

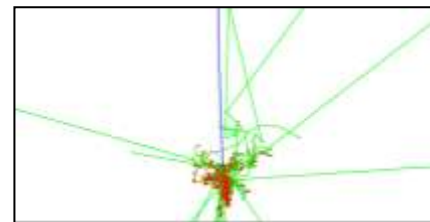
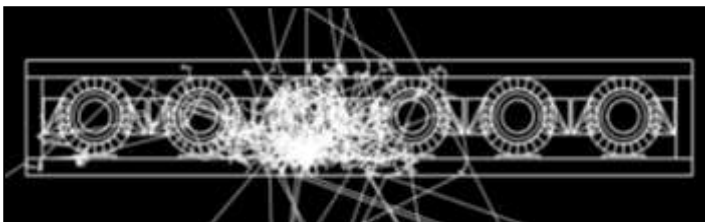
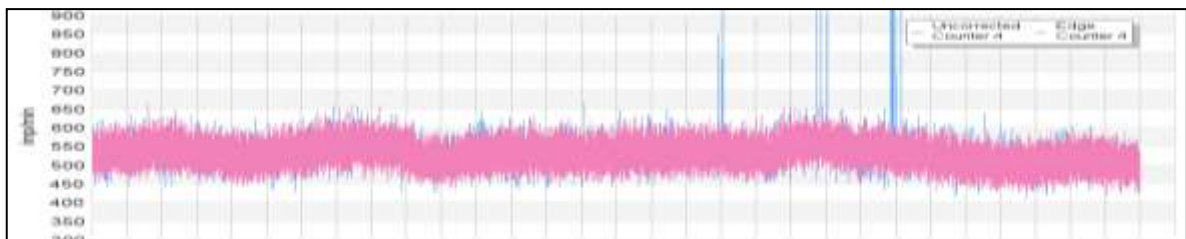


*Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*

*Τμήμα Φυσικής*

*Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων*

## **Έλεγχος ποιότητας δεδομένων υψηλής ανάλυσης των Μετρητών Νετρονίων και ανάπτυξη τεχνικών προσομοίωσης**



**Διδακτορική Διατριβή**

**Πασχάλης Παύλος**

**AM: 2011503**

**Επιβλ.: Καθ. Ε. Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη**

**ΑΘΗΝΑ 2014**





*Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*

*Τμήμα Φυσικής*

*Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων*

**Έλεγχος ποιότητας δεδομένων υψηλής ανάλυσης των  
Μετρητών Νετρονίων και ανάπτυξη τεχνικών προσομοίωσης**

**Διδακτορική Διατριβή**

**Πασχάλης Παύλος**

**AM: 2011503**

**Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή**

**Ελένη Χριστοπούλου-  
Μαυρομιχαλάκη**

**Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**

**Δημήτριος  
Φασουλιώτης**

**Αν. Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**Άννα  
Μπελεχάκη**

**Διευθ. Ερευνών ΕΑΑ**

**ΑΘΗΝΑ 2014**



σε εκείνους που έφυγαν  
σε εκείνους που έμειναν  
και σε εκείνους που έρχονται



## Πρόλογος

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο Διδακτορικού Διπλώματος Φυσικών Επιστημών (Δ.Δ.Φ.Ε) και πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του Τμήματος φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και συγκεκριμένα στον σταθμό συνεχούς καταμέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Εξετάζει δύο σημαντικά θέματα, τον έλεγχο της ποιότητας των μετρήσεων του μετρητή νετρονίων που διαθέτει ο Σταθμός και την ανάπτυξη τεχνικών προσομοίωσης για τη μελέτη φαινομένων που σχετίζονται με τη κοσμική ακτινοβολία. Η δημιουργία της Διεθνούς βάσης δεδομένων Μετρητών Νετρονίων - NMDB που έγινε τα τελευταία χρόνια και επιτρέπει την πρόσβαση στις μετρήσεις των μετρητών νετρονίων σε πραγματικό χρόνο, θέτει τον έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων εξαιρετικά επίκαιρο θέμα, ενώ η ανάπτυξη προσομοιώσεων επιτρέπει τη μελέτη πολύπλοκων φαινομένων και διαδικασιών για την καλύτερη κατανόησή τους και την εξαγωγή ποσοτικών δεδομένων.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κύρια επιβλέπουσα αυτής της εργασίας Καθηγήτρια του Τμήματος Φυσικής του ΕΚΠΑ κα. Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εργαστώ στον Σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας, ο οποίος μέσα από την πολυετή έρευνα έχει καθιερωθεί ως ένας από τους πρωτοπόρους σε παγκόσμια κλίμακα. Θα ήθελα να της εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες για την επιστημονική καθοδήγηση που μου προσέφερε αλλά κυρίως για τη στήριξη που μου παρείχε σε όλα τα θέματα, ερευνητικά ή μη. Στα πλαίσια αυτής της συνεργασίας είχα τη δυνατότητα, ως μέλος της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, της οποίας είναι Επιστημονική Υπεύθυνη, να συνεργαστώ με αξιόλογα μέλη της διεθνούς επιστημονικής κοινότητας, να συμμετάσχω σε Ευρωπαϊκά Ερευνητικά Προγράμματα και να παρακολουθήσω ενεργά διεθνή συνέδρια και συναντήσεις εργασίας που οργανώθηκαν είτε στην Ελλάδα είτε στο εξωτερικό.

Πέρα από την Καθηγήτρια κα. Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, που η συμβολή της ήταν καταλυτική, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα άλλα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον Αν. Καθηγητή κ. Δημήτριο Φασουλιώτη και την Διευθύντρια Ερευνών του Αστεροσκοπείου Αθηνών Δρ. Άννα Μπελεχάκη για τη συμβολή

τους, τις παρατηρήσεις τους και τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσαν, όπως επίσης και τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητή κ. Ξενοφώντα Μουσά, Αν. Καθηγητή κ. Γεώργιο Βούλγαρη, Επ. Καθηγητή κ. Αρκάδιο Μανουσάκη-Κατσικάκη και Επ. Καθηγήτρια κα. Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους διακεκριμένους ερευνητές Dr. Anatoly Belon, Dr. Eugenia Eroshenko και Dr. Victor Yanke της Ομάδας Κοσμικής Ακτινοβολίας του Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN) της Russian Academy of Sciences για τη συνεργασία που είχα σχετικά με τη μέθοδο υπολογισμού του βαρομετρικού συντελεστή, τον Dr. Christian Steigies του Kiel University της Γερμανίας και τους άλλους συνεργάτες της Διεθνούς Βάσης NMDB για τη συνεργασία σε θέματα που αφορούν την βάση και τον Dr. John Apostolakis συντονιστή της ομάδας εργασίας του Geant4 στο CERN για την καθοδήγηση σε θέματα που αφορούν το Geant4. Ιδιαίτερως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Prof. L.I. Dorman του Tel-Aviv University του Ισραήλ για τη τιμή που μου έκανε να συνεργαστεί μαζί μου και να με καθοδηγήσει στο θέμα των προσομοιώσεων. Τους Επιστημονικούς Υπευθύνους και τις Ομάδες Κοσμικής Ακτινοβολίας των Σταθμών των Μετρητών Νετρονίων του Παγκοσμίου Δικτύου Μετρητών Νετρονίων που ευγενικά διέθεσαν τα δεδομένα κοσμικής ακτινοβολίας σε πραγματικό χρόνο στο NMDB ευχαριστώ θερμά, γιατί χωρίς αυτά δεν θα ήταν δυνατή η πραγματοποίηση αυτής της μελέτης.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στα μέλη της ομάδας κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου της Αθήνας και αναφέρω τον Δρ. Χρήστο Σαρλάνη για τη σημαντική καθοδήγηση που μου προσέφερε στο ξεκίνημα της έρευνάς μου στο Σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας, καθώς και τους Δρ. Μαρία Γεροντίδου, Δρ. Χριστίνα Πλαϊνάκη και υποψήφιο διδάκτορα Ευάγγελο Παούρη για τη συνεχή συνεργασία. Ευχαριστίες οφείλω ακόμη στον Δρ. Δημήτριο Τσιρίγκα για τη βοήθεια που μου πρόσφερε στο θέμα των προσομοιώσεων και η οποία μείωσε στο ελάχιστο δυνατό τον απαιτούμενο χρόνο για την παραγωγή των αποτελεσμάτων. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη και την κατανόηση που έδειξε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής.



## Abstract

Neutron monitors are the state of the art detectors that measure the nucleonic component of the cosmic ray cascades on ground level. Although, neutron monitors are in operation for more than 50 years and their measurements have been used in several scientific researches, they have become of significant interest nowadays. The advancement of the computer systems and the internet these last years, have allowed the development of the High Resolution Neutron Monitor Data Base (NMDB) that distributes the measurements of most neutron monitors worldwide, in real time and in a common format. As a result, the neutron monitor measurements can be immediately used by applications and services extending their use to new scientific fields, such as the space weather prediction. However, the real time announcement of the neutron monitor measurements requires the quality control of them, in order to exclude erroneous cases. This need leads to a new field of the neutron monitor technology, the development of algorithms that perform the primary processing of the measurements.

This thesis was realized in the cosmic ray station of the University of Athens and consists of two parts. The first one covers the development of primary data processing algorithms for the control of the data quality, while the second one covers the development of simulation techniques. The achievements of the research have been published in several scientific journals and have been presented in conferences and meetings. In the first part, two new algorithms have been developed, the ANN based on artificial neural networks and the Edge Editor based on statistical criteria (Paschalis and Mavromichalaki, 2012; Paschalis et al., 2013a). Moreover, parts of the new algorithms and the well-known Median Editor have been combined in order to develop the ANN Plus and the Median Editor Plus algorithm (Paschalis and Mavromichalaki, 2013b). In addition, a method for the accurate calculation of the barometric coefficient, which is used for the correction of measurements with the atmospheric pressure, has been developed by using the data from NMDB (Paschalis et al., 2013c). Based on all these, a series of computer applications that handle the quality control of the measurements, their real time sending to the NMDB and their offline revision have been implemented. In the second part, two simulations have been performed based on the Geant4 toolkit. The first simulation

concerns the 6NM-64 neutron monitor that is in operation in the Athens station and focuses on the determination of several parameters such as the detection efficiency (Paschalis et al., 2013d). The second simulation studies the cosmic ray cascades in the Earth atmosphere and the results are very promising for its use in radiation dose measuring applications (Paschalis et al., 2014). Both simulations are provided as standalone programs in order for the scientific community to execute the simulations with specific scenarios.

## Περιεχόμενα

<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ I: Κοσμική ακτινοβολία και μετρητές νετρονίων</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Γενικά περί κοσμικής ακτινοβολίας</b>	<b>7</b>
1.1.1. Φύση της κοσμικής ακτινοβολίας	7
1.1.2. Αλληλεπίδραση κοσμικής ακτινοβολίας με το μαγνητικό πεδίο και την ατμόσφαιρα της Γης	12
1.1.3. Διαμόρφωση κοσμικής ακτινοβολίας	17
<b>1.2. Καταμέτρηση κοσμικής ακτινοβολίας</b>	<b>21</b>
1.2.1. Πειράματα μέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας	21
1.2.2. Μετρητές νετρονίων	24
1.2.3. Διόρθωση μετρήσεων μετρητών νετρονίων	27
<b>1.3. Δίκτυα μετρητών νετρονίων</b>	<b>31</b>
1.3.1. Αναγκαιότητα και πλεονεκτήματα των δικτύων μετρητών νετρονίων	31
1.3.2. Δομή της παγκόσμιας βάσης μετρήσεων	34
1.3.3. Παρουσία των σταθμών στο NMDB	38
1.3.4. Ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας	40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ II: Αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο</b>	<b>45</b>
<b>2.1. Διακυμάνσεις οργάνων και διόρθωση των μετρήσεων</b>	<b>45</b>
2.1.1. Φύση και μορφή των διακυμάνσεων	45
2.1.2. Αρχή λειτουργίας αλγορίθμων διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο	47
2.1.3. Καθιερωμένοι αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο	51
2.1.4. Στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων του μετρητή νετρονίων	55
<b>2.2. Διόρθωση δεδομένων με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων</b>	<b>64</b>
2.2.1. Αρχή λειτουργίας Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	64
2.2.2. Δείγμα εκπαίδευσης του αλγορίθμου ANN	67
2.2.3. Υλοποίηση του αλγορίθμου ANN	71
2.2.4. Αποτελέσματα	73
<b>2.3. Διόρθωση δεδομένων με τον Edge Editor</b>	<b>75</b>
2.3.1. Κριτήριο εγκυρότητας της μέτρησης	75
2.3.2. Εκτίμηση της στάθμης μέτρησης σε πραγματικό χρόνο	79
2.3.3. Διαδικασία διόρθωσης	84
2.3.4. Παράδειγμα εφαρμογής	86
2.3.5. Αποτελέσματα	90

<b>2.4. Βελτιστοποίηση και σύγκριση αλγορίθμων</b>	<b>92</b>
2.4.1. Υλοποίηση Median Editor και Plus ANN Plus	92
2.4.2. Ποσοτική σύγκριση αλγορίθμων	94
<b>2.5. Προσδιορισμός βαρομετρικού συντελεστή</b>	<b>99</b>
2.5.1. Διόρθωση πρωτογενών μετρήσεων ως προς τη ατμοσφαιρική πίεση	99
2.5.2. Τυπική μέθοδος υπολογισμού βαρομετρικού συντελεστή	101
2.5.3. Μέθοδος υπολογισμού με χρήση σταθμού αναφοράς	104
2.5.4. Αποτελέσματα	107
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ III: Διαχείριση δεδομένων και ανάπτυξη εφαρμογών</b>	<b>109</b>
<b>3.1. Διαχείριση των δεδομένων του μετρητή νετρονίων</b>	<b>109</b>
3.1.1. Τοπική βάση μετρήσεων και δικτυακή διεπαφή χρήστη	109
3.1.2. Επεξεργασία πρωτογενών μετρήσεων	113
3.1.3. Συγχρονισμός της παγκόσμιας βάσης μετρήσεων	122
3.1.4. Ανανέωση των μετρήσεων	125
3.1.5. Προγράμματα υποστήριξης	129
<b>3.2. Εφαρμογές παγκόσμιας βάσης μετρήσεων</b>	<b>131</b>
3.2.1. Πρόσβαση στα δεδομένα των σταθμών	131
3.2.2. Υπολογισμός βαρομετρικού συντελεστή των σταθμών	135
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV: Ανάπτυξη τεχνικών προσομοίωσης</b>	<b>139</b>
<b>4.1. Τεχνικές προσομοίωσης</b>	<b>139</b>
4.1.1. Στόχος, πεδίο εφαρμογής και τρόπος υλοποίησης των προσομοιώσεων	139
4.1.2. Λογισμικά πακέτα προσομοιώσεων στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων	141
4.1.3. Προσομοιώσεις στο πεδίο της Κοσμικής Ακτινοβολίας	146
4.1.4. Περιγραφή του Geant4	148
<b>4.2. Προσομοίωση του 6NM-64</b>	<b>154</b>
4.2.1. Περιγραφή και στόχος της εφαρμογής	154
4.2.2. Σχεδιασμός - μοντελοποίηση	156
4.2.3. Υλοποίηση	159
4.2.4. Είσοδος, έξοδος και χρονική απόδοση του προγράμματος	165
4.2.5. Επιλογή παραμέτρων και physics list	169
4.2.6. Αποτελέσματα	173
<b>4.3. Προσομοίωση των καταιγισμών κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα</b>	<b>184</b>
4.3.1. Περιγραφή και στόχος της εφαρμογής	184
4.3.2. Σχεδιασμός - μοντελοποίηση	185

---

4.3.3. Υλοποίηση	190
4.3.4. Είσοδος, έξοδος και χρονική απόδοση του προγράμματος	194
4.3.5. Επιλογή παραμέτρων και physics list	203
4.3.6. Αποτελέσματα	206
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ V: Συμπεράσματα και προοπτικές</b>	<b>217</b>
<b>5.1. Συμπεράσματα</b>	<b>217</b>
5.1.1. Αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών μετρήσεων	217
5.1.2. Εφαρμογές διαχείρισης των μετρήσεων	220
5.1.3. Προσομοιώσεις	222
<b>5.2. Προοπτικές</b>	<b>224</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>229</b>
<b>Ιστοσελίδες</b>	<b>243</b>
<b>Κατάλογος Σχετικών Δημοσιεύσεων</b>	<b>245</b>



## Εισαγωγή

Η Φυσική της Κοσμικής Ακτινοβολίας είναι ένας επιστημονικός κλάδος που εμφανίστηκε στις αρχές του 20ου αιώνα. Ο ιονισμός που παρατηρήθηκε στην ατμόσφαιρα της Γης, αν και αρχικά αποδόθηκε σε ραδιενεργές πηγές της επιφάνειάς της, γρήγορα συνδέθηκε με ακτινοβολία που δέχεται η Γη από το Σύμπαν. Έκτοτε, η επιστημονική κοινότητα παρακολουθεί τη ροή και τη σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας με τα τεχνολογικά μέσα κάθε εποχής. Τα πρώτα πειράματα ανίχνευσης της κοσμικής ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκαν με απλά ηλεκτρόμετρα που τοποθετούνταν σε αερόστατα. Ωστόσο η μεγάλη πρόοδος στην ανίχνευση της ακτινοβολίας πραγματοποιήθηκε τη δεκαετία του 1960, με την εφεύρεση του state-of-the-art ανιχνευτή που είναι ο μετρητής νετρονίων. Στις μέρες μας, η μεγάλη τεχνολογική πρόοδος επιτρέπει την παράλληλη παρακολούθηση της ροής της κοσμικής ακτινοβολίας με ένα πλήθος ανιχνευτικών διατάξεων που τοποθετούνται στην επιφάνεια της Γης, σε αερόστατα και σε δορυφόρους.

Ο τομέας της κοσμικής ακτινοβολίας συνδέεται με πολλούς επιστημονικούς τομείς της Φυσικής και είναι στο επίκεντρο της προσοχής πλήθους επιστημονικών ομάδων. Η προέλευση και οι μηχανισμοί επιτάχυνσης των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνουν σε ενέργεια ακόμη και τα  $10^{21}$  eV αποτελούν μέχρι και σήμερα θέμα, τη λύση του οποίου μελετά η Κοσμολογία και η Αστροφυσική Υψηλών Ενεργειών. Η επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας στη ροή της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη συνδέεται με την Ηλιακή Φυσική. Η επίδραση της ακτινοβολίας στους έμβιους οργανισμούς και στις ηλεκτρονικές διατάξεις είναι θέματα που εμφανίζουν ενδιαφέρον για την ιατρική και την ηλεκτρονική αντίστοιχα. Ακόμη και στη Φυσική της ατμόσφαιρας έχει διαπιστωθεί συσχέτιση της κοσμικής ακτινοβολίας με τον σχηματισμό των νεφών. Πέρα όμως από την επιστημονική προσέγγιση, η κοσμική ακτινοβολία εμφανίζει και έντονο ενδιαφέρον σε καθημερινές δραστηριότητες του ανθρώπου και σε τεχνολογικά θέματα. Ο προσδιορισμός της δόσης ακτινοβολίας που λαμβάνουν τα πληρώματα των αεροσκαφών και η προστασία των ηλεκτρονικών διατάξεων των δορυφόρων σε περιόδους έντονων φαινομένων είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων και του διαδικτύου την τελευταία δεκαετία είχε αντίκτυπο και στο χώρο της κοσμικής ακτινοβολίας. Το μεγάλο ενδιαφέρον για την κοσμική ακτινοβολία και η δυνατότητα χρήσης των μετρήσεων από πλήθος εφαρμογών ώθησε τους σταθμούς καταμέτρησης να ανακοινώνουν τις μετρήσεις τους σε πραγματικό χρόνο προκειμένου να είναι άμεσα διαθέσιμες στην επιστημονική κοινότητα. Η πρακτική αυτή ακολουθήθηκε από τους σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας που βασίζονται σε μετρητές νετρονίων, αναδεικνύοντας έτσι τη σπουδαιότητα των μετρήσεών τους. Η εφαρμογή της τεχνολογίας πραγματικού χρόνου στους μετρητές νετρονίων από το έτος 1997, αν και άνοιξε νέους δρόμους για την αξιοποίηση των μετρήσεων, άρχισε να αναδεικνύει νέες δυσκολίες. Οι μετρήσεις που ανακοινώνονταν από κάθε σταθμό δεν ακολουθούσαν μία κοινή δομή, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η συνδυαστική μελέτη μετρήσεων από διαφορετικούς μετρητές νετρονίων. Επιπλέον η ανακοίνωση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο συνδέθηκε άμεσα με την ποιότητα και την αξιοπιστία των μετρήσεων αφού δεν υπήρχε έλεγχος και επίβλεψη από τον ανθρώπινο παράγοντα.

Επίλυση στα παραπάνω προβλήματα ήρθε να δώσει η βάση δεδομένων υψηλής ανάλυσης των μετρητών νετρονίων (High Resolution Neutron Monitor DataBase-NMDB), η οποία δημιουργήθηκε στα πλαίσια Ευρωπαϊκού προγράμματος FP7 με τη συμμετοχή δώδεκα Ευρωπαϊκών χωρών. Το πρόγραμμα αυτό έθεσε προδιαγραφές στον τρόπο που κάθε σταθμός ανακοίνωνε τις μετρήσεις του, ενώ ταυτόχρονα έφερε κοντά την επιστημονική κοινότητα των μετρητών νετρονίων έτσι ώστε, μέσα από την άμεση συνεργασία, να αναπτυχθεί η τεχνογνωσία τόσο για τη τεχνολογία πραγματικού χρόνου όσο και για το τρόπο διασφάλισης της ποιότητας των μετρήσεων. Η αποδοχή του NMDB από την επιστημονική κοινότητα ήταν πολύ μεγάλη και για το λόγο αυτό, ενώ ξεκίνησε με 18 σταθμούς ως ευρωπαϊκή συνεργασία, σήμερα θεωρείται παγκόσμια συνεργασία με συμμετοχή του συνόλου σχεδόν των μετρητών νετρονίων πραγματικού χρόνου (περίπου πενήντα). Στις μέρες μας, οι μετρήσεις των μετρητών νετρονίων είναι πλέον διαθέσιμες σε πραγματικό χρόνο μέσω του NMDB και χρησιμοποιούνται από πλήθος εφαρμογών και υπηρεσιών. Η μεγάλη απήχηση του NMDB έχει θέσει ως υψίστης σημασίας το θέμα της ποιότητας των μετρήσεων καθώς και της αποστολής των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Αν και η παρουσία του NMDB έχει εδραιωθεί στον



επιστημονικό και στον τεχνολογικό χώρο τα τελευταία χρόνια, τα θέματα αυτά παραμένουν ακόμα ανοικτά και δεν υπάρχει κοινή αντιμετώπιση από τους σταθμούς.

Η παρουσία του Πανεπιστημίου Αθηνών στο χώρο της κοσμικής ακτινοβολίας είναι πολύ έντονη. Ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών καταμετρά από το έτος 2000 ανελλιπώς σε 24ωρη βάση την ένταση της κοσμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας έναν μετρητή νετρονίων τύπου 6NM-64, ενώ η επιστημονική ομάδα της κοσμικής ακτινοβολίας έχει αναπτύξει μεγάλη τεχνογνωσία και έχει συνεισφέρει σημαντικά στο συγκεκριμένο χώρο. Η τεχνογνωσία αυτή έθεσε το σταθμό της Αθήνας από τους πρωτοπόρους στη δημιουργία του NMDB, γεγονός που αποδεικνύεται από το ότι στο Πανεπιστήμιο Αθηνών φιλοξενείται slave server του NMDB, προκειμένου η ομάδα να έχει άμεση πρόσβαση στις μετρήσεις. Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή έρχεται να συνεισφέρει στο χώρο της κοσμικής ακτινοβολίας σε δύο διακριτούς τομείς. Ο πρώτος τομέας αφορά την ανάπτυξη αλγορίθμων που αναλαμβάνουν τον έλεγχο και τη διόρθωση των πρωτογενών μετρήσεων του μετρητή νετρονίων σε πραγματικό χρόνο. Ο δεύτερος τομέας αφορά την ανάπτυξη τεχνικών προσομοίωσης ώστε να αντληθούν ποσοτικά συμπεράσματα σε σημαντικά ζητήματα του τομέα της κοσμικής ακτινοβολίας.

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής έγινε ανάπτυξη δύο νέων αλγορίθμων για τον έλεγχο και τη διόρθωση των πρωτογενών μετρήσεων. Ο πρώτος αλγόριθμος ονομάζεται ANN και βασίζεται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, ενώ ο δεύτερος ονομάζεται Edge Editor και βασίζεται σε στατιστικά κριτήρια. Στοιχεία των αλγορίθμων αυτών καθώς και του καθιερωμένου αλγορίθμου Median Editor συνδυάστηκαν για την ανάπτυξη των βελτιστοποιημένων αλγορίθμων ANN Plus και Median Editor Plus. Επιπλέον υλοποιήθηκε αλγόριθμος για τον ακριβή υπολογισμό του βαρομετρικού συντελεστή των σταθμών που χρησιμοποιείται στη διόρθωση των μετρήσεων ως προς την ατμοσφαιρική πίεση. Σε συνέχεια της ανάπτυξης των αλγορίθμων, έγινε ανάπτυξη μιας σειράς εφαρμογών που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των μετρήσεων του σταθμού της Αθήνας αλλά και των υπολοίπων σταθμών του NMDB. Όσον αφορά την ανάπτυξη των τεχνικών προσομοίωσης, έγινε η ανάπτυξη δύο εφαρμογών με χρήση του διαδεδομένου πακέτου Geant4. Η πρώτη εφαρμογή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της απόδοσης

ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων 6NM-64 σε σχέση με την εισερχόμενη δέσμη σωματιδίων. Η δεύτερη εφαρμογή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των καταγισμών δευτερογενών σωματιδίων που δημιουργούνται εντός της ατμόσφαιρας λόγω της κοσμικής ακτινοβολίας. Όλα τα παραπάνω συγκεντρώνονται σε μια σειρά επιστημονικών δημοσιεύσεων σε διεθνή περιοδικά και ανακοινώσεων σε συνέδρια, καθώς και σε μια σειρά εκτεταμένων εφαρμογών. Η παρουσίαση των παραπάνω θεμάτων πραγματοποιείται σε πέντε κεφάλαια.

**Στο πρώτο κεφάλαιο** της εργασίας γίνεται εισαγωγή στις κύριες έννοιες γύρω από τις οποίες επικεντρώνεται η εργασία. Το κεφάλαιο είναι χωρισμένο σε τέσσερις κύριες παραγράφους. Στην παράγραφο 1.1 αναφέρονται οι έννοιες που σχετίζονται με τη φυσική της κοσμικής ακτινοβολίας και τη διαμόρφωσή της από την Ηλιακή δραστηριότητα, υποδεικνύοντας τη μεγάλη αξία που έχει η καταμέτρησή της τόσο σε επιστημονικό όσο και σε τεχνολογικό επίπεδο. Στην παράγραφο 1.2 αναφέρονται οι τρόποι με τους οποίους πραγματοποιείται η μέτρηση της κοσμικής ακτινοβολίας. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στους μετρητές νετρονίων και στην επεξεργασία που πρέπει να υποστούν οι μετρήσεις τους προκειμένου να χαρακτηρίζονται από υψηλή ποιότητα. Στην παράγραφο 1.3 γίνεται αναφορά στα δίκτυα των μετρητών νετρονίων και στην αναγκαιότητα της ύπαρξής τους. Στην ίδια παράγραφο γίνεται παρουσίαση της παγκόσμιας βάσης δεδομένων υψηλής ανάλυσης των μετρητών νετρονίων (NMDB) που μαζί με τους μετρητές νετρονίων αποτελεί κεντρικό θέμα της εργασίας. Στην παράγραφο 1.4 γίνεται μία σύντομη αναφορά στο μετρητή νετρονίων του σταθμού της Αθήνας.

**Στο δεύτερο κεφάλαιο** της εργασίας αναπτύσσεται το πρώτο θέμα που εξετάζει η εργασία, δηλαδή την ανάπτυξη αλγορίθμων διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων των μετρητών νετρονίων. Το κεφάλαιο είναι χωρισμένο σε πέντε κύριες παραγράφους. Στην παράγραφο 2.1 γίνεται καθορισμός του προβλήματος της επεξεργασίας των πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και γίνεται περιγραφή των αλγορίθμων που έχουν υλοποιηθεί στο παρελθόν. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στον αλγόριθμο Median Editor που χρησιμοποιείται από τους περισσότερους σταθμούς μετρητών νετρονίων. Στην παράγραφο 2.2 παρουσιάζεται ο πρώτος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας, που ονομάζεται ANN και βασίζεται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Στην

παράγραφο 2.3 παρουσιάζεται ο δεύτερος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε, που ονομάζεται Edge Editor και βασίζεται σε στατιστικές μεθόδους. Στην παράγραφο 2.4 γίνεται συνδυασμός ορισμένων στοιχείων από τους παραπάνω αλγορίθμους ώστε να προκύψουν οι βελτιστοποιημένοι αλγόριθμοι Median Editor Plus και ANN Plus, ενώ παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ τους. Στην παράγραφο 2.5 παρουσιάζεται η μέθοδος που αναπτύχθηκε για τον ακριβή υπολογισμό του βαρομετρικού συντελεστή χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από την παγκόσμια βάση μετρήσεων NMDB.

**Στο τρίτο κεφάλαιο** της εργασίας γίνεται παρουσίαση των σημαντικότερων εφαρμογών που υλοποιήθηκαν για την επεξεργασία των μετρήσεων τόσο του μετρητή νετρονίων της Αθήνας όσο και του συνόλου των σταθμών που συμμετέχουν στο NMDB. Το κεφάλαιο είναι χωρισμένο σε δύο κύριες παραγράφους. Στην παράγραφο 3.1 παρουσιάζονται οι εφαρμογές που αφορούν το μετρητή νετρονίων της Αθήνας. Πρόκειται για μία σειρά εφαρμογών που διαχειρίζονται τον έλεγχο, τη διόρθωση και την αποστολή των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο στο NMDB καθώς και την offline επεξεργασία των μετρήσεων. Στην παράγραφο 3.2 παρουσιάζονται δύο δικτυακές εφαρμογές που υλοποιήθηκαν για την επισκόπηση των μετρήσεων καθώς και για τον υπολογισμό του βαρομετρικού συντελεστή κάθε σταθμού που συμμετέχει στην παγκόσμια βάση μετρήσεων. Οι εφαρμογές αυτές υλοποιήθηκαν χάρη στην ύπαρξη του NMDB slave server στο σταθμό της Αθήνας.

**Στο τέταρτο κεφάλαιο** αναπτύσσεται το δεύτερο θέμα της εργασίας, της ανάπτυξης των τεχνικών προσομοίωσης. Το κεφάλαιο είναι χωρισμένο σε τρεις κύριες παραγράφους. Στην παράγραφο 4.1 αναλύονται οι βασικές έννοιες της προσομοίωσης και γίνεται μια εκτενής αναφορά σε λογισμικά πακέτα προσομοίωσης στο τομέα της Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων καθώς και σε εφαρμογές προσομοίωσης που έχουν γίνει στον τομέα της κοσμικής ακτινοβολίας. Στη παράγραφο 4.2 παρουσιάζεται η ανάπτυξη, η υλοποίηση και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του μετρητή νετρονίων 6NM-64, που φέρει ο σταθμός της Αθήνας. Στη παράγραφο 4.3 γίνεται παρουσίαση της προσομοίωσης για τη μελέτη των καταγισμών δευτερογενών κοσμικών ακτίνων μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης.

Η εργασία ολοκληρώνεται με το **πέμπτο κεφάλαιο** όπου παρουσιάζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα και οι προοπτικές από τα επιτεύγματα της εργασίας. Το κεφάλαιο είναι χωρισμένο σε δύο κύριες παραγράφους. Στη παράγραφο 5.1 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα χωριστά για τους αλγορίθμους διόρθωσης δεδομένων, για τις εφαρμογές που διαχειρίζονται τα δεδομένα και για τις προσομοιώσεις που υλοποιήθηκαν. Στη παράγραφο 5.2 παρουσιάζονται οι προοπτικές για το μέλλον.

**Εκτενής βιβλιογραφία** που αναφέρεται κατά τη διάρκεια της διατριβής δίνεται συγκεντρωτικά στο τέλος της εργασίας, ενώ επιπλέον παρατίθεται λίστα χρήσιμων **ιστοσελίδων** και λίστα **δημοσιεύσεων** σε διεθνή περιοδικά και σε συνέδρια που σχετίζονται με την παρούσα διατριβή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ Ι

### Κοσμική ακτινοβολία και μετρητές νετρονίων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση όλων των βασικών εννοιών που είναι απαραίτητες για την κατανόηση του συνόλου της εργασίας. Η παρουσίαση των θεωρητικών θεμάτων της κοσμικής ακτινοβολίας, αν και δεν αποτελεί το κεντρικό θέμα της εργασίας, υποδεικνύει τη μεγάλη αξία που έχει η καταμέτρησή της σε επιστημονικό και τεχνολογικό επίπεδο. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στους μετρητές νετρονίων και στη συνεργασία του NMDB που αποτελούν κεντρικό θέμα της εργασίας, καθώς και στο σταθμό κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας πάνω στον οποίο βασίστηκε η ανάπτυξη και η εφαρμογή των αλγορίθμων που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια.

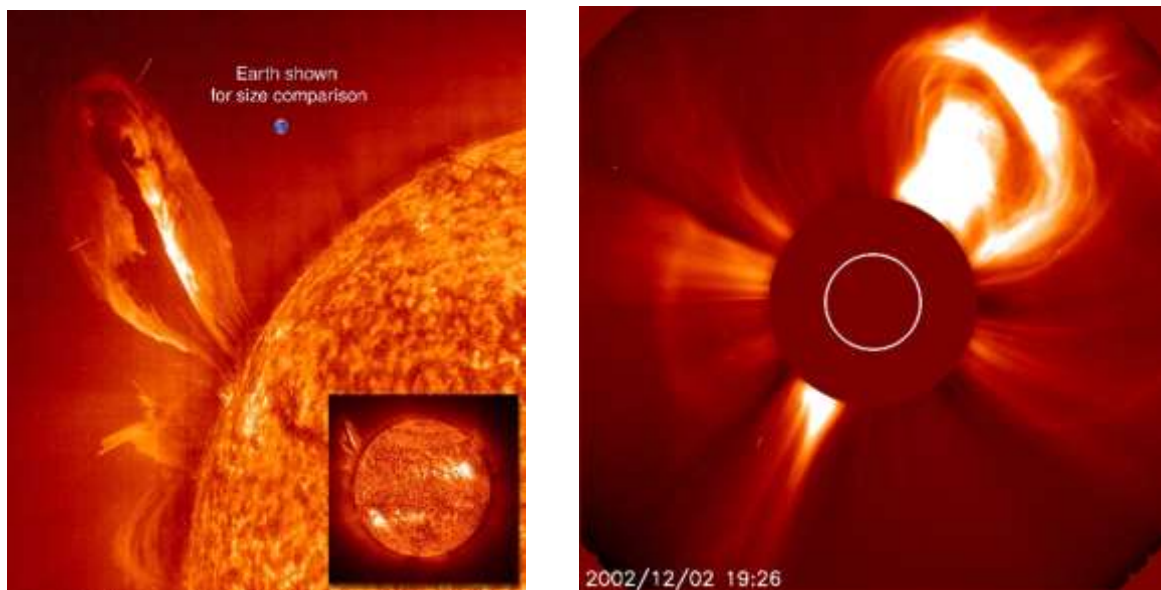
#### 1.1. Γενικά περί κοσμικής ακτινοβολίας

##### 1.1.1. Φύση της κοσμικής ακτινοβολίας

Ο όρος κοσμική ακτινοβολία αναφέρεται σε σωματίδια πολύ μεγάλης ενέργειας τα οποία προέρχονται από εξωγήινες πηγές. Η κοσμική ακτινοβολία κατά κύριο λόγο παράγεται από γαλαξιακές και εξωγαλαξιακές πηγές, για αυτό και χρησιμοποιείται η ορολογία γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία (Galactic Cosmic Rays - GCR). Η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία παρουσιάζει μεγάλη σταθερότητα και ισοτροπία και φτάνει σε ενέργειες ακόμα και τα  $10^{21}$  eV ενώ η μελέτη της παρουσιάζει έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον αφού προσφέρει ένα μέσο για τη μελέτη του σύμπαντος και του διαστρικού χώρου μέσα από τον οποίον περνά. Επιπλέον, σε περιόδους έντονης ηλιακής δραστηριότητας, ενεργητικά σωματίδια από τον ήλιο φτάνουν στην Γη τα οποία χαρακτηρίζονται ως ηλιακή κοσμική ακτινοβολία (Solar Cosmic Rays - SCR). Τα σωματίδια αυτά έχουν πολύ μικρότερες ενέργειες σε σχέση με την γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία και η έντασή τους εξαρτάται από την ένταση του ηλιακού φαινομένου που τις δημιουργήσει. Η μέτρηση και η μελέτη της ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζει έντονο επιστημονικό ενδιαφέρον αφού σε περιόδους ηλιακής έξαρσης σχετίζεται με την

υγεία των έμβιων όντων της Γης καθώς και με την ασφάλεια των ηλεκτρονικών διατάξεων και των δορυφόρων.

Η ηλιακή κοσμική ακτινοβολία είναι αποτέλεσμα χρωμοσφαιρικών εκλάμψεων του ήλιου και στεμματικών εκπομπών μάζας κατά τις οποίες εκπέμπονται σωματίδια και ακτινοβολία. Η ένταση των φαινομένων είναι τέτοια ώστε τα σωματίδια να επιταχύνονται σε χαμηλές σχετικά ενέργειες, της τάξης των μερικών GeV ενώ σε σπάνιες περιπτώσεις μεγάλων εκλάμψεων οι ενέργειες των σωματιδίων μπορούν να φθάσουν μέχρι και τα 10 GeV. Παραδείγματα τέτοιων φαινομένων απεικονίζονται στο σχήμα 1.1.



**Σχήμα 1.1:** Φωτογραφίες (αριστερά) ηλιακής έκλαμψης που συνέβη στις 24 Ιουλίου 1999 με διάσταση 35 πλανητών σαν τη Γη και (δεξιά) στεμματικής εκπομπής μάζας που συνέβη στις 2 Δεκεμβρίου 2002. Στη δεξιά φωτογραφία με άσπρο κύκλο διαγράφεται η διάσταση του ηλιακού δίσκου (πηγή <http://sohowww.nascom.nasa.gov/>).

Ωστόσο οι μεγάλες ενέργειες που παρατηρούνται στα σωματίδια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας δε μπορούν να δικαιολογηθούν από τις εκλάμψεις και τις στεμματικές εκπομπές μάζας των σταθερών αστερών του γαλαξία. Ο τρόπος με τον οποίο τα σωματίδια αυτά αποκτούν αυτές τις ενέργειες δεν έχει διαλευκανθεί πλήρως και αποτελεί πεδίο έρευνας.

Σύμφωνα με ορισμένες απόψεις, οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες είναι προϊόν βίαιων γαλαξιακών φαινομένων και συγκεκριμένα των υπερκαινοφανών αστέρων (Schure and Bell, 2013). Το τέλος της ζωής ενός αστεριού, όταν έχει πλέον καταναλώσει το πυρηνικό του καύσιμο, ακολουθείται από τη βαρυτική κατάρρευσή του που οδηγεί σε μια βίαια έκρηξη. Εξαιτίας της έκρηξης δημιουργείται κρουστικό κύμα το οποίο επιταχύνει τα σωματίδια σε τεράστιες ταχύτητες που μπορούν να φτάσουν τα  $10^{19}$  eV. Εναλλακτική άποψη συσχετίζει τη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία με την παρουσία των αστέρων νετρονίων οι οποίοι δημιουργούνται στο τελευταίο στάδιο των υπερκαινοφανών (Cholis and Hooper, 2013). Η μεγάλη πυκνότητα των αστέρων νετρονίων συμπιέζει το αστρικό μαγνητικό πεδίο και δημιουργεί έντονα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που επιταχύνουν τα σωματίδια. Ωστόσο, ο αριθμός και η κατανομή στο σύμπαν τόσο των υπερκαινοφανών όσο και των αστέρων νετρονίων δε μπορεί να δικαιολογήσει την μεγάλη σταθερότητα και ισοτροπία που παρουσιάζει η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία. Η ισοτροπία οδήγησε στη συσχέτιση της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας με τους λευκούς νάνους, τα μαγνητικά πεδία των οποίων μπορούν να επιταχύνουν σωματίδια σε μεγάλες ενέργειες (Kashiyama et al., 2011). Ωστόσο αυτή η θεώρηση δε δικαιολογεί τη σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας, αφού οι λευκοί νάνοι δεν διαθέτουν βαρέα στοιχεία που παρατηρούνται στη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία. Τελευταία άποψη για τη γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία είναι ότι προέρχεται από τη διαστρική ύλη η οποία επιταχύνεται από το μέτωπο κρούσης των υπερκαινοφανών αστέρων (Ellison et al., 1997). Σε κάθε περίπτωση, οι παραπάνω θεωρίες δε μπορούν να δικαιολογήσουν το άνω όριο των ενεργειών της κοσμικής ακτινοβολίας που είναι τα  $10^{21}$  eV. Η κοσμική ακτινοβολία με αυτή την ενέργεια θεωρείται ότι έχει εξωγαλαξιακή προέλευση, ενώ ο ακριβής μηχανισμός δημιουργίας τους αποτελεί ακόμη και σήμερα άλυτο μυστήριο.

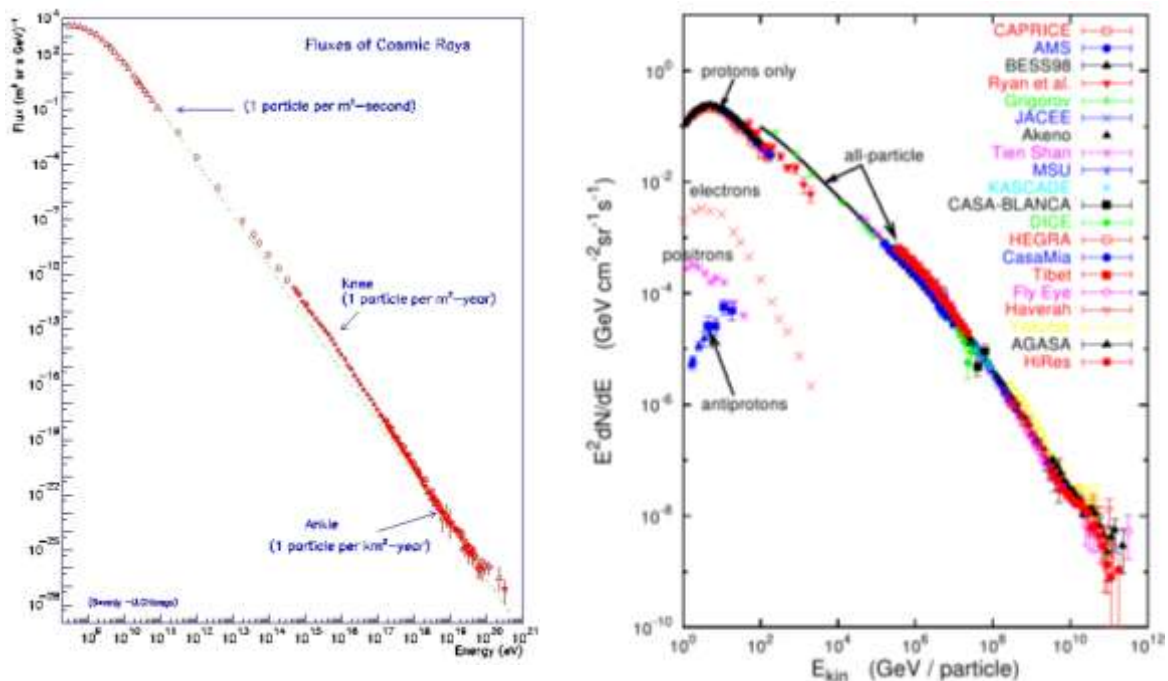
Η ροή των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας μειώνεται καθώς αυξάνεται η ενέργειά τους, ακολουθώντας τον εκθετικό νόμο  $E^{-\gamma}$ . Συγκεκριμένα, το ολοκληρωμένο ενεργειακό φάσμα (integral spectrum) που δίνει τον αριθμό των σωματιδίων με ενέργεια μεγαλύτερη από κάποια τιμή έχει τη μορφή:

$$J(>E)=kE^{-\gamma} \quad (1)$$

Με διαφόριση της σχέσης (1) προκύπτει το διαφορικό ενεργειακό φάσμα (differential spectrum) που έχει τη μορφή:

$$dJ(E)=-k\gamma E^{-(\gamma+1)}dE \quad (2)$$

Η μελέτη του φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας, της σύστασής της και της προέλευσής της αποτελεί ακόμα και σήμερα πεδίο έρευνας. Πλήθος πειραμάτων πραγματοποιούνται για να μετρήσουν τη ροή και τη σύσταση σε διάφορες ενεργειακές περιοχές, ενώ βάσει των μετρήσεων υπολογίζονται μαθηματικές προσεγγίσεις του φάσματος. Σχετικές εργασίες με σημαντικά αποτελέσματα είναι των Papini et al. (1996), Gaisser et al. (2001), Hillas (2006) και Beringer et al. (2012). Ενδεικτικές μορφές του διαφορικού φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζονται στο σχήμα 1.2.

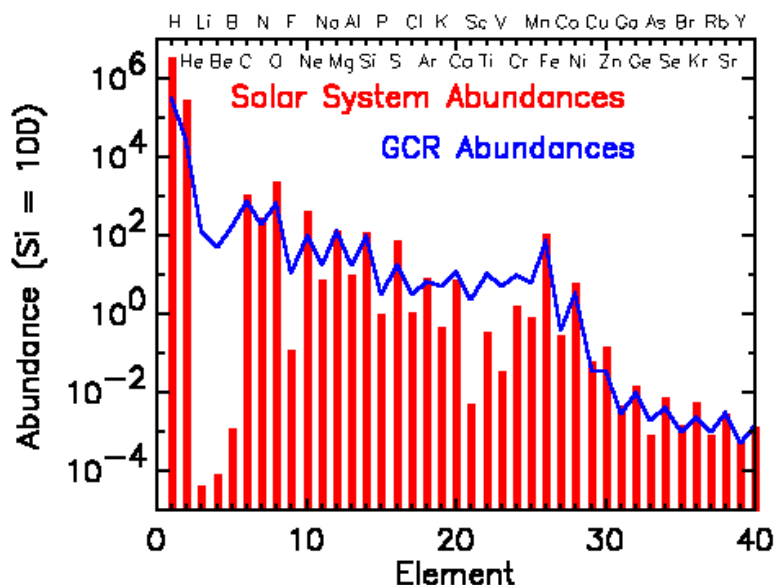


**Σχήμα 1.2:** Στα αριστερά δίνεται ενδεικτικό διαφορικό ενεργειακό φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι αλλαγές στην κλίση που παρατηρούνται στα  $10^{15}$  eV και στα  $10^{18}$  eV ονομάζονται γόνατο και αστράγαλος εξαιτίας της μορφής τους (πηγή: <http://www.nmdb.eu>). Στα δεξιά δίνεται το διαφορικό ενεργειακό φάσμα, όπως υπολογίστηκε από πλήθος μετρήσεων σε διάφορα πειράματα (Hillas, 2006).



Η τιμή του εκθέτη  $\gamma$  δεν είναι σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάλογα με την ενεργειακή περιοχή των σωματιδίων. Ωστόσο παρατηρείται σχετική σταθερότητα του συντελεστή για ορισμένα διαστήματα, επιτρέποντας έτσι τη διάκριση περιοχών στο φάσμα. Μέχρι τα  $10^9 - 10^{10}$  eV τα σωματίδια προέρχονται κυρίως από τον ήλιο και στο φάσμα παρατηρείται μια καμπύλωση. Το φάσμα σε αυτή τη περιοχή εξαρτάται από την ηλιακή δραστηριότητα και μπορεί να διαφέρει πολύ μετά από ηλιακά φαινόμενα. Μετά από αυτή την ενέργεια και μέχρι τα  $10^{21}$  eV η ροή μειώνεται σταθερά με τη τιμή του  $\gamma$  να παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές στα  $10^{15}$  eV και στα  $10^{18}$  eV. Λόγω της μορφής που έχει το φάσμα σε αυτά τα σημεία, οι περιοχές ονομάζονται γόνατο (Knee) και αστράγαλος (Ankle). Μέχρι το γόνατο τα σωματίδια θεωρείται ότι προέρχονται από γαλαξιακές πηγές. Η προέλευση των σωματιδίων στην περιοχή ανάμεσα στο γόνατο και τον αστράγαλο δεν είναι σαφής, θεωρείται όμως ότι και αυτά προέρχονται από γαλαξιακές πηγές, διαφορετικές όμως από ότι της περιοχής πριν το γόνατο. Η ύπαρξη των σωματιδίων της περιοχής μετά τον αστράγαλο είναι ένα άλυτο μυστήριο και αποδίδεται σε εξωγαλαξιακές πηγές. Όσον αφορά την απόλυτη τιμή της ροής παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές. Συγκεκριμένα, στα  $10^{10}$  eV ένα σωματίδιο διαπερνά μια επιφάνεια εμβαδού ενός τετραγωνικού μέτρου κάθε δευτερόλεπτο ενώ οι ροές στο γόνατο και στον αστράγαλο είναι αντίστοιχα ένα σωματίδιο ανά  $m^2$  και ένα σωματίδιο ανά  $km^2$  το έτος.

Η σύσταση της ηλιακής κοσμικής ακτινοβολίας είναι πρωτόνια, ηλεκτρόνια, σωματάρια  $\alpha$  καθώς και βαρύτεροι πυρήνες, σωματίδια τα οποία εκπέμπονται κατά τις ηλιακές εκλάμψεις και τις στεμματικές εκπομπές μάζας (Miroshnichenko, 2001). Παρόμοια είναι η σύσταση της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας, η οποία δίνεται στο σχήμα 1.3. Παρατηρείται ότι υπάρχουν μικρές διαφοροποιήσεις της σύστασης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας σε σχέση με τις αφθονίες των στοιχείων του ηλιακού συστήματος και ιδιαίτερα στα στοιχεία με ατομικούς αριθμούς 3 έως 5 (Li, Be, B), 9 (F) και 21 έως 25 (Sc, Ti, V, Cr, Mn). Οι διαφορές αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία προέρχεται από πηγές εκτός του ηλιακού συστήματος.



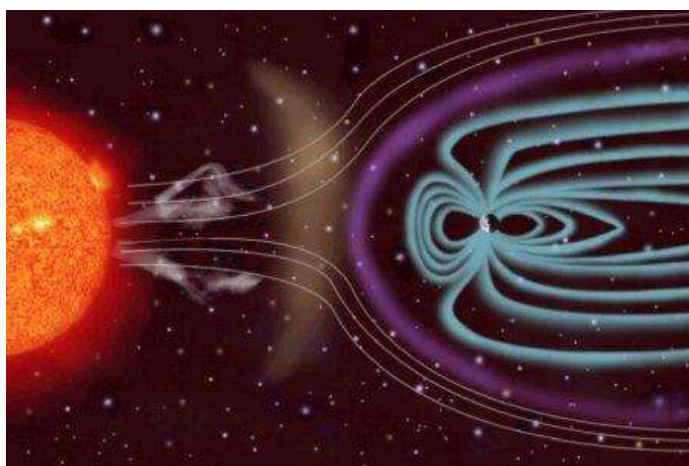
**Σχήμα 1.3:** Αφθονία στοιχείων της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας σε αντιπαραβολή με τις αφθονίες στο ηλιακό σύστημα. Οι διαφορές που παρατηρούνται είναι μια ακόμη ένδειξη της γαλαξιακής προέλευσης της κοσμικής ακτινοβολίας (πηγή: <http://www.nmdb.eu>).

### 1.1.2. Αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με το μαγνητικό πεδίο και την ατμόσφαιρα της Γης

Η παρουσία της κοσμικής ακτινοβολίας στη Γη είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων με το μαγνητικό πεδίο και την ατμόσφαιρά της. Καθοριστικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία έχει ο ηλιακός άνεμος. Πέρα από το ορατό τμήμα του ήλιου που ονομάζεται φωτόσφαιρα, εκτείνεται το ηλιακό στέμμα. Το στέμμα είναι ένα μαγνητικό αέριο με μέση θερμοκρασία  $10^6$  K, το οποίο αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια σε κατάσταση πλάσματος. Η βαρυτική δύναμη δεν είναι ικανή να συγκρατήσει τα φορτισμένα σωματίδια στον ήλιο με αποτέλεσμα το πλάσμα να εκτείνεται προς όλες τις κατευθύνσεις του στέμματος δημιουργώντας τον ηλιακό άνεμο. Όπως το στέμμα έτσι και ο ηλιακός άνεμος αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια και συγκεκριμένα πρωτόνια, ηλεκτρόνια, σωματίδια  $\alpha$  και ιόντα βαρύτερων στοιχείων. Ο ηλιακός άνεμος κινείται με ταχύτητες 200-1000 km/s ανάλογα με την ηλιακή δραστηριότητα. Ο συνήθης ηλιακός άνεμος διακρίνεται σε γρήγορο ηλιακό άνεμο που προέρχεται από τις στεμματικές οπές του ήλιου και έχει ταχύτητες έως 800 km/s και σε

αργό ηλιακό άνεμο που προέρχεται από άλλες περιοχές του στέμματος και έχει ταχύτητες έως 400 km/s.

Ο ηλιακός άνεμος στη διαδρομή του μέσα στο ηλιακό σύστημα παρασύρει το μαγνητικό πεδίο που συναντά. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται και κατά την αλληλεπίδραση του ηλιακού ανέμου με το μαγνητικό πεδίο της Γης. Συγκεκριμένα, η Γη φέρει μαγνητικό πεδίο που ονομάζεται γεωμαγνητικό και το οποίο προκύπτει από την υπέρθεση του εσωτερικού πεδίου της Γης και του πεδίου του φλοιού τα οποία προκαλούνται αντίστοιχα από τα ηλεκτρικά ρεύματα στον Γήινο πυρήνα και από μαγνητικές περιοχές στο φλοιό. Το γεωμαγνητικό πεδίο προσεγγίζεται με μαγνητικό δίπολο που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 433 km από το κέντρο της Γης και σχηματίζει γωνιά  $15^\circ$  σε σχέση με τον άξονα περιστροφής της. Ο ηλιακός άνεμος συναντώντας τις δυναμικές γραμμές του γεωμαγνητικού πεδίου, τις συμπιέζει ενώ ταυτόχρονα επιβραδύνεται απότομα. Η αλληλεπίδραση αυτή δημιουργεί τη μαγνητόσφαιρα, μία κοιλότητα μέσα στην οποία εγκλωβίζονται οι δυναμικές γραμμές του γεωμαγνητικού πεδίου. Από την πλευρά της Γης που κοιτάει προς τον Ήλιο οι δυναμικές γραμμές συμπιέζονται ενώ από την αντίθετη πλευρά δημιουργείται μια μαγνητοουρά. Το όριο του ηλιακού ανέμου με τις δυναμικές γραμμές ονομάζεται μαγνητόπαυση. Η αλληλεπίδραση απεικονίζεται σχηματικά στο σχήμα 1.4.



**Σχήμα 1.4:** Σχηματική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης του ηλιακού ανέμου με το γεωμαγνητικό πεδίο και της διαμόρφωσης της μαγνητόσφαιρας. Με μωβ χρώμα απεικονίζεται η μαγνητόπαυση (πηγή: <http://www.nmdb.eu>).

Αποτέλεσμα της παρουσίας του ηλιακού ανέμου είναι η διάκριση δύο περιοχών για το μαγνητικό πεδίο της Γης. Στην εσωτερική περιοχή που εκτείνεται μέχρι 5 ακτίνες Γης κυριαρχεί το γεωμαγνητικό πεδίο, όπως αναπαρίσταται από το μαγνητικό δίπολο. Πέρα από εκείνη την απόσταση κυριαρχεί η αλληλεπίδραση του γεωμαγνητικού πεδίου με τον ηλιακό άνεμο το οποίο εκτείνεται σε μια απόσταση 10 περίπου ακτίνων Γης από τη πλευρά του ήλιου και 100 περίπου ακτίνων Γης από την πλευρά της μαγνητοουράς. Λόγω του ότι η ακριβής περιγραφή του μαγνητικού πεδίου της Γης απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα υπολογισμού του. Το διεθνές πρότυπο είναι το International Geomagnetic Reference Field (International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 2010) το οποίο κάνει χρήση των ημι-εμπειρικών μοντέλων Tsyganenko (Tsyganenko, 1989; 1995).

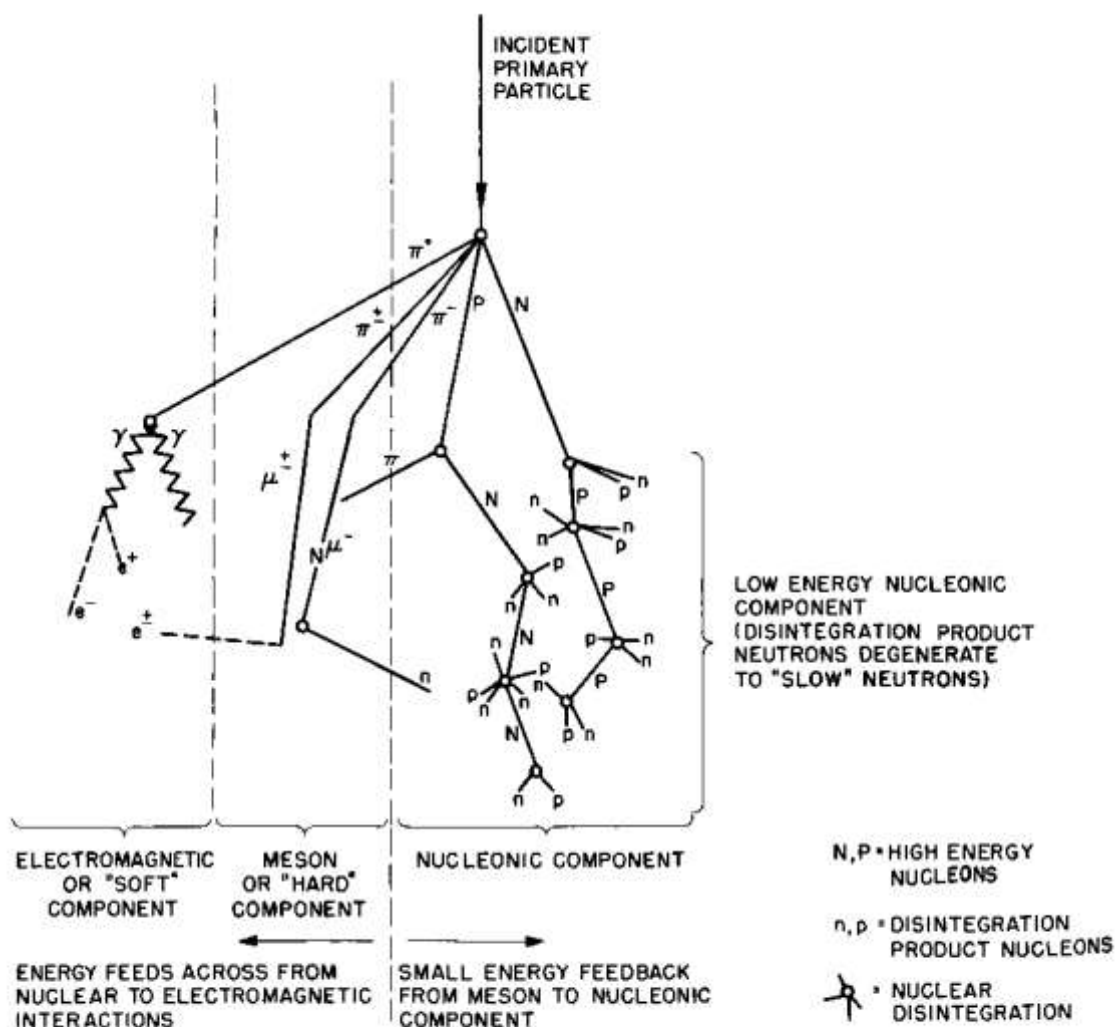
Τα φορτισμένα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας που φτάνουν στη Γη δέχονται τη δύναμη Lorenz από το μαγνητικό πεδίο. Σωματίδια με πολύ μεγάλες ενέργειες μπορούν και διαπερνούν το μαγνητικό πεδίο, σωματίδια με μικρές ενέργειες ανακλώνται ενώ σωματίδια με μέσες ενέργειες διαγράφουν από απλές καμπύλες έως πολύπλοκες ελικοειδείς τροχιές. Το τί από τα παραπάνω θα συμβεί εξαρτάται από την ενέργεια του σωματιδίου, από το σημείο της μαγνητόσφαιρας που αυτό εισέρχεται καθώς και από τη γωνία εισόδου. Οι τροχιές με τις οποίες τα σωματίδια προσεγγίζουν την επιφάνεια της Γης ονομάζονται ασυμπτωτικές διευθύνσεις άφιξης. Η θεωρία του Stormer προσφέρει αναλυτική μέθοδο υπολογισμού των διευθύνσεων αυτών για κάποια τοποθεσία της Γης προβλέποντας κώνους εισόδου και απαγορευμένες διευθύνσεις, ωστόσο δεν είναι δυνατό να λάβει υπόψη όλες τις λεπτομέρειες του μαγνητοσφαιρικού πεδίου. Ο καθορισμός των τροχιών με ακρίβεια απαιτεί πολύπλοκους υπολογισμούς που στις μέρες μας πραγματοποιείται με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Κύριο ρόλο στην προσέγγιση των σωματιδίων στη Γη έχει η δυσκαμψία (rigidity) τους, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$R = \frac{p \cdot c}{|q|} \quad (3),$$

όπου  $p$  η ορμή του σωματιδίου,  $c$  η ταχύτητα του φωτός και  $q$  το φορτίο του. Κάθε γεωγραφικός τόπος στη Γη έχει ένα κατώφλι δυσκαμψίας κάτω από το οποίο δε μπορεί να δεχτεί σωματίδια. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 1.4, οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι πιο αραιές πάνω από τους πόλους της Γης επιτρέποντας την είσοδο σωματιδίων πιο χαμηλής ενέργειας και επομένως πιο χαμηλής δυσκαμψίας, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία του σέλαος. Αντίθετα, οι δυναμικές γραμμές είναι πιο πυκνές πάνω από τον ισημερινό, επιτρέποντας την είσοδο μόνο σε σωματίδια υψηλών ενεργειών. Ως αποτέλεσμα, όσο μεγαλώνει το γεωγραφικό πλάτος, μειώνεται το κατώφλι δυσκαμψίας.

Τα σωματίδια που τελικά διεισδύουν στο μαγνητικό πεδίο φτάνουν στο όριο της ατμόσφαιρας της Γης. Η ατμόσφαιρα, ένα μίγμα αποτελούμενο κυρίως από Άζωτο, Οξυγόνο και Αργό, είναι λεπτότερη στους πόλους και παχύτερη στον ισημερινό, ενώ τα διεθνή πρότυπα θεωρούν ότι εκτείνεται σε ένα υψόμετρο 86 χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια (U.S. Government Printing Office, 1976; International Civil Aviation Organization, 1993). Από τις συγκρούσεις των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας με τα μόρια της ατμόσφαιρας, δημιουργούνται νέα σωματίδια τα οποία μέσω νέων αλληλεπιδράσεων δημιουργούν καταιγισμούς σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα. Συνοπτικά, τα πρωτογενή σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας, κυρίως πρωτόνια και σωματίδια  $\alpha$ , κατά την είσοδό του μέσα στην ατμόσφαιρα χάνουν ενέργεια λόγω ιονισμού. Μία ανελαστική σκέδαση του σωματιδίου με ένα μόριο της ατμόσφαιρας παράγει δευτερογενή σωματίδια και κυρίως πρωτόνια, νετρόνια, πιόνια και καόνια. Από αυτή την αλληλεπίδραση και μετά ξεκινά μία αλυσίδα αλληλεπιδράσεων η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια παράγουν επιπλέον δευτερογενή σωματίδια μέσω νέων ανελαστικών σκεδάσεων. Τα ουδέτερα πιόνια διασπώνται σε ακτίνες  $\gamma$ , τα φορτισμένα πιόνια διασπώνται σε μίονια και τα καόνια διασπώνται σε πιόνια και μίονια. Τα μίονια με τη σειρά τους διασπώνται σε ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια και νετρίνα. Οι ακτίνες  $\gamma$  δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων μέσω δίδυμης γένεσης, ηλεκτρόνια μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου και ακτίνες  $\gamma$  χαμηλότερης ενέργειας μέσω σκέδασης Compton. Η κίνηση των ηλεκτρονίων με τη σειρά της δημιουργεί επιπλέον ακτίνες  $\gamma$  λόγω ακτινοβολίας πέδης και ακτινοβολίας Cherenkov. Αποτέλεσμα όλων αυτών των διαδικασιών είναι ένας καταιγισμός

σωματιδίων που αποτελείται από την αδρονική συστασώσα (πρωτόνια, νετρόνια, πιόνια, καόνια), τη μιονική συστασώσα (μιόνια, νετρίνα) και την ηλεκτρομαγνητική συστασώσα (ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, ακτίνες γ), όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 1.5:



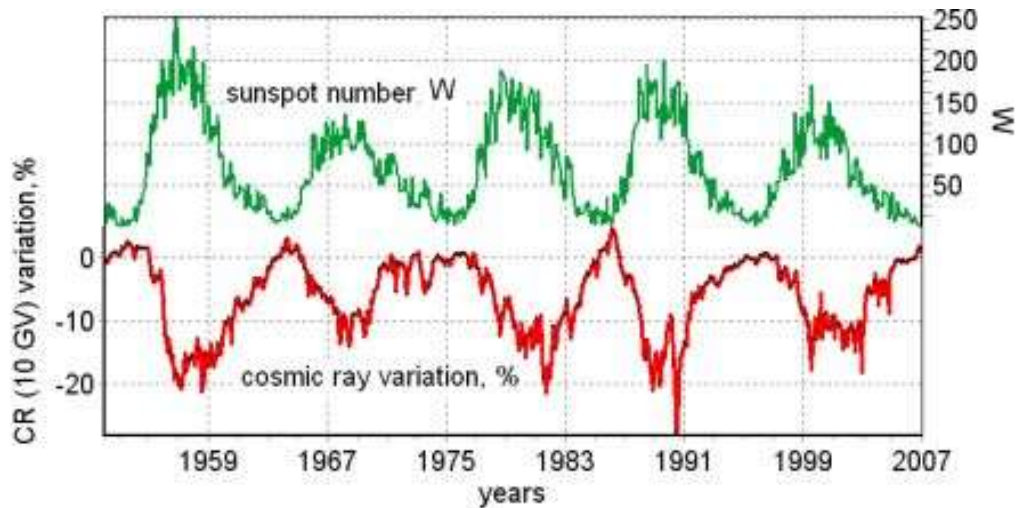
Schematic Diagram of Cosmic Ray Shower

**Σχήμα 1.5:** Σχηματική απεικόνιση των αλληλεπιδράσεων της κοσμικής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης με παραγωγή των τριών συστασών σωματιδίων (πηγή: <http://cosmic.lbl.gov>).

### 1.1.3. Διαμόρφωση κοσμικής ακτινοβολίας

Δεδομένου ότι η γαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία αποτελεί τη μεγαλύτερη και σταθερότερη συνιστώσα της κοσμικής ακτινοβολίας, θα ήταν αναμενόμενο η καταμέτρηση της κοσμικής ακτινοβολίας στη Γη να μην παρουσιάζει διακυμάνσεις. Ωστόσο αυτό δε συμβαίνει ούτε στις μετρήσεις από τους δορυφόρους, ούτε από τους επίγειους μετρητές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κοσμική ακτινοβολία που φθάνει στη Γη αλλά και στο ηλιακό σύστημα γενικότερα επηρεάζεται από την ηλιακή δραστηριότητα μέσα από διαδικασίες που συνιστούν την ηλιακή διαμόρφωση. Συγκεκριμένα, η ηλιακή δραστηριότητα μεταβάλλει τα χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου ο οποίος, μέσω του μαγνητικού πεδίου που μεταφέρει, αποτρέπει τα σωματίδια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας να προσεγγίσουν τη Γη. Η ηλιακή δραστηριότητα παρουσιάζει μια αντίστροφη συσχέτιση με τα σωματίδια της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνουν στη Γη λόγω του ότι όσο πιο έντονα είναι τα χαρακτηριστικά του ηλιακού ανέμου τόσο καλύτερα θωρακίζεται η Γη από την κοσμική ακτινοβολία. Επιπλέον, κατά τα έντονα ηλιακά φαινόμενα εκπέμπονται σωματίδια τα οποία φθάνουν στη Γη και αυξάνουν τους καταιγισμούς σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι να εμφανίζονται μεταβολές στη κοσμική ακτινοβολία που φθάνει στη Γη, οι οποίες παρουσιάζουν είτε περιοδικό είτε μη περιοδικό χαρακτήρα.

Η δραστηριότητα του ήλιου εκ φύσεως παρουσιάζει μια περιοδικότητα 11 ετών, η οποία ονομάζεται ενδεκαετής κύκλος. Το μαγνητικό πεδίο που μεταφέρει ο ηλιακός άνεμος είναι αυξημένο σε περιόδους αυξημένης δραστηριότητας, όπου παρατηρείται αύξηση του αριθμού των κηλίδων και των στεμματικών εκπομπών μάζας. Ως αποτέλεσμα, τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας εκτρέπονται περισσότερο και δεν φθάνουν στη Γη. Παράλληλα μεταβάλλεται το ενεργειακό φάσμα των σωματιδίων που τελικά φτάνουν στη Γη αφού η εκτροπή είναι μεγαλύτερη στα χαμηλής ενέργειας σωματίδια, ενώ διαταράσσεται και η ισοτροπία τους. Στο σχήμα 1.6 αποτυπώνεται η μέτρηση της κοσμικής ακτινοβολίας στη Γη σε αντιπαραβολή με την ηλιακή δραστηριότητα αν χρησιμοποιηθεί ως μέτρο αυτής ο αριθμός των ηλιακών κηλίδων.

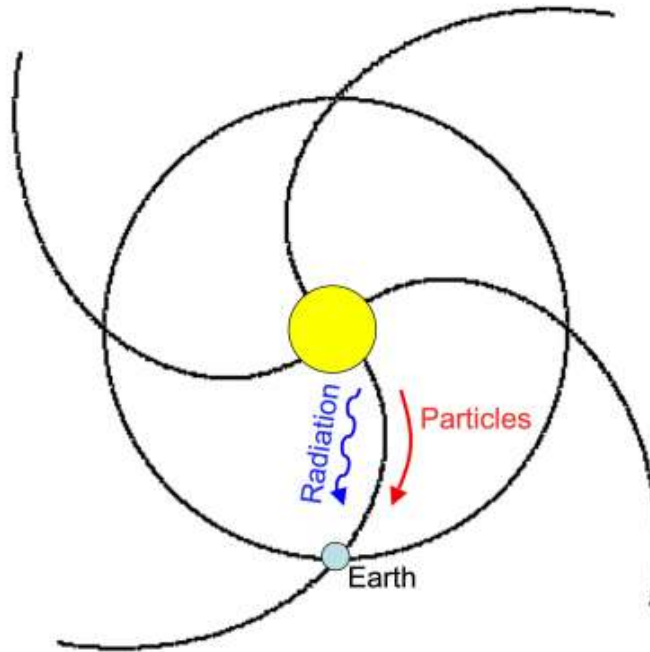


**Σχήμα 1.6:** Ηλιακή δραστηριότητα βάσει του αριθμού των ηλιακών κηλίδων και αντίστοιχη μεταβολή της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη με δυσκαμψία 10 GV (πηγή: <http://www.nmdb.eu>).

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι τα διαδοχικά ελάχιστα που εμφανίζει η κοσμική ακτινοβολία παρουσιάζουν διαφορετική μορφή αφού το ένα είναι πιο απότομο και το άλλο πιο ομαλό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ηλιακή δραστηριότητα παρουσιάζει στη πραγματικότητα 22ετή μεταβολή και όχι 11ετή. Η μέτρηση των ηλιακών κύκλων ξεκινάει από το 1775, όταν και ξεκίνησε η μέτρηση των ηλιακών κηλίδων. Στις μέρες μας διατρέχουμε τον 24ο ηλιακό κύκλο, ο οποίος έχει ξεκινήσει από το 2008.

Πέρα από την 11ετή περιοδικότητα της δραστηριότητας του ήλιου, παρατηρείται και μία μικρής κλίμακας περιοδικότητα λόγω της περιστροφής του ήλιου γύρω από τον άξονα του. Συγκεκριμένα, λόγω της 27ήμερης περιστροφής του ήλιου, ο ηλιακός άνεμος εκπέμπεται σχηματίζοντας τη σπείρα του Αρχιμήδη, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.7. Ως αποτέλεσμα, ο ηλιακός άνεμος που φθάνει στη Γη κάθε 27 ημέρες προέρχεται από την ίδια περιοχή του ήλιου και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι ενεργές περιοχές στον ήλιο έχουν χρόνο ζωής μεγαλύτερο από 27 ημέρες, δημιουργείται η αντίστοιχη περιοδικότητα στην κοσμική ακτινοβολία που φθάνει στη Γη.



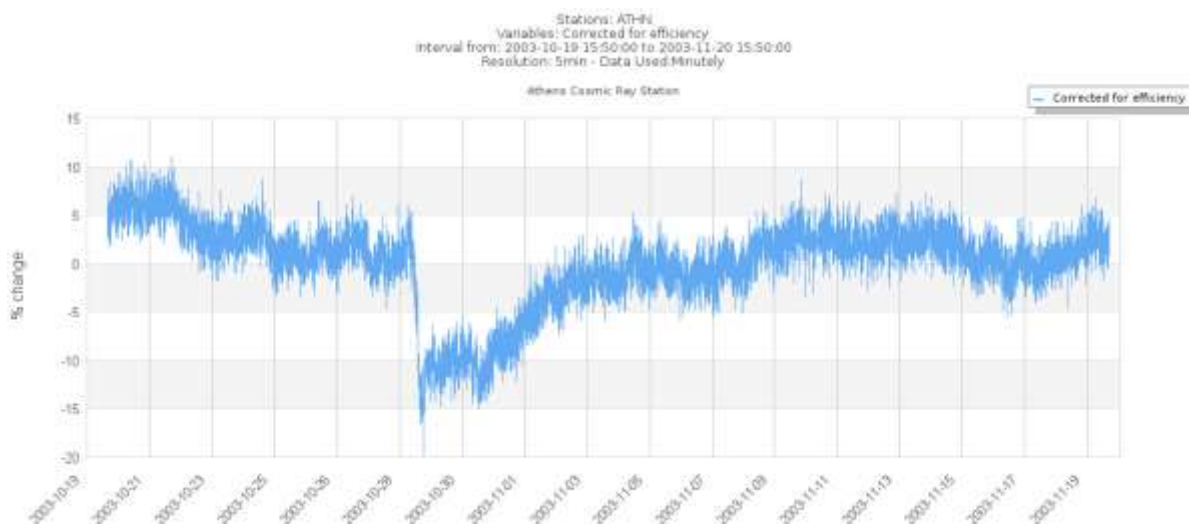


**Σχήμα 1.7:** Σπείρα του Αρχιμήδη που δημιουργεί ο ηλιακός άνεμος λόγω της 27ήμερης περιστροφής του ήλιου (πηγή: <http://www.nmdb.eu>).

Λόγω της 11ετούς περιοδικότητας της ηλιακής δραστηριότητας, οι μετρήσεις των επίγειων ανιχνευτών σε τοποθεσίες με κατώφλι δυσκαμψίας <1 GV παρουσιάζουν μια μεταβολή της τάξης του 20% για τη νουκλεονική συνιστώσα και 5% για τη μεσονική. Η μεταβολή λόγω της 27ήμερης διαμόρφωσης είναι πολύ μικρότερη. Τέλος, μικρότερης κλίμακας ανισotropίες παρατηρούνται λόγω της περιστροφής της Γης. Συγκεκριμένα παρατηρείται ημερήσια διακύμανση, μικρότερη του 1%, με μέγιστο στις 18:00 hr καθώς και ημηνεμερήσια διακύμανση.

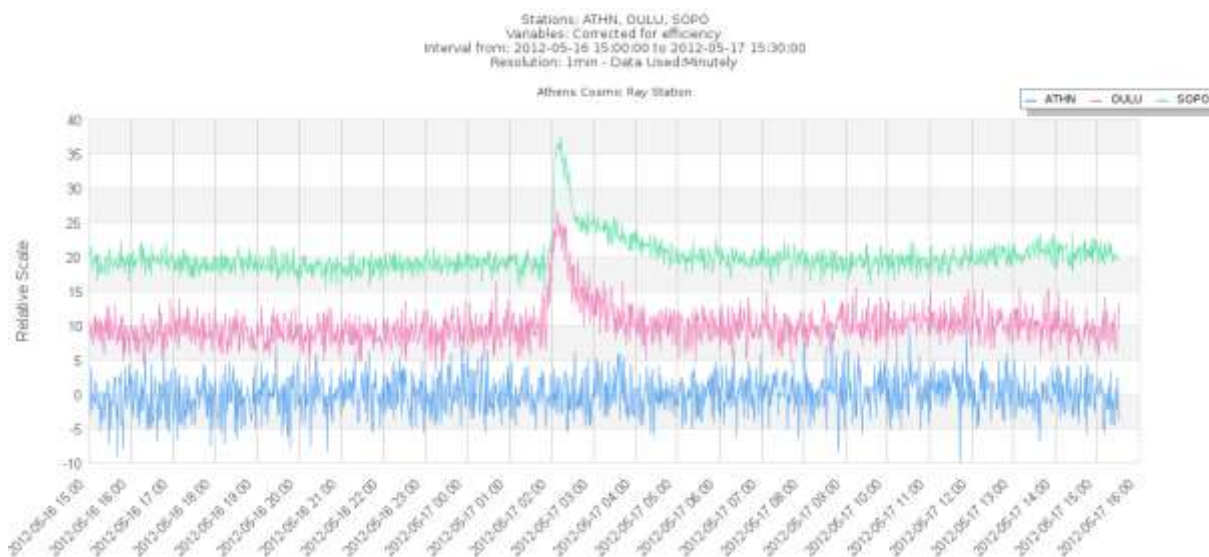
Πέρα από τους παραπάνω τρόπους διαμόρφωσης της κοσμικής ακτινοβολίας που παρουσιάζουν περιοδικό χαρακτήρα, έκτακτα ηλιακά φαινόμενα όπως εκλάμψεις και στεμματικές εκπομπές μάζας, δημιουργούν απροσδόκητες μεταβολές στη ροή της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη. Συνηθισμένο φαινόμενο είναι η μείωση Forbush το οποίο πολλές φορές ακολουθεί μία στεμματική εκπομπή μάζας από τον ήλιο (Belon et al., 2014). Το μαγνητικό πεδίο που μεταφέρει ο ηλιακός άνεμος ενισχύεται εκτρέποντας τα σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνουν στη Γη, με αποτέλεσμα την απότομη μείωση της μετρούμενης ροής. Η μείωση στην καταγραφόμενη

ροή είναι μεγαλύτερη από 5% ενώ μπορεί να φθάσει ακόμα και το 20%. Η μείωση διαρκεί από λίγες ώρες έως 2 ημέρες και η επαναφορά στα συνήθη επίπεδα μέτρησης διαρκεί από λίγες ημέρες έως λίγες εβδομάδες. Τυπικό παράδειγμα μείωσης Forbush που μετρήθηκε από το σταθμό της Αθήνας στις 29-10-2003 δίνεται στο σχήμα 1.8:



**Σχήμα 1.8:** Μείωση Forbush όπως μετρήθηκε από το σταθμό της Αθήνας στις 29-10-2003

Ενώ οι μειώσεις Forbush είναι ένα σχετικά συνηθισμένο φαινόμενο, σε πιο σπάνιες περιπτώσεις τα φαινόμενα του ήλιου είναι τόσο έντονα ώστε τα σωματίδια που εκπέμπονται συνεισφέρουν σημαντικά στην ροή της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη. Το φαινόμενο αυτό γίνεται αντιληπτό από την απότομη και μεγάλη αύξηση της ροής των σωματιδίων που μετρώνται στο έδαφος, για αυτό και ονομάζεται επίγειες επαυξήσεις της έντασης της κοσμικής ακτινοβολίας (Ground Level Enhancement-GLE) (Belon et al., 2005). Επειδή τα σωματίδια από τον ήλιο έχουν χαμηλές σχετικά ενέργειες, τα GLEs καταγράφονται από σταθμούς με μεγάλο γεωγραφικό πλάτος που έχουν χαμηλά κατώφλια δυσκαμψίας. Παράδειγμα GLE που πραγματοποιήθηκε στις 17 Μαΐου 2012 δίνεται στο σχήμα 1.9. Στο διάγραμμα δίνεται η αύξηση της ροής που μετρήθηκε στο σταθμό της OULU στην Φινλανδία και στο σταθμό SOPO του Νότιου Πόλου. Για αντιπαραβολή δίνονται και οι μετρήσεις του σταθμού της Αθήνας όπου, λόγω του μεγάλου κατωφλίου δυσκαμψίας, δε παρατηρούνται GLE.



**Σχήμα 1.9:** Το GLE στις 17-5-2012 όπως μετρήθηκε από τους σταθμούς OULU και SOPO. Για αντιπαραβολή οι μετρήσεις του σταθμού της Αθήνας που λόγω κατωφλίου δυσκαμψίας δεν καταμετρά GLE.

## 1.2. Καταμέτρηση κοσμικής ακτινοβολίας

### 1.2.1. Πειράματα μέτρησης κοσμικής ακτινοβολίας

Η καταμέτρηση της κοσμικής ακτινοβολίας παρουσιάζει έντονο επιστημονικό αλλά και τεχνολογικό ενδιαφέρον. Από επιστημονικής πλευράς, η μελέτη της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας είναι ένα μέσο κατανόησης της προέλευσης και των μηχανισμών εξέλιξης του σύμπαντος. Επιπλέον η μελέτη των μεταβολών της ροής της κοσμικής ακτινοβολίας λόγω της ηλιακής διαμόρφωσης είναι ένας τρόπος ελέγχου της ηλιακής δραστηριότητας που σχετίζεται άμεσα με επιστημονικά πεδία αλλά και με την καθημερινή δραστηριότητα του ανθρώπου. Από τη μία μεριά η μέτρηση των μεταβολών της κοσμικής ακτινοβολίας σχετίζεται άμεσα με την πρόβλεψη του διαστημικού καιρού. Από την άλλη μεριά οι απότομες αυξήσεις της ροής της κοσμικής ακτινοβολίας θεωρούνται επικίνδυνες για τους έμβιους οργανισμούς αλλά και για ηλεκτρονικές διατάξεις και όταν διαπιστώνονται πρέπει να λαμβάνεται ειδική μέριμνα για την προστασία τους. Τέλος η ροή της κοσμικής ακτινοβολίας σχετίζεται άμεσα με τη μέτρηση

της δόσης ακτινοβολίας που λαμβάνουν τα πληρώματα των αεροσκαφών, τα οποία εκτίθενται στους καταιγισμούς των σωματιδίων στην ατμόσφαιρα σε καθημερινή βάση.

Λόγω του επιστημονικού και τεχνολογικού ενδιαφέροντος, για την καταμέτρηση της κοσμικής ακτινοβολίας, έχουν πραγματοποιηθεί και πραγματοποιούνται πλήθος σχετικών πειραμάτων. Τα πειράματα αποσκοπούν στη μέτρηση είτε της ροής της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας με ανιχνευτές τοποθετημένους σε δορυφόρους είτε των συνιστωσών των καταιγισμών σωματιδίων εντός της ατμόσφαιρας με ανιχνευτές τοποθετημένους στο έδαφος ή σε αερόστατα. Το είδος των ανιχνευτών που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από το είδος και τις ενέργειες των σωματιδίων που καταγράφονται. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ανιχνευτές ακολουθούν τις αρχές λειτουργίας των γνωστών ανιχνευτών σωματιδίων όπως των θαλάμων ιονισμού, των αναλογικών απαριθμητών, των ανιχνευτών Geiger-Muller, των ανιχνευτών ημιαγωγών, των ανιχνευτών σπινθηρισμού, των ανιχνευτών Cherenkov και των φασματογράφων. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις γίνεται χρήση ανιχνευτών με εξειδικευμένα χαρακτηριστικά.

Ενδεικτική λίστα πειραμάτων και συνεργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί ή πραγματοποιούνται ακόμα, καθώς επίσης και πρόσφατες επιστημονικές δημοσιεύσεις δίνονται στον πίνακα 1.1. Όσον αφορά τις επίγειες μετρήσεις, ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στο Spaceship Earth και στο NMDB που αποτελούν δίκτυα μετρητών νετρονίων. Η μεγάλη αξία αυτών των συνεργασιών θα αναπτυχθεί στην παράγραφο 1.3.1. Επιπλέον ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει και στο Pierre Auger Observatory στην Αργεντινή που ανιχνεύει σωματίδια υπερυψηλών ενεργειών (άνω των  $10^{18}$  eV) μέσω της ακτινοβολίας Cherenkov που εκπέμπεται κατά την κίνησή τους στην ατμόσφαιρα. Όσον αφορά τις μετρήσεις και τις παρατηρήσεις από τους δορυφόρους, πολύ σημαντική είναι η συνεισφορά των ACE, GOES, SOHO και STEREO οι οποίοι προσφέρουν είτε απευθείας μέτρηση της ροής των σωματιδίων με ανιχνευτές είτε οπτικές παρατηρήσεις της ηλιακής δραστηριότητας.

<b>Ground based</b>	AGASA / Akeno Giant Air Shower Array (Troitsky, 2006)
	CHICOS / California High school Cosmic ray ObServatory (Carlson et al., 2005)
	CLOUD / Cosmics Leaving OUtdoor Droplets (Kirkby et al., 2011)
	GAMMA (Garyaka et al., 2008)
	GRAPES-3 / Gamma Ray Astronomy PeV EnergieS 3rd establishment (Tanaka et al., 2011)
	HEGRA / High Energy Gamma Ray Astronomy (Aharonian et al., 2006)
	HESS / High Energy Stereoscopic System (Abramowski et al., 2014)
	High Resolution Fly's Eye Cosmic Ray Detector (Sokolsky, 2011)
	IceCube (Aartsen et al., 2014)
	KASCADE / KARlsruhe Shower Core and Array DETector (Apel et al., 2011)
	MAGIC / Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov telescopes (Cortina et al., 2009)
	MARIACHI / Mixed Apparatus for Radar Investigation of Cosmic-rays of High Ionization (Takai, 2006)
	Milagro (Abdo et al., 2009)
	NMDB / Neutron Monitor Database (Mavromichalaki et al., 2011)
	Pierre Auger Observatory (Abreu et al., 2013)
	Spaceship Earth (Bieber et al., 2013)
	Telescope Array Project (Abu-Zayyad et al., 2012)
WALTA / Washington Large Area Time Coincidence Array (Wilkes et al., 2004)	

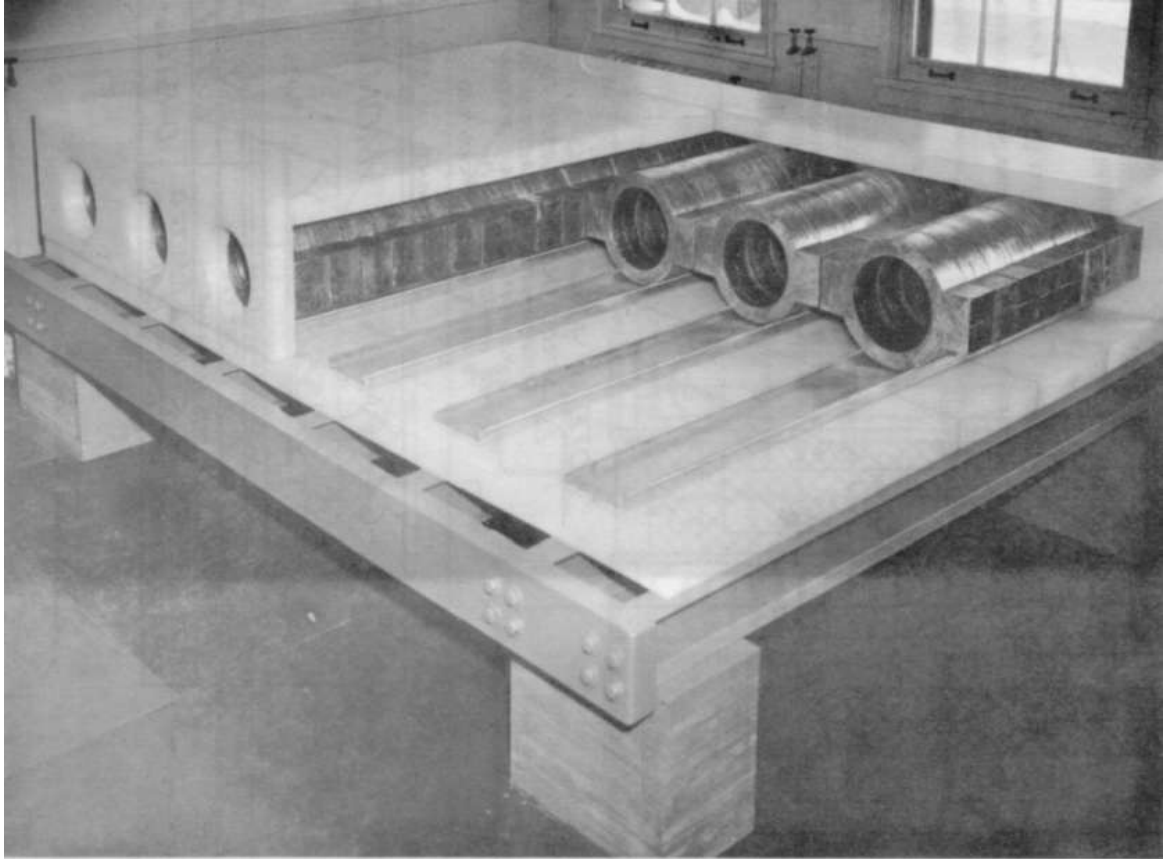
<b>Satellite based</b>	ACE / Advanced Composition Explorer (Lepri et al., 2013)
	AMS / Alpha Magnetic Spectrometer (Aguilar et al., 2013)
	Cassini - Huygens (Masters et al., 2013)
	FGST / Fermi Gamma-ray Space Telescope (Thompson et al., 2012)
	GOES / Geostationary Operational Environmental Satellite
	HEAO / High Energy Astronomy Observatories (Binns et al., 1989)
	IBEX / Interstellar Boundary EXplorer (Schwadron et al., 2014)
	PAMELA / Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics (Adriani et al., 2013)
	SOHO / SOLar and Heliospheric Observatory (Oh et al., 2014)
	STEREO / Solar TERrestrial RELations Observatory (Mishra W. and Srivastava N., 2013)
	Voyager (Stone et al., 2013)

<b>Balloon based</b>	ATIC / Advanced Thin Ionization Calorimeter (Panov et al., 2007)
	BESS / Balloon-borne Experiment with Superconducting Spectrometer (Yamamoto et al., 2007)
	CREAM / Cosmic Ray Energetics And Mass (Seo et al., 2014)
	HEAT / High Energy Antimatter Telescope (Barwick S.W. et al., 1997)
	PERDaix / Proton Electron Radiation Detector Aix-la-Chapelle (Bachlechner et al., 2009)
	Super-TIGER / Super Trans-Iron Galactic Element Recorder (Israel M.H. et al., 2009)
	TRACER / Transition Radiation Array for Cosmic Energetic Radiation (Ave et al., 2011)

**Πίνακας 1.1:** κατάλογος πειραμάτων και συνεργασιών που έχουν διεξαχθεί ή διεξάγονται, τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιούνται στο καθορισμό της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη. Στο πίνακα δίδεται και μία πρόσφατη αναφορά για κάθε περίπτωση.

### 1.2.2. Μετρητές νετρονίων

Ο μετρητής νετρονίων αποτελεί μία περίπτωση state-of-the-art ανιχνευτή ο οποίος χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της νουκλεονικής συνιστώσας των καταγισμών στην επιφάνεια της Γης. Ο μετρητής νετρονίων εφευρέθηκε από τον J.A. Simpson, ενώ ο ίδιος δημιούργησε το 1958 τον πρώτο καθιερωμένο τύπο του ανιχνευτή, γνωστό και ως IGY εξαιτίας του χαρακτηρισμού εκείνης της χρονιάς ως International Geophysical Year (Simpson, 1958). Ο μετρητής νετρονίων τύπου IGY εξελίχθηκε περαιτέρω και το 1964 δημιουργήθηκε από τον Carmichael ένας νέος καθιερωμένος τύπος, γνωστός ως NM-64 Supermonitor (Carmichael, 1964; Hatton, 1971). Και οι δύο αυτοί τύποι των μετρητών νετρονίων χρησιμοποιούν μια κοινή αρχιτεκτονική που βασίζεται στη χρήση αναλογικών θαλάμων που φέρουν αέριο  $\text{BF}_3$ , εμπλουτισμένου πάνω από 90% σε  $^{10}\text{B}$ . Κάθε αναλογικός θάλαμος περιβάλλεται από τον επιβραδυντή, έναν κύλινδρο κατασκευασμένο από υλικό χαμηλού μοριακού βάρους. Ο επιβραδυντής με τη σειρά του περιβάλλεται από τον παραγωγό, ένα κύλινδρο κατασκευασμένο από υλικό υψηλού μοριακού βάρους. Το σύστημα όλων των αναλογικών θαλάμων είναι τοποθετημένο μέσα στον ανακλαστήρα, ένα ορθογώνιο κουτί κατασκευασμένο από το ίδιο υλικό με τον επιβραδυντή. Η διαφοροποίηση του NM-64 σε σχέση με τον IGY αφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του παραγωγού και στο υλικό που χρησιμοποιείται στον ανακλαστήρα-επιβραδυντή, προκειμένου να αυξηθεί ο ρυθμός μέτρησης των σωματιδίων. Συγκεκριμένα, ενώ το υλικό κατασκευής του παραγωγού είναι σε κάθε περίπτωση μόλυβδος υψηλής καθαρότητας (τουλάχιστον 99%), το υλικό του ανακλαστήρα και του επιβραδυντή είναι πολυαιθυλένιο για την περίπτωση του NM-64 και παραφίνη για την περίπτωση του IGY. Ο αριθμός των αναλογικών θαλάμων που φέρει ο μετρητής νετρονίων δεν είναι καθορισμένος ενώ στην περίπτωση του NM-64 μπαίνει ως πρόθεμα στην ονομασία, για παράδειγμα 3NM-64, 6NM-64, 9NM-64, κλπ. Στο σχήμα 1.10 δίνεται φωτογραφία του μετρητή νετρονίων 6NM-64 από το εγχειρίδιο οδηγιών του Carmichael (1964):



**Σχήμα 1.10:** Μετρητής νετρονίων 6NM-64 κατά τη διάρκεια της κατασκευής του, όπως απεικονίζεται στην εργασία Carmichael (1964).

Κατά τη διαδικασία ανίχνευσης της νουκλεονικής συνιστώσας των καταιγισμών, ο ανακλαστήρας αποτρέπει τα χαμηλής ενέργειας σωματίδια να εισέλθουν στο μετρητή νετρονίων αφού το χαμηλό μοριακό του βάρος ευνοεί τις ελαστικές σκεδάσεις που μειώνουν άμεσα την ενέργεια των σωματιδίων. Τα σωματίδια που έχουν την ενέργεια να διαπεράσουν τον ανακλαστήρα αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες του παραγωγού και παράγονται δευτερογενή νετρόνια μέσω της ανελαστικής σκέδασης, η οποία ευνοείται λόγω του μεγάλου μοριακού βάρους του μολύβδου. Τα δευτερογενή νετρόνια επιβραδύνονται μέσω των ελαστικών σκεδάσεων στον επιβραδυντή, ανακλώνται μέσω των ελαστικών σκεδάσεων στον ανακλαστήρα, ενώ νέα δευτερογενή νετρόνια παράγονται μέσω νέων ανελαστικών σκεδάσεων στον παραγωγό. Αποτέλεσμα όλων αυτών των διαδικασιών είναι η παραγωγή εντός του μετρητή νετρονίων ενός μεγάλου

αριθμού δευτερογενών νετρονίων τα οποία σταδιακά επιβραδύνονται σε θερμικές ενέργειες.

Τα νετρόνια που φθάνουν σε θερμικές ενέργειες παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ενεργό διατομή για τη σύλληψή τους από το  $^{10}\text{B}$  στους αναλογικούς θαλάμους μέσω της αλληλεπίδρασης  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ . Το σωματίδιο  $\alpha$  που παράγεται έχει ενέργεια 1.47 MeV (πιθανότητα 93.7%) ή 1.78 MeV (πιθανότητα 6.3%) ανάλογα με τον αν το  $^7\text{Li}$  είναι σε διεγερμένη κατάσταση ή μη. Η παραγωγή του σωματιδίου  $\alpha$  εντός του αναλογικού θαλάμου συνεπάγεται τη δημιουργία παλμού που καταγράφεται από τα ηλεκτρονικά σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του αναλογικού θαλάμου. Από την αρχή λειτουργίας του μετρητή νετρονίων γίνεται σαφές ότι τα αρχικά σωματίδια που εισέρχονται πρέπει να αλληλεπιδράσουν ανελαστικά με τον παραγωγό προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής δευτερογενών νετρονίων που θα οδηγήσει στην καταγραφή παλμών. Η ευαισθησία του συγκεκριμένου ανιχνευτή στη νουκλεονική συνιστώσα των καταιγισμών οφείλεται στο γεγονός ότι τα σωματίδια της συγκεκριμένης συνιστώσας εκκινούν αυτή την διαδικασία σε αντίθεση με την ηλεκτρομαγνητική και την μιονική συνιστώσα.

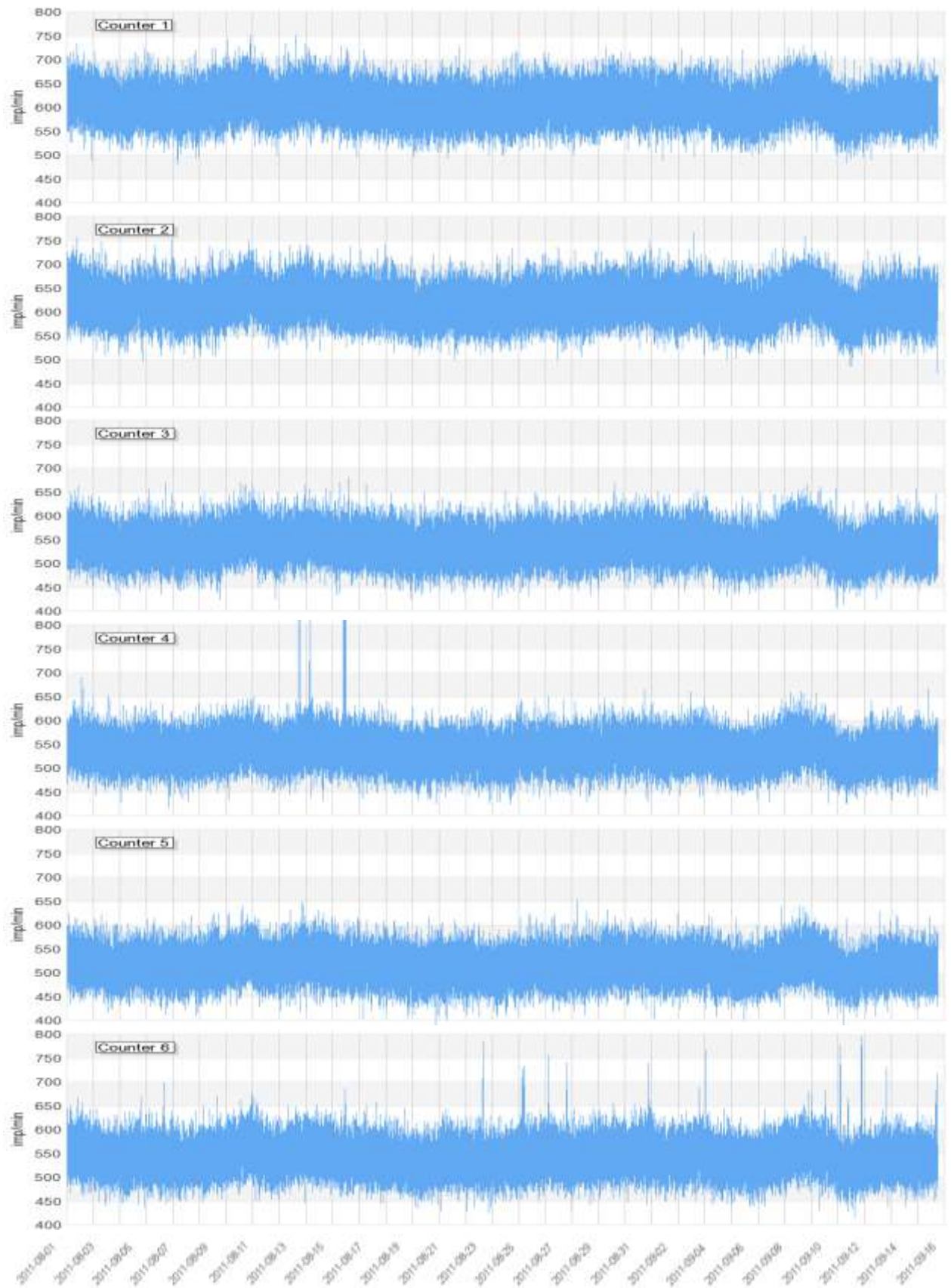
Χαρακτηριστικό του μετρητή νετρονίων είναι ο μεγάλος χρόνος ζωής τους και η σταθερότητα και αξιοπιστία στις μετρήσεις. Μετρητές νετρονίων IGY και NM-64 είναι ακόμα σε λειτουργία με εκσυγχρονισμό όταν απαιτείται στα ηλεκτρονικά και στα συστήματα συλλογής των μετρήσεων. Στις μέρες μας κατασκευάζονται πολλοί νέοι τύποι μετρητών νετρονίων που ακολουθούν την αρχιτεκτονική που περιγράφηκε παραπάνω, χωρίς ωστόσο να έχει δημιουργηθεί ένα νέο πρότυπο. Αν και αναλογικοί θάλαμοι με αέριο  $\text{BF}_3$  κατασκευάζονται ακόμη και σήμερα, η πλειοψηφία των νέων ανιχνευτών χρησιμοποιεί αέριο  $^3\text{He}$  (Stoker et al., 2000). Η αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων μετρητών είναι ακριβώς ίδια με αυτή που περιγράφηκε με τη διαφορά ότι η σύλληψη των νετρονίων στους αναλογικούς θαλάμους γίνεται μέσω της αλληλεπίδρασης  $^3\text{He}(n,p)^3\text{H}$  που οδηγεί στην παραγωγή ενός πρωτονίου με ενέργεια 573 keV.



### 1.2.3. Διόρθωση μετρήσεων μετρητών νετρονίων

Κάθε αναλογικός θάλαμος του μετρητή νετρονίων είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρονικές μονάδες έτσι ώστε κάθε παλμός να ενισχύεται, να ψηφιοποιείται και να καταγράφεται από μετρητικό σύστημα. Το σύστημα αυτό ρυθμίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να καταγράφει τον αριθμό των παλμών για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που συνήθως είναι ένα λεπτό της ώρας. Ως εκ τούτου οι μετρήσεις του μετρητή νετρονίων είναι χρονοσειρές του αριθμού των παλμών που καταγράφονται κάθε λεπτό (ή όποιο χρονικό διάστημα έχει καθοριστεί) από κάθε αναλογικό θάλαμο, ενώ σαν συνολική μέτρηση λογίζεται το άθροισμα των μετρήσεων όλων των αναλογικών θαλάμων. Παράδειγμα μετρήσεων ενός μετρητή νετρονίων με έξι αναλογικούς θαλάμους όπως ο 6NM-64 δίνεται στο σχήμα 1.11.

Από το διάγραμμα προκύπτουν τρία σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά τη φύση των μετρήσεων. Κατ' αρχήν παρατηρείται ότι ο αριθμός των παλμών που καταγράφει κάθε θάλαμος παρουσιάζει στατιστικές διακυμάνσεις της τάξης του  $\pm 10\%$ . Αυτό οφείλεται αφενός μεν στο ότι η ίδια η κοσμική ακτινοβολία που φθάνει στον ανιχνευτή παρουσιάζει διακυμάνσεις, αφετέρου δε στο γεγονός ότι η καταγραφή των παλμών είναι αποτέλεσμα της παραγωγής, επιβράδυνσης και σύλληψης των δευτερογενών νετρονίων ενός ανιχνευτή, δηλαδή διαδικασιών που παρουσιάζουν στατιστικές διακυμάνσεις. Το δεύτερο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η μέση στάθμη μέτρησης κάθε θαλάμου διαφέρει είτε λίγο είτε πολύ από τους υπόλοιπους. Αυτό οφείλεται αφενός μεν στη θέση που έχουν οι θάλαμοι εντός του ανιχνευτή, αφετέρου δε σε μικροδιαφορές στην τάση λειτουργίας τους, στη συγκέντρωση του αερίου τους και στις συνθήκες λειτουργίας των ηλεκτρονικών μονάδων που τους υποστηρίζουν. Το τρίτο συμπέρασμα είναι ότι μεταβολές της μέσης στάθμης μέτρησης παρατηρούνται ταυτόχρονα σε όλους τους θαλάμους, πράγμα αναμενόμενο αφού σχετίζεται με την μεταβολή της ροής των σωματιδίων που φθάνουν στον μετρητή νετρονίων.



**Σχήμα 1.11:** Ενδεικτική χρονοσειρά μετρήσεων λεπτού από τους έξι αναλογικούς θαλάμους του μετρητή νετρονίων 6NM-64.

Σκοπός του μετρητή νετρονίων είναι η παρακολούθηση, μέσω της καταμέτρησης της έντασης της νουκλεονικής συνιστώσας στο έδαφος, των μεταβολών στη ροή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη. Για αυτό το λόγο, προκειμένου οι μετρήσεις να είναι αξιόπιστες πρέπει να υποστούν επεξεργασία ώστε να απομονωθούν στοιχεία που τις επηρεάζουν και δε σχετίζονται με μεταβολές της ροής της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας (Kudela, 1974). Η επεξεργασία αυτή, γνωστή και ως επεξεργασία πρωτογενών δεδομένων (primary data processing), έγκειται σε δύο διαδικασίες που είναι απαραίτητες προκειμένου να διασφαλίζεται η ποιότητα των δεδομένων:

- εκκαθάριση των μετρήσεων από τυχαίες εσφαλμένες τιμές
- διόρθωση των μετρήσεων ως προς τις μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης

Παράδειγμα σποραδικών σφαλμάτων παρατηρούνται στο σχήμα 1.11 και συγκεκριμένα στον τέταρτο και στον έκτο αναλογικό θάλαμο. Οι απότομες κορυφές που παρατηρούνται στερούνται φυσικού νοήματος αφενός μεν γιατί δεν υπάρχει φυσικό φαινόμενο που να προκαλεί τόσο απότομη μεταβολή στη ροή της κοσμικής ακτινοβολίας αφετέρου γιατί οι κορυφές αυτές παρατηρούνται μόνο σε έναν από τους έξι αναλογικούς θαλάμους. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται σε τυχαίες δυσλειτουργίες των μονάδων που υποστηρίζουν τους αναλογικούς θαλάμους και είναι γνωστές ως διακυμάνσεις οργάνων (instruments variations). Αν και τέτοια σφάλματα δεν είναι συνηθισμένα στις χρονοσειρές των μετρήσεων, η διαδικασία εκκαθάρισης των μετρήσεων από τέτοιες περιπτώσεις είναι απαραίτητη προκειμένου να μην αλλοιώνεται το φυσικό περιεχόμενο των μετρήσεων. Τελικό ζητούμενο της διαδικασίας είναι η αποκοπή ή η διόρθωση των εσφαλμένων μετρήσεων χωρίς ωστόσο να αλλοιώνεται η φυσιολογική στατιστική διακύμανση των μετρήσεων.

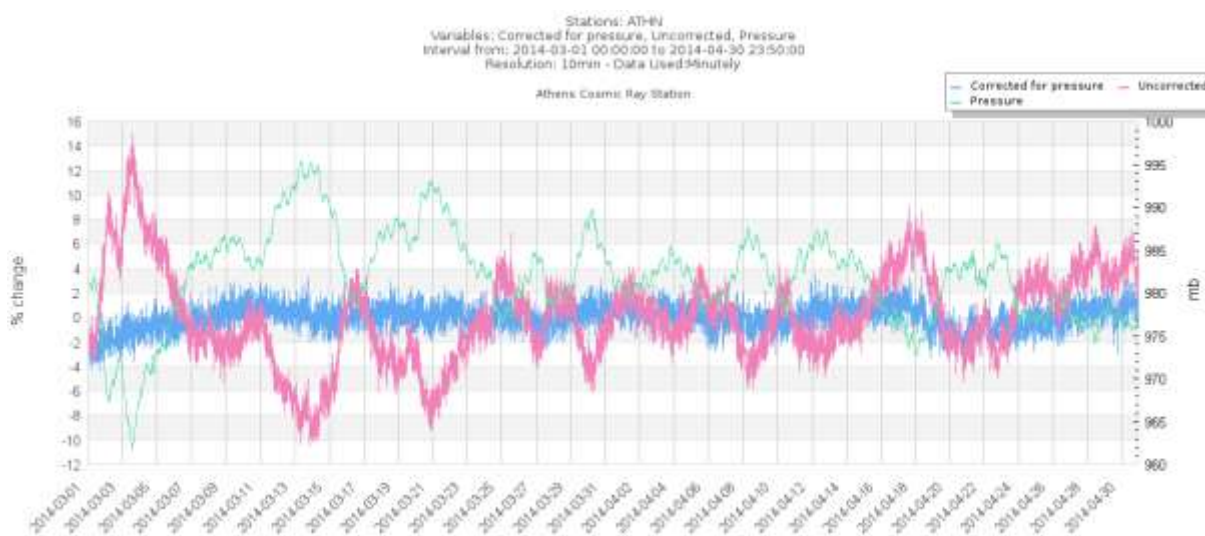
Όσον αφορά την επίδραση που έχει η ατμοσφαιρική πίεση στη ροή της νουκλεονικής συνιστώσας στην επιφάνεια της Γης, παρατηρείται έντονη συσχέτιση που εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$dN = -\beta \cdot N \cdot dP \quad (4)$$

όπου  $dN$  η μεταβολή στην μετρούμενη ροή όταν η πίεση μεταβάλλεται κατά  $dP$  και  $\beta$  παράμετρος που ονομάζεται βαρομετρικός συντελεστής (Carmichael et al., 1968; Dorman, 1972; 1974). Προκειμένου οι μεταβολές στις μετρήσεις να σχετίζονται μόνο με την μεταβολή της ροής της πρωτογενούς ακτινοβολίας, η επίδραση της πίεσης είναι απαραίτητο να εξαλειφθεί. Αυτό είναι εφικτό με την αναγωγή των μετρήσεων σε μία κοινή ατμοσφαιρική πίεση  $P_0$  χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$N = N_o \cdot e^{-\beta \cdot (P - P_o)} \Rightarrow N_o = N \cdot e^{\beta \cdot (P - P_o)} \quad (5)$$

Η εξάρτηση των μετρήσεων από την ατμοσφαιρική πίεση αποτυπώνεται γραφικά στο σχήμα 1.12 όπου δίνεται η χρονοσειρά των μετρήσεων του μετρητή νετρονίων σε αντιπαραβολή με την ατμοσφαιρική πίεση στο έδαφος. Στο ίδιο διάγραμμα δίνονται οι διορθωμένες ως προς την πίεση τιμές προκειμένου να φανεί η εξάλειψη της επίδρασης από την πίεση.

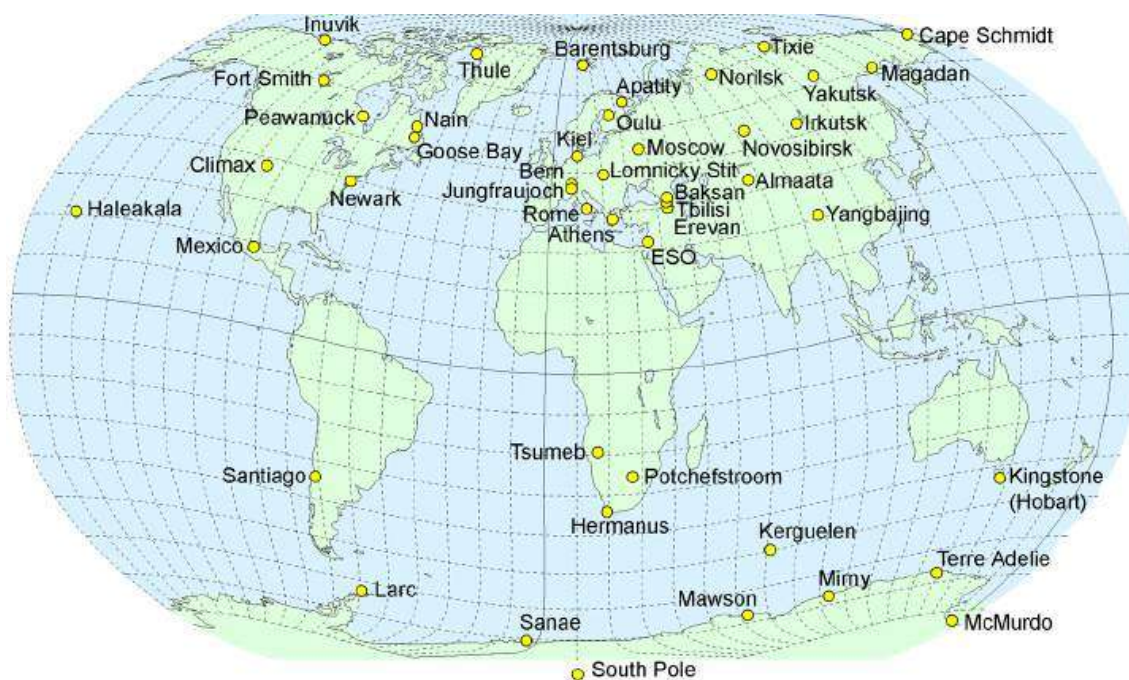


**Σχήμα 1.12:** Χρονοσειρά μετρήσεων του μετρητή νετρονίων σε αντιπαραβολή με την ατμοσφαιρική πίεση. Η αντίστροφη συσχέτιση είναι φανερή. Στο ίδιο διάγραμμα δίνεται η διορθωμένη ως προς την πίεση τιμή.

### 1.3. Δίκτυα μετρητών νετρονίων

#### 1.3.1. Αναγκαιότητα και πλεονεκτήματα των δικτύων μετρητών νετρονίων

Η χρήση των μετρητών νετρονίων είναι ιδιαίτερα διαδομένη σε παγκόσμιο επίπεδο. Σε αυτό συνεπικουρεί η μεγάλη σταθερότητα των μετρήσεών τους σε συνδυασμό με τη μεγάλη διάρκεια ζωής τους και την περιορισμένη συντήρηση που απαιτούν. Από επιστημονικής πλευράς ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συνδυαστική μελέτη των μετρήσεων που καταγράφονται από μετρητές νετρονίων σε διάφορες τοποθεσίες της Γης (McDonald, 2000; Simpson, 2000). Ανισοτροπίες της κοσμικής ακτινοβολίας που φθάνει στη Γη από διαφορετικά σημεία του σύμπαντος, μελέτη των ασυμπτωτικών διευθύνσεων εισόδου των σωματιδίων, ενεργειακή κατανομή των σωματιδίων είναι κάποια από τα θέματα που μπορούν να μελετηθούν μέσω της συνδυαστικής μελέτης των μετρήσεων, εκμεταλλευόμενοι τη διαφορετική τοποθεσία και το διαφορετικό κατώφλι δυσκαμψίας κάθε σταθμού. Για τους λόγους αυτούς ένα μεγάλο πλήθος σταθμών μετρητών νετρονίων έχει εγκατασταθεί σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, όπως φαίνεται στο χάρτη του σχήματος 1.13:



**Σχήμα 1.13:** Τοποθεσία σταθμών μετρητών νετρονίων (πηγή: <http://www.nmdb.eu>).

Η αξία της συνδυαστικής μελέτης των μετρήσεων από μετρητές νετρονίων σε διαφορετικές τοποθεσίες έχει οδηγήσει σε αρκετές προσπάθειες συνεργασίας μεταξύ των σταθμών ώστε να είναι πιο εύκολη η ανταλλαγή των δεδομένων. Επιπλέον χώρες με μεγάλη γεωγραφική έκταση και εμπειρία, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και η Ρωσία, τοποθετούν σταθμούς μετρητών νετρονίων σε διαφορετικές τοποθεσίες εντός της επικράτειάς τους, όπως επίσης και στους πόλους της Γης. Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι μετρητές νετρονίων του Πανεπιστημίου του Dalaware, γνωστά ως Bartol Neutron Monitors, καθώς και οι μετρητές νετρονίων της Ρωσίας. Οι συγκεκριμένοι σταθμοί έχουν προχωρήσει σε συνεργασία μεταξύ τους δημιουργώντας το Spaceship Earth.

Πολύ σημαντική τα τελευταία χρόνια θεωρείται η δημιουργία του παγκόσμιου δικτύου μετρητών νετρονίων. Η ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων, των δικτύων και των βάσεων δεδομένων, καθώς επίσης και η βούληση των περισσότερων σταθμών για συνεργασία όσον αφορά την ανακοίνωση των μετρήσεών τους, οδήγησε στη δημιουργία μίας Παγκόσμιας Βάσης Δεδομένων Μετρητών Νετρονίων γνωστής ως Neutron Monitor Database (NMDB), όπου συλλέγονται οι μετρήσεις των σταθμών (Mavromichalaki et al., 2011). Η συνεργασία του NMDB ξεκίνησε αρχικά σε Ευρωπαϊκό επίπεδο με την πρωτοβουλία σταθμών που διαθέτουν μεγάλη εμπειρία στο επιστημονικό πεδίο της κοσμικής ακτινοβολίας, μεταξύ των οποίων ήταν και ο σταθμός της Αθήνας. Γρήγορα αναγνωρίστηκε η αξία της συνεργασίας και ενσωματώθηκαν πολλοί νέοι σταθμοί σε παγκόσμιο επίπεδο, θέτοντάς την έτσι σαν παγκόσμια βάση δεδομένων. Ενδεικτική λίστα των σταθμών που συμμετέχουν στη συνεργασία δίνεται στον πίνακα 1.2:

No	Station	NMDB name	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Rigidity (GV)
1	Almaty	AATB	43.14	76.6	3340	6.69
2	Apatity	APTY	67.57	33.4	181	0.65
3	Aragats	ARNM	40.47	44.17	3200	7.1
4	Athens	ATHN	37.58	23.47	260	8.53
5	Baksan	BKSN	43.28	42.69	1700	5.6
6	Castilla-La Mancha	CaLMa	40.2	3.16	708	6.95
7	Dourbes	DOUR	50.1	4.6	225	3.18
8	ESOI-TAU	ESOI	33.3	35.8	2055	10.75
9	Fort Smith	FSMT	60.02	-111.93	180	0.3
10	Hermanus	HERM	-34.42	19.23	26	4.44
11	Inuvik	INVK	68.36	-133.72	21	0.3
12	Irkutsk	IRKT	52.47	104.03	sea level	3.64
13	Irkutsk	IRKT1	52.47	104.03	2000	3.64
14	Irkutsk	IRKT2	52.47	104.03	3000	3.64
15	Jungfrauoch	JUNG	46.55	7.98	3570	4.5
16	Jungfrauoch	JUNG1	46.55	7.98	3475	4.5
17	Kerguelen	KERG	-49.35	70.25	33	1.14
18	Kiel	KIEL	54.34	10.12	54	2.36
19	Kingston	KGSN	-42.99	147.29	65	1.88
20	Lomnicky stit	LMKS	49.2	20.22	2634	3.84
21	Magadan	MGDN	60.04	151.05	220	2.09
22	Mawson	MWSN	67.6	62.88	30	0.22
23	Mexico City	MXCO	19.33	80.82	2274	8.28
24	McMurdo	MCMU	-77.9	166.6	48	0.3
25	Mirny	MRNY	-66.55	93.02	30	0.03
26	Mobile CR Laboratory	MCRL	55.47	37.32	200	2.43
27	Moscow	MOSC	55.47	37.32	200	2.43
28	Nain	NAIN	56.55	-61.68	46	0.3
29	Neumayer III	NEU3	-70.67	-8.26	sea level	0.03
30	Newark	NEWK	39.68	-75.75	50	2.4
31	Nor-Amberd	NANM	40.37	44.25	2000	7.1
32	Norilsk	NRLK	69.2	88.05	sea level	0.63
33	Novosibirsk	NVBK	54.48	83	163	2.91
34	Oulu	OULU	65.05	25.47	15	0.8
35	Peawanuck	PWNK	54.98	-85.44	53	0.3
36	Potchefstroom	POTC	-26.69	27.1	1351	6.98
37	Plateau de Bure	BURE	44.63	5.91	2555	5
38	Rome	ROME	41.86	12.47	sea level	6.27
39	Sanae	SANA	-70.31	-2.35	52	0.86
40	Sanae IV	SAND	71.66	-2.85	856	0.73
41	South Pole	SOPO	-90	N/A	2820	0.1
42	South Pole Bare	SOPB	-90	N/A	2820	0.1
43	Terre Adelie	TERA	-66.65	140	32	0
44	Thule	THUL	76.5	-68.7	26	0.3
45	Tixie	TXBY	71.36	128.54	sea level	0.48
46	Tsumeb	TSUM	-19.2	17.58	1240	9.12
47	Yakutsk	YKTK	62.01	129.43	105	1.65

Πίνακας 1.2: Σταθμοί που συμμετέχουν στο NMDB και χαρακτηριστικά τους

Ο στόχος του NMDB είναι διπλός:

- συλλογή των δεδομένων σε μία κοινή δομή
- συλλογή των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο

Η ικανοποίηση των δύο στόχων επιλύει τα προβλήματα που αντιμετώπιζε παλαιότερα η επιστημονική κοινότητα τόσο στην πρόσβαση όσο και στη χρήση των μετρήσεων από διαφορετικούς σταθμούς, αφού ο κάθε ένας από αυτούς ανακοίνωνε τις μετρήσεις του με διαφορετικό τρόπο και σε διαφορετική δομή. Με τη δημιουργία του NMDB όλη η επιστημονική κοινότητα έχει άμεση πρόσβαση στις μετρήσεις των μετρητών νετρονίων, ενώ η επεξεργασία πλέον είναι πολύ πιο εύκολη λόγω της κοινής δομής των δεδομένων.

Η δημιουργία του NMDB έχει δώσει μεγάλη αξία στις μετρήσεις των μετρητών νετρονίων αφού η άμεση πρόσβαση σε αυτές και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την ανάπτυξη πλήθους εφαρμογών που βασίζονται σε αυτές. Παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής είναι το GLE Alert το οποίο παρακολουθεί πιθανές απότομες αυξήσεις στις μετρήσεις των σταθμών προκειμένου να ενημερώσει άμεσα την επιστημονική κοινότητα για την έναρξη GLE γεγονότος (Mariatos et al., 2005; Mavromichalaki et al., 2007; 2010; Souvatzoglou et al., 2009; Papaioannou et al., 2013). Η διευρυμένη και σε πραγματικό χρόνο χρήση των μετρήσεων βάζει σε προτεραιότητα τον έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων, όπως περιγράφηκε και στην παράγραφο 1.2.3, με την ιδιαιτερότητα ότι η επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων πρέπει να πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο.

### **1.3.2. Δομή της παγκόσμιας βάσης μετρήσεων**

Η συμφωνία μεταξύ των σταθμών που συμμετέχουν στο NMDB είναι να στέλνουν σε πραγματικό χρόνο με την ολοκλήρωση των μετρήσεων δεδομένα τεσσάρων ειδών και συγκεκριμένα:

- τα πρωτογενή δεδομένα (uncorrected)
- τα δεδομένα διορθωμένα με την πίεση (pressure corrected)



- τα δεδομένα διορθωμένα όσον αφορά τις διακυμάνσεις των οργάνων και την πίεση (efficiency and pressure corrected)
- την ατμοσφαιρική πίεση (pressure)

Οι μετρήσεις στέλνονται σε δύο χρονικές κλίμακες, σε κλίμακα υψηλής ανάλυσης που στην παρούσα φάση είναι μέτρηση ενός λεπτού (minutely measurements) και σε κλίμακα μίας ώρας (hourly measurements). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ως μέτρηση του μετρητή νετρονίων θεωρείται το άθροισμα των παλμών που μετρούν όλοι οι αναλογικοί θάλαμοι. Η μονάδα μέτρησης που στέλνονται τα δεδομένα είναι παλμοί ανά δευτερόλεπτο για τους θαλάμους και mb για την πίεση. Επισημαίνεται ότι η τιμή που καταγράφει ένας μετρητής νετρονίων εξαρτάται από παράγοντες όπως το κατώφλι δυσκαμψίας, το υψόμετρο και ο αριθμός των αναλογικών θαλάμων που φέρει. Για παράδειγμα στην ίδια τοποθεσία ένας μετρητής νετρονίων τύπου 3NM-64 θα μετράει περίπου τους μισούς παλμούς σε σχέση με έναν 6NM-64. Ωστόσο αυτό δε δημιουργεί κάποια ασυμβατότητα στη σύγκριση των μετρήσεων μεταξύ των σταθμών αφού αυτό που έχει πραγματική αξία στις μετρήσεις δεν είναι η απόλυτη τιμή τους αλλά οι μεταβολές που παρατηρούνται.

Από τεχνικής πλευράς το NMDB είναι μια βάση δεδομένων MySQL. Για κάθε σταθμό που συμμετέχει στο NMDB δημιουργούνται στη βάση δεδομένων πέντε πίνακες. Αν η ονομασία του σταθμού είναι STATION τότε οι πέντε πίνακες είναι οι STATION\_ori, STATION\_rev, STATION\_1h, STATION\_env και STATION\_meta. Από τους πίνακες αυτούς οι τρεις πρώτοι είναι οι κύριοι και αφορούν τις μετρήσεις του σταθμού. Συγκεκριμένα, στον πίνακα STATION\_ori ο σταθμός στέλνει τις μετρήσεις υψηλής ανάλυσης (minutely measurement), ενώ στον πίνακα STATION\_1h στέλνει τις ωριαίες μετρήσεις (hourly measurements). Τα δεδομένα υψηλής ανάλυσης που στέλνονται στον πίνακα STATION\_ori δεν μπορούν να μεταβληθούν και σε περίπτωση ανανέωσή τους τα νέα δεδομένα αποστέλλονται στον πίνακα STATION\_rev. Αντίθετα τα ωριαία δεδομένα που στέλνονται στο πίνακα STATION\_1h είναι δυνατό να μεταβληθούν και η πιθανή ανανέωσή του γίνεται στον ίδιο πίνακα. Η αποστολή δεδομένων στους πίνακες STATION\_env και STATION\_meta είναι προαιρετική. Στον πρώτο πίνακα στέλνονται περιβαλλοντικά δεδομένα, ενώ στον δεύτερο αποστέλλονται σημαντικές πληροφορίες

σχετικά με το σταθμό. Συγκεντρωτικά οι πίνακες και τα πεδία για κάθε σταθμό παρατίθενται στον πίνακα 1.3:

Table	Field	Comment
STATION_ori	start_date_time	start date and time of the count interval
	length_time_interval_s	duration of the data collection interval (s)
	measured_uncorrected	uncorrected count rates (counts/s)
	measured_corr_for_efficiency	count rates corrected for efficiency and pressure (counts/s)
	measured_corr_for_pressure	count rates corrected for pressure (counts/s)
	measured_pressure_mbar	pressure (mb)

STATION_rev	start_date_time	start date and time of the count interval
	length_time_interval_s	duration of the data collection interval (s)
	measured_uncorrected	uncorrected count rates (counts/s)
	measured_corr_for_efficiency	count rates corrected for efficiency and pressure (counts/s)
	measured_corr_for_pressure	count rates corrected for pressure (counts/s)
	measured_pressure_mbar	pressure (mb)
	version	revision version
last_change	automatically updated timestamp	

STATION_1h	start_date_time	start date and time of the 3600 s count interval
	uncorrected	uncorrected count rates (counts/s)
	corr_for_efficiency	count rates corrected for efficiency and pressure (counts/s)
	corr_for_pressure	count rates corrected for pressure (counts/s)
	pressure_mbar	pressure (mb)
	last_change	automatically updated timestamp

STATION_env	date_time	date and time of the measurement
	measured_temperature_inside	inside air temperature (°C)
	measured_temperature_outside	outside air temperature (°C)
	measured_relative_humidity	relative humidity (%)
	measured_wind_speed_m_s	wind speed (m/s)
	last_change	automatically updated timestamp

STATION_meta	start_date_time	start of time period
	end_date_time	end of time period
	quality_flag	(currently not defined)
	comment	Information on special events
	last_change	automatically updated timestamp
	ID_RECORD	integer

**Πίνακας 1.3:** Δομή πινάκων που αντιστοιχούν σε κάθε σταθμό του NMDB.

Ο κύριος ρόλος της βάσης δεδομένων του NMDB είναι να αποθηκεύει τις μετρήσεις των σταθμών που συμμετέχουν. Για το λόγο αυτό και επιπλέον επειδή δεν υπάρχουν συσχετίσεις μεταξύ των πινάκων που να θέτουν προβλήματα ακεραιότητας (integrity) της βάσης, η βάση του NMDB χρησιμοποιεί μηχανή myISAM που προσφέρει ταχύτητα και εύκολη συντήρηση. Όσον αφορά τους servers που χρησιμοποιούνται, ο κύριος server (master server) βρίσκεται στο Kiel της Γερμανίας. Ωστόσο επειδή η ζήτηση σε δεδομένα είναι μεγάλη και προκειμένου να μειωθεί το φορτίο στον master server, έχουν εγκατασταθεί σε ορισμένες τοποθεσίες slave servers. Οι slave servers έχουν εγκατασταθεί σε σταθμούς που έχουν έντονη παρουσία στο χώρο των μετρητών νετρονίων και που μπορούν τεχνικά να τους υποστηρίξουν, όπως συμβαίνει για το σταθμό της Αθήνας στην Ελλάδα, της Ούλου στη Φινλανδία και του IZMIPAN στη Ρωσία.

Η πρόσβαση της επιστημονικής κοινότητας καθώς και των χρηστών με επιστημονικό ενδιαφέρον στα δεδομένα του NMDB γίνεται μέσω δικτυακών διεπαφών. Τέτοιο εργαλείο είναι το NMDB EVENT SEARCH TOOL (NEST), εικόνα του οποίου δίνεται στο σχήμα 1.14:



**Σχήμα 1.14:** Το εργαλείο NEST για πρόσβαση του κοινού στα δεδομένα του NMDB (<http://www.nmdb.eu/nest/search.php>)

Πέρα από την απλή πρόσβαση των δεδομένων που παρέχει το NEST, σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται συνδυαστική και εξειδικευμένη χρήση των δεδομένων που μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο με απευθείας ερωτήματα (queries) στη βάση δεδομένων. Επιστημονικές ομάδες μπορούν να έχουν απευθείας πρόσβαση στη βάση μέσω χρηστών που δημιουργούνται συνήθως στους slave servers, μετά από συνεννόηση με τη συνεργασία του NMDB.

### 1.3.3. Παρουσία των σταθμών στο NMDB

Η αξία του NMDB έχει αναγνωριστεί από την επιστημονική κοινότητα αφού σχεδόν το σύνολο των επιστημονικών δημοσιεύσεων που βασίζονται σε μετρήσεις των μετρητών νετρονίων κάνουν αναφορά σε αυτό. Αποτέλεσμα αυτής της κοινής αποδοχής είναι ότι οι περισσότεροι σταθμοί παγκοσμίως έχουν εισέλθει στην συνεργασία αυτή, ενώ και οι υπόλοιποι σχεδιάζουν να εισέλθουν. Ωστόσο η παρουσία των σταθμών στο NMDB δεν ικανοποιεί πάντα τους στόχους που έχουν τεθεί. Από τους περίπου 60 σταθμούς που στέλνουν δεδομένα, περίπου οι μισοί είναι εκείνοι που πραγματοποιούν την αποστολή σε πραγματικό χρόνο, όπως φαίνεται από το σχήμα 1.15.

Ο στόχος της αποστολής των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο δεν ικανοποιείται από όλους τους σταθμούς είτε γιατί οι σταθμοί δεν διαθέτουν την απαραίτητη τεχνογνωσία είτε για τεχνικούς λόγους, όπως συμβαίνει με τους πολιτικούς σταθμούς ή τους σταθμούς σε μεγάλο υψόμετρο. Οι σταθμοί αυτοί έχουν περιορισμένη πρόσβαση στο διαδίκτυο και πολλές φορές στέλνουν τα δεδομένα τους μέσω δορυφόρου και επομένως η αποστολή κάθε λεπτό δεν είναι εφικτή. Επιπλέον, σε κάποιες περιπτώσεις οι απομακρυσμένοι σταθμοί λειτουργούν αυτοματοποιημένα χωρίς την παρουσία επιστημόνων ή τεχνικών και επομένως πιθανές δυσλειτουργίες δεν μπορούν να αντιμετωπίζονται άμεσα.

Η μη αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από ορισμένους σταθμούς απαγορεύει τη χρήση των μετρήσεών τους από εφαρμογές που απαιτούν δεδομένα πραγματικού χρόνου, όπως είναι για παράδειγμα εφαρμογές πρόβλεψης των GLE.

Ωστόσο τα δεδομένα αυτά είναι χρήσιμα για offline επεξεργασία, επομένως η μη αποστολή σε πραγματικό χρόνο δεν αποτελεί πρωτεύον πρόβλημα για το NMDB. Αντιθέτως, σοβαρό πρόβλημα θεωρείται η αποστολή δεδομένων χαμηλής ποιότητας. Η αποστολή μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο απαιτεί την εφαρμογή αλγορίθμων για την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων καθώς και διαδικασίας για τον offline έλεγχο και την διόρθωσή τους. Δυστυχώς αυτό δεν εφαρμόζεται από αρκετούς σταθμούς με αποτέλεσμα να αναδεικνύεται κύριας σημασίας για το NMDB η ανάπτυξη αλγορίθμων τόσο για τη διόρθωση και τον έλεγχο των δεδομένων όσο και για τον χειρισμό τους σε πραγματικό χρόνο από τεχνικής πλευράς.

Station	TA00	Original Data (TA00)	1 Year Avg	Environmental Data
1. Athens	AATH	OK	OK	OK
2. Athens	APTY	OK	OK	OK
3. Athens	ARON	OK	OK	OK
4. Athens	ATSD	OK	OK	OK
5. Athens	BECH	OK	OK	OK
6. BECH	BECH	OK	OK	OK
7. CALM	CALM	OK	OK	OK
8. CLMY	CLMY	OK	OK	OK
9. DUCK	DUCK	OK	OK	OK
10. DRBM	DRBM	OK	OK	OK
11. El Estero	ENEX	OK	OK	OK
12. FIMT	FIMT	OK	OK	OK
13. HELI	HELI	OK	OK	OK
14. HRMB	HRMB	OK	OK	OK
15. ICAN	ICAN	OK	OK	OK
16. INOK	INOK	OK	OK	OK
17. IONK 1	IEIC	OK	OK	OK
18. IONK 2	IEI2	OK	OK	OK
19. IONK	IECT	OK	OK	OK
20. Ionian Sea, NDB	IONG1	OK	OK	OK
21. Ionian Sea, NDB	IONG2	OK	OK	OK
22. Karlsruhe	KRHO	OK	OK	OK
23. KUOH	KUOH	OK	OK	OK
24. KRI1	KRI1	OK	OK	OK
25. KRI2	KRI2	OK	OK	OK
26. LENS	LEVL	OK	OK	OK
27. Lonsdale air	LAMB	OK	OK	OK
28. MCMO	MCMO	OK	OK	OK
29. Mobile Cr. Lab	MCRB	OK	OK	OK
30. Morden	MORD	OK	OK	OK
31. Moscow	MOSC	OK	OK	OK
32. Muro	MURU	OK	OK	OK
33. MTWB	MTWB	OK	OK	OK
34. MWDB	MWDB	OK	OK	OK
35. MUCO	MUCO	OK	OK	OK
36. NAGN	NAGN	OK	OK	OK
37. New Zealand	NANM	OK	OK	OK
38. NERI	NERI	OK	OK	OK
39. NEWL	NEWL	OK	OK	OK
40. Norka	NORK	OK	OK	OK
41. Novosibirsk	NOBK	OK	OK	OK
42. NUSA	NUSA	OK	OK	OK
43. OMB	OMBL	OK	OK	OK
44. POFI	POFI	OK	OK	OK
45. PTM	PTM	OK	OK	OK
46. PRNE	PRNE	OK	OK	OK
47. ROME	ROME	OK	OK	OK
48. SAGL	SAGL	OK	OK	OK
49. SAGB	SAGB	OK	OK	OK
50. SAGI	SAGI	OK	OK	OK
51. SCFB	SCFB	OK	OK	OK
52. SCPI	SCPI	OK	OK	OK
53. Sea, Arctic	SEPA	OK	OK	OK
54. THUL	THUL	OK	OK	OK
55. TBIT	TBIT	OK	OK	OK
56. THDB	THDB	OK	OK	OK
57. Tice Sea	TADU	OK	OK	OK
58. UFG	UFG	OK	OK	OK
59. YAKO	YAKO	OK	OK	OK

Online: 29    Offline: 18    Offline: 2  
 Offline: 11    Offline: 41    Offline: 27

Created: UTC Mon: 2014-05-01 10:18:24  
 Email: NMDB@nrdp.eu    URL: http://www.nmdb.eu

**Σχήμα 1.15:** Ενδεικτική κατάσταση πινάκων του NMDB (<http://www.nmdb.eu/status/status.php>). Επισημαίνεται ότι τα περιβαλλοντολογικά δεδομένα είναι προαιρετικά.

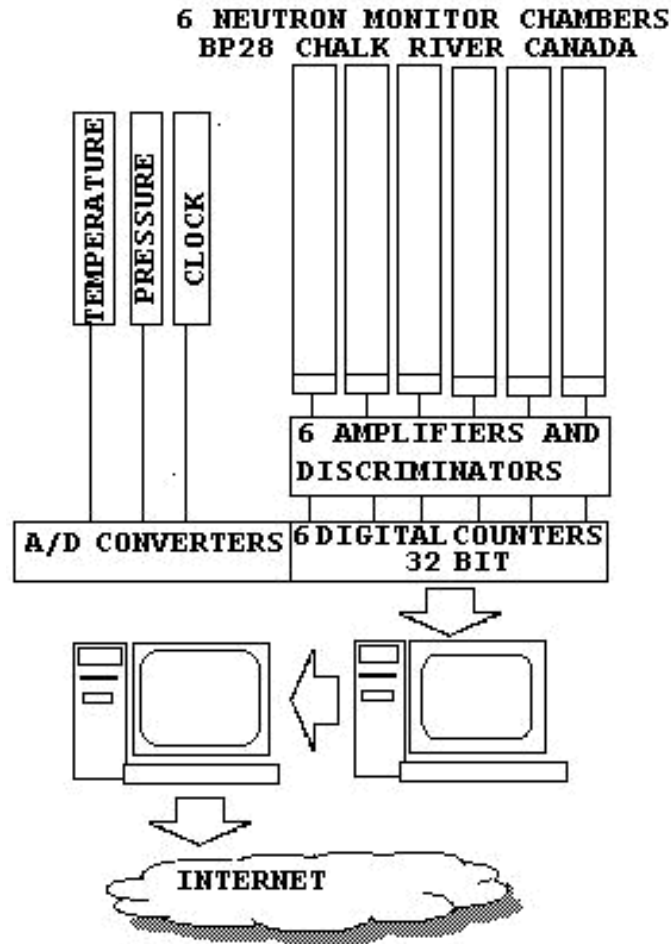
#### 1.3.4. Ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας

Ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας έχει μακρά ιστορία που ξεκινάει από το 1970. Τα πρώτα χρόνια της λειτουργίας του χρησιμοποιούσε έναν μετρητή νετρονίων 3NM-64, ενώ από το 2000 εκσυγχρονίστηκε και αναβαθμίστηκε σε 6NM-64. Ο σταθμός βρίσκεται σε ειδικά κατασκευασμένο χώρο στην οροφή του κτιρίου Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, το οποίο έχει κατασκευαστεί και ενισχυθεί ώστε να αντέχει το μεγάλο βάρος της υποδομής του μετρητή νετρονίων που πλησιάζει τους 10 τόνους. Ο σταθμός βρίσκεται στη γεωγραφική θέση  $37^{\circ}58' \text{ N} - 23^{\circ}47' \text{ E}$  και σε υψόμετρο 260 μέτρων. Η τοποθεσία που βρίσκεται έχει κατώφλι δυσκαμψίας 8.53 GV που θεωρείται από τις υψηλές τιμές. Φωτογραφίες από το εξωτερικό και το εσωτερικό του σταθμού δίνονται στο σχήμα 1.16.



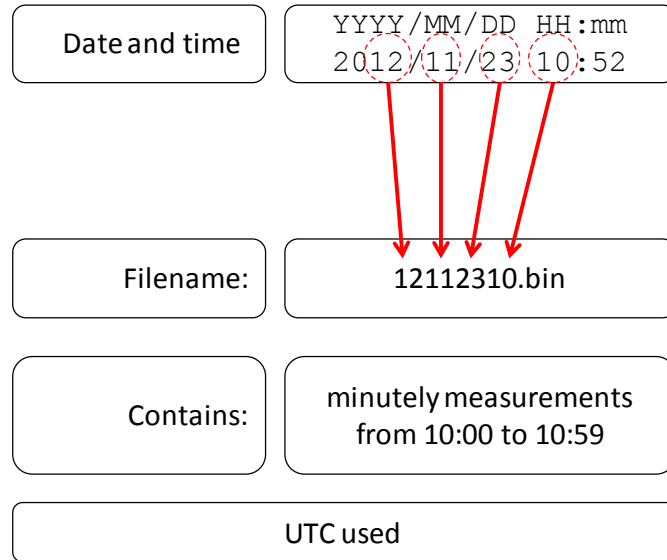
**Σχήμα 1.16:** Εξωτερική (αριστερά) και εσωτερική (δεξιά) φωτογραφία του σταθμού κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας (πηγή: <http://cosray.phys.uoa.gr>)

Ο μετρητής νετρονίων υποστηρίζεται από ηλεκτρονικές μονάδες και ειδικό λογισμικό που επιτρέπει την καταμέτρηση των παλμών για χρονικά διαστήματα ενός λεπτού (Sarlanis PhD, 2007). Οι παλμοί από κάθε θάλαμο ενισχύονται και ψηφιοποιούνται με χρήση ενισχυτών και διευκρινιστών και στη συνέχεια οδηγούνται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου φέρει PCI κάρτες για την καταμέτρησή τους. Παράλληλα γίνεται μέτρηση της πίεσης και της θερμοκρασίας με αισθητήρες, η τιμή των οποίων ψηφιοποιείται με ADCs. Ένα διάγραμμα του συστήματος δίνεται στο σχήμα 1.17:



**Σχήμα 1.17:** Διάγραμμα μετρητικού συστήματος του μετρητή νετρονίων της Αθήνας (πηγή: <http://cosray.phys.uoa.gr>)

Οι μετρήσεις που συλλέγει το σύστημα καταμέτρησης αποθηκεύονται σε δυαδικά αρχεία (binary files), προκειμένου να περιορίζεται το μέγεθος των αποθηκευμένων δεδομένων στη διάρκεια των ετών λειτουργίας του σταθμού. Συγκεκριμένα το σύστημα καταμέτρησης δημιουργεί ένα binary file για κάθε ώρα, μέσα στο οποίο αποθηκεύονται οι μετρήσεις των εξήντα λεπτών. Η κωδικοποίηση της αρχείου είναι 16-bit little endian και το όνομά του φέρει οκτώ ψηφία που προκύπτουν από το έτος, τον μήνα, την ημέρα και την ώρα της μέτρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.18. Οι μετρήσεις που αποθηκεύονται κάθε λεπτό δίνονται στον πίνακα 1.4.



**Σχήμα 1.18:** Ονοματολογία και περιεχόμενο των *binary files* του συστήματος καταμέτρησης

	Field
1	measurement of counter 1
2	measurement of counter 2
3	measurement of counter 3
4	measurement of counter 4
5	measurement of counter 5
6	measurement of counter 6
7	pressure 1
8	pressure 2
9	average pressure
10	temperature
11	not used (for meteorological use)
12	not used (for meteorological use)
13	length of measurement
14	minute of the hour

**Πίνακας 1.4:** Μετρήσεις που αποθηκεύονται κάθε λεπτό στο *binary file*. Τα δύο πεδία που δε χρησιμοποιούνται προορίζονται για μετεωρολογικές μετρήσεις, όπως ταχύτητα ανέμου και υγρασία.



Λόγω της μακρόχρονης πορείας, η ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας της Αθήνας έχει αναπτύξει έναν αριθμό αλγορίθμων και εφαρμογών για την επεξεργασία και τη μελέτη των μετρήσεων από τους μετρητές νετρονίων. Η τεχνογνωσία που έχει αποκτηθεί οδήγησε στη δημιουργία του Athens Neutron Monitor Data Processing Center (A.N.MO.DA.P.) καθώς και στην οργάνωση των υπολοίπων σταθμών κατά την δημιουργία του NMDB (Mavromichalaki et al., 2001; 2005; 2009). Επιπλέον, η εγκατάσταση NMDB slave server στο σταθμό της Αθήνας, αποτέλεσμα της σημαντικής του παρουσίας, δίνει επιπλέον δυναμική αφού υπάρχει άμεση και ταχεία πρόσβαση στα δεδομένα όλων σχεδόν των σταθμών. Σε συνέχεια της πρωτοπόρας πορείας του σταθμού, η εργασία αυτή έρχεται να συνεισφέρει σε δύο σημαντικούς τομείς. Ο πρώτος τομέας αφορά στην ανάπτυξη αλγορίθμων για την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθώς και στην υλοποίηση εφαρμογών για το χειρισμό των δεδομένων προκειμένου να διασφαλίζεται η ποιότητα των μετρήσεων και να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που περιγράφηκαν στην παράγραφο 1.3.3. Ο δεύτερος τομέας αφορά στη μελέτη διαδικασιών και φαινομένων που σχετίζονται με τη κοσμική ακτινοβολία μέσω προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα έχουν δημοσιευτεί σε διεθνή περιοδικά ενώ έχουν παρουσιαστεί σε πλήθος συνεδρίων και συναντήσεων των σταθμών που συμμετέχουν στο NMDB.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ II

### Αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται το πρώτο κύριο μέρος της εργασίας που αφορά τη διόρθωση των δεδομένων των μετρητών νετρονίων σε πραγματικό χρόνο, ένα εξαιρετικά επίκαιρο θέμα μετά τη δημιουργία του NMDB. Γίνεται περιγραφή του προβλήματος της διόρθωσης των πρωτογενών δεδομένων, της αρχής λειτουργίας που ακολουθούν οι αλγόριθμοι διόρθωσης και της μεθόδου επεξεργασίας των ιστορικών δεδομένων που είναι απαραίτητη για την εξαγωγή στατιστικών συμπερασμάτων. Στη συνέχεια γίνεται εστίαση στην ανάπτυξη των νέων αλγορίθμων ANN και Edge Editor καθώς και στους βελτιστοποιημένους αλγορίθμους ANN Plus και Median Editor Plus. Τέλος γίνεται παρουσίαση της μεθόδου υπολογισμού του βαρομετρικού συντελεστή που είναι απαραίτητος για την διόρθωση των μετρήσεων ως προς την ατμοσφαιρική πίεση. Οι αλγόριθμοι έχουν δημοσιευθεί στις εργασίες Paschalis and Mavromichalaki (2012), Paschalis et al. (2013a, 2013b, 2013c)

#### 2.1. Διακυμάνσεις οργάνων και διόρθωση των μετρήσεων

##### 2.1.1. Φύση και μορφή των διακυμάνσεων

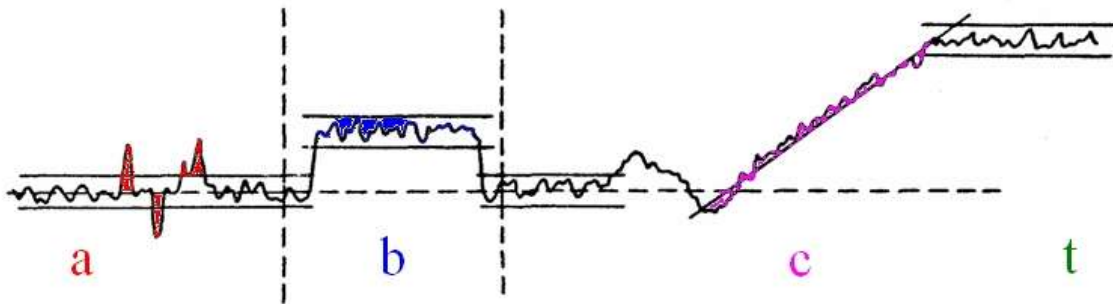
Η αρχή λειτουργίας του μετρητή νετρονίων καθώς και το γεγονός ότι η λειτουργία του υποστηρίζεται από ένα μεγάλο πλήθος ηλεκτρονικών μονάδων, έχει σαν αποτέλεσμα ο ρυθμός καταμέτρησης των παλμών από κάθε αναλογικό θάλαμο να επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Η σύλληψη ενός νετρονίου σε κάποιον από τους αναλογικούς θαλάμους εκκινεί μία διαδικασία καταμέτρησης η οποία, μέσω της ενίσχυσης και της ψηφιοποίησης του σήματος, καταλήγει στην καταγραφή ενός παλμού από το μετρητικό σύστημα. Η αλλαγή κάποιας ηλεκτρονικής μονάδας, καλωδίου ή συνδεσμολογίας λόγω φθοράς, η ανταλλαγή ηλεκτρονικών μονάδων μεταξύ των θαλάμων, η αλλαγή στις ρυθμίσεις κάποιας μονάδας είναι πιθανό να αλλάξει το ρυθμό

καταμέτρησης των παλμών. Το ίδιο μπορεί να συμβεί αν υπάρξουν αλλαγές στη θέση του μετρητή νετρονίων ή αντιμετάθεση των αναλογικών θαλάμων μέσα σε αυτόν δεδομένου ότι εκ κατασκευής μπορεί να υπάρχουν μικροδιαφορές στα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, αλλαγές στο αέριο που φέρουν οι αναλογικοί θάλαμοι λόγω διαρροών είναι αναμενόμενο να μεταβάλουν τον αριθμό των παλμών που καταμετρούνται. Τέλος, εξωτερικοί παράγοντες όπως η ύπαρξη χιονιού ή πάγου στην οροφή του κτίσματος που βρίσκεται ο μετρητής νετρονίων επηρεάζει τον ρυθμό καταμέτρησης, αφού επηρεάζει τον αριθμό των σωματιδίων που φθάνουν σε αυτόν.

Παρότι οι παραπάνω παράγοντες επηρεάζουν τον ρυθμό μέτρησης των παλμών από τους αναλογικούς θαλάμους, δεν αποτελούν σοβαρό πρόβλημα για την επιστημονική ομάδα που διαχειρίζεται τα δεδομένα. Ο λόγος είναι ότι οι παράγοντες αυτοί αποτελούν μόνιμες ή διαχειρίσιμες μεταβολές, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αποτελούν τμήμα της συντήρησης του σταθμού. Για παράδειγμα, η αλλαγή μιας ηλεκτρονικής μονάδας λόγω φθοράς, η αλλαγή σε κάποια ρύθμιση, η αλλαγή της θέσης του μετρητή νετρονίων ή η αντιμετάθεση των αναλογικών θαλάμων είναι ενέργειες της ίδιας της ομάδας που γίνονται με κάποια σκοπιμότητα και με γνώση του αποτελέσματος που επιφέρει. Επιπλέον, η αλλοίωση των χαρακτηριστικών του αερίου που φέρουν οι αναλογικοί θάλαμοι στις περισσότερες φορές γίνεται σταδιακά και η ομάδα μπορεί να την παρακολουθήσει. Τέλος, η ύπαρξη πάγου ή χιονιού διαπιστώνεται εύκολα και στις περισσότερες περιπτώσεις γίνονται οι προβλεπόμενες ενέργειες καθαρισμού.

Ωστόσο, πέρα από τις παραπάνω προβλέψιμες και διαχειρίσιμες μεταβολές, οι ηλεκτρονικές μονάδες που υποστηρίζουν τον μετρητή νετρονίων εμφανίζουν τυχαίες δυσλειτουργίες οι οποίες εκδηλώνονται είτε στιγμιαία είτε για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα και συνεπάγονται μεταβολή στον αριθμό των μετρούμενων παλμών από έναν ή περισσότερους αναλογικούς θαλάμους. Αν και αυτές οι δυσλειτουργίες δεν είναι συνηθισμένες, αποτελούν σημαντικό πρόβλημα αφού είναι μη προβλέψιμες και μειώνουν την ποιότητα των δεδομένων. Λόγω του ότι τα προβλήματα αυτά αποδίδονται σε διακυμάνσεις της λειτουργίας των συστημάτων που υποστηρίζουν τον μετρητή νετρονίων, η ορολογία που χρησιμοποιείται για την περιγραφή τους είναι διακυμάνσεις οργάνων (instruments variations). Οι διακυμάνσεις διακρίνονται σε τρία είδη που

απεικονίζονται στο σχήμα 2.1 (Belov et al., 1988; Chilingarian et al., 2009; Hovhannisyan and Chilingarian, 2011) :

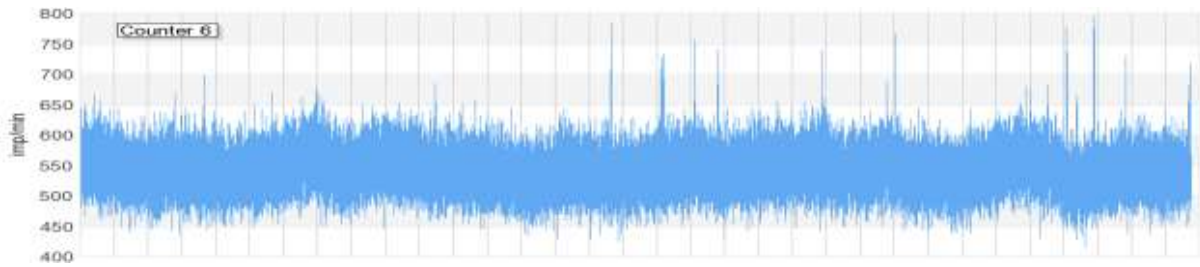


**Σχήμα 2.1:** Αποτύπωση των τριών διακυμάνσεων οργάνων, (a) απότομη κορυφή, (b) μεταβολή του ρυθμού με επαναφορά, (c) αργή ολίσθηση χωρίς επαναφορά.

Η πρώτη κατηγορία διακύμανσης είναι η πιο συνηθισμένη και αφορά απότομες κορυφές στο ρυθμό μέτρησης που εμφανίζονται για λίγες διαδοχικές μετρήσεις (συνήθως μια μέτρηση). Η δεύτερη κατηγορία είναι λιγότερο συνηθισμένη και αφορά μεταβολή στο ρυθμό μέτρησης του αναλογικού θαλάμου για κάποιο χρονικό διάστημα η οποία ακολουθείται από επαναφορά στο κανονικό ρυθμό μέτρησης. Η τρίτη κατηγορία είναι η πιο σπάνια και αφορά την αργή μεταβολή (ολίσθηση) του μετρούμενου ρυθμού ενός αναλογικού θαλάμου χωρίς επαναφορά. Η τελευταία κατηγορία σχετίζεται περισσότερο με μόνιμες μεταβολές στις συνθήκες λειτουργίας των ηλεκτρονικών μονάδων που υποστηρίζουν τον αναλογικό θάλαμο παρά σε τυχαίες διακυμάνσεις.

### 2.1.2. Αρχή λειτουργίας αλγορίθμων διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

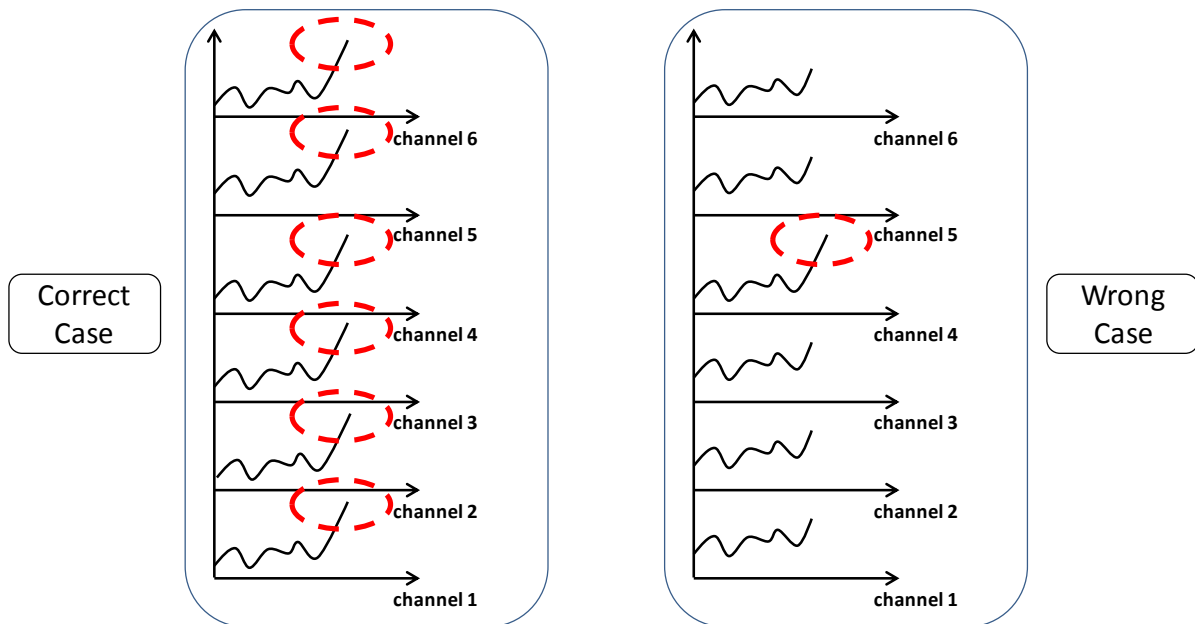
Οι διακυμάνσεις των οργάνων αλλοιώνουν τις μετρήσεις και για το λόγο αυτό η διόρθωσή τους κρίνεται επιβεβλημένη προκειμένου να διατηρηθεί η ποιότητά τους σε υψηλά επίπεδα. Η διαδικασία αυτή μοιάζει τετριμμένη αν ληφθεί υπόψη μια πλήρης χρονοσειρά μετρήσεων ενός αναλογικού θαλάμου, όπως αυτή του σχήματος 2.2:



**Σχήμα 2.2:** Χρονοσειρά μετρήσεων αναλογικού θαλάμου όπου περιλαμβάνονται διακυμάνσεις οργάνων με τη μορφή κορυφών.

Συγκεκριμένα, έχοντας στη διάθεσή μας όλη τη χρονοσειρά των μετρήσεων και λαμβάνοντας υπόψη τη στατιστική των μετρήσεων που αποτυπώνεται με τη μορφή της μπλε λωρίδας, οι προβληματικές κορυφές που απεικονίζονται μπορούν εύκολα να αποκοπούν είτε οπτικά είτε αυτοματοποιημένα με τη χρήση αλγορίθμων που συγκρίνουν κάθε τιμή με αυτές που προηγούνται και με αυτές που έπονται.

Ωστόσο μια τέτοια διαδικασία δε μπορεί να εφαρμοστεί όταν έρχεται στο προσκήνιο ο έλεγχος των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση είναι γνωστές μόνο οι τιμές που μετρήθηκαν από τον αναλογικό θάλαμο και όχι οι τιμές που θα ακολουθήσουν, επομένως μία μεταβολή στο ρυθμό καταμέτρησης ενός αναλογικού θαλάμου δεν μπορεί άμεσα να διαπιστωθεί αν αντιπροσωπεύει τη στατιστική διακύμανση των μετρήσεων, αν οφείλεται σε μεταβολή των σωματιδίων που φθάνουν στον ανιχνευτή ή αν είναι αποτέλεσμα διακύμανσης οργάνων. Το πρόβλημα της διόρθωσης των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο επιλύεται με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων οι οποίοι εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι ο μετρητής νετρονίων αποτελείται από πολλούς αναλογικούς θαλάμους και προβαίνουν σε σύγκριση των μετρήσεων μεταξύ τους προκειμένου να διαπιστώσουν αν κάποιος αναλογικός θάλαμος εμφανίζει μεταβολή που δεν παρατηρείται στους υπολοίπους. Η συγκεκριμένη αρχή λειτουργίας αποτυπώνεται γραφικά στο σχήμα 2.3. Σύμφωνα με το διάγραμμα, όταν παρατηρείται μεταβολή του ρυθμού καταμέτρησης σε όλους τους αναλογικούς θαλάμους, η μεταβολή κρίνεται μη προβληματική. Αντίθετα, όταν παρατηρείται μεταβολή μόνο σε έναν αναλογικό θάλαμο τότε η μεταβολή κρίνεται εσφαλμένη.



**Σχήμα 2.3:** Αρχή λειτουργίας αλγορίθμων διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Στην αριστερή περίπτωση παρατηρείται αύξηση του ρυθμού μέτρησης σε όλους τους αναλογικούς θαλάμους την ίδια στιγμή, περίπτωση που θεωρείται μη προβληματική. Στη δεξιά περίπτωση που θεωρείται εσφαλμένη, η αύξηση παρατηρείται μόνο σε έναν αναλογικό θάλαμο.

Η συγκεκριμένη αρχή λειτουργίας φαίνεται αρκετά απλοϊκή δεδομένου ότι η επεξεργασία ενός συνόλου αριθμών συναντάται συχνά στη στατιστική. Για παράδειγμα, όταν το πλήθος των αριθμών είναι μεγάλο, η απόρριψη τιμών που παραβιάζουν τη στατιστική του δείγματος μπορεί να γίνει με εφαρμογή του Q-test (Rorabacher, 1991). Ωστόσο η επίλυση του προβλήματος δυσχεραίνεται όταν το πλήθος των αριθμών του δείγματος μειώνεται, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των θαλάμων του μετρητή νετρονίων. Η εξαγωγή στατιστικής πληροφορίας από μικρό δείγμα αριθμών είναι ένα θέμα που συναντάται συχνά σε εφαρμογές της ιατρικής και της χημείας (Dean & Dixon, 1951). Στη περίπτωση του μετρητή νετρονίων, η εφαρμογή της παραπάνω αρχής λειτουργίας παρουσιάζει αρκετά μεγάλη πολυπλοκότητα ειδικά σε περιπτώσεις όπου πάνω από ένας αναλογικός θάλαμος παρουσιάζει προβληματική συμπεριφορά. Στην πράξη οι αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι στατιστικοί αλγόριθμοι οι οποίοι, λαμβάνοντας υπόψη τα στατιστικά χαρακτηριστικά

των μετρήσεων των θαλάμων σε βάθος χρόνου, δίνουν αποτέλεσμα με κάποια στατιστική ακρίβεια, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνεται ο αριθμός των αναλογικών θαλάμων του μετρητή νετρονίων.

Οι αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο απαιτείται να διαθέτουν τρία βασικά χαρακτηριστικά:

- να είναι αρκετά γρήγοροι προκειμένου να μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικό χρόνο
- να αποκόπτουν όλες τις προβληματικές μετρήσεις
- να αφήνουν αναλλοίωτες τις μη προβληματικές μετρήσεις

Από τα χαρακτηριστικά αυτά, το πρώτο είναι πολύ εύκολο να ικανοποιηθεί δεδομένης της ισχύος των σύγχρονων υπολογιστικών συστημάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις, η εφαρμογή των αλγορίθμων απαιτεί ελάχιστο χρόνο έτσι ώστε οι μετρήσεις να διορθώνονται ουσιαστικά "on the fly" κατά τη μεταφορά τους από το μετρητικό σύστημα στη βάση δεδομένων που αποθηκεύονται. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι επίσης σχετικά εύκολο να ικανοποιηθεί, ωστόσο έρχεται σε αντίθεση με το τρίτο χαρακτηριστικό. Συγκεκριμένα, δεδομένου ότι οι μετρήσεις του αναλογικού θαλάμου παρουσιάζουν εκ φύσεως στατιστική διακύμανση, ο χαρακτηρισμός μίας τιμής ως προβληματική μπορεί να γίνει μέσα σε κάποιο διάστημα εμπιστοσύνης. Επομένως ένας αλγόριθμος πρέπει να βρει τη χρυσή τομή ανάμεσα στη στατιστική διακύμανση των μετρήσεων και στο όριο πάνω από το οποίο μια τιμή θα χαρακτηρίζεται ως εσφαλμένη. Στην πράξη, έχει παρατηρηθεί ότι οι αλγόριθμοι διόρθωσης των πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο έχουν την τάση να αλλοιώνουν τις μη προβληματικές τιμές, συμπιέζοντας τη στατιστική τους διακύμανση, φαινόμενο το οποίο αποτυπώνεται στο σχήμα 2.4:





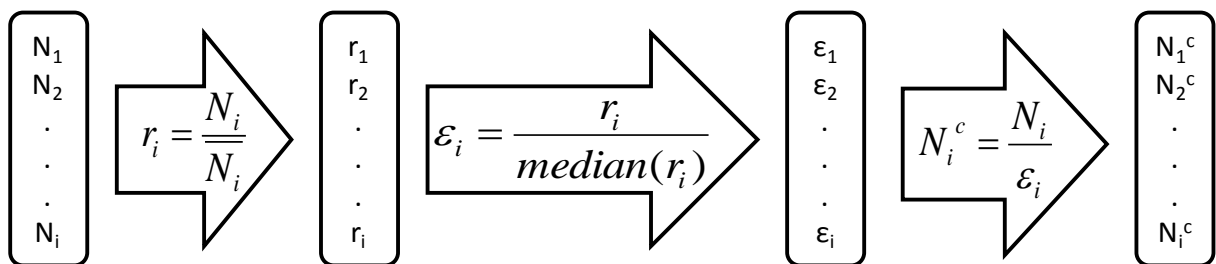
**Σχήμα 2.4:** Διόρθωση μετρήσεων αναλογικού θαλάμου όπου αποτυπώνεται το φαινόμενο αλλοίωσης των μη προβληματικών τιμών που εκδηλώνεται με συμπίεση της στατιστικής των διορθωμένων μετρήσεων.

Με τη δημιουργία της παγκόσμιας βάσης μετρήσεων NMDB, η ανάπτυξη αλγορίθμων διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο θεωρείται κύριας σημασίας, ενώ η επιστημονική έρευνα επικεντρώνεται στην ανάπτυξη αλγορίθμων που να εξαλείφουν το φαινόμενο της αλλοίωσης των μη προβληματικών μετρήσεων, όπως παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.4.

### 2.1.3. Καθιερωμένοι αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Η ανάπτυξη αλγορίθμων διόρθωσης των πρωτογενών μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο αποτελεί ένα νέο σχετικά επιστημονικό πεδίο που ήρθε στο προσκήνιο κυρίως μετά την δημιουργία της παγκόσμιας βάσης δεδομένων των μετρητών νετρονίων. Η καθιέρωση της χρήσης αυτών των αλγορίθμων επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι μεταξύ των μετρήσεων που αποστέλλουν κάθε λεπτό οι σταθμοί στο NMDB περιλαμβάνονται και οι διορθωμένες τιμές ως προς τις διακυμάνσεις των οργάνων (corrected for efficiency measurements). Πολύ σημαντική παρουσία στην ανάπτυξη τέτοιων αλγορίθμων έχει η ομάδα κοσμικής ακτινοβολίας του IZMIRAN (Ρωσία), η οποία έχει υλοποιήσει και βελτιώσει μία σειρά αλγορίθμων με γνωστότερους τους Super Editor και Median Editor (Yanke et al., 2011).

Ο Median Editor αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους για τους μετρητές νετρονίων, ενώ διακρίνεται για την απλή εφαρμογή του. Προκειμένου να εφαρμοστεί, απαιτεί τον υπολογισμό της μέσης στάθμης μέτρησης  $\bar{N}_i$  κάθε αναλογικού θαλάμου 'i' του μετρητή νετρονίων (baseline), η οποία αντιστοιχεί στο μέσο όρο των μετρήσεων του για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Με βάση αυτές τις παραμέτρους, ο έλεγχος και η διόρθωση των μετρήσεων  $N_i$  των αναλογικών θαλάμων σε πραγματικό χρόνο πραγματοποιείται ακολουθώντας τη διαδικασία που απεικονίζεται στο σχήμα 2.5:



**Σχήμα 2.5:** Εφαρμογή αλγορίθμου Median Editor (Yanke et al., 2011). Ως  $N_i$  συμβολίζεται η προς διόρθωση τιμή του θαλάμου  $i$  ενώ ως  $\bar{N}_i$  η μέση στάθμη μέτρησής του βάσει των ιστορικών μετρήσεων του μετρητή νετρονίων.

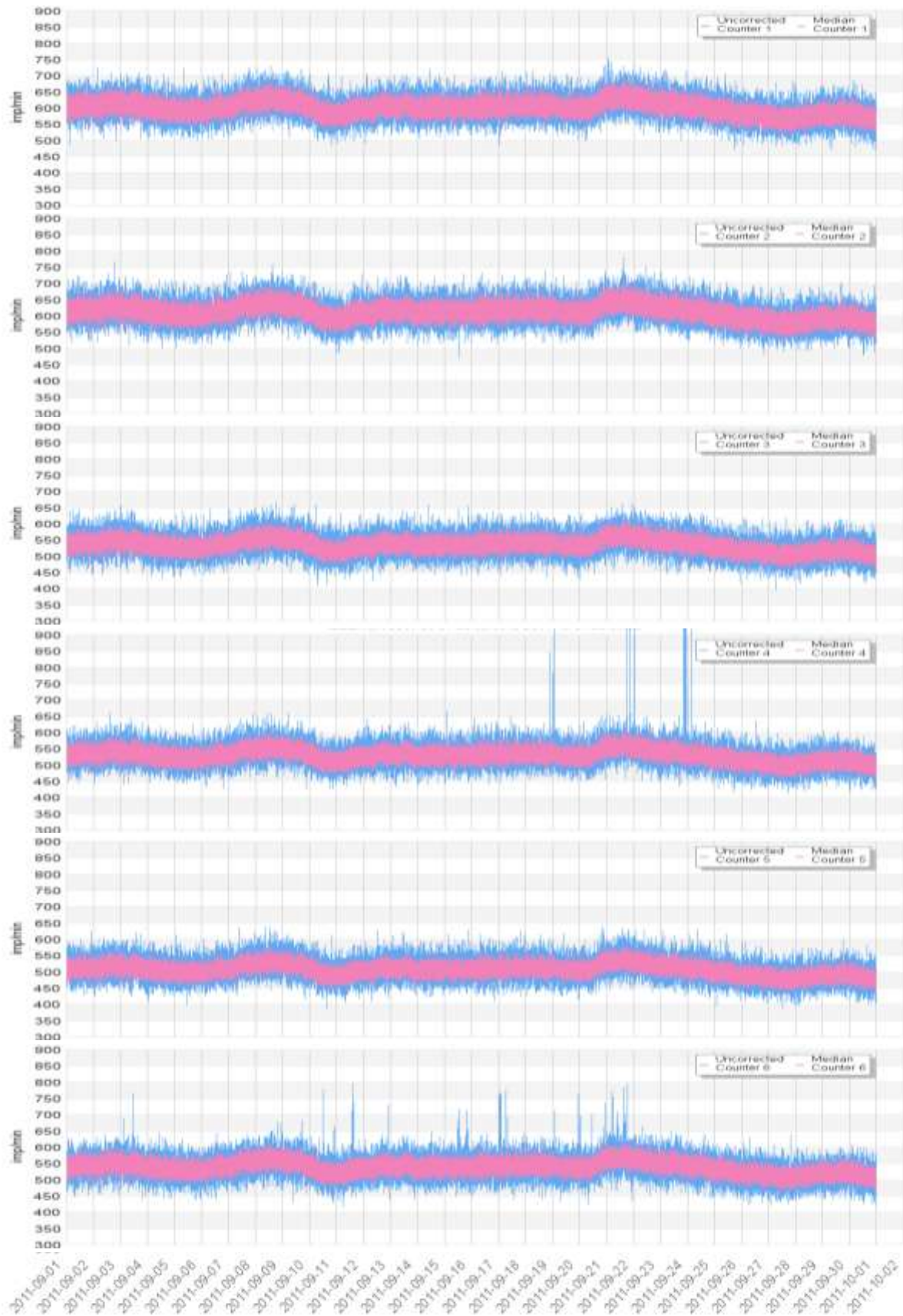
Αρχικά γίνεται υπολογισμός των λόγων  $r_i = \frac{N_i}{\bar{N}_i}$  που εκφράζουν τη μεταβολή της

μέτρησης κάθε θαλάμου σε σχέση με τη μέση στάθμη μέτρησής του. Ενώ η απευθείας σύγκριση των μετρήσεων  $N_i$  δεν είναι ενδεικτική της κατάστασης κάθε θαλάμου, αφού κάθε θάλαμος μετρά σε διαφορετική στάθμη μέτρησης λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του, η απευθείας σύγκριση των λόγων  $r_i$  είναι εφικτή. Κεντρική σημασία στον αλγόριθμο έχει ο υπολογισμός της ενδιάμεσης τιμής (median value) των λόγων  $r_i$  (πaráμετρος  $\theta$ ), που από στατιστικής πλευράς αποτελεί μία ασφαλή εκτίμηση της μεταβολής που εμφανίζουν οι θάλαμοι σε σχέση με τη μέση στάθμη μέτρησής τους.

Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός των ποσοτήτων  $\epsilon_i = \frac{r_i}{\text{median}(r_i)}$ , όπου η παράμετρος  $\epsilon_i$  ονομάζεται απόδοση (efficiency) του θαλάμου. Θεωρώντας ότι η median value των λόγων  $r_i$  εκφράζει την ενδεικτική συμπεριφορά των θαλάμων, η efficiency  $\epsilon_i$

εκφράζει το πόσο διαφέρει η συμπεριφορά κάθε θαλάμου από αυτή την ενδεικτική συμπεριφορά. Όταν ένας θάλαμος ακολουθεί την ενδεικτική συμπεριφορά τότε  $r_i \approx \text{median}(r_i)$  και η efficiency είναι κοντά στη μονάδα. Αντίθετα όταν η συμπεριφορά του θαλάμου διαφέρει από την ενδεικτική συμπεριφορά τότε η efficiency είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από τη μονάδα ανάλογα με το αν θάλαμος εμφανίζει μεγάλη αύξηση ή μείωση αντίστοιχα σε σχέση με την ενδεικτική συμπεριφορά. Η διορθωμένη τιμή κάθε θαλάμου προέρχεται από το λόγο  $N_i^c = \frac{N_i}{\varepsilon_i}$  και συμπίπτει με την αρχική όταν η efficiency είναι μονάδα, ενώ μειώνεται ή αυξάνεται σε σχέση με την αρχική όταν η efficiency είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη αντίστοιχα από τη μονάδα.

Ο αλγόριθμος Median Editor παίρνει το όνομα του από το κεντρικό ρόλο που έχει ο υπολογισμός της ενδιάμεσης τιμής των  $r_i$  προκειμένου να υπολογιστεί η απόδοση του κάθε ανιχνευτή. Η ευκολία στην υλοποίηση του και οι ελάχιστες παράμετροι που απαιτεί (μέση στάθμη μέτρησης  $\overline{N}_i$  κάθε θαλάμου) τον έχουν καθιερώσει ως τον πιο διαδεδομένο αλγόριθμο στους σταθμούς του παγκόσμιου δικτύου μετρητών νετρονίων. Ωστόσο ο Median Editor παρουσιάζει σαφή μειονεκτήματα που γίνονται εύκολα αντιληπτά από την επισκόπηση των διορθωμένων τιμών που παρέχει σε σχέση με της αρχικές. Ενδεικτικό παράδειγμα εφαρμογής του Median Editor δίνεται στο σχήμα 2.6, όπου παρουσιάζονται τα δεδομένα του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για τον Σεπτέμβριο του 2011. Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος διορθώνει ικανοποιητικά όλες τις προβληματικές τιμές των θαλάμων 4 και 6, όμως αλλοιώνει σημαντικά και όλες τις υπόλοιπες τιμές, συμπιέζοντας τη στατιστική των μετρήσεων. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην υλοποίηση μιας βελτιωμένης έκδοσης του Median Editor, η οποία ονομάζεται Median Editor Plus. Η βελτίωση έγκειται στην εισαγωγή ενός κριτηρίου ελέγχου των μετρήσεων και στη διόρθωση μόνο εκείνων που παραβιάζουν το κριτήριο αυτό. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τους Yanke et al. (2011), ο Median Editor Plus διορθώνει τις τιμές των θαλάμων οι οποίοι εμφανίζουν efficiency εκτός κάποιων ορίων. Εναλλακτική επιλογή αλγορίθμου από την ίδια επιστημονική ομάδα είναι ο αλγόριθμος Super Editor που ακολουθεί τη φιλοσοφία του Median Editor Plus, ωστόσο η εφαρμογή του είναι αρκετά πιο πολύπλοκη και δεν έχει τόσο ευρεία χρήση.



**Σχήμα 2.6:** Διόρθωση δεδομένων του μετρητή ветρονίων της Αθήνας για τον μήνα Σεπτέμβριο του 2011 χρησιμοποιώντας τον Median Editor.

#### 2.1.4. Στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων του μετρητή νετρονίων

Η αρχή λειτουργίας του Median Editor είναι ενδεικτική του τρόπου με τον οποίο λειτουργούν οι αλγόριθμοι διόρθωσης των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι η εφαρμογή του αλγορίθμου απαιτεί την είσοδο όχι μόνο των μετρήσεων πραγματικού χρόνου των θαλάμων αλλά και δεδομένων που αφορούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά που έχουν οι μετρήσεις τους σε βάθος χρόνου. Η γνώση της στατιστικής είναι απαραίτητη προκειμένου ο αλγόριθμος διόρθωσης να γνωρίζει τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που έχουν οι μετρήσεις κάθε θαλάμου. Για παράδειγμα στην περίπτωση του Median Editor είναι απαραίτητη η γνώση της μέσης στάθμης μέτρησης κάθε θαλάμου που προκύπτει από το μέσο όρο των μετρήσεων του για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Αντίστοιχα δεδομένα που αφορούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων απαιτούνται και από τους αλγορίθμους που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας και θα παρουσιαστούν στις επόμενες παραγράφους.

Η διαδικασία υπολογισμού των χαρακτηριστικών που έχουν οι μετρήσεις κάθε θαλάμου βασίζεται στην στατιστική επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων του μετρητή νετρονίων. Η διαδικασία αυτή δεν είναι τετριμμένη δεδομένου ότι στα ιστορικά δεδομένα περιλαμβάνονται περιπτώσεις μετρήσεων όπου ένας ή περισσότεροι θάλαμοι ήταν εκτός λειτουργίας ή κατέγραψαν μετρήσεις αλλοιωμένες από τις διακυμάνσεις των οργάνων. Προκειμένου η στατιστική επεξεργασία να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα, είναι απαραίτητο να γίνει εκκαθάριση των ιστορικών δεδομένων ώστε να αφαιρεθούν προβληματικές περιπτώσεις μετρήσεων και να ληφθούν υπόψη μόνο οι μετρήσεις όπου όλοι οι θάλαμοι λειτουργούσαν με σωστό τρόπο. Μία μέθοδος διαλογής αυτών των δεδομένων έχει αναπτυχθεί και εφαρμοστεί στις εργασίες Paschalis and Mavromichalaki (2012) και Paschalis et al. (2013a).

Η μέθοδος θεωρεί ότι οι παλμοί που μετρά ο αναλογικός θάλαμος  $i$  του μετρητή νετρονίων εξαρτώνται από τις εξής τέσσερις παραμέτρους:

- Από την ροή σωματιδίων  $N$  που φθάνει στο μετρητή νετρονίων

- Από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του θαλάμου, τις ρυθμίσεις των ηλεκτρονικών που τον υποστηρίζουν καθώς και τη θέση του μέσα στο μετρητή νετρονίων, που εκφράζεται μέσω της παραμέτρου  $A_i$
- Από τη στατιστική διακύμανση  $\sigma_i$  της μέτρησης η οποία, όπως και η παράμετρος  $A_i$ , είναι διαφορετική για κάθε θάλαμο.
- Από την πιθανή ανεπιθύμητη διακύμανση  $\delta_i$  των οργάνων που σχετίζονται με τη μέτρηση

Επομένως η ροή που μετρά ο θάλαμος  $i$  δίνεται από τη σχέση:

$$N_i = N \cdot A_i \pm \sigma_i \pm \delta_i \quad (1)$$

Στην περίπτωση που οι διακυμάνσεις των οργάνων είναι μηδέν, ο λόγος των μετρήσεων των θαλάμων  $i$  και  $j$  είναι:

$$\frac{N_i}{N_j} = \frac{N \cdot A_i \pm \sigma_i}{N \cdot A_j \pm \sigma_j} = \frac{A_i}{A_j} \cdot \frac{\left(1 \pm \frac{\sigma_i}{N \cdot A_i}\right)}{\left(1 \pm \frac{\sigma_j}{N \cdot A_j}\right)} \quad (2)$$

Δεδομένου ότι οι στατιστικές διακυμάνσεις είναι πολύ μικρότερες από τη μέτρηση ( $\sigma_j \ll N \cdot A_j$ ), προκύπτει ότι:

$$\frac{1}{\left(1 \pm \frac{\sigma_j}{N \cdot A_j}\right)} \approx \left(1 \mp \frac{\sigma_j}{N \cdot A_j}\right) \quad (3),$$

και η εξίσωση (2) γίνεται:

$$\frac{N_i}{N_j} = \frac{A_i}{A_j} \cdot \left(1 \pm \frac{\sigma_i}{N \cdot A_i}\right) \cdot \left(1 \mp \frac{\sigma_j}{N \cdot A_j}\right) \quad (4)$$

Αν κρατήσουμε μόνο τους όρους πρώτης τάξης καταλήγουμε ότι:

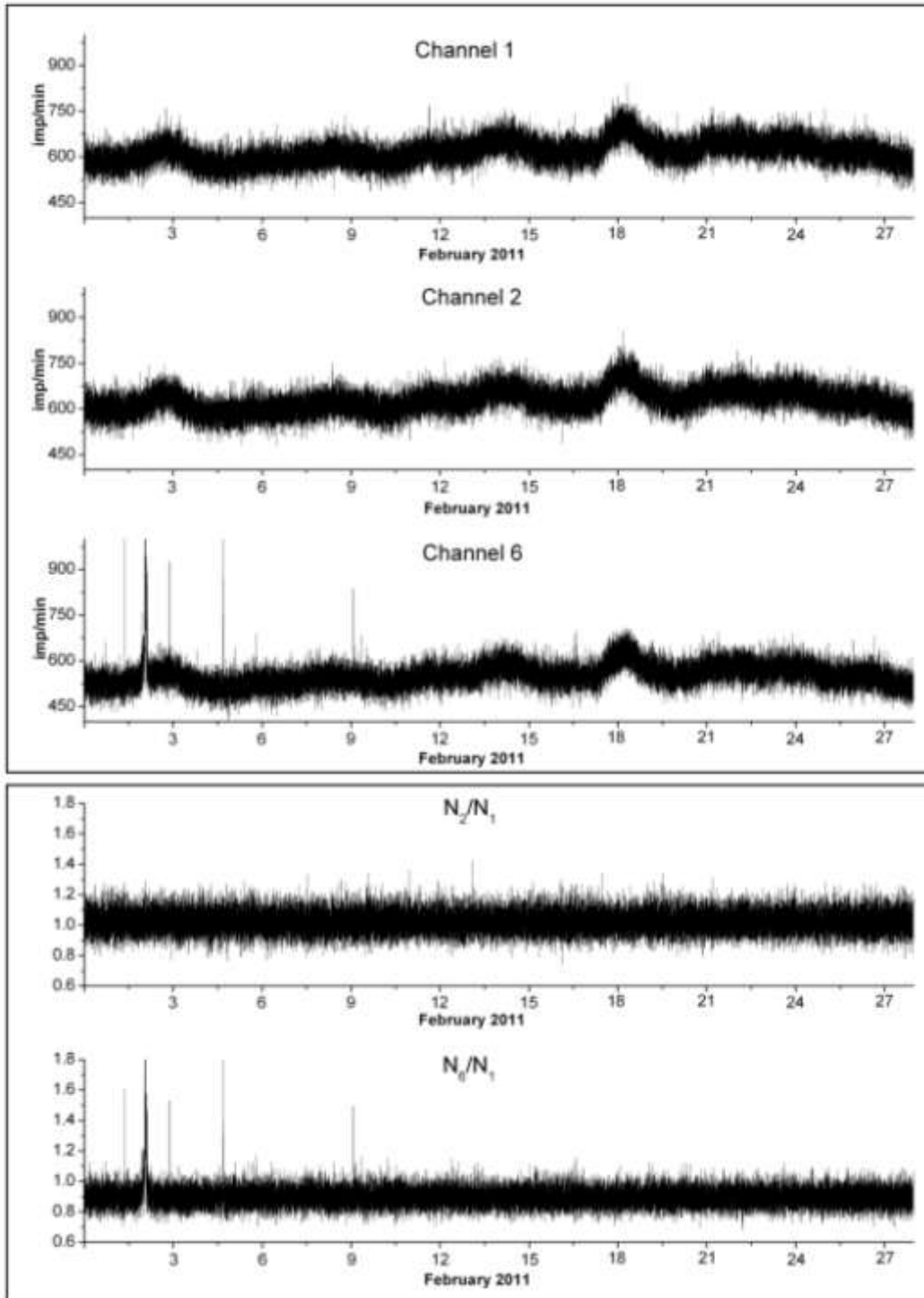
$$\frac{N_i}{N_j} = \frac{A_i}{A_j} \cdot \left( 1 \pm \frac{\sigma_i}{N \cdot A_i} \mp \frac{\sigma_j}{N \cdot A_j} \right) \quad (5)$$

Η εξίσωση (5) μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$\frac{N_i}{N_j} = R_{i,j} \pm \Sigma_{i,j} \quad (6),$$

$$\text{όπου } R_{i,j} = \frac{A_i}{A_j} \quad \text{και} \quad \Sigma_{i,j} = \frac{A_i}{A_j} \cdot \left( \pm \frac{\sigma_i}{N \cdot A_i} \mp \frac{\sigma_j}{N \cdot A_j} \right) \quad (7)$$

Οι παράμετροι  $A_i$  and  $A_j$  είναι σταθεροί, ενώ οι τιμές τους αναμένεται να μη διαφέρουν πολύ, επομένως η τιμή του  $R_{i,j}$  είναι μία σταθερή τιμή κοντά στη μονάδα. Επιπλέον, δεδομένου ότι  $\frac{\sigma_i}{N \cdot A_i} \ll 1$  και  $\frac{\sigma_j}{N \cdot A_j} \ll 1$ , προκύπτει ότι  $|\Sigma_{i,j}| \ll R_{i,j}$ . Συμπεραίνεται επομένως ότι ο λόγος των μετρήσεων  $\frac{N_i}{N_j}$  έχει μία σταθερή μέση τιμή  $R_{i,j}$  (κοντά στη μονάδα) και κυμαίνεται γύρω από αυτή λόγω των στατιστικών διακυμάνσεων  $\Sigma_{i,j}$ . Η κατάληξη σε αυτό το συμπέρασμα έγινε θεωρώντας ότι δεν υπάρχουν διακυμάνσεις οργάνων που αλλοιώνουν τις μετρήσεις. Σε περίπτωση που αυτό δεν ισχύει, η σταθερότητα το λόγου  $\frac{N_i}{N_j}$  διαταράσσεται, φαινόμενο που παρατηρείται στο σχήμα 2.7.



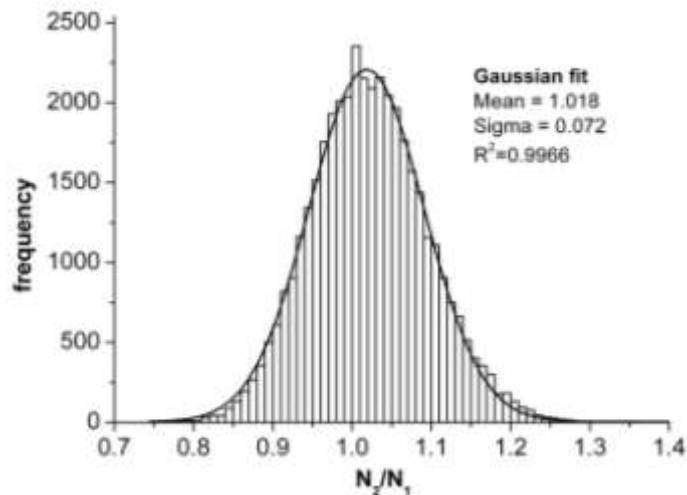
**Σχήμα 2.7:** Χρονοσειρά μετρήσεων των θαλάμων 1, 2 και 6 του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για το Φεβρουάριο 2011 καθώς και οι λόγοι  $\frac{N_2}{N_1}$  και  $\frac{N_6}{N_1}$ . Οι λόγοι παρουσιάζουν στατιστική διακύμανση γύρω από τη μονάδα, ενώ ο λόγος  $\frac{N_6}{N_1}$  διαταράσσεται λόγω των σφαλμάτων στον θάλαμο 6.



Όσον αφορά την κατανομή που ακολουθούν οι λόγοι  $\frac{N_i}{N_j}$ , ενδεικτικά οι τιμές του λόγου

$\frac{N_2}{N_1}$  για το Φεβρουάριο του 2011 σε μορφή ιστογράμματος δίνονται στο σχήμα 2.8, από

το οποίο συμπεραίνεται ότι ακολουθούν κανονική κατανομή:



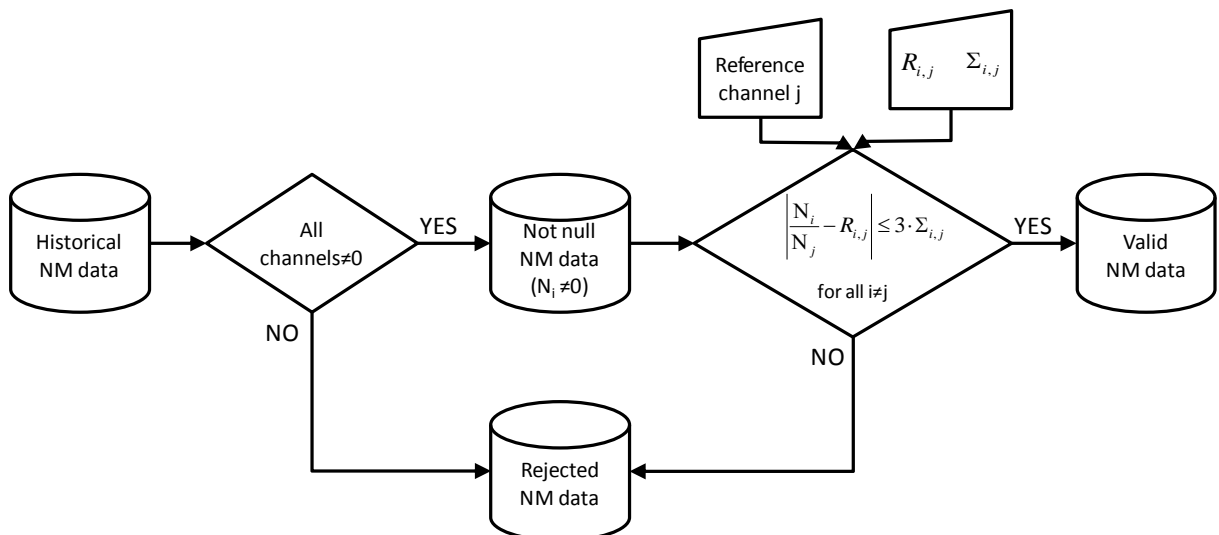
**Σχήμα 2.8:** Οι τιμές  $\frac{N_2}{N_1}$  του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για το Φεβρουάριο 2011 σε μορφή ιστογράμματος. Παρατηρείται ότι οι τιμές ακολουθούν κανονική κατανομή.

Το γεγονός ότι ο λόγος  $\frac{N_i}{N_j}$  ακολουθεί κανονική κατανομή είναι εξαιρετικά χρήσιμο αφού είναι δυνατό να υπολογιστούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της κατανομής του χρησιμοποιώντας τις γνωστές σχέσεις για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση. Ο υπολογισμός των στατιστικών χαρακτηριστικών που έχουν οι λόγοι  $\frac{N_i}{N_j}$  είναι πολύ χρήσιμος στη μέθοδο που ακολουθείται προκειμένου να γίνει εκκαθάριση των ιστορικών δεδομένων από μετρήσεις με προβλήματα. Συγκεκριμένα, όταν ο λόγος  $\frac{N_i}{N_j}$  είναι εκτός ενός καθορισμένου διαστήματος εμπιστοσύνης, τότε δύο ενδεχόμενα συμβαίνουν, είτε η μέτρηση  $N_i$  είτε η μέτρηση  $N_j$  είναι προβληματική. Ωστόσο, μία τιμή

$\frac{N_i}{N_j}$  που είναι εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης είναι ικανή αλλά όχι αναγκαία συνθήκη ότι οι επιμέρους μετρήσεις  $N_i$  και  $N_j$  είναι σωστές, αφού ενδέχεται και οι δύο να είναι προβληματικές. Παρόλα αυτά όταν σε μια μέτρηση οι λόγοι όλων των θαλάμων ως προς ένα κοινό θάλαμο αναφοράς είναι εντός των διαστημάτων εμπιστοσύνης είναι ικανή και αναγκαία συνθήκη αφού τότε υπάρχει η βεβαιότητα ότι καμία μέτρηση δεν είναι προβληματική. Πράγματι, η ύπαρξη ενός ή περισσότερων θαλάμων με προβληματικές μετρήσεις θα αντικατοπτρίζεται σε έναν ή περισσότερους λόγους, ανεξάρτητα από το αν ο θάλαμος αυτός έχει επιλεγεί ως θάλαμος αναφοράς ή όχι. Επομένως, οι μετρήσεις των ιστορικών δεδομένων του ανιχνευτή που θεωρούνται αξιόπιστες, είναι αυτές που τηρούν δύο συνθήκες:

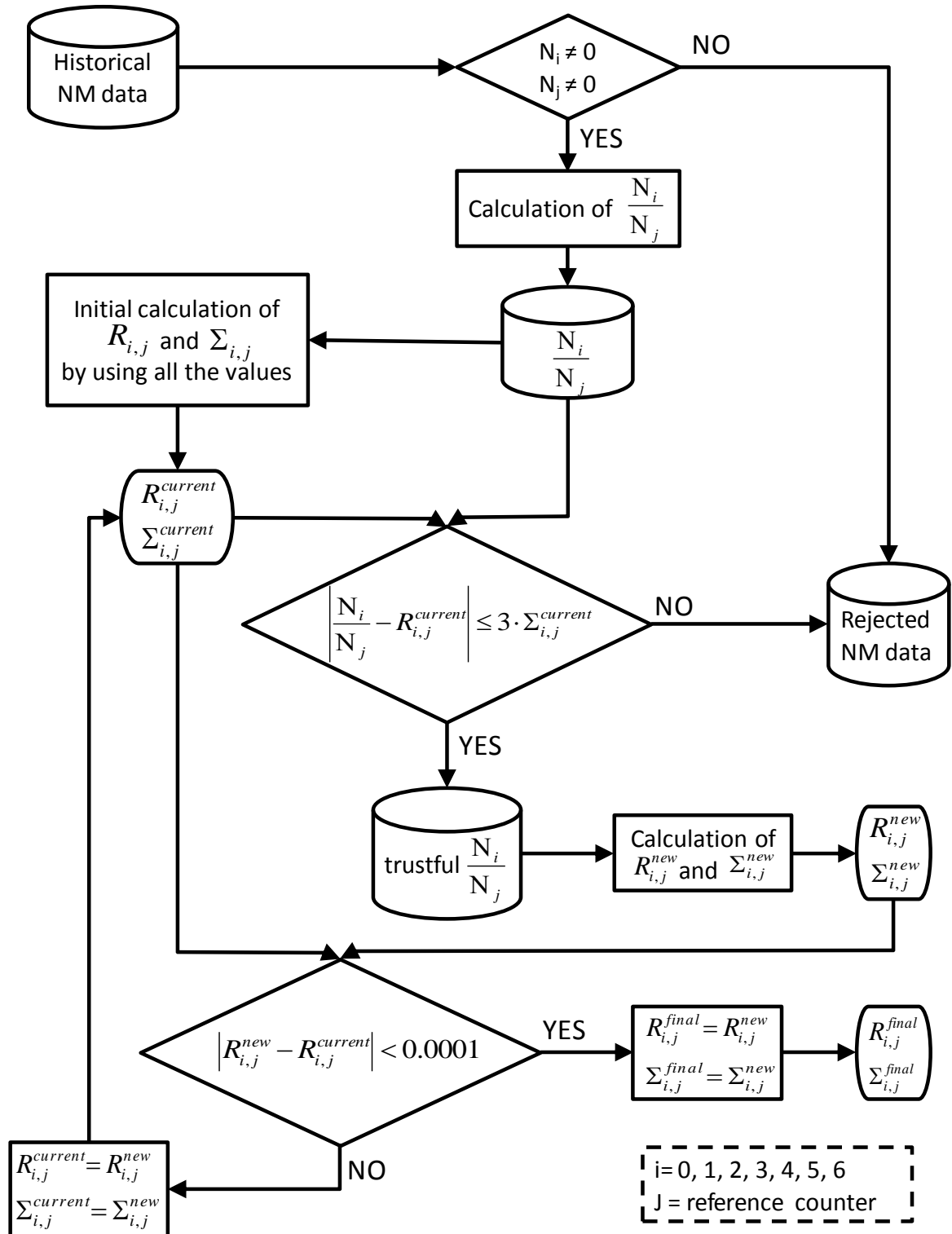
- όλοι οι θάλαμοι είναι σε λειτουργία
- όλοι οι λόγοι  $\frac{N_i}{N_j}$ , όπου  $j$  κάποιος τυχαίος θάλαμος αναφοράς, είναι εντός προκαθορισμένων διαστημάτων εμπιστοσύνης

Η διαδικασία που ακολουθείται προκειμένου να γίνει η εκκαθάριση των ιστορικών δεδομένων αποτυπώνεται στο σχήμα 2.9:



**Σχήμα 2.9:** Διαλογή έγκυρων ιστορικών δεδομένων μέσω ελέγχου της τιμής των λόγων  $\frac{N_i}{N_j}$ .

Προκειμένου να εφαρμοστεί η παραπάνω μέθοδος απαιτείται πρώτα ο υπολογισμός των στατιστικών χαρακτηριστικών που έχουν οι λόγοι  $\frac{N_i}{N_j}$  των θαλάμων ως προς τον θάλαμο αναφοράς  $j$ . Ωστόσο ο υπολογισμός θα πρέπει να γίνει λαμβάνοντας υπόψη τα έγκυρα ιστορικά δεδομένα τα οποία, σύμφωνα με το σχήμα 2.9, για να καθοριστούν απαιτείται η προγενέστερη γνώση των  $\frac{N_i}{N_j}$ . Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτή η ασυμβατότητα, ο υπολογισμός των λόγων των θαλάμων  $N_i$  ως προς τον κοινό θάλαμο αναφοράς  $j$  γίνεται ταυτόχρονα ακολουθώντας μια επαναληπτική διαδικασία που συγκλίνει στη μέση τιμή και στην τυπική απόκλιση, αποκλείοντας σταδιακά από τους υπολογισμούς τις προβληματικές μετρήσεις. Η διαδικασία αυτή απεικονίζεται στο σχήμα 2.10. Ξεκινώντας από το σύνολο των ιστορικών δεδομένων, αρχικά γίνεται υπολογισμός των λόγων  $\frac{N_i}{N_j}$  για τις μετρήσεις όπου οι θάλαμοι έχουν μη μηδενικές τιμές. Χρησιμοποιώντας όλες τις τιμές των λόγων  $\frac{N_i}{N_j}$  γίνεται ένας αρχικός υπολογισμός της μέσης τιμής  $R_{i,j}$  και της τυπικής απόκλισης  $\Sigma_{i,j}$  για κάθε έναν από αυτούς. Στη συνέχεια γίνεται επαναληπτικά νέος υπολογισμός των  $R_{i,j}$  και  $\Sigma_{i,j}$  χρησιμοποιώντας μόνο τις τιμές των  $\frac{N_i}{N_j}$  που είναι εντός των διαστημάτων εμπιστοσύνης  $3\sigma$ , λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των  $R_{i,j}$  και  $\Sigma_{i,j}$  που έχουν υπολογιστεί μέχρι εκείνη τη στιγμή από το προηγούμενο βήμα. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν τα νέα  $R_{i,j}$  διαφέρουν από τον προηγούμενο υπολογισμό κατά μία ελάχιστη τιμή.



**Σχήμα 2.10:** Επαναληπτική διαδικασία που συγκλίνει στον υπολογισμό της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των λόγων  $\frac{N_i}{N_j}$ .

Βάσει της παραπάνω μεθόδου, ο υπολογισμός των στατιστικών χαρακτηριστικών που έχουν οι λόγοι  $\frac{N_i}{N_j}$  για το μετρητή νετρονίων της Αθήνας, χρησιμοποιώντας τα ιστορικά δεδομένα των ετών από το 2007 έως το 2011 δίνεται στον πίνακα 2.1:

		Counter i											
		1		2		3		4		5		6	
		R <sub>i,j</sub>	Σ <sub>i,j</sub>	R <sub>i,j</sub>	Σ <sub>i,j</sub>	R <sub>i,j</sub>	Σ <sub>i,j</sub>	R <sub>i,j</sub>	Σ <sub>i,j</sub>	R <sub>i,j</sub>	Σ <sub>i,j</sub>	R <sub>i,j</sub>	Σ <sub>i,j</sub>
Counter j	1	1	0	1.021	0.074	0.893	0.068	0.885	0.069	0.849	0.065	0.895	0.060
	2	0.984	0.071	1	0	0.876	0.059	0.870	0.074	0.833	0.056	0.879	0.067
	3	1.126	0.085	1.146	0.077	1	0	0.995	0.087	0.954	0.074	1.006	0.080
	4	1.134	0.078	1.156	0.088	1.011	0.080	1	0	0.961	0.078	1.013	0.079
	5	1.184	0.090	1.205	0.081	1.054	0.082	1.046	0.093	1	0	1.057	0.084
	6	1.122	0.075	1.144	0.086	1.000	0.079	0.992	0.085	0.951	0.075	1	0

**Πίνακας 2.1:** Αποτελέσματα υπολογισμού της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης των λόγων  $\frac{N_i}{N_j}$  για το μετρητή νετρονίων της Αθήνας χρησιμοποιώντας τα ιστορικά δεδομένα από το 2007 έως το 2011.

Με την ανωτέρω μέθοδο γίνεται εκκαθάριση των ιστορικών δεδομένων από τις προβληματικές μετρήσεις και δημιουργείται ένα αξιόπιστο δείγμα μετρήσεων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να υπολογιστούν στατιστικά στοιχεία που απαιτούνται από τους αλγόριθμους διόρθωσης των μετρήσεων. Αναφορικά με τον Median Editor που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο και για τον οποίο απαιτείται ο υπολογισμός της μέσης τιμής μέτρησης των θαλάμων, χρησιμοποιώντας την παραπάνω τεχνική στα δεδομένα του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για την περίοδο από 2007 έως 2011 προκύπτει ότι :

	counter 1	counter 2	counter 3	counter 4	counter 5	counter 6
average counts (imp/min)	615	627	547	542	519	551

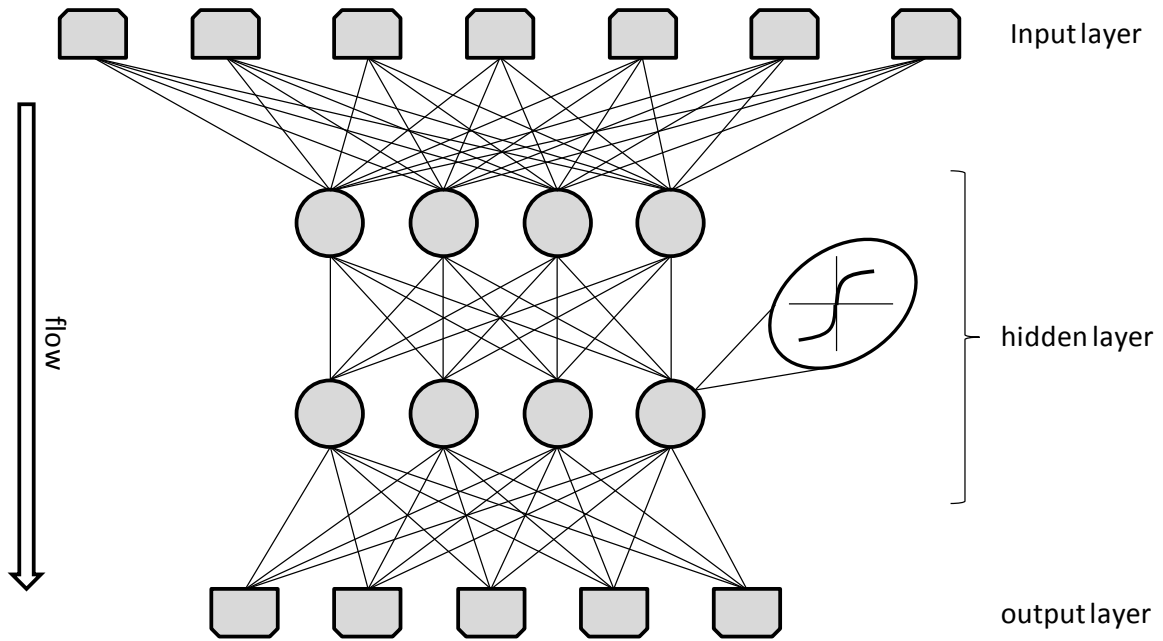
**Πίνακας 2.2:** Μέση τιμή μέτρησης των θαλάμων του μετρητή νετρονίων της Αθήνας χρησιμοποιώντας τα έγκυρα ιστορικά δεδομένα από το 2007 έως το 2011.

## 2.2. Διόρθωση δεδομένων με χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

### 2.2.1. Αρχή λειτουργίας Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Ο πρώτος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τη διόρθωση των πρωτογενών δεδομένων του μετρητή νετρονίων βασίζεται στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Paschalis et al., 2013a). Στον αλγόριθμο αυτό δόθηκε η ονομασία ANN εξαιτίας της αγγλικής ορολογίας των τεχνητών νευρωνικών δικτύων που είναι Artificial Neural Network. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι ένα γνωστό υπολογιστικό εργαλείο που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα πλήθος επιστημονικών πεδίων. Το εργαλείο αυτό έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν και στο πεδίο της κοσμικής ακτινοβολίας (Riggi et al., 2007), ωστόσο στη διόρθωση των πρωτογενών δεδομένων του μετρητή νετρονίων χρησιμοποιείται για πρώτη φορά. Εξαιτίας της ευρείας χρήσης του, πληροφορίες σχετικά με το εργαλείο αυτό μπορούν να αντληθούν από πλήθος πηγών του διαδικτύου. Στη συνέχεια δίνονται τα σημαντικότερα στοιχεία του εργαλείου προκειμένου να γίνει κατανοητή η ανάπτυξη του αλγορίθμου ANN.

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από δύο ή περισσότερα επίπεδα (layers), κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από κόμβους που ονομάζονται "νευρώνες" (neurons). Οι νευρώνες κάθε επιπέδου συνδέονται με τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου μέσω συνδέσεων που ονομάζονται "συνάψεις" (synapses). Κάθε σύναψη σχετίζεται με έναν συντελεστή βαρύτητας ο οποίος δρα ως πολλαπλασιαστής όταν μία τιμή μεταφέρεται διαμέσου αυτής. Σε κάθε νευρώνα οι τιμές που εισέρχονται αθροίζονται και το αποτέλεσμα επεξεργάζεται από μία συνάρτηση ενεργοποίησης η οποία συνήθως είναι μία σιγμοειδής συνάρτηση. Η έξοδος του νευρώνα μεταφέρεται μέσω των συνάψεων στο επόμενο επίπεδο και η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι το τελευταίο επίπεδο εξόδου. Η γενική δομή ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου αποτυπώνεται στο σχήμα 2.11:



**Σχήμα 2.11:** Τυπική μορφή τεχνητού νευρωνικού δικτύου

Είναι προφανές ότι ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από τουλάχιστον δύο επίπεδα, το επίπεδο εισόδου και το επίπεδο εξόδου. Πέρα από αυτά είναι δυνατό να περιλαμβάνει εσωτερικά επίπεδα τα οποία ονομάζονται "κρυφά" επίπεδα (hidden layers). Ο αριθμός των επιπέδων και των νευρώνων που τα συνθέτουν αποτελούν την αρχιτεκτονική του δικτύου.

Σκοπός του τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι να παρέχει συγκεκριμένες τιμές στο επίπεδο εξόδου όταν τροφοδοτείται με συγκεκριμένες τιμές στο επίπεδο εισόδου. Όταν το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο δημιουργείται, οι συντελεστές βαρύτητας που φέρουν οι συνάψεις παίρνουν προκαθορισμένες ή τυχαίες τιμές. Προκειμένου το δίκτυο να παράγει την επιθυμητή έξοδο για μια συγκεκριμένη είσοδο, οι συντελεστές βαρύτητας πρέπει να αποκτήσουν σωστές τιμές. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μίας διαδικασίας εκπαίδευσης κατά την οποία το δίκτυο ωθείται στην κατεύθυνση να παράγει συγκεκριμένες τιμές στην έξοδο αφού πρώτα τροφοδοτηθεί με δεδομένα εκπαίδευσης στην είσοδο. Το δίκτυο συγκρίνει την επιθυμητή έξοδο με αυτή που βγάζει πραγματικά και προσαρμόζει τους συντελεστές βαρύτητας των συνάψεων σε μικρά βήματα. Το δείγμα που χρησιμοποιείται κατά την εκπαίδευση του δικτύου ονομάζεται

δείγμα εκπαίδευσης και περιέχει ζεύγη δεδομένων εισόδου-εξόδου από ένα πλήθος διαφορετικών περιπτώσεων προκειμένου, μετά την εκπαίδευση, το δίκτυο να έχει γενική συμπεριφορά. Η παροχή στο δίκτυο με όλα τα δεδομένα του δείγματος εκπαίδευσης ονομάζεται εποχή εκπαίδευσης, ενώ η εκπαίδευση του δικτύου απαιτεί επαναληπτικά πολλές εποχές εκπαίδευσης προκειμένου να θεωρηθεί ότι ολοκληρώθηκε. Το στάδιο της εκπαίδευσης ελέγχεται μετά από μία ή περισσότερες εποχές μέσω ενός δείγματος ελέγχου. Κατά τον έλεγχο, το δίκτυο τροφοδοτείται με το δείγμα ελέγχου και η έξοδος του συγκρίνεται με την έξοδο που δείγματος, διαμορφώνοντας έναν δείκτη σφάλματος (error index). Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η διαδικασία εκπαίδευσης πραγματοποιείται μόνο μία φορά, στην αρχή της δημιουργίας του δικτύου και μετά από αυτή το δίκτυο είναι έτοιμο να δίνει άμεσα αποτελέσματα όταν τροφοδοτείται με δεδομένα στην είσοδό του.

Η αρχιτεκτονική του δικτύου πρέπει να περιέχει την απαιτούμενη πολυπλοκότητα προκειμένου να υπάρχει πλήθος ελεύθερων παραμέτρων οι οποίες, μέσα από την εκπαίδευση, θα προσαρμοστούν και θα επιλύσουν το πρόβλημα. Μία απλούστερη αρχιτεκτονική δε θα επιλύσει το πρόβλημα ικανοποιητικά ενώ μία πιο σύνθετη αρχιτεκτονική θα αποτρέψει το δίκτυο από το να εκπαιδευτεί. Επομένως, όσον αφορά την αρχιτεκτονική, πρέπει να βρεθεί η χρυσή τομή για την πολυπλοκότητα. Ωστόσο, το πιο κρίσιμο ζήτημα στη χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι το δείγμα εκπαίδευσης. Είναι προφανές ότι μία λανθασμένη συμπεριφορά του δικτύου μετά την εκπαίδευσή του πρέπει πρώτα να αποδοθεί στο δείγμα εκπαίδευσης. Η δημιουργία του δείγματος εκπαίδευσης απαιτεί λεπτομερή ανάλυση του προς επίλυση προβλήματος και της επιθυμητής συμπεριφοράς του δικτύου. Επιπλέον, οι εποχές εκπαίδευσης του δικτύου πρέπει να είναι όσες απαιτούνται για να συγκλίνει η συμπεριφορά του και όχι περισσότερες. Σε αντίθετη περίπτωση το δίκτυο θα "υπερ-εκπαιδευτεί", δηλαδή θα μάθει να ανταποκρίνεται βέλτιστα μόνο στο δείγμα εκπαίδευσης και θα χάσει τη γενικότητα της συμπεριφοράς του. Τέλος, κατά το σχεδιασμό και την εκπαίδευση του δικτύου πρέπει να ληφθούν υπόψη θέματα όπως η επιλογή της συνάρτησης ενεργοποίησης στους νευρώνες, η ταχύτητα με την οποία θα γίνεται η προσαρμογή των συντελεστών βαρύτητας των συνάψεων, η αποκοπή ορισμένων συνάψεων και ο αλγόριθμος εκπαίδευσης. Συμπεραίνεται επομένως ότι η συμπεριφορά ενός τεχνητού

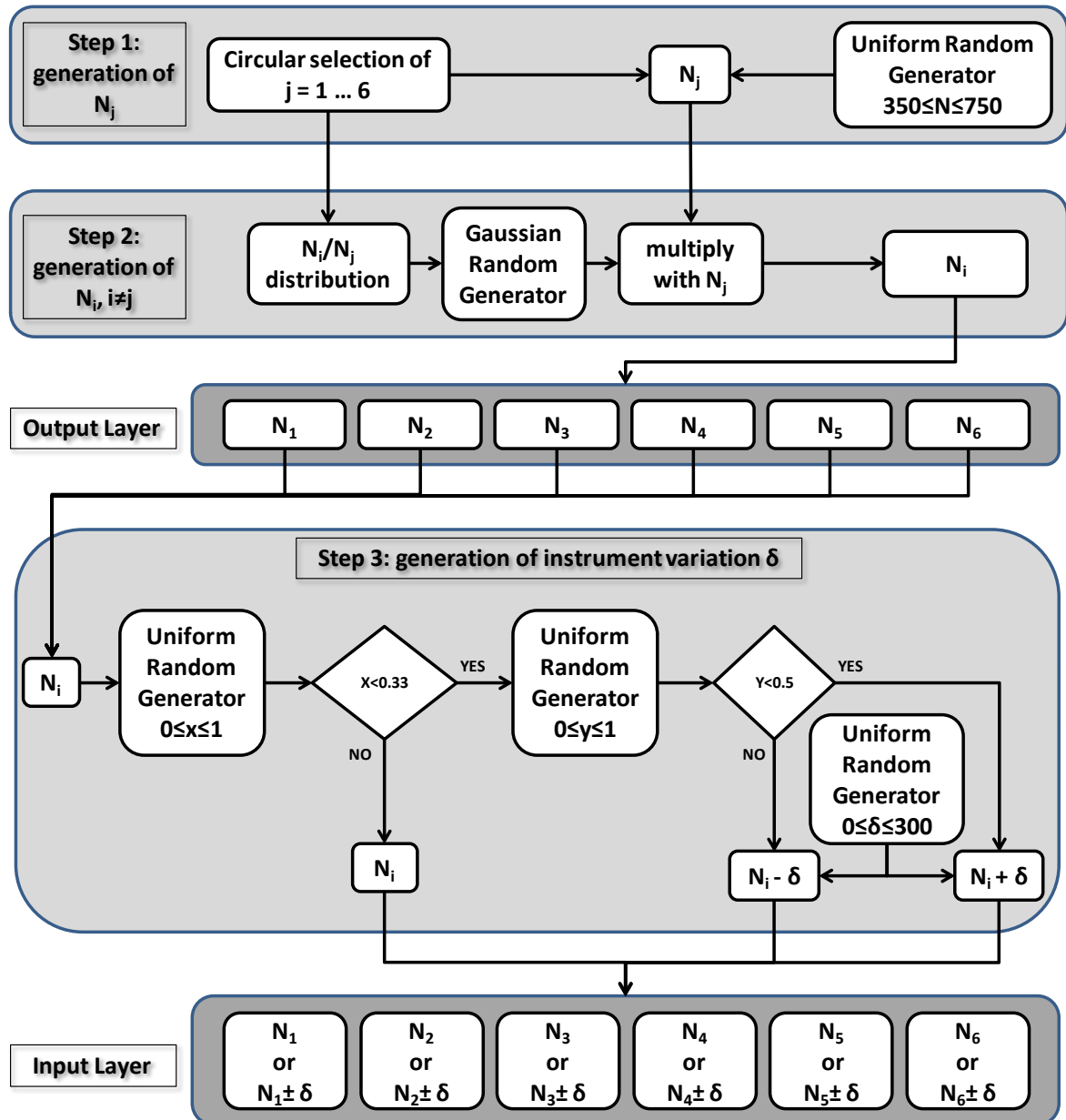


νευρωνικού δικτύου εξαρτάται και μπορεί να βελτιστοποιηθεί με τη σωστή επιλογή όλων αυτών των παραμέτρων.

### 2.2.2. Δείγμα εκπαίδευσης του αλγορίθμου ANN

Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που βασίζεται ο αλγόριθμος ANN αποσκοπεί στο να δέχεται ως είσοδο τις μετρήσεις πραγματικού χρόνου των θαλάμων του μετρητή νετρονίων και να δίνει στην έξοδο τις διορθωμένες μετρήσεις. Επομένως η είσοδος και η έξοδος του δικτύου έχουν ίσο αριθμό νευρώνων κάθε ένας από τους οποίους αναπαριστά τη μέτρηση ενός θαλάμου του μετρητή νετρονίων. Η εκπαίδευση του δικτύου πραγματοποιείται με δείγμα που παράγεται με γεννήτριες τυχαίων αριθμών. Οι τιμές που παράγονται αναπαριστούν τις μετρήσεις των θαλάμων ενώ προκειμένου να αναπαρασταθούν οι πιθανές διακυμάνσεις των οργάνων, προστίθενται σε αυτές με τυχαίο τρόπο διαταραχές. Κατά την εκπαίδευση το δίκτυο τροφοδοτείται με τις διαταραγμένες μετρήσεις και απαιτείται η έξοδος να παράγει τις μετρήσεις χωρίς τις διαταραχές.

Η σύνθεση του δείγματος εκπαίδευσης απαιτεί στατιστική επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων του μετρητή νετρονίων προκειμένου οι τιμές που παράγονται να αντικατοπτρίζουν πραγματικές περιπτώσεις μετρήσεων. Επιπλέον οι διαταραχές που προστίθενται στις μετρήσεις θα πρέπει να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος περιπτώσεων προκειμένου το δίκτυο μετά την εκπαίδευση να μπορεί να ανταποκριθεί σωστά σε οποιοδήποτε πρόβλημα παρουσιάζουν οι μετρήσεις. Αυτά επιτυγχάνονται ακολουθώντας τη διαδικασία που απεικονίζεται στο σχήμα 2.12 η οποία, χωρίς να επηρεάζεται η γενικότητα, αναφέρεται στην περίπτωση μετρητή νετρονίων με έξι ανιχνευτικούς θαλάμους.



**Σχήμα 2.12:** Διαδικασία παραγωγής δείγματος εκπαίδευσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου για τη διόρθωση των μετρήσεων μετρητή νετρονίων με έξι θαλάμους

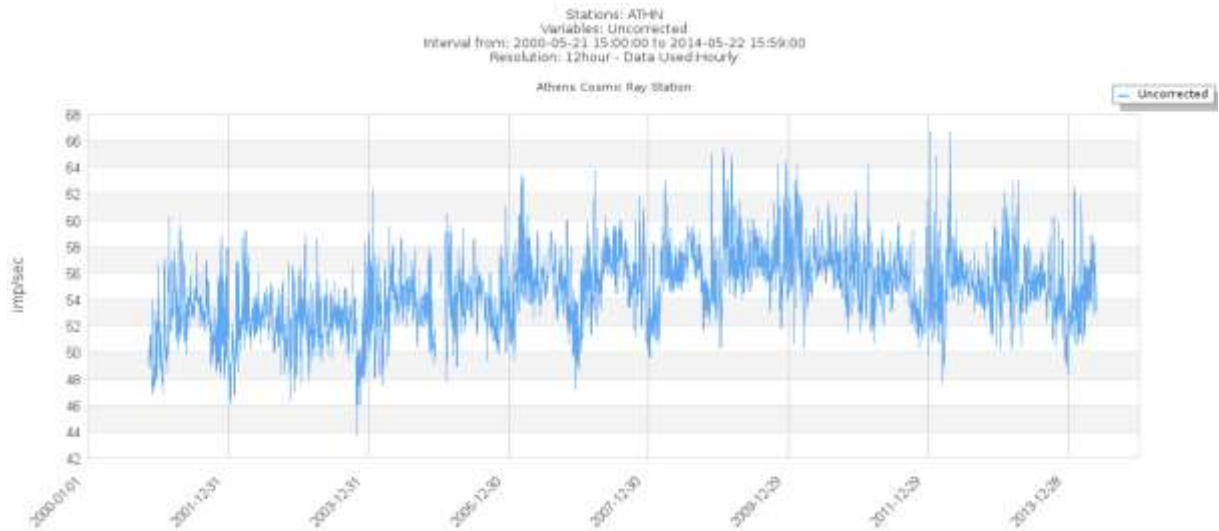
Η διαδικασία διακρίνεται στα ακόλουθα τρία βήματα:

- Χρησιμοποιώντας μία κυκλική διαδικασία κατά την παραγωγή του δείγματος εκπαίδευσης, επιλέγεται ως θάλαμος αναφοράς ένας θάλαμος 'j'. Για το θάλαμο αυτό και χρησιμοποιώντας μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής, παράγεται μία τιμή  $N_j$  που αναπαριστά τη μέτρηση του θαλάμου. Το

εύρος των τιμών που παράγει η γεννήτρια τυχαίων αριθμών επιλέγεται αφού πρώτα έχει ελεγχθεί το εύρος των τιμών που μετρά ο μετρητής νετρονίων κατά τη διάρκεια των ετών λειτουργίας του. Για τη περίπτωση του μετρητή νετρονίων της Αθήνας, το σχετικό σχήμα είναι το 2.13. Από αυτό το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι οι μετρήσεις κυμαίνονται από 42 imp/sec έως 66 imp/sec για όλο το μετρητή νετρονίων που αντιστοιχεί σε 420-660 imp/min για κάθε έναν από τους έξι θαλάμους. Προκειμένου το νευρωνικό δίκτυο να έχει μια πιο γενική συμπεριφορά και να διασφαλίζεται ότι θα καλύπτονται και περιπτώσεις μετρήσεων που πιθανόν να μην έχουν ακόμη εμφανιστεί, ως εύρος τιμών για το  $N_j$  επιλέγεται στο διάστημα 350 - 750 imp/min.

- Αφού έχει παραχθεί η τιμή  $N_j$  για τον θάλαμο 'j', οι τιμές  $N_i$  ( $i \neq j$ ) των υπολοίπων θαλάμων αναπαράγονται πολλαπλασιάζοντας την τιμή αυτή με τιμές που αναπαριστούν του λόγους  $\frac{N_i}{N_j}$ . Για το σκοπό αυτό γίνεται χρήση γεννήτριας τυχαίων αριθμών που παράγει τιμές με κανονικές κατανομές σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται στο πίνακα 2.1. Μετά τη διαδικασία αυτή έχει ολοκληρωθεί η παραγωγή όλων των τιμών που αναπαριστούν τις μετρήσεις των θαλάμων. Οι μετρήσεις αυτές περιέχουν μόνο στατιστικές διακυμάνσεις και συνδέονται με την έξοδο που θα πρέπει να έχει το δίκτυο.
- Αφού έχουν παραχθεί οι τιμές για το επίπεδο εξόδου του δικτύου, οι αντίστοιχες τιμές του επιπέδου εισόδου προκύπτουν με την προσθήκη τυχαίων διαταραχών. Για κάθε  $N_i$  που έχει παραχθεί στο προηγούμενο βήμα, προστίθεται μία διακύμανση  $\delta_i$  με πιθανότητα 33%. Επιλέγοντας αυτή την πιθανότητα, κάθε δείγμα από το δείγμα εκπαίδευσης περιέχει κατά μέσο όρο δύο θαλάμους από τους έξι με διαταραγμένες τιμές. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών με ομοιόμορφη κατανομή και ελέγχοντας αν μία παραγόμενη τιμή στο διάστημα 0 έως 1 είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από 0.33. Στη περίπτωση που η τιμή είναι μεγαλύτερη από 0.33 η τιμή  $N_i$  μένει αμετάβλητη διαφορετικά παράγεται μία διαταραχή  $\delta_i$  στο διάστημα 0 έως 300 χρησιμοποιώντας μία γεννήτρια τυχαίων αριθμών με ομοιόμορφη

κατανομή. Το  $\delta_i$  προστίθεται ή αφαιρείται από το  $N_i$  με πιθανότητα 50%. Οι τιμές που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία συνδέονται με την είσοδο του δικτύου.



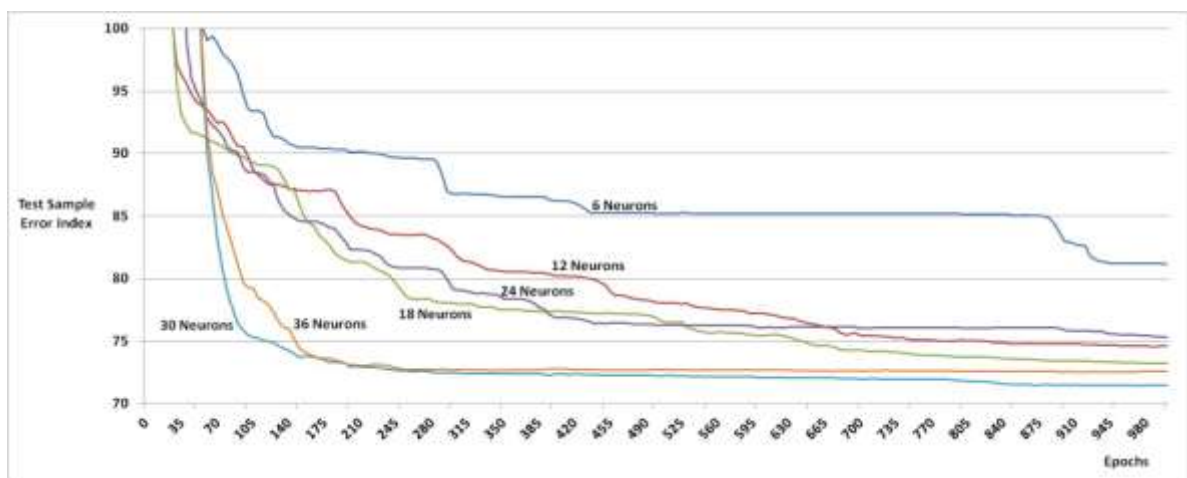
**Σχήμα 2.13:** Μετρούμενος ρυθμός του μετρητή νετρονίων της Αθήνας από το 2010 έως τον Μάιο του 2014.

Με την παραπάνω διαδικασία παράγεται ένα δείγμα εκπαίδευσης που υπερκαλύπτει τα σενάρια μέτρησης που συναντούμε στο μετρητή νετρονίων. Ο ρυθμός καταμέτρησης που παράγεται υπερκαλύπτει το ρυθμό καταμέτρησης των θαλάμων για τα τελευταία 13 χρόνια. Επιπλέον, κατά μέσο όρο δύο από τους έξι θαλάμους παρουσιάζουν διακυμάνσεις οργάνων που είναι μία μάλλον σπάνια περίπτωση δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο ένα θάλαμος παρουσιάζει προβλήματα. Παρόλα αυτά επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθεί ένα όσο το δυνατό πιο γενικό δείγμα εκπαίδευσης προκειμένου το νευρωνικό δίκτυο να μπορεί να αποκριθεί ακόμη και στις πιο δύσκολες περιπτώσεις. Με τη παραπάνω διαδικασία παράχθηκαν 12.000 περιπτώσεις από τις οποίες οι 10.000 χρησιμοποιήθηκαν για το δείγμα εκπαίδευσης και οι υπόλοιπες 2.000 για το δείγμα ελέγχου του δικτύου. Δεδομένης της πολυπλοκότητας του νευρωνικού δικτύου, αυτός ο αριθμός θεωρήθηκε ως ο βέλτιστος.

### 2.2.3. Υλοποίηση του αλγορίθμου ANN

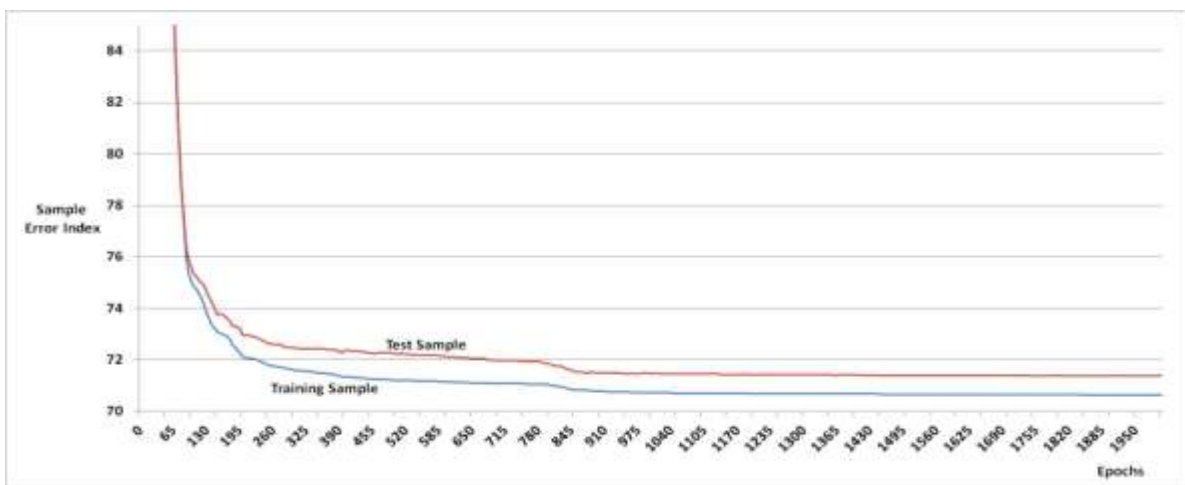
Η υλοποίηση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου έγινε σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Για την υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε η κλάση MLP από το πακέτο ROOT του CERN στην οποία υλοποιείται μία ειδική κατηγορία νευρωνικού δικτύου που ονομάζεται multilayer perceptron (<http://root.cern.ch/drupal;> <http://root.cern.ch/root/html/TMultiLayerPerceptron.html>). Πρόκειται για ένα νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο backpropagation για εκμάθηση και αποτελείται από τρία επίπεδα κατ' ελάχιστο. Επιπλέον, από το ίδιο λογισμικό πακέτο γίνεται χρήση της κλάσης TRandom3 η οποία παρέχει γεννήτριες τυχαίων αριθμών με διάφορες κατανομές, μεταξύ των οποίων με ομοιόμορφη ή κανονική κατανομή που απαιτούνται για την παραγωγή του δείγματος εκπαίδευσης.

Αφού καθορίστηκε το επίπεδο εισόδου, το επίπεδο εξόδου και το δείγμα εκπαίδευσης, ο βέλτιστος αριθμός των κρυφών επιπέδων καθορίστηκε με διαδικασία δοκιμών. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι το δίκτυο είχε τη καλύτερη συμπεριφορά όταν χρησιμοποιείτο μόνο ένα κρυφό επίπεδο. Η συμπεριφορά με δύο κρυφά επίπεδα σε κάθε περίπτωση ήταν χειρότερη ενώ με περισσότερα από δύο δεν ήταν δυνατή η εκπαίδευση. Στη περίπτωση με το ένα κρυφό επίπεδο, ο βέλτιστος αριθμός των νευρώνων καθορίστηκε επίσης με δοκιμές. Ο δείκτης σφάλματος του δείγματος ελέγχου για διάφορες περιπτώσεις αριθμού νευρώνων απεικονίζεται στο σχήμα 2.14:



**Σχήμα 2.14:** Δείκτης σφάλματος του δείγματος ελέγχου κατά την εκπαίδευση για διάφορες περιπτώσεις του κρυφού επιπέδου.

Συμπεραίνεται ότι τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν για τη περίπτωση κρυφού επιπέδου με 30 νευρώνες. Η χρήση περισσότερων από 30 νευρώνες έδωσε παρόμοια αποτελέσματα και δεν επιλέχτηκε δεδομένου ότι ενδείκνυται η επιλογή της απλούστερης αρχιτεκτονικής. Η διαδικασία εκπαίδευσης για την περίπτωση των 30 νευρώνων απεικονίζεται στο σχήμα 2.15:



**Σχήμα 2.15:** Δείκτης σφάλματος του δείγματος εκπαίδευσης και του δείγματος ελέγχου κατά την εκπαίδευση με 30 νευρώνες στο κρυφό επίπεδο.

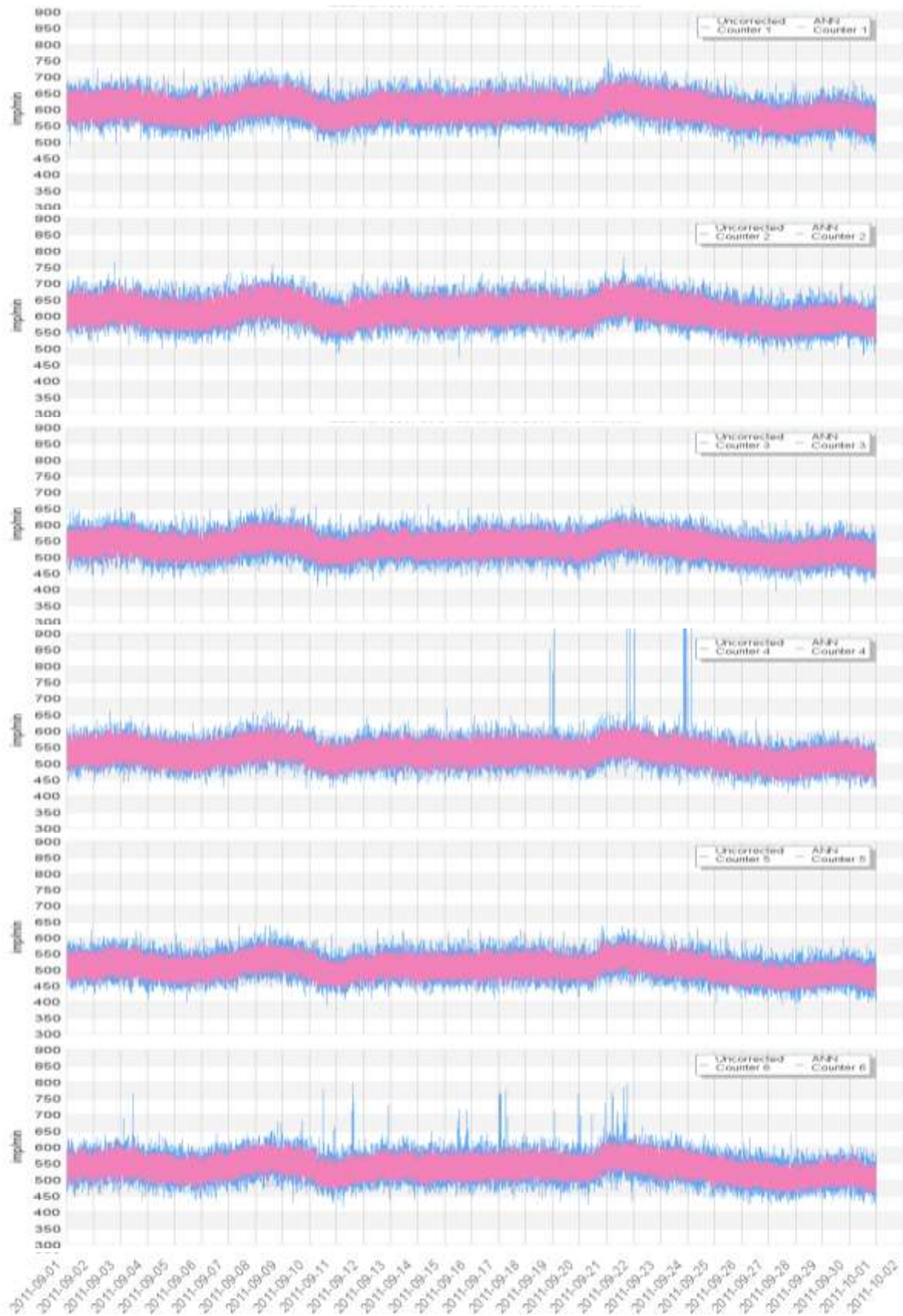
Βάσει αυτού το διαγράμματος, ως βέλτιστος αριθμός εποχών εκπαίδευσης επιλέχτηκε ο αριθμός των χιλίων εποχών. Σε αυτό το στάδιο εκπαίδευσης ο δείκτης σφάλματος του δείγματος ελέγχου έχει συγκλίνει στη τελική τιμή που συνεπάγεται ότι η συνέχιση της εκμάθησης αυξάνει τον κίνδυνο υπέρ-εκπαίδευσης του δικτύου. Τέλος, οι παράμετροι του δικτύου που επιλέχτηκαν δίνονται στον πίνακα 2.3.

ANN parameters	
Architecture	Input (6) : Hidden (30) : Output (6)
Activation function	Sigmoid
Learning method	Stochastic
Eta parameter	0.1
Training Sample	10000
Test Sample	2000
Weights Initialization	No randomization
Inputs	Normalized
Epochs	1000
Training time	≈ 10 minutes @ mid-range PC

**Πίνακα 2.3:** Παράμετροι του τεχνητού νευρωνικού δικτύου που εκπαιδεύτηκε για τον αλγόριθμο διόρθωσης ANN.

#### 2.2.4. Αποτελέσματα

Δείγμα της διόρθωσης που πραγματοποιείται με τον αλγόριθμο ANN παρουσιάζεται στο σχήμα 2.16. Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η διόρθωση για τα δεδομένα του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για την περίοδο Σεπτεμβρίου 2011, ώστε να είναι δυνατή η απευθείας σύγκριση με τη διόρθωση που παρέχει ο Median Editor και που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.6. Παρατηρώντας τη διόρθωση στους θαλάμους 4 και 6 διαπιστώνεται ότι οι προβληματικές σποραδικές κορυφές αποκόπτονται επαρκώς. Είναι πολύ θετικό δε ότι στη χρονική στιγμή που εμφανίζεται η κορυφή δεν παρατηρείται στα διορθωμένα δεδομένα καμία τάση ανόδου. Όσον αφορά την αλλοίωση των μη προβληματικών μετρήσεων, είναι προφανής η βελτίωση στη διόρθωση με τη χρήση του ANN. Συγκεκριμένα, η συμπίεση της στατιστικής είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τον Median Editor αφού η στατιστική διακύμανση των διορθωμένων μετρήσεων είναι πολύ κοντύτερα στη στατιστική διακύμανση των πρωτογενών μετρήσεων. Σε αντιστοιχία με τον Median Editor, ο αλγόριθμος ANN παρουσιάζει σταθερότητα στη συμπεριφορά του. Το παράδειγμα του σχήματος 2.16, είναι ενδεικτικό για τη διόρθωση που παρέχεται για οποιαδήποτε χρονικό διάστημα όπως διαπιστώνεται μέσα από την παρατήρηση του συνόλου των δεδομένων του μετρητή νετρονίων.



**Σχήμα 2.16:** Διόρθωση δεδομένων του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για τον μήνα Σεπτέμβριο του 2011 χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο ANN.



## 2.3. Διόρθωση δεδομένων με τον Edge Editor

### 2.3.1. Κριτήριο εγκυρότητας της μέτρησης

Η υλοποίηση του αλγορίθμου ANN βελτιώνει σημαντικά την διόρθωση των πρωτογενών δεδομένων σε σχέση με τον Median Editor, ωστόσο η αλλοίωση της στατιστικής όλων των μετρήσεων εξακολουθεί να είναι εμφανής. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι προκειμένου ένας αλγόριθμος να παρέχει ικανοποιητική διόρθωση στις προβληματικές τιμές αλλά παράλληλα να αφήνει ανεπηρέαστες τις μη προβληματικές μετρήσεις θα πρέπει να ακολουθεί τη φιλοσοφία διόρθωσης του Median Editor Plus. Σύμφωνα με τη φιλοσοφία αυτή, ο αλγόριθμος θα πρέπει να δρα σε δύο επίπεδα:

- Έλεγχος της εγκυρότητας της μέτρησης ενός θαλάμου με χρήση στατιστικού κριτηρίου
- Διόρθωση της μέτρησης μόνο σε περίπτωση που η μέτρηση χαρακτηρίζεται ως προβληματική

Η παραπάνω προσέγγιση οδήγησε στη ανάπτυξη του αλγορίθμου Edge Editor, ο οποίος υιοθετεί τη χρήση σχετικού κριτηρίου για τον έλεγχο της εγκυρότητας των δεδομένων (Paschalis and Mavromichalaki, 2012).

Ο έλεγχος του κριτηρίου του Edge Editor βασίζεται στο εάν η μέτρηση ενός θαλάμου είναι εντός ενός διαστήματος εμπιστοσύνης, λαμβάνοντας υπόψη τη στατιστική των μετρήσεων του συγκεκριμένου θαλάμου και τη μέση στάθμη μέτρησης του μετρητή νετρονίων τη δεδομένη χρονική στιγμή. Προκειμένου να καθοριστούν αυτές οι παράμετροι ακολουθείται η κοινή πρακτική των αλγορίθμων διόρθωσης δεδομένων που είναι η συγκριτική μελέτη των μετρήσεων των θαλάμων. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν είναι άμεσα εφικτό αφού, σύμφωνα με τη σχέση (1), το επίπεδο μέτρησης των θαλάμων διαφέρει μεταξύ τους κυρίως λόγω των διαφορετικών συντελεστών  $A_i$ . Ο αλγόριθμος Median Editor ξεπερνά αυτό το πρόβλημα υπολογίζοντας τους λόγους  $r_i$  που εκφράζουν τη ποσοστιαία μεταβολή της μέτρησης των θαλάμων σε σχέση με το μέσο επίπεδο μέτρησης. Στην περίπτωση του αλγορίθμου Edge Editor το πρόβλημα αντιμετωπίζεται

μετασχηματίζοντας τις μετρήσεις των θαλάμων σε ένα κοινό επίπεδο μέτρησης (baseline).

Σε συνέχεια των σχέσεων (6) και (7), όπου έγινε υπολογισμός των λόγων  $\frac{N_i}{N_j}$ , η τιμή  $N_i$  ενός θαλάμου 'i' μπορεί να μετασχηματιστεί στο επίπεδο μέτρησης του θαλάμου 'j' διαιρώντας την τιμή του με τη μέση τιμή  $R_{i,j}$  της κατανομής  $\frac{N_i}{N_j}$ . Συγκεκριμένα αν η μετασχηματισμένη τιμή μέτρησης συμβολιστεί με  $N_i^j$  τότε χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (1), (6) και (7) προκύπτει :

$$\begin{aligned} N_i^j &= \frac{N \cdot A_i \pm \sigma_i}{R_{i,j}} \Rightarrow N_i^j = \frac{N \cdot A_i \pm \sigma_i}{A_i / A_j} \Rightarrow N_i^j = N \cdot A_j \pm \frac{A_j}{A_i} \cdot \sigma_i \Rightarrow \\ &\Rightarrow N_i^j = n_j \pm \sigma_i^j, \quad \text{όπου } n_j = A_j \cdot N \quad \text{και} \quad \sigma_i^j = \frac{A_j}{A_i} \cdot \sigma_i \quad (8) \end{aligned}$$

Όσον αφορά τη στατιστική διακύμανση  $\sigma_i^j$ , προκύπτει ότι:

$$\sigma_i \ll A_i \cdot N \Rightarrow \frac{A_j}{A_i} \cdot \sigma_i \ll A_j \cdot N \Rightarrow \sigma_i^j \ll n_j \quad (9)$$

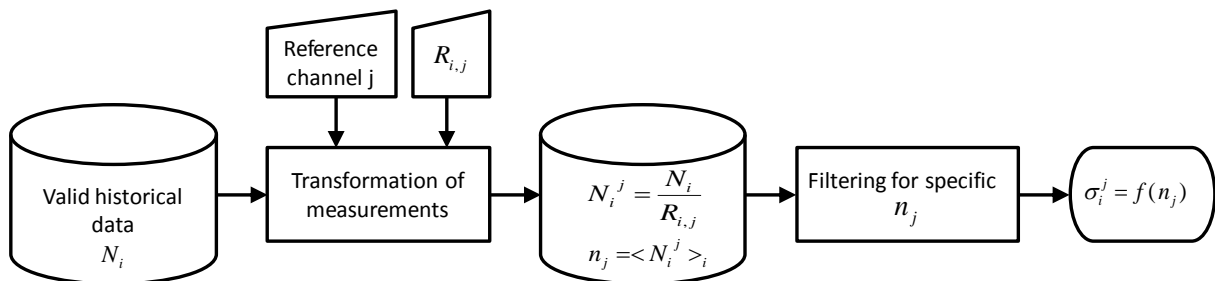
Με το μετασχηματισμό αυτό όλοι οι θάλαμοι μετρούν την ίδια τιμή  $n_j$  που εξαρτάται από την επιλογή του θαλάμου αναφοράς 'j', ενώ όποια διαφορά παρατηρείται οφείλεται στη στατιστική διακύμανση  $\sigma_i^j$  που εξαρτάται τόσο από τον θάλαμο που εξετάζεται όσο και από τον θάλαμο αναφοράς. Η τιμή  $n_j$  αποτελεί τη μέση στάθμη μέτρησης του ανιχνευτή. Όταν γίνεται χρήση των έγκυρων ιστορικών δεδομένων, δεδομένου ότι αυτά δεν περιλαμβάνουν διακυμάνσεις οργάνων, μία εκτίμηση του  $n_j$  είναι εφικτή μέσω του υπολογισμού της μέσης τιμής των  $N_i^j$ . Συγκεκριμένα :

$$\langle N_i^j \rangle_i = \frac{\sum_i N_i^j}{\text{number of channels}} = n_j + \frac{\sum_i (\pm \sigma_i^j)}{\text{number of channels}} \quad (13)$$

Δεδομένου ότι  $\sigma_i^j$  είναι οι στατιστικές διακυμάνσεις, το  $\frac{\sum_i (\pm \sigma_i^j)}{\text{number of channels}}$  τείνει στο μηδέν καθώς ο αριθμός των θαλάμων του μετρητή νετρονίων αυξάνεται, επομένως:

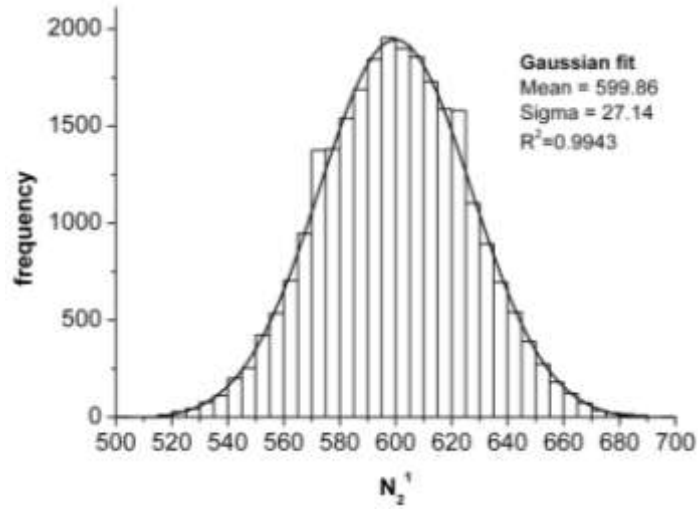
$$\langle N_i^j \rangle_i \approx n_j \quad (14)$$

Η παραπάνω θεώρηση εφαρμόστηκε στα ιστορικά δεδομένα του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για το διάστημα από το 2007 έως το 2011 προκειμένου να καθοριστούν οι στατιστικές διακυμάνσεις  $\sigma_i^j$  κάθε θαλάμου. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε αποτυπώνεται στο σχήμα 2:17:

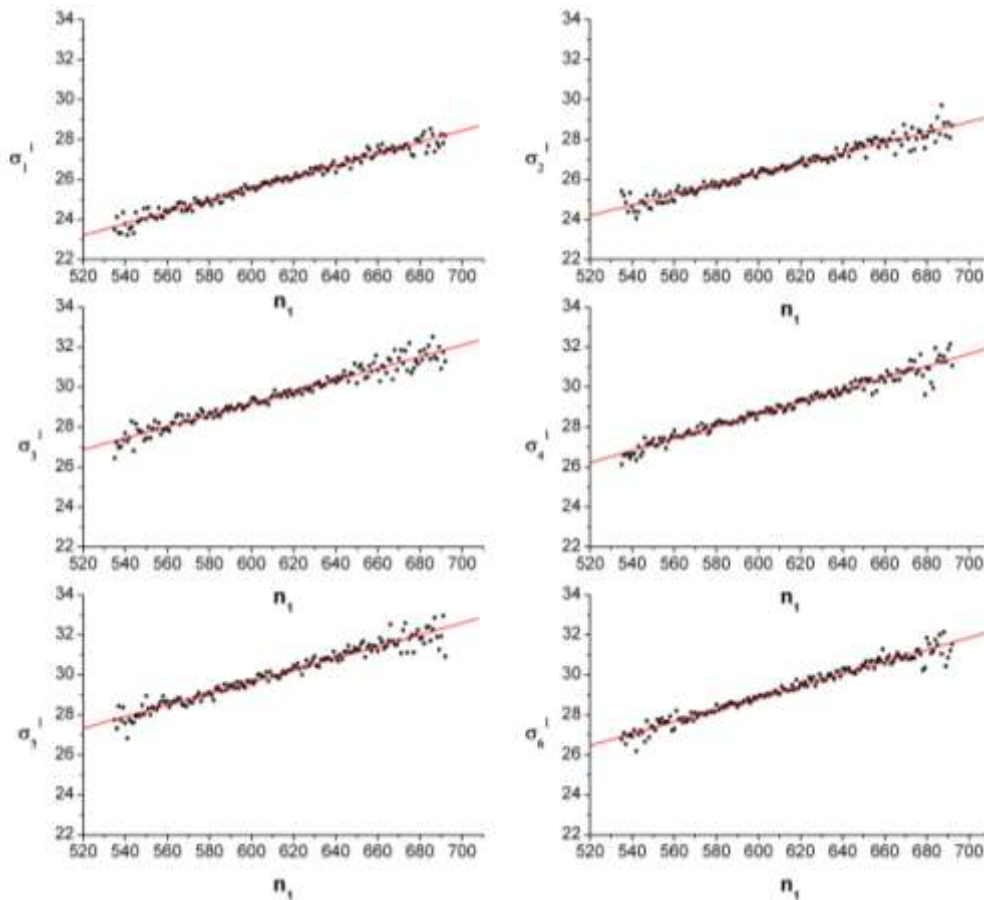


**Σχήμα 2.17:** Διαδικασία υπολογισμού των στατιστικών διακυμάνσεων  $\sigma_i^j$ .

Τα έγκυρα ιστορικά δεδομένα του μετρητή νετρονίων μετασχηματίζονται ως προς κάποιον θάλαμο αναφοράς 'j' ενώ γίνεται και υπολογισμός του αντίστοιχου  $n_j$ . Στη συνέχεια γίνεται κατηγοριοποίηση των μετρήσεων για τις διάφορες τιμές του  $n_j$  και υπολογισμός των στατιστικών διακυμάνσεων των θαλάμων για κάθε τιμή του  $n_j$ . Ενδεικτικά, το ιστόγραμμα των μετασχηματισμένων μετρήσεων του θαλάμου 2 ως προς τον θάλαμο 1 ( $N_2^1$ ) όταν το  $n_1$  είναι ίσο με 600 απεικονίζεται στο σχήμα 2.18. Από το διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι οι μετασχηματισμένες μετρήσεις ακολουθούν κανονική κατανομή επομένως μπορεί να γίνει καθορισμός των στατιστικών χαρακτηριστικών με τις γνωστές σχέσεις για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης. Επιλέγοντας ως θάλαμο αναφοράς 'j' τον θάλαμο 1, οι τυπικές αποκλίσεις των θαλάμων για διάφορες περιπτώσεις του  $n_j$  ( $n_1$  αφού επιλέχτηκε ο θάλαμος 1 για αναφορά), παρουσιάζονται στο σχήμα 2.19.



**Σχήμα 2.18:** Κατανομή των μετασχηματισμένων μετρήσεων  $N_2^1$  όταν η μέση μέτρηση των θαλάμων  $n_1$  είναι ίση με 600.



**Σχήμα 2.19:** Αποτέλεσμα υπολογισμού των  $\sigma_i^j$  για διάφορες περιπτώσεις της μέσης μέτρησης  $n_j$  όταν χρησιμοποιείται ως θάλαμος αναφοράς 'j' ο θάλαμος 1.

Από τα ανωτέρω διαγράμματα με γραμμική προσέγγιση προκύπτουν οι εξισώσεις  $\sigma_i^j=f(n_j)$ . Τα σχετικά αποτελέσματα δίνονται στο πίνακα 2.4:

Channel	$\sigma_i^j = f(n_j)$	Correlation Coefficient
1	$\sigma_1^1 = 0.0291 \cdot n_1 + 8.1129$	0.986
2	$\sigma_2^1 = 0.0260 \cdot n_1 + 10.6687$	0.974
3	$\sigma_3^1 = 0.0290 \cdot n_1 + 11.7736$	0.975
4	$\sigma_4^1 = 0.0302 \cdot n_1 + 10.5180$	0.981
5	$\sigma_5^1 = 0.0293 \cdot n_1 + 12.1078$	0.973
6	$\sigma_6^1 = 0.0300 \cdot n_1 + 10.8838$	0.982

**Πίνακα 2.4:** Εξισώσεις των  $\sigma_i^j=f(n_j)$  που προκύπτουν από την γραμμική προσέγγιση των διαγραμμάτων που απεικονίζονται στο σχήμα 2.19.

### 2.3.2. Εκτίμηση της στάθμης μέτρησης σε πραγματικό χρόνο

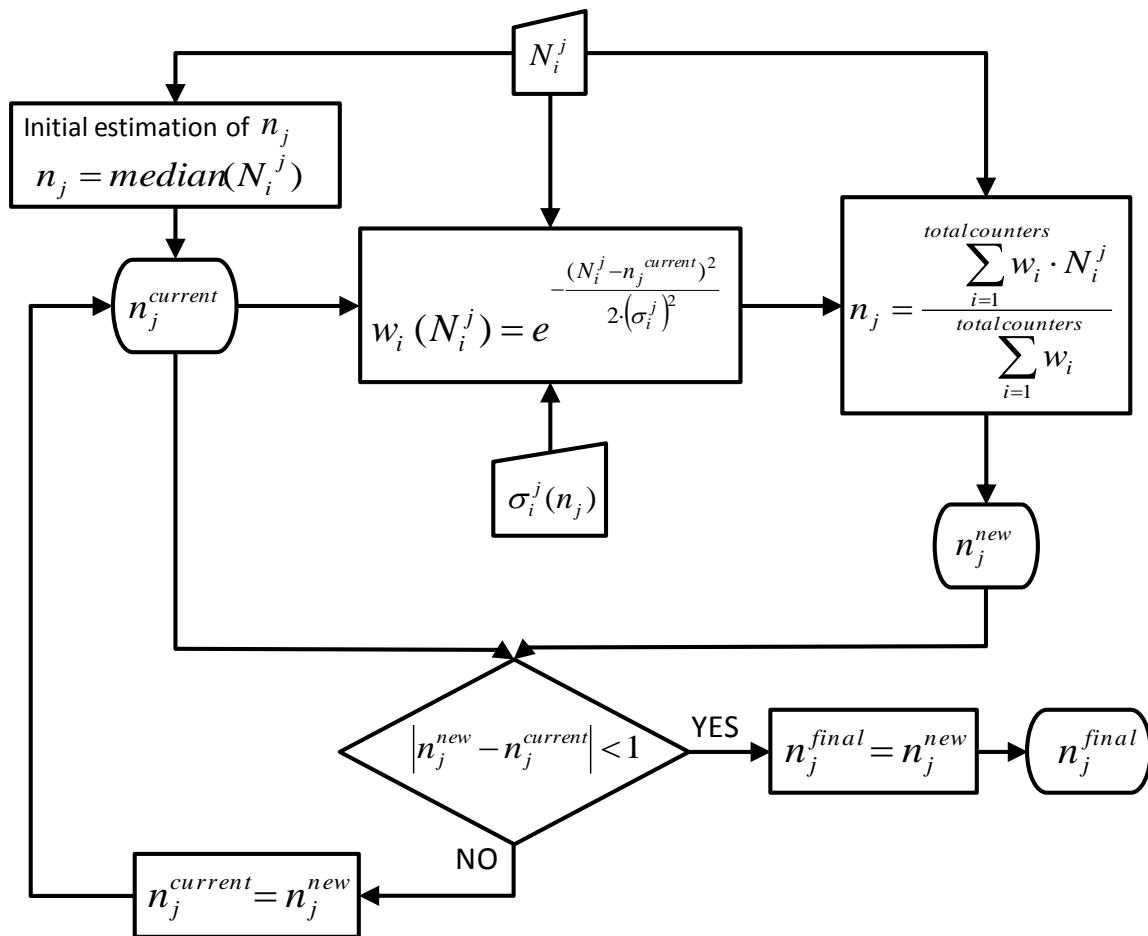
Η παραπάνω ανάλυση αναφέρεται στην επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων του μετρητή νετρονίων που απαιτείται προκειμένου να καθοριστούν οι τυπικές αποκλίσεις  $\sigma_i^j$  των μετρήσεων κάθε θαλάμου. Έχοντας καθορίσει τα στατιστικά χαρακτηριστικά, η εγκυρότητα μιας μέτρησης σε πραγματικό χρόνο μπορεί να καθοριστεί από τον έλεγχο του εάν η μέτρηση είναι εντός ενός συγκεκριμένου διαστήματος εμπιστοσύνης. Συγκεκριμένα, η μετασηματισμένη μέτρηση του θαλάμου 'i' στο επίπεδο μέτρησης του θαλάμου 'j' ( $N_i^j$ ) θεωρείται έγκυρη εάν:

$$n_j + x \cdot \sigma_i^j \leq N_i^j \leq n_j + x \cdot \sigma_i^j \quad (16),$$

όπου x το εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης (π.χ. x=3 ή x=4).

Προκειμένου να εφαρμοστεί το κριτήριο της σχέσης (16) απαιτείται ο καθορισμός της μέσης στάθμης μέτρησης  $n_j$  σε πραγματικό χρόνο. Κατά την επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων, το  $n_j$  καθορίστηκε από τη σχέση (13) ως η μέση τιμή των μετασηματισμένων μετρήσεων των θαλάμων. Αυτό ήταν εφικτό διότι τα έγκυρα ιστορικά δεδομένα περιέχουν μετρήσεις που δεν έχουν αλλοίωση λόγω διακυμάνσεων

οργάνων. Στην περίπτωση όμως των μετρήσεων πραγματικού χρόνου αυτός ο τρόπος εκτίμησης του  $n_j$  δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί δεδομένου ότι είναι πιθανή η ύπαρξη διακυμάνσεων οργάνων. Αντίστοιχο πρόβλημα συναντάται στην εφαρμογή του Median Editor όπου απαιτείται η εκτίμηση ενός ενδεικτικού  $r_i$ . Ο Median Editor αντιμετωπίζει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας την ενδιάμεση τιμή των  $r_i$ , μία ασφαλής επιλογή στατιστικά. Ωστόσο αυτός ο τρόπος λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό μόνο τις τιμές ενός ή δύο θαλάμων (ανάλογα με το αν ο αριθμός των θαλάμων είναι άρτιος ή περιττός), αγνοώντας τις μετρήσεις των υπολοίπων θαλάμων που στατιστικά μπορούν να συνεισφέρουν στον υπολογισμό. Ο Edge Editor ξεκινά από μία αρχική εκτίμηση για το  $n_j$  την οποία όμως βελτιώνει χρησιμοποιώντας έναν επαναληπτικό αλγόριθμο ο οποίος, λόγω του τρόπου δράσης του, ονομάστηκε αλγόριθμος weighted mean. Ο αλγόριθμος αποδίδεται σχηματικά στο σχήμα 2.20:



**Σχήμα 2.20:** Διάγραμμα αλγορίθμου weighted mean για τον υπολογισμό του  $n_j$  από τις μετρήσεις πραγματικού χρόνου.

Αρχικά γίνεται μία εκτίμηση του  $n_j$  μέσω της ενδιάμεσης τιμή των  $N_i^j$ . Στη συνέχεια η τιμή  $n_j$  υπολογίζεται επαναληπτικά χρησιμοποιώντας όλες τις τιμές  $N_i^j$  αφού πρώτα συσχετιστούν με έναν συντελεστή βαρύτητας. Ο συντελεστής βαρύτητας επιλέγεται να είναι ίσος με τη μονάδα όταν η τιμή  $N_i^j$  ταυτίζεται με την τιμή του  $n_j$  και να φθίνει τείνοντας στο μηδέν όσο απομακρύνεται το  $N_i^j$  από  $n_j$ . Με το τρόπο αυτό, παρότι όλες οι τιμές συμμετέχουν στον προσδιορισμό του  $n_j$ , κάποιο  $N_i^j$  που έχει διαταραχθεί από διακύμανση οργάνου αναμένεται να μην αλλοιώσει τον υπολογισμό αφού θα απέχει πολύ από το  $n_j$  και ο συντελεστής βαρύτητάς του θα τείνει στο μηδέν. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μετασχηματισμένες μετρήσεις των θαλάμων  $N_i^j$  ακολουθούν κανονική κατανομή, ο συντελεστής βαρύτητας επιλέγεται να δίνεται από συνάρτηση που έχει τη μορφή :

$$w_i (N_i^j) = e^{-\frac{(N_i^j - \text{estimated } n_j)^2}{k \cdot (\sigma_i^j)^2}} \quad (17),$$

όπου  $k$  παράμετρος που εκφράζει την ευαισθησία της συνάρτησης βάρους. Οι συντελεστές βαρύτητας υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου χρησιμοποιώντας την τιμή του  $n_j$  που έχει υπολογιστεί μέχρι εκείνη τη στιγμή και τα  $\sigma_i^j$  για το συγκεκριμένο  $n_j$ . Ο υπολογισμός ολοκληρώνεται όταν η τιμή του  $n_j$  έχει συγκλίνει, γεγονός που διαπιστώνεται από το ότι η νέα τιμή που υπολογίζεται δεν διαφέρει πολύ από την προηγούμενη.

Παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου weighted mean για  $k=4$  δίνεται στον πίνακα 2.5:

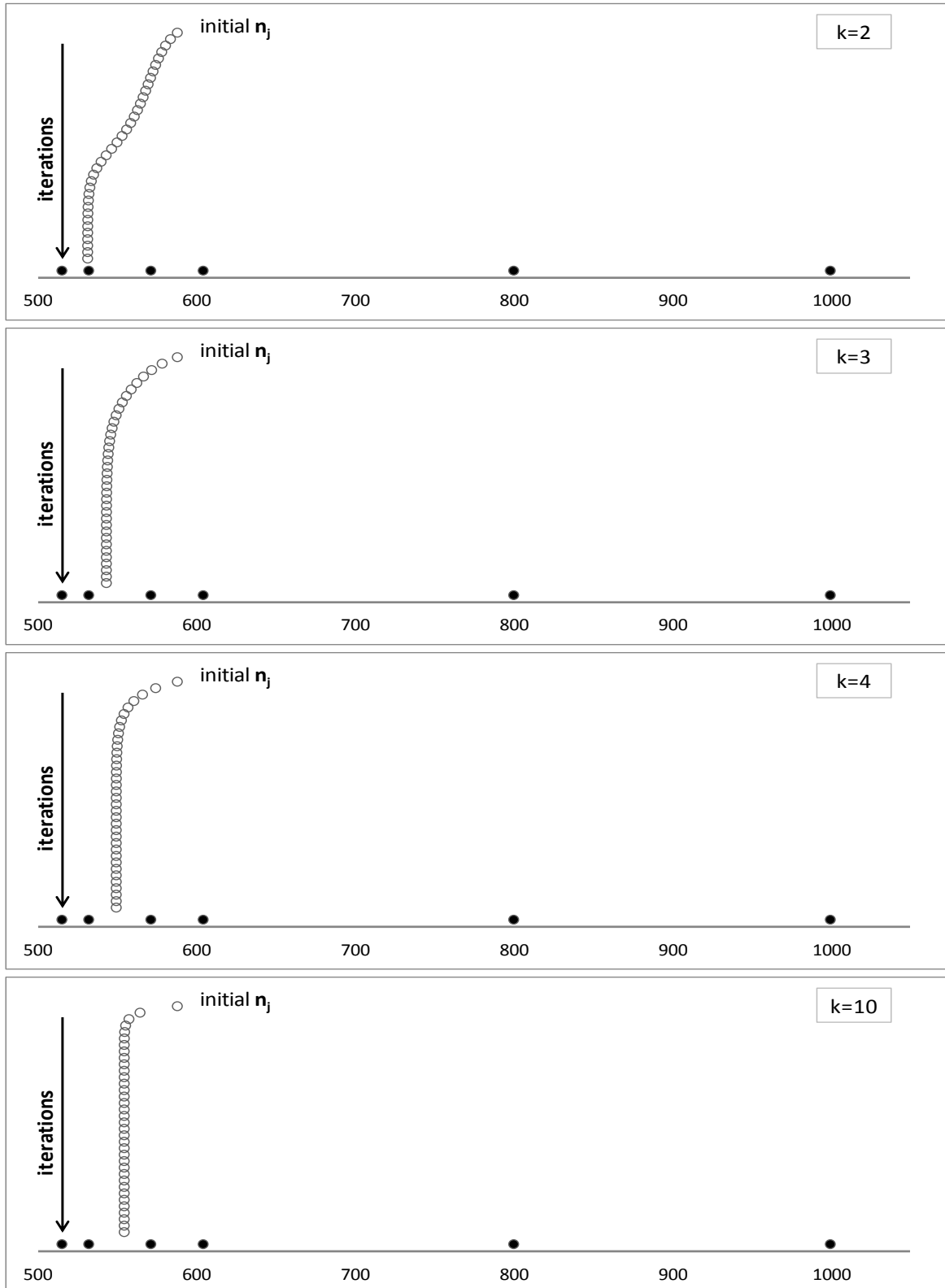
	$N_1^1=532$	$N_2^1=571$	$N_3^1=604$	$N_4^1=800$	$N_5^1=515$	$N_6^1=1000$	
<b>Iteration</b>	<b>w<sub>1</sub></b>	<b>w<sub>2</sub></b>	<b>w<sub>3</sub></b>	<b>w<sub>4</sub></b>	<b>w<sub>5</sub></b>	<b>w<sub>6</sub></b>	<b>n<sub>1</sub></b>
0	-	-	-	-	-	-	<b>587.5000</b>
1	0.29768	0.90382	0.92128	7.3E-07	0.21688	1.9E-23	<b>573.8413</b>
2	0.49118	0.99692	0.75456	6.9E-08	0.35529	1.1E-25	<b>565.5527</b>
3	0.62738	0.98854	0.6278	1.5E-08	0.45987	3.8E-27	<b>560.0874</b>
4	0.71823	0.95431	0.54108	5E-09	0.53532	3.9E-28	<b>556.4004</b>
5	0.77726	0.91911	0.48326	2.3E-09	0.58809	8E-29	<b>553.9107</b>
10	0.87127	0.83653	0.38596	5.9E-10	0.68218	4.6E-30	<b>549.5856</b>
15	0.88175	0.82463	0.37438	4.9E-10	0.69385	3.2E-30	<b>549.0549</b>
20	0.88297	0.8232	0.37302	4.8E-10	0.69523	3.1E-30	<b>548.9921</b>
25	0.88312	0.82303	0.37286	4.8E-10	0.69539	3E-30	<b>548.9847</b>
30	0.88313	0.82301	0.37284	4.8E-10	0.69541	3E-30	<b>548.9838</b>
35	0.88313	0.82301	0.37284	4.8E-10	0.69542	3E-30	<b>548.9837</b>

**Πίνακα 2.5:** Παράδειγμα εφαρμογής του αλγόριθμου *weighted mean* για μετρητή νετρονίων με 6 θαλάμους και  $\sigma_j^i$  που δίνονται από τις σχέσεις του πίνακα 2.4.

Στο παραπάνω παράδειγμα οι τιμές των θαλάμων 4 και 6 έχουν εμφανώς διαταραχθεί από διακυμάνσεις οργάνων. Ενώ ο αρχικός υπολογισμός του  $n_1$  μέσω της ενδιάμεσης τιμής είναι 587.5 παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος τελικά καταλήγει στην εκτίμηση ότι το  $n_1$  ισούται με 548.98. Από την τελευταία επανάληψη παρατηρείται ότι οι τιμές του θαλάμου 4 και 6 έχουν συντελεστή βαρύτητας που τείνει στο μηδέν επομένως δεν λαμβάνονται ουσιαστικά στον υπολογισμό.

Από φυσικής πλευράς ο αλγόριθμος *weighted mean* μετακινεί την ενδιάμεση τιμή που υπολογίζεται αρχικά στην περιοχή που οι μετρήσεις  $N_i^j$  εμφανίζουν τη μέγιστη πυκνότητα. Αυτό αποδίδεται γραφικά στο σχήμα 2.21 όπου με μαύρους κύκλους αναπαριστούνται οι τιμές  $N_i^j$  και με λευκούς κύκλους οι διαδοχικοί υπολογισμοί της τιμής  $n_j$ . Στο διάγραμμα δίνεται η σύγκλιση της τιμής  $n_j$  για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $k$ . Παρατηρείται ότι η τιμή του  $k$  ενδείκνυται να έχει τιμή μεγαλύτερη από το τέσσερα, προκειμένου η ευαισθησία της συνάρτησης βάρους να μην εγκλωβίζει την τιμή του  $n_j$  σε μεμονωμένα  $N_i^j$ , φαινόμενο που παρατηρείται για  $k=2$ .

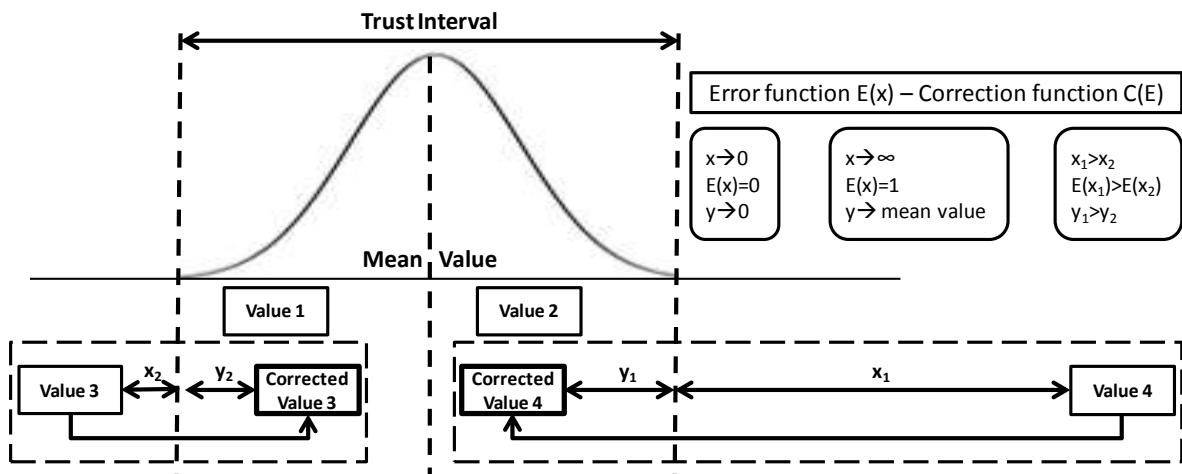




**Σχήμα 2.21:** Γραφική απεικόνιση των διαδοχικών υπολογισμών του  $n_j$  (λευκοί κύκλοι) σε σχέση με τις μετασχηματισμένες μετρήσεις των θαλάμων (μαύροι κύκλοι) για διάφορες τιμές του συντελεστή  $k$ .

### 2.3.3. Διαδικασία διόρθωσης

Η εκτίμηση της μέσης στάθμης μέτρησης  $\eta_j$  του ανιχνευτή επιτρέπει την απευθείας εφαρμογή του κριτηρίου της σχέσης (16). Οι μετασηματισμένες μετρήσεις που είναι εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης θεωρούνται έγκυρες και δεν υπόκεινται σε διόρθωση. Αντιθέτως οι τιμές που είναι εκτός του διαστήματος θεωρούνται εσφαλμένες και διορθώνονται. Συγκεκριμένα, οι τιμές που βρίσκονται εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης τοποθετούνται εντός αυτού και τόσο κοντύτερα προς το μέσο του όσο πιο μακριά είναι η αρχική εσφαλμένη τιμή από το άκρο του διαστήματος. Η διαδικασία αυτή αποτυπώνεται στο σχήμα 2.22:



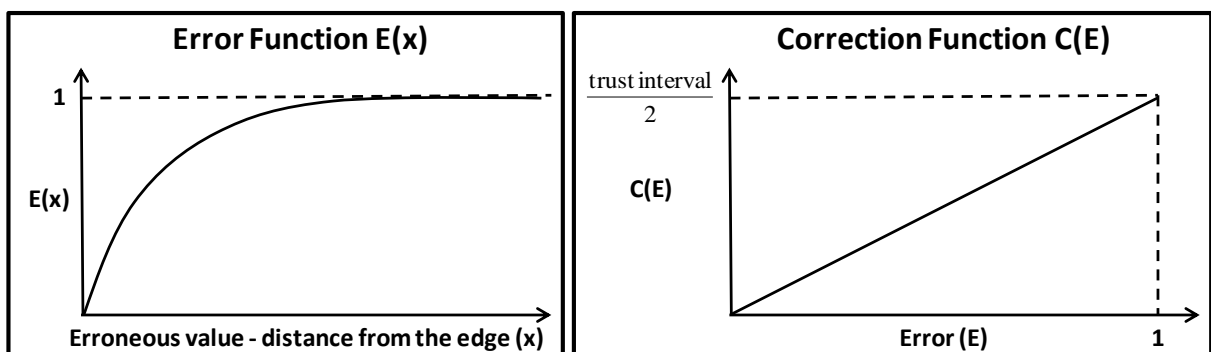
**Σχήμα 2.22:** Προσδιορισμός σφάλματος και διόρθωση μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο με τον Edge Editor.

Προκειμένου να υλοποιηθεί η διαδικασία αυτή, ο Edge Editor εισάγει δύο συναρτήσεις. Η πρώτη συνάρτηση  $E(x)$ , ονομάζεται συνάρτηση σφάλματος (error function) και ποσοτικοποιεί το σφάλμα που παρουσιάζει η μέτρηση. Μία προβληματική μέτρηση που είναι κοντά στο διάστημα εμπιστοσύνης θεωρείται λιγότερο λάθος από μία μέτρηση που είναι μακρύτερα. Στην οριακή περίπτωση που η εσφαλμένη τιμή είναι ακριβώς στο όριο του διαστήματος εμπιστοσύνης το σφάλμα θεωρείται μηδέν ενώ όταν η εσφαλμένη τιμή είναι σε άπειρη απόσταση το σφάλμα είναι ίσο με τη μονάδα. Η δεύτερη συνάρτηση  $C(x)$ , ονομάζεται συνάρτηση διόρθωσης (correction function) και προσδιορίζει το που θα τοποθετηθεί η διορθωμένη μέτρηση σε σχέση με το άκρο του διαστήματος

εμπιστοσύνης. Συγκεκριμένα, η διορθωμένη μέτρηση τοποθετείται κοντά στο άκρο του διαστήματος εμπιστοσύνης όταν το σφάλμα είναι μικρό, ενώ τοποθετείται κοντά στο κέντρο του διαστήματος όταν το σφάλμα τείνει στη μονάδα.

Η λογική πίσω από αυτή τη διαδικασία είναι η εξής. Λαμβάνοντας υπόψη τη στατιστική φύση των μετρήσεων, δεν υπάρχει σαφές όριο ανάμεσα στο πότε μία μέτρηση εμπεριέχει μόνο στατιστικές διακυμάνσεις ή και διακυμάνσεις οργάνων. Η παρουσία μίας μέτρησης εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης δεν βεβαιώνει ότι είναι λανθασμένη αφού στατιστικά είναι δυνατό να εμφανιστούν μετρήσεις εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης, έστω και με μικρή πιθανότητα. Ο Edge Editor λαμβάνει υπόψη αυτό το γεγονός και θεωρεί ότι μια μέτρηση που είναι κοντά στο διάστημα εμπιστοσύνης έχει μικρή πιθανότητα να είναι λάθος. Για το λόγο αυτό κατά τη διόρθωση, η πρωτογενής τιμή πρέπει να ληφθεί υπόψη και αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας τη διορθωμένη τιμή κοντά της. Αντιθέτως, μια τιμή που είναι μακριά είναι πιο βέβαιο να είναι λάθος. Για το λόγο αυτό κατά τη διόρθωση η πρωτογενής τιμή της δε μπορεί να ληφθεί καθόλου υπόψη και σαν αποτέλεσμα η διορθωμένη τιμή τοποθετείται στο κέντρο του διαστήματος εμπιστοσύνης. Η ονομασία του αλγορίθμου Edge Editor προέρχεται από το γεγονός ότι τόσο ο χαρακτηρισμός μιας τιμής ως εσφαλμένης όσο και η διαδικασία διόρθωσης της πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τα άκρα του διαστήματος εμπιστοσύνης μέσα στα οποία οι τιμές θεωρούνται ως έγκυρες.

Η μορφή που έχουν οι συναρτήσεις  $E(x)$  και  $C(E)$  αποδίδονται στο σχήμα 2.23:



**Σχήμα 2.23:** Μορφή συναρτήσεων προσδιορισμού σφάλματος  $E(x)$  και διόρθωσης  $C(x)$  που χρησιμοποιεί ο Edge Editor.

Στη υλοποίηση του Edge Editor που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγινε χρήση συναρτήσεων προσδιορισμού σφάλματος  $E(x)$  και διόρθωσης  $C(x)$  με την ακόλουθη αναλυτική μορφή:

$$E_i^j(N_i^j) = \begin{cases} 0 & , |N_i^j - n_j| < x \cdot \sigma_i^j \\ 1 - \frac{1}{e^{\frac{N_i^j - (n_j + x \cdot \sigma_i^j)}{\sqrt{2} \cdot \sigma^2}}} & , |N_i^j - n_j| \geq x \cdot \sigma_i^j \quad \text{and} \quad N_i^j > n_j \\ 1 - \frac{1}{e^{\frac{(n_j - x \cdot \sigma_i^j) - N_i^j}{\sqrt{2} \cdot \sigma^2}}} & , |N_i^j - n_j| \geq x \cdot \sigma_i^j \quad \text{and} \quad N_i^j < n_j \end{cases} \quad (18)$$

$$C_i^j(E_i^j) = \begin{cases} N_i^j & , |N_i^j - n_j| < x \cdot \sigma_i^j \\ n_j + x \cdot \sigma_i^j \cdot (1 - E_i^j) & , |N_i^j - n_j| \geq x \cdot \sigma_i^j \quad \text{and} \quad N_i^j > n_j \\ n_j + x \cdot \sigma_i^j \cdot (E_i^j - 1) & , |N_i^j - n_j| \geq x \cdot \sigma_i^j \quad \text{and} \quad N_i^j < n_j \end{cases} \quad (19)$$

όπου  $x$  το εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει χρήση οποιασδήποτε συνάρτησης με τη μορφή του σχήματος 2.23, μεταβάλλοντας έτσι την ευαισθησία τόσο στην ποσοτικοποίηση του σφάλματος όσο και στην τοποθέτηση της διορθωμένης τιμής εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης.

#### 2.3.4. Παράδειγμα εφαρμογής

Σε αντίθεση με τους αλγόριθμους Median Editor και ANN, ο Edge Editor εμφανίζεται πιο πολύπλοκος στην εφαρμογή του. Ωστόσο η αρχή λειτουργίας του είναι τέτοια ώστε να λαμβάνει υπόψη με ακρίβεια όλα τα στατιστικά χαρακτηριστικά των μετρήσεων. Η εφαρμογή του Edge Editor προϋποθέτει την επιλογή ενός θαλάμου 'j' ως θάλαμο αναφοράς και τον προσδιορισμό μέσα από τα ιστορικά δεδομένα των λόγων  $\frac{N_i}{N_j}$  και των συναρτήσεων  $\sigma_i^j = f(n_j)$ , όπως αναφέρθηκαν στους πίνακες 2.1 και 2.4

αντίστοιχα. Σε πραγματικό χρόνο η διαδικασία διόρθωσης πραγματοποιείται αφού

πρώτα επιλεχτεί το εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης (συνήθως 3σ ή 4σ) και ακολουθώντας τα εξής βήματα:

- Μετασχηματισμό των μετρήσεων πραγματικού χρόνου  $N_i$  στη στάθμη μέτρησης του θαλάμου 'j', διαιρώντας τα  $N_i$  με τα  $R_{i,j}$  του πίνακα 2.1. Από αυτό το βήμα προκύπτουν τα  $N_i^j$
- Προσδιορισμό της μέσης στάθμης μέτρησης  $n_j$  χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο weighted mean
- Προσδιορισμό της τυπικής απόκλισης του  $N_i^j$  για το συγκεκριμένο  $n_j$  χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις  $\sigma_i^j=f(n_j)$
- Έλεγχο της εγκυρότητας κάθε  $N_i^j$  εφαρμόζοντας το κριτήριο εγκυρότητας της σχέσης (16)
- Προσδιορισμό του σφάλματος για τις τιμές που παραβιάζουν το κριτήριο εγκυρότητας μέσω της συνάρτησης  $E_i^j(N_i^j)$  της σχέσης (18)
- Υπολογισμό της διορθωμένης τιμής μέσω της συνάρτησης  $C_i^j(E_i^j)$  της σχέσης (19)
- Αντίστροφο μετασχηματισμό των διορθωμένων τιμών  $C_i^j$  ώστε να επανέλθουν στην αρχική στάθμη μέτρησης του θαλάμου 'i', πολλαπλασιάζοντάς τες με τα  $R_{i,j}$  του πίνακα 2.1

Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η παραπάνω διαδικασία, παρατίθεται παράδειγμα εφαρμογής του Edge Editor στο μετρητή νετρονίων της Αθήνας. Έστω ότι έχει γίνει επιλογή του θαλάμου 1 για αναφορά επομένως, σύμφωνα με τον πίνακα 2.1, από την επεξεργασία των ιστοριών δεδομένων προκύπτει ότι:

$$R_{1,1} = 1 \quad R_{2,1} = 1.021 \quad R_{3,1} = 0.893 \quad R_{4,1} = 0.885 \quad R_{5,1} = 0.849 \quad R_{6,1} = 0.895$$

Επίσης σύμφωνα με τον πίνακα 2.4, ισχύουν οι συναρτήσεις :

$$\sigma_1^1 = 0.0291 \cdot n_1 + 8.11290$$

$$\sigma_2^1 = 0.0260 \cdot n_1 + 10.6687$$

$$\sigma_3^1 = 0.0290 \cdot n_1 + 11.7736$$

$$\sigma_4^1 = 0.0302 \cdot n_1 + 10.5180$$

$$\sigma_5^1 = 0.0293 \cdot n_1 + 12.1078$$

$$\sigma_6^1 = 0.0300 \cdot n_1 + 10.8838$$

Έστω επίσης ότι σε κάποια χρονική στιγμή οι μετρήσεις των θαλάμων του μετρητή νετρονίων είναι:

$$N_1 = 552 \quad N_2 = 583 \quad N_3 = 593 \quad N_4 = 515 \quad N_5 = 670 \quad N_6 = 494$$

Διαιρώντας τις ανωτέρω τιμές με τα αντίστοιχα  $R_{i,1}$  προκύπτουν οι μετασχηματισμένες τιμές που είναι:

$$N_1^1 = 552 \quad N_2^1 = 571 \quad N_3^1 = 664.1 \quad N_4^1 = 581.9 \quad N_5^1 = 789.2 \quad N_6^1 = 552$$

Ενώ οι τιμές  $N_i$  δε μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους καθότι κάθε θάλαμος μετρά σε διαφορετική στάθμη μέτρησης, οι τιμές  $N_i^1$  αναφέρονται στην ίδια στάθμη μέτρησης, επομένως η απευθείας σύγκριση μεταξύ τους είναι εφικτή. Σαν πρώτη εκτίμηση επομένως διαφαίνεται ότι οι θάλαμοι 3 και 5 παρουσιάζουν προβληματική συμπεριφορά και μάλιστα ο θάλαμος 5 σε πιο μεγάλο βαθμό. Χρησιμοποιώντας των αλγόριθμό *weighted mean* προκύπτει ότι η μέση στάθμη μέτρησης για το μετρητή νετρονίων στη συγκεκριμένη μέτρηση είναι  $n_1 = 565.4$ .

Από τις εξισώσεις  $n_i^1$  που υπολογίστηκαν προκύπτει ότι για το συγκεκριμένο  $n_1$  η τυπική απόκλιση των μετασχηματισμένων μετρήσεων είναι :

$$\sigma_1^1 = 24.57 \quad \sigma_2^1 = 25.37 \quad \sigma_3^1 = 28.17 \quad \sigma_4^1 = 27.59 \quad \sigma_5^1 = 28.68 \quad \sigma_6^1 = 27.84$$

Επομένως, έχοντας επιλέξει ως εύρος για τα διαστήματα εμπιστοσύνης τα  $3\sigma$ , τα διαστήματα εμπιστοσύνης για τις μετασχηματισμένες τιμές είναι:

$$\begin{aligned}
 491.73 < N_1^1 < 639.15 \\
 489.33 < N_2^1 < 641.55 \\
 480.93 < N_3^1 < 649.95 \\
 482.67 < N_4^1 < 648.21 \\
 479.40 < N_5^1 < 651.48 \\
 481.89 < N_6^1 < 648.99
 \end{aligned}$$

Με βάση αυτά τα διαστήματα εμπιστοσύνης, διαπιστώνεται και στατιστικά ότι οι μετρήσεις των θαλάμων 1, 2, 4 και 6 είναι έγκυρες, ενώ οι μετρήσεις των θαλάμων 3 και 5 είναι εκτός του διαστήματος εμπιστοσύνης. Χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση  $E_i^j(N_i^j)$ , ο δείκτης σφάλματος των θαλάμων υπολογίζεται σε:

$$E_3^1 = 0.298 \quad E_5^1 = 0.966$$

Επιβεβαιώνεται επομένως η διαπίστωση ότι η μέτρηση του θαλάμου 5 είναι περισσότερο "λάθος" από τη μέτρηση του θαλάμου 3 καθώς απέχει περισσότερο από το άκρο του διαστήματος εμπιστοσύνης. Οι διορθωμένες τιμές των  $C_3^1$  και  $C_5^1$  υπολογίζονται από τη συνάρτηση  $C_i^j(E_i^j)$ :

$$C_3^1 = 624.77 \quad C_5^1 = 568.36$$

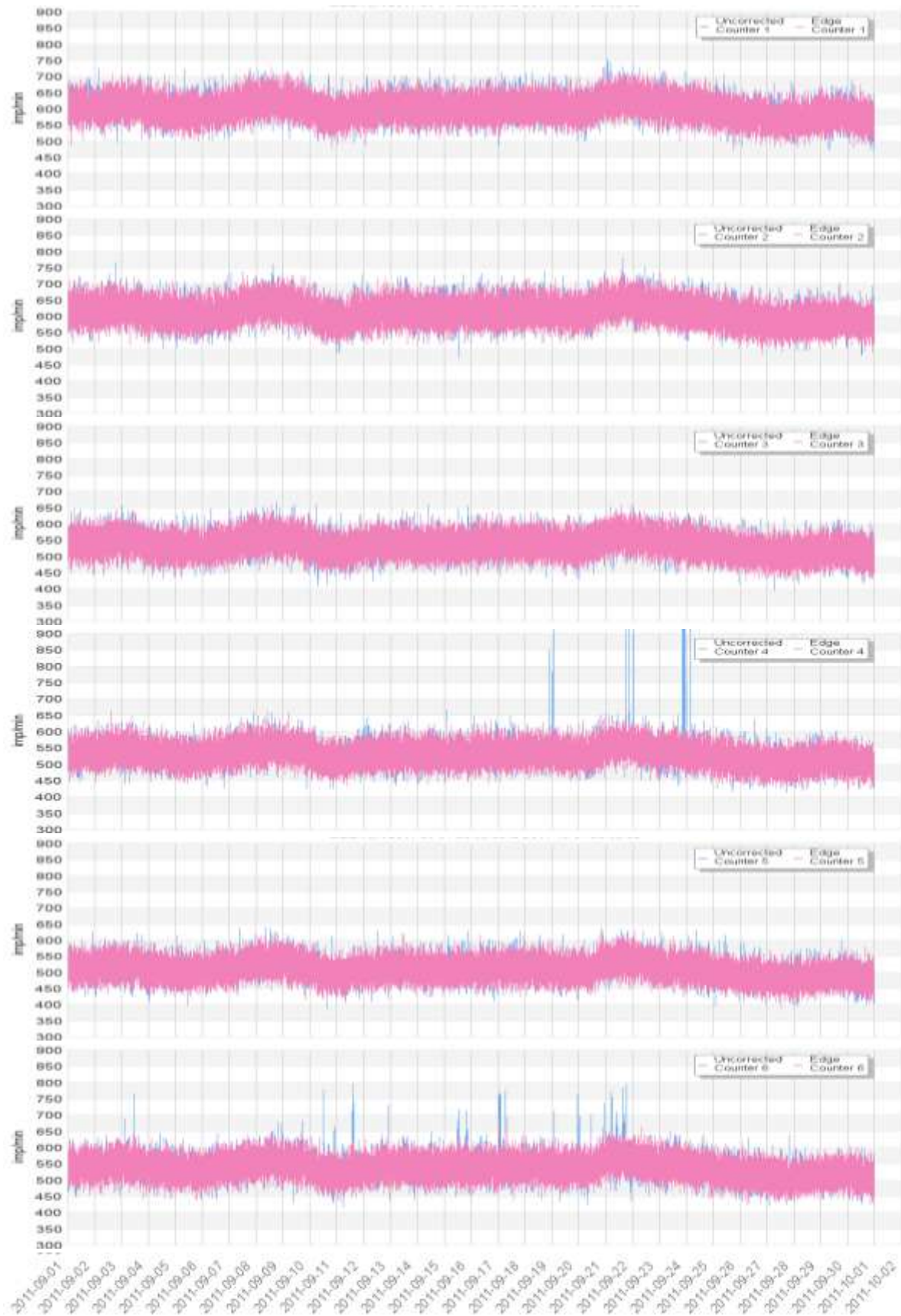
Παρατηρείται ότι επειδή η τιμή  $N_3^1$  έχει μικρότερο δείκτη σφάλματος, η διορθωμένη τιμή  $C_3^1$  τοποθετείται πιο κοντά στο άκρο του διαστήματος εμπιστοσύνης σε σχέση με τη διορθωμένη τιμή της  $N_5^1$  που τοποθετείται ουσιαστικά στο κέντρο του διαστήματος. Τέλος εφαρμόζοντας των αντίστροφο μετασχηματισμό για να επανέλθουν οι διορθωμένες τιμές στο κανονικό επίπεδο μέτρησης των θαλάμων, οι διορθωμένη μέτρηση για το μετρητή νετρονίων είναι:

$$N_1 = 552 \quad N_2 = 583 \quad N_3 = 557.92 \quad N_4 = 515 \quad N_5 = 482.54 \quad N_6 = 494$$

### 2.3.5. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα του Edge Editor όταν χρησιμοποιείται διάστημα εμπιστοσύνης 3σ για τις μετρήσεις του Σεπτεμβρίου 2011 του μετρητή νετρονίων της Αθήνας δίνονται στο σχήμα 2.24. Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι ο Edge Editor καταφέρνει να αποκόπτει τις προβληματικές κορυφές των θαλάμων 4 και 6 όπως και οι αλγόριθμοι Median Editor και ANN. Στο τομέα της αλλοίωσης της στατιστικής των δεδομένων, ο Edge Editor φαίνεται ότι περιορίζει εντελώς το φαινόμενο. Οι διορθωμένες με τις αδιόρθωτες μετρήσεις δεν ξεχωρίζουν σχεδόν καθόλου οπτικά και μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις (όπως στις προβληματικές κορυφές) ξεχωρίζει η γραμμή των πρωτογενών μετρήσεων. Αυτή η βελτίωση οφείλεται στη χρήση του κριτηρίου εγκυρότητας η οποία, στις περισσότερες περιπτώσεις, αφήνει τις πρωτογενείς μετρήσεις ανεπηρέαστες. Επισημαίνεται ότι η αλλοίωση της στατιστικής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης που ορίζεται κατά τη χρήση του αλγορίθμου. Για παράδειγμα, η χρήση ενός στενού διαστήματος εμπιστοσύνης (πχ 2σ) θα οδηγήσει στον χαρακτηρισμό πολλών πρωτογενών τιμών ως εσφαλμένες και σαν επακόλουθο οι διορθωμένες τιμές θα εμφανίζουν μειωμένη στατιστική διακύμανση σε σχέση με τις πρωτογενείς. Το εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης είναι βασική παράμετρος του αλγορίθμου και πρέπει να επιλέγεται με προσοχή. Η χρήση διαστήματος 3σ ή 4σ θεωρείται η ενδεδειγμένη με την πρώτη επιλογή να θεωρείται πιο ασφαλής για τη διόρθωση.





**Σχήμα 2.24:** Διόρθωση δεδομένων του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για τον μήνα Σεπτέμβριο του 2011 χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Edge Editor.

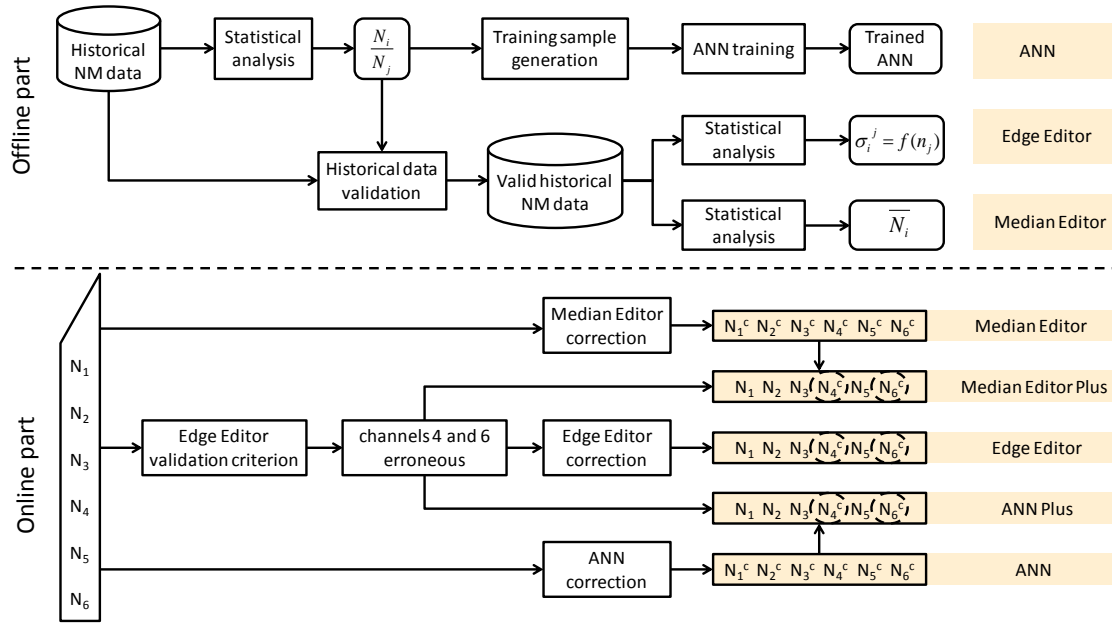
## 2.4. Βελτιστοποίηση και σύγκριση αλγορίθμων

### 2.4.1. Υλοποίηση Median Editor και Plus ANN Plus

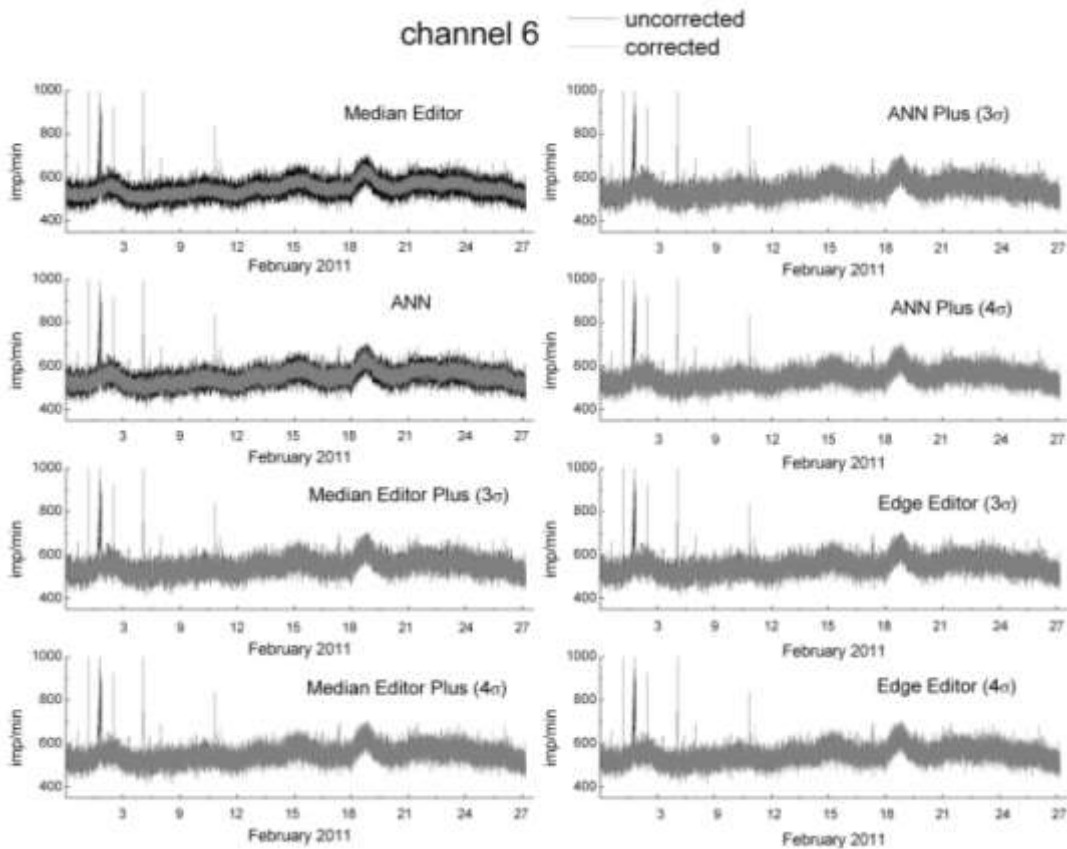
Τα αποτελέσματα των τριών αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος ANN υπερτερεί του Median Editor όσον αφορά την αλλοίωση των μετρήσεων ενώ ο Edge Editor υπερτερεί έναντι και των δύο. Ωστόσο, ενώ η απευθείας σύγκριση του Median Editor με τον ANN είναι εφικτή λόγω του τρόπου εφαρμογής τους, η σύγκριση και των δύο με τον Edge Editor δεν είναι ενδεικτική. Ο λόγος είναι ότι ο Median Editor και ο ANN δρουν σε όλες τις μετρήσεις του μετρητή νετρονίων ενώ ο Edge Editor υιοθετεί ένα κριτήριο εγκυρότητας των μετρήσεων και διορθώνει μόνο ορισμένες από αυτές. Η αλλοίωση επομένως που παρουσιάζουν οι μετρήσεις στη περίπτωση του Median Editor και του ANN, στο μεγαλύτερο βαθμό οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι μετρήσεις επεξεργάζονται χωρίς να γίνεται έλεγχος του αν μια μέτρηση είναι έγκυρη ή όχι.

Το γεγονός ότι η δράση του Edge Editor χωρίζεται σε δύο διακριτά επίπεδα, το ένα για τον προσδιορισμό των προβληματικών μετρήσεων και το άλλο για την διόρθωση τους, επιτρέπει τον συνδυασμό του κριτηρίου εγκυρότητας του Edge Editor με την διαδικασία διόρθωσης των Median Editor και ANN. Συγκεκριμένα, παρότι οι δύο αλγόριθμοι παράγουν διορθωμένες τιμές για όλους του θαλάμους του μετρητή νετρονίων, η χρήση του κριτηρίου εγκυρότητας μπορεί να καθορίσει ποιες από αυτές θα χρησιμοποιηθούν στο διορθωμένο σετ μετρήσεων. Η διαδικασία αυτή, που οδηγεί στη δημιουργία των Median Editor Plus και ANN Plus, αποδίδεται στο σχήμα 2.25.

Παράδειγμα της διόρθωσης κάθε ενός από τους αλγορίθμους δίνεται στο σχήμα 2.26, όπου απεικονίζεται η διόρθωση του θαλάμου 6 του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για το Φεβρουάριο του 2011. Στα διάγραμμα παρουσιάζεται η διόρθωση για τους Median Editor και ANN καθώς και για τους Median Editor Plus, ANN Plus και Edge Editor για δύο περιπτώσεις διαστημάτων εμπιστοσύνης, 3σ και 4σ. Όπως έχει ήδη διαπιστωθεί, όλοι οι αλγόριθμοι διορθώνουν ικανοποιητικά τις προβληματικές μετρήσεις ενώ ο ANN αλλοιώνει εμφανώς λιγότερο τις μετρήσεις που δεν είναι προβληματικές σε σχέση με τον Median Editor. Όσον αφορά τους Median Editor Plus, ANN Plus και Edge Editor, η διόρθωση είναι εμφανώς βελτιωμένη ενώ δε μπορεί να γίνει οπτική σύγκριση μεταξύ τους αφού το αποτέλεσμα είναι παρόμοιο. Όπως αναμένεται η χρήση διαστήματος εμπιστοσύνης 4σ αλλοιώνει λιγότερο τα δεδομένα, αφήνοντας ωστόσο μερικές προβληματικές κορυφές αδιόρθωτες.



Σχήμα 2.25: Υλοποίηση των Median Editor Plus και ANN Plus μέσω του κριτηρίου εγκυρότητας των μετρήσεων του Edge Editor.



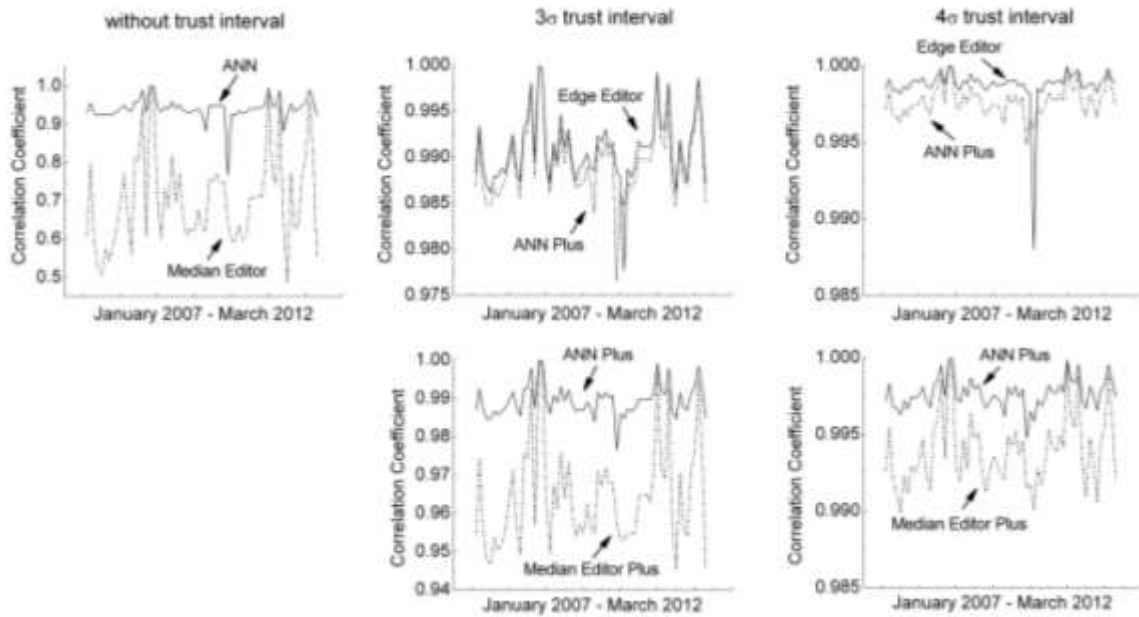
Σχήμα 2.26: Πρωτογενή (μαύρο) και διορθωμένα (γκρι) δεδομένα του θαλάμου 6 του μετρητή νετρονίων της Αθήνας για τον μήνα Φεβρουάριο του 2011.

#### 2.4.2. Ποσοτική σύγκριση αλγορίθμων

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, από τις τρεις συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούν οι αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, η ταχύτητα και η ικανότητα διόρθωσης των προβληματικών μετρήσεων είναι σχετικά εύκολο να επιτευχθεί. Η έρευνα επικεντρώνεται στο να μένουν αναλλοίωτες οι μετρήσεις που θεωρούνται έγκυρες, συνθήκη που ικανοποιούν οι αλγόριθμοι Edge Editor, Median Editor Plus και ANN Plus, χάριν του κριτηρίου εγκυρότητας. Αναμφισβήτητα και οι τρεις αλγόριθμοι μπορούν να εφαρμοστούν στη λειτουργία του μετρητή νετρονίων βελτιώνοντας σημαντικά τα αποτελέσματα σε σχέση με τον καθιερωμένο Median Editor που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι σταθμοί. Ωστόσο, λόγω του κοινού οπτικού αποτελέσματος και για τους τρεις αλγορίθμους, κρίνεται σκόπιμο να γίνει ποσοτική σύγκρισή τους.

Ως βάση για την ποσοτική σύγκριση των αλγορίθμων χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης των διορθωμένων με τις αδιόρθωτες μετρήσεις. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι διακυμάνσεις των οργάνων αποτελούν ελάχιστες περιπτώσεις στο σύνολο των μετρήσεων, ο συντελεστής συσχέτισης αναμένεται να είναι ίσος με τη μονάδα στις περισσότερες περιπτώσεις και να μειώνεται απότομα όταν απαιτούνται διορθώσεις λόγω προβλημάτων στις μετρήσεις. Επισημαίνεται ότι ένας υψηλός συντελεστής συσχέτισης δεν αποτελεί γενικά αξιόπιστο δείκτη της απόδοσης του αλγορίθμου αφού μπορεί να σχετίζεται με ελλιπή διόρθωση των προβληματικών μετρήσεων. Ο συντελεστής συσχέτισης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων μόνο όταν έχει ήδη διαπιστωθεί ότι η διόρθωση των προβλημάτων από τους αλγορίθμους είναι επαρκής και σωστή, όπως έχει ήδη συμβεί με τους αλγορίθμους που παρουσιάστηκαν.

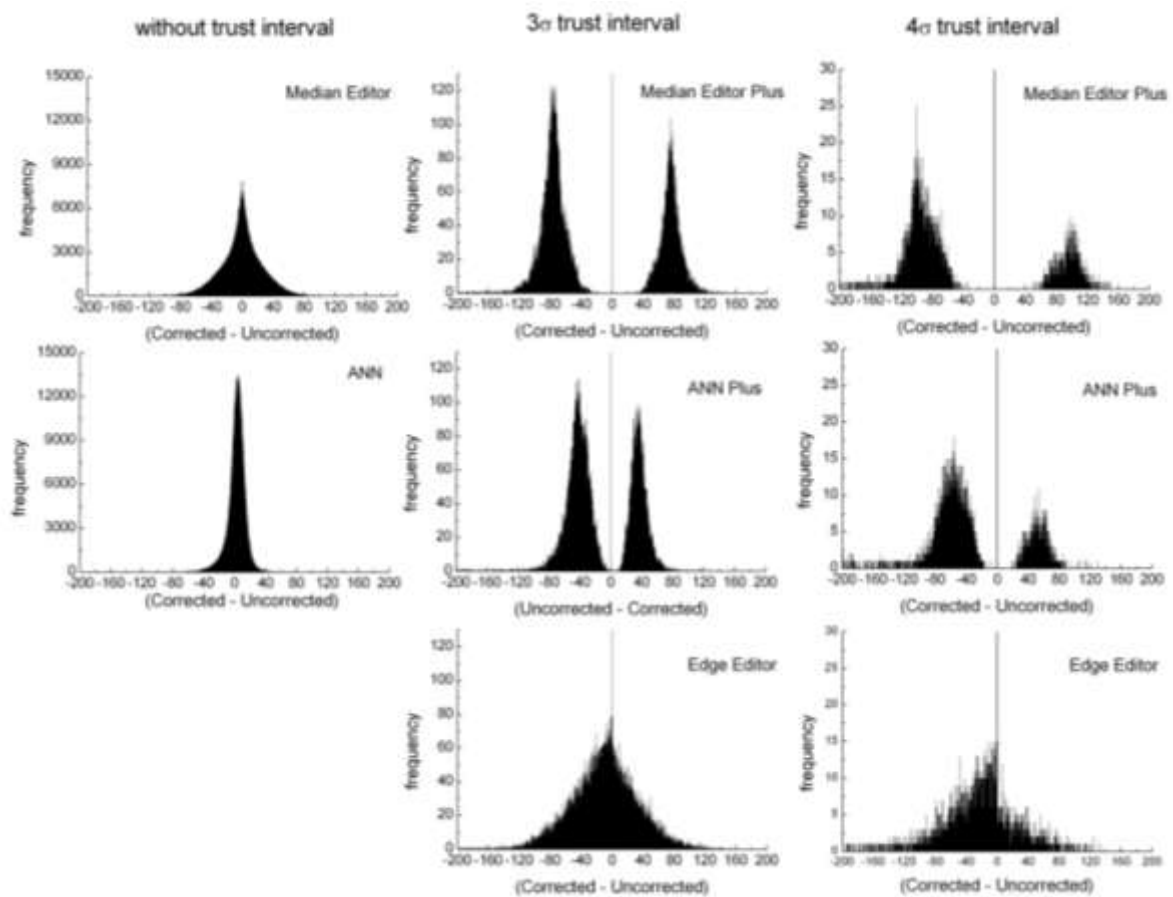
Ο συντελεστής συσχέτισης των πρωτογενών δεδομένων με τις διορθωμένες μετρήσεις για τον θάλαμο 3 του μετρητή νετρονίων της Αθήνας χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις ανά μήνα από το 2007 έως τον Μάρτιο του 2012 απεικονίζεται στο σχήμα 2.27:



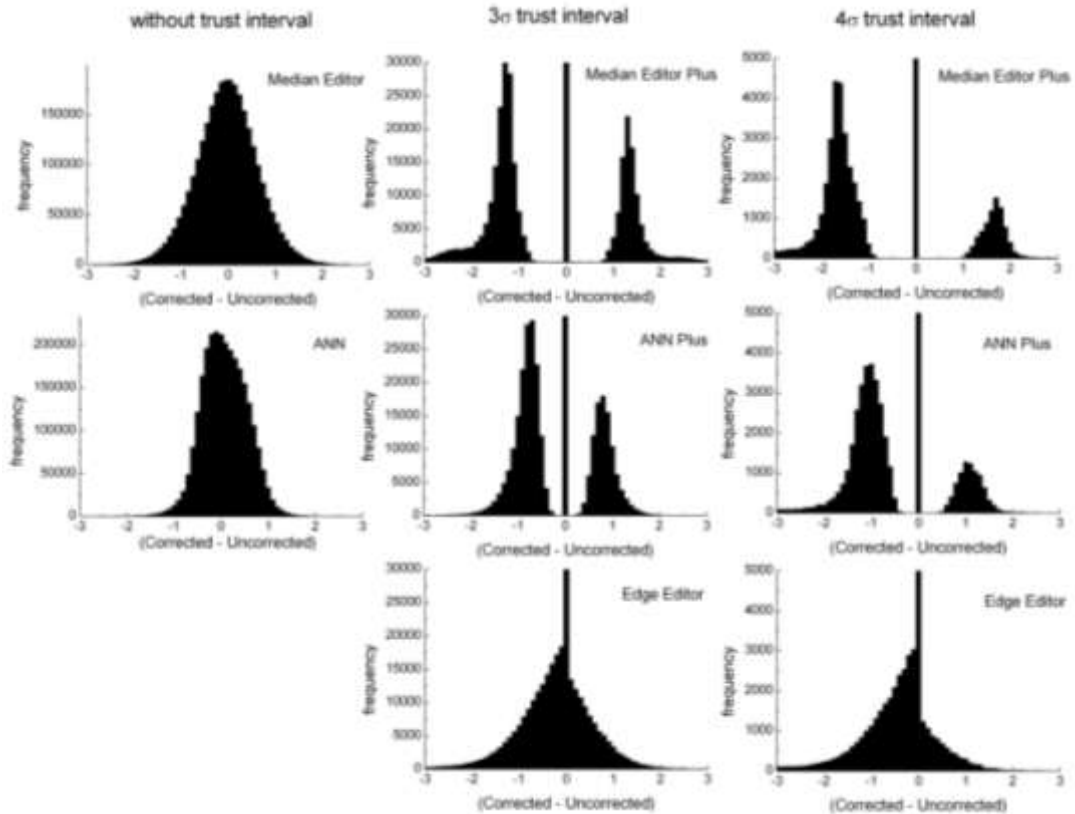
**Σχήμα 2.27:** Συντελεστής συσχέτισης των διορθωμένων με τις πρωτογενείς μετρήσεις του θαλάμου 3 σε μηνιαία βάση, από τον Ιανουάριο του 2007 έως το Μάρτιο του 2012.

Όπως αναμενόταν, οι συντελεστές συσχέτισης κυμαίνονται γύρω από κάποια σταθερή τιμή ενώ παρατηρούνται απότομες μειώσεις. Οι μειώσεις αυτές αντιστοιχούν σε μήνες όπου οι μετρήσεις του θαλάμου εμφάνιζαν πολλές προβληματικές τιμές, ως εκ τούτου οι διορθωμένες μετρήσεις διαφέρουν σημαντικά από τις πρωτογενείς αφού οι αλγόριθμοι πραγματοποιούν πολλές διορθώσεις. Αγνοώντας τις απότομες μειώσεις του συντελεστή συσχέτισης και παρατηρώντας τις υπόλοιπες τιμές που αντιστοιχούν σε μήνες χωρίς σημαντικά προβλήματα, συμπεραίνεται ότι ενώ ο συντελεστής συσχέτισης του Median Editor κυμαίνεται μεταξύ του 0.5 και του 0.9, ο συντελεστής για τον ANN κυμαίνεται σε τιμές άνω του 0.9. Επιβεβαιώνεται επομένως η διαπίστωση που προέκυψε οπτικά, ότι η αλλοίωση των μετρήσεων είναι μικρότερη στο ANN σε σχέση με τον Median Editor. Η εφαρμογή του κριτηρίου εγκυρότητας του Edge Editor βελτιώνει τα αποτελέσματα. Η χρήση κριτηρίου με διάστημα εμπιστοσύνης είτε 3σ είτε 4σ συνεπάγεται τιμές του συντελεστή συσχέτισης άνω του 0.95. Οι διαφορές είναι πολύ μικρές ωστόσο είναι σαφής η υπεροχή του ANN Plus έναντι του Median Editor Plus. Η συμπεριφορά του Edge Editor με τον ANN Plus είναι παρόμοια και απαιτείται πολύ μικρή κλίμακα προκειμένου να φανεί η μικρή υπεροχή του Edge Editor.

Ένας εναλλακτικός τρόπος σύγκρισης των αλγορίθμων είναι μέσω των αλγεβρικών διαφορών των πρωτογενών από τις διορθωμένες τιμές. Λαμβάνοντας και πάλι υπόψη ότι οι διακυμάνσεις οργάνων επηρεάζουν ελάχιστες τιμές συγκριτικά με το πλήθος των μετρήσεων, η διαφορά διορθωμένων-πρωτογενών τιμών αναμένεται να είναι μηδέν στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι διαφορές για τον θάλαμο 4 του μετρητή νετρονίων της Αθήνας απεικονίζονται στο σχήμα 2.28 ενώ για το σύνολο της μέτρησης του ανιχνευτή (μέσος όρος μέτρησης όλων των θαλάμων) στο σχήμα 2.29:



**Σχήμα 2.28:** Ιστόγραμμα των διαφορών διορθωμένων-πρωτογενών μετρήσεων του θαλάμου 4 του μετρητή νετρονίων της Αθήνας από τον Ιανουάριο 2007 έως τον Μάρτιο του 2011.



**Σχήμα 2.29:** Ιστογράμματα των διαφορών διορθωμένων-πρωτογενών μετρήσεων της συνολικής μέτρησης του μετρητή νετρονίων της Αθήνας από τον Ιανουάριο 2007 έως τον Μάρτιο του 2011.

Στην περίπτωση του Median Editor οι διαφορές κυμαίνονται γύρω από το μηδέν. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται για τον ANN με τη διαφορά ότι το ιστογράμματα είναι στενότερο που σημαίνει ότι οι διορθωμένες τιμές είναι κοντύτερα στις πρωτογενείς. Εντελώς διαφορετική συμπεριφορά παρατηρείται στους υπόλοιπους αλγόριθμους λόγω της εφαρμογής του κριτηρίου εγκυρότητας. Στα αντίστοιχα ιστογράμματα παρατηρείται μία μεμονωμένη κορυφή στο μηδέν που αντιστοιχεί στις περιπτώσεις που οι μετρήσεις είναι εντός του διαστήματος εμπιστοσύνης και επομένως οι διορθωμένες τιμές είναι ίσες με τις πρωτογενείς. Επισημαίνεται ότι οι αυτόνομες κορυφές έχουν πολύ μεγάλο ύψος και έχουν περικοπεί στο ιστογράμματα προκειμένου να μην απαιτηθεί η χρήση μεγάλης κλίμακας. Εκατέρωθεν της κορυφής στο μηδέν παρατηρούνται δύο επιπλέον κορυφές που αντιστοιχούν στις μετρήσεις που παραβιάζουν το κριτήριο εγκυρότητας και απαιτούν διόρθωση. Οι κορυφές βρίσκονται περίπου στην ίδια απόσταση από την κεντρική κορυφή και έχουν παρατηρήσιμη

διαφορά στο ύψος τους. Αυτό συμβαίνει γιατί μια διακύμανση οργάνου είναι πιο πιθανό να δημιουργήσει μία αύξηση στο ρυθμό μέτρησης, επομένως η αλγεβρική διαφορά της διορθωμένης-αδιόρθωτης μέτρησης είναι πιθανότερο να έχει αρνητική τιμή. Συγκρίνοντας τα ιστογράμματα των Median Editor Plus, ANN Plus και Edge Editor συμπεραίνεται ότι οι διαφορές διορθωμένων-πρωτογενών μετρήσεων είναι μακρύτερα από το μηδέν σε σχέση με τον ANN Plus ενώ στην περίπτωση του Edge Editor οι δύο κορυφές είναι τόσο κοντά ώστε να ενώνονται. Τα συμπεράσματα είναι κοινά ανεξάρτητα από το αν χρησιμοποιείται διάστημα εμπιστοσύνης 3σ ή 4σ. Τα συμπεράσματα είναι κοινά τόσο για τις μετρήσεις του θαλάμου 4 στο σχήμα 2.28 όσο και για τη συνολική μέτρηση του μετρητή νετρονίων στο σχήμα 2.29.

Ένας τελευταίος έλεγχος όσον αφορά τη συμπεριφορά των αλγορίθμων είναι η ευαισθησία που παρουσιάζουν στην επιλογή των αρχικών συνθηκών. Όπως αποτυπώνεται συγκεντρωτικά στο σχήμα 2.25, κάθε ένας από τους αλγορίθμους απαιτεί τον καθορισμό παραμέτρων που προκύπτουν από τη στατιστική επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων του μετρητή νετρονίων. Η ακριβής επιλογή των παραμέτρων προφανώς είναι προαπαιτούμενο για τη σωστή λειτουργία του αλγορίθμου, για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να ελεγχθεί η ανοχή του αλγορίθμου στη πιθανή μεταβολή κάποια αρχικής συνθήκης. Προκειμένου να γίνει αυτό ο έλεγχος, εισήχθη μία αυθαίρετη αύξηση κατά 10% της αρχικής συνθήκης που σχετίζεται με τον θάλαμο 3 για τον Median Editor Plus και για τον Edge Editor ( $\bar{N}_3$  and  $R_{3,j}$  αντίστοιχα) και ελέγχθηκε η απόδοση του μέσω του συντελεστή συσχέτισης. Τα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Αυγούστου 2011 δίνονται στον πίνακα 2.6. Όταν χρησιμοποιείται ένα διάστημα εμπιστοσύνης 3σ η μεταβολή του συντελεστή συσχέτισης είναι μεγάλη για τον Median Editor Plus ενώ για τον Edge Editor είναι αρκετά μικρότερη. Το ίδιο αποτέλεσμα παρατηρείται όταν γίνεται χρήση διαστήματος εμπιστοσύνης 4σ, αποδεικνύοντας ότι ο Edge Editor παρουσιάζει μεγαλύτερη ανοχή στο λάθος προσδιορισμό των αρχικών συνθηκών.



	correct initial condition for channel 3		10% error in the initial condition for channel 3	
	3σ trust interval	4σ trust interval	3σ trust interval	4σ trust interval
Median Editor Plus	0.9455	0.9909	0.3864	0.7961
Edge Editor	0.9862	0.9986	0.7590	0.9600

**Πίνακα 2.6:** Συντελεστής συσχέτισης των διορθωμένων με τις πρωτογενείς μετρήσεις του θαλάμου 3 για τον Αύγουστο 2011 έχοντας εισάγει μία αύξηση 10% στην αρχική συνθήκη.

## 2.5. Προσδιορισμός βαρομετρικού συντελεστή

### 2.5.1. Διόρθωση πρωτογενών μετρήσεων ως προς τη ατμοσφαιρική πίεση

Στις προηγούμενες παραγράφους αναπτύχθηκε λεπτομερώς η διαδικασία ελέγχου και διόρθωσης των πρωτογενών μετρήσεων του μετρητή νετρονίων ως προς τις διακυμάνσεις οργάνων. Αυτή η διαδικασία αποτελεί τη μία από τις δύο διορθώσεις που είναι απαραίτητες κατά την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων. Η δεύτερη διαδικασία, που θα αναπτυχθεί σε αυτή τη παράγραφο, αφορά στη διόρθωση των πρωτογενών μετρήσεων ως προς τις μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Ο λόγος που είναι απαραίτητη αυτή η διόρθωση είναι ότι παρατηρείται μεγάλη συσχέτιση του ρυθμού μέτρησης παλμών του μετρητή νετρονίων από την ατμοσφαιρική πίεση της τοποθεσίας που βρίσκεται ο σταθμός (Carmichael et al., 1968; Dorman, 1972, 1974). Η φυσική εξήγηση πίσω από αυτό το φαινόμενο σχετίζεται με το γεγονός ότι ο μετρητής νετρονίων ανιχνεύει τη νουκλεονική συνιστώσα του καταιγισμού σωματιδίων που δημιουργείται εντός της ατμόσφαιρας. Η παραγωγή της νουκλεονικής συνιστώσας επηρεάζεται από την πυκνότητα που έχουν τα στρώματα της ατμόσφαιρας, παράμετρος που αντικατοπτρίζεται στην ατμοσφαιρική πίεση στο έδαφος. Αντίστοιχη εξάρτηση εμφανίζει η μιονική συνιστώσα από την θερμοκρασία, ωστόσο η παράμετρος της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει τις μετρήσεις του μετρητή νετρονίων σε σημαντικό βαθμό, επομένως δεν μελετάται στην εργασία αυτή. Σε αντίθεση με τη διόρθωση ως προς τις διακυμάνσεις οργάνων που εφαρμόζεται σε κάθε θάλαμο του μετρητή νετρονίων, η διόρθωση ως προς την ατμοσφαιρική πίεση εφαρμόζεται στο σύνολο της μέτρησης αφού η εξάρτηση είναι η ίδια για όλους τους θαλάμους.

Θεωρώντας μια συγκεκριμένη ροή πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, η εξάρτηση του ρυθμού μέτρησης των παλμών του μετρητή νετρονίων από την ατμοσφαιρική πίεση εκφράζεται από τη σχέση :

$$dN = -\beta \cdot N \cdot dP \quad (20),$$

όπου  $\beta$  είναι ο βαρομετρικός συντελεστής του σταθμού. Εάν ο ρυθμός μέτρησης είναι  $N_0$  όταν η ατμοσφαιρική πίεση είναι  $P_0$ , τότε με ολοκλήρωση της σχέσης (20) προκύπτει ότι για ατμοσφαιρική πίεση  $P$  ο ρυθμός μέτρησης είναι :

$$N = N_0 \cdot e^{-\beta \cdot (P - P_0)} \quad (21)$$

Εξ ορισμού ο βαρομετρικός συντελεστής  $\beta$  αναμένεται να εξαρτάται από τις μεταβολές της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας, αφού διαφορετική ροή ή ενέργεια εισερχόμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα συνεπάγεται μεταβολή στην ανάπτυξη της νουκλεονικής συνιστώσας και διαφορετική εξάρτησή της από την ατμοσφαιρική πίεση. Επομένως ο βαρομετρικός συντελεστής αναμένεται να μεταβάλλεται σε περιόδους έντονων γεγονότων της κοσμικής ακτινοβολίας, ενώ αναμένεται αργή μεταβολή του κατά τη διάρκεια του ηλιακού κύκλου ακολουθώντας την αργή μεταβολή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας που φτάνει στη Γη. Ωστόσο, δεδομένου ότι τα γεγονότα που επηρεάζουν την πρωτογενή κοσμική ακτινοβολία είναι μεμονωμένα, κάθε σταθμός συνδέεται με έναν σταθερό βαρομετρικό συντελεστή ενώ εξετάζονται οι μεταβολές του μόνο κατά τον ηλιακό κύκλο (Belon et al., 1993). Η τιμή του βαρομετρικού συντελεστή για το σταθμό της Αθήνας έχει υπολογιστεί σε  $-0.7 \text{ \%/mb}$ .

Όσον αφορά την επεξεργασία των πρωτογενών μετρήσεων, προκειμένου οι μετρήσεις του μετρητή νετρονίων να είναι αξιοποιήσιμες και οι μεταβολές που παρατηρούνται να σχετίζονται με τη μεταβολή της ροής της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας και όχι με τη μεταβολή της ατμοσφαιρικής πίεσης, θα πρέπει να ανάγονται σε μια κοινή ατμοσφαιρική πίεση  $P_0$ . Θεωρώντας ότι ο βαρομετρικός συντελεστής είναι σταθερός, η διόρθωση των μετρήσεων ως προς την πίεση πραγματοποιείται μέσω της σχέσης:

$$N_0 = N \cdot e^{\beta \cdot (P - P_0)} \quad (22)$$

Η παραπάνω σχέση είναι εύκολο να εφαρμοστεί για τη διόρθωση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και η χρήση της θεωρείται τετριμμένη από όλους τους σταθμούς. Η έρευνα επικεντρώνεται στις μεθόδους για τον ακριβή υπολογισμό του βαρομετρικού συντελεστή προκειμένου να είναι ακριβής η διόρθωση των μετρήσεων ως προς την πίεση.

### 2.5.2. Τυπική μέθοδος υπολογισμού βαρομετρικού συντελεστή

Η τυπική μέθοδος υπολογισμού προκύπτει με την εφαρμογή λογαρίθμου στη σχέση (21) :

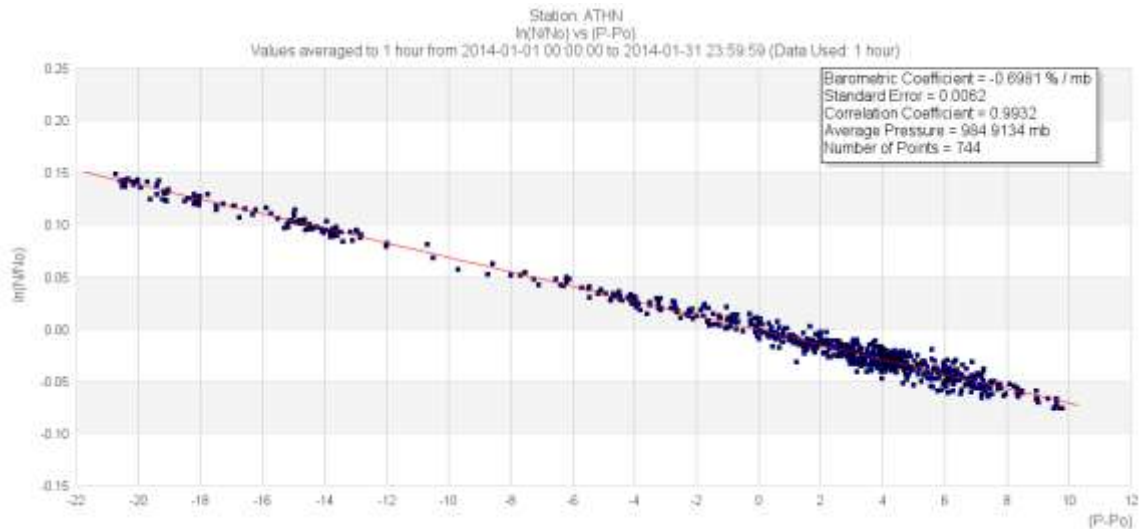
$$N = N_o \cdot e^{-\beta \cdot (P - P_o)} \Rightarrow \frac{N}{N_o} = e^{-\beta \cdot (P - P_o)} \Rightarrow \ln \frac{N}{N_o} = -\beta \cdot (P - P_o) \quad (23)$$

Εάν επομένως παραστεί γραφικά το  $\ln \frac{N}{N_o}$  με το  $(P - P_o)$  τότε αναμένεται να προκύψει ευθεία, η κλίση της οποίας θα δίνει τον βαρομετρικό συντελεστή. Ως  $P_o$  και  $N_o$  στους υπολογισμούς επιλέγεται η μέση τιμή της πίεσης και των παλμών αντίστοιχα για το χρονικό διάστημα που λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό. Προκειμένου ο υπολογισμός να είναι ακριβής το διάστημα που επιλέγεται στον υπολογισμό θα πρέπει να έχει δύο χαρακτηριστικά:

- να περιέχει μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης προκειμένου να υπάρχει επαρκής διασπορά σημείων στον άξονα  $(P - P_o)$  ώστε να είναι δυνατό να υπολογιστεί η κλίση
- να μην περιέχει μεταβολές της πρωτογενούς κοσμική ακτινοβολία που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας (πχ Forbush decrease) προκειμένου η διασπορά των σημείων στον άξονα  $\ln \frac{N}{N_o}$  να οφείλεται μόνο στις μεταβολές της πίεσης και όχι σε γεγονότα της κοσμικής ακτινοβολίας

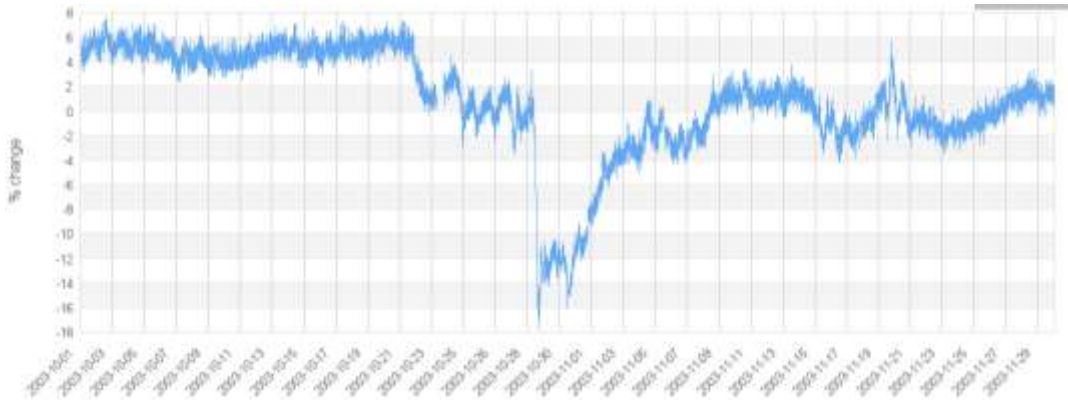
Παράδειγμα υπολογισμού του βαρομετρικού συντελεστή του μετρητή νετρονίων της Αθήνας χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Ιανουαρίου 2014 δίνεται στο σχήμα 2.30. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι ο βαρομετρικός συντελεστής για το συγκεκριμένο μήνα

είναι  $-0.6982 \text{ \%}/\text{mb}$  ενώ ως δείκτης για την ακρίβεια του υπολογισμού μπορεί να θεωρηθεί ο συντελεστής συσχέτισης του  $\ln \frac{N}{N_0}$  με το  $(P-P_0)$  που για το συγκεκριμένο υπολογισμό είναι 0.9932.



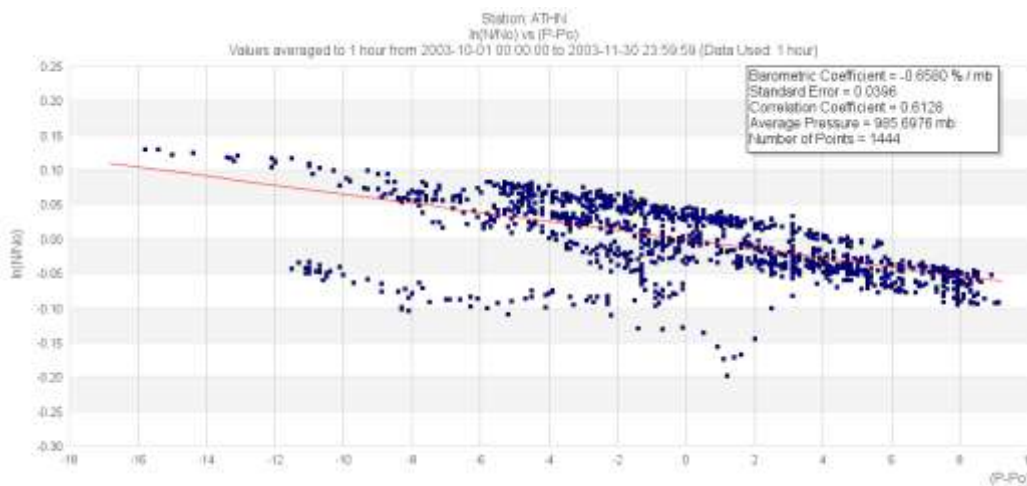
**Σχήμα 2.30:** Υπολογισμός βαρομετρικού συντελεστή για το μετρητή νετρονίων της Αθήνας χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Ιανουαρίου 2014.

Η παραπάνω μέθοδος, αν και απλή, δεν παρέχει απόλυτη ακρίβεια στον τρόπο υπολογισμού του βαρομετρικού συντελεστή. Η απαίτηση να μην παρατηρούνται διακυμάνσεις της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας κατά το χρονικό διάστημα που λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό δε μπορεί να επιβεβαιωθεί απόλυτα, εισάγοντας έτσι συστηματικά σφάλματα στον υπολογισμό. Στην ακραία περίπτωση όπου κατά το χρονικό διάστημα του υπολογισμού έχει συμβεί κάποιο γεγονός που μεταβάλλει σημαντικά τη ροή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας, ο υπολογισμός προβλέπεται να είναι αναξιόπιστος. Παράδειγμα τέτοιας περιόδου είναι το διάστημα Οκτωβρίου-Νοεμβρίου 2003 όπου πραγματοποιήθηκε μεγάλη μείωση Forbush. Στο σχήμα 2.31 παρουσιάζεται η χρονοσειρά των διορθωμένων ως προς την πίεση μετρήσεων του σταθμού της Ρώμης, ενός κοντινού σταθμού στην Αθήνα τόσο σαν τοποθεσία όσο και σαν κατώφλι δυσκαμψίας:



**Σχήμα 2.31:** Χρονοσειρά των διορθωμένων ως προς την πίεση μετρήσεων Οκτωβρίου-Νοεμβρίου 2003 του σταθμού της Ρώμης. Παρατηρείται μεγάλη μείωση Forbush.

Ο υπολογισμός του βαρομετρικού συντελεστή χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις αυτής της περιόδου για το σταθμό της Αθήνας δίνεται στο σχήμα 2.32. Παρατηρείται μεγάλη διασπορά σημείων στο κατακόρυφο άξονα, αποτέλεσμα της μείωσης του μετρούμενου ρυθμού κατά τη μείωση Forbush. Η κλίση της ευθείας μπορεί να προσδιοριστεί δύσκολα, γεγονός που αποτυπώνεται και από τον πολύ χαμηλό συντελεστή συσχέτισης, επομένως η τιμή που υπολογίζεται για το βαρομετρικό συντελεστή δε μπορεί σε καμία περίπτωση να θεωρηθεί αξιόπιστη.



**Σχήμα 2.32:** Υπολογισμός βαρομετρικού συντελεστή για το μετρητή νετρονίων της Αθήνας χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Οκτωβρίου-Νοεμβρίου 2006, όπου πραγματοποιήθηκε μεγάλη μείωση Forbush.

### 2.5.3. Μέθοδος υπολογισμού με χρήση σταθμού αναφοράς

Η τυπική μέθοδος υπολογισμού του βαρομετρικού συντελεστή ενδείκνυται να χρησιμοποιείται μόνο σε ήσυχες περιόδους που δεν παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές στη ροή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Ωστόσο η ανάγκη για ακριβή υπολογισμό του βαρομετρικού συντελεστή οδήγησε στην ανάπτυξη εναλλακτικής μεθόδου κατά την οποία παύει να ισχύει η απαίτηση της ήσυχης περιόδου. Κατά την μέθοδο αυτή οι μεταβολές στη ροή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας υπολογίζονται από τις διορθωμένες με την πίεση μετρήσεις ενός σταθμού αναφοράς και αφαιρούνται από τις μετρήσεις του σταθμού για τον οποίο γίνεται ο υπολογισμός του βαρομετρικού συντελεστή (Chiba, 1976; Kobelev et al., 2011). Μοναδική απαίτηση της μεθόδου είναι ο σταθμός αναφοράς να είναι κοντινός σε τοποθεσία και με παρόμοιο κατώφλι δυσκαμψίας με τον σταθμό για τον οποίο πραγματοποιείται ο υπολογισμός, προκειμένου οι μεταβολές στη ροή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας να ανταποκρίνονται και για τους δύο σταθμούς.

Από μαθηματικής πλευράς, εάν θεωρηθεί ότι η μέτρηση του σταθμού περιέχει μεταβολές όχι μόνο λόγω μεταβολών της ατμοσφαιρικής πίεσης αλλά και λόγω μεταβολών στη ροή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας, τότε η μέτρηση μπορεί να εκφραστεί ως :

$$N' = N \cdot (1 + \nu) \quad (24),$$

όπου  $N'$  είναι η μέτρηση του σταθμού και  $(1 + \nu)$  ο παράγοντας που περιέχει τις διακυμάνσεις λόγω μεταβολών της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Αντικαθιστώντας το  $N$  από τη σχέση (21) και εφαρμόζοντας λογαρίθμους προκύπτει ότι :

$$N' = N_0 \cdot (1 + \nu) \cdot e^{-\beta \cdot (P - P_0)} \quad (25)$$

$$\ln N' - \ln N_0 - \ln(1 + \nu) = -\beta \cdot (P - P_0) \quad (26)$$

Η διακύμανση  $\nu$  υπολογίζεται μέσω των διορθωμένων ως προς την πίεση μετρήσεων του σταθμού αναφοράς. Συγκεκριμένα, εάν για το διάστημα που γίνεται ο υπολογισμός, η μέση τιμή μέτρησης του σταθμού αναφοράς διορθωμένη ως προς την πίεση είναι  $N_{pcorr}^S$

τότε η διακύμανση  $v_s$  για κάθε μέτρηση του σταθμού αναφοράς σε αυτό το διάστημα είναι :

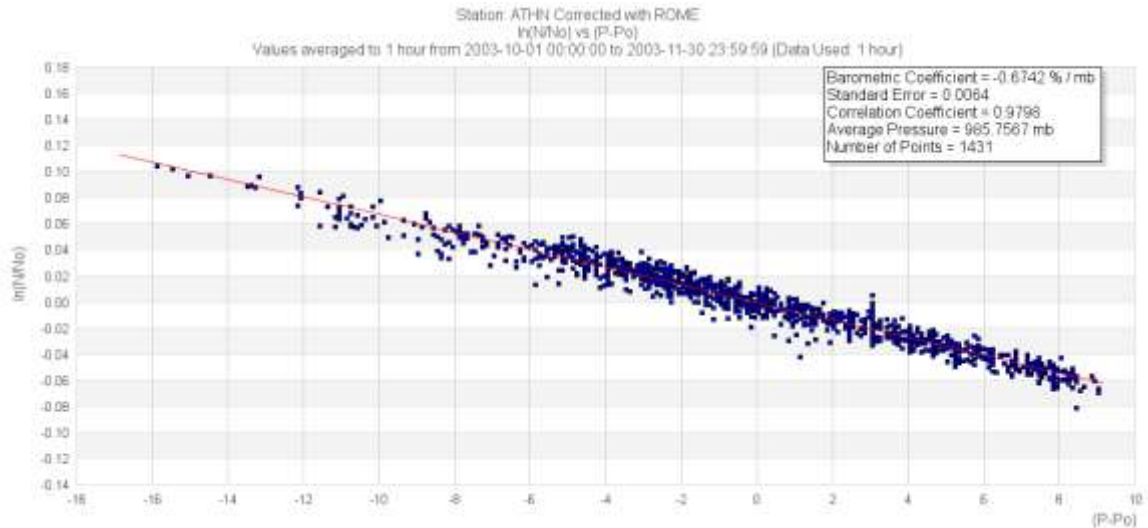
$$v_s = \frac{N_{pcorr}^S - \overline{N_{pcorr}^S}}{N_{pcorr}^S} \quad (27)$$

Προκειμένου να μετασχηματιστεί η διακύμανση  $v_s$  του σταθμού αναφοράς στη διακύμανση του κύριου σταθμού για τον οποίο πραγματοποιείται ο υπολογισμός, γίνεται χρήση των συντελεστών σύζευξης (coupling coefficients) των σταθμών (Belon et al., 1993). Εάν οι αρμονικές μηδενικής τάξης των συντελεστών σύζευξης είναι  $C_0$  και  $C_0^S$  για το κύριο σταθμό και για το σταθμό αναφοράς αντίστοιχα, τότε η σχέση (26) γίνεται :

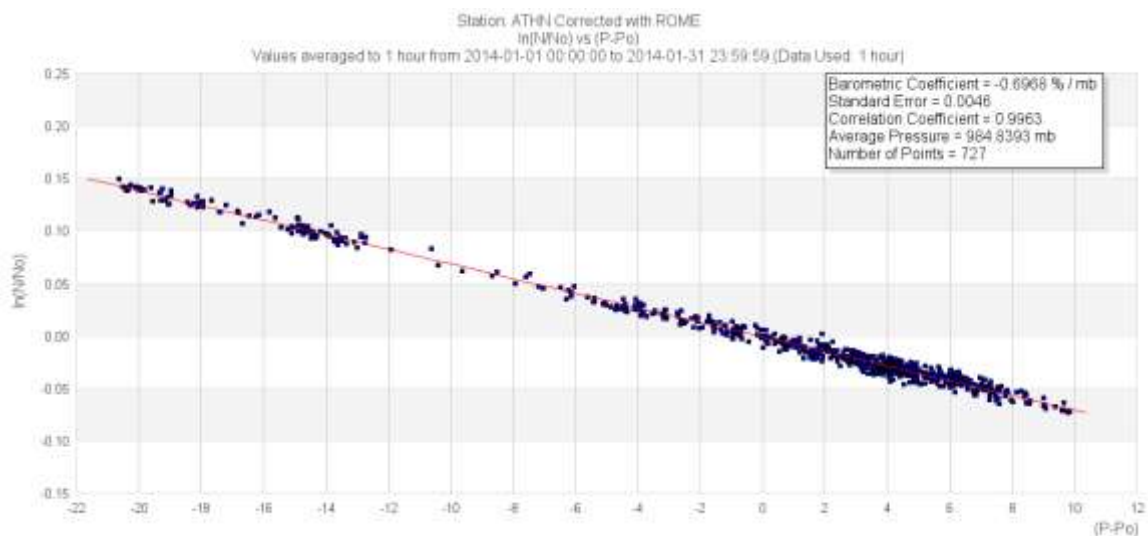
$$\ln N' - \ln N_0 - \ln\left(1 + \frac{C_0}{C_0^S} v_s\right) = -\beta(P - P_0) \quad (28)$$

Οι συντελεστές σύζευξης θεωρούνται γνωστοί και ο υπολογισμός τους δεν αποτελεί τμήμα της συγκεκριμένης μεθόδου.

Σε αντιστοιχία με τη σχέση (23), ο υπολογισμός του βαρομετρικού συντελεστή γίνεται με γραφική παράσταση των  $\ln N' - \ln N_0 - \ln\left(1 + \frac{C_0}{C_0^S} v_s\right)$  με το  $(P - P_0)$ . Σε συνέχεια του σχήματος 2.32, όπου έγινε υπολογισμός του βαρομετρικού συντελεστή της Αθήνας με την τυπική μέθοδο υπολογισμού κατά τη διάρκεια μείωσης Forbush, το αντίστοιχο αποτέλεσμα με χρήση του σταθμού της Ρώμης ως αναφορά δίνεται στο σχήμα 2.33. Η βελτίωση στο υπολογισμό είναι εντυπωσιακή. Παρατηρείται πλήρης συσχέτιση των μεταβλητών που απεικονίζονται γεγονός που αποτυπώνεται στο συντελεστή συσχέτισης, ο οποίος έχει ανέβει στο 0.98. Η συγκεκριμένη μέθοδος υπολογισμού του βαρομετρικού συντελεστή δεν είναι χρήσιμη μόνο για τον υπολογισμό σε περιόδους έντονων φαινομένων κοσμικής ακτινοβολίας. Ακόμη και σε ήσυχες περιόδους βελτιώνει τον υπολογισμό αφού διορθώνει τις μικρές διακυμάνσεις που αναπόφευκτα παρατηρούνται. Για παράδειγμα ο υπολογισμός χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Ιανουαρίου 2014, που παρουσιάστηκε στο σχήμα 2.30, βελτιώνεται ακόμη περισσότερο χρησιμοποιώντας το σταθμό της Ρώμης ως αναφορά. Το σχετικό αποτέλεσμα απεικονίζεται στο σχήμα 2.34.



**Σχήμα 2.33:** Υπολογισμός βαρομετρικού συντελεστή για το μετρητή νετρονίων της Αθήνας χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Οκτωβρίου-Νοεμβρίου 2006 και με σταθμό αναφοράς της Ρώμης. Ο υπολογισμός είναι ακριβής παρότι κατά τη περίοδο αυτή πραγματοποιήθηκε μεγάλη μείωση Forbush.

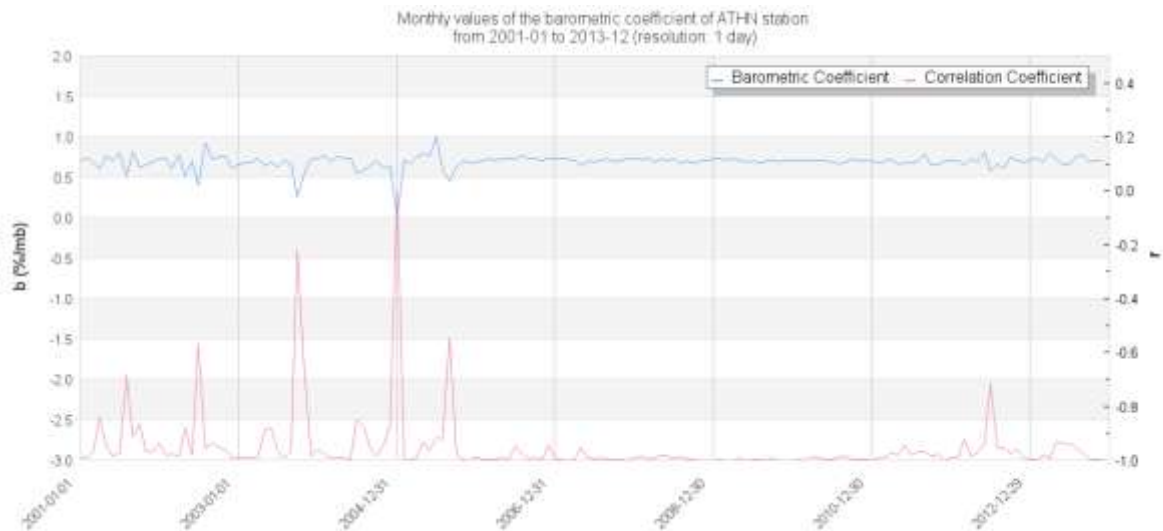


**Σχήμα 2.34:** Υπολογισμός βαρομετρικού συντελεστή για το μετρητή νετρονίων της Αθήνας χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις του Ιανουαρίου 2014 και με σταθμό αναφοράς της Ρώμης. Αν και λόγω της ήσυχης περιόδου ο υπολογισμός χωρίς σταθμό αναφοράς είναι ακριβής, η χρήση σταθμού αναφοράς βελτιώνει ακόμη περισσότερο την εκτίμηση.



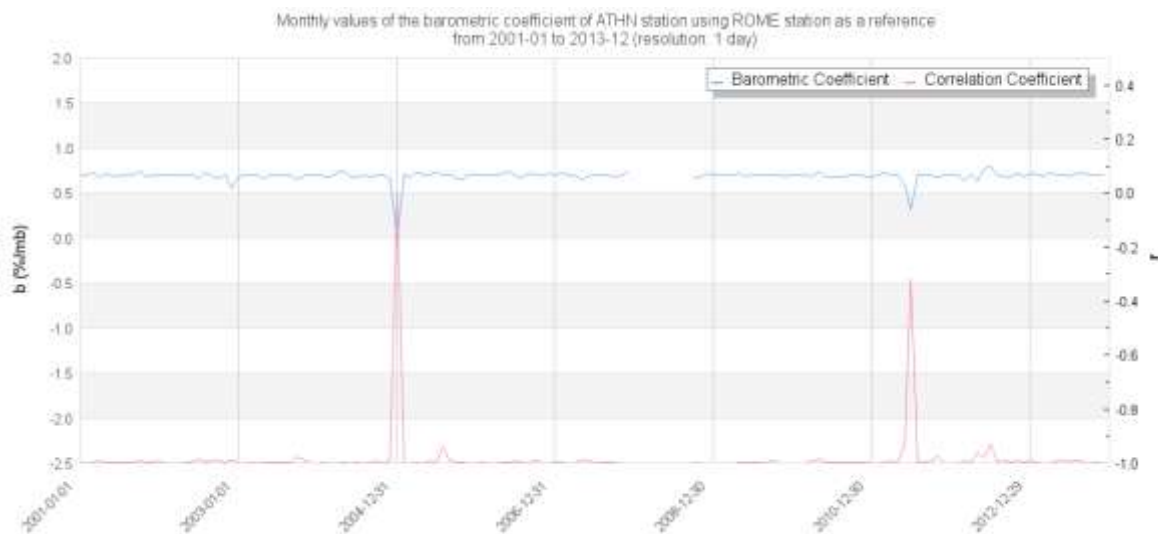
#### 2.5.4. Αποτελέσματα

Ο υπολογισμός του βαρομετρικού συντελεστή για το σταθμό της Αθήνας χρησιμοποιώντας τις μηνιαίες μετρήσεις από το 2001 έως και το 2013 και χωρίς τη χρήση σταθμού αναφοράς παρουσιάζεται στο σχήμα 2.35. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται σε αντίστροφη κλίμακα ο συντελεστής συσχέτισης που είχαν οι μεταβλητές κατά τον υπολογισμό. Παρατηρείται ότι μέχρι τις αρχές του 2005 ο βαρομετρικός συντελεστής παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης απέχουν αρκετά από τη μονάδα που σημαίνει ότι οι υπολογισμοί του βαρομετρικού συντελεστή δε είναι ακριβείς, γεγονός που οφείλεται στα έντονα φαινόμενα της κοσμικής ακτινοβολίας εκείνης της περιόδου. Μετά το 2005 ο βαρομετρικός συντελεστής παρουσιάζει σταθερότητα με εξαίρεση τον Ιούλιο του 2012.



**Σχήμα 2.35:** Βαρομετρικός συντελεστής για το μετρητή νετρονίων της Αθήνας υπολογισμένος σε μηνιαία βάση από το 2001 έως το 2013 και χωρίς τη χρήση σταθμού αναφοράς.

Ο αντίστοιχος υπολογισμός όταν χρησιμοποιείται ο σταθμός της Ρώμης ως αναφορά απεικονίζεται στο σχήμα 2.36. Είναι προφανής η βελτίωση στον υπολογισμό που αποδεικνύεται από τον υψηλό συντελεστή συσχέτισης. Ο συντελεστής συσχέτισης εμφανίζεται χαμηλός μόνο για τον Ιανουάριο του 2005 λόγω προβλημάτων στα δεδομένα του σταθμού της Αθήνας καθώς και για τον Ιούλιο του 2011 λόγω προβλημάτων με τα δεδομένα του σταθμού της Ρώμης. Αγνοώντας αυτές τις τιμές, ο βαρομετρικός συντελεστής εμφανίζει σταθερότητα. Από το διάγραμμα αυτό επιβεβαιώνεται η ορθότητα της τιμής  $-0.7\%/mb$  που είναι η τιμή του βαρομετρικού συντελεστή που χρησιμοποιείται για τη διόρθωση των μετρήσεων του σταθμού της Αθήνας ως προς την πίεση.



**Σχήμα 2.36:** Βαρομετρικός συντελεστής για το μετρητή νετρονίων της Αθήνας υπολογισμένος σε μηνιαία βάση από το 2001 έως το 2013 χρησιμοποιώντας το σταθμό της Ρώμης ως αναφορά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ III

### Διαχείριση δεδομένων και ανάπτυξη εφαρμογών

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή των εφαρμογών που αναπτύχθηκαν και αφορούν την επεξεργασία των δεδομένων των μετρητών νετρονίων. Παρουσιάζεται η τοπική βάση δεδομένων του σταθμού της Αθήνας και μια σειρά εφαρμογών με τις οποίες πραγματοποιείται η διόρθωση και η αποστολή των μετρήσεων στο NMDB καθώς και η offline ανανέωσή τους. Με τις εφαρμογές αυτές ο σταθμός της Αθήνας επιτυγχάνει τους στόχους που θέτει το NMDB, αποστέλλοντας αδιάλειπτα και σε πραγματικό χρόνο υψηλής ποιότητας μετρήσεις. Επιπλέον στο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση δικτυακών εφαρμογών οι οποίες, κάνοντας χρήση των μετρήσεων του NMDB slave server της Αθήνας, δίνουν την δυνατότητα στην επιστημονική κοινότητα να αντλήσει τις μετρήσεις των σταθμών και να υπολογίσει το βαρομετρικό συντελεστή. Το σύνολο των εφαρμογών απαιτήσε το προγραμματισμό σε .NET, PHP, HTML, Javascript και τη χρήση βάσεων δεδομένων MySQL.

#### 3.1. Διαχείριση των δεδομένων του μετρητή νετρονίων

##### 3.1.1. Τοπική βάση μετρήσεων και δικτυακή διεπαφή χρήστη

Πολύ σημαντικό ρόλο στη διαχείριση των δεδομένων του μετρητή νετρονίων έχει η τοπική βάση δεδομένων του σταθμού. Η τοπική βάση αποσκοπεί στην αποθήκευση τριών ειδών δεδομένων και συγκεκριμένα των πρωτογενών μετρήσεων του μετρητή νετρονίων που καταγράφονται από το σύστημα καταμέτρησης, των επεξεργασμένων μετρήσεων που προκύπτουν από τους αλγορίθμους διόρθωσης δεδομένων και των μετρήσεων που αποστέλλονται στην παγκόσμια βάση δεδομένων NMDB. Η τοπική βάση είναι μια βάση MySQL που αποτελείται από εννέα πίνακες, όπως περιγράφονται στο σχήμα 3.1:

uncorrected	edge	median	ann	athn_ori
start_date_time(key) measurement_length counter1 counter2 counter3 counter4 counter5 counter6 pressure1 pressure2 avgpressure temperatureout temperaturein windspeed winddirection humidity pressure total_uncorrected total_uncorrected_pre lastchange	start_date_time(key) error_counter1 error_counter2 error_counter3 error_counter4 error_counter5 error_counter6 cor_counter1 cor_counter2 cor_counter3 cor_counter4 cor_counter5 cor_counter6 total_edge total_edge_pre lastchange	start_date_time(key) eff_counter1 eff_counter2 eff_counter3 eff_counter4 eff_counter5 eff_counter6 theta cor_counter1 cor_counter2 cor_counter3 cor_counter4 cor_counter5 cor_counter6 total_median total_median_pre lastchange	start_date_time(key) cor_counter1 cor_counter2 cor_counter3 cor_counter4 cor_counter5 cor_counter6 total_ann total_ann_pre lastchange	start_date_time(key) length_time_interval_s measured_uncorrected measured_corr_for_efficiency measured_corr_for_pressure measured_pressure_mbar
			annplus	athn_1h
			start_date_time(key) cor_counter1 cor_counter2 cor_counter3 cor_counter4 cor_counter5 cor_counter6 total_annplus total_annplus_pre lastchange	start_date_time(key) uncorrected corr_for_efficiency corr_for_pressure pressure_mbar last_change
		medianplus		athn_rev
		start_date_time cor_counter1 cor_counter2 cor_counter3 cor_counter4 cor_counter5 cor_counter6 total_medianplus total_medianplus_pre lastchange		start_date_time(key) length_time_interval_s revised_uncorrected revised_corr_for_efficiency revised_corr_for_pressure revised_pressure_mbar version last_change

**Σχήμα 3.1:** Πίνακες και πεδία τοπικής βάσης δεδομένων του σταθμού της Αθήνας

Όλοι οι πίνακες έχουν ως πρωτεύον κλειδί (primary key) το πεδίο start\_date\_time όπου καταγράφεται η ημερομηνία και η ώρα της μέτρησης, ενώ στους περισσότερους από αυτούς περιλαμβάνεται το πεδίο lastchange όπου καταγράφεται η ημερομηνία και η ώρα όπου προστέθηκε η εγγραφή στο πίνακα. Ο πίνακας uncorrected περιλαμβάνει τις μετρήσεις που καταγράφονται στα δυαδικά αρχεία του συστήματος καταγραφής ενώ επιπλέον περιλαμβάνει τις μετρήσεις της πίεσης (pressure), της συνολικής μέτρησης (total\_uncorrected) και της συνολικής μέτρησης διορθωμένης ως προς την πίεση (total\_uncorrected\_pre) στις μονάδες μέτρησης της παγκόσμιας βάσης δεδομένων, δηλαδή σε mb για την πίεση και σε imp/sec για τη συνολική μέτρηση. Οι πίνακες edge, median, medianplus, ann και annplus περιλαμβάνουν τις διορθωμένες μετρήσεις με κάθε έναν από τους αλγορίθμους διόρθωσης δεδομένων. Συγκεκριμένα, στα πεδία cor\_counter1 έως cor\_counter6 καταγράφεται η διορθωμένη τιμή κάθε θαλάμου ενώ, σε αντιστοιχία με τον πίνακα uncorrected, γίνεται καταγραφή της συνολικής μέτρησης και της συνολικής μέτρησης διορθωμένης ως προς την πίεση για όλο το μετρητή νετρονίων

στις μονάδες μέτρησης της παγκόσμιας βάσης δεδομένων. Για την περίπτωση του αλγορίθμου Median Editor γίνεται επιπλέον καταγραφή της efficiency κάθε θαλάμου (eff\_counter1 έως eff\_counter6) καθώς και της παραμέτρου theta ενώ για την περίπτωση του αλγορίθμου Edge Editor γίνεται καταγραφή του σφάλματος κάθε θαλάμου (error\_counter1 έως error\_counter6). Τέλος οι πίνακες athen\_ori, athen\_1h και athen\_rev έχουν ίδια δομή με τους αντίστοιχους πίνακες της παγκόσμιας βάσης μετρήσεων και αποσκοπούν στην προετοιμασία των μετρήσεων που θα σταλούν στο NMDB.

Σε αντίθεση με την παγκόσμια βάση μετρήσεων που χρησιμοποιεί μηχανή αποθήκευσης myISAM, η τοπική βάση δεδομένων του σταθμού της Αθήνας χρησιμοποιεί μηχανή innoDB. Η συγκεκριμένη μηχανή επιλέχτηκε προκειμένου να διασφαλίζεται η ακεραιότητα των δεδομένων (data integrity) που αποθηκεύονται αφού, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια, η εγγραφή για ένα συγκεκριμένο start\_date\_time πραγματοποιείται ταυτόχρονα για όλους τους πίνακες χρησιμοποιώντας transaction. Ο εξωτερικός χρήστης έχει πρόσβαση στα δεδομένα της τοπικής βάσης μέσω δικτυακής διεπαφής που απεικονίζεται στο σχήμα 3.2:

## Athens Cosmic Ray Station Local Database Interface

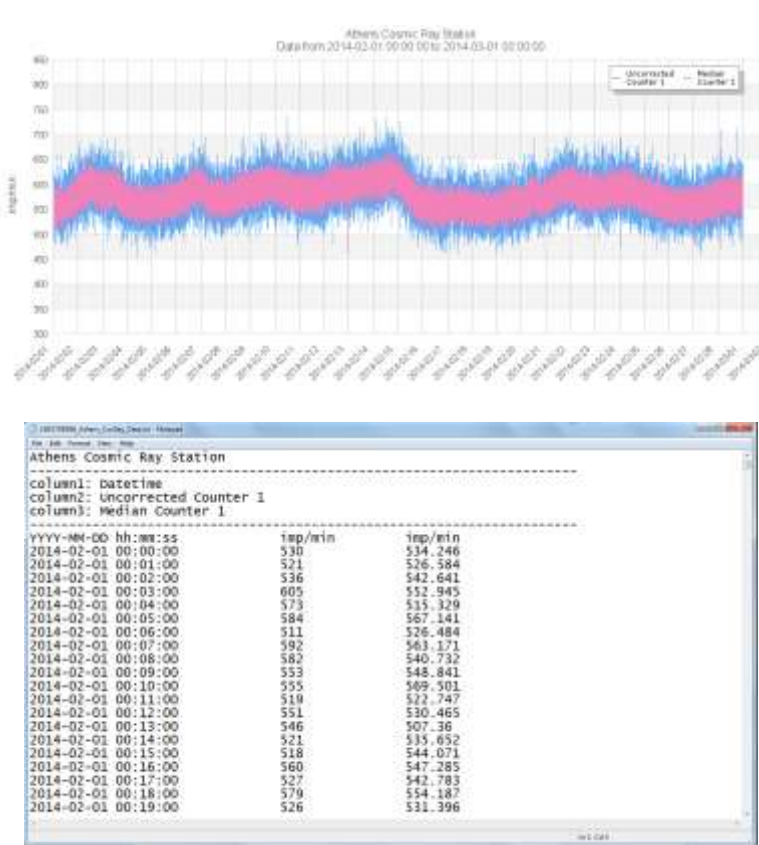
### Selection Form

Time Interval		Starting From		Data Selection			
1 Day ▾	Year	2014 ▾	Data Source 1	No Selection ▾			
	Month	Jan ▾		Data Source 2	No Selection ▾		
	Day	1 ▾			Output	Plot ▾	
	Hour	0 ▾				Results	
	Minute	0 ▾					
	<input checked="" type="checkbox"/> Until Now						

**Σχήμα 3.2:** Διαδικτυακή διεπαφή χρήστη για επισκόπηση των δεδομένων από την τοπική βάση

Η διαδικτυακή εφαρμογή επιτρέπει την άντληση δεδομένων από τους πίνακες uncorrected, edge, median, medianplus, ann και annplus της τοπική βάση για χρονικά

διαστήματα 1 ώρας, 1 ημέρας, 1 εβδομάδας ή ενός μήνα και την απεικόνισή τους σε διάγραμμα, σε ιστοσελίδα ή την αποθήκευση σε αρχείο. Για σύγκριση μεταξύ διαφορετικών παραμέτρων, η εφαρμογή επιτρέπει την ταυτόχρονη άντληση και απεικόνιση μέχρι δύο μεταβλητών. Με τη συγκεκριμένη εφαρμογή ο σταθμός της Αθήνας καινοτομεί δεδομένου ότι παρέχονται σε πραγματικό χρόνο οι μετρήσεις κάθε θαλάμου χωριστά καθώς και οι παράμετροι με τις οποίες πραγματοποιείται η διόρθωσή τους. Η εφαρμογή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη σύγκριση της διόρθωσης που παρέχουν οι αλγόριθμοι διόρθωσης δεδομένων που έχουν υλοποιηθεί. Αντιπροσωπευτικό δείγμα της εξόδου που παρέχει η εφαρμογή δίνεται στο σχήμα 3.3:

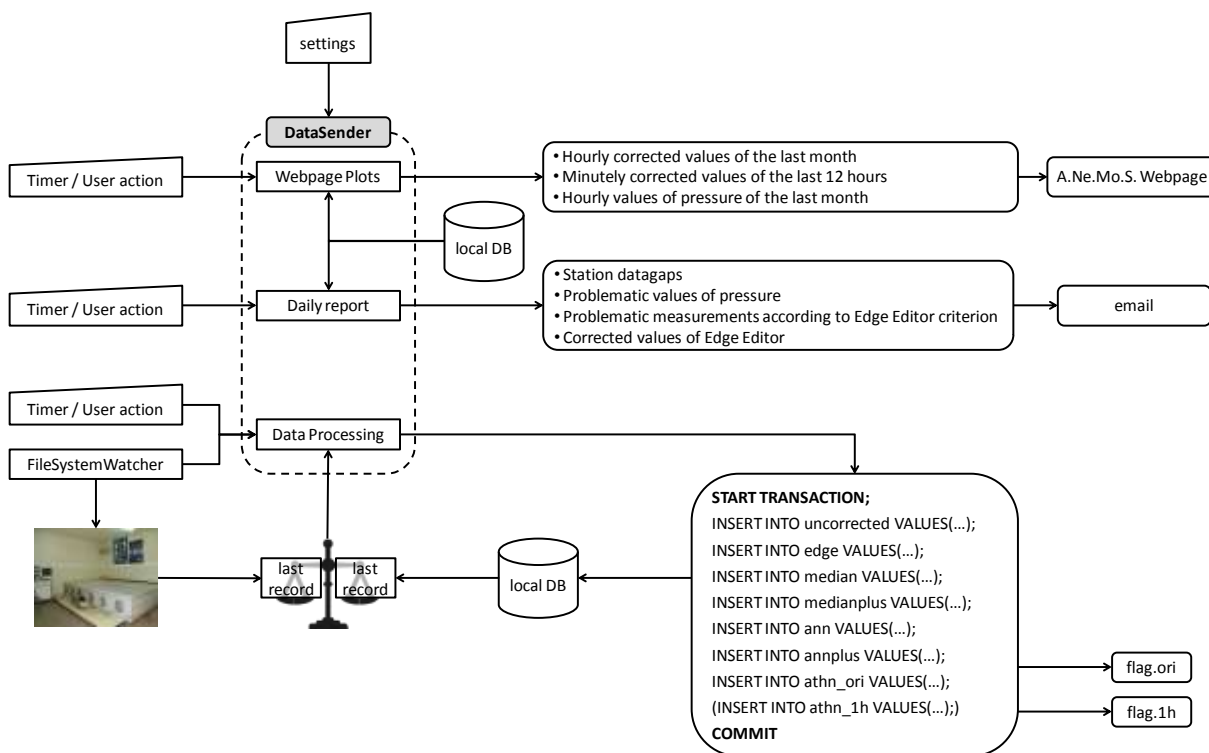


Athens Cosmic Ray Station		
Datetime	Uncorrected Counter 1	Median Counter 1
YYYY-MM-DD hh:mm:ss	imp/min	imp/min
2014-02-01 00:00:00	530	534.246
2014-02-01 00:01:00	521	526.584
2014-02-01 00:02:00	536	542.641
2014-02-01 00:03:00	605	552.945
2014-02-01 00:04:00	573	515.329
2014-02-01 00:05:00	584	567.141
2014-02-01 00:06:00	511	526.484
2014-02-01 00:07:00	592	563.171
2014-02-01 00:08:00	582	540.732
2014-02-01 00:09:00	553	548.841
2014-02-01 00:10:00	555	569.501
2014-02-01 00:11:00	519	522.747
2014-02-01 00:12:00	551	530.465
2014-02-01 00:13:00	546	507.36
2014-02-01 00:14:00	521	535.652
2014-02-01 00:15:00	518	544.071
2014-02-01 00:16:00	560	547.285
2014-02-01 00:17:00	527	542.783
2014-02-01 00:18:00	579	554.187
2014-02-01 00:19:00	526	531.396
2014-02-01 00:20:00	530	550.331
2014-02-01 00:21:00	532	534.266
2014-02-01 00:22:00	554	549.341
2014-02-01 00:23:00	544	529.132
2014-02-01 00:24:00	528	524.279
2014-02-01 00:25:00	632	586.938
2014-02-01 00:26:00	541	535.933

**Σχήμα 3.3:** Παράδειγμα του διαγράμματος (πάνω αριστερά), της ιστοσελίδας (δεξιά) και του αρχείου (κάτω αριστερά) που παρέχει η δικτυακή εφαρμογή για την επισκόπηση των δεδομένων από την τοπική βάση

### 3.1.2. Επεξεργασία πρωτογενών μετρήσεων

Η επεξεργασία των πρωτογενών μετρήσεων που καταγράφονται από το σύστημα καταγραφής και η αποθήκευσή τους στη τοπική βάση πραγματοποιείται με την κύρια εφαρμογή DataSender που έχει υλοποιηθεί σε .NET. Η επεξεργασία έγκειται στη διόρθωση της πρωτογενούς μέτρησης κάθε λεπτού με όλους τους αλγορίθμους διόρθωσης δεδομένων και την αποθήκευση του αποτελέσματος στους πίνακες της τοπικής βάσης δεδομένων. Πέρα από αυτή την κύρια διαδικασία, η εφαρμογή εκτελεί δύο διαδικασίες υποστήριξης του σταθμού και συγκεκριμένα τη παραγωγή διαγραμμάτων για την ιστοσελίδα του σταθμού και την παραγωγή ημερήσιας αναφοράς για τη λειτουργία του μετρητή νετρονίων που αποστέλλεται στα μέλη της ομάδας του σταθμού μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Προκειμένου να διασφαλίζεται η λειτουργικότητα της εφαρμογής, κάθε μία από τις διαδικασίες εκτελείται από διαφορετικό thread με χρήση της κλάσης BackgroundWorker. Η εκτέλεση κάθε διαδικασίας ενεργοποιείται μέσω timer ενώ έχει προβλεφθεί και η χειροκίνητη ενεργοποίηση από το χρήστη. Ειδικά για την κύρια διαδικασία της επεξεργασίας και αποθήκευσης των δεδομένων, έχει επιπλέον προβλεφθεί η ενεργοποίησή της με χρήση της κλάσης FileSystemWatcher, με την οποία γίνεται παρακολούθηση του καταλόγου που εγγράφονται τα δυαδικά αρχεία του συστήματος καταγραφής. Με το τρόπο αυτό διασφαλίζεται η άμεση επεξεργασία της μέτρησης αμέσως μετά την καταγραφή της από το σύστημα καταγραφής. Συνοπτικά οι λειτουργίες που εκτελεί η εφαρμογή DataSender αποτυπώνονται στο σχήμα 3.4:



**Σχήμα 3.4:** Λειτουργίες της κύριας εφαρμογής DataSender για την επεξεργασία των πρωτογενών μετρήσεων του μετρητή νετρονίων.

Η διαδικασία διόρθωσης των πρωτογενών μετρήσεων και αποθήκευσής τους στην τοπική βάση δεδομένων ξεκινά με σύγκριση των τελευταίων εγγραφών στη τοπική βάση δεδομένων και στα δυαδικά αρχεία του συστήματος καταγραφής. Προκειμένου να μετατραπούν τα δυαδικά αρχεία σε αναγνώσιμη μορφή χρησιμοποιείται η κλάση BinaryReader του .NET μέσω της οποίας γίνεται ανάγνωση των δυαδικών αρχείων σε τμήματα των 16 bits (2 bytes), αντιστροφή των bytes δεδομένου ότι τα αρχεία ακολουθούν κωδικοποίηση little endian και μετατροπή τους σε ακέραιους αριθμούς. Από την άλλη μεριά, η σύνδεση με τη τοπική βάση δεδομένων πραγματοποιείται με χρήση του ODBC Connector που παρέχεται από την MySQL. Μέσα από τη σύγκριση καθορίζονται ποιες είναι οι εγγραφές του συστήματος καταγραφής που δεν έχουν μεταφερθεί στη τοπική βάση και πραγματοποιείται η επεξεργασία των μετρήσεων για κάθε μία εγγραφή χωριστά. Η εισαγωγή των δεδομένων στους πίνακες της τοπικής βάση πραγματοποιείται μέσω INSERT queries τα οποία συντάσσονται σταδιακά κατά την επεξεργασία κάθε νέας εγγραφής. Όταν ολοκληρωθεί η επεξεργασία όλων των νέων μετρήσεων, τα queries που έχουν συνταχθεί αποστέλλονται προς τη βάση

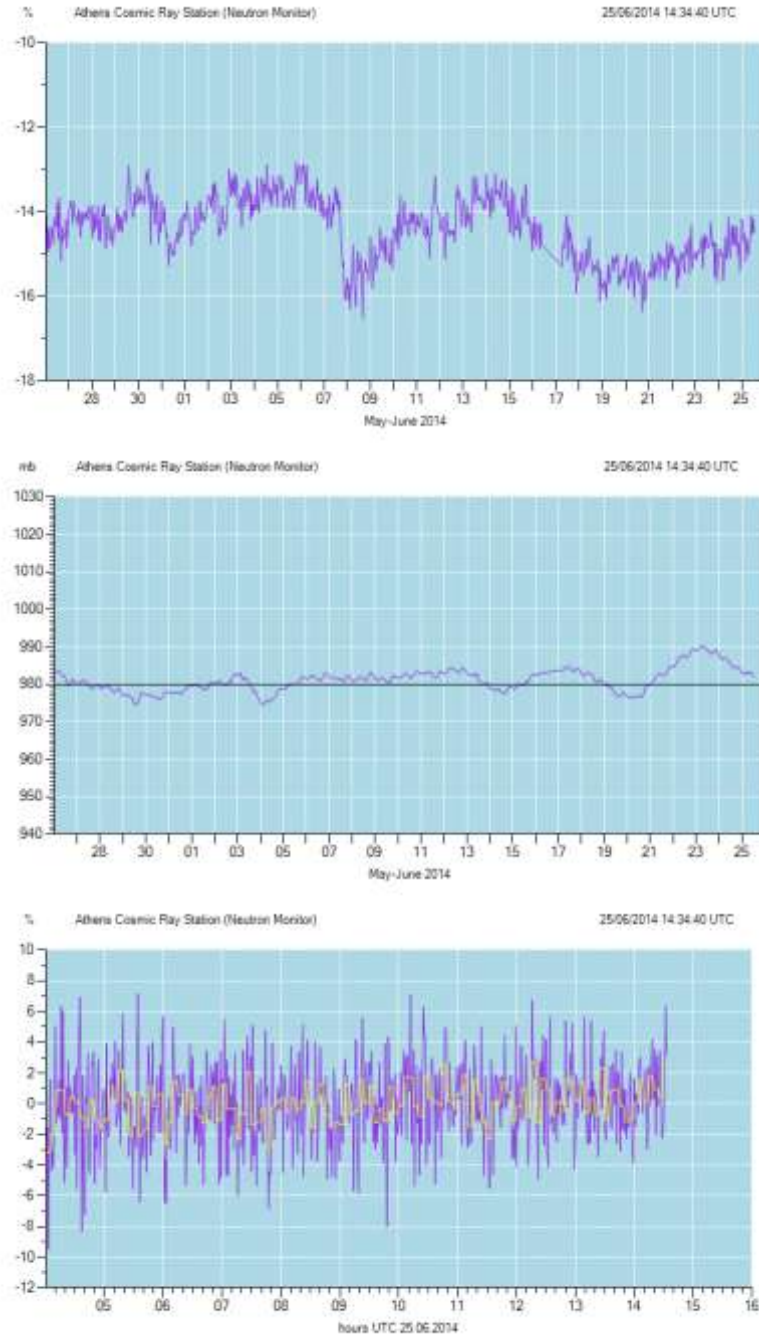


χρησιμοποιώντας transaction, προκειμένου να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα της βάσης σε ενδεχόμενη απροσδόκητη διακοπή της διαδικασίας. Η παραπάνω διαδικασία καταλήγει στην εγγραφή δεδομένων στους πίνακες uncorrected, edge, median, medianplus, ann, annplus και athen\_ori. Στον πίνακα athen\_ori που καταχωρούνται τα δεδομένα όπως θα αποσταλούν στο NMDB και στον οποίο τα πεδία measured\_corr\_for\_efficiency και measured\_corr\_for\_pressure αποτελούν τις διορθωμένες με μετρήσεις με κάποιον αλγόριθμο διόρθωσης δεδομένων, οι τιμές που αποθηκεύονται προέρχονται από τον αλγόριθμο που έχει χαρακτηριστεί ως βασικός (δηλαδή ο Edge Editor). Σε περίπτωση που μεταξύ των νέων εγγραφών εμφανίζεται η μέτρηση του 59ου λεπτού της ώρας, γίνεται ανάγνωση των μετρήσεων της τελευταίας ώρας που έχουν καταχωρηθεί ή θα καταχωρηθούν μέσω του τρέχοντος transaction στο πίνακα athen\_ori και με υπολογισμό της μέσης τιμής των μετρήσεων προστίθεται η αντίστοιχη εγγραφή στον πίνακα athen\_1h. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας εγγραφής των νέων μετρήσεων στη τοπική βάση γίνεται σε προκαθορισμένο κατάλογο εγγραφή του αρχείου flag.ori και του αρχείου flag.1h αν έχουν προστεθεί εγγραφές στον πίνακα athen\_1h. Τα αρχεία αυτά χρησιμοποιούνται για συγχρονισμό της διαδικασίας διόρθωσης με την εφαρμογή που αποστέλλει τις νέες μετρήσεις στη παγκόσμια βάση μετρήσεων και η οποία θα περιγραφεί στην παράγραφο 3.1.3.

Κατά τη διαδικασία διόρθωσης, ακολουθούνται με ακρίβεια οι μέθοδοι διόρθωσης που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μέθοδοι διόρθωσης βασίζονται σε σύγκριση των μετρήσεων των θαλάμων, η διόρθωση πραγματοποιείται μόνο όταν παρέχουν μέτρηση τουλάχιστον τρεις θάλαμοι του μετρητή νετρονίων. Σε αντίθετη περίπτωση δεν πραγματοποιείται διόρθωση και στους αντίστοιχους πίνακες καταχωρούνται κενές (NULL) εγγραφές. Επιπλέον, ιδιαίτερο χειρισμό απαιτεί η διόρθωση με τον αλγόριθμο ANN που βασίζεται στη χρήση τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Η εφαρμογή κάνει χρήση κλάσης που αναπαριστά το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο και η οποία εξάγεται από το λογισμικό πακέτο ROOT μέσω του οποίου υλοποιείται ο αλγόριθμος ANN. Σε αντίθεση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους που μπορούν να εφαρμοστούν ακόμη και αν κάποιος από τους θαλάμους έχουν μηδενικές τιμές, το νευρωνικό δίκτυο του αλγορίθμου ANN απαιτεί ακριβώς τις έξι τιμές των θαλάμων του μετρητή νετρονίων. Για το λόγο αυτό, όταν οι μετρήσεις κάποιων θαλάμων

είναι μηδενικές γίνεται για αυτούς εικονική αναπαραγωγή μετρήσεων πολλαπλασιάζοντας τη μέση στάθμη μέτρησης που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο Edge Editor με τη τιμή των λόγων  $R_{i,j} = \frac{N_i}{N_j}$  που σχετίζονται με τους θαλάμους που είναι εκτός λειτουργίας. Τέλος, η διόρθωση με την ατμοσφαιρική πίεση πραγματοποιείται μόνο όταν η πίεση που καταγράφεται είναι εντός προκαθορισμένων ορίων (μεταξύ 800 έως 1200 mb), σε αντίθετη περίπτωση η διορθωμένη τιμή με την πίεση είναι κενή. Η πρακτική αυτή ακολουθείται προκειμένου να αποφευχθεί λανθασμένη διόρθωση όταν η πίεση που καταγράφεται είναι λανθασμένη λόγω προβλήματος είτε στον αισθητήρα μέτρησης είτε στο σύστημα καταγραφής.

Όσον αφορά τα διαγράμματα για την ιστοσελίδα του σταθμού, παράγονται χρησιμοποιώντας τις εγγραφές των πινάκων athen\_ori και athen\_1h. Από το πίνακα athen\_1h παράγονται δύο διαγράμματα που αποτυπώνουν τις ωριαίες τιμές των διορθωμένων μετρήσεων και της ατμοσφαιρικής πίεσης. Από τον πίνακα athen\_ori παράγεται διάγραμμα που αποτυπώνει τις διορθωμένες μετρήσεις των τελευταίων 12 ωρών με ανάλυση 1 και 5 λεπτών. Τα διαγράμματα παράγονται περιοδικά σε χρονικό διάστημα της τάξης των 5 λεπτών ώστε η ιστοσελίδα του σταθμού να αποτυπώνει την πρόσφατη εικόνα των μετρήσεων. Παράδειγμα των διαγραμμάτων που παράγονται με την εφαρμογή DataSender δίνονται στο σχήμα 3.5. Όσον αφορά την παραγωγή ημερήσιας αναφοράς, αντλούνται στοιχεία από τους πίνακες uncorrected και edge που περιλαμβάνονται οι πρωτογενείς μετρήσεις και οι διορθωμένες μετρήσεις με τον Edge Editor που χρησιμοποιείται ως ο βασικός αλγόριθμος διόρθωσης. Η αναφορά περιλαμβάνει τα λεπτά που ο μετρητής νετρονίων δεν κατέγραψε καμία τιμή (station datagaps), τα λεπτά που η ατμοσφαιρική πίεση που καταγράφηκε ήταν εκτός καθορισμένου εύρους, τα λεπτά που οι μετρήσεις των θαλάμων παραβιάζουν το κριτήριο εγκυρότητας του Edge Editor καθώς και τις διορθωμένες τιμές που παράγονται. Η αναφορά παράγεται και αποστέλλεται μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου στα μέλη της ομάδας που υποστηρίζει το σταθμό μία φορά την ημέρα σε προκαθορισμένη ώρα.



**Σχήμα 3.5:** Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα που παράγονται από την εφαρμογή DataSender. Από πάνω προς τα κάτω διακρίνεται (α) το διάγραμμα 30 ημερών για τις ωριαίες τιμές των διορθωμένων μετρήσεων, (β) το διάγραμμα 30 ημερών για τις ωριαίες τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης και (γ) το διάγραμμα 12 ωρών για τις τιμές λεπτού και πεντάλεπτου των διορθωμένων μετρήσεων.

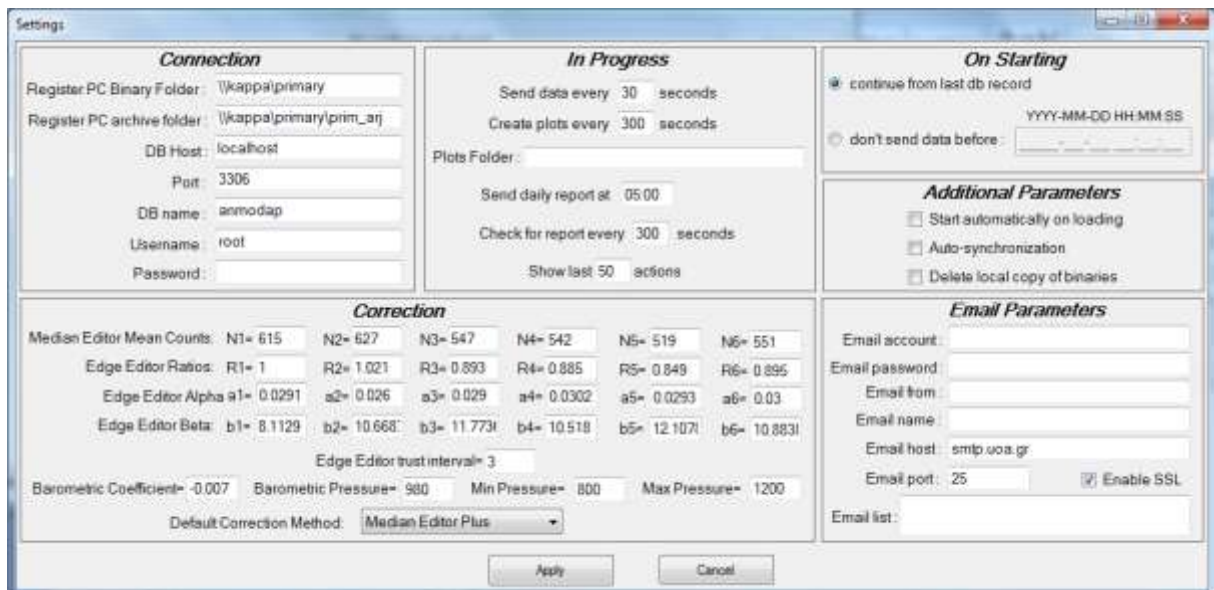
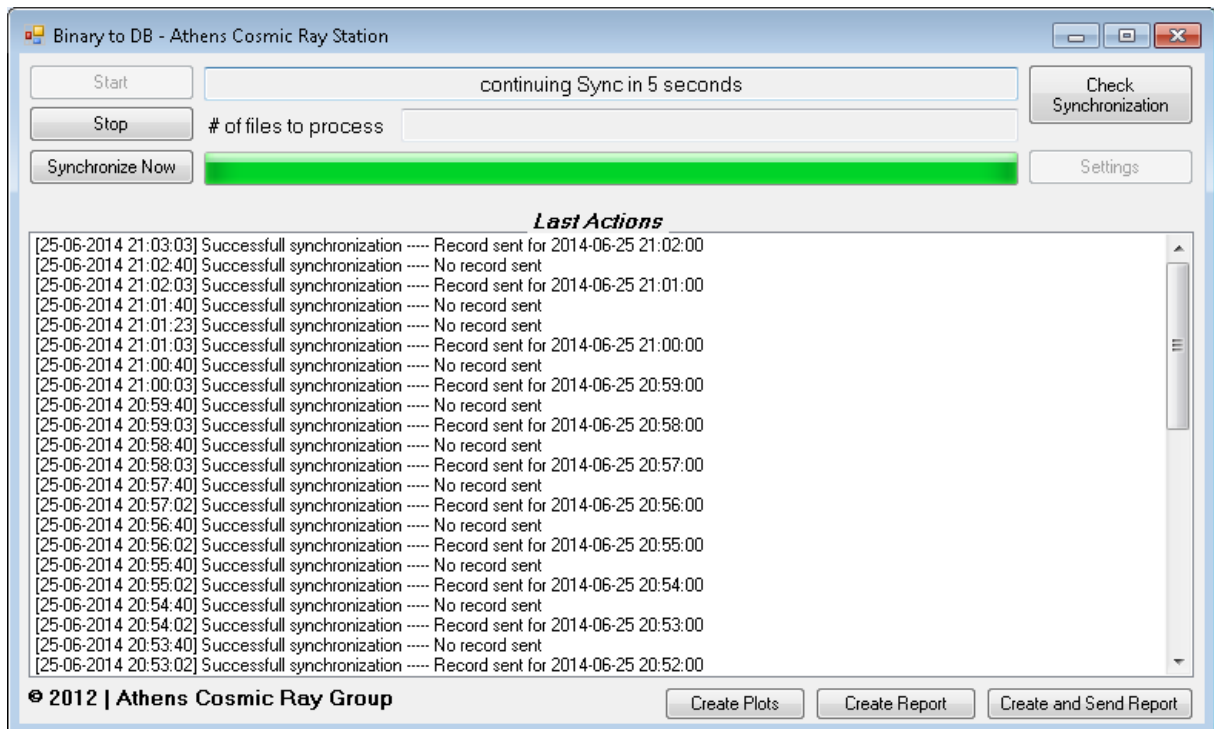
Η πραγματοποίηση των ανωτέρω διαδικασιών προϋποθέτει την καταχώριση από πλευράς του χρήστη ενός πλήθους παραμέτρων που σχετίζονται (α) με τη σύνδεση της εφαρμογής στο σύστημα καταγραφής και στην τοπική βάση (β) με τους αλγορίθμους διόρθωσης δεδομένων, (γ) με γενικές παραμέτρους και (δ) με το λογαριασμό ηλεκτρονικού ταχυδρομείου που χρησιμοποιείται για την αποστολή του ημερήσιου report. Οι παράμετροι αναφέρονται στον πίνακα 3.1.

Η διεπαφή της εφαρμογής με τον χρήστη πραγματοποιείται μέσω δύο φορμών, μία για την εκτέλεση των διαδικασιών και μία για την εισαγωγή των παραμέτρων. Η πρώτη φόρμα φέρει πλήκτρα για την έναρξη/λήξη της εφαρμογής και για την άμεση εκτέλεση του συγχρονισμού των δεδομένων, της παραγωγής των διαγραμμάτων και της αποστολής της ημερήσια αναφοράς. Επιπλέον η φόρμα φέρει μπάρες προόδου και πίνακα με τις τελευταίες ενέργειες που έχουν πραγματοποιηθεί. Η φόρμα εισαγωγής των παραμέτρων φέρει όλα τα απαραίτητα πεδία σύμφωνα με τον πίνακα 3.1. Οι δύο φόρμες απεικονίζονται στο σχήμα 3.6.

Η υλοποίηση της εφαρμογής πραγματοποιείται με έξι κλάσεις οι οποίες περιγράφονται στο πίνακα 3.2. Η εφαρμογή DataSender έχει λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα και έχει αποδειχτεί ιδιαίτερα σταθερή. Σε σχέση με το χρόνο που απαιτείται για τη διόρθωση κάθε νέας εγγραφής, ενδεικτικό είναι ότι κατά την πρώτη εκκίνηση έγινε επεξεργασία περίπου 2.700.000 ιστορικών εγγραφών σε περίπου 4 ώρες, επομένως ο χρόνος επεξεργασίας μίας μέτρησης είναι περίπου 5 ms.

Description	Parameter
<b>connection</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• registration PC folder of binaries files</li> <li>• registration PC folder of archived binaries files</li> <li>• local DB host</li> <li>• local DB port</li> <li>• local DB name</li> <li>• username for local DB access</li> <li>• password for local DB access</li> </ul>
<b>correction</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\overline{N}_i</math> (6 values) used by the Median Editor</li> <li>• <math>R_{i,j} = \frac{N_i}{N_j}</math> (6 values) used by the Edge Editor</li> <li>• <math>a_i</math> and <math>b_i</math> of <math>\sigma_i = a_i \cdot x + b_i</math> equations (12 values) used by the Edge Editor</li> <li>• trust interval for correction</li> <li>• barometric coefficient for pressure correction</li> <li>• reference pressure for pressure correction</li> <li>• minimum and maximum values of valid pressure</li> <li>• default correction method for NMDB</li> </ul>
<b>progress</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• timer for data correction procedure</li> <li>• timer for plot generation procedure</li> <li>• plot destination folder</li> <li>• time of daily reporting</li> <li>• timer for checking if the daily report has been sent</li> <li>• number of the last actions that are displayed</li> <li>• radio button for selecting between continuing from last DB record or from specific record when the application starts</li> <li>• checkbox for starting automatically on loading</li> <li>• checkbox for enabling the file system watcher of register PC</li> <li>• checkbox for enabling the deletion of binary files' local copy</li> </ul>
<b>email</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• username of email account</li> <li>• password of email account</li> <li>• email address</li> <li>• email Name</li> <li>• email host</li> <li>• email port</li> <li>• email SSL</li> <li>• email recipient list</li> </ul>

**Πίνακας 3.1:** Παράμετροι που απαιτούνται για την εκτέλεση της εφαρμογής DataSender



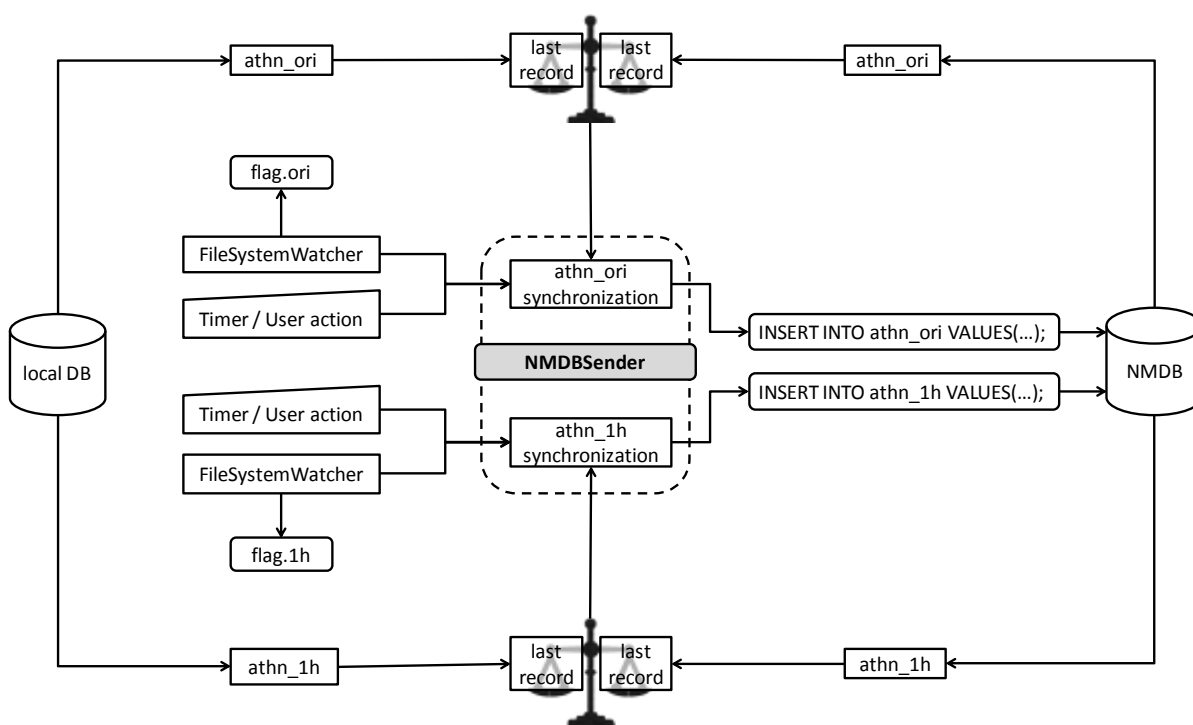
Σχήμα 3.6: Η φόρμα εκτέλεσης των διαδικασιών (πάνω) και εισαγωγής των παραμέτρων (κάτω) της εφαρμογής DataSender.

Όνομα κλάσης	Κύριες διαδικασίες
<b>mainForm</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Διεπαφή χρήστη για τις λειτουργίες της εφαρμογή</li> <li>• Διαχείριση των threads</li> </ul>
<b>settingsForm</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Διεπαφή χρήστη για επεξεργασία των παραμέτρων ρύθμισης</li> </ul>
<b>appSettings</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κωδικοποίηση των κωδικών του χρήστη ώστε να μην είναι προσπελάσιμοι</li> <li>• Αποθήκευση των παραμέτρων της εφαρμογής και εγγραφή τους σε αρχείο XML</li> <li>• Έλεγχος την εγκυρότητα των ρυθμίσεων</li> </ul>
<b>mysqlsender</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Σύγκριση της τελευταίας μέτρησης στα δυαδικά αρχεία του συστήματος καταγραφής και στη τοπική βάση δεδομένων</li> <li>• Αποκωδικοποίηση από τα δυαδικά αρχεία των εγγραφές που δεν έχουν σταλεί στην τοπική βάση μετρήσεων</li> <li>• Επικοινωνία με το αντικείμενο της κλάσης dataCorrection για να πραγματοποιηθεί η διόρθωση κάθε μέτρησης με τους αλγόριθμους διόρθωσης και με την ατμοσφαιρική πίεση</li> <li>• Διαχείριση της συναλλαγής με την τοπική βάση δεδομένων</li> <li>• Δημιουργία διαγραμμάτων των μετρήσεων</li> <li>• Δημιουργία και αποστολή με ηλεκτρονικό ταχυδρομείο αναφοράς για τη κατάσταση των μετρήσεων</li> </ul>
<b>dataCorrection</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εισαγωγή των πρωτογενών μετρήσεων</li> <li>• Εφαρμογή των αλγορίθμων Median Editor, Median Editor Plus, ANN, ANN Plus και Edge Editor</li> <li>• Εφαρμογή της διόρθωσης με την πίεση</li> <li>• Σύνταξη του INSERT queries προς τη τοπική βάση για κάθε νέα εγγραφή</li> </ul>
<b>NNfunction</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Υλοποίηση του εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο ANN</li> </ul>

*Πίνακας 3.2: Κλάσεις της εφαρμογής DataSender και διαδικασίες που εκτελούν*

### 3.1.3. Συγχρονισμός της παγκόσμιας βάσης μετρήσεων

Η εφαρμογή DataSender εκτελεί όλες τις απαραίτητες διαδικασίες για την επεξεργασία και αποθήκευση των δεδομένων του σταθμού της Αθήνας. Μια ανεξάρτητη αλλά εξίσου σημαντική διαδικασία που απαιτείται να εκτελεστεί, δεδομένης της συμμετοχής του σταθμού της Αθήνας στο παγκόσμιο δίκτυο μετρητών νετρονίων, είναι η αποστολή των μετρήσεων στη βάση δεδομένων NMDB. Την πραγματοποίηση αυτής της διαδικασίας αναλαμβάνει η εφαρμογή NMDBSender που υλοποιήθηκε σε .NET. Οι λειτουργίες που επιτελεί η εφαρμογή περιορίζονται στο συγχρονισμό των πινάκων athn\_ori και athn\_1h της τοπικής βάσης με τους αντίστοιχους πίνακες του NMDB, όπως αποτυπώνεται στο σχήμα 3.7:



**Σχήμα 3.7:** Λειτουργία της εφαρμογής NMDBSender για το συγχρονισμό του NMDB με τη τοπική βάση δεδομένων του σταθμού της Αθήνας.

Η διαδικασία συγχρονισμού είναι όμοια για κάθε έναν από τους πίνακες. Μέσω του ODBC Connector της mySQL γίνεται ανάγνωση της τελευταίας εγγραφής στο NMDB και στη τοπική βάση. Σε περίπτωση που η τοπική βάση περιέχει νέες εγγραφές, η εφαρμογή

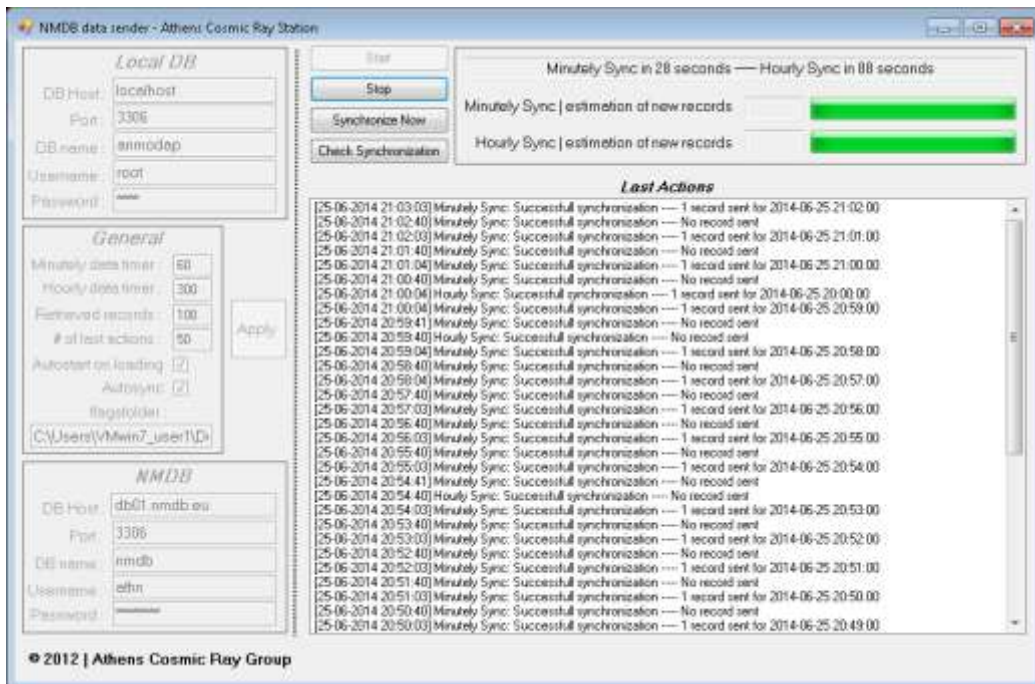


συνθέτει ένα INSERT query ώστε να γίνει αποστολή των επιπλέον εγγραφών στο NMDB. Η διαδικασία για κάθε έναν από τους πίνακες εκκινεί μέσω timer ενώ προβλέπεται και η αυτόματη ενεργοποίηση της διαδικασίας μέσω της παρακολούθησης με την κλάση FileSystemWatcher των αρχείων flag.ori και flag.1h που δημιουργούνται από την εφαρμογή DataSender.

Η υλοποίηση της εφαρμογής NMDBSender βρίσκεται σε αναλογία με την εφαρμογή DataSender, ωστόσο εμφανίζει μικρότερη πολυπλοκότητα λόγω των λιγότερων και απλούστερων διαδικασιών που εκτελεί. Συγκεκριμένα, ο χειρισμός των λειτουργιών πραγματοποιείται μέσω φόρμας που φέρει πλήκτρα ώστε ο χρήστης να εκκινεί/σταματά τη διαδικασία ενώ υιοθετείται η χρήση threads προκειμένου να διασφαλίζεται η ανεξάρτητη λειτουργία κάθε διαδικασίας αλλά και η απόκριση στις εντολές του χρήστη. Οι παράμετροι που απαιτείται να οριστούν σχετίζονται με τις παραμέτρους σύνδεσης στις βάσεις δεδομένων, με τους timers και με τον αυτόματο συγχρονισμό. Λόγω του μικρού πλήθους των παραμέτρων, δεν έχει υλοποιηθεί επιπλέον φόρμα για την καταχώρισή τους και οι παράμετροι καταχωρούνται στη βασική φόρμα της εφαρμογής. Η εφαρμογή κάνει χρήση μόνο δύο κλάσεων, της MainForm μέσω της οποίας υλοποιείται η διεπαφή και όλες οι απαραίτητες μέθοδοι για το συγχρονισμό και της appSettings όπου αποθηκεύονται οι παράμετροι που εισάγει ο χρήστης. Οι παράμετροι που απαιτούνται από την εφαρμογή δίνονται στο πίνακα 3.3 ενώ εικόνα της διεπαφής δίνεται στο σχήμα 3.8:

Description	Parameter
<b>connection</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>local DB host</li> <li>local DB port</li> <li>local DB name</li> <li>username for local DB access</li> <li>password for local DB access</li> <li>NMDB host</li> <li>NMDB port</li> <li>NMDBDB name</li> <li>username for NMDB access</li> <li>password for NMDB access</li> </ul>
<b>progress</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>timer for athn_ori synchronization (minutely data)</li> <li>timer for athn_1h synchronization (hourly data)</li> <li>maximum number of records that are simultaneously sent to NMDB</li> <li>number of the last actions that are displayed</li> <li>checkbox for starting automatically on loading</li> <li>checkbox for enabling the automatic synchronization</li> <li>folder that the files flag.ori and flag.1h are written</li> </ul>

Πίνακας 3.3: Παράμετροι που απαιτούνται για την εκτέλεση της εφαρμογής NMDBSender

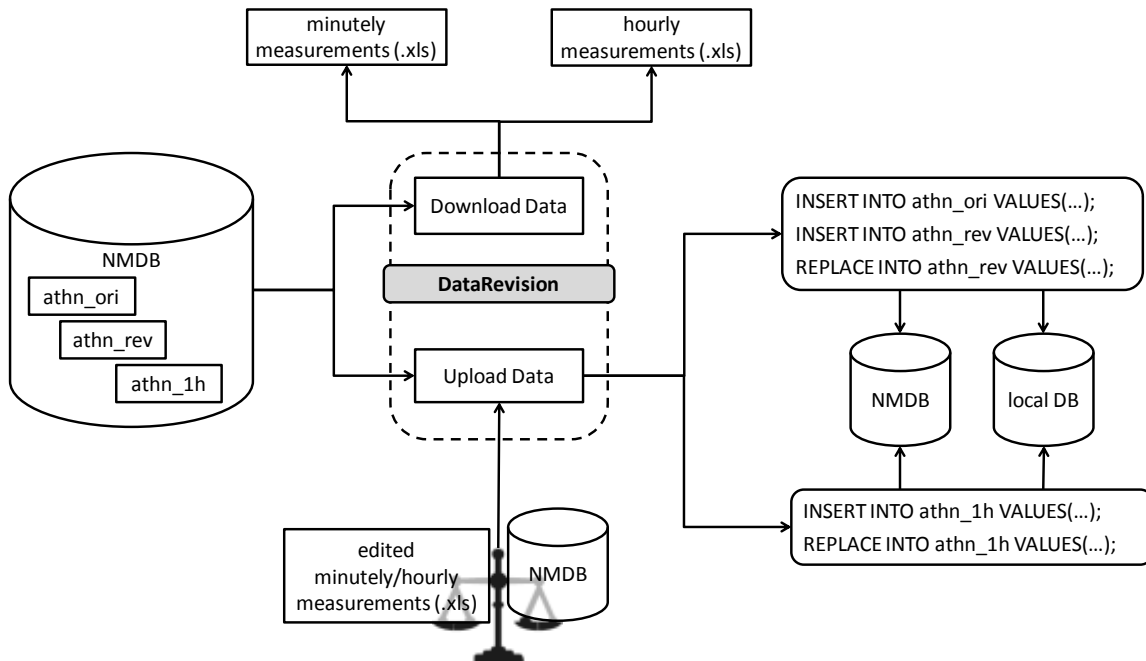


Σχήμα 3.8: Η φόρμα της εφαρμογής NMDBSender.

### 3.1.4. Ανανέωση των μετρήσεων

Όπως περιγράφηκε στο πρώτο κεφάλαιο, στόχος της παγκόσμιας βάσης μετρήσεων είναι η συλλογή των μετρήσεων λεπτού και των ωριαίων μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Οι σταθμοί έχουν τη δυνατότητα να ανανεώνουν εκ των υστέρων τις μετρήσεις που έχουν αποστείλει προκειμένου η βάση του NMDB να περιέχει αξιόπιστα δεδομένα. Η δυνατότητα αυτή είναι πολύ χρήσιμη και εφαρμόζεται τακτικά από τους σταθμούς που δε διαθέτουν σταθερά συστήματα για την καταγραφή, την επεξεργασία ή την αποστολή των μετρήσεών τους. Στην περίπτωση του σταθμού της Αθήνας, όλα τα συστήματα του σταθμού χαρακτηρίζονται από σταθερή λειτουργία, ενώ η διόρθωση που πραγματοποιείται σε πραγματικό με την εφαρμογή DataSender αποδεικνύεται αξιόπιστη. Ωστόσο ακόμη και σε αυτή τη περίπτωση απαιτείται η επικαιροποίηση των μετρήσεων σε μεμονωμένες περιπτώσεις. Οι περιπτώσεις αυτές σχετίζονται με δυσλειτουργία του συστήματος καταγραφής κατά την οποία όλοι οι θάλαμοι του μετρητή νετρονίων καταγράφουν πολύ χαμηλή ή πολύ υψηλή μέτρηση. Οι περιπτώσεις αυτές δεν είναι δυνατό να διορθωθούν σε πραγματικό χρόνο από τους αλγόριθμους διόρθωσης δεδομένων αφού σύμφωνα με τη αρχή λειτουργία τους ο εντοπισμός των προβληματικών περιπτώσεων πραγματοποιείται μέσω της σύγκρισης ανάμεσα στις μετρήσεις των θαλάμων.

Η επικαιροποίηση των μετρήσεων πραγματοποιείται με την εφαρμογή DataRevision που όπως και οι προηγούμενες εφαρμογές υλοποιήθηκε σε .NET. Η εφαρμογή επιτρέπει την τροποποίηση των μετρήσεων που έχουν αποσταλεί στο NMDB με χρήση του Excel. Για το σκοπό αυτό πέρα από τον ODBC Connector που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση με τη βάση δεδομένων, η εφαρμογή κάνει χρήση της βιβλιοθήκης EPPlus για τη εγγραφή ή την ανάγνωση των μετρήσεων σε αρχεία τύπου .xlsx. Η λειτουργία της εφαρμογής αποτυπώνεται στο σχήμα 3.9:



**Σχήμα 3.9:** Λειτουργία της εφαρμογής DataRevision για την επικαιροποίηση των μετρήσεων του σταθμού της Αθήνας στην παγκόσμια βάση μετρήσεων.

Η εφαρμογή διαθέτει δύο χωριστές λειτουργίες, μία για τη μεταφόρτωση των μετρήσεων από το NMDB και μία για την αποστολή των μετρήσεων είτε στο NMDB είτε στη τοπική βάση μετρήσεων. Κατά τη μεταφόρτωση των μετρήσεων, η εφαρμογή συνδέεται στο NMDB και λαμβάνει τα δεδομένα του λεπτού και τα ωριαία δεδομένα για προκαθορισμένο μήνα και έτος. Στη περίπτωση των ωριαίων δεδομένων γίνεται ανάγνωση του πίνακα athn\_1h ενώ για τη περίπτωση των μετρήσεων του λεπτού γίνεται συνδυασμένη ανάγνωση των πινάκων athn\_ori και athn\_rev (LEFT JOIN), ώστε με προτεραιότητα ανάγνωσης από τον athn\_rev (COALESCE) να ληφθούν οι πιο πρόσφατες μετρήσεις σε περίπτωση προηγούμενης ανανέωσης. Οι μετρήσεις αποθηκεύονται σε δυο χωριστά αρχεία .xlsx για τα δεδομένα του λεπτού και τα ωριαία δεδομένα. Η ομάδα υποστήριξης του σταθμού, μέσα από την επισκόπηση των μετρήσεων επιλέγει τις τροποποιήσεις που πρέπει να γίνουν και οι οποίες συνήθως αφορούν την τροποποίηση ή τη διαγραφή κάποιας μέτρησης.

Η αποστολή των τροποποιήσεων στη βάση δεδομένων, γίνεται μέσω της δεύτερης λειτουργίας της εφαρμογής. Στη περίπτωση αυτή ο χρήστης εισάγει το

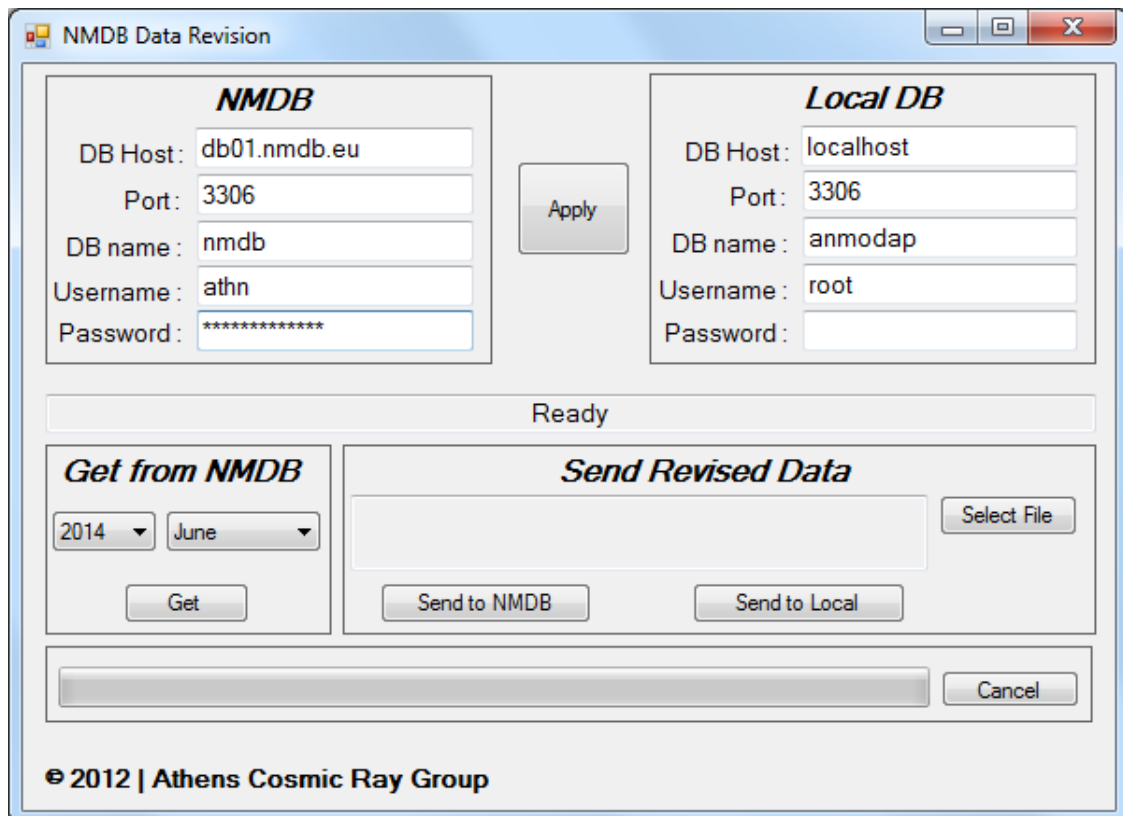
τροποποιημένο αρχείο .xlsx και η εφαρμογή μέσω μιας διαδικασίας εντοπίζει τις διαφορές που έχουν επέλθει και που πρέπει να αποσταλούν στη βάση δεδομένων. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή μέσω της ονομασίας που έχει το λογιστικό φύλλο του Excel καθορίζει το αν η διαδικασία αποστολής αφορά δεδομένα λεπτού ή ωριαία δεδομένα και συλλέγει από το NMDB τα δεδομένα από τους πίνακες athn\_ori/athn\_rev ή athn\_1h αντίστοιχα. Στη συνέχεια το αρχείο .xlsx σαρώνεται και για κάθε εγγραφή γίνεται έλεγχος αν υπάρχει διαφοροποίηση στα τρέχοντα δεδομένα του NMDB. Ανάλογα με τη περίπτωση που διαπιστώνεται εκτελείται και η ενέργεια που περιγράφεται στο πίνακα 3.4:

data type	.xlsx record case	Action
minutely	key does not exist in both athn_ori and athn_rev tables and the record is NULL	-
	key does not exist in both athn_ori and athn_rev tables and the record is not NULL	INSERT record INTO athn_ori
	key exists only in athn_ori table and the records are identical	-
	key exists only in athn_ori table and the records are different	INSERT record INTO athn_rev
	key exists in both athn_ori and athn_rev tables and the record is identical to the athn_rev	-
	key exists in both athn_ori and athn_rev tables and the record is different to the athn_rev	REPLACE record INTO athn_rev
	key exists only in athn_rev table and the records are identical	INSERT record INTO athn_ori
	key exists only in athn_rev table and the records are different	INSERT record INTO athn_ori REPLACE record INTO athn_rev
hourly	key does not exist in athn_1h and the record is NULL	-
	key does not exist in athn_1h and the record is not NULL	INSERT record INTO athn_1h
	key exists in athn_1h and the records are identical	-
	key exists in athn_1h and the records are different	REPLACE record INTO athn_1h

**Πίνακας 3.4:** Αποτέλεσμα σύγκρισης επικαιροποιημένων μετρήσεων με τα δεδομένα του NMDB και ενέργεια που εκτελείται από την εφαρμογή DataRevision

Κατά τη σάρωση του αρχείου .xlsx συντάσσονται τα αντίστοιχα query τα οποία με το πέρασ της διαδικασίας αποστέλλονται είτε στη παγκόσμια βάση του NMDB είτε στη τοπική βάση του σταθμού. Παράλληλα καταγράφονται σε αρχείο κειμένου οι εγγραφές που αποστέλλονται προκειμένου να διατηρεί ο σταθμός αρχείο των τροποποιήσεων που έχει εφαρμόσει στις μετρήσεις.

Όσον αφορά την υλοποίηση, ακολουθείται η φιλοσοφία και των υπολοίπων εφαρμογών. Η διεπαφή με το χρήστη πραγματοποιείται μέσω φόρμας που δίνεται στο σχήμα 3.10. Όπως και στη περίπτωση της εφαρμογής NMDBSender ο χρήστης εισάγει τις απαιτούμενες παραμέτρους και ενεργοποιεί τις διαδικασίες. Οι παράμετροι αφορούν τη σύνδεση με το NMDB και τη τοπική βάση, το έτος και το μήνα που θα γίνει άντληση των μετρήσεων από το NMDB και το τροποποιημένο .xlsx αρχείο. Η εφαρμογή υλοποιείται μέσω δύο κλάσεων, της mainForm για την υλοποίηση της φόρμας και των διαδικασιών και της appSettings για έλεγχο και αποθήκευση των παραμέτρων.



Σχήμα 3.10: Η φόρμα της εφαρμογής DataRevision.

### 3.1.5. Προγράμματα υποστήριξης

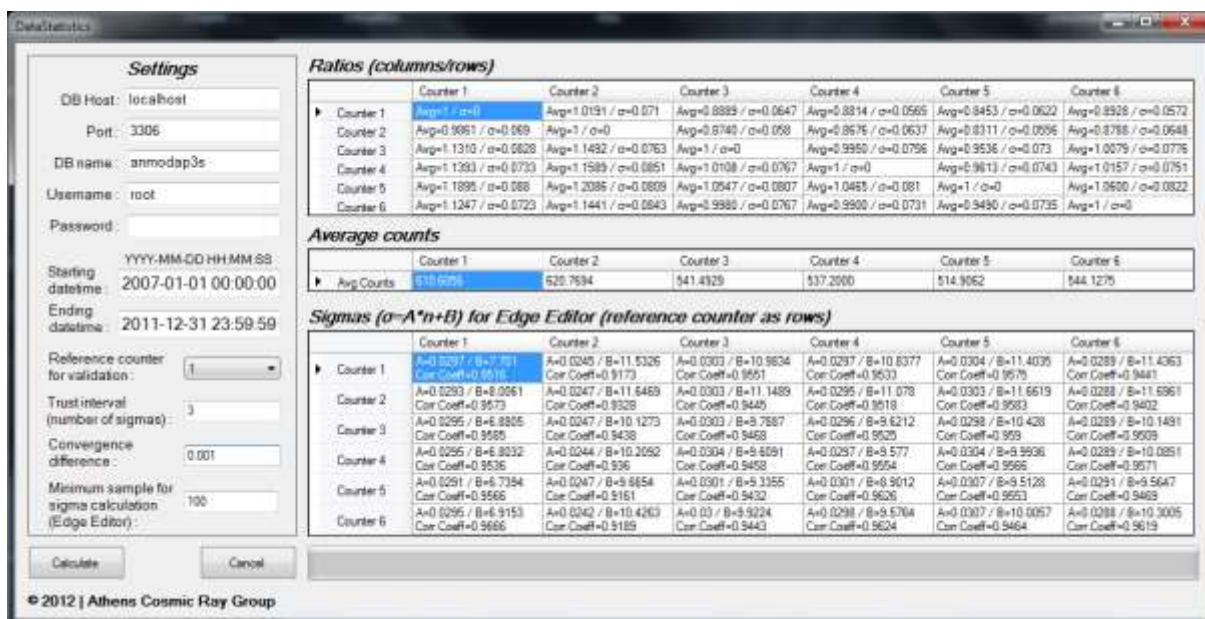
Οι εφαρμογές DataSender και NMDBSender έχουν διαρκή λειτουργία ενώ η χρήση της εφαρμογής DataRevision έχει περιοδικό χαρακτήρα, όποτε απαιτείται η ανανέωση των μετρήσεων. Στο πλαίσιο ελέγχου και επεξεργασίας των μετρήσεων υλοποιήθηκαν δύο επιπλέον εφαρμογές οι οποίες έχουν υποστηρικτικό χαρακτήρα. Η πρώτη εφαρμογή ονομάζεται BinaryReader και επιτρέπει την ανάγνωση των δυαδικών αρχείων του συστήματος καταγραφής. Η δυνατότητα αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου σε ορισμένες περιπτώσεις να γίνεται απευθείας επισκόπηση των μετρήσεων που καταγράφονται από το σύστημα καταγραφής και να διαπιστώνονται πιθανές δυσλειτουργίες. Όπως περιγράφηκε και στην εφαρμογή DataSender που γίνεται ανάγνωση των δυαδικών αρχείων, η εφαρμογή κάνει χρήση της κλάσης BinaryReader του .NET. Η εφαρμογή δεν απαιτεί κάποια ρύθμιση και ο χρήστης απαιτείται μόνο να ορίσει το δυαδικό αρχείο που θα αποκωδικοποιηθεί προκειμένου να γίνει εμφάνιση των δεδομένων στην οθόνη, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.11:

Counter 1	Counter 2	Counter 3	Counter 4	Counter 5	Counter 6	Pressure 1	Pressure 2	Pressure 3	Temperature	Not Used	Not Used	Seconds Length	Minute
664	581	531	546	510	448	9776	9775	9776	176	0	0	60	0
622	663	567	524	514	514	9776	9775	9776	176	0	0	60	1
628	662	556	522	499	526	9775	9775	9775	178	0	0	60	2
651	616	548	541	533	501	9775	9774	9776	178	0	0	60	3
689	586	531	520	503	534	9775	9775	9775	179	0	0	60	4
637	591	559	481	523	582	9776	9775	9777	180	0	0	60	5
608	608	555	560	530	543	9776	9776	9777	181	0	0	60	6
662	542	485	500	484	540	9777	9776	9778	181	0	0	60	7
632	559	535	537	524	581	9777	9776	9778	182	0	0	60	8
696	586	514	496	503	602	9776	9776	9777	182	0	0	60	9
581	717	562	539	534	552	9776	9775	9776	183	0	0	60	10
663	613	514	572	596	589	9776	9776	9777	183	0	0	60	11
682	580	507	555	496	534	9777	9777	9777	183	0	0	60	12
616	622	532	549	519	560	9777	9777	9777	183	0	0	60	13
627	631	561	620	493	539	9778	9777	9778	180	0	0	60	14
637	611	564	496	542	531	9777	9776	9778	176	0	0	60	15

**Σχήμα 3.11:** Εφαρμογή BinaryReader για ανάγνωση των δυαδικών αρχείων του συστήματος καταγραφής

Η δεύτερη εφαρμογή ονομάζεται DataStatistics και αφορά τον υπολογισμό των παραμέτρων που απαιτούνται για την υλοποίηση των αλγορίθμων διόρθωσης δεδομένων. Η εφαρμογή συνδέεται στην τοπική βάση του σταθμού και αντλώντας δεδομένα για μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο από τον πίνακα uncorrected που περιέχονται οι πρωτογενείς μετρήσεις, εκτελεί όλους τους υπολογισμούς σύμφωνα με όσα περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 2. Συγκεκριμένα, αρχικά γίνεται υπολογισμός των λόγων  $\frac{N_i}{N_j}$  για κάποιον προεπιλεγμένο θάλαμο αναφοράς  $j$ . Ο υπολογισμός γίνεται με την επαναληπτική διαδικασία που απεικονίστηκε στο σχήμα 2.10 και προκειμένου να πραγματοποιηθεί απαιτεί το καθορισμό από το χρήστη του διαστήματος εμπιστοσύνης και της τιμής με την οποία θα ελέγχεται η σύγκλιση του υπολογισμού. Στη συνέχεια γίνεται υπολογισμός των υπολοίπων παραμέτρων φιλτράροντας τις αξιόπιστες ιστορικές μετρήσεις σύμφωνα με το σχήμα 2.9. Με τον τρόπο αυτό γίνεται υπολογισμός των υπολοίπων λόγων  $\frac{N_i}{N_j}$  και της μέσης τιμής των θαλάμων. Τέλος πραγματοποιείται υπολογισμός των συναρτήσεων  $\sigma_i^j=f(n_j)$  σύμφωνα με το σχήμα 2.17. Για τον υπολογισμό αυτό συντάσσεται ένα σύνθετο ερώτημα κατά το οποίο οι μετρήσεις μετασχηματίζονται ως προς τον θάλαμο αναφοράς, υπολογίζεται η στατιστική διακύμανση για κάθε  $n_j$  και γίνεται υπολογισμός συνάρτησης  $\sigma_i^j=f(n_j)$  εφαρμόζοντας τις σχέσεις της μεθόδου ελαχίστων τετράγωνων. Προκειμένου κατά την εφαρμογή της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων να μη ληφθούν υπόψη σημεία που έχουν προκύψει από πολύ χαμηλή στατιστική, ο χρήστης ορίζει τον ελάχιστο αριθμό μετρήσεων από τις οποίες πρέπει να έχει προκύψει κάποιο σημείο  $\sigma_i^j$  προκειμένου να ληφθεί υπόψη από τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Η εικόνα της εφαρμογής DataStatistics μετά την ολοκλήρωση των υπολογισμών δίνεται στο σχήμα 3.12:





**Σχήμα 3.12:** Εφαρμογή DataStatistics για τον υπολογισμό από τη τοπική βάση δεδομένων των παραμέτρων για την εφαρμογή των αλγορίθμων διόρθωσης δεδομένων.

## 3.2. Εφαρμογές παγκόσμιας βάσης μετρήσεων

### 3.2.1. Πρόσβαση στα δεδομένα των σταθμών

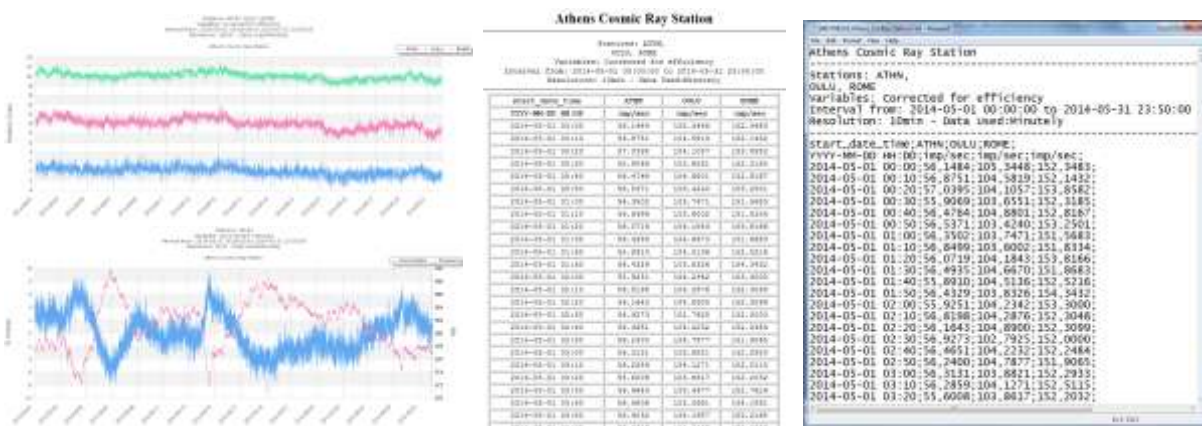
Η ύπαρξη slave server του NMDB στο σταθμό της Αθήνας επιτρέπει την υλοποίηση εφαρμογών που χρησιμοποιούν απευθείας τις μετρήσεις που αποστέλλουν όλοι οι σταθμοί στην παγκόσμια βάση μετρήσεων. Μία βασική δικτυακή εφαρμογή που υλοποιήθηκε είναι η εφαρμογή Multi-Station που επιτρέπει τη συνδυαστική επισκόπηση των δεδομένων του NMDB. Η εφαρμογή αποτελείται από μία φόρμα που έχει υλοποιηθεί σε HTML με εκτεταμένη χρήση Javascript και jQuery προκειμένου να υπάρξει η απαιτούμενη διαδραστικότητα στις εντολές του χρήστη, ενώ η μορφοποίηση γίνεται με χρήση css λητσι ώστε να είναι εύκολες οι αισθητικές μεταβολές όταν απαιτούνται. Η επικοινωνία με τη βάση δεδομένων, η επεξεργασία των δεδομένων και η προβολή των αποτελεσμάτων γίνεται με χρήση PHP. Η δικτυακή φόρμα δίνεται στο σχήμα 3.13:

**Σχήμα 3.13:** Η φόρμα της δικτυακής εφαρμογής Multi-Station για την επισκόπηση των δεδομένων του NMDB.

Η χρήση της εφαρμογής προϋποθέτει την επιλογή παραμέτρων τεσσάρων ειδών και συγκεκριμένα των σταθμών που θα γίνει αναζήτηση των μετρήσεων (Stations), των ημερομηνιών έναρξης και λήξης (Dates), των μεταβλητών (Variables) και του τρόπου που θα απεικονιστούν τα αποτελέσματα (Output). Δεδομένου ότι στο NMDB αποθηκεύονται τεσσάρων ειδών μετρήσεις για κάθε σταθμό (uncorrected, pressure corrected, pressure and efficiency corrected, pressure), η εφαρμογή υποστηρίζει δύο λειτουργίες για επισκόπηση των μετρήσεων, την λειτουργία Multi-Station και την λειτουργία Multi-Variable. Η λειτουργία Multi-Station επιτρέπει την ταυτόχρονη επισκόπηση μίας μεταβλητής από πολλούς σταθμούς, ενώ η λειτουργία Multi-Variable επιτρέπει την

ταυτόχρονη επισκόπηση πολλών μεταβλητών από ένα σταθμό. Η εναλλαγή ανάμεσα στις δύο λειτουργίες γίνεται με drop-box και αναλόγως ο τρόπος επιλογής των σταθμών και των μεταβλητών εναλλάσσεται ανάμεσα σε checkbox ή σε radio-buttons. Κατά την λειτουργία Multi-Station και προκειμένου να διευκολυνθεί ο χρήστης στη μαζική επιλογή των σταθμών υπάρχει η δυνατότητα άμεσης επιλογής όλων των σταθμών ή των σταθμών που είναι σε λειτουργία (online). Ο προσδιορισμός των online σταθμών ενεργοποιείται με την επιλογή του σχετικού checkbox και πραγματοποιείται ελέγχοντας εάν η τελευταία εγγραφή κάθε σταθμού είναι εντός των τελευταίων πέντε λεπτών. Ο έλεγχος γίνεται μέσω ερωτήματος στη βάση δεδομένων που αποστέλλεται χρησιμοποιώντας την τεχνική AJAX (Asynchronous JavaScript and XML).

Η επιλογή των ημερομηνιών μεταξύ των οποίων γίνεται η αναζήτηση των μετρήσεων, γίνεται με χρήση του Any+Time™ DatePicker/TimePicker που προσφέρει έναν εύχρηστο τρόπο επιλογής για την ημερομηνία και την ώρα. Όσον αφορά την έξοδο των μετρήσεων, απαιτείται ο καθορισμός της ανάλυσης που θα έχουν οι μετρήσεις καθώς και ο τρόπος προβολής. Για την ανάλυση των μετρήσεων δίνεται η δυνατότητα ενός πλήθους επιλογών από 1 λεπτό έως και 1 έτος ενώ για την έξοδο υποστηρίζεται η απεικόνιση σε διάγραμμα, σε ιστοσελίδα και σε αρχείο csv. Λόγω του ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις στους σταθμούς όσον αφορά τον αριθμό των θαλάμων που έχει ο μετρητής νετρονίων, το κατώφλι δυσκαμψίας και το υψόμετρο, αναμένονται μεγάλες διαφοροποιήσεις στην απόλυτη τιμή της μέτρησης που καταγράφει κάθε σταθμός. Προκειμένου να είναι πρακτική η απεικόνιση σε διάγραμμα και δεδομένου ότι στην παρακολούθηση της ροής της κοσμικής ακτινοβολίας σημασία έχει η μεταβολή της μέτρησης και όχι η απόλυτη τιμή της, για την περίπτωση της εξόδου σε διάγραμμα δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης σε σχετική κλίμακα του ενός σταθμού με τον άλλο. Για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων γίνεται χρήση της βιβλιοθήκης JpGraph. Παραδείγματα της εξόδου δίνεται στο σχήμα 3.14:



**Σχήμα 3.14:** Η έξοδος της εφαρμογής Multi-Station. Διακρίνεται διάγραμμα από τη λειτουργία multi-station (αριστερά πάνω), διάγραμμα από τη λειτουργία multi-variable (αριστερά κάτω), ιστοσελίδα (κέντρο) και αρχείο csv (δεξιά).

Η άντληση των μετρήσεων από τη βάση δεδομένων πραγματοποιείται με SQL queries τα οποία συντάσσονται ανάλογα με τις παραμέτρους που έχει επιλέξει ο χρήστης. Στη περίπτωση που η ανάλυση των μετρήσεων είναι μικρότερη από μία ώρα, τα δεδομένα αντλούνται με συνδυασμένη ανάγνωση (LEFT JOIN) των πινάκων STATION\_ori και STATION\_rev και με προτεραιότητα ανάγνωσης από τον STATION\_rev (COALESCE) ώστε να ανακτηθούν οι επικαιροποιημένες μετρήσεις. Στη περίπτωση που η ανάλυση είναι ίση ή μεγαλύτερη της μίας ώρας, οι μετρήσεις αντλούνται από τον πίνακα STATION\_1h. Σε περίπτωση που η ανάλυση που θα εξαχθούν οι μετρήσεις είναι διαφορετική από ένα λεπτό ή από μία ώρα απαιτείται μείωση της ανάλυσης των μετρήσεων από αυτή που είναι αποθηκευμένες στη βάση δεδομένων. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας timeslices και υπολογίζοντας το μέσο όρο των μετρήσεων μέσα σε αυτές. Συγκεκριμένα η μέθοδος βασίζεται στη δημιουργία μέσω του SQL query ενός προσωρινού πεδίου που έχει την ίδια τιμή για όλες τις εγγραφές που θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό του μέσου όρου. Δεδομένου ότι οι εγγραφές έχουν ως πρωτεύον κλειδί την ημερομηνία και την ώρα της μέτρησης (start\_date\_time), το προσωρινό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις TIMESTAMPADD, TIMESTAMPDIFF και FLOOR της SQL. Για παράδειγμα, εάν τη ημερομηνία εκκίνησης για την ανάκτηση των μετρήσεων είναι η 1η Σεπτεμβρίου 2011

και οι μετρήσεις πρέπει να ανακτηθούν με ανάλυση μία ημέρας, γίνεται υπολογισμός το πόσο διαφέρει η ημερομηνία κάθε εγγραφής από την ημερομηνία έναρξης:

```
TIMESTAMPDIFF(DAY,'2011-09-01 00:00:00',start_date_time)
```

Η έξοδος της συνάρτησης είναι δεκαδικός αριθμός, επομένως χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση FLOOR απορρίπτεται το δεκαδικό μέρος και δημιουργείται ένα προσωρινό πεδίο που είναι ίδιο για όλες τις εγγραφές που απέχουν από την ημερομηνία έναρξης κατά το ίδιο ακέραιο μέρος. Η ποσότητα που υπολογίστηκε προστίθεται με χρήση της συνάρτησης TIMESTAMPADD στην ημερομηνία έναρξης δημιουργώντας το ενδιάμεσο πεδίο που ονομάζεται timeslice και βάση του οποίου ταξινομούνται οι μετρήσεις ώστε να υπολογιστεί ο μέσος όρος:

```
TIMESTAMPADD(DAY,
              FLOOR(TIMESTAMPDIFF(DAY,'2011-09-01 00:00:00',start_date_time)),
              '2011-09-01 00:00:00') AS timeslice
```

Ανεξάρτητα με την ανάλυση που επιλέγει ο χρήστης στη φόρμα, κατά την υποβολή των παραμέτρων γίνεται υπολογισμός μίας ελάχιστης ανάλυσης που πρέπει να έχουν οι μετρήσεις προκειμένου να μην επιβαρύνεται η βάση δεδομένων με μεγάλα φορτία. Η ελάχιστη ανάλυση είναι τέτοια ώστε οι εγγραφές που θα αντληθούν από τη βάση δεδομένων να μην ξεπερνούν τις 17 000 για έναν σταθμό, τιμή που διαιρείται με τον αριθμό των σταθμών κατά τη λειτουργία multi-station. Η υλοποίηση αυτή προστατεύει τη βάση δεδομένων ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζει τη λειτουργικότητα της εφαρμογής ακόμη και στην άντληση μετρήσεων από πολλούς σταθμούς ταυτόχρονα.

### 3.2.2. Υπολογισμός βαρομετρικού συντελεστή των σταθμών

Η δεύτερη εφαρμογή που υλοποιήθηκε και που κάνει χρήση των δεδομένων από το slave server του NMDB αφορά τον υπολογισμό του βαρομετρικού συντελεστή. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται είτε με την τυπική μέθοδο που περιγράφηκε στην

παράγραφο 2.5.2 είτε με την μέθοδο που περιγράφηκε στη παράγραφο 2.5.3, δηλαδή κάνοντας χρήση σταθμού αναφοράς για τη διόρθωση των διακυμάνσεων της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Η εφαρμογή είναι δικτυακή και έχει υλοποιηθεί σε HTML με χρήση Javascript ενώ η σύνδεση με τη βάση δεδομένων, η επεξεργασία των δεδομένων και η απεικόνιση του αποτελέσματος πραγματοποιείται με PHP. Η διεπαφή δίνεται στο σχήμα 3.15:

## Athens Cosmic Ray Station Barometric Coefficient Form

	Year	Month	Day	Hour	Minute
<b>From</b>	2014 ▾	Jan ▾	1 ▾	0 ▾	0 ▾
<b>To</b>	2014 ▾	Jan ▾	31 ▾	23 ▾	59 ▾
<b>Resolution</b>					
<input checked="" type="radio"/> 1 Hour <input type="radio"/> 1 Day					
<b>Plot Type</b>					
<input checked="" type="radio"/> Beta Calculation <input type="radio"/> Monthly Variation					
<input type="checkbox"/> Allow usage of 1 minute data table					
<input type="checkbox"/> Define the average pressure <input type="text" value=""/> mb					
<b>Main Station</b>			<b>Reference Station</b>		
ATHN ▾			No Correction ▾		
<input type="button" value="Results"/>					

### Brief Description

- The Barometric Coefficient of Neutron Monitors is calculated using the NMDB Data
- Due to performance reasons, the "1 Hour" resolution is limited to 3000 points. For more points the resolution is forced to "1 Day"
- The resolution of the "Monthly Variation" plot is forced to "1 Day" for time periods more than 5 years.
- checkbox "Allow usage of 1 minute data table": use of the 1 minute data of the stations in case of 1 hour data absence
- checkbox "Define the average pressure": allows the user to enter the desired average pressure of the station

[\[REF\]](#) Online application for barometric coefficient calculation of the NMDB stations

P.Paschalis, H.Mavromichalaki, V.Yanke, A.Belov, E.Eroshenko, M.Gerontidou, I.Koutrompi, *New Astronomy*, 19,10-18, 2013

**Σχήμα 3.15:** Η φόρμα της δικτυακής εφαρμογής για τον υπολογισμό του βαρομετρικού συντελεστή χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του NMDB.

Η εφαρμογή προσφέρει δύο λειτουργίες, την beta calculation για τον υπολογισμό του βαρομετρικού συντελεστή χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις μιας καθορισμένης περιόδου και την monthly variation για τον υπολογισμό των μηνιαίων τιμών του βαρομετρικού συντελεστή για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Και στις δύο λειτουργίες η έξοδος της εφαρμογής είναι διαγράμματα της μορφής που παρουσιάστηκαν στη παράγραφο 2.5 και τα οποία παράγονται με χρήση της βιβλιοθήκης JpGraph. Συγκεκριμένα, στη λειτουργία beta calculation το διάγραμμα απεικονίζει τη μεταβλητή  $\ln \frac{N}{N_0}$  σε συνάρτηση με το P-P<sub>0</sub>, καθώς και την ευθεία που προκύπτει από τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, παρέχοντας έτσι, πέρα από τη τιμή του βαρομετρικού συντελεστή, πληροφορία σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού. Στη λειτουργία monthly variation, το διάγραμμα απεικονίζει τη τιμή του βαρομετρικού συντελεστή που υπολογίζεται κάθε μήνα ενώ στο ίδιο διάγραμμα δίνεται ο συντελεστής συσχέτισης που προκύπτει από τον υπολογισμό κάθε τιμής. Και για τις δύο λειτουργίες γίνεται χρήση των μετρήσεων που είναι αποθηκευμένες στο NMDB με ανάλυση μίας ώρας ή μίας ημέρας.

Οι παράμετροι που πρέπει να εισάγει ο χρήστης για τον υπολογισμό είναι οι ημερομηνίες μεταξύ των οποίων θα γίνει χρήση των μετρήσεων, η ανάλυση που θα έχουν οι μετρήσεις, η λειτουργία beta calculation ή monthly variation, ο σταθμός για τον οποίο θα γίνει υπολογισμός και προαιρετικά ο σταθμός αναφοράς για τη διόρθωση ως προς τη μεταβολή της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Με την υποβολή των παραμέτρων συντάσσεται το SQL query και αποστέλλεται στη βάση δεδομένων. Δεδομένου ότι η ανάλυση των μετρήσεων είναι μία ώρα ή μία ημέρα, γίνεται χρήση των πινάκων STATION\_1h. Ωστόσο λόγω του ότι υπάρχουν σταθμοί που δεν αποστέλλουν διαρκώς ωριαίες μετρήσεις αλλά αποστέλλουν μετρήσεις λεπτού, δίνεται η δυνατότητα χρήσης των πινάκων STATION\_ori μέσω της σχετικής επιλογής στη φόρμα. Σε περίπτωση που η ανάλυση που επιλέγεται είναι μίας ημέρας ή στη περίπτωση που γίνεται χρήση των πινάκων STATION\_ori, απαιτείται η τροποποίηση της ανάλυσης των δεδομένων που αντλούνται από τη βάση. Για την τροποποίηση της ανάλυσης ακολουθείται η μέθοδος των timeslices που περιγράφηκε και στην εφαρμογή Multi-Station. Προκειμένου να προστατευτεί η βάση δεδομένων από μεγάλα φορτία και προκειμένου η εφαρμογή να είναι λειτουργική σε κάθε περίπτωση, η ανάλυση των μετρήσεων μειώνεται αυτόματα

σε 1 ημέρα όταν κατά τη λειτουργία beta calculation δημιουργούνται περισσότερα από 3000 σημεία στο διάγραμμα ή όταν κατά τη λειτουργία monthly variations το χρονικό διάστημα υπολογισμού ξεπερνά τα 5 έτη.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ IV

### Ανάπτυξη τεχνικών προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο παρουσιάζεται το δεύτερο κύριο θέμα της εργασίας που αφορά την ανάπτυξη των τεχνικών προσομοίωσης. Αρχικά γίνεται μια αναφορά της χρησιμότητας των προσομοιώσεων στη Φυσική γενικά και στον τομέα της κοσμικής ακτινοβολίας ειδικότερα, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο προσομοιώσεις που αναπτύχθηκαν. Η πρώτη προσομοίωση αφορά στη μελέτη της λειτουργίας του μετρητή νετρονίων 6NM-64 που φέρει ο σταθμός της Αθήνας, ενώ η δεύτερη στη μελέτη των καταγισμών δευτερογενών κοσμικών ακτίνων μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης. Και οι δύο προσομοιώσεις κάνουν χρήση του πακέτου Geant4. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έχουν δημοσιευτεί στις Paschalis et al. (2013d; 2014).

#### 4.1. Τεχνικές προσομοίωσης

##### 4.1.1. Στόχος, πεδίο εφαρμογής και τρόπος υλοποίησης των προσομοιώσεων

Σαν γενική έννοια, σύστημα θεωρείται ένα πλήθος στοιχείων και αντικειμένων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους είτε με φυσικό τρόπο είτε με διαδικασίες. Η προσομοίωση αναφέρεται στη μέθοδο μελέτης ενός συστήματος μέσω της αναπαράστασης των στοιχείων του και των διαδικασιών που τα συνδέουν, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα όσον αφορά την ανταπόκριση του συστήματος σε σχέση με τις διάφορες συνθήκες λειτουργίας του. Οι στόχοι της προσομοίωσης είναι πολλαπλοί και σχετίζονται κυρίως με την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το σύστημα ανταποκρίνεται σε διάφορες εισόδους-συνθήκες λειτουργίας, με τη μελέτη της ευαισθησίας του σε διάφορες παραμέτρους και σε ορισμένες περιπτώσεις (όταν υπάρχει πρόσβαση στο πραγματικό σύστημα) με την βελτιστοποίησή του.

Δεδομένου ότι η έννοια του συστήματος συναντάται σε πολλούς επιστημονικούς τομείς, η τεχνική της προσομοίωσης βρίσκει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα

επιστημονικών πεδίων που περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, τη Μηχανική (McKenna, 2011; Martinelli and Filippou, 2009; Bohn et al., 2013), την Οικονομία (Bergmann, 1974), την Ιατρική (Milburn, 2012), τη Βιολογία (Meng et al., 2004), τη Χημεία (Gillespie, 1977) και ασφαλώς την Φυσική. Παρότι η τεχνική της προσομοίωσης μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε σύστημα, η μεγάλη αξία της φαίνεται στη μελέτη συστημάτων που αποτελούνται από μεγάλο πλήθος στοιχείων ή/και από μεγάλο πλήθος διαδικασιών. Με δεδομένο ότι κάποια μεταβολή στο ίδιο το σύστημα ή στο περιβάλλον του επηρεάζει όλα τα στοιχεία του συστήματος μέσω των διαδικασιών που τα συνδέουν, τα συστήματα με μεγάλο αριθμό στοιχείων πολλές φορές παρουσιάζουν χαοτική συμπεριφορά που δεν είναι εύκολο να προβλεφθεί ή να περιγραφεί νομοτελειακά. Σε αυτού του είδους τα συστήματα, η τεχνική της προσομοίωσης βρίσκει το ιδανικό πεδίο εφαρμογής και καταφέρνει να δώσει χρήσιμες πληροφορίες μέσω της αναπαράστασης της συμπεριφοράς κάθε στοιχείου και κάθε διαδικασίας του συστήματος.

Η αναπαράσταση της συμπεριφοράς των στοιχείων και των διαδικασιών ενός συστήματος μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους και εργαλεία και εξαρτάται από το σύστημα που προσομοιώνεται. Για παράδειγμα, η ανταπόκριση ενός κτιρίου σε ένα σεισμό μπορεί να προσομοιωθεί με την κατασκευή μιας μικρογραφίας του ή τμήματός του και τη δημιουργία εικονικού σεισμού με τη βοήθεια ενός παλλόμενου επιπέδου (Martinelli and Filippou, 2009). Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία, ο πιο πρόσφορος τρόπος είναι με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα σύστημα με πολλά στοιχεία και διαδικασίες, που κατά περίπτωση παρουσιάζει χαοτική συμπεριφορά, είναι πολύ πιο εύκολο από τη πλευρά του επιστήμονα αλλά και πιο αποδοτικό από πλευράς χρόνου προσομοίωσης και παρεχόμενων πληροφοριών να περιγραφεί με τη βοήθεια υπολογιστικών συστημάτων. Για αυτό το λόγο η έννοια της προσομοίωσης συνδέεται άρρηκτα με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Η εφαρμογή της προσομοίωσης σε κάποιο σύστημα, ειδικά όταν γίνεται με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή, προϋποθέτει τη μοντελοποίηση των στοιχείων του συστήματος και των διαδικασιών που τα συνδέουν. Η μοντελοποίηση σχετίζεται με την περιγραφή-αναπαράσταση των στοιχείων και των διαδικασιών και είναι απαραίτητη

προκειμένου το σύστημα να μπορεί να περιγράψει-αναπαρασταθεί είτε από τον υπολογιστή είτε από κάποια άλλη μέθοδο. Η μοντελοποίηση δεν είναι μια τετριμμένη διαδικασία, αλλά απαιτεί πολύ καλή κατανόηση του συστήματος ώστε να αποδοθούν σωστά τα σημαντικά χαρακτηριστικά κάθε στοιχείου και διαδικασίας, ενώ παράλληλα να απομονωθούν τα χαρακτηριστικά εκείνα που δεν επηρεάζουν σημαντικά το σύστημα και αυξάνουν την πολυπλοκότητα του μοντέλου χωρίς να προσθέτουν ουσιαστικά στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η μοντελοποίηση εμπεριέχει την έννοια της προσέγγισης και για αυτό είναι απαραίτητη η επιβεβαίωση της ορθότητας κάθε μοντέλου μέσα από σύγκριση με πραγματικά δεδομένα.

Η αναπαράσταση της συμπεριφοράς των στοιχείων ενός συστήματος και των διαδικασιών του γίνεται μέσω στατιστικών κατανομών που είναι προϊόν είτε της θεωρίας είτε της μοντελοποίησης. Μια μεγάλη κατηγορία προσομοιώσεων είναι η μέθοδος Monte Carlo, η οποία προσομοιώνει το σύστημα χρησιμοποιώντας ακολουθίες τυχαίων αριθμών που ακολουθούν τις στατιστικές κατανομές που χαρακτηρίζουν το σύστημα. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναπτύχθηκε από επιστήμονες του Εργαστηρίου του Los Alamos κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, με αφορμή την αδυναμία που αντιμετώπισαν στην επίλυση προβλημάτων ραδιοπροστάσιας με χρήση αναλυτικών μαθηματικών μεθόδων. Η ακριβής μέθοδος αποδίδεται στους Fermi, von Neumann, Ulam, Metropolis, και Richtmyer και περιγράφεται από τους Cashwell και Everett (1959). Οι μέθοδοι Monte Carlo είναι υπολογιστικοί αλγόριθμοι και τις τελευταίες δεκαετίες έχουν γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη λόγω του γεγονότος ότι υπάρχει άφθονη υπολογιστική ισχύς, σαν αποτέλεσμα της ραγδαίας ανάπτυξης των πληροφοριακών συστημάτων.

#### **4.1.2. Λογισμικά πακέτα προσομοιώσεων στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων**

Η Φυσική, ως βασική επιστήμη, είναι ένας τομέας που προσφέρεται για την εφαρμογή της τεχνικής των προσομοιώσεων. Παρότι εφαρμόζονται σε όλους τους τομείς της Φυσικής, οι προσομοιώσεις είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στο τομέα της Πυρηνικής Φυσικής και της Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων. Ο λόγος είναι ότι τα συστήματα που συναντώνται στο συγκεκριμένο τομέα παρουσιάζουν όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά τα οποία καθιστούν τη μέθοδο της προσομοίωσης ιδανική για τη μελέτη τους.

Συγκεκριμένα, τα συστήματα σε αυτό το τομέα συνθέτονται από ένα μεγάλο πλήθος στοιχειωδών σωματιδίων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με ένα μεγάλο πλήθος αλληλεπιδράσεων, παρουσιάζοντας με αυτό το τρόπο σε πολλές περιπτώσεις χαοτική συμπεριφορά. Οι βασικές αλληλεπιδράσεις που εμφανίζονται ανάμεσα στα σωματίδια είναι η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής και η ισχυρή αλληλεπίδραση οι οποίες συνδέονται με ένα πλήθος παρατηρήσιμων φαινομένων όπως διασπάσεις, ελαστικές και ανελαστικές σκεδάσεις, εκπομπή ακτινοβολίας και ιονισμοί. Η πιθανότητα να συμβεί κάποιο από αυτά τα φαινόμενα εκφράζεται μέσω της ενεργούς διατομής, γεγονός που ευνοεί εξαιρετικά τη χρήση των μεθόδων Monte Carlo για τις προσομοιώσεις. Στη περίπτωση αυτή οι ακολουθίες των τυχαίων αριθμών χρησιμοποιούνται προκειμένου να καθοριστεί αν θα πραγματοποιηθεί κάποιο φαινόμενο και ποιό φαινόμενο θα είναι αυτό.

Η χρήση προσομοιώσεων στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων εμφανίζει πολλές εφαρμογές τις τελευταίες δεκαετίες εξαιτίας των παγκόσμιας κλίμακας πειραμάτων Φυσικής Υψηλών Ενεργειών που πραγματοποιούνται. Τα πειράματα αυτά αποτελούνται από πολύ μεγάλης κλίμακας επιταχυντές και ανιχνευτές και η διαδικασία της προσομοίωσης αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις κομμάτι του πειράματος, αφενός για να γίνει βελτιστοποίηση στα τμήματα της διάταξη, αφετέρου για να αποφευχθούν αποτυχημένες εκτελέσεις του πειράματος που θα έχουν μεγάλη οικονομική επιβάρυνση. Ένα χαρακτηριστικό που παρουσιάζουν οι προσομοιώσεις ιδιαίτερα στη Φυσική Υψηλών Ενεργειών είναι ότι, λόγω μεγάλου πλήθους σωματιδίων, τα συστήματα εμφανίζουν μεγάλη πολυπλοκότητα με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγάλη υπολογιστική ισχύς προκειμένου η χρονική απόδοση να είναι σε λογικά πλαίσια. Ως εκ τούτου απαιτείται πολύ προσεκτικός σχεδιασμός της προσομοίωσης, τόσο από πλευράς υλοποίησης όσο και από πλευράς μοντελοποίησης.

Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιούνται στη Πυρηνική Φυσική και στη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων παρουσιάζουν κοινά σημεία, δεδομένου ότι έχουν σαν αντικείμενο συστήματα που αποτελούνται από στοιχειώδη σωματίδια τα οποία αλληλεπιδρούν με τις γνωστές αλληλεπιδράσεις της φύσης. Η διαφοροποίηση που συναντούμε στα διάφορα συστήματα έχουν να κάνουν με τη γεωμετρία κάθε

συστήματος, με την ύπαρξη αντικειμένων μέσα στο χώρο, με την ύπαρξη πεδίων καθώς και με το είδος των πληροφοριών που αντλούνται από την προσομοίωση. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι, δεδομένης της πολυπλοκότητας των συστημάτων, οι υπολογιστικοί αλγόριθμοι πρέπει να είναι σχεδιασμένοι με το βέλτιστο δυνατό τρόπο προκειμένου να υπάρχει καλή χρονική απόδοση, έχουν αναπτυχθεί συνεργασίες σε παγκόσμιο επίπεδο για τη δημιουργία λογισμικών πακέτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να αναπτυχθούν προσομοιώσεις Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων. Τα πακέτα αυτά παρέχουν τις βασικές μεθόδους τις οποίες ο χρήστης προσαρμόζει και χρησιμοποιεί προκειμένου να συνθέσει την προσομοίωση του συστήματος που μελετά. Από τα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης που έχουν δημιουργηθεί στο χώρο της Πυρηνικής Φυσικής και της Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων, τα πιο γνωστά είναι τα MCNP, MARS, PHITS, TRIPOLI-4, FLUKA και Geant4 που έχουν σαν αντικείμενο την προσομοίωση της κίνησης σωματιδίων μέσα στην ύλη.

Το πακέτο MCNP έχει δημιουργηθεί από το εργαστήριο του Los Alamos και αντιστοιχεί στο ακρωνύμιο "Monte Carlo N-Particle". Είναι από τα παλαιότερα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης και θεωρείται ότι χρησιμοποιεί την αυθεντική μέθοδο Monte Carlo των Fermi, von Neumann, Ulam, Metropolis, και Richtmyer (Cashwell and Everett, 1959). Το MCNP είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και η πρώτη του παρουσίαση έγινε το 1977. Χρήσιμο υλικό σχετικά με την αρχική υλοποίηση του δίνεται από τους Carter και Cashwell (1975) και Thompson et al. (1980). Έκτοτε, πολλές εκδόσεις του MCNP έχουν υλοποιηθεί και παρουσιαστεί με πολύ σημαντική την MCNPX, η οποία αντιστοιχεί στο ακρωνύμιο "Monte Carlo N-Particle eXtended" και η οποία επεκτείνει το MCNP σε όλα σχεδόν τα σωματίδια. Η τελευταία έκδοση του πακέτου είναι η MCNP6.1 (Goorley et al., 2013). Σχετικά με το λογισμικό πακέτο MARS, έχει δημιουργηθεί από επιστήμονες του εργαστηρίου Fermilab και είναι και αυτό γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Είναι και αυτό ένα από τα πρώτα πακέτα προσομοίωσης. Η πρώτη αναφορά που συναντάται στην βιβλιογραφία είναι από τον Mokhov (1975) ενώ η τελευταία του έκδοση είναι η MARS15, η οποία εξελίσσεται μέχρι σήμερα. Αναφορές σχετικά με το MARS, όπως αναφέρεται από την ίδια την ομάδα υλοποίησής του, είναι των Mokhov (1995 και 2003), Krivosheevet and Mokhov (2000) και Mokhov et al. (2004). Όσον αφορά το PHITS, είναι ένα πολύ πιο πρόσφατο πακέτο

προσομοίωσης, που έχει δημιουργηθεί από επιστήμονες της Ιαπωνικής Υπηρεσίας Ατομικής Ενέργειας, και αντιστοιχεί στο ακρωνύμιο "Particle and Heavy Ion Transport code System". Είναι γραμμένο σε FORTRAN και εμφανίζεται πρώτη φορά στη βιβλιογραφία από τους Iwase et al. (2002) ενώ η τελευταία του έκδοση είναι η PHITS2.64 (Sato et al., 2013). Επιπλέον, το TRIPOLI-4 είναι ένα νέο λογισμικό πακέτο προσομοίωσης, γραμμένο σε C++ με περιορισμένες δυνατότητες, σε σχέση με τα υπόλοιπα λογισμικά, αφού επικεντρώνεται στη διάδοση μέσα στην ύλη μόνο νετρονίων, ηλεκτρονίων και φωτονίων σε χαμηλές ενέργειες (Dior et al., 2007).

Δυο από τα πιο γνωστά πακέτα προσομοίωσης στο χώρο της Πυρηνικής Φυσικής και της Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων είναι το FLUKA και Geant4, που έχουν δημιουργηθεί μέσα από συνεργασίες επιστημονικών ομάδων από διάφορα ερευνητικά κέντρα παγκοσμίως, με πολύ μεγάλη συνεισφορά του ερευνητικού κέντρου CERN. Το FLUKA αντιστοιχεί στο ακρωνύμιο "Fluktuiierende Kaskade" και είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Η εμφάνισή του ξεκινά από 1962 ενώ πολλές αλλαγές ενσωματώθηκαν το 1978 και το 1988. Από το 1988 έχει τη τελική του μορφή και εξελίσσεται συνεχώς, ενώ αντιπροσωπευτικές αναφορές στις μέρες μας θεωρούνται των Ferrari et al. (2005) και Battistoni et al. (2007). Τελευταία έκδοση του πακέτου είναι η FLUKA 2011.2b.4. Το Geant4 αντιστοιχεί στο ακρωνύμιο "GEometry ANd Tracking", εμφανίστηκε πιο πρόσφατα (Agostinelli et al. 2003; Allison et al. 2006) και διαφέρει από τα άλλα πακέτα που περιγράφηκαν στο γεγονός ότι είναι γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού C++. Ωστόσο το Geant4 έχει και αυτό μία μακρά ιστορία που ξεκινάει από τη δεκαετία του 1970, αφού είναι συνέχεια του προηγούμενων εκδόσεων του πακέτου και κυρίως του Geant3, που χρησιμοποιούσε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN.

Τα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης στην Πυρηνική Φυσική και τη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Συνήθως είναι δομημένα σε μικρότερα τμήματα, κάθε ένα από το οποία σχετίζεται με διαφορετική λειτουργία όπως ο καθορισμός της γεωμετρίας του συστήματος που προσομοιώνεται, ο καθορισμός των πεδίων, η κίνηση των σωματιδίων μέσα στο χώρο προσομοίωσης, η παραγωγή τυχαίων αριθμών για την εφαρμογή των μεθόδων Monte Carlo, οι

αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων μεταξύ τους και με την ύλη, η διεπαφή με τον χρήστη και η γραφική αναπαράσταση της προσομοίωσης. Τις πιο πολλές φορές, κάθε ένα από τα τμήματα εξελίσσεται από διαφορετική ομάδα με εξειδίκευση στο συγκεκριμένο τομέα. Αποτέλεσμα αυτού του τρόπου υλοποίησης είναι η παροχή προς το χρήστη μιας ομάδας βελτιστοποιημένων εργαλείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να προσαρμόσει το λογισμικό προσομοίωσης σύμφωνα με τις ανάγκες του πειράματός του.

Από τα πιο σημαντικά τμήματα του λογισμικού πακέτου προσομοίωσης είναι αυτό που αναπαριστά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων, δεδομένου ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται στο μεγαλύτερο βαθμό από αυτές. Προκειμένου οι αλληλεπιδράσεις της φύσης να αναπαρασταθούν με γλώσσα προγραμματισμού από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή πρέπει να μοντελοποιηθούν, που στη συγκεκριμένη περίπτωση σχετίζεται με τον τρόπο υπολογισμού της ενεργού διατομής και των παραγόντων που την επηρεάζουν. Σε πολλές περιπτώσεις η μέθοδος υπολογισμού δεν είναι μοναδική και ως αποτέλεσμα ένα λογισμικό πακέτο μπορεί να διαθέτει παραπάνω από ένα μοντέλο για μία αλληλεπίδραση. Η διαφοροποίηση που παρατηρείται ανάμεσα σε μοντέλα της ίδια αλληλεπίδρασης αφορά κυρίως την ενεργειακή κλίμακα που είναι έγκυρο το μοντέλο καθώς και σε διαφορετικές παραδοχές και διαφορετικούς τρόπους υπολογισμού της ενεργού διατομής. Η μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων είναι πεδίο έρευνας, πολλές φορές ανεξάρτητο από την ανάπτυξη των λογισμικών πακέτων προσομοίωσης, για αυτό το λόγο σε ορισμένες περιπτώσεις διαφορετικά λογισμικά πακέτα χρησιμοποιούν κοινά μοντέλα για κάποια αλληλεπίδραση. Η μοντελοποίηση ενδείκνυται, όταν είναι δυνατό, να επικυρώνεται μέσα από τη σύγκριση με πραγματικά δεδομένα από πειράματα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα επικύρωσης μοντέλων παρουσιάζονται στους Cirrone et al. (2010), Uzhinsky et al. (2011) και Ivantchenko et al. (2011). Ωστόσο η μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων σε πολύ μεγάλες ενέργειες, που δεν έχουν ακόμη προσεγγιστεί από πειράματα, βασίζεται σε επέκταση των υπάρχουσών μοντέλων και θεωρητικούς υπολογισμούς. Σε περιπτώσεις που κάποια αλληλεπίδραση δεν είναι εφικτό να μοντελοποιηθεί σε κάποιο ενεργειακό εύρος, τότε χρησιμοποιούνται εμπειρικά μοντέλα ή ακόμη και αρχεία που περιλαμβάνουν ενεργές διατομές της αλληλεπίδρασης για συγκεκριμένες ενέργειες. Τέτοια παραδείγματα είναι των Paul and Bolik (1993), Orlic et al. (1994) και Kahoul et al. (2008).

Τα λογισμικά προσομοίωσης έχουν εξελιχθεί αρκετές δεκαετίες και σαν αποτέλεσμα η μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων καλύπτει μεγάλα ενεργειακά εύρη, ξεκινώντας από χαμηλές ενέργειες και φτάνοντας μέχρι ενέργειες που δεν έχουν ακόμη παραχθεί από τους επιταχυντές των εργαστηρίων. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι επιστημονικές ομάδες που εξελίσσουν τα λογισμικά προσομοίωσης έχουν μεταξύ άλλων και στόχο να υποστηρίξουν τα πειράματα που υλοποιεί το εργαστήριο που ανήκουν, τα λογισμικά προσομοίωσης παρουσιάζουν εξειδίκευση σε συγκεκριμένα εύρη ενεργειών. Ως εκ τούτου, ο χρήστης προκειμένου να χρησιμοποιήσει κάποιο λογισμικό για να πραγματοποιήσει κάποια προσομοίωση θα πρέπει να μελετήσει τις βιβλιογραφικές αναφορές ώστε να διαπιστώσει ποιο λογισμικό πακέτο ενδείκνυται για τις ενέργειες που συναντώνται στο σύστημα του.

#### 4.1.3. Προσομοιώσεις στο πεδίο της Κοσμικής Ακτινοβολίας

Το επιστημονικό πεδίο της κοσμικής ακτινοβολίας ενδείκνυται για την εφαρμογή προσομοιώσεων Monte Carlo καθώς σχετίζεται με την κίνηση μεγάλου πλήθους σωματιδίων υψηλών ενεργειών και την αλληλεπίδραση τους με την ύλη και τα πεδία που συναντούν στη διαδρομή τους. Η κίνηση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων και των ηλιακών ενεργητικών σωματιδίων μέσα στο μαγνητικό πεδίο της Γης και ο καθορισμός των επιτρεπόμενων τροχιών, η διάδοσή τους μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης και η δημιουργία καταιγισμών δευτερογενών σωματιδίων, η διαδικασία ανίχνευσης των σωματιδίων από τους ανιχνευτές είναι θέματα που απασχολούν την επιστημονική κοινότητα και είναι πρόσφορα να μελετηθούν μέσω προσομοιώσεων.

Η βιβλιογραφία περιλαμβάνει πλήθος αναφορών σχετικά με προσομοιώσεις στο πεδίο της κοσμικής ακτινοβολίας, το σύνολο των οποίων έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση των λογισμικών Fluka και Geant4. Εξαιρετικά σημαντική εργασία θεωρείται αυτή των Clem and Dorman (2000) με περισσότερες από 200 αναφορές. Στην εργασία αυτή έχει γίνει μελέτη της ευαισθησίας (detection efficiency) των μετρητών νετρονίων τύπου IGY, NM-64 και  $^3\text{He}$  καθώς και μελέτη των καταιγισμών δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα με σκοπό τον υπολογισμό των συναρτήσεων απόδοσης (response function και yield function) των μετρητών νετρονίων. Στη συγκεκριμένη εργασία γίνεται



παρουσίαση αποτελεσμάτων από παλαιότερους υπολογισμούς, ενώ κεντρικό ρόλο έχουν οι υπολογισμοί του Clem (1999), ο οποίος πραγματοποίησε τις σχετικές προσομοιώσεις με χρήση του λογισμικού Fluka. Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη μέτρηση της ευαισθησίας των μετρητών νετρονίων, η μέθοδος που ακολουθήθηκε ήταν η αναπαράσταση όλων των επιμέρους τμημάτων του μετρητή νετρονίων στο πρόγραμμα προσομοίωσης, η αποστολή προς αυτόν μιας δέσμης μονοενεργητικών σωματιδίων του ίδιου τύπου με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτεται όλος ο ανιχνευτής και η μέτρηση των παλμών που καταγράφονται. Όσον αφορά τη μελέτη των καταιγισμών δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα, η μέθοδος που ακολουθήθηκε ήταν η διαμέριση της ατμόσφαιρας σε στρώματα με σταθερή πυκνότητα, η αποστολή από την κορυφή της ατμόσφαιρας μονοενεργητικών σωματιδίων με συγκεκριμένες γωνίες και η καταμέτρηση των δευτερογενών σωματιδίων που δημιουργούνται μέσα σε αυτήν. Άλλες εργασίες που γίνεται υπολογισμός των συναρτήσεων απόκρισης των μετρητών νετρονίων μέσω προσομοιώσεων είναι των Debrunner et al. (1982), Flückiger et al. (2008), Matthiä et al. (2009) και Mishev et al. (2013). Επιπλέον, όσον αφορά την λειτουργία του μετρητή νετρονίων, άλλες προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί είναι των Balabin et al. (2011) και Mauricev et al. (2011) οι οποίοι με τη χρήση του λογισμικού Geant4 μελέτησαν τη διαδικασία ανίχνευσης των σωματιδίων από το μετρητή νετρονίων NM64, επικεντρώνοντας την έρευνα στη πολλαπλότητα των νετρονίων που παράγονται μέσα στον ανιχνευτή. Επιπλέον οι Semikh et al. (2012) μελέτησαν με χρήση του Geant4 την λειτουργία του μετρητή νετρονίων  $^3\text{He}$  που εγκατέστησαν στο σταθμό Plateau de Bure στη Γαλλία. Τέλος, η κίνηση των κοσμικών ακτίνων μέσα στην ατμόσφαιρα έχει μελετηθεί επίσης πολλές φορές με τεχνικές προσομοίωσης. Παραδείγματα μπορούν να αναζητηθούν στους Zuccon (2002), Battistoni et al. (2003) οι οποίοι έκαναν χρήση του λογισμικού Fluka καθώς και στους Desorgher et al. (2003) που έκαναν χρήση του λογισμικού Geant4.

Επιπλέον των ανωτέρω αναφορών, που επικεντρώνονται στη παρουσίαση αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις, εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η δημιουργία αυτόνομων προγραμμάτων που επιτρέπουν στο χρήστη να προσομοιώσει κάποιο φαινόμενο σχετικό με την κοσμική ακτινοβολία επιλέγοντας συγκεκριμένες παραμέτρους. Από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα είναι το πρόγραμμα CORSIKA

το οποίο αντιστοιχεί στο ακρωνύμιο "COsmic Ray Simulations for KAScade" και προσομοιώνει τη δημιουργία καταιγισμών σωματιδίων κατά την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα της Γης (Heck et al., 1998). Το CORSIKA έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εργασιών και έχει πάνω από 500 αναφορές στην βιβλιογραφία. Μεταξύ των εφαρμογών του είναι η δημιουργία του μοντέλου CR11 το οποίο χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ιονισμού της ατμόσφαιρας σε διάφορα ύψη (Usoskin et al., 2004; Usoskin and Kovaltsov, 2006; Usoskin et al., 2010). Τέλος, πολύ σημαντική θεωρείται η δημιουργία τριών προγραμμάτων προσομοίωσης με χρήση του πακέτου Geant4, των MAGNETOCOSMICS, ATMOCOSMICS και PLANETOCOSMICS. Τα προγράμματα αυτά έχουν δημιουργηθεί από επιστημονική ομάδα του Πανεπιστημίου της Βέρνης και προσομοιώνουν τη κίνηση των κοσμικών ακτίνων στο μαγνητικό πεδίο, στην ατμόσφαιρα της Γης καθώς και άλλων πλανητών. Πληροφορίες σχετικά με τα προγράμματα αυτά μπορούν να βρεθούν σε πλήθος δημοσιεύσεων και παρουσιάσεων (Desorgher et al., 2003; Desorgher et al., 2005; Desorgher et al., 2006; Gurtner et al., 2007, Dartnell et al. 2007, Bütikofer et al., 2011).

#### 4.1.4. Περιγραφή του Geant4

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας έγινε ανάπτυξη δυο νέων προσομοιώσεων στο πεδίο της κοσμικής ακτινοβολίας. Η πρώτη προσομοίωση αφορά τη διαδικασία ανίχνευσης σωματιδίων από τον μετρητή νετρονίων τύπου 6NM-64, ενώ η δεύτερη προσομοίωση αφορά τη διαδικασία δημιουργίας των καταιγισμών δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης. Ο στόχος αυτών των προσομοιώσεων είναι διπλός. Ο πρώτος στόχος είναι η μελέτη των αντίστοιχων φαινομένων και διαδικασιών ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα. Ο δεύτερος στόχος είναι η δημιουργία αυτόνομων προγραμμάτων με ευρεία δυνατότητα παραμετροποίησης, όπου ο τελικός χρήστης θα μπορεί να χρησιμοποιήσει προκειμένου να προσομοιώσει ένα συγκεκριμένο σενάριο.

Για τη δημιουργία των προγραμμάτων προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο Geant4. Πολλοί είναι οι λόγοι για τους οποίους επιλέχτηκε μεταξύ των υπολοίπων λογισμικών πακέτων. Το Geant4, ως ένα από τα τελευταία λογισμικά πακέτα

που έχουν δημιουργηθεί και σε αντίθεση με τα υπόλοιπα που χρησιμοποιούν γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού C++. Ως αποτέλεσμα, παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης προγραμμάτων με τη χρήση ανεπτυγμένων προγραμματιστικών τεχνικών μέσα από ένα σύγχρονο περιβάλλον υλοποίησης. Από την άλλη μεριά, στο Geant4 έχει γίνει μεταφορά όλης της τεχνογνωσίας από το Geant3 που, ως ένα από τα πρώτα λογισμικά πακέτα προσομοίωσης, διέθετε έγκυρες μεθόδους για την προσομοίωση. Επιπλέον, η μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων του Geant4 καλύπτει πλήρως την τάξη μεγέθους των ενεργειών που συναντούμε στη κοσμική ακτινοβολία. Ο λόγος είναι ότι η ομάδα ανάπτυξης του Geant4 έχει ως κύριο στόχο να υποστηρίξει μεγάλα πειράματα Φυσικής Υψηλών Ενεργειών που πραγματοποιούνται στα ερευνητικά κέντρα παγκοσμίως και ειδικότερα στο CERN. Τέλος, η ομάδα ανάπτυξης του Geant4 παρέχει εξαιρετική υποστήριξη στο πακέτο με την έκδοση διορθωμένων εκδόσεων όταν απαιτείται ενώ, δεδομένης της ευρείας χρήσης του πακέτου από την επιστημονική κοινότητα, υπάρχει υποστήριξη από δικτυακή κοινότητα χρηστών (<http://hypernews.slac.stanford.edu/HyperNews/geant4/cindex>). Ο πηγαίος κώδικας του Geant4 διατίθεται ελεύθερα μέσα από την σχετική ιστοσελίδα και συνοδεύεται από βοηθητικά αρχεία απαραίτητα για την εγκατάστασή του, καθώς και μία σειρά αναλυτικών εγχειριδίων χρήσης που περιγράφουν το τρόπο εγκατάστασης, τον τρόπο χρήσης και τον τρόπο ανάπτυξης του ίδιου του λογισμικού. Η αναλυτική περιγραφή του πακέτου δεν είναι στους στόχους του παρόντος κεφάλαιο, ωστόσο θα γίνει αναφορά στα γενικά θέματα υλοποίησης προσομοιώσεων μέσω του Geant4 ώστε να είναι πιο κατανοητή η περιγραφή των εφαρμογών που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Η ανάπτυξη εφαρμογών χρησιμοποιώντας το λογισμικό πακέτο Geant4 μπορεί να γίνει σε περιβάλλον Linux, Windows ή και Mac OS. Η ομάδα ανάπτυξης του Geant4 έχει δοκιμάσει τη συμβατότητα του με ένα πλήθος μεταγλωττιστών (compilers), ωστόσο ενδείκνυται η χρήση του g++ για το Linux και του Visual Studio της Microsoft για την ανάπτυξη εφαρμογών σε περιβάλλον Windows. Όσον αφορά τη διαδικασία ανάπτυξης εφαρμογών, το Geant4 υιοθετεί όλες τις σύγχρονες και ανεπτυγμένες τεχνικές υλοποίησης λογισμικού, παρέχοντας ένα πλήθος βασικών κλάσεων (classes) τις οποίες ο χρήστης χρησιμοποιεί για την υλοποίηση των δικών του κλάσεων μέσω της

κληρονομικότητας της C++. Μια εφαρμογή του Geant4 ελέγχεται πλήρως από δύο βασικές κλάσεις, την `G4RunManager` στην οποία ο χρήστης δηλώνει τους δείκτες διεύθυνσης των Geant4 αντικειμένων που δημιουργεί και την `G4UImanager` στην οποία ο χρήστης μπορεί να θέτει τις απαραίτητες εντολές. Αυτός ο μελετημένος τρόπος υλοποίηση καθοδηγεί το χρήστη στο τρόπο υλοποίησης που πρέπει να ακολουθήσει, βελτιστοποιεί τη διαδικασία προσομοίωσης και ελαχιστοποιεί το κίνδυνο διαρροών μνήμης. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί μια προσομοίωση, ο χρήστης είναι απαραίτητο να δημιουργήσει και να δηλώσει στο `G4RunManager` τους δείκτες διεύθυνσης τριών κύριων αντικειμένων. Τα αντικείμενα αυτά ορίζουν τη γεωμετρία της προσομοίωσης, την αρχική δέσμη σωματιδίων και τις φυσικές αλληλεπιδράσεις ενώ οι κλάσεις τους κληρονομούν τα χαρακτηριστικά των `G4VUserDetectorConstruction`, `G4VPrimaryGeneratorAction` και `G4VUserPhysicsLists` κλάσεων αντιστοίχως.

Η γεωμετρία του Geant4 ορίζεται μέσω της κλάσης `G4VUserDetectorConstruction`. Αποτελείται από έναν βασικό χώρο, που ονομάζεται `World Volume`, μέσα στον οποίο τοποθετείται ένα πλήθος αντικειμένων τα οποία έχουν συγκεκριμένες διαστάσεις, συγκεκριμένο σχήμα και είναι φτιαγμένα από συγκεκριμένα υλικά. Το πακέτο προσφέρει ένα πλήθος από γεωμετρικά σχήματα όπως ορθογώνιο, σφαίρα, κύλινδρος, κώνος, τραπεζοειδές, τετράεδρο, πολυέδρο τα οποία ο χρήστης μπορεί να συνδυάζει προκειμένου να φτιάξει από πολύ απλές δομές μέχρι πολύπλοκα συστήματα. Σε αυτό συνεισφέρει και η ύπαρξη μεθόδων που δημιουργούν ενώσεις ή τομές γεωμετρικών σχημάτων, ενώ σε περιπτώσεις σχημάτων που δε μπορούν να παραχθούν με χρήση βασικών σχημάτων, το Geant4 δίνει επιπλέον τη δυνατότητα εισαγωγής τους με χρήση συστημάτων CAD. Σημαντική είναι επίσης η ύπαρξη μεθόδων που επιτρέπουν την επανάληψη γεωμετρικών δομών ή την διαμέρισή τους σε μικρότερες δομές. Παράδειγμα της τελευταίας μεθόδου είναι η κλάση `G4PVParameterized` η οποία χωρίζει ένα αντικείμενο σε μικρότερα μέρη, επιτρέποντας στο χρήστη να ορίσει το μέγεθος, τη θέση και το υλικό που είναι κατασκευασμένο κάθε επιμέρους μέρος, μέσω της κλάσης `G4PVParameterization`. Όσον αφορά τα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των αντικειμένων, το Geant4 διαθέτει μια βάση με χημικά στοιχεία, χημικές ενώσεις και γνωστά υλικά τα οποία ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιήσει. Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από το National Institute of

Standards and Technology (NIST) του US Department of Commerce. Ωστόσο ο χρήστης είναι ελεύθερος να δημιουργήσει δικά του στοιχεία με βάση των ατομικό και τον μαζικό αριθμό και να συνθέσει ενώσεις και υλικά από αυτά. Αποτέλεσμα όλων αυτών των εργαλείων είναι η δυνατότητα αναπαράστασης πολύ πολύπλοκων συστημάτων, όπως για παράδειγμα ο ανιχνευτής ενός πειράματος Φυσικής Υψηλών Ενεργειών.

Η δέσμη των σωματιδίων καθορίζεται μέσω της κλάσης `G4VPrimaryGeneratorAction`. Η δέσμη αποτελείται από ένα πλήθος σωματιδίων για κάθε ένα από τα οποία ορίζεται η αρχική του θέση, ο τύπος του, η ενέργεια του και η κατεύθυνση κίνησής του. Ωστόσο, στις τελευταίες εκδόσεις του Geant4 έχει ενσωματωθεί και η δομή `G4GeneralParticleSource (GPS)` μέσω της οποίας είναι δυνατή η εκπομπή σωματιδίων που ακολουθούν συγκεκριμένη ενεργειακή και γωνιακή κατανομή. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι το Geant4, λόγω της εφαρμογής του στα πειράματα Φυσικής Υψηλών Ενεργειών, διαθέτει μια μεγάλη βιβλιοθήκη από σωματίδια. Τα σωματίδια της δέσμης κινούνται μέσα στη γεωμετρία που έχει οριστεί και αλληλεπιδρούν με την ύλη. Ο ορισμός των αλληλεπιδράσεων γίνεται με χρήση της κλάσης `G4VUserPhysicsLists`. Σε αυτή ο χρήστης δηλώνει ποια φαινόμενα (πχ ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση, διάσπαση, ανελαστική σκέδαση) και μέσω ποιών μοντέλων μπορούν να πραγματοποιηθούν για κάθε τύπο σωματιδίου. Η πολιτική του Geant4 είναι τέτοια ώστε ο χρήστης να καθορίσει μόνος του ποιες είναι οι σημαντικές για την προσομοίωση αλληλεπιδράσεις που πρέπει να οριστούν καθώς και ποια μοντέλα πρέπει να χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, το πακέτο παρέχει ορισμένους προκαθορισμένους συνδυασμούς μοντέλων (`physics lists`), που καλύπτουν όλες τις φυσικές αλληλεπιδράσεις σε όλο το ενεργειακό φάσμα και οι οποίοι έχουν προέλθει μέσα από την εμπειρία των μεγάλης κλίμακας πειραμάτων. Οι `physics lists`, τις περισσότερες φορές, καλύπτουν τις ανάγκες του χρήστη για την προσομοίωση, αλλά ακόμα και αν αυτό δε συμβαίνει αποτελούν μία καλή αφετηρία η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να δημιουργηθεί η βέλτιστη επιλογή μοντέλων. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ορισμένα μοντέλα αλληλεπιδράσεων κάνουν χρήση αρχείων όπου περιέχονται πληροφορίες σχετικά με τις ενεργές διατομές για συγκεκριμένες ενέργειες. Μία τέτοια περίπτωση, που σχετίζεται άμεσα με της προσομοιώσεις στην κοσμική ακτινοβολία, αφορά την

ανελαστική σκέδαση των νετρονίων σε ενέργειες έως 20 MeV, όπου για μεγάλης ακρίβειας αποτελέσματα απαιτείται η επιλογή του μοντέλου NeutronHP.

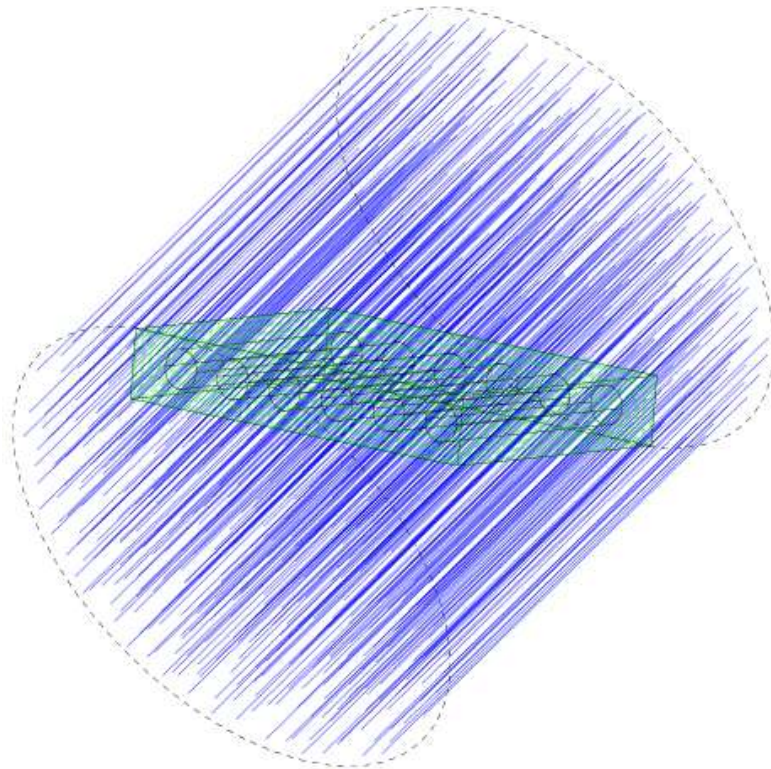
Αφού δηλωθούν στο G4RunManager οι δείκτες διεύθυνσης των τριών βασικών αντικειμένων η προσομοίωση μπορεί να πραγματοποιηθεί. Μια απλοϊκή περιγραφή της διαδικασίας προσομοίωσης είναι η ακόλουθη. Για κάθε σωματίδιο, είτε της αρχικής δέσμης είτε δευτερογενές που προέρχεται από κάποια αλληλεπίδραση, το Geant4 υπολογίζει μέσω της μεθόδου Monte Carlo την απόσταση που θα συμβούν οι αλληλεπιδράσεις που είναι δηλωμένες για το σωματίδιο αυτό. Η μικρότερη απόσταση από αυτές καθορίζει το επόμενο βήμα για το σωματίδιο και η αντίστοιχη αλληλεπίδραση πραγματοποιείται μεταβάλλοντας την ενέργεια και την διεύθυνση του σωματιδίου ή δημιουργώντας νέα σωματίδια. Η προσομοίωση των σωματιδίων από το Geant4 γίνεται μέχρι το μηδενισμό της ενέργειάς τους ή μέχρι να απορροφηθούν από κάποια αλληλεπίδραση. Εάν απαιτείται ο αποκλεισμός σωματιδίων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, αυτός πρέπει να γίνει από το χρήστη μέσω των τεχνικών που διαθέτει το Geant4. Ωστόσο, το πακέτο διαθέτει ενσωματωμένη λειτουργία για τον έλεγχο της παραγωγής σωματιδίων σε σχέση με την ενέργειά τους (production cut). Η επιλογή των ενεργειακών κατωφλίων (energy cut) κάτω από τα οποία δεν δημιουργούνται σωματίδια είναι ιδιαίτερα σημαντική προκειμένου να αποφευχθεί η παραγωγή σωματιδίων με πολύ χαμηλή ενέργεια, που δε συνεισφέρουν ουσιαστικά στη προσομοίωση και αυξάνουν τον απαιτούμενο χρόνο. Επιπλέον, πέρα από το ενεργειακό κατώφλι, το Geant4 εισάγει μια εύχρηστη έννοια σε σχέση με την παραγωγή σωματιδίων, αυτή του κατωφλίου εμβέλειας (range cut). Το κατώφλι εμβέλειας μετατρέπεται σε ενεργειακό κατώφλι για τα σωματίδια ανάλογα με το υλικό μέσα στο οποίο κινούνται, με τέτοιο τρόπο ώστε η απόσταση που θα διανύσουν θα είναι μεγαλύτερη από κάποια προκαθορισμένη τιμή. Τα κατώφλια παραγωγής σωματιδίων είναι πολύ σημαντικά για την χρονική απόδοση της προσομοίωσης, ειδικά στις περιπτώσεις καταιγισμών σωματιδίων. Ωστόσο ο χρήστης θα πρέπει να είναι πολύ προσεκτικός στην επιλογή τους ώστε να μην απορριφθούν από την προσομοίωση σημαντικά για το αποτέλεσμα σωματίδια και ιδιαίτερα εκείνα που συνεισφέρουν με τη σειρά τους σε νέα δευτερογενή σωματίδια.

Προκειμένου ο χρήστης να έχει πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικά με τα σωματίδια ή να μεταβάλει παραμέτρους κατά τη διάρκεια που η προσομοίωση εκτελείται, μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα πλήθος προαιρετικών κλάσεων όπως οι `G4UserRunAction`, `G4UserEventAction`, `G4UserStackingAction`, `G4UserTrackingAction`, `G4UserSteppingAction`. Οι δείκτες διεύθυνσης αυτών των αντικειμένων δηλώνονται στο `G4RunManager` και καλούνται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Για παράδειγμα το αντικείμενο της `G4UserStackingAction` καλείται κάθε φορά που ένα νέο σωματίδιο, είτε πρωτογενές είτε δευτερογενές, δημιουργείται ενώ η `G4UserSteppingAction` καλείται κάθε φορά που ένα σωματίδιο πραγματοποιεί ένα βήμα (η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αλληλεπιδράσεις). Επιπρόσθετα στο Geant4 έχουν υλοποιηθεί μέθοδοι που ευαισθητοποιούν κάποια περιοχή της γεωμετρίας (sensitive detectors), έτσι ώστε να ενεργοποιείται αυτόματα η καταγραφή πληροφοριών όταν κάποιο σωματίδιο εισέλθει στη περιοχή αυτή, καθώς και μέθοδοι που επιτρέπουν την αποθήκευση των πληροφοριών έτσι ώστε να παράγονται ιστογράμματα. Στην πράξη, ο χρήστης έχει μια πληθώρα εργαλείων προκειμένου να έχει πρόσβαση σε παραμέτρους και πληροφορίες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το σχεδιασμό της εφαρμογής και τις παραμέτρους που χρειάζεται να μετρούνται. Τέλος, μία σημαντική λειτουργία του Geant4 είναι η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης της προσομοίωσης μέσω της κλάσης `G4VisManager`. Παρέχεται η δυνατότητα απεικόνισης μέσω ενός πλήθους οδηγών όπως των `OpenGL`, `Qt`, `OpenInventor`, `RayTracerX`, `DAWNFILE`, `HepRepFile`, `HepRepXML`, `RayTracer`. Η δυνατότητα αυτή είναι απαραίτητη προκειμένου να επιβεβαιώνεται η σωστή γεωμετρία της προσομοίωσης αλλά και προκειμένου να κατανοηθεί καλύτερα η διαδικασία της προσομοίωσης.

## 4.2. Προσομοίωση του 6NM-64

### 4.2.1. Περιγραφή και στόχος της εφαρμογής

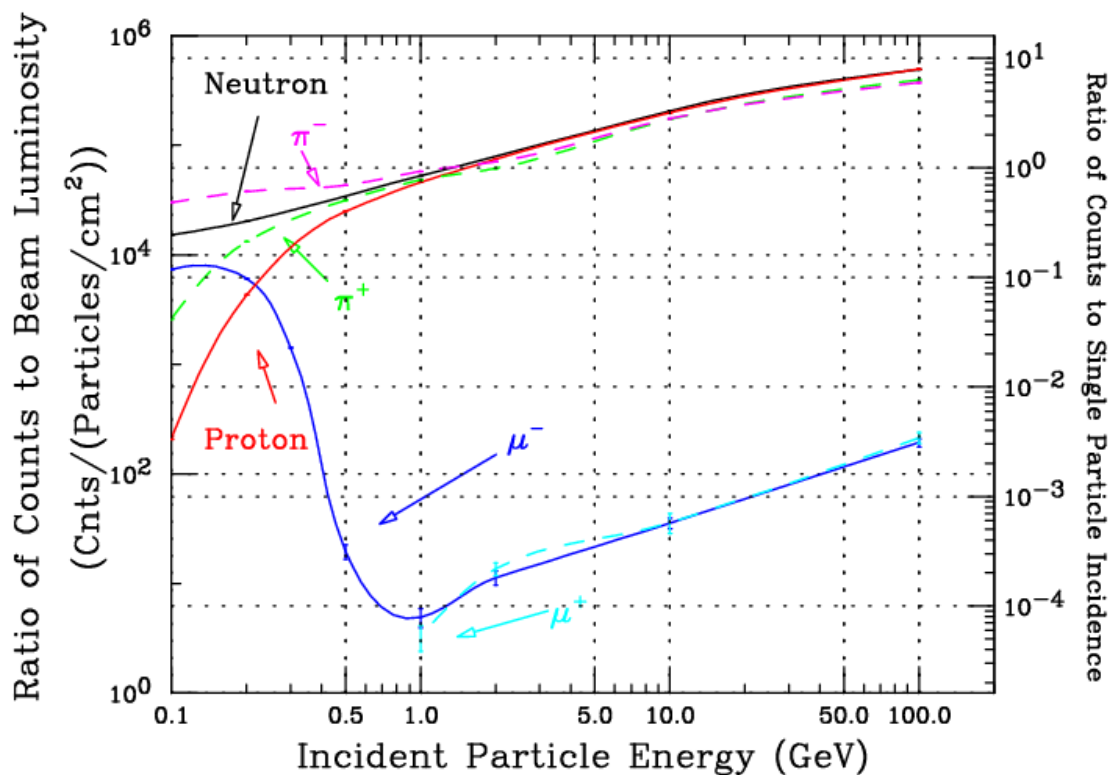
Η πρώτη εφαρμογή προσομοίωση που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αφορά την προσομοίωση του μετρητή νετρονίων που φέρει ο σταθμός κοσμικής ακτινοβολίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, δηλαδή του 6NM-64. Αφετηρία για την ανάπτυξη της εφαρμογής αποτέλεσε η πολύ σημαντική εργασία των Clem and Dorman (2000) οι οποίοι, όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, μελέτησαν την απόδοση του μετρητή νετρονίων με χρήση του λογισμικού Fluka. Στην εργασία αυτή, η απόδοση του μετρητή νετρονίων υπολογίστηκε στο σύνολό του, φωτίζοντας τον με μία παράλληλη δέσμη μονοενεργητικών σωματιδίων διαμέτρου 4 μέτρων (σχήμα 4.1) και καταγράφοντας μέσω της προσομοίωσης τον αριθμό των παλμών.



**Σχήμα 4.1:** Η μορφή της δέσμης που χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση των Clem and Dorman (2000). Η εικόνα προέρχεται από την παρουσίαση που έκανε ο John Clem στο Annual CRONUS Collaboration Meeting το 2004.



Αποτέλεσμα αυτής της προσομοίωσης, για την περίπτωση κάθετης δέσμης σωματιδίων, είναι το σχήμα 4.2. το οποίο θεωρείται αναφορά στο χώρο των μετρητών νετρονίων. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό, ο μετρητής νετρονίων παρουσιάζει πολύ υψηλή απόδοση στη καταμέτρηση της αδρονικής συνιστώσας της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Πάνω από ενέργεια 1 GeV η απόδοση ανίχνευσης των πρωτονίων και νετρονίων είναι ταυτόσημη ενώ των πιονίων είναι ελαφρώς μικρότερη. Η απόδοση ανίχνευσης των μιονίων είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη με εξαίρεση την περίπτωση των  $\mu^-$  σε πολύ χαμηλές ενέργειες.



**Σχήμα 4.2:** Απόδοση ανίχνευσης του 6NM-64 για διάφορους τύπους και ενέργειες σωματιδίων και για κάθετη δέσμη. Τα αποτελέσματα προέρχονται από την εργασία των Clem and Dorman (2000) ωστόσο, λόγω καλύτερης ποιότητας στην εμφάνιση, το παραπάνω διάγραμμα προέρχεται από την παρουσίαση που έκανε ο John Clem στο Annual CRONUS Collaboration Meeting το 2004.

Η ανάπτυξη της εφαρμογής που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας κινήθηκε σε τρεις άξονες. Ο πρώτος στόχος ήταν να αναπτυχθεί μια προσομοίωση με βάση το Geant4 το οποίο να αναπαράγει-επιβεβαιώσει τα

αποτελέσματα των Clem and Dorman (2000). Ο δεύτερος στόχος ήταν να επεκταθεί η προσομοίωση σε επιπλέον αποτελέσματα που έχουν να κάνουν τη χωρική και τη γωνιακή απόδοση ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων, περιπτώσεις που δεν παρουσιάστηκαν στην εργασία των Clem and Dorman (2000). Ο τρίτος στόχος ήταν η δημιουργία ενός αυτόνομου προγράμματος, μέσω του οποίου ο χρήστης θα μπορεί να παράγει αποτελέσματα που θα σχετίζονται με μια συγκεκριμένη επιλογή παραμέτρων. Τα κύρια βήματα της υλοποίησης και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της προσομοίωσης που αναπτύχθηκε δημοσιεύτηκαν στο Paschalis et al. (2013d).

#### 4.2.2. Σχεδιασμός - μοντελοποίηση

Η ανάπτυξη της προσομοίωσης του μετρητή νετρονίων 6NM-64 με το Geant4 χωρίζεται στα παρακάτω βήματα:

- Καθορισμός της γεωμετρίας του μετρητή νετρονίων
- Καθορισμός της αρχικής δέσμης σωματιδίων
- Καθορισμός των φυσικών αλληλεπιδράσεων που πραγματοποιούνται
- Αναγνώριση των καταμετρούμενων παλμών

Δεδομένου ότι ο μετρητής νετρονίων αποτελείται από πολλά επιμέρους τμήματα και από διάφορα υλικά κατασκευής, ο καθορισμός της γεωμετρίας του στο λογισμικό προσομοίωσης είναι μια πολύπλοκη μεν, ευθεία δε διαδικασία. Ευθεία διαδικασία αποτελεί και ο καθορισμός της δέσμης σωματιδίων που εισέρχεται στο μετρητή νετρονίων. Σε συνέχεια της εργασίας των Clem and Dorman (2000), η δέσμη σε κάθε περίπτωση αποτελείται από μονοενεργητικά σωματίδια του ίδιου τύπου με παράλληλες διευθύνσεις κίνησης. Ανάλογα με την περίπτωση που ελέγχεται, το εύρος της δέσμης καλύπτει όλη την επιφάνεια του μετρητή νετρονίων ή ένα μέρος του και εισέρχεται σε αυτόν είτε κάθετα είτε υπό συγκεκριμένη γωνία. Ωστόσο, ο καθορισμός των φυσικών διαδικασιών που πραγματοποιούνται μέσα στο μετρητή νετρονίων καθώς και η μέθοδος καθορισμού των παλμών που καταγράφονται δεν είναι μια τετριμμένη διαδικασία και αποτελεί αντικείμενο μελέτης για την προσομοίωση. Προκειμένου να καθοριστούν τα δύο αυτά βήματα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο τρόπος λειτουργίας του μετρητή νετρονίων

και η διαδικασία καταμέτρησης παλμών. Δεδομένου ότι ο τρόπος λειτουργίας έχει ήδη περιγραφεί αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά μόνο στα κυριότερα σημεία προκειμένου να γίνει κατανοητή η μοντελοποίηση πάνω στα οποία βασίζεται η ανάπτυξη της εφαρμογής προσομοίωσης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο μετρητής νετρονίων 6NM-64 αποτελείται από 6 αναλογικούς θαλάμους, παράλληλα τοποθετημένους μεταξύ τους, που φέρουν αέριο  $\text{BF}_3$  εμπλουτισμένο τουλάχιστον κατά 90% σε  $^{10}\text{B}$ . Κάθε θάλαμος περιβάλλεται από ένα λεπτό κυλινδρικό σωλήνα πολυαιθυλενίου, τον επιβραδυντή, το οποίο με τη σειρά του περιβάλλεται από ένα κυλινδρικό σωλήνα μολύβδου, τον παραγωγό. Το όλο σύστημα περιβάλλεται από ένα ορθογώνιο κουτί πολυαιθυλενίου, τον ανακλαστήρα. Ο ανακλαστήρας αποτρέπει τα χαμηλής ενέργειας νετρόνια που εκπέμπονται από τον περιβάλλοντα χώρο να εισέλθουν στο μετρητή νετρονίων. Τα δευτερογενή σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας που διαπερνούν τον ανακλαστήρα, μέσω της αλληλεπίδρασης τους με τον παραγωγό, οδηγούν στην παραγωγή δευτερογενών νετρονίων. Τα δευτερογενή νετρόνια χάνουν ενέργεια κατά το πέρασμά τους μέσα από τον επιβραδυντή, ανακλώνται εσωτερικά από τον ανακλαστήρα και επίσης αλληλεπιδρούν εκ νέου με τον παραγωγό με αποτέλεσμα να παράγονται επιπλέον νετρόνια. Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η παραγωγή, εντός του μετρητή νετρονίων, ενός μεγάλου πλήθους δευτερογενών νετρονίων τα οποία επιβραδύνονται σταδιακά. Τα νετρόνια που φθάνουν σε θερμικές ενέργειες εμφανίζουν μεγάλη πιθανότητα σύλληψής τους από το  $^{10}\text{B}$  που φέρει ο απαριθμητής. Η αντίδραση που πραγματοποιείται είναι η  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  όπου, ανάλογα με το αν το  $^7\text{Li}$  είναι σε διεγερμένη κατάσταση ή όχι, το σωματίδιο  $\alpha$  αποκτά κινητική ενέργεια 1.47 MeV (93.7% πιθανότητα) ή 1.78 MeV (6.3% πιθανότητα). Το σωματίδιο  $\alpha$  και το  $^7\text{Li}$  κινείται προς την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα ιονίζοντας το αέριο του θαλάμου και η καταμέτρηση γίνεται με βάση την αρχή λειτουργίας των αναλογικών απαριθμητών.

Λαμβάνοντας υπόψη την ανωτέρω περιγραφή προκύπτει ότι το αποτέλεσμα της προσομοίωσης εξαρτάται σημαντικά από τρεις διαδικασίες, οι οποίες σχετίζονται με συγκεκριμένες αλληλεπιδράσεις:

- από τη διαδικασία παραγωγής δευτερογενών νετρονίων στον παραγωγό που σχετίζεται με την ανελαστική σκέδαση των σωματιδίων από τους πυρήνες μολύβδου. Στη διαδικασία αυτή πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι φωτοπυρηνικές αλληλεπιδράσεις των μιονίων και των φωτονίων με τους πυρήνες μολύβδου. Στη πρώτη περίπτωση, ένα μόνιο ανταλλάσει ηλεκτρομαγνητικά με τον πυρήνα ένα φωτόνιο, το οποίο σε υψηλές ενέργειες αλληλεπιδρά αδρονικά με τον πυρήνα. Στη δεύτερη περίπτωση, ένα υψηλής ενέργειας φωτόνιο αλληλεπιδρά απευθείας αδρονικά με τον πυρήνα. Δεδομένου ότι μόνια και υψηλής ενέργειας φωτόνια δεν παράγονται μέσα στο μετρητή νετρονίων αλλά εισέρχονται σε αυτόν ως προϊόντα της δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας, οι φωτοπυρηνικές αλληλεπιδράσεις είναι σημαντικές μόνο για την εκκίνηση της διαδικασίας παραγωγής δευτερογενών νετρονίων και όχι για την αύξηση του αριθμού των νετρονίων.
- από τη διαδικασία επιβράδυνσης των δευτερογενών νετρονίων σε θερμικές ενέργειες που σχετίζεται με την ελαστική σκέδαση κατά τη διέλευσή τους μέσα από τον επιβραδυντή ή την ανάκλασή τους από τον ανακλαστήρα. Η ελαστική σκέδαση παρατηρείται και στον παραγωγό, σε χαμηλότερο βαθμό ωστόσο λόγω του μεγάλου ατομικού αριθμού του μολύβδου που ευνοεί την ανελαστική σκέδαση.
- από τη απορρόφηση των δευτερογενών νετρονίων που έχουν επιβραδυνθεί σε θερμικές ενέργειες από το  $^{10}\text{B}$ .

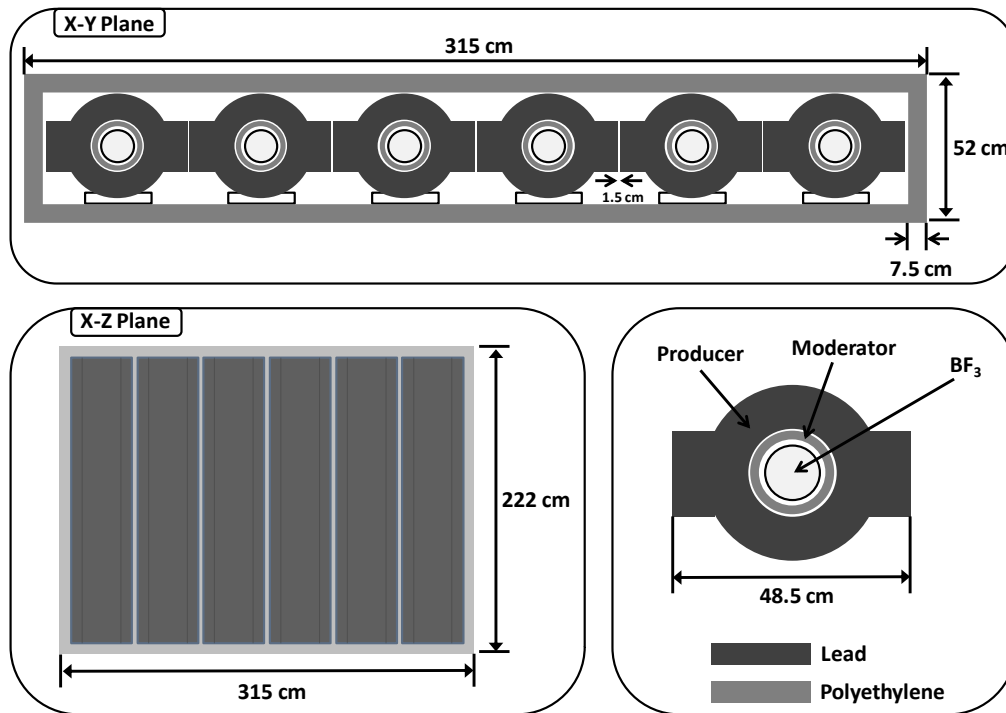
Πέρα από τις παραπάνω αλληλεπιδράσεις που σχετίζονται με τη διαδικασία παραγωγής και ανίχνευσης των δευτερογενών νετρονίων, άλλες αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στο μετρητή νετρονίων είναι ο ιονισμός της ύλης και η ακτινοβολία πέδησης από την κίνηση φορτισμένων σωματιδίων μέσα στην ύλη, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, η δίδυμη γέννηση και η σκέδαση Compton για τα φωτόνια, η εξαΰλωση για τα ποζιτρόνια και η διάσπαση των ασταθών σωματιδίων. Ωστόσο, οι αλληλεπιδράσεις αυτές δεν επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία παραγωγής - επιβράδυνσης - απορρόφησης των δευτερογενών νετρονίων.

Όσον αφορά τον προσδιορισμό των παλμών που μετρά ο μετρητής νετρονίων, σαν αφετηρία μπορεί να θεωρηθεί το γεγονός ότι η διαδικασία καταμέτρησης ενός παλμού ξεκινά με την απορρόφηση ενός νετρονίου από το  $^{10}\text{B}$  του θαλάμου με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός ζεύγους  $^7\text{Li}$  - σωματιδίου  $\alpha$ . Το σωματίδιο  $\alpha$  έχει κινητική ενέργεια είτε 1.47 MeV είτε 1.78 MeV, επομένως η εμφάνιση ενός σωματιδίου  $\alpha$  με μία από τις δύο αυτές ενέργειες μέσα στο χώρο του αναλογικού απαριθμητή θεωρείται από την προσομοίωση ότι ξεκινά και τη διαδικασία καταμέτρησης ενός παλμού. Ωστόσο είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι όλες οι περιπτώσεις απορρόφησης ενός νετρονίου από το  $^{10}\text{B}$  του θαλάμου δεν οδηγούν πάντα σε μέτρηση παλμού. Ο λόγος είναι ότι μετά από τη μέτρηση ενός παλμού χρειάζεται κάποιος χρόνος για να επανέλθει η τάση λειτουργίας του αναλογικού απαριθμητή καθώς και για να επανέλθει το αέριο στις συνθήκες λειτουργίας του. Επιπλέον ακόμη και αν ο απαριθμητής έχει επανέλθει, τα ηλεκτρονικά που κάνουν την καταμέτρηση εισάγουν σημαντικό νεκρό χρόνο. Ως αποτέλεσμα, απορροφήσεις νετρονίων από το  $^{10}\text{B}$  που συμβαίνουν κοντά χρονικά με κάποια άλλη δεν οδηγούν σε μέτρηση παλμού. Τυπικός χρόνος επαναφοράς του αναλογικού απαριθμητή είναι περίπου 5  $\mu\text{s}$  ενώ τα ηλεκτρονικά του 6NM-64 εισάγουν ένα νεκρό χρόνο της τάξης των 20  $\mu\text{s}$ . Στην προσομοίωση που αναπτύχθηκε, γίνεται έλεγχος του χρόνου που λαμβάνουν χώρα οι απορροφήσεις των δευτερογενών νετρονίων από το  $^{10}\text{B}$  προκειμένου να υπολογιστεί ο αριθμός των παλμών, λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο επαναφοράς του θαλάμου και το νεκρό χρόνο των ηλεκτρονικών. Προκειμένου να μην υπάρξει συσχέτιση μεταξύ παλμών που προέρχονται από διαφορετικά εισερχόμενα σωματίδια, κάθε σωματίδιο που εισέρχεται στο μετρητή νετρονίων θεωρείται ανεξάρτητο από τα υπόλοιπα.

#### 4.2.3. Υλοποίηση

Ο καθορισμός της γεωμετρίας του 6NM-64 γίνεται με τον ορισμό κλάσης η οποία κληρονομεί τα χαρακτηριστικά της κλάσης G4VUserDetectorConstruction. Τα χαρακτηριστικά του μετρητή νετρονίων και τα υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένος έχουν αποδοθεί με μεγάλη λεπτομέρεια σύμφωνα με την περιγραφή

του Carmichael (1964). Η αναλυτική παρουσίαση του 6NM-64 έχει γίνει στο κεφάλαιο 1. Μια γραφική αναπαράσταση δίνεται στο σχήμα 4.3.

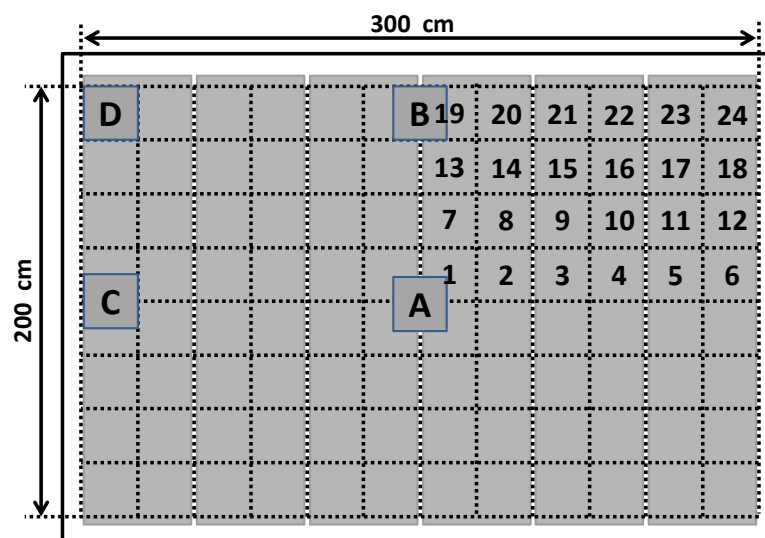


**Σχήμα 4.3:** Γεωμετρία του 6NM-64 όπως ορίστηκε στην εφαρμογή προσομοίωσης.

Οι κλάσεις που χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση των επιμέρους τμημάτων είναι οι G4Box και G4Tubs που αντιστοιχούν σε ορθογώνιο και κύλινδρο. Για την περίπτωση του πολύπλοκου σχήματος του παραγωγού, γίνεται ένωση ενός κυλίνδρου με δύο ορθογώνια με χρήση της κλάσης G4UnionSolid. Όσον αφορά τα υλικά που χρησιμοποιούνται, γίνεται όπου είναι δυνατό χρήση της βάσης υλικών του Geant4. Έτσι ο ανακλαστήρας και ο επιβραδυντής είναι κατασκευασμένα από G4\_POLYETHYLENE (πολυαιθυλένιο), ο παραγωγός από G4\_Pb (μόλυβδος), το τοίχωμα των απαριθμητών από G4\_STAINLESS-STEEL (ανοξείδωτο ατσάλι), τα υποστηρικτικά κανάλια πάνω στα οποία τοποθετούνται οι απαριθμητές από G4\_Al (αλουμίνιο) ενώ ο χώρος μέσα στον μετρητή νετρονίων είναι γεμάτος από G4\_AIR (μίγμα που αναπαριστά τον αέρα). Όσον αφορά το αέριο  $\text{BF}_3$  που περιέχεται στους απαριθμητές, δεδομένου ότι το B είναι εμπλουτισμένο

σε  $^{10}\text{B}$ , έχει γίνει ο ορισμός του από τα βασικά στοιχεία προκειμένου το ποσοστό του  $^{10}\text{B}$  να είναι 96% στο σύνολο του Βορίου. Τέλος ο χώρος του World Volume εκτός του μετρητή νετρονίων είναι γεμάτος με αέριο που αναπαριστά το κενό ώστε να αποτρέπονται αλληλεπιδράσεις σωματιδίων που θα μπορούσαν να αλλοιώσουν το αποτέλεσμα. Ο μετρητής νετρονίων είναι τοποθετημένος στο επίπεδο X-Z με τους αριθμητές παράλληλους στον άξονα Z, ενώ μπορεί να περιστρέφεται στο χώρο με τον καθορισμό συγκεκριμένων γωνιών.

Ο καθορισμός της δέσμης των σωματιδίων γίνεται με τον ορισμό κλάσης η οποία κληρονομεί τα χαρακτηριστικά της κλάσης G4VUserPrimaryGeneratorAction. Η δέσμη αποτελείται πάντα από μονοενεργητικά σωματίδια του ίδιου τύπου τα οποία κινούνται παράλληλα με τον άξονα Y και τα οποία προσκρούουν σε όλη ή σε μέρος της επιφάνειας του μετρητή νετρονίων. Συγκεκριμένα υποστηρίζεται η δημιουργία δυο ειδών δέσμης. Ο πρώτος τύπος δέσμης αποσκοπεί στον υπολογισμό της απόδοσης του μετρητή νετρονίων στο σύνολό του και για αυτό καλύπτει όλη την επιφάνεια του. Ο δεύτερος τύπος δέσμης αποσκοπεί στον υπολογισμό της απόδοσης ενός μέρους του μετρητή νετρονίων, έχει διάσταση 25x25 cm και προσκρούει κάθετα σε κάποια από τις επιφάνειες 1 - 24 ή A-B-C-D όπως απεικονίζονται στο σχήμα 4.4.



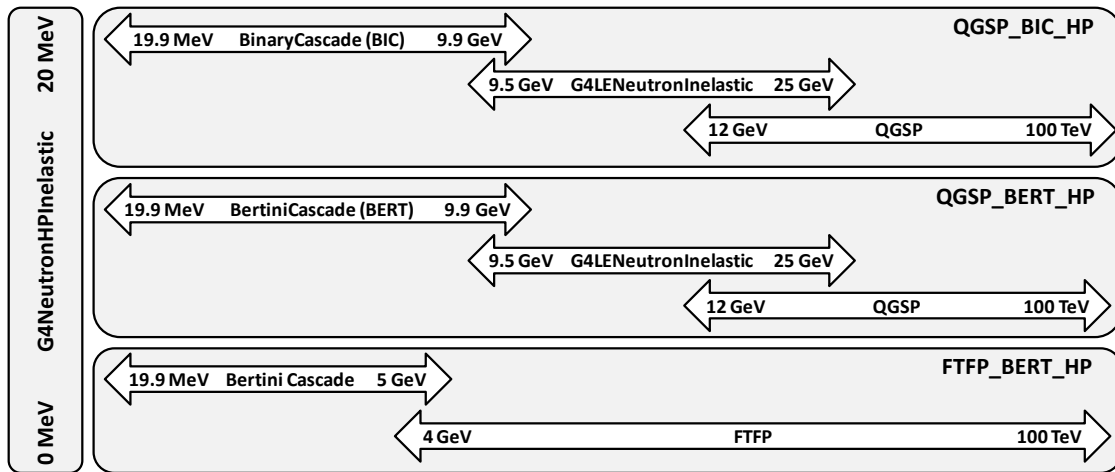
**Σχήμα 4.4:** Διαμέριση του 6NM-64 και επιφάνειες που προσκρούει κάθετα η δέσμη.

Οι θέσεις των σωματιδίων κάθε τύπου δέσμης σχηματίζουν τετράγωνο πλέγμα. Η παραγωγή της δέσμης του πρώτου τύπου απαιτεί τον καθορισμό του είδους και της ενέργειας των σωματιδίων καθώς και της ακμής του πλέγματος. Η ακμή του πλέγματος για τη δέσμη του δεύτερου τύπου δέσμης είναι σταθερή και ίση με 1 cm.

Όσον αφορά τον καθορισμό των φυσικών αλληλεπιδράσεων, αφετηρία αποτελούν οι reference physics lists που περιλαμβάνει το Geant4. Από τις φυσικές διαδικασίες που πραγματοποιούνται εντός του μετρητή νετρονίων, η ανάκλαση και η επιβράδυνση των νετρονίων στον ανακλαστήρα και στον επιβραδυντή καθώς και η απορρόφησή τους από το  $^{10}\text{B}$  πραγματοποιούνται σε χαμηλές ενέργειες. Για το λόγο αυτό ενδείκνυται η χρήση του μοντέλου NeutronHP το οποίο κάνει χρήση υψηλής ακρίβειας δεδομένων για τις ενεργές διατομές των αλληλεπιδράσεων των νετρονίων σε ενέργειες μέχρι 20 MeV. Για ακόμη καλύτερη ακρίβεια, ενδείκνυται η προσθήκη της θερμικής σκέδασης των νετρονίων από το πολυαιθυλένιο, η οποία αφορά τα νετρόνια με ενέργεια μέχρι τα 4 eV. Σε αυτές τις ενέργειες νετρονίων, η κίνηση των ατόμων του πολυαιθυλενίου επηρεάζει τη γωνιακή κατανομή των ελαστικά σκεδαζόμενων νετρονίων. Τόσο το μοντέλο NeutronHP όσο και η θερμική σκέδαση των νετρονίων κάνει χρήση των αρχείων δεδομένων G4NDL. Σε αντίθεση με τις ανωτέρω διαδικασίες που πραγματοποιούνται σε χαμηλές ενέργειες, η ανελαστική σκέδαση των σωματιδίων στον παραγωγό, η οποία εκκινεί τη διαδικασία παραγωγής δευτερογενών νετρονίων, μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιαδήποτε ενέργεια που ξεκινάει από πολύ υψηλές ενέργειες αν αναφερθούμε στα σωματίδια που εισέρχονται στο μετρητή νετρονίων έως χαμηλές αν αναφερθούμε στα δευτερογενή σωματίδια που παράγονται μέσα στον ίδιο τον μετρητή. Το Geant4 παρέχει πολλά μοντέλα για την ανελαστική σκέδαση με ποιο γνωστά τα QGSP (Quark-Gluon String Precompound) και FTFP (FRITIOF Precompound) για υψηλές ενέργειες όπως επίσης τα LEP, Bertini Cascades και Binary Cascades για μεσαίες και χαμηλές ενέργειες. Ο συνδυασμός των μοντέλων αυτών ώστε να καλύπτουν όλο το ενεργειακό φάσμα είναι μία διαδικασία που απαιτεί πολλές δοκιμές και έλεγχο με πειραματικά δεδομένα. Παρόλα αυτά υπάρχουν reference physics lists που περιλαμβάνουν συνδυασμούς των μοντέλων με βάση την εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τα πειράματα που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν. Οι τρεις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες physics lists είναι οι QGSP\_BIC\_HP, QGSP\_BERT\_HP και



FTFP\_BERT\_HP στις οποίες τα μοντέλα της ανελαστικής σκέδασης προσαρμόζονται σύμφωνα με το σχήμα 4.5.



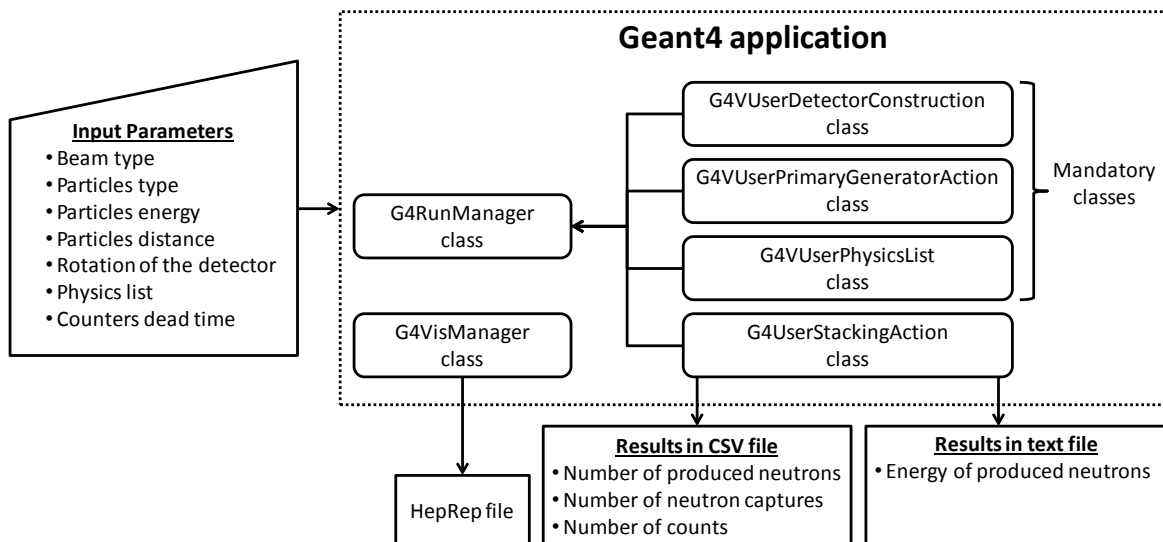
**Σχήμα 4.5:** Συνδυασμός μοντέλων ανελαστικής σκέδασης του Geant4.

Οι παραπάνω physics lists χρησιμοποιούν το μοντέλο NeutronHP για τα χαμηλής ενέργειας νετρόνια και επιπλέον περιλαμβάνουν όλες τις αλληλεπιδράσεις που πραγματοποιούνται στο μετρητή νετρονίων όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 4.2.2. Εξαιρέση αποτελεί η φωτοπυρηνική αλληλεπίδραση των μιονίων η οποία μαζί με τη θερμική σκέδαση των νετρονίων από το πολυαιθυλένιο προστέθηκαν στις συγκεκριμένες physics lists για την ανάγκη της συγκεκριμένης προσομοίωσης.

Ο προσδιορισμός των παλμών που μετρά ο μετρητής νετρονίων πραγματοποιείται με τον ορισμό κλάσης η οποία κληρονομεί τα χαρακτηριστικά της G4UserStackingAction. Η κλάση καλείται από τη G4RunManager κάθε φορά που ένα καινούριο σωματίδιο δημιουργείται στο χώρο της προσομοίωσης. Προκειμένου να προσδιοριστεί ο αριθμός των παλμών που μετρά κάθε αναλογικός απαριθμητής, γίνεται καταγραφή του πραγματικού χρόνου κατά τον οποίο κάνουν την εμφάνισή τους σωματίδια α με ενέργεια 1.47 MeV ή 1.78 MeV μέσα στον απαριθμητή. Με την ολοκλήρωση της καταγραφής των σωματιδίων α που αντιστοιχούν σε ένα εισερχόμενο σωματίδιο, γίνεται υπολογισμός των μετρούμενων παλμών λαμβάνοντας υπόψη τους χρόνους που έγιναν οι εμφανίσεις των σωματιδίων α και τον νεκρό χρόνο μεταξύ των παλμών. Μετά την προσομοίωση όλων των εισερχόμενων σωματιδίων, τα αποτελέσματα

από τους υπολογισμούς καταγράφονται σε αρχείο .csv. Τέλος, δεύτερη λειτουργία της κλάσης είναι η καταγραφή του αριθμού και της ενέργειας των νετρονίων που παράγονται μέσα στο μετρητή νετρονίων. Σε αυτή τη περίπτωση τα αποτελέσματα καταγράφονται σε αρχείο text προκειμένου ο χρήστης να τα επεξεργαστεί περαιτέρω.

Η εφαρμογή ελέγχεται από τη main μέθοδο, η οποία δημιουργεί τα ανωτέρω αντικείμενα και δηλώνει τις διευθύνσεις μνήμης τους στο αντικείμενο G4RunManager. Η δημιουργία των αντικειμένων απαιτεί τον καθορισμό παραμέτρων από το χρήστη. Συγκεκριμένα, ο καθορισμός της γεωμετρίας απαιτεί τον καθορισμό γωνιών σύμφωνα με τις οποίες γίνεται περιστροφή του μετρητή νετρονίων στο χώρο. Για τον καθορισμό της δέσμης απαιτείται το είδος και την ενεργεία των σωματιδίων, η απόσταση ανάμεσα στα σωματίδια και το αν η δέσμη θα προσκρούει σε όλο ή σε ένα μέρος του μετρητή νετρονίων. Ο καθορισμός των φυσικών διεργασιών απαιτεί το όνομα της physics list που θα χρησιμοποιηθεί ενώ η καταμέτρηση των παλμών απαιτεί τον καθορισμό του νεκρού χρόνου. Επιπλέον η main μέθοδος δίνει τη δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης του χώρου της προσομοίωσης μέσω της κλάσης G4VisManager, με δημιουργία .hepRep αρχείου. Η δομή της εφαρμογής δίνεται στο σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6: Δομή της εφαρμογής προσομοίωσης.

#### 4.2.4. Είσοδος, έξοδος και χρονική απόδοση του προγράμματος

Δεδομένου ότι για την εκτέλεση της εφαρμογής δεν απαιτείται πολύ μεγάλος αριθμός δεδομένων εισόδου, οι απαραίτητες παράμετροι εισάγονται από το χρήστη κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Η εφαρμογή υποστηρίζει τρεις λειτουργίες, οι οποίες φέρουν τις ονομασίες TOTAL - SPATIAL - GEOMETRY. Η λειτουργία TOTAL αποσκοπεί στο να μελετηθεί η απόδοση ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων σαν σύνολο. Σε αυτή τη λειτουργία η δέσμη καλύπτει την επιφάνεια όλου του μετρητή νετρονίων και εκκινεί είτε από ένα ύψος 2m πάνω το κέντρο του είτε από ένα ύψος 1 cm πάνω από την επιφάνειά του. Στην πρώτη περίπτωση δέσμης (2m), ο μετρητής μπορεί να περιστρέφεται στο χώρο με τον ορισμό δύο γωνιών οι οποίες αναπαριστούν την ζενιθιακή και την αζιμουθιακή γωνιά της δέσμης. Το μηδενικό αζιμούθιο έχει καθοριστεί να έχει διεύθυνση κάθετη στους αναλογικούς απαριθμητές. Με τη λειτουργία αυτή είναι δυνατό να μελετηθεί η εξάρτηση της απόδοσης ανίχνευσης από την γωνία που η δέσμη προσπίπτει στο μετρητή νετρονίων. Στη δεύτερη περίπτωση δέσμης (1cm), ο μετρητής νετρονίων δεν περιστρέφεται. Η λειτουργία αυτή αποσκοπεί στη δυνατότητα υπολογισμού της απόδοσης ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων για δέσμες που περιέχουν ασταθή σωματίδια (πχ μόνια) χαμηλής ενέργειας. Σε αυτή τη περίπτωση δεν ενδείκνυται η χρήση δέσμης που εκκινεί από τα 2m διότι στην απόσταση που έχουν να διανύσουν τα ασταθή σωματίδια μέχρι το μετρητή νετρονίων πολλά από αυτά διασπώνται. Η λειτουργία SPATIAL αποσκοπεί στο να μελετηθεί η απόδοση ανίχνευσης των διαφόρων τμημάτων του μετρητή νετρονίων, όπως ορίστηκαν στο σχήμα 4.4. Σε αυτή τη λειτουργία ο μετρητής νετρονίων δεν περιστρέφεται και η δέσμη εκκινεί 1 cm πάνω από αυτόν, προσκρούοντας κάθετα είτε σε κάποια από τις περιοχές 1-24, είτε σε κάποια από τις περιοχές A-B-C-D. Τέλος, η λειτουργία GEOMETRY έχει βοηθητικό ρόλο και αποσκοπεί στη γραφική αναπαράσταση του χώρου της προσομοίωσης. Η δέσμη αποτελείται από ένα σωματίδιο που εκκινεί 2 m πάνω από το κέντρο το μετρητή νετρονίων ο οποίος μπορεί να περιστρέφεται με τον ίδιο τρόπο όπως στη λειτουργία TOTAL.

Προκειμένου να εκτελεστεί η εφαρμογή πρέπει επιπλέον να οριστεί η physics list που θα χρησιμοποιηθεί και ανάλογα με την λειτουργία που επιλέγεται ο χρόνος επαναφοράς των αναλογικών απαριθμητών, ο νεκρός χρόνος των ηλεκτρονικών και η

απόσταση ανάμεσα στα σωματίδια της δέσμης. Επιπλέον υπάρχει επιλογή αν θα γίνει καταγραφή των ενεργειών των δευτερογενών νετρονίων. Επισημαίνεται ότι η καταγραφή των ενεργειών συνεπάγεται τη δημιουργία ενός text file με πολύ μεγάλο μέγεθος. Τα χαρακτηριστικά κάθε λειτουργίας με τις παραμέτρους που πρέπει να οριστούν από το χρήστη παρατίθενται στο πίνακα 4.1.

Modes	Brief Desc.	Parameters
<b>TOTAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>the beam illuminates the whole NM</li> <li>two types of beam</li> <li>NM rotation when the beam originates 2m above the NM centre (not suggested for low energy particles)</li> <li>no NM rotation when the beam originates 1cm above the NM surface (suggested for low energy particles)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Particle Name</li> <li>Particle Energy (GeV)</li> <li>Beam type (2m / 1 cm)</li> <li>Distance between particles (cm)</li> <li>NM zenith angle (deg)</li> <li>NM azimuth angle (deg)</li> <li>NM counter resolving time (<math>\mu</math>s)</li> <li>NM electronics dead time (<math>\mu</math>s)</li> <li>Physics list</li> <li>Secondary neutrons spectrum (YES/NO)</li> </ul>
<b>SPATIAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>the beam illuminates one region of the NM</li> <li>beam originates 1cm from the NM surface</li> <li>no NM rotation</li> <li>suggested for both low and high energy particles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Particle Name</li> <li>Particle Energy (GeV)</li> <li>NM region (1 to 24 or A to D)</li> <li>NM counter resolving time (<math>\mu</math>s)</li> <li>NM electronics dead time (<math>\mu</math>s)</li> <li>Physics list</li> <li>Secondary neutrons spectrum (YES/NO)</li> </ul>
<b>GEOMETRY</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>one particle originates 2m from the NM centre</li> <li>NM rotation</li> <li>for visualization only</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Particle Name</li> <li>Particle Energy (GeV)</li> <li>NM zenith angle (deg)</li> <li>NM azimuth angle (deg)</li> <li>Physics list</li> </ul>

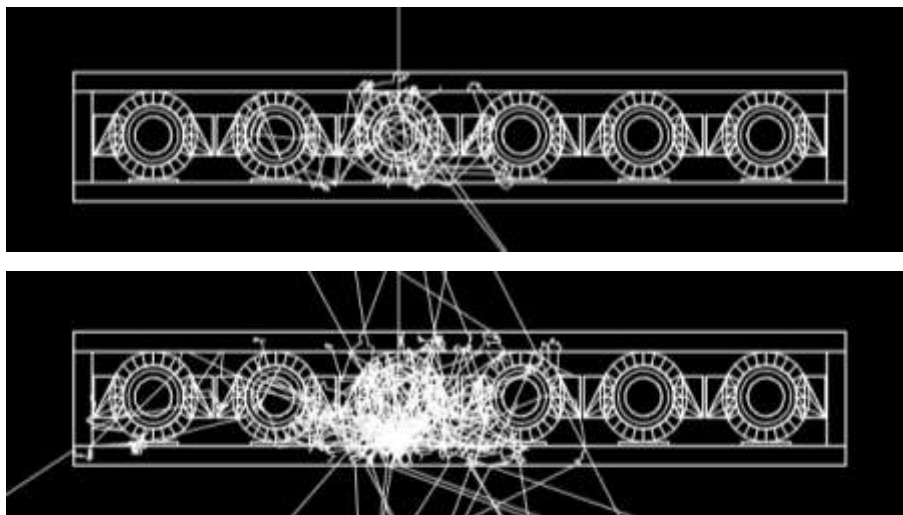
**Πίνακας 4.1:** Παράμετροι εισόδου του προγράμματος προσομοίωσης για τον 6NM-64.

Κατά την εκτέλεση του προγράμματος εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή πληροφορίες σχετικά με την αρχικοποίηση των αντικειμένων του Geant4. Στη συνέχεια η εφαρμογή ενημερώνει για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης κάθε σωματιδίου της δέσμης, για το χρόνο που απαιτήθηκε καθώς και για τον εκτιμώμενο χρόνο που απομένει. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης του συνόλου των σωματιδίων της δέσμης, γίνεται προσθήκη μια εγγραφής στο αρχείο results.csv, η οποία περιλαμβάνει τις εξής πληροφορίες:

- Το σύνολο των παραμέτρων με τις οποίες πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση.
- Ο αριθμός των δευτερογενών νετρονίων που δημιουργήθηκαν στο μετρητή νετρονίων.
- Ο αριθμός των νετρονίων που απορροφήθηκαν από το  $^{10}\text{B}$  σε κάθε αναλογικό απαριθμητή.
- Ο αριθμός των παλμών που καταγράφηκαν από κάθε απαριθμητή λαμβάνοντας υπόψη το χρόνο επαναφοράς και το νεκρό χρόνο.

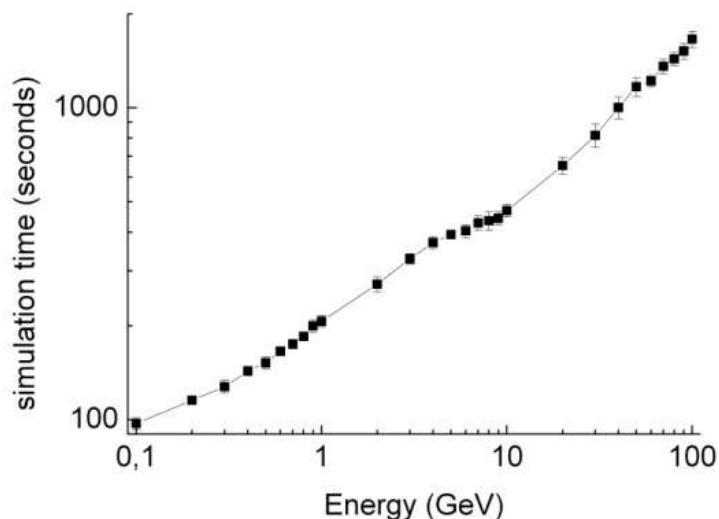
Στην περίπτωση που έχει επιλεγεί η καταγραφή των ενεργειών των δευτερογενών νετρονίων, δημιουργείται αρχείο .txt το οποίο συμπληρώνεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Η χρονική απόδοση της προσομοίωσης ποικίλει ξεκινώντας από λίγα δευτερόλεπτα για δέσμες χαμηλής και μέσης ενέργειας έως αρκετά λεπτά για δέσμες σωματιδίων υψηλών ενεργειών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε υψηλές ενέργειες ο αριθμός των δευτερογενών νετρονίων που παράγονται αυξάνεται κατά πολλές τάξεις μεγέθους. Χαρακτηριστική εικόνα αυτής της αύξησης είναι το σχήμα 4.7 στο οποίο αποδίδεται, μέσω της λειτουργία GEOMETRY της εφαρμογής, η παραγωγή των δευτερογενών νετρονίων για ένα εισερχόμενο νετρόνιο με ενέργειες 1 GeV (πάνω) και 100 GeV (κάτω).



**Σχήμα 4.7:** Απεικόνιση προσομοίωσης για ένα εισερχόμενο νετρόνιο ενέργειας 1 GeV (πάνω) και 100 GeV (κάτω). Διακρίνονται οι ανακλάσεις των νετρονίων στον ανακλαστήρα.

Επιβαρυντική στη χρονική απόδοση της προσομοίωσης είναι η χρήση physics list που περιλαμβάνει το μοντέλο NeutronHP καθώς και την θερμική σκέδαση των νετρονίων. Ωστόσο, η χρήση αυτών των physics lists είναι επιβεβλημένη για τη ακρίβεια των αποτελεσμάτων, όπως περιγράφηκε στη παράγραφο 4.2.3. Ενδεικτικό σχήμα του χρόνου που απαιτείται για την εκτέλεση της εφαρμογής σε έναν μέσης απόδοσης υπολογιστή, όταν χρησιμοποιείται η physics list QGSP\_BIC\_HP με την προσθήκη της θερμικής σκέδασης, είναι το 4.8. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ο απαιτούμενος χρόνος ολοκλήρωσης της προσομοίωσης για κάθετη δέσμη νετρονίων που καλύπτει όλη την επιφάνεια του μετρητή νετρονίων. Τα σωματίδια της δέσμης έχουν απόσταση μεταξύ τους 10cm, επομένως 700 περίπου νετρόνια εισέρχονται στο μετρητή νετρονίων. Όπως προκύπτει, η μετάβαση από ενέργεια 0.1 GeV σε 100 GeV συνεπάγεται την αύξηση του χρόνου προσομοίωσης κατά 2 σχεδόν τάξεις μεγέθους.



**Σχήμα 4.8:** Απαιτούμενος χρόνος ολοκλήρωσης της εφαρμογής για κάθετη δέσμη νετρονίων που καλύπτει όλη την επιφάνεια του μετρητή νετρονίων (περίπου 700 εισερχόμενα νετρόνια).

#### 4.2.5. Επιλογή παραμέτρων και physics list

Όπως προκύπτει από τον πίνακα 4.1., οι παράμετροι που απαιτείται να οριστούν από τον χρήστη για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης δεν είναι πολλές σε πλήθος. Από αυτές, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί:

- στο νεκρό χρόνο των ηλεκτρονικών
- στην απόσταση ανάμεσα στα σωματίδια της δέσμης για τη λειτουργία TOTAL
- στην επιλογή της physics list

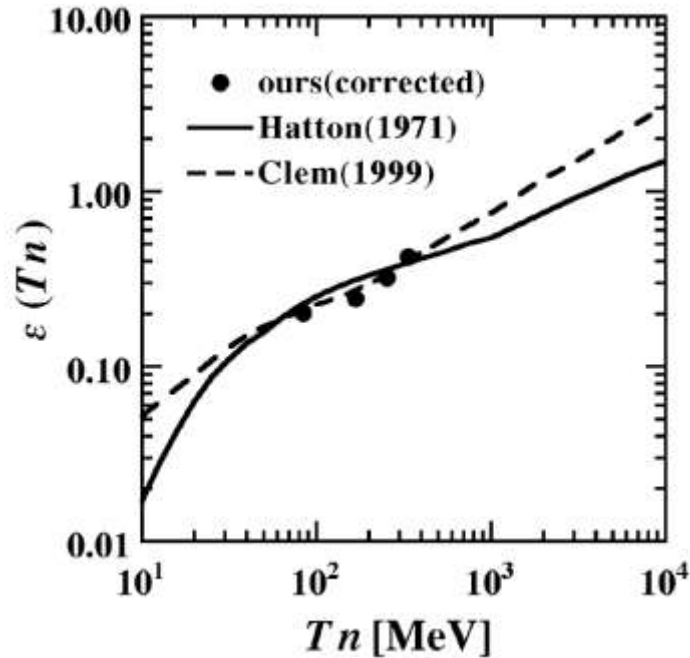
Όπως ήδη αναφέρθηκε, τυπικός χρόνος για την επαναφορά του θαλάμου του μετρητή νετρονίων είναι 5μs. Ο νεκρός χρόνος των ηλεκτρονικών όμως εξαρτάται από τις ηλεκτρονικές μονάδες που χρησιμοποιούνται. Τα ηλεκτρονικά που συνοδεύουν τον 6NM-64 εκ κατασκευής έχουν νεκρό χρόνο 20 μs, ωστόσο αυτός ο χρόνος δεν μπορεί να θεωρηθεί τυπικός. Πολλοί σταθμοί που χρησιμοποιούν τον συγκεκριμένο τύπο μετρητή νετρονίων έχουν αντικαταστήσει λόγω παλαιότητας τα ηλεκτρονικά με νέες μονάδες που εισάγουν πολύ μικρότερο νεκρό χρόνο. Επιπλέον υπάρχουν σταθμοί που εσκεμμένα εισάγουν μεγάλο νεκρό χρόνο (της τάξης των ms) προκειμένου να αυξήσουν την ευαισθησία σε εισερχόμενα σωματίδια χαμηλής ενεργείας.

Όσον αφορά την απόσταση ανάμεσα στα σωματίδια της δέσμης, αυτή επηρεάζει τον αριθμό των σωματιδίων που εισέρχονται στο μετρητή νετρονίων και ως εκ τούτου τη στατιστική ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Δεδομένου ότι η κάθετη επιφάνεια του μετρητή νετρονίων έχει εμβαδό περίπου  $7\text{m}^2$ , μία δέσμη όπου οι τροχιές των σωματιδίων σχηματίζουν ορθογώνιο πλέγμα με ακμή  $1\text{cm}$  αντιστοιχεί σε 70000 εισερχόμενα σωματίδια στο μετρητή νετρονίων. Ο αριθμός αυτός μειώνεται κατά πολλές τάξεις μεγέθους ότι αυξάνεται η απόσταση ανάμεσα στα σωματίδια. Στη περίπτωση ακμής  $5\text{cm}$  τα σωματίδια που εισέρχονται στο μετρητή νετρονίων είναι 2800 ενώ για ακμή  $10\text{cm}$  ο αριθμός πέφτει στα 700. Η ενδεδειγμένη επιλογή της τιμής εξαρτάται από την ενέργεια των σωματιδίων της δέσμης. Όταν η ενέργεια των σωματιδίων είναι μικρή τότε ο αριθμός των μετρούμενων παλμών είναι μικρός και προκειμένου να υπάρχει καλή στατιστική ακρίβεια του αποτελέσματος, ο αριθμός των σωματιδίων που εισέρχονται στο μετρητή νετρονίων πρέπει να είναι μεγάλος. Στη περίπτωση όμως που η ενέργεια της δέσμης είναι μεγάλη, ο χρόνος της προσομοίωσης αυξάνεται πολλές τάξεις μεγέθους, όπως προκύπτει από το σχήμα 4.8. Ωστόσο, λόγω του ότι ο αριθμός των μετρούμενων παλμών αυξάνεται και αυτός, η απαιτούμενη στατιστική ακρίβεια μπορεί να επιτευχθεί με μικρότερο αριθμό εισερχόμενων σωματιδίων. Επομένως ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μεγαλύτερη απόσταση ανάμεσα στα σωματίδια της δέσμης, μειώνοντας έτσι τον χρόνο της προσομοίωσης.

Πολύ σημαντική για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων κρίνεται η επιλογή της physics list που θα χρησιμοποιηθεί. Η εφαρμογή δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει οποιαδήποτε physics list παρέχει το Geant4. Ωστόσο η εφαρμογή παρέχει τρεις physics lists, τις QGSP\_BIC\_HP\_TS, QGSP\_BERT\_HP\_TS και FTFP\_BERT\_HP\_TS που αναπτύχθηκαν για τις ανάγκες της προσομοίωσης και οι οποίες προέρχονται από τις QGSP\_BIC\_HP, QGSP\_BERT\_HP και FTFP\_BERT\_HP με την προσθήκη της θερμικής σκέδασης των νετρονίων. Προκειμένου να καθοριστεί η πιο κατάλληλη physics list πραγματοποιήθηκαν πλήθος δοκιμών που είχαν σαν στόχο τον υπολογισμό της απόδοσης ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων σε κάθετη δέσμη νετρονίων. Ως αναφορά θεωρήθηκαν τα αποτελέσματα των Clem and Dorman (2000) τα οποία, παρότι δεν έχουν επιβεβαιωθεί σε όλο το ενεργειακό φάσμα, ταυτίζονται με τα αποτελέσματα των Shibata

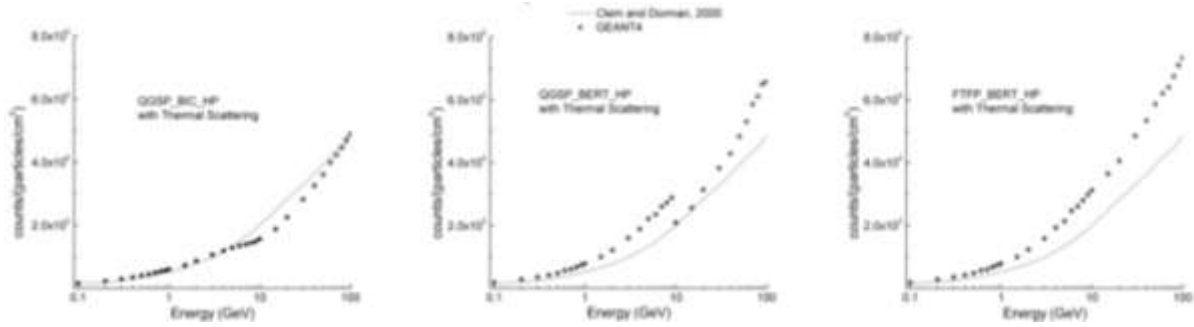


et al. (2001), οι οποίοι μέτρησαν πειραματικά την απόδοση ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων. Το σχετικό διάγραμμα από την εργασία τους παρατίθεται στο σχήμα 4.9.



**Σχήμα 4.9:** Πειραματικός υπολογισμός της απόδοσης ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων από τους Shibata et al. (2001).

Η απόδοση ανίχνευσης όπως υπολογίζεται από την εφαρμογή χρησιμοποιώντας τις τρεις βασικές physics lists παρουσιάζεται στο σχήμα 4.10. Στα διαγράμματα αυτά αποδίδεται ο αριθμός των παλμών που μετρά ο μετρητής νετρονίων προς την φωταύγεια της δέσμης ( $\text{particles}/\text{cm}^2$ ), όταν μια κάθετη δέσμη νετρονίων εισέρχεται σε αυτόν. Ως τιμές χρόνου αποκατάστασης του απარიθμητή και νεκρού χρόνου των ηλεκτρονικών επιλέχθηκαν οι τιμές των 5 $\mu\text{s}$  και 20 $\mu\text{s}$  αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι οι καμπύλες των αποτελεσμάτων των Clem and Dorman είναι προσεγγιστικές δεδομένου ότι ψηφιοποιήθηκαν από την σχετική εργασία τους στην οποία το διάγραμμα αποδίδεται σε λογαριθμική κλίμακα τόσο για τον άξονα της ενέργειας όσο και για τον άξονα της απόδοσης.



**Σχήμα 4.10.:** Υπολογισμός της απόδοσης ανίχνευσης για κάθετη δέσμη νετρονίων, με χρήση των τριών βασικών physics list.

Από το διάγραμμα αυτό διαφαίνεται πόσο ευαίσθητη είναι η προσομοίωση από τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην ανελαστική σκέδαση. Η QGSP\_BIC\_HP\_TS φαίνεται να δίνει ίδια αποτελέσματα με των Clem and Dorman μέχρι τα 5 GeV περίπου και από τα 70 GeV μέχρι τα 100 GeV. Από τα 6 GeV μέχρι τα 60 GeV η απόδοση ανίχνευσης που υπολογίζεται είναι μικρότερη από τον Clem and Dorman. Μία εντελώς διαφορετική εικόνα προκύπτει από τη χρήση της QGSP\_BERT\_HP\_TS. Η απόδοση ανίχνευσης που υπολογίζεται είναι μεγαλύτερη από αυτή των Clem and Dorman, ωστόσο το πιο παράδοξο είναι η ασυνέχεια που εμφανίζεται στην ενέργεια των 10 GeV. Η ασυνέχεια αυτή εξομαλύνεται στη περίπτωση της FTFP\_BERT\_HP\_TS, ωστόσο η απόδοση ανίχνευσης που υπολογίζεται παραμένει να είναι αξιοσημείωτα μεγαλύτερη από αυτή των Clem and Dorman.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα αυτά καθώς και το σχήμα 4.5 στο οποίο απεικονίζονται τα μοντέλα της ανελαστικής σκέδασης, συνάγεται το συμπέρασμα πως η μετάβαση από το μοντέλο Bertini Cascades στο μοντέλο LEP (περίπτωση QGSP\_BERT\_HP\_TS) δε γίνεται με ομαλό τρόπο ενώ η μετάβαση από το Bertini Cascades στο μοντέλο FTFP (περίπτωση FTFP\_BERT\_HP\_TS) γίνεται πολύ ομαλά. Ωστόσο, δεδομένου ότι τα μοντέλα Bertini και Binary Cascades φτάνουν μέχρι τα 10 GeV ενώ το μοντέλο QGSP ξεκινάει από τα 12 GeV, σε physics lists που γίνεται χρήση αυτών των μοντέλων είναι απαραίτητη και η χρήση του μοντέλου LEP τουλάχιστον για το διάστημα από 10 GeV έως 12 GeV που κανένα από τα άλλα μοντέλα δεν είναι διαθέσιμο.

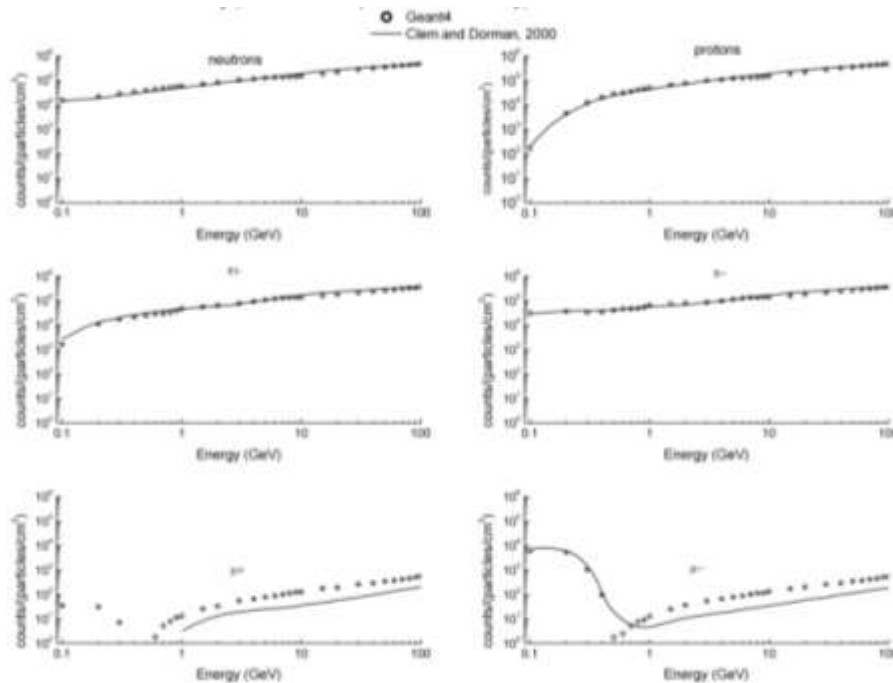
Εναλλακτική επιλογή είναι στο κενό διάστημα ανάμεσα στα μοντέλα Bertini/Binary Cascades και στο μοντέλο QGSP να γίνει χρήση του μοντέλου FTFP. Σχετική physics list παρέχεται από το Geant4 και είναι η QGSP\_FTFP\_BERT, η οποία χρησιμοποιεί το μοντέλο Bertini Cascades για χαμηλές ενέργειες, το FTFP για μέσες ενέργειες και το QGSP για υψηλές ενέργειες, ενώ χρησιμοποιεί και επικάλυψη των μοντέλων κοντά στα όρια λειτουργίας τους ώστε να υπάρχει ομαλή μετάβαση. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκαν πολλοί συνδυασμοί μοντέλων στη λογική της QGSP\_FTFP\_BERT και έγινε έλεγχος των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα έγινε παραγωγή των αποτελεσμάτων του σχήματος 4.10 για διάφορες περιπτώσεις σημείων μετάβασης από τα μοντέλα Bertini Cascades ή Binary Cascades στα μοντέλα LEP ή FTFP και στη συνέχεια στο μοντέλο QGSP και για διάφορους συνδυασμούς επικάλυψης των μοντέλων. Από τις δοκιμές προέκυψε ότι κανένας συνδυασμός δεν έδωσε κοντινότερο αποτέλεσμα σε αυτό των Clem and Dorman από ότι η QGSP\_BIC\_HP\_TS. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η συγκεκριμένη physics list χρησιμοποιήθηκε και από τους Semikh et al. (2011) για την προσομοίωση του μετρητή νετρονίων που εγκατέστησαν στο Plateau de Bure, κατέστησε τη χρήση της ως την πιο κατάλληλη για την αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων.

#### 4.2.6. Αποτελέσματα

Η εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να γίνει λεπτομερής έλεγχος της απόδοσης ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων 6NM-64, για διάφορους τύπους σωματιδίων σε ένα ευρύ φάσμα ενεργειών. Για την παραγωγή των αποτελεσμάτων έγινε χρήση όλων των λειτουργιών της εφαρμογής ώστε να γίνει προσομοίωση διαφόρων σεναρίων λειτουργίας του μετρητή νετρονίων. Προκειμένου να γίνει υπολογισμός των στατιστικών σφαλμάτων, κάθε σενάριο προσομοίωσης επαναλήφθηκε από 20 έως 40 φορές, ανάλογα με τον αριθμό των μετρούμενων παλμών. Δεδομένης της χρονικής απόδοσης της εφαρμογής, η διαδικασία παραγωγής του συνόλου των αποτελεσμάτων είχε διάρκεια αρκετών μηνών ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η εφαρμογή έτρεξε σε περισσότερους του ενός υπολογιστές. Σε όλες τις περιπτώσεις η physics list που

χρησιμοποιήθηκε ήταν η QGSP\_BIC\_HP\_TS, ο χρόνος επαναφοράς του απαριθμητή ήταν 5μs και ο νεκρός χρόνος των ηλεκτρονικών 20μs.

Στο σχήμα 4.11. δίνεται ο υπολογισμός της απόδοσης ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων 6NM-64 για κάθετες δέσμες σωματιδίων. Για σύγκριση παρατίθενται στο διάγραμμα τα αποτελέσματα των Clem and Dorman, τα οποία έχουν ψηφιοποιηθεί από το αντίστοιχο διάγραμμα της εργασίας τους.

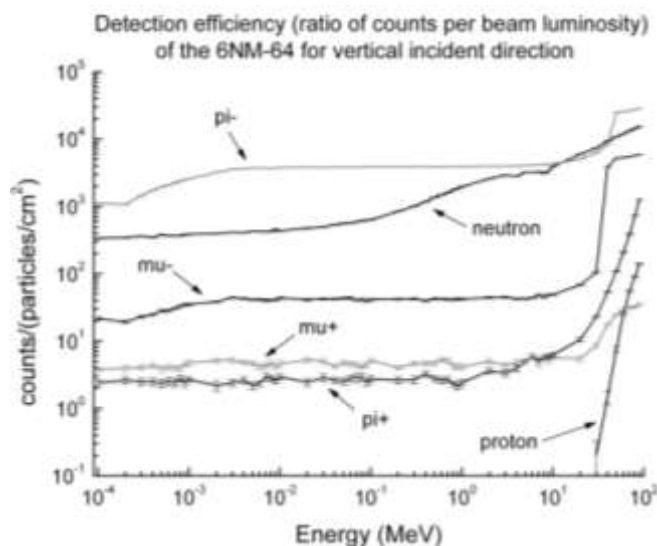


**Σχήμα 4.11:** Υπολογισμός της απόδοσης ανίχνευσης για κάθετη δέσμη σωματιδίων ενεργειών 100 MeV – 100 GeV που εισέρχεται σε ολόκληρο το μετρητή νετρονίων.

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι υπάρχει ταύτιση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής προσομοίωσης με τα αποτελέσματα των Clem and Dorman (2000). Στην περίπτωση των μιονίων ωστόσο παρατηρούνται μικρές διαφορές. Ο λόγος των διαφορών δεν είναι δυνατό να εξηγηθεί δεδομένου ότι δεν γίνεται αναφορά στην εργασία τους για τις φυσικές διεργασίες των μιονίων που συμπεριέλαβαν στην προσομοίωση που πραγματοποίησαν. Όσον αφορά τα αποτελέσματα αυτά καθαυτά, τα συμπεράσματα είναι ίδια με αυτά που αναφέρουν οι Clem and Dorman. Συγκεκριμένα η απόδοση ανίχνευσης είναι σημαντική για πρωτόνια, νετρόνια και πιόνια ενώ για τα

μόνια η απόδοση είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια παρουσιάζουν ίδια συμπεριφορά για ενέργειες πάνω από 1 GeV. Για ενέργειες κάτω από 1 GeV η απώλεια ενέργειας των πρωτονίων λόγω ιονισμού είναι σημαντική και ως αποτέλεσμα η απόδοση ανίχνευσης μειώνεται πολύ. Όσον αφορά τα θετικά και τα αρνητικά πιόνια, επίσης παρουσιάζουν ίδια απόδοση ανίχνευσης για ενέργειες άνω του 1 GeV αλλά λίγο μικρότερη από ότι τα πρωτόνια και νετρόνια. Κάτω από το 1 GeV, η απορρόφηση των αρνητικών πιονίων από τους πυρήνες μόλυβδου με συνεπακόλουθο την εκπομπή νετρονίων είναι σημαντική. Ως αποτέλεσμα η απόδοση ανίχνευσης των αρνητικών πιονίων σε εκείνο το ενεργειακό εύρος είναι μεγαλύτερη από αυτή των νετρονίων. Τέλος, αν και η απόδοση ανίχνευσης των μιονίων είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη από τα υπόλοιπα σωματίδια, εξαίρεση αποτελεί η συμπεριφορά των αρνητικών μιονίων κάτω από τα 300 MeV. Όπως και στην περίπτωση των αρνητικών πιονίων, κάτω από αυτή την ενέργεια γίνεται σημαντική η απορρόφηση των αρνητικών μιονίων από τους πυρήνες μόλυβδου.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην ενεργειακή κλίμακα 100 eV έως 100 MeV παρουσιάζονται στο σχήμα 4.12. Τα αποτελέσματα αυτά έχουν παραχθεί με χρήση της λειτουργίας TOTAL (δέσμη από το 1cm) προκειμένου η δέσμη να είναι πολύ κοντά στο μετρητή νετρονίων και να μη διασπώνται τα ασταθή σωματίδια πριν φτάσουν σε αυτόν.

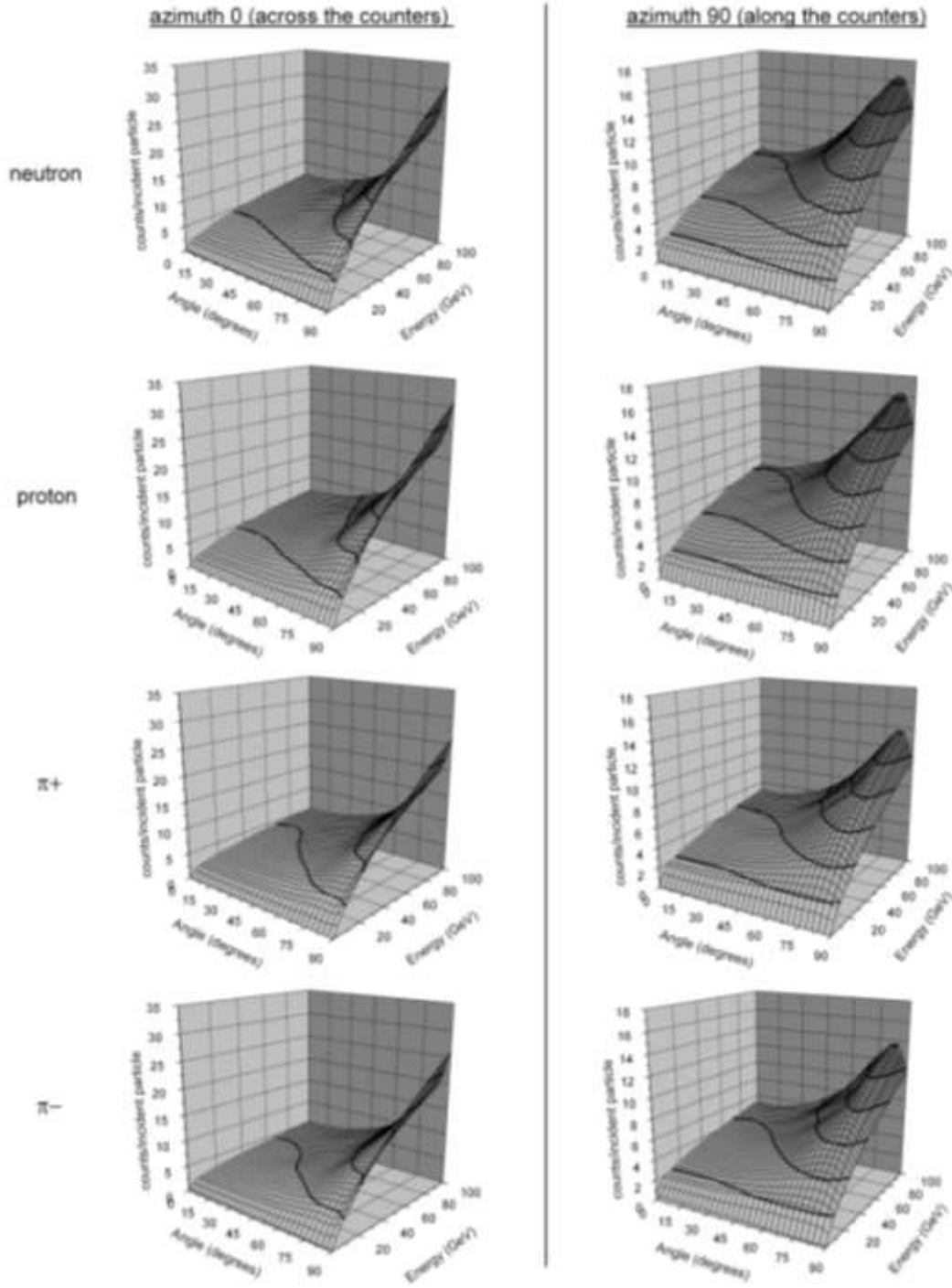


**Σχήμα 4.12:** Υπολογισμός της απόδοσης ανίχνευσης για κάθετη δέσμη σωματιδίων ενεργειών 100 eV – 100 MeV που εισέρχεται σε ολόκληρο το μετρητή νετρονίων.

Σε αυτή την ενεργειακή κλίμακα, πολλά νετρόνια δεν καταφέρνουν να διαπεράσουν τον ανακλαστήρα λόγω των ελαστικών σκεδάσεων. Όσο η ενέργεια αυξάνεται όλο και περισσότερα νετρόνια διαπερνούν τον ανακλαστήρα και η απόδοση ανίχνευσης ανεβαίνει ομαλά. Από την άλλη μεριά τα πρωτόνια δεν ανιχνεύονται καθόλου μέχρι τα 30 MeV. Ο λόγος είναι ότι χάνουν πολύ γρήγορα την ενέργειά τους λόγω ιονισμού με αποτέλεσμα να μη καταφέρνουν να διαπεράσουν τον ανακλαστήρα. Πάνω από τα 30 MeV μερικά πρωτόνια αρχίζουν να διαπερνούν τον ανακλαστήρα, ο αριθμός των οποίων αυξάνεται γρήγορα όσο αυξάνεται η ενέργεια με παράλληλη αύξηση της ενέργειας απόδοσης. Όσον αφορά τα μόνια, γενικά τα αρνητικά μόνια εμφανίζουν μεγαλύτερη απόδοση ανίχνευσης από ότι τα θετικά μόνια. Μια απότομη αύξηση και για τα δύο εμφανίζεται στα 50 MeV. Μέχρι εκείνη την ενέργεια τα περισσότερα αρνητικά μόνια χάνουν την ενεργεία τους λόγω ιονισμού και απορροφούνται μέσα στον ανακλαστήρα ενώ τα θετικά μόνια διασπώνται μέσα στον ανακλαστήρα. Πάνω από αυτή την ενέργεια, τα αρνητικά μόνια διαπερνούν τον ανακλαστήρα και απορροφούνται από τους πυρήνες μολύβδου του παραγωγού, ενώ τα θετικά μόνια καταφέρνουν να φτάσουν και να διασπαστούν μέσα στο παραγωγό. Τέλος, αναφορικά με τα πόνια μια μεταβολή στην απόδοση ανίχνευσης παρατηρείται επίσης στα 50 MeV. Μέχρι αυτή την ενέργεια, τα θετικά πόνια χάνουν την ενέργειά τους και διασπώνται σε θετικά μόνια μέσα στον ανακλαστήρα. Τα αρνητικά πόνια χάνουν την ενέργεια τους και απορροφώνται στον ανακλαστήρα παράγοντας, μεταξύ άλλων σωματιδίων, νετρόνια. Για το λόγο αυτό η απόδοση ανίχνευσης των αρνητικών πιονίων είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τους άλλους τύπους σωματιδίων σε αυτό το ενεργειακό εύρος. Πάνω από τα 50 MeV τα αρνητικά πόνια φτάνουν και αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες μολύβδου του παραγωγού ενώ τα θετικά πόνια διασπώνται μέσα στον παραγωγό. Από τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτει ότι η απόδοση ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων σε αυτό το ενεργειακό εύρος εξαρτάται έντονα από το πάχος και την πυκνότητα του ανακλαστήρα που εμποδίζει τα σωματίδια χαμηλής ενέργειας να εισέλθουν στο μετρητή νετρονίων και να αλληλεπιδράσουν με τον παραγωγό.

Για το ενεργειακό φάσμα 100 MeV με 100 GeV, έγινε έλεγχος της εξάρτησης που έχει η απόδοση ανίχνευσης από την γωνιά πρόσπτωσης της δέσμης στον μετρητή νετρονίων. Για το σκοπό αυτό έγινε χρήση της λειτουργίας TOTAL (δέσμη από τα 2m) για

δύο περιπτώσεις αζιμούθιου, μία σε διεύθυνση κάθετη στους απαριθμητές (αζιμούθιο  $0^\circ$ ) και μία σε διεύθυνση παράλληλη με τους απαριθμητές (αζιμούθιο  $90^\circ$ ), και για ζενιθιακές γωνίες σε  $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 85^\circ, 90^\circ$ . Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα απαιτήσαν το μεγαλύτερο χρόνο προσομοίωσης δεδομένου ότι απαιτήθηκαν πολλοί συνδυασμοί τύπου σωματιδίων, ενέργειας, ζενιθιακής και αζιμουθιακής γωνίας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.13. στο οποίο αποδίδεται ο αριθμός των παλμών ανά εισερχόμενο σωματίδιο που μετρά ο μετρητής νετρονίων σε σχέση με την ενέργεια του σωματιδίου και της γωνίας πρόσπτωσης. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ίδια ανεξαρτήτως του τύπου σωματιδίων. Στην περίπτωση του αζιμούθιου  $0^\circ$ , η αύξηση της ζενιθιακής γωνίας πρόσπτωσης συνεπάγεται την αύξηση της απόδοσης ανίχνευσης, η οποία είναι πιο σημαντική όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια του σωματιδίου. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι με αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης αυξάνεται η απόσταση που διανύει το σωματίδιο μέσα στο μόλυβδο του παραγωγού με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα ανελαστικής σκέδασης που εκκινεί τη διαδικασία ανίχνευσης του σωματιδίου. Στην περίπτωση του αζιμούθιου  $90^\circ$ , παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο όμως η αύξηση της απόδοσης παρουσιάζει ένα μέγιστο στις  $80^\circ$  περίπου ενώ μετά ακολουθεί μείωση. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, δεδομένου ότι το αζιμούθιο  $90^\circ$  αναφέρεται σε διεύθυνση παράλληλη με τους απαριθμητές, πάνω από ζενιθιακή γωνία  $80^\circ$  αρχίζει να μειώνεται η απόσταση που διανύει το σωματίδιο μέσα από το μόλυβδο του παραγωγού. Σε ζενιθιακή γωνία  $90^\circ$  πολλά σωματίδια περνούν μέσα από τον απαριθμητή χωρίς να περάσουν μέσα από τον παραγωγό.

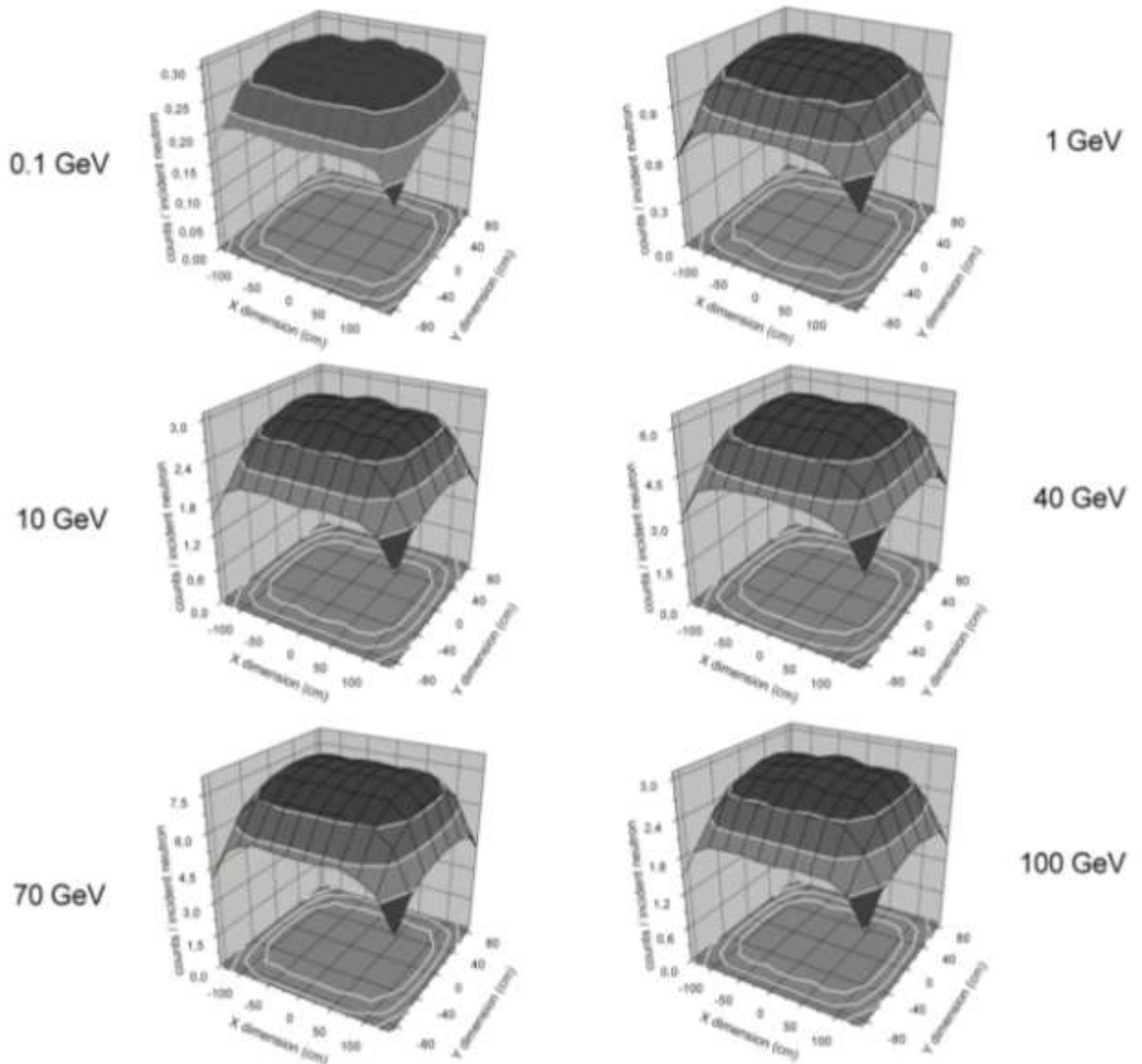


**Σχήμα 4.13:** Παλμοί ανά εισερχόμενο σωματίδιο σε σχέση με την ενέργεια της δέσμης και την γωνία πρόσπτωσης για την περίπτωση νετρονίων, πρωτονίων, θετικών και αρνητικών πιονίων.

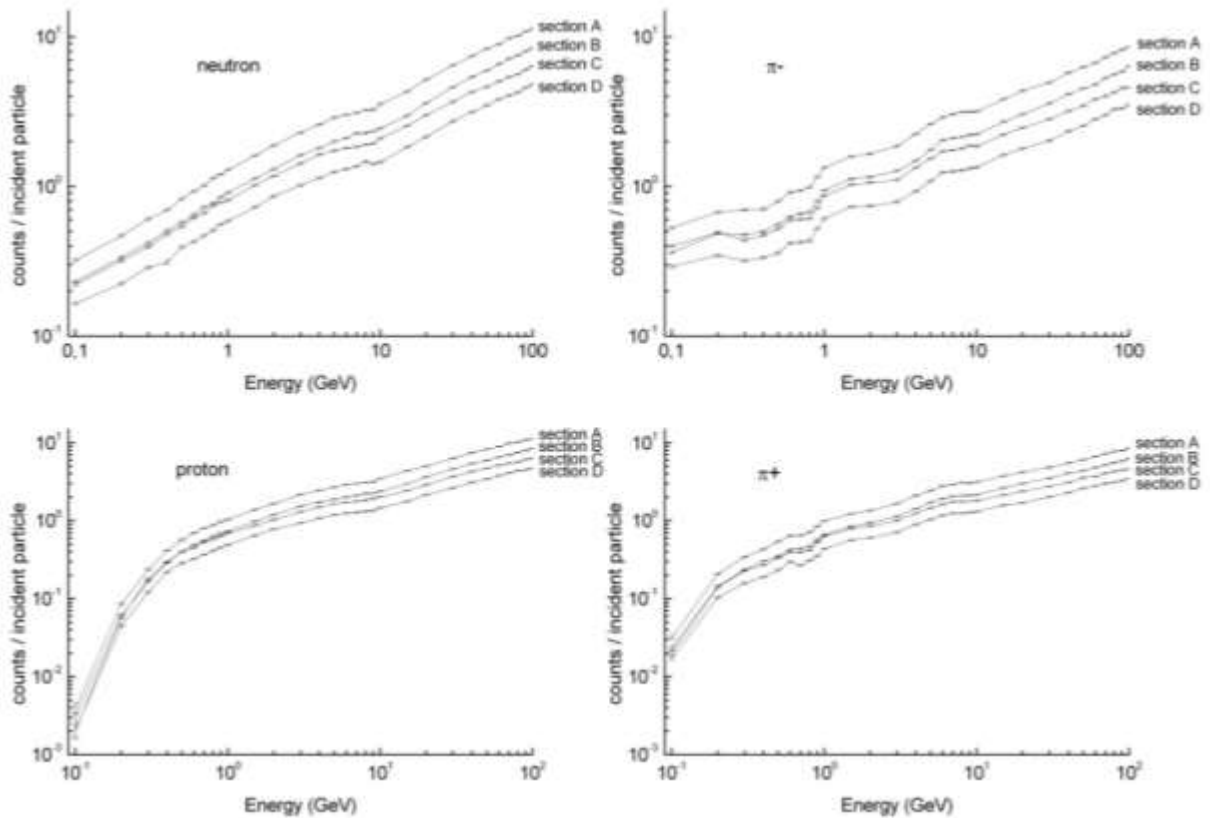
Η χωρική απόδοση ανίχνευσης του μετρητή νετρονίων πραγματοποιήθηκε με τη λειτουργία SPATIAL. Δύο ειδών αποτελέσματα παρήχθησαν. Το ένα αποτέλεσμα αφορά δέσμες νετρονίων με ενέργειες 0.1 GeV, 1 GeV, 10 GeV, 40 GeV, 70 GeV και 100 GeV οι



οποίες προσκρούουν κάθετα στις περιοχές 1 έως 24 του μετρητή νετρονίων, όπως ορίστηκαν στο σχήμα 4.4. Το δεύτερο αποτέλεσμα αφορά δέσμες νετρονίων, πρωτονίων, θετικών και αρνητικών πιονίων με ενέργειες από 100 MeV έως 100 GeV που προσκρούουν κάθετα στις περιοχές A, B, C και D του μετρητή νετρονίων. Τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων παρουσιάζονται στα σχήματα 4.14. και 4.15 αντίστοιχα.



**Σχήμα 4.14:** Παλμοί ανά εισερχόμενο σωματίδιο ανά τομέα του μετρητή νετρονίων για κάθετη δέσμη νετρονίων με ενέργειες 0.1 GeV, 1 GeV, 10 GeV, 40 GeV, 70 GeV και 100 GeV.

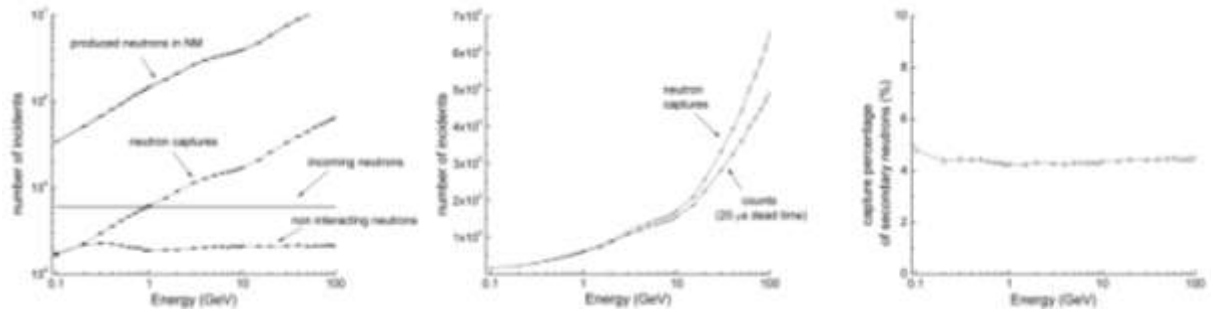


**Σχήμα 4.15:** Παλμοί ανά εισερχόμενο σωματίδιο για κάθετες δέσμες νετρονίων, πρωτονίων, θετικών και αρνητικών πιονίων που προσκρούουν κάθετα στους τομείς A-B-C-D του μετρητή νετρονίων.

Το σχήμα 4.14 είναι ένα τρισδιάστατο διάγραμμα επιφανείας όπου αποδίδονται οι παλμοί ανά εισερχόμενο σωματίδιο που μετρά ο μετρητή νετρονίων ανάλογα με το σημείο της επιφάνειάς του στο οποίο εισέρχεται κάθετα η δέσμη νετρονίων. Για καλύτερη απεικόνιση του αποτελέσματος, στη βάση του τρισδιάστατου διαγράμματος έχει προστεθεί διάγραμμα ισοϋψών καμπυλών (contour plot). Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι κοινό, ανεξάρτητα από την ενέργεια της δέσμης σωματιδίων. Ο μετρητής νετρονίων παρουσιάζει μέγιστη και χωρίς πολλές διαφοροποιήσεις απόδοση ανίχνευσης σε μια κεντρική περιοχή διάστασης περίπου 220x120 cm. Έξω από αυτή την περιοχή η απόδοση ανίχνευσης μειώνεται απότομα. Αυτό συμβαίνει πιθανότατα λόγω του ότι η αρχική ανελαστική σκέδαση που εκκινεί την παραγωγή δευτερογενών νετρονίων πραγματοποιείται κοντά στο άκρο το μετρητή νετρονίων με αποτέλεσμα πολλά από τα δευτερογενή νετρόνια να διαφεύγουν. Όσον αφορά το σχήμα 4.15,

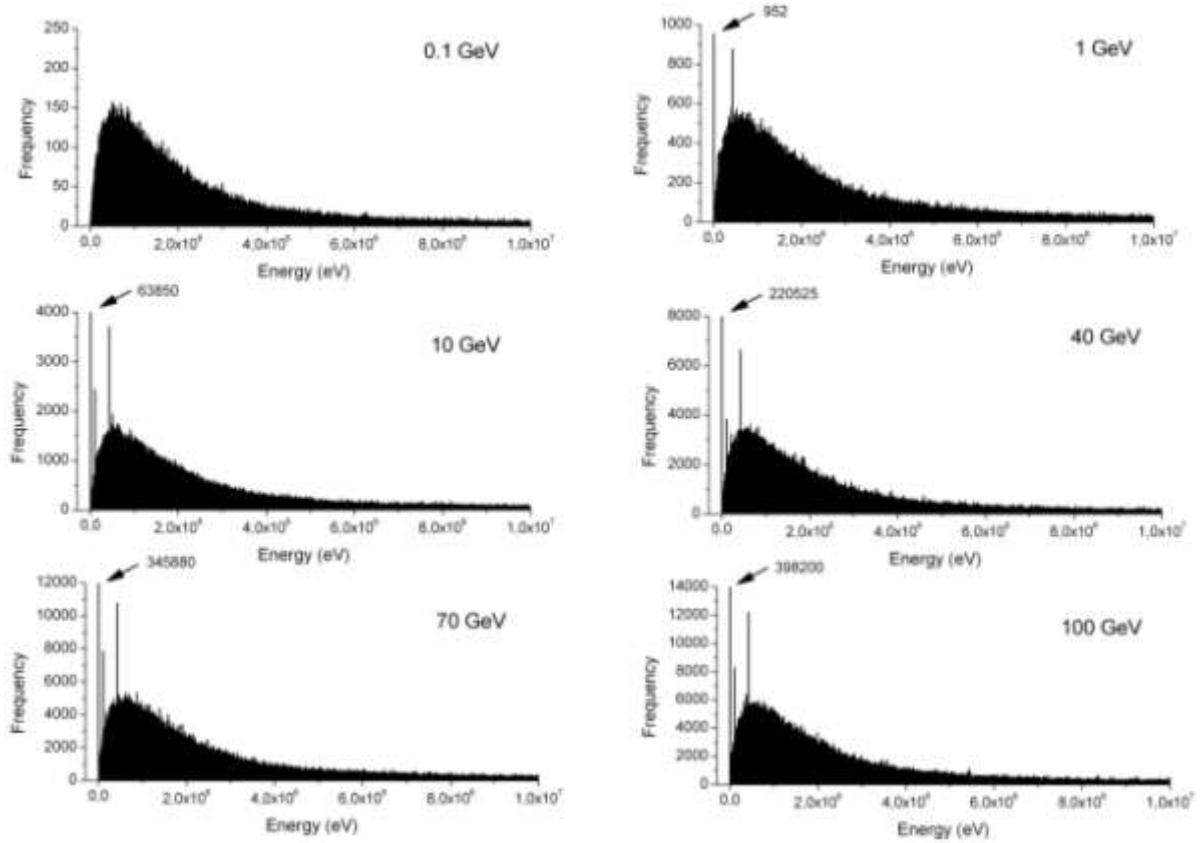
αποδίδει τον αριθμό των παλμών ανά εισερχόμενο σωματίδιο όταν η δέσμη εισέρχεται κάθετα στους τομείς A, B, C ή D. Πέρα από την αυτονόητη αύξηση της απόδοσης ανίχνευσης με την ενέργεια, συμπεραίνεται ότι η απόδοση του κεντρικού τομέα A είναι μέγιστη και του ακριανού τομέα D ελάχιστη. Ανάμεσά τους βρίσκεται η απόδοση των τομέων B και C, με τον τομέα B που πρόσκειται στην μεγάλη πλευρά του μετρητή νετρονίων να εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη απόδοση ανίχνευσης.

Ολοκληρώνοντας τη παραγωγή αποτελεσμάτων για το μετρητή νετρονίων 6NM-64 και προκειμένου να γίνουν καλύτερα κατανοητά τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν, έγινε ο έλεγχος μιας σειράς παραμέτρων που σχετίζονται με τη διαδικασία παράγωγης και ανίχνευσης των νετρονίων εντός του 6NM-64. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε κάθετη δέσμη νετρονίων που καλύπτει όλη την επιφάνεια του ανιχνευτή. Τα αποτελέσματα αποδίδονται στο σχήμα 4.16 που περιλαμβάνει τρία γραφήματα. Σύμφωνα με το αριστερό γράφημα, το ένα τρίτο περίπου των νετρονίων που εισέρχονται στον 6NM-64 τον διαπερνά χωρίς να πραγματοποιηθεί ανελαστική σκέδαση, δηλαδή χωρίς να ξεκινήσει η διαδικασία παραγωγής δευτερογενών νετρονίων. Το ποσοστό αυτό είναι σταθερό και δεν μεταβάλλεται με την ενέργεια της δέσμης. Επιπλέον όπως φαίνεται από το ίδιο γράφημα, ο αριθμός των δευτερογενών νετρονίων αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας της δέσμης με παράλληλη αύξηση του αριθμού των συλλήψεων νετρονίων στον αναλογικό απαριθμητή. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται από το δεξί γράφημα, περίπου το 4.5%-5% των δευτερογενών νετρονίων που παράγονται στον 6NM-64 απορροφάται στους απαριθμητές, ανεξάρτητα της ενέργειας της δέσμης. Τέλος, το κεντρικό γράφημα αποδίδει τη συσχέτιση ανάμεσα στον αριθμό των νετρονίων που συλλαμβάνονται στους απαριθμητές και στον αριθμό των παλμών που καταγράφονται. Όπως φαίνεται, μέχρι τα 2 GeV περίπου δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στις δύο μεταβλητές. Για μεγαλύτερες ενέργειες όμως ο αριθμός των νετρονίων που συλλαμβάνονται στους απαριθμητές αυξάνεται με αποτέλεσμα ο χρόνος επαναφοράς του θαλάμου και ο νεκρός χρόνος των ηλεκτρονικών να περιορίζει τον αριθμό των μετρούμενων παλμών. Αναφορικά με το αριστερό γράφημα, σημειώνεται ότι η πληροφορία των πόσων σωματιδίων διαπερνούν το μετρητή νετρονίων χωρίς αλληλεπίδραση δεν παρέχεται από την τελική έκδοση της εφαρμογής αλλά υλοποιήθηκε αποκλειστικά για τις ανάγκες αυτού του γραφήματος.



**Σχήμα 4.16:** (Αριστερά) Συσχέτιση αριθμού νετρονίων που εισέρχονται στο μετρητή νετρονίων, που τον διαπερνούν χωρίς αλληλεπίδραση, που παράγονται μέσα στο μετρητή και που συλλαμβάνονται στον απαριθμητή. (Κέντρο) Συσχέτιση αριθμού νετρονίων που συλλαμβάνονται στον απαριθμητή και παλμών που καταγράφονται. (Δεξιά) Ποσοστό νετρονίων που συλλαμβάνονται στον απαριθμητή σε σχέση με τα παραγόμενα.

Τέλος, στο σχήμα 4.17 δίνεται το ενεργειακό φάσμα των δευτερογενών νετρονίων για κάθετες δέσμες νετρονίων με ενέργειες 0.1 GeV, 1 GeV, 10 GeV, 40 GeV, 70 GeV και 100 GeV. Συμπεραίνεται ότι τα ιστογράμματα είναι παρόμοια σε μορφή με μοναδική διαφοροποίηση στο συνολικό αριθμό των δευτερογενών νετρονίων, ο οποίος όπως αναμένεται αυξάνεται με την ενέργεια της δέσμης. Στο ενεργειακό φάσμα παρατηρείται μια ομαλή κορυφή στα 500 keV ενώ κάνουν την εμφάνισή τους τρεις διακριτές κορυφές. Η πρώτη κορυφή έχει πολύ μεγάλο ύψος, βρίσκεται στην αρχή του ιστογράμματος και σχετίζεται με τα θερμικά νετρόνια ενώ οι άλλες 2 κορυφές βρίσκονται περίπου στα 100 keV και στα 418 keV.



**Σχήμα 4.17:** Φάσμα δευτερογενών νετρονίων που παράγονται στον μετρητή νετρονίων για κάθετες δέσμες νετρονίων.

### 4.3. Προσομοίωση των καταιγισμών κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα

#### 4.3.1. Περιγραφή και στόχος της εφαρμογής

Η δεύτερη εφαρμογή προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αφορά την αλληλεπίδραση των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα της Γης και τη δημιουργία καταιγισμών δευτερογενών σωματιδίων. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αποτελεί πεδίο μελέτης κυρίως γιατί σχετίζεται με δύο πολύ σημαντικά θέματα. Από επιστημονικής πλευρά, η μελέτη των καταιγισμών σωματιδίων που δημιουργούνται εντός της ατμόσφαιρας παρέχει τη σύνδεση ανάμεσα στα πρωτογενή σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας που φτάνουν στο όριο της ατμόσφαιρας και στις μετρήσεις των επίγειων ανιχνευτών. Ως αποτέλεσμα, η μελέτη του φαινομένου συνεισφέρει στην καλύτερη αξιοποίηση των επίγειων παρατηρήσεων και στη σύνδεση τους με φαινόμενα που μεταβάλλουν τη ροή των πρωτογενών κοσμικών σωματιδίων προς την Γη. Στο πεδίο των εφαρμογών, η συγκεκριμένη μελέτη συνδέεται άμεσα με τον υπολογισμό της δόσης ακτινοβολίας που δέχεται ο ανθρώπινος οργανισμός, κάτι το οποίο απασχολεί ιδιαίτερα τις αεροπορικές εταιρίες και τα πληρώματα των αεροσκαφών.

Σε σχέση με την προσομοίωση του μετρητή νετρονίων 6NM-64 που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο μέρος του κεφαλαίου, η μελέτη του καταιγισμού σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Στην περίπτωση του μετρητή νετρονίων, το σύστημα που προσομοιώνεται είναι πλήρως καθορισμένο όσον αφορά τις διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του ενώ οι μεταβλητές εξόδου που μετρούνται, δηλαδή οι παλμοί που μετρά ο μετρητής νετρονίων, είναι επίσης συγκεκριμένες. Αντίθετα, όσον αφορά την περίπτωση των καταιγισμών σωματιδίων, το σύστημα που προσομοιώνεται είναι η ατμόσφαιρα που δεν έχει σαφή όρια και χαρακτηριστικά ενώ και οι μεταβλητές εξόδου επίσης δεν είναι σαφείς αφού οποιαδήποτε πληροφορία σχετικά με τους τύπους και τις ενέργειες των σωματιδίων που εμφανίζονται σε οποιοδήποτε σημείο της ατμόσφαιρας είναι χρήσιμο. Η ιδιαιτερότητα αυτή καθιστά πολύ κρίσιμη τη σχεδίαση της εφαρμογής έτσι ώστε αφενός να επιτρέπει την παραμετροποίηση των στοιχείων που συνθέτουν την προσομοίωση, αφετέρου να διαχειρίζεται το μεγάλο όγκο των παραμέτρων εξόδου. Δεδομένου του πλήθους των

μεταβλητών τόσο της εισόδου που αφορούν την παραμετροποίηση του συστήματος όσο και της εξόδου που αφορούν τις μετρήσιμες ποσότητες, ιδιαίτερα σημαντικός είναι και ο σχεδιασμός της διεπαφής με το χρήστη προκειμένου ο τελευταίος να μπορεί να ορίσει τις παραμέτρους με εύχρηστο τρόπο και να μπορεί να επεξεργαστεί την πληροφορία εξόδου.

Όπως αναφέρθηκε στη παράγραφο 4.1.3., στο χώρο της κοσμικής ακτινοβολίας έχουν δημιουργηθεί δύο εφαρμογές σχετικά με την προσομοίωση των καταιγισμών δευτερογενούς κοσμικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Η μία εφαρμογή είναι το CORSIKA που έχει υλοποιηθεί αποκλειστικά για το σκοπό της συγκεκριμένης προσομοίωσης και η οποία έχει ευρύτατη χρήση. Η άλλη εφαρμογή είναι το ATMOCOSMICS που βασίζεται στο Geant4 και το οποίο έχει πιο περιορισμένη χρήση δεδομένου ότι είναι πιο διαδεδομένη η χρήση του PLANETOCOSMICS που αποτελεί εξέλιξη του. Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας βασίζεται στο Geant4 και ονομάζεται DYNASTIMA από το ακρωνύμιο DYNamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application. Ο στόχος της εφαρμογής είναι διπλός. Ο κύριος στόχος είναι η ανάπτυξη μιας εφαρμογής που θα μπορεί να παραμετροποιηθεί σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο βαθμό μέσω ενός εύχρηστου τρόπου και θα παρέχει όσο το δυνατό περισσότερες πληροφορίες για τον καταιγισμό. Η ικανοποίηση αυτού του στόχου θα επιτρέψει τη χρήση της εφαρμογής τόσο από επιστήμονες όσο και από φοιτητές και για ένα μεγάλο πλήθος εφαρμογών. Ο δεύτερος στόχος είναι η μελέτη, μέσω της εφαρμογής, ενδεικτικών καταιγισμών. Η ανάπτυξη της εφαρμογής καθώς και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της έχουν δημοσιευτεί στο Paschalis et al. (2014).

#### **4.3.2. Σχεδιασμός - μοντελοποίηση**

Η ανάπτυξη της εφαρμογής προσομοίωσης για τη μελέτη των καταιγισμών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα χωρίζεται στα παρακάτω βήματα:

- Καθορισμός της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας.

- Καθορισμός της δομής της ατμόσφαιρας.
- Καθορισμός του μαγνητικού πεδίου
- Καθορισμός των φυσικών διαδικασιών μεταξύ των σωματιδίων της πρωτογενούς κοσμικής και των μορίων της ατμόσφαιρας.

Από τα παραπάνω βήματα μόνο οι φυσικές διαδικασίες μέσω των οποίων αναπτύσσεται ο καταιγισμός είναι συγκεκριμένες και δεν επηρεάζονται από παραμέτρους που μεταβάλλονται. Όλα τα υπόλοιπα βήματα αφορούν στοιχεία που μεταβάλλονται με τον τόπο ή το χρόνο στον οποίο αναφέρεται η προσομοίωση. Για το λόγο αυτό πρέπει να γίνει μοντελοποίηση τους ώστε ο χρήστης να μπορεί να ορίζει την ακριβή κατάστασή τους μέσω παραμέτρων.

Η διαδικασία παραγωγής των καταιγισμών δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα έχει περιγραφεί αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας. Συνοπτικά, τα πρωτογενή σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας, κυρίως πρωτόνια και σωματίδια  $\alpha$ , κατά την είσοδό του μέσα στην ατμόσφαιρα χάνουν ενέργεια λόγω ιονισμού. Μία ανελαστική σκέδαση του σωματιδίου με ένα μόριο της ατμόσφαιρας παράγει δευτερογενή σωματίδια και κυρίως πρωτόνια, νετρόνια, πιόνια και καόνια. Από αυτή την αλληλεπίδραση και μετά ξεκινά μία αλυσίδα αλληλεπιδράσεων η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια παράγουν επιπλέον δευτερογενή σωματίδια μέσω νέων ανελαστικών σκεδάσεων. Τα ουδέτερα πιόνια διασπώνται σε ακτίνες  $\gamma$ , τα φορτισμένα πιόνια διασπώνται σε μίονια και τα καόνια διασπώνται σε πιόνια και μίονια. Τα μίονια με τη σειρά τους διασπώνται σε ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια και νετρίνα. Οι ακτίνες  $\gamma$  δημιουργούν ζεύγη ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων μέσω δίδυμης γένεσης, ηλεκτρόνια μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου και ακτίνες  $\gamma$  χαμηλότερης ενέργειας μέσω σκέδασης Compton. Η κίνηση των ηλεκτρονίων με τη σειρά της δημιουργεί επιπλέον ακτίνες  $\gamma$  λόγω ακτινοβολίας πέδης και ακτινοβολίας Cherenkov. Αποτέλεσμα όλων αυτών των διαδικασιών είναι ένας καταιγισμός σωματιδίων που αποτελείται από την αδρονική συνιστώσα (πρωτόνια, νετρόνια, πιόνια, καόνια), τη μιονική συνιστώσα (μίονια, νετρίνα) και την ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα (ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, ακτίνες  $\gamma$ ).



Όσον αφορά το φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας, έχει γίνει χρήση της παραμετροποίησης του Papini et al. (1996). Σύμφωνα με αυτή, το φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας για κάθε εισερχόμενο τύπο σωματιδίου είναι:

$$J(E) = A \cdot (E+B)^a \cdot E^b \frac{\text{particles}}{m^2 \cdot sr \cdot s \cdot GeV/n} \quad (1)$$

όπου A, B, a, b παράμετροι και E η ενέργεια ανά νουκλεόνιο των εισερχόμενων σωματιδίων. Η συγκεκριμένη παραμετροποίηση είναι πολύ εύχρηστη δεδομένου ότι, μέσω του παράγοντα  $(E+B)^a$ , εμπεριέχει την ηλιακή διαμόρφωση ενώ σε μεγάλες ενέργειες παίρνει τη γνωστή εκθετική μορφή  $E^b$ . Επομένως η ανωτέρω μορφή του φάσματος μπορεί να παραμετροποιηθεί σε μεγάλο βαθμό προκειμένου να αναπαραστήσει πολλές περιπτώσεις ηλιακής διαμόρφωσης καθώς και κατωφλίων δυσκαμψίας.

Σχετικά με την ατμόσφαιρα της Γης, αποτελείται από 5 στρώματα. Τα τρία χαμηλότερα στρώματα είναι η τροπόσφαιρα, η στρατόσφαιρα και η μεσόσφαιρα η οποία εκτείνεται μέχρι το ύψος των 85 km περίπου. Τα εξωτερικά στρώματα, τα οποία ονομάζονται θερμόσφαιρα και εξώσφαιρα, εκτείνονται σε απόσταση πολλών εκατοντάδων χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια. Η πυκνότητα της ατμόσφαιρας μειώνεται γρήγορα με το ύψος και σαν αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της μάζας της περιέχεται στα κατώτερα στρώματα. Ενδεικτικά το 80% περίπου της μάζας της ατμόσφαιρας περιέχεται εντός της τροπόσφαιρας ενώ περισσότερο από το 99.9% της μάζας βρίσκεται κάτω από το όριο Kalman. Το όριο Kalman βρίσκεται σε ένα ύψος περίπου 100 km και θεωρείται το όριο μεταξύ της ατμόσφαιρας και του διαστήματος, μέσα στο οποίο οι συγκρούσεις μεταξύ των σωματιδίων είναι σπάνιες. Η σύνθεση της ατμόσφαιρας των κατώτερων στρωμάτων μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, αποτελούμενη κατ' όγκο από 78% Άζωτο, 21% Οξυγόνο και 1% Αργό.

Η ατμόσφαιρα δεν είναι ένα στατικό σύστημα αλλά επηρεάζεται από την τοποθεσία και το χρόνο της παρατήρησης. Γενικά η ατμόσφαιρα είναι λεπτότερη στους πόλους και παχύτερη στον ισημερινό, ενώ για ένα συγκεκριμένο τόπο η ακριβής δομή της εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Η ακριβής δομή της ατμόσφαιρας περιγράφεται μέσω του προφίλ της θερμοκρασίας με το ύψος. Η μεταβολή της

ατμοσφαιρικής πίεσης συνδέεται με τη μεταβολή του ύψους με την υδροστατική εξίσωση:

$$dp = -\rho \cdot g \cdot dh, \quad (2)$$

όπου  $dp$  η μεταβολή της πίεσης για μεταβολή ύψους  $dh$ ,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας. Θεωρώντας τον αέρα σας ιδανικό αέριο, η πυκνότητα  $\rho$  υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T}, \quad (3)$$

όπου  $p$  η ατμοσφαιρική πίεση,  $R$  η σταθερά των αερίων και  $T$  η θερμοκρασία. Από τις εξισώσεις (2) και (3) προκύπτει:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{g}{R \cdot T} \cdot dh, \quad (4)$$

Ολοκληρώνοντας την εξίσωση (4) και χρησιμοποιώντας ως οριακή συνθήκη την πίεση στην επιφάνεια της Γης, προκύπτει η σχέση ανάμεσα στην ατμοσφαιρική πίεση και στο ύψος. Από αυτή τη σχέση είναι εύκολο στη συνέχεια να υπολογιστούν άλλες χρήσιμες μεταβλητές για την ατμόσφαιρα και συγκεκριμένα η πυκνότητα και το ατμοσφαιρικό βάθος (διαιρώντας την πίεση με τη σταθερά της βαρύτητας  $g$ ). Ωστόσο η ολοκλήρωση της εξίσωσης (4) προϋποθέτει τη γνώση του προφίλ της θερμοκρασίας, δηλαδή της σχέσης ανάμεσα στη θερμοκρασία και το ύψος. Για μία συγκεκριμένη τοποθεσία σε ένα συγκεκριμένο χρόνο, τα προφίλ θερμοκρασίας μπορούν να προσδιοριστούν πειραματικά μέσω ραδιοβολίσεων στην ατμόσφαιρα. Παρόλα αυτά, δεδομένου ότι η δομή της ατμόσφαιρας βρίσκεται στο επίκεντρο πολλών πεδίων εφαρμογών, με σημαντικότερο την αεροπορία, έχουν δομηθεί τυποποιημένα μοντέλα τα οποία δίνουν με καλή προσέγγιση τη δομή της ατμόσφαιρας στις περισσότερες περιπτώσεις. Τα μοντέλα αυτά είναι το US Standard Atmosphere (U.S. Government Printing Office, 1976) και το International Standard Atmosphere (International Civil Aviation Organization, 1993). Τα αυτά μοντέλα συμπίπτουν ως προς τη δομή της ατμόσφαιρας μέχρι το υψόμετρο των 32 km.

Σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο της Γης, διακρίνεται σε δύο περιοχές. Στην εσωτερική περιοχή το πεδίο ονομάζεται γεωμαγνητικό και προκύπτει από την υπέρθεση του εσωτερικού πεδίου της Γης και του πεδίου του φλοιού τα οποία προκαλούνται αντίστοιχα από τα ηλεκτρικά ρεύματα στον Γήινο πυρήνα και από μαγνητικές περιοχές στο φλοιό (International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 2010). Στην εξωτερική περιοχή το πεδίο ονομάζεται μαγνητοσφαιρικό και προκαλείται από την αλληλεπίδραση του εσωτερικού πεδίου με τον ηλιακό άνεμο (Tsyganenko,1989; Tsyganenko,1995). Το γεωμαγνητικό πεδίο δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και κυριαρχεί σε μια απόσταση περίπου τεσσάρων γήινων ακτίνων. Πέρα από αυτή την απόσταση κυριαρχεί το μαγνητοσφαιρικό το οποίο και εκτείνεται μέχρι την μαγνητόπαυση. Στην προσομοίωση που αναπτύχθηκε, σαν αφετηρία για την προσομοίωση των σωματιδίων τίθεται το όριο της ατμόσφαιρας, επομένως το μαγνητικό πεδίο της Γης δεν χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των επιτρεπόμενων τροχιών των πρωτογενών κοσμικών σωματιδίων αλλά μόνο για τον υπολογισμό της απόκλισης των τροχιών των σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα. Δεδομένου ότι η ατμόσφαιρα εκτείνεται σε λίγα χιλιόμετρα πάνω από την επιφάνεια της γης, στην προσομοίωση λαμβάνεται υπόψη μόνο το γεωμαγνητικό πεδίο. Το γεωμαγνητικό πεδίο προσεγγιστικά περιγράφεται ως μαγνητικό δίπολο, επομένως αν το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}_0$  στην επιφάνεια της Γης είναι γνωστό, το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}_h$  σε υψόμετρο  $h$  είναι ένα σχεδόν παράλληλο διάνυσμα με μέτρο:

$$\left| \vec{B}_h \right| = \left| \vec{B}_0 \right| \cdot \frac{r_{earth}^3}{(r_{earth} + h)^3} \quad (5)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η μείωση της έντασης του μαγνητικού πεδίου στο όριο της ατμόσφαιρας σε σχέση με την ένταση στο έδαφος είναι της τάξης του 4.5%. Δεδομένου ότι η εξασθένηση του πεδίου με το ύψος δεν είναι τόσο σημαντική και για λόγους απλοποίησης, η σχέση (5) δεν λαμβάνει υπόψη ότι το μαγνητικό δίπολο με το οποίο προσεγγίζεται το γεωμαγνητικό πεδίο βρίσκεται σε απόσταση περίπου 433 km από το κέντρο της Γης και σχηματίζει γωνιά  $15^\circ$  σε σχέση με τον άξονα περιστροφής. Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου της Γης που χρησιμοποιούνται ως αναφορά από τη σχέση

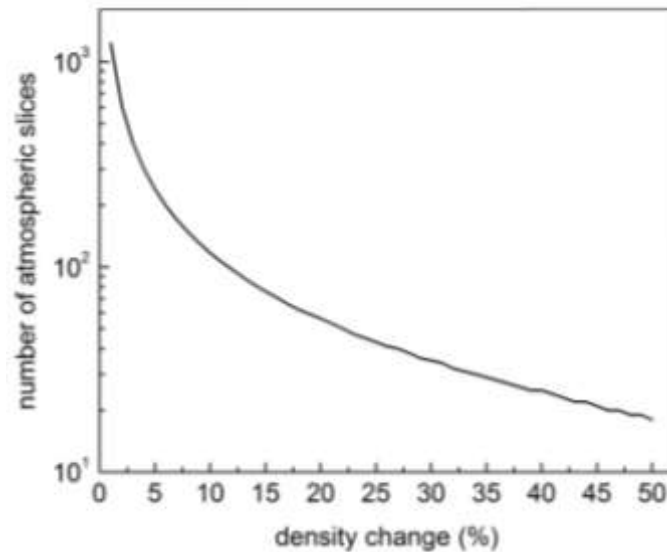
(4) μπορούν είναι γνωστές για οποιαδήποτε τοποθεσία στη Γη ([www.ngdc.noaa.gov/geomag/ website](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/website)).

#### 4.3.3. Υλοποίηση

Σύμφωνα με την μοντελοποίηση που περιγράφηκε και σε αντίθεση με τη προσομοίωση του 6NM-64, η προσομοίωση των καταιγισμών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα απαιτεί τον καθορισμό αρκετών παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί περιλαμβάνουν τις μεταβλητές που εμφανίζονται στις εξισώσεις (1), (4) και (5) καθώς και πλήθος παραμέτρων που θα αναφερθούν στη συνέχεια. Προκειμένου όλες αυτές οι παράμετροι να ελεγχθούν, να επεξεργαστούν, να αποθηκευτούν και να ανταλλαχτούν μεταξύ των αντικειμένων της C++, έχει υλοποιηθεί η κλάση `atmodel`. Η κλάση αυτή έχει διπλή λειτουργία. Η πρώτη λειτουργία είναι να ελέγχει και αποθηκεύσει όλες τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται από την προσομοίωση ενώ η δεύτερη και σημαντικότερη λειτουργία είναι να παρέχει μεθόδους για τον υπολογισμό της ατμοσφαιρικής πίεσης και πυκνότητας μέσω ολοκλήρωσης της εξίσωσης (4). Η εισαγωγή των παραμέτρων από τον χρήστη γίνεται μέσω αρχείων ρύθμισης (`configuration files`).

Ο καθορισμός της γεωμετρίας του συστήματος που προσομοιώνεται γίνεται με τον ορισμό κλάσης η οποία κληρονομεί τα χαρακτηριστικά της κλάσης `G4UserDetectorConstruction`. Το βασικό αντικείμενο που περιλαμβάνεται στον `World Volume` είναι η ατμόσφαιρα. Δύο διαφορετικά γεωμετρικά μοντέλα έχουν υλοποιηθεί. Το πρώτο αναπαριστά ένα επίπεδο μοντέλο όπου η ατμόσφαιρα είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο και γίνεται χρήση του αντικειμένου `G4Box`. Το δεύτερο αναπαριστά ένα σφαιρικό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη την καμπυλότητα της Γης και γίνεται χρήση του αντικειμένου `G4Sphere`. Δεδομένου ότι τα αντικείμενα που ορίζονται στο `Geant4` αποτελούνται από υλικά με σταθερή πυκνότητα, προκειμένου να αναπαρασταθεί η μείωση της πυκνότητας του αέρα με το υψόμετρο, το αντικείμενο που αναπαριστά την ατμόσφαιρα διαιρείται σε οριζόντια τμήματα καθένα εκ των οποίων φέρει αέρα συγκεκριμένης πυκνότητας. Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται μέσω της κλάσης `G4VPParameterized`. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί τον ορισμό κλάσης η οποία κληρονομεί τα χαρακτηριστικά της `G4VPParameterisation` και στην οποία καθορίζεται η θέση, η

διάσταση και το υλικό κάθε τμήματος. Για το σκοπό αυτό έχει υλοποιηθεί μέθοδος στη κλάση `atmodel` η οποία διαιρεί την ατμόσφαιρα σε τμήματα με τέτοιο τρόπο ώστε η μεταβολή της πυκνότητας από το ένα τμήμα στο επόμενο να είναι μικρότερο από ένα προκαθορισμένο ποσοστό. Ο αριθμός των τμημάτων στα οποία διαμερίζεται η ατμόσφαιρα σαν συνάρτηση της μεταβολής της πυκνότητας του αέρα μεταξύ τους δίνεται στο σχήμα 4.18.



**Σχήμα 4.18:** Αριθμός τμημάτων στα οποία διαμερίζεται η ατμόσφαιρα σαν συνάρτηση της μεταβολής της πυκνότητας του αέρα μεταξύ τους.

Η κλάση `atmodel` παρέχει μεθόδους που επιστρέφουν την θέση, τη διάσταση και την πυκνότητα του αέρα κάθε τμήματος. Αυτές οι μέθοδοι καλούνται από την κλάση `G4VPVParameterisation` η οποία και θέτει τα τμήματα στη γεωμετρία του `Geant4`. Ως βασικό υλικό για τον ατμοσφαιρικό αέρα χρησιμοποιείται το `G4_AIR`, η πυκνότητα του οποίου μεταβάλλεται σύμφωνα με την πυκνότητα κάθε τμήματος της ατμόσφαιρας. Σε κάθε μοντέλο, εφαρμόζεται μέσω της κλάσης `G4MagneticField` ένα μη ομογενές μαγνητικό πεδίο, το οποίο εξασθενεί με το υψόμετρο σύμφωνα με την σχέση (5). Στην προσομοίωση, ο άξονας X κατευθύνεται προς την Ανατολή, ο άξονας Z προς τον Νότο και ο άξονας Y προς τα πάνω. Τέλος, προκειμένου να αναπαρασταθούν οι αλληλεπιδράσεις με την επιφάνεια της γης, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τον αριθμό των

σωματιδίων στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, κάτω από την ατμόσφαιρα δίνεται η δυνατότητα να οριστεί ένα στρώμα που αναπαριστά το έδαφος ή τη θάλασσα.

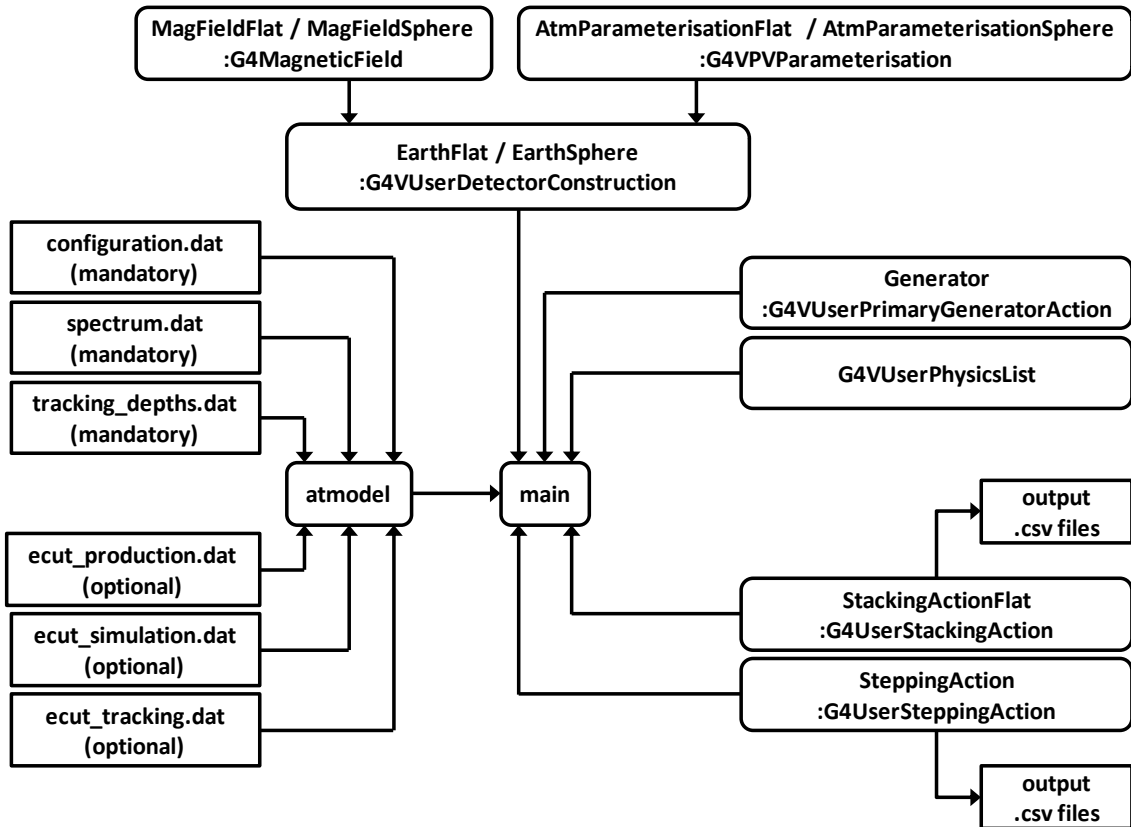
Η δέσμη των σωματιδίων που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα καθώς και οι φυσικές αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα, δηλώνονται μέσω των κλάσεων που κληρονομούν τα χαρακτηριστικά των `G4VPrimaryGeneratorAction` και `G4VUserPhysicsList` αντίστοιχα. Αναφορικά με τη δέσμη σωματιδίων, πάντοτε εκπέμπεται από την κορυφή της ατμόσφαιρας. Προκειμένου τα σωματίδια που εκπέμπονται να ακολουθούν το φάσμα της σχέσης (1) γίνεται χρήση της κλάσης `G4GeneralParticleSource (GPS)` του Geant4. Η ενέργεια, η ζενιθιακή και η αζιμουθιακή γωνία των εκπεμπόμενων σωματιδίων είναι εντός τιμών που θέτει ο χρήστης. Η γωνιακή κατανομή των σωματιδίων ακολουθεί το νόμο συνημιτόνων η οποία αναπαριστά την κατανομή που φαίνεται σε ένα επίπεδο εξαιτίας μιας ισότροπης ροής (Lambert's cosine law). Η δέσμη των σωματιδίων μπορεί να αποτελείται από σωματίδια διαφόρων τύπων. Αναφορικά με τις φυσικές αλληλεπιδράσεις, στην προσομοίωση γίνεται χρήση των physics lists που διαθέτει το Geant4. Ο λόγος είναι ότι περιλαμβάνουν όλες τις διαδικασίες που είναι υπεύθυνες για το σχηματισμό του καταιγισμού ενώ παράλληλα έχουν επικυρωθεί από πλήθος πειραμάτων, κυρίως Φυσικής Υψηλών Ενεργειών.

Για τη συλλογή των πληροφοριών σχετικά με τα σωματίδια του καταιγισμού που παράγονται εντός της ατμόσφαιρας, ορίζονται δύο κλάσεις που κληρονομούν τα χαρακτηριστικά των `G4UserStackingAction` και `G4UserSteppingAction`. Η πρώτη κλάση διαθέτει μια μέθοδο η οποία καλείται κάθε φορά που ένα νέο σωματίδιο παράγεται στο χώρο της προσομοίωσης ενώ η δεύτερη κλάση διαθέτει μία μέθοδο που καλείται κάθε φορά που ένα σωματίδιο εκτελεί ένα βήμα (η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αλληλεπιδράσεις του σωματιδίου). Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή παρέχει δύο ειδών πληροφορίες. Το πρώτο αφορά τα σωματίδια τη στιγμή της παραγωγής τους (μέσω της `G4UserStackingAction`), όπου γίνεται η καταγραφή του υψομέτρου και της ενέργειας. Το δεύτερο αφορά τα σωματίδια τη στιγμή που τέμνουν κατά την κίνησή τους προκαθορισμένα ατμοσφαιρικά επίπεδα (μέσω της `G4UserTrackingAction`), όπου γίνεται καταγραφή της ενέργειας, της διεύθυνσης κίνησης, της οριζόντιας θέσης και του χρόνου. Η εξαγωγή των δεδομένων γίνεται σε μορφή αρχείων .csv, προκειμένου να είναι δυνατή

η περαιτέρω επεξεργασία τους από οποιοδήποτε πρόγραμμα επεξεργασίας. Τέλος, ομοίως με την προσομοίωση του 6NM-64, η εφαρμογή υποστηρίζει την γραφική αναπαράσταση της δημιουργίας του καταιγισμού μέσα στην ατμόσφαιρα μέσω της κλάσης G4VisManager, με δημιουργία .heprep αρχείου.

Πολύ σημαντικός παράγοντας για την εκτέλεση της προσομοίωσης και για την ακρίβεια των παραγόμενων αποτελεσμάτων είναι ο καθορισμός ενεργειακών κατωφλίων πάνω από τα οποία πραγματοποιείται η παραγωγή (production), η προσομοίωση (simulation) και η ανίχνευση (tracking) των σωματιδίων. Όσον αφορά το ενεργειακό κατώφλι παραγωγής των σωματιδίων, δίνονται δύο δυνατότητες. Η πρώτη είναι μέσω του κατωφλίου εμβείας που ορίζεται στη physics list που χρησιμοποιείται από την προσομοίωση. Σύμφωνα με αυτή τη λειτουργία, κατά την προσομοίωση παράγονται μόνο σωματίδια τα οποία έχουν εμβεία μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο και το μέσο που θα κινηθεί το σωματίδιο. Εξ ορισμού οι physics lists του Geant4 έχουν κατώφλι εμβείας ίσο με 1 mm, τιμή η οποία μπορεί να μεταβάλλεται με την εφαρμογή. Η δεύτερη δυνατότητα ελέγχου των σωματιδίων που παράγονται είναι μέσω συγκεκριμένων για κάθε τύπο σωματιδίων κατωφλίων ενέργειας. Η ενέργεια κάθε νέου σωματιδίου ελέγχεται από την G4UserStackingAction και αν είναι μικρότερη από την το αντίστοιχο ενεργειακό κατώφλι τότε η παραγωγή του σωματιδίου απορρίπτεται. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα ενεργειακά κατώφλια παραγωγής δεν επηρεάζουν την προσομοίωση των σωματιδίων αλλά μόνο την δημιουργία τους. Ένα σωματίδιο που έχει παραχθεί θα προσομοιαστεί μέχρι να μηδενιστεί η ενέργειά του ανεξαρτήτως του ενεργειακού κατωφλίου παραγωγής. Όσον αφορά τα ενεργειακά κατώφλια προσομοίωσης και ανίχνευσης των σωματιδίων, δίνεται η δυνατότητα καθορισμού τιμών για κάθε τύπο σωματιδίου. Σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα, ο αποκλεισμός των σωματιδίων από την προσομοίωση ή την ανίχνευση γίνεται με σύγκριση της ενέργειάς τους με το ενεργειακό κατώφλι προσομοίωσης ή ανίχνευσης αντίστοιχα σε κάθε βήμα μέσω της G4UserSteppingAction.

Συνοψίζοντας όλα τα ανωτέρω, η δομή της εφαρμογής δίνεται στο σχήμα 4.19:



**Σχήμα 4.19:** Δομή της εφαρμογής για την προσομοίωση των καταιγισμών σωματιδίων στην ατμόσφαιρα.

#### 4.3.4. Είσοδος, έξοδος και χρονική απόδοση του προγράμματος

Σε αντίθεση με την προσομοίωση του μετρητή νετρονίων 6NM-64, όπου η εκτέλεσή της απαιτούσε από το χρήστη τον ορισμό ελάχιστων παραμέτρων, η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα της Γης απαιτεί τον καθορισμό από το χρήστη ενός μεγάλου αριθμού ρυθμίσεων. Οι ρυθμίσεις αυτές καταχωρούνται σε έξι αρχεία ρύθμισης, τρία εκ των οποίων (configuration.dat, spectrum.dat, tracking\_depths.dat) περιλαμβάνουν τις βασικές ρυθμίσεις ενώ τα υπόλοιπα τρία (ecut\_production.dat, ecut\_simulation.dat, ecut\_tracking.dat) περιλαμβάνουν τα ενεργειακά κατώφλια για την παραγωγή, προσομοίωση και ανίχνευση των σωματιδίων.

Η παρουσία του configuration.dat είναι υποχρεωτική για την προσομοίωση καθώς αποτελεί το βασικό αρχείο ρυθμίσεων όπου ο χρήστης ορίζει το μεγαλύτερο



πλήθος των παραμέτρων που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Μεταξύ των ρυθμίσεων που περιλαμβάνονται στο αρχείο αυτό είναι οι τιμές του μαγνητικού πεδίου στην επιφάνεια της Γης καθώς και οι παράμετροι που καθορίζουν την δομή της ατμόσφαιρας (προφίλ θερμοκρασίας με το υψόμετρο, φυσικές σταθερές, κλπ). Οι τιμές του μαγνητικού πεδίου για κάποιο συγκεκριμένο τόπο και χρόνο μπορούν να βρεθούν από το (<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>) ενώ για διευκόλυνση του χρήστη το αρχείο παρέχεται προσυμπληρωμένο με προφίλ θερμοκρασίας που αναπαριστούν το μοντέλο International Standard Atmosphere. Επιπλέον στο αρχείο περιέχονται οι ρυθμίσεις για την επιλογή επίπεδου ή σφαιρικού μοντέλου, για τη μεταβολή της πίεσης ανάμεσα στα στρώματα που γίνεται η διαμέριση της ατμόσφαιρας, για την μορφή της επιφάνεια της Γης (έδαφος ή θάλασσα), για την physics list και για το κατώφλι εμβέλειας των σωματιδίων που παράγονται. Τυπική δομή του αρχείου δίνεται στο σχήμα 4.20:

```

configuration.dat (mandatory)
6371          [EARTH RADIUS IN KM]
200           [HORIZONTAL DIMENSION OF THE WORLD VOLUME IN KM]
FLAT          [GEOMETRY MODEL - FLAT|SPHERE]
LAND          [SURFACE TYPE - NONE|LAND|SEA]
10           [CHANGE OF AIR DENSITY BETWEEN THE LAYERS OF THE GEOMETRY IN %]
FTFP_BERT_HP [REFERENCE PHYSICS LIST]
1.           [DEFAULT CUT VALUE OF THE REFERENCE PHYSICS LIST IN METERS]
27134.9      [NORTH COMPONENT OF THE MAGNETIC FIELD (+NORTH|-SOUTH) IN nT]
1807.8       [EAST COMPONENT OF THE MAGNETIC FIELD (+EAST|-WEST) IN nT]
36378.3      [VERTICAL COMPONENT OF THE MAGNETIC FIELD (+DOWN|-UP) IN nT]
86000        [MAX HEIGHT OF THE ATMOSPHERE IN METERS]
1013.25      [SURFACE PRESSURE IN mbar]
287.1        [GAS CONSTANT FOR DRY AIR IN J*(Kg^-1)*(K^-1)]
9.80665      [GRAVITATIONAL ACCELERATION IN M/S^2]
[TEMPERATURE PROFILES FROM BOTTOM TO TOP LAYERS - ADD LINES]
[BOTTOM TEMPERATURE OF THE LAYER IN KELVIN] [TEMPERATURE CHANGE IN KELVIN/KM] [TOP
HEIGHT OF THE LAYER IN KM]
288.15 -0.0065 11000.
216.65 0. 20000.
216.65 0.001 32000.
228.65 0.0028 47000.
270.65 0. 51000.
270.65 -0.0028 71000.
214.65 -0.002 86000.

```

**Σχήμα 4.20:** Τυπική δομή του *configuration.dat*

Η παρουσία του αρχείου *spectrum.dat* είναι επίσης υποχρεωτική καθώς σε αυτό ο χρήστης ορίζει τις παραμέτρους που αφορούν το φάσμα των σωματιδίων που

εισέρχονται στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα ορίζονται οι τύποι σωματιδίων από τους οποίους αποτελείται η δέσμη, ενώ για κάθε τύπο σωματιδίου ορίζονται οι παράμετροι A, B, a, b του φάσματος της εξίσωσης (1) καθώς και η ελάχιστη-μέγιστη τιμή της ενέργειας, της ζενιθιακής και της αζιμουθιακής γωνίας. Στην περίπτωση μονοενεργειακής δέσμης σωματιδίων με σταθερή κατεύθυνση εισόδου, ο χρήστης πρέπει να ορίσει μόνο ένα τύπο σωματιδίου ενώ οι ελάχιστες τιμές ενέργειας, ζενιθιακής και αζιμουθιακής γωνίας πρέπει να είναι ίσες με τις αντίστοιχες μέγιστες. Τυπική δομή του spectrum.dat όταν η δέσμη αποτελείται από πρωτόνια και σωματίδια α δίνεται στο σχήμα 4.21:

```
spectrum.dat (mandatory)
[PARAMETERS FOR PARTICLE 1]
proton      [PARTICLE TYPE]
1           [MINIMUM ENERGY IN GeV]
100        [MAXIMUM ENERGY IN GeV]
0           [MINIMUM ZENITH ANGLE IN DEG]
90         [MAXIMUM ZENITH ANGLE IN DEG]
0           [MINIMUM AZIMUTH ANGLE IN DEG]
360        [MAXIMUM AZIMUTH ANGLE IN DEG]
[PARAMETERS OF DIFFERENTIAL SPECTRUM J(E)=A*(E+B)^a*E^b particles/(m2*s*Sr)]
18000      [A]
0.92       [B IN GeV]
-4         [a]
1.25       [b]
[PARAMETERS FOR PARTICLE 2]
alpha      [PARTICLE TYPE]
4          [MINIMUM ENERGY IN GeV]
400        [MAXIMUM ENERGY IN GeV]
0          [MINIMUM ZENITH ANGLE IN DEG]
90         [MAXIMUM ZENITH ANGLE IN DEG]
0          [MINIMUM AZIMUTH ANGLE IN DEG]
360        [MAXIMUM AZIMUTH ANGLE IN DEG]
[PARAMETERS OF DIFFERENTIAL SPECTRUM J(E)=A*(E+B)^a*E^b particles/(m2*s*Sr)]
850        [A]
0.76       [B IN GeV]
-3.52      [a]
0.77       [b]
```

**Σχήμα 4.21:** Τυπική δομή του spectrum.dat

Στο αρχείο tracking\_depths.dat ο χρήστης ορίζει τα ατμοσφαιρικά βάθη, σε  $g/cm^2$ , όπου θα πραγματοποιείται η καταγραφή των σωματιδίων. Η παρουσία του αρχείου είναι υποχρεωτική ενώ απαιτείται ο ορισμός τουλάχιστον ενός επιπέδου καταγραφής προκειμένου να εκτελεστεί η προσομοίωση. Τυπική δομή του αρχείου δίνεται στο σχήμα 4.22:

```
tracking_depths.dat (mandatory)  
[TRACKING LAYERS - ONE ENTRY PER LINE]  
[ATMOSPHERIC DEPTH IN g/cm^2]  
1030  
900  
800  
700  
600  
500  
400  
300  
200  
100  
50  
25  
12.5  
6.25  
3.125  
1.5625  
0.78125
```

**Σχήμα 4.22:** Τυπική δομή του *tracking\_depths.dat*

Όσον αφορά τα αρχεία ρύθμισης *ecut\_production.dat*, *ecut\_simulation.dat* και *ecut\_tracking.dat*, η παρουσία τους είναι προαιρετική. Τα αρχεία περιλαμβάνουν τις τιμές των ενεργειακών κατωφλίων πάνω από τις οποίες πραγματοποιείται αντίστοιχα η παραγωγή, η προσομοίωση και η ανίχνευση των σωματιδίων. Τα αρχεία αποτελούνται από ζευγάρια παραμέτρων, η πρώτη εκ των οποίων αναφέρεται στο τύπο του σωματιδίου ενώ η δεύτερη στη ενέργεια κατωφλίου σε MeV κάτω από την οποία θα γίνεται αποκλεισμός των σωματιδίων από την παραγωγή, την προσομοίωση ή την ανίχνευση. Μία αρνητική τιμή ενέργειας οδηγεί στην ολική απόρριψη των σωματιδίων. Τα αρχεία αυτά έχουν παρόμοια δομή, η οποία δίνεται στο σχήμα 4.23:

```

ecut_production.dat / ecut_simulation.dat / ecut_tracking.dat (optional)
[ENERGY CUTS FOR TRACKING - ONE ENTRY PER LINE]
[PARTICLE TYPE] [ENERGY IN MeV (NEGATIVE VALUE FOR EXCLUSION)]
mu+ 1000
mu- 1000
proton 1000
neutron 1000
pi+ 1000
pi- 1000
e- 1000
e+ 1000
nu_mu 1000
anti_nu_mu 1000
nu_e -1
anti_nu_e -1
gamma -1
    
```

**Σχήμα 4.23:** Τυπική δομή των αρχείων *ecut\_production.dat*, *ecut\_simulation.dat* και *ecut\_tracking.dat*.

Μετά τον καθορισμό των ανωτέρω αρχείων η εφαρμογή εκτελείται από τη γραμμή εντολών με τον καθορισμό ελάχιστων παραμέτρων. Η εφαρμογή υποστηρίζει δύο λειτουργίες. Η πρώτη έχει την ονομασία SPECTRUM και αποτελεί την κύρια λειτουργία με την οποία εκτελείται η προσομοίωση καθορισμένου αριθμού σωματιδίων σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά που έχουν οριστεί στο *spectrum.dat*. Η δεύτερη έχει την ονομασία GEOMETRY και έχει βοηθητικό ρόλο αφού αποσκοπεί στη γραφική απεικόνιση του καταιγισμού που προκαλείται από ένα σωματίδιο που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα με καθορισμένη ενέργεια και κατεύθυνση. Οι λειτουργίες της εφαρμογής και οι παράμετροι που απαιτούνται δίνονται στο πίνακα 4.2.:

Modes	Brief Desc.	Parameters
<b>SPECTRUM</b>	Simulation of particles according to the parameters defined in <i>spectrum.dat</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Number of Particles</li> <li>• selection of output mode (ANALYTIC / SYNOPTIC)</li> </ul>
<b>GEOMETRY</b>	representation of the geometry (one particle only)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Particle Name</li> <li>• Particle Energy (GeV)</li> <li>• zenith angle (deg)</li> <li>• azimuth angle (deg)</li> </ul>

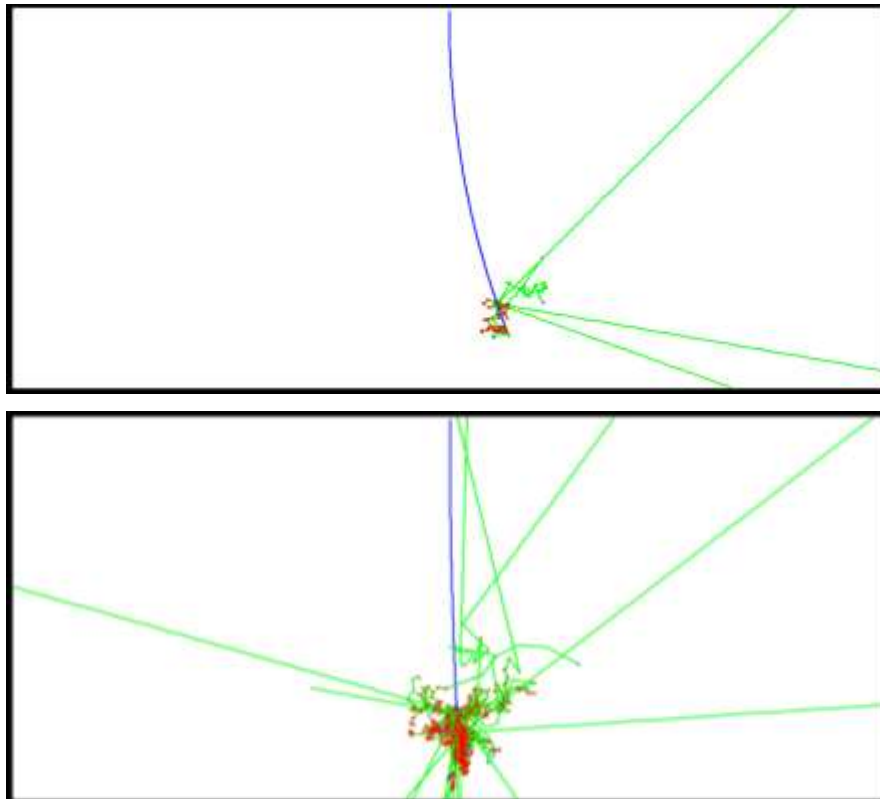
**Πίνακας 4.2:** Παράμετροι εισόδου του προγράμματος προσομοίωσης για τους καταιγισμούς σωματιδίων.

Αντίστοιχα με την προσομοίωση του μετρητή νετρονίων, κατά την εκτέλεση του προγράμματος εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή πληροφορίες σχετικά με την αρχικοποίηση των αντικειμένων του Geant4 ενώ στη συνέχεια η εφαρμογή ενημερώνει για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης κάθε σωματιδίου που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, για το χρόνο που απαιτήθηκε καθώς και για τον εκτιμώμενο χρόνο που απομένει μέχρι την ολοκλήρωση όλων των σωματιδίων. Η έξοδος της εφαρμογής εξαρτάται από τη λειτουργία. Στην περίπτωση της λειτουργίας GEOMETRY, η έξοδος είναι αρχείο της μορφής .heprep. Στη περίπτωση της βασικής λειτουργίας SPECTRUM, η έξοδος του προγράμματος εξαρτάται από την επιλογή της λειτουργίας ANALYTIC/SYNOPTIC. Στη περίπτωση της λειτουργίας ANALYTIC παράγονται δύο αρχεία .csv στα οποία προστίθενται εγγραφές κατά τη διάρκεια που η προσομοίωση εκτελείται. Στο ένα αρχείο προστίθεται μία εγγραφή κάθε φορά που δημιουργείται ένα νέο σωματίδιο ενώ στο άλλο κάθε φορά που ένα σωματίδιο περνά από ένα επίπεδο καταγραφής. Στη περίπτωση της λειτουργίας SYNOPTIC, οι πληροφορίες αυτές αποθηκεύονται και επεξεργάζονται με το πέρας της προσομοίωσης. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας καταγράφεται σε μία σειρά αρχείων .csv τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δημιουργία ιστογραμμάτων. Και στις δύο λειτουργίες με το τέλος της προσομοίωσης δημιουργείται αρχείο σχετικά με τις ρυθμίσεις που επιλέχτηκαν για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Η δομή των αρχείων εξόδου της προσομοίωσης δίνεται στον πίνακα 4.3.

MODE	DESCRIPTION	OUTPUT FILE	FILE DESCRIPTION	FIELDS
ANALYTIC	RECORDS ARE APPENDED IN THE OUTPUT FILES EACH TIME A SECONDARY PARTICLE IS GENERATED OR CROSSES A TRACKING LAYER	RUNIDxxx_SECONDARY.csv	DATA COLLECTED WHEN A SECONDARY PARTICLE IS GENERATED	<ul style="list-style-type: none"> <li>PARTICLE NAME</li> <li>HEIGHT OF GENERATION (m)</li> <li>KIN. ENERGY (eV)</li> </ul>
		RUNIDxxx_LAYER.csv	DATA COLLECTED WHEN A SECONDARY PARTICLE CROSSES A TRACKING LAYER	<ul style="list-style-type: none"> <li>ATM. DEPTH (g/cm<sup>2</sup>)</li> <li>HEIGHT (m)</li> <li>PARTICLE NAME</li> <li>KIN. ENERGY (eV)</li> <li>LONGITUDE POSITION (m) (+E   -W)</li> <li>LATITUDE POSITION (m) (+N   -S)</li> <li>ZENITH ANGLE (deg)</li> <li>AZIMUTH ANGLE (deg)</li> <li>TIME (μs)</li> </ul>
SYNOPTIC	COLLECTED DATA ARE STORED AND PROCESSED BY THE APPLICATION. AFTER THE SIMULATION IS FINISHED. THE OUTPUT FILES ARE GENERATED CONTAINING PROCESSED DATA THAT CAN BE USED FOR HISTOGRAMS	RUNIDxxx_SECONDARY_ENERGY.csv	ENERGY DISTRIBUTION OF SECONDARY PARTICLES AT THE TIME OF THEIR GENERATION	<ul style="list-style-type: none"> <li>PARTICLE NAME</li> <li>KIN. ENERGY (order of magnitude)</li> <li>NUMBER OF PARTICLES</li> </ul>
		RUNIDxxx_SECONDARY_HEIGHT.csv	NUMBER OF SECONDARY PARTICLES THAT ARE GENERATED AT EACH HEIGHT	<ul style="list-style-type: none"> <li>PARTICLE NAME</li> <li>HEIGHT OF GENERATION (km)</li> <li>NUMBER OF PARTICLES</li> <li>AVGKIN. ENERGY (eV)</li> </ul>
		RUNIDxxx_SECONDARY_TOTAL.csv	TOTAL INFORMATION ABOUT SECONDARY PARTICLES	<ul style="list-style-type: none"> <li>PARTICLE NAME</li> <li>NUMBER OF PARTICLES</li> <li>AVGHEIGHT OF GENERATION (m)</li> <li>AVGKIN. ENERGY (eV)</li> </ul>
		RUNIDxxx_LAYERS_ENERGY.csv	ENERGY DISTRIBUTION OF PARTICLES AT EACH TRACKING LAYER	<ul style="list-style-type: none"> <li>ATM. DEPTH (g/cm<sup>2</sup>)</li> <li>HEIGHT (m)</li> <li>PARTICLE NAME</li> <li>KIN. ENERGY (order of magnitude)</li> <li>NUMBER OF PARTICLES</li> </ul>
		RUNIDxxx_LAYERS_TIME.csv	ARRIVAL TIME OF PARTICLES AT EACH TRACKING LAYER	<ul style="list-style-type: none"> <li>ATM. DEPTH (g/cm<sup>2</sup>)</li> <li>HEIGHT (m)</li> <li>PARTICLE NAME</li> <li>TIME (μs)</li> <li>NUMBER OF PARTICLES</li> </ul>
		RUNIDxxx_LAYERS_DIRECTION.csv	ZENITH-AZIMUTH DISTRIBUTION OF PARTICLES AT EACH TRACKING LAYER	<ul style="list-style-type: none"> <li>ATM. DEPTH (g/cm<sup>2</sup>)</li> <li>HEIGHT (m)</li> <li>PARTICLE NAME</li> <li>ZENITH ANGLE (deg)</li> <li>AZIMUTH ANGLE (deg)</li> <li>NUMBER OF PARTICLES</li> </ul>
		RUNIDxxx_LAYERS_POSITION.csv	SPATIAL DISTRIBUTION OF PARTICLES AT EACH TRACKING LAYER	<ul style="list-style-type: none"> <li>ATM. DEPTH (g/cm<sup>2</sup>)</li> <li>HEIGHT (m)</li> <li>PARTICLE NAME</li> <li>LONGITUDE POSITION (Km) (+E   -W)</li> <li>LATITUDE POSITION (Km) (+N   -S)</li> <li>NUMBER OF PARTICLES</li> <li>AVGKIN. ENERGY (eV)</li> <li>AVG ZENITH (deg)</li> <li>AVG AZIMUTH (deg)</li> <li>AVGTIME (μs)</li> </ul>
		RUNIDxxx_LAYERS_TOTAL.csv	TOTAL INFORMATION OF THE PARTICLES AT EACH TRACKING LAYER	<ul style="list-style-type: none"> <li>ATM. DEPTH (g/cm<sup>2</sup>)</li> <li>HEIGHT (m)</li> <li>PARTICLE NAME</li> <li>NUMBER OF PARTICLES</li> <li>AVGKIN. ENERGY (eV)</li> <li>AVG LONGITUDE POSITION (m) (+E   -W)</li> <li>AVG LATITUDE POSITION (m) (+N   -S)</li> <li>AVG ZENITH (deg)</li> <li>AVG AZIMUTH (deg)</li> <li>AVGTIME (μs)</li> </ul>

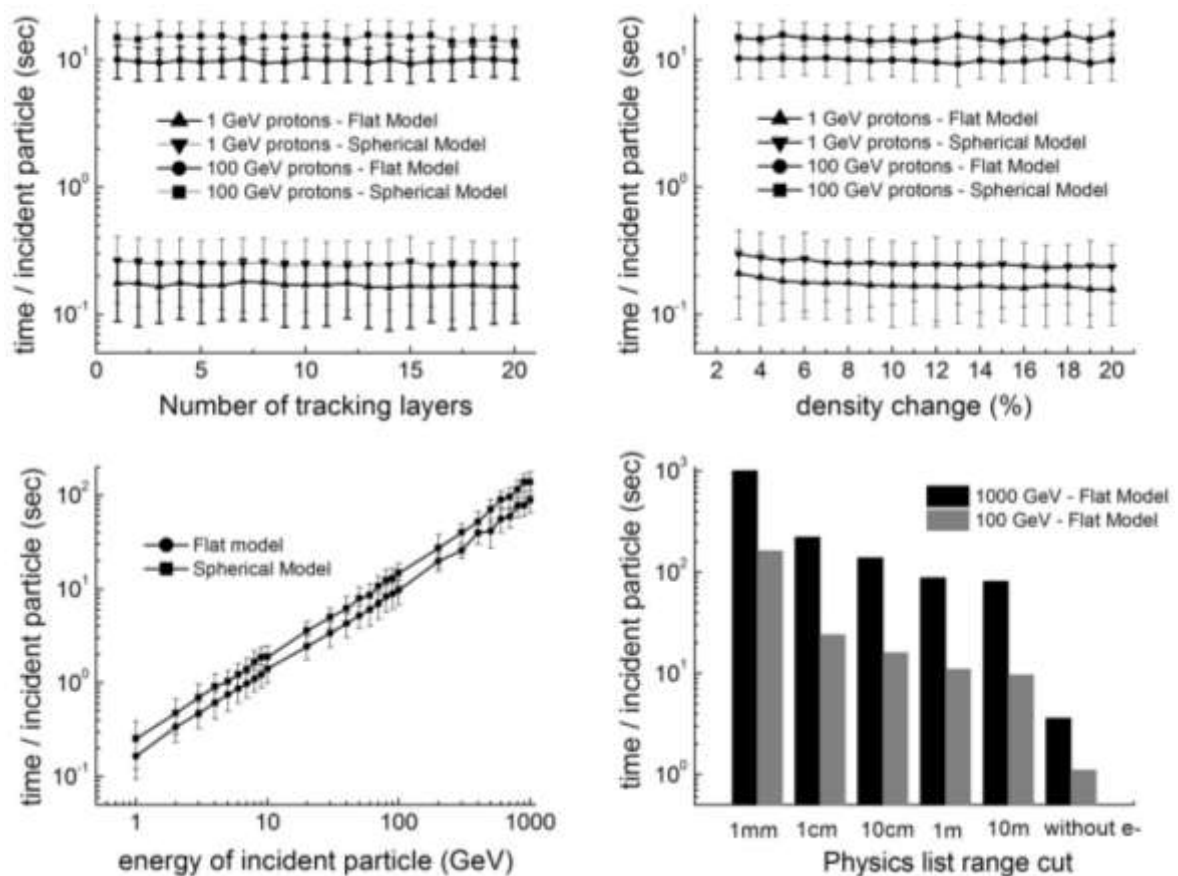
**Πίνακας 4.3:** Δομή αρχείων εξόδου της εφαρμογής ανάλογα με την επιλογή της λειτουργίας ANALYTIC-SYNOPTIC. Όπου xxx συμπληρώνεται από την εφαρμογή το unix timestamp κατά την έναρξη της προσομοίωσης. Συμπληρωματικά με τα ανωτέρω αρχεία δημιουργείται το αρχείο RUNIDxxx\_INFO.txt που περιέχει της παραμέτρους με τις οποίες πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση.

Δεδομένου ότι η εκτέλεση της εφαρμογής προϋποθέτει ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων, η χρονική απόδοση της προσομοίωσης μπορεί να επηρεάζεται από πολλές από αυτές. Ο αριθμός των επιπέδων καταγραφής, ο αριθμός των τμημάτων που διαχωρίζεται η ατμόσφαιρα, η χρήση επίπεδου ή σφαιρικού μοντέλου μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια του αποτελέσματος με αντίβαρο την χρονική απόδοση. Ωστόσο, η πιο κρίσιμη παράμετρος για τη χρονική απόδοση αναμένεται να είναι η ενέργεια των εισερχόμενων σωματιδίων. Ο λόγος είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια του σωματιδίου τόσο μεγαλύτερη έκταση έχει ο καταιγισμός μέσα στην ατμόσφαιρα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται γραφικά στο σχήμα 4.24 όπου, μέσω της λειτουργίας GEOMETRY, αποδίδεται ο καταιγισμός που προκαλείται από ένα πρωτόνιο που εισέρχεται κάθετα στην ατμόσφαιρα, στις περιπτώσεις ενέργειας 1 και 10 GeV.



**Σχήμα 4.24:** Γραφική απεικόνιση καταιγισμού εξαιτίας πρωτονίου ενέργειας 1 GeV (επάνω) και 10 GeV (κάτω) που εισέρχεται κάθετα στην ατμόσφαιρα. Παρατηρείται η απόκλιση της τροχιάς του πρωτονίου λόγω του μαγνητικού πεδίου η οποία είναι μικρότερη στην περίπτωση των 10 GeV λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας του σωματιδίου

Λόγω της αύξησης του μεγέθους του καταιγισμού με την ενέργεια, είναι αναμενομένη η εξάρτηση της ενεργειακής απόδοσης από τα ενεργειακά κατώφλια των δευτερογενών σωματιδίων. Ιδιαίτερα τα ενεργειακά κατώφλια για τη παραγωγή ή τη προσομοίωση των σωματιδίων που εμφανίζονται σε μεγάλη αφθονία αναμένεται να επηρεάζουν τη χρονική απόδοση κατά πολλές τάξεις μεγέθους. Κάποια συγκριτικά αποτελέσματα σχετικά με την χρονική απόδοση της εφαρμογής όταν αυτή εκτελείται σε έναν τυπικό υπολογιστή αποδίδεται στο σχήμα 4.25:



**Σχήμα 4.25:** Χρονική απόδοση της εφαρμογής όταν χρησιμοποιείται η physics list QGSP\_BIC\_HP με κατώφλι εμβέλειας 1m. Η απόδοση εξαρτάται έντονα από την ενέργεια των σωματιδίων που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα και μπορεί να βελτιωθεί αυξάνοντας το κατώφλι εμβέλειας ή αποκλείοντας ορισμένα σωματίδια από την προσομοίωση.



Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας κάθετες μονοενεργητικές δέσμες πρωτονίων τα οποία είναι τα πιο άφθονα σωματίδια πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Η physics list που χρησιμοποιήθηκε ήταν η QGSP\_BIC\_HP με κατώφλι εμβέλειας το 1 m. Παρατηρείται ότι η χρήση του σφαιρικού μοντέλου αυξάνει τον χρόνο της προσομοίωσης κατά περίπου 50%. Επιπλέον διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των επιπέδων καταγραφής των σωματιδίων δεν επηρεάζει την απόδοση. Από την άλλη μεριά, ο αριθμός των τμημάτων που διαμερίζεται η ατμόσφαιρα επηρεάζει ελάχιστα την απόδοση όταν η ενέργεια του εισερχόμενου πρωτονίου είναι 1 GeV. Όταν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη, ο αριθμός των τμημάτων της ατμόσφαιρας δεν επηρεάζει την απόδοση, πιθανότατα επειδή η απόδοση καθορίζεται από τον τεράστιο αριθμό των δευτερογενών σωματιδίων. Ωστόσο, όπως αναμενόταν, η απόδοση καθορίζεται κυρίως από την ενέργεια του εισερχόμενου σωματιδίου. Ο χρόνος της προσομοίωσης αυξάνεται κατά τρεις τάξεις μεγέθους όταν η ενέργεια αυξάνεται από το 1 GeV στα 1000 GeV. Σε αυτές τις ενέργειες ο αριθμός των δευτερογενών σωματιδίων είναι τεράστιος και προκειμένου η προσομοίωση να ολοκληρωθεί σε κάποιο λογικό χρόνο θα πρέπει να τεθούν κάποια ενεργειακά κατώφλια. Το ιστόγραμμα του σχήματος 4.25 δείχνει πως το κατώφλι εμβέλειας των σωματιδίων μπορεί να μειώσει το χρόνο της προσομοίωσης. Επιπλέον μείωση του χρόνου προσομοίωσης μπορεί να επιτευχθεί θέτοντας επιπλέον ενεργειακά κατώφλια για την παραγωγή ή την προσομοίωση σωματιδίων.

#### 4.3.5. Επιλογή παραμέτρων και physics list

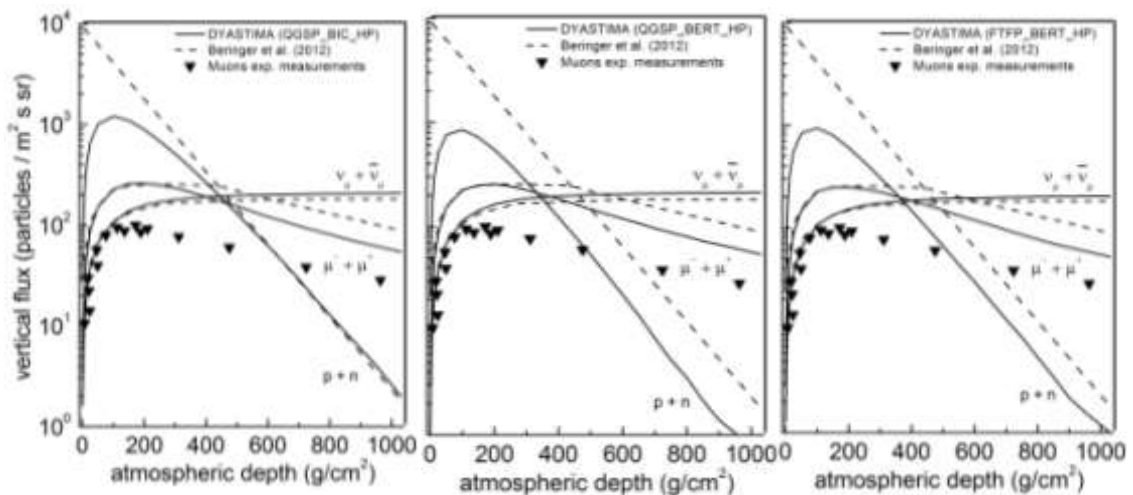
Από τις παραμέτρους που πρέπει να οριστούν, ο χρήστης πρέπει να δώσει ιδιαίτερη προσοχή:

- στην επιλογή ανάμεσα στο επίπεδο και το σφαιρικό μοντέλο
- στην μεταβολή της πυκνότητας ανάμεσα στα στρώματα που διαμερίζεται η ατμόσφαιρα
- στο κατώφλι εμβέλειας και στα ενεργειακά κατώφλια των σωματιδίων
- στην επιλογή της physics list

Η κατάλληλη επιλογή ανάμεσα στο επίπεδο και στο σφαιρικό μοντέλο εξαρτάται από τη ζενιθιακή γωνία των σωματιδίων που εισέρχονται (όπως ορίζονται στο `spectrum.dat`). Στην περίπτωση που τα εισερχόμενα σωματίδια έχουν μικρές ζενιθιακές γωνίες η επιλογή του επίπεδου μοντέλου είναι επαρκής. Για μεγάλες ζενιθιακές γωνίες όμως η καμπυλότητα της Γης γίνεται σημαντική και πρέπει να επιλεγεί το σφαιρικό μοντέλο. Σχετικά με την μεταβολή της πυκνότητας ανάμεσα στα στρώματα της ατμόσφαιρας, μια τιμή ανάμεσα στο 5% και 10% συνεπάγεται τη διαμέριση σε μερικές εκατοντάδες στρώματα, το οποίο θεωρείται επαρκές. Όσον αφορά τον καθορισμό των ενεργειακών κατωφλίων, αυτός είναι απαραίτητος προκειμένου να απορριφθούν από την προσομοίωση τα σωματίδια με πολύ χαμηλή ενέργεια, τα οποία δεν προσθέτουν σημαντική πληροφορία στην προσομοίωση και την καθυστερούν. Η επιλογή ενός κατωφλίου εμβέλειας (`range cut`) παρέχει έναν εύκολο και αποδοτικό τρόπο να απορρίπτεται η παραγωγή αυτών των σωματιδίων, χωρίς να απαιτείται από το χρήστη ο καθορισμός ενός ενεργειακού κατωφλίου παραγωγής (`production cut`) για κάθε σωματίδιο. Ωστόσο ο χρήστης πρέπει να λάβει υπόψη του ότι, δεδομένης της μείωσης της πυκνότητας της ατμόσφαιρας με το υψόμετρο, ο ορισμός ενός κατωφλίου εμβέλειας οδηγεί στον ορισμό διαφορετικών ενεργειακών κατωφλίων παραγωγής σε κάθε υψόμετρο. Αν αυτό δεν είναι επιθυμητό τότε ο χρήστης πρέπει να ορίσει σταθερά ενεργειακά κατώφλια παραγωγής (αρχείο `ecut_production.dat`). Παρ' όλα αυτά, δεδομένης της κλίμακας του καταιγισμού, μια τιμή για το κατώφλι εμβέλειας ίση με 1 m θεωρείται απολύτως ασφαλής επιλογή. Όσον αφορά τα ενεργειακά κατώφλια προσομοίωσης (αρχείο `ecut_simulation.dat`), ο χρήστης πρέπει να λάβει υπόψη του ότι η παραγωγή συγκεκριμένων σωματιδίων επηρεάζεται από τον αποκλεισμό των σωματιδίων από τα οποία προέρχονται. Τέλος, τα ενεργειακά κατώφλια ανίχνευσης (αρχείο `ecut_tracking.dat`) δεν επηρεάζει την ακρίβεια της προσομοίωσης παρά μόνο τις πληροφορίες που συλλέγονται.

Σχετικά με την κατάλληλη `physics list`, η υψηλή ενέργεια των εισερχόμενων σωματιδίων στην ατμόσφαιρα υποδεικνύει ότι πρέπει να χρησιμοποιηθούν `physics lists` κατάλληλες για υψηλές ενέργειες. Από την άλλη μεριά, η χρήση κάποιας `physics list` που περιλαμβάνει το μοντέλο `NeutronHP` θεωρείται ενδεδειγμένη δεδομένου ότι χειρίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια την ανελαστική σκέδαση των νετρονίων, η οποία επηρεάζει

σημαντικά την παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα. Επομένως, όπως και στην προσομοίωση του μετρητή νετρονίων, ενδεδειγμένες physics lists θεωρούνται οι QGSP\_BIC\_HP, QGSP\_BERT\_HP και FTFP\_BERT\_HP. Προκειμένου να επιλεγεί η καταλληλότερη physics list, έγινε υπολογισμός της κάθετης ροής των σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα και σύγκριση του αποτελέσματος με αυτά των Beringer et al. (2012). Στη συγκεκριμένη δημοσίευση έγινε χρήση πρωτογενούς φάσματος πρωτονίων, ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων. Το φάσμα αυτό χρησιμοποιήθηκε στην προσομοίωση μέσω επιλογής των κατάλληλων παραμέτρων της παραμετροποίησης των Papini et al. (1996). Τα αποτελέσματα για τις τρεις physics lists δίνονται στο σχήμα 4.26:



**Σχήμα 4.26:** Κάθετη ροή σωματιδίων με ενέργεια >1GeV μέσα στην ατμόσφαιρα και σύγκριση με τα αποτελέσματα των Beringer et al (2012) για διάφορες physics lists. Παρατηρούνται μεγάλες διαφοροποιήσεις όσον αφορά τη ροή των πρωτονίων/νετρονίων, ενώ η καλύτερη προσέγγιση παρατηρείται με τη physics list QGSP\_BIC\_HP.

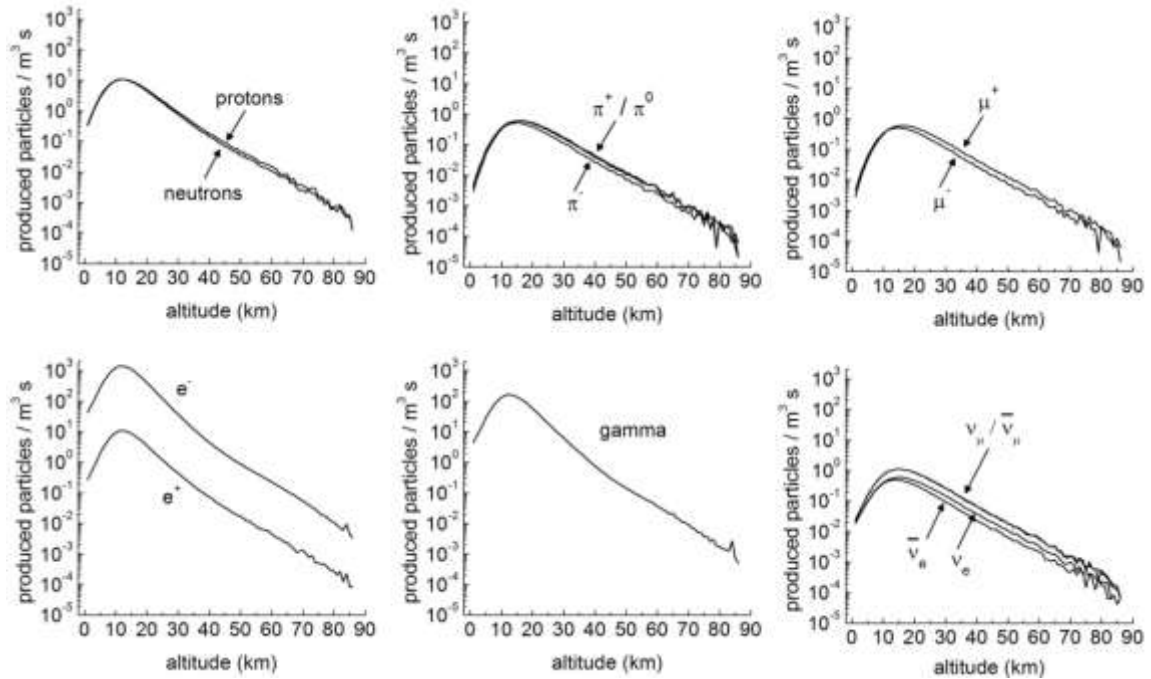
Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η ροή που υπολογίζεται για τα νετρίνα και τα μίονια δε διαφέρει πολύ για τις διαφορετικές physics lists. Στην περίπτωση της FTFP\_BERT\_HP η ροή των νετρίνων προσεγγίζει ελαφρώς καλύτερα τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Ωστόσο μεγάλες διαφορές παρατηρούνται στην περίπτωση των πρωτονίων/νετρονίων. Ενώ τα αποτελέσματα των FTFP\_BERT\_HP και QGSP\_BERT\_HP διαφέρουν από την

βιβλιογραφία, τα αποτελέσματα της QGSP\_BIC\_HP συμπίπτουν απόλυτα. Καταλήγουμε λοιπόν στο ίδιο συμπέρασμα με την περίπτωση της προσομοίωσης του μετρητή νετρονίων 6NM-64, ότι η καταλληλότερη physics list είναι η QGSP\_BIC\_HP.

#### 4.3.6. Αποτελέσματα

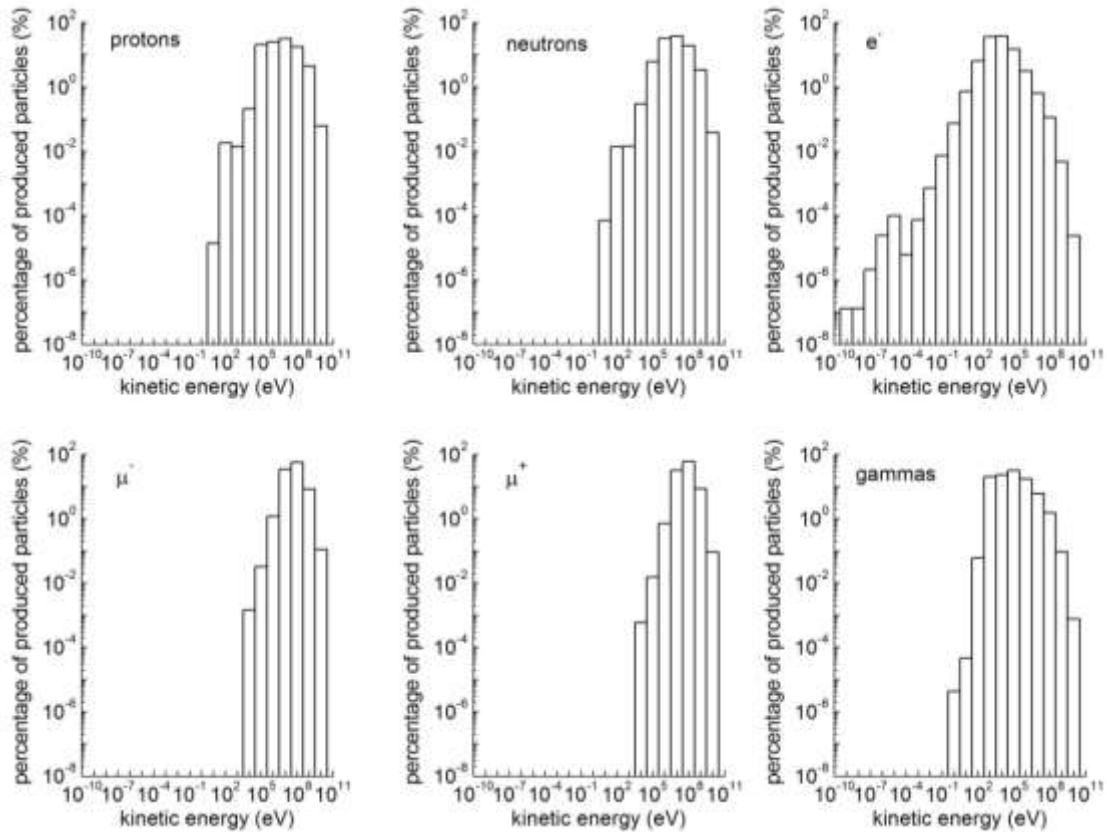
Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα από την εφαρμογή προσομοίωσης των καταιγισμών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα. Σε συνέχεια των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για την επιλογή της QGSP\_BIC\_HP ως την καταλληλότερη physics list, το φάσμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ίδιο με των Beringer et al. (2012). Τα εισερχόμενα σωματίδια ακολουθούν γωνιακή κατανομή με ζενιθιακές γωνίες εισόδου από 0 έως 70° και αζιμουθιακές γωνίες από 0 έως 360°. Για την προσομοίωση επιλέχθηκε το σφαιρικό μοντέλο, ενώ για την παραγωγή των σωματιδίων επιλέχτηκε κατώφλι εμβέλειας 1m. Η δομή της ατμόσφαιρας αναπαριστά το μοντέλο International Standard Atmosphere, ενώ το μαγνητικό πεδίο φέρει τιμές που αντιστοιχούν στο σταθμό της Αθήνας.

Η πρώτη πληροφορία που παρέχει το DYASTIMA αφορά τα δευτερογενή σωματίδια τη στιγμή της δημιουργίας τους. Ο καταιγισμός αποτελείται από διάφορους τύπους σωματιδίων και ασταθών πυρήνων, ωστόσο μόνο ορισμένα από αυτά παρουσιάζονται. Στο σχήμα 4.27 αποτυπώνεται πόσα πρωτόνια, νετρόνια, πιόνια, μιόνια, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, γάμμα και νετρίνα παράγονται σε κάθε υψόμετρο:



**Σχήμα 4.27:** Αριθμός παραγόμενων πρωτονίων/νετρονίων, πιονίων, μιονίων, ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων, γάμμα και νετρίνων για κατώφλι εμβέλειας 1m. Η παραγωγή παρουσιάζει μέγιστο από τα 10 έως τα 20 km υψόμετρο. Τα ηλεκτρόνια και τα γάμμα είναι τα πιο πολυάριθμα εξαιτίας των χαμηλής ενέργειας σωματιδίων που παράγονται λόγω ιονισμού, Compton, φωτοηλεκτρικού φαινομένου και Bremsstrahlung.

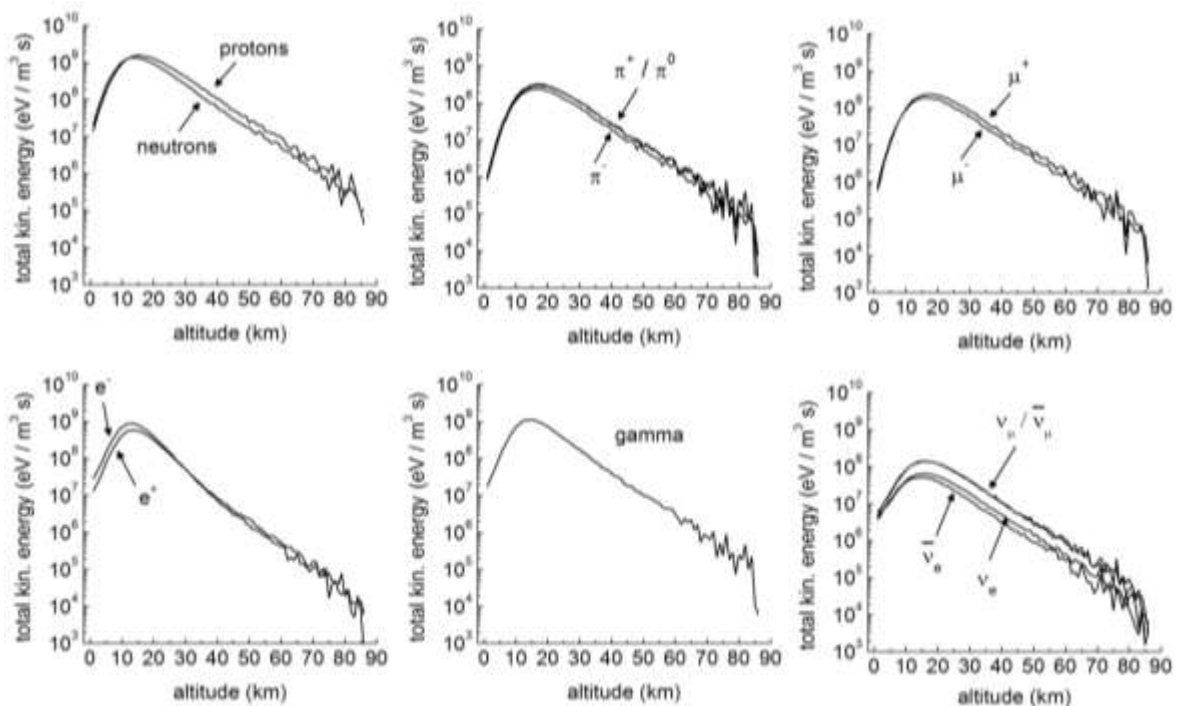
Όπως παρατηρείται, η παραγωγή των σωματιδίων παρουσιάζει ένα μέγιστο στα 10 με 20 km ύψος από την επιφάνεια της Γης. Τα σωματίδια με την μεγαλύτερη αφθονία είναι ηλεκτρόνια και γάμμα, ενώ ακολουθούν πρωτόνια και νετρόνια. Ο απόλυτος αριθμός σωματιδίων δεν παρέχει αρκετές πληροφορίες δεδομένου ότι εξαρτάται σημαντικά από το κατώφλι εμβέλειας που έχει οριστεί. Ένα κατώφλι εμβέλειας μεγαλύτερο από 1m θα αποκλείσει από την προσομοίωση σωματίδια με χαμηλή ενέργεια μειώνοντας σημαντικά τον αριθμό των μετρούμενων σωματιδίων. Για το λόγο αυτό είναι σημαντικό να μελετούμε την ενεργειακή κατανομή των δευτερογενών σωματιδίων, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στα σωματίδια χαμηλής ενέργειας. Αυτή η πληροφορία παρέχεται από το DYASTIMA και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.28:



**Σχήμα 4.28:** Κατανομή κινητικής ενέργειας των παραγόμενων πρωτονίων, νετρονίων, ηλεκτρονίων, μιονίων και γάμμα για κατώφλι εμβέλειας  $1m$ . Το φάσμα των ηλεκτρονίων και γάμμα ξεκινά από χαμηλές ενέργειες λόγω ιονισμού, Compton, φωτοηλεκτρικού φαινομένου και Bremsstrahlung.

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια μοιράζονται μία παρόμοια ενεργειακή κατανομή που ξεκινάει από τα  $10$  eV και φτάνει τα  $10^{10}$  eV, ενώ τα περισσότερα σωματίδια έχουν ενέργεια με τάξη μεγέθους  $10^5 - 10^9$  eV. Τα αρνητικά και τα θετικά μίονια επίσης μοιράζονται μία παρόμοια κατανομή που ξεκινάει από τα  $10^4$  eV και φτάνει τα  $10^{10}$  eV, ενώ τα περισσότερα σωματίδια έχουν ενέργεια με τάξη μεγέθους  $10^7 - 10^9$  eV. Το φάσμα των γάμμα ξεκινάει από πιο χαμηλές ενέργειες λόγω της Bremsstrahlung, ωστόσο τα περισσότερα σωματίδια έχουν ενέργειες με τάξη μεγέθους  $10^3 - 10^8$  eV. Από την άλλη μεριά τα ηλεκτρόνια έχουν ένα ευρύ φάσμα που ξεκινάει από τα  $10^{-9}$  eV, ωστόσο τα περισσότερα ηλεκτρόνια έχουν ενέργεια με τάξη μεγέθους  $10^2 - 10^5$  eV. Τα ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας είναι το αποτέλεσμα της κίνησης των γάμμα και των φορτισμένων

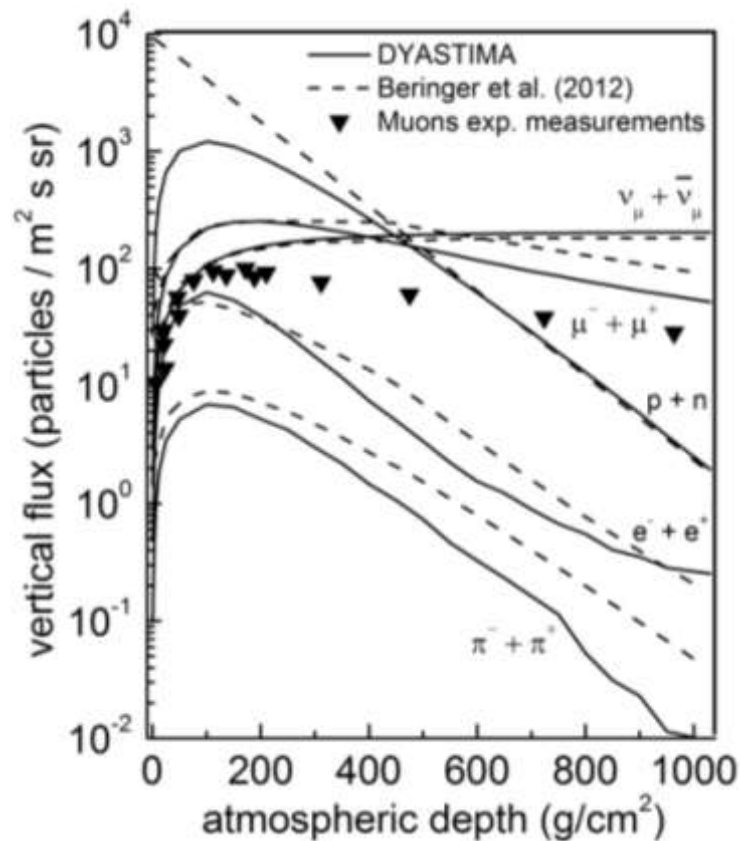
σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα. Τα γάμμα χάνουν την ενέργειάς τους λόγω του φαινομένου Compton και τελικά απορροφούνται λόγω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου ενώ τα φορτισμένα σωματίδια ιονίζουν την ύλη. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η παραγωγή ηλεκτρονίων με πολύ χαμηλές ενέργειες. Το σχήμα 4.29 παρέχει συνδυαστική πληροφορία τους αριθμούς και της ενέργειας των σωματιδίων που παράγονται, αποδίδοντας την ολική κινητική ενέργεια των παραγόμενων σωματιδίων σαν συνάρτηση του ύψους.



**Σχήμα 4.29:** Ολική κινητική ενέργεια των παραγόμενων πρωτονίων/νετρονίων, πιονίων, μιονίων, ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων, γάμμα και νετρίνων για κατώφλι εμβέλειας 1m. Παρότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων και γάμμα είναι μία με δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από των άλλων σωματιδίων (σύμφωνα με το σχήμα 4.27), η συνεισφορά τους στην ενέργεια είναι παρόμοια με των υπολοίπων σωματιδίων αφού ένας μεγάλος αριθμός από αυτά έχουν πολύ χαμηλή ενέργεια.

Παρατηρείται ότι παρότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων και γάμμα είναι μία με δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερος από ότι των άλλων σωματιδίων (σύμφωνα με το σχήμα 4.27), η συνεισφορά τους στην ενέργεια είναι παρόμοια με των άλλων σωματιδίων αφού ένα μεγάλο ποσοστό από αυτά σχετίζεται με σωματίδια πολύ χαμηλής ενέργειας.

Τα προηγούμενα διαγράμματα σχετίζονται με τα σωματίδια που παράγονται τη στιγμή της δημιουργίας τους. Αυτό που είναι πιο σημαντικό είναι ο αριθμός των σωματιδίων που ανιχνεύονται σε κάθε επίπεδο. Τονίζεται ότι ο αριθμός των σωματιδίων που ανιχνεύονται σε κάθε υψόμετρο διαφέρουν από τον αριθμό των σωματιδίων που δημιουργούνται στο ίδιο υψόμετρο δεδομένου ότι τα υψηλής ενέργειας σωματίδια μπορούν να ταξιδέψουν σε μεγάλες αποστάσεις. Τα διαγράμματα με τη ροή των σωματιδίων παρουσιάστηκαν ήδη κατά την επιλογή της physics list. Στο σχήμα 4.30 παρουσιάζεται το ίδιο διάγραμμα με την προσθήκη των ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων και των πιονίων:



**Σχήμα 4.30:** Κάθετη ροή σωματιδίων με ενέργεια  $>1$  GeV μέσα στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των Beringer et al. (2012). Η ταύτιση των αποτελεσμάτων με τη βιβλιογραφία επικυρώνει τα αποτελέσματα από το DYASTIMA.

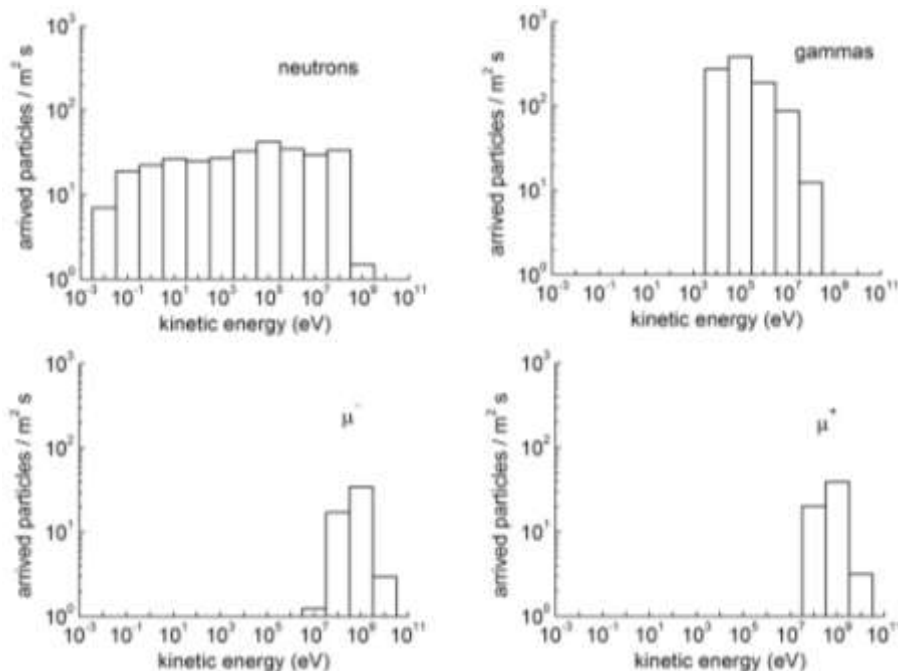
Το δεδομένα για να δημιουργηθεί το διάγραμμα αυτό έχουν συλλεχθεί με τον ορισμό αρκετών επιπέδων ανίχνευσης μέσα στην ατμόσφαιρα. Στο διάγραμμα αυτό



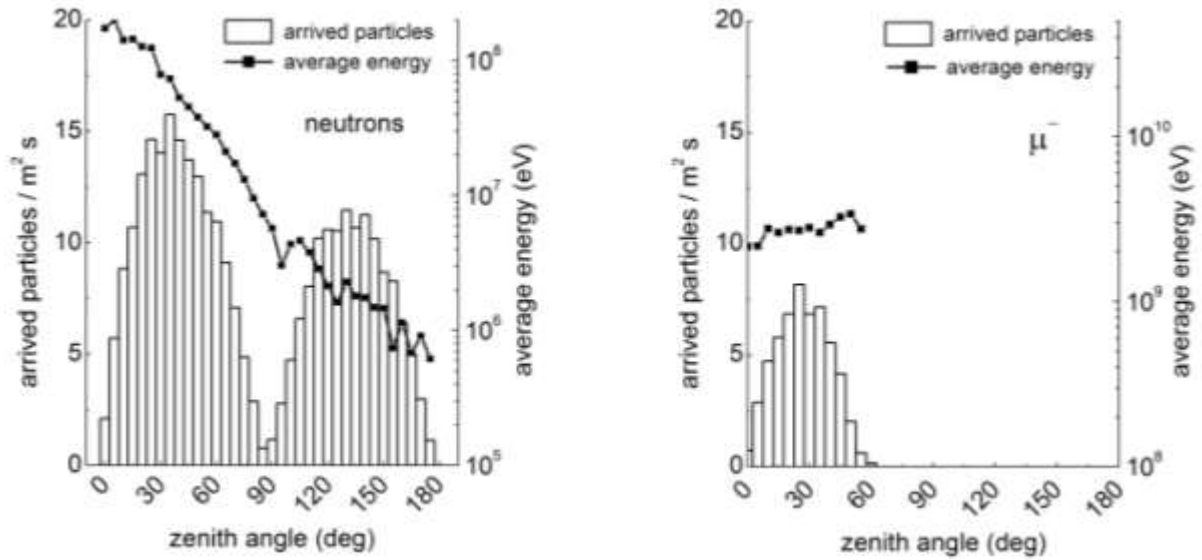
παρουσιάζονται μόνο τα σωματίδια με κάθετες διευθύνσεις και με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 GeV προκειμένου να υπάρξει ευθεία σύγκριση με τα αποτελέσματα των Beringer et al. (2012). Όπως έχει ήδη επισημανθεί κατά την επιλογή της κατάλληλης physics list, παρατηρείται συμφωνία με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Η κάθετη ροή είναι μέγιστη σε ατμοσφαιρικό βάθος περίπου  $100 \text{ g/cm}^2$  (περίπου 16 km υψόμετρο). Σε αυτό το υψόμετρο η ροή των πρωτονίων/νετρονίων είναι μεγαλύτερη με τη ροή των μιονίων και των νετρίνων να ακολουθούν. Η ροή των σωματιδίων έπειτα μειώνεται καθώς προσεγγίζεται η επιφάνεια της θάλασσας. Σε ένα ατμοσφαιρικό βάθος περίπου  $450\text{-}500 \text{ g/cm}^2$  (περίπου 6 km υψόμετρο) η ροή των πρωτονίων/νετρονίων γίνεται μικρότερη από τη ροή των μιονίων και των νετρίνων, ενώ στην επιφάνεια της θάλασσας τα νετρίνα είναι σε μεγαλύτερη αφθονία από ότι τα μίονια. Οι ροές των ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων και των πιονίων είναι μικρότερες των υπολοίπων σωματιδίων σε όλα τα υψόμετρα. Τονίζεται ότι τα αποτελέσματα των πρωτονίων/νετρονίων και των νετρίνων είναι σχεδόν ταυτόσημα με τη βιβλιογραφία. Η διαφοροποίηση για τη περίπτωση των πρωτονίων/νετρονίων στα μικρά ατμοσφαιρικά βάθη οφείλεται στο γεγονός ότι στη προσομοίωση καταμετρήθηκαν μόνο τα πρωτόνια/νετρόνια που παρήχθησαν εντός της ατμόσφαιρας λόγω των αλληλεπιδράσεων ενώ στη βιβλιογραφία περιλαμβάνονται και τα πρωτόνια της κοσμικής ακτινοβολίας που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα. Από την άλλη μεριά, η υπολογιζόμενη ροή των μιονίων είναι ίδια με τη βιβλιογραφία μέχρι τα  $200 \text{ g/cm}^2$  και μικρότερη σε μεγαλύτερη ατμοσφαιρικά βάθη, ωστόσο είναι πιο κοντά στις πειραματικές μετρήσεις. Τέλος, τα αποτελέσματα των ηλεκτρονίων/ποζιτρονίων και των πιονίων είναι πολύ κοντά στη βιβλιογραφία.

Το DYASTIMA επιπλέον παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ενέργεια, τη διεύθυνση και τον χρόνο άφιξης των σωματιδίων σε κάθε ένα από τα ορισμένα επίπεδα ανίχνευσης. Αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στα σχήματα 4.31, 4.32 και 4.33. Σύμφωνα με το σχήμα 4.31, το οποίο απεικονίζει την ενεργειακή κατανομή στο επίπεδο της θάλασσας, προκύπτει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των μιονίων έχει ενέργειες με τάξη μεγέθους  $10^8$  και  $10^9$  eV, ενώ για το μεγαλύτερο ποσοστό των γάμμα η αντίστοιχη τιμή είναι από  $10^4$  έως  $10^7$  eV. Τα νετρόνια έχουν ένα ευρύ φάσμα που ξεκινά από τις θερμικές ενέργειες και φτάνει ενέργειες με τάξη μεγέθους  $10^8$  eV. Επιπλέον, σύμφωνα με το σχήμα 4.32 που αφορά τη διεύθυνση κίνησης των σωματιδίων στην

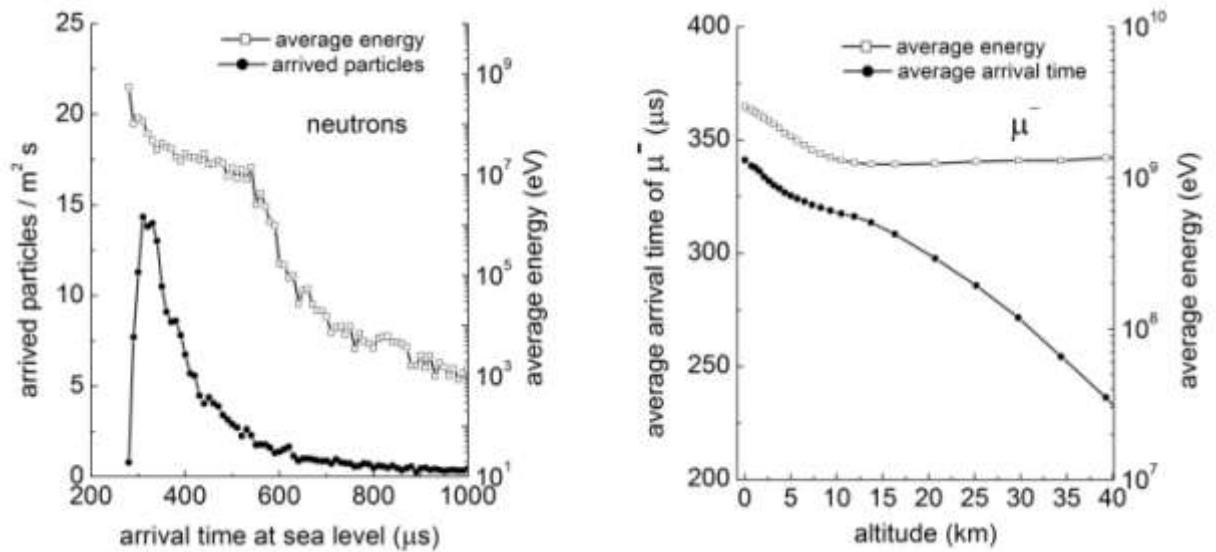
επιφάνεια της θάλασσας, τα μόνια έχουν ζενιθιακές γωνίες μέχρι  $60^\circ$ , ενώ η διεύθυνση των νετρονίων ακολουθεί μία ευρεία κατανομή που παρουσιάζει μέγιστο στις  $40^\circ$ . Παρατηρείται ότι υπάρχει ένα μεγάλο ποσοστό νετρονίων με ζενιθιακές γωνίες μεγαλύτερες των  $90^\circ$ , το οποίο σημαίνει ότι κινούνται προς τα επάνω. Τα νετρόνια αυτά είναι αποτέλεσμα ελαστικών σκεδάσεων και έχουν σημαντικά μικρότερες ενέργειες (μία με δύο τάξεις μεγέθους) σε σχέση με τα νετρόνια που κινούνται προς τα κάτω. Τέλος, κάποια αποτελέσματα σχετικά με το χρόνο άφιξης των σωματιδίων παρουσιάζονται στο σχήμα 4.33. Σύμφωνα με αυτό, ο χρόνος άφιξης των νετρονίων στην επιφάνεια της θάλασσας είναι περίπου 350  $\mu\text{s}$  μετά την είσοδο του πρωτογενούς σωματιδίου στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, υπάρχουν νετρόνια που καθυστερούν και φτάνουν στην επιφάνεια της θάλασσας πολύ αργότερα. Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα, ο χρόνος άφιξης των σωματιδίων σχετίζεται με την ενέργεια τους. Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται ο μέσος χρόνος άφιξης των μιονίων σε κάθε υψόμετρο. Παρατηρείται γραμμική συσχέτιση του χρόνου άφιξης και του υψομέτρου.



**Σχήμα 4.31:** Κινητική ενέργεια νετρονίων μιονίων και γάμμα που φτάνουν στην επιφάνεια της θάλασσας.

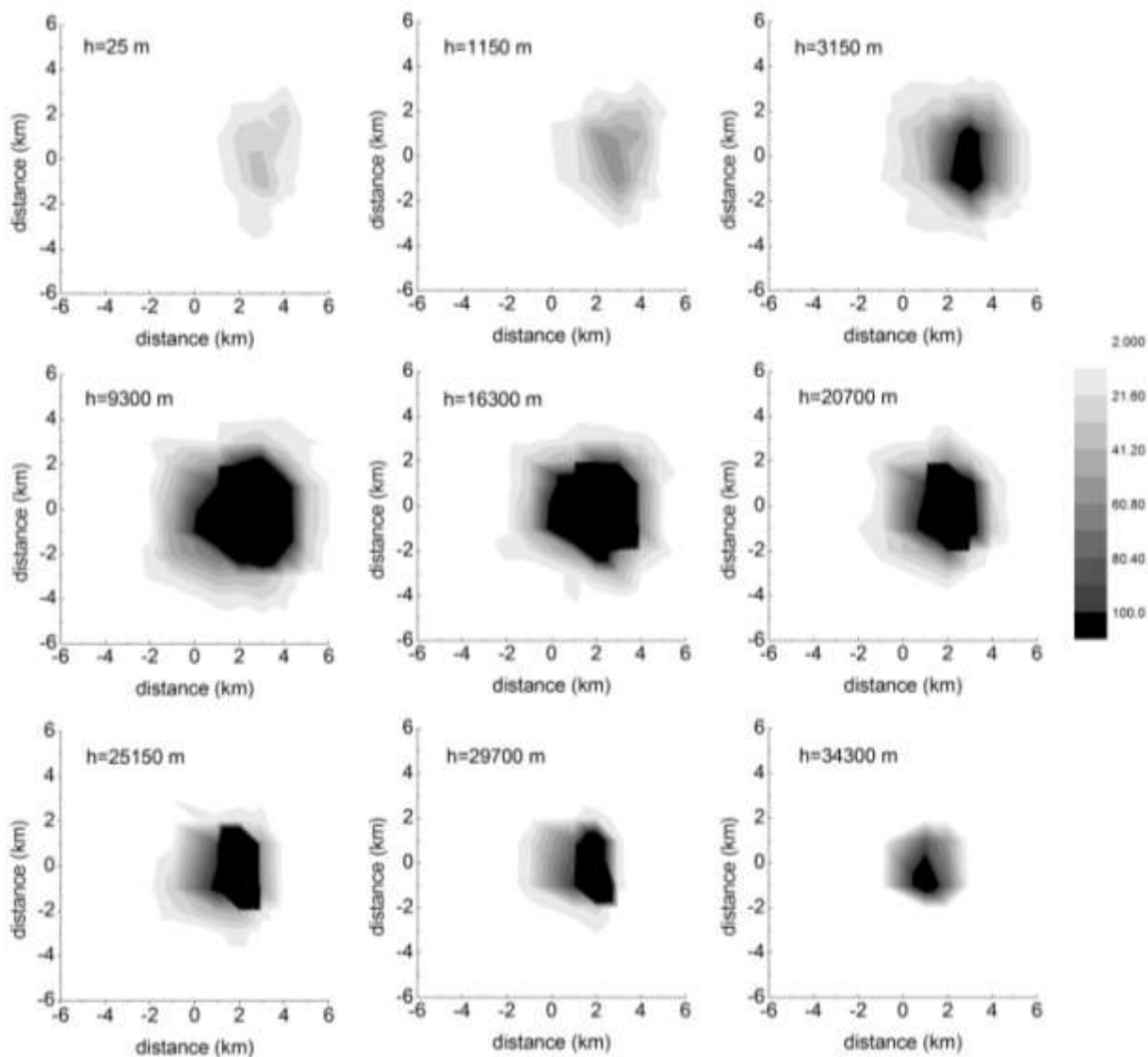


**Σχήμα 4.32:** Ζενιδιακή κατανομή νετρονίων και  $\mu^-$  που φτάνουν στην επιφάνεια της θάλασσας. Παρατηρούνται νετρόνια που κινούνται προς τα επάνω, επακόλουθο των ελαστικών σκεδάσεων. Τα νετρόνια αυτά έχουν πολύ πιο χαμηλές ενέργειες σε σχέση με εκείνα που κινούνται προς τα κάτω.

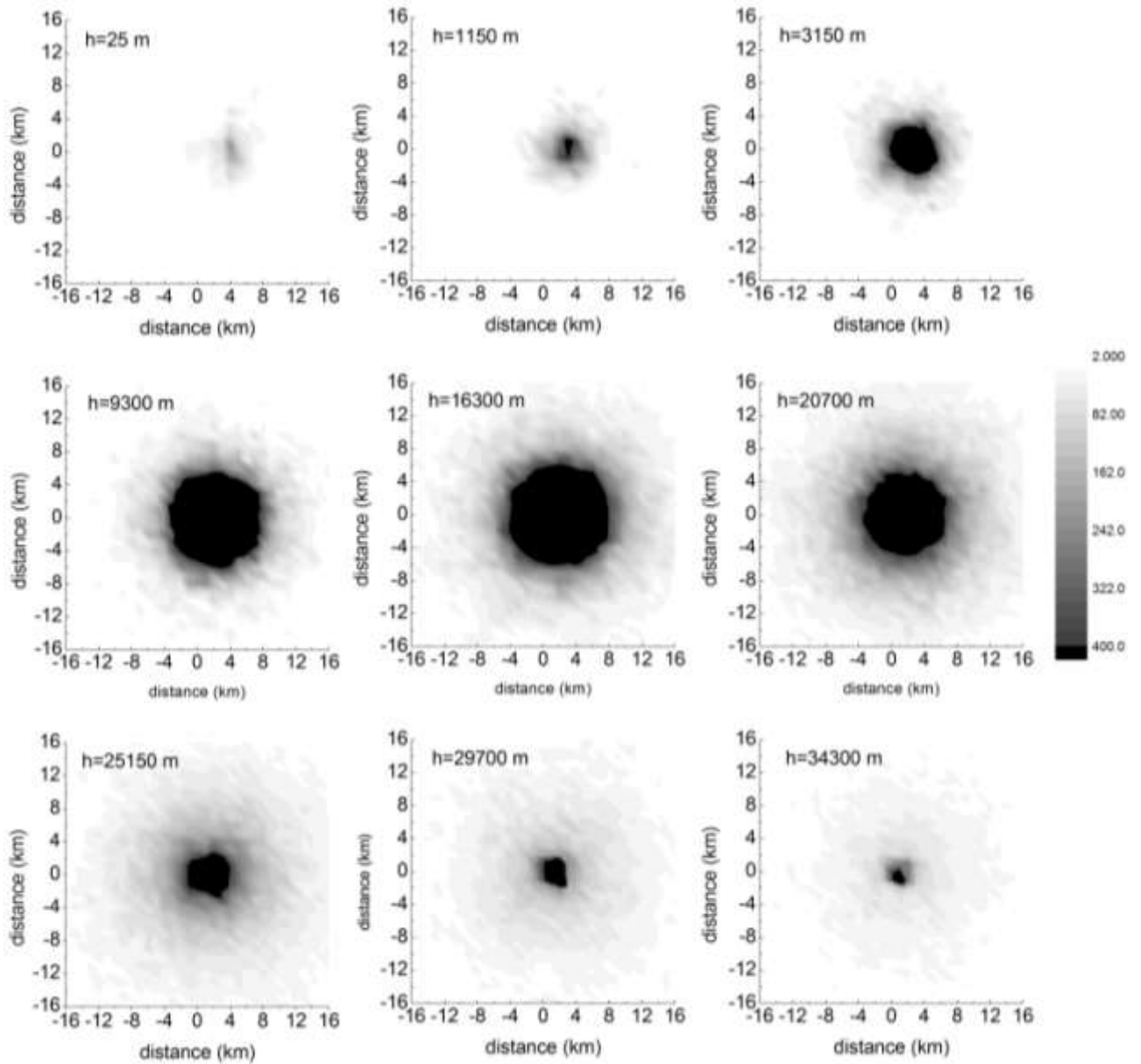


**Σχήμα 4.33:** Χρόνος άφιξης των νετρονίων στην επιφάνεια της θάλασσας και η αντίστοιχη κινητική ενέργεια. Τα περισσότερα νετρόνια φτάνουν σε 350  $\mu\text{s}$  αφού το πρωτογενές σωματίδιο εισέλθει στην ατμόσφαιρα, ωστόσο υπάρχουν νετρόνια χαμηλής ενέργειας που φτάνουν πιο καθυστερημένα. Στα δεξιά απεικονίζεται ο μέσος χρόνος άφιξης και η μέση κινητική ενεργεία των  $\mu^-$  σε σχέση με το υψόμετρο.

Τελειώνοντας, μια χρήσιμη λειτουργία του DYASTIMA είναι η παροχή της χωρικής κατανομής των σωματιδίων σε κάθε επίπεδο ανίχνευσης. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο όταν μελετούνται μονοενεργητικές δέσμες με σταθερή διεύθυνση προκειμένου να μελετηθεί η διάσταση του καταιγισμού. Τα σχήματα 4.34 και 4.35 παρουσιάζουν τη χωρική κατανομή σε διάφορα υψόμετρα για τα  $\mu^-$  και τα νετρόνια, όταν μια κάθετη δέσμη πρωτονίων με ενέργεια 10 GeV εισέρχεται στην ατμόσφαιρα. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση των μιονίων, ο καταιγισμός έχει διάσταση 8x8 km σε υψόμετρο 10 km. Πάνω και κάτω από αυτό το υψόμετρο η διάσταση του καταιγισμού μειώνεται και σαν αποτέλεσμα είναι πολύ μικρότερος στην επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα περισσότερα μίονια παράγονται σε υψόμετρο 15 km περίπου και διασπώνται καθώς κινούνται προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Παρόμοια είναι τα αποτελέσματα για την περίπτωση των νετρονίων με τη διαφορά ότι ο καταιγισμός έχει διπλάσια διάσταση και το μέγιστο εμφανίζεται στα 16 km υψόμετρο. Στη περίπτωση των νετρονίων η χωρική κατανομή σχηματίζει κύκλο λόγω του ότι η κίνηση των νετρονίων δεν επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο της Γης.



**Σχήμα 4.34:** Χωρική κατανομή  $\mu^-$  σε διάφορα υψόμετρα όταν μία κάθετη δέσμη νετρονίων με ενέργεια 10 GeV εισέρχεται στην ατμόσφαιρα. Η οριζόντια διάσταση του καταιγισμού είναι περίπου 8x8 km στο υψόμετρο των 10 km.



**Σχήμα 4.35:** Χωρική κατανομή νετρονίων σε διάφορα υψόμετρα όταν μία κάθετη δέσμη νετρονίων με ενέργεια 10 GeV εισέρχεται στην ατμόσφαιρα. Η οριζόντια διάσταση του καταιγισμού έχει διπλάσια διάσταση συγκριτικά με των  $\mu$  και παρουσιάζει το μέγιστο στο υψόμετρο των 16 km.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ V

### Συμπεράσματα και προοπτικές

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία σύνοψη των θεμάτων που μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια της εργασίας, δηλαδή της ανάπτυξης αλγορίθμων διόρθωσης δεδομένων των μετρητών νετρονίων, της ανάπτυξης εφαρμογών για τη διαχείριση των μετρήσεων και της ανάπτυξης προσομοιώσεων. Παράλληλα εντοπίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα και η συνεισφορά της εργασίας σε κάθε ένα από τα θέματα αυτά. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με τις προοπτικές που ανοίγονται για το μέλλον ως αποτέλεσμα της εργασίας.

#### 5.1. Συμπεράσματα

##### 5.1.1. Αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών μετρήσεων

Το πρώτο κύριο θέμα που αναπτύχθηκε στην εργασία είναι οι αλγόριθμοι διόρθωσης πρωτογενών δεδομένων των μετρητών νετρονίων. Η σπουδαιότητα του συγκεκριμένου θέματος είναι μεγάλη, ιδιαίτερα μετά τη δημιουργία του NMDB που έχει ως στόχο τη συλλογή αξιόπιστων μετρήσεων από τους μετρητές νετρονίων σε πραγματικό χρόνο. Μέχρι την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, ελάχιστοι ήταν οι αλγόριθμοι με τους οποίους πραγματοποιείτο η συγκεκριμένη διαδικασία. Ο γνωστότερος αλγόριθμος, η χρήση του οποίου έχει κυριαρχήσει, είναι ο Median Editor, ένας απλός στην εφαρμογή αλγόριθμος που απαιτεί λίγες παραμέτρους για τη λειτουργία του. Ο Median Editor αν και εμφανίζεται αποδοτικός στην αποκοπή των προβληματικών μετρήσεων του μετρητή νετρονίων προκαλεί μεγάλη αλλοίωση και στις έγκυρες μετρήσεις που εμφανίζεται ως συμπίεση της στατιστικής τους.

Η συνεισφορά της εργασίας στην ανάπτυξη αλγορίθμων διόρθωσης είναι πολύ μεγάλη, γεγονός που αποτυπώνεται στις τέσσερεις δημοσιεύσεις που παρήχθησαν. Συγκεκριμένα, κατά την εκπόνηση της διατριβής έγινε ανάπτυξη δύο νέων αλγορίθμων,

του ANN και του Edge Editor. Ο αλγόριθμος ANN (Paschalis et al., 2013a) βασίζεται σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα που αποτελεί καινοτόμα μέθοδο στη διόρθωση των μετρήσεων των μετρητών νετρονίων. Για την υλοποίηση της μεθόδου έγινε χρήση του Multilayer Perceptron που περιλαμβάνεται στο πακέτο ROOT του CERN. Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε με δείγμα που προσομοιώνει τις μετρήσεις των θαλάμων του μετρητή νετρονίων και το οποίο συντέθηκε λαμβάνοντας υπόψη τη στατιστική που εμφανίζουν οι μετρήσεις των θαλάμων καθώς και τη μορφή που εμφανίζουν οι διακυμάνσεις των οργάνων. Αποτέλεσμα της εκπαίδευσης είναι ένα δίκτυο που δέχεται ως είσοδο τις πρωτογενείς μετρήσεις των θαλάμων του μετρητή νετρονίων και παράγει στην έξοδο τις διορθωμένες μετρήσεις. Ο αλγόριθμος Edge Editor (Paschalis and Mavromichalaki, 2012) ακολουθεί μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος δρα σε δύο βήματα καθορίζοντας αρχικά, μέσω κριτηρίου εγκυρότητας, τους θαλάμους που οι μετρήσεις τους θεωρούνται μη έγκυρες και προβαίνοντας στη συνέχεια στη διόρθωση των μετρήσεων τους. Κατά την υλοποίηση γίνεται χρήση των στατιστικών χαρακτηριστικών που εμφανίζουν οι ιστορικές μετρήσεις των θαλάμων, ενώ εισάγονται αρκετές καινοτόμες μέθοδοι για τον καθορισμό μεταβλητών. Για παράδειγμα, με τη μέθοδο weighted mean γίνεται καθορισμός της μέσης στάθμης μέτρησης του μετρητή νετρονίων, ενώ μέσω των συναρτήσεων σφάλματος και διόρθωσης γίνεται ποσοτικοποίηση του σφάλματος κάθε μέτρησης καθώς και της διόρθωσης που πρέπει να εφαρμοστεί. Το κριτήριο εγκυρότητας του Edge Editor συνδυάστηκε με τους αλγόριθμους Median Editor και ANN προκειμένου να προκύψουν οι βελτιστοποιημένοι αλγόριθμοι Median Editor Plus και ANN Plus αντίστοιχα (Paschalis and Mavromichalaki, 2013b). Στη περίπτωση των αλγορίθμων αυτών γίνεται καθορισμός των μη έγκυρων μετρήσεων με το κριτήριο του Edge Editor ενώ για την διόρθωση εφαρμόζεται η μέθοδος του Median Editor ή του ANN.

Σε σχέση με τον καθιερωμένο Median Editor, η λειτουργία των ANN και Edge Editor εμφανίζεται σαφώς βελτιωμένη. Οι αλγόριθμοι αποκόπτουν όπως και ο Median Editor όλες τις προβληματικές μετρήσεις των θαλάμων, ωστόσο η μεγάλη βελτίωση εντοπίζεται στη μικρότερη αλλοίωση των έγκυρων μετρήσεων. Ο ANN αλλοιώνει τις έγκυρες μετρήσεις ελάχιστα και σαφώς λιγότερο από τον Median Editor, γεγονός εντυπωσιακό για έναν αλγόριθμο που είναι βασισμένος σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα



και ο οποίος μέσα από την εκπαίδευση καταγράφει τη στατιστική των μετρήσεων και το τρόπο τη διόρθωσης που πρέπει να επιφέρει. Ο Edge Editor από την άλλη παρουσιάζει μια αψεγάδιαστη συμπεριφορά, γεγονός αναμενόμενο λόγω της χρήσης του κριτηρίου εγκυρότητας. Οι έγκυρες μετρήσεις παραμένουν ανεπηρέαστες, ενώ μεταβάλλοντας το εύρος του διαστήματος εμπιστοσύνης η διαδικασία διόρθωσης μπορεί να γίνει λιγότερο ή περισσότερο ελαστική. Ωστόσο ο Edge Editor δεν υπερτερεί μόνο στην χρήση του διαστήματος εμπιστοσύνης αλλά και στη μέθοδο διόρθωσης. Αυτό αποδεικνύεται από τη σύγκρισή του με τον Median Editor Plus και τον ANN Plus όπου φαίνεται ότι ακόμη και σε αυτή τη περίπτωση ο Edge Editor αλλοιώνει λιγότερα τις μετρήσεις. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι ο Edge Editor κατά τη διόρθωση λαμβάνει υπόψη ότι δεν υπάρχει σαφές όριο ανάμεσα στο πότε μία μέτρηση είναι στατιστική διακύμανση και πότε διακύμανση οργάνου. Επομένως μία μη έγκυρη μέτρηση θεωρείται λιγότερο εσφαλμένη όταν είναι κοντά στο άκρο του διαστήματος εμπιστοσύνης από μία μέτρηση που είναι μακρύτερα και διορθώνεται λιγότερο. Αυτή η φιλοσοφία διόρθωσης είναι καινοτόμα και στην πράξη αποδεικνύεται ότι λειτουργεί ενδεδειγμένα. Για το λόγο αυτό ο Edge Editor καθιερώθηκε ως ο βασικός αλγόριθμος διόρθωσης για το μετρητή νετρονίων της Αθήνας.

Πέρα από την ανάπτυξη των ANN και Edge Editor, η εργασία συνεισέφερε και σε μία ακόμη πτυχή των αλγορίθμων διόρθωσης δεδομένων. Η υλοποίηση οποιουδήποτε αλγορίθμου διόρθωσης προϋποθέτει τον καθορισμό στατιστικών χαρακτηριστικών των ιστορικών μετρήσεων. Για παράδειγμα ο Median Editor προϋποθέτει τον καθορισμό της μέσης στάθμης μέτρησης κάθε θαλάμου, ο ANN τον καθορισμό των λόγων μέτρησης των θαλάμων ενώ ο Edge Editor επιπλέον απαιτεί την τυπική απόκλιση των μετρήσεων σας συνάρτηση της μέσης στάθμης μέτρησης του ανιχνευτή. Ο καθορισμός αυτών των χαρακτηριστικών απαιτεί τη χρήση των έγκυρων ιστορικών μετρήσεων, δηλαδή εκείνων που δεν εμφανίζουν διακυμάνσεις οργάνων. Στην εργασία έγινε ανάπτυξη της μεθόδου με την οποία εκκαθαρίζονται τα ιστορικά δεδομένα, γεγονός που επιτρέπει τη βέλτιστη εφαρμογή των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν, ενώ παράλληλα ευνοεί τη μελλοντική ανάπτυξη νέων αλγορίθμων. Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό των στατιστικών χαρακτηριστικών που έχει ο λόγος της μέτρησης κάθε θαλάμου ως προς ένα θάλαμο

αναφοράς και στην απαίτηση οι λόγοι όλων των θαλάμων να είναι εντός διαστημάτων εμπιστοσύνης.

Τέλος, στο πλαίσιο της ανάπτυξης των αλγορίθμων διόρθωσης των μετρήσεων πρέπει να συγκαταλεγεί και η υλοποίηση της μεθόδου όπου υπολογίζει με ακρίβεια το βαρομετρικό συντελεστή του σταθμού καθώς και τις διακυμάνσεις του στο χρόνο (Paschalis et al., 2013c). Αν και η διόρθωση ως προς την ατμοσφαιρική πίεση αποτελεί μία τετριμμένη διαδικασία για κάθε σταθμό από την αρχή της εμφάνισης των μετρητών νετρονίων, ο τρόπος υπολογισμού του βαρομετρικού συντελεστή εμφανίζει δυσκολίες που πολλές φορές οδηγούν σε εσφαλμένο υπολογισμό εάν κατά το διάστημα υπολογισμού παρατηρούνται μεταβολές της ροής της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Στην εργασία έγινε καθορισμός της τιμής του βαρομετρικού συντελεστή με μέθοδο που χρησιμοποιεί τα δεδομένα σταθμού αναφοράς για την αφαίρεση των διακυμάνσεων της πρωτογενούς ροής. Ο σταθμός που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά είναι της Ρώμης που έχει παρόμοιο κατώφλι δυσκαμψίας με το σταθμό της Αθήνας ενώ έγινε χρήση των δεδομένων από το NMDB. Με τη μέθοδο αυτή επαληθεύτηκε ως ορθή η τιμή που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια από το σταθμό της Αθήνας για διόρθωση ως προς την ατμοσφαιρική πίεση, ενώ δημιουργήθηκε και η υποδομή για υπολογισμούς στο μέλλον και σε άλλες φάσεις του Ηλιακού κύκλου.

### **5.1.2. Εφαρμογές διαχείρισης των μετρήσεων**

Η ανάπτυξη των αλγορίθμων διόρθωσης ήταν αλληλένδετη με την ανάπτυξη εφαρμογών. Η συνεισφορά της εργασίας σε αυτόν τον τομέα αποτυπώνεται σε μια σειρά εφαρμογών που προσφέρουν πλήρη διαχείριση των δεδομένων του σταθμού της Αθήνας αλλά και τη δυνατότητα στον εξωτερικό χρήστη για άντληση μετρήσεων. Η ενσωμάτωση των αλγορίθμων διόρθωσης σε εφαρμογές που λειτουργούν και διαχειρίζονται τις πραγματικές μετρήσεις του σταθμού είναι πολλή σημαντική αφού αποδεικνύουν ότι η ανάπτυξη των αλγορίθμων δεν περιορίζεται σε απλή θεωρητική προσέγγιση αλλά καταλήγει στη πραγματική εφαρμογή που είναι και το τελικό ζητούμενο. Η ανάπτυξη των εφαρμογών πραγματοποιήθηκε σε μια σειρά από γλώσσες

προγραμματισμού που περιλαμβάνουν .NET, HTML, JavaScript, PHP, ενώ απαιτήθηκε η χρήση βάσεων δεδομένων MySQL.

Η πιο σημαντική εφαρμογή που υλοποιήθηκε είναι η DataSender η οποία αντλεί τις πρωτογενείς μετρήσεις από το σύστημα καταγραφής του μετρητή νετρονίων, εφαρμόζει όλους τους αλγορίθμους διόρθωσης μετρήσεων και αποθηκεύει το αποτέλεσμα στην τοπική βάση δεδομένων του σταθμού σε πραγματικό χρόνο. Υποστήριξη στην εφαρμογή αυτή παρέχουν οι εφαρμογές Binary Reader και DataStatistics. Η BinaryReader δίνει τη δυνατότητα ανάγνωσης των δυαδικών αρχείων του συστήματος καταγραφής που σε ορισμένες περιπτώσεις είναι απαραίτητη για έλεγχο δυσλειτουργιών, ενώ η DataStatistics δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των απαιτούμενων μεταβλητών για την εφαρμογή των αλγορίθμων διόρθωσης. Ιδιαίτερη καινοτομία του σταθμού είναι η παροχή μέσω δικτυακής διεπαφής των πρωτογενών μετρήσεων σε επίπεδο θαλάμου καθώς και όλων παραμέτρων που αφορούν τη διόρθωση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Με το τρόπο αυτό η επιστημονική κοινότητα είναι σε θέση να ελέγξει το τρόπο διόρθωσης κάθε αλγορίθμου και να προβεί σε συγκρίσεις.

Εξίσου σημαντική εφαρμογή, λόγω της συμμετοχής του σταθμού της Αθήνας στο NMDB, είναι η εφαρμογή NMDBSender η οποία αναλαμβάνει να αποστείλει στο NMDB τις νέες μετρήσεις που αποθηκεύονται. Τόσο η εφαρμογή DataSender όσο και η NMDBSender έχουν λειτουργήσει για μεγάλο χρονικό διάστημα με εξαιρετική σταθερότητα, πραγματοποιώντας σε πραγματικό χρόνο τόσο την επεξεργασία και αποθήκευση των μετρήσεων στη τοπική βάση του σταθμού όσο και την αποστολή τους στο NMDB. Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στον τρόπο με τον οποίο ενεργοποιούνται οι διαδικασίες που επιτελούν οι εφαρμογές. Η εφαρμογή DataSender μέσω της κλάσης FileSystemWatcher του .NET παρακολουθεί την εγγραφή νέας μέτρησης στο σύστημα καταγραφής και εκτελεί άμεσα τη διαδικασία διόρθωσης και αποθήκευσης της μέτρησης στη τοπική βάση. Η ολοκλήρωση της διαδικασίας από την εφαρμογή DataSender καταλήγει στην εγγραφή αρχείων συγχρονισμού τα οποία παρακολουθούνται με την ίδια κλάση από την εφαρμογή NMDBSender για εκκίνηση της αποστολής στο NMDB. Αποτέλεσμα αυτής της υλοποίησης είναι η άμεση ανακοίνωση των μετρήσεων του

σταθμού τόσο μέσω της τοπικής βάσης όσο και του NMDB. Η διαχείριση των μετρήσεων του σταθμού ολοκληρώνεται με την εφαρμογή DataRevision με την οποία η ομάδα υποστήριξης του σταθμού μπορεί να επικαιροποιεί τις μετρήσεις που έχουν αποσταλεί στο NMDB. Με το τέλος λοιπόν της εργασίας παρέχεται στο σταθμό της Αθήνας το σύνολο των εφαρμογών με τα οποία διασφαλίζεται η ποιότητα των μετρήσεων, η αποστολή τους στο NMDB σε πραγματικό χρόνο και η offline ανανέωσή τους.

Τέλος, πέρα από τις εφαρμογές που αφορούν αποκλειστικά το σταθμό της Αθήνας, έγινε ανάπτυξη δικτυακών εφαρμογών που κάνουν χρήση των δεδομένων του NMDB slave server που διαθέτει ο σταθμός της Αθήνας. Η εφαρμογή Multi-Station επιτρέπει την επισκόπηση των μετρήσεων όλων των σταθμών που συμμετέχουν στο NMDB με έναν εύχρηστο τρόπο. Ωστόσο σημαντικότερη είναι η εφαρμογή υπολογισμού του βαρομετρικού συντελεστή που επιτρέπει σε κάθε σταθμό να υπολογίζει τη συγκεκριμένη παράμετρο που είναι απαραίτητη για τη διόρθωση των μετρήσεων ως προς την ατμοσφαιρική πίεση. Ο υπολογισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί για οποιαδήποτε περίοδο είτε με τη τυπική μέθοδο υπολογισμού είτε με την μέθοδο του σταθμού αναφοράς. Η εργασία επομένως συνεισέφερε όχι μόνο στο σταθμό του Πανεπιστημίου της Αθήνας αλλά σε όλη την επιστημονική κοινότητα των μετρητών νετρονίων, εντύπωση που ενισχύεται από τη σημαντική επισκεψιμότητα που παρουσιάζουν οι δικτυακές εφαρμογές.

### 5.1.3. Προσομοιώσεις

Το δεύτερο κύριο θέμα της εργασίας ήταν η ανάπτυξη προσομοιώσεων. Σε αυτό το θέμα έγινε ανάπτυξη δύο σημαντικών προσομοιώσεων που μελετούν φαινόμενα και διαδικασίες σχετικά με την κοσμική ακτινοβολία. Η υλοποίηση των προσομοιώσεων πραγματοποιήθηκε σε C++ χρησιμοποιώντας το πολύ γνωστό πακέτο προσομοιώσεων Geant4. Πολύ σημαντικό πρέπει να θεωρηθεί το γεγονός ότι οι προσομοιώσεις που αναπτύχθηκαν δεν χρησιμοποιήθηκαν μόνο για την παραγωγή αποτελεσμάτων στο πλαίσιο της εργασίας, αλλά παρέχονται ως εφαρμογές έτσι ώστε η επιστημονική κοινότητα να μπορεί να προσομοιώσει συγκεκριμένα σενάρια προσομοίωσης και να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα.

Η πρώτη προσομοίωση που αναπτύχθηκε αφορά τη λειτουργία του μετρητή νετρονίων 6NM-64 που χρησιμοποιείται στο σταθμό της Αθήνας (Paschalis et al., 2013d). Στόχος της προσομοίωσης ήταν ο υπολογισμός της απόδοσης που εμφανίζει ο μετρητής νετρονίων στους διάφορους τύπους και στις διάφορες ενέργειες των εισερχόμενων σωματιδίων. Κατά την προσομοίωση έγινε μελέτη της ενδεδειγμένης physics list, ενώ η ταύτιση των αποτελεσμάτων με την παλαιότερη προσομοίωση του Clem (Clem, 1999; Clem and Dorman, 2000) επικυρώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Μέσω της προσομοίωσης επιβεβαιώθηκε ότι ο μετρητής νετρονίων εμφανίζει μεγάλη απόδοση στη καταμέτρηση της νουκλεονικής συνιστώσας, ενώ για πρώτη φορά μελετήθηκε η εξάρτηση της απόδοσης από τη γωνία και από το σημείο εισόδου των εισερχόμενων σωματιδίων. Η μελέτη απέδειξε ότι η απόδοση της ανίχνευσης παρουσιάζει σταθερότητα στον κεντρικό τομέα του μετρητή νετρονίων και απότομη πτώση στην περίμετρό του. Επιπλέον απέδειξε την αύξηση της απόδοσης όταν η ζενιθιακή γωνία αυξάνεται, αποτέλεσμα της μεγαλύτερης διαδρομής που διανύουν τα σωματίδια εντός του ανιχνευτή. Εξαιρέση αποτελεί μόνο η περίπτωση κατά την οποία τα σωματίδια διέρχονται από διεύθυνση παράλληλη με τους θαλάμους του μετρητή νετρονίων, λόγω του ότι μειώνεται η ορατή επιφάνεια του μολύβδου. Πέρα από τα ποσοτικά αποτελέσματα, η προσομοίωση του μετρητή νετρονίων προσέφερε καλύτερη κατανόηση σε βάθος των διαδικασιών που πραγματοποιούνται εντός του ανιχνευτή από τη στιγμή της εισόδου ενός σωματιδίου μέχρι και τη σύλληψη ενός νετρονίου σε έναν από τους αναλογικούς θαλάμους. Ζητήματα, όπως η πολλαπλότητα των νετρονίων και η επίδραση του νεκρού χρόνου στην αποκοπή του ρυθμού καταμέτρησης όταν αυξάνεται η πολλαπλότητα εξετάστηκαν διεξοδικά κατά τη προσομοίωση. Η προσομοίωση του μετρητή νετρονίων έκανε σαφή τη στατιστική φύση της καταμέτρησης των παλμών την οποία επιδιώκουν να αφήσουν ανεπηρέαστη οι αλγόριθμοι διόρθωσης των μετρήσεων.

Η δεύτερη προσομοίωση που αναπτύχθηκε αφορά τη δημιουργία των καταιγισμών δευτερογενών σωματιδίων μέσα στην ατμόσφαιρα λόγω της αλληλεπίδρασης των μορίων της με την κοσμική ακτινοβολία. Η εφαρμογή που ονομάζεται DYASTIMA (DYnamic Atmospheric Shower Tracking Interactive Model Application) παρέχει, μέσα από ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων, τη δυνατότητα προσομοίωσης διαφόρων σεναρίων για τη δομή της ατμόσφαιρας και τη ροή της

πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Όσον αφορά την ατμόσφαιρα, ο καθορισμός των χαρακτηριστικών της γίνεται μέσα από το προφίλ της θερμοκρασίας με το ύψος, ενώ για τον καθορισμό της πρωτογενούς ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η παραμετροποίηση των Parini et al. (1996). Για τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην εργασία, η δομή της ατμόσφαιρας ορίστηκε να είναι η International Standard Atmosphere (International Civil Aviation Organization, 1993) ενώ για την πρωτογενή κοσμική ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε το φάσμα που αναφέρεται στους Beringer et al. (2012). Κατά την προσομοίωση αυτή έγινε έλεγχος σε μεγάλο αριθμό παραμέτρων που αφορούν τον καταγισμό των σωματιδίων και εξαγωγή σημαντικών συμπερασμάτων που αφορούν την ενεργειακή κατανομή, τη γωνιακή κατανομή και τη ροή των σωματιδίων. Κύριο συμπέρασμα είναι ότι ο καταγισμός ανάλογα με το τύπο των σωματιδίων, μεγιστοποιείται στα 10-15 χιλιόμετρα και φθίνει πλησιάζοντας προς το έδαφος. Αντιπροσωπευτικό και ιδιαίτερης σημασίας μπορεί να θεωρηθεί το σχήμα 4.30 που αποτυπώνει την κάθετη ροή των ενεργητικών σωματιδίων εντός της ατμόσφαιρας. Η ταύτιση του αποτελέσματος με τους υπολογισμούς που παρουσιάζονται στην εργασία των Beringer et al. (2012) επικυρώνει και σε αυτή τη περίπτωση την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Άξια αναφοράς είναι και τα σχήματα 4.34-4.35 που απεικονίζουν σε οριζόντιες τομές την ανάπτυξη του καταγισμού για τη περίπτωση των αρνητικών μιονίων και των νετρονίων αντίστοιχα.

## 5.2. Προοπτικές

Όπως γίνεται σαφές από τα συμπεράσματα που αναπτύχθηκαν, η συνεισφορά της εργασίας είναι μεγάλη και καθορισμένη τόσο σε επιστημονικό όσο και σε τεχνολογικό επίπεδο. Όσον αφορά τους αλγορίθμους διόρθωσης δεδομένων των μετρητών νετρονίων, η εργασία προσφέρει δύο νέους αλγορίθμους, τον ANN και τον Edge Editor, που η εφαρμογή τους αποδεικνύεται σταθερή και αξιόπιστη. Επιπλέον προσφέρει τους βελτιστοποιημένους αλγορίθμους ANN Plus και Median Editor Plus καθώς και τη μεθοδολογία υπολογισμού των παραμέτρων που απαιτούνται για την εφαρμογή όλων των αλγορίθμων διόρθωσης δεδομένων. Όσον αφορά τις εφαρμογές που υλοποιήθηκαν, η εργασία προσφέρει όλες τις απαραίτητες εφαρμογές που

απαιτούνται για την αδιάλειπτη και αξιόπιστη λειτουργία του σταθμού της Αθήνας, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του NMDB, από το σύστημα καταγραφής και μετά. Επιπλέον προσφέρει δύο χρήσιμες δικτυακές εφαρμογές για την επισκόπηση των μετρήσεων και τον υπολογισμό του βαρομετρικού συντελεστή των σταθμών του NMDB. Τέλος, στο πεδίο των προσομοιώσεων προσφέρει δύο πλήρεις εφαρμογές για τον υπολογισμό παραμέτρων που αφορούν τη λειτουργία του μετρητή νετρονίων 6NM-64 και τη δημιουργία καταγισμών εντός της ατμόσφαιρας της Γης.

Η δυνατότητα βελτίωσης κάθε ενός από τα ανωτέρω είναι περιορισμένη. Ο λόγος είναι ότι η ανάπτυξη των αλγορίθμων και των εφαρμογών δεν έμεινε σε θεωρητική προσέγγιση αλλά προχώρησε στην υλοποίηση. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να αναλυθούν όλες οι λεπτομέρειες και να επιλυθούν όλα τα προβλήματα που χωρίζουν την θεωρητική ή τμηματική ανάπτυξη των θεμάτων από την εφαρμογή τους στην παραγωγική διαδικασία. Ωστόσο η ανάλυση που απαιτήθηκε προκειμένου να αναπτυχθούν οι αλγόριθμοι και οι εφαρμογές θέτουν πολύ γερές βάσεις για ανάπτυξη νέων εφαρμογών στο μέλλον. Στόχος είναι η εφαρμογή των επιτευγμάτων της εργασίας στους τομείς της πρόγνωσης του Διαστημικού καιρού (Lundstedt, 2005) και της δοσιμετρίας λόγω κοσμικής ακτινοβολίας, δύο εξαιρετικά ενεργών τομέων στους οποίους βρίσκουν χρήση τόσο τα υψηλής ποιότητας δεδομένα των μετρητών νετρονίων όσο και η ανάπτυξη των προσομοιώσεων. Επιπλέον, σημαντική θεωρείται η υλοποίηση νέων εφαρμογών που αφορούν τους μετρητές νετρονίων και η παροχή τους στην επιστημονική κοινότητα των μετρητών νετρονίων.

Η επιτυχημένη εφαρμογή των αλγορίθμων διόρθωσης δεδομένων στο σταθμό της Αθήνας ανοίγει την προοπτική εφαρμογής τους και στους υπολοίπους σταθμούς του NMDB. Αυτό αποτελεί πολύ σημαντικό στόχο για τη συνεργασία του NMDB, δεδομένης της αδυναμίας ορισμένων σταθμών να παρέχουν δεδομένα υψηλής ποιότητας και της έλλειψης τεχνογνωσίας για πραγματοποίηση της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο. Για τη πραγματοποίηση του στόχου αυτού απαιτείται προσαρμογή της εφαρμογής DataSender αφενός για να υποστηρίζει μετρητές νετρονίων με οποιοδήποτε αριθμό θαλάμων, αφετέρου για να μπορεί να αντλεί τις πρωτογενείς μετρήσεις από οποιοδήποτε σύστημα καταγραφής. Προκειμένου το τελευταίο να είναι εφικτό θα

πρέπει να καθοριστεί μία πρότυπη δομή για τις πρωτογενείς μετρήσεις των μετρητών νετρονίων και η εφαρμογή DataSender να τροποποιηθεί ώστε να διαβάζει τις μετρήσεις σε αυτή τη δομή. Για να κάνει ο κάθε σταθμός χρήση της εφαρμογής DataSender θα απαιτείται να υλοποιεί μία υποτυπώδη εφαρμογή ώστε να μετασχηματίζει τις πρωτογενείς μετρήσεις του στην πρότυπη δομή. Η χρήση των εφαρμογών NMDBSender και DataRevision δεν απαιτούν κάποια προσαρμογή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα από οποιοδήποτε σταθμό, ενώ η εφαρμογή DataStatistics απαιτεί τροποποίηση προκειμένου να είναι παραμετροποιήσιμος ο αριθμός των θαλάμων του μετρητή νετρονίων. Με τις ανωτέρω προσαρμογές, το σύνολο των εφαρμογών με τις οποίες διαχειρίζεται τα δεδομένα ο σταθμός της Αθήνας θα μπορούν να εφαρμοστούν από κάθε σταθμό, αναβαθμίζοντας κατά πολύ τη ποιότητα των μετρήσεων και τον αριθμό των σταθμών πραγματικού χρόνου. Οι αλγόριθμοι διόρθωσης δεδομένων καθώς και οι εφαρμογές που υλοποιήθηκαν για τη διαχείριση των μετρήσεων παρουσιάστηκαν πρόσφατα στο NMDB Meeting που έγινε στο Kiel Germany με την συμμετοχή όλων των χωρών που διαθέτουν σταθμούς κοσμικής ακτινοβολίας με real-time τεχνολογία.

Όσον αφορά την ανάπτυξη προσομοιώσεων, σημαντική προοπτική αποτελεί η χρήση των αποτελεσμάτων της εφαρμογής DYASTIMA για υπολογισμό των δόσεων ακτινοβολίας εντός της ατμόσφαιρας. Δεδομένου ότι η εφαρμογή υπολογίζει τη ροή και τις ενέργειες των σωματιδίων εντός της ατμόσφαιρας, η μετατροπή των αποτελεσμάτων σε ισοδύναμη δόση είναι μια σχετικά απλή διαδικασία. Ωστόσο ακόμη πιο σημαντική είναι η σύνδεση της δόσης με πραγματικές μετρήσεις από τους ανιχνευτές της κοσμικής ακτινοβολίας. Προκειμένου να γίνει αυτή η σύνδεση απαιτούνται δύο διακριτές μελέτες. Η πρώτη μελέτη αφορά τη μοντελοποίηση της ροής και της ενέργειας των σωματιδίων σε σχέση με το φάσμα της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας στο όριο της ατμόσφαιρας καθώς και με τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας. Αυτό προϋποθέτει την εκτέλεση ενός μεγάλου πλήθους σεναρίων με την εφαρμογή DYASTIMA και την προσαρμογή στα αποτελέσματα εξισώσεων που θα υπολογίζουν τη ροή και τις ενέργειες των σωματιδίων ως συνάρτηση της πρωτογενούς ροής και των περιβαλλοντικών μετρήσεων. Η δεύτερη μελέτη αφορά τη σύνδεση των μετρήσεων από τους ανιχνευτές με το φάσμα της πρωτογενούς κοσμικής ακτινοβολίας. Συνδυασμός των παραπάνω θα επιτρέπει τον υπολογισμό δόσεων λαμβάνοντας υπόψη απευθείας τις μετρήσεις της κοσμικής



ακτινοβολίας. Παρόμοιες προσπάθειες με υποσχόμενα αποτελέσματα αποτελούν τα προγράμματα AVIDOS (Latocha et al., 2009) και NAIRAS (Mertens et al., 2009). Μια δεύτερη προοπτική για το DYASTIMA είναι η επέκτασή του στις ατμόσφαιρες άλλων πλανητών, σε αναλογία με την εφαρμογή PLANETOCOSMICS (Desorgher et al., 2006). Ήδη έχει ξεκινήσει η μελέτη για την ατμόσφαιρα της Αφροδίτης σε μια συνεργασία με Ιταλούς συνεργάτες από το ινστιτούτο INAF της Ρώμης.



## Βιβλιογραφία

Aartsen M.G., Abbasi R., Ackermann M., Adams J. et al. [IceCube Collaboration]: "Search for a Diffuse Flux of Astrophysical Muon Neutrinos with the IceCube 59-string Configuration", *Physical Review D*, 89, 062007, 2014

Abdo A.A., Allen B.T., Aune T., Berley D. et al.: "Milagro Observations of Multi-TeV Emission from Galactic Sources in the Fermi Bright Source List", *The Astrophysical Journal*, 700, L127, 2009

Abramowski A., Aharonian F., Ait Benkhali F., Akhperjanian A.G. et al. [H.E.S.S. collaboration], "HESS J1818-154, a new composite supernova remnant discovered in TeV gamma rays and X-rays", *Astron. Astrophys.*, 562, A40, 2014

Abreu P., Aglietta M., Ahlers M., Ahn E.J. et al. [Pierre Auger Collaboration]: "Constraints on the Origin of Cosmic Rays above 10<sup>18</sup> eV from Large-scale Anisotropy Searches in Data of the Pierre Auger Observatory", *The Astrophysical Journal*, 762, L13, 2013

Abu-Zayyad T., Aidab R., Allena M., Anderson R. et al. [Telescope Array Project Group]: "The surface detector array of the Telescope Array experiment", *Nuclear Instruments and Methods A*, 689, 87-97, 2012

Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A., Bellotti R. et al.: "Measurement of the Isotopic Composition of Hydrogen and Helium Nuclei in Cosmic Rays with the PAMELA Experiment", *The Astrophysical Journal*, 770, 9, 2013

Agostinelli S., Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. [Geant4 Collaboration]: "Geant4 - a simulation toolkit", *NIM A*, 506, 250-303, 2003

Aguilar M., Alberti G., Alpat B., Alvino A. et al. [AMS Collaboration]: "First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV", *Physical Review Letters* PRL 110, 141102, 2013

- Aharonian F., Akhperjanian A., Beilicke M., Bernlöhr K. et al. [HEGRA Collaboration]: "Observations of 14 young open star clusters with the HEGRA system of Cherenkov telescopes", *Astronomy & Astrophysics*, 454, 775-779, 2006
- Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H. et al. [Geant4 Collaboration]: "Geant4 developments and applications", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 53, 270-278, 2006
- Apel W.D., Arteaga-Velazquez J.C., Bekk K., Bertaina M. et al. [KASCADE-Grande Collaboration]: "Kneelike Structure in the Spectrum of the Heavy Component of Cosmic Rays Observed with KASCADE-Grande", *Phys. Rev. Lett.* 107, 171104, 2011
- Ave M., Boyle P.J., Brannon E., Gahbauer F. et al.: "The TRACER instrument: A balloon-borne cosmic-ray detector", *Nuclear Instruments and Methods A*, 654, 140-156, 2011
- Bachlechner A., Boland M., Doetinchem P.v., Gast H. et al.: "A New Instrument for Testing Charge-Sign Dependent Solar Modulation", *Proceedings of the 31st ICRC*, 2009
- Balabin Yu.V., Gvozdevsk B.B., Mauricev E.A., Vashenyuk E.V., Dzhappuev D.D.: "Fine structure of neutron multiplicity on neutron monitors", *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 7, 283-286, 2011
- Barwick S.W., Beatty J.J., Bower C.R., Chaput C. et al.: "The High-Energy Antimatter Telescope (HEAT): An instrument for the study of cosmic-ray positrons", *Nuclear Instruments and Methods A*, 400, 34-52, 1997
- Battistoni G., Ferrari A., Montaruli T., Sala P.R.: "The FLUKA atmospheric neutrino flux calculation", *Astropart. Phys.*, 19, 269-290, 2003
- Battistoni G., Muraro S., Sala P.R., Cerutti F., Ferrari A., Roesler S., Fasso A., Ranft J.: "The FLUKA code: Description and benchmarking", *AIP Conf. Proc.*, 896, 31-49, 2007
- Belov A.V., Blokh Ya.L., Klepach E.G., Yanke V.G.: "Processing of cosmic ray station data: algorithm, computer program and realization", *Kosmicheskie Luchi, Moscow, Nauka*, 25, 113-134, 1988
- Belov A. V., Gushchina R. T., Sirotina I.: "Long Time Modulation of the Neutron Monitors Barometric Coefficients", *Proc 23th ICRC, Calgary*, 605, 1993

- Belov A., Eroshenko E., Mavromichalaki H., Plainaki C., Yanke V.: "A study of Great Ground Level Enhancement of 23 February, 1956", *Adv. Space Res*, 35, 697-701, 2005
- Belov A., Abunin A., Abunina M., Eroshenko E. et al.: "Coronal mass ejections and non recurrent Forbush decreases", *Solar Physics*, 289, 3949–3960, 2014
- Bergmann B.: "A Microsimulation of the Macroeconomy with Explicitly Represented Money Flows", *Annals of Economic and Social Measurement*, 3, 29-44, 1974
- Beringer J., Arguin J.-F., Barnett R.M., Copic K. et al. [Particle Data Group], *Phys. Rev. D* 86, 010001, 2012
- Bieber J.W., Clem J., Evenson P., Pyle R., Sáiz A., Ruffolo D.: "Giant Ground Level Enhancement of Relativistic Solar Protons on 2005 January 20. I. Spaceship Earth Observations", *The Astrophysical Journal*, 771, L92, 2013
- Binns W.R., Garrard T.L., Gibner P.S., Israel M.H. et al.: "The Abundances of Ultraheavy Elements in the Cosmic Radiation: Results from HEAO-3", *The Astrophysical Journal*, 346, 997, 1989
- Bohn B., Garcke J., Iza-Teran R., Paprotny A., Peherstorfer B., Schepsmeier U., Thole C.A.: "Analysis of Car Crash Simulation Data with Nonlinear Machine Learning Methods", *Procedia Computer Science*, 18, 621-630, 2013
- Bütikofer R. and Flückiger E. O.: "Radiation doses along selected flight profiles during two extreme solar cosmic ray events", *Astrophysics and Space Sciences Transactions*, 7, 105-109, 2011
- Carlson B.E, Brobeck E., Jillings C.J., Larson M.B. et al.: "Search for Correlated High Energy Cosmic Ray Events with CHICOS", *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 31, 409–416, 2005
- Carmichael H.: "IQSY Instruction Manual", vol. 7, Deep River, Canada, 1964
- Carmichael H., Bercovitch M., Shea M.A., Magidin M., Peterson R.: "Attenuation of neutron monitor radiation in the atmosphere" *Canad. J. Phys.*, 46, 1006, 1968.

Carter L.L., Cashwell E.D., Everett C.J., Forest C.A., Schrandt R.G., Taylor W.M., Thompson W.L., Turner G.D.: "Monte Carlo Development in Los Alamos", LA-5903-MS, 1975

Cashwell E.D. and Everett C.J.: "A Practical Manual on the Monte Carlo Method for Random Walk Problems", Pergamon Press, 1959, LA-2120

Chiba, T.: "Time Variations of the barometric Coefficient of cosmic Ray Neutron Component at Morioka, Tokyo and Mt.Norikura during the period 1970-1973", Ann. Rep. Fac. Educ., Iwate Univ., 36, 1976

Chilingarian A., Hovhannisyanyan A., Mailyan B.: "Median Filtering Algorithms for Multichannel Detectors", Proc. 31st ICRC, Lodz, icrc0677, 2009

Cholis I. and Hooper D.: "Dark Matter and Pulsar Origins of the Rising Cosmic Ray Positron Fraction in Light of New Data From AMS", Phys.Rev. D, 88, 023013, 2013

Cirrone G.A.P., Cuttonea G., Di Rosaa F., Pandolab L., Romanoa F., Zhang Q.: "Validation of the Geant4 electromagnetic photon cross-sections for elements and compounds", NIM A, 618, 315-322, 2010

Clem J.M. and Dorman L.I.: "Neutron Monitor Response Functions", Space Science Review, 93, 335-359, 2000

Clem J.M.: "Atmospheric Yield Functions and the Response to Secondary Particles of Neutron Monitors", Proceedings of the 26th International Cosmic Ray Conference, 7, 317-311, 1999

Cortina J., Goebel F., Schweizer T. et al. [MAGIC collaboration], "Technical Performance of the MAGIC Telescopes", Proc. International Cosmic Rays Conference 2009

Dartnell L. R., Desorgher L., Ward J. M., Coates A. J.: "Modelling the surface and subsurface Martian radiation environment: Implications for astrobiology", Geophysical Research Letters, 34, 2007

Dean R.B. and Dixon W.J.: "Simplified statistics for small numbers of observations", Anal. Chem., 23, 636-638, 1951.

- Debrunner H., Flückiger E., Lockwood J.: "Specific yield function S(P) for a neutron monitor at sea level", paper presented, Proceedings of the 8th European Cosmic Ray Symposium, 1982.
- Desorgher L., Fluckiger E.O., Moser M.R., Butikofer R.: "Geant4 Simulation of the Propagation of Cosmic Rays through the Earth's Atmosphere", Proceedings of 28th ICRC, 2003
- Desorgher L., Flückiger E. O., Gurtner M., Moser M. R., Bütikofer R.: "Atmocosmics: a Geant4 Code for Computing the Interaction of Cosmic Rays with the Earth's Atmosphere", International Journal of Modern Physics A, 20, 6802-6804, 2005
- Desorgher L., Flückiger E. O., Gurtner M.: "The PLANETOCOSMICS Geant4 application", 36th COSPAR Scientific Assembly, Meeting abstract from the CDROM, #2361, 2006
- Diop C.M., Petit O., Dumonteil E., Hugot F.X., Lee Y.K., Mazzolo A., Trama J.C.: "Tripoli-4: A 3D continuous-energy monte carlo transport code", First International Conference on Physics and Technology of Reactors and Applications, 2007
- Dorman L. I.: "Variations and Space explorations", Moscow, 492, 1974.
- Dorman L.I.: "Meteorological effects of cosmic rays", Nauka, 211, 1972.
- Ellison D.C., Drury L.O'C., Meyer, J.P.: "Galactic Cosmic Rays from Supernova Remnants. II. Shock Acceleration of Gas and Dust", The Astrophysical Journal, 487, 197, 1997
- Ferrari A., Sala P.R., Fasso A., and Ranft J.: "FLUKA: a multi-particle transport code", CERN-2005-10, INFN/TC\_05/11, SLAC-R-773, 2005
- Flückiger E.O., Moser M.R., Bütikofer R., Desorgher L., Pirard B.: "A parameterized neutron monitor yield function for space weather applications", Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, 1, 289 – 292, 2008.
- Gaisser, T.K., Honda, M., Lipari, P., Stanev, T.: "Primary spectrum to 1 TeV and beyond", Proc. 27th ICRC, 643 – 646, 2001

- Garyaka A.P., Martirosov R.M., Ter-Antonyan S.V., Erlykin A.D. et al.: "All-particle primary energy spectrum in the 3-200 PeV energy range", *Phys. G: Nucl. Part. Phys.*, 35, 115201, 2008
- Gillespie D.: "Exact stochastic simulation of coupled chemical reactions", *The Journal of Physical Chemistry*, 81, 2340-2361, 1977
- Goorley J.T., James M.R., Booth T.E., Brown F.B. et al.: "Initial MCNP6 Release Overview - MCNP6 version 1.0", LA-UR-13-22934, 2013
- Gurtner M., Desorgher L., Flückiger E. O., Moser M. R.: "Simulation of the interaction of space radiation with the Martian atmosphere and surface", *Advances in Space Research*, 36, 2176-2181, 2007
- Hatton C.J.: "The Neutron Monitor", *Prog. Elem. Part. Cosmic Ray Phys.*, 10, 1971
- Heck D., Knapp J., Capdevielle J.N., Schatz G., Thouw T.: "CORSIKA: A Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers", *Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe (Germany)*, Feb 1998, V + 90 p., TIB Hannover, D-30167 Hannover (Germany)
- Hillas A.M.: "Cosmic Rays: Recent Progress and some Current Questions", *arXiv:astro-ph/0607109*, 2006
- Hovhannisyan A. and Chilingarian A.: "Median filtering algorithms for multichannel detectors", *Adv. Space Res.*, 47, 1544–1557, 2011.
- International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-MOD: "International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation", *Geophysical J. Intern.*, 183, 1216–1230, 2010
- International Civil Aviation Organization: "Manual of the ICAO Standard Atmosphere (extended to 80 kilometres (262 500 feet))", Doc 7488-CD, Third Edition, 1993
- Israel M.H., Binns W.R., Christian E.R., Mitchell J.W. et al.: "Super-TIGER: A New Instrument to Test the Model of Galactic Cosmic-Ray Origin in OB Associations", *Bulletin of the American Astronomical Society*, 41, p.435, 2009



- Ivantchenko V., Apostolakis J., Bagulya A., Abdelouahed H.B. et al.: "Recent Improvements in Geant4 Electromagnetic Physics Models and Interfaces", *Progress in Nuclear Science and Technology*, 2, 898-903, 2011
- Iwase H., Niita K., T. Nakamura: "Development of General-Purpose Particle and Heavy Ion Transport Monte Carlo Code," *J. Nucl. Sci. Technol.*, 39, 1142, 2002
- Kahoul A., Nekkab M., Deghfel B.: "Empirical K-shell ionization cross-sections of elements from 4Be to 92U by proton impact", *Nucl. Instrum. Meth. B*, 266, 4969-4975, 2008
- Kashiyama K., Ioka K., Kawanaka N.: "White Dwarf Pulsars as Possible Cosmic Ray Electron-Positron Factories", *Phys. Rev. D*, 83, 023002, 2011
- Kirkby J., Curtius J., Almeida J., Dunne E. et al.: "Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation", *Nature*, 476, 429–433, 2011
- Kobelev P., Belov A., Mavromichalaki E., Gerontidou M., Yanke V.: "Variations of Barometric Coefficients of the Neutron Component in the 22-23 Cycles of Solar Activity" *Proc. 32nd ICRC*, icrc00654, 2011
- Krivosheev O.E., Mokhov N.V., "MARS Code Status", *Proc. Monte Carlo 2000 Conf.*, p. 943, Lisbon, October 23-26, 2000; *Fermilab-Conf-00/181* (2000)
- Kudela K.: "Some measurement quality criteria for a multichannel neutron supermonitor", *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.*, 38, 1982-1986, 1974.
- Latocha M., Beck P., Rollet S.: "AVIDOS—a software package for European accredited aircrew dosimetry", *Radiat Prot Dosim*, 136, 286–290, 2009
- Lepri S.T., Landi E., Zurbuchen T.H.: "Solar Wind Heavy Ions over Solar Cycle 23: ACE/SWICS Measurements", *The Astrophysical Journal*, 768, A94, 2013
- Lundstedt H.: "Progress in space weather predictions and applications", *Adv. Space Res.*, 36, 2516, 2005.

Mariatos G., Mavromichalaki H., Sarlanis C., Souvatzoglou G.: "Alert system for ground level cosmic-ray enhancements prediction at the Athens Neutron Monitor Network in real-time", *International Journal of Modern Physics A*, 20, 6711-6713, 2005

Martinelli P. and Filippou F.: "Simulation of the shaking table test of a seven-story shear wall building", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38, 587–607, 2009

Masters A., Stawarz L., Fujimoto M., Schwartz S.J. et al.: "Electron acceleration to relativistic energies at a strong quasi-parallel shock wave", *Nature Physics*, 9, 164–167, 2013

Matthiä D., Heber B., Reitz G., Meier M., Sihver L., Berger T., Herbst K., "Temporal and spatial evolution of the solar energetic particle event on 20 January 2005 and resulting radiation doses in aviation", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 114, 2009.

Maurchev E.A., Gvozdevskij B.B., Balabin J.V., Vashenjuk E.V.: "Modellig of hadron interactions in the neutron monitor", *Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXIII Annual Seminar*, 83 - 86, 2011

Mavromichalaki H., Sarlanis C., Souvatzoglou G., Tatsis S. et al.: "Athens Neutron Monitor and its aspects in the cosmic-ray variations studies", *Proc. 27th ICRC*, 10, 4099, 2001

Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G. et al.: "The new Athens Center on data processing from the Neutron Monitor Network in real time", *Annales Geophysicae*, 23, 3103-3110, 2005

Mavromichalaki H., Plainaki C., Gerontidou M., Sarlanis C. et al.: "GLEs as a Warning Tool for Radiation Effects on Electronics and Systems: A new Alert System based on Real-Time Neutron", *IEEE TNS* 54, 1083-1088, 2007

Mavromichalaki H., Gerontidou M., Mariatos G., Papailiou M. et al.: "Athens Neutron Monitor Data Processing Center-ANMODAP Center", *Adv. Space. Res.*, 44, 1237-1246, 2009

- Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G. et al. [NMDB team]: "Implementation of the Ground Level Enhancement Alert Software at NMDB database", *New Astronomy*, 15, 744-748, 2010
- Mavromichalaki H., Papaioannou A., Plainaki C., Sarlanis C. et al.: "Applications and usage of the Real – time Neutron Monitor database", *Advances in Space Research*, 47, 2210-2222, 2011
- McDonald F.B.: "Integration Of Neutron Monitor Data With Spacecraft Observation: A Historical Perspective", *Space Sci. Rev.* 93, 239-258, 2000
- McKenna F.: "OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation", *Computing in Science and Engineering*, 13, 58-66, 2011
- Meng T.C., Somani S., Dhar P.: "Modeling and simulation of biological systems with stochasticity", *Silico Biol.*, 4, 293-309, 2004
- Mertens C.J., Tobiska W.K., Bouwer D., Kress B.T., Wiltberger M., Solomon S.C., Murray J.J.: "Development of the nowcast of atmospheric ionizing radiation for aviation safety (NAIRAS) model", *AIAA 2009-3633-978*, 2009
- Milburn J.A., Khera G., Hornby S.T., Malone P.S.C., Fitzgerald J.E.F.: "Introduction, availability and role of simulation in surgical education and training: Review of current evidence and recommendations from the Association of Surgeons in Training", *International Journal of Surgery*, 10, 393-398, 2012
- Miroshnichenko L.: "Solar Cosmic Rays", Kluwer Academic Publishers, 2001
- Mishev A.L., Usoskin I.G., Kovaltsov G.A., "Neutron monitor yield function: New improved computations", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118, 2783–2788, 2013
- Mishra W. and Srivastava N.: "Estimating the arrival time of Earth-directed coronal mass ejections at in situ spacecraft using COR and HI observations from STEREO", *Astrophys. J.* 772, 70, 2013
- Mokhov N.V., Proc. IV All-Union Conference on Charge Particle Accelerators, Moscow, Nauka, vol. 2, p. 222, 1975

- Mokhov N.V., "The Mars Code System User's Guide", Fermilab-FN-628, 1995
- Mokhov N.V., "Status of MARS Code", Fermilab-Conf-03/053, 2003
- Mokhov N.V., Gudima K.K., James C.C. et al: "Recent Enhancements to the MARS15 Code", Fermilab-Conf-04/053, 2004
- Oh S., Park H., Yi Y., Chae J.: "Signals of solar cosmic ray flux variations inferred from the noise in raw CCD solar images taken by SOHO/EIT", J. Geophys. Res. Space Physics, 119, 88-96, 2014
- Orlic I., Sow C.H., Tang S.M.: "Semi-empirical Formulas for Calculation of L Subshell Ionization Cross Sections", Int. J. PIXE, 4, 217-230, 1994
- Panov A.D., Sokolskaya N.V., Adams J.H. Jr., Ahn H.S. et al.: "Relative abundances of cosmic ray nuclei B-C-N-O in the energy region from 10 GeV/n to 300 GeV/n. Results from ATIC-2 (the science flight of ATIC)", Proceedings of the 30st ICRC, 2007
- Papaioannou A., Souvatzoglou G., Paschalis P., Gerontidou M., Mavromichalaki H.: "The first ground level enhancement of solar cycle 24 on 17 May 2012 and its real time detection", Solar Physics, 289, 423-436, 2013
- Papini P., Grimani C., Stephens S.A.: "An estimate of the secondary-proton spectrum at small atmospheric depths", Nuovo Cimento C Geophysics Space Physics C, 19, 367-387, 1996
- Paschalis P. and Mavromichalaki H.: "Real- time processing of neutron monitor data using the Edge editor algorithm", J. Space Weather Space Clim., 2, A15, 2012
- Paschalis P., Sarlanis C., Mavromichalaki H.: "Artificial Neural Networks Approach of Cosmic Ray Primary data Processing" Solar Phys., 282, 303-318, 2013a
- Paschalis P. and Mavromichalaki H.: "Optimization of neutron monitor data correction algorithms", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 714, 38-47, 2013b

Paschalis P., Mavromichalaki H., Yanke V., Belov A., Eroshenko E., Gerontidou M., Koutrompi I.: "Online application for barometric coefficient calculation of the NMDB stations", *New Astronomy*, 19,10-18, 2013c

Paschalis P., Mavromichalaki H., Dorman L.I.: "A quantitative study of the 6NM-64 neutron monitor by using Geant4: 1. Detection efficiency for different particles", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 729, 877-887, 2013d

Paschalis P., Mavromichalaki H., Dorman L.I., Plainaki C., Tsirigkas D.: "Application for the cosmic rays simulation of atmospheric showers using Geant4", *New Astronomy*, 33, 26-37, 2014

Paul H. and Bolik O.: "Fitted Empirical Reference Cross Sections for K-Shell Ionization by Alpha Particles", *Atom. Data Nucl. Data Tables*, 54, 75-131, 1993.

Riggi S., Caruso R., Insolia A., Scuderi M.: "A neural network approach to event-by-event primary mass identification by means of FD observables", XI Inter. Workshop on Advanced Computing and Analysis Techniques in Physics Research, PoS(ACAT)035, 2007

Rorabacher D.B.: "Statistical treatment for rejection of deviant values: critical values of Dixon's 'Q' parameter and related subrange ratios at the 95% confidence level", *Anal. Chem.*, 63 (2), 139–146, 1991.

Sarlanis C., PhD Thesis, University of Athens, 2007

Sato T., Niita K., Matsuda N., Hashimoto S., Iwamoto Y., Noda S., Ogawa T., Iwase H., Nakashima H., Fukahori T., Okumura K., Kai T., Chiba S., Furuta T. and Sihver L.: "Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52", *J. Nucl. Sci. Technol.* 50, 913-923, 2013

Schure K.M. and Bell A.R.: "Cosmic ray acceleration in young supernova remnants", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431, 415–429, 2013

Schwadron N.A., Adams F.C., Christian E.R., Desiati P. et al.: "Global anisotropies in TeV cosmic rays related to the Sun's local galactic environment from IBEX", 343, 988-990, 2014

Semikh S., Serre S., Autran, J.-L., Munteanu, D., Sauze, S., Yakushev, E., Rozov, S.: "The Plateau de Bure Neutron Monitor: Design, Operation and Monte Carlo Simulation", IEEE Transactions on Nuclear Science, 59, 303-313, 2012

Seo E.S., Anderson T., Angelaszek D., Baek S.J. et al.: "Cosmic Ray Energetics And Mass for the International Space Station (ISS-CREAM)", Advances in Space Research, 53, 1451–1455, 2014

Shibata S., Munakata Y., Tatsuoka R., Muraki Y. et al.: "Detection efficiency of a neutron monitor calibrated by an accelerator neutron beam", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 463, 316–320, 2001

Simpson J. A.: "The Cosmic Ray Nucleonic Component: The Invention And Scientific Uses Of Neutron Monitor", Space Sci. Rev. 93, 1-20, 2000

Sokolsky P. [HiRes Collaboration]: "Final Results from the High Resolution Fly's Eye (HiRes) Experiment", Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 212–213, 74–78, 2011

Souvatoglou G., Mavromichalaki H., Sarlanis C., Mariatos G. et al.: "Real Time GLE ALERT in the ANMODAP Center for December 13, 2006", Advances in Space Research, 43, 728-734, 2009

Stoker P., Dorman L.I., Clem J.: "Neutron Monitor Design Improvements", Space Science Reviews, 93, 361-380, 2000

Stone E.C., Cummings A.C., McDonald F.B., Heikkila B.C., Lal N., Webber W.R.: "Voyager 1 Observes Low-Energy Galactic Cosmic Rays in a Region Depleted of Heliospheric Ions", Science, 341, 150-153, 2013

Takai H.: "MARIACHI — Detecting Ultra High Energy Cosmic Rays with radar". American Physical Society, APS April Meeting, April 22–26, 2006

Tanaka H., Dugad S.R., Gupta S.K., Jain A. et al.: "Studies of the energy spectrum and composition of the primary cosmic rays at 100-1000 TeV from the GRAPES-3 experiment", Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 39, 025201, 2011

- Thompson D.J., Baldini L., Uchiyama Y.: "Cosmic Ray Studies with the Fermi Gamma-ray Space Telescope Large Area Telescope", *Astroparticle Physics*, 39, 22–32, 2012
- Thompson W.L, Cashwell E.D., Godfrey T.N.K., Schrandt R.G., Deutsch O.L., Booth T.E.: "Status of Monte Carlo at Los Alamos", LA-8353-MS, 1980
- Troitsky S.V.: "Magnetic deflections and possible sources of the ultra-high-energy cosmic rays in the AGASA-HiRes-Yakutsk cluster", *Astropart. Phys*, 26, 325-331, 2006
- Tsyganenko N.A.: "A magnetospheric magnetic field model with the warped tail current sheet", *Planet. Space Sci.*, 37, 5-20, 1989
- Tsyganenko N.A.: "Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause", *J. Geophys. Res.*, 100, 5599-5612, 1995
- U.S. Government Printing Office: "U.S. Standard Atmosphere, 1976", Washington D.C., 1976
- Usoskin, I.G., Gladysheva O.G., Kovaltsov, G.A., "Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Spatial and temporal changes", *J. Atm. Solar-Terr. Phys.*, 66, 1791-1796, 2004
- Usoskin I.G., Kovaltsov G.A.: "Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications", *J. Geophys. Res.*, 111, D21206, 2006
- Usoskin, I.G., Kovaltsov G.A., Mironova I. A.: "Cosmic ray induced ionization model CRAC:CRIL: An extension to the upper atmosphere", *J. Geophys. Res.*, 115, D10302, 2010
- Uzhinsky V., Apostolakis J., Galoyan A., Folger G., Grichine V.M., Ivanchenko V.N., Wright D.H.: "Antinucleus-nucleus Cross Sections Implemented in Geant4", *Physics Letters B*, 705, 235-239, 2011
- Wilkes R.J., Berns H.-G., Burnett T.H., Gran R.: "WALTA school-network cosmic ray detectors", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 51, 1385 - 1388, 2004
- Yamamoto A., Abe K., Fuke H., Haino S. et al.: "The BESS Program", *Nuclear Physics B(Proc. Suppl.)* 166, 62-67, 2007

Yanke V., Belov A., Klepach E., Eroshenko E., Nikolaevsky N., Kryakunova O., Sarlanis H., Mavromichalaki E., Gerontidou M.: "Primary Processing of Multichannel Cosmic Ray Detectors", Proc. 32nd ICRC, Beijing, icrc0599, 2011

Zucon P.: "A monte carlo simulation of the cosmic rays interactions with the Earth's atmosphere", International Journal of Modern Physics A, 17, 1625-1634, 2002



## Ιστοσελίδες

<http://cosray.phys.uoa.gr/>

<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/data/nm-database>

<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/data/nm-plots>

<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/data/nm-barometric-coefficient>

<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/esa-neutron-monitor-service/multi-station-neutron-monitor-data>

[cosray.phys.uoa.gr/index.php/applications/6nm64-simulation](http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/applications/6nm64-simulation)

<http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/applications/dyastima>

<http://www.nmdb.eu/>

<http://www.nmdb.eu/nest/search.php>

<http://swe.ssa.esa.int/web/guest/space-radiation>

<http://root.cern.ch/drupal/>

<http://root.cern.ch/root/html/TMultiLayerPerceptron.html>

<http://root.cern.ch/root/html/TRandom3.html>

<http://geant4.cern.ch/>

<http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/>



## Κατάλογος Σχετικών Δημοσιεύσεων

### Σε περιοδικά με κριτές:

- 1) P. Paschalis and H. Mavromichalaki: "Real- time processing of neutron monitor data using the Edge editor algorithm", *Space Weather and Climate*, 2, A15, 2012
- 2) P. Paschalis, C. Sarlanis and H. Mavromichalaki: "Artificial Neural Networks Approach of Cosmic Ray Primary data processing", *Solar Physics*, 282, 303-318, 2013
- 3) P. Paschalis and H. Mavromichalaki: "Optimization of neutron monitor data correction algorithms", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 714, 38-47, 2013
- 4) P. Paschalis, H. Mavromichalaki, V. Yanke, A. Belov, E. Eroshenko, M. Gerontidou and I. Koutroumpi: "Online application for barometric coefficient calculation of the NMDB stations", *New Astronomy*, 19, 10-18, 2013
- 5) P. Paschalis, H. Mavromichalaki and L.I. Dorman: "A quantitative study of the 6NM-64 neutron monitor by using Geant4: 1. Detection efficiency for different particles", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 729, 877-887, 2013
- 6) A. Papaioannou, G. Souvatzoglou, P. Paschalis, M. Gerontidou, H. Mavromichalaki: "The first ground level enhancement of solar cycle 24 on 17 May 2012 and its real time detection", *Solar Physics*, 289, 423-436, 2013
- 7) P. Paschalis, C. Sarlanis, H. Mavromichalaki: "Primary Data Processing Algorithms for Neutron Monitors", *Journal of Physics* 409, 012198, 2013
- 8) P. Paschalis, H. Mavromichalaki, V. Yanke, A. Belov, E. Eroshenko, M. Gerontidou and I. Koutroumpi: "An online application for the barometric coefficient calculation of NMDB stations", *Journal of Physics* 409, 012179, 2013
- 9) M. Abunina, A. Papaioannou, M. Gerontidou, P. Paschalis, A. Abunin, S. Gaidash, I. Tsepakina, A. Malimbayev, A. Belov, H. Mavromichalaki, O. Kryakunova, P. Velinov: "Forecasting Geomagnetic Conditions in near-Earth space", *Journal of Physics* 409, 012197, 2013

10) P. Paschalis, H. Mavromichalaki, L.I. Dorman, C. Plainaki, D. Tsigrikas: "Application for the cosmic rays simulation of atmospheric showers using Geant4", *New Astronomy*, 33, 26-37, 2014

**Παρουσιάσεις σε συνέδρια:**

1) P. Paschalis, C. Sarlanis, H. Mavromichalaki: "Primary Data Processing Algorithms for Neutron Monitors", Proc. 23rd ECRS (Moscow, 3-7 July 2012), ecrs\_sh-636

2) P. Paschalis, H. Mavromichalaki, V. Yanke, A. Belov, E. Eroshenko, M. Gerontidou and I. Koutroumpi: "An online application for the barometric coefficient calculation of NMDB stations", Proc. 23rd ECRS (Moscow, 3-7 July 2012), ecrs\_sh\_519

3) M. Abunina, A. Papaioannou, M. Gerontidou, P. Paschalis, A. Abunin, S. Gaidash, I. Tsepakina, A. Malimbayev, A. Belov, H. Mavromichalaki, O. Kryakunova, P. Velinov: "Forecasting Geomagnetic Conditions in near-Earth space", Proc. 23rd ECRS (Moscow, 3-7 July 2012), ecrs\_sh\_622

4) A. Papaioannou, H. Mavromichalaki, G. Souvatzoglou, P. Paschalis, C. Sarlanis, J. Dimitroulakos and M. Gerontidou: "Space Environment Forecasting with Neutron Monitors: Establishing a novel service for the ESA SSA Program", EGU General Assembly 2013 (Vienna, April 2013), Geophys. Res. Abstracts, 15, EGU2013-11784, 2013

5) H. Mavromichalaki, A. Papaioannou, G. Souvatzoglou, J. Dimitroulakos, P. Paschalis, M. Gerontidou and E. Paouris: "Implementing the European Neutron Monitor Service for the ESA SSA Program", Proc. 11th HEL.A.S. (Athens, 1-5 September 2013), 2013

6) P. Paschalis, H. Mavromichalaki, L.I. Dorman, D. Tsigrikas: "Simulation of neutron monitor using Geant4", European Space Weather week 10, (Antwerp, 18-22 November 2013), 152, 2013

7) M. Gerontidou, E. Paouris, P. Paschalis, A. Papaioannou, H. Mavromichalaki: "Geomagnetic Conditions Forecasting Using Solar Activity Parameters", European Space Weather week 10, (Antwerp, 18-22 November 2013), 140, 2013

- 8) H. Mavromichalaki, A. Papaioannou, G. Souvatzoglou, J. Dimitroulakos, P. Paschalis, M. Gerontidou, C. Sarlanis: "Establishing a Space Weather Service based upon Neutron Monitors for the ESA SSA Program", European Space Weather week 10, (Antwerp, 18-22 November 2013), 83, 2013
- 9) H. Mavromichalaki, M. Gerontidou, P. Paschalis, A. Papaioannou, E. Paouris, G. Souvatzoglou: "Research applications of the Athens Neutron Monitor Station", ECRS 2014, (Kiel, 1-5 September 2014), S1 457, 62, 2014
- 10) P. Paschalis, M. Gerontidou, H. Mavromichalaki: "Handling of the neutron monitor data", NMDB Meeting, (Kiel, 8-12 September 2014)
- 11) P. Paschalis and H. Mavromichalaki: "Primary data processing algorithms in real time", NMDB Meeting, (Kiel, 8-12 September 2014)

