



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ
ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Υπολογιστική ανάλυση του ρόλου των παρεμποδιστών
εγχάραξης στην τραχύτητα επιφανειών που εγχαράσσονται
με πλάσμα**

Βασιλική Π. Σκούρτη

Επιβλέπων: Γεώργιος Κόκκορης, Ερευνητής

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υπολογιστική ανάλυση του ρόλου των παρεμποδιστών εγχάραξης στην τραχύτητα επιφανειών που εγχαράσσονται με πλάσμα

Βασιλική Π. Σκούρτη

A. M.: MM209

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Γεώργιος Κόκκορης, Ερευνητής

Ιούλιος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εγχάραξη με πλάσμα αποτελεί μία από τις κύριες διεργασίες κατασκευής μικρο- και νανοδιατάξεων και τροποποίησης (αρχικά επίπεδων) επιφανειών. Οι μηχανισμοί εγχάραξης είναι η καθαρά χημική εγχάραξη, η ιονοβολή και η υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη. Κατά την εγχάραξη με πλάσμα, αναπτύσσεται δημιουργείται τραχύτητα στις πλευρικές επιφάνειες γραμμών ή οπών κατά τη μεταφορά σχήματος αλλά και στις αρχικά επίπεδες επιφάνειες. Ο λόγος της δημιουργίας τραχύτητας σε επιφάνεια είναι η αδυναμία ομοιόμορφης εγχάραξης σε κάθε σημείο της. Η τραχύτητα με την σειρά της, διαμορφώνει τις ιδιότητες της επιφάνειας και καθορίζει τη λειτουργία των διατάξεων: Για παράδειγμα, η τραχύτητα αρχικά επίπεδων επιφανειών επηρεάζει τις ιδιότητες διαβροχής τους και η πλευρική τραχύτητα γραμμών ή οπών επηρεάζει τη λειτουργία των σχετικών διατάξεων (π.χ. τρανζίστορ).

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην τραχύτητα που δημιουργείται κατά την εγχάραξη με πλάσμα αρχικά επίπεδων επιφανειών. Ένας από τους μηχανισμούς δημιουργίας και εξέλιξης τραχύτητας που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία είναι η συμμετοχή στην εγχάραξη των λεγόμενων παρεμποδιστών εγχάραξης. Οι παρεμποδιστές είναι συστατικά που αποτίθενται στην επιφάνεια, λειτουργούν ως τοπικές μάσκες και δεν επιτρέπουν την ομοιόμορφη εγχάραξη της επιφάνειας. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των παρεμποδιστών εγχάραξης στην τραχύτητα που αναπτύσσεται κατά την εγχάραξη με πλάσμα. Για την επίτευξη του στόχου χρησιμοποιείται υπολογιστικό πλαίσιο Monte Carlo για την προσομοίωση της εξέλιξης της μορφολογίας εγχαρασσόμενων επιφανειών και υλοποιείται μαθηματικός χαρακτηρισμός των (μορφολογιών των) επιφανειών με στατιστικά μεγέθη όπως η root mean square (rms) τραχύτητα, το μήκος συσχέτισης και η φασματική πυκνότητα ισχύος.

Εξετάζονται δύο πηγές παρεμποδιστών εγχάραξης: Αυτοί που προέρχονται από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα και αυτοί που παράγονται τοπικά στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια και επανααποτίθενται σε αυτήν (προϊόντα εγχάραξης). Γίνεται μελέτη τόσο περιπτώσεων ταυτόχρονης διαδικασίας εγχάραξης – απόθεσης όσο και περιπτώσεων σειριακής επαναλαμβανόμενης εγχάραξης και απόθεσης. Διερευνάται η επίδραση του συντελεστή προσκόλλησης και της επιλεκτικότητας εγχάραξης των παρεμποδιστών.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φανερώνουν ότι μόνο όταν οι παρεμποδιστές προέρχονται από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα υπάρχει περιοδικότητα στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια. Η αύξηση του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών οδηγεί σε μείωση της rms τραχύτητας όταν οι παρεμποδιστές προέρχονται από την επιφάνεια και αύξηση της rms τραχύτητας όταν οι παρεμποδιστές προέρχονται από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα. Η σειριακή επαναλαμβανόμενη διαδικασία εγχάραξης απόθεσης δεν οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα με την ταυτόχρονη εγχάραξη – απόθεση. Όσο το πλήθος εναλλαγών εγχάραξης – απόθεσης αυξάνει (η συχνότητα αυξάνει), οι τιμές των στατιστικών μεγεθών χαρακτηρισμού της επιφάνειας τείνουν σε αυτές της ταυτόχρονης εγχάραξης – απόθεσης, ωστόσο η rms τραχύτητα απαιτεί πολύ μεγαλύτερο πλήθος κύκλων γι αυτό. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με επιφάνειες που προκύπτουν από πειράματα εγχάραξης διαφορετικών υποστρωμάτων με πλάσμα διαφορετικών αερίων.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Εγχάραξη με πλάσμα

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: εγχάραξη, τραχύτητα, πλάσμα, απόθεση, παρεμποδιστές, προσομοίωση, Monte Carlo

ABSTRACT

Plasma etching is one of the main processes for making micro- and nanodevices and modifying (initially flat) surfaces. Etching mechanisms are pure chemical etching, physical sputtering and ion-enhanced etching. Plasma etching inevitably induces roughness on the sidewalls of lines of holes during pattern transfer and on the initially flat surfaces. The origin of surface roughness is local nonuniformity of the etching rate on the etched surface. Surface roughness is critical as it affects the properties of the surface and the operation of the devices: For example, the roughness of initially flat surfaces affects their wetting properties and sidewall roughness of lines or holes affects the operation of the relevant devices (e.g. transistors).

The present study focuses on the roughness created during plasma etching of initially flat surfaces. One of the proposed mechanisms for the creation and development of roughness is the participation of the so-called etch-inhibitors or inhibitors in etching. The inhibitors are species deposited on the surface, act as local etch-masks, and do not allow for uniform etching. The aim of this work is to study the effect of etch-inhibitors on the roughness developed during plasma etching. To achieve the goal, a Monte Carlo computational framework is used to simulate the evolution of the morphology of etched surfaces and a mathematical characterization of surface morphologies is performed with statistical measures such as root mean square (rms) roughness, correlation length and power spectral density.

Two sources of etch-inhibitors are examined: The first source is the bulk of the reactor and the second is the etching products being produced locally on the etched surface and redeposited thereon. The study covers both cases of simultaneous etching and deposition processes as well as cases of serial repeating etching and deposition. The effect of the sticking coefficient and etching selectivity of the etch-inhibitors is investigated.

The results of the simulations show that only when the etch-inhibitors come from the bulk of the reactor, periodicity exists on the etched surface. Increasing the sticking coefficient of the inhibitors results in a decrease in rms roughness when the etch-inhibitors come from the surface and an increase when the etch-inhibitors come from the bulk of the reactor. The serial repeating process of etching and deposition does not induce the same roughness with simultaneous etching and deposition. As the number of etching - deposition cycles increases (the frequency increases), the statistical measures of the surface tend to those of the simultaneous etching and deposition, though rms roughness needs a much larger number of cycles for it. Finally, the results of the simulation are compared with experimental results of etched surfaces of different substrates with different plasmas.

SUBJECT AREA: Plasma etching

KEYWORDS: etching, roughness, plasma, deposition, etch-inhibitors, simulation, Monte Carlo

Στον Ιάσονα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας Δρ. Γεώργιο Κόκκορη για τον χρόνο που μου αφιέρωσε, την προθυμία για βοήθεια σχετικά με την μελέτη του περιεχομένου και την καθοδήγηση κατά την εκπόνηση της εργασίας, αλλά και την υπομονή και την κατανόηση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	18
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1.1 Διεργασία εγχάραξης – εγχάραξη με πλάσμα	19
1.2 Δημιουργία και φυσικά χαρακτηριστικά του πλάσματος	20
1.3 Οι βασικοί μηχανισμοί εγχάραξης με πλάσμα	21
1.4 Η επιφανειακή τραχύτητα κατά την εγχάραξη με πλάσμα και η σημασία της στις ιδιότητες της επιφάνειας	22
1.5 Είδη τραχύτητας	22
1.6 Μηχανισμοί δημιουργίας τραχύτητας σε εγχαρασσόμενες επιφάνειες	23
1.7 Ο σκοπός της παρούσας εργασίας	26
2. ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ	28
2.1 Εισαγωγή	28
2.2 Οι μεταβλητές εισόδου του μοντέλου Monte Carlo	29
2.3 Μοντέλο Monte Carlo για την εξέλιξη μορφολογίας επιφάνειας	30
2.4 Στατιστικά μεγέθη χαρακτηρισμού της μορφολογίας τραχείας επιφάνειας	33
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	37
3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση: Παρεμποδιστές από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα	40
3.2.1 Επίδραση του συντελεστή προσκόλλησης και του κλάσματος των παρεμποδιστών	40
3.2.2 Επίδραση της επιλεκτικότητας εγχάραξης των παρεμποδιστών	48
3.3 Ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση: Παρεμποδιστές από επαναπόθεση των προϊόντων της εγχάραξης.....	54
3.3.1 Ο ρόλος της επαναπόθεσης των παρεμποδιστών και της επανεκπομπής (ανάκλασης) των ιόντων	54
3.3.2 Η επίδραση του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών (προϊόντων εγχάραξης)	60
3.4 Σειριακή επαναλαμβανόμενη ακολουθία εγχάραξης και απόθεσης	66
3.4.1 Η επίδραση του πλήθους των κύκλων εγχάραξης - απόθεσης.....	66
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	75
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	81
A: Παράλληλη εγχάραξη και απόθεση με διαφορετικό ποσοστό ιόντων και παρεμποδιστών	81

Β: Παράλληλη εγχάραξη και απόθεση με διαφορετικό ποσοστό ιόντων και παρεμποδιστών, αλλά και με διαφορετική απόδοση εγχάραξης	106
Γ: Παράλληλη εγχάραξη και απόθεση με και χωρίς το φαινόμενο της επαναπόθεσης, με βέβαιη προσκόλληση ιόντων	116
Δ: Παράλληλη εγχάραξη και απόθεση με και χωρίς το φαινόμενο της επαναπόθεσης, με μη βέβαιη προσκόλληση ιόντων	125
Ε: Σειριακή εγχάραξη και απόθεση με διαφορετικό αριθμό κύκλων εγχάραξης ιόντων - απόθεσης παρεμποδιστών	132
ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	154
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	155
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	156

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Κατηγορίες και τρόποι εγχάραξης	19
Σχήμα 2: Διατάξεις αντιδραστήρων πλάσματος (α) RIE, (β) ECR (γ) ICP	19
Σχήμα 3: Μηχανισμοί εγχάραξης με πλάσμα: (α) Χημική εγχάραξη, (β) ιονοβολή, και υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη (γ) είτε μέσω ενεργοποίησης της επιφάνειας (δ) είτε μέσω απομάκρυνσης στρώματος παθητικοποίησης (παρεμποδιστές εγχάραξης) [6].....	21
Σχήμα 4: Παραδείγματα εγχάραξης πλάσματος για επιφάνειες υλικών: Εικόνες από μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (Atomic force microscope, AFM) επιφάνειας: α) PMMA που έχει εγχαραχθεί με πλάσμα O_2 , β) PDMS που έχει εγχαραχθεί με πλάσμα SF_6 και γ) Si που έχει εγχαραχθεί με πλάσμα SF_6 . Η επιφάνεια σάρωσης είναι και στις τρεις περιπτώσεις $4\mu m \times 4\mu m$, ενώ ο άξονας z δείχνει το εύρος τιμών του ύψους εγχάραξης για κάθε επιφάνεια [7].....	22
Σχήμα 5: (α) Πλευρική τραχύτητα – τραχύτητα στα πλευρικά τοιχώματα σε αυλάκια πολυμερούς υλικού (εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM). (β) Τραχύτητα σε ελεύθερη σκίασης επιφάνεια πυριτίου (εικόνα SEM). (γ) Περιοδική τραχύτητα επιφάνειας PMMA όπως φαίνεται σε κάτοψη [11, 12].....	23
Σχήμα 6: Τοπικές μεταβολές της απόδοσης εγχάραξης (α) σε μία κοίλη επιφάνεια και (β) σε μία κυρτή επιφάνεια. Τα ευθύγραμμα τμήματα OA, OB, O'A' και O'B' αντιστοιχούν στις αποστάσεις που διανύει η ενέργεια σύγκρουσης από τα κέντρα ενεργειακής απόθεσης O και O' στα σημεία A, B, A', B' [16]	24
Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση της πρώτης τάξεως επανεκπομπής. Κατά την πρώτη πρόσκρουση στο σημείο A η πιθανότητα προσκόλλησης ουδέτερου σωματιδίου πάνω στην επιφάνεια είναι 0, ενώ στην επόμενη πρόσκρουση στο σημείο B το ουδέτερο άτομο προσκολλάται με πιθανότητα 1 [17].....	24
Σχήμα 8: Πολυμερές χωρισμένο στην ζώνη επίδρασης της υπεριώδους (VUV) ακτινοβολίας (2η ζώνη) και στη ζώνη επίδρασης της δέσμης ιόντων που έχει δεχτεί (1 ^η ζώνη).	25
Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας Bosch. Η συνεχής εναλλαγή μεταξύ κύκλων εναπόθεσης παρεμποδιστών και εγχάραξης παράγει ανισοτροπικά εγχαραγμένα προφίλ, παρόλα αυτά η επιφάνεια των προφίλ είναι κυματιστή, με κάθε «κύμα» να αντιστοιχεί σε έναν κύκλο [21].	26
Σχήμα 10: Ενίσχυση της τραχύτητας λόγω της κάλυψης ανισόπεδης επιφάνειας με παρεμποδιστές εγχάραξης. Αν οι παρεμποδιστές κατανέμονται ισοτροπικά, τότε	

εξαιτίας του φαινομένου της σκίασης ο λόγος της ροής ιόντων προς αυτή των παρεμποδιστών είναι μεγαλύτερος στις κοιλάδες από ότι στις κορυφές της επιφάνειας, οπότε και ο ρυθμός εγχάραξης των κοιλάδων είναι μεγαλύτερος από αυτόν των κορυφών [22].	26
Σχήμα 11: Το υπολογιστικό πλαίσιο προσομοίωσης της εξέλιξης εγχαρασσόμενης επιφάνειας.	28
Σχήμα 12: Η εξάρτηση από την γωνία πρόσπτωσης των ιόντων, θ_i , (α) του συντελεστή προσκόλλησης των ιόντων, S_c , για διάφορες ενέργειες πρόσπτωσης των ιόντων [20] και (β) της απόδοσης εγχάραξης, Y , σε ιονοβολές ιόντων Cu^+ σε επιφάνεια χαλκού για διάφορες ενέργειες πρόσπτωσης ιόντων, E_i [20].	30
Σχήμα 13: Προσομοίωση Monte Carlo για το μοντέλο της ανακατανομής: Ένα εισερχόμενο σωματίδιο προσκρούει την επιφάνεια και επανεκπέμπεται σε ένα άλλο σημείο της επιφάνειας. Εκεί προσκολλάται σε αυτή και την εγχαράσσει [14].	31
Σχήμα 14: Χρονική εξέλιξη της επιφανειακής τραχύτητας με χρήση μοντέλου Monte Carlo χρησιμοποιώντας διαφορετικές διαστάσεις πλέγματος: 20×20 , 50×50 , 100×100 και 150×150 [21].	33
Σχήμα 15: Ανάγλυφο για $\alpha=0.2$ (αριστερά) και $\alpha=0.8$ (δεξιά).	35
Σχήμα 16: Συνάρτηση συσχέτισης υψών μιας αυτοσυσχετιζόμενης επιφάνειας [23].	35
Σχήμα 17: Ανάγλυφο για $\xi=50$ (αριστερά) και $\xi=100$ (δεξιά).	36
Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση της ταυτόχρονης εγχάραξης α) με παρεμποδιστές από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα, β) με παρεμποδιστές από επαναπόθεση των προϊόντων της εγχάραξης, γ) με παρεμποδιστές και από τις δύο πηγές και δ,ε) της σειριακής εγχάραξης και απόθεσης.	38
Σχήμα 19: Κατόψεις της εγχαρασσόμενης επιφάνειας σε διαφορετικές χρονικές στιγμές όταν $X_d=0.05$ και $S_{d, sb} = S_{d, d} = S_d = 1$. Κατόψεις μετά από πρόσπτωση α) $4.9 \cdot 10^7$ β) $9.9 \cdot 10^7$ γ) $2 \cdot 10^8$ δ) $4 \cdot 10^8$ ε) $5.9 \cdot 10^8$ στ) $7.9 \cdot 10^8$ ζ) $9.9 \cdot 10^8$ υπερ-ιόντων	41
Σχήμα 20: Κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το X_d κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1).	42
Σχήμα 21: α) Μέσο ύψος εγχαρασσόμενης επιφάνειας, β) ρυθμός εγχάραξης, γ) κλάσμα κάλυψης από παρεμποδιστές συναρτήσει του χρόνου (πλήθος υπερ-ιόντων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος) για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για	

τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος σωματιδίων στην επιφάνεια.

.....43

Σχήμα 22: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα. Ο χρόνος ορίζεται ως το πλήθος υπεριόντων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται (το X_d αυξάνεται) είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος υπερ-σωματιδίων (ιόντων και παρεμποδιστών) στην επιφάνεια.....45

Σχήμα 23: Το μήκος συσχέτισης συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα. Ο χρόνος ορίζεται ως το πλήθος υπεριόντων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται (το X_d αυξάνεται) είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος υπερ-σωματιδίων (ιόντων και παρεμποδιστών) στην επιφάνεια.....46

Σχήμα 24: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου. Ο χρόνος ορίζεται ως το πλήθος υπεριόντων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται (το X_d αυξάνεται) είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος υπερ-σωματιδίων (ιόντων και παρεμποδιστών) στην επιφάνεια.47

Σχήμα 25: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου. Ο χρόνος ορίζεται ως το πλήθος υπεριόντων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d

μειώνεται (το X_d αυξάνεται) είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος υπερ-σωματιδίων (ιόντων και παρεμποδιστών) στην επιφάνεια.	47
Σχήμα 26: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2) συναρτήσει του κυματάριθμου (κατοπτρικό της συχνότητας, αφού $u=\omega/k$)	48
Σχήμα 27: Κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας για διαφορετικές τιμές της απόδοσης εγχάραξης των παρεμποδιστών ($EY_{i,d}=1, 0.5, 0.33, 0.25$). Το X_d κυμαίνεται από 0.05 έως 0.0125, ώστε το πηλίκο $X_d / EY_{i,d}$ να είναι σταθερό με 0.05. (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).	49
Σχήμα 28: α) Μέσο ύψος εγχαρασσόμενης επιφάνειας, β) ρυθμός εγχάραξης, γ) κλάσμα καθαρής επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το X_d κυμαίνεται από 0.05 έως 0.0125 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1) ώστε το πηλίκο $X_d / EY_{i,d}$ να είναι σταθερό με 0.05.	50
Σχήμα 29: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το X_d κυμαίνεται από 0.05 έως 0.0125 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).	51
Σχήμα 30: Το μήκος συσχέτισης συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.025 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).	52
Σχήμα 31: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.025 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).	53
Σχήμα 32: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.025 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).	53
Σχήμα 33: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25) συναρτήσει του κυματάριθμου (κατοπτρικό της συχνότητας, αφού $u=\omega/k$)	54
Σχήμα 34: Κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας για πλήθος υπερ-ιόντων $\sim 1.05 \cdot 10^9$ με [(γ) και (δ)] και χωρίς [(α) και (β)] επαναπόθεση των παρεμποδιστών (προϊόντων εγχάραξης). Όταν συμβαίνει επαναπόθεση, ο συντελεστής προσκόλλησης των παρεμποδιστών είναι $S_{sb,sb}=1$. Όταν δεν συμβαίνει, τότε $S_{sb,sb}=0$. Στις κατόψεις (α) και (β) ο συντελεστής προσκόλλησης των ιόντων, $S_{i,sb}$, είναι 1, ενώ στις κατόψεις των	

(γ) και (δ) είναι $\cos\theta$ (όπου θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).	55
Σχήμα 35: α) Μέσο ύψος εγχαρασσόμενης επιφάνειας και β) απόλυτη τιμή του ρυθμού εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου με ($S_{sb,sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb,sb}=0$), με ($S_{i,sb}=\cos\theta$, θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i,sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).	56
Σχήμα 36: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, με ($S_{sb,sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb,sb}=0$), με ($S_{i,sb}=\cos\theta$, θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i,sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).	57
Σχήμα 37: Το μήκος συσχέτισης συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, με ($S_{sb,sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb,sb}=0$), με ($S_{i,sb}=\cos\theta$, θ είναι η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i,sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).	58
Σχήμα 38: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου με ($S_{sb,sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb,sb}=0$), με ($S_{i,sb}=\cos\theta$, θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i,sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).	59
Σχήμα 39: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου με ($S_{sb,sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb,sb}=0$), με ($S_{i,sb}=\cos\theta$, θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i,sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).	59
Σχήμα 40: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης παρεμποδιστών $S_{sb,sb}$ (0, 1) και διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης $S_{i,sub}$ (1, $\cos\theta$) συναρτήσει του κυματάριθμου (κατοπτρικό της συχνότητας, αφού $u=\omega/k$)	60
Σχήμα 41: Κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb,sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i,sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).	61
Σχήμα 42: Μέσο ύψος εγχαρασσόμενης επιφάνειας και β) απόλυτη τιμή του ρυθμού εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή	

προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i, sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).	62
Σχήμα 43: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i, sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).	63
Σχήμα 44: Το μήκος συσχέτισης συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i, sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).	64
Σχήμα 45: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i, sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).	65
Σχήμα 46: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i, sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).....	66
Σχήμα 47: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών για πλήθος υπερ-ιόντων $\sim 1.05 \cdot 10^9$ για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i, sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1)	66
Σχήμα 48: Κατόψεις της εγχαρασσόμενης επιφάνειας κατά τη διάρκεια κύκλων απόθεσης – εγχάραξης μετά από πρόσπτωση α) $4.9 \cdot 10^7$, β) $9.8 \cdot 10^7$, γ) $1.96 \cdot 10^8$, δ) $3.96 \cdot 10^8$, ε) $5.96 \cdot 10^8$, στ) $7.96 \cdot 10^8$ και ζ) $9.96 \cdot 10^8$ υπερ-ιόντων. Η τελευταία κάτοψη αντιστοιχεί στο τέλος 16 κύκλων απόθεσης – εγχάραξης. Το πρώτο βήμα κάθε κύκλου είναι απόθεση.....	68
Σχήμα 49: Κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας όταν φτάνουν στην επιφάνεια $\sim 9.96 \cdot 10^8$ υπερ-ιόντα στο τέλος β) 1 κύκλου, γ) 2, δ) 4, ε) 4 (με πρώτο βήμα εγχάραξης), στ) 8, ζ) 16 και η) 32 κύκλων. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την (ε) το πρώτο βήμα κάθε κύκλου είναι απόθεση. (runs 019-025 του Πίνακα 1). Στο α)	

φαίνεται για λόγους σύγκρισης η περίπτωση ταυτόχρονης εγχάραξης – απόθεσης.	69
Σχήμα 50: α) Μέσο ύψος εγχαρασσόμενης επιφάνειας, β) ρυθμός εγχάραξης και γ) κλάσμα κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).	70
Σχήμα 51: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).	72
Σχήμα 52: Το μήκος συσχέτισης συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).	73
Σχήμα 53: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).	73
Σχήμα 54: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).	74
Σχήμα 55: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών όταν το πλήθος των προσπίπτοντων υπεριόντων είναι $\sim 9.96 \cdot 10^8$ για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι	

το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 Ε) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση.	74
Σχήμα 56: Κάτοψη εγχαρασσόμενης επιφάνειας σε περιπτώσεις παρεμποδιστών που προέρχονται α) από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα και β) από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια.	77
Σχήμα 57: α) rms τραχύτητα συναρτήσει του συντελεστή προσκόλλησης παρεμποδιστών στις περιπτώσεις παρεμποδιστών που προέρχονται είτε από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα (αέρια φάση) είτε από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια. Στο διάγραμμα έχει παραληφθεί η τιμή της rms τραχύτητας που αντιστοιχεί στη διαδικασία εγχάραξης χωρίς παρεμποδιστές που προέρχονται από την επιφάνεια, δηλαδή όπου $S_{sb, sb} = 0$ (run 014 του Πίνακα 1). β) Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών σε περιπτώσεις παρεμποδιστών που προέρχονται είτε από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα (αέρια φάση) είτε από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια.	77
Σχήμα 58: rms τραχύτητα και μήκος συσχέτισης ολοκληρωμένων προσομοιώσεων εγχάραξης συναρτήσει του αριθμού των κύκλων εγχάραξης – απόθεσης τους (με πρώτο βήμα απόθεσης).	78
Σχήμα 59: α) Εικόνα SEM επιφάνειας PS που εγχαρράζεται σε Ar πλάσμα [27]. β) Κάτοψη της προσομοιωμένης εγχαρασσόμενης επιφάνειας στο τέλος ταυτόχρονης εγχάραξης – απόθεσης. γ) Εικόνα SEM επιφάνειας Si που εγχαρράζεται σε κρυογενικές συνθήκες με πλάσμα SF_6 και O_2 [29]. δ) Επιφάνεια που προκύπτει από την προσομοίωση με τους παρεμποδιστές να προέρχονται από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια (runs 001, 017 του Πίνακα 1).	79
Σχήμα 60: Φασματική πυκνότητα ισχύος α) για υμένα PMMA που εγχάρασσονται από πλάσμα O_2 όταν η εφαρμοζόμενη τάση (bias voltage) στο ηλεκτρόδιο παίρνει τιμές από 0 έως 100 V (ο χρόνος εγχάραξης είναι 1 min, η πίεση 0.75 Pa, η ισχύς 1900 W και η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου 65 °C) [28] β) για επιφάνειες που προκύπτουν από προσομοίωση με διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών που προέρχονται από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια, $S_{sb, sb}$ (runs 014-018 του Πίνακα 1).	80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τιμές παραμέτρων των προσομοιώσεων	39
---	----

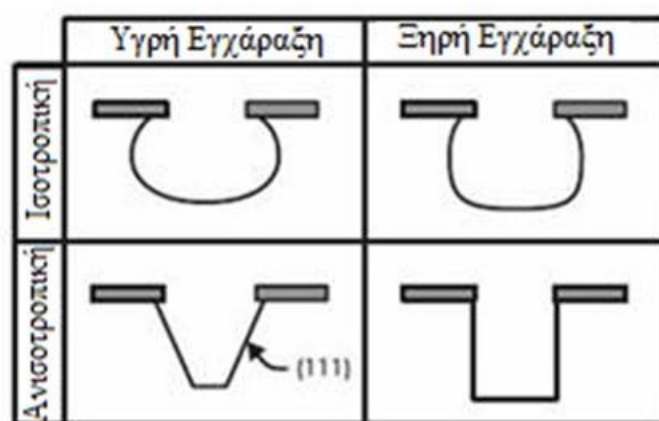
ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2016-2017 και 2017-2018 στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) των Τμημάτων Φυσικής και Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Ε.Κ.Π.Α.) και του Εθνικού Κέντρου Ερευνών Φυσικών Επιστημών (Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.) «Δημόκριτος», που οδηγεί στη λήψη Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης (Μ.Δ.Ε.) στην Μικροηλεκτρονική. Οι υπολογισμοί για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων έγιναν στη συστοιχία υπολογιστών Nessie του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης & Νανοτεχνολογίας του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

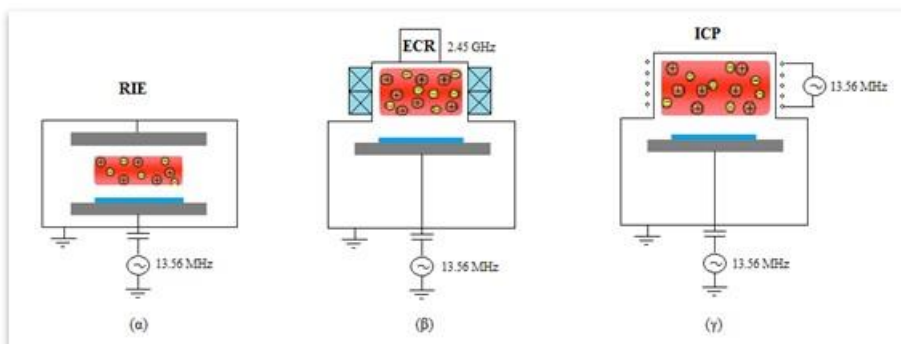
1.1 Διεργασία εγχάραξης – εγχάραξη με πλάσμα

Μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των ηλεκτρονικών μικροδιατάξεων είναι η *εγχάραξη* (*etching*), δηλαδή η αφαίρεση υλικού από κάποιο υπόστρωμα. Υπάρχουν δύο κατηγορίες εγχάραξης: η *υγρή* (*wet etching*) και η *ξηρή* (*dry etching*). Στην υγρή εγχάραξη το υπόστρωμα είναι είτε εμβαπτισμένο μέσα σ' ένα χημικό διάλυμα, το οποίο προκαλεί την αφαίρεση του υλικού, ή ψεκασμένο με αυτό το διάλυμα. Η παρούσα εργασία, ασχολείται μόνο με περιπτώσεις εγχάραξεων με πλάσμα, οι οποίες αποτελούν (ενδεχομένως την σημαντικότερη) υποκατηγορία των ξηρών εγχάραξεων. Ακόμα, υπάρχουν δύο τρόποι εγχάραξης: ο *ισοτροπικός* και ο *ανισοτροπικός*. Στον ισοτροπικό τρόπο εγχάραξης η αφαίρεση του υλικού γίνεται σε όλες τις διευθύνσεις, ενώ στον ανισοτροπικό μόνο σε κάθετη ως προς την επιφάνεια του στόχου διεύθυνση (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Κατηγορίες και τρόποι εγχάραξης

Παραδείγματα ξηρής εγχάραξης με χρήση πλάσματος είναι η κατασκευή ηλεκτροδίων πύλης και ρηχών αυλακιών απομόνωσης από πυρίτιο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, συνήθως χρησιμοποιούνται αντιδραστήρες πλάσματος τύπου RIE (Reactive Ion Etching) με συχνότητα λειτουργίας 13,56 MHz, αντιδραστήρες ECR (Electron-Cyclotron-Resonance) με συχνότητα λειτουργίας στα 2,45 GHz ή ICP (Inductively Coupled Plasma) στα 13,56 MHz (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Διατάξεις αντιδραστήρων πλάσματος (α) RIE, (β) ECR (γ) ICP

1.2 Δημιουργία και φυσικά χαρακτηριστικά του πλάσματος

Το πλάσμα δημιουργείται κατά την εφαρμογή υψηλής τάσης σε ένα αέριο που βρίσκεται σε θάλαμο σε συνθήκες κενού. Τα ηλεκτρόνια ως πιο ευκίνητα, επιταχυνόμενα από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από την υψηλή τάση που εφαρμόζεται, αποκτούν μια υψηλή μέση κινητική ενέργεια πολλών eV που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία η οποία υπερτερεί κατά χιλιάδες βαθμούς της θερμοκρασίας του αερίου (η οποία είναι η θερμοκρασία των ιόντων και οι τιμές της είναι συνήθως λίγο υψηλότερες από εκείνες της θερμοκρασίας περιβάλλοντος). Τα ηλεκτρόνια λοιπόν, απομακρύνονται γρηγορότερα από τα ιόντα από τις θέσεις που βρισκόντουσαν μέχρι εκείνη την στιγμή και έτσι, είναι αυτά που ξεκινούν την διαδικασία του πλάσματος. Το πλάσμα που σχηματίζεται είναι βεβαίως ένα μακροσκοπικά ουδέτερο ηλεκτρικά μίγμα ηλεκτρονίων, ιόντων και ουδέτερων σωματιδίων, αφού το αέριο που τοποθετείται είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και τα στοιχεία που το απαρτίζουν εξακολουθούν να βρίσκονται στον ίδιο χώρο, δηλαδή στον αντιδραστήρα. Παράλληλα, σχηματίζονται περιοχές που εμφανίζουν τοπικές διακυμάνσεις με άνισες συγκεντρώσεις θετικών και αρνητικών φορτίων.

Έτσι, μέσα στον αντιδραστήρα του πλάσματος, συνυπάρχουν συστατικά διαφορετικών θερμοκρασιών: τα θερμά ηλεκτρόνια και τα ψυχρά ιόντα και ουδέτερα μόρια του αερίου. Η συνύπαρξη αυτή, καθιστά τις διεργασίες πλάσματος διαφορετικές από τις λοιπές συμβατικές θερμικές διεργασίες.

Οι συγκρούσεις που γίνονται μέσα στο πλάσμα μπορεί να είναι είτε ελαστικές, είτε ανελαστικές. Στην περίπτωση των ελαστικών συγκρούσεων, υπάρχει μεταφορά ενέργειας και ορμής ανάμεσα στα συγκρουόμενα σωματίδια, οπότε αλλάζει η διεύθυνση κίνησης των συμμετεχόντων σωματιδίων και η ταχύτητά τους, χωρίς όμως να επηρεάζονται οι εσωτερικές τους καταστάσεις. Στις ανελαστικές συγκρούσεις από την άλλη, συμβαίνουν οι αλλαγές που γίνονται και στις περιπτώσεις των ελαστικών κρούσεων, αλλά επιπλέον κάποια από τα συμμετέχοντα σωματίδια εν γένει προωθούνται και σε διεγερμένες καταστάσεις.

Το ποσοστό των ελαστικών και των ανελαστικών κρούσεων, εξαρτάται προφανώς από την μέση κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων: Αν η μέση κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι μικρή για να προκαλέσει διέγερση, οι πιο πολλές συγκρούσεις ηλεκτρονίων και μορίων θα είναι ελαστικές, ενώ όσο αυτή μεγαλώνει, τόσο λιγότερες θα είναι οι ελαστικές και τόσο περισσότερες οι ανελαστικές συγκρούσεις. Όμως, επιπλέον εξαρτάται και από την απαιτούμενη ενέργεια του υλικού για μετάπτωση των ηλεκτρονίων από την θεμελιώδη στάθμη σε κάποια διεγερμένη. Έτσι, στα ευγενή αέρια που σχηματίζουν διατομικά μόρια και τα ηλεκτρόνια βρίσκονται κοντά στους πυρήνες, απαιτείται μεγαλύτερη ενέργεια για την διέγερσή τους, από ότι στα μοριακά αέρια. Αυτό, έχει ως αποτέλεσμα στα ευγενή αέρια να κυριαρχεί το φαινόμενο των ελαστικών συγκρούσεων περισσότερο από ότι στα μοριακά, για δεδομένη μέση κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων.

Επίσης, η μεγάλη μέση κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων, έχει ως συνέπεια την αρνητική φόρτιση όποιων επιφανειών έρχονται σε άμεση επαφή με το πλάσμα. Αυτές οι επιφάνειες, μπορεί να είναι είτε τα τοιχώματα του αντιδραστήρα, είτε οι επιφάνειες των δειγμάτων. Καθώς είναι φορτισμένες αρνητικά λοιπόν αυτές οι επιφάνειες, έλκουν τα θετικά ιόντα, τα οποία με την σειρά τους προσκρούουν πάνω τους. Τα αρνητικά ιόντα από την άλλη, έχουν πολύ χαμηλότερη μέση κινητική ενέργεια και πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία και είναι εγκλωβισμένα να κάνουν διαρκώς συγκρούσεις επανασύνδεσης και αποσύνδεσης εντός του πλάσματος [3].

Μέσα στο πλάσμα του αντιδραστήρα, παρατηρείται επίσης οπτική εκπομπή, η οποία είναι αποτέλεσμα των αποδιεγέρσεων ατόμων και μορίων που συμβαίνουν στον χώρο αυτόν,

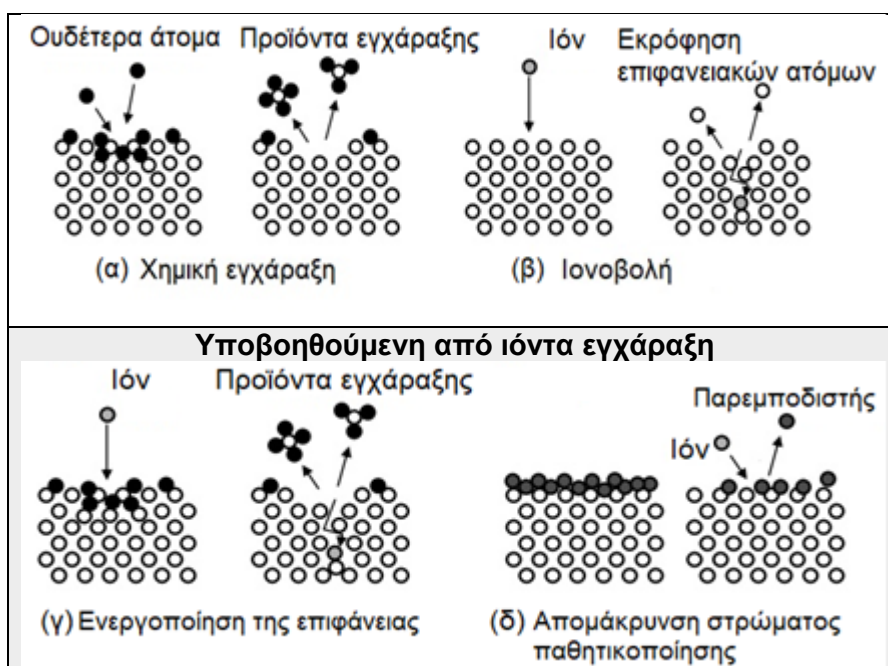
ως άμεση συνέπεια των διεγέρσεων λόγω ανελαστικών κρούσεων. Το μήκος κύματος λοιπόν του εκπεμπόμενου φωτός κατά την αποδιέγερση ατόμων και μορίων, είναι σε πολλές περιπτώσεις ικανό να σπάσει χημικούς δεσμούς και ενδεχομένως χρήσιμο στην τροποποίηση κατά την επεξεργασία πολυμερικών υλικών.

1.3 Οι βασικοί μηχανισμοί εγχάραξης με πλάσμα

Οι βασικοί μηχανισμοί στους οποίους στηρίζεται η εγχάραξη με πλάσμα είναι τρεις: η *ιονοβολή* ή *μηχανική εγχάραξη* (*physical sputtering*), η *χημική εγχάραξη* (*chemical etching*) και η *υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη* (*ion-enhanced etching*) (Σχήμα 3).

Η ιονοβολή είναι η εγχάραξη που προκαλείται από μηχανική δράση των ιόντων κατά την πρόσκρουσή τους στο υπόστρωμα (Σχήμα 3β). Η χημική εγχάραξη από την άλλη, λαμβάνει χώρα όταν υπάρχει χημική δράση των ηλεκτρικά ουδέτερων συστατικών (ρίζες), όπως είναι το οξυγόνο, το οποίο αφαιρεί το υλικό και το μετατρέπει σε πτητικό CO, CO₂ και άλλα στοιχεία (Σχήμα 3α). Η υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη προκύπτει από τη συνεργηστική δράση των ιόντων με τα ουδέτερα συστατικά του πλάσματος στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια (Σχήμα 3γ).

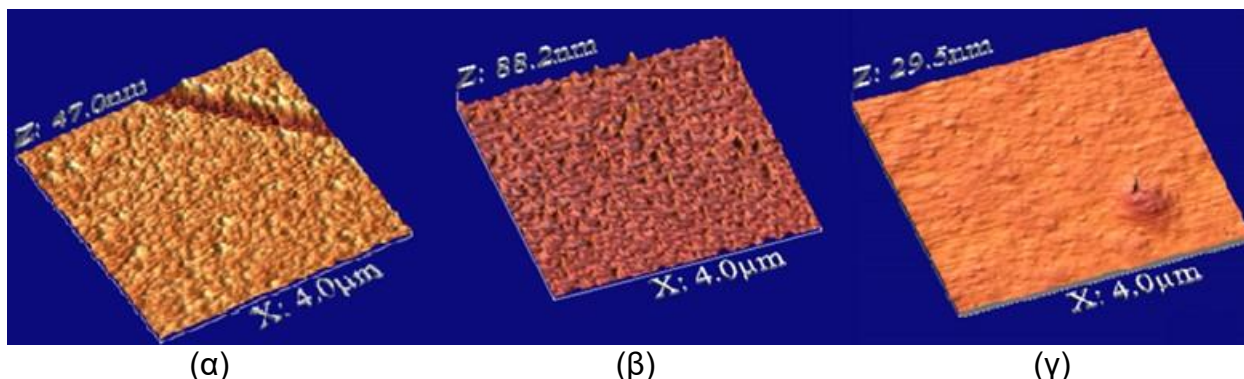
Κατά την υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη, τα ιόντα είτε ενεργοποιούν την επιφάνεια (διάσπαση χημικών δεσμών, διαταραχή της δομής του πλέγματος, σχηματισμός ατελειών πλέγματος, εξαναγκασμένη διάχυση μορίων στο πλέγμα) (Σχήμα 3γ) διευκολύνοντας τις χημικές αντιδράσεις, είτε απομακρύνουν στρώμα παθητικοποίησης από την επιφάνεια (Σχήμα 3δ). Το στρώμα παθητικοποίησης της επιφάνειας δημιουργείται από μη πτητικά προϊόντα εγχάραξης ή από πρόδρομες ενώσεις από τον κύριο όγκο του πλάσματος, όπως φθοριωμένοι υδρογονάνθρακες, οι οποίες ευνοούν τον χημικό πολυμερισμό στην επιφάνεια.



Σχήμα 3: Μηχανισμοί εγχάραξης με πλάσμα: (α) Χημική εγχάραξη, (β) ιονοβολή, και υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη (γ) είτε μέσω ενεργοποίησης της επιφάνειας (δ) είτε μέσω απομάκρυνσης στρώματος παθητικοποίησης (παρεμποδιστές εγχάραξης) [6].

1.4 Η επιφανειακή τραχύτητα κατά την εγχάραξη με πλάσμα και η σημασία της στις ιδιότητες της επιφάνειας

Η εγχάραξη μίας επιφάνειας με πλάσμα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία *τραχύτητας* επάνω σε αυτήν. Στο Σχήμα 4 φαίνονται επιφάνειες Si, πολυμεθακρυλικού μεθυλίου (Poly-Methyl MethAcrylate, PMMA) και πολύ(διμεθυλοσιλοξάνης) (Poly-DiMethyl-Siloxane, PDMS) που έχουν εγχαραχθεί με πλάσμα SF_6 (επιφάνειες Si, PDMS) και με πλάσμα O_2 (επιφάνεια PMMA) [7].



Σχήμα 4: Παραδείγματα εγχάραξης πλάσματος για επιφάνειες υλικών: Εικόνες από μικροσκόπιο ατομικής δύναμης (Atomic force microscope, AFM) επιφάνειας: α) PMMA που έχει εγχαραχθεί με πλάσμα O_2 , β) PDMS που έχει εγχαραχθεί με πλάσμα SF_6 και γ) Si που έχει εγχαραχθεί με πλάσμα SF_6 . Η επιφάνεια σάρωσης είναι και στις τρεις περιπτώσεις $4\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}$, ενώ ο άξονας z δείχνει το εύρος τιμών του ύψους εγχάραξης για κάθε επιφάνεια [7].

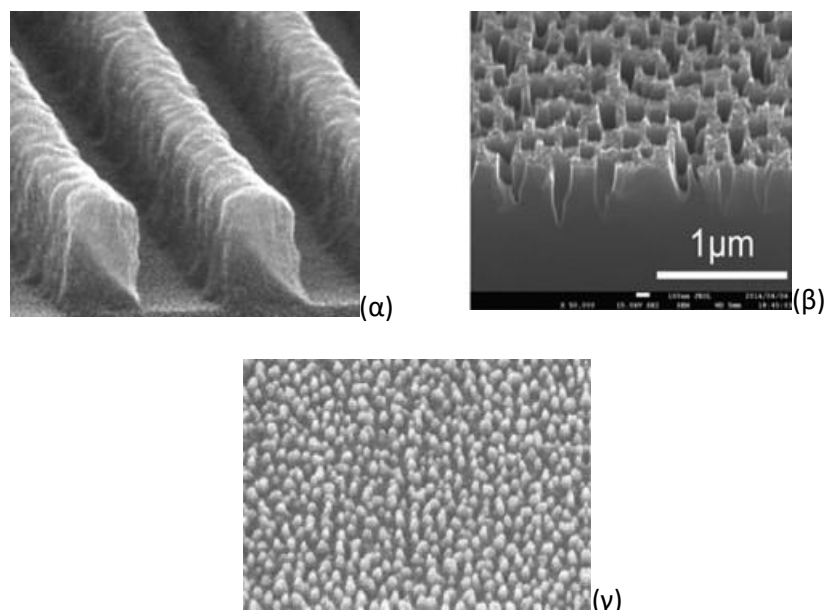
Η σημασία της τραχύτητας προκύπτει από τον καίριο ρόλο σε πολλά είδη εφαρμογών που ανήκουν τόσο στον χώρο της τεχνολογίας όσο και στον χώρο των επιστημών υγείας [2]. Μπορεί να είναι ευεργετική ή επιβλαβής. Για παράδειγμα, η τραχύτητα μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες διαβροχής μιας επιφάνειας [8], την αλληλεπίδραση της επιφάνειας με κύτταρα [9], τις οπτικές ιδιότητες της επιφάνειας [10].

Η τραχύτητα είναι επίσης σημαντική και για τη λειτουργία των τρανζίστορ [1]. Καθώς οι διαστάσεις πύλης των MOS ULSI (Metal Oxide Semiconductor devices in Ultra Large Scale Integration) ελαττώνονται, η τραχύτητα γίνεται σημαντικότερη καθώς πλησιάζει τις διαστάσεις της πύλης. Έτσι ο έλεγχος της διεργασίας εγχάραξης με πλάσμα γίνεται ολοένα και σημαντικότερος.

1.5 Είδη τραχύτητας

Η πρώτη κατηγοριοποίηση της τραχύτητας αφορά την περιοχή στην οποία αυτή δημιουργείται. Έτσι, η τραχύτητα μπορεί να είναι **πλευρική**, κάτι το οποίο συμβαίνει όταν εμφανίζεται στις πλευρικές επιφάνειες των δομών (Σχήμα 5α). **Τραχύτητα μπορεί να παρατηρηθεί και στις ελεύθερες σκίασης επιφάνειες** (Σχήμα 5β). Η παρούσα εργασία εστιάζει στην τραχύτητα που δημιουργείται σε ελεύθερες (σκίασης) επιφάνειες.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση που μπορεί να εφαρμοστεί στις τραχιές επιφάνειες, είναι ως προς την **ύπαρξη ή την μη ύπαρξη περιοδικότητας**. Δηλαδή κάποιες επιφάνειες μπορεί να παρουσιάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που να επαναλαμβάνονται σε αποστάσεις δεδομένου μήκους πάνω σε μία συγκεκριμένη διεύθυνση (π.χ. ημιτονοειδείς επιφάνειες, τριγωνικές, τετραγωνικές κλπ) και έτσι να χαρακτηρίζονται **περιοδικές**, (Σχήμα 5γ), ενώ επίσης μπορούν και να μην εμφανίζουν κανενός είδους περιοδικότητα (**απεριοδικές** επιφάνειες).



Σχήμα 5: (α) Πλευρική τραχύτητα – τραχύτητα στα πλευρικά τοιχώματα σε αυλάκια πολυμερούς υλικού (εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης SEM). (β) Τραχύτητα σε ελεύθερη σκίασης επιφάνεια πυριτίου (εικόνα SEM). (γ) Περιοδική τραχύτητα επιφάνειας PMMA όπως φαίνεται σε κάτοψη [11, 12].

Η τραχύτητα επιφανειών μπορεί να είναι ισοτροπική (Σχήμα 5γ) ή ανισοτροπική. Στην ανισοτροπική τραχύτητα υπάρχει μία κατεύθυνση προτίμησης στην τραχύτητα.

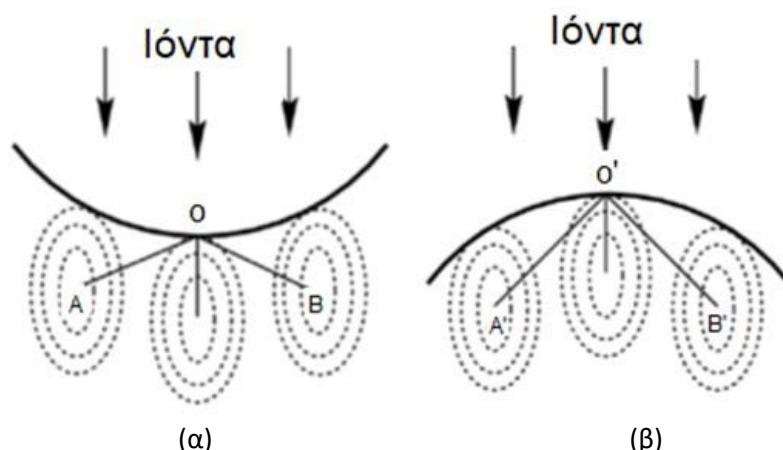
Οι τραχιές επιφάνειες μπορούν επίσης να διαχωριστούν σε δύο γενικές κατηγορίες: σε *αιτιοκρατικές* και *τυχαίες*. Στις αιτιοκρατικές, το ύψος της επιφάνειας σε συγκεκριμένες επιφανειακές συντεταγμένες, δίνεται από μία αναλυτική συνάρτηση που εξαρτάται μόνο από τις συντεταγμένες αυτές. Στις τυχαίες από την άλλη, δεν υπάρχει τέτοια συνάρτηση που να καθορίζει σαφώς το ύψος της επιφάνειας σε κάθε σημείο, αλλά εφαρμόζεται στοχαστική μελέτη με αξιοποίηση στατιστικών δεδομένων.

1.6 Μηχανισμοί δημιουργίας τραχύτητας σε εγχαρασσόμενες επιφάνειες

Υπάρχουν αρκετές θεωρήσεις σχετικά με το πως δημιουργείται τραχύτητα σε μία εγχαρασσόμενη επιφάνεια. Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των κύριων μηχανισμών δημιουργίας κατά την εγχάραξη που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία.

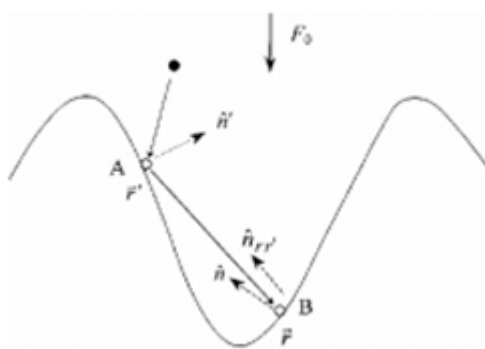
Σύμφωνα με τη θεωρία του Sigmund [13, 14] όταν ένα ιόν εισχωρεί σε μια επιφάνεια, η κινητική του ενέργεια διαμοιράζεται στο υπόστρωμα ακολουθώντας μια κατανομή Gauss. Η ενέργεια μεταφέρεται είτε μέσω διαδοχικών συγκρούσεων (Collision Cascade), είτε μέσω ηλεκτρονικών διεγέρσεων. Το βάθος διείσδυσης του ιόντος στο υπόστρωμα καθορίζει και το βάθος απορρόφησης της ενέργειάς του και μάλιστα, τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα. Σύμφωνα με το θεωρητικό μοντέλο των Bradley - Harper [15], η απόδοση εγχάραξης μιας επιφάνειας συνδέεται με την απορροφούμενη ενέργεια. Αναλυτικότερα, η θεωρία αυτή δείχνει ότι η καμπυλότητα της επιφάνειας ευθύνεται για τις τοπικές μεταβολές στην απόδοση εγχάραξης, οι οποίες και οδηγούν στην ανάπτυξη τραχύτητας. Όσο μικρότερη είναι η επιφάνεια που διανύει η ενέργεια σύγκρουσης από τα κέντρα ενεργειακής απόθεσης, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός εγχάραξης. Όταν η επιφάνεια

είναι κοίλη (Σχήμα 6.α), δηλαδή απέχει λιγότερο από τα κέντρα ενεργειακής απόθεσης, εγχαρασσεται γρηγορότερα σε σύγκριση με μία κυρτή επιφάνεια (Σχήμα 6.β) [16].



Σχήμα 6: Τοπικές μεταβολές της απόδοσης εγχάραξης (α) σε μία κοίλη επιφάνεια και (β) σε μία κυρτή επιφάνεια. Τα ευθύγραμμα τμήματα OA, OB, O'A' και O'B' αντιστοιχούν στις αποστάσεις που διανύει η ενέργεια σύγκρουσης από τα κέντρα ενεργειακής απόθεσης O και O' στα σημεία A, B, A', B' [16].

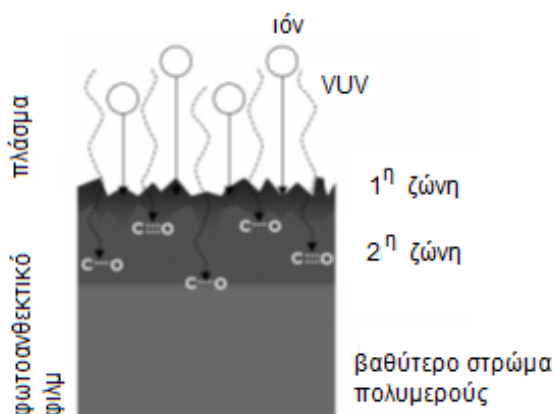
Ένας από τους μηχανισμούς δημιουργίας τραχύτητας, στα συστήματα εγχάραξης με πλάσμα είναι η πρώτης τάξης επανεκπομπή σωματιδίου. Κατα κύριο λόγο, τα ενεργά συστατικά που συμμετέχουν στην εγχάραξη με πλάσμα είναι ρίζες, ουδέτερα σωματίδια και ιόντα. Η πιθανότητα προσκόλλησης των παραπάνω σωματιδίων στην επιφάνεια εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Σύμφωνα με την θεωρία των Drotar et al. [17] για τα ουδέτερα σωματίδια του πλάσματος προτάθηκε η πιθανότητα προσκόλλησης στην πρώτη πρόσκρουση να είναι 0 και στην αμέσως επόμενη να είναι 1 (Σχήμα 7). Σε εγχαρασσόμενες επιφάνειες στις οποίες υπάρχουν κορυφές και κοιλάδες παρατηρείται ότι επειδή στις κοιλάδες προσπίπτουν περισσότερα ουδέτερα άτομα απ' ό,τι στις κορυφές, οι κοιλάδες εγχαρασσονται ταχύτερα από τις κορυφές. Λόγω αυτής της διαφοράς στους ρυθμούς εγχάραξης σε κοιλάδες και κορυφές της επιφάνειας, η συνολική τραχύτητα ενισχύεται.



Σχήμα 7: Σχηματική απεικόνιση της πρώτης τάξεως επανεκπομπής. Κατά την πρώτη πρόσκρουση στο σημείο A η πιθανότητα προσκόλλησης ουδέτερου σωματιδίου πάνω στην επιφάνεια είναι 0, ενώ στην επόμενη πρόσκρουση στο σημείο B το ουδέτερο άτομο προσκολλάται με πιθανότητα 1 [17].

Ανάπτυξη τραχύτητας παρατηρείται και εξαιτίας της ανάπτυξης τάσεων στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια, όταν ταυτόχρονα με τη διαδικασία της εγχάραξης ή της ιονοβολής, η επιφάνεια εκτεθεί σε υπεριώδη ακτινοβολία. Η υπεριώδης ακτινοβολία επειδή επιδρά σε μεγαλύτερο πάχος σε σχέση με τα ιόντα, διασπά τους δεσμούς του υποστρώματος. Αντίθετα τα ιόντα φτάνουν σε μικρότερο βάθος της επιφάνειας και

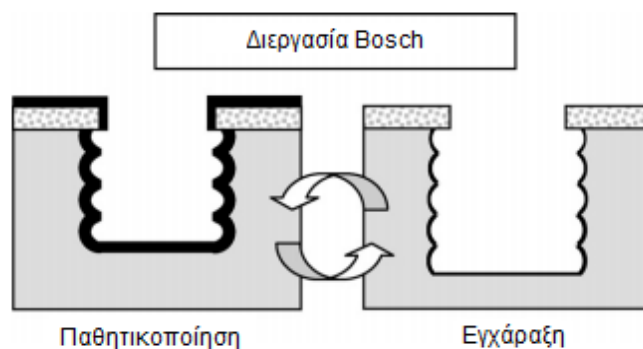
δημιουργούν ένα πιο άκαμπτο στρώμα. Με αυτόν τον μηχανισμό το υπόστρωμα διαμοιράζεται σε δύο ζώνες ελαστικότητας (Σχήμα 8). Η ζώνη που βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια είναι λιγότερο ελαστική της ζώνης που βρίσκεται κάτω από αυτήν. Λόγω του πλάσματος, η θερμοκρασία μέσα στον θάλαμο κατά τη διεργασία της εγχάραξης αυξάνεται, ενώ μετά το τέλος της διαδικασίας η θερμοκρασία μειώνεται και έτσι δημιουργούνται μηχανικές επιφανειακές τάσεις [18]. Με την εκτόνωση των μηχανικών τάσεων του λιγότερο άκαμπτου επιφανειακού στρώματος παραμορφώνεται η επιφάνεια οπότε και ενισχύεται η τραχύτητα.



Σχήμα 8: Πολυμερές χωρισμένο στην ζώνη επίδρασης της υπεριώδους (VUV) ακτινοβολίας (2η ζώνη) και στη ζώνη επίδρασης της δέσμης ιόντων που έχει δεχτεί (1η ζώνη).

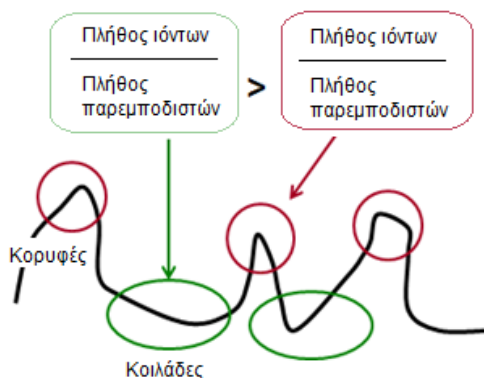
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην παράγραφο 1.3 κατά την υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη, ιόντα και ουδέτερα σωματίδια προσκρούουν σε μια επιφάνεια. Τα ιόντα ενεργοποιούν την επιφάνεια, είτε διευκολύνοντας τις χημικές αντιδράσεις λόγω της χημικής δράσης των ριζών είτε απομακρύνοντας το στρώμα παθητικοποίησης. Τα ουδέτερα άτομα όμως σε πολύ μικρές διαστάσεις (μm, nm), εκτός από τη χημική αυτή δράση, μαζί με διάφορες προσμίξεις μπορούν να λειτουργούν και ως τοπικές μάσκες εγχάραξης (*παρεμποδιστές εγχάραξης, etch-inhibitors*). Οι παρεμποδιστές αυτοί, μπορεί είτε να έχουν προστεθεί σκόπιμα στο πλάσμα (στόχοι μετάλλου τοποθετημένοι μέσα στα συστήματα ιονοβολής με δέσμη ιόντων [19]), είτε να προκύπτουν αυθόρμητα κατά την διαδικασία της εγχάραξης εξ' αιτίας των συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης εντός του αντιδραστήρα καθώς και των αλληλεπιδράσεων με τα υψηλής κινητικής ενέργειας ιόντα του πλάσματος (προσμίξεις που προέρχονται από τα τοιχώματα του αντιδραστήρα ή από το ηλεκτρόδιο στο οποίο είναι τοποθετημένο το προς εγχάραξη δείγμα [20]).

Ένα παράδειγμα σκόπιμης και ελεγχόμενης εναπόθεσης παρεμποδιστών για αύξηση της ανισοτροπίας σε μία διεργασία εγχάραξης πυριτίου, όπου επιτυγχάνονται δομές με μεγάλο λόγο ύψους προς πλάτος (υψηλό aspect ratio) είναι η *διεργασία Bosch (Bosch process)* (Σχήμα 9). Σε αυτήν την διεργασία γίνονται εναλλαγές δύο αερίων (C_4F_8 για δημιουργία παθητικού στρώματος στα πλευρικά τοιχώματα και SF_6 για εγχάραξη των οριζόντιων) ανά μια χρονική περίοδο που καθορίζεται από ηλεκτρονική μονάδα. Στις περιοχές της επιφάνειας όπου προσπίπτουν περισσότερα ιόντα (δηλαδή κατά την κάθετη στην δέσμη των ιόντων κατεύθυνση) οι παρεμποδιστές απομακρύνονται, ωστόσο στην επιφάνεια των πλευρικών τοιχωμάτων δεν συμβαίνει το ίδιο, αφού εκεί προσπίπτουν μόνο μερικά σκεδαζόμενα ιόντα. Έτσι, η μεμβράνη των παρεμποδιστών βοηθάει ώστε η εγχάραξη να γίνεται κάθετα σε βάθος, χωρίς να υπάρχει σημαντική διάχυσή της στην οριζόντια διεύθυνση.



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση της διεργασίας Bosch. Η συνεχής εναλλαγή μεταξύ κύκλων εναπόθεσης παρεμποδιστών και εγχάραξης παράγει ανισοτροπικά εγχαραγμένα προφίλ, παρόλα αυτά η επιφάνεια των προφίλ είναι κυματιστή, με κάθε «κύμα» να αντιστοιχεί σε έναν κύκλο [21].

Σε μια διεργασία εγχάραξης, στην οποία γίνεται και ελεγχόμενη ισοτροπική εναπόθεση παρεμποδιστών εγχάραξης, παρατηρείται ότι όταν η εγχαρασσόμενη επιφάνεια δεν είναι λεία, οι κοιλάδες εγχαρασσονται ταχύτερα από ότι οι κορυφές. Πιο συγκεκριμένα αυτό συμβαίνει επειδή μεγαλύτερος αριθμός παρεμποδιστών προσπίπτουν σε κορυφές απ' ότι σε κοιλάδες, εξαιτίας του φαινομένου της σκίασης, ενώ ο αριθμός των ιόντων που προσπίπτουν στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια είναι περίπου σταθερός τόσο στις κοιλάδες όσο και στις κορυφές. Έτσι η απόδοση εγχάραξης στις κοιλάδες είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την απόδοση εγχάραξης στις κορυφές (Σχήμα 10). Μάλιστα έχει υπολογιστεί ότι εάν το ποσοστό των παρεμποδιστών σε μια διεργασία εγχάραξης πλάσματος είναι της τάξεως του 5% της προσπίπτουσας ροής, η εγχαρασσόμενη επιφάνεια εμφανίζει περιοδικότητα, ενώ αν είναι μικρότερο, της τάξεως του 2%, η τραχύτητα που αναπτύσσεται είναι τυχαία [5].



Σχήμα 10: Ενίσχυση της τραχύτητας λόγω της κάλυψης ανισόπεδης επιφάνειας με παρεμποδιστές εγχάραξης. Αν οι παρεμποδιστές κατανέμονται ισοτροπικά, τότε εξαιτίας του φαινομένου της σκίασης ο λόγος της ροής ιόντων προς αυτή των παρεμποδιστών είναι μεγαλύτερος στις κοιλάδες από ότι στις κορυφές της επιφάνειας, οπότε και ο ρυθμός εγχάραξης των κοιλάδων είναι μεγαλύτερος από αυτόν των κορυφών [22].

1.7 Ο σκοπός της παρούσας εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των παρεμποδιστών εγχάραξης στην τραχύτητα που αναπτύσσεται κατά την εγχάραξη με πλάσμα. Η μελέτη υλοποιείται με ένα υπολογιστικό πλαίσιο Monte Carlo για την εξέλιξη της μορφολογίας εγχαρασσόμενων επιφανειών το οποίο επεκτείνεται και τροποποιείται κατάλληλα. Εξετάζονται δύο πηγές παρεμποδιστών εγχάραξης: Αυτοί που προέρχονται από τον

κύριο όγκο του αντιδραστήρα και αυτοί που παράγονται τοπικά στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια (δηλαδή τα προϊόντα της εγχάραξης που επαναποτίθενται στην επιφάνεια).

Όσον αφορά την πρώτη πηγή παρεμποδιστών, διερευνάται η επίδραση της πιθανότητας προσκόλλησης και της επιλεκτικότητας στα στατιστικά μεγέθη χαρακτηρισμού της μορφολογίας της επιφάνειας (root mean square τραχύτητα, μήκος συσχέτισης, εκθέτης τραχύτητας, ρυθμός εγχάραξης, κλάσμα κάλυψης από παρεμποδιστές, ασυμμετρία και φασματική πυκνότητα ισχύος). Επίσης, εξετάζεται η διαφορά μεταξύ ταυτόχρονης εγχάραξης και απόθεσης και σειριακής επαναλαμβανόμενης ακολουθίας εγχάραξης – απόθεσης. Δοκιμάζονται διαφορετικά πλήθη κύκλων εγχάραξης – απόθεσης. Όσον αφορά τη δεύτερη πηγή παρεμποδιστών, εξετάζεται η επίδραση του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια στα στατιστικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν την επιφάνεια.

Γίνεται διερεύνηση της επίδρασης της πηγής των παρεμποδιστών στην εμφάνιση περιοδικότητας (οργάνωσης) στη μορφολογία της επιφάνειας και στα υπόλοιπα στατιστικά μεγέθη χαρακτηρισμού της μορφολογίας. Εξετάζονται οι διαφορές στη μορφολογία μετά από ταυτόχρονη και σειριακή εγχάραξη και απόθεση. Τέλος, γίνεται μία ποιοτική σύγκριση μεταξύ των μορφολογιών που προκύπτουν από την προσομοίωση με αυτές που προκύπτουν από πειράματα εγχάραξης με πλάσμα.

Το υπόλοιπο της εργασίας είναι οργανωμένο ως εξής: Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται το υπολογιστικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση εξέλιξης της μορφολογίας των εγχαρασσόμενων επιφανειών, στο τρίτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υπολογιστικής μεθόδου και στο τέταρτο συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας. Στα παραρτήματα Α, Β, Γ, Δ και Ε υπάρχουν συγκεντρωτικά όλα τα γραφήματα για καθεμία από τις πέντε ομάδες προσομοιώσεων.

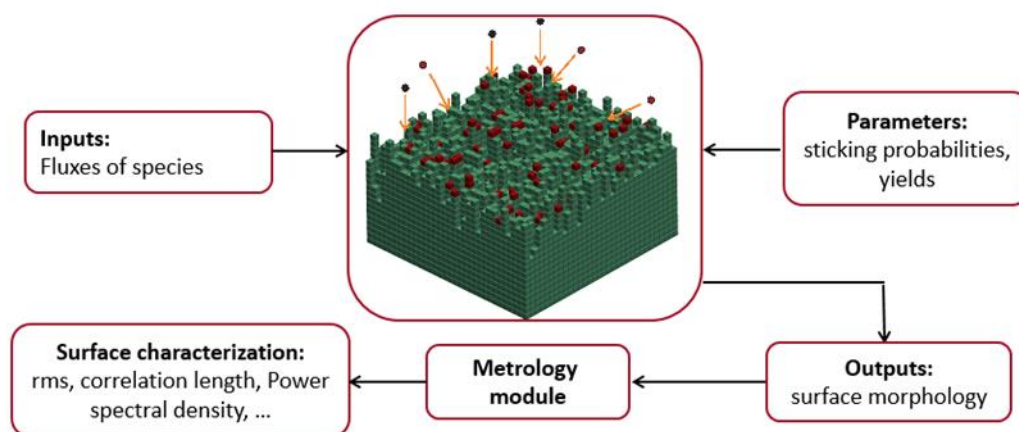
2. ΤΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Ως *προσομοίωση (simulation)* ονομάζεται η τεχνητή αναπαραγωγή μιας πραγματικής κατάστασης ενός συστήματος μέσω ενός προγράμματος στον Η/Υ και η πραγματοποίηση εικονικών πειραμάτων σε αυτό. Με αυτόν το τρόπο διαπιστώνονται τυχόν μεταβολές της αρχικής κατάστασης κατά τη διάρκεια αυτών των δραστηριοτήτων. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται όταν ένα πρόβλημα δεν μπορεί να επιλυθεί αναλυτικά (διαμέσου κάποιου αριθμητικού προτύπου) ή όταν δεν είναι εφικτή η πραγματοποίηση των πειραμάτων (χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία).

Ένα μοντέλο προσομοίωσης (Σχήμα 11) αποτελείται από τα στοιχεία, δηλαδή το σύνολο των αντικειμένων που απαρτίζουν το σύστημα, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και καθορίζουν το αποτέλεσμα της προσομοίωσης. Εκτός από τα στοιχεία ένα σύστημα απαρτίζεται από μια συλλογή από *παραμέτρους (parameters)* και *μεταβλητές (variables)*. Οι παράμετροι διαμορφώνουν τις συνθήκες των *εισόδων (inputs)*, ενώ οι μεταβλητές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Η επακόλουθη αλλαγή των τιμών των μεταβλητών, τροποποιεί την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σύστημα. Για να είναι ρεαλιστική η δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης θα πρέπει τα στοιχεία, οι παράμετροι και οι μεταβλητές που περιγράφουν το σύστημα να συνδυαστούν ουτως ώστε να δημιουργηθεί το κατάλληλο μαθηματικό πρότυπο.

Ένα σύστημα ονομάζεται *προσδιοριστικό (deterministic)* αν τα αποτελέσματα που προκύπτουν στην *έξοδο (output)*, όταν αυτό τροφοδοτηθεί με συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων εισόδου και κάποιες αρχικές συνθήκες, είναι γνωστά και πάντα τα ίδια για δεδομένες τιμές των παραμέτρων. Αντίθετα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν στην έξοδο ενός *στοχαστικού (stochastic)* συστήματος δεν μπορούν να προσδιοριστούν πλήρως από την είσοδο, αλλά μεταβάλλονται τυχαία μέσα σε ένα σύνολο δυνατών αποτελεσμάτων. Αυτό σημαίνει ότι για δεδομένη είσοδο υπάρχουν πολλαπλά σύνολα εξόδων και αυτό που συμβαίνει κάθε φορά είναι αποτέλεσμα τυχαίων μεταβλητών.



Σχήμα 11: Το υπολογιστικό πλαίσιο προσομοίωσης της εξέλιξης εγχαρασσόμενης επιφάνειας

Η προσομοίωση της εξέλιξης της μορφολογίας εγχαρασσόμενης επιφάνειας, αν και είναι θεωρητικά από μαθηματικής απόψεως δυνατόν να γίνει με αυστηρά προσδιοριστικό τρόπο, πρακτικά κάτι τέτοιο είναι αδύνατον λόγω του πολύ μεγάλου πλήθους των παραμέτρων και των μεταβλητών. Για αυτό το λόγο γίνεται με στοχαστικά μοντέλα,

ύστερα από καθορισμό των τυχαίων μεταβλητών του προβλήματος. Ένας τέτοιος τρόπος προσομοίωσης, μπορεί να προκύψει από την υιοθέτηση ενός μοντέλου τύπου Monte Carlo.

Τα μοντέλα Monte Carlo αποτελούνται είναι ένα σύνολο υπολογιστικών αλγορίθμων που στηρίζονται σε επαναλαμβανόμενες ψευδοτυχαίες δειγματοληψίες για να εξάγουν αριθμητικά αποτελέσματα. Η εφαρμογή της, προϋποθέτει μεγάλο πλήθος ψευδοτυχαίων αριθμών, με γνωστή όμως συνάρτηση κατανομής που ακολουθούν (π.χ. Gauss, Poisson κλπ.).

Το υπολογιστικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση εξέλιξης μορφολογίας επιφανειών σε συνθήκες εγχάραξης ή/και απόθεσης βασίζεται σε στοχαστικό μοντέλο Monte Carlo. Οι μεταβλητές εισόδου του μοντέλου αφορούν α) την αέρια φάση (βλ. παράγραφο 2.2) και ειδικότερα τις κατανομές κατεύθυνσης (και ενέργειας) των συστατικών πάνω από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια και β) την αλληλεπίδραση των συστατικών της αέρια φάσης με την επιφάνεια (βλ. παράγραφο 2.3) και ειδικότερα τις πιθανότητες προσκόλλησης των συστατικών και τις αποδόσεις εγχάραξης. Η έξοδος του μοντέλου Monte Carlo είναι η μορφολογία της εγχαρασσόμενης επιφάνειας η οποία χαρακτηρίζεται μαθηματικά από το μετρολογικό «άρθρωμα» του πλαισίου (βλ. παράγραφο 2.4) με στατιστικά μεγέθη όπως η root mean square (rms) τραχύτητα και το διάγραμμα φασματικής πυκνότητας ισχύος.

2.2 Οι μεταβλητές εισόδου του μοντέλου Monte Carlo

Το σύνθετο περιβάλλον του πλάσματος, θεωρείται ότι αποτελείται γενικά από τρία είδη σωματιδίων: τα ιόντα, τα ουδέτερα σωματίδια που αποτίθενται (και λειτουργούν ως παρεμποδιστές εγχάραξης) και τα δραστικά ουδέτερα σωματίδια που εγχαρασσουν την επιφάνεια. Η αλληλεπίδραση αυτών των σωματιδίων (συστατικών) με την επιφάνεια του δείγματος, καθορίζει την τραχύτητα της επιφάνειας.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η αλληλεπίδραση των ιόντων με τα σωματίδια που αποτίθενται στην επιφάνεια θεωρώντας ότι α) δεν υπάρχουν ουδέτερα σωματίδια που προκαλούν εγχάραξη, όπως στις περιπτώσεις ιονοβολής με δέσμη ιόντων (ion beam sputtering), ή β) η εγχάραξη που προκαλούν είναι αμελητέα (περιπτώσεις όπου ο ρυθμός καθαρά χημικής εγχάραξης είναι πολύ μικρός). Στη δεύτερη κατηγορία περιπτώσεων κυριαρχεί ο μηχανισμός υποβοηθούμενης από ιόντα εγχάραξης. Τα ουδέτερα σωματίδια που προκαλούν εγχάραξη είναι συνήθως σε περίσσεια (ο λόγος της ροής προς αυτή των ιόντων είναι > 100) με αποτέλεσμα η επιφάνεια να είναι κορεσμένη από αυτά.

Τόσο το είδος της κατανομής των ιόντων όσο και εκείνο των ουδέτερων συστατικών που αποτίθενται στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια είναι σημαντικές παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν στην είσοδο του συστήματος του μοντέλου προσομοίωσης. Η κατανομή μπορεί να είναι είτε ισοτροπική (για τα ουδέτερα συστατικά) είτε γκαουσιανή (για ιόντα). Όσο μικρότερη είναι η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων τόσο περισσότερο η διεύθυνση κίνησης των ιόντων προσεγγίζει την καθετότητα στον στόχο. Όταν το πλήθος των ουδέτερων σωματιδίων που προκαλούν εγχάραξη στη μονάδα του χρόνου είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των ιόντων, το είδος της εγχάραξης δεν είναι απολύτως ανισοτροπικό, αφού σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει σε μεγάλο βαθμό πλευρική εγχάραξη.

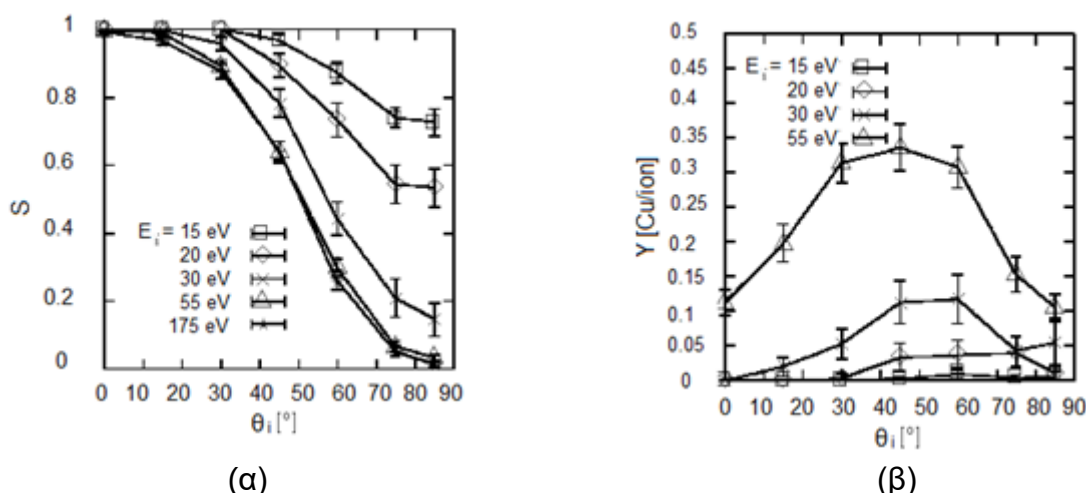
Η αλληλεπίδραση των συστατικών της αέριας φάσης με την εγχαρασσόμενη επιφάνεια καθορίζεται από το συντελεστή (την πιθανότητα) προσκόλλησης των συστατικών στην επιφάνεια S_c (sticking coefficient), και την απόδοση εγχάραξης Y (etching yield, πλήθος ατόμων ή μορίων υποστρώματος που απομακρύνονται ανά προσπίπτον ιόν).

$$S_c = \frac{F_{reacted}}{F_{incident}}$$

Όπου $F_{reacted}$ η ροή του συστατικού της αέριας φάσης που καταναλώνεται στην επιφάνεια και $F_{incident}$ η ροή του συστατικού που φτάνει στην επιφάνεια.

$$Y = A \cdot (\sqrt{E_i} - \sqrt{E_{th}}) \cdot f(\theta)$$

Όπου A σταθερά, E_{th} η ενέργεια κατωφλίου, E_i η ενέργεια πρόσπτωσης των ιόντων και $f(\theta)$ εμπειρική συνάρτηση που εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης των ιόντων.



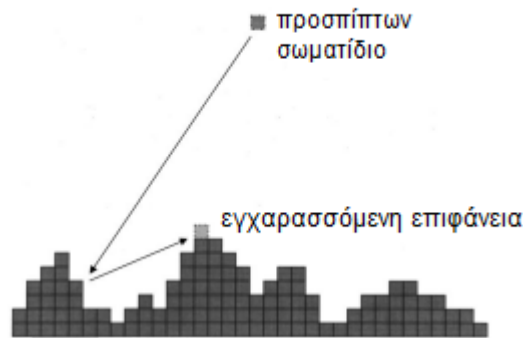
Σχήμα 12: Η εξάρτηση από την γωνία πρόσπτωσης των ιόντων, θ_i , (α) του συντελεστή προσκόλλησης των ιόντων, S_c , για διάφορες ενέργειες πρόσπτωσης των ιόντων [20] και (β) της απόδοσης εγχάραξης, Y , σε ιονοβολές ιόντων Cu^+ σε επιφάνεια χαλκού για διάφορες ενέργειες πρόσπτωσης ιόντων, E_i [20].

Παρατηρείται πως σε περιπτώσεις ιονοβολής (Σχήμα 12α) όταν τα ιόντα προσπίπτουν στην επιφάνεια υπό πολύ μικρές γωνίες προσκολλούνται σε αυτή ($S_c = 1$). Σε περιπτώσεις χημικής εγχάραξης τα ουδέτερα συστατικά όταν δεν ανακλώνονται καθόλου από την επιφάνεια, δηλαδή δεν υπάρχει το φαινόμενο της επανεκπομπής, ο συντελεστής πρόσκόλλησης παίρνει την μέγιστη τιμή ($S_c = 1$), ενώ όταν σκέδάζονται με γωνιακή κατανομή ως προς $\cos\theta$ (ανεξάρτητα από την αρχική γωνία πρόσπτωσής τους στην επιφάνεια) ο συντελεστής πρόσκόλλησης είναι $S_c < 1$.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 12β η απόδοση εγχάραξης εξαρτάται τόσο από τη γωνία πρόσπτωσης των ιόντων στην επιφάνεια όσο και από την ενέργειά πρόσπτωσής τους. Ειδικότερα αυξανόμενης της ενέργειας πρόσπτωσης των ιόντων μεγαλώνει και η απόδοση εγχάραξης, ενώ αυξανόμενης της γωνίας πρόσπτωσης, θ_i , (για $\theta_i > 60^\circ$) η απόδοση εγχάραξης μειώνεται.

2.3 Μοντέλο Monte Carlo για την εξέλιξη μορφολογίας επιφάνειας

Το μοντέλο προσομοίωσης Monte Carlo χρησιμοποιείται ώστε να γίνει η πρόβλεψη του σχήματος των κατασκευαζόμενων δομών με βάση την αέρια φάση στον κύριο όγκο του πλάσματος. Παραδείγματος χάριν μια προσομοίωση Monte Carlo μπορεί να υιοθετηθεί προκειμένου να καθοριστεί αποδοτικότερα πως τα διαφορετικά μοντέλα ανακατανομής (λόγω επανεκπομπής) (Σχήμα 13) μπορούν να επηρεάσουν τη μορφολογική εξέλιξη της επιφάνειας [14].



Σχήμα 13: Προσομοίωση Monte Carlo για το μοντέλο της ανακατανομής: Ένα εισερχόμενο σωματίδιο προσκρούει την επιφάνεια και επανεκπέμπεται σε ένα άλλο σημείο της επιφάνειας. Εκεί προσκολλάται σε αυτή και την εγχαράσσει [14].

Στην μέθοδο Monte Carlo για την αναπαράσταση της τοπογραφίας χρησιμοποιείται η μέθοδος κελιών. Αναλυτικότερα η εγχαρασσόμενη επιφάνεια αναπαριστάται από ένα πλέγμα κυβικών κελιών, όπου κάθε κελί αντιστοιχεί σε ένα σωματίδιο (ión, ουδέτερο άτομο στην αέρια φάση, συστατικό της εγχαρασσόμενης επιφάνειας). Η τροχιά του κάθε σωματιδίου που προέρχεται από την αέρια φάση παρακολουθείται έως ότου προσκρούσει σ'ένα κελί που ανήκει στην επιφάνεια του υποστρώματος.

Έπειτα μέσω υπολογισμού της πιθανότητας σκέδασης, χρησιμοποιώντας στοχαστικές μεταβλητές (όπως είναι η πιθανότητα προσκόλλησης και η απόδοση εγχάραξης), καθορίζεται εάν το σωματίδιο θα σκεδαστεί ή θα αλληλεπιδράσει με την επιφάνεια. Στην περίπτωση που σκεδάζεται και δεν γίνεται επανεκπομπή του σ'ένα άλλο σημείο της επιφάνειας, φεύγει από το πλέγμα και η διαδικασία ανίχνευσής ξαναξεκινάει. Εάν όμως το σωματίδιο αλληλεπιδράσει με την επιφάνεια τότε ανάλογα με το είδος του σωματιδίου αλλάζει και η σύνθεση του πλέγματος. Δηλαδή εάν είναι ίόν ή ουδέτερο άτομο το κελί εγχαράσσεται, ενώ εάν είναι παρεμποδιστής το κελί που αντιστοιχεί στο σωματίδιο εναποτίθεται πάνω από το κελί της διεπαφής.

Η διαδικασία της προσομοίωσης προαπαιτεί την γένεση σειρών από τυχαίους αριθμούς: για κάθε απόφαση, ένας τυχαίος αριθμός δημιουργείται. Για την περίπτωση που στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια φτάνουν ίόντα και ουδέτερα συστατικά που προκαλούν απόθεση ή παρεμποδιστές εγχάραξης, τα βήματα της διαδικασίας είναι τα εξής [5]:

α) Ένα σωματίδιο, ίόν ή παρεμποδιστής εγχάραξης δημιουργείται. Η απόφαση σχετικά με το είδος που θα επιλεγεί από τα δύο προαναφερθέντα (δηλαδή ίόν ή παρεμποδιστής) στην παράλληλη εγχάραξη λαμβάνεται βάσει των κλασμάτων του αριθμού ιόντων προς τον συνολικό αριθμό των σωματιδίων και του αριθμού παρεμποδιστών προς τον συνολικό αριθμό των σωματιδίων. Από την άλλη, στις περιπτώσεις σειριακής εγχάραξης και εναπόθεσης, το είδος ορίζεται με μη τυχαίο τρόπο, σύμφωνα επίσης όμως με τα προαναφερθέντα κλάσματα.

β) Η αρχική θέση του σωματιδίου βρίσκεται πάνω σε ένα επίπεδο, το οποίο απέχει μικρή απόσταση (της τάξεως των πέντε πλεγματικών μονάδων) από το υψηλότερο σημείο της εγχαρασσόμενης επιφάνειας. Η θέση στην επιφάνεια αυτή, επιλέγεται τυχαία.

γ) Η αρχική κατεύθυνση κίνησης του σωματιδίου, επιλέγεται επίσης με τυχαίο τρόπο, σύμφωνα με συναρτήσεις κατανομής (για παράδειγμα, χρησιμοποιείται συχνά η Gauss για τα ίόντα).

δ) Το σωματίδιο κινείται πάνω σε μία ευθεία γραμμή μέχρις ότου φτάσει στην επιφάνεια του δείγματος (δηλαδή, δεν λαμβάνονται υπόψη σκεδάσεις κατά την κίνησή του). Η

κίνηση πραγματοποιείται με διακριτά βήματα μέχρι την σύγκρουση με την επιφάνεια και η επιφάνεια αποτελείται από διακριτά κελιά, ώστε η ακριβής θέση της σύγκρουσης σωματιδίου-επιφάνειας καταγράφεται. Ο τύπος του κελιού, αναγνωρίζεται (δηλαδή, αν είναι υπόστρωμα ή παρεμποδιστής εγχάραξης).

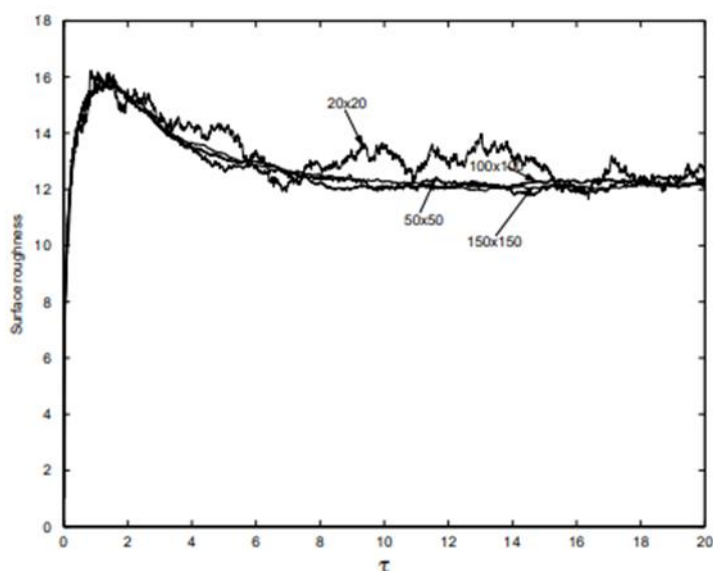
ε) Βάσει της πιθανότητας προσκόλλησης που έχει επιλεγεί, αποφασίζεται αν το σωματίδιο θα προσκολληθεί ή θα επανεκπεμφθεί. Όταν αποφασίζεται επανεκπομπή, επιλέγεται μία από τις επιτρεπτές κατευθύνσεις επανεκπομπής.

Τα δύο τελευταία βήματα (δ και ε), επαναλαμβάνονται, μέχρις ότου το σωματίδιο προσκολληθεί στην επιφάνεια ή απομακρυνθεί από τον χώρο της προσομοίωσης (ότι από τα δύο συμβεί πρώτο). Σημειώνεται, ότι θεωρείται ότι απομακρύνεται από τον χώρο της προσομοίωσης όταν διέλθει από το επίπεδο πάνω στο οποίο δημιουργήθηκε. Αν λοιπόν διαφύγει μέσω του επιπέδου αυτού, δημιουργείται ένα νέο σωματίδιο. Αν από την άλλη διαφύγει από κάποιο άλλο επίπεδο, τότε επανέρχεται στον χώρο της προσομοίωσης μέσω του αντίθετου παράλληλου επιπέδου: για τον σκοπό αυτόν, υιοθετούνται περιοδικές οριακές συνθήκες για τις τροχιές των σωματιδίων.

στ) Τέλος, όταν ένα σωματίδιο κολλάει στην επιφάνεια του δείγματος, αποφασίζεται αν θα εγχαραχθεί το δείγμα ή όχι βάσει της απόδοσης εγχάραξης (*EY – Etching Yield*). Αν η απόφαση είναι εγχάραξη, τότε το κελί στο οποίο συμβαίνει η σύγκρουση αφαιρείται από το πλέγμα. Αλλιώς, ένα νέο σωματίδιο γεννάται (βήμα α). Αν ένας παρεμποδιστής εγχάραξης κολλήσει στην επιφάνεια, προστίθεται κάθετα στην πλευρά του κελιού όπου συνέβη η σύγκρουση ένα νέο κελί παρεμποδιστή. Όταν δεν υπάρχουν κελιά κάτω από το κελί του παρεμποδιστή ώστε να το συγκρατούν, αυτό μετακινείται κάθετα μέχρι να συναντήσει ένα.

Ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, αρχικά πραγματοποιούνται πολλές προσομοιώσεις και καταγράφονται. Από κάθε προσομοίωση (που πραγματοποιείται για μία από τις ψευδοτυχαίες δειγματοληψίες), προκύπτουν αποτελέσματα, τα οποία δείχνουν τις στατιστικές κατανομές που ακολουθούν οι μελετούμενες μεταβλητές [4]. Έτσι, συνδυάζοντας τα αποτελέσματα από ένα σύνολο προσομοιώσεων, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την πιθανότητα που έχει μία μεταβλητή να λαμβάνει τιμές εντός μίας περιοχής.

Το πρώτο βήμα για να μελετηθεί η εξέλιξη της τραχύτητας στην επιφάνεια μιας μικροδομής με χρήση μοντέλου Monte Carlo, είναι να οριστούν οι αρχικές διαστάσεις της επιφάνειας, το μέγεθος του πλέγματος $N \times N$. Το μέγεθος του πλέγματος, επιλέγεται βάσει της επιθυμητής αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, αφού γενικά σε μια προσομοίωση Monte Carlo όσο μεγαλύτερο μέγεθος έχει το πλέγμα, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται (Σχήμα 14). Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι αν και τα αριθμητικά αποτελέσματα βελτιώνονται με την αύξηση των διαστάσεων του πλέγματος, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την διαδικασία προσομοίωσης είναι περισσότερος [21].



Σχήμα 14: Χρονική εξέλιξη της επιφανειακής τραχύτητας με χρήση μοντέλου Monte Carlo χρησιμοποιώντας διαφορετικές διαστάσεις πλέγματος: 20×20 , 50×50 , 100×100 και 150×150 [21].

2.4 Στατιστικά μεγέθη χαρακτηρισμού της μορφολογίας τραχείας επιφάνειας

Η τραχύτητα μιας επιφάνειας, χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο στατιστικών φυσικών μεγεθών. Βάσει αυτών των μεγεθών, μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ διαφορετικών επιφανειών προκειμένου να διαπιστωθεί ποιες είναι περισσότερο και ποιες είναι λιγότερο τραχιές. Προκειμένου να υπολογιστούν τα μεγέθη αυτά, εφαρμόζονται *στατιστικές αναλύσεις πρώτης ή δεύτερης τάξης*. Με την στατιστική ανάλυση πρώτης τάξης, υπολογίζεται η *συνάρτηση κατανομής (distribution function)* του *ύψους τραχύτητας*, η *μέση (τυπική) απόκλιση* των υψών της επιφάνειας από την μέση τιμή τους *rms (root mean squared roughness)*, *w*, η *ασυμμετρία* της επιφάνειας (*skewness*) και η *κύρτωσή* της (*kurtosis*). Με την στατιστική ανάλυση δεύτερης τάξης, υπολογίζεται η *συνάρτηση συσχέτισης υψών (Height-Height Correlation Function, HHCF)*, από την οποία προκύπτουν το *μήκος συσχέτισης ξ (correlation length)*, ο *εκθέτης τραχύτητας α (roughness exponent)* και η *φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD - Power Spectral Density)*. Επισημαίνεται ότι στην παρούσα εργασία όλα τα εν λόγω μεγέθη υπολογίζονται αριθμητικά μέσω κώδικα C++.

Μέσα στον αντιδραστήρα η επιφάνεια που βρίσκεται εκτεθειμένη αλλοιώνεται και γίνεται ολοένα και πιο τραχιά κατά την εξέλιξη της εγχάραξης (και της συνεπαγόμενης της εναπόθεσης που θα περιγραφεί αργότερα), σχηματίζοντας όρη (σημεία με μέγιστο ύψος) και κοιλάδες (σημεία με ελάχιστο ύψος). Η διαφορά ύψους μεταξύ ενός όρους της εν λόγω επιφάνειας και της γειτονικής σε αυτό κοιλάδας, ονομάζεται *ύψος τραχύτητας* και συμβολίζεται με

$$h(\mathbf{r}, t) = h(x, y, t)$$

όπου $\mathbf{r} = (x, y)$ το διάνυσμα θέσης πάνω στην επιφάνεια και t ο χρόνος που έχει περάσει από την έναρξη της εγχάραξης.

Είναι προφανές, ότι αυτό το μέγεθος παίρνει διαφορετική τιμή σε κάθε σημείο της επιφάνειας και για κάθε χρονική στιγμή, οπότε δεν έχει από μόνο του συνολική ισχύ στην επιφάνεια, παρά μόνο τοπική. Έτσι, για την περιγραφή μίας ολόκληρης επιφάνειας ή ενός τμήματος αυτής για την περίπτωση μελέτης των διακριτών τραχιών επιφανειών εισάγεται

το στατιστικό μέγεθος της *τυπικής απόκλισης του ύψους τραχύτητας* μίας επιφάνειας, δηλαδή της τιμής

$$w = \sqrt{\langle h^2(t) \rangle - \langle h(t) \rangle^2}$$

όπου $\langle h(t) \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N h_i(r_i, t)}{N}$ και $\langle h^2(t) \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N h_i^2(r_i, t)}{N}$, ενώ N είναι το πλήθος των στοιχείων που στο σύνολό τους απαρτίζουν την επιφάνεια ή του τμήματος της επιφάνειας που μελετάται [3]. Η τυπική απόκλιση του ύψους τραχύτητας από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται πιο απλά ως *rms τραχύτητα* (w).

Η τραχύτητα λοιπόν, όπως εξάλλου υπονοείται από τους παραπάνω τύπους, δεν είναι μόνο στατική αλλά εξελίσσεται δυναμικά με τον χρόνο μέχρι την χρονική στιγμή που επιτυγχάνεται ισορροπία. Έτσι, η τραχύτητα που αναφέρεται σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή ονομάζεται *στατική τραχύτητα*, ενώ η περιγραφή της πλήρους χρονικής εξέλιξής της έως ότου αποκατασταθεί ισορροπία ονομάζεται *κινητική τραχύτητα*.

Η μέση στατιστική τιμή των υψών των διακυμάνσεων στο ύψος της επιφάνειας (*rms*), είναι χρήσιμη για την ποσοτική περιγραφή της τραχύτητας, όπως εξάλλου εξηγήθηκε παραπάνω.

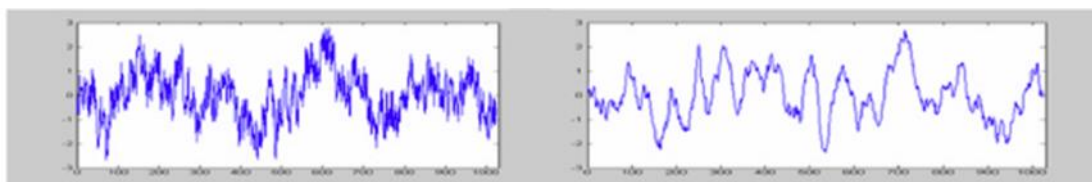
Ωστόσο, πιο ακριβής γίνεται η περιγραφή της τραχύτητας με την εισαγωγή των εννοιών της *κάθετης* και της *οριζόντιας* τραχύτητας. Σχετικά με την κάθετη τραχύτητα, αυτή είναι που αναφέρεται ως *rms τραχύτητα* παραπάνω. Η οριζόντια τραχύτητα από την άλλη, χαρακτηρίζεται από την *συνάρτηση συσχέτισης ύψους-ύψους*, η οποία μπορεί να γραφεί ως

$$G(r = md) = \sqrt{\frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} [h_{(i+m)} - h_{(i)}]^2}$$

όπου d η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών σημείων της επιφάνειας των οποίων το ύψος γνωρίζουμε και N το πλήθος των σημείων αυτών. Αυτή η συνάρτηση, ουσιαστικά παρέχει πληροφορία για την συσχέτιση των υψών μεταξύ δύο διαφορετικών θέσεων της δομής. Όπως φαίνεται και από τη σχέση όσο αυξάνεται η τιμή του δείκτη m , δηλαδή όσο αυξάνονται οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων, τόσο μειώνεται η ακρίβεια υπολογισμού της $G(md)$. Για αυτόν τον λόγο δεν λαμβάνονται υπόψιν για τον υπολογισμό της συνάρτησης συσχέτισης ύψους-ύψους μεγάλες τιμές του m .

Αν η συμπεριφορά της συνάρτησης συσχέτισης ύψους-ύψους είναι του τύπου $G(r) \propto r^\alpha$, όπου α ($0 \leq \alpha \leq 1$) ο *εκθέτης τραχύτητας*, η δομή καλείται *αυτοσυσχετιζόμενη* (*self-affine*).

Τέτοιου είδους δομές παραμένουν αναλλοίωτες ύστερα από ανισότροπες αλλαγές κλίμακας. Για την περιγραφή αυτοσυσχετιζόμενων δομών που χαρακτηρίζονται από ακανόνιστο (μη περιοδικό), τραχύ ανάγλυφο χρησιμοποιείται η κλασματική (fractal) γεωμετρία. Σύμφωνα με αυτήν, η δομή ενός συνόλου σημείων του χώρου εκφράζεται ως ένας αριθμός D που ονομάζεται κλασματική διάσταση (διάσταση Hausdorff-Bericovitch). Ο εκθέτης τραχύτητας όταν γίνεται μελέτη σε μία διάσταση (γραμμές) ορίζεται ως: $\alpha=2-D$, ενώ όταν μελετούνται και οι δύο διαστάσεις (επιφάνειες): $\alpha=3-D$ [22]. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 15, ο εκθέτης τραχύτητας περιγράφει τις ιδιότητες μικρής κλίμακας της δομής και όσο μικρότερη είναι η τιμή του, διατηρώντας τα υπόλοιπα μεγέθη ίδια, τόσο πιο απότομες είναι οι τοπικές διακυμάνσεις (δηλαδή το ανάγλυφο είναι πιο «πριονωτό»).



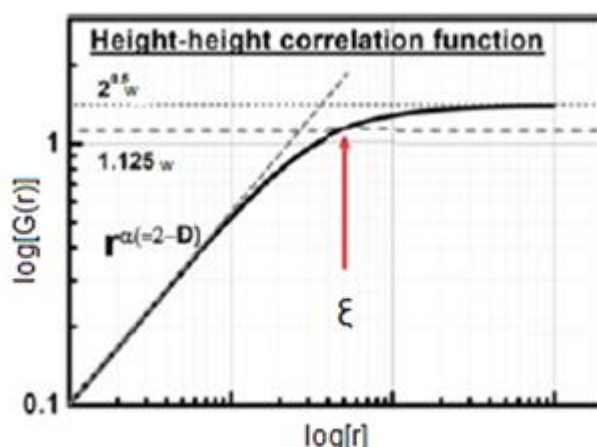
Σχήμα 15: Ανάγλυφο για $\alpha=0.2$ (αριστερά) και $\alpha=0.8$ (δεξιά)

Για μια αυτοσυσχετιζόμενη επιφάνεια η συνάρτηση συσχέτισης ύψους-ύψους μπορεί να γραφτεί και ως:

$$G(r) = \sqrt{2} \cdot w \cdot f\left(\frac{r}{\xi}\right)$$

Όπου w η rms τραχύτητα και ξ το μήκος συσχέτισης.

Στο Σχήμα 16 φαίνεται η λογαριθμική συνάρτηση συσχέτισης υψών. Όπως παρατηρείται τα στατιστικά μεγέθη: rms τραχύτητα w , μήκος συσχέτισης ξ και εκθέτης τραχύτητας α μπορούν να υπολογιστούν γραφικά. Ειδικότερα η rms τραχύτητα μπορεί να προσδιοριστεί από την μέγιστη τιμή της $\log[G(r)]$ ($r > \xi$), ο εκθέτης τραχύτητας υπολογίζεται από την κλίση της $\log[G(r)]$ σε περιοχή μικρών τιμών $r < 2 \cdot \xi$, ενώ το μήκος συσχέτισης ξ από το «γόνατο» που σχηματίζεται μεταξύ των δύο ασυμπτωτικών περιοχών της $\log[G(r)]$.



Σχήμα 16: Συνάρτηση συσχέτισης υψών μιας αυτοσυσχετιζόμενης επιφάνειας [23].

Η συνάρτηση συσχέτισης ύψους-ύψους $G(r)$ συνδέεται με την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $R(r)$ μέσω της σχέσης:

$$R(r) = 1 - \left[\frac{G^2(r)}{2 \cdot w^2} \right]$$

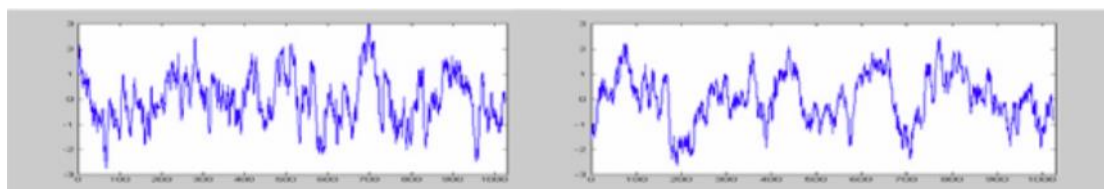
Η συνάρτηση συσχέτισης ύψους-ύψους $G(r)$ μιας περιοδικής λοφώδους (mounded) επιφάνειας δεν λαμβάνει μέγιστη τιμή σταθερή για $r > \xi$ όπως συμβαίνει σε μια αυτοσυσχετιζόμενη επιφάνεια (Σχήμα 16), αλλά παρατηρείται ότι η $G(r)$ ταλαντώνεται. Ένα χρήσιμο μέγεθος που προσδιορίζεται από την συνάρτηση συσχέτισης ύψους-ύψους μιας λοφώδους επιφάνειας, είναι η φασματική πυκνότητα ισχύος (PSD - Power Spectrum Density). Αυτή, είναι το τετράγωνο του μέτρου του μιγαδικού που προκύπτει

εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Fourier στην $G(r)$, δηλαδή είναι η συνάρτηση $|\tilde{G}(\omega)|^2$, όπου:

$$\tilde{G}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(r) e^{-i\omega r} dr$$

Ουσιαστικά, η περιοδικότητα στην μορφολογία της επιφάνειας απεικονίζεται από την κορυφή στο συχνοτικό διάγραμμα της φασματικής πυκνότητας ισχύος. Αυτό, δεν σημαίνει βέβαια ότι η επιφάνεια παρουσιάζει τέλεια περιοδικότητα και εμφανίζεται μόνο ένα μήκος κύματος, αλλά ότι υπάρχει ένα *κυρίαρχο ή χαρακτηριστικό* της επιφάνειας μήκος κύματος [5].

Άλλα μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό μιας περιοδικής επιφάνειας, είναι η *μέση απόσταση μεταξύ των λόφων* (λ), το *μήκος συσχέτισης* (ξ) και το ολικό μήκος συσχέτισης (ζ). Η μέση απόσταση μεταξύ των λόφων λ , δεν είναι παρά η μέση τιμή του μήκους μεταξύ δύο διαδοχικών μεγίστων στο ύψος του ανάγλυφου. Δηλαδή είναι ένα σημαντικό μέγεθος που σε μία λοφώδη επιφάνεια, εκφράζει την περιοδικότητα της μορφολογίας της. Το μήκος συσχέτισης ξ από την άλλη, καθορίζει την μέγιστη απόσταση στην οποία όταν βρίσκονται δύο σημεία μεταξύ τους, τα ύψη τους θεωρούνται συσχετισμένα. Αν δηλαδή απέχουν περισσότερο από ξ δύο σημεία μεταξύ τους, θεωρούνται ασυσχέιστα τα ύψη τους. Αυτό προσδιορίζεται από την απόσταση στην οποία η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης $R(r)$ πέφτει στο $1/e$ της μέγιστης τιμής της. Με διατήρηση των υπόλοιπων μεγεθών σταθερών, όσο πιο μικρή είναι η τιμή του, τόσο πιο τραχειά όψη έχει η επιφάνεια, αφού οι αυξομειώσεις πλησιάζουν μεταξύ τους (Σχήμα 17). Τέλος, το ολικό μήκος συσχέτισης ζ δείχνει συνολικά την τυχαιότητα με την οποία κατανέμονται οι λόφοι και οι κοιλάδες σε μια επιφάνεια και μάλιστα, όσο μικρότερη είναι η τιμή του τόσο μεγαλύτερη είναι και η εν λόγω τυχαιότητα.



Σχήμα 17: Ανάγλυφο για $\xi=50$ (αριστερά) και $\xi=100$ (δεξιά)

Επίσης, ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος για την μελέτη των εγχαρασσόμενων επιφανειών, είναι η *ασυμμετρία* (*skewness*). Αυτή λοιπόν, φανερώνει το μοτίβο της επιφάνειας. Όταν δηλαδή η ασυμμετρία λαμβάνει αρνητικές τιμές, κυριαρχούν τρύπες στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια, ενώ όταν παίρνει θετικές τιμές, η επιφάνεια παρουσιάζει όρη.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

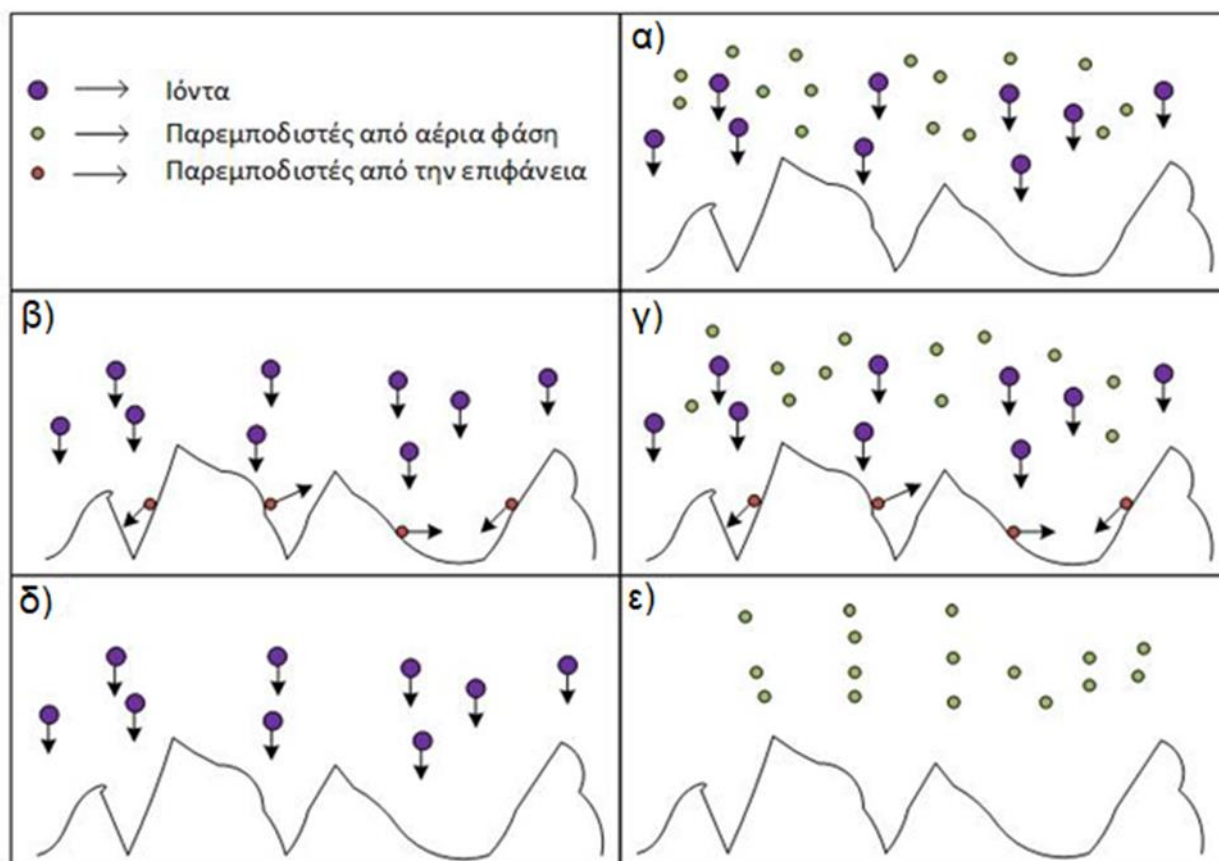
3.1 Εισαγωγή

Η μελέτη στο παρόν κεφάλαιο εστιάζει σε διεργασίες εγχάραξης υποστρωμάτων στις οποίες μπορεί να συμβεί και απόθεση. Η απόθεση προέρχεται από τους παρεμποδιστές εγχάραξης (για τις πηγές των παρεμποδιστών εγχάραξης σε αντιδραστήρα πλάσματος δες παράγραφο 1.8). Η εγχάραξη είναι οδηγούμενη από ιόντα δηλαδή αναφέρεται είτε σε υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη (ion enhanced etching) στην οποία η επιφάνεια είναι είτε κορεσμένη από ουδέτερα συστατικά (π.χ. πλήρως χλωριωμένη επιφάνεια Πυριτίου (Si) κατά την εγχάραξη υποστρωμάτων Si με πλάσμα Cl_2) είτε σε ιονοβολή (physical sputtering). Η χημική εγχάραξη δεν λαμβάνεται υπόψη.

Η πρώτη διεργασία που μελετάται είναι η περίπτωση της ταυτόχρονης εγχάραξης και απόθεσης (παρεμποδιστών εγχάραξης). Οι παρεμποδιστές μπορεί να προέρχονται από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα (Σχήμα 18α) είτε από επαναπόθεση (redosition) των προϊόντων της εγχάραξης δηλαδή από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια (Σχήμα 18β). Για την περίπτωση που οι παρεμποδιστές προέρχονται από την αέρια φάση, μελετάται η επίδραση του συντελεστή προσκόλλησης τους και της επιλεκτικότητας εγχάραξης, ως προς το υπόστρωμα στην τραχύτητα που αναπτύσσεται στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια. Τα ίδια φαινόμενα μελετώνται στην αναπτυσσόμενη τραχύτητα της εγχαρασσόμενης επιφάνειας, όταν οι παρεμποδιστές προέρχονται από επαναπόθεση. Τέλος γίνεται διερεύνηση του ανταγωνισμού μεταξύ των παρεμποδιστών από τον κύριο όγκο και των παρεμποδιστών από την επαναπόθεση. (Σχήμα 18γ).

Η δεύτερη διεργασία που μελετάται στο παρόν κεφάλαιο είναι η σειριακή επαναλαμβανόμενη ακολουθία εγχάραξης και απόθεσης (Σχήματα 18δ, 18ε). Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται η επίδραση της επιλεκτικότητας εγχάραξης (υποστρώματος προς παρεμποδιστές) και του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών που προέρχονται από την αέρια φάση στην τραχύτητα που αναπτύσσεται στην επιφάνεια όταν τα βήματα εγχάραξης και απόθεσης γίνονται σειριακά εναλλάξ.

Στο Σχήμα 18 απεικονίζεται η εγχαρασσόμενη επιφάνεια στην ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση όταν οι παρεμποδιστές προέρχονται από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα (Σχήμα 18α) στην ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση όταν οι παρεμποδιστές προέρχονται από επαναπόθεση από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια (Σχήμα 18β), στην ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση με παρεμποδιστές και από τις δύο πηγές (Σχήμα 18γ) και στην σειριακή εγχάραξη και απόθεση (Σχήματα 18δ και 18ε). Σημειώνεται ότι με μωβ χρώμα συμβολίζονται τα ιόντα που προσπίπτουν κάθετα στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια και την εγχαρασσουν. Επίσης, με πράσινο απεικονίζονται οι παρεμποδιστές που προέρχονται από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα, ενώ οι παρεμποδιστές που αποκολλώνται από την επιφάνεια και επαναποτίθενται σε αυτήν σημαίνονται με πορτοκαλί χρώμα.



Σχήμα 18: Σχηματική απεικόνιση της ταυτόχρονης εγχάραξης α) με παρεμποδιστές από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα, β) με παρεμποδιστές από επαναπόθεση των προϊόντων της εγχάραξης, γ) με παρεμποδιστές και από τις δύο πηγές και δ,ε) της σειριακής εγχάραξης και απόθεσης

Για την μελέτη της τραχύτητας σε διάφορες περιπτώσεις, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο που περιγράφεται στο κεφάλαιο 2. Πραγματοποιήθηκαν και μελετήθηκαν γενικά πέντε οικογένειες προσομοιώσεων: (α) Ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση όπου οι παρεμποδιστές προέρχονται από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα, (β) Ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση με διαφορετικό ποσοστό ιόντων και παρεμποδιστών, αλλά και με διαφορετική απόδοση εγχάραξης, (γ) ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση με και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών, (δ) ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση με και χωρίς επαναπόθεση, με ανάκλαση ιόντων και (ε) σειριακή εγχάραξη και απόθεση με διαφορετικό αριθμό κύκλων εγχάραξης ιόντων - επαναπόθεσης παρεμποδιστών. Το σύνολό των περιπτώσεων που μελετήθηκαν συνοψίζεται στον Πίνακα 3.1:

Πίνακας 1: Τιμές παραμέτρων των προσομοιώσεων

Run3dxxx	N	# Of cycles	runs	αέρια φάση		πιθανότητα Προσκόλλησης						απόδοση Εγχάραξης			
				χ_d	χ_i	$S_{d, sb}$	$S_{d, d}$	$S_{i, sb}$	$S_{i, d}$	$S_{sb, sb}$	$EY_{d, sb}$	$EY_{d, d}$	$EY_{i, sb}$	$EY_{i, d}$	$EY_{sb, sb}$
001	512	0	5	0.0500	0.9500	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	0
002	512	0	5	0.0556	0.9444	0.9	0.9	1	1	0	-1	-1	1	1	0
003	512	0	5	0.0625	0.9375	0.8	0.8	1	1	0	-1	-1	1	1	0
004	512	0	5	0.0714	0.9286	0.7	0.7	1	1	0	-1	-1	1	1	0
005	512	0	5	0.0833	0.9167	0.6	0.6	1	1	0	-1	-1	1	1	0
006	512	0	5	0.1000	0.9000	0.5	0.5	1	1	0	-1	-1	1	1	0
007	512	0	5	0.1250	0.8750	0.4	0.4	1	1	0	-1	-1	1	1	0
008	512	0	5	0.2500	0.7500	0.2	0.2	1	1	0	-1	-1	1	1	0
009	512	0	5	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
010	512	0	5	0.0250	0.9750	1	1	1	1	0	-1	-1	1	0.5	0
011	512	0	5	0.0167	0.9833	1	1	1	1	0	-1	-1	1	0.33	0
012	512	0	5	0.0125	0.9875	1	1	1	1	0	-1	-1	1	0.25	0
013	512	0	5	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	-1
014	512	0	5	0	1	0	0	$\cos\theta$	0	0	0	0	a.d.	0	0
015	512	0	5	0	1	0	0	$\cos\theta$	0	1	0	0	a.d.	0	-1
016	512	0	5	0	1	0	0	$\cos\theta$	0	0.75	0	0	a.d.	0	-1
017	512	0	5	0	1	0	0	$\cos\theta$	0	0.5	0	0	a.d.	0	-1
018	512	0	5	0	1	0	0	$\cos\theta$	0	0.25	0	0	a.d.	0	-1
019	512	1	5	0.0500	0.9500	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	0
020	512	2	5	0.0500	0.9500	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	0
021	512	4	5	0.0500	0.9500	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	0
022	512	8	5	0.0500	0.9500	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	0
023	512	4	5	0.0500	0.9500	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	0
024	512	16	5	0.0500	0.9500	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	0
025	512	32	5	0.0500	0.9500	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	0

X: κλάσμα ροής στην επιφάνεια, S: πιθανότητα προσκόλλησης στην επιφάνεια

EY: απόδοση εγχάραξης επιφάνειας

Δείκτες i, d και sb: ιόντα, παρεμποδιστές εγχάραξης και εγχαρασσόμενο υπόστρωμα αντίστοιχα

N: πλήθος κελιών επιφάνειας, θ : γωνία πρόσπτωσης των ιόντων, a.d. (angular dependence): στα αντίστοιχα κελιά, ο συντελεστής EY δεν καθορίζεται μονοσήμαντα, καθώς υπάρχει εξάρτηση από την γωνία πρόσπτωσης των ιόντων στην επιφάνεια

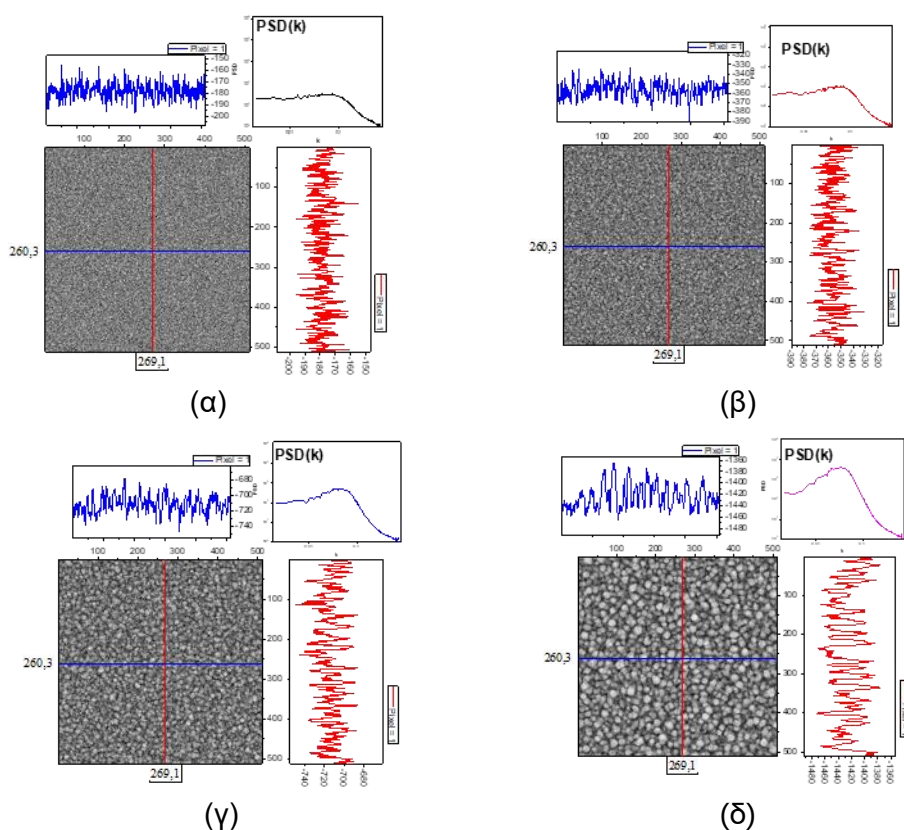
3.2 Ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση: Παρεμποδιστές από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα

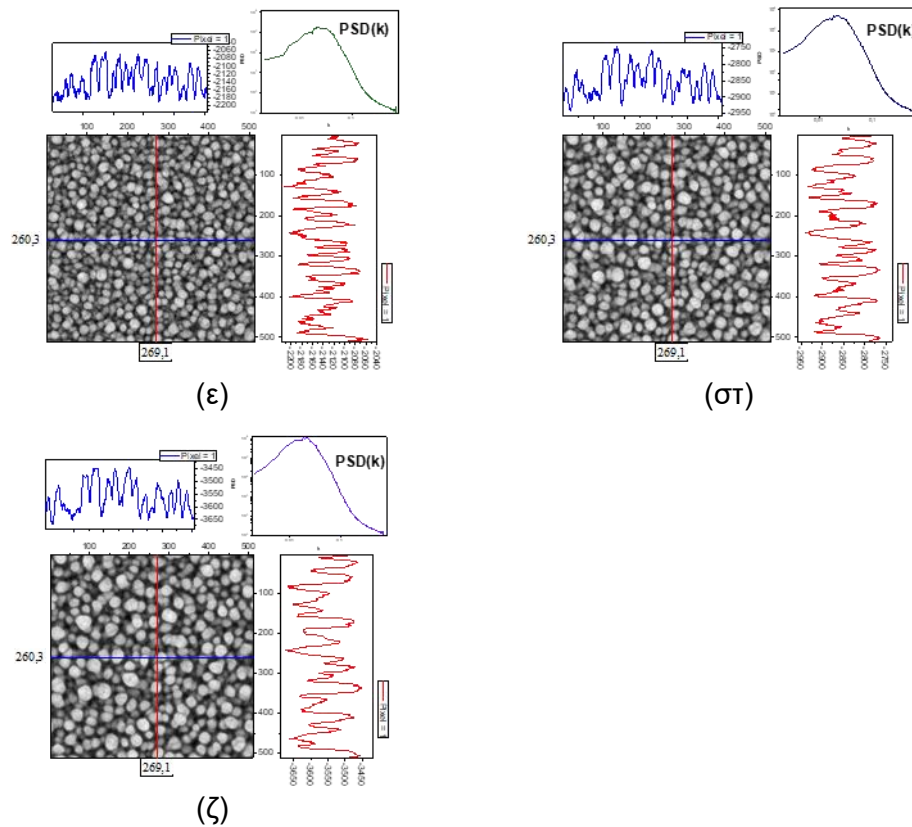
3.2.1 Επίδραση του συντελεστή προσκόλλησης και του κλάσματος των παρεμποδιστών

Η ακόλουθη οικογένεια προσομοιώσεων, αποτελείται από οκτώ περιπτώσεις στις οποίες ο συντελεστής προσκόλλησης των παρεμποδιστών (στο υπόστρωμα, $S_{d,sub}$, και σε περιοχές όπου υπάρχουν παρεμποδιστές $S_{d,d}$) κυμαίνεται από 1 μέχρι 0.2, ενώ το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενό τους να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Η επαναπόθεση των προϊόντων της εγχάραξης θεωρείται αμελητέα. Η πιθανότητα προσκόλλησης των ιόντων είναι 1. Η επίδραση του κλάσματος των παρεμποδιστών και του συντελεστή προσκόλλησης τους μεμονωμένα έχει εξεταστεί στην αναφορά [5]. Στο παράρτημα Α υπάρχουν γραφήματα για καθεμία από τις οκτώ περιπτώσεις ξεχωριστά.

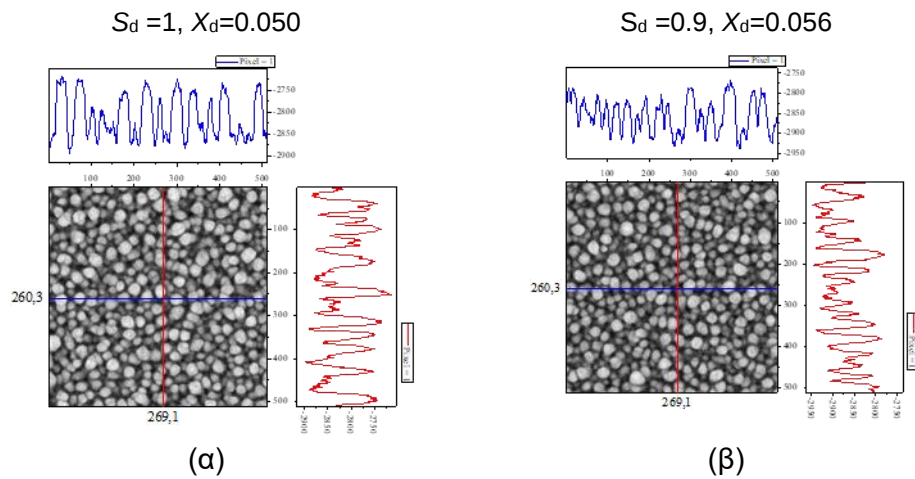
Στο Σχήμα 19, φαίνονται επτά διαφορετικά στιγμιότυπα της εγχαρασσόμενης επιφάνειας σε κάτοψη για την περίπτωση όπου $X_d = 0.05$ και $S_{d,sub} = S_{d,d} = S_d = 1$. Από αυτά τα στιγμιότυπα, εύκολα συμπεραίνεται ότι με την πάροδο του χρόνου σχηματίζονται λόφοι και κοιλάδες στην επιφάνεια, δηλαδή διακυμάνσεις ύψους των οποίων η ένταση σταδιακά αυξάνεται..

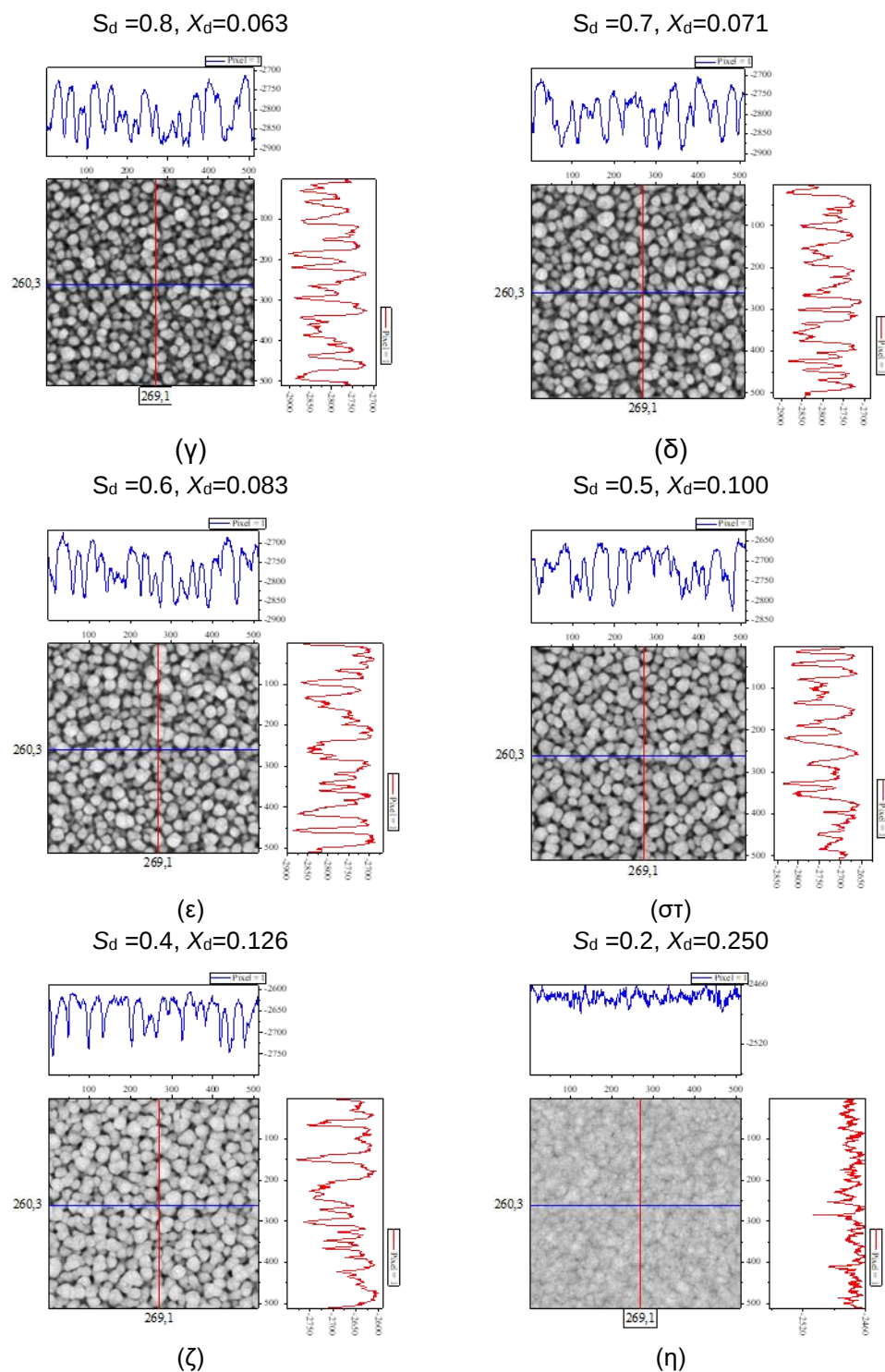
Στο Σχήμα 20 απεικονίζονται οκτώ στιγμιότυπα κάτοψης επιφανειών που αφορούν την ίδια χρονική στιγμή: Το ίδιο πλήθος ιόντων έχει βομβαρδίσει όλες τις επιφάνειες (πλήθος υπερϊόντων $\sim 7.9 \cdot 10^8$). Το κάθε στιγμιότυπο αντιστοιχεί σε διαφορετικό συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών ($S_{d,sub}=S_{d,d}=S_d$). Σημειώνεται ότι σε κάθε περίπτωση σχηματίζονται λόφοι και κοιλάδες στην επιφάνεια. Οι διακυμάνσεις αυτές στο ύψος του ανάγλυφου, φαίνεται ότι είναι μικρότερες σε ένταση καθώς ο συντελεστής προσκόλλησης παρεμποδιστών μειώνεται, αλλά παράλληλα είναι και χωρικά συχνότερες.





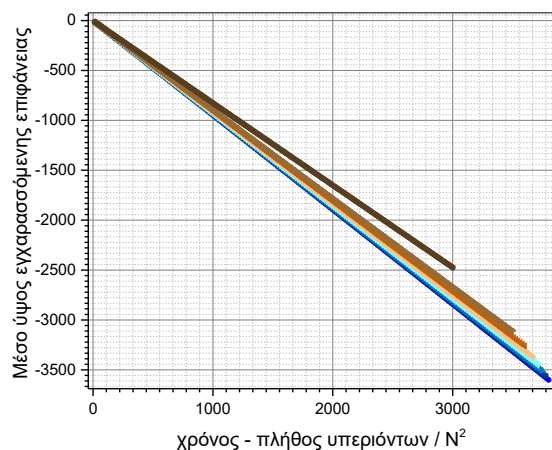
Σχήμα 19: Κατόψεις της εγχαρασσόμενης επιφάνειας σε διαφορετικές χρονικές στιγμές όταν $X_d=0.05$ και $S_{d, sb} = S_{d, d} = S_d=1$. Κατόψεις μετά από πρόσπτωση α) $4.9 \cdot 10^7$ β) $9.9 \cdot 10^7$ γ) $2 \cdot 10^8$ δ) $4 \cdot 10^8$ ε) $5.9 \cdot 10^8$ στ) $7.9 \cdot 10^8$ ζ) $9.9 \cdot 10^8$ υπερ-ιόντων



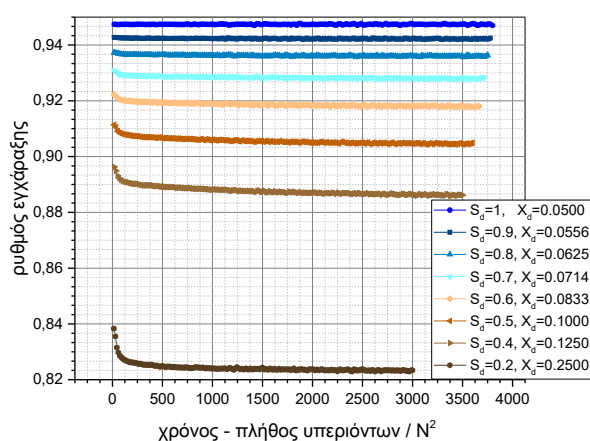


Σχήμα 20: Κάτοψη της εγχαρασόμενης επιφάνειας για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το X_d κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1).

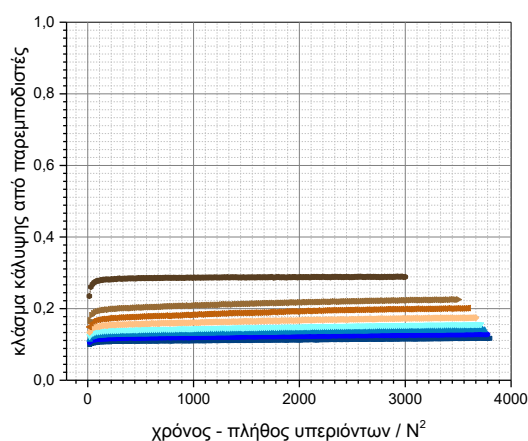
Συγκριτικά αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων συναρτήσει του χρόνου (πλήθους υπερϊόντων που πέφτουν στην επιφάνεια) παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 21 – 26.



(α)



(β)

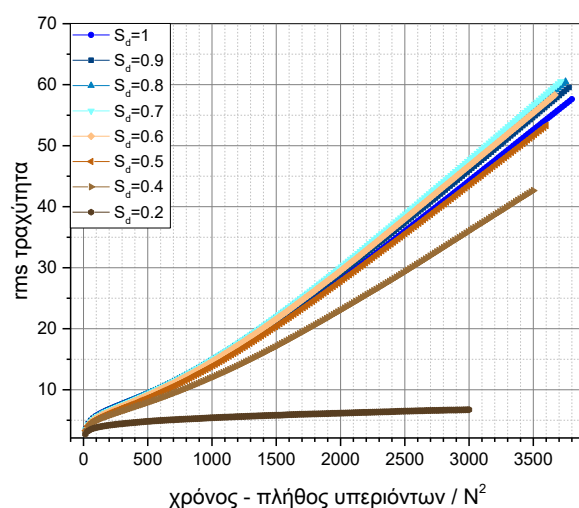


(γ)

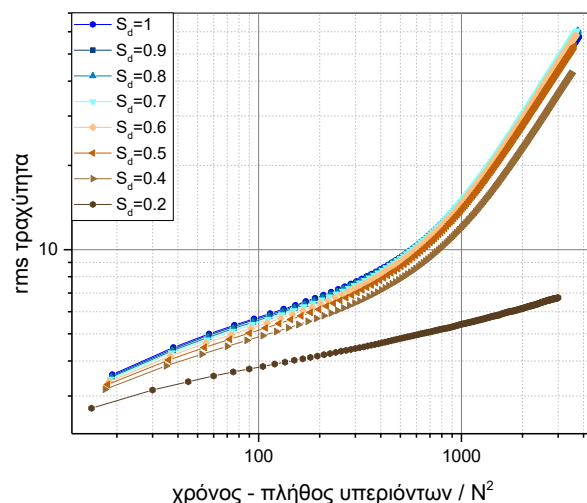
Σχήμα 21: α) Μέσο ύψος εγχαρασσομένης επιφάνειας, β) ρυθμός εγχάραξης, γ) κλάσμα κάλυψης από παρεμποδιστές συναρτήσει του χρόνου (πλήθος υπερionτων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος) για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος σωματιδίων στην επιφάνεια.

Όλα τα στατιστικά μεγέθη που φαίνονται στα Σχήματα 21 – 26 αποτελούν το μέσο όσο πέντε προσομοιώσεων. Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες στα Σχήματα 21 – 26 σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται (το X_d αυξάνεται) είναι διότι όλες οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος σωματιδίων (υπερ-ιόντων + υπερ-σωματιδίων παρεμποδιστών) στην επιφάνεια. Έτσι, όσο αυξάνεται το X_d τόσο πέφτει το συνολικό πλήθος των υπερ-ιόντων που φτάνει στην επιφάνεια.

Στο Σχήμα 21α φαίνεται το μέσο ύψος της εγχαρασσόμενης επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης (πλήθους των υπερ-ιόντων που φτάνουν στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια). Στο Σχήμα 21β φαίνεται η απόλυτη τιμή του ρυθμού εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου όπως προκύπτει από την παραγωγή του μέσου ύψους στο Σχήμα 21α. Παρατηρούμε ότι η μείωση του S_d οδηγεί σε μείωση του ρυθμού εγχάραξης. Η τελευταία αιτιολογείται από την αύξηση του κλάσματος κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές καθώς το S_d μειώνεται (Σχήμα 21γ). Στο Σχήμα 21γ παρατηρούμε ότι το κλάσμα κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές με την πάροδο του χρόνου σχεδόν σταθεροποιείται σε κάθε περίπτωση, με την τιμή να ελαττώνεται καθώς αυξάνεται το S_d . Σημειώνεται για μία ακόμα φορά, ότι η περίπτωση με την χαμηλότερη τιμή συντελεστών προσκόλλησης απέχει περισσότερο από τις υπόλοιπες, από ότι οι υπόλοιπες μεταξύ τους.



(α)

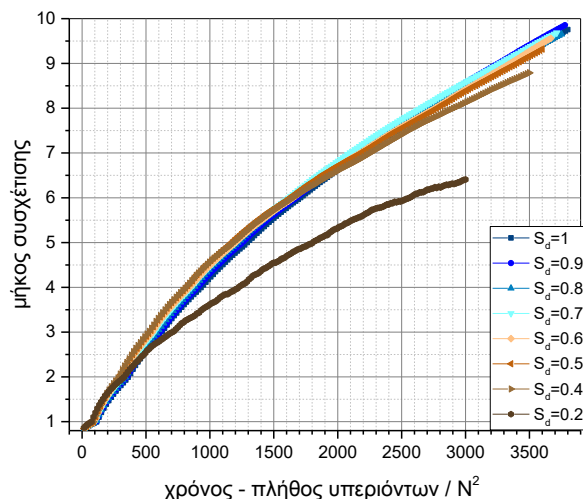


(β)

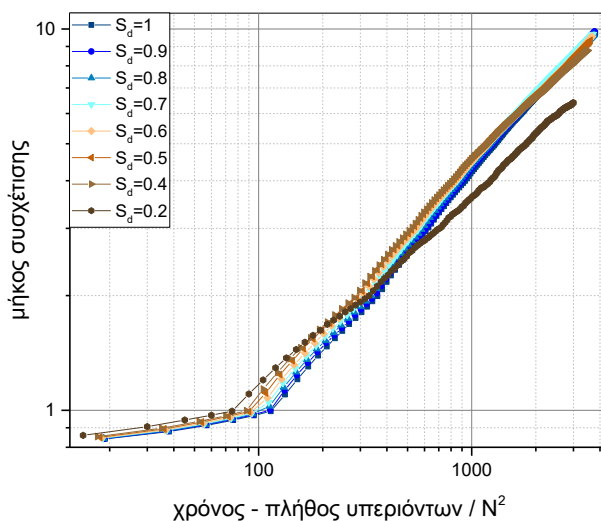
Σχήμα 22: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα. Ο χρόνος ορίζεται ως το πλήθος υπερϊόντων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται (το X_d αυξάνεται) είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος υπερ-σωματιδίων (ιόντων και παρεμποδιστών) στην επιφάνεια.

Στο Σχήμα 22 φαίνεται η root mean square (rms) τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης (του πλήθους των ιόντων που βομβαρδίζουν την επιφάνεια). Φαίνεται ότι η rms τραχύτητα είναι σχεδόν η ίδια για τιμές του S_d μεγαλύτερες από 0.6. Για τιμές μικρότερες από 0.6, η rms τραχύτητα μειώνεται με τη μείωση του S_d . Επίσης, εξετάζοντας καθεμία από τις προσομοιώσεις χωριστά, φαίνεται ότι η rms τραχύτητα, αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Ευδιάκριτη είναι η βραδύτερη αύξηση της rms τραχύτητας στην περίπτωση που $S_{d,d}=0.2$ σε σχέση με τις υπόλοιπες περιπτώσεις, οι οποίες αυξάνουν με παρόμοιο τρόπο και στις οποίες η τραχύτητα λαμβάνει γειτονικές τιμές.

Στο Σχήμα 23 φαίνεται το μήκος συσχέτισης, ξ , συναρτήσει του χρόνου. Όπως και στην rms τραχύτητα συμβαίνει αύξηση του ξ συναρτήσει του χρόνου σε όλες τις περιπτώσεις. Όλες οι καμπύλες είναι κοντά εκτός από την καμπύλη που αντιστοιχεί στο $S_d=0.2$.



(α)



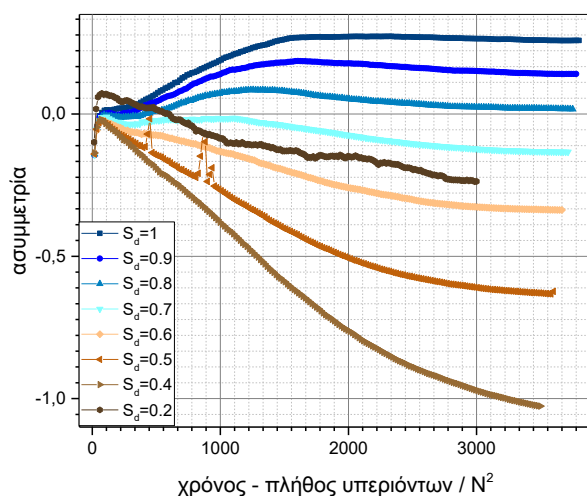
(β)

Σχήμα 23: Το μήκος συσχέτισης συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα. Ο χρόνος ορίζεται ως το πλήθος υπεριόντων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται (το X_d αυξάνεται) είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος υπερ-σωματιδίων (ιόντων και παρεμποδιστών) στην επιφάνεια.

Επίσης, από τα Σχήματα 22 και 23 φαίνεται ότι τόσο η rms τραχύτητα όσο και το μήκος συσχέτισης ακολουθούν μαθηματική σχέση της μορφής $y(t) = ct^a$, όπου t ο χρόνος. Τη θέση του y παίρνει το ένα από τα δύο μεγέθη και c , a είναι σταθερές που μπορούν να προσδιοριστούν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

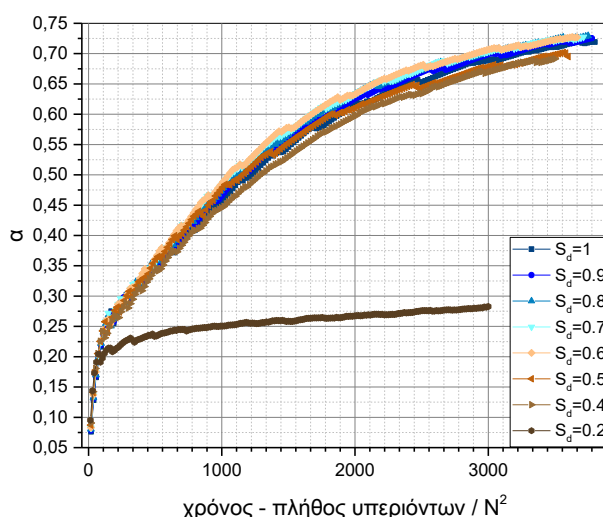
Σχετικά με την ασυμμετρία, στο Σχήμα 24 φαίνεται ότι στις πέντε από τις οκτώ προσομοιώσεις λαμβάνει αρνητικές τιμές, κάτι το οποίο σημαίνει ότι οι αντίστοιχες εγχαρασσόμενες επιφάνειες παρουσιάζουν οπές στο ανάγλυφό τους. Επίσης, στις υπόλοιπες τρεις που έχουν και τους υψηλότερους συντελεστές προσκόλλησης η

ασυμμετρία λαμβάνει θετικές τιμές, οπότε το ανάγλυφο των επιφανειών εκείνων εμφανίζει όρη.

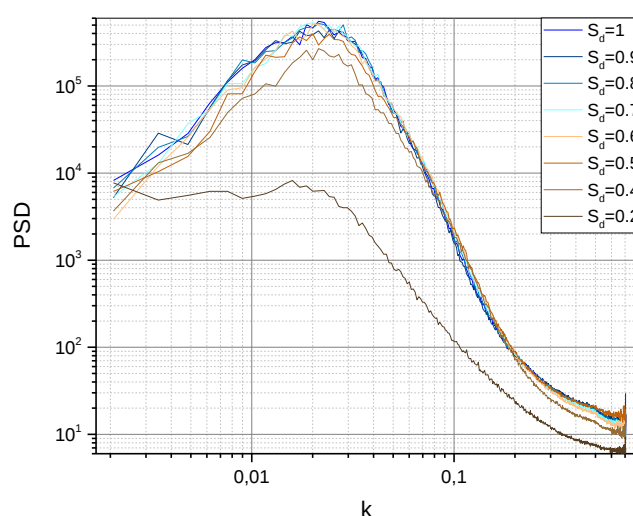


Σχήμα 24: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου. Ο χρόνος ορίζεται ως το πλήθος υπερϊόντων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται (το X_d αυξάνεται) είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος υπερ-σωματιδίων (ιόντων και παρεμποδιστών) στην επιφάνεια.

Όσον αφορά τον εκθέτη τραχύτητας, α , ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 25, παρατηρείται γενικά ότι αυξάνει με την πάροδο του χρόνου. Αυτό σημαίνει ότι η τραχύτητα με υψηλή (χωρική) συχνότητα μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Έντονη διαφοροποίηση παρουσιάζει ο εκθέτης τραχύτητας που αντιστοιχεί στην προσομοίωση με το μικρότερο S_d (μεγαλύτερο X_d).



Σχήμα 25: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου. Ο χρόνος ορίζεται ως το πλήθος υπερϊόντων που φτάνουν στην επιφάνεια δια του N^2 , όπου N^2 είναι το πλήθος των κελιών ενός στρώματος για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.25 ώστε το γινόμενο $X_d \cdot S_d$ να είναι 0.05 (runs 001-008 του Πίνακα 1). Ο λόγος για τον οποίο οι καμπύλες σταματούν σε μικρότερο χρόνο καθώς το S_d μειώνεται (το X_d αυξάνεται) είναι διότι οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για το ίδιο πλήθος υπερ-σωματιδίων (ιόντων και παρεμποδιστών) στην επιφάνεια.



Σχήμα 26: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών για διαφορετικές τιμές του S_d (1, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.2) συναρτήσει του κυματάριθμου (κατοπτρικό της συχνότητας, αφού $u=\omega/k$)

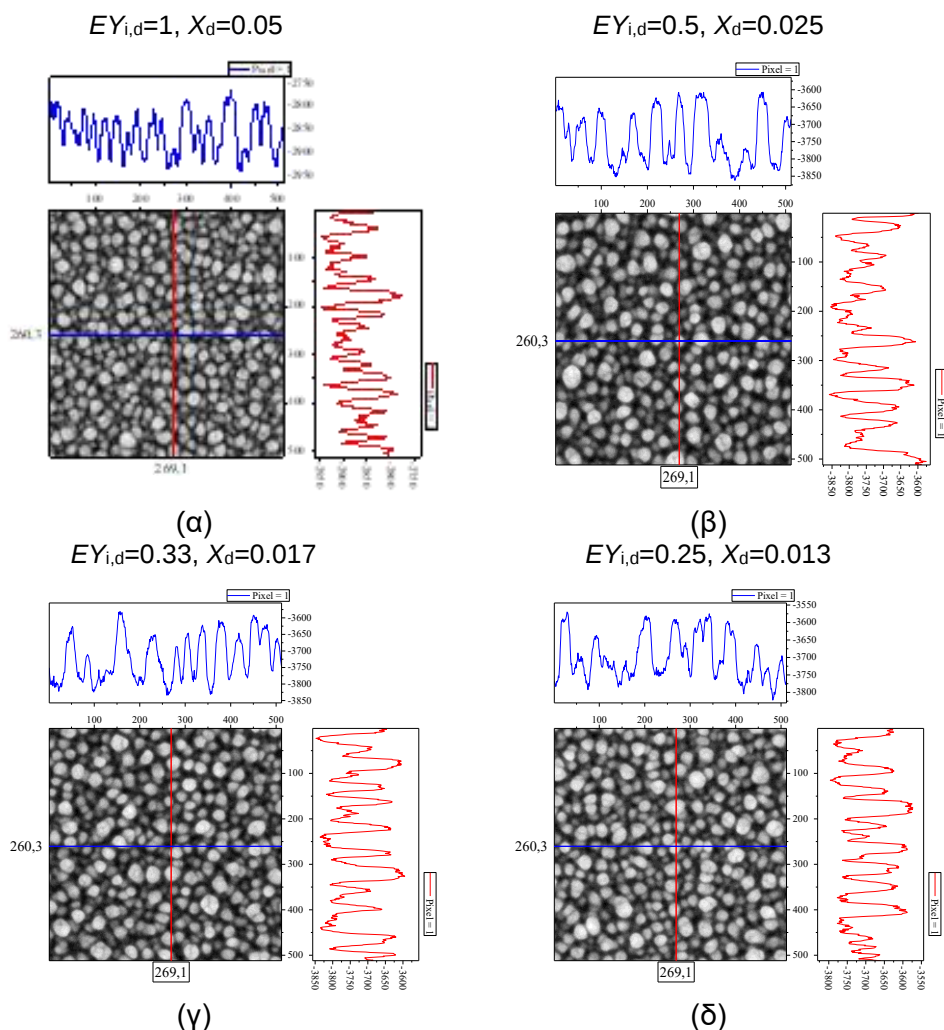
Στο σχήμα 26 απεικονίζεται η φασματική πυκνότητα ισχύος (power spectral density) εγχαρασσόμενων επιφανειών στην ίδια χρονική στιγμή: Το ίδιο πλήθος ιόντων έχει βομβαρδίσει όλες τις επιφάνειες (πλήθος υπεριόντων $\sim 7.9 \cdot 10^8$). Οι επτά από τις οκτώ περιπτώσεις προσομοιώσεων έχουν την ίδια μορφολογία και την ίδια περίπου κορυφή στο διάγραμμα της φασματικής πυκνότητας ισχύος. Αυτό, σημαίνει ότι η επιφάνειες στις επτά από τις οκτώ περιπτώσεις παρουσιάζουν (παρόμοια) περιοδικότητα, αλλά δεν εμφανίζεται μόνο ένα μήκος κύματος. Υπάρχει ωστόσο ένα κυρίαρχο ή χαρακτηριστικό των επιφανειών αυτών μήκος κύματος, το οποίο είναι αυτό που υπολογίζεται εύκολα από την τιμή του κυματάριθμου στον οποίο αντιστοιχεί η κορυφή σε κάθε προσομοίωση. Στην περίπτωση όμως του μικρότερου S_d (μεγαλύτερου X_d), δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια κορυφή που να αποτυπώνεται με σαφήνεια στο διάγραμμα, οπότε δεν εμφανίζει περιοδικότητα η αντίστοιχη εγχαρασσόμενη επιφάνεια.

3.2.2 Επίδραση της επιλεκτικότητας εγχάραξης των παρεμποδιστών

Στις ακόλουθες 4 περιπτώσεις προσομοιώσεων (runs 001 και 010 – 012 του Πίνακα 1), μεταβάλλεται η επιλεκτικότητα εγχάραξης των παρεμποδιστών σε σχέση με το υπόστρωμα. Πιο συγκεκριμένα η επιλεκτικότητα εγχάραξης ($sel_{d-sb} = EY_{i,d} / EY_{i,sb}$) παίρνει τιμές 1, 0.5, 0.33, 0.25 και ταυτόχρονα το κλάσμα των παρεμποδιστών μεταβάλλεται από 0.05 μέχρι 0.0125 ώστε το πηλίκο X_d / sel_{d-sb} να παραμένει σταθερό στο 0.05. Η μεταβολή στην επιλεκτικότητα επιβάλλεται με μείωση της απόδοσης εγχάραξης των παρεμποδιστών ($EY_{i,d}$), ενώ η απόδοση εγχάραξης του υποστρώματος παραμένει σταθερή. Σημειώνεται ότι η επίδραση του κλάσματος των παρεμποδιστών και της επιλεκτικότητας εγχάραξης μεμονωμένα έχει εξεταστεί στην αναφορά (Kokkoris et al., 2012)[5]. Η πιθανότητα προσκόλλησης των ιόντων και των παρεμποδιστών είναι 1 και η επαναπόθεση θεωρείται αμελητέα.

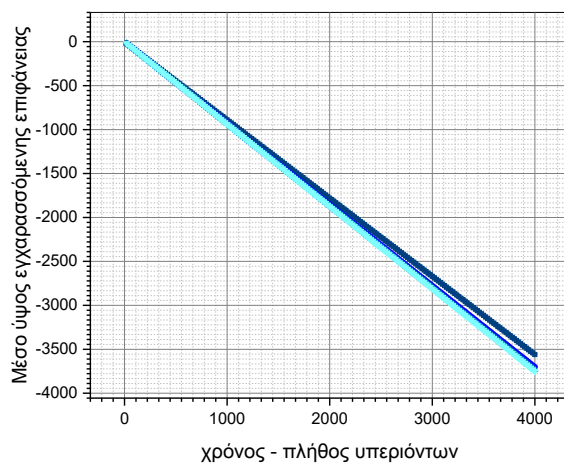
Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων, παρουσιάζονται συνοπτικά στα ακόλουθα γραφήματα, ενώ στο παράρτημα Β υπάρχουν γραφήματα για καθεμία από τις τέσσερις περιπτώσεις ξεχωριστά.

Στο Σχήμα 27 απεικονίζονται τέσσερα στιγμιότυπα κάτοψης επιφανειών που αφορούν την ίδια χρονική στιγμή: Το ίδιο πλήθος ιόντων έχει βομβαρδίσει όλες τις επιφάνειες (πλήθος υπερ-ιόντων $\sim 1.3 \cdot 10^9$). Σε κάθε περίπτωση δημιουργούνται λόφοι (ή τελείες) στην επιφάνεια.

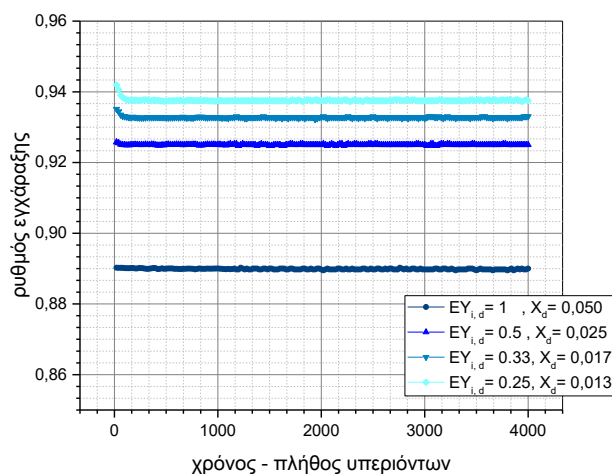


Σχήμα 27: Κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας για διαφορετικές τιμές της απόδοσης εγχάραξης των παρεμποδιστών ($EY_{i,d} = 1, 0.5, 0.33, 0.25$). Το X_d κυμαίνεται από 0.05 έως 0.0125, ώστε το πηλίκιο $X_d / EY_{i,d}$ να είναι σταθερό με 0.05. (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).

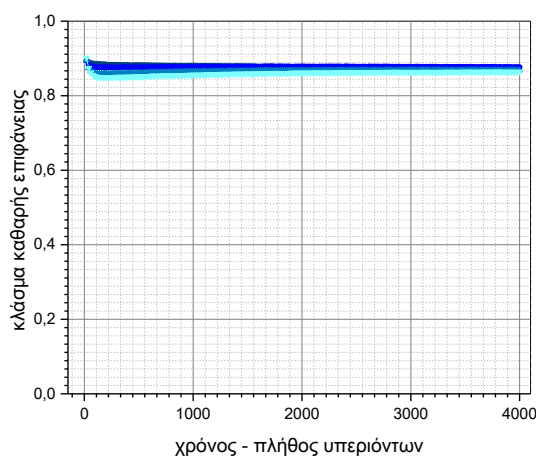
Στο Σχήμα 28α απεικονίζεται το μέσο ύψος της εγχαρασσόμενης επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης (πλήθους των υπερ-ιόντων που φτάνουν στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια). Στο Σχήμα 28β φαίνεται ο ρυθμός εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου όπως προκύπτει από την παραγωγή του μέσου ύψους στο Σχήμα 28α, ενώ στο Σχήμα 28γ φαίνεται το κλάσμα κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές με την πάροδο του χρόνου.



(α)



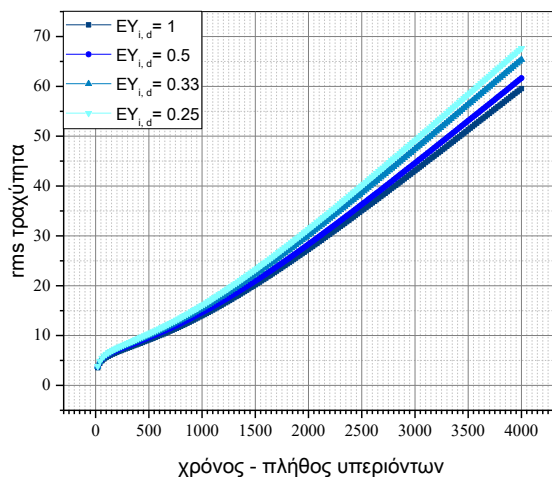
(β)



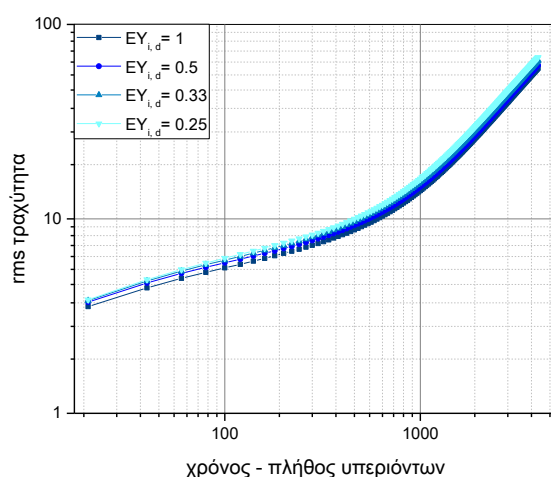
(γ)

Σχήμα 28: α) Μέσο ύψος εγχαρασσόμενης επιφάνειας, β) ρυθμός εγχάραξης, γ) κλάσμα καθαρής επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το X_d κυμαίνεται από 0.05 έως 0.0125 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1) ώστε το πηλίκο $X_d / EY_{i,d}$ να είναι σταθερό με 0.05.

Παρατηρείται ότι διατηρώντας σταθερό το S_d και ίσο με την μονάδα, η επίδραση της μείωσης της απόδοσης εγχάραξης των παρεμποδιστών αντισταθμίζεται με την μείωση του κλάσματός τους: Το μέσο ύψος, ο ρυθμός εγχάραξης και το κλάσμα κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές συναρτήσει του χρόνου δεν διαφοροποιούνται έντονα μεταξύ τους.



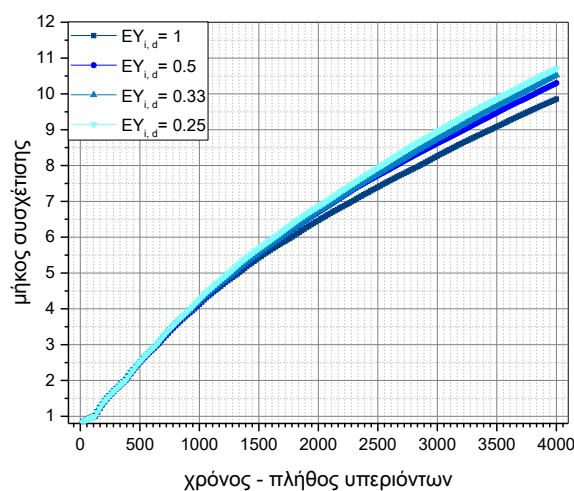
(α)



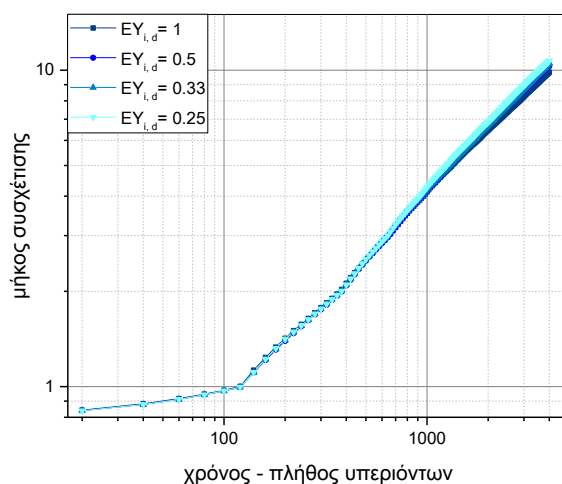
(β)

Σχήμα 29: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το X_d κυμαίνεται από 0.05 έως 0.0125 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).

Στο Σχήμα 29 φαίνεται η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 29α και 29β, η rms τραχύτητα και στις τέσσερις περιπτώσεις εμφανίζει έντονη αύξηση, η οποία μάλιστα είναι σχεδόν πανομοιότυπη. Η παρόμοια αυτή συμπεριφορά των προσομοιώσεων, μας οδηγεί και πάλι στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του ποσοστού των παρεμποδιστών μπορεί να απαλειφθεί από την αύξηση του συντελεστή απόδοσης εγχάραξης $EY_{i,d}$ των ιόντων πάνω στους παρεμποδιστές.



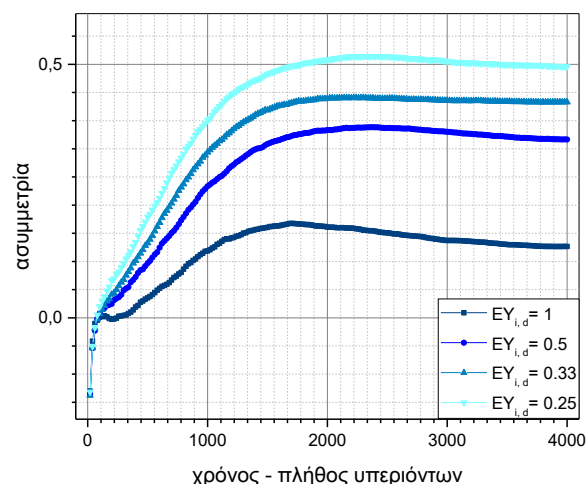
(α)



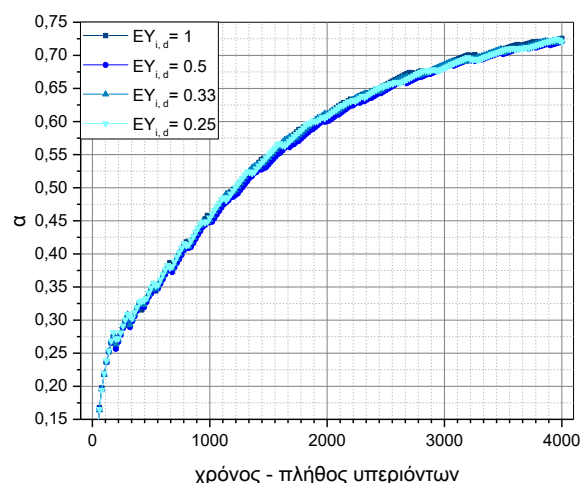
(β)

Σχήμα 30: Το μήκος συσχέτισης συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.025 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).

Στα Σχήματα 30α και 30β φαίνεται το μήκος συσχέτισης, ξ , σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα, συναρτήσει του χρόνου. Όπως και στην rms τραχύτητα, όλες οι περιπτώσεις έχουν παρόμοια συμπεριφορά.



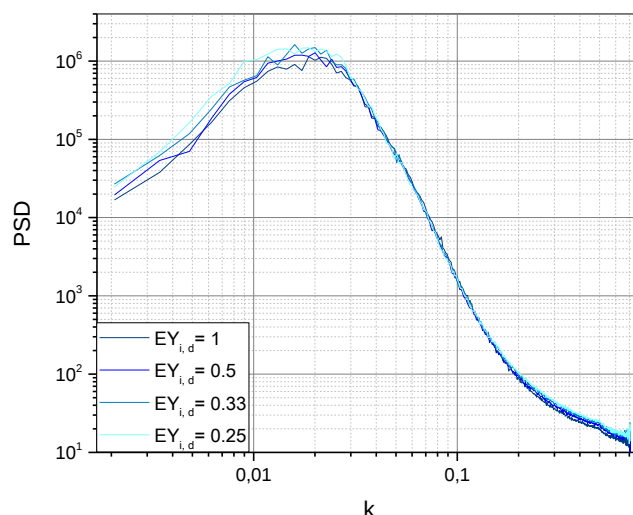
Σχήμα 31: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.025 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).



Σχήμα 32: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25). Το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή (X_d) κυμαίνεται από 0.05 έως 0.025 (runs 001 και 010-012 του Πίνακα 1).

Σχετικά με την ασυμμετρία, στο Σχήμα 31 φαίνεται ότι και στις τέσσερις προσομοιώσεις λαμβάνει θετικές τιμές, κάτι το οποίο σημαίνει ότι οι αντίστοιχες εγχαρασσόμενες επιφάνειες παρουσιάζουν όρη στο ανάγλυφό τους.

Όσον αφορά τον εκθέτη τραχύτητας, α , ο οποίος απεικονίζεται στο σχήμα 32, παρατηρείται γενικά ότι σε όλες τις περιπτώσεις αυξάνει με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που σημαίνει ότι η συνεισφορά της τραχύτητας με υψηλή (χωρική) συχνότητα στη συνολική τραχύτητα μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.



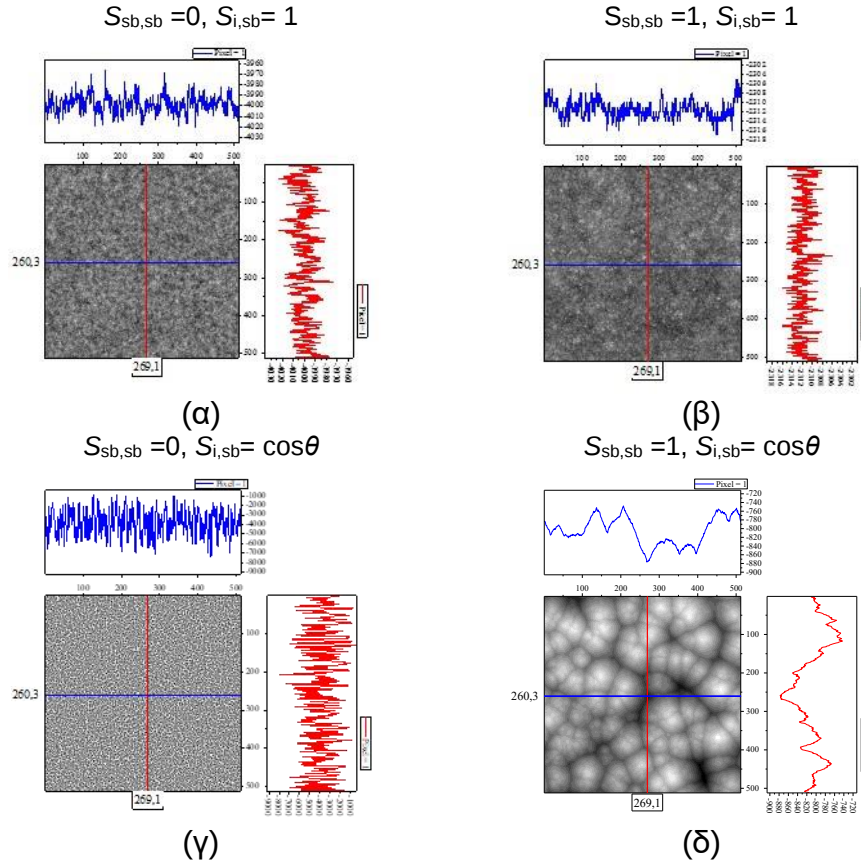
Σχήμα 33: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών για διαφορετικές τιμές του $EY_{i,d}$ (1, 0.5, 0.33, 0.25) συναρτήσει του κυματάριθμου (κατοπτρικό της συχνότητας, αφού $u=\omega/k$)

Στο σχήμα 33 απεικονίζεται η φασματική πυκνότητα ισχύος (power spectral density) εγχαρασσόμενων επιφανειών στην ίδια χρονική στιγμή: Το ίδιο πλήθος ιόντων έχει βομβαρδίσει όλες τις επιφάνειες (πλήθος υπερionτών $\sim 1.3 \cdot 10^9$). Όλες οι περιπτώσεις προσομοιώσεων όπου υπάρχουν παρεμποδιστές, έχουν την ίδια μορφολογία και την ίδια περίπου κορυφή στο διάγραμμα της PSD. Αυτό, σημαίνει ότι οι επιφάνειες παρουσιάζουν (παρόμοια) περιοδικότητα, χωρίς όμως κατ'ανάγκη να εμφανίζεται μόνο ένα μήκος κύματος. Υπάρχει όμως ένα κυρίαρχο ή χαρακτηριστικό των επιφανειών αυτών μήκος κύματος, το οποίο είναι αυτό που υπολογίζεται εύκολα από την τιμή του κυματάριθμου στον οποίο αντιστοιχεί η κορυφή σε κάθε προσομοίωση.

3.3 Ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση: Παρεμποδιστές από επαναπόθεση των προϊόντων της εγχάραξης

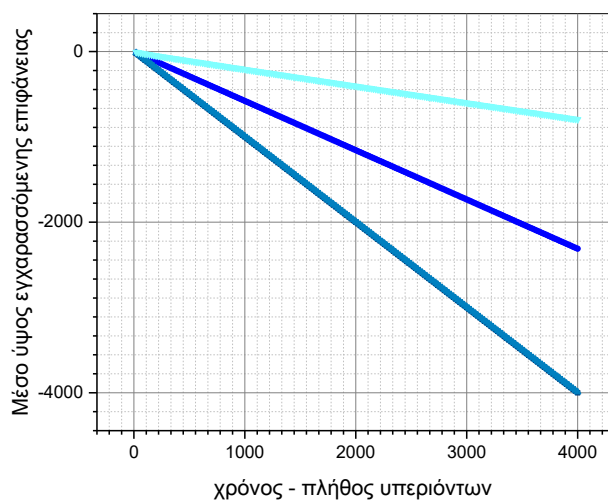
3.3.1 Ο ρόλος της επαναπόθεσης των παρεμποδιστών και της επανεκπομπής (ανάκλασης) των ιόντων

Στις ακόλουθες τέσσερις περιπτώσεις προσομοιώσεων (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1), μελετάται ο ρόλος της επαναπόθεσης παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια (προϊόντων της εγχάραξης), με την πιθανότητα προσκόλλησης των προσπίπτοντων ιόντων να είναι είτε ίση με την μονάδα, είτε συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης θ , διατηρώντας τις υπόλοιπες μεταβλητές σταθερές. Όταν η πιθανότητα προσκόλλησης των ιόντων είναι $\cos\theta$, συμβαίνει επανεκπομπή ή ανάκλαση των ιόντων. Η γωνία επανεκπομπής ενός ιόντος είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης. Παρεμποδιστές από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα δεν υπάρχουν. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων, παρουσιάζονται συνοπτικά στα ακόλουθα Σχήματα (34 έως 40)

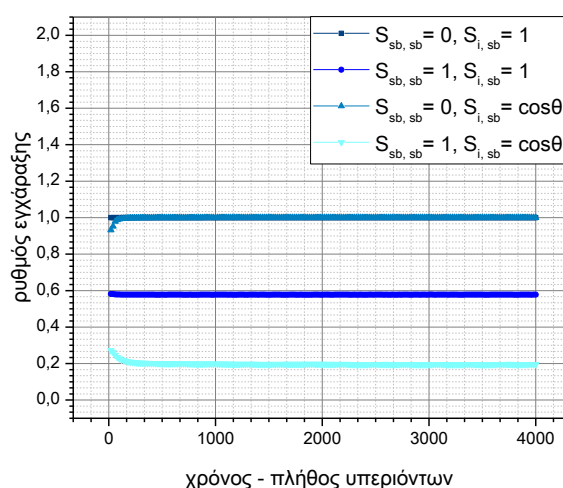


Σχήμα 34: Κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας για πλήθος υπερ-ιόντων $\sim 1.05 \cdot 10^9$ με [(γ) και (δ)] και χωρίς [(α) και (β)] επαναπόθεση των παρεμποδιστών (προϊόντων εγχάραξης). Όταν συμβαίνει επαναπόθεση, ο συντελεστής προσκόλλησης των παρεμποδιστών είναι $S_{sb,sb}=1$. Όταν δεν συμβαίνει, τότε $S_{sb,sb}=0$. Στις κατόψεις (α) και (β) ο συντελεστής προσκόλλησης των ιόντων, $S_{i,sb}$, είναι 1, ενώ στις κατόψεις των (γ) και (δ) είναι $\cos\theta$ (όπου θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).

Στο Σχήμα 34 λοιπόν, απεικονίζονται τέσσερα στιγμιότυπα κάτοψης επιφανειών που αφορούν την ίδια χρονική στιγμή (πλήθος υπερ-ιόντων $\sim 1.05 \cdot 10^9$) με και χωρίς επαναπόθεση ($S_{sb,sb} = 1$ και 0) και με διαφορετικό συντελεστή προσκόλλησης για τα ιόντα ($S_{i,sb} = 1$ και $\cos\theta$). Στην περίπτωση όπου ο συντελεστής προσκόλλησης των ιόντων είναι 1 παρατηρείται ότι η κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας δεν επηρεάζεται σημαντικά από την μεταβολή του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών. Αντίθετα, παρατηρείται ότι στην περίπτωση όπου ο συντελεστής προσκόλλησης των ιόντων είναι $\cos\theta$, όταν συμβαίνει επαναπόθεση παρεμποδιστών που προέρχονται από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb,sb} = 1$) το ανάγλυφο είναι διαφορετικό σε σχέση με όταν δεν συμβαίνει επαναπόθεση ($S_{sb,sb} = 0$). Αναλυτικότερα το ανάγλυφο της περίπτωσης όπου $S_{sb,sb} = 1$ και $S_{i,sb} = \cos\theta$ εμφανίζει μικρότερη περιοδικότητα από εκείνο της περίπτωσης όπου $S_{sb,sb} = 0$ και $S_{i,sb} = \cos\theta$ αφού η μέση απόσταση μεταξύ γειτονικών λόφων (τελείων) είναι μεγαλύτερη.



(α)



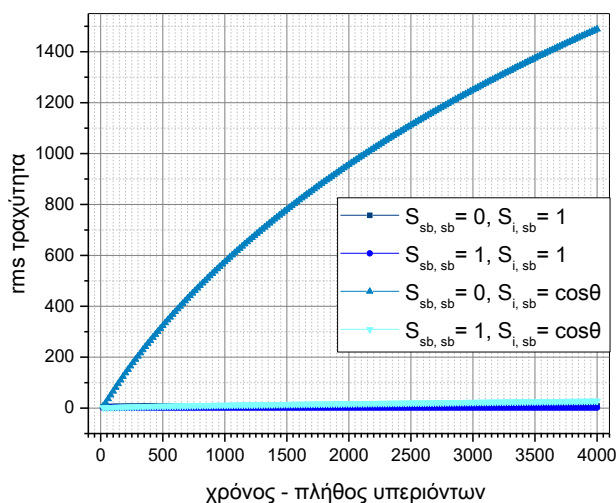
(β)

Σχήμα 35: α) Μέσο ύψος εγχαρασσόμενης επιφάνειας και β) απόλυτη τιμή του ρυθμού εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου με ($S_{sb, sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb, sb}=0$), με ($S_{i, sb}=\cos\theta$, θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i, sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).

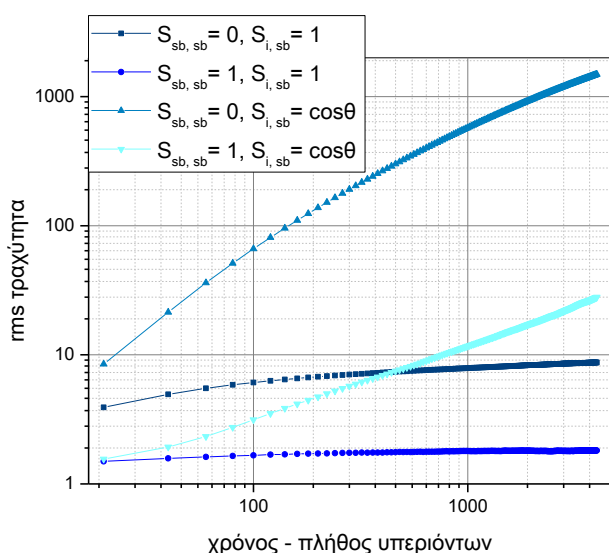
Συγκριτικά αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 35 – 40. Όλα τα στατιστικά μεγέθη που φαίνονται στα Σχήματα 35 – 40 αποτελούν το μέσο όσο πέντε προσομοιώσεων.

Στο Σχήμα 35α απεικονίζεται το μέσο ύψος της εγχαρασσόμενης επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης. Στο Σχήμα 35β φαίνεται ο ρυθμός εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου όπως προκύπτει από την παραγωγή του μέσου ύψους στο Σχήμα 35α. Παρατηρούμε και στα δύο αυτά Σχήματα ότι όταν η πιθανότητα προσκόλλησης των παρεμποδιστών που προέρχονται από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια είναι μηδενική ($S_{sb, sb} = 0$), δηλαδή όταν δεν υπάρχει επαναπόθεση, τόσο το μέσο ύψος όσο και ο ρυθμός εγχάραξης της εγχαρασσόμενης επιφάνειας δεν επηρεάζονται από την γωνία πρόσπτωσης των ιόντων (θ). Αντίθετα, παρουσία του φαινομένου της επαναπόθεσης, όπως ήταν αναμενόμενο λιγότερα ιόντα φθάνουν στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια όταν η πιθανότητα προσκόλλησής τους είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης θ . Αυτό

συμβαίνει επειδή τότε τα ιόντα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να συγκρουστούν με μόριο παρεμποδιστή.



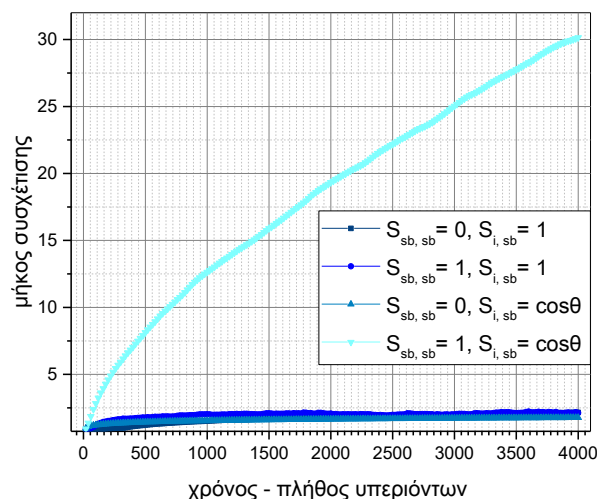
(α)



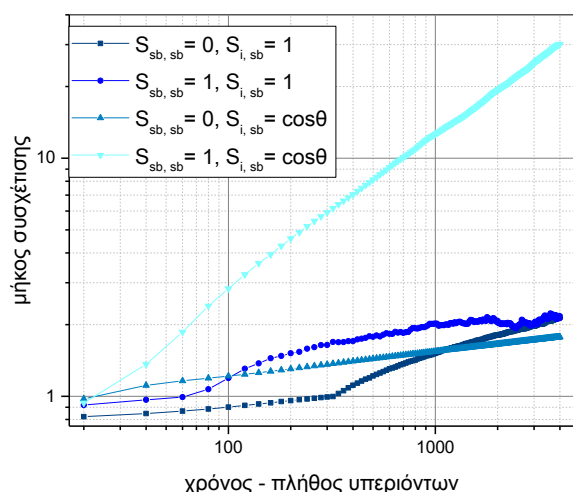
(β)

Σχήμα 36: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, με ($S_{sb, sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb, sb}=0$), με ($S_{i, sb}=\cos\theta$, θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i, sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).

Στο Σχήμα 36 φαίνεται η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης. Συγκρίνοντας τα δύο ζεύγη περιπτώσεων για τις τιμές συντελεστή προσκόλλησης των ιόντων 1 και $\cos\theta$ φαίνεται ότι και στα δύο παρουσία επαναπόθεσης παρεμποδιστών ($S_{sb, sb} = 1$) οι τιμές που λαμβάνει η rms τραχύτητα είναι μεγαλύτερες. Από την άλλη συγκρίνοντας τα δύο ζεύγη περιπτώσεων με και χωρίς επαναπόθεση παρατηρείται ότι παρουσία της ανάκλασης των ιόντων οι τιμές που λαμβάνει η rms τραχύτητα είναι μεγαλύτερες και μάλιστα συμπεραίνεται ότι η επίδραση από την ανάκλαση των ιόντων στην rms τραχύτητα είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη επίδραση από την επαναπόθεση των παρεμποδιστών.



(α)

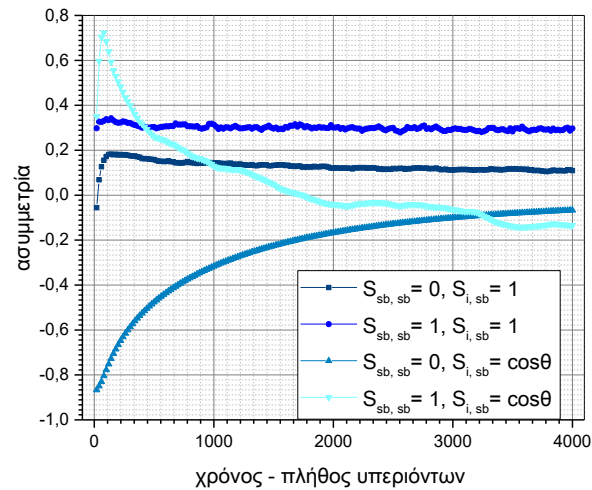


(β)

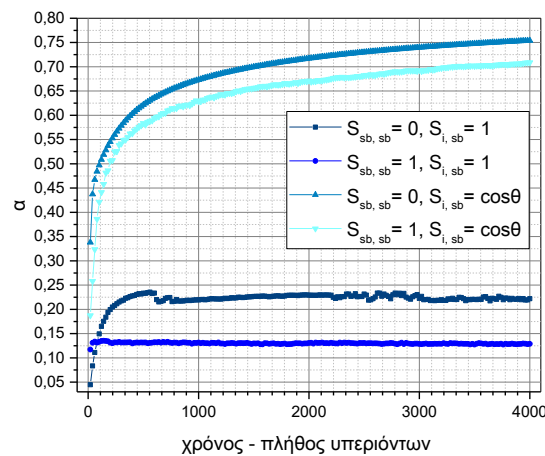
Σχήμα 37: Το μήκος συσχέτισης συναρτίζεται του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, με ($S_{sb, sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb, sb}=0$), με ($S_{i, sb}=\cos\theta$, θ είναι η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i, sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).

Στα Σχήματα 37α και 37β φαίνεται το μήκος συσχέτισης, ξ , σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα, συναρτίζεται του χρόνου. Από τα διαγράμματα αυτά, συμπεραίνουμε ότι η επιφάνεια της περίπτωσης με επαναπόθεση όπου ο συντελεστής προσκόλλησης των ιόντων είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης τους, παρουσιάζει τις λιγότερες τοπικές διακυμάνσεις από τις τέσσερις, ενώ οι υπόλοιπες τρεις εμφανίζουν παρόμοια μήκη συσχέτισης.

Στο Σχήμα 38, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της ασυμμετρίας. Από τα διαγράμματα αυτά, φαίνεται ότι από κάποιο χρονικό σημείο και αργότερα, οι περιπτώσεις όπου η πιθανότητα προσκόλλησης των ιόντων είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης τους, εμφανίζουν ασυμμετρία που σταθεροποιείται σε αρνητικές τιμές (κοιλιάδες στο ανάγλυφο), ενώ οι περιπτώσεις όπου ο συντελεστής προσκόλλησης των ιόντων ισούται με 1 λαμβάνουν θετικές τιμές (όρη στο ανάγλυφο).

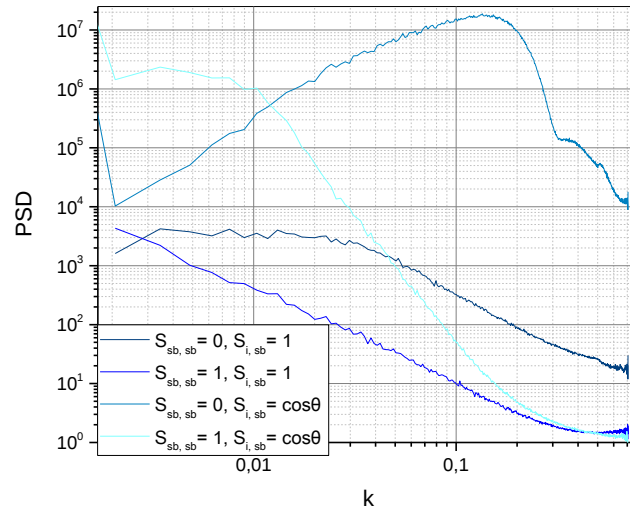


Σχήμα 38: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου με ($S_{sb, sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb, sb}=0$), με ($S_{i, sb}=\cos\theta$, θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i, sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).



Σχήμα 39: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου με ($S_{sb, sb}=1$) και χωρίς επαναπόθεση παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια ($S_{sb, sb}=0$), με ($S_{i, sb}=\cos\theta$, θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και χωρίς ανάκλαση των ιόντων ($S_{i, sb}=1$). Το X_d είναι 0 (runs 009, 013-015 του Πίνακα 1).

Στο Σχήμα 39, απεικονίζεται ο εκθέτης τραχύτητας, α . Παρατηρείται γενικά ότι στις δύο περιπτώσεις που ο συντελεστής προσκόλλησης των ιόντων στην επιφάνεια του υποστρώματος είναι συνάρτηση της γωνίας πρόσπτωσης ($S_{i, sub} = \cos\theta$), ο εκθέτης τραχύτητας αυξάνει με την πάροδο του χρόνου τείνοντας ασυμπτωτικά να σταθεροποιηθεί σε σχετικά υψηλές τιμές (σχετικά ήπιες τοπικές διακυμάνσεις στο ανάγλυφο). Στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει τέτοιου είδους εξάρτηση της πιθανότητας προσκόλλησης των ιόντων ($S_{i, sub} = 1$), ο εκθέτης τραχύτητας σταθεροποιείται πολύ γρήγορα γύρω από τις τελικές, χαμηλότερες τιμές του (ανάγλυφο με εντονότερες τοπικές διακυμάνσεις).

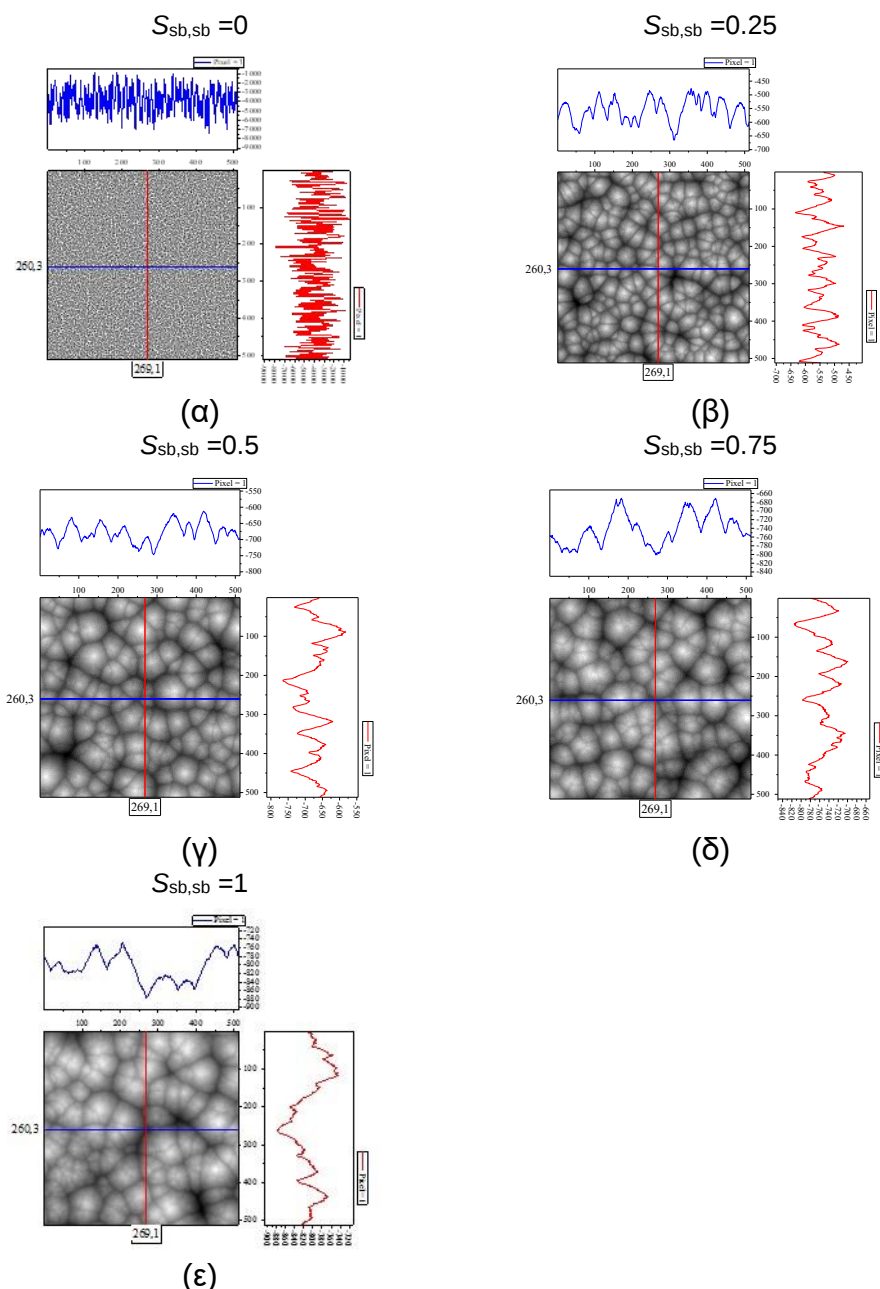


Σχήμα 40: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης παρεμποδιστών $S_{sb, sb}$ (0, 1) και διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης $S_{i, sub}$ (1, $\cos\theta$) συναρτήσει του κυματάριθμου (κατοπτρικό της συχνότητας, αφού $u=\omega/k$)

Στο Σχήμα 40 απεικονίζεται η φασματική πυκνότητα ισχύος (power spectral density) εγχαρασσόμενων επιφανειών στην ίδια χρονική στιγμή: Το ίδιο πλήθος ιόντων έχει βομβαρδίσει όλες τις επιφάνειες (πλήθος υπερειόντων $\sim 1.05 \cdot 10^9$). Παρατηρείται ότι καθεμία από τις τέσσερις περιπτώσεις προσομοιώσεων έχει διαφορετική μορφολογία και κορυφή διακρίνεται στην προσομοίωση όπου είναι μηδενικός ο συντελεστής προσκόλλησης των παρεμποδιστών και υπάρχει γωνιακή εξάρτηση του συντελεστή προσκόλλησης των ιόντων ($S_{sb, sb} = 0, S_{i, sub} = \cos\theta$). Ειδικά στις περιπτώσεις με $S_{i, sb} = 1$, δεν διακρίνεται κάποια συγκεκριμένη κορυφή, γεγονός που αντικατοπτρίζει την απεριοδικότητα των αντίστοιχων εγχαρασσόμενων επιφανειών.

3.3.2 Η επίδραση του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών (προϊόντων εγχάραξης)

Στις ακόλουθες πέντε περιπτώσεις προσομοιώσεων (runs 014-018 του Πίνακα 1), μελετούνται οι διαφορές στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια λόγω της μεταβολής του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών που προέρχονται από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια σε διαφορετικό σημείο της ίδιας επιφάνειας, $S_{sb, sb}$. Οι τιμές που παίρνει ο συντελεστής προσκόλλησης των παρεμποδιστών κυμαίνονται από 0 (δηλαδή δεν υπάρχει επαναπρόσδεση) έως 1. Οι υπόλοιπες μεταβλητές διατηρούνται σταθερές ενώ η προσκόλληση των προσπίπτοντων ιόντων εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια ($S_{i, sb} = \cos\theta$, θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων στην επιφάνεια).

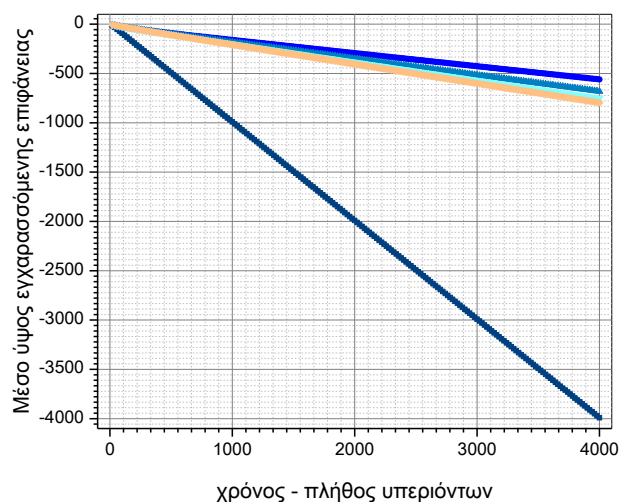


Σχήμα 41: Κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb,sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i,sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το χ_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1)

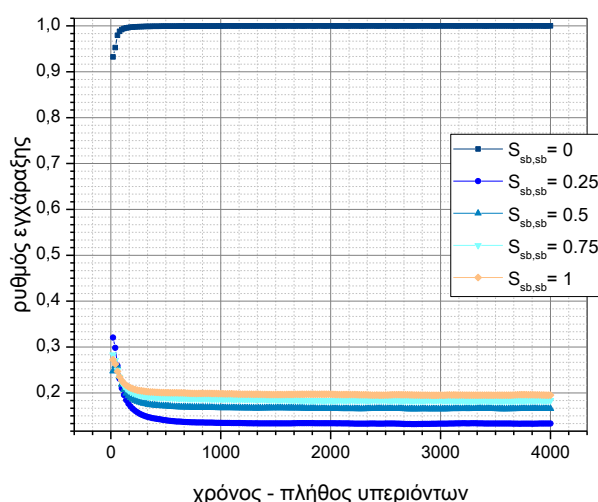
Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων, παρουσιάζονται συνοπτικά στα ακόλουθα γραφήματα, ενώ στο παράρτημα Γ υπάρχουν και τα γραφήματα της κάθε περίπτωσης ξεχωριστά. Κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει και μία διαφορετική περίπτωση από τις πέντε που αναφέρονται παραπάνω στον πίνακα (runs 014 - 018 του Πίνακα 1).

Στο Σχήμα 41 λοιπόν, απεικονίζονται τέσσερα στιγμιότυπα κάτοψης επιφανειών που αφορούν την ίδια χρονική στιγμή: Το ίδιο πλήθος ιόντων έχει βομβαρδίσει όλες τις επιφάνειες (πλήθος υπερionτων $\sim 1.05 \cdot 10^9$). Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής προσκόλλησης των παρεμποδιστών μειώνεται το πλήθος των κορυφών που δημιουργούνται στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια, αλλά αυξάνεται το ύψος τους. Επίσης σημειώνεται ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής προσκόλλησης των παρεμποδιστών τόσο μειώνεται η περιοδικότητα τραχύτητας στο εγχαρασσόμενο ανάγλυφο, αφού μεγαλώνει η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών λόφων.

Συγκριτικά αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 42 – 47. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που εξεταστήκαν στην παρούσα εργασία, έτσι και στα ακόλουθα Σχήματα 42 – 47 όλα τα στατιστικά μεγέθη αποτελούν το μέσο όρο πέντε προσομοιώσεων το καθένα.



(α)



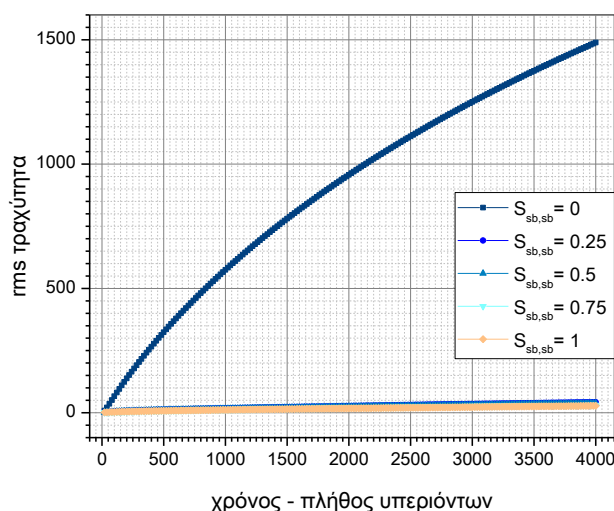
(β)

Σχήμα 42: Μέσο ύψος εγχαρασσόμενης επιφάνειας και β) απόλυτη τιμή του ρυθμού εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb,sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i,sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).

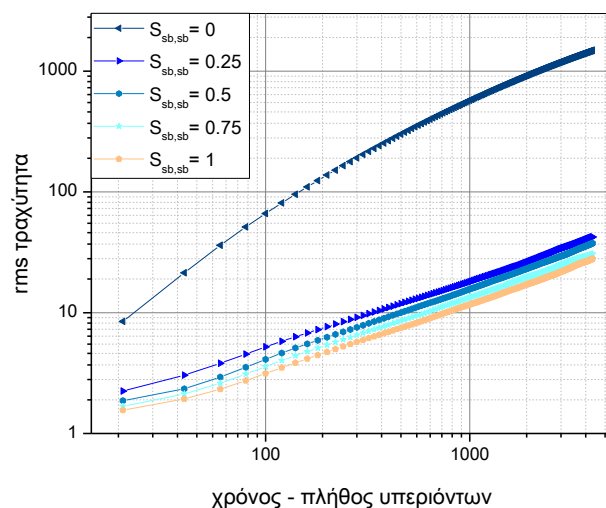
Στο Σχήμα 42α απεικονίζεται το μέσο ύψος της εγχαρασσόμενης επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης, στο Σχήμα 42β φαίνεται ο ρυθμός εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου όπως προκύπτει από την παραγωγή του μέσου ύψους στο Σχήμα 42α. Σε κάθε περίπτωση, το μέσο ύψος της εγχαρασσόμενης επιφάνειας μειώνεται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει του χρόνου. Όσον αφορά μάλιστα την περίπτωση όπου δεν υπάρχει επαναπόθεση ($S_{sb,sb}=0$), το μέσο ύψος της εγχαρασσόμενης επιφάνειας είναι πολύ μικρότερο και η ευθεία που το αναπαριστά συναρτήσει του χρόνου έχει μεγάλη (αρνητική) κλίση. Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις, η κλίση της ευθείας είναι σημαντικά μικρότερη και παρόμοια μεταξύ τους. Όπως είναι επόμενο δεδομένου ότι οι γραφικές παραστάσεις είναι ευθείες με κάποια κλίση, στο Σχήμα 42β όπου απεικονίζονται οι χρονικοί τους

παράγωγοι, προκύπτουν ευθείες με σταθερή τιμή και μηδενική κλίση (παράλληλες στον άξονα του χρόνου).

Στα Σχήματα 43α και 43β απεικονίζεται η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης. Όπως παρατηρείται από αυτά, η rms τραχύτητα αυξάνεται με τη μείωση της πιθανότητας προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$. Η περίπτωση όπου η επαναπόθεση απουσιάζει ($S_{sb, sb}=0$) είναι εκείνη με τις μεγαλύτερες τιμές rms τραχύτητας, αλλά επίσης και η ίδια που παρουσιάζει την μεγαλύτερη (αρνητική) κλίση του μέσου ύψους εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου.



(α)

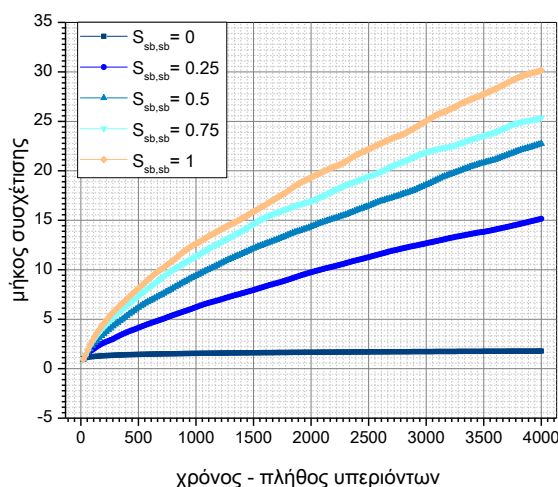


(β)

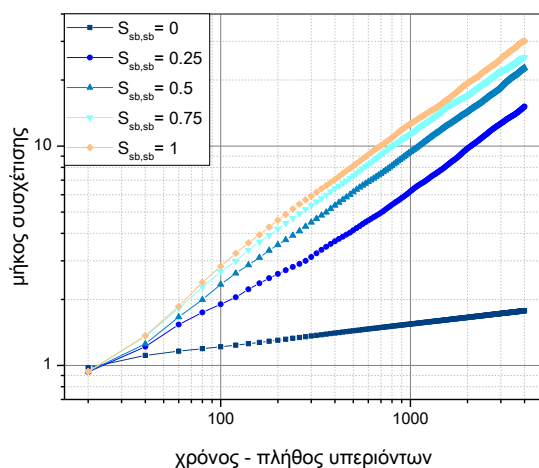
Σχήμα 43: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i, sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).

Στα Σχήματα 44α και 44β φαίνεται το μήκος συσχέτισης, ξ , σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα, συναρτήσει του χρόνου. Από τα διαγράμματα αυτά, συμπεραίνουμε ότι η επιφάνεια της περίπτωσης χωρίς επαναπόθεση ($S_{sb, sb}=0$) εμφανίζει το μικρότερο μήκος συσχέτισης ξ συναρτήσει του χρόνου και συνεπώς, είναι η περισσότερο οδοντωτή.

Οι υπόλοιπες τέσσερις εμφανίζουν μήκη συσχέτισης, τα οποία αυξανόμενης της πιθανότητας προσκόλλησης $S_{sb, sb}$ παρουσιάζουν αύξηση.



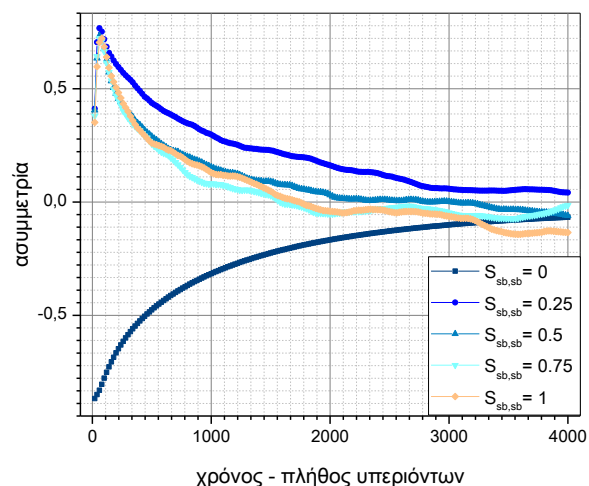
(α)



(β)

Σχήμα 44: Το μήκος συσχέτισης συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i, sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).

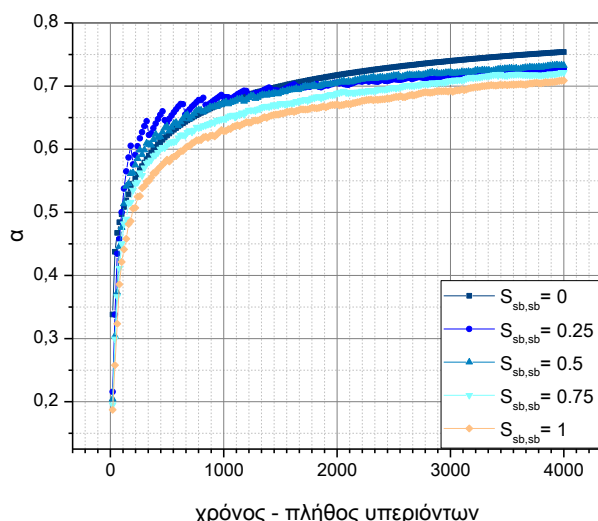
Στο Σχήμα 45, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της ασυμμετρίας. Από τα διαγράμματα αυτά, φαίνεται ότι στις περιπτώσεις που περιλαμβάνουν επαναπόθεση οι καμπύλες που προκύπτουν είναι παρόμοιες και όσο περνάει ο χρόνος φθίνουν, ενώ στην περίπτωση που δεν υπάρχει το φαινόμενο της επαναπόθεσης, η ασυμμετρία λαμβάνει σε κάθε χρονική στιγμή αρνητικές τιμές, με την καμπύλη της να είναι σχεδόν αντισυμμετρική των υπολοίπων ως προς τον άξονα του χρόνου. Φαίνεται ότι στις περιπτώσεις όπου έχουμε επαναπόθεση σχηματίζονται λόφοι στην επιφάνεια, ενώ στην περίπτωση όπου δεν έχουμε σχηματίζονται οπές (βλέπε Σχήμα 41).



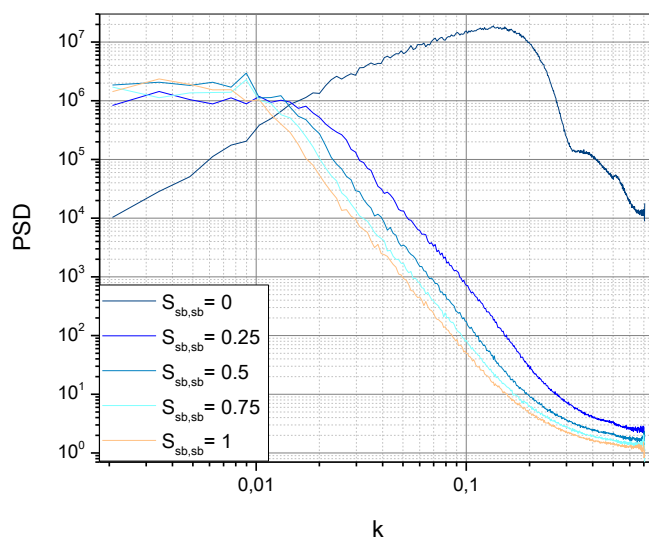
Σχήμα 45: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb, sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i, sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).

Στο Σχήμα 46, απεικονίζεται ο εκθέτης τραχύτητας, α . Παρατηρείται γενικά ότι καθώς ο συντελεστής προσκόλλησης $S_{sb, sb}$ αυξάνει, ο εκθέτης τραχύτητας ελαφρώς μειώνεται. Τα λοιπά γνωρίσματα των καμπυλών είναι παρόμοια και μάλιστα, λαμβάνουν κοντινές τιμές μεταξύ τους για δεδομένη χρονική στιγμή. Σε κάθε περίπτωση αυξάνει με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που φανερώνει την απόκτηση ηπιότερων τοπικών διακυμάνσεων στο ανάγλυφο καθώς η διαδικασία της εγχάραξης εξελίσσεται.

Τέλος, στο σχήμα 47 φαίνεται η φασματική πυκνότητα ισχύος (power spectral density) εγχαρασσόμενων επιφανειών στην ίδια χρονική στιγμή: Το ίδιο πλήθος ιόντων έχει βομβαρδίσει όλες τις επιφάνειες (πλήθος υπερϊόντων $\sim 1.05 \cdot 10^9$). Παρατηρείται ότι οι τέσσερις περιπτώσεις προσομοιώσεων με επαναπόθεση έχουν παρόμοια μορφολογία και δεν διαθέτουν ευδιάκριτες κορυφές, οπότε συμπεραίνεται ότι κυριαρχεί απεριοδικότητα στο ανάγλυφο των εγχαρασσόμενων επιφανειών. Στην περίπτωση χωρίς επαναπόθεση ($S_{sb, sb} = 0$), η καμπύλη είναι αρκετά διαφορετικής μορφολογίας και εμφανίζει μέγιστο σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, οπότε έχει και κάποιου είδους περιοδικότητα.



Σχήμα 46: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb,sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i,sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1).



Σχήμα 47: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών για πλήθος υπερ-ιόντων $\sim 1.05 \cdot 10^9$ για διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, $S_{sb,sb}$ (0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Ο συντελεστής προσκόλλησης ιόντων ($S_{i,sub}$) είναι $\cos\theta$ (θ η γωνία πρόσπτωσης των ιόντων) και το X_d είναι 0 (runs 014-018 του Πίνακα 1)

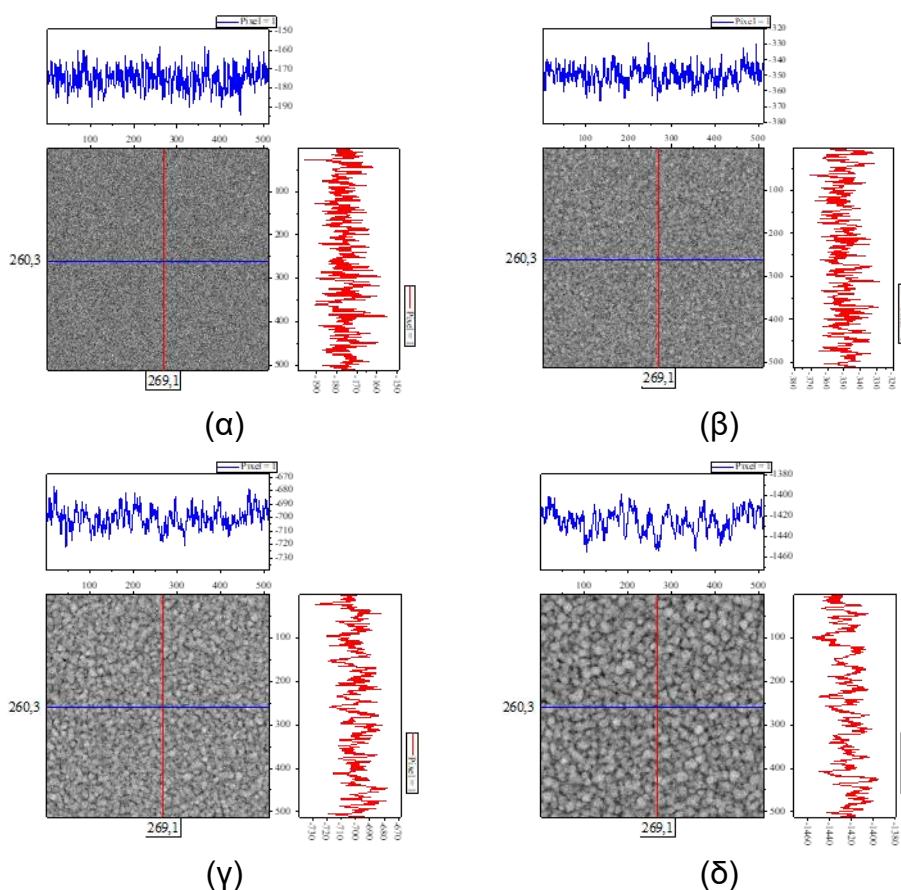
3.4 Σειριακή επαναλαμβανόμενη ακολουθία εγχάραξης και απόθεσης

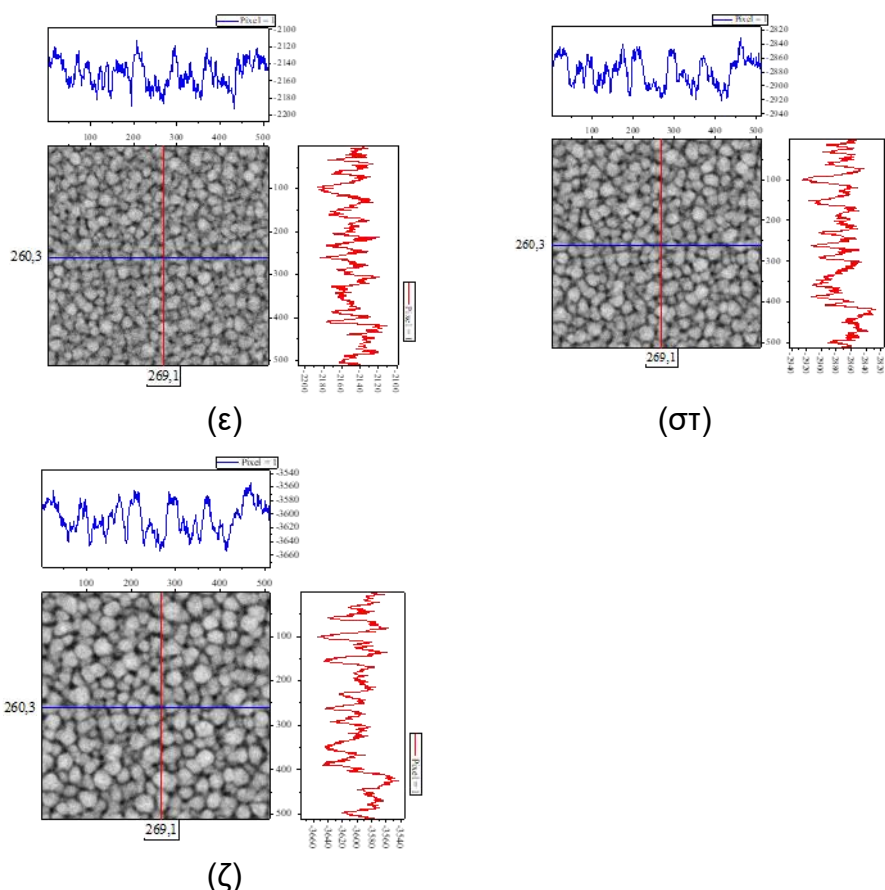
3.4.1 Η επίδραση του πλήθους των κύκλων εγχάραξης - απόθεσης

Η επόμενη ομάδα προσομοιώσεων (runs 019 - 025 του Πίνακα 1) αναφέρεται στη σειριακή ακολουθία βημάτων εγχάραξης και απόθεσης παρεμποδιστών από την αέρια φάση. Στο βήμα εγχάραξης μόνο ιόντα βομβαρδίζουν την επιφάνεια και στο βήμα απόθεσης μόνο παρεμποδιστές από την αέρια φάση φτάνουν στην επιφάνεια. Σε κάθε προσομοίωση το ίδιο πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών φτάνουν στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια. Η διαφορά στις προσομοιώσεις είναι το πλήθος των κύκλων εγχάραξης –

απόθεσης που ξεκινά από 1 και καταλήγει στους 32 κύκλους. Πιο συγκεκριμένα το κλάσμα των παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι 0.05 και το κλάσμα των ιόντων είναι 0.95 σε κάθε περίπτωση. Έτσι, για παράδειγμα, αν στην επιφάνεια πέφτουν συνολικά 200 σωματίδια τα 190 θα είναι ιόντα και τα 10 θα είναι παρεμποδιστές. Αν συμβαίνει ένα κυκλος απόθεσης – εγχάραξης, τότε στο πρώτο βήμα θα φτάσουν στην επιφάνεια 10 παρεμποδιστές και στο δεύτερο 190 ιόντα. Αν συμβαίνουν δύο κύκλοι απόθεσης-εγχάραξης, τότε θα στο πρώτο βήμα του πρώτου κύκλου θα φτάσουν στην επιφάνεια 5 παρεμποδοστές, στο δεύτερο βήμα του πρώτου κύκλου 95 ιόντα, στο πρώτο βήμα του δεύτερου κύκλου 5 παρεμποδιστές και στο δεύτερο βήμα του δεύτερου κύκλου 95 ιόντα. Για λόγους σύγκρισης, στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων συμπεριλαμβάνεται και η περίπτωση ταυτόχρονης εγχάραξης και απόθεσης παρεμποδιστών από την αέρια φάση. Επίσης διερευνάται η επίδραση της σειράς των βημάτων σε ένα κύκλο: Σημειώνεται ότι στο run 023 η αρχή γίνεται με εγχάραξη (*E-Etching*), σε αντίθεση με όλες τις άλλες περιπτώσεις όπου γίνεται με απόθεση (*D-Deposition*). Επίσης, η πιθανότητα προσκόλλησης των ιόντων και των παρεμποδιστών είναι 1 και η επαναπόθεση θεωρείται αμελητέα.

Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων, παρουσιάζονται συνοπτικά στα ακόλουθα Σχήμα (48 έως 55), ενώ στο παράρτημα Ε υπάρχουν γραφήματα για καθεμία από τις οκτώ περιπτώσεις ξεχωριστά. Κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει και μία διαφορετική περίπτωση από τις οκτώ που αναφέρονται παραπάνω στον Πίνακα 1.

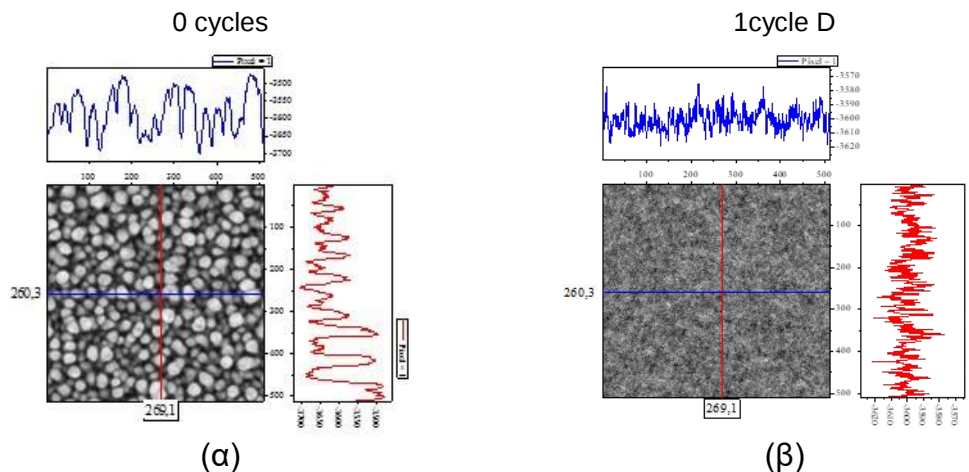


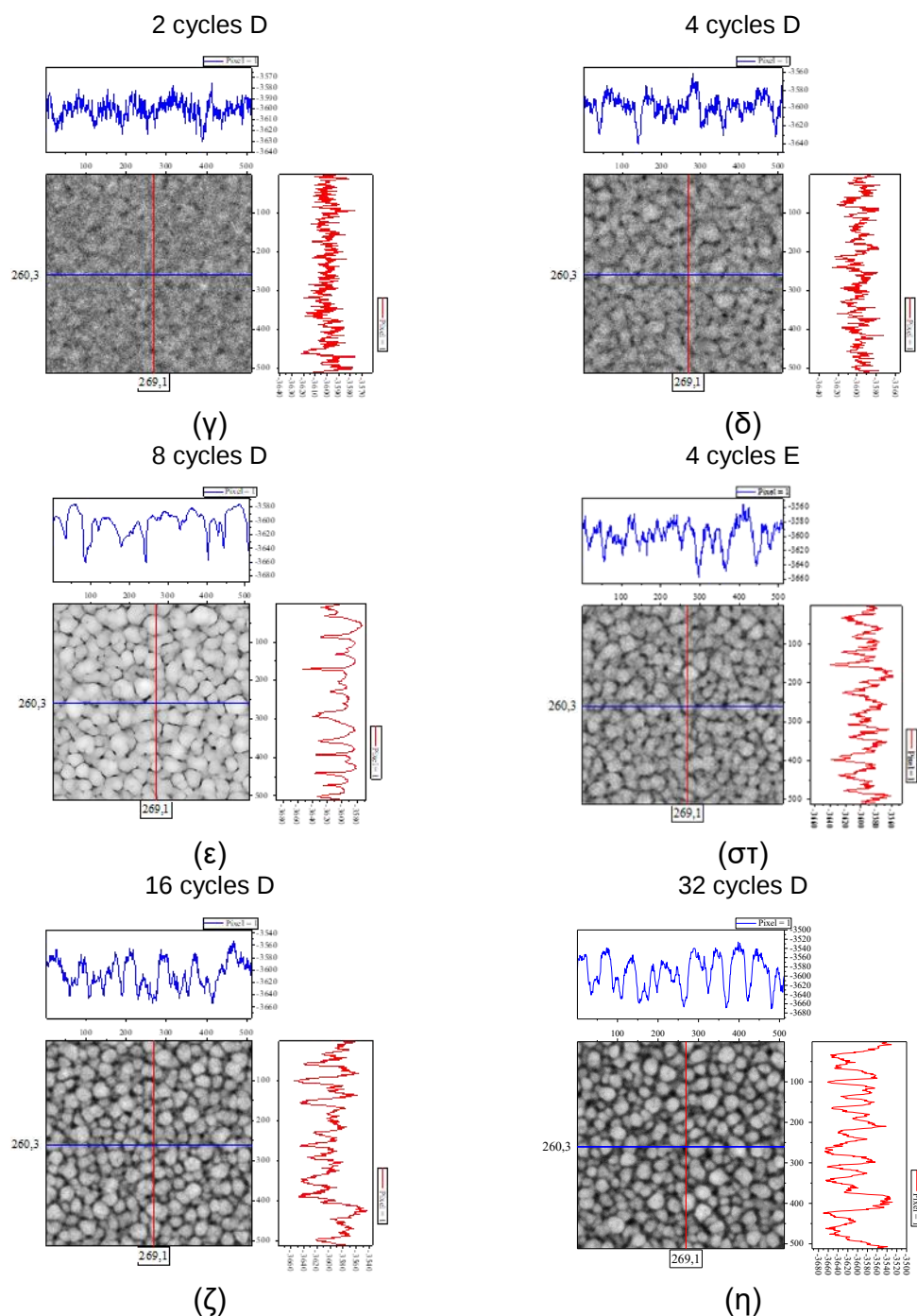


Σχήμα 48: Κατόψεις της εγχαρασσόμενης επιφάνειας κατά τη διάρκεια κύκλων απόθεσης – εγχάραξης μετά από πρόσπτωση α) $4.9 \cdot 10^7$, β) $9.8 \cdot 10^7$, γ) $1.96 \cdot 10^8$, δ) $3.96 \cdot 10^8$, ε) $5.96 \cdot 10^8$, στ) $7.96 \cdot 10^8$ και ζ) $9.96 \cdot 10^8$ υπερ-ιόντων. Η τελευταία κάτοψη αντιστοιχεί στο τέλος 16 κύκλων απόθεσης – εγχάραξης. Το πρώτο βήμα κάθε κύκλου είναι απόθεση.

Στο Σχήμα 48, φαίνονται επτά διαφορετικά στιγμιότυπα της εγχαρασσόμενης επιφάνειας σε κάτοψη. Από αυτά τα στιγμιότυπα, εύκολα συμπεραίνεται ότι με την πάροδο του χρόνου σχηματίζονται λόφοι στην επιφάνεια των οποίων το ύψος και το πλάτος σταδιακά μεγαλώνει.

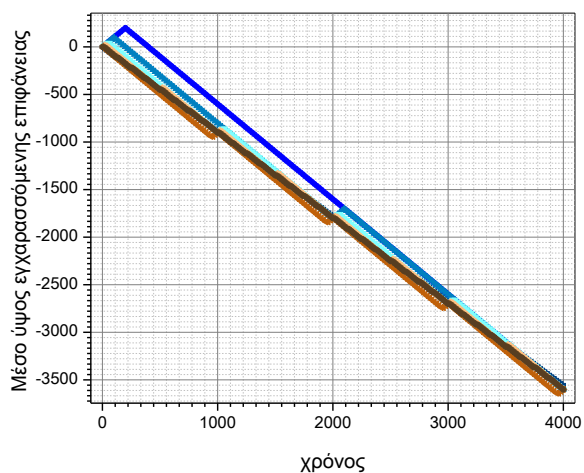
Στο Σχήμα 49, απεικονίζονται οκτώ στιγμιότυπα κάτοψης επιφανειών που αφορούν την ίδια χρονική στιγμή, το ίδιο πλήθος ιόντων έχει βομβαρδίσει όλες τις επιφάνειες (πλήθος υπερ-ιόντων $\sim 9.96 \cdot 10^8$), για διαφορετικό πλήθος κύκλων εγχάραξης απόθεσης.



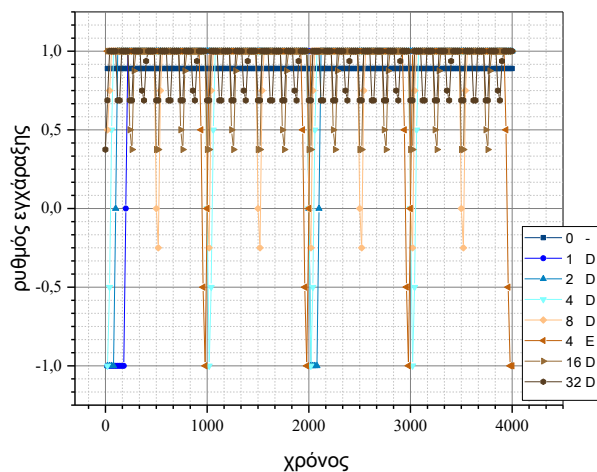


Σχήμα 49: Κάτοψη της εγχαρασσόμενης επιφάνειας όταν φτάνουν στην επιφάνεια $\sim 9.96 \cdot 10^8$ υπερ-ιόντα στο τέλος β) 1 κύκλου, γ) 2, δ) 4, ε) 4 (με πρώτο βήμα εγχάραξης), στ) 8, ζ) 16 και η) 32 κύκλων. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από την (ε) το πρώτο βήμα κάθε κύκλου είναι απόθεση. (runs 019-025 του Πίνακα 1). Στο α) φαίνεται για λόγους σύγκρισης η περίπτωση ταυτόχρονης εγχάραξης – απόθεσης.

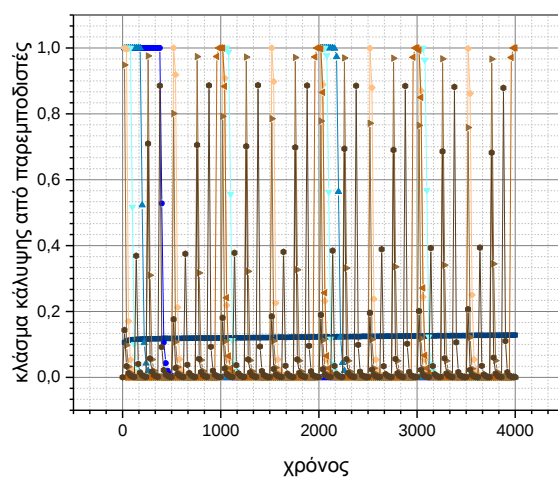
Συγκριτικά αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 50 – 55. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που εξεταστήκαν στην παρούσα εργασία, έτσι και στα ακόλουθα Σχήματα 50 – 55 όλα τα στατιστικά μεγέθη αποτελούν το μέσο όρο πέντε προσομοιώσεων το καθένα.



(α)



(β)



(γ)

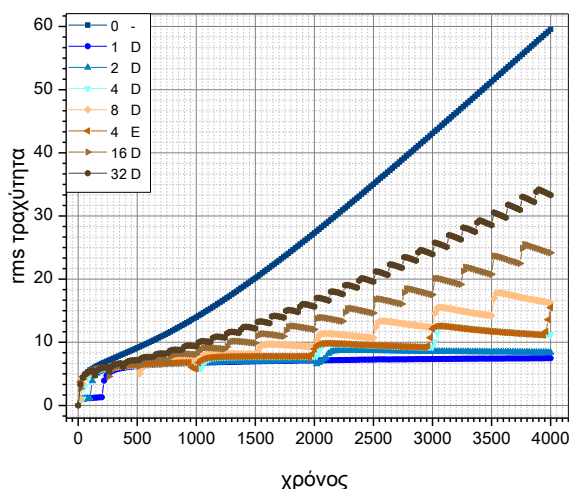
Σχήμα 50: α) Μέσο ύψος εγχαρασσόμενης επιφάνειας, β) ρυθμός εγχάραξης και γ) κλάσμα κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις

περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).

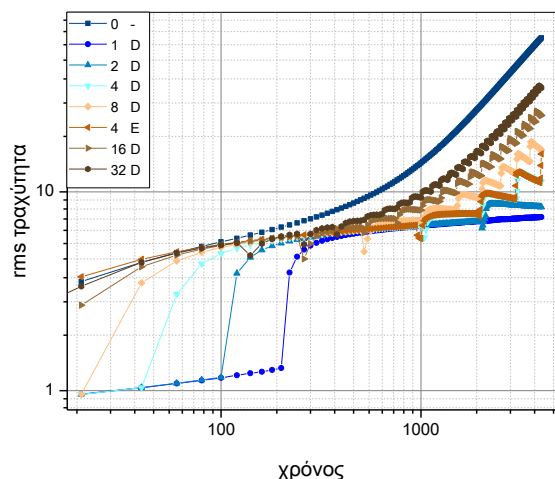
Στο Σχήμα 50α απεικονίζεται το μέσο ύψος της εγχαρασσόμενης επιφάνειας συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης, στο Σχήμα 50β φαίνεται ο ρυθμός εγχάραξης συναρτήσει του χρόνου όπως προκύπτει από την παραγωγή του μέσου ύψους στο Σχήμα 50α και στο Σχήμα 50γ φαίνεται το κλάσμα κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές συναρτήσει του χρόνου. Σε κάθε περίπτωση, το μέσο ύψος της εγχαρασσόμενης επιφάνειας μειώνεται με γραμμικό τρόπο, ωστόσο αυτή η πορεία διακόπτεται από μικρά τοπικά «ανεβάσματα» της καμπύλης, με αποτέλεσμα κάθεμία από τις γραφικές παραστάσεις να αποκτά μορφή «σκάλας» (ζιγκ-ζαγκ). Τα πιο επιμήκη ευθύγραμμα τμήματα των καμπυλών αυτών αντιστοιχούν στα διαστήματα που πραγματοποιείται εγχάραξη, οπότε και το μέσο βάθος αυξάνει γραμμικά (το ύψος γίνεται αρνητικότερο), ενώ τα πιο βραχεία «ανεβάσματα» των καμπυλών αντιστοιχούν στις χρονικές περιόδους της απόθεσης. Έτσι, η ύπαρξη ανοδικών και καθοδικών τμημάτων στην καμπύλη του μέσου ύψους, οδηγεί στην ύπαρξη θετικών και αρνητικών τμημάτων αντίστοιχα στην καμπύλη της πρώτης παραγώγου του που απεικονίζεται στο Σχήμα 50β, το οποίο παίρνει μια περιοδική «οδοντωτή» μορφή, διαφορετική για κάθε περίπτωση.

Αντίστοιχη πορεία ακολουθούν και οι γραφικές παραστάσεις στο Σχήμα 50γ όπου φαίνονται να εναλλάσσονται στιγμές πλήρους κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές (μετά από κάθε βήμα απόθεσης) με στιγμές μερικής κάλυψης (ύστερα από κάθε βήμα εγχάραξης). Ακόμα, σημειώνεται ότι στα Σχήματα 50α, 50β και 50γ, υπάρχει και η περίπτωση της ταυτόχρονης εγχάραξης και απόθεσης για σύγκριση. Σε αυτήν την περίπτωση, στο Σχήμα 50α το γράφημα είναι μία συνεχής ευθεία με αρνητική κλίση, στο Σχήμα 50β λαμβάνει μία σταθερή τιμή (ίση με την κλίση) και στο Σχήμα 50γ η εναλλαγή ανοδικής και καθοδικής πορείας απουσιάζει.

Στα Σχήματα 51α και 51β απεικονίζεται η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου εγχάραξης. Η rms τραχύτητα αυξάνει συναρτήσει του χρόνου, όμως με εναλλαγές λόγω των βημάτων απόθεσης (ανεβαίνει μόνο κατά τη διάρκεια της απόθεσης και μειώνεται κατά τη διάρκεια της εγχάραξης). Όσο το πλήθος των κύκλων εγχάραξης – απόθεσης αυξάνεται, η rms τραχύτητα αυξάνεται επίσης. Οι τιμές της rms τραχύτητας που υπολογίζονται δεν ξεπερνούν τις τιμές στην περίπτωση ταυτόχρονης εγχάραξης – απόθεσης.



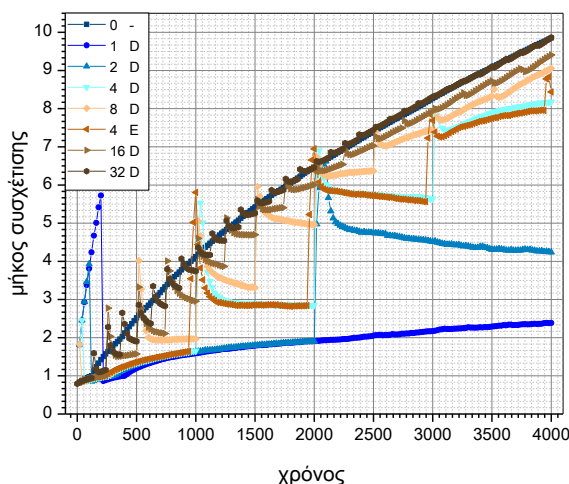
(α)



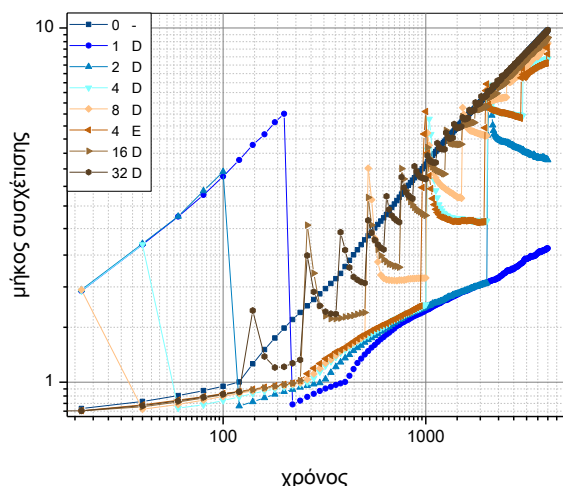
(β)

Σχήμα 51: Η rms τραχύτητα συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα, για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).

Στα Σχήματα 52α και 52β απεικονίζεται το μήκος συσχέτισης, ξ , σε γραμμική και λογαριθμική κλίμακα αντίστοιχα, συναρτήσει του χρόνου. Από τα διαγράμματα αυτά, συμπεραίνουμε ότι οι επιφάνειες που υπόκεινται σε εναλλαγές απόθεσης - εγχάραξης παρουσιάζουν τμήματα που βρίσκονται άνω και κάτω της καμπύλης που αφορά την ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, ενώ όσο το πλήθος των εναλλαγών αυτών (δηλαδή το πλήθος των κύκλων) αυξάνει, τείνει να αποκτηθεί η συμπεριφορά της περίπτωσης χωρίς εναλλαγές. Αυτό γενικά, είναι αναμενόμενο καθώς όσο το πλήθος εναλλαγών αυξάνει, τόσο πλησιάζουν χρονικά οι στιγμές εγχάραξης και εναπόθεσης και τείνουν έτσι στην ταυτόχρονη διενέργεια των δύο αυτών διαδικασιών.

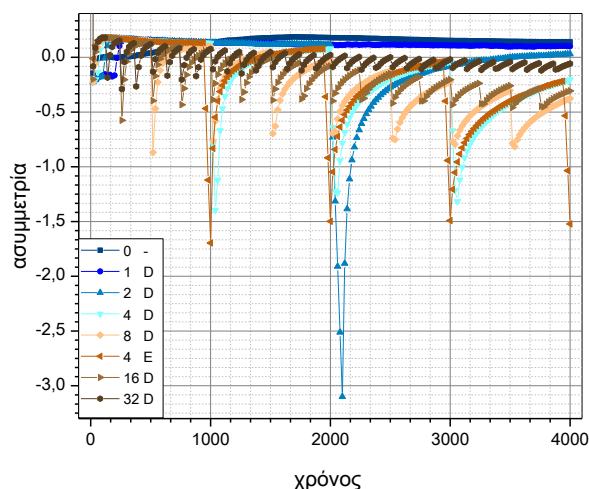


(α)



(β)

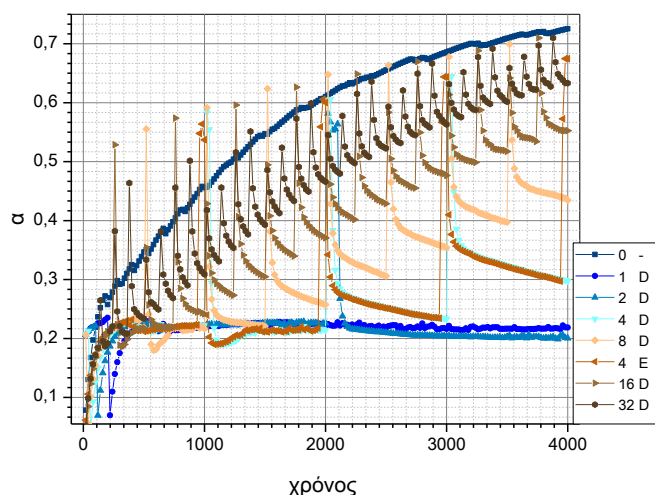
Σχήμα 52: Το μήκος συσχέτισης συναρτήσει του χρόνου σε α) γραμμική κλίμακα και β) λογαριθμική κλίμακα για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).



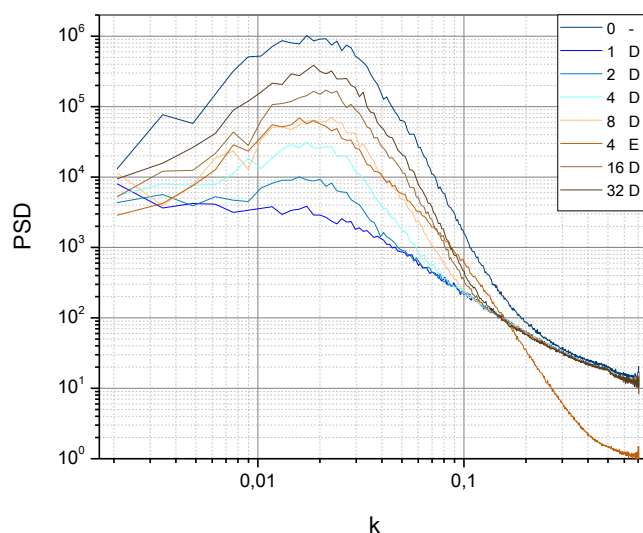
Σχήμα 53: Η ασυμμετρία συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).

Στο Σχήμα 53, παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της ασυμμετρίας. Από τα διαγράμματα αυτά, προκύπτει και πάλι ότι στις γραφικές παραστάσεις οι εναλλαγές απόθεσης –εγχάραξης δημιουργούν απότομες ασυνέχειες, οι οποίες γίνονται ηπιότερες καθώς το πλήθος των κύκλων αυξάνει και τείνουν τότε προς την καμπύλη της ταυτόχρονης εγχάραξης-απόθεσης.

Αντίστοιχη συμπεριφορά, παρατηρείται επίσης και στο Σχήμα 54, όπου απεικονίζεται ο εκθέτης τραχύτητας α .



Σχήμα 54: Ο εκθέτης τραχύτητας συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση (runs 019-025 του Πίνακα 1).



Σχήμα 55: Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών όταν το πλήθος των προσπίπτοντων υπεριόντων είναι $\sim 9.96 \cdot 10^8$ για διαφορετικό πλήθος κύκλων απόθεσης –εγχάραξης (ταυτόχρονη εγχάραξη-απόθεση, 1 κύκλος, 2, 4, 8, 16, 32 κύκλοι). Το συνολικό πλήθος ιόντων και παρεμποδιστών από την αέρια φάση είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από μία (4 E) το πρώτο βήμα του κάθε κύκλου είναι απόθεση.

Τέλος, στο Σχήμα 55 απεικονίζεται η φασματική πυκνότητα ισχύος (power spectral density) εγχαρασσόμενων επιφανειών στην ίδια χρονική στιγμή: Το ίδιο πλήθος ιόντων έχει βομβαρδίσει όλες τις επιφάνειες (πλήθος υπεριόντων $\sim 9.96 \cdot 10^8$). Παρατηρείται ότι την πιο ευδιάκριτη κορυφή διαθέτει το διάγραμμα ταυτόχρονης εγχάραξης-εναπόθεσης, ενώ καθώς το πλήθος των εναλλαγών εγχάραξης-εναπόθεσης φθίνει, τόσο η κορυφή αυτή γίνεται λιγότερο έντονη. Συνεπώς, όσο το πλήθος των εναλλαγών εγχάραξης-εναπόθεσης φθίνει, η περιοδικότητα των επιφανειών χάνεται. Την μέγιστη περιοδικότητα, δείχνει το διάγραμμα που αφορά την ταυτόχρονη διεκπεραίωση εγχάραξης και εναπόθεσης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν διεργασίες εγχάραξης υποστρωμάτων στις οποίες μπορεί να συμβεί και απόθεση παρεμποδιστών εγχάραξης. Η μελέτη υλοποιήθηκε μέσω ενός υπολογιστικού πλαισίου Monte Carlo που προσομοιώνει την εξέλιξη της μορφολογίας των εγχαρασσόμενων επιφανειών. Ο στόχος της μελέτης ήταν η διερεύνηση της επίδρασης των παρεμποδιστών εγχάραξης. Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, η εγχάραξη είναι οδηγούμενη από ιόντα (υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη ή ιονοβολή). Σημειώνεται ότι όλα τα στατιστικά μεγέθη που περιγράφουν την αναπτυσσόμενη τραχύτητα προέκυψαν ως ο μέσος όρος πέντε προσομοιώσεων.

Η πρώτη διεργασία που μελετήθηκε είναι η ταυτόχρονη εγχάραξη και απόθεση. Η απόθεση οφείλεται στους παρεμποδιστές εγχάραξης που μπορεί να παράγονται είτε στον κύριο όγκο του αντιδραστήρα πλάσματος είτε στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια (προϊόντα εγχάραξης). Μελετήθηκε η επίδραση του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών καθώς και της επιλεκτικότητας εγχάραξης στην τραχύτητα που αναπτύσσεται στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια σε καθεμία από τις δύο περιπτώσεις προέλευσης των παρεμποδιστών.

Η δεύτερη διεργασία που μελετήθηκε είναι η σειριακή επαναλαμβανόμενη ακολουθία εγχάραξης και απόθεσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση μελετήθηκε η επίδραση της επιλεκτικότητας εγχάραξης (υποστρώματος προς παρεμποδιστές) και του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών που προέρχονται από την αέρια φάση στην τραχύτητα που αναπτύσσεται στην επιφάνεια όταν τα βήματα εγχάραξης και απόθεσης γίνονται σειριακά εναλλάξ.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις είναι τα ακόλουθα:

A) Ταυτόχρονη εγχάραξη – απόθεση με παρεμποδιστές εγχάραξης από τον κύριο όγκο. Στην πρώτη ομάδα προσομοιώσεων μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών, S_d , όταν ταυτόχρονα μεταβάλλεται και το κλάσμα των παρεμποδιστών στην προσπίπτουσα ροή, X_d . Το γινόμενο $X_d S_d$ ήταν σταθερό. Η πιθανότητα προσκόλλησης των ιόντων ήταν 1 και η επαναπόθεση προϊόντων εγχάραξης (παρεμποδιστών από την επιφάνεια) θεωρήθηκε αμελητέα. Προέκυψε ότι:

- Η ασυμμετρία (skewness) για $S_d < 0.7$ λαμβάνει αρνητικές τιμές δηλαδή στο ανάγλυφο των αντίστοιχων εγχαρασσόμενων επιφανειών παρουσιάζονται περισσότερες οπές, ενώ για $S_d > 0.7$ στο ανάγλυφο των επιφανειών η ασυμμετρία λαμβάνει θετικές τιμές (εμφανίζονται λόφοι).
- Το κλάσμα κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές με την πάροδο του χρόνου σχεδόν σταθεροποιείται σε κάθε περίπτωση, με την τιμή του να ελαττώνεται καθώς αυξάνεται ο S_d , αφού όπως προαναφέρθηκε, ταυτόχρονα ελαττώνεται το κλάσμα X_d .
- Η rms τραχύτητα όπως και το μήκος συσχέτισης, ξ , αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, τα δύο αυτά μεγέθη μειώνονται με τη μείωση του S_d .
- Τα διαγράμματα της φασματικής πυκνότητας ισχύος έχουν την ίδια περίπου κορυφή, οπότε οι επιφάνειες αυτές παρουσιάζουν περιοδικότητα με περίπου την ίδια περίοδο. Σημειώνεται ότι η κορυφή στα διαγράμματα φασματικής πυκνότητας ισχύος δεν είναι σημειακή, έχει πάχος, συνεπώς δεν αφορά μία μόνο περίοδο αλλά δείχνει προτίμηση σε κάποια περίοδο.

Β) Ταυτόχρονη εγχάραξη – απόθεση με παρεμποδιστές εγχάραξης από τον κύριο όγκο. Στην δεύτερη ομάδα προσομοιώσεων μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής της επιλεκτικότητας εγχάραξης, seI_{d-sb} όταν ταυτόχρονα μεταβάλλεται το κλάσμα X_d . Ο λόγος X_d / seI_{d-sb} ήταν σταθερός. Η πιθανότητα προσκόλλησης των ιόντων και των παρεμποδιστών ήταν 1 και η επαναπόθεση προϊόντων εγχάραξης (παρεμποδιστών από την επιφάνεια) θεωρήθηκε αμελητέα. Παρατηρήθηκε ότι:

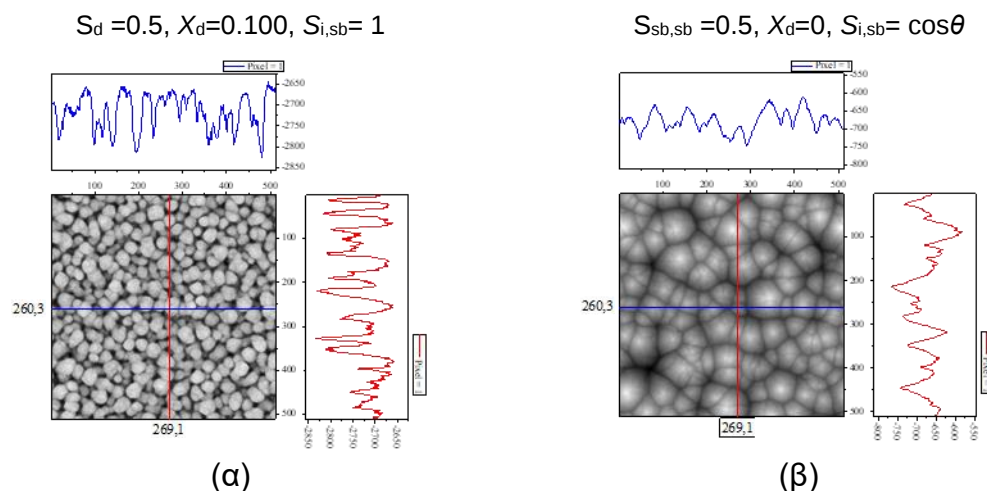
- Η ασυμμετρία λαμβάνει θετικές τιμές, οπότε δημιουργούνται λόφοι (τελείες) στο ανάγλυφο της εγχαρασσόμενης επιφάνειας.
- Το κλάσμα κάλυψης της επιφάνειας είναι σταθερό και ίσο με ~ 0.12 , οπότε η επίδραση της μείωσης της απόδοσης εγχάραξης των παρεμποδιστών σε αυτό δείχνει να αντισταθμίζεται από την ταυτόχρονη μείωση του κλάσματος των παρεμποδιστών.
- Η rms τραχύτητα και το μήκος συσχέτισης, με την πάροδο του χρόνου εμφανίζουν έντονη αύξηση, ενώ μένουν ανεπηρέαστα από τη μείωση της απόδοσης εγχάραξης των παρεμποδιστών (ταυτόχρονα μειώνεται και το κλάσμα τους).
- Τα διαγράμματα φασματικής πυκνότητας ισχύος έχουν την ίδια περίπου κορυφή (έχουν δηλαδή προτίμηση στην ίδια περίοδο).

Γ) Ταυτόχρονη εγχάραξη – απόθεση με παρεμποδιστές εγχάραξης από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια (προϊόντα εγχάραξης). Στην τρίτη και τέταρτη ομάδα προσομοιώσεων, μελετήθηκε ο ρόλος της επαναπόθεσης παρεμποδιστών μόνο από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια. Θεωρήθηκε ότι δεν υπάρχουν παρεμποδιστές από τον κύριο όγκο. Παρατηρήθηκε ότι:

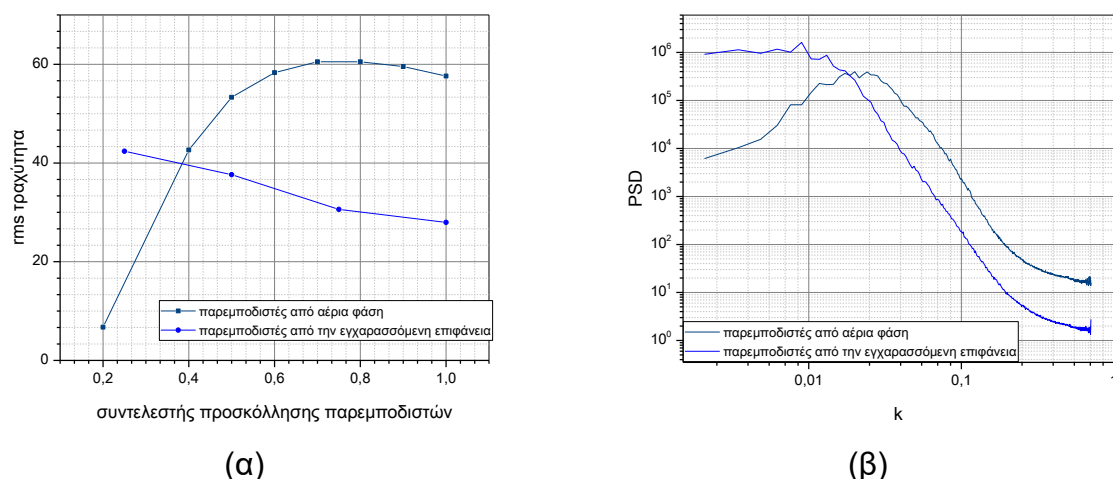
- Μόνο όταν συμβαίνει επανεκπομπή (ανάκλαση) των προσπίπτοντων ιόντων στην επιφάνεια, η επαναπόθεση των παρεμποδιστών οδηγεί στη δημιουργία τραχύτητας με αξιόλογες τιμές rms. Μάλιστα η μορφολογία της επιφάνειας όταν έχουμε επαναπόθεση είναι λοφώδης (ασυμμετρία θετική) ενώ όταν δεν συμβαίνει επαναπόθεση, σχηματίζεται μία επιφάνεια με οπές και υψηλό rms.
- Όταν συμβαίνει επαναπόθεση δεν έχουμε κορυφές στο διάγραμμα της φασματικής πυκνότητας ισχύος, συνεπώς δεν έχουμε περιοδικότητα.
- Η μείωση του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια, $S_{sb, sb}$, αυξάνει την rms τραχύτητα και μειώνει το μήκος συσχέτισης, ξ .

Δ) Σύγκριση αποτελεσμάτων στην ταυτόχρονη εγχάραξη – απόθεση για τα δύο διαφορετικά είδη παρεμποδιστών. Στο Σχήμα 56 φαίνονται χαρακτηριστικές κατόψεις επιφανειών και στο Σχήμα 57 η rms τραχύτητα και τα διαγράμματα φασματικής πυκνότητας ισχύος για τα δύο είδη παρεμποδιστών. Τα συμπεράσματα της σύγκρισης συνοψίζονται παρακάτω:

- Λόφοι σχηματίζονται στην επιφάνεια και στις δύο πηγές παρεμποδιστών (Σχήμα 56)
- Περιοδικότητα υπάρχει μόνο για παρεμποδιστές από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα (Σχήμα 57β).
- Καθώς ο συντελεστής προσκόλλησης αυξάνεται, η rms τραχύτητα λόγω των παρεμποδιστών που προέρχονται από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα (αέρια φάση) αυξάνεται, ενώ η rms τραχύτητα των παρεμποδιστών από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια μειώνεται (Σχήμα 57α).



Σχήμα 56: Κάτοψη εγχαρασσόμενης επιφάνειας σε περιπτώσεις παρεμποδιστών που προέρχονται α) από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα και β) από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια.

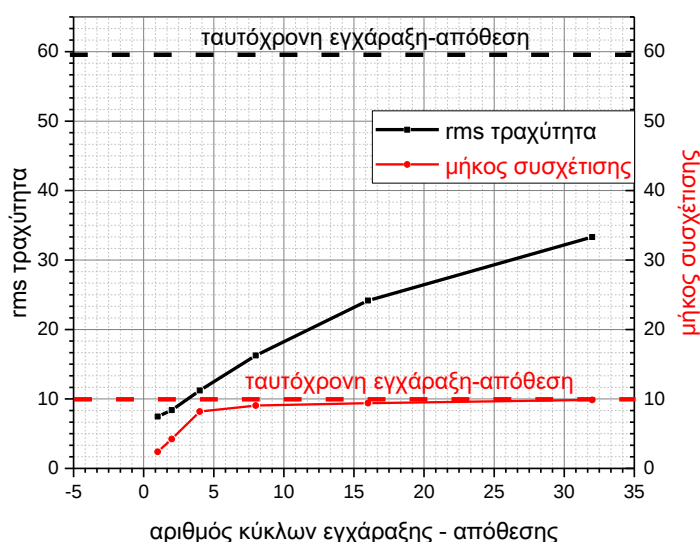


Σχήμα 57: α) rms τραχύτητα συναρτήσει του συντελεστή προσκόλλησης παρεμποδιστών στις περιπτώσεις παρεμποδιστών που προέρχονται είτε από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα (αέρια φάση) είτε από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια. Στο διάγραμμα έχει παραληφθεί η τιμή της rms τραχύτητας που αντιστοιχεί στη διαδικασία εγχάραξης χωρίς παρεμποδιστές που προέρχονται από την επιφάνεια, δηλαδή όπου $S_{sb,sb} = 0$ (run 014 του Πίνακα 1). β) Φασματική πυκνότητα ισχύος εγχαρασσόμενων επιφανειών σε περιπτώσεις παρεμποδιστών που προέρχονται είτε από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα (αέρια φάση) είτε από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια.

- Αν οι παρεμποδιστές τόσο από τον κύριο όγκο όσο και από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια είχαν τον ίδιο συντελεστή προσκόλλησης, σε μικρές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης, η rms τραχύτητα διαμορφώνεται κυρίως από τους παρεμποδιστές από την επιφάνεια, ενώ σε μεγαλύτερες τιμές κυρίαρχο ρόλο έχουν οι παρεμποδιστές που προέρχονται από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα.

Ε) Σειριακή εγχάραξη – απόθεση. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις της σειριακής επαναλαμβανόμενης ακολουθίας εγχάραξης και απόθεσης, σχετικά με την επίδραση του πλήθους των κύκλων εγχάραξης – απόθεσης είναι:

- Εναλλάσσονται περίοδοι πλήρους κάλυψης της επιφάνειας από παρεμποδιστές (μετά από κάθε βήμα απόθεσης) με περιόδους μερικής και καθόλου κάλυψης (ύστερα από κάθε βήμα εγχάραξης).
- Τα βήματα απόθεσης αυξάνουν την rms τραχύτητα ενώ τα βήματα εγχάραξης τη μειώνουν.
- Τα βήματα απόθεσης αυξάνουν το μήκος συσχέτισης. Τα βήματα εγχάραξης μπορεί να μειώνουν ή να αυξάνουν το μήκος συσχέτισης ανάλογα με τη συχνότητα των βημάτων.
- Όσο το πλήθος των κύκλων εγχάραξης - απόθεσης μεγαλώνει, το μήκος συσχέτισης πλησιάζει ασυμπτωτικά τις τιμές της περίπτωσης ταυτόχρονης εγχάραξης – απόθεσης, τις οποίες μάλιστα προσεγγίζει ικανοποιητικά ακόμα και για μικρό πλήθος κύκλων (Σχήμα 58).
- Η rms τραχύτητα επίσης τείνει προς εκείνη της ταυτόχρονης διαδικασίας εγχάραξης – απόθεσης καθώς το πλήθος κύκλων αυξάνει, ωστόσο απαιτείται πολύ μεγαλύτερο πλήθος κύκλων για ικανοποιητική προσέγγιση.
- Από τα διαγράμματα της φασματικής πυκνότητας ισχύος (Σχήμα 55) φαίνεται ότι όσο το πλήθος των κύκλων εναλλαγών εγχάραξης – απόθεσης φθίνει (η συχνότητα μικραίνει), η κορυφή και άρα η περιοδικότητα των επιφανειών χάνεται.

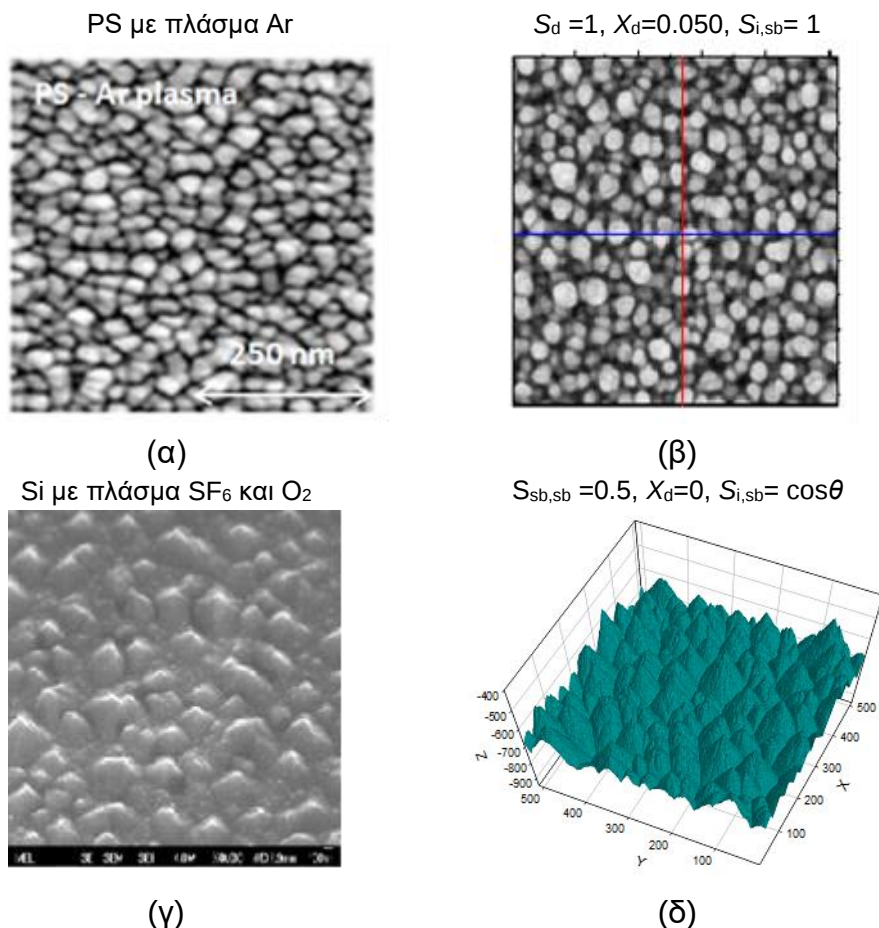


Σχήμα 58: rms τραχύτητα και μήκος συσχέτισης ολοκληρωμένων προσομοιώσεων εγχάραξης συναρτήσει του αριθμού των κύκλων εγχάραξης – απόθεσης τους (με πρώτο βήμα απόθεσης).

ΣΤ) Ποιοτική σύγκριση με μετρήσεις. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίνονται ποιοτικά με πειραματικά αποτελέσματα που αφορούν σε επιφάνειες α) Πολυστυρενίου (Polystyrene, PS) έπειτα από εγχάραξη με πλάσμα Ar [27], β) Πυριτίου (Silicon, Si) έπειτα από εγχάραξη σε κρυογενικές συνθήκες με πλάσμα εξαφθοριούχου θείου (sulfur hexafluoride, SF_6) και Οξυγόνου, (Oxygen, O_2) και γ) Πολυμεθακρυλικού μεθυλεστέρα [poly(methyl methacrylate), PMMA] έπειτα από εγχάραξη με πλάσμα O_2 [28].

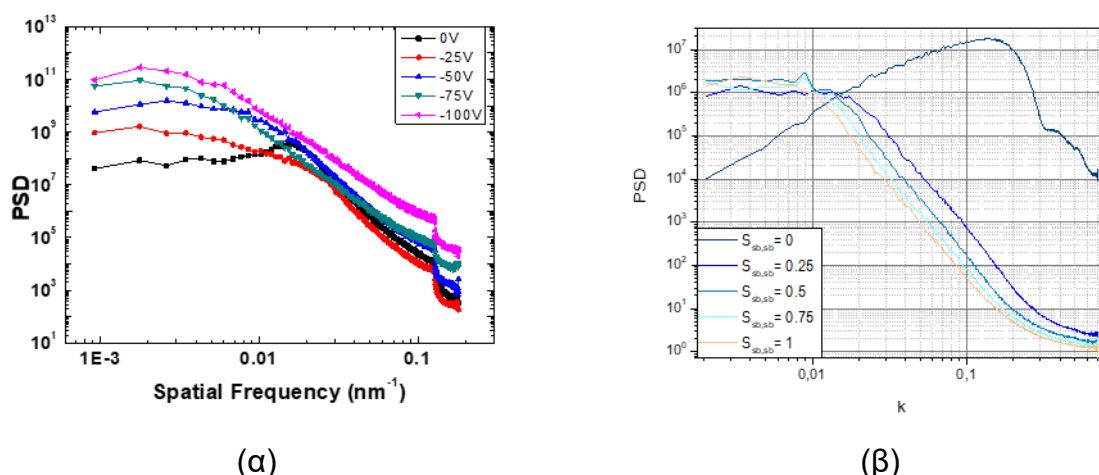
α) Στο Σχήμα 59α φαίνεται εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope, SEM) η οποία φαίνεται να έχει αρκετές ομοιότητες με τις επιφάνειες που προκύπτουν από την προσομοίωση ταυτόχρονης εγχάραξης – απόθεσης (Σχήμα 59β). Αυτό είναι πιθανό να σημαίνει ότι υπάρχουν παρεμποδιστές στον κύριο όγκο του αντιδραστήρα όπου γίνεται η εγχάραξη του PS.

β) Η εγχάραξη Si σε κρυογενικές συνθήκες με πλάσμα SF_6 και O_2 (Σχήμα 59γ - εικόνα SEM) φαίνεται να έχει αρκετές ομοιότητες με τις επιφάνειες που προκύπτουν από την προσομοίωση εγχάραξης παρουσία παρεμποδιστών μόνο από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια (Σχήμα 59δ). Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι υπάρχουν παρεμποδιστές που δημιουργούνται στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια κατά την κρυογενική εγχάραξη. Σε κρυογενικές συνθήκες δεν ευνοείται η δημιουργία κορεσμένων (πτητικών) προϊόντων και έτσι είναι πιθανό αυτά τα μη κορεσμένα προϊόντα να επαναποτεθούν στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια.



Σχήμα 59: α) Εικόνα SEM επιφάνειας PS που εγχαρράσσεται σε Ar πλάσμα [27]. β) Κάτοψη της προσομοιωμένης εγχαρασσόμενης επιφάνειας στο τέλος ταυτόχρονης εγχάραξης – απόθεσης. γ) Εικόνα SEM επιφάνειας Si που εγχαρράσσεται σε κρυογενικές συνθήκες με πλάσμα SF_6 και O_2 [29]. δ) Επιφάνεια που προκύπτει από την προσομοίωση με τους παρεμποδιστές να προέρχονται από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια (runs 001, 017 του Πίνακα 1).

γ) Στο Σχήμα 60α φαίνεται η φασματική πυκνότητα ισχύος για επιφάνειες PMMA που εγχαρράσσονται με πλάσμα O_2 για διαφορετικές τιμές του δυναμικού αυτοπόλωσης του ηλεκτροδίου. Η αύξηση του δυναμικού οδηγεί στην απώλεια της κορυφής και άρα της περιοδικότητας της επιφάνειας. Όσο αυξάνεται το δυναμικό τόσο αυξάνεται και η ενέργεια των ιόντων. Είναι πιθανό η αύξηση της ενέργειας των ιόντων να οδηγεί σε ενίσχυση των μη κορεσμένων προϊόντων και άρα στην ενίσχυση της επαναπόθεσης αυτών. Στο Σχήμα 60β φαίνεται η φασματική πυκνότητα ισχύος για διαφορετικές τιμές παρεμποδιστών προερχόμενων από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια. Φαίνεται ότι περιοδικότητα έχουμε μόνο όταν δεν έχουμε επαναπόθεση παρεμποδιστών. Συγκρίνοντας τα Σχήμα 60α και 60β θα μπορούσε να πει κάποιος ότι η αύξηση του δυναμικού αυτοπόλωσης αυξάνει την ποσότητα των παρεμποδιστών (μη κορεσμένων προϊόντων) που προέρχονται από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια.



Σχήμα 60: Φασματική πυκνότητα ισχύος α) για υμένια PMMA που εγχαρασσονται από πλάσμα O_2 όταν η εφαρμοζόμενη τάση (bias voltage) στο ηλεκτρόδιο παίρνει τιμές από 0 έως 100 V (ο χρόνος εγχάραξης είναι 1 min, η πίεση 0.75 Pa, η ισχύς 1900 W και η θερμοκρασία του ηλεκτροδίου 65 °C) [28] β) για επιφάνειες που προκύπτουν από προσομοίωση με διαφορετικές τιμές του συντελεστή προσκόλλησης των παρεμποδιστών που προέρχονται από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια, $S_{sb,sb}$ (runs 014-018 του Πίνακα 1).

Ζ) Ιδέες για μελλοντικές μελέτες

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκαν περιπτώσεις που περιέχουν παρεμποδιστές που προέρχονται είτε από τον κύριο όγκο του αντιδραστήρα (δηλαδή παρεμποδιστές από χημικές αντιδράσεις στον κύριο όγκο ή τα τοιχώματα του αντιδραστήρα εκτός του υποστρώματος εγχάραξης) είτε από την εγχαρασσόμενη επιφάνεια (δηλαδή προϊόντα της εγχάραξης). Σε μελλοντική εργασία, θα μπορούσε να μελετηθεί τί συμβαίνει όταν υπάρχουν και οι δύο πηγές παρεμποδιστών ταυτόχρονα, κάτι το οποίο θα αποτελούσε μία πιο ρεαλιστική προσέγγιση της διαδικασίας εγχάραξης σε πλάσμα υπό πραγματικές συνθήκες.

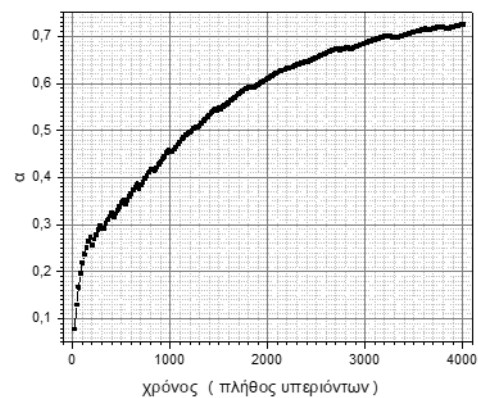
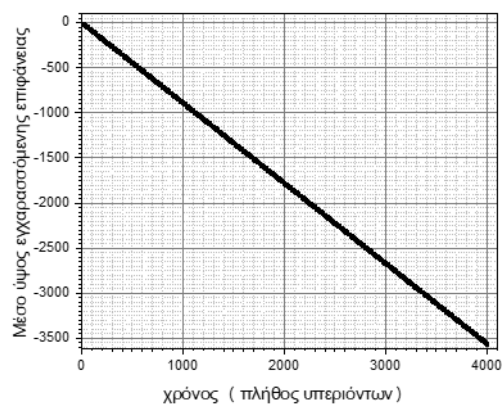
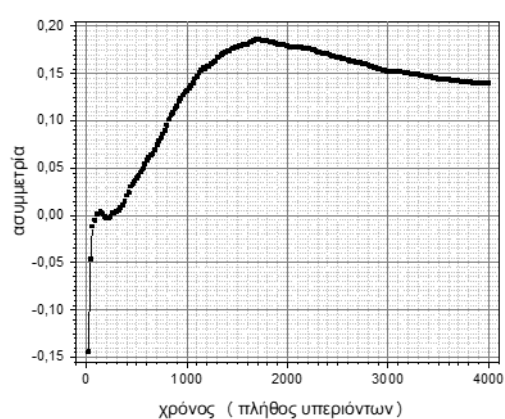
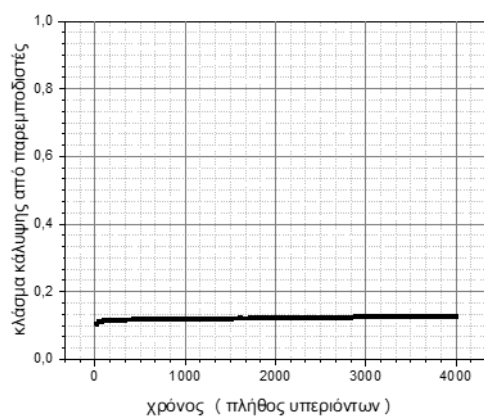
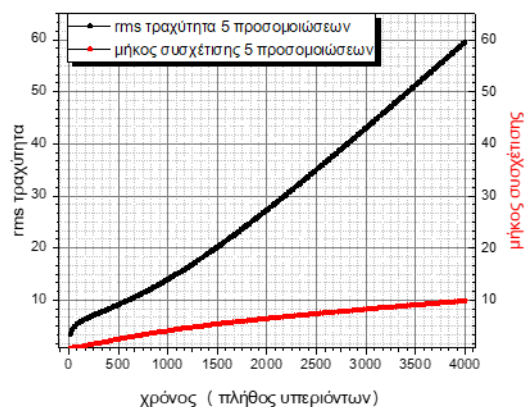
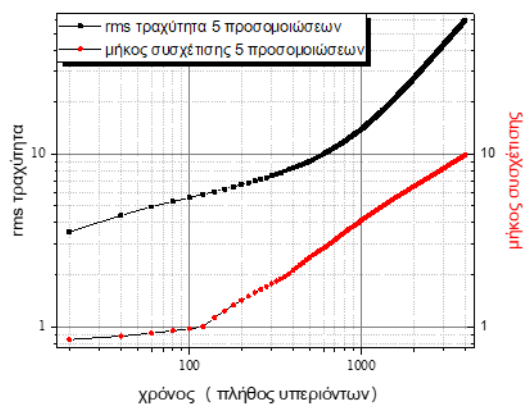
Στην περίπτωση της ταυτόχρονης εγχάραξης-απόθεσης, παρατηρήθηκε ότι τόσο το διάγραμμα της rms τραχύτητας όσο και το διάγραμμα του μήκους συσχέτισης μπορούν να προσεγγιστούν ικανοποιητικά από μαθηματικές σχέσεις της μορφής $y(t) = ct^a$, όπου t ο χρόνος. Τη θέση του y παίρνει καθένα από τα δύο μεγέθη και c , a είναι σταθερές που μπορούν να προσδιοριστούν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Εκρεμμεί λοιπόν ο προσδιορισμός των σταθερών για καθεμία από αυτές τις δύο καμπύλες και η επακόλουθη απεικόνισή καθεμίας από αυτές στο ίδιο διάγραμμα με την αντίστοιχη καμπύλη από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, προκειμένου να αναδειχθεί κατά πόσο προσεγγίζει η μία την άλλη. Ενδέχεται να υπάρχει και κάποια μαθηματική σχέση με γενική ισχύ που να προσεγγίζει τις εν λόγω σταθερές (όχι εμπειρικά αλλά με φορμαλιστικό τρόπο), όταν σε αυτήν εισάγονται οι τιμές κάποιων παραμέτρων που αποτελούν εισόδους της εκάστοτε προσομοίωσης.

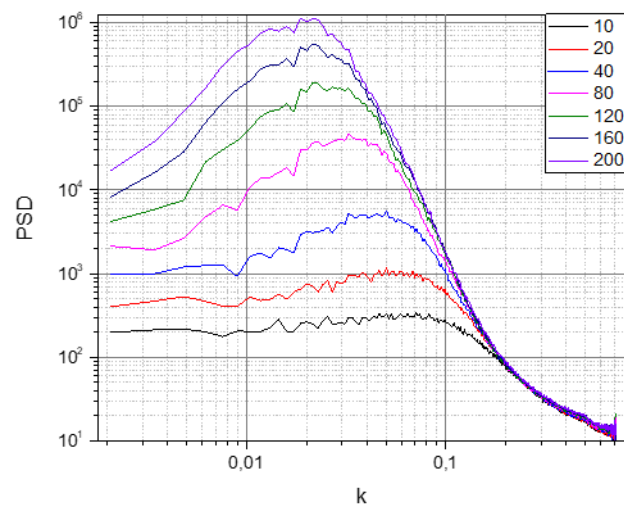
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

A: Παράλληλη εγχάραξη και απόθεση με διαφορετικό ποσοστό ιόντων και παρεμποδιστών

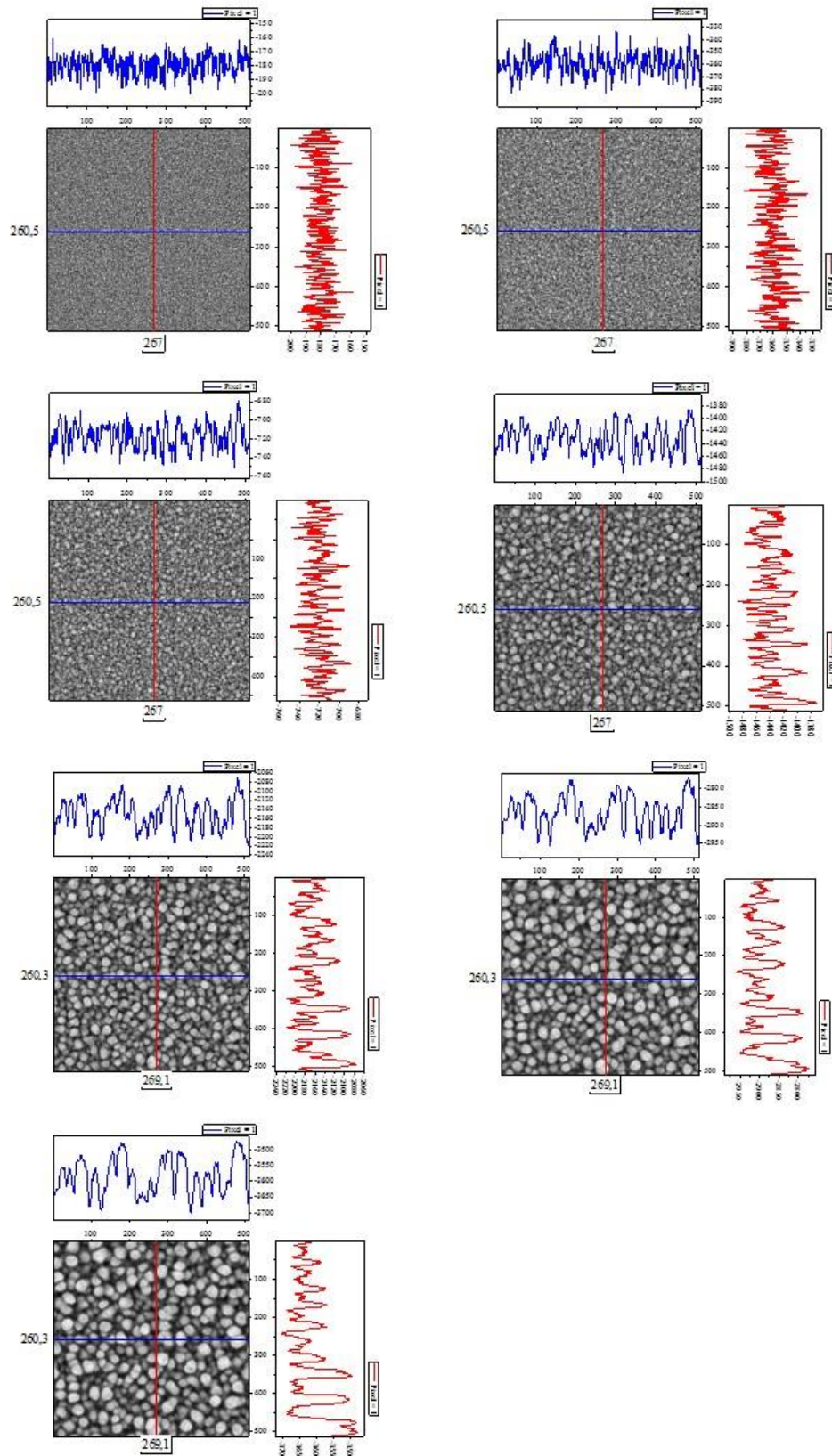
Σε αυτό το τμήμα του παραρτήματος, παρουσιάζονται αναλυτικά οι οκτώ προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και ενσωματώθηκαν στο κεφάλαιο 3.2.1 (runs 001-008 του Πίνακα 3.1). Επισημαίνεται ότι ως χρόνος εγχάραξης θεωρείται το πλήθος των υπερ-ιόντων που φτάνουν στην εγχαρασσόμενη επιφάνεια. Σημειώνεται, ότι στα διαγράμματα που απεικονίζουν την φασματική πυκνότητα ισχύος, κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετική χρονική στιγμή της διαδικασίας εγχάραξης.

#001 (512x512, 5 runs): $X_d=0.05$, $S_{d, sb}=1$, $X_i=0.95$, $S_{d, d}=1$

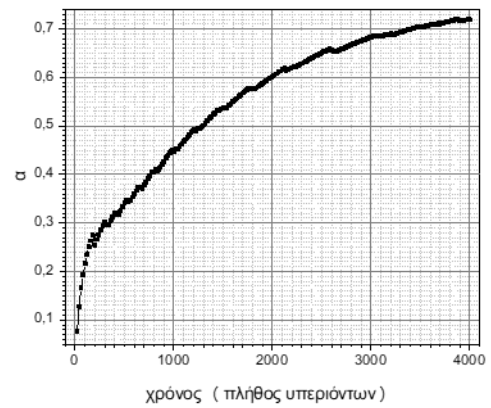
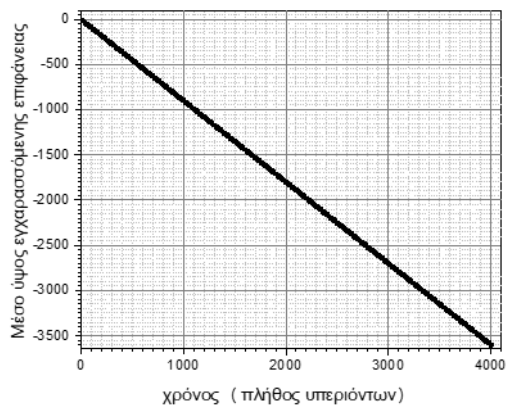
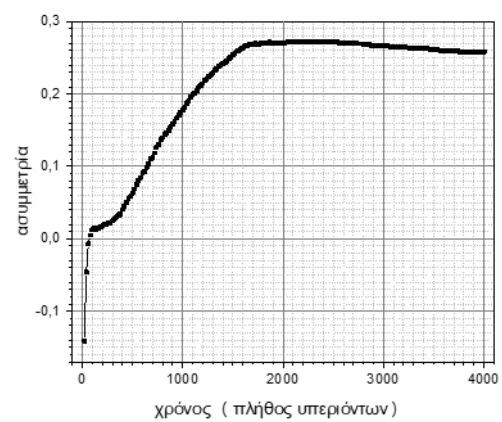
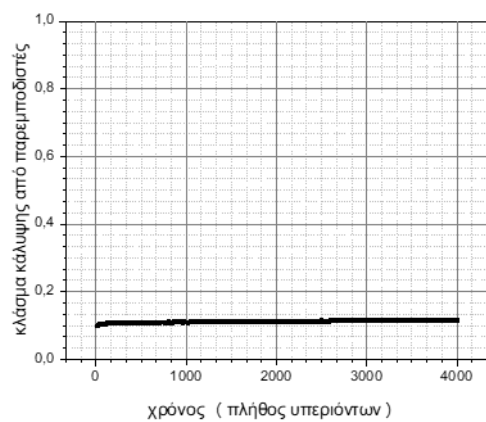
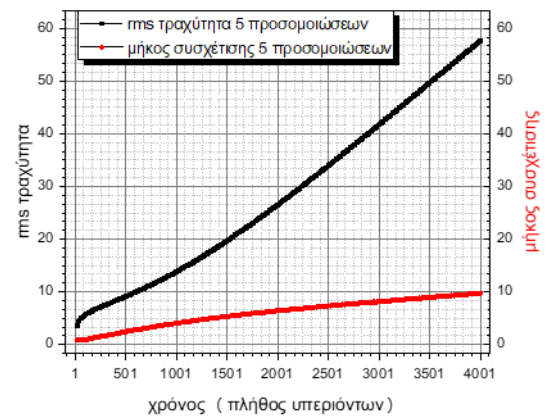
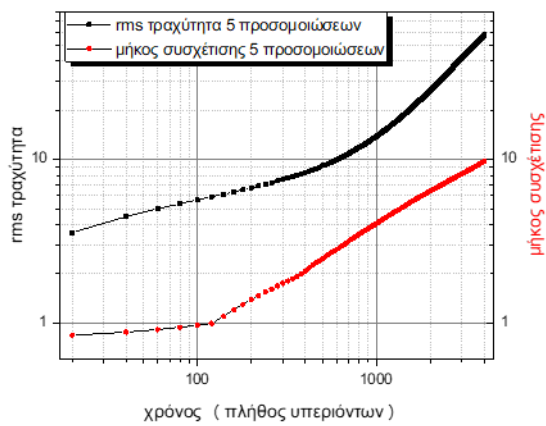


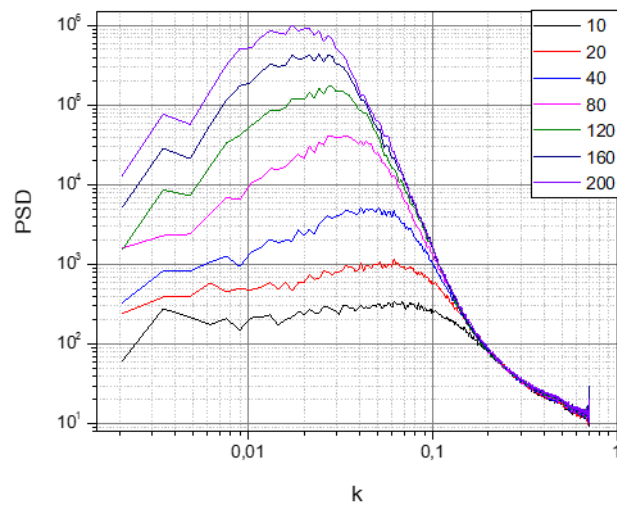


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

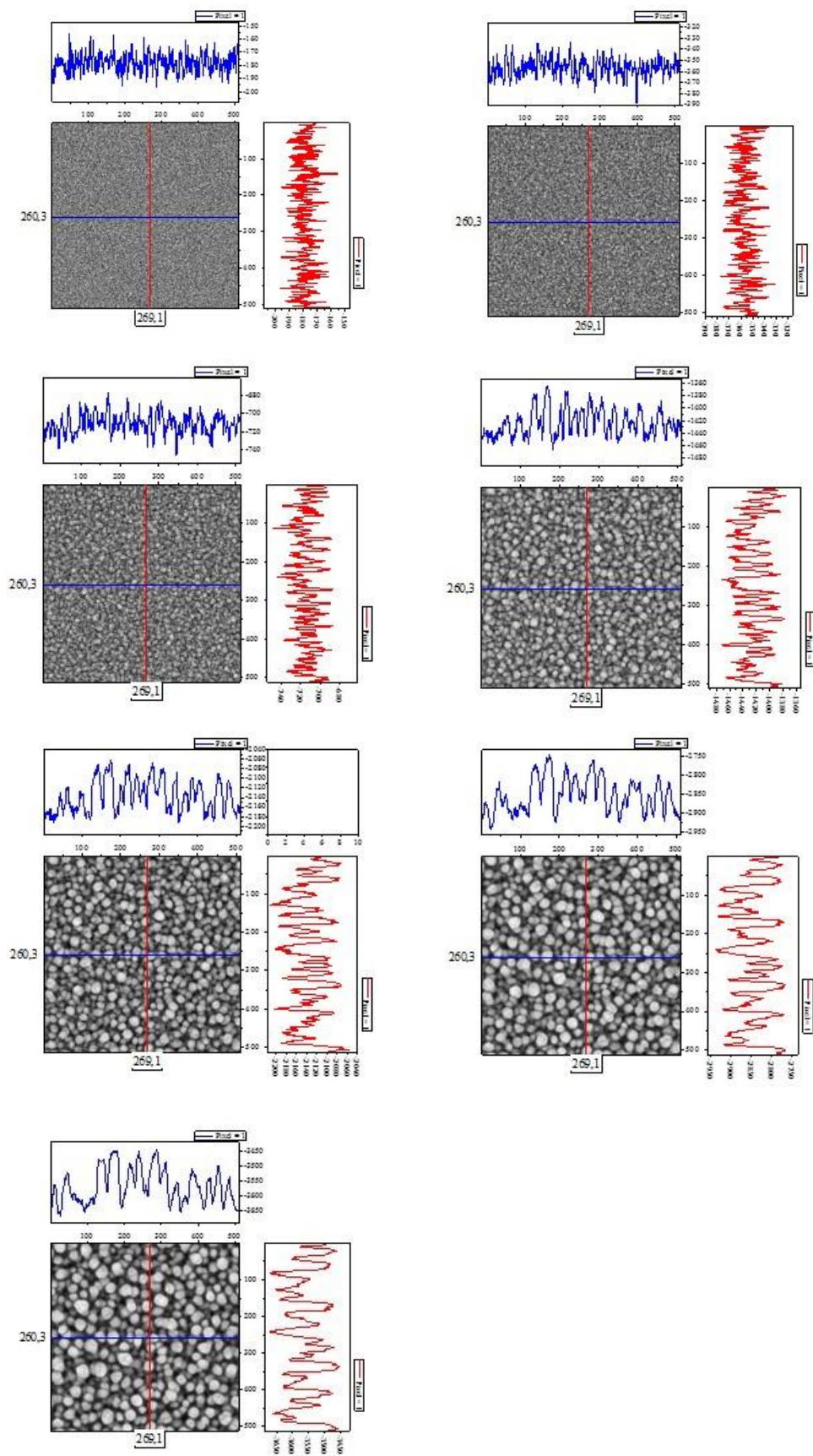


#002 (512x512, 5 runs): $X_d=0.0556$, $S_{d, sb}=0.9$, $X_i=0.9444$, $S_{d, d}=0.9$

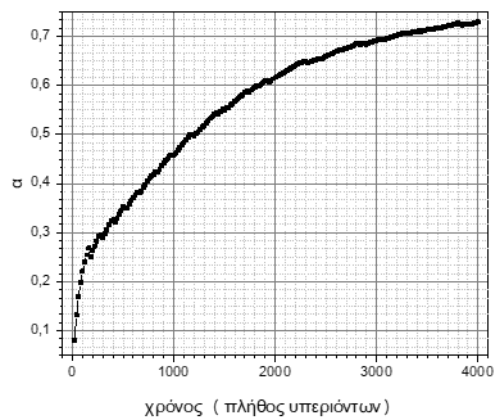
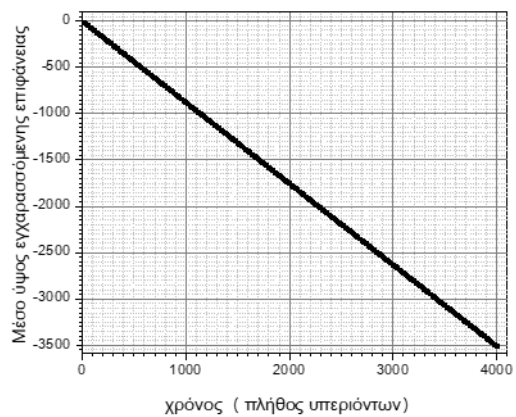
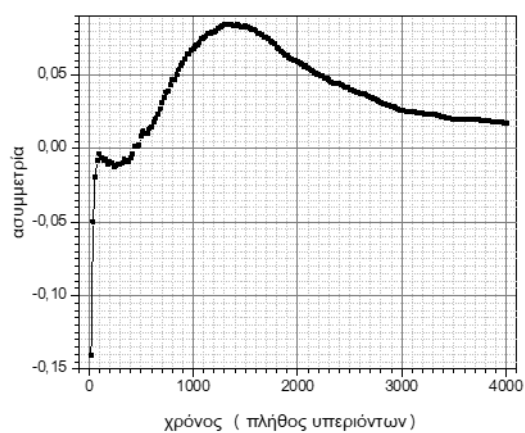
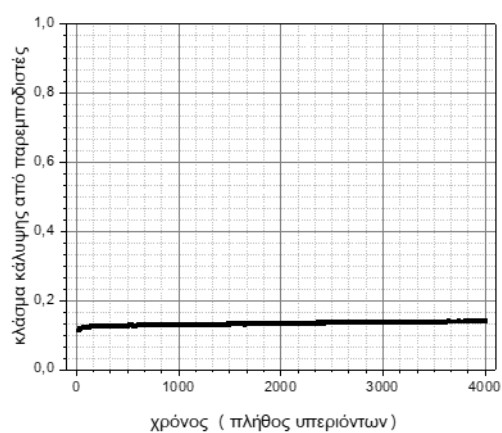
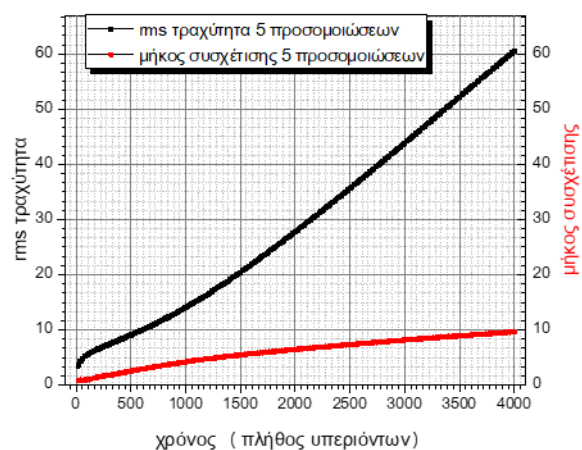
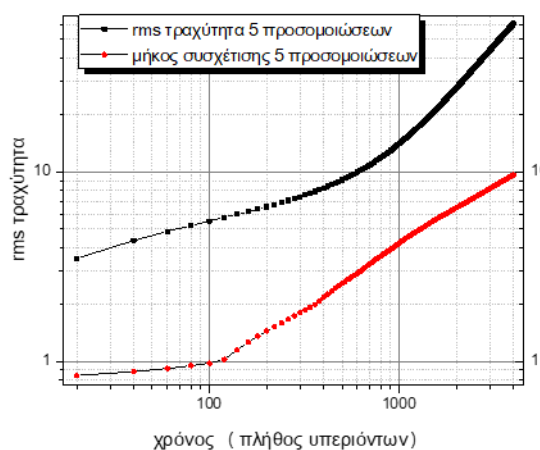


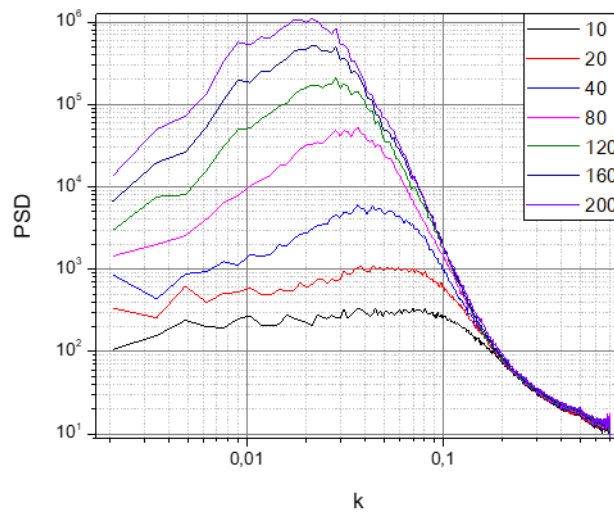


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

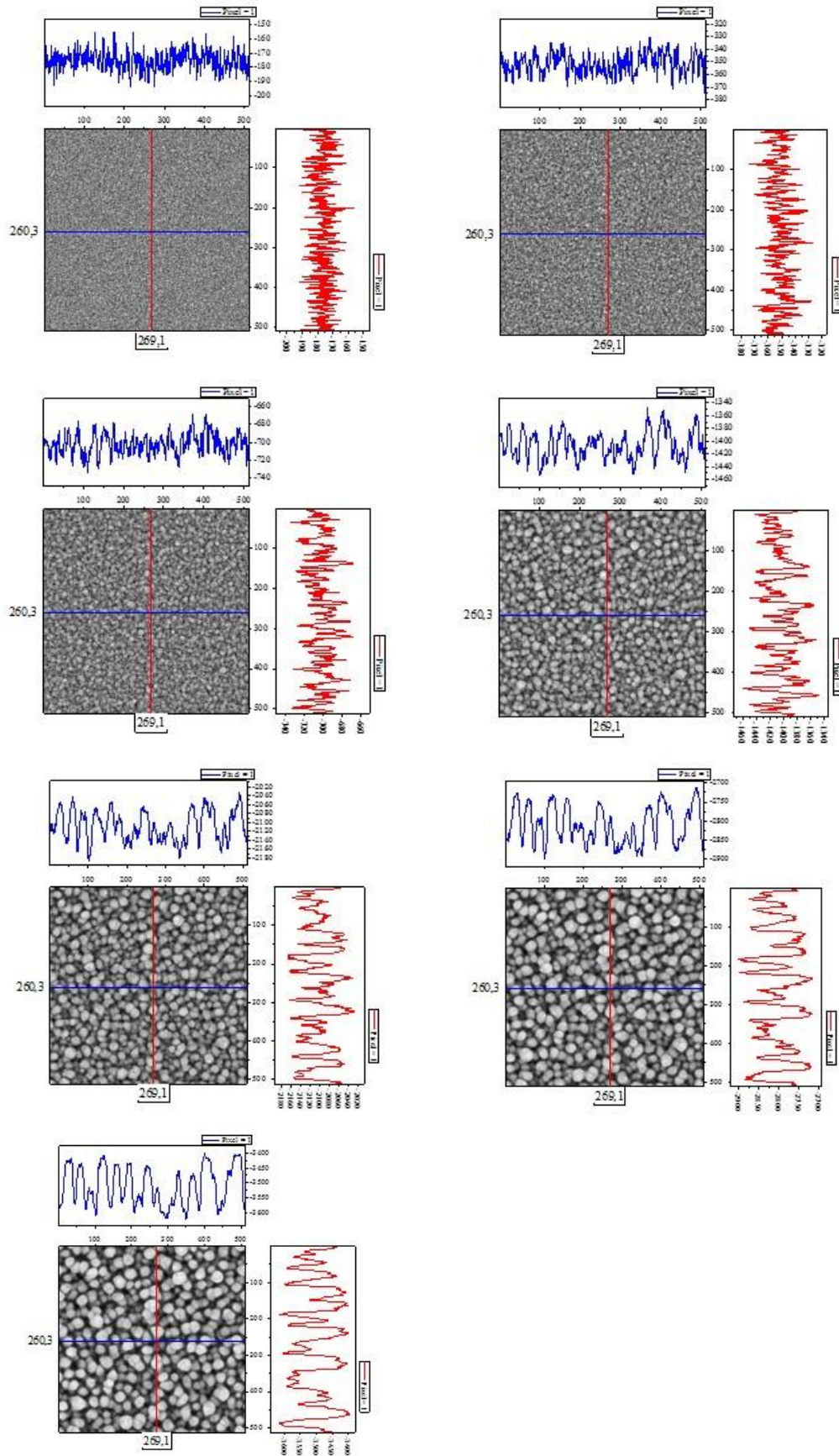


#003 (512x512, 5 runs): $X_d=0.0625$, $S_{d, sb}=0.8$, $X_i=0.9375$, $S_{d, d}=0.8$

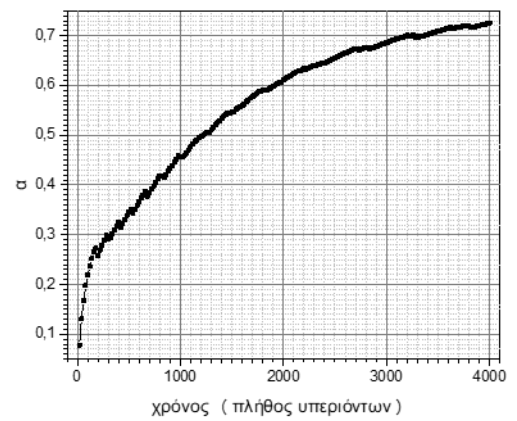
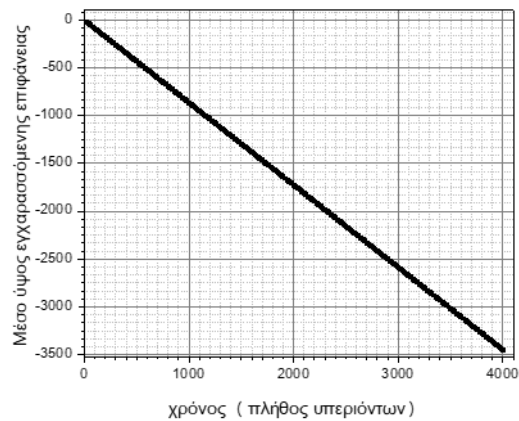
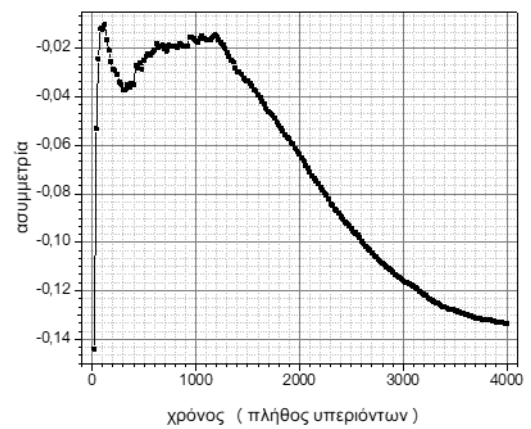
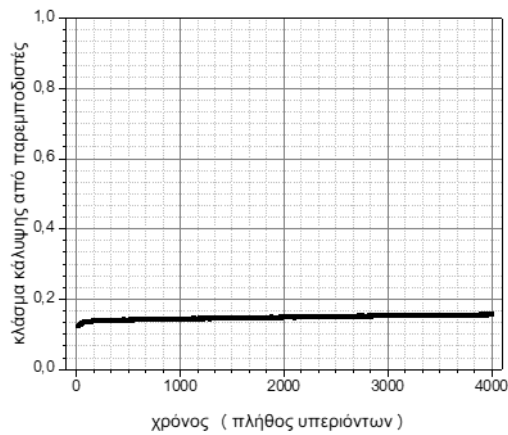
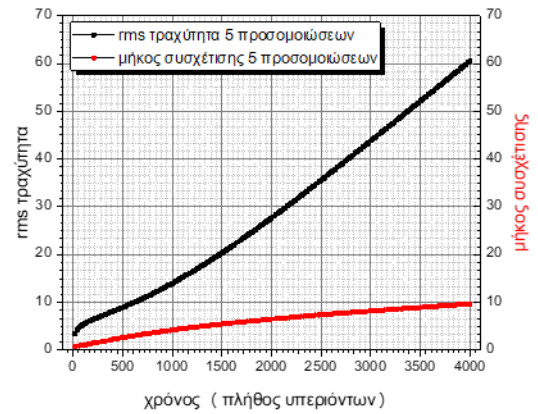
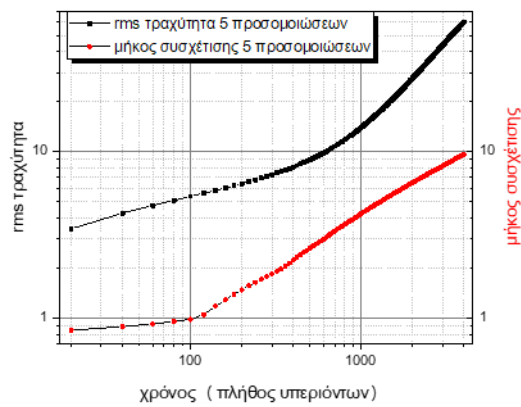


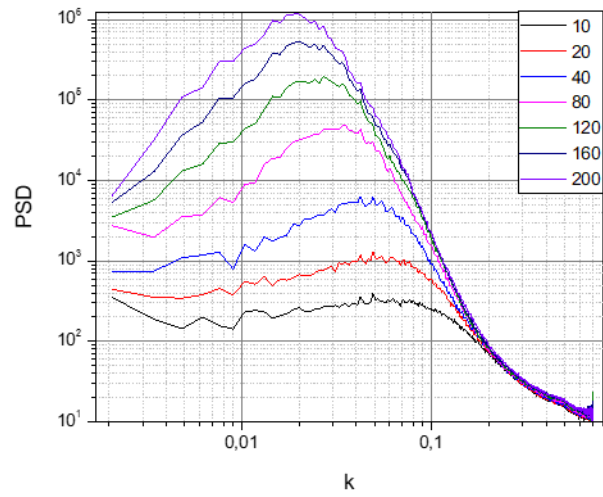


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

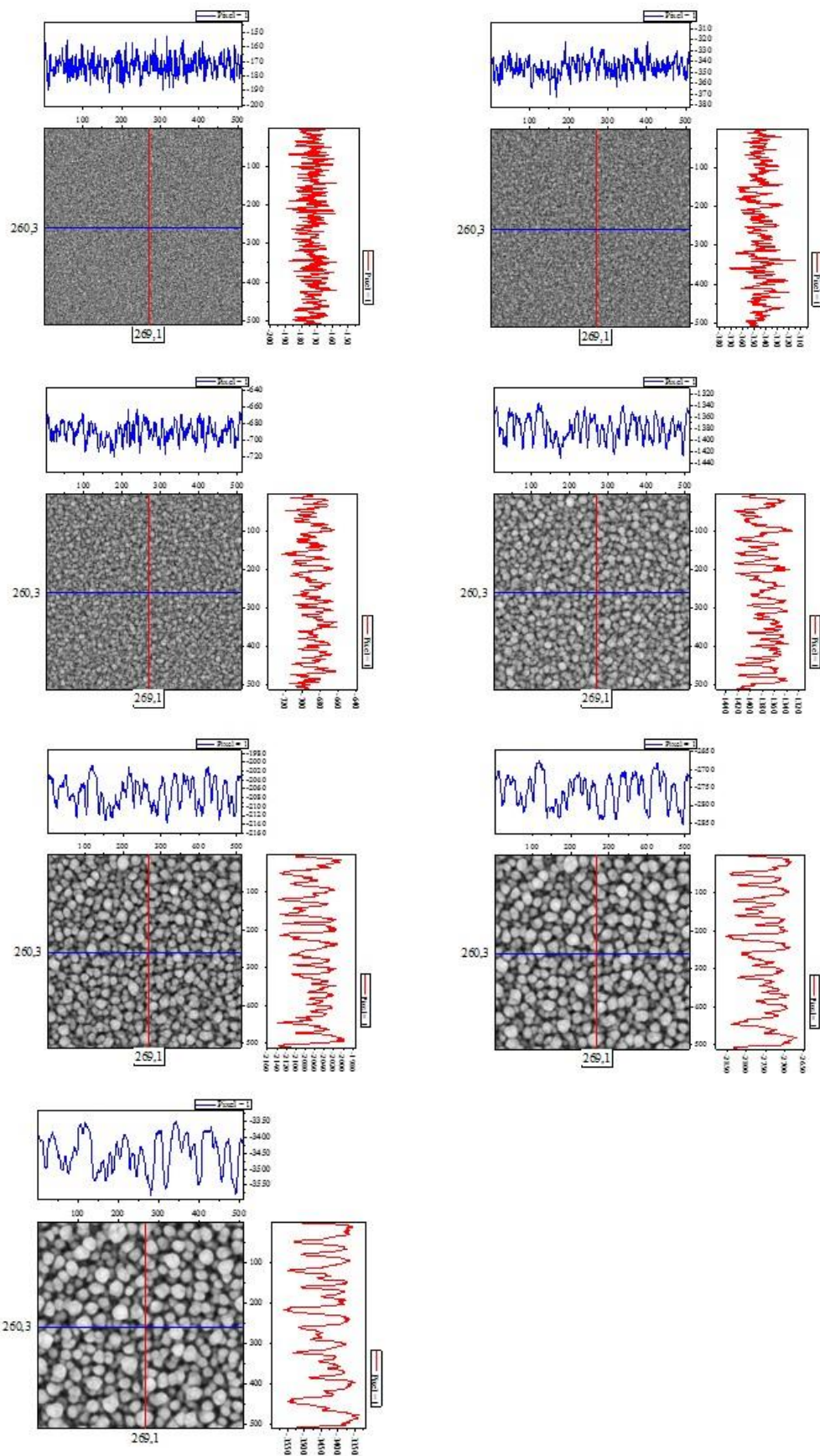


#004 (512x512, 5 runs): $X_d=0.0714$, $S_{d, sb}=0.7$, $X_i=0.9286$, $S_{d, d}=0.7$

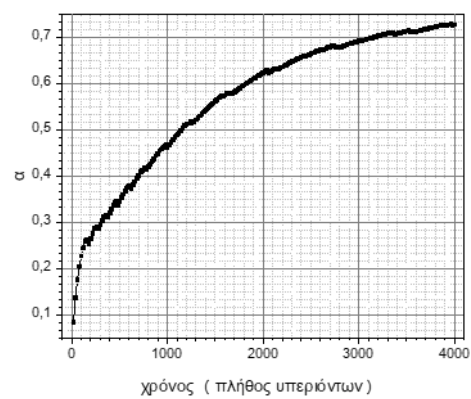
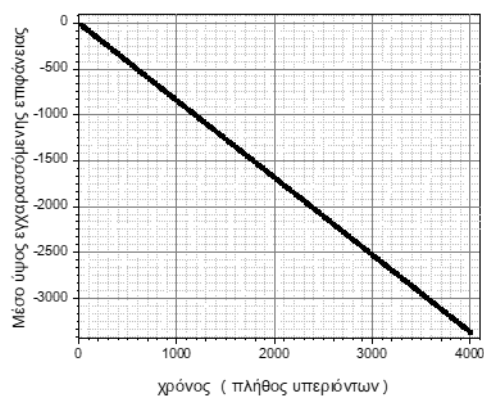
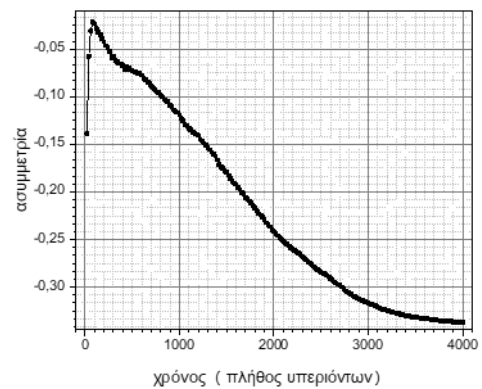
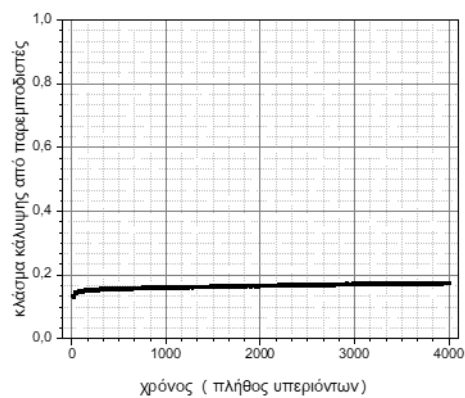
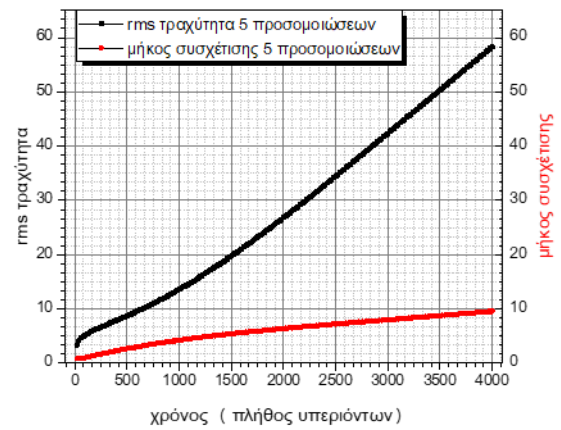
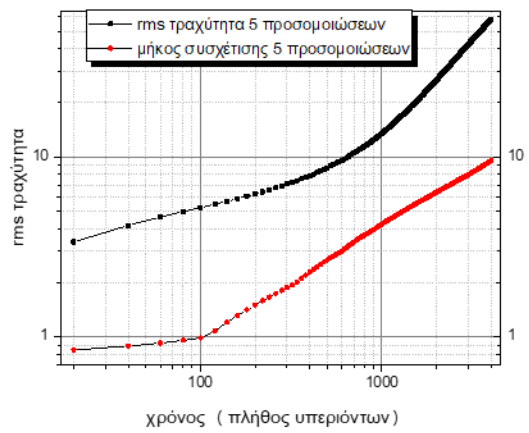


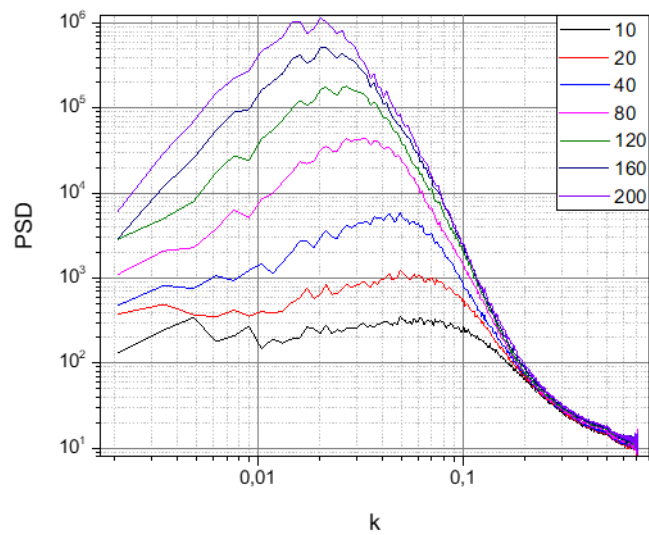


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

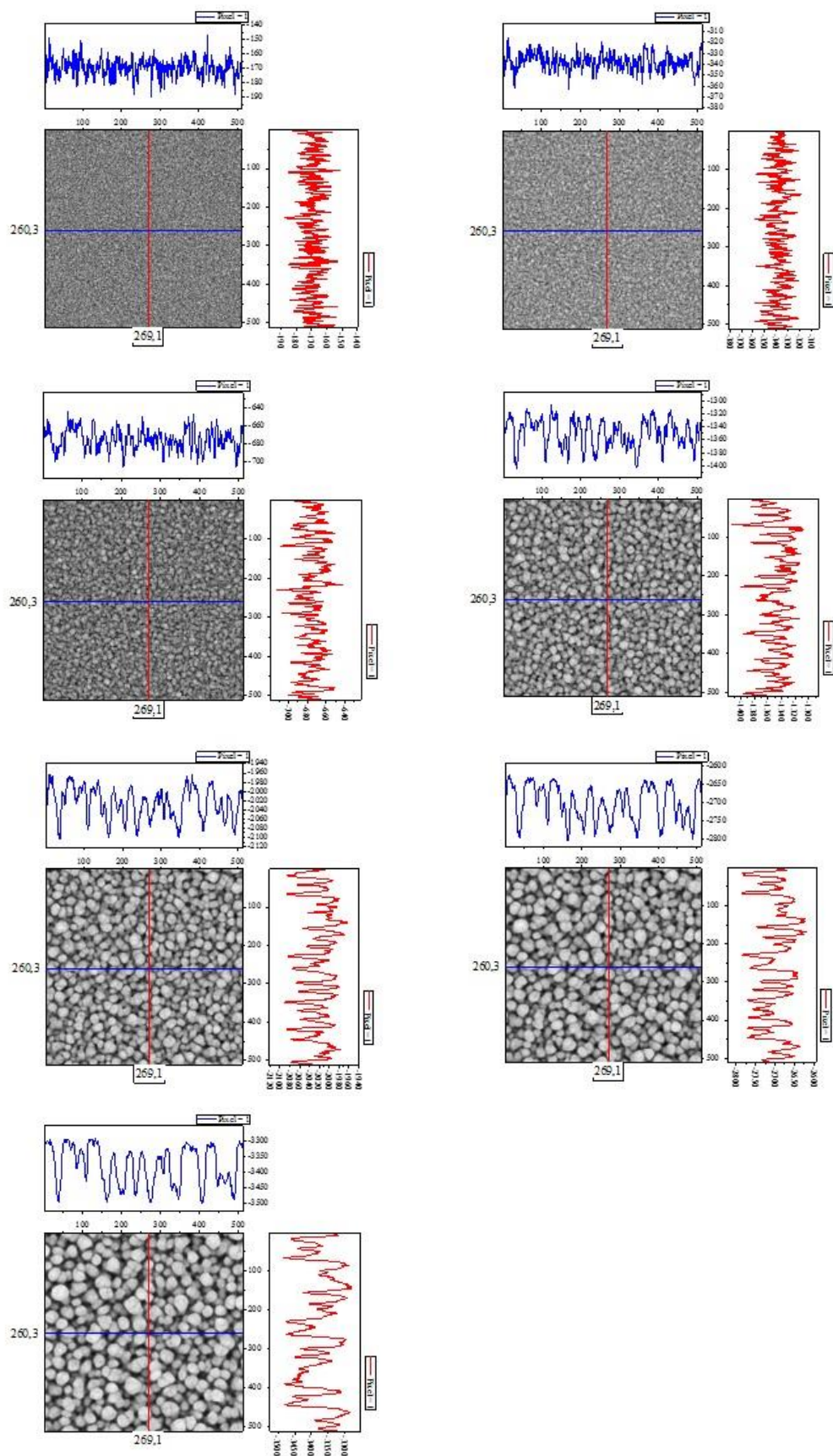


#005 (512x512, 5 runs): $X_d=0.0833$, $S_{d, sb}=0.6$, $X_i=0.9167$, $S_{d, d}=0.6$

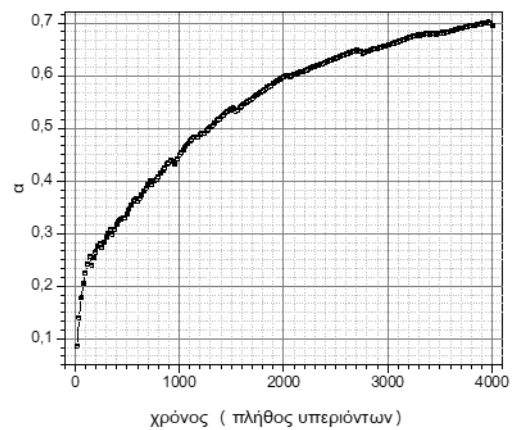
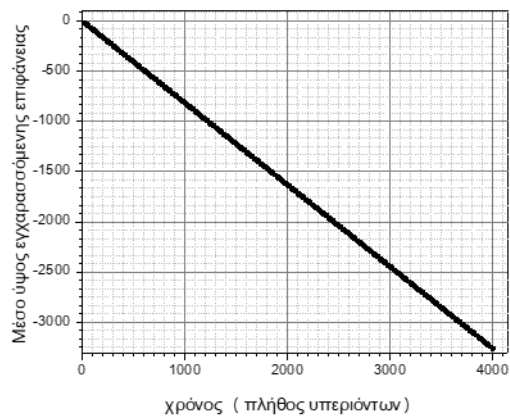
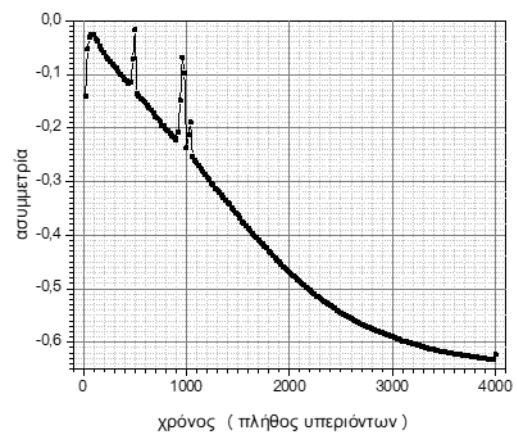
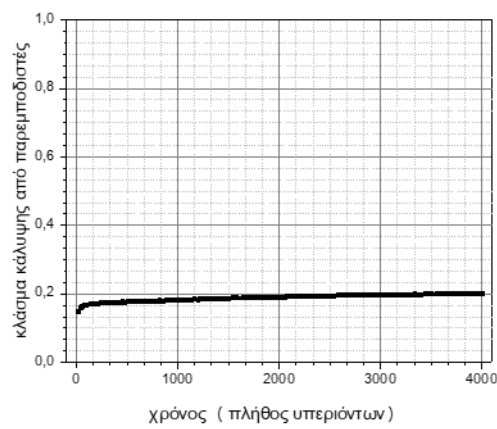
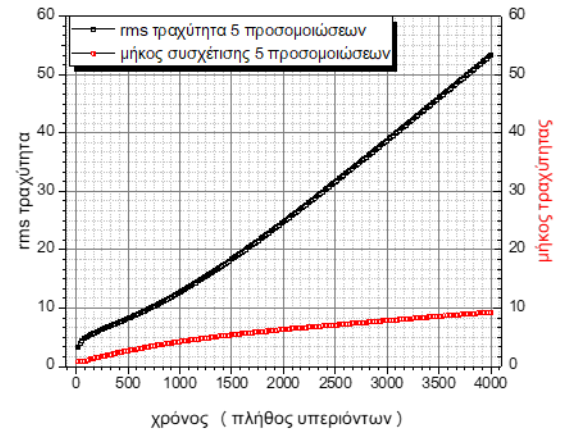
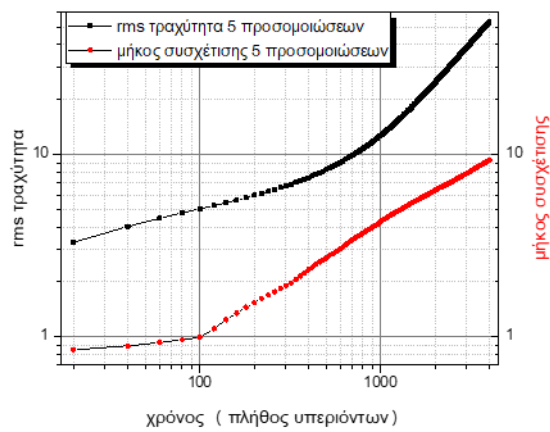


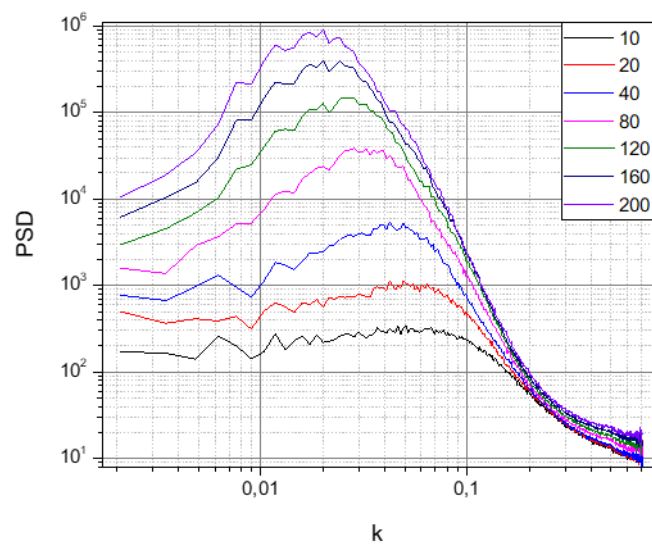


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

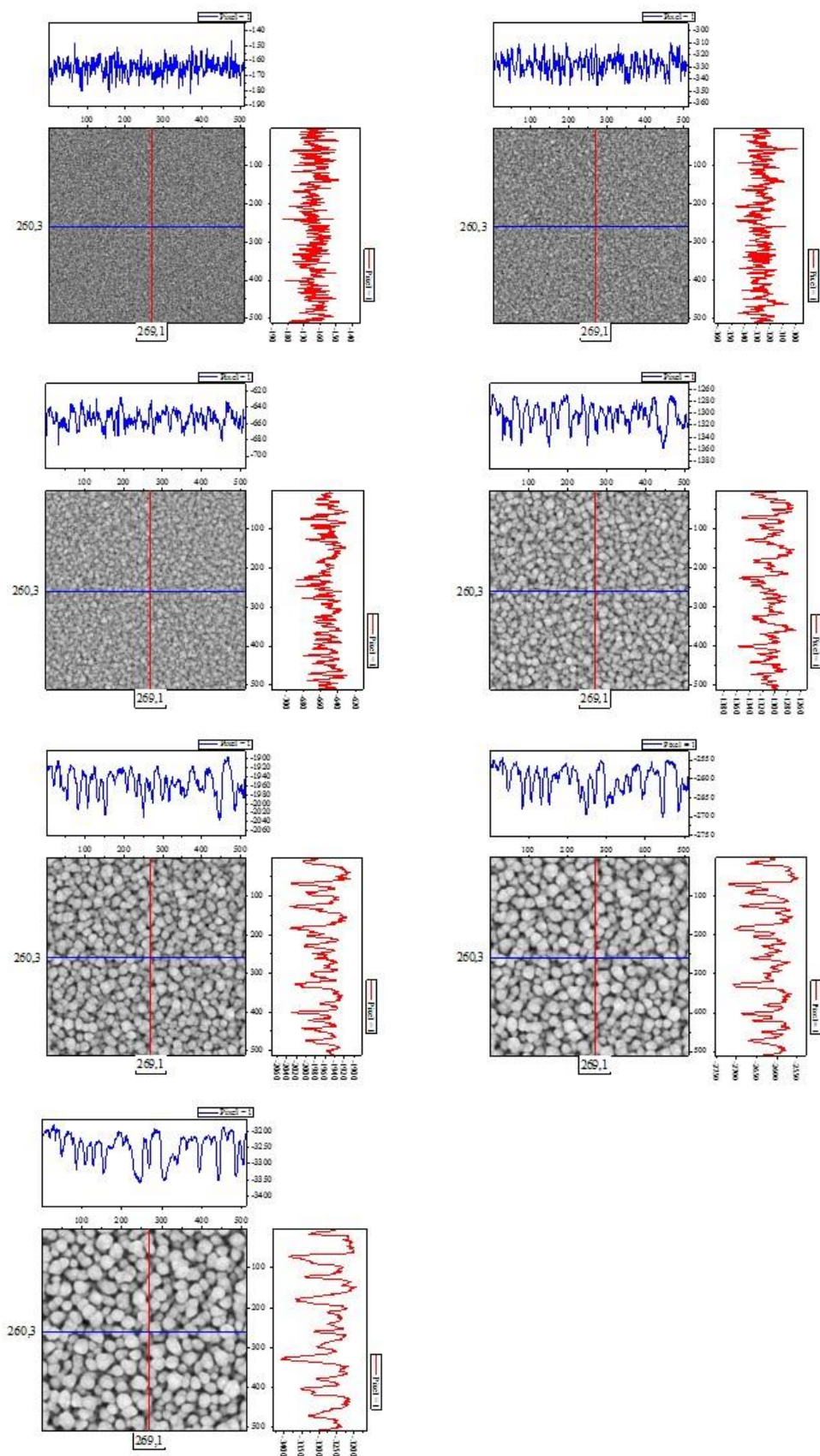


#006 (512x512, 5 runs): $X_d=0.1000$, $S_{d, sb}=0.5$, $X_i=0.9000$, $S_{d, d}=0.5$

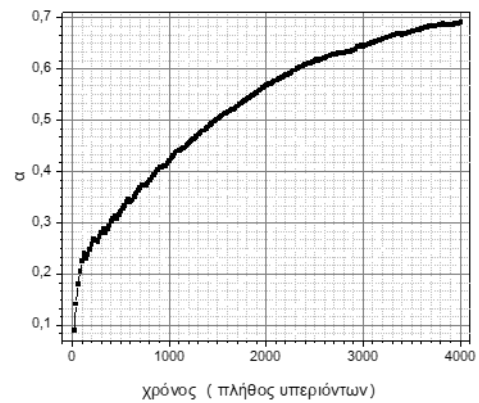
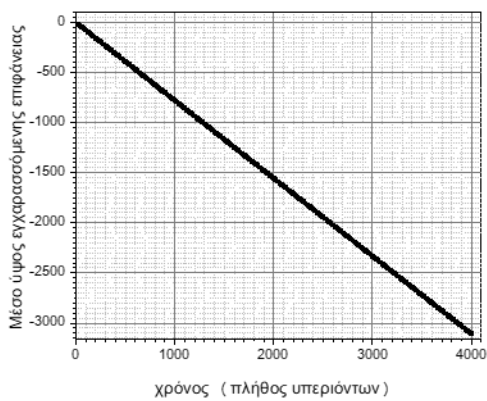
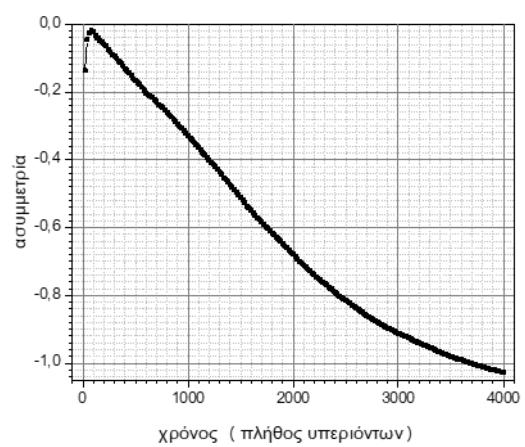
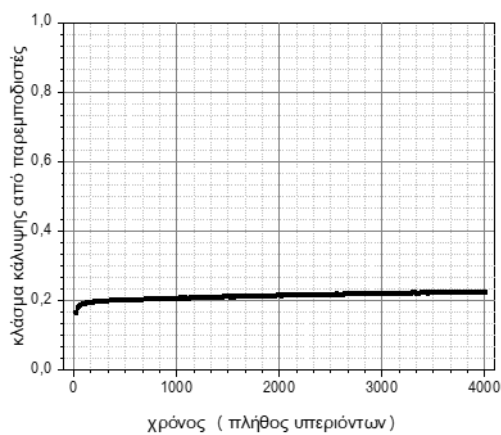
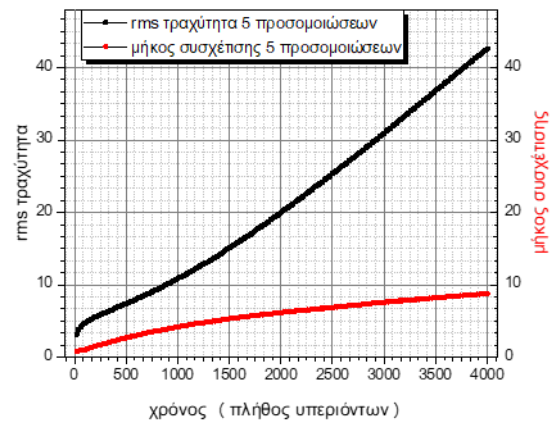
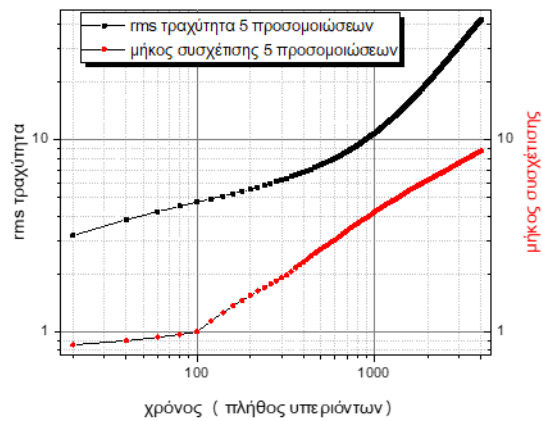


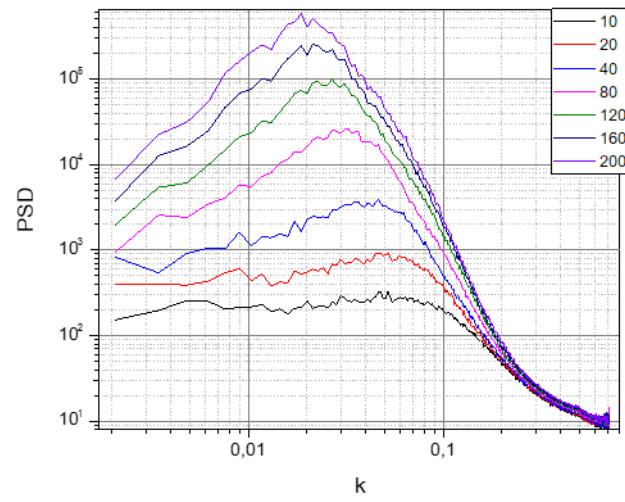


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

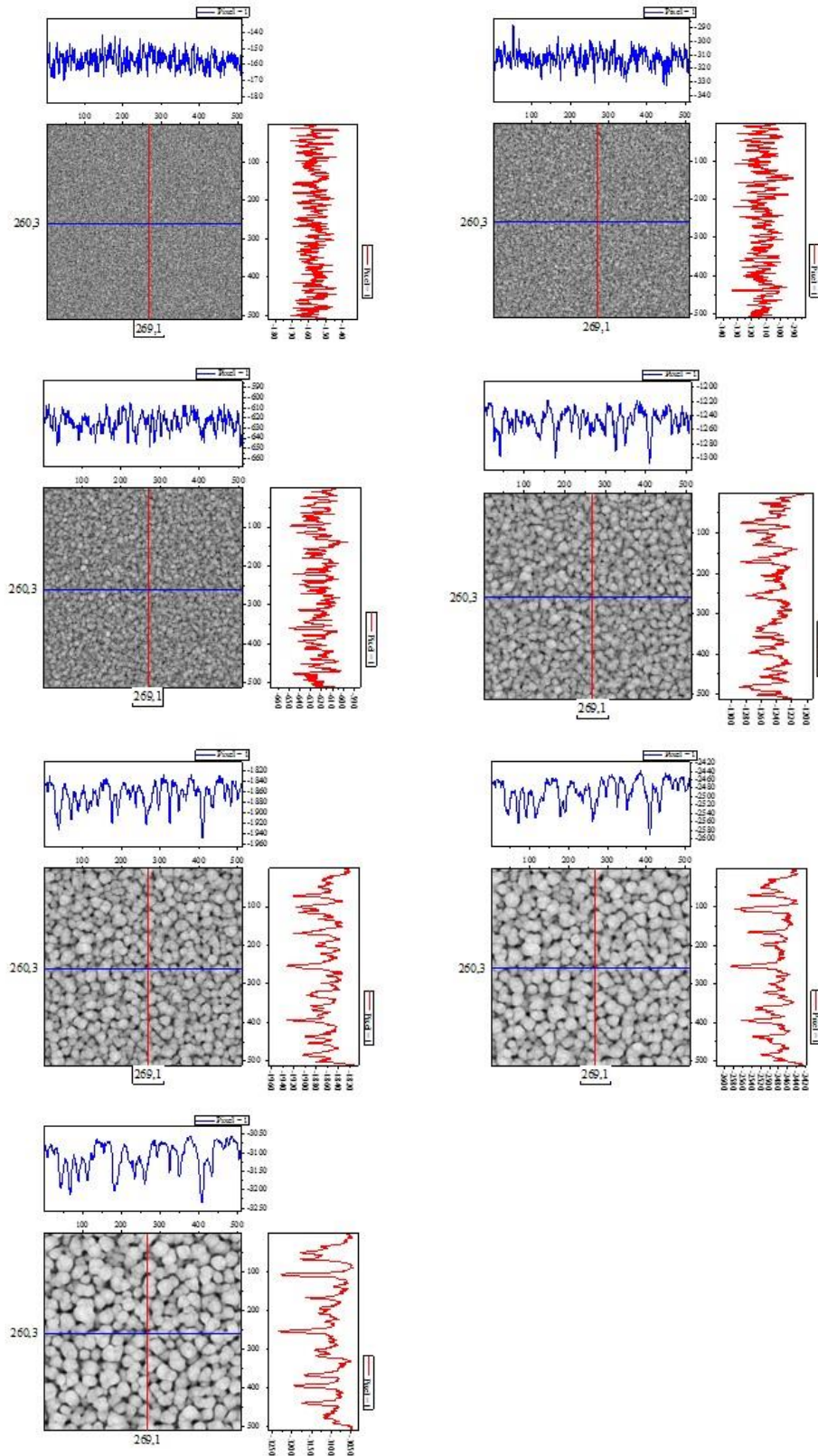


#007 (512x512, 5 runs): $X_d=0.1250$, $S_{d, sb}=0.4$, $X_i=0.8750$, $S_{d, d}=0.4$

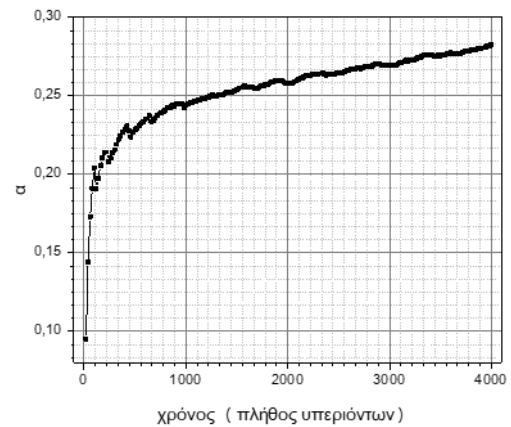
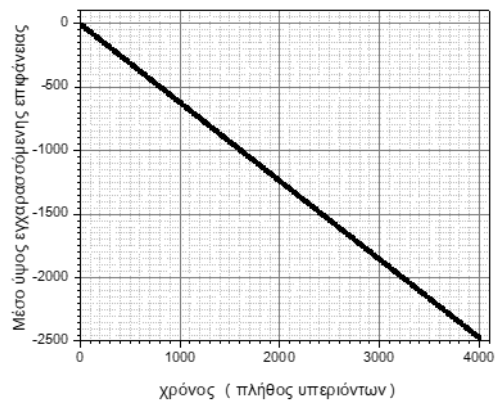
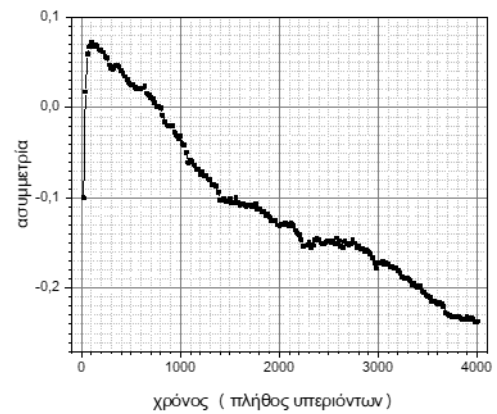
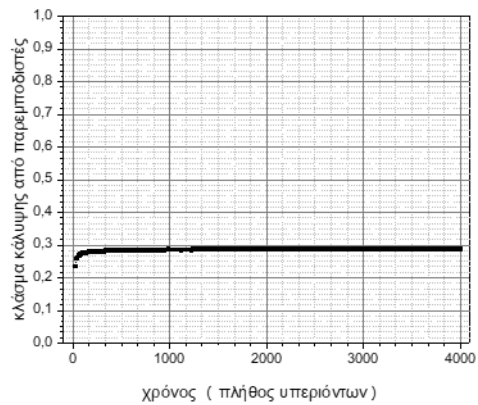
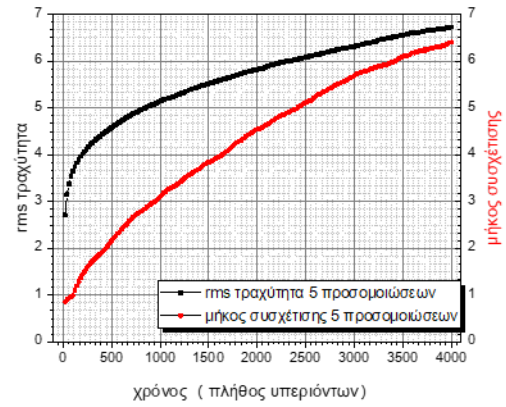
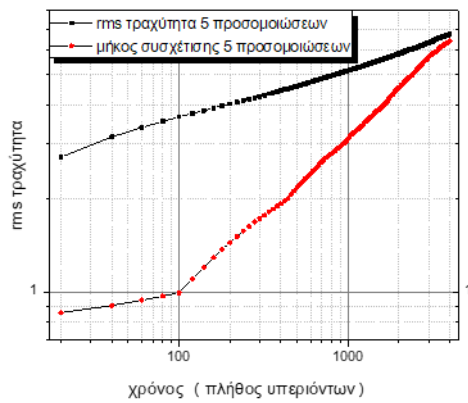


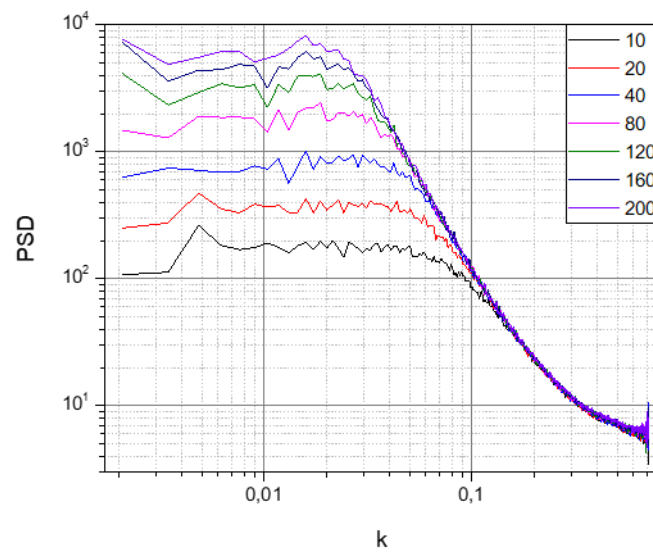


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

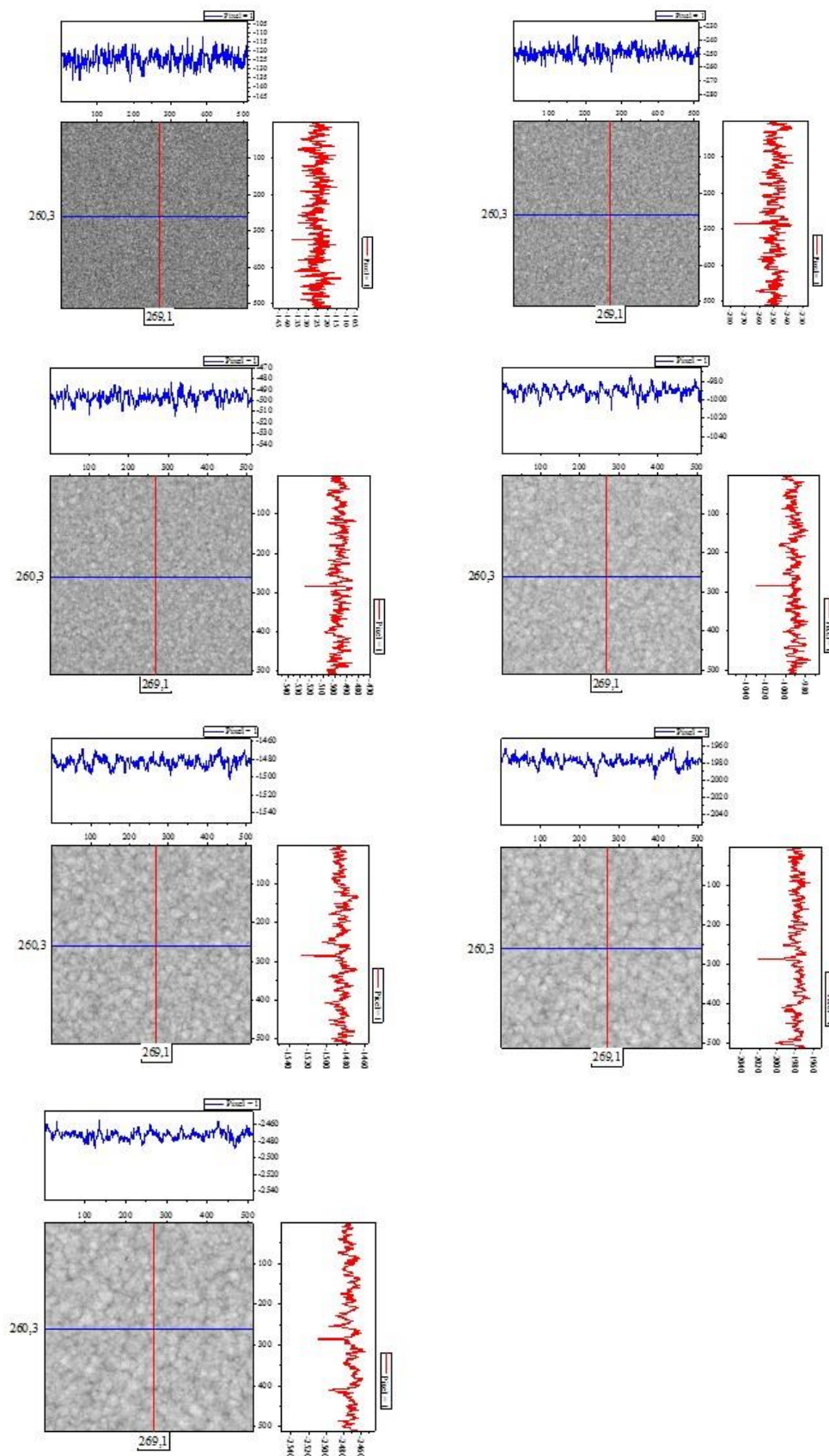


#008 (512x512, 5 runs): $X_d=0.2500$, $S_{d, sb}=0.2$, $X_i=0.7500$, $S_{d, d}=0.2$





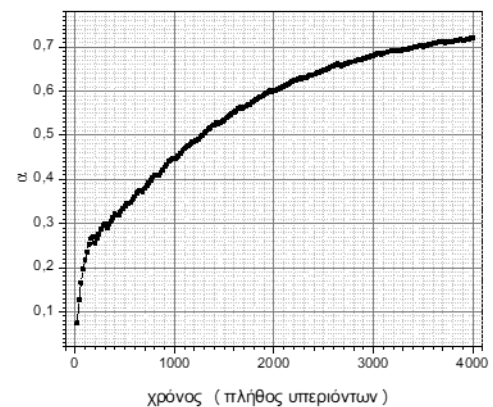
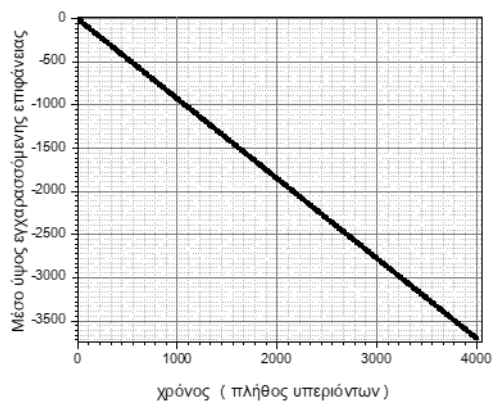
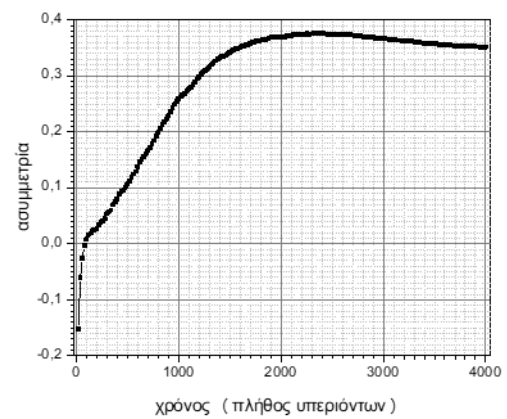
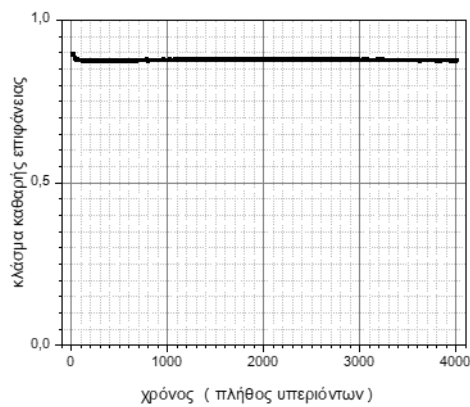
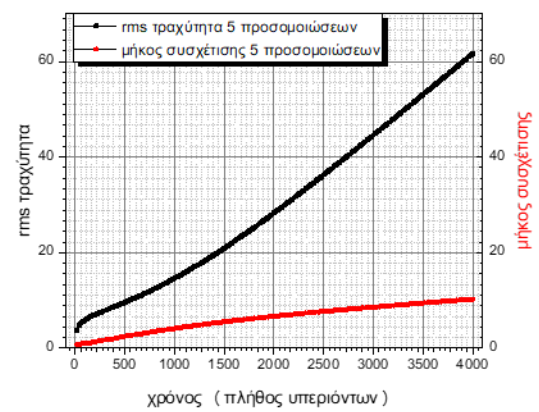
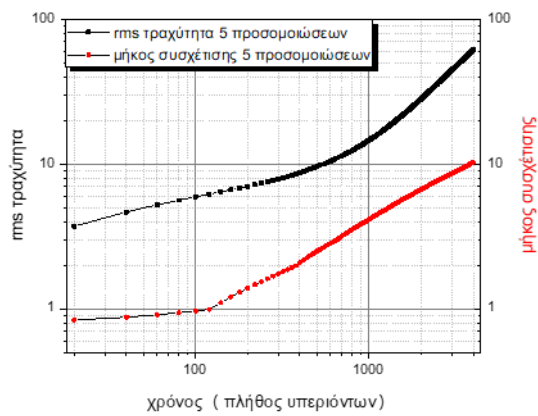
Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

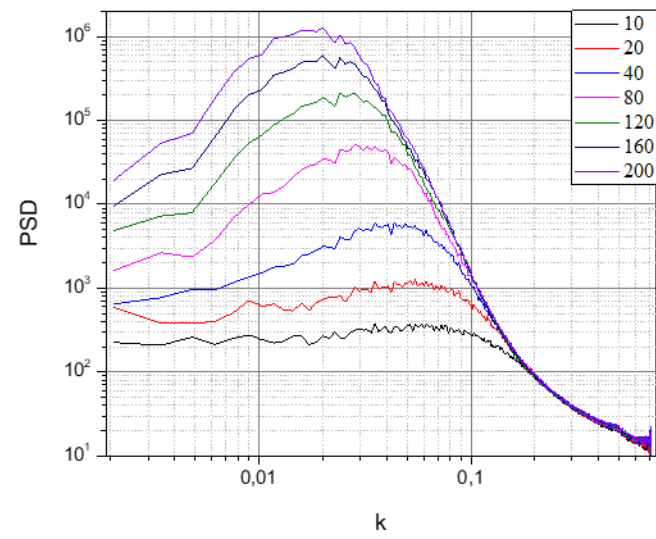


B: Παράλληλη εγχάραξη και απόθεση με διαφορετικό ποσοστό ιόντων και παρεμποδιστών, αλλά και με διαφορετική απόδοση εγχάραξης

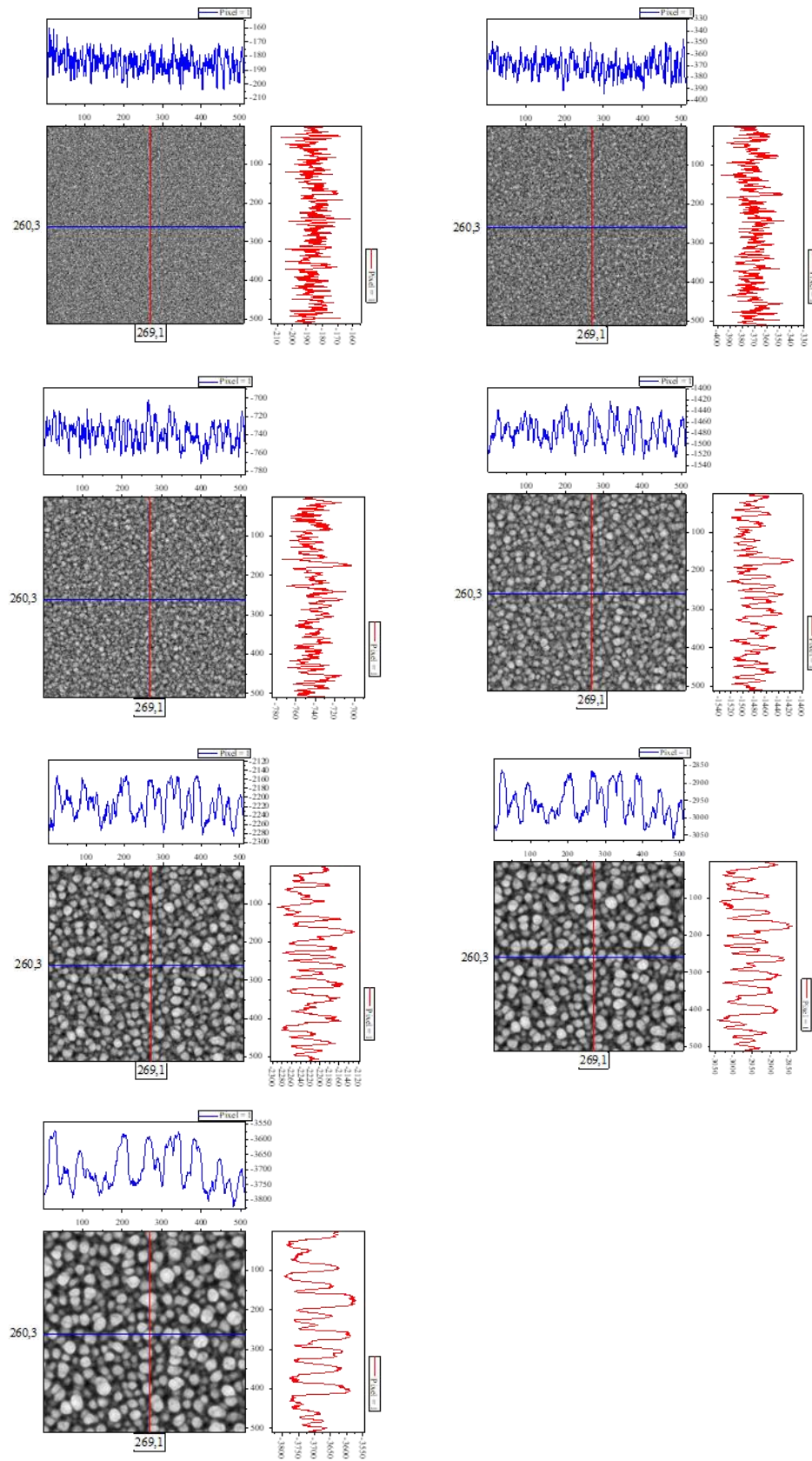
Σε αυτό το τμήμα του παραρτήματος, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τέσσερις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και ενσωματώθηκαν στο κεφάλαιο 3.2.2. Σημειώνεται ότι η περίπτωση του run 001 παραλείπεται, καθώς έχει συμπεριληφθεί στο μέρος Α του παραρτήματος.

#010 (512x512, 5 runs, no redepo): $X_d=0.025$, $S_{sub,sub}=0.5$, $S_{i,d}=1$, $EY_{i,sub}=1$, $EY_{i,d}=0.5$

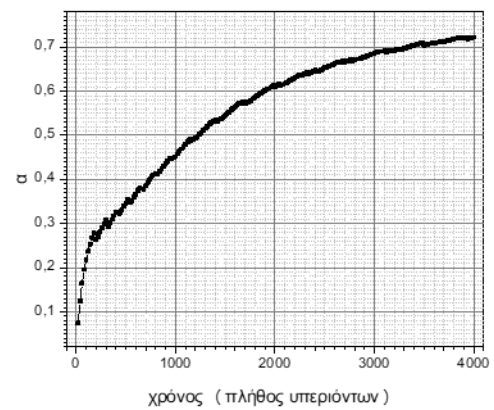
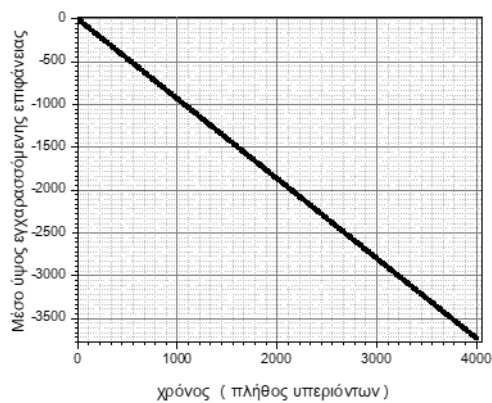
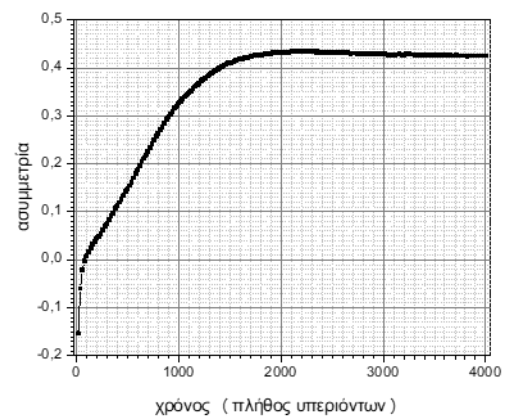
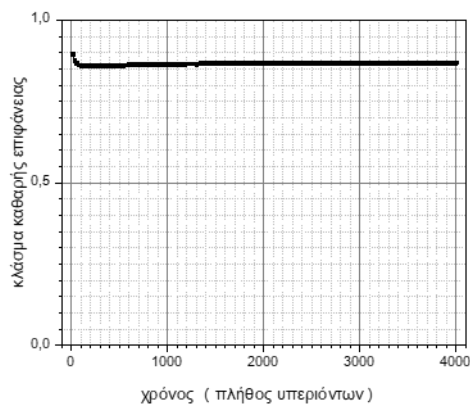
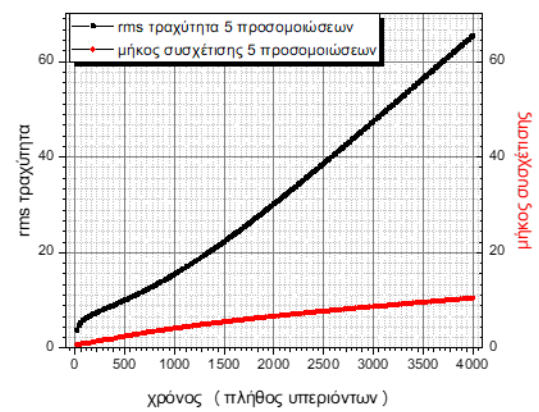
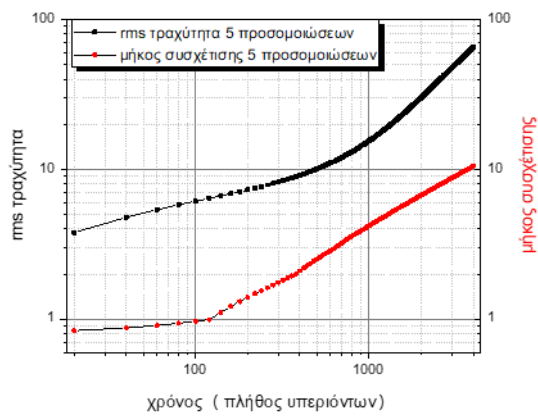


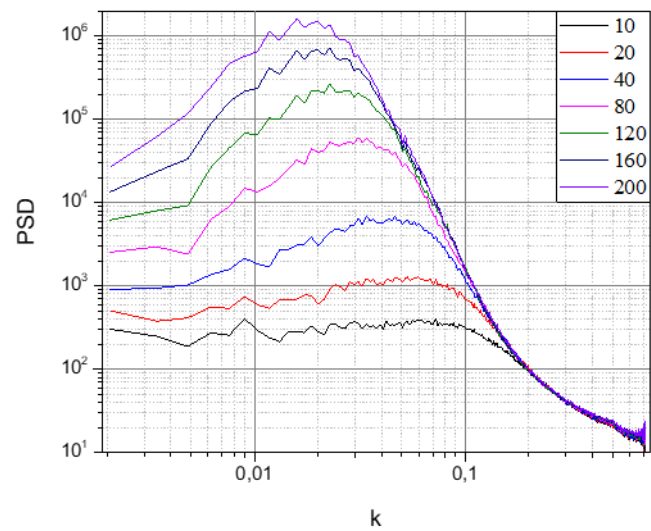


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

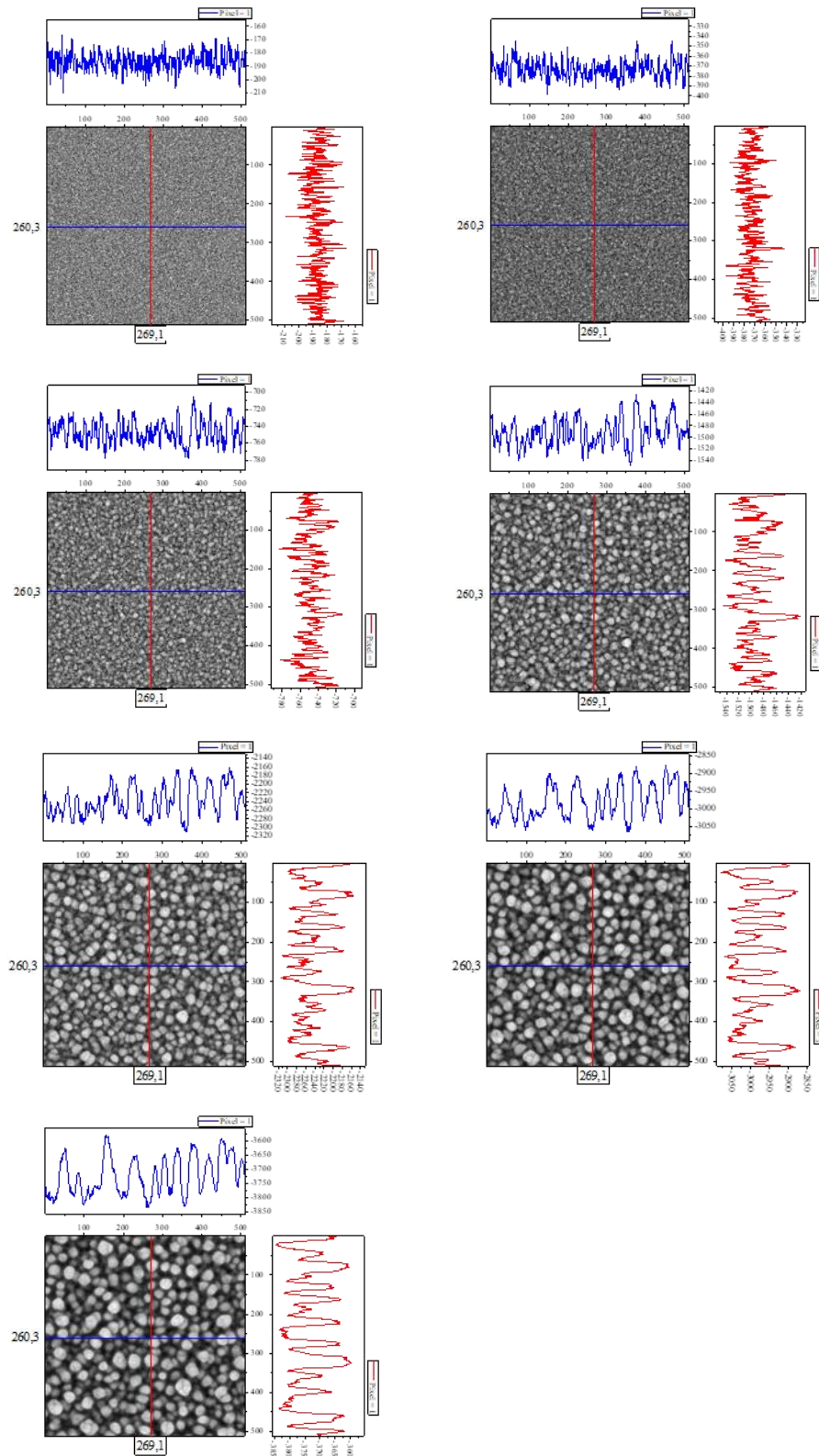


#011 (512x512, 5 runs, no redepo): $X_d=0.0167$, $S_{sub,sub}=0.5$, $S_{i,d}=1$, $EY_{i,sub}=1$, $EY_{i,d}=0.33$

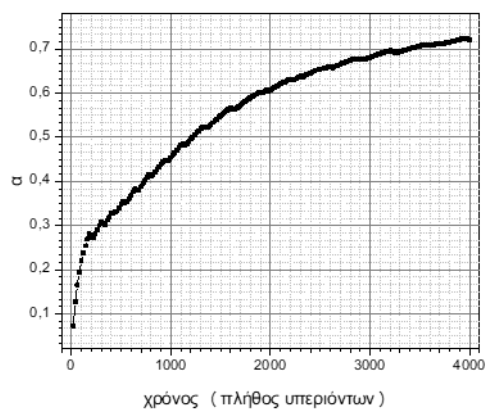
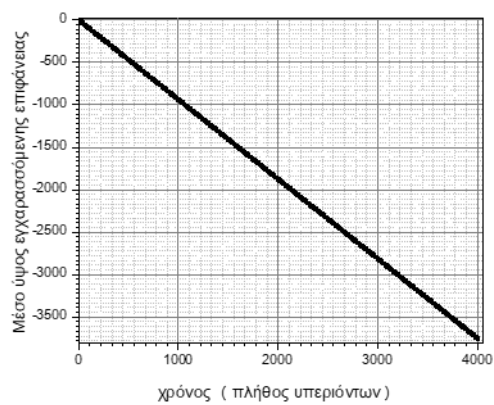
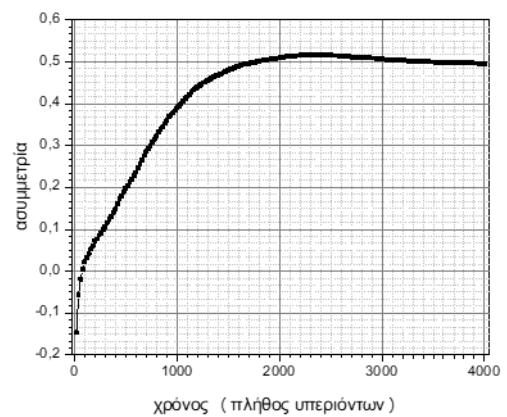
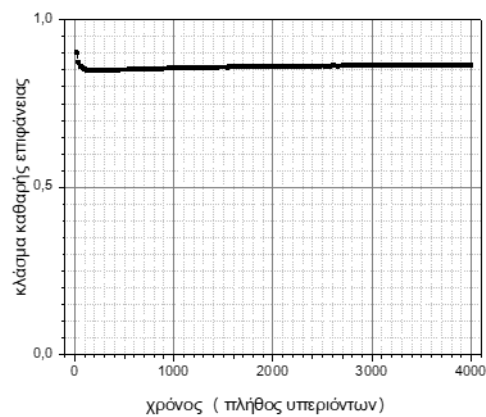
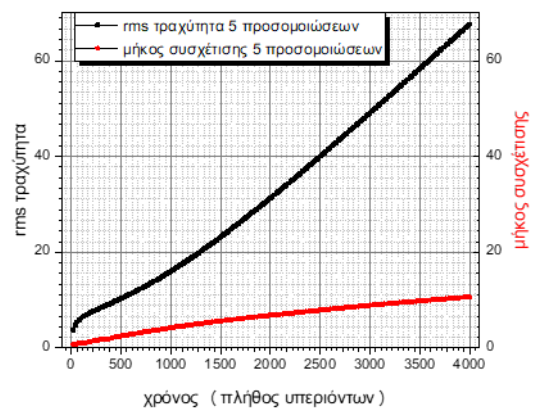
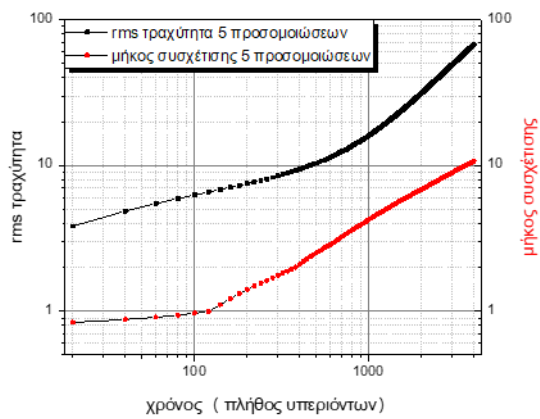


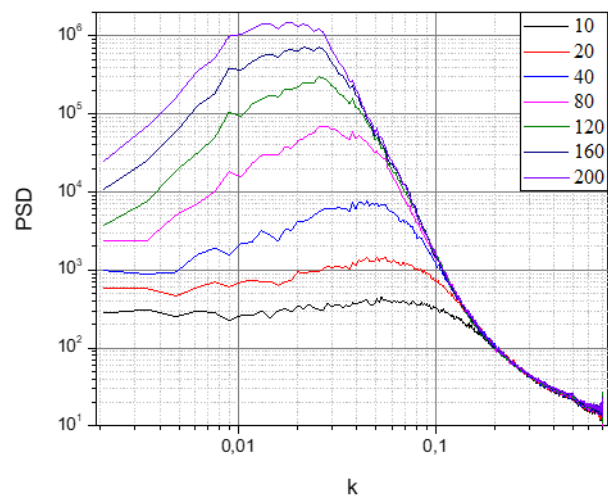


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

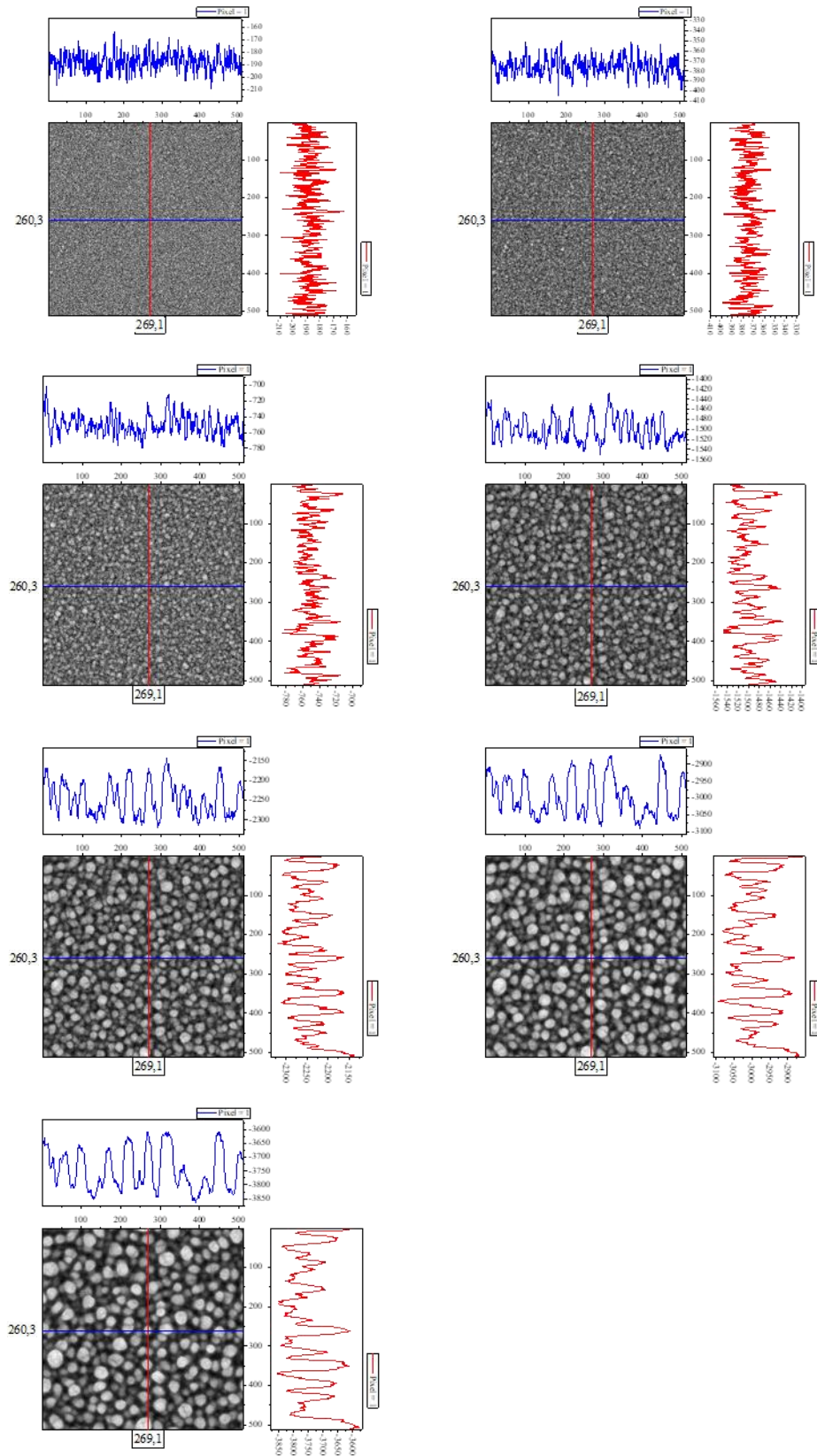


#012 (512x512, 5 runs, no redepo): $X_d=0.0125$, $S_{sub,sub}=0.5$, $S_{i,d}=1$, $EY_{i,sub}=1$, $EY_{i,d}=0.25$





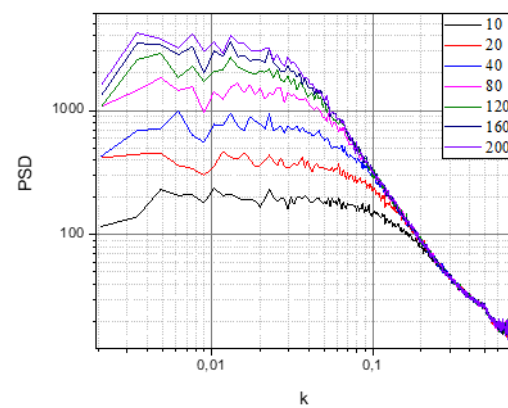
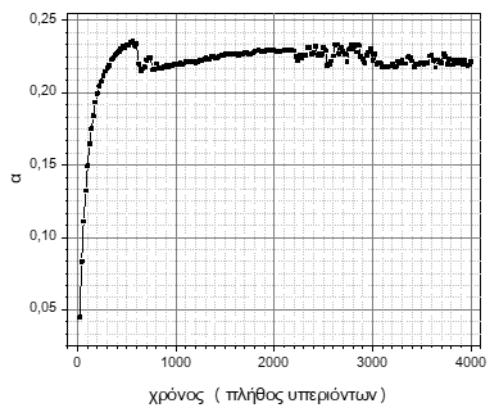
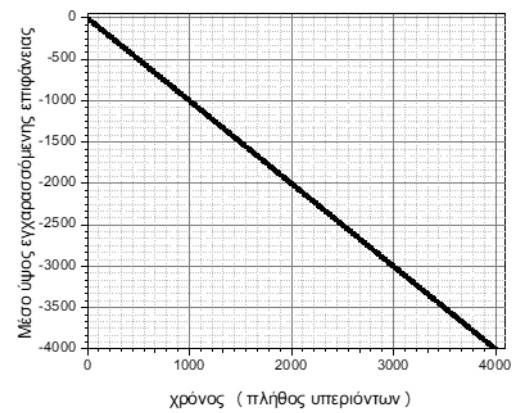
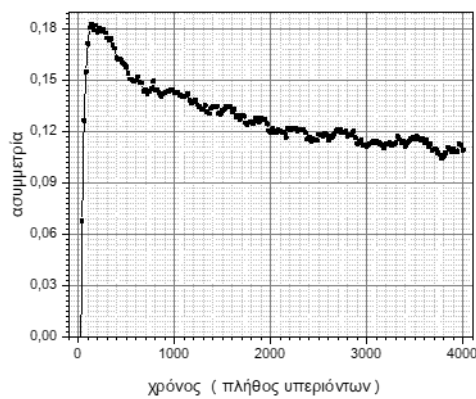
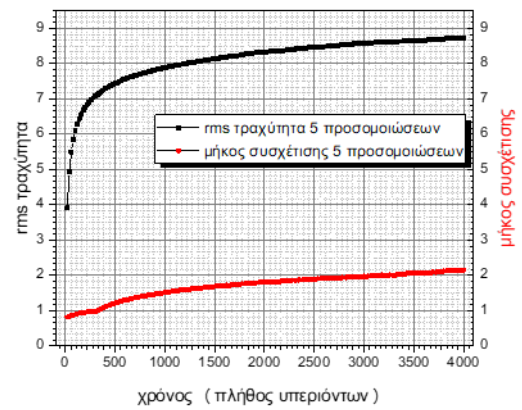
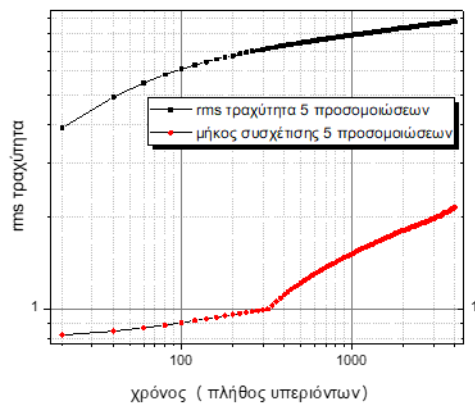
Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200



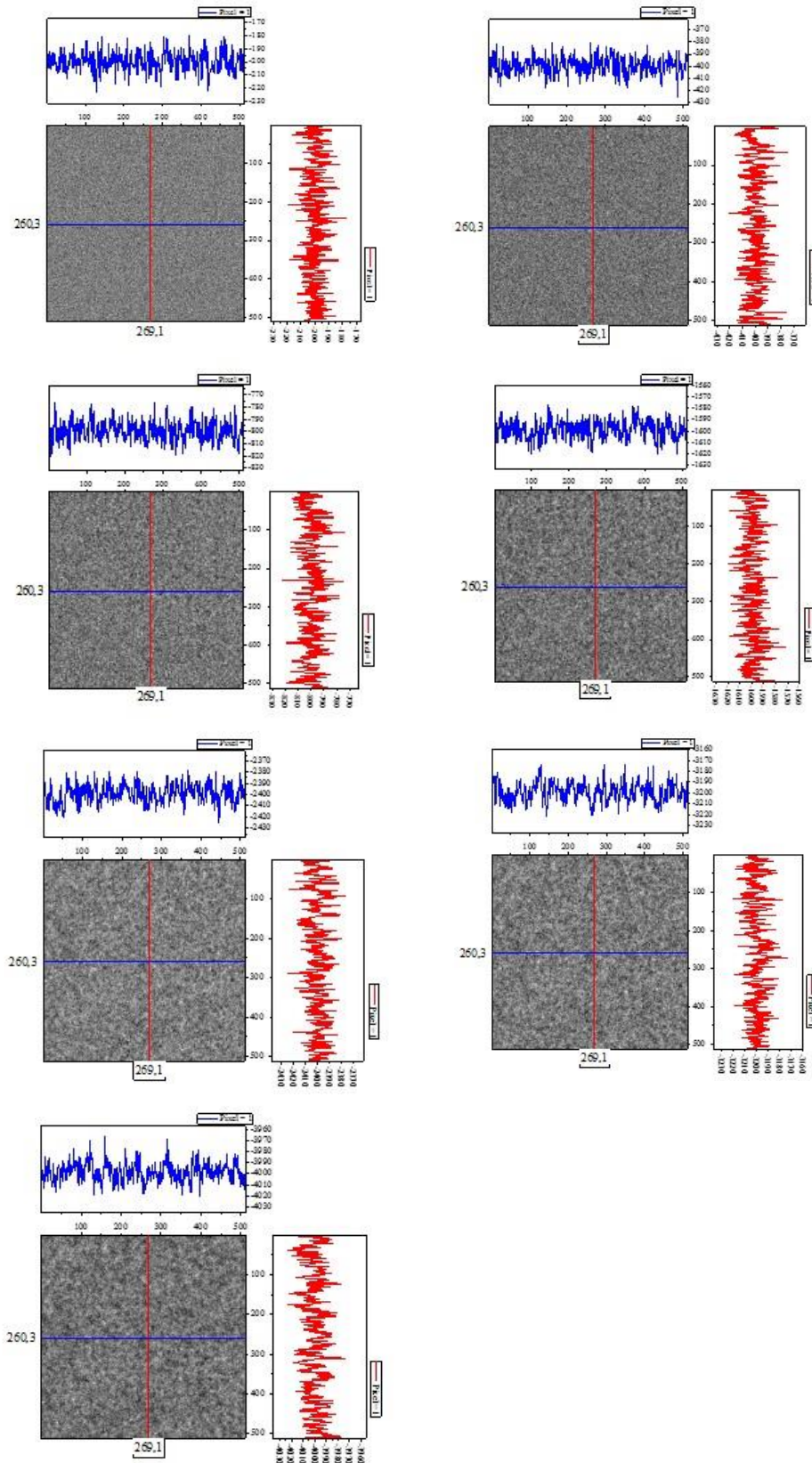
Γ: Παράλληλη εγχάραξη και απόθεση με και χωρίς το φαινόμενο της επαναπόθεσης, με βέβαιη προσκόλληση ιόντων

Σε αυτό το τμήμα του παραρτήματος, παρουσιάζονται αναλυτικά οι τέσσερις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και ενσωματώθηκαν στο κεφάλαιο 3.3.1.

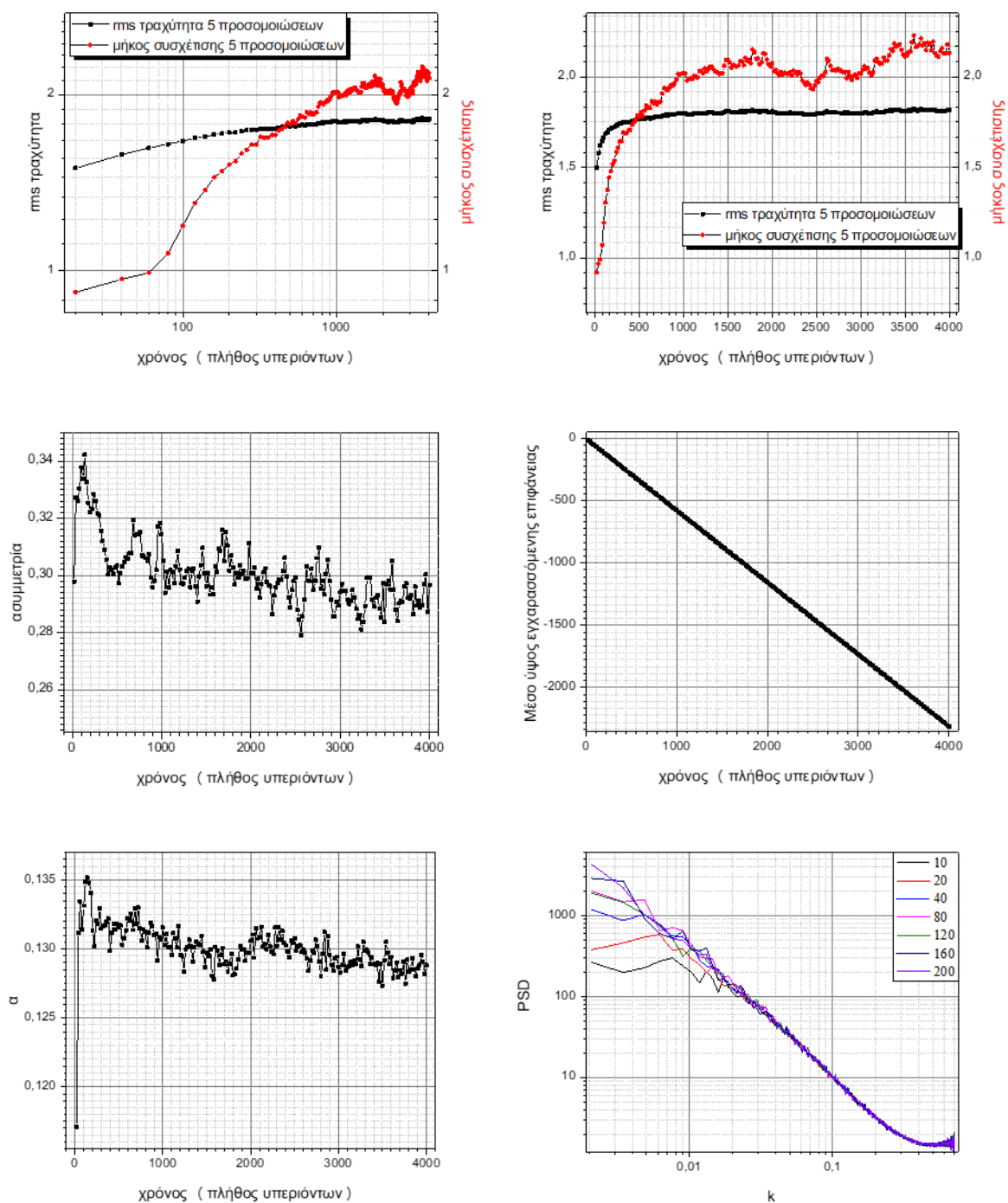
#009 (512x512, 5 runs, No redepo): $X_i=1$, $S_{sb, sb}=0$, $S_{i, sb}=1$, $EY_{i, sb}=1$, $EY_{sb, sb}=-1$



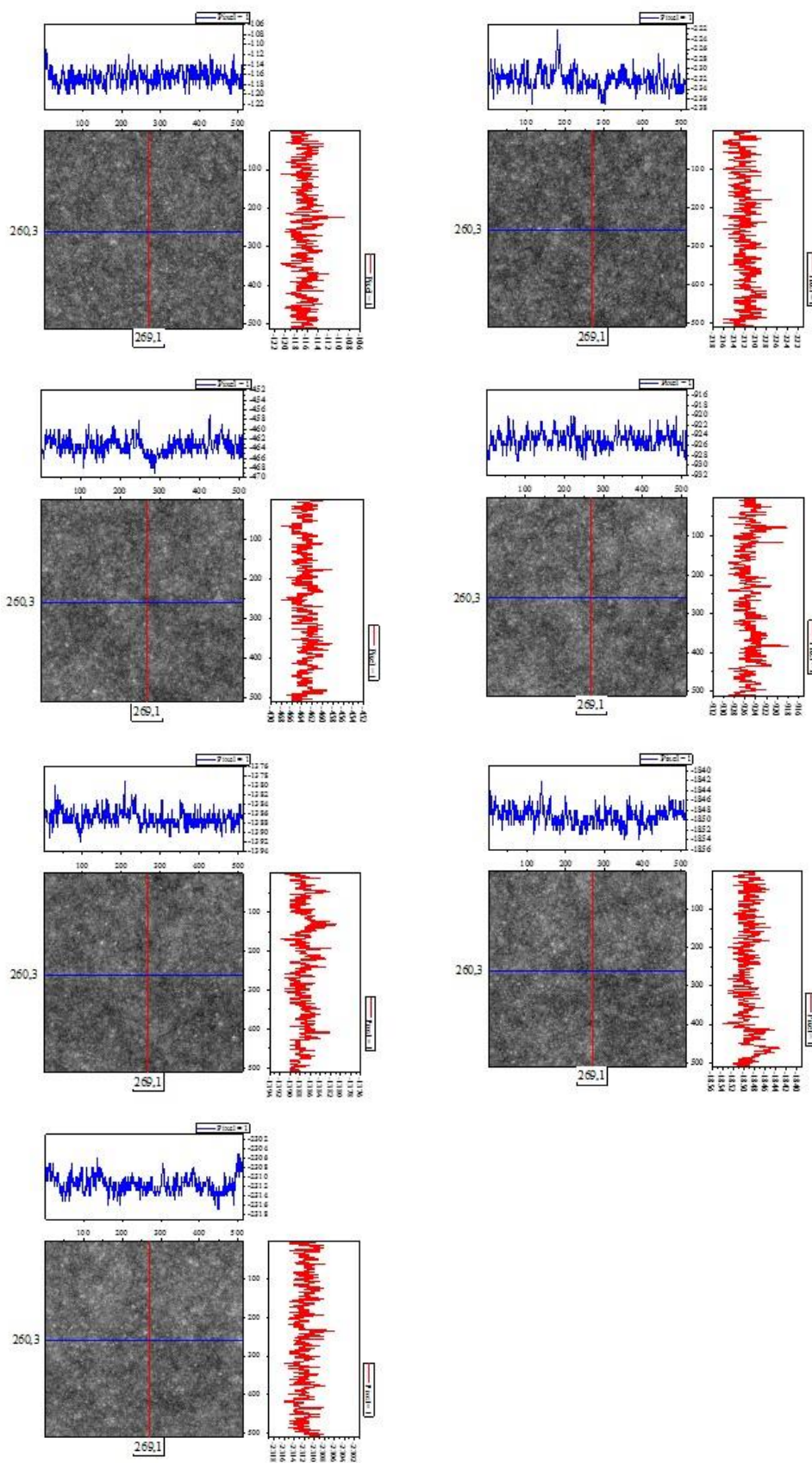
Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200



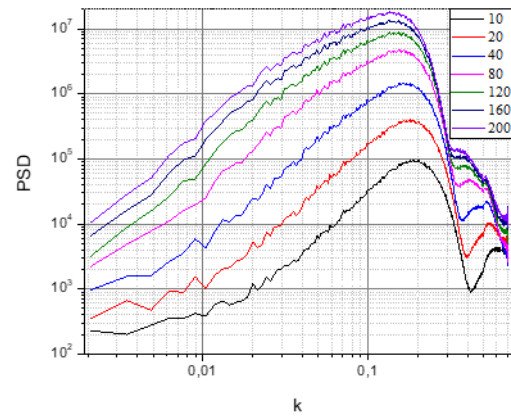
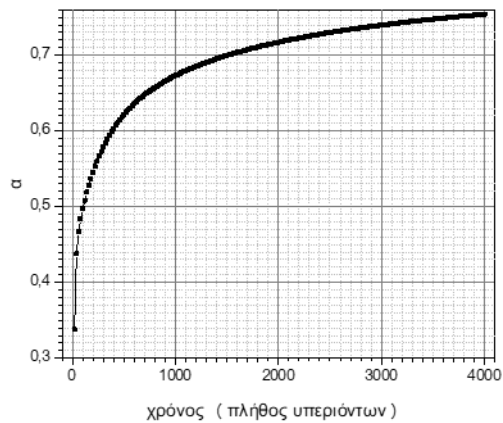
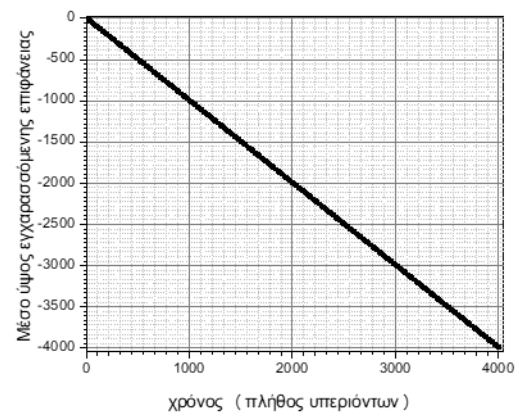
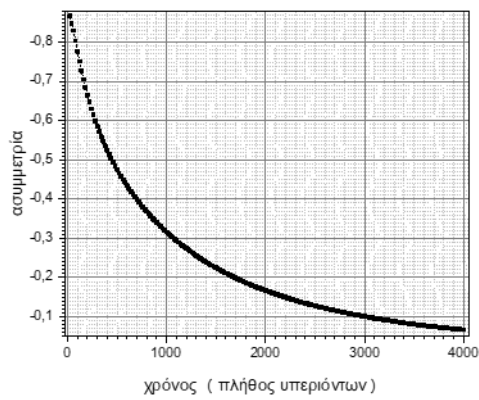
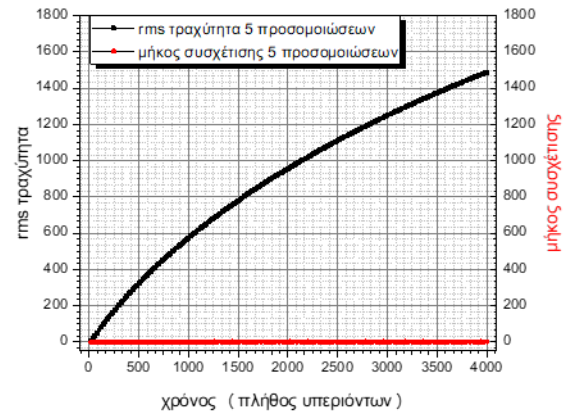
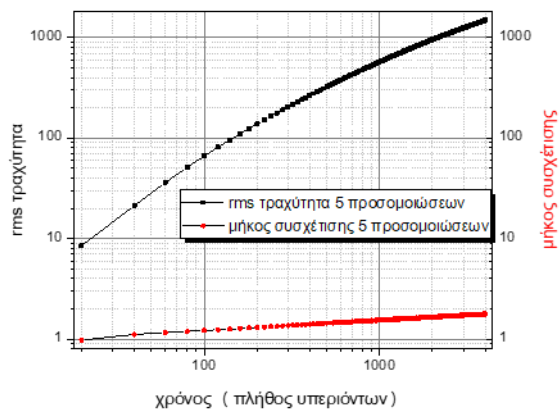
#013 (512x512, 5 runs, redepo): $X_i=1$, $S_{sb, sb}=1$, $S_{i, sb}=1$, $EY_{i, sb}=1$, $EY_{sb, sb}=-1$



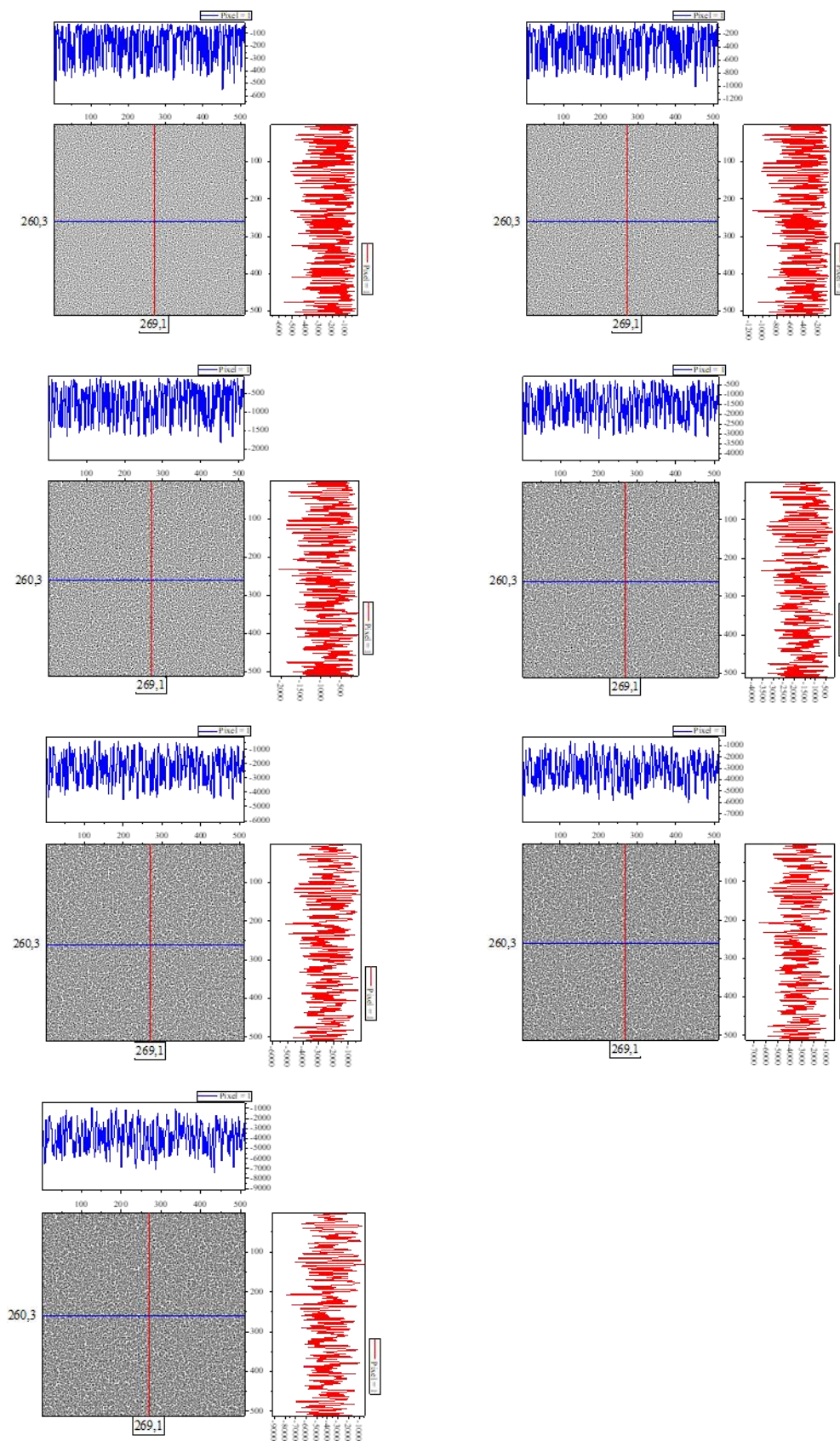
Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200



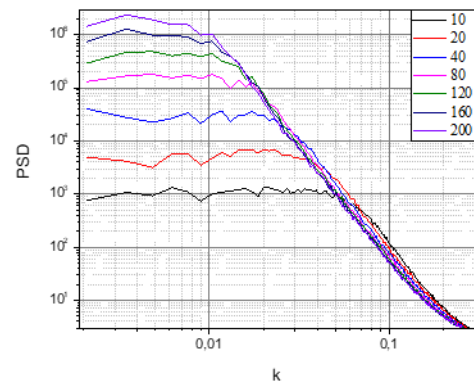
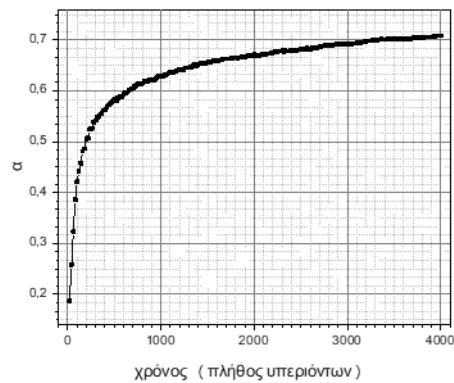
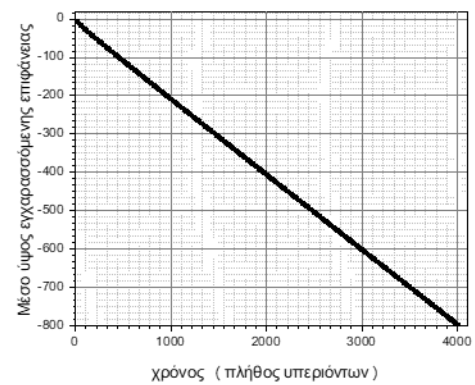
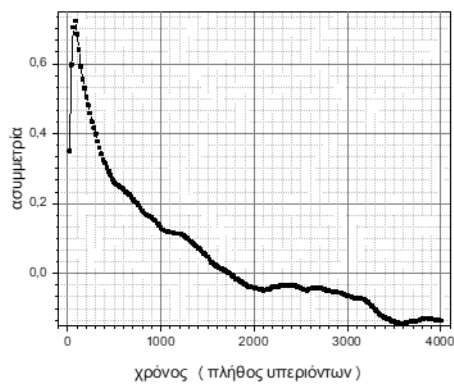
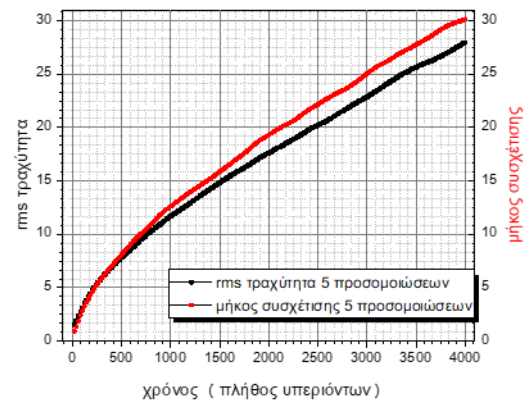
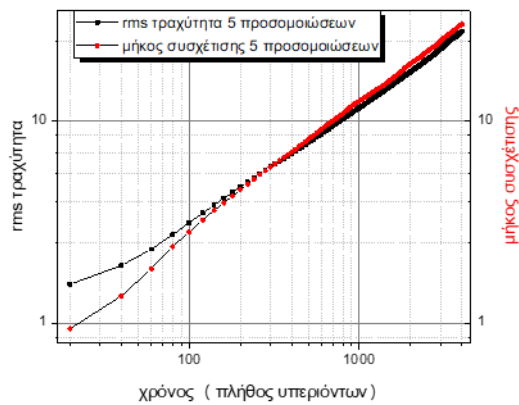
#014 (512x512, 5 runs): $X_i=1$, $S_{sb, sb} = 0$, $S_{i, sb} = \cos\theta$, $EY_{i, sb} = a.d.$, $EY_{sb, sb} = -1$



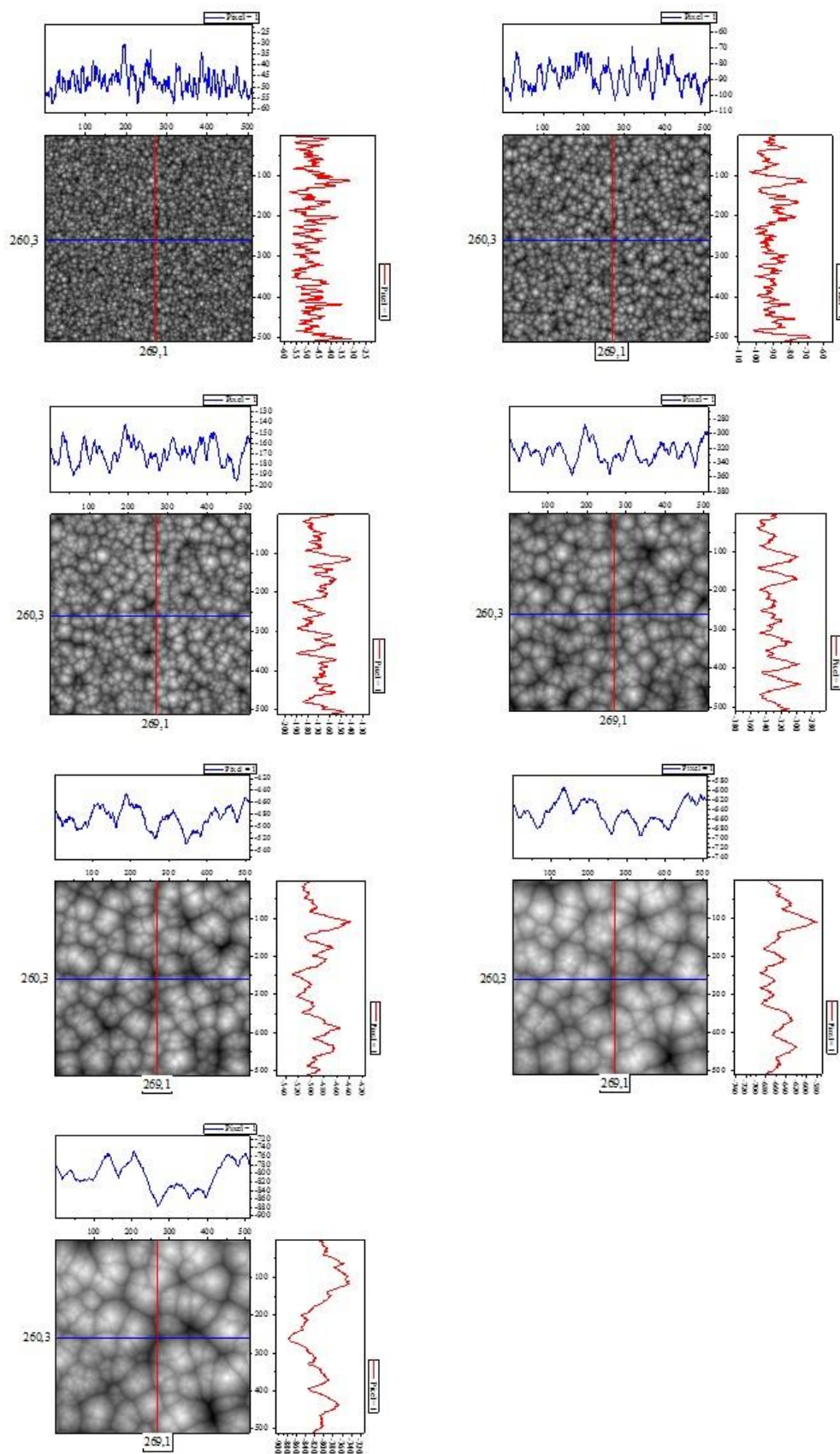
Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200



#015 (512x512, 5 runs, redepo): $X_i=1$, $S_{\text{sub, sub}}=1$, $S_{i, \text{sub}} = \cos\theta$, $EY_{i, \text{sub}}=a.d.$, $EY_{\text{sub, sub}}= -1$



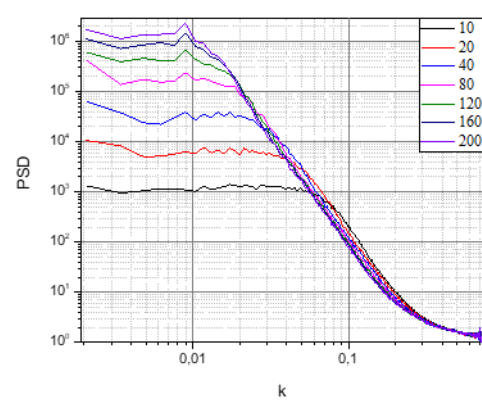
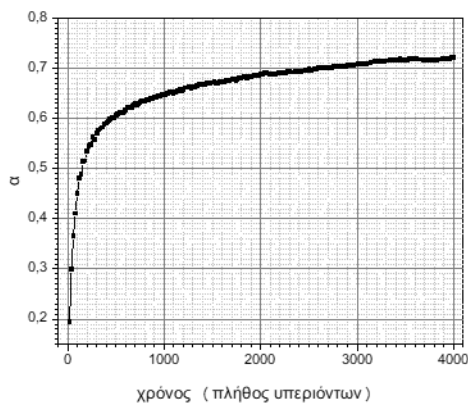
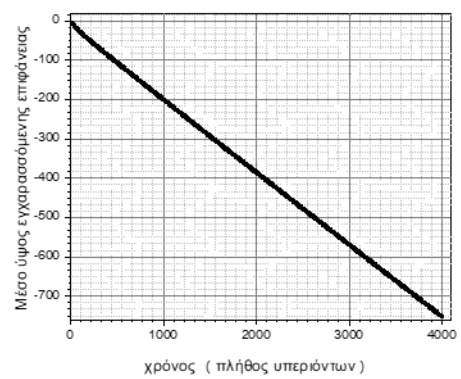
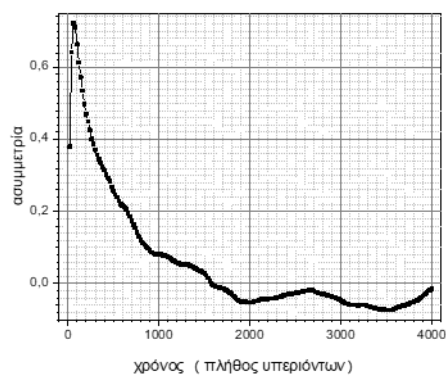
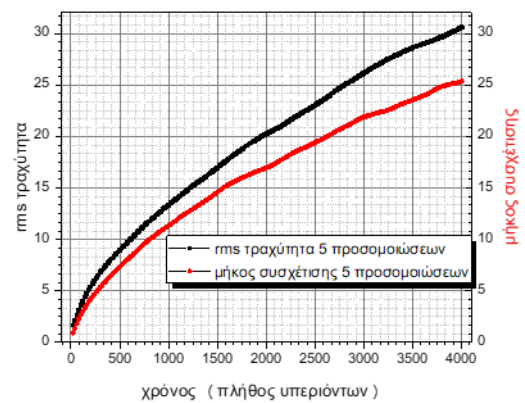
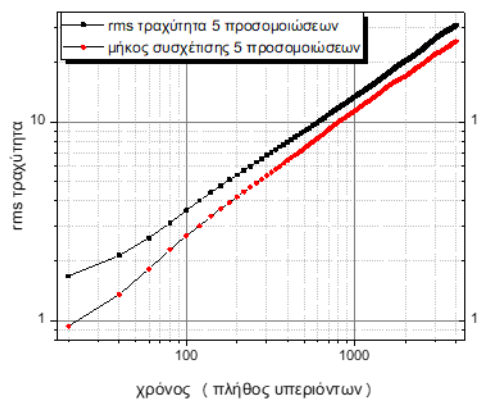
Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200



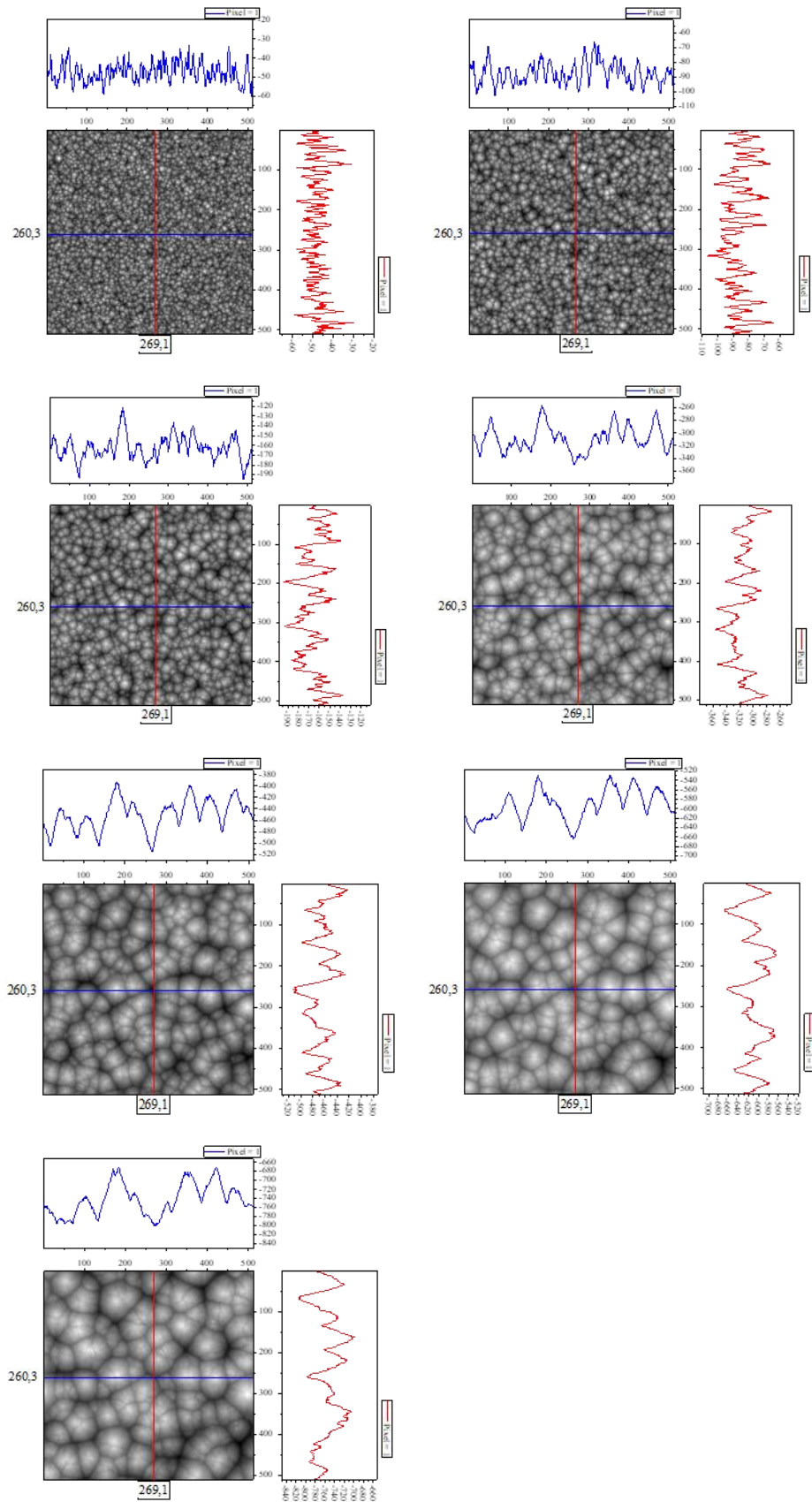
Δ: Παράλληλη εγχάραξη και απόθεση με και χωρίς το φαινόμενο της επαναπόθεσης, με μη βέβαιη προσκόλληση ιόντων

Σε αυτό το τμήμα του παραρτήματος, παρουσιάζονται αναλυτικά οι προσομοιώσεις των run που πραγματοποιήθηκαν και ενσωματώθηκαν στο κεφάλαιο 3.3.2, εκτός των περιπτώσεων των run 014 – 015 που συμπεριλήφθηκαν στο μέρος Γ του παραρτήματος. Σημειώνεται, ότι στα διαγράμματα που απεικονίζουν την φασματική πυκνότητα ισχύος, κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετική χρονική στιγμή της διαδικασίας εγχάραξης.

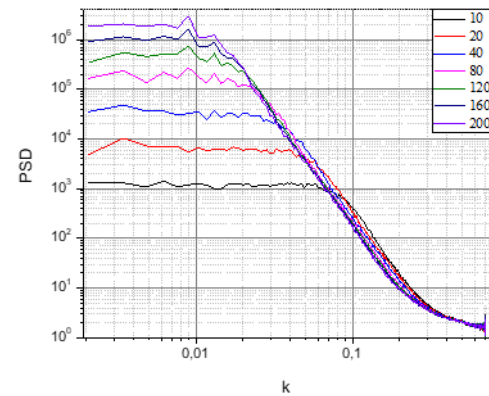
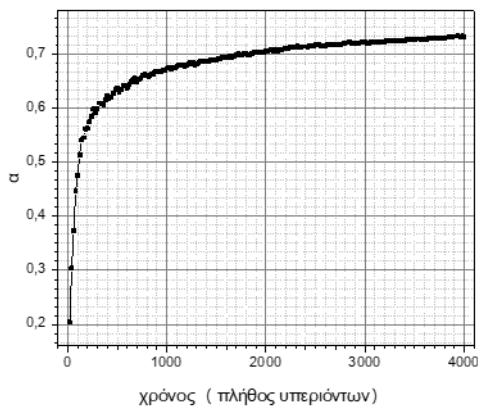
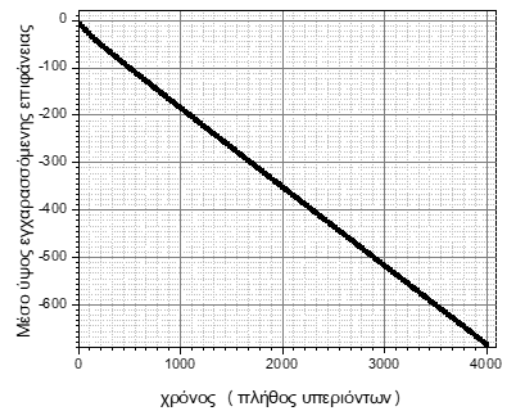
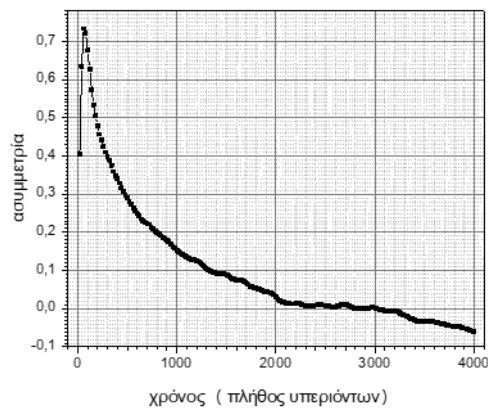
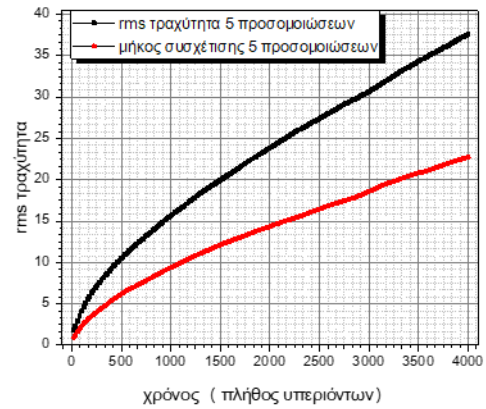
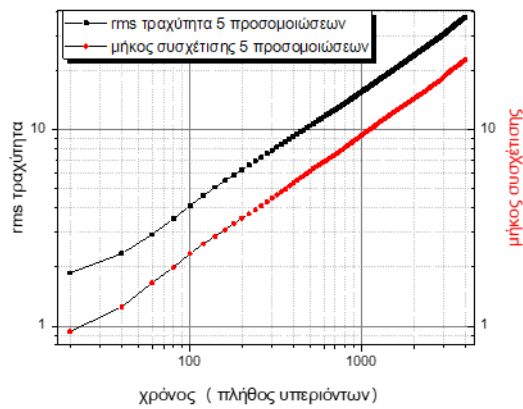
#016 (512x512, 5 runs, redepo): $X_i=1$, $S_{sub,sub}=0.75$, $S_{i,sub}=\cos\theta$, $EY_{i,sub}=a.d.$, $EY_{sub,sub}=-1$



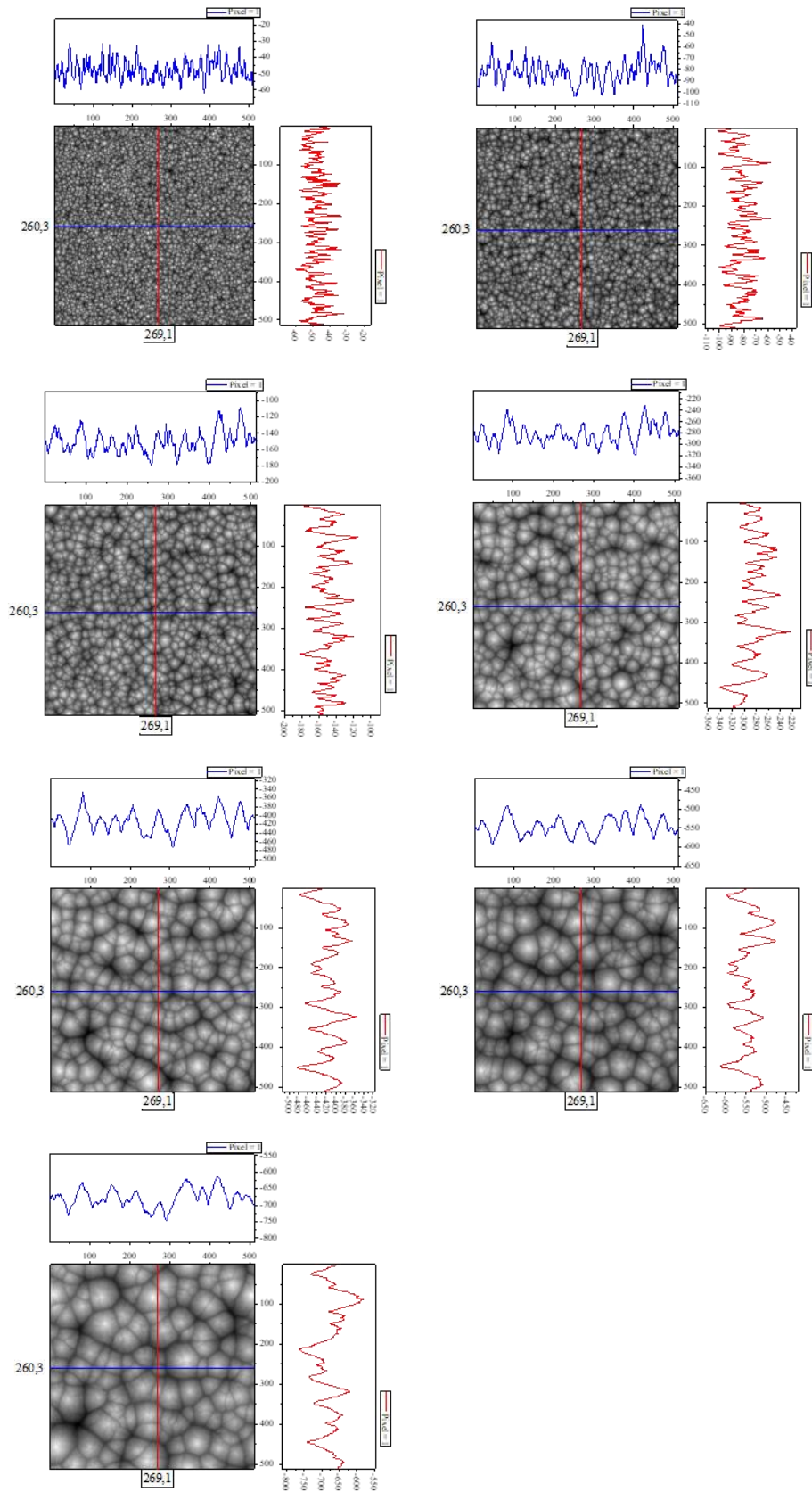
Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200



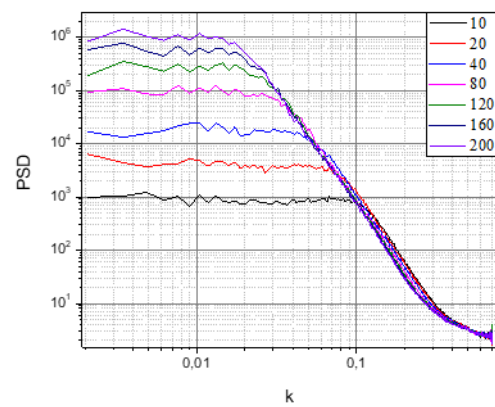
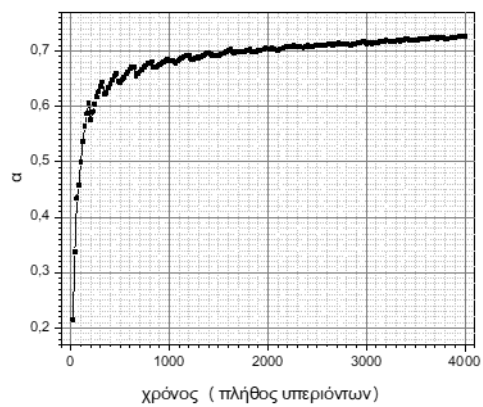
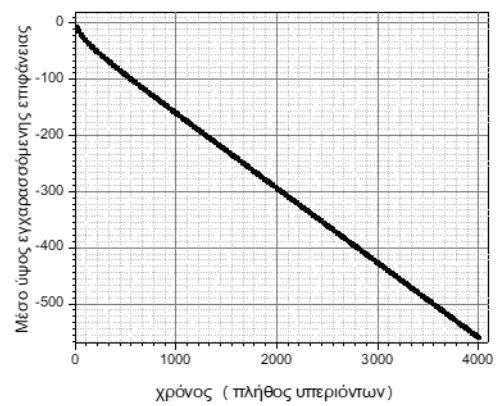
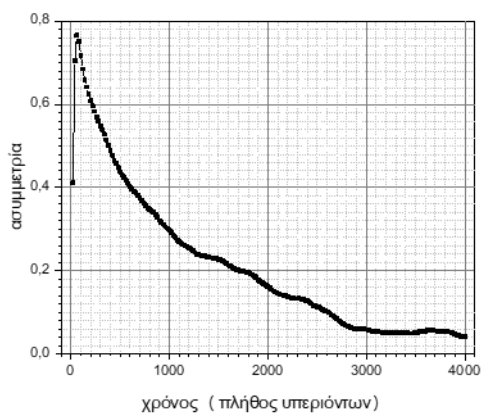
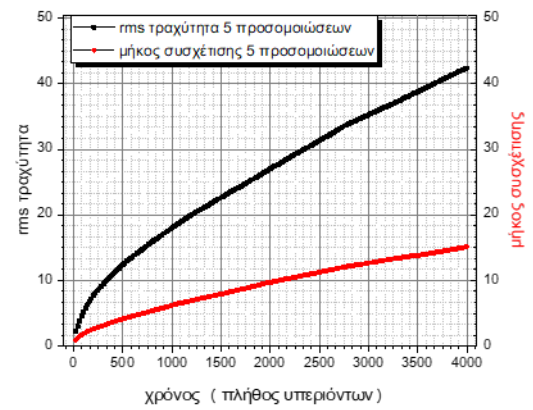
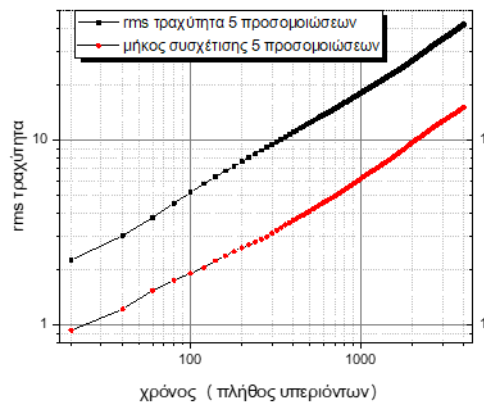
#017 (512x512, 5 runs, redepo): $X_i=1$, $S_{\text{sub, sub}}=0.5$, $S_{i, \text{sub}} = \cos\theta$, $EY_{i, \text{sub}}=a.d.$, $EY_{\text{sub, sub}}= -1$



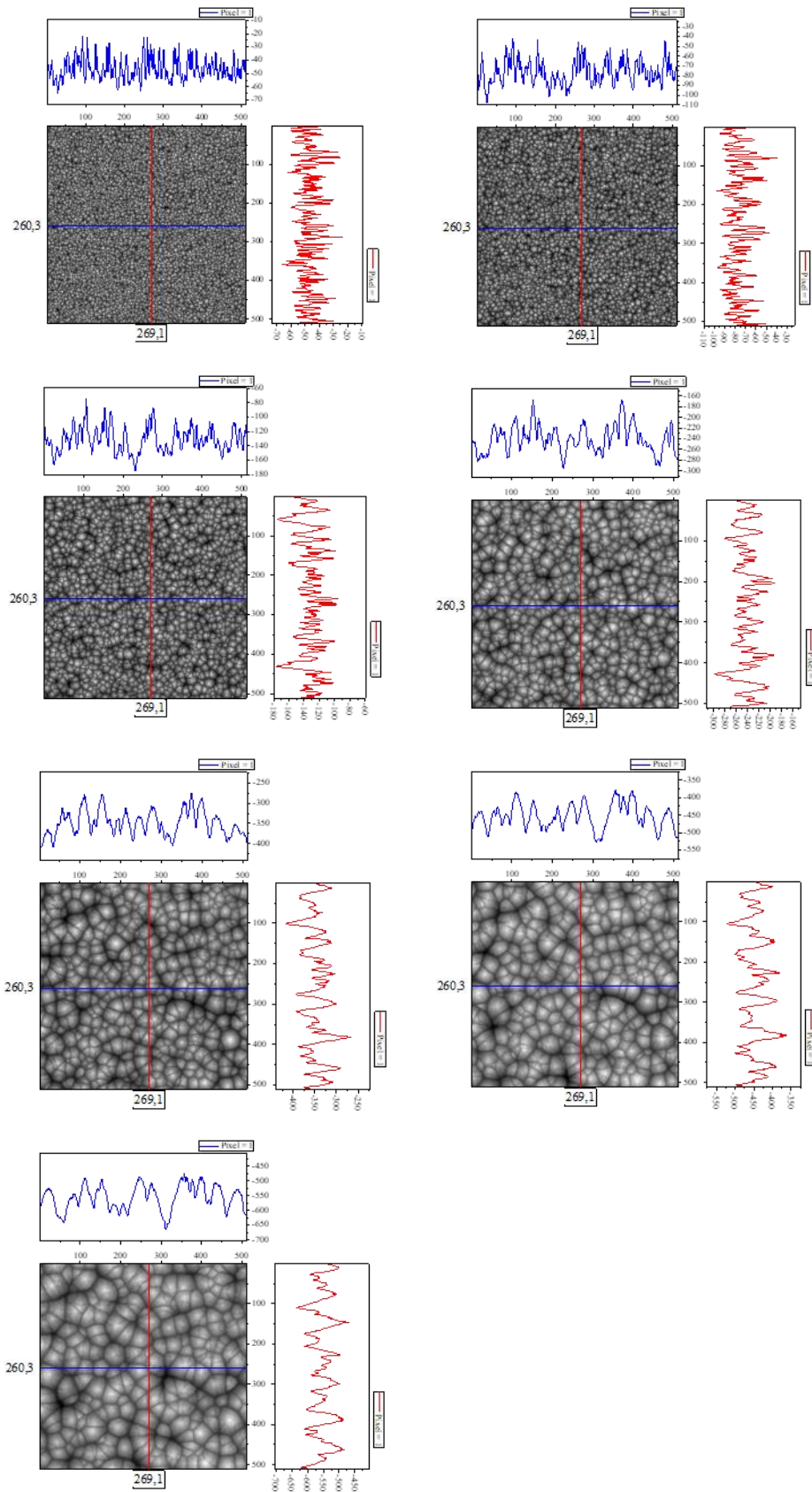
Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200



#018 (512x512, 5 runs, redepo): $X_i=1$, $S_{sub,sub}=0.25$, $S_{i,sub}=\cos\theta$, $EY_{i,sub}=a.d.$, $EY_{sub,sub}=-1$



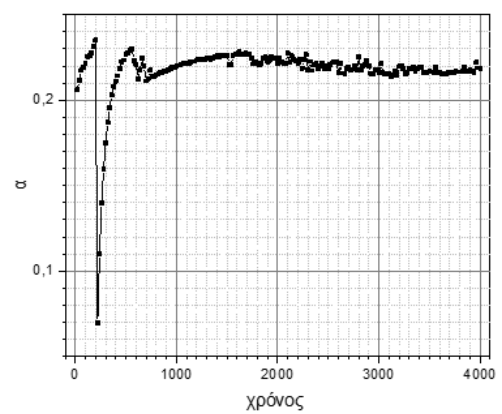
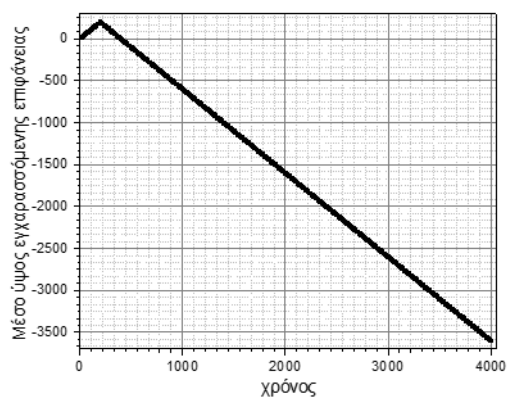
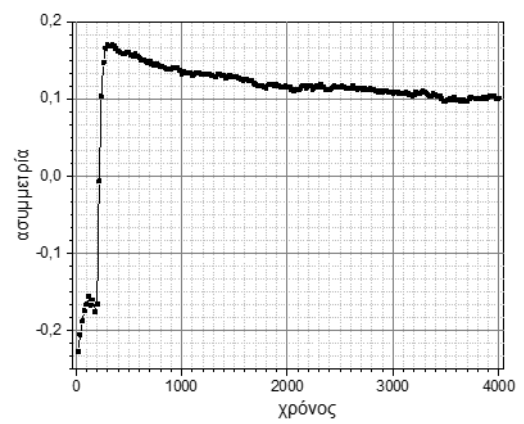
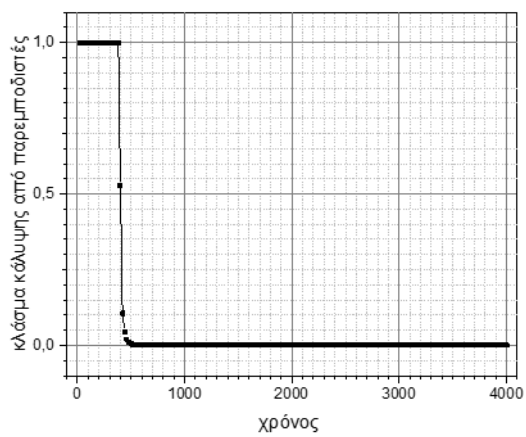
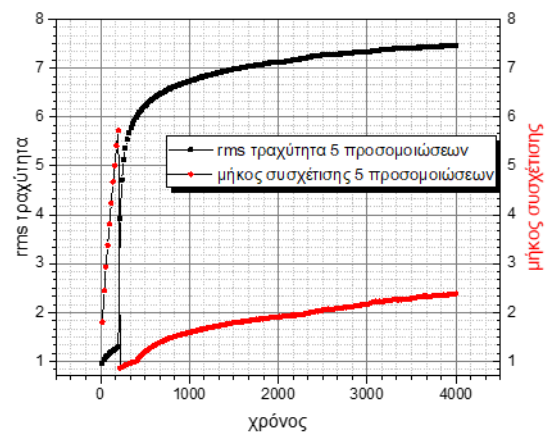
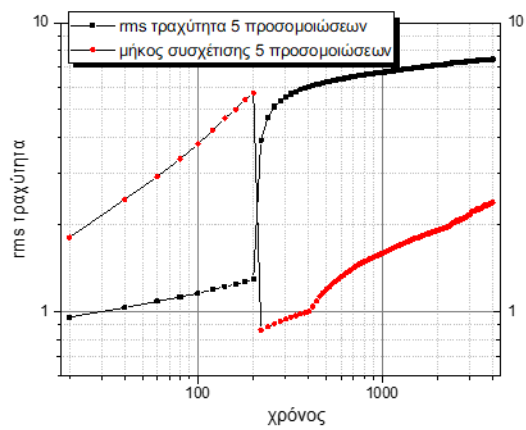
Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

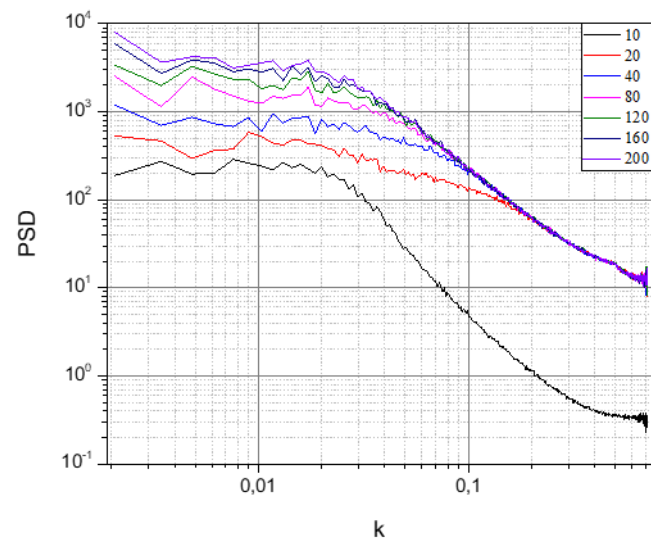


Ε: Σειριακή εγχάραξη και απόθεση με διαφορετικό αριθμό κύκλων εγχάραξης ιόντων - απόθεσης παρεμποδιστών

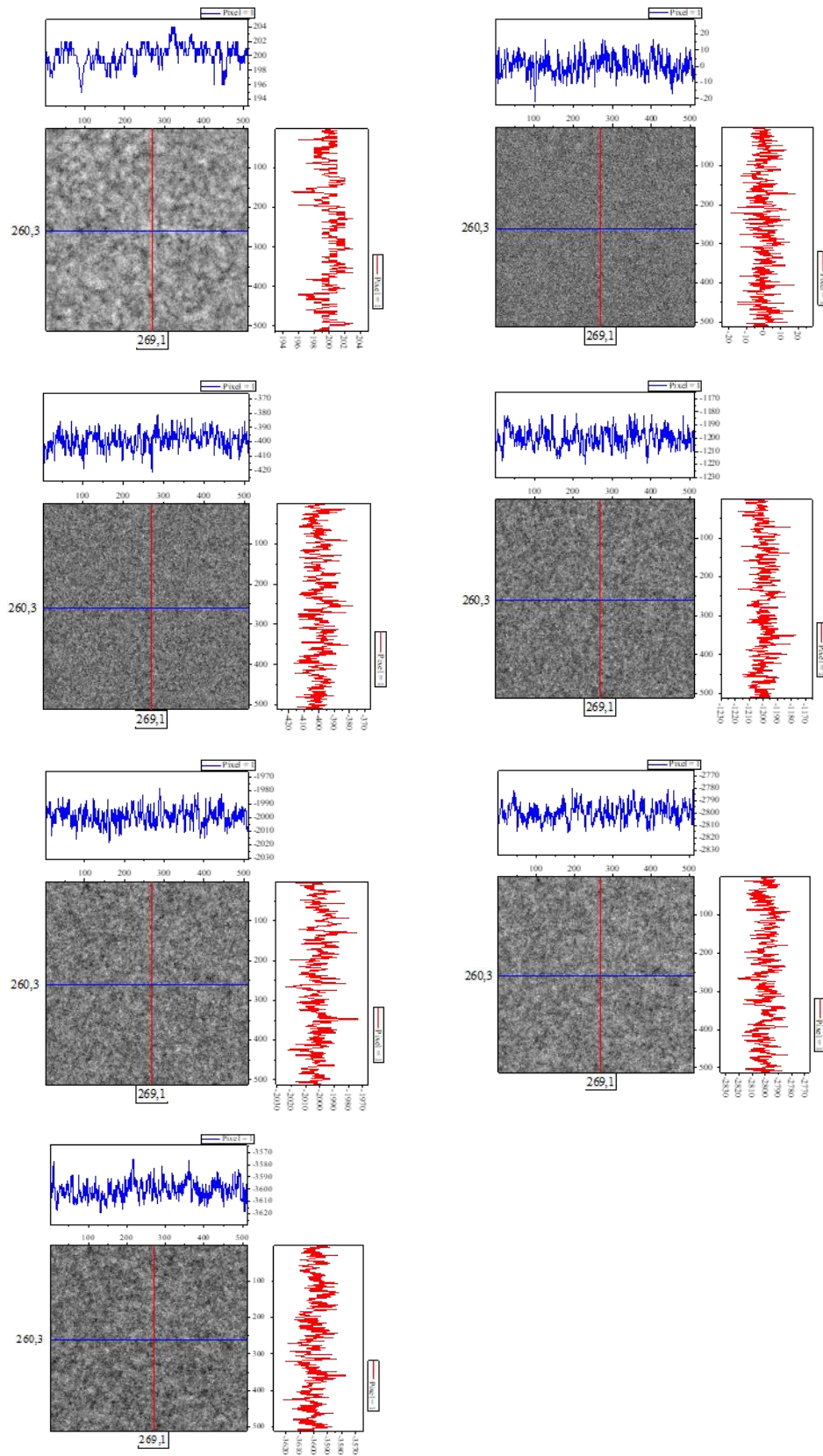
Σε αυτό το τμήμα του παραρτήματος, παρουσιάζονται αναλυτικά οι οκτώ προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν και ενσωματώθηκαν στο κεφάλαιο 3.4.1. Σημειώνεται, ότι τα διαγράμματα που αφορούν την περίπτωση του run 001 παραλείπονται καθώς υπάρχουν στο μέρος του παραρτήματος Α.

#019 (512x512, 5 runs, 1 cycle): $X_d=0.050$, $S_{d, sb}=1$, $X_i=0.950$, $S_{d, d}=1$

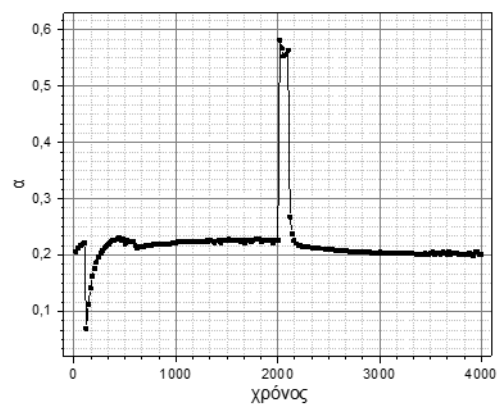
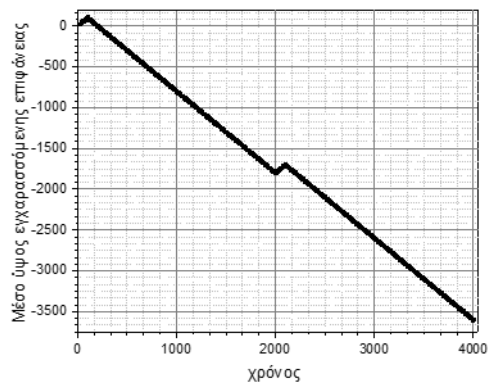
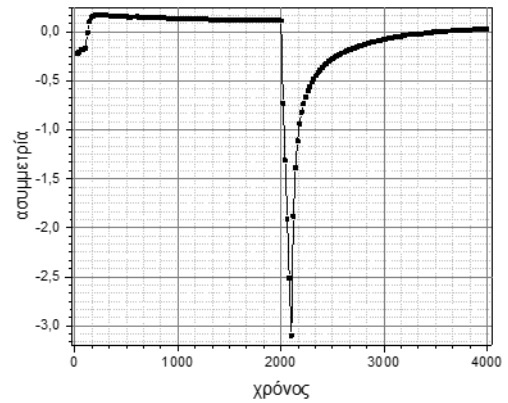
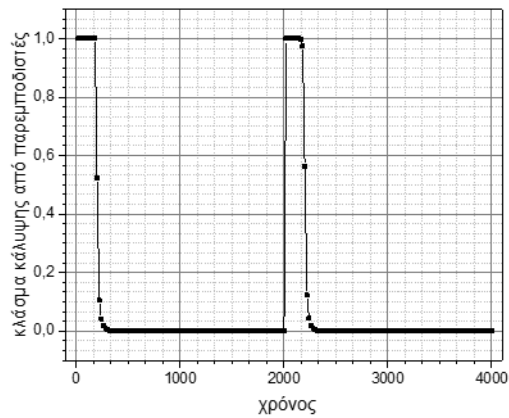
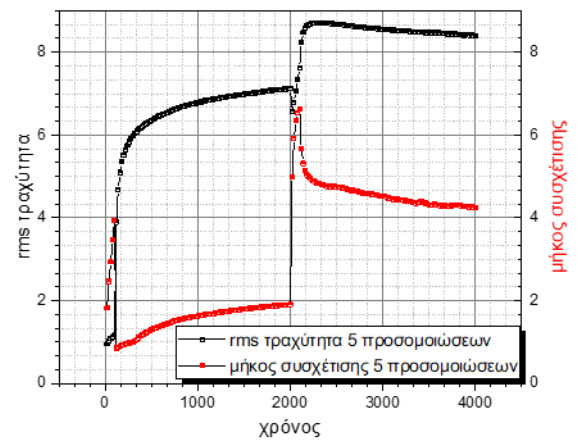
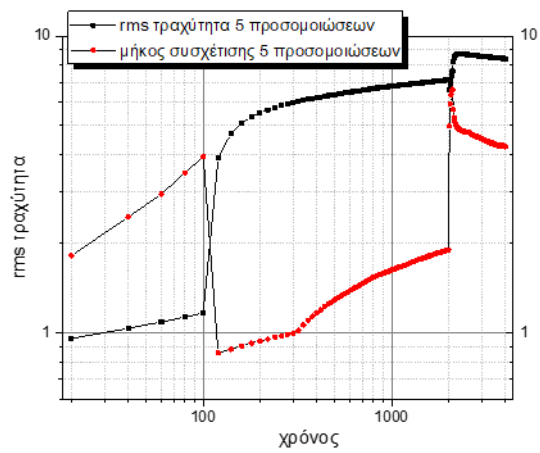


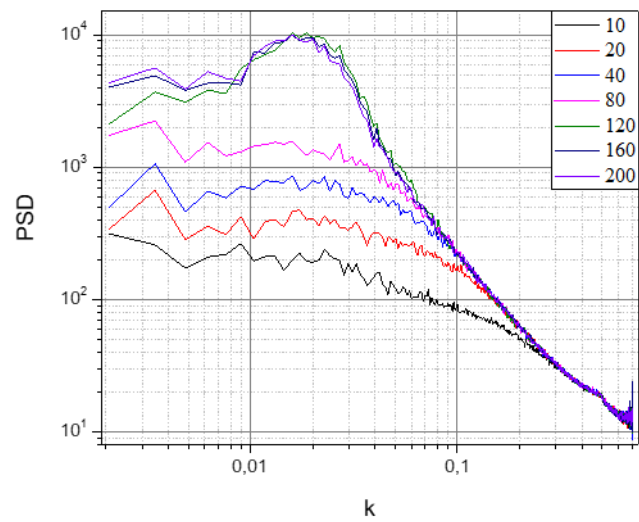


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

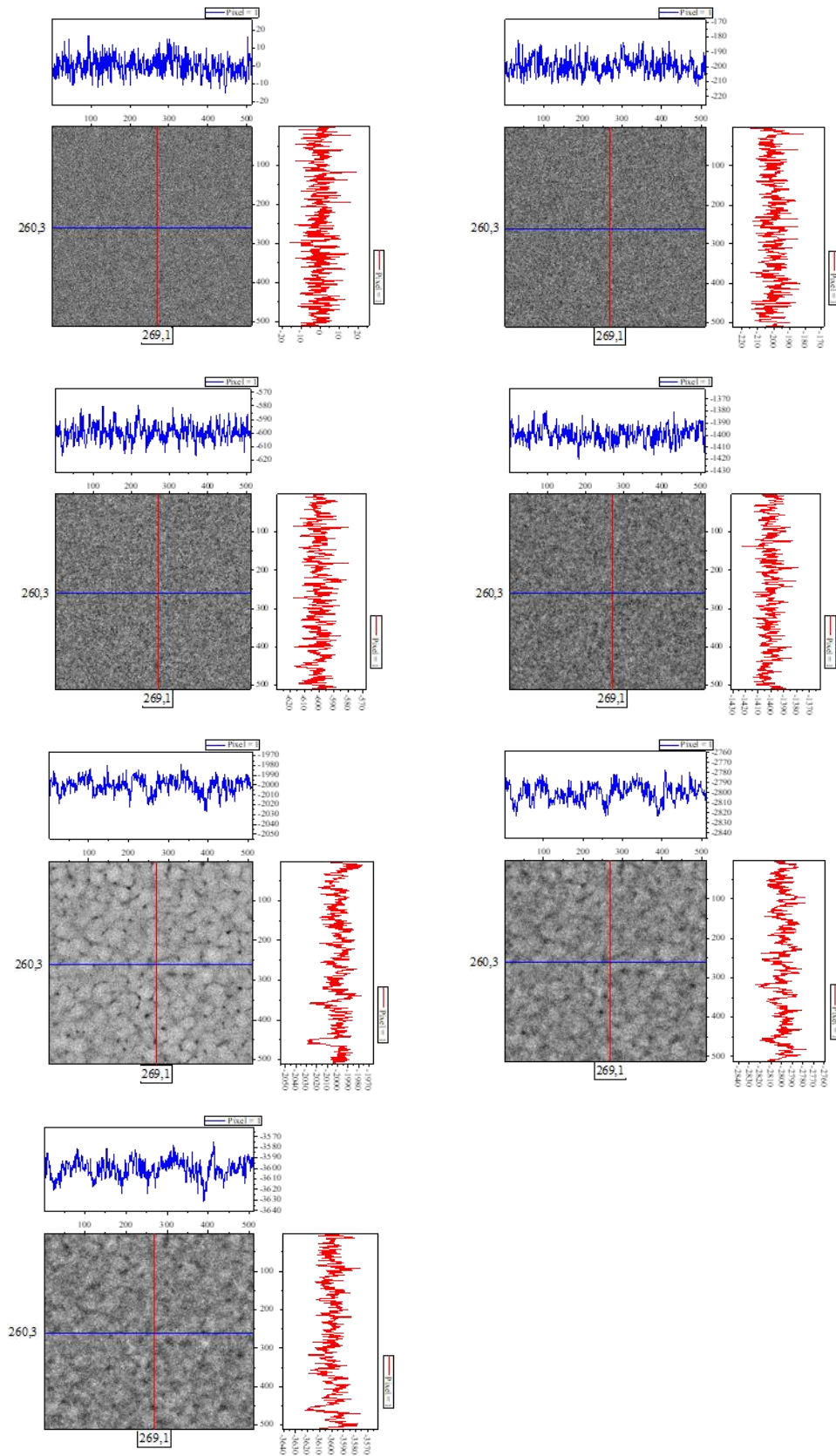


#020 (512x512, 5 runs, 2 cycles): $X_d=0.050$, $S_{d, sb}=1$, $X_i=0.950$, $S_{d, d}=1$

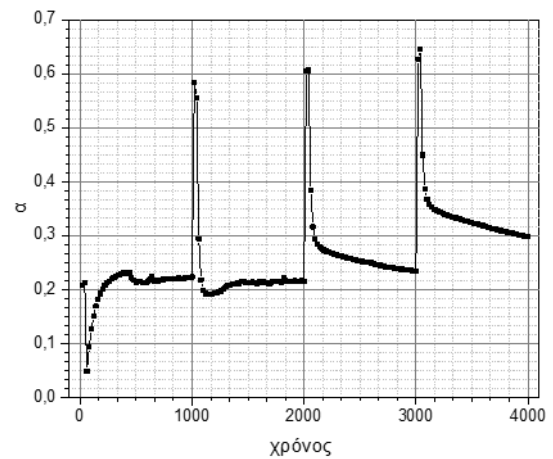
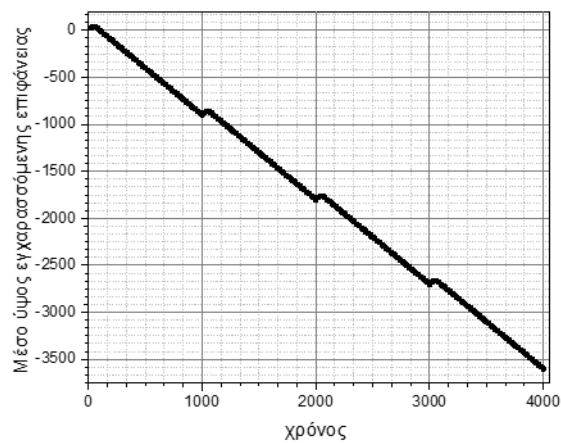
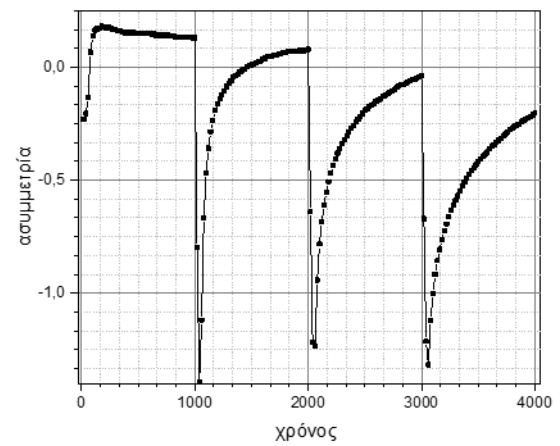
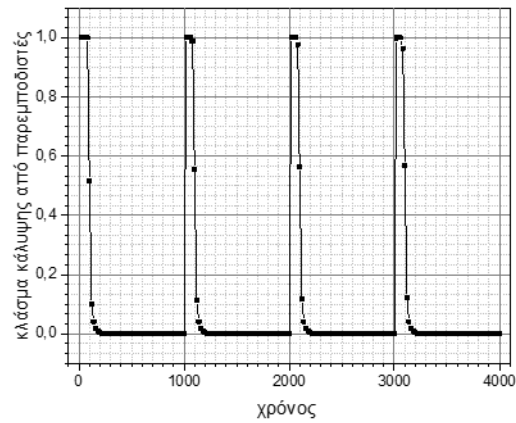
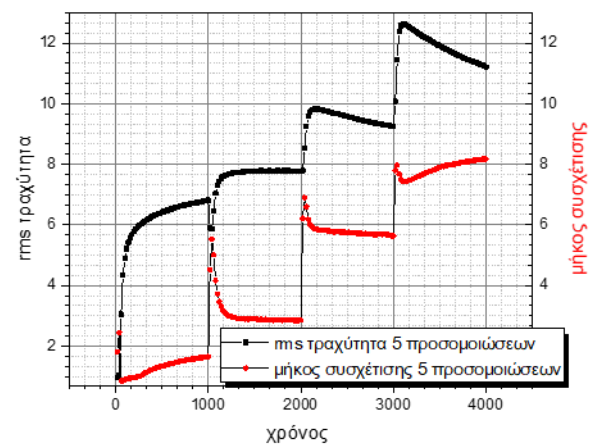
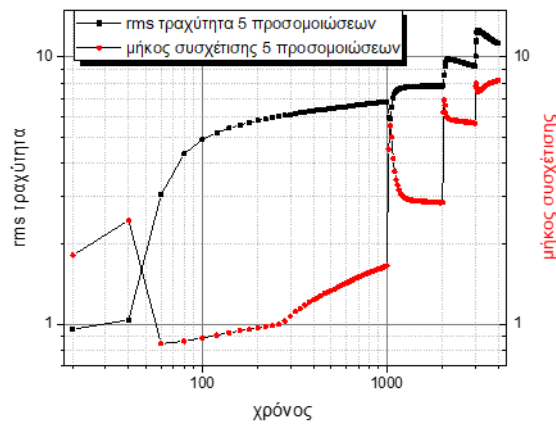


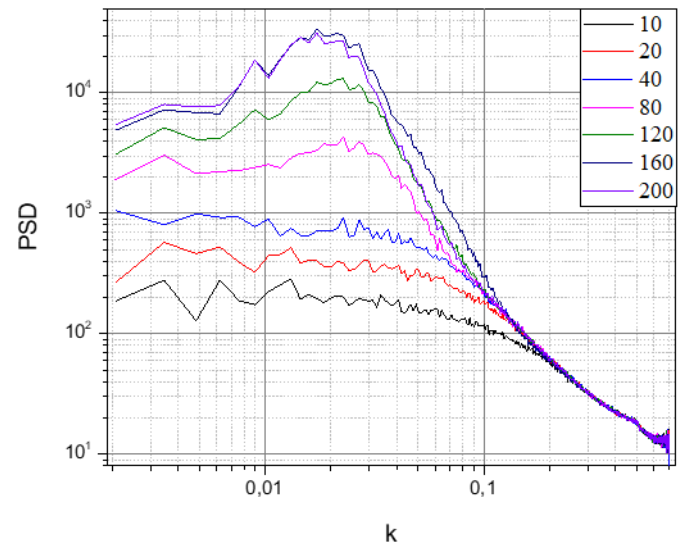


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

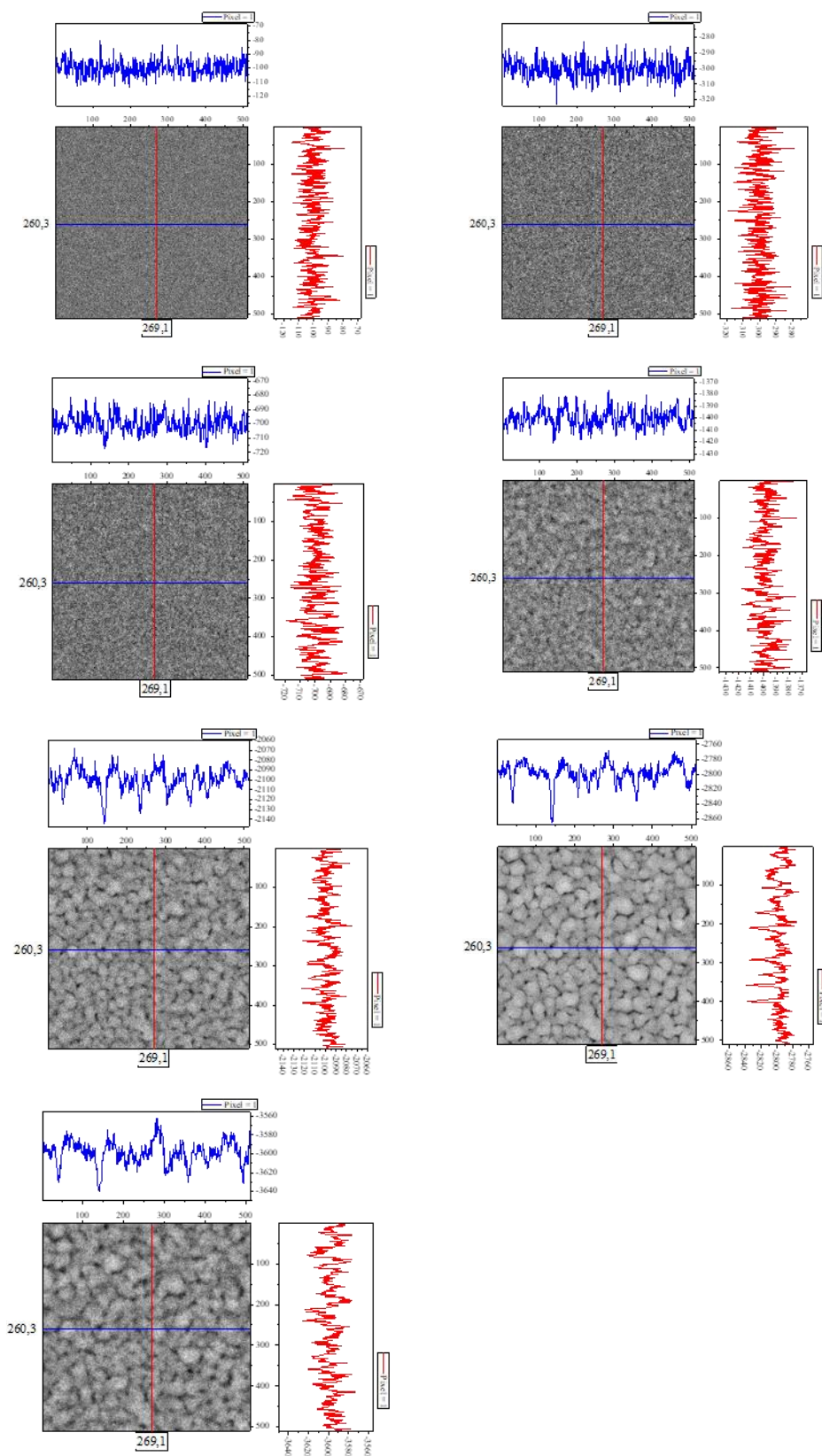


#021 (512x512, 5 runs, 4 cycles): $X_d=0.050$, $S_{d, sb}=1$, $X_i=0.950$, $S_{d, d}=1$

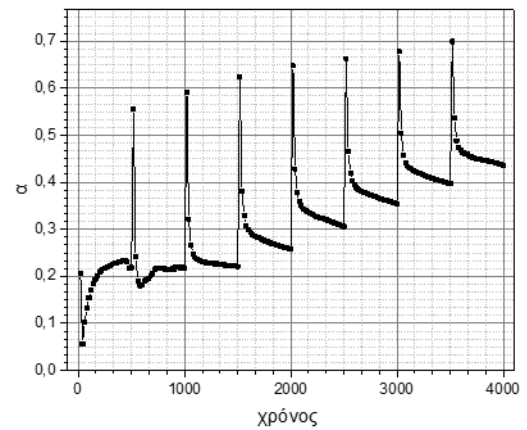
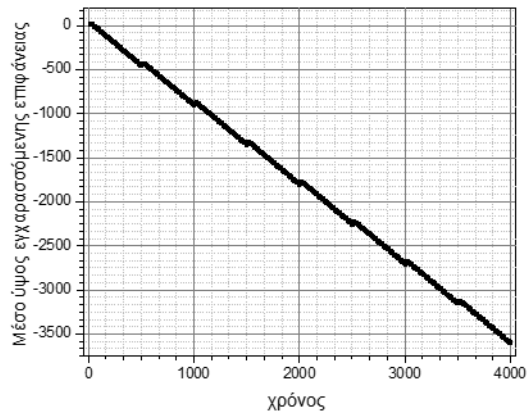
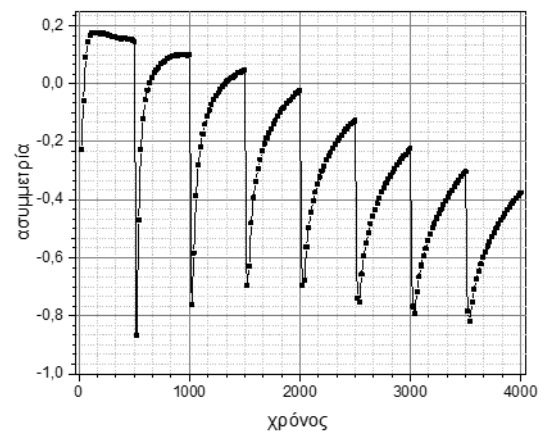
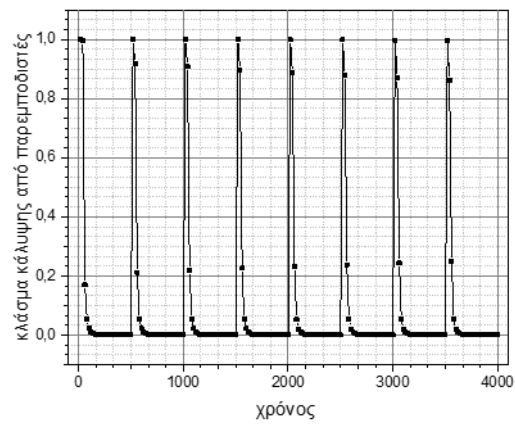
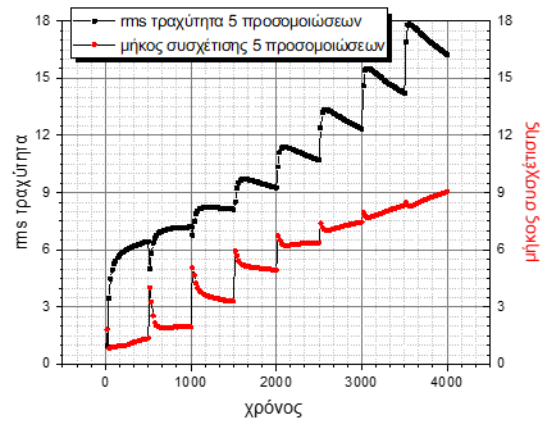
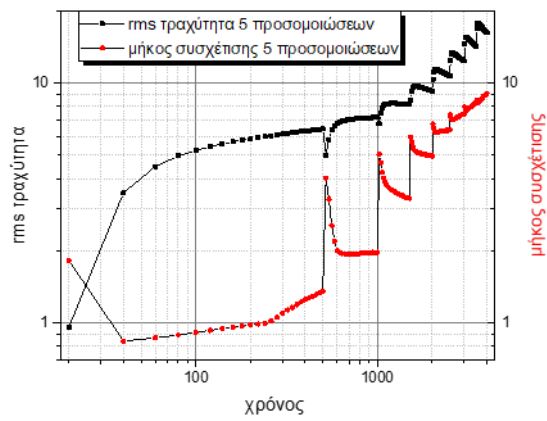


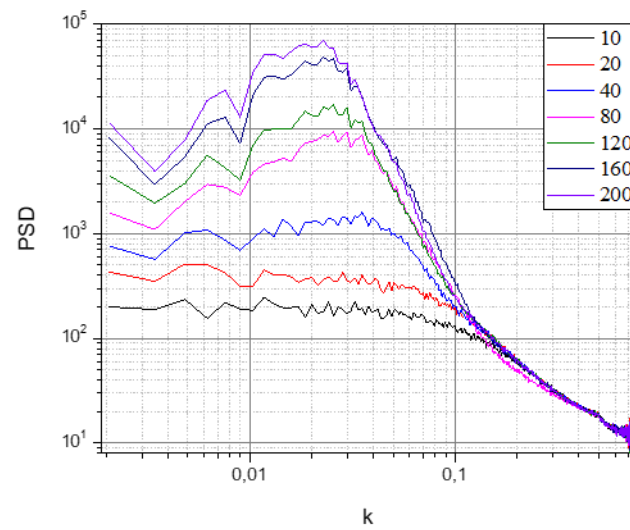


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

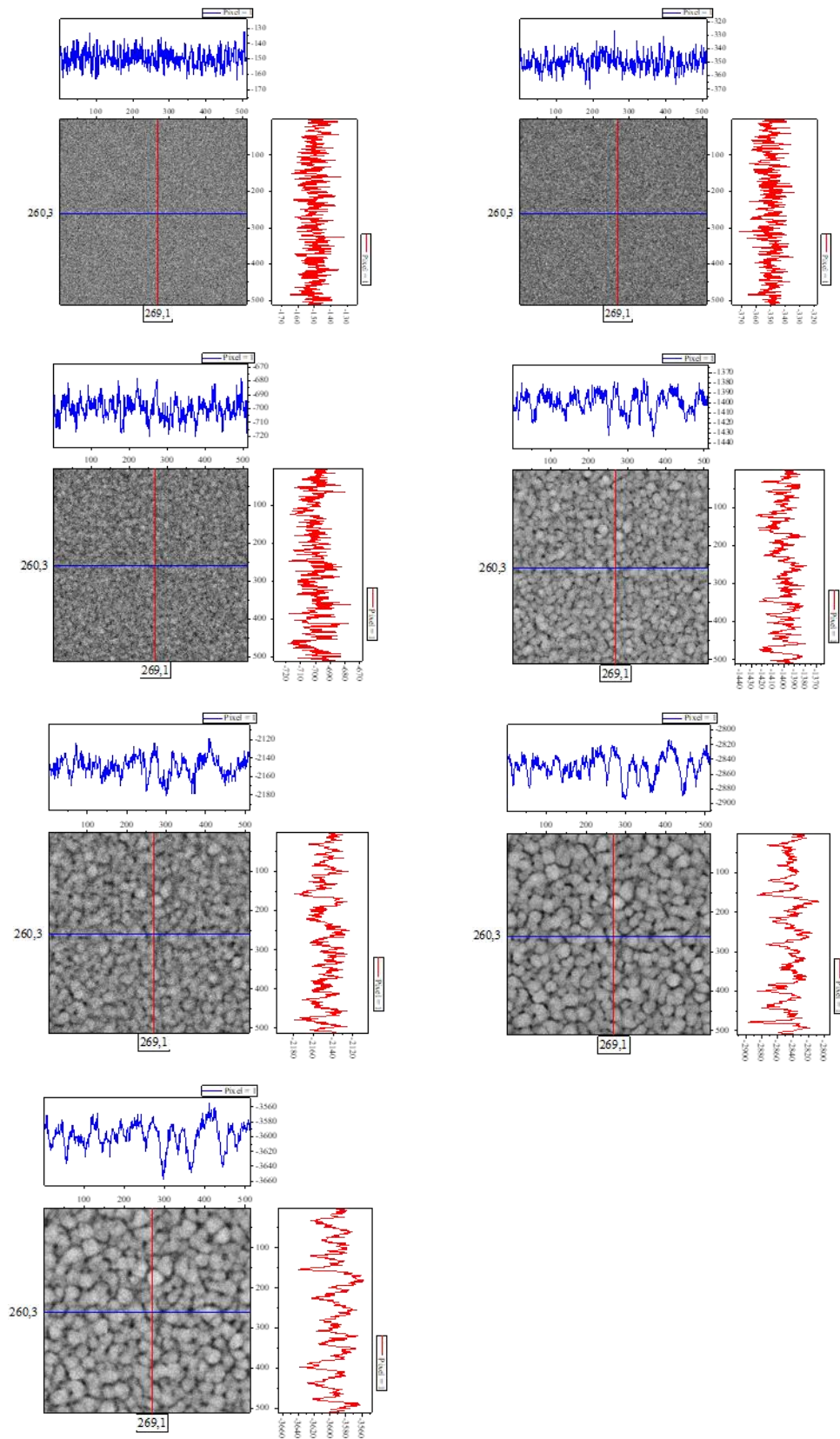


#022 (512x512, 5 runs, 8 cycles): $X_d=0.050$, $S_{d, sb}=1$, $X_i=0.950$, $S_{d, d}=1$

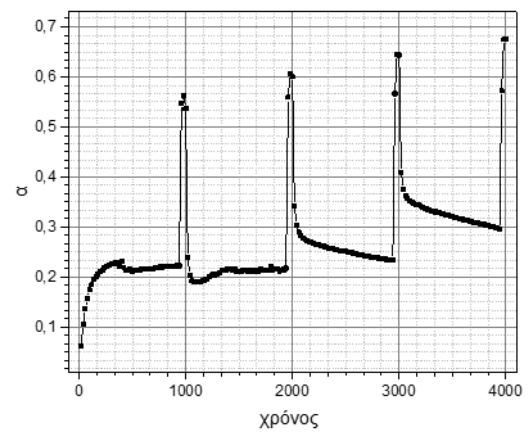
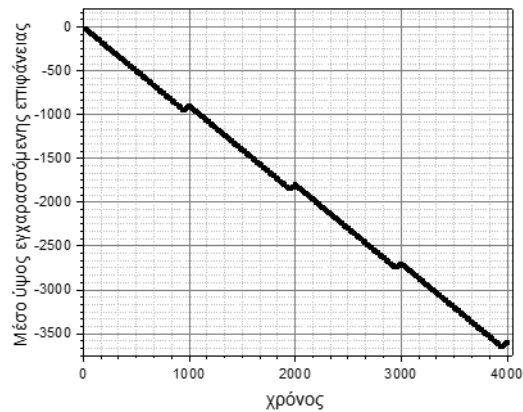
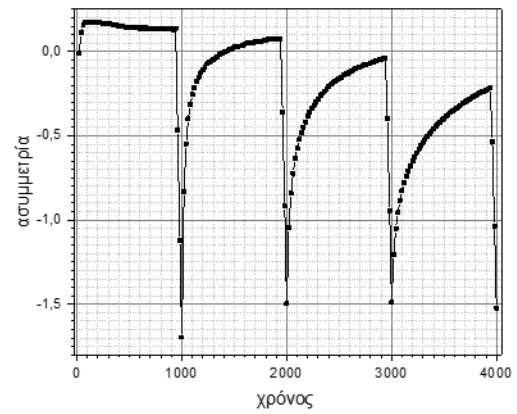
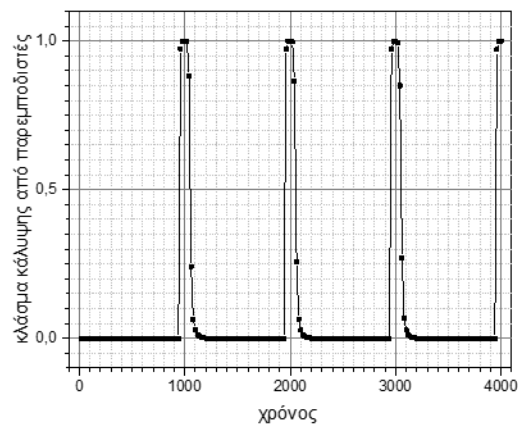
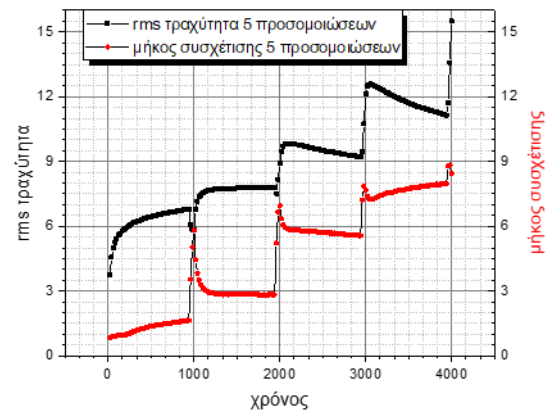
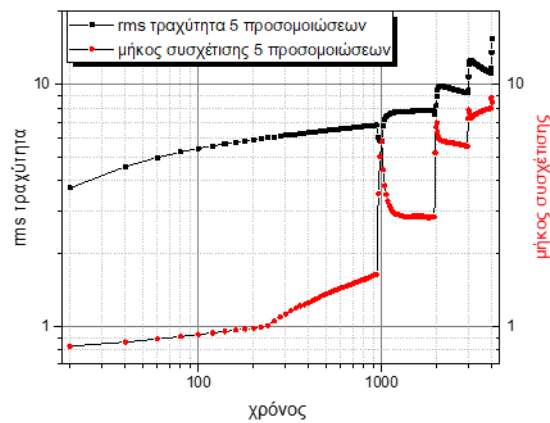


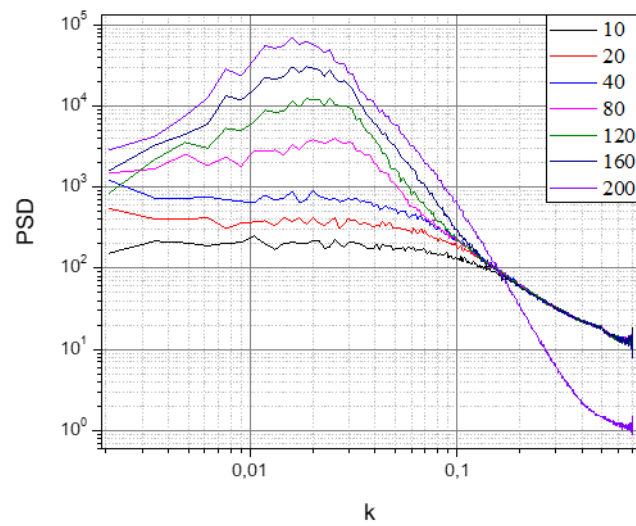


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

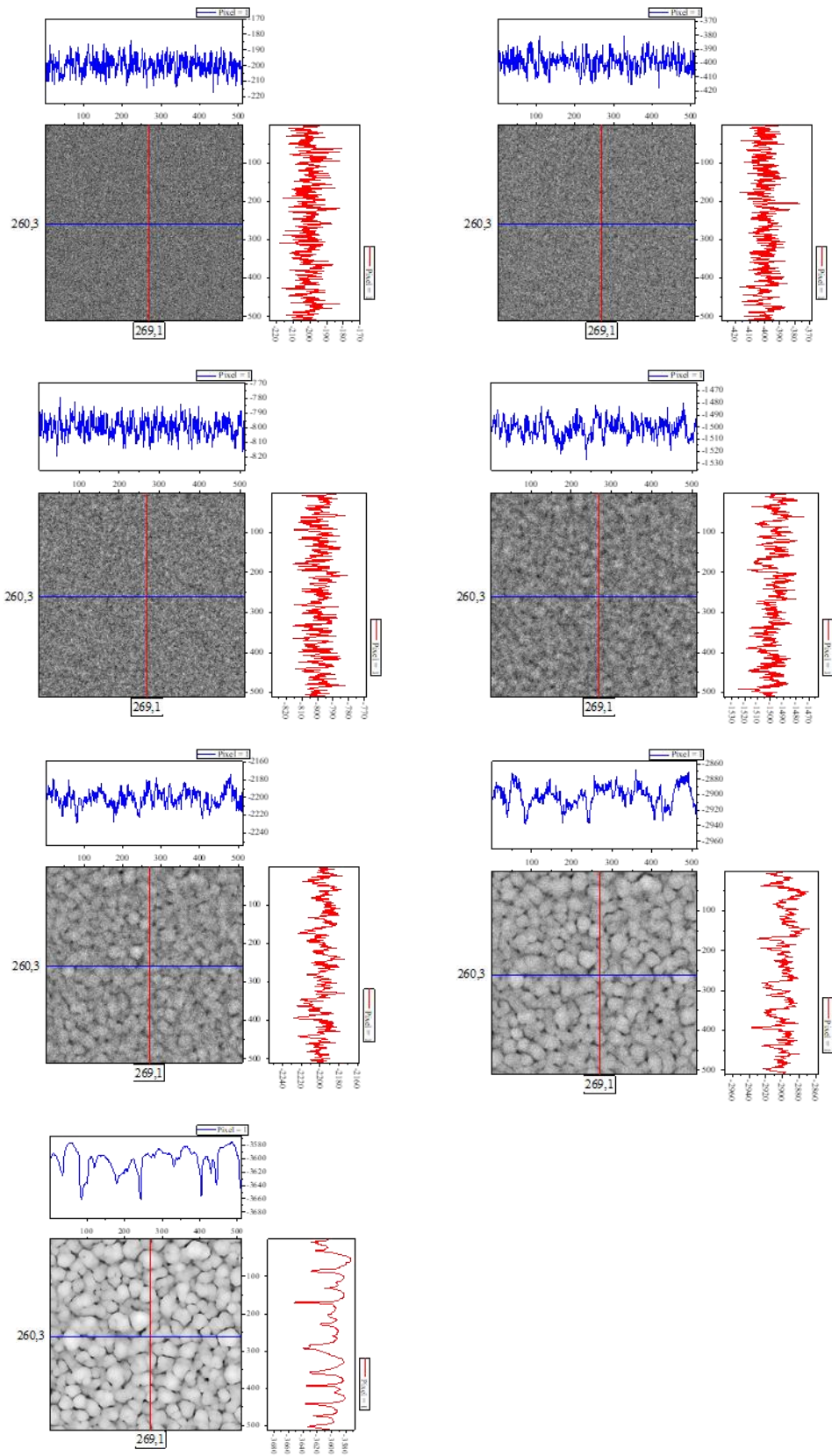


#023 (512x512, 5 runs, 4 cycles): $X_d=0.050$, $S_{d, sb}=1$, $X_i=0.950$, $S_{d, d}=1$

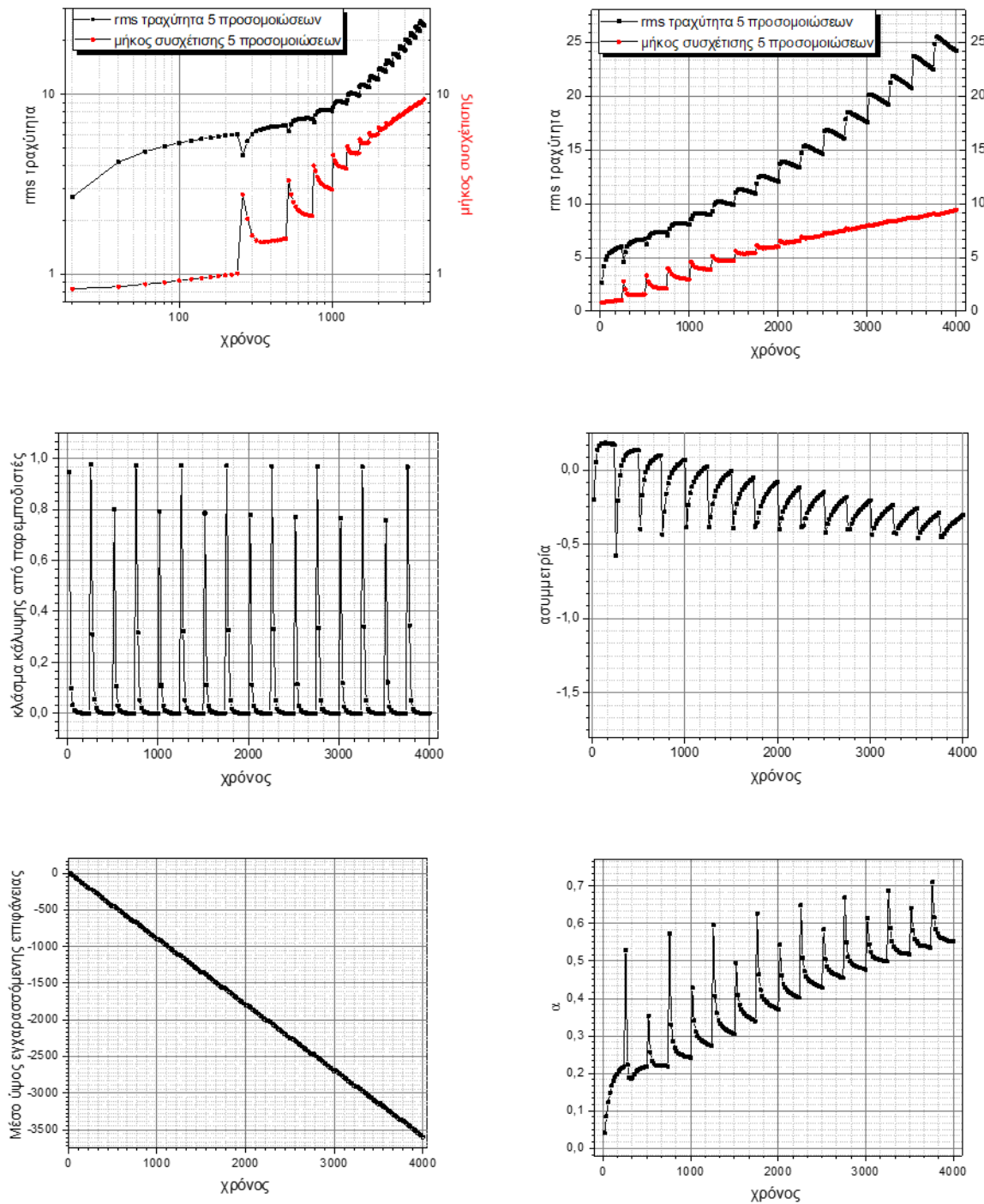


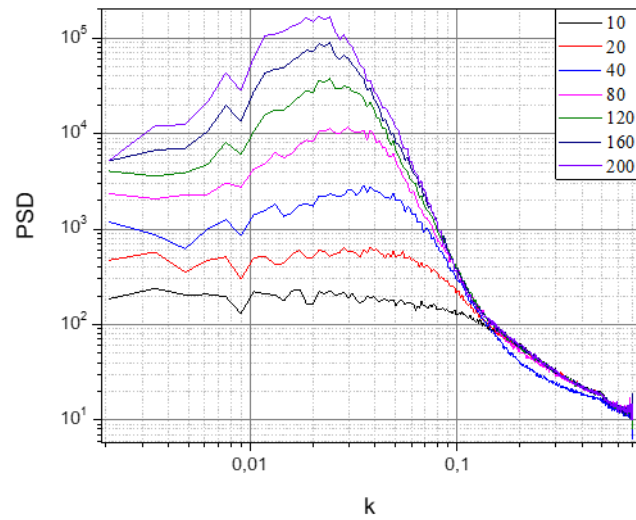


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

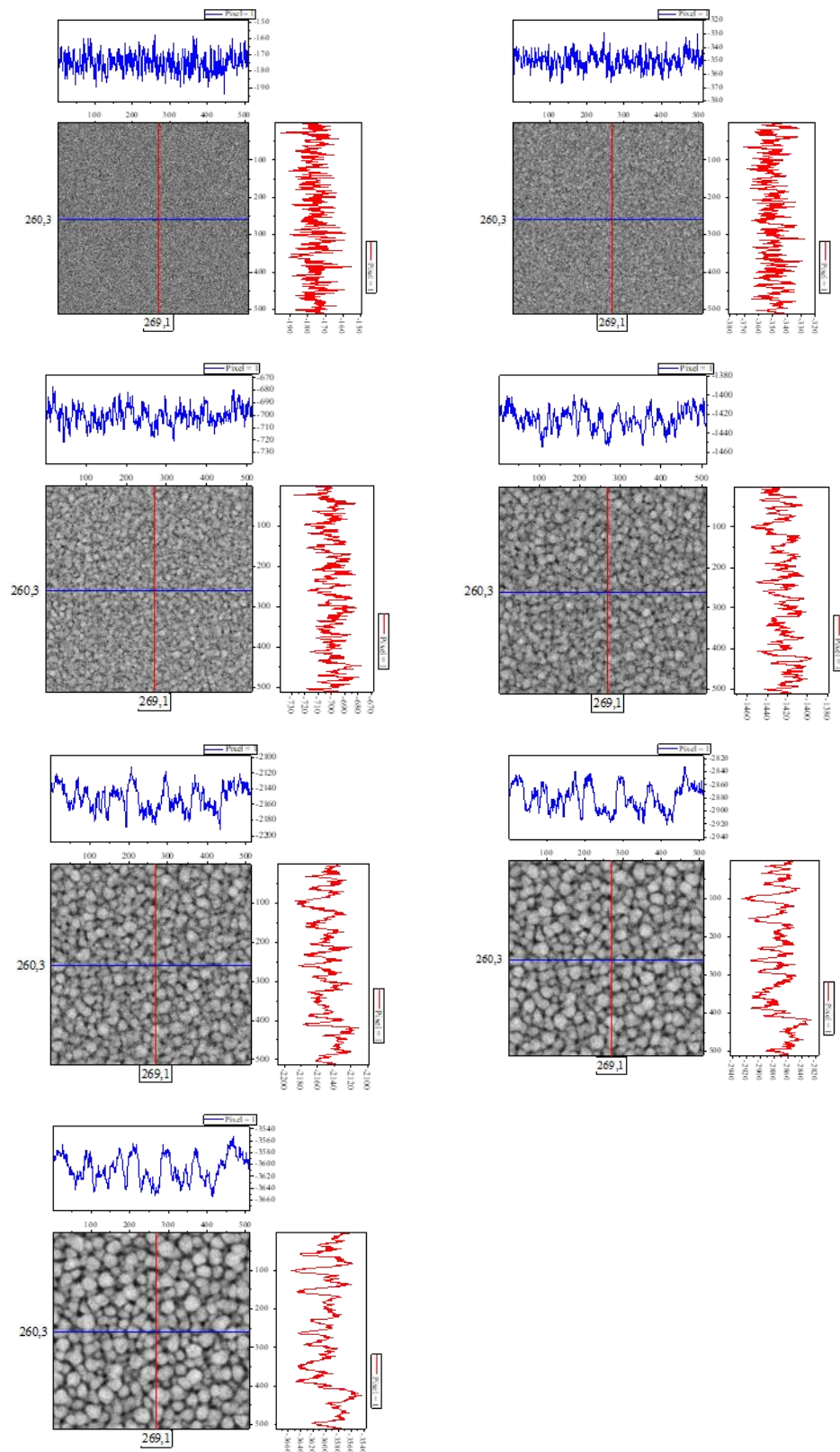


#024 (512x512, 5 runs, 16 cycles): $X_d=0.050$, $S_{d, sb}=1$, $X_i=0.950$, $S_{d, d}=1$

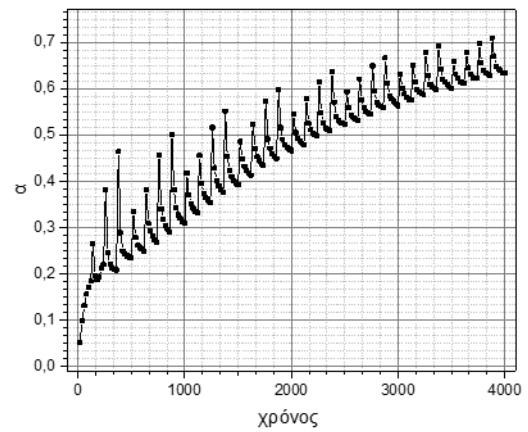
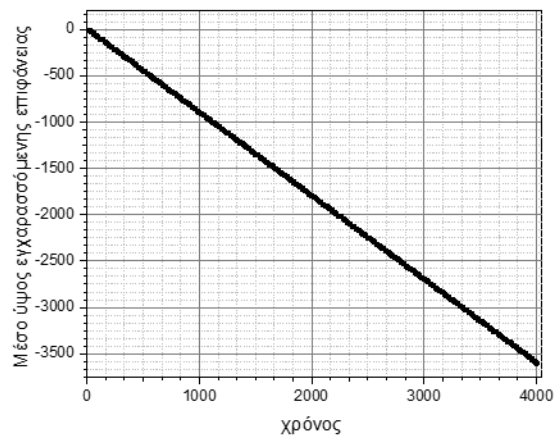
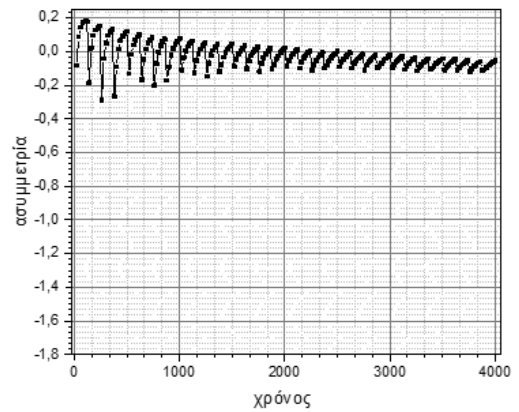
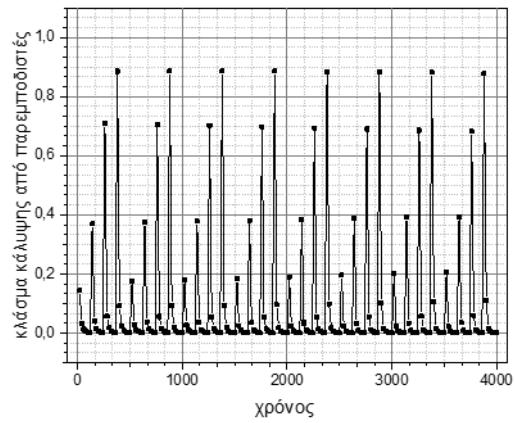
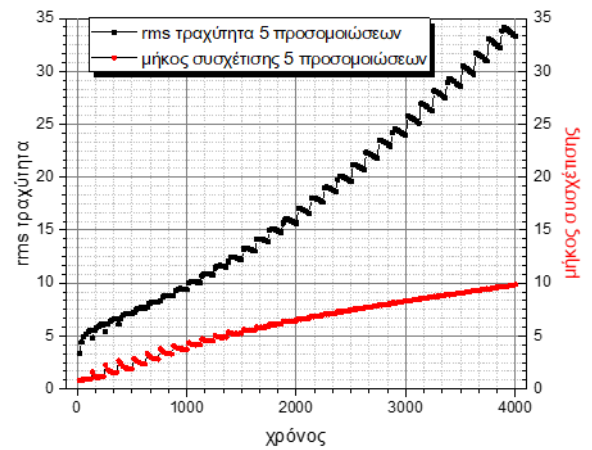
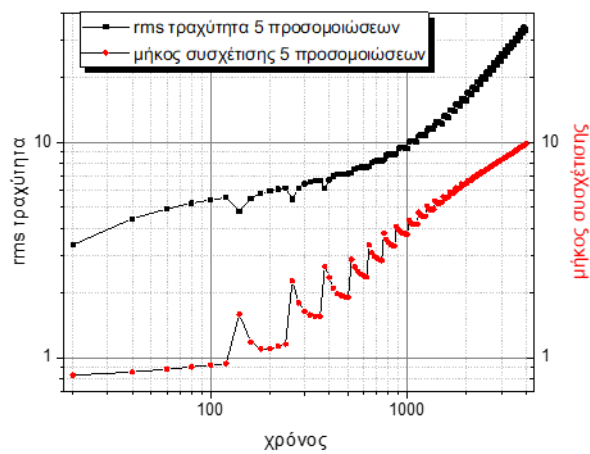


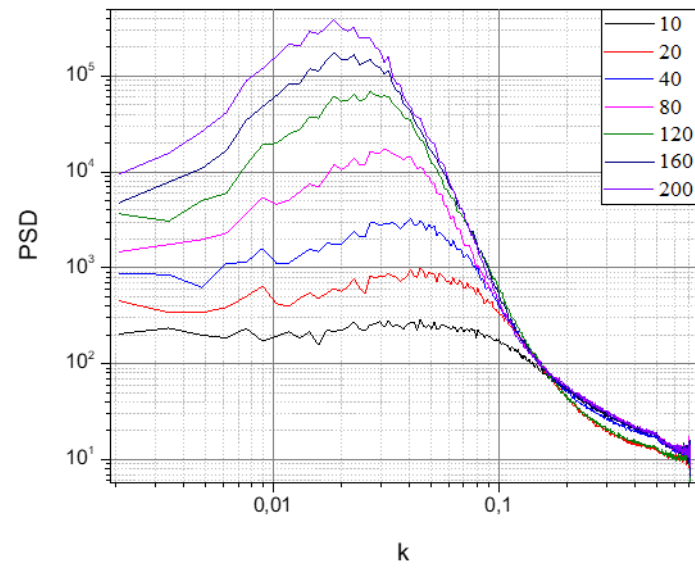


Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200

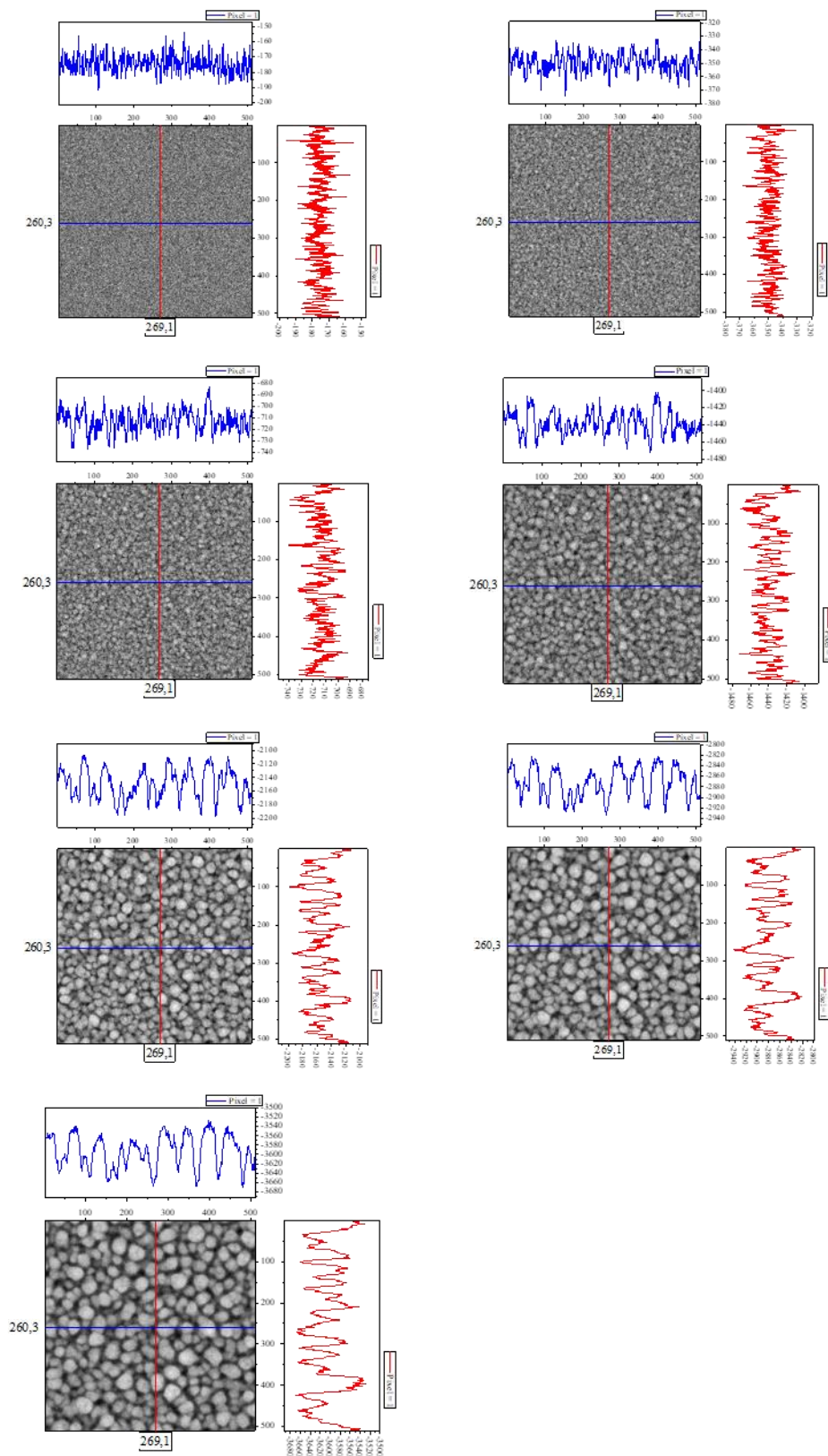


#025 (512x512, 5 runs, 32 cycles): $X_d=0.050$, $S_{d, sb}=1$, $X_i=0.950$, $S_{d, d}=1$





Interface στα 10, 20, 40, 80, 120, 160, 200



ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Etching	Εγχάραξη
Wet etching	Υγρή εγχάραξη
Dry etching	Ξηρή εγχάραξη
Physical sputtering	Ιονοβολή
Chemical etching	Χημική εγχάραξη
Ion – enhanced etching	Υποβοηθούμενη από ιόντα εγχάραξη
Collision Cascade	Διαδοχικές συγκρούσεις
Etch – inhibitors	Παρεμποδιστές εγχάραξης
Simulation	Προσομοίωση
Parameters	Παράμετροι
Inputs	Είσοδοι
Variables	Μεταβλητές
Deterministic	Προσδιοριστικό
Output	Έξοδος
Stochastic	Στοχαστικό
Ion beam sputtering	Ιονοβολή με δέσμη ιόντων
Sticking coefficient	Συντελεστής προσκόλλησης
Etching yield	Απόδοση εγχάραξης
Distribution function	Συνάρτηση κατανομής του ύψους τραχύτητας
Skewness	ασυμμετρία
Root mean squared roughness	Τυπική απόκλιση των υψών της επιφάνειας από την μέση τιμή τους
Correlation length	Μήκος συσχέτισης
Kurtosis	Κύρτωση
Roughness exponent	Εκθέτης τραχύτητας
Self – affine	Αυτοσυσχετιζόμενη
Fractal	Κλασματική
Mounded	Λοφώδης
Redeposition	Επαναπόθεση
Power spectral density	Φασματική πυκνότητα ισχύος
Silicon	Πυρίτιο
Sulfur hexafluoride	Εξαφθοριούχο θείο
Bias voltage	Δυναμικό αυτοπόλωσης

ΣΥΝΤΗΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

RIE	Reactive Ion Etching
ECR	Electron-Cyclotron-Resonance
ICP	Inductively Coupled Plasma
PMMA	Poly-Methyl MethAcrylate
PDMS	Poly-DiMethyl-Siloxane
AFM	Atomic force microscope
MOS ULSI	Metal Oxide Semiconductor devices in Ultra Large Scale Integration
VUV	Vacuum ultraviolet
rms	root mean square
HHCF	Height-Height Correlation Function
PSD	Power Spectral Density
a.d.	Angular dependence
PS	Polystyrene
SEM	Scanning Electron Microscope
W	root mean square roughness
α	Roughness exponent
EY	Etching yield
S	Sticking coefficient
sel	Selectivity
ξ	Correlation length

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Flamm Daniel, Plasma chemistry in etching, AT&T Bell Laboratories at Murray Hill and University Of California at Berkeley, United States of America
- [2] Μπουλούσης Γεώργιος, 2009, Ανάπτυξη τραχύτητας κατά την εγχάραξη πυριτίου με πλάσμα για μικροευστομηχανικές διατάξεις (διδακτορική διατριβή), Σχολή Χημικών Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [3] Μπούκουρας Κωνσταντίνος, 2003, Εγχάραξη επιφανειών πυριτίου σε αντιδραστήρα πλάσματος υψηλής πυκνότητας και μελέτη της επιφανειακής και πλευρικής τραχύτητας (διπλωματική εργασία), Διατμηματικό Προγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Μικροηλεκτρονική των τμημάτων Φυσικής και Πληροφορικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και του Εθνικού Κέντρου Ερευνών Φυσικών Επιστημών Δημόκριτος
- [4] Ανασασόπουλος Αντρέας, 2009, Προσομοίωση με κινητική Monte Carlo της εγχάραξης πολυμερικών αλυσίδων με ιόντα πλάσματος αερίου (διπλωματική εργασία), Διατμηματικό Προγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Μικροηλεκτρονική των τμημάτων Φυσικής και Πληροφορικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και του Εθνικού Κέντρου Ερευνών Φυσικών Επιστημών Δημόκριτος
- [5] George Kokkoris and Evangelos Gogolides, 2012, The potential of ion-driven etching with simultaneous deposition of impurities for inducing periodic dots on surfaces, Journal of Physics D: Applied Physics, doi: 10.1088/0022-3727/45/16/165204
- [6] Tsuda, Hirota, 2013, Atomic-Scale Analysis of Plasma-Surface Interactions and Formation Mechanisms of Profile Anomalies and Surface Roughness during Plasma Etching of Silicon, <https://doi.org/10.14989/doctor.k17787>, Kyoto University
- [7] Evangelos Gogolides, Vassilios Constantoudis, George Kokkoris, Dimitrios Kontziampasis, Katerina Tsougeni, George Boulousis, Marilena Vlachopoulou and Angeliki Tserepi, 2011, Controlling roughness: from etching to nanotexturing and plasma-directed organization on organic and inorganic materials, Journal of Physics D: Applied Physics, <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3727/44/17/174021>
- [8] Quere D. 2008 Annu. Rev. Mater. Res. 38 71
- [9] Gristina R., D'Aloia E., Senesi G. S., Milella A., Nardulli M., Sardella E., Favia P. and d'Agostino R. 2009 Appl. Biomater. B 88 139
- [10] Koynov S., Brandt M. S. and Stutzmann M. 2006 Appl. Phys. Lett. 88 20310
- [11] Nakazaki, N., Tsuda, H., Takao, Y., Eriguchi, K., and Ono, K.: 'Two modes of surface roughening during plasma etching of silicon: Role of ionized etch products', J. Appl. Phys., 2014, 116, (22).
- [12] N Vourdas, D Kontziampasis, G Kokkoris, V Constantoudis, A Goodyear, A Tserepi, M Cooke and E Gogolides, 2010, Plasma directed assembly and organization: bottom-up nanopatterning using top-down technology, Journal of Physics D: Applied Physics, <http://dx.doi.org/10.1088/0957-4484/21/8/085302>
- [13] Sigmund, P.: 'Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets', Physical Review, 1969, 184, (2)
- [14] Sigmund, P.: 'A mechanism of surface micro-roughening by ion bombardment', Journal of Materials Science, 1973, 8, (11)
- [15] Bradley, R.M., and Harper, J.M.E.: 'Theory of ripple topography induced by ion bombardment', Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 1988, 6, (4)
- [16] Makeev, M.A., Cuerno, R., and Barabási, A.-L.: 'Morphology of ion-sputtered surfaces', Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2002, 197, (3)
- [17] Drotar, J.T., Zhao, Y.P., Lu, T.M., and Wang, G.C.: 'Mechanisms for plasma and reactive ion etch-front roughening', Physical Review B, 2000, 61, (4)
- [18] Nest, D., Chung, T.-Y., Graves, D.B., Engelmann, S., Bruce, R.L., Weirnboeck, F., Oehrlein, G.S., Wang, D., Andes, C., and Hudson, E.A.: 'Understanding the Roughening and Degradation of 193 nm Photoresist during Plasma Processing: Synergistic Roles of Vacuum Ultraviolet Radiation and Ion Bombardment', Plasma Processes and Polymers, 2009, 6, (10)
- [19] Zhang, K., Bobes, O., and Hofsäss, H.: 'Designing self-organized nanopatterns on Si by ion irradiation and metal co-deposition', Nanotechnology, 2014, 25, (8)
- [20] Martin, M., and Cunge, G.: 'Surface roughness generated by plasma etching processes of silicon' (2015. 2015)
- [21] Reza Abdolvand, Farrokh Ayazi, An advanced reactive ion etching process for very high aspect-ratio sub-micron wide trenches in silicon, Sensors and Actuators A 144, 2008
- [22] Kokkoris, G., Constantoudis, V., Angelikopoulos, P., Boulousis, G., and Gogolides, E.: 'Dual nanoscale roughness on plasma-etched Si surfaces: Role of etch inhibitors', Physical Review B, 2007, 76, (19)

- [23] Cameron F. Abrams and David B. Graves: Sputter Yield and Sticking Coefficient Dependencies on Ion Incident Energy and Angle Near the Sputtering Threshold: Molecular Dynamics Simulations of Cu+ Impacting Cu, Department of Chemical Engineering University of California, Berkeley, 1999, J. Appl. Phys.
- [24] Yiming Lou, Panagiotis D. Christorides, Estimation and control of surface roughness in thin film growth using kinetic Monte-Carlo models, Chemical Engineering Science 58, doi:10.1016/S0009-2509(03)00166-0, 2003
- [25] Ξυδής Παναγιώτα, 2006, προσομοίωση εγχάραξης επιφανειών με τραχύτητα με τη μέθοδο ισοϋψών στενής ζώνης (διπλωματική εργασία), Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Μικροηλεκτρονική των τμημάτων Φυσικής και Πληροφορικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και του Εθνικού Κέντρου Ερευνών Φυσικών Επιστημών Δημόκριτος
- [26] Changhwan Shin, 2016, Variation-Aware Advanced CMOS Devices and SRAM, Springer Series in Advanced Microelectronics Volume 56, Department of Electrical and Computer Engineering University of Seoul Seoul, Republic of Korea (South Korea)
- [27] Oehrlein G. S., Phaneuf R. J. and Graves D. B. 2011 Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures 29 0108011-01080135
- [28] Δημήτρης Κοντζιάμπασης, «Μικρο/νανοσχηματοποίηση Πολυμερών με Εγχάραξη Πλάσματος για Βιοαναλυτικές Εφαρμογές», διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 2013
- [29] Πειράματα Θάνου Σμυρνάκη