



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΦΙΛΟΣΟΦΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ



Στοχαστικά μοντέλα στο έργο του Ιάννη Ξενάκη :

Μουσικολογικά και μαθηματικά ζητήματα

Ονοματεπώνυμο φοιτητή: Βασίλειος Ν. Νικολόπουλος

Επιβλέπουσα : Αναστασία Γεωργάκη , Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Αθήνα , 2020

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

### **Στοχαστικά μοντέλα στο έργο του Ιάnnη Ξενάκη : Μουσικολογικά και μαθηματικά ζητήματα**

**Βασίλειος Ν. Νικολόπουλος**

**ΑΜ : 1569201300048**

**Τριμελής Επιτροπή:** **Αναστασία Γεωργάκη** , Αναπληρώτρια Καθηγήτρια  
**Χριστίνα Αναγνωστοπούλου** , Αναπληρώτρια Καθηγήτρια  
**Αρετή Ανδρεοπούλου** , Επίκουρη Καθηγήτρια

#### **Σημείωμα του συγγραφέα**

Το δοκίμιο αυτό αποτελεί πτυχιακή εργασία η οποία συντάχθηκε για το Τμήμα Μουσικών Σπουδών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και υποβλήθηκε προς εξέταση τον (Μήνας) του (Έτος). Ο/η συγγραφέας βεβαιώνει ότι το περιεχόμενο του παρόντος έργου είναι αποτέλεσμα προσωπικής εργασίας και ότι έχει γίνει η κατάλληλη αναφορά στην εργασία τρίτων, όπου κάτι τέτοιο ήταν απαραίτητο, σύμφωνα με τους κανόνες της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Οι απόψεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία εκφράζουν αποκλειστικά τον/την συγγραφέα και όχι τον/την επιβλέποντα/επιβλέπουσα Καθηγητή/τρια.

## Περίληψη

Θέμα της παρούσης εργασίας αποτελεί η Στοχαστική Μουσική και πως αυτή παράγεται μέσα από τη χρήση αλγορίθμων. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παραθέτουμε κάποια γενικά στοιχεία για το φιλοσοφικό κίνημα του Στοχασμού και το φιλοσοφικό κίνημα της Στοχαστικής Μουσικής. Πιο συγκεκριμένα δίνουμε τον ορισμό της μουσικής σύνθεσης και της αλγοριθμικής μουσικής σύνθεσης, αναλύουμε την αισθητική της αλγοριθμικής μουσικής σύνθεσης και παραθέτουμε στοιχεία για τους στοχαστικούς αλγόριθμους. Επίσης εξετάζουμε τους στοχαστικούς αλγόριθμους στις αποικίες των μυρμηγκιών και στα σμήνη των τζίτζικιών. Το δεύτερο κεφάλαιο, είναι αφιερωμένο στον Ιάννη Ξενάκη που έχει χαρακτηριστεί ως ο «αρχιτέκτονας» της στοχαστικής μουσικής. Αρχικά παρουσιάζουμε την ιστορία της στοχαστικής μουσικής πριν την εμφάνιση του Ξενάκη και ύστερα αναλύουμε το έργο του μεγάλο συνθέτη, παραθέτοντας μερικά παραδείγματα από τα στοχαστικά μοντέλα στα έργα του. Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο, επιχειρούμε μια σύντομη ανασκόπηση της στοχαστικής σύνθεσης στις ημέρες μας, η οποία επιτυγχάνεται με την χρήση αλγορίθμων και προγραμμάτων τεχνητής νοημοσύνης (AI) και είναι σε μεγάλο βαθμό επηρεασμένη από τη στοχαστική σύνθεση του Ιάννη Ξενάκη .

### Λέξεις – Κλειδιά

Στοχαστική μουσική, στοχαστικά πολύτοπα μοντέλα, επιρροή στοχαστικών μοντέλων, στοχασμός, αλγόριθμοι, αλγοριθμική μουσική σύνθεση

## **Abstract**

The subject of this work is Stochastic Music and how it is produced through the use of algorithms. In the first chapter of this work we give some general information about the philosophical movement of Stochasm and the philosophical movement of Stochastic Music. In the second chapter we analyze the algorithmic composition of music. We give the definition of musical composition and algorithmic musical composition, analyze the aesthetics of algorithmic musical composition, and provide data on stochastic algorithms. In particular, we analyze the scattering of algorithms, genetic algorithms, and consider stochastic algorithms in ant colonies and clusters of zigzags. The third, and last chapter, is dedicated to Iannis Xenakis who has been described as the "architect" of stochastic music. We first introduce the history of stochastic music before Xenakis appeared and then analyze the work of the great composer.

## **Keywords**

Stochastic music, stochastic polytopic models, stochastic models influence, algorithms, algorithmic music composition

## Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία με θέμα « Στοχαστικά μοντέλα στο έργο του Ιάnnη Ξενάκη » πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας του τμήματος Μουσικών σπουδών του Καποδιστριακού Πανεπιστήμιου Αθηνών το έτος 2020 .

Η παρούσα εργασία είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς αλληλεπιδράσεων με διάφορα άτομα , καθένα από τα οποία έπαιξε ένα σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της . Αξίζει λοιπόν να αφιερώσω την παρούσα σελίδα για να ευχαριστήσω ειλικρινά τα άτομα αυτά για τη βοήθεια που μου προσέφεραν .

Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας :

Και πρώτα απ' όλα , στην υπεύθυνη καθηγήτρια για την πτυχιακή μου , κυρία Αναστασία Γεωργάκη για την συνεχή καθοδήγηση την αμέριστη υποστήριξη , τις ουσιώδεις συμβουλές , καθώς και την αδιάκοπη συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου παρείχε σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα . Δεύτερον, οφείλω να πω, πως η παρούσα εργασία δεν θα είχε αυτή την μορφή χωρίς την υποστήριξη και τις παρατηρήσεις του κυρίου Αντώνη Αντωνόπουλου . Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω δυο καλούς μου φίλους , τον Γιώργο Πολιτόπουλο , μαθηματικό από το πανεπιστήμιο του Leiden και τον Γιώργο Σακελλίων από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο για την βοήθεια τους με τα μαθηματικά εφόδια που μου χρειάστηκαν για την ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής και της κατανόησης του έργου του Ιάnnη Ξενάκη . Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αδερφό μου Βαγγέλη Νικολόπουλο που με βοήθησε με τα πρακτικά ζητήματα που προέκυψαν κατά την συγγραφή αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που με έμαθαν να "προσπερνώ" τις δυσκολίες στην διάρκεια αυτών των ετών : την οικογένεια μου , τους συμφοιτητές μου και ορισμένους πολύ αξιόλογους ανθρώπους που συνάντησα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου που με την καθημερινή τους συμπαράσταση , την υπομονή τους και την θετική τους σκέψη συνέβαλλαν στην ομαλή σταδιοδρομία και την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Βασίλης Νικολόπουλος

Αθήνα, 2020

# Περιεχόμενα

## Εισαγωγή

### 1. Αλγοριθμική και στοχαστική σύνθεση

- 1.1. Αλγοριθμική σύνθεση : ορισμός , τεχνικές , αισθητική .....3
- 1.2. Η αλγοριθμική μουσική σύνθεση πριν τον Ιάννη Ξενάκη .....5
- 1.3. Στοχαστικοί αλγόριθμοι στην φύση .....10
  - 1.3.1.Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι στην αποικία μυρμηγκιών .....12
  - 1.3.2.Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι στο σμήνος των τζιτζικιών .....15

### 2. Ιάννης Ξενάκης : ο «αρχιτέκτονας» της Στοχαστικής Μουσικής

- 2.1. Στοχαστική μουσική : ορισμός .....20
- 2.2. Η στοχαστική μουσική του Ιάννη Ξενάκη .....22
- 2.3. Στοχαστικά πολύτοπα μοντέλα .....39

### 3. Η επίδραση των Στοχαστικών Μοντέλων στη μουσική μετά το '90

- 3.1. Στοχαστικά Μοντέλα στην αλγοριθμική σύνθεση .....45
- 3.2. Στοχαστικά Μοντέλα στην τεχνητή νοημοσύνη και τη μουσική..... 55

Συζήτηση ..... 61

Επίλογος .....63

Βιβλιογραφικές αναφορές .....65

Ιστότοποι ..... 69

Παράρτημα .....71

## Εισαγωγή

Τα ερευνητικά ερωτήματα που θα εξετάσουμε σε αυτήν την εργασία είναι η μελέτη της εξέλιξης της πορείας των μαθηματικών με την μουσική και τον ρόλο του Ιάννη Ξενάκη σε αυτήν την πορεία . Πως δηλαδή ένας άνθρωπος που είχε μελετήσει φιλοσοφία , μαθηματικά , αρχιτεκτονική , φυσική κατάφερε να χρησιμοποιήσει όλες αυτές τις γνώσεις για την δημιουργία μουσικής . Ποιος είναι ο φιλοσοφικός και ποιος ο αισθητικός στοχασμός σε αυτές τις διαδικασίες και ποια ανάγκη οδηγεί τον Ιάννη Ξενάκη να δημιουργήσει ένα τελείως καινούργιο είδος μουσικής σύνθεσης το οποίο θα ονομάσει στοχαστική σύνθεση . Ακόμα πιο σημαντικό θα ήταν επίσης να αναρωτηθούμε ποια είναι η επίπτωση του έργου του Ξενάκη στις μέρες μας και πως αξιοποιήθηκε ο τεράστιος όγκος γνώσης που άφησε πίσω του και μέσα από τα έργα του και τα γραπτά του αλλά και μέσα από τις φιλοσοφικές του αναζητήσεις .

Στο πρώτο κεφάλαιο αρχικά θα μελετήσουμε τον ορισμό και την αισθητική αξία της αλγοριθμικής μουσικής σύνθεσης . Ενώ στην συνέχεια θα επιχειρήσουμε μια σύντομη αναδρομή στο παρελθόν για να δείξουμε πως, από τα χρόνια του Πυθαγόρα που πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά το πάντρεμα της μουσικής με τα μαθηματικά , φτάσαμε στο σήμερα , όπου πλέον μέσα από την στοχαστική σύνθεση μπορούμε να κατασκευάσουμε μουσική της οποίας όλες οι παράμετροι να ελέγχονται αποκλειστικά από διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα και πιθανοκρατικές θεωρίες. Τέλος θα παρατηρήσουμε πως η αλγοριθμική/μαθηματική σκέψη παρατηρείται ακόμα και στην φύση και πιο συγκεκριμένα στις αποικίες των μυρμηγκιών και των τζίτζικιών το οποίο μας δίνει ένα επιχείρημα παραπάνω υπέρ της χρήσης αντίστοιχων μοντέλων και στην μουσική συνθετική διαδικασία . Αυτές οι διαδικασίες που παρατηρούνται στην φύση, θα δώσουν στον άνθρωπο νέα εργαλεία για την ανάπτυξη αλγορίθμων μέσα από υπολογιστές που μιμούνται αυτές τις λειτουργίες.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας μας αρχικά θα μιλήσουμε για την στοχαστική μουσική έτσι όπως την όρισε ο Ιάννης Ξενάκης , ο οποίος ήταν και ο πρωτεργάτης αυτής . Επίσης θα εξετάσουμε τις φιλοσοφικές του ιδέες για την μουσική και τον γενικότερο προβληματισμό για την κρίση της σύγχρονης ευρωπαϊκής μουσικής των δεκαετιών του 1950 και 1960 . Θα μελετήσουμε την χρήση των στοχαστικών θεωριών στα διαφορετικά μουσικά έργα του Ξενάκη και πως αυτές σταδιακά αυτοματοποιήθηκαν με την ανάπτυξη των υπολογισμών μέσα από υπολογιστικά

προγράμματα που κατασκεύασε ο ίδιος ο Ξενάκης . Επίσης θα μελετήσουμε το πώς αυτές οι στοχαστικές θεωρίες εφαρμόστηκαν στην αρχιτεκτονική του Ξενάκη μέσα από την δημιουργία πολύτοπων .

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος της εργασίας θα εξετάσουμε την επίπτωση που είχαν οι ιδέες του Ξενάκη σε μεταγενέστερους συνθέτες για την δημιουργία μουσικής σύνθεσης με στοχαστικά μοντέλα και με την χρήση υπολογισμών . Αυτοί οι συνθέτες και ερευνητές πραγματοποιούν σήμερα το επόμενο βήμα στην μουσική σύνθεση με το πάντρεμα της μουσικής με την τεχνητή νοημοσύνη , τα κυτταρικά αυτόματα , τα L systems , τα φράκταλς ,τους γενετικούς αλγορίθμους , την βιολογία , την φύση κ.α.



# 1. Αλγοριθμική και στοχαστική σύνθεση : ορισμός ,τεχνικές, αισθητική

## 1.1. Αλγοριθμική σύνθεση

Η σύνθεση είναι η διαδικασία δημιουργίας ενός μουσικού έργου. Ο όρος σύνθεση σημαίνει κυριολεκτικά να "συγκεντρώσει" τα διαφορετικά στοιχεία σε ένα ενοποιημένο σύνολο. Η διαδικασία της σύνθεσης της μουσικής συχνά χαρακτηρίζεται από μια διαδικασία όπου ο συνθέτης προσπαθεί κάτι, ακούει και καθορίζει εάν είναι απαραίτητες οι αναθεωρήσεις στο έργο ή το σημείο του έργου στο οποίο εργάζεται . Τέλος , ο συνθέτης αξιολογεί συνεχώς την αποτελεσματικότητα ενός μέρους σε σχέση με το σύνολο .

Συνδυάζουμε τους όρους αλγόριθμος και σύνθεση για να αντλήσουμε τον όρο αλγοριθμική σύνθεση. Η αλγοριθμική σύνθεση, με την απλούστερη έννοια, είναι όταν ένας συνθέτης χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο για να κατασκευάσει ένα κομμάτι μουσικής. Από τα μέσα του εικοστού αιώνα, ο υπολογιστής έχει γίνει βασικός συνεργάτης στην εφαρμογή αλγορίθμων που παράγουν μουσική. Λόγω του αυξημένου ρόλου του υπολογιστή στη σύνθεση, η αλγοριθμική σύνθεση έρχεται να σημάνει τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών για την εφαρμογή διαδικασιών σύνθεσης που έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μουσικής [ApeI,1979].

Ένας αλγόριθμος ορίζεται ως ένα σύνολο κανόνων ή ακολουθία λειτουργιών σχεδιασμένων για να ολοκληρώσουν κάποια εργασία ή να λύσουν ένα πρόβλημα. Τα ανθρώπινα όντα είναι πολύ καλά στο σχεδιασμό και την εφαρμογή αλγορίθμων. Από το ντύσιμο το πρωί μέχρι το βραδινό φαγητό, αναπτύσσουμε συνεχώς αλγόριθμους για την επίλυση των καθημερινών προβλημάτων της ζωής.

Ο Gareth Loy περιγράφει τα κριτήρια για τον προσδιορισμό της εγκυρότητας ενός αλγορίθμου ως εξής : Ένας αλγόριθμος πρέπει να έχει έναν πεπερασμένο αριθμό βημάτων, τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο από τον αλγόριθμο. Επίσης πρέπει να αποδίδει ένα αποτέλεσμα σε μια πεπερασμένη χρονική περίοδο και να έχει ακριβή ορισμό για κάθε βήμα του αλγορίθμου. Ο Donald Knuth εξηγεί ότι υπάρχουν επίσης αισθητικά κριτήρια για την αξιολόγηση ενός αλγορίθμου. Αυτά τα κριτήρια αισθητικής περιλαμβάνουν την απλότητα, την κομψότητα και την ευκολία. Στην ιδανική περίπτωση, οι αλγόριθμοι θα πρέπει να ανταποκρίνονται στα κριτήρια που περιγράφονται από τον Loy και τον Knuth [ Loy ,1989] .

Συχνά όμως, όταν πρόκειται για δημιουργία μιας μουσικής σύνθεσης με την χρήση υπολογιστή ή με την χρήση αλγορίθμων, η συζήτηση στρέφεται γύρω από το θέμα της αισθητικής. Η αισθητική είναι ένας κλάδος της φιλοσοφίας που περιγράφει τις θεωρίες και μορφές ομορφιάς στις καλές τέχνες. Είναι η μοναδική σειρά εμπειριών του κάθε ατόμου και η αντίληψη που δημιουργεί για αυτές τις εμπειρίες, που διαμορφώνουν την προσωπική αισθητική. Η προσωπική μας αισθητική είναι αλληλένδετα συνδεδεμένη με την προσωπικότητά μας και την ιδιότητά μας (ως καλλιτέχνης ή ως ακροατής). Τέλος ο Knuth υποστηρίζει ότι «κάθε έργο τέχνης είναι μια εκδήλωση της αισθητικής του καλλιτέχνη» [Knuth, 1973].

Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την αισθητική αξία μιας αλγοριθμικής μουσικής σύνθεσης θα πρέπει να διαχωρίσουμε τη διαδικασία σύνθεσης από το προϊόν της σύνθεσης. Μερικοί αλγοριθμικοί συνθέτες θα υποστήριζαν ότι, η αισθητική αξία μιας αλγοριθμικής σύνθεσης θα πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά στον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της μουσικής. Ενώ άλλοι συνθέτες υποστηρίζουν ότι τόσο οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της σύνθεσης όσο και η ίδια η σύνθεση θα πρέπει να αξιολογείται κατά τον προσδιορισμό της αισθητικής αξίας. Υπάρχουν ακόμα άλλοι που θα υποστήριζαν ότι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στην αλγοριθμική σύνθεση είναι απλά ένα μέσο και γι' αυτό οι ίδιοι οι αλγόριθμοι δεν αξίζουν τον καλλιτεχνικό έλεγχο. Αυτοί οι συνθέτες μπορεί να πιστεύουν ότι, η επιτυχία ή η αποτυχία τους ως συνθέτες βασίζεται στην ανταπόκριση του ακροατή [Allan, M., & Williams, C. K., 2014].

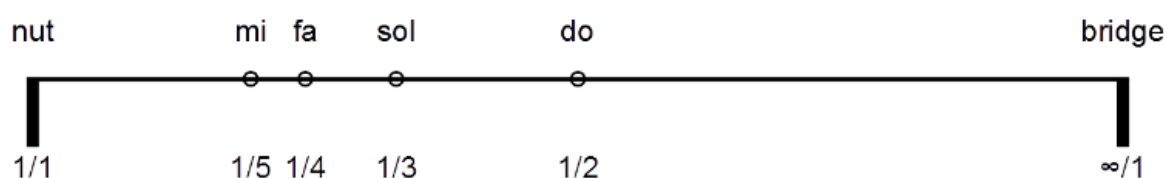
Όλες αυτές οι αποκρίσεις στη διαδικασία και το προϊόν της αλγοριθμικής σύνθεσης είναι έγκυρες καθώς κάθε άποψη είναι απλά μια εκδήλωση μιας προσωπικής αισθητικής. Δυστυχώς, οι συνθέτες της αλγοριθμικής μουσικής δεν ερευνήθηκαν επισήμως για τις απόψεις τους για την αισθητική της αλγοριθμικής σύνθεσης, έτσι δεν ξέρουμε πόσοι συνθέτες emπίπτουν σε ποια κατηγορία σε οποιαδήποτε δεδομένη στιγμή ή αν υπάρχουν περισσότερες κατηγορίες που πρέπει να λάβουμε υπόψη [Mandelbrojt, 1999 ,19-30]. Παρακάτω στην εργασία θα εξετάσουμε το κίνημα της στοχαστικής μουσικής σύνθεσης ως υποκατηγορία των τεχνικών της αλγοριθμικής σύνθεσης και πως αυτή αναπτύχθηκε από τον Ιάννη Ξενάκη. Πριν εξετάσουμε όμως την στοχαστική μουσική του Ιάννη Ξενάκη θα επιχειρήσουμε μια σύντομη αναδρομή στις μουσικές συνθέσεις που χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα για την δημιουργία κάποιων στοιχείων της μουσικής σύνθεσης.

## 1.2. Η αλγοριθμική μουσική σύνθεση πριν τον Ιάnnη Ξενάκη

Ο Έλληνας φιλόσοφος, μαθηματικός και θεωρητικός της μουσικής Πυθαγόρας (περίπου 500 π.Χ.) τεκμηριώνει τη σχέση μουσικής με τα μαθηματικά που έθεσαν τα θεμέλια για τη σύγχρονη μελέτη της μουσικής θεωρίας και ακουστικής. Οι Έλληνες πίστευαν ότι η κατανόηση των αριθμών ήταν το κλειδί για την κατανόηση του σύμπαντος. Το εκπαιδευτικό τους σύστημα βασίστηκε στη μελέτη της μουσικής, της αριθμητικής, της γεωμετρίας και της αστρονομίας. Αν και έχουμε πολυάριθμες πραγματείες για τη θεωρία της μουσικής που χρονολογούνται από την ελληνική αρχαιότητα, οι Έλληνες δεν άφησαν ενδείξεις αν εφαρμόζονταν μαθηματικές διαδικασίες στη σύνθεση της μουσικής.

Μεσαιωνικές απεικονίσεις, που αποδίδουν στον Πυθαγόρα την ανακάλυψη των μαθηματικών λόγων που διέπουν τις πρώτες συμφωνίες και πιθανόν εκείνη του τόνου, είναι γεμάτη παράδοξες δηλώσεις. Οι ιστορίες για τον τρόπο με τον οποίο ο Πυθαγόρας παρατήρησε τις πρώτες συμφωνίες όταν πέρασε έξω από το εργαστήριο σιδεράδων και στη συνέχεια προσπάθησε να τις αναπαράγει σε χορδές, από το ένα άκρο του οποίου κρεμάει διαφορετικά βάρη, είναι γνωστές. Έχει αποδειχθεί ότι αυτές οι ιστορίες δεν μπορούν να επαληθευτούν πειραματικά. Ωστόσο, πρέπει να δεχτούμε ότι το παράδοξο στοιχείο αυτών των ιστοριών, το οποίο η παράδοση μας έχει δώσει, είναι το κύριο πλεονέκτημά τους. Οι συγκεκριμένες ανακαλύψεις δεν μπορούν να εφευρεθούν από έναν Έλληνα μαθηματικό, αλλά, μάλλον, αποτελούν λαϊκή γνώση. Αυτό είναι ενδεικτικό της ύπαρξης μιας άλλης, πραγματικής παράδοσης, σύμφωνα με την οποία ο Πυθαγόρας πρέπει να ήταν πράγματι εκείνος στον οποίο οφείλουμε αυτή τη σημαντική ανακάλυψη. Όπως είναι γνωστό, ο Πυθαγόρας πέρασε αρκετό καιρό στην Αίγυπτο. Εκεί θα πρέπει να είχε συναντήσει όργανα πάνω στα οποία θα μπορούσαν εύκολα να κατασκευαστούν διαστήματα μεγέθη και τα μήκη των χορδών που τα παράγουν και μετριούνται εύκολα. Μια τέτοια παρατήρηση δεν μπορεί να αγνοηθεί από την πυθαγόρεια φιλοσοφία. Έτσι ο Φιλόλαος ο Κροτωνιάτης, ο οποίος ανήκει στη δεύτερη γενιά των μαθητών του Πυθαγόρα, είναι ο πρώτος του οποίου τα γραπτά έχουν επιβιώσει (από τη φύση του). Σε ένα από αυτά, το αυθεντικό «6α», γίνεται αναφορά στη συστημική δομή της αρμονίας. Ο Αρχύτας ο Ταραντίνος, μαθηματικός της τρίτης γενιάς των Πυθαγορείων, επίσης περιέγραψε, με τη μορφή αριθμητικών λόγων, τη συστημική δομή των εναρμολογικών, χρωματικών και διατονικών τετραχορδών, με βάση τις ιδιότητες τριών μέσων (αριθμητική, γεωμετρική, αρμονική). Οι μελετητές

σήμερα υποστηρίζουν ότι τα τμήματα του Αρχύτα βασίζονται στη μουσική πρακτική των ημερών του, αν και συμφωνούν ότι ήταν προϊόντα καθαρά ανεπτυγμένων μαθηματικών εικασιών. Όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο ο Αρχύτας έρχεται σε αυτές τις αριθμητικές προτάσεις, διατυπώθηκαν διαφορετικές θεωρίες. Οι οποίες είναι υπερβολικά γενικές και ασαφείς ή, όταν είναι πιο συγκεκριμένες, αποτυγχάνουν, είτε επειδή δεν ακολουθούν στο τέλος τη θεωρητική αρχή που εφαρμόζεται, είτε δεν προτείνουν έναν τρόπο που θα καλύπτει και τα τρία μέσα [Brzezniak & Zastawniak 1999].



Εικόνα 1. Το μονόχορδο του Πυθαγόρα

Επόμενος μεγάλος σταθμός στην σχέση μαθηματικών-μουσικής είναι ο Ιταλός Guido d'Arezzo (περ. 995 – 1050 μ.Χ. ). Ο Ιταλός συνθέτης έχει μείνει γνωστός για το σύγχρονο σύστημα σημειογραφίας (πεντάγραμμο) το οποίο εφηύρε. Το νέο πεντάγραμμο αντικατέστησε την παλαιά νευματική σημειογραφία. Παρά τις αντιπαραθέσεις που έχουν προκληθεί γύρω από το έργο του Guido d'Arezzo είναι βέβαιο ότι η πρωταρχική του επιθυμία και στόχος στην ανάπτυξη των μεθόδων του ήταν να βοηθήσει τους μαθητές στην εκμάθηση των ψαλμών. Ο στόχος αυτός ήταν μοναδικός στην εποχή του, καθώς οι προηγούμενοι θεωρητικοί, όπως ο Βοήθιος, επέλεξαν να επικεντρώσουν τα γραπτά τους στις φιλοσοφικές και μαθηματικές συνέπειες της μουσικής και όχι στην εκπαίδευση των αναγνωστών τους. Ως αποτέλεσμα του πάθους και της αφοσίωσής του σε αυτόν τον στόχο, οι εξελίξεις του είχαν βαθύ αντίκτυπο όχι μόνο στον τρόπο με τον οποίο διδάσκεται η μουσική αλλά και σε ολόκληρη την πορεία της μουσικής ιστορίας. Οι πρώτες από τις μεγάλες εξελίξεις του Guido στη σφαίρα της μουσικής θεωρίας και εκπαίδευσης ήταν η κωδικοποίηση του συστήματος του εξαχόρδου. Στο σύστημά του, οι σημειώσεις της μουσικής κλίμακας περιγράφηκαν σε αλληλοσυνδεδεμένα τμήματα έξι σημείων,

γνωστά ως εξάχορδα, τα οποία μοιράζονταν το ίδιο μοτίβο διαστημάτων. Αυτό το σύστημα, που είναι παρόμοιο με τις σύγχρονες έννοιες της κλίμακας και της τονικότητας, επέτρεψε στους τραγουδιστές να ομαδοποιήσουν τις ψαλμωδίες σύμφωνα με το συγκεκριμένο εξάχορδο, στο οποίο ανήκε κάθε ψαλμωδία [Atkinson, Charles M., 2009].

Σε συνέχεια της σύντομης ανασκόπησης μας βρισκόμαστε στις αρχές του 14ου αιώνα, όπου οι συνθέτες άρχισαν να αντιμετωπίζουν το ρυθμό ανεξάρτητα από το κείμενο. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιόδους όπου ο ρυθμός δεν αντιμετωπίζεται με μαθηματική ακρίβεια αλλά απλά υπάρχει για να εξυπηρετεί το κείμενο. Οι Γάλλοι συνθέτες της ars nova, όπως ο Phillippe de Vitry και ο Guillaume de Machaut, χρησιμοποίησαν το ισόρρυθμο ως μέσο ενοποίησης των συνθέσεων τους. Το Iso σημαίνει "ίδιο", οπότε ο ισόρρυθμος σημαίνει κυριολεκτικά "ίδιο ρυθμό". Το ισόρρυθμο είναι η πρακτική της χαρτογράφησης μιας ρυθμικής ακολουθίας [Simoni, 2003, 727-734].



Εικόνα 2 . Ισόρρυθμο μοτέτο De bon espoir-Puisque la douce-Speravi από τον Guillaume de Machaut

Η αναγεννησιακή περίοδος που ακολούθησε σηματοδότησε την άνοδο των πολυφωνικών και κοσμικών μουσικών μορφών. Ενώ κατά την Μπαρόκ Περίοδο (1600-1750), αναπτύχθηκαν πολύ ανεπτυγμένες αντιστικτικές μορφές όπως ο κανόνας και η φούγκα. Ένας από τους σπουδαίους συνθέτες αυτών των μορφών ήταν ο Johann Sebastian Bach. Στα τελευταία χρόνια της ζωής του, ο JS Bach έγραψε πολλά τέτοια έργα όπως η «Μουσική Προσφορά» και η «Τέχνη της Φούγκας» [Bach, J.S., 1752]. Η Τέχνη της Φούγκας είναι ένα λαμπρό παιδαγωγικό εργαλείο για τη μελέτη του αντικειμένου, το οποίο συστηματικά τεκμηριώνει τη διαδικασία της σύνθεσης. Επίσης ο Bach χρησιμοποίησε την τεχνική του κανόνα, μια εξαιρετικά διαδικαστική αντιστικτική μορφή η οποία θα μπορούσε να είναι παράδειγμα πρώιμης αλγοριθμικής σύνθεσης. Ο συνθέτης αρχίζει με μια μελωδία, η οποία ακολουθείται αυστηρά με καθυστέρηση από μια άλλη φωνή. Μερικές φορές, μπορεί να παρουσιαστεί μια παραλλαγή με την δεύτερη φωνή σε μεταφορά, αύξηση ή αναστροφή.

Ένα από τα πιο συχνά παραδείγματα αλγοριθμικής μουσικής στην Κλασική Εποχή (1750-1827) είναι το Musikalisches Würfelspiel από τον Wolfgang Amadeus Mozart (1756-1791). Σε αυτή τη σύνθεση, ο Μότσαρτ συνέθεσε διακριτά μουσικά αποσπάσματα που θα μπορούσαν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν ένα βαλς. Η σειρά των μουσικών αποσπασμάτων καθορίζεται με την κύλιση δύο ζαριών έξι πλευρών. Το άτομο που εκτελεί το βαλς έχει ως σημείο αναφοράς μια παρτιτούρα που δημιούργησε ο Μότσαρτ που έδειξε ποια μουσική θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί για τις τιμές των 2-12 στα ζάρια [Simoni , 2003, 727-734].

Ο ρομαντισμός λίγα χρόνια αργότερα ώθησε το αρμονικό λεξιλόγιο στην ακραία χρήση του χρωματισμού. Μετά από τον Richard Wagner (1813-1883), υπήρχαν πολλοί τρόποι με τους οποίους ένας συνθέτης μπορούσε να κάνει αυτό χρησιμοποιώντας τη θεωρία της τονικής μουσικής. Ενώ στην συνέχεια ο Arnold Schoenberg, και οι μαθητές του Anton Webern και Alban Berg, δημιούργησαν νέες διαδικασίες για σύνθεση που ονομάζεται σειριακή σύνθεση .

Στην σειριακή σύνθεση ο συνθέτης εργάζεται με μια σειρά από δώδεκα χρωματικούς τόνους ίσης σημασίας. Σε αυστηρή σειριακή σύνθεση, δεν μπορεί να επαναληφθεί τόνος μέχρι να χρησιμοποιηθούν και οι δώδεκα. Ο συνολικός αριθμός των σειρών δώδεκα σημειώσεων είναι 479.001.600 και με αυτόν τον τρόπο επεκτείνεται σε μεγάλο βαθμό το μελωδικό και αρμονικό λεξιλόγιο της ύστερης ρομαντικής περιόδου. Λόγω της ίσης σημασίας των δώδεκα χρωματικών τόνων, η σειριακή σύνθεση έσπασε την τονικότητα και δημιούργησε την ατονικότητα.

Αλγοριθμικές διαδικασίες προσφέρονται για μια σειριακή σύνθεση. Για να εισαγάγει μια παραλλαγή σε μια σειριακή σύνθεση, ο συνθέτης μπορεί να χρησιμοποιήσει μεταθέσεις της σειράς τόνων που προέρχονται από τη μεταφορά, την αναστροφή, την οπισθοδρόμηση ή την οπισθοδρομική αναστροφή της σειράς. [Hoffmann,2004 , 137-144]



Εικόνα 3 . Η σειρά τόνων για την Lyric Suite από την Alban Berg

Η επόμενη εικόνα δείχνει έναν πίνακα που κατασκευάστηκε με βάση τη σειρά τόνων από την Lyric Suite του Alban Berg. Οι σειρές αριθμούνται 1-12 και οι στήλες φέρουν την ένδειξη AL. Η αρχική μορφή της γραμμής τόνου βρίσκεται στη Σειρά 1, Στήλες AL, και η ανάγνωση γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά. Η οπισθοδρομική μορφή της γραμμής τόνου βρίσκεται με την ανάγνωση της Γραμμής 1, Στήλες AL, (ανάγνωση από δεξιά προς τα αριστερά). Η αντιστροφή της σειράς τόνων βρίσκεται στη Στήλη A που διαβάζεται από τη Σειρά 1 έως τη Σειρά 12 και η ανάδρομη αναστροφή βρίσκεται στην ανάγνωση της Στήλης A από τη Σειρά 12 στη Σειρά 1. Κάθε Σειρά και Στήλη επισημαίνεται περαιτέρω με T ακολουθούμενη από μια τιμή στην περιοχή 0-11. Το T σημαίνει μεταφορά και ο αριθμός είναι το επίπεδο μεταφοράς που μετράται σε μισά βήματα από την αρχική σειρά τόνων. Για παράδειγμα, το T5 σημαίνει ότι η σειρά τόνων έχει μεταφερθεί σε πέντε μισά βήματα από την αρχική φόρμα (π.χ. καθαρή Πέμπτη)[ Brindle, 1969].

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
		T0	T11	T7	T4	T2	T9	T3	T8	T10	T1	T5	T6
1	T0	F	E	C	A	G	D	Ab	Db	Eb	Gb	Bb	B
2	T1	Gb	F	Db	Bb	Ab	Eb	A	D	E	G	B	C
3	T5	Bb	A	F	D	C	G	Db	Gb	Ab	B	Eb	E
4	T8	Db	C	Ab	F	Eb	Bb	E	A	B	D	Gb	G
5	T10	Eb	D	Bb	G	F	C	Gb	B	Db	E	Ab	A
6	T3	Ab	G	Eb	C	Bb	F	B	E	Gb	A	Db	D
7	T9	D	Db	A	Gb	E	B	F	Bb	C	Eb	G	Ab
8	T4	A	Ab	E	Db	B	Gb	C	F	G	Bb	D	Eb
9	T2	G	Gb	D	B	A	E	Bb	Eb	F	Ab	C	Db
10	T11	E	Eb	B	Ab	Gb	Db	G	C	D	F	A	Bb
11	T7	C	B	G	E	D	A	Eb	Ab	Bb	Db	F	Gb
12	T6	B	Bb	Gb	Eb	Db	Ab	D	G	A	C	E	F

Εικόνα 4. Πίνακας για την Lyric Suite του Alban Berg

### 1.3 Στοχαστικοί αλγόριθμοι στην φύση

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε την σχέση μουσικής και φύσης . Μια σχέση η οποία περιγράφηκε σε πολλά έργα του Ξενάκη . Ξεκινώντας από τους μεμονωμένους ήχους του κάθε έμβιου οργανισμού έως την οργάνωση των ήχων της φύσης σε ηχητικά νέφη. Η φύση είναι ο κύριος διδάξαντας και ο κύριος εμπνευστής για την δημιουργία μουσικής στο έργο του Ξενάκη αλλά και πολλών άλλων συνθετών . Τέλος μέσα από την μελέτη των διαφορετικών λειτουργιών των ζώων και των εντόμων θα μπορούσαν να προκύψουν αλγόριθμοι και εξισώσεις που θα χρησίμευαν στην αλγοριθμική και πιο συγκεκριμένα στην στοχαστική σύνθεση.

Στην φύση πολλοί οργανισμοί για λόγους επιβίωσης αναγκάστηκαν να αναπτύξουν κάποιες λειτουργίες ή συνήθειες οι οποίες σταδιακά μεταβιβάστηκαν από την μια γενιά στην επόμενη . Σε αυτή την εργασία θα εξετάσουμε πως τα μυρμήγκια χρησιμοποιώντας ένα σύστημα φερομόνων για να επικοινωνούν μεταξύ τους , κατάφεραν να αναπτύξουν έναν στοχαστικό αλγόριθμο στον οποίον θα βασιστούν σταδιακά και πολλοί αλγόριθμοι ή προγράμματα για την επίλυση διαφορετικών προβλημάτων . Επίσης θα εξετάσουμε το τραγούδι των τζιτζικιών , πως αυτό επιτυγχάνεται , ποια είναι η λειτουργία του στην κοινότητα των τζιτζικιών και πως ο Ιάννης Ξενάκης επηρεάστηκε από αυτά τα ηχητικά νέφη ή και από άλλα όπως (ο ήχος των αστραπών , ο ήχος του πλήθους διαδηλωτών κ.α. ) .Τέλος , θα εξετάσουμε την περιοδικότητα στις αποικίες τζιτζικιών και πως αυτή η περιοδικότητα συμβάλει στην επιβίωση αυτών των λεγόμενων “περιοδικών” τζιτζικιών .

Ο Ξενάκης εξερεύνησε όχι μόνο τις σχέσεις μουσικής και μαθηματικών αλλά είναι και πρωτοπόρος στην διερεύνηση του ηχητικού φάσματος της φύσης. Ο Ξενάκης αναδεικνύει την φύση μέσα από τα πιο ριζοσπαστικά του έργα όπως οι υπαιγιμοί των ήχων της φύσης και των φυσικών φαινομένων μέσω οργανικών ήχων , τα ηχητικά περιβάλλοντα των πολύτοπων , την μεταφορά από τον ήχο της φύσης στον οργανικό ήχο και την αναφορά στην φύση μέσω των φυσικών επιστήμων και των μαθηματικών. Σε πολλά έργα του Ξενάκη ο ακροατής έρχεται αντιμέτωπος με ένα συνονθύλευμα ηχητικών μαζών που δεν έχουν ουδεμιά σχέση με τις παραδοσιακές έννοιες της μελωδίας και της αρμονίας ή της συμφωνίας και της διαφωνίας . Όλες αυτές οι ηχητικότητες είναι παραλλαγές του φυσικού ηχητικού σύμπαντος που μας περιβάλλει , χρωματισμένες με αποχρώσεις φιλοσοφίας [Γεωργάκη , 2009].



Σε προσωπικές του συνεντεύξεις ο Ξενάκης αναφέρεται σε βόλτες που έκανε στην εξοχή και το πώς γοητεύτηκε από την μουσική της φύσης ,με το κελάηδισμα των πουλιών , το θρόισμα των φύλλων κ . α ( Vagras 2004 ). Η φύση για τον Ξενάκη δεν περιορίζεται μόνο στο φυσικό περιβάλλον αλλά πάει πέρα από αυτό στην απεραντοσύνη του σύμπαντος και μέσα από αυτή την προσέγγιση ο Ξενάκης φαίνεται να επιχειρεί ένα βήμα πιο βαθιά στον κόσμο της φύσης [Solomos , 2004].

Στο έργο του Ξενάκη μπορούμε να παρατηρήσουμε επίσης αρκετούς τίτλους έργων που παραπέμπουν στην φύση με συμβολικό χαρακτήρα : Αλλαγή θαλάσσης (1997), Νύμφες της θάλασσας (1994), Λυκόφως (1993-94), Άχυρο στον άνεμο ( 1992), Ροαί (1991), Κρινοϊδή (1991), Το τέλειο ταξίδι των χαρταετών προς την ανδρομέδα (1989), Ηλιοβασίλεμα (1985) , Λειχήνες (1983), Τραγούδι των ήλιων (1983), Για τις φάλαινες(1982), Ομίχλες(1981), Ανεμόεσσα (1979), Πλειάδες (1978), Σχοινώνες (1977),Συστροφές (1976), Νύχτες (1967., κ.α. [Γεωργάκη , 2009].

Σε πολλά έργα διακρίνουμε διάφορους ήχους από την φύση που ο Ξενάκης πρόσθεσε συνειδητά ή ασυνείδητα με μια διάθεση νατουραλισμού .Για παράδειγμα στα πρώτα μέτρα του έργου Ais ακούμε μια σπαρακτική φωνή που παραπέμπει σε κραυγή πουλιού ή στο κεντρικό πέρασμα του έργου Nuits μας παραπέμπει σε ένα περίεργο νυχτερινό μεσογειακό ηχοτοπίο , όπου αναφορές στα επαναληπτικά μοτίβα των γρύλλων και των απελπισμένων κραυγών των πολιτικών κρατουμένων είναι εμφανείς ( Γεωργάκη , 2009 ). Μια διάσταση αναφοράς της φύσης στο έργο του Ξενάκη έχει τις βάσεις της στις φυσικές επιστήμες σε συνδυασμό με τα μαθηματικά μοντέλα που παρομοιάζουν φυσικά πρότυπα ( κινήσεις brown , παραβολική καμπύλη της κίνησης των μορίων των αερίων συναρτήσεως της θερμοκρασίας , τεχνική δένδρομορφών, κυψελωτά αυτόματα). Εκτός από τις συνεχείς αναφορές στην φύση μέσω των φυσικών επιστημών , ο Ξενάκης προβληματίζεται ιδιαίτερα με το θέμα της μορφής , της περιοδικότητας και αναγνώρισης σχηματικών προτύπων που υπάρχουν στην φύση σε σχέση με την μουσική ( Solomos , 2004) .

Μέσα από την εξερεύνηση της γεωμετρικής και χημικής υφής των νεφών και των γαλαξιών ο Ξενάκης θέτει ουσιαστικά τις βάσεις για την εξερεύνηση της μουσικής βάση των αρχών της Φρακταλ Γεωμετρίας . Τα φυσικά νέφη , τα ηχητικά νέφη των διαδηλωτών , τα ηχητικά νέφη των τζιτζικιών είναι διαφορετικές μορφές που απασχολούν έντονα τον Ξενάκη .

Ο Ξενάκης εμβαθύνει μεταξύ άλλων στην εφαρμογή δένδρομορφών στα μουσικά του έργα . Για παράδειγμα στο πιανιστικό έργο Ευρυάλη ο Ξενάκης προσπαθεί να επιτύχει έναν συνεχή ήχο σε ένα όργανο που έχει τις αντίθετες ιδιότητες . Έτσι η ιδέα του δέντρου είναι μια βασική λογική , δηλαδή αντί να έχει κανείς μελωδικά σχήματα και πολυφωνία από απλές γραμμές , μπορεί να έχει στην διάθεση του έναν ‘‘όγκο’’ νοτών που προκύπτουν από μεγεθύνσεις και μετατροπές όλων των ειδών . Οι δένδρομορφές παρατηρεί ο Ξενάκης πως βρίσκονται παντού στην φύση ( φλέβες , νευρά , αστραπές κ.α.) [ Vargas , 2004 ].

### **1.3.1 Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι στην αποικία μυρμηγκιών**

Μελετώντας τις αποικίες των μυρμηγκιών, είτε μέσω του τρόπου επικοινωνίας μεταξύ αυτών, είτε μέσω του τρόπου οργάνωσης , οι επιστήμονες έχουν αναπτύξει διάφορους αλγόριθμους οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μια συνθετική διαδικασία. Ο αλγόριθμος Ant System είναι ένα παράδειγμα μιας μεθόδου Colony Optimization από το πεδίο της Swarm Intelligence, Metaheuristics και Computational Intelligence. Το Ant System ήταν αρχικά ο όρος που χρησιμοποιείται για να αναφερθεί σε μια σειρά αλγορίθμων που βασίζονται στον τρόπο λειτουργίας των αποικιών των μυρμηγκιών, όπου η συγκεκριμένη εφαρμογή αλγορίθμου αναφέρεται ως Ant Cycle . Ο αλγόριθμος Ant System είναι η βασική μέθοδος αντιστάθμισης αποικιών των μυρμηγκιών για τις δημοφιλείς επεκτάσεις όπως το σύστημα Elite Ant . Ο αλγόριθμος του Ant System εμπνέεται από τη συμπεριφορά αναζήτησης των μυρμηγκιών, συγκεκριμένα από την επικοινωνία μεταξύ των μυρμηγκιών μέσα από την παραγωγή φερομονών σχετικά με την καλή πορεία μεταξύ της αποικίας και μιας πηγής τροφής σε ένα περιβάλλον.

Τα μυρμήγκια αρχικά περιπλανιούνται τυχαία γύρω από το περιβάλλον τους. Μόλις βρει φαγητό ένα μυρμήγκι, θα αρχίσει να παράγει φερομόνη στο περιβάλλον. Τα μυρμήγκια κάνουν πολλές μετακινήσεις ανάμεσα στις αποικίες τους και στο μέρος όπου έχουν εντοπίσει τροφή. Όσο πιο πολλές φορές επαναλάβουν την ίδια διαδρομή τόσο πιο πολλή θα είναι η φερομόνη που θα υπάρχει στο περιβάλλον. Η φερομόνη διασπάται στο περιβάλλον, έτσι ώστε οι παλαιότερες διαδρομές να είναι λιγότερο πιθανό να ακολουθηθούν. Άλλα μυρμήγκια μπορεί να ανακαλύψουν την ίδια διαδρομή με το φαγητό και με τη σειρά τους να τα ακολουθήσουν και επίσης να παράγουν φερομόνη. Μια διαδικασία θετικής ανατροφοδότησης μεταφέρει όλο και περισσότερα

μυρμήγκια σε παραγωγικές διαδρομές, οι οποίες στη συνέχεια βελτιώνονται περαιτέρω μέσω της χρήσης. [Bonabeau E., Dorigo M. and G. Theraulaz., 2009].

### 1.3.2 Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι στο σμήνος των τζιτζικιών

Ένα άλλο χαρακτηριστικό το οποίο μπορούμε να αποκωδικοποιήσουμε με τη βοήθεια της επιστήμης και της τεχνολογίας είναι το μονότονο τραγούδι των τζιτζικιών. Προκειμένου να εμβαθύνουμε την κατανόησή μας για τα τζιτζίκια, είναι απαραίτητη η επιστήμη της εντομολογίας. Οι ερευνητές υποστηρίζουν ότι τις τελευταίες δεκαετίες έγινε φανερό ότι τα τραγούδια τζιτζικιών είναι ιδιαίτερα συγκεκριμένο. Αυτό τους επιτρέπει να ανιχνεύουν την παρουσία περισσότερων ειδών σε έναν βίοτοπο χωρίς να τα βλέπουν και να τα συλλέγουν απλά καταγράφοντας και αναλύοντας τις ακουστικές εκπομπές τους. Εκτός αυτού, μπορεί κανείς να αναγνωρίσει τα κρυμμένα, μορφολογικά είδη ανάλυσης και σύγκρισης των τραγουδιών τους. Τα αρσενικά παράγουν ένα δυναμικό ακουστικό σήμα το οποίο χρησιμοποιείται για να κατευθύνουν τα θηλυκά προς αυτά. Τα τραγούδια αυτά συχνά είναι πολύπλοκα με αλλαγές στο ρυθμό, το εύρος και, σε πολλά είδη, διαφοροποίηση της συχνότητας. Ένα τραγούδι που έχει πολλές παραλλαγές πρέπει να εξετασθεί με βάση τη φυσιολογία (είδος τζιτζικιού), τη θερμοκρασία και την περίοδο του καλοκαιριού. Η ηχητική επικοινωνία των τζιτζικιών είναι μονόδρομη και μέσα από αυτό τα αρσενικά υποδεικνύουν τον εντοπισμό, την ταυτότητα και τη διαθεσιμότητά τους προς τα θηλυκά. Ορισμένα είδη εκπέμπουν μια κανονική διαδοχή παλμών και άλλα έχουν ένα αργό μοτίβο στο τραγούδι τους, που παράγεται από τη συντονισμένη νευρική διέγερση τριών λειτουργικών ομάδων μυών. [Kaliakatsos , Epitropakis , Vrahatis 2012, 140-151]

Ο Ιάννης Ξενάκης ανέφερε συνεχώς την ηχητική υφή και την στοχαστική επίδραση των τζιτζικιών για να περιγράψει τα νέφη των ήχων ( granular sound clouds ) που είχε βιώσει κατά την διάρκεια της ζωής του. Σε αυτό το πλαίσιο ο Ξενάκης υπογραμμίζει το γεγονός ότι ορισμένα ηχητικά γεγονότα ( πχ , διαδήλωση ανθρώπων , ήχος πυροβόλων στην μάχη ) μπορεί να είναι πολύ διαφορετικά όταν διαχωριστούν από το πολιτικό ή ηθικό πλαίσιο και εξετασθούν μόνο ως ηχητικά γεγονότα . Αυτήν την σκέψη μπορούμε να την μεταφέρουμε και στο τραγούδι των τζιτζικιών. Έτσι , πολλοί άλλοι σύνθετες έχουν εμπνευστεί από το τραγούδι των τζιτζικιών με διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα ο Bella Bartok επικαλείται το τραγούδι των τζιτζικιών στην σουίτα για πιάνο που έγραψε το 1926 με όνομα Out of Doors , ενώ ο Gyorgy Ligeti στο έργο του

Poeme symphonique (1962) που είναι ένα κομμάτι για 100 μετρονόμους στηρίζεται πάνω στο στοχαστικά νέφη του τραγουδιού των τζιτζικιών . Επίσης ο Ιάnnης Ξενάκης πρωτοεμφάνισε κάτι που μπορεί να παρομοιαστεί με τις κινήσεις των μυρμηγκιών και το τραγούδι των τζιτζικιών στο έργο Πιθοπρακτά (1955-56).

Οι Luc Ferrari και J . C Risset χρησιμοποιούν επεξεργασμένους ήχους τζιτζικιών στην ηλεκτροακουστική μουσική τους, ενώ ο David Rothenberg προσπαθεί να αλληλεπιδράσει με τους ήχους των τζιτζικιών παίζοντας μουσική στην φύση.

Πολλές έρευνες έχουν στρέψει το ενδιαφέρον του στην ανάλυση ή την σύνθεση του τραγουδιού των τζιτζικιών , την μελέτη του φυσικού οργάνου παραγωγής του ήχου , την μελέτη μεταξύ της έντασης του ήχου και του πληθυσμού των τζιτζικιών και την μελέτη της φυσικής αντίδρασης στο τύμπανο των θηλυκών τζιτζικιών . Το όργανο παραγωγής του ήχου των τζιτζικιών ξεκίνησε να μελετιέται από τον 18<sup>ο</sup> αιώνα, αλλά οι πρώτες ηχογραφήσεις αυτού έγιναν λίγο μετά το 1950 όπου εκεί εξακριβώθηκαν οι μορφολογικές δομές που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια του τραγουδιού των τζιτζικιών . Ο μηχανισμός αυτός αποτελείται από ζευγάρια από μεμβράνες οι οποίες ονομάζονται Tymbales οι οποίες διεγείρονται από μύες που έχουν το αντίστοιχο όνομα. Όταν αυτό το σύστημα διεγείρεται ακούγεται ο γνώριμος ήχος του τζιτζικιού ο οποίο ονομάζεται echeme . [Georgaki , Queiroz , 2015].

Αυτός ο ήχος έχει πολλές διαφορετικές λειτουργίες :

- 1) Ως σήμα κίνδυνου για τα υπόλοιπα τζιτζίκια
- 2) Ως αμυντικός μηχανισμός σε αρπακτικά
- 3) Κάλεσμα προς άλλα τζιτζίκια για ζευγάρωμα
- 4) Το να καθορίζουν της περιοχής τους

Έτσι εξηγείτε και ο λόγος που αναπτύχθηκαν τα διαφορετικά ρυθμικά μοτίβα και οι διαφορετικές χροιές που υπάρχουν στο τραγούδι των τζιτζικιών που μπορούν να διακριθούν και από το ανθρώπινο αυτί . Για την ακρίβεια δυο διαφορετικές κατηγορίες μπορούν να διακριθούν , ένα συνεχόμενο τραγούδι και ένα διακεκομμένο τραγούδι . Αυτές οι εκδόσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ως φράσεις που μπορούν να είναι είτε απλές και επαναλαμβανόμενες είτε συγκκοπάτες και περίπλοκες . Ένα άλλο πολύ σημαντικό στοιχείο στο τραγούδι των τζιτζικιών είναι οι χρωδιακές σχέσεις . Όσον αφορά αυτές διακρίνουμε δυο μεγάλες κατηγορίες , συγχρονισμός και αντιχρονισμός . Ο συγχρονισμός φαίνεται να είναι συνεργασία μεταξύ αρσενικών , ο οποίος ποτέ δεν

είναι τέλειος και φαίνεται να έχει άμεση σχέση με το precedence (Hass) effect. Η θηλυκή φωνοταξία επηρεάζεται από το precedence effect υπό την έννοια ότι προτιμάται το πρώτο που θα ξεχωρίσει από δυο ή περισσότερα συγχρονισμένα καλέσματα. Έτσι, τα αρσενικά πρέπει να εφαρμόσουν χρονικούς μηχανισμούς εμπλοκής σήματος με σκοπό να αποτρέψουν καλέσματα είτε αυτά που βρίσκονται σε συγχρονισμό με τα ίδια είτε σε αντιχρονισμό. (Georgaki, Queiroz, 2015)

Πρόσφατες έρευνες αποδεικνύουν ότι η παραγωγή του ήχου γίνεται μέσω ενός συντονιστή Helmholtz (Helmholtz resonator) που ενθουσιάζεται από την κίνηση των Tympanes [Bennet-Clark Young, 1992]. Στα τζίτζικια ο συντονιστής Helmholtz αποτελείται από μια κοιλότητα ανοιχτή προς τα έξω. Η συχνότητα ιδιο-συντονισμού αυτής δίνεται από τη γενική εξίσωση:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{A}{L \times V}\right)}$$

Όπου c είναι η ταχύτητα του ήχου σε υγρό (δηλαδή 340ms για τον αέρα), A είναι η διατομή του λαιμού, L είναι το μήκος του λαιμού και V ο όγκος της κοιλότητας. Όπου ο συντονιστής έχει δύο οπές, οι όροι αυτοί πρέπει να τροποποιηθούν κάπως. Το A πρέπει να συνδυαστεί με την περιοχή των δυο τρυπών. το L γίνεται  $16/3 \pi r$  και το r είναι η διάμετρος της μια τρύπας [Seto, 1971]. Αυτές οι μετατροπές στην προηγούμενη εξίσωση, που περιλαμβάνουν διορθώσεις για αλλοιώσεις σε οποιαδήποτε από τις δυο οπές είναι εφαρμόσιμες στα αρσενικά τζίτζικια στα οποία υπάρχουν δυο tympana κοντά στην κοιλιακή επιφάνεια της κοιλίας. Απλοποιώντας αυτή την εξίσωση, μπορεί να φανεί ότι η συχνότητα συντονισμού μίας σειράς ομοειδών κοιλιοτήτων γίνεται:

$$f_0 \propto \sqrt{\left(\frac{A}{L \times V}\right)} \propto \sqrt{\left(\frac{L^2}{L \times L^3}\right)} \propto \frac{1}{L}$$

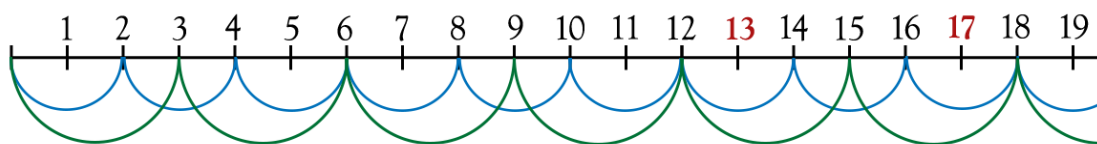
Κάποιος μπορεί να περιμένει ότι η συχνότητα του τραγουδιού θα κλιμακωθεί με το μέγεθος του σώματος στα αρσενικά τζίτζικια, υπό τον όρο ότι οι δομές παραγωγής ήχου, η ηχητική παραγωγή, συντονιστής (Helmholtz), κλιμάκωση έχουν παρόμοιο

σχεδιασμό σε διαφορετικά είδη. Η πλειονότητα των αρσενικών τζιτζικιών φαίνεται ότι έχουν παρόμοια ανατομία και παρόμοιες διαστάσεις σχετικού σώματος, παρόλο που τα μήκη του σώματος τους κυμαίνονται από κάτω από 15 mm έως πάνω από 50 mm. Μπορούμε να αναφέρουμε αυτά ως «τυπικά» τζιτζίκια, ακολουθώντας τον Young (1990). Υπάρχουν κάποιες αξιοσημείωτες εξαιρέσεις από αυτό τον κοινό σχεδιασμό, όπως τα cicada cystosomasaundersii, τα οποία έχουν μια μεγαλύτερη κοιλότητα λεπτού τοιχώματος σε αναλογία με το σώμα τους. [Simmons and Young, 1978].

Πριν από 2.300 χρόνια, ο Έλληνας επιστημονικός συγγραφέας, ποιητής και αστρονόμος, ο Ερατοσθένης της Κυρήνης ( 276- 194 π.Χ.) , έγινε ο πρώτος άνθρωπος που υπολογίζει την περιφέρεια της Γης. Επίσης, εφηύρε το περίφημο Κόσκινο του Ερατοσθένη, το οποίο είναι μια εύκολη μέθοδος για την εύρεση πρώτων αριθμών. Αλλά τώρα φαίνεται ότι κάποια πρόσφατη έρευνα για τα τζιτζίκια μας δίνει έναν άλλο τρόπο να βρούμε πρώτους αριθμούς . Στα μαθηματικά πρώτος αριθμός (ή απλά πρώτος) είναι ένας φυσικός αριθμός μεγαλύτερος της μονάδας με την ιδιότητα οι μόνοι φυσικοί διαιρέτες του να είναι η μονάδα και ο εαυτός του .Έτσι, οι 2, 3, 5, 7, 11, 13 και 17 είναι πρωταρχικοί αριθμοί - αλλά ο αριθμός 18 δεν είναι πρωταρχικός αριθμός, διότι μπορείτε να τον διαιρέσετε και από το 2 και το 9. Στους κύκλους ζωής των τζιτζικιών μπορούμε να βρούμε πολλούς πρώτους αριθμούς. Υπάρχουν περίπου 1.500 είδη γνωστών τζιτζικιών. Υπάρχουν εκείνα που εμφανίζονται κάθε χρόνο το καλοκαίρι, και υπάρχουν και τα λεγόμενα "περιοδικά" τζιτζίκια. Εμφανίζονται σε διαστήματα πρωταρχικού αριθμού - 7 ετών, 13 ετών και 17 ετών. Ο κύκλος αναπαραγωγής ξεκινά όταν εμφανιστούν τεράστιοι αριθμοί ενήλικων τζιτζικιών την άνοιξη. Το κάθε θηλυκό τρυπάει στο ξύλο των δέντρων και εισάγει μέχρι περίπου 400 με 600 αυγά. Αυτά τα αυγά εκκολάπτονται μετά από δύο έως έξι εβδομάδες. Τα μικρά μωρά φτάνουν μέχρι το έδαφος (σκάβοντας κάτω ή απλώς πέφτουν), σκάβουν το δρόμο τους στο έδαφος με τα νύχια τους και ξεκινούν την επόμενη φάση της ζωής τους, στις ρίζες των θάμνων και των δέντρων για τα επόμενα 6 , 12 ή 16 έτη. Τα 17χρονα τζιτζίκια εξελίσσονται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε νύμφες μετά από 8 χρόνια, αλλά συνεχίζουν να τρέφονται υπόγεια μέχρι το 17ο έτος όταν βγαίνουν από το έδαφος και προσκολλώνται σε οποιοδήποτε κοντινό δέντρο ή θέση. Το κέλυφος τους χωρίζεται, οι ενήλικες εμφανίζονται και ζουν μόνο για μερικές εβδομάδες πριν πεθάνουν. [Goles , Schulz , Markus 2000].

Μια προηγούμενη θεωρία ήταν ότι εάν τα τζιτζίκια ζουν σε διαφορετικούς κύκλους, και αν αυτοί οι κύκλοι είναι πρωταρχικοί αριθμοί, θα συναντιούνται πολύ σπάνια . Για παράδειγμα, ένας κύκλος 13 ετών και ένας κύκλος 17 ετών θα συναντιούνται μόνο κάθε 221 χρόνια. Αυτό σημαίνει ότι και τα δύο είδη τζιτζικιών θα βγαίνουν σε τεράστιους αριθμούς και όλοι θα πρέπει να ανταγωνίζονται για την ίδια ποσότητα τροφής μόνο μία φορά κάθε 221 χρόνια. Τον υπόλοιπο χρόνο, θα υπήρχε αρκετό φαγητό. Αυτή είναι μια ωραία θεωρία, αλλά ο Mario Markus, φυσικός του Ινστιτούτου Molecular Physiology του Max Planck στη Γερμανία, έχει καταλήξει σε μια νέα θεωρία. Σχετίζεται με περιοδικά αρπακτικά ζώα. Ας υποθέσουμε ότι υπάρχουν κάποιοι θηρευτές (όπως τα πουλιά, και η σφήκα δολοφόνοι των τζιτζικιών) που προσβάλλουν τα τζιτζίκια και ότι τα τζιτζίκια εμφανίζονται κάθε 12 χρόνια. Στη συνέχεια, οι θηρευτές που βγαίνουν κάθε δύο χρόνια θα τους επιτεθούν, όπως και οι αρπακτικοί που θα βγουν κάθε 3 χρόνια, 4 χρόνια και 6 χρόνια. Αλλά σύμφωνα με τον Mario Markus, "αν τα τζιτζίκια μεταλλαχθούν σε κύκλους 13 ετών, θα επιβιώσουν." [ Markus 2000]

Ο Markus και οι συνεργάτες του δημιούργησαν ένα μαθηματικό μοντέλο. Σε αυτό το μαθηματικό μοντέλο, εάν πέσει θήραμα από ένα αρπακτικό ζώο, τότε χάνει. Σύμφωνα με αυτό το μαθηματικό μοντέλο, καθώς τα έτη κυλούν, το μήκος του κύκλου αυξάνεται μέχρι τα τζιτζίκια να φτάσουν έναν πρωταρχικό αριθμό και στη συνέχεια να παραμείνει εκεί. Αυτό το μοντέλο έχει ένα απροσδόκητο και ευχάριστο αποτέλεσμα. Αποδεικνύεται ότι είναι μια μηχανή, όπως το κόσκινο του Ερατοσθένη 2300 χρόνια πριν, που μπορεί να παράγει πρωταρχικούς αριθμούς. Αυτά τα φαινόμενα ονομάζει ο KS Williams ως Stochastic natural events .



Εικόνα 5. Με την πράσινη γραμμή βλέπουμε την γέννηση των τζιτζικιών ενώ η μπλε των αρπακτικών .

## 2. Ιάννης Ξενάκης : ο «αρχιτέκτονας» της Στοχαστικής Μουσικής

### 2.1 Στοχαστική μουσική : ορισμός

Η Στοχαστική μουσική είναι μια μέθοδος της σύγχρονης κλασικής σύνθεσης που αναπτύχθηκε αρχικά από τον Ιάννη Ξενάκη στις αρχές της δεκαετίας του 1950 και περιγράφεται στο βιβλίο του *Formalized Music*. Η τεχνική αυτή προέκυψε από την κριτική του Ξενάκη για τον σειραϊσμό, ο οποίος στην οπτική του Ξενάκη αντικατέστησε τη φυσική αιτιότητα της τονικής μουσικής με την αφηρημένη αιτιότητα για να δημιουργήσει ατονική μουσική. Ωστόσο, ο Ξενάκης καταλήγει ότι αυτή η αιτιότητα δεν μπορεί να γίνει αντιληπτή και αυτό που ο ακροατής ακούει είναι απλά μια τυχαία σειρά αποχρώσεων, που ο σειραϊσμός :“συνθλίβει κάτω από την πολυπλοκότητά του” [Wolrkowicz, , Kulka, , Kešelj 2007].

Ο Ξενάκης σκόπευε να δημιουργήσει μουσική που θα απόφευγε τις δεσμεύσεις της αιτιότητας, αλλά θα παραμένει λογική και η εγγενής λογική του θα μπορούσε να γίνει αντιληπτή σε μακροσκοπικό επίπεδο από τον ακροατή. Αυτό συχνά οδηγεί σε μια αργά-εξελισσόμενη μάζα ήχου, μια ιδέα που ενέπνευσε και τους συνθέτες του *Sonorism*. Το "Στοχαστικό" είναι ένας όρος δανεισμένος από τη θεωρία της πιθανότητας και τη θεωρία των μεγάλων αριθμών από μαθηματικής πλευράς και του στοχασμού από φιλοσοφικής. Ο Ξενάκης το περιγράφει ως "μια ασυμπτωτική εξέλιξη προς μια σταθερή κατάσταση, προς ένα είδος στόχου". Η στοχαστική μουσική είναι το είδος καθοδηγημένου μη προσδιορισμού, όπου η ακόλουθη κατάσταση καθορίζεται μόνο εν μέρει από την προηγούμενη κατάσταση, που σημαίνει ότι η συγκεκριμένη κατάσταση  $n + 2$  ακολουθεί την κατάσταση  $n + 1$  μόνο με κάποια πιθανότητα. Κάθε πτυχή της μουσικής, είτε είναι η συχνότητα, η διάρκεια, η δυναμική και ούτω καθεξής, μπορεί να υπαχθεί σε τέτοιους νόμους τυχαιότητας [Halliday,2013].

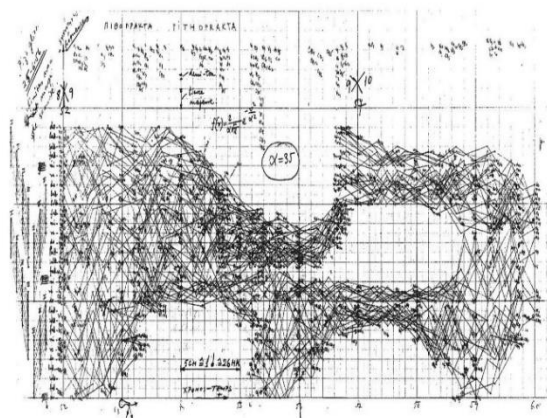
Η στοχαστική μουσική δανείζεται όρους από τα μαθηματικά όπως ο νόμος μεγάλων αριθμών, η θεωρία πιθανοτήτων, η θεωρία των παιχνιδιών, η άλγεβρα του Bool, οι αλυσίδες Markov, ο νόμος Poisson, η θεωρία των ομάδων κ.ο.κ. Αυτά τα μαθηματικά μέσα χρησιμοποιούνται για να κατευθύνουν την αναιτιοκρατία. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος είναι διαφορετική από την ατονικότητα, όπου η τυχαιότητα δεν καθοδηγείται από μαθηματικούς ή άλλους τέτοιους νόμους. Επίσης, η παραγωγή των στοχαστικών διεργασιών συνήθως καταγράφεται σε παραδοσιακή παρτιτούρα στο τέλος, ενώ για



την διαδικασία παραγωγής αυτής συχνά χρησιμοποιούνται εναλλακτικές παρτιτούρες ή ακόμη και εναλλακτικές σημειώσεις [Jones, P., Smith, P., 2011].

Η στοχαστική μουσική αναφέρεται μερικές φορές ως τεχνική σύνθεσης, μερικές φορές ως είδος. Αν και η στοχαστική μουσική δανείζεται έντονα τόσο από τον σειραϊσμό όσο και από την ατονικότητα, διακρίνεται από τις βασικές φιλοσοφικές ιδέες της και από την εφαρμογή επιστημονικών ή άλλων μη μουσικών εννοιών στη μουσική που να εμπλουτίζουν την αντίληψη μας και να επαναπροσδιορίζουν την έννοια της "αρμονίας". Η χρήση των υπολογιστών είναι επίσης ευπρόσδεκτη στη στοχαστική μουσική λόγω της ανάγκης πολλών υπολογισμών που χρειάζονται πολύ χρόνο όταν αυτό γίνεται με το χέρι. Αυτό οδήγησε σε παρτιτούρες που δημιουργήθηκαν από υπολογιστές που χρησιμοποιούν προκαθορισμένους αλγορίθμους, καθώς και σε ηλεκτρονικά κομμάτια [Wołkowicz, , Kulka, , Kešelj 2007] . Έτσι το ηχητικό υλικό διαμορφώνεται «προς ένα στόχο» και εισάγεται το τυχαίο στη μουσική, όχι όμως με τον τρόπο που το έκαναν άλλοι συνθέτες εκείνη την εποχή (όπως ο Αμερικανός Τζον Κέιτζ [1912-1992] ), αλλά με βάση τη θεωρία των πιθανοτήτων και τους νόμους της στατιστικής. Με αυτή τη λογική, ο Ξενάκης κατασκευάζει ηχητικά συμβάντα , τα οποία αποτελούνται από ένα μεγάλο πλήθος μεμονωμένων ήχων, με βάση τους στοχαστικούς νόμους. Συνθέτει έναν κύκλο έργων το 1962, τα οποία αριθμεί με τα αρχικά *ST* (*ST*, από το «Στοχαστικά») ενώ τα προηγούμενα έργα του τα κατέταξε στην κατηγορία της «ελεύθερης στοχαστικής μουσικής». Ως μεμονωμένα γεγονότα ενός μαζικού φαινομένου, που ορίζεται από στοχαστικούς νόμους, μπορούν να θεωρηθούν ομάδες οργάνων, ηχοχρώματα , μορφολογικές δομές κ.ά.

*Pithoprakta* (1955-56), mesures 52-59 : graphique de Xenakis  
Source : Iannis Xenakis, *Musique, Architecture*, Tournai, Casterman, 1976, p. 167



Εικόνα 5. Η εναλλακτική παρτιτούρα του έργου Pithoprakta

## 2.2 Η στοχαστική μουσική του Ιάννη Ξενάκη

Ο Ιάννης Ξενάκης ήταν επαναστάτης, τόσο στην πολιτική όσο και στην τέχνη. Η πρωτοποριακή του προσέγγιση και ο αντίκτυπος που είχε η μουσική του στις επόμενες γενιές, μας οδηγεί να υποθέσουμε ότι οποιαδήποτε ιστορία της ηλεκτρονικής μουσικής από το σήμερα και μετά είναι λογικό να τοποθετήσει τον Ξενάκη ως κεντρικό πρόσωπο. Η εμπλοκή του στα πολυμέσα έφερε ευρεία έκθεση, αλλά η φύση του ασυμβίβαστου αισθητικού του οράματος σήμαινε ότι δεν πέτυχε φήμη και περιουσία σε μεγάλη κλίμακα. Η ηλεκτροακουστική μουσική του Ξενάκη είχε σαφείς επιρροές σε όλα της τα στάδια (αισθητικό , φιλοσοφικό , μαθηματικό , μουσικό ) . Ο Ιάννης Ξενάκης , χρησιμοποίησε τις διάφορες θεωρίες για να παράγει τα αποτελέσματά του και πρωτοστάτησε στη στοχαστική μουσική. Αν και σύγχρονος των Stockhausen, Boulez και Cage, ο Ξενάκης ήταν μηχανικός και αρχιτέκτονας που δημιούργησε επαναστατικά σχέδια με τον Le Corbusier,. Πολλές από τις καινοτομίες του Ξενάκη στη μουσική και την αρχιτεκτονική πραγματοποιήθηκαν σε εκατοντάδες εντυπωσιακά γραφήματα και στη μελέτη του «Μουσική αρχιτεκτονική» [Bestougeff, 1975].

Η μουσική του Karlheinz Stockhausen βρίσκεται σε έντονη αντίθεση με αυτή του Ιάννη Ξενάκη. Ο Stockhausen ανέπτυξε σειραϊκή σύνθεση εφαρμόζοντας όχι μόνο σειραϊκές μεθόδους αλλά και μαθηματικά μοντέλα για ρυθμό, δυναμική και πυκνότητα. Ο Stockhausen επηρεάστηκε από τον Γερμανό φιλόσοφο Hegel και το δόγμα του για την ενότητα των αντιθέτων. Ο Stockhausen εφάρμοσε τη φιλοσοφία του Hegel, χρησιμοποιώντας υπολογισμούς για να συνθέσει τη μουσική του. Ένα εκπληκτικό παράδειγμα της δουλειάς του είναι το Klavierstück XI(1956) για πιάνο. Η παρτιτούρα που μετράει περίπου τριάντα επτά ίντσες επι είκοσι ένα ίντσες, αποτελείται από δεκαεννέα τμήματα που ο πιανίστας εκτελεί με οποιαδήποτε σειρά το μάτι του / της συμβαίνει να πέσει πάνω στην παρτιτούρα. Ο Stockhausen χρησιμοποίησε τυχαίες μεταβολές παρόμοιες με αυτές που διερευνήθηκαν από τον Μότσαρτ στο Musikalisches Würfelspiel σχεδόν διακόσια χρόνια νωρίτερα. Ήταν το 1957 όταν ο Lejaren Hiller και ο Leonard Isaacson προγραμματίζουν τον υπολογιστή ILLIAC στο Πανεπιστήμιο του Illinois για να παράγουν μουσική αλγοριθμικά. Η έξοδος του λογισμικού τους δημιούργησε το ILLIAC Suite το οποίο έγραφε παρτιτούρα για κουαρτέτο εγχόρδων. Το έργο του Hiller και του Isaacson τεκμηριώνεται στο βιβλίο "Experimental Music". Μέχρι το 1962, ο Ξενάκης άρχισε να χρησιμοποιεί τον

υπολογιστή για να βοηθήσει στους υπολογισμούς για τις συνθέσεις του Amorsima-Morsima και Strategie, Jeu pour deux orchestres [Hiller, 1959].

Ο Ξενάκης χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα για την πρωτοποριακή ηλεκτρονική μουσική του και για τη χρήση στοχαστικών μαθηματικών τεχνικών στις συνθέσεις του, συμπεριλαμβανομένης της πιθανοτικής εξίσωσης (Maxwell-Boltzmann κινητική θεωρία των αερίων στην Πιθοπράκτα, την τυχαία κατανομή των σημείων στο έργο Διαμορφώσεις, τους ελάχιστους περιορισμούς στην Achorripsis, Gaussian κατανομή σε ST / 10 και τις Μαρκοβιανές αλυσίδες στα Analogiques, θεωρία παιγνίων (στο Duel and Strategie), θεωρία ομάδων (Nomos Alpha) και Bool άλγεβρα (στο Herma και Eonta). Σύμφωνα με τη χρήση των πιθανοτικών θεωριών, πολλά από τα κομμάτια του Ξενάκη είναι, με τα δικά του λόγια, "μια μορφή σύνθεσης που δεν είναι το αντικείμενο από μόνη της, αλλά μια ιδέα από μόνη της, δηλαδή οι αρχές μιας οικογένειας των συνθέσεων "[Bestougeff, 1975] . Η μεγάλη εξάρτηση της μουσικής του Ξενάκη από τα μαθηματικά, και κυρίως η θεωρία των πιθανοτήτων, οδήγησε σε κριτική και έλλειψη εκτίμησης τόσο από τη μουσική κοινότητα όσο και από το ευρύ κοινό. Το 1962 κυκλοφόρησε το Musique Formelles ( Formalized Music )- το οποίο αναθεωρήθηκε αργότερα, επεκτάθηκε και μεταφράστηκε ως "Τυποποιημένη Μουσική» το 1971, μια συλλογή από δοκίμια για τις μουσικές του ιδέες και τεχνικές σύνθεσης, θεωρούμενο ως ένα από τα σημαντικότερα θεωρητικά έργα της μουσικής του 20ου αιώνα [Brigitte, 1997] .

Στις αρχές της δεκαετίας του 1950, όταν μελετούσε με τον Olivier Messiaen, ο οποίος δίδαξε επίσης τους Stockhausen και Boulez, έπρεπε να αναπτύξει την προσέγγιση της σύντηξης της αρχιτεκτονικής μουσικής και των μαθηματικών μαζί σε μια επαναστατική προσέγγιση της διαδικασίας σύνθεσης. Ο Messiaen προσέφερε μια κατανόηση δύο βασικών πτυχών της πρωτοποριακής μουσικής, την ιστορική προοπτική που απαιτείται για να τοποθετηθεί η μουσική γλώσσα και την προσωρινή εγκυρότητα οποιουδήποτε σταδίου εξέλιξης αυτής της γλώσσας. Αντί να διδάξει τις παραδοσιακές τεχνικές κλασικής μουσικής στον Ξενάκη, ο Messiaen συμβούλευσε τον Ξενάκη να αναζητήσει μουσική έμπνευση σε ένα μίγμα από τις ελληνικές ρίζες του, το τεχνικό και φιλοσοφικό υπόβαθρο του και το έργο του ως αρχιτέκτονα. [Bestougeff, 1975] Ο ίδιος ο Messiaen έδωσε το βραβείο του Ιπότη της Λεγεώνας της Τιμής στον Ιάννη Ξενάκη στο Παρίσι το 1977. Τα πρώτα κομμάτια του Ξενάκη, ο οποίος ακολούθησε πιστά τις συμβουλές του Γάλλου συνθέτη, βασίζονται στη χρήση χαρτιού

γραφημάτων (που συνήθιζε να οργανώνει τον χρόνο με ορθολογικό τρόπο ) και στο μετρικό σύστημα Modulor του Le Corbusier για τη διαμόρφωση μουσικών μορφών με βάση τη σειρά Fibonacci και τη χρυσή τομή. Ο Ξενάκης άρχισε να δημιουργεί μια ηχητική εικόνα της σειράς Fibonacci , που ορίζεται από τη χρυσή τομή ,μέσω μιας μαγνητικής ταινίας με το οποίο αποτυπώνεται στο Le Sacrifice (1953). Αυτό που σηματοδοτεί αυτή την απλή πρώιμη καινοτομία είναι ότι αντιβαίνει στην παραδοσιακή δυτική μουσική, όπου ο παλμός του χρόνου ορίζεται εξωτερικά ως σταθερό στοιχείο. Στο έργο του Ξενάκη, η καινοτομία είναι ότι η συνθετική διαδικασία ποικίλλει καθ 'όλη τη διάρκεια της ζωής του.[Xenakis, I. 1971].

Μέχρι το 1954 , είχε διακριθεί κάνοντας υπολογιστικές μελέτες για την δημιουργία αρχικών αρχιτεκτονικών σχεδίων. Το 1954 ολοκληρώθηκε η σύνθεση που είναι συνήθως αναγνωρισμένη ως το πρώτο του ώριμο έργο , το έργο Metastasis . Εκεί ο Ξενάκης πήρε το ριζοσπαστικό βήμα της υιοθέτησης γεωμετρικών μεθόδων για την διαδικασία της μουσικής σύνθεσης [Varga , 1996] . Η σύνθεση περιλαμβάνει τέσσερα ξεχωριστά μέρη , το καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα σύνολο αλληλεπικαλυπτόμενων ευθειών γραμμών . Κάθε σχήμα είναι μια προβολή στη δισδιάστατη σελίδα ενός τμήματος της τρισδιάστατης γεωμετρικής κατασκευής που αποτελείται από μια διπλή επιφάνεια [Robindore , 1997]. Μέσα από κάθε σημείο πάνω σε μια τέτοια επιφάνεια περνούν δύο ξεχωριστές ευθείες γραμμές κάθε μια από τις οποίες βρίσκεται εξ ολοκλήρου στην επιφάνεια . Τέτοιες ευθείες γραμμές στον τρισδιάστατο χώρο δημιουργεί ευθείες γραμμές σε επίπεδη προβολή . Αυτό καθιστά εύκολη την παραγωγή τέτοιων προβολών σε χαρτί [Xenakis 1963] . Η προσθήκη από τον συνθέτη συμβατικών σημειωμένων και η μέτρηση αριθμών στο σκίτσο δημιουργεί μια αντιστοιχία μεταξύ των δύο χωρικών διαστάσεων στις οποίες εμφανίζονται αυτές οι προβολές και οι ακουστικές διαστάσεις του βήματος και του χρόνου . [Varga , 1996]

Το έργο Metastasis γράφτηκε το 1953-1954 αλλά παρουσιάστηκε το 1955 στο Donaueschingen Festival . Το έργο αυτό είναι 8 λεπτά σε διάρκεια και χρειάζεται 61 μουσικούς ( 12 πνευστά , 3 κρουστούς και 46 έγχορδα ) εκ των οποίων κάποιες δεν παίζει το ίδιο μέρος . Πρακτικά το έργο αυτό γράφτηκε χρησιμοποιώντας την τεχνική των ηχητικών μαζών ( sound mass ή αλλιώς sound clouds ) . Στην μουσική σύνθεση η τεχνική των ηχητικών μαζών είναι το αποτέλεσμα τεχνικών σύνθεσης όπου η σημασία των βημάτων ελαχιστοποιείται , προτιμώντας την υφή , την δυναμική και την αίσθηση ως κυρίους διαμορφωτές της σύνθεσης. Έτσι επιτυγχάνεται μια σκίαση μεταξύ θορύβου και όλων των υπόλοιπων ήχων που διέπουν την σύνθεση [Brigitte ,1997].

Σε αυτή την σύνθεση ο κάθε μουσικός εκτελεί τα γκλισάντο σε διαφορετική συχνότητα και σε διαφορετικούς χρόνους. Το έργο αυτό κυριαρχείται κυρίως από έγχορδα τα οποία ξεκινάνε από ταυτοφωνία και στην συνέχεια χωρίζονται σε 46 ξεχωριστά μέρη . Το 1968 το έργο αυτό παρουσιάστηκε στην Νέα Υόρκη με ένα μπαλέτο που έγραψε ο Ξενάκης για το συγκεκριμένο έργο . Αρχικά το έργο αυτό ήταν μέρος μιας τριλογίας του συνθέτη με όνομα Αναστενάρια αλλά στην συνέχεια αποκόπηκε από αυτήν . Αυτό το έργο επηρεάστηκε από τον τρόπο που ο Αϊνστάιν έβλεπε τον χρόνο και από τις μαθηματικές ιδέες του Λα Κορμπιζιε . Στον πόλεμο όπως ήξερε ο Ξενάκης μέσω του μουσικού του αυτού δεν θα μπορούσε να διακριθεί ένας ήχος μέσα στην κακοφωνία αλλά το σύνολο του ήχου του πυροβολισμού ήταν σαφώς ο προσδιορισμός του ηχητικού τοπιού για το έργο Metastasis. Το πρώτο μέρος του έργου δεν έχει κάποιο μελωδικό θέμα ή μοτίβο αλλά περισσότερο συγκεντρώνεται στην ενέργεια των γκλισάντο στον χρόνο . Το δεύτερο μέρος έχει κάποιο μελωδικό στοιχείο το οποίο προκύπτει από μια δωδεκαθοδογική σειρά της οποίας η διάρκεια καθορίζεται από την σειρά Φιμπονάτσι η οποία συχνά χρησιμοποιούταν και από τον Μπέλα Μπάρτοκ σε πολλά του έργα . [Xenakis 1992] Το 1954, η αφοσίωση του Ξενάκη στη σύγχρονη μουσική κουλτούρα ενισχύθηκε όταν έγινε ένα από τα πρώτα μέλη του Groupe de recherches de musique concrete (GRM) και την ίδια χρονιά ολοκλήρωσε τις πρώτες του ορχηστρικές συνθέσεις, εξερευνώντας τις νέες μεθόδους ηχογράφησης. Σε αυτές ενσωμάτωσε επίσης την έννοια του χρόνου του Αϊνστάιν και την ακολουθία Fibonacci δημιουργώντας στατικές ατμόσφαιρες που μοιάζουν με αρχιτεκτονική, οι οποίες αναφέρονται στην παρτιτούρα ως: Τάξη, Πολυπλοκότητα, Διαταραχή και ξανά Τάξη, που εξελίσσονται από το ένα στο άλλο. [Feller, 1968].

Το 1955-56, κυρίως στο έργο Pithoprakta, ο Ξενάκης εισήγαγε την «Στοχαστική Μουσική» και διερεύνησε τις καινοτόμες δυνατότητές του όσον αφορά:

- (α) Μια λύση σε αυτό που ονομάζεται «αδιέξοδο» της σειριακής μουσικής.
- (β) Μια τεχνική για τη δημιουργία και την άρθρωση των ηχητικών μαζών που εμπνέονται από τις φυσικές εκδηλώσεις.
- (γ) Μια ευκαιρία να ενσωματωθούν οι έννοιες της σύγχρονης επιστήμης στον τομέα της μουσικής σύνθεσης.
- (δ) Να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα του «ποιο είναι το ελάχιστο των λογικών περιορισμών που απαιτούνται για την κατασκευή μιας μουσικής διαδικασίας;»

Ο Luque (2009) περιγράφει πολλά χαρακτηριστικά αυτής της διαδικασίας που υπογράμμισαν τις "Νέες Προτάσεις" του Ξενάκη συμπεριλαμβάνοντας την ανάμειξη ηλεκτρονικών ήχων με «συγκεκριμένους» ήχους (όπου το μεταβατικό τμήμα του ήχου είναι πιο σημαντικό από το μόνιμο μέρος) και πολλές άλλες εξελίξεις [Brigitte Robindoré, 1997] .

Στο πρώτο μέρος του έργου Pithoprakta (μέτρα 0-51) ο Ξενάκης χρησιμοποιεί θεωρίες πιθανοτήτων για τα τονικά ύψη που προκύπτουν από την εξίσωση  $P_x = \int e^{-x} \cdot m \cdot dx$  (radium formula) ενώ για τις αντίστοιχες διάρκειες αυτών των τονικών υψών χρησιμοποιεί την ίδια εξίσωση σε πιο απλή μορφή  $P_x = \int e^{-x} \cdot dx$  . Στο δεύτερο μέρος του έργου στα μετρά 52-59 ο Ξενάκης χρησιμοποιεί glissandos βασισμένα στον Νόμο του Gauss . Από τον ορισμό, glissando είναι όταν μια ηχητική διαδικασία σε ένα συγκεκριμένο τονικό ύψος σταδιακά μετατοπίζεται ( γλιστρά) προς ένα άλλο τονικό ύψος , πρόκειται ουσιαστικά για ένα διάστημα το οποίο εκτελείται σταδιακά και όχι στιγμιαία ή αρμονικά. Έτσι ο Ξενάκης αντιστοιχίζει από τον νομό του Gauss ( βλέπε παρακάτω) την τοποθεσία ενός σωματιδίου (απόσταση ) ως τονικό ύψος (άξονας  $\chi$ ) και τον χρόνο της εξίσωσης με τον χρόνο εκτέλεσης του glissando ( άξονας  $\psi$ ) . Έτσι με αυτό τον τρόπο χρησιμοποιείται ένα στοχαστικό μοντέλο για την δημιουργία μουσικής. Από την θεωρητική σκέψη μέχρι την απόδοση αυτών των διαδικασιών σε παρτιτούρα, μπορούμε να διακρίνουμε 3 στάδια τα οποία συχνά αλληλοκαλύπτονται μεταξύ τους :

- 1) Μαθηματικοί ορισμοί ( π.χ. ερευνά του νομού του Gauss)
- 2) Θεωρητικά σχέδια που αφορούν τις διάρκειες (π.χ. κατανομές ταχυτήτων)
- 3) Εφαρμογή θεωρητικών μοντέλων στην πράξη

Οι πρώτες δυο φάσεις αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο ενώ η τρίτη το μουσικό με οποίο ξεκινά και η διαδικασία παραγωγής παρτιτούρας . Αυτό το σημείο πρώιμης σύνθεσης θα μπορούσε ευκολά να μπερδευτεί με την σύνθεση ως μουσική διαδικασία. Οι αισθητικές επιλογές από αυτό το σημείο και έπειτα είναι που θα δώσουν στον έργο μια αισθητική πνοή και την πλήρωση του έργου ή του μέρους ως μουσική σύνθεση .

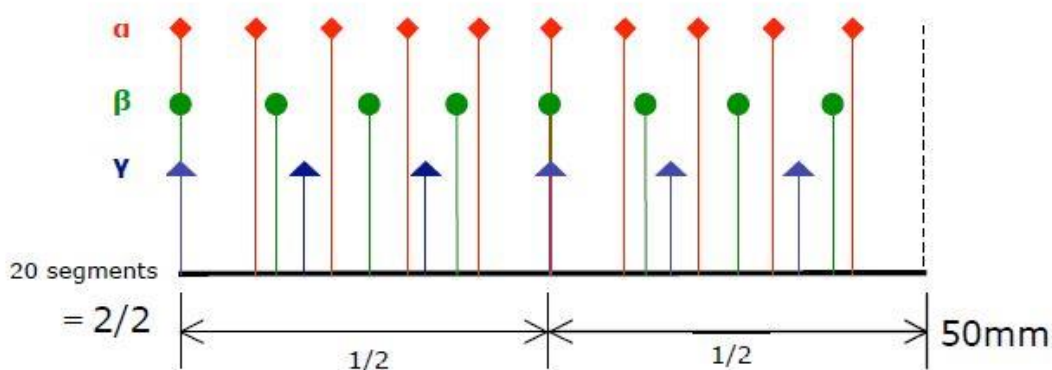
Ο νομός του Gauss (κατανομή Gauss) μετά από διατύπωση του ίδιου το 1809 ( ενώ ήταν ήδη γνωστή από το 1774 από τον LaPlace ) : μια τυχαία μεταβλητή  $X$  είναι σωστά κατανομητή όταν η εξίσωση της πυκνότητας  $F(X)$  έχει την εξής μορφή :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Όπου  $\mu$  και  $\sigma$  πρόκειται για παραμέτρους της εξίσωσης όπου  $\mu$  είναι οποιοσδήποτε πραγματικός αριθμός ενώ  $\sigma$  είναι οποιοσδήποτε θετικός αριθμός . Για να περιγράψει ο Ξενάκης ήχους ενός οργάνου (glissandos) χρησιμοποιεί την εξής εξίσωση προερχόμενη από τον νομό του Gauss :

$$f(v) = \frac{2}{\sigma\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{v^2}{\sigma^2}}$$

Όπου  $\alpha$  είναι η θερμοκρασία της ατμοσφαιράς .Ο Ξενάκης “δίνει” σε αυτή την φόρμουλα θεωρητικές ή νοητές τιμές θερμοκρασίας και έτσι παράγονται τα αποτελέσματα . Όσο για τις χρονικές διάρκειες αυτού του μέρους ο Ξενάκης χωρίζει ένα μέτρο των 2/2 σε 20 μη όμοια μέρη από τα οποία προκύπτουν 3 συγκεκριμένη ρυθμικά pattern τα οποία κατανέμονται ξεχωριστά στα 46 έγχορδα ( 24 βιολιά , 8 βιόλες , 8 τσέλο , 6 κοντραμπάσα) .[ Antonopoulos, 2011].



Εικόνα 5 . Η κατανομή των ρυθμών στην καθεμιά από τις 3 ομάδες στα μετρά 51-59 στο έργο Pithoprakta .

Στα μέσα της δεκαετίας του 1960 ο συνθέτης, αρχιτέκτονας και θεωρητικός Ιάννης Ξενάκης ξεκίνησε την έρευνά του για την στοχαστική σύνθεση: μια προσέγγιση στη σύνθεση που χρησιμοποιεί πιθανοτικές κατανομές για να χειριστεί μεμονωμένα

ψηφιακά δείγματα. Συνέχισε με αυτή την έρευνα τη δεκαετία του 1970 και από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 μέχρι το τέλος της σταδιοδρομίας του. Οι πρώτες συγκεκριμένες ιδέες του Ξενάκη για την στοχαστική σύνθεση δημοσιεύτηκαν με τίτλο "Νέες προτάσεις στη δομή μικροσκοπίων" ( New Proposals In Microsound Structure ). Ο Ξενάκης ξεκινάει την καταγραφή των ιδεών του απορρίπτοντας την ανάλυση Fourier ως βάση για ηχητική σύνθεση [Brigitte Robindoré, 1997] .Το 1958-1959 ο Ξενάκης αναπτύσσει τα έργα Αναλογικό Α και Αναλογικό Β ( Rebonds A , Rebonds B ) με την υπόθεση ότι ένας ήχος αποτελείται από χιλιάδες μικρόκοκκους. Την εποχή εκείνη, δεν μπορεί όμως να εφαρμόσει την υπόθεση αυτή γιατί δεν διαθέτει τεχνολογικά μέσα που να μπορούν να παράγουν τέτοιους κόκκους . Πειραματίζεται λοιπόν με κόκκους που αποτελούν ήδη ήχους ( ενόργανους ) ήχους μικρής διάρκειας στο Αναλογικό Α και τους συντόμους ηλεκτρονικούς ημιτονοειδείς ήχους στο Αναλογικό Β. Η υπόθεση αυτή θα δώσει γέννηση την δεκαετία του 1970 στην κοκκώδη ηχητική σύνθεση (granular synthesis ) Η υπόθεση λοιπόν είναι ότι για το αυτί οι ηχητικοί αυτοί κόκκοι θα σμιζούν και για να παράγουν ένα σύνθετο ήχο [Μάκης Σολωμός ,2003 , 22-24] .

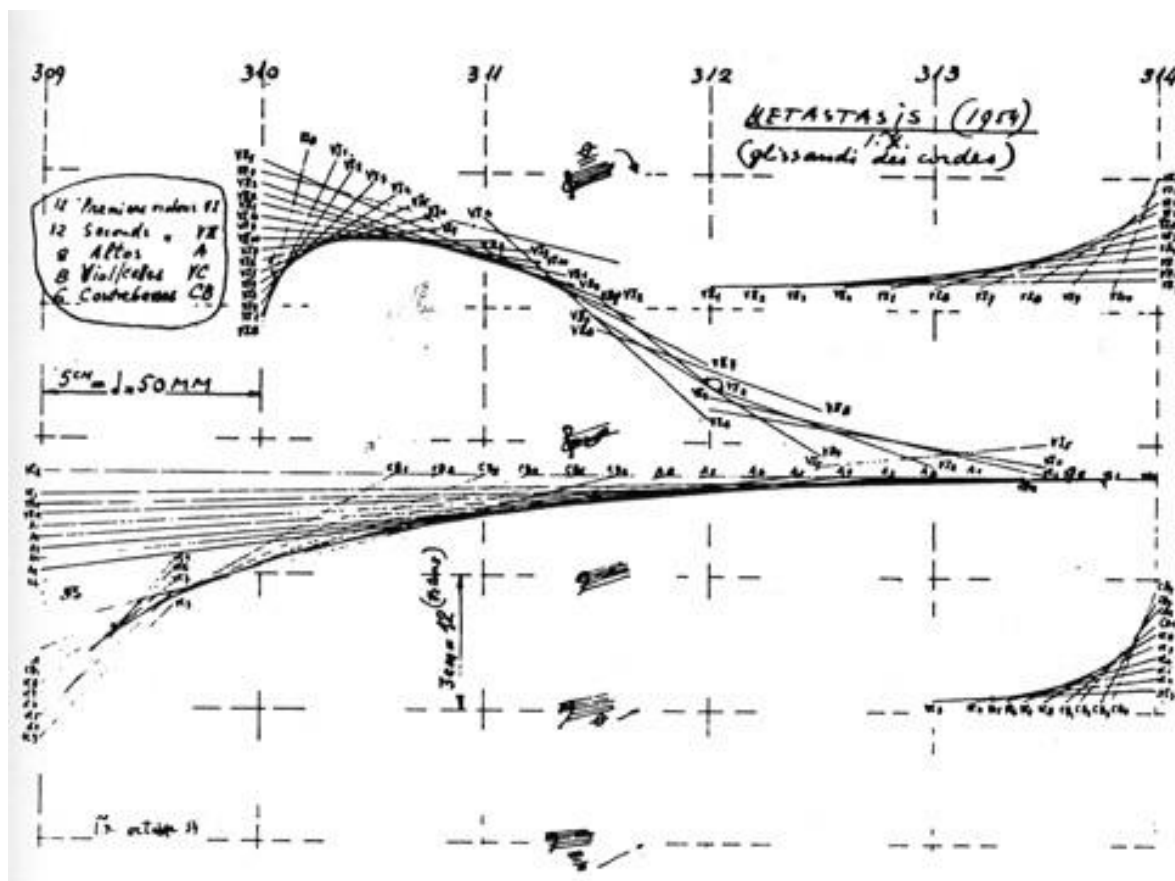
Ο Ξενάκης έχει προτείνει επτά στάδια εργασίας για τη στοχαστική σύνθεση μουσικής [Xenakis 1992] :

- i. Τιμές πλάτους ή διάρκειας που λαμβάνονται απευθείας από μια κατανομή πιθανότητας . (π.χ. ομοιόμορφη, Gaussian, εκθετική, Poisson).
- ii. Συνδυασμός τυχαίων μεταβλητών μέσω συνάρτησης, όπως για παράδειγμα μέσω πρόσθεσης ή πολλαπλασιασμού
- iii. Οι τυχαίες μεταβλητές είναι λειτουργίες άλλων μεταβλητών (π.χ. ελαστικές δυνάμεις, φυγόκεντρες δυνάμεις) ή άλλες τυχαίες μεταβλητές
- iv. Οι τυχαίες μεταβλητές κινούνται μεταξύ δύο ελαστικών φραγμών που επαναφέρουν τις υπερβολικές τιμές πίσω στο φάσμα των ορίων
- v. Οι παράμετροι μιας πιθανότητας λειτουργούν ως μεταβλητές άλλων λειτουργιών πιθανότητας.
- vi. Συνδυασμοί λειτουργιών πιθανότητας (π.χ. γραμμική, πολυωνυμική) οδηγούν σε σύνθετες λειτουργίες (π.χ. διαμόρφωση).
- vii. Κατηγοριοποίηση των λειτουργιών πιθανότητας μέσω τουλάχιστον τριών ειδών κριτηρίων όπως η σταθερότητα και τα χαρακτηριστικά καμπύλης [Luque Sergio , 2006, 77-84].



Ο Ξενάκης χρησιμοποίησε τα γραφήματα της στοχαστικής σύνθεσης στη μουσική του. Στα έργα Mikka (1971), N'Shima (1974) και Mikka "S" (1975), όρισε τον οριζόντιο άξονα ως άξονα στον οποίον αποτυπώνονται τιμές χρόνου και ενώ ο κατακόρυφος άξονας μας δίνει τιμές τονικών υψών . Τα μελωδικά σχέδια του N'Shima προέρχονται από γραφικές παραστάσεις μέσω υπολογιστή, ως αποτέλεσμα της θεωρίας των κινήσεων Brown [Morse, 2011].

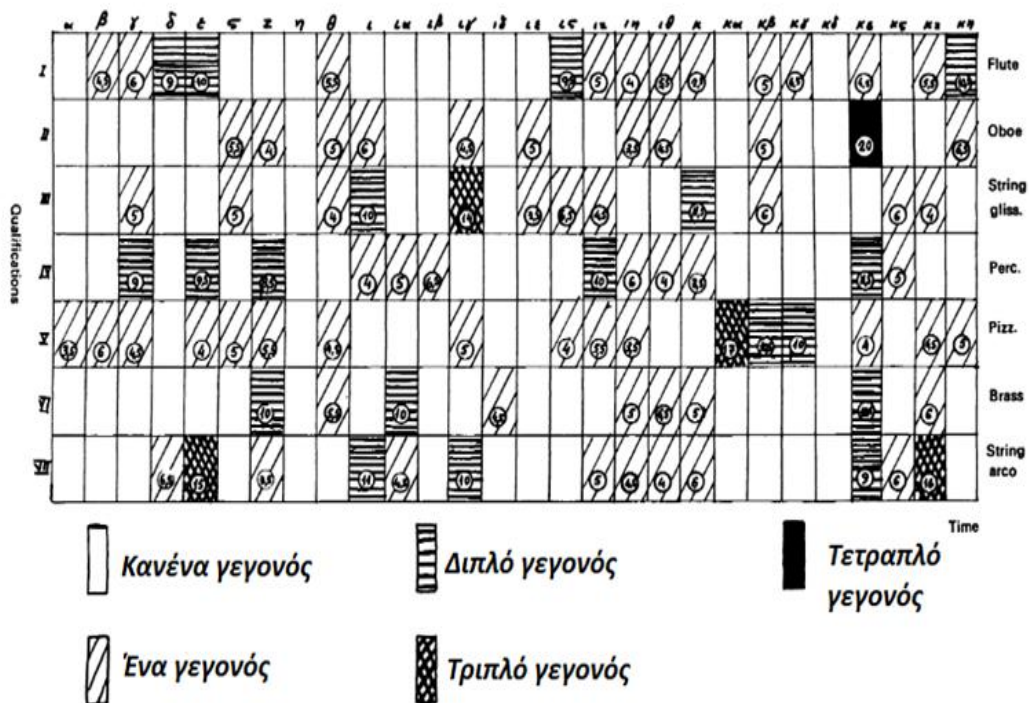
Η Metastasis (1953) ήταν ένα από τα πρώτα του μουσικά έργα στα οποία χρησιμοποίησε την παραβολή για να σηματοδοτήσει την ολίσθηση από το ένα τονικό ύψος προς το άλλο που χαρακτηρίζει τις επόμενες συνθέσεις του . Στο έργο αυτό οι περισσότεροι υπολογισμοί έγιναν με το μυαλό , χωρίς δηλαδή την βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή [Anastasia Georgaki , 2005].



Εικόνα 6 . Metastaseis, 1954

Αρχικά, ο πιθανοτικός λογισμός χρησιμοποιήθηκε στο Metastasis, στη συνέχεια στο Pithoprakta, για τη δημιουργία ενός μεγάλου αριθμού "ταχυτήτων" (ταχύτητα ολίσθησης του glissando, στα έγχορδα ) οι οποίες αντιπροσωπεύονται ως γραμμές στον χώρο-χρόνο. Τα Πιθοπρακτά είναι η πρώτη απόπειρα του Ξενάκη να τυποποιήσει τη

συνθετική τεχνική που είχε αρχίσει να εφαρμόζει με μαθηματικές θεωρίες, δημιουργώντας τη «στοχαστική μουσική». Στο έργο αυτό εφάρμοσε νόμους της θερμοδυναμικής που περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός αερίου κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες (κατανομή Maxwell-Boltzmann), αντιστοιχίζοντας παραμέτρους της μουσικής με τη συμπεριφορά των μορίων ενός αερίου. Στη συνέχεια ο Ξενάκης αποφάσισε να γενικεύσει τη χρήση των πιθανοτήτων στη μουσική σύνθεση. Το έργο *Achorripsis* ήταν το πρώτο του έργο για αυτή τη γενίκευση. Στην *Achorripsis*, ένας μικρός αριθμός στοχαστικών κανόνων εφαρμόζεται για να παράγει τόσο τις παραμέτρους των σημειώσεων όσο και την δομή του έργου [Harley James ,2002 , 33-57].



Εικόνα 7 . Η παρτιτούρα του έργου *Achorripsis*

Την εποχή εκείνη όλοι οι στοχαστικοί υπολογισμοί έγιναν με το χέρι ή με τη βοήθεια υπολογιστών που ήταν σε πολύ πρώιμο στάδιο σε σύγκριση με τους σημερινούς υπολογιστές . Στη δεκαετία του 1960 ο Ξενάκης άρχισε να χρησιμοποιεί τον υπολογιστή για να αυτοματοποιήσει και να επιταχύνει τους πολλούς στοχαστικούς υπολογισμούς που χρειαζόνταν, αναθέτοντας στον υπολογιστή σημαντικές συνθετικές αποφάσεις που συνήθως αφήνονταν στον συνθέτη. Για παράδειγμα, στο έργο *ST10*, η σύνθεση της ορχήστρας (εκφρασμένη σε ποσοστά ομάδων οργάνων) οργανώνεται από

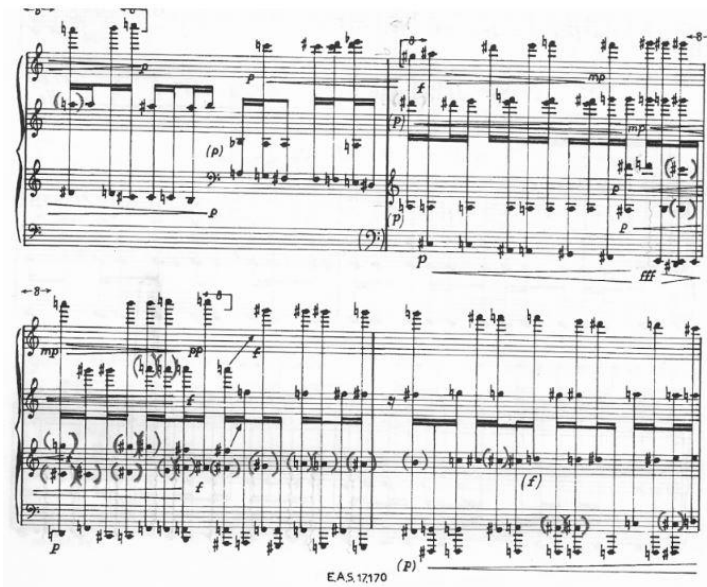
το μηχάνημα, καθώς και η ανάθεση μιας δεδομένης σημείωσης σε ένα όργανο της ορχήστρας. Στο τέλος του υπολογισμού του μουσικού έργου, τα αριθμητικά αποτελέσματα μεταγράφηκαν σε παραδοσιακές παρτιτούρες, έτσι ώστε η μουσική να μπορεί να αναπαραχθεί από μια ορχήστρα. Σε αυτά τα έργα συνήθως οι υπολογισμοί γίνονταν σε έναν υπολογιστή IBM 7090 [Anastasia Georgaki, 2005].

Το 1962, ο Ξενάκης έγραψε το Πρόγραμμα Στοχαστικής Μουσικής (ST Program) στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN. Αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιεί συναρτήσεις πιθανότητας για τον προσδιορισμό της συνολικής δομής (π.χ., μήκος των τμημάτων) και των παραμέτρων (π.χ. τονικό ύψος, διάρκεια) μιας σύνθεσης.

Την ίδια στιγμή, ο Ξενάκης ερευνά επίσης τη δυνατότητα χρήσης στοχαστικών τεχνικών για τη σύνθεση ήχων. Αν και αυτό το πρόγραμμα δίνει μια ικανοποιητική, στο ελάχιστο δομή, είναι, ωστόσο, απαραίτητο να γίνει η μετάβαση στο στάδιο της καθαρής σύνθεσης με τη σύζευξη ψηφιακού και αναλογικού. Οι αριθμητικοί υπολογισμοί θα εκφράζονταν τότε ως εναλλαγές στον ήχο, του οποίου η εσωτερική οργάνωση είχε σχεδιαστεί εκ των προτέρων [Xenakis, 1992].

Ο Ιάννης Ξενάκης εφηύρε επίσης το σύστημα σύνθεσης που ονόμασε συμβολική μουσική με βάση τη θεωρία συνόλων του Γκεοργκ Καντορ και την Άλγεβρα Μπουλ. Βάση αυτού του συστήματος έγραψε τα έργα Herma (1961), Eonta (1964) Nomos Alpha (1965) κ.α. Το έργο Herma είναι ένα κομμάτι για σόλο πιάνο βασισμένο σε αλγεβρικές εξισώσεις και στην άλγεβρα Bool. Το έργο Eonta (1964) είναι βασισμένο στην θεωρία των συνόλων ενώ το έργο Nomos Alpha χρησιμοποιεί όλα τα παραπάνω και είναι βασισμένο στην μαθηματική λογική. Στα έργα Strategie (1959) και Duel (1962) χρησιμοποιεί την θεωρία των παιγνίων.

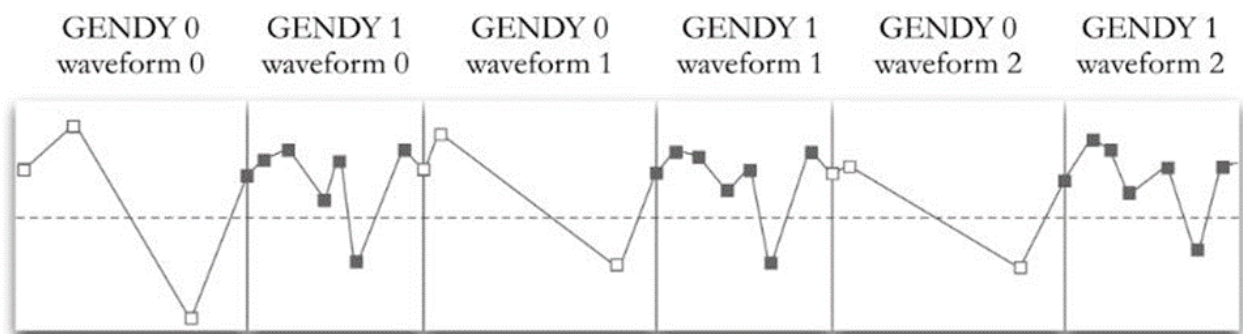
Σε αυτό το σημείο θα ήταν επίσης σημαντικό να υπογραμμίσουμε το έργο του Ξενάκη Enryali το οποίο γράφτηκε το 1973 και χρησιμοποιεί μια καινοτόμο τεχνική, τις "δενδρώσεις", του Ξενάκη όπου η πολλαπλασιαστική αναπαραγωγή των μελωδικών γραμμών δημιουργούνται από ένα γενετικό περίγραμμα [Thomopoulos, 2011].



Εικόνα 8 . Παρτιτούρα του έργου Enryali

Κατά τη διάρκεια της θητείας του στο Πανεπιστήμιο Indiana στο Bloomington, από το 1967 έως το 1972, ο Xenakis χρησιμοποίησε για πρώτη φορά έναν υπολογιστή για στοχαστική σύνθεση ήχου. Το 1972, συνέχισε αυτά του τα πειράματα στο Κέντρο Παρακολούθησης Mathematique et Automatique Musicales (CEMAMu) στο Παρίσι. Ωστόσο, το 1977, με την έλευση της Unite Polyagogique Informatique du CEMAMu (UPIIC), ο Ξενάκης ανέβαλε την έρευνα στοχαστικής σύνθεσης μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980 [Brigitte 1997].

Το DY3 είναι ένα στοχαστικό μουσικό έργο που παράγεται εξ ολοκλήρου από ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικών υπολογιστών, που γράφτηκε το 1991 από τον ίδιο τον συνθέτη στο CEMAMu. Το έργο GENDY3 είναι η συνέχεια της σειράς στοχαστικών μουσικών έργων που ο Xenakis εγκαινίασε το 1955 με το έργο Metastasis. Στο GENDY3, η χρήση των στοχαστικών κανόνων είναι πιο συστηματική, όπως αναφέρει ο ίδιος ο συνθέτης [Xenakis, I, 1991]. Όχι μόνο η μουσική δομή του GENDY3 είναι στοχαστική, αλλά η ηχητική σύνθεση βασίζεται επίσης σε έναν στοχαστικό αλγόριθμο τον οποίο ο ίδιος ο Ξενάκης εφηύρε και ονόμασε "δυναμική στοχαστική σύνθεση" (génération dynamique). Το GENDY3 έχει κοινά με τα προηγούμενα στοχαστικά έργα που ο Ξενάκης συνέθεσε και περιέγραψε στο έργο του Formalized Music' [Xenakis, 1971].



Εικόνα 9 . Μια διαδοχική σύζευξη από δυο κυματομορφές χρησιμοποιώντας δυο μοντέλα GENDY

Στη δεκαετία του 1970, στο Πανεπιστήμιο της Ιντιάνα, ο Ξενάκης πειραματίστηκε με νέες μεθόδους σύνθεσης ήχων βασισμένων σε τυχαίες ακολουθίες, οι θεωρητικές πτυχές των οποίων περιγράφονται στις πιθανότητες. Ενώ το 1991, ο Ξενάκης επέστρεψε στο όνειρό του να κάνει μια μουσική που θα διέπεται εξ ολοκλήρου από στοχαστικούς νόμους και θα υπολογίζεται εξ ολοκλήρου. Στο CEMAMu, ο Xenakis έγραψε ένα πρόγραμμα στην γλώσσα προγραμματισμού Basic που τρέχει σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το πρόγραμμα ονομάζεται GENDY: GEN σημαίνει Generation και DY για Dynamic . Το πρόγραμμα αυτό παράγει τόσο τη μουσική δομή όσο και τον πραγματικό ήχο. Ο ήχος συντίθεται με έναν νέο αλγόριθμο που ονομάζεται δυναμική στοχαστική σύνθεση, με αυτόν τον αλγόριθμο μπορεί κανείς να δημιουργήσει μια μεγάλη ποικιλία από διαφορετικές οικογένειες ηχοχρωμάτων , καθώς και πλούσιους και ζωντανούς ήχους.

Η εργασία αυτή στοχεύει σε λεπτομερή περιγραφή του προγράμματος GENDY, του οποίου η κύρια πτυχή είναι ο αλγόριθμος στοχαστικής σύνθεσης. Πράγματι, θα δούμε ότι η μορφή του έργου έχει πολύ στενή συνάφεια με παλαιότερα στοχαστικά έργα. Η περιγραφή του προγράμματος GENDY χωρίζεται σε δύο κεφάλαια: τη στοχαστική μικροδομή και την μακροδομική στοχαστική αρχιτεκτονική . Δύο έργα, με μήκος περίπου είκοσι λεπτά, δημιουργήθηκαν με αυτό το πρόγραμμα χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους εισόδου: Το GENDY3 είχε πρεμιέρα στο Μόντρεαλ (Καναδάς) τον Οκτώβριο του 1991 στο Διεθνές Συνέδριο Μουσικής Πληροφορικής

και το GENDY301 πραγματοποιήθηκε στο Metz (Γαλλία) τον Νοέμβριο του 1991 για το "Journées de Musique Contemporaine" [Feller, 1968] .

Για τον Ξενάκη, το ζήτημα της προσέγγισης των ηχητικών οργάνων και των φυσικών ήχων είναι δευτερεύον. Η πρωταρχική του πρόθεση είναι να δώσει έμφαση στη μουσική. Όπως γνωρίζουμε, ένας ήχος καθορίζεται πλήρως από την καμπύλη της διακύμανσης της ατμοσφαιρικής πίεσης στο χρόνο. Υπάρχουν δύο τρόποι να εξετάσουμε το πρόβλημα της κατασκευής του ήχου. Ο πρώτος τρόπος είναι να συνθέσουμε την καμπύλη πίεσης-χρόνου συνδυάζοντας τα συστατικά του ήχου. Μπορεί κανείς να ξεκινήσει με ένα σύνολο από μερικά συστατικά του ήχου που προέρχονται από μια φασματική ανάλυση ή από το μηδέν. Για παράδειγμα, μπορεί κανείς να ξεκινήσει με μια ομάδα ημιτονοειδών αρμονικών και να εισάγει προοδευτικά την μη περιοδικότητα στον ήχο μεταβάλλοντας τη συχνότητα και το εύρος των αρμονικών. Για τον Ξενάκη, αυτή η προσέγγιση, που βασίζεται στην ανάλυση Fourier, δεν είναι επαρκής για την (επανά) σύνθεση της πολυπλοκότητας που είναι εγγενής στον ήχο. Προτιμά να υιοθετήσει μια σφαιρική προσέγγιση στην οποία η ηχητική σύνθεση πραγματοποιείται μόνο στο πεδίο του χρόνου, χωρίς να καταφεύγει σε φασματική αποσύνθεση. Αντί να αρχίζει με έναν περιοδικό ήχο και να τον τροποποιεί (συμπεριλαμβανομένων τυχαίων μεταβολών), ξεκινά "... από μια έννοια διαταραχής και στη συνέχεια εισάγει τα μέσα που θα την αυξήσουν ή θα την μειώσουν". Με άλλα λόγια, ο Ξενάκης προτείνει να ξεκινήσει με έναν ήχο (τυχαίο σήμα) στον οποίο εισάγονται διαφορετικοί παράμετροι [Xenakis, 1985] .

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, στο Κέντρο Μαθηματικής και Αυτοματοποιημένης Μουσικής (CEMAMu) στο Πανεπιστήμιο της Ιντιάνα, ο Ξενάκης πειραματίστηκε με ποικίλους τύπους τυχαίων συμβάντων για τη σύνθεση ήχου. Η ιδέα ήταν να αντιστοιχίσουμε τη θέση ενός δεδομένου σωματιδίου στην καμπύλη του πλάτους κάθε δείγματος του ήχου, το οποίο κινήθηκε με τυχαίο τρόπο σε έναν άξονα. Προστέθηκαν φραγμοί (ελαστικοί ή απορροφητικοί) για τον έλεγχο των τυχαίων θέσεων του σωματιδίου. Το πρόγραμμα GENDY υπολογίζει μια σειρά από αριθμητικά δείγματα και τα αποθηκεύει σε ένα αρχείο ήχου που μπορεί να αναπαραχθεί μετά την ολοκλήρωση του υπολογισμού. Το πλάτος ενός δείγματος είναι το άθροισμα των μεγεθών που δίδονται από διάφορες φωνές. Μια φωνή χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων εισόδου, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων στοχαστικής σύνθεσης που ελέγχουν τον ήχο. Υπάρχουν μέχρι και δεκαέξι κανάλια . Δύο αρχεία ήχου

μπορούν να αναπαραχθούν ταυτόχρονα, έτσι ώστε ο αριθμός των φωνών να μπορεί να αυξηθεί και τα στερεοφωνικά εφέ να μπορούν να ενσωματωθούν στη μουσική (επομένως ακούγονται 32 'μελωδικές γραμμές' από 16 κανάλια).

Στο μοντέλο της δυναμικής στοχαστικής σύνθεσης, υποτίθεται ότι ο ήχος δημιουργείται από την επανάληψη μίας αρχικής κυματομορφής και ότι σε κάθε επανάληψη το σχήμα της κυματομορφής παραμορφώνεται ανάλογα με το χρόνο και το πλάτος. Ο αλγόριθμος σύνθεσης συνίσταται στον υπολογισμό κάθε νέας κυματομορφής εφαρμόζοντας στοχαστικές μεταβολές στην προηγούμενη. Για την απλοποίηση του μοντέλου και για την υπολογιστική αποδοτικότητα, η κυματομορφή είναι πολυγωνισμένη, δηλ. κόβεται σε πολλά τμήματα. Κάθε τομέας καθορίζεται από τις συντεταγμένες των δύο τελικών σημείων. Ο αριθμός των τελικών σημείων του κάθε τμήματος είναι μικρότερος από τον αριθμό των σημείων που ορίζουν την κυματομορφή

Υποθέτουμε ότι ο ήχος αποτελείται από μια σειρά  $J$  διαδοχικών πολυγωνικών κυματομορφών. Ο αριθμός πολυγωνικής κυματομορφής  $j$  ορίζεται με τα τελικά σημεία του δείκτη  $i$ . Στη συνέχεια, σημειώνουμε τις συντεταγμένες των τελικών σημείων ως  $(x_i, Y_i, j)$ ,  $0 < i < I$ ,  $0 < j < J$ . Οι τετμημένες  $x_i$ , είναι αριθμοί δειγμάτων. Οι τεταγμένες  $y_j$  είναι ακέραιοι αριθμοί 16 bits. Η συνοχή μεταξύ δύο διαδοχικών κυματομορφών είναι εγγυημένη με τον ορισμό ότι ο τελικός αριθμός 0 (πρώτο τελικό σημείο) στην κυματομορφή  $j + 1$  είναι ίσος με τον αριθμό τελικού σημείου  $I-1$  (τελευταίο τελικό σημείο) σε κυματομορφή:

$$(X_{0, j}, j + 1) = (X_{I-1, j}, j)$$

Αυτή τη στιγμή ο αριθμός των τελικών σημείων στην κυματομορφή υποτίθεται ότι είναι σταθερός. Επομένως, για κάθε  $j$ , ο αριθμός των τελικών σημείων στην κυματομορφή  $j + 1$  είναι ο ίδιος όπως στην κυματομορφή  $j$ . Οι συντεταγμένες κάθε καταληκτικού σημείου στην κυματομορφή  $j + 1$  λαμβάνονται με την προσθήκη μιας στοχαστικής μεταβολής στις συντεταγμένες του αντίστοιχου τελικού σημείου (τελικό σημείο της ίδιας τάξης) στην κυματομορφή  $j$ . Αυτή η διαδικασία διατυπώνεται από το σύνολο των εκφράσεων

$$x_{i, j + 1} = x_{ij} + f_x \quad \text{και} \quad Y_{i, j + 1} = Y_{i, j} + f_y$$

είναι οι τιμές (θετικές ή αρνητικές) που επιστρέφονται από τις στοχαστικές συναρτήσεις  $f_x$  και  $f_y$ , για το όρισμα  $z$ , το οποίο είναι το ίδιο ένας τυχαίος αριθμός με ομοιόμορφη κατανομή. Η διάρκεια  $d_i$ , σε δευτερόλεπτα του τμήματος που βρίσκεται μεταξύ των δύο τελικών σημείων  $i$  και  $i + 1$ , είναι ανάλογη του αριθμού των δειγμάτων  $n_i, j$  στο τμήμα:  $d_i = (n_{ij}-1) / S_{rate} \text{ (sec)}$   $n_i, j$   $X_{i+1, j+1} - i_{j+1} + 1$  όπου το  $S$ -rate είναι ο ρυθμός δειγματοληψίας, στην περίπτωσή μας 44100 δείγματα ανά δευτερόλεπτο. Η συνολική διάρκεια  $D$  της κυματομορφής είναι ίση με το άθροισμα των διαδοχικών διαστημάτων:

$$\sum_{i=0}^{I-1} D = \sum_{i=0}^{I-1} d_i \quad i = 0$$

Εάν οι τετμημένες  $x_i$  δεν υποβλήθηκαν σε καμία παραλλαγή, θα έχουμε μόνο μια μη γραμμική μεταβολή πλάτους της κυματομορφής με την πάροδο του χρόνου. Δεδομένου ότι τόσο οι τετμημένες  $x_i$   $j$  όσο και οι τεταγμένες  $y_i$  των τελικών σημείων του τμήματος ποικίλει, η πολυγωνική κυματομορφή μεταβάλλεται τόσο σε σχήμα όσο και σε διάρκεια, οδηγώντας σε διακυμάνσεις στο πλάτος και την συχνότητα του ήχου.

Ο χώρος δείγματος  $\Omega$  είναι το σύνολο όλων των στοιχειωδών συμβάντων του πειράματος που θεωρούμε. Για παράδειγμα, στο παιχνίδι με κέρματα, το δείγμα  $\Omega$  αποτελείται από δύο στοιχειώδη γεγονότα: "κορώνα" και "γράμματα". Κάθε στοιχειώδες συμβάν στο χώρο του δείγματος έχει την πιθανότητα εμφάνισής του. Στο παιχνίδι με κέρματα η πιθανότητα "κορώνα" είναι  $1/2$ . Η πιθανότητα συνδυασμένων γεγονότων μπορεί να υπολογιστεί από τις πιθανότητες των στοιχειωδών γεγονότων.

Μια τυχαία μεταβλητή είναι μια αριθμητική συνάρτηση που συσχετίζει αριθμητικές τιμές με τα συμβάντα του  $\Omega$ . Μια τυχαία μεταβλητή είναι είτε συνεχής είτε ασυνεχής. Είναι ασυνεχής αν παίρνει μόνο ένα πεπερασμένο ή μετρήσιμο σύνολο τιμών. Είναι συνεχής αν μπορεί να πάρει όλες τις πραγματικές τιμές σε ένα δεδομένο διάστημα (ή μερικές παρεμβολές). Παραδείγματος χάριν, στο παιχνίδι με κέρματα μπορούμε να φτιάξουμε μια ασυνεχή μεταβλητή  $X$  που παίρνει την τιμή 1 αν πραγματοποιηθεί το συμβάν "κορώνα" και η τιμή μείον 1 αν πραγματοποιηθεί το συμβάν "γράμματα" [Bestougeff, 1975] .

Η έκφραση  $X = x$  δηλώνει το σύνολο των συμβάντων στο  $\Omega$  που σχετίζονται με την τιμή  $x$  από τη συνάρτηση  $X$ . Ομοίως, η έκφραση  $X \leq x$  δηλώνει το σύνολο συμβάντων στο  $\Omega$  που παίρνουν τιμές που κυμαίνονται από  $-\infty$  έως  $x$ . Μια τυχαία μεταβλητή είναι πραγματική εάν οι τιμές της ανήκουν στο σύνολο των πραγματικών αριθμών  $\mathbb{R}$ . Στη



συνέχεια θα εξετάσουμε συνεχείς και πραγματικές τυχαίες μεταβλητές. Η συνάρτηση κατανομής του  $x$  και η πυκνότητα πιθανότητας του  $X$ . Μια συνεχής μεταβλητή  $x$  καθορίζεται από τις τιμές που παίρνει (συχνά μια μαθηματική συνάρτηση) και επίσης από τις πιθανότητες να πάρει εκείνες τις τιμές που σχετίζονται με τις πιθανότητες των γεγονότων στα μαθηματικά. Η συνάρτηση που περιγράφει τις πιθανότητες των τιμών του  $X$ , που ονομάζεται συνάρτηση κατανομής  $F(x)$ . Η συνάρτηση κατανομής  $F$  ορίζεται από το

$$F(x) = P[X \leq x]$$

όπου  $P[X \leq x]$  είναι η πιθανότητα ότι η τυχαία μεταβλητή  $X$  παίρνει τιμές που κυμαίνονται από  $-\infty$  έως  $x$ . Αν η συνάρτηση κατανομής  $F$  είναι διαφοροποιήσιμη, η τυχαία μεταβλητή  $X$  δέχεται μια συνάρτηση πυκνότητας  $f$  τέτοια ώστε  $F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$ . Στη συνέχεια παραθέτουμε διάφορες λειτουργίες ολοκληρωμάτων  $f(x)$  και τις αντίστοιχες λειτουργίες κατανομής  $F(x)$  που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα σύνθεσης GENDY (Feller 1968, Xenakis 1971). Η ομοιόμορφη κατανομή σε ένα διάστημα  $[0, A]$ :  $f(x) = 1/A$  για  $x < A$ ,  $f(x) = 0$  για  $x > A$ ,  $F(x) = x/A$  για  $x < A$ ,  $F(x) = 1$  για  $x > A$ .

Ο ολοκληρωτικός τύπος του Cauchy που έχει κεντρική θέση στην αρχή ορίζεται από:  $f(x) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{1+x^2}$  για  $-\infty < x < \infty$ ,  $F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctan(x)$ . Η εφοδιαστική πυκνότητα:  $f(x) = \frac{1}{\sigma} e^{-x/\sigma}$  για  $x > 0$ ,  $f(x) = 0$  για  $x < 0$ ,  $F(x) = 1 - e^{-x/\sigma}$  για  $x > 0$ ,  $F(x) = 0$  για  $x < 0$ . Η εκθετική πυκνότητα:  $f(x) = \frac{1}{\sigma} e^{-x/\sigma}$  για  $x > 0$ ,  $f(x) = 0$  για  $x < 0$ ,  $F(x) = 1 - e^{-x/\sigma}$  για  $x > 0$ ,  $F(x) = 0$  για  $x < 0$ . Για την προσομοίωση μιας τυχαίας μεταβλητής στο πρόγραμμα πρέπει να χτίσουμε μια σειρά από στοχαστικές τιμές  $X$  με μια αντίστοιχη κατανομή  $F$ . Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να δημιουργήσουμε μια σειρά αριθμών  $X$  έτσι ώστε η πιθανότητα ότι το  $X < x$  να είναι μια προσέγγιση μιας δεδομένης συνάρτησης κατανομής  $F(x)$ . Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε το ακόλουθο θεώρημα αν  $Y$  είναι μια τυχαία μεταβλητή με ομοιόμορφη κατανομή στο  $[0,1]$  και αν η συνάρτηση  $F$  είναι αντιστρέψιμη, τότε η τυχαία μεταβλητή  $X$  που ακολουθεί τη συνάρτηση κατανομής  $F$  λαμβάνεται με:  $X = F^{-1}(Y)$  όπου το  $F^{-1}$  είναι το αντίστροφο του  $F$ . Για παράδειγμα, η τυχαία μεταβλητή  $X$  που ακολουθεί την εκθετική κατανομή υπολογίζεται με:  $X = -\sigma \ln(1-Y)$ .

Η πολυγωνοποίηση της κυματομορφής εισάγει ασυνέχειες στο αριθμητικό σήμα που παράγει υψηλά μέρη, μερικά από τα οποία θα αλλοιωθούν από την μετατροπή από ψηφιακό σε αναλογικό. Το ψηφιακό φίλτράρισμα μπορεί να εφαρμοστεί για να εξασθενήσει την ψευδαίσθηση, αλλά τότε το σήμα μπορεί να χάσει κάποια

μεταβλητότητα που είναι αξιόλογη για τη δυναμική ποιότητα. Αυτή η μέθοδος φαίνεται να είναι πολύ ελκυστική και ο Ξενάκης εξακολουθεί να ασχολείται με αυτό μέχρι το τέλος της ζωής του. Όπως είπαμε, ο αριθμός των τμημάτων στην κυματομορφή, τα όρια των κατόπτρων και οι λειτουργίες διανομής είναι σταθερές παράμετροι για κάθε φωνή σε κάθε τμήμα. Η έρευνα του Ξενάκη στρέφεται προς την κατεύθυνση της διερεύνησης της διακύμανσης αυτών των παγκόσμιων παραμέτρων, για να παράξει τροποποιήσεις ήχου με την πάροδο του χρόνου [Bestougeff, 1975].

Οι προοπτικές της νέας μουσικής και η προσομοίωση ενός τέτοιου πειραματισμού πραγματοποιείται με την ακόλουθη μέθοδο δεδομένης της πιθανότητας επιτυχίας  $p$  και του δοθέντος τυχαίου αριθμού  $z$  (μεταξύ 0 και 1) με ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ  $[0,1]$ , η κλήρωση είναι επιτυχής αν το  $z$  είναι μικρότερο ή ίσο με το  $p$ .

Στο GENDY επιτυχία σημαίνει ότι το πεδίο δεν είναι σιωπηλό. Η ένδειξη σιωπής / ήχου είναι 1 (ήχος) αν η κλήρωση είναι επιτυχής ( $z \leq p$ ) και 0 (σιωπή) αν η κλήρωση αποτύχει ( $z > p$ ). Η επιλογή του  $p$ , η πιθανότητα να είναι το ηχητικό πεδίο, ελέγχει την ισορροπία μεταξύ ήχου και σιωπής. Για παράδειγμα, αν το  $p$  είναι  $1/2$  (και αν ο αριθμός των δοκιμών τείνει στο άπειρο), ο αριθμός των ηχητικών πεδίων θα είναι ισοδύναμος με τον αριθμό των σιωπηρών πεδίων. Το  $1/p$  είναι μικρότερο από  $1/2$ , ο αριθμός των ηχητικών πεδίων θα είναι μικρότερος από τον αριθμό των αθόρυβων πεδίων. Με το  $p$  διαφορετικό από το  $1/2$ , η δοκιμή Bernoulli που προσομοιώνει το πρόγραμμα είναι ανάλογη με ένα παιχνίδι με κέρματα. Η παράμετρος  $p$  είναι μια παράμετρος εισόδου του προγράμματος που είναι σταθερή για κάθε φωνή σε κάθε τμήμα. Οι διάρκειες των χρονικών πεδίων συσχετίζονται αυτόματα με τον εκθετικό νόμο. Χρησιμοποιούμε τον τύπο:  $d = (-1 / D) \log (1 - z)$ , όπου  $D$  είναι η μέση διάρκεια των χρονικών πεδίων και τυχαίος αριθμός με ομοιόμορφη κατανομή. Η μέση διάρκεια  $D$  είναι μια παράμετρος εισόδου του προγράμματος που έχει καθοριστεί για κάθε φωνή σε κάθε τμήμα. Ο Ξενάκης συχνά χρησιμοποίησε τον εκθετικό νόμο για την οικοδόμηση μιας τυχαίας διανομής των διάρκειων που αποδίδονται σε ένα σύνολο σημείων ή σε ένα σύνολο αυθαίρετων ηχητικών γεγονότων, όπως στην Achorripsis και στο ST10. Η εκθετική πυκνότητα σχετίζεται με τον νόμο Poisson, ο οποίος διέπει τα τυχαία γεγονότα που συμβαίνουν στο χρόνο, αλλά με σταθερή μέση πυκνότητα (αριθμός γεγονότων ανά μονάδα χρόνου). Οι ραδιενεργές αποσυνθέσεις ή οι εισερχόμενες κλήσεις σε τηλεφωνικό κέντρο αποτελούν παραδείγματα τέτοιων φαινομένων. Ο εκθετικός νόμος είναι ο νόμος που διέπει τα χρονικά διαστήματα στη διαδικασία Poisson. Η μακροδομή

του GENDY3 είναι στενά συνδεδεμένη με τα παλαιότερα στοχαστικά έργα όπως η Achorripsis και τα St-pieces. Αυτή τη φορά η οργάνωση των παράλληλων τμημάτων βρίσκεται ξανά στο GENDY3. Οι ομάδες των οργάνων στην Achorripsis και στα κομμάτια ST αντικαθίστανται εδώ με φωνές που αντιστοιχούν σε διαφορετικές παραμέτρους.

Τα κύτταρα της μήτρας στο έργο Achorripsis διαφοροποιούνται μόνο από μία συνολική παράμετρο, την ηχητική πυκνότητα (αριθμός των ηχητικών συμβάντων ανά μονάδα χώρου). Στο GENDY3 η ηχητική πυκνότητα δεν ελέγχεται άμεσα, αλλά με την πιθανότητα σιωπής / ήχου (μία για κάθε φωνή), τη μέση διάρκεια (μία για κάθε φωνή) και τον αριθμό των φωνών σε κάθε ενότητα. Συνοπτικά, τα πάντα στη σύλληψη του GENDY3 βρίσκονται υπό τον έλεγχο του υπολογιστή εκτός από τη φωνητική διαμόρφωση σε κάθε τομέα (αριθμός φωνών και ανάθεση σε ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων σύνθεσης) και την επιλογή των παραμέτρων εισόδου. Το πρόγραμμα βασίζεται σε μια εκτεταμένη χρήση των στοχαστικών νόμων. Αυτό δημιουργεί μια ομοιογενή σύνθεση στην οποία η μικροδομή και η μακροδομή σχεδιάζονται μέσω της ίδιας προοπτικής, δηλ. η πλήρωση του ηχητικού χώρου με ηχητικό υλικό και η δομή αυτού του χώρου επιτυγχάνεται με παρόμοια μέσα [Bestougeff, 1975].

Παρά τη στενή σχέση των δύο κομματιών ( GENDY301 και GENDY3 ) όσον αφορά στην αρχική ιδέα της γέννησής τους, στην πραγματικότητα οι δύο συνθέσεις ήταν εντελώς διαφορετικές. Το GENDY301 παρουσιάζει ευρύτερο δυναμικό εύρος σε σύγκριση με οποιοδήποτε άλλο γνωστό κομμάτι, με εξαιρετικά δυνατές υφές που εισέρχονται ξαφνικά πάνω από μικρότερους ήχους. Επιπλέον, περιέχει περισσότερα διαλείμματα σιωπής. Ο Ξενάκης δεν δήλωσε ποτέ τη δυσαρέσκεία του για το κομμάτι, αλλά αποφάσισε να μην το κυκλοφορήσει μαζί με το άλλο κομμάτι, σαν «οικογένεια» μουσικών συνθέσεων. Τα περισσότερα τμήματα του GENDY3 αποτελούν συνδυασμό σταθερών βημάτων και έντονων ήχων. Η εισαγωγή με τη σιωπή και τις σταθερές θέσεις δημιουργεί μια σύνθεση τέτοιας υφής που μπορεί να χαρακτηριστεί και ως στοχαστικό *ostinato*. Επίσης, χρησιμοποιώντας τον ίδιο τύπο συμπεριφοράς σε όλες τις φωνές, ο Ξενάκης δημιούργησε μερικά ομοιογενή τμήματα. Το πρόγραμμα PARAG λαμβάνει ως μεταβλητές εισόδου τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πρόγραμμα GENDY και κατασκευάζει ενότητες με αυτά. Επίσης το πρόγραμμα αυτό απομονώνει και κατηγοριοποιεί τα διαφορετικά μέρη της κάθε φωνής τα οποία ονομάζει *time fields*. Στην τυποποιημένη μουσική, ο Ξενάκης πρότεινε μια παρόμοια μέθοδο για να επιτύχει

πολυκάναλη παραγωγή. Για την πολυκάναλη αυτή παραγωγή ο Ξενάκης δούλεψε με δύο τεχνικές. Για να πετύχει το μέγιστο εύρος κενών, ανέλυσε τον ήχο και άλλαζε διαρκώς την αντιληπτή χωρική διάθεση. Η δεύτερη τεχνική του έχει να κάνει με τη μετατόπιση της κυματομορφής. Αυτή η τεχνική δημιουργεί μια ελεγχόμενη εξάπλωση και μεταφέρει μια ιδιόμορφη ψευδαίσθηση βάθους. Μετά τη σύνθεση του GENDY3, ο Ξενάκης επέκτεινε το πρόγραμμα GENDY προσθέτοντας τη δυνατότητα τροποποίησης των παραμέτρων του αλγορίθμου δυναμικής στοχαστικής σύνθεσης.

Με αυτή την έκδοση του προγράμματος ο Ξενάκης δημιούργησε το S.709. Το έκανε πρεμιέρα στη συναυλία του La Maison de Radio-France τον Δεκέμβριο του 1994. Ο τίτλος του αντιπροσωπεύει την Ακολουθία 709. Η ακολουθία ήταν το όνομα που έδωσε ο Ξενάκης στα τμήματα που δημιουργούνται από το PARAG πρόγραμμα [Brigitte Robindoré, 1997] .

### **2.3 Στοχαστικά μοντέλα στα πολύτοπα**

Τα πολύτοπα αποτελούν μια σειρά από πολυμεσικές εγκαταστάσεις σε διάφορα μέρη του κόσμου, στα οποία η μουσική συνδυαζόταν με οπτικά ερεθίσματα σε συγκεκριμένους, ειδικά διαμορφωμένους χώρους. Ένα γνωστό παράδειγμα είναι το πολύτοπο των Μυκηνών του Ιάννη Ξενάκη το οποίο στήθηκε στις αρχαίες Μυκήνες, τον Σεπτέμβριο του 1978, και ήταν βασισμένο στο ομώνυμο μουσικό έργο του συνθέτη. Όπως ο ίδιος ο Ξενάκης αναφέρει “πολύτοπο είναι ένα σύμπλεγμα από πολλούς τόπους ή η συμβολή πολλών τόπων”. Η έννοια τόπος εδώ έχει γενική σημασία δηλαδή τόπος μπορεί να είναι γεωγραφικός, καλλιτεχνικός ,τόπος του φωτός , τόπος της ιστορίας κ.α. Τα πολύτοπα μπορούν να θεωρηθούν ως ένα άθροισμα των ενδιαφερόντων και των δεξιοτήτων του Ξενάκη, διότι ο σχηματισμός και οι εμπειρίες του τον έκαναν έναν παραγωγό συνθέτη στον τομέα της μουσικής και της αρχιτεκτονικής. Ο όρος έχει μαθηματική καταγωγή, λειτουργώντας ως αναφορά στα πολύτοπα της ευκλείδειας γεωμετρίας. Η μουσική είναι ιεραρχικά δομημένη με πολλούς τρόπους και όλες αυτές οι μορφές οργάνωσης μοιράζονται βασικά μαθηματικά χαρακτηριστικά. Ένα γεωμετρικό κατασκεύασμα που ονομάζεται «πολύτοπο» συνοψίζει αυτές τις ομοιότητες και έχει μια πλούσια μαθηματική δομή. Αναγνωρίζοντας τις ιεραρχίες που προκύπτουν στη μουσική, μπορούμε να δούμε πώς πραγματοποιείται αυτή η πλούσια δομή σε πολλές πτυχές της μουσικής

οργάνωσης. Επειδή το ίδιο μαθηματικό κατασκεύασμα πραγματοποιείται σε πολλαπλές μουσικές παραμέτρους, το πολύτοπο όχι μόνο αναγάγει τις σχέσεις μεταξύ ιεραρχιών σε μία μόνο παράμετρο αλλά και καθορίζει πρότυπα συμφωνίας και σύγκρουση μεταξύ ταυτόχρονων ιεραρχιών σε διαφορετικές παραμέτρους [Brigitte 1997].

Το συλλογικό όνομα αυτής της σειράς εγκαταστάσεων, που περιελάμβαναν τον ήχο, το φως και την αρχιτεκτονική, είναι το «Πολύτοπα». Η λέξη «poly» σημαίνει πολλά ενώ το topos σημαίνει «τόπος» επειδή κάθε Polytope έχει το όνομα του ιστότοπου ή της πόλης όπου έχει εγκατασταθεί. Αλλά ο όρος «πολυμέσα» δεν είχε ακόμη χρησιμοποιηθεί για να δηλώσει αυτό το είδος δουλειάς όπως μπορούμε σήμερα και αυτή η καινοτομία αποτελεί ένα άλλο παράδειγμα της προφητικής σκέψης του Ξενάκη. Από την άποψη αυτή, ο συνδυασμός αυτών των χωροταξικών στοιχείων φωτισμού και ηχητικών στοιχείων σχετίζεται με την αντίληψη του Wagner για το συνολικό έργο τέχνης. Για τον Sterken η αρχιτεκτονική του Ξενάκη ήταν μια ρητή εκδήλωση της αποδόμησης του καρτεσιανού χώρου - αντί να δημιουργήσει μια σχέση μεταξύ τόπου και χώρου, ο Ξενάκης δημιουργεί μια ρήξη που απομονώνει ένα κομμάτι του χώρου δημιουργώντας μια αντίθεση μεταξύ ενός εσωτερικού και έναν εξωτερικό, πραγματικό κόσμο. [Streken 2001]

Τις αριθμητικές αναλογίες των πολύτοπων μετέφερε από τη συνθετική διαδικασία του ο Ιάννης Ξενάκης, στην οποία χρησιμοποίησε στοχαστικές μαθηματικές τεχνικές, συμπεριλαμβανομένης της θεωρίας των πιθανοτήτων Maxwell-Boltzmann, την κινητική θεωρία, τις κινήσεις των αερίων, τις αλυσίδες Markov ( Analogiques ), την θεωρία παιγνίων ( Duel και Strategie ), την θεωρία ομάδων ( Nomos Alpha ) και την άλγεβρα Boolean ( Herma και Eonta ). Αυτά θα τυπώσουν τις επαναστατικές του ιδέες για τη συστηματική, μαθηματική οργάνωση της μουσικής μαζί με τους διαρθρωτικούς παραλληλισμούς με την αρχιτεκτονική.

Ενδεχομένως το μεγαλύτερο αρχιτεκτονικό επίτευγμα του Ξενάκη ήρθε το 1958 με το Pavilion Phillips στην Παγκόσμια Έκθεση των Βρυξελλών. Στο πολύτοπο αυτό η μουσική συντέθηκε κυρίως από τον Edgar Varese σε ένα έργο που ονομάζεται *Roème électronique* και ένα δίλεπτο κομμάτι του Ξενάκη που ονομαζόταν *Concret P.H* ( P.H = παραβολοειδές και υπερβολοειδές ). Το δίλεπτο κομμάτι του Ξενάκη από ήχους από αναμένα κάρβουνα συνόδευε τους επισκέπτες για όση ώρα χρειαζόταν για να μπουν στην αίθουσα, ενώ το δεκάλεπτο «ηλεκτρονικό ποίημα» του Varèse ακουγόταν μέσα

στην αίθουσα. Συνολικά υπήρχαν 350 ηχεία συνδεδεμένα σε 20 ενισχυτές, κάτι εξωπραγματικό για τα δεδομένα της εποχής [Xenakis 1971].

Η προσέγγιση του Ξενάκη για το μουσικό σκυρόδεμα ήταν να τα κάνει όμοια με τη μουσική οργάνου. Την ίδια στιγμή που δούλευε για το *Diamorphoses*, ο Ξενάκης ασχολήθηκε με την ταινία του *Concret PH* (1958) που δημιουργήθηκε για το *Pavilion Phillips* που ο Xenakis είχε βοηθήσει στην σχεδίαση, αξιοποιώντας την τεχνολογία πολλαπλών στρωμάτων της Philips. Μέσω πάλι της χρήσης τεχνολογίας, φώτα, λέιζερ, προβολές, φυσικών ήχων, αλλά και συνδεδεμένα με τα αντίστοιχα μουσικά έργα του, ο Ξενάκης προσπαθεί να αναδημιουργήσει τις χωρικές σχέσεις και ποιότητες που προϋπάρχουν στον εκάστοτε χώρο. Η συγγένεια του Ξενάκη με τα μαθηματικά, την αρχιτεκτονική και την τεχνολογία μοιάζει να κατευθύνεται προς το να γίνει επαναστατική φιγούρα στην ηλεκτρονική μουσική. Οι πρώτες εργασίες όπως οι *Diamorphoses* (1957-1958) αντιπροσωπεύουν την ανάπτυξη των πειραμάτων που εμπνέονται από το ραδιοφωνικό studio του Pierre Schaeffer με τη χρήση ηχογραφήσεων φυσικών και μηχανικών ήχων [Brigitte, 1997].

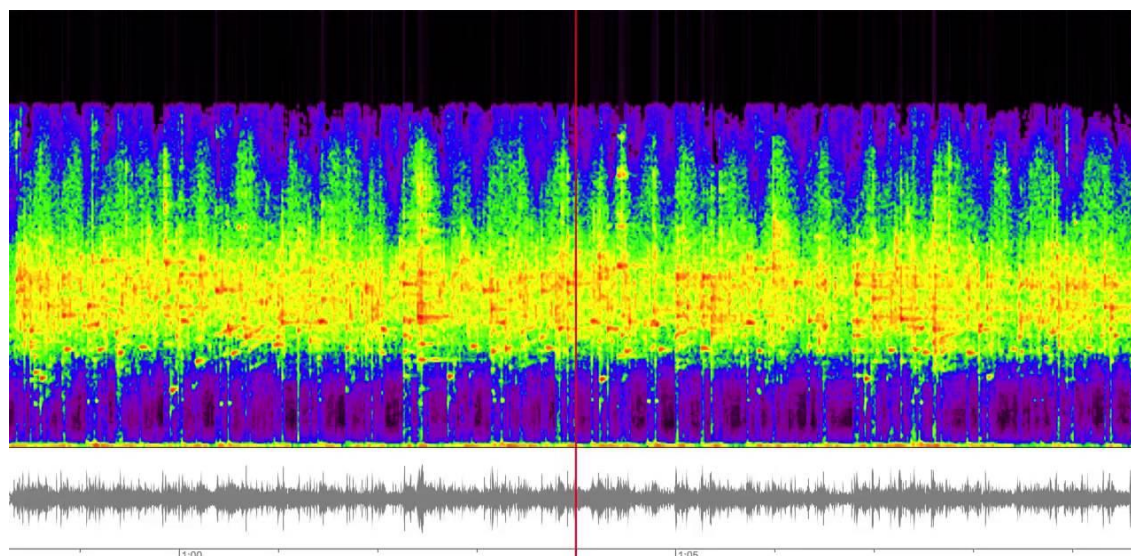


Diamorphoses 1957

Εικόνα 10. Παρτιτούρα του έργου *Diamorphoses*, 1957

Για τον Harley το *Concret PH* ήταν εντελώς αντίθετο με οποιαδήποτε άλλη ηλεκτροακουστική μουσική της εποχής. Το συγκεκριμένο ράγισμα και το σφύριγμα του καυστικού άνθρακα προέκυψε από τη μελέτη της πυκνότητας και της εφαρμογής στοχαστικών λειτουργιών στον υπολογισμό των σημείων αρθρώσεως για κάθε στρώμα ήχου [Brigitte Robindoré, 1997].

Η υφή εξελίσσεται με συνεχή τρόπο με μια αίσθηση της κίνησης στον χώρο καθώς η μουσική κινείται μέσω των μεγαφώνων του περιπτέρου με κυρίως κόκκους ήχου με μέση έως υψηλή εγγραφή [Brigitte Robindoré, 1997] .



Εικόνα 11. Concrete ph, 1958

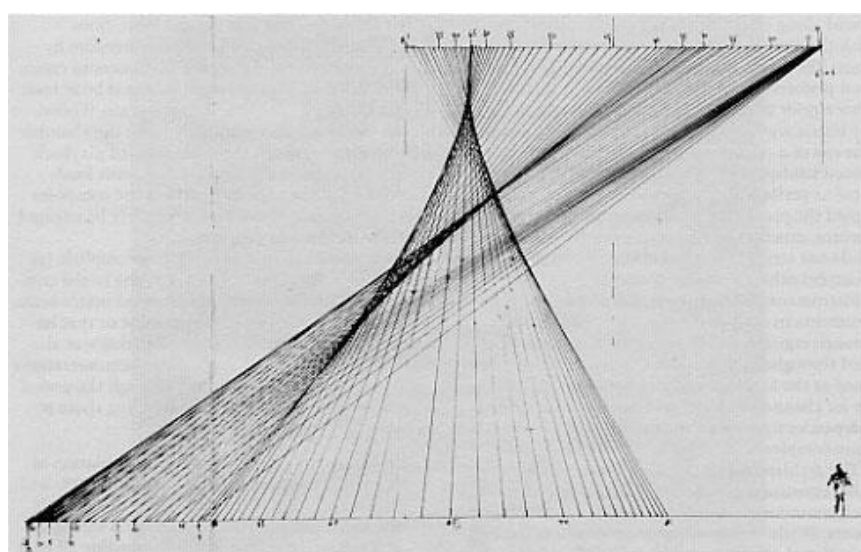
Το 1977, ο Ξενάκης συνέθεσε την *La Legende d'Eer*, η οποία ήταν η μουσική συνιστώσα του *Le Diatope*, έργο πολυμέσων που περιλαμβάνει επίσης 1.680 λάμπες , 4 έγχρωμα λείζερ, που αντικατοπτρίζονται από 400 προγραμματιζόμενοι καθρέφτες και ένα περίπτερο κατασκευασμένο από κόκκινο βινύλιο που εκτείνεται πάνω από ένα μεταλλικό πλαίσιο. Τα περισσότερα από τα ηχητικά υλικά που χρησιμοποιούνται στο *La Legende d'Eer* είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στο *Polytope de Cluny*, αν και μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στους αναλογικούς και ψηφιακούς συνθετικούς ήχους .

Οι Πολύτοπες του Ξενάκη πρόσθεσαν νέα στοιχεία στην αλληλεπίδραση μεταξύ διαστήματος, αρχιτεκτονικής και σώματος που άρχισαν να επηρεάζουν τις νέες μορφές τέχνης που εμφανίστηκαν τη δεκαετία του 1950. Τα γεγονότα, οι επιδόσεις, οι εγκαταστάσεις και τα περιβάλλοντα μοιράστηκαν αυτή τη γενική τάση προς την απλοποίηση του αντικειμένου της τέχνης και τη θολή διάκριση μεταξύ του χώρου του θεατή και του χώρου του ίδιου του έργου τέχνης. [Brigitte 1997]

Τα στρώματα του πολύτοπου του φωτός, του χώρου και του ήχου επιτρέπουν στον Ξενάκη να σχεδιάζει, να κατασκευάζει ένα υπερτιθέμενο, άπειρο χώρο που μεταφέρει το αφηρημένο και γεωμετρικό του λεξιλόγιο. Αναπόσπαστο κομμάτι ακόμα και των

σύντομων βιογραφιών του Ξενάκη είναι η αναφορά στην ένταξη των μαθηματικών θεωριών στις μουσικές του συνθέσεις. [Sterken, Sven, 2001]

Ένα από τα πιο σημαντικά έργα του Ξενάκη είναι το πολύτοπο του Μόντρεαλ το οποίο σήμερα είναι το καζίνο του Μόντρεαλ . Το κτήριο αυτό δημιουργήθηκε για την διεθνή έκθεση του 1967 . Το μουσικό έργο του πολυτόπου αυτό ονομάζεται Kraanerg και περιέχει 34 όργανα σε μια τετρακάναλη αναλογική ταινία . Το πολύτοπο αποτελείτο από μια γεωμετρική συστοιχία χαλύβδινων καλωδίων που εκτείνεται μέσα από τον κέντρο του αίθριου του κτιρίου, με 1.200 λάμπες που συνδέονται με τα καλώδια .



Εικόνα 12. Σχεδιασμός του Polytope de Montréal

Το Polytope of Persepolis πραγματοποιήθηκε στα ερείπια του Ναού του Δαρείου στην Ιρανική έρημο στις 26 Αυγούστου 1971. Η παράσταση, η οποία διήρκεσε πάνω από μία ώρα ξεκινώντας από το ηλιοβασίλεμα, συγκέντρωσε μια ποικιλία από ηχητικές και φωτεινές συσκευές. Περιλάμβανε 2 λέιζερ, στρατιωτικούς προβολείς, τεράστιες φωτιές, 150 παιδιά που φέρουν φακό και έξι σταθμούς ακρόασης με οκτώ ηχεία, ένα για κάθε κομμάτι της ηλεκτροακουστικής σύνθεσης του Περσέπολις του Ξενάκη. Το κοινό μπορούσε να περπατήσει μέσα από τα ερείπια του ναού και να μετακινηθεί από το ένα σταθμό ακρόασης στο άλλο [Brigitte, 1997] .

Το Polytope of Cluny άνοιξε τον Οκτώβριο του 1972 στα Λουτρά του Cluny, κοντά στη Σορβόνη και ήταν μια εκπομπή πολυμέσων εγκατεστημένη ακριβώς στα θησαυροφυλάκια των λουτρών. Οι ήχοι αποτελούνται από μια ταινία οκτώ καναλιών 24 ωρών που περιέχει ηλεκτροακουστική μουσική, αρκετές εκατοντάδες λάμπες



τοποθετημένες σε σκαλωσιές σε όλους τους υπόγειους θαλάμους και μπορούν να ενεργοποιηθούν ξεχωριστά για να δημιουργήσουν ζωντανά πρότυπα φωτός και τρία λέιζερ διαφορετικών χρωμάτων που θα μπορούσαν να προβάλλονται σε όλο το θόλο μέσω ενός δικτύου ρυθμιζόμενων καθρεπτών ". Ο τεχνικός συντονισμός μεταξύ των διαφόρων στοιχείων αποκτήθηκε με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών και εισήχθη επίσης η μουσική που δημιουργήθηκε από τον υπολογιστή.

Ένα από τα πιο σημαντικά έργα του Ιάννη Ξενάκη που δημιουργήθηκαν στον Ελλαδικό χώρο είναι το Πολύτοπο των Μυκηνών . Το 1978 το Πολύτοπο των Μυκηνών ήταν η πρώτη παράσταση που χρησιμοποίησε το UPIC (Unite Polygogique Informatique de CEMAMu), ένα μουσικό υπολογιστικό σύστημα που επιτρέπει στο χρήστη να δημιουργεί ήχους μέσω μιας γραφικής διεπαφής: μια ηλεκτρομαγνητική πένα και μια ηλεκτρομαγνητική σανίδα σχεδίων. Το Upic ήταν ένα φυσικό εργαλείο για κάποιον, όπως ο Ξενάκης, ο οποίος συνήθιζε να σχεδιάζει τη δική του μουσική σε χαρτί γραφικών σχεδιαγραμμάτων. Το πολύτοπο των Μυκηνών ήταν παρόμοιο με το Persepolis και συμπεριλάμβανε παιδιά που φορούσαν φακούς, αναγνώσεις και παραστάσεις για τον Όμηρο, προβολές στον τοίχο, φλόγες, πυροτεχνήματα, δύο βρόχους βίντεο και, όπως ηλεκτρονικά interludes, επαναλαμβανόμενες παρουσιάσεις του έργου MYCAENE A τη νέα σύνθεσή του UPIC. Τέλος ένα σημαντικό πολύτοπο έργο του Ξενάκη ήταν το Le diatope που βρίσκεται έξω από το πρόσφατα εγκαινιασμένο κέντρο Πομπιντού στο Παρίσι, ο Ξενάκης αντικατέστησε το πάτωμα με γυαλί και χρησιμοποίησε 1600 λάμπες και τέσσερα λέιζερ καθοδηγούμενα από τετρακόσια ρυθμιζόμενα κάτοπτρα για να αναπτύξουν ένα εντυπωσιακό αρχιτεκτονικό περιβάλλον [Sterken, Sven, 2001].



Εικόνα 13 . Le diatope

### 3 Η επίδραση των Στοχαστικών Μοντέλων του Ξενάκη στη μουσική μετά το '90

#### 3.1 Στοχαστικά Μοντέλα στην αλγοριθμική σύνθεση

Πολλοί είναι οι συνθέτες της σύγχρονης εποχής που έχουν μελετήσει ή δουλέψει στο CEMAMU, το σημερινό CCMIX πάνω στον τομέα της ηλεκτροακουστικής μουσικής και έχουν επηρεαστεί από το έργο του Ιάννη Ξενάκη. Ειδικά αυτοί που εφαρμόζουν στοχαστικά μοντέλα στην σύνθεση τους, συνθέτες όπως Curtis Roads, Barry Truax, Gérard Pape, Richard Barrett, Cort Lippe και άλλοι. Άλλοι συνθέτες έχουν αναπτύξει μια συγκεκριμένη μουσική διάλεκτο η οποία έχει ως αφετηρία τις στοχαστικές μεθόδους του Ξενάκη στην σύνθεση. Μερικοί συνθέτες όπως είναι οι James Harley, Agostino di Scipio, Curtis Roads έχουν συνεχίσει την έρευνα του Ξενάκη πάνω στα στοχαστικά μοντέλα γράφοντας επίσης εξαιρετικά άρθρα [Anastasia Georgaki, 2005].

Ένα από τα πιο διάσημα προγράμματα για μουσική παραγωγή μέσω υπολογιστή είναι το πρόγραμμα MAX/MSP [Cycling, 1974] [Georgaki Anastasia, 2005]. Ένα διαμορφώσιμο περιβάλλον το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και από συνθέτες και από ερευνητές, το οποίο είναι εμπνευσμένο από τις στοχαστικές μεθόδους του Ξενάκη. Άλλοι συνθέτες και ερευνητές στον τομέα της μουσικής και των μαθηματικών έχουν επηρεαστεί από τις ιδέες του Ξενάκη και έχουν ανακατασκευάσει μέσω του Openmusic (IRCAM) μια ερμηνευτική και μια παραδειγματική ανάλυση του έργου του. Επίσης ένα από τα πιο σημαντικά προγράμματα αλγοριθμικής σύνθεσης είναι το Chaosynth όπου ουσιαστικά πρόκειται για ένα σύστημα σύνθεσης μουσικής με ηχητικές μονάδες, με την βοήθεια κυτταρικών αυτόματων. Το Chaosynth είναι ένα δυναμικό σύστημα, του οποίου ο ικανότητες να συνθέτει ασυνήθιστους ήχους είναι τεράστιες. Επίσης σημαντικό θα ήταν να αναφέρουμε και τα προγράμματα: Reaktor, Cuck και Tune smithy.

Παραδοσιακά, η σύνθεση μουσικής έχει εμπλακεί σε μια σειρά δραστηριοτήτων, όπως ο ορισμός της μελωδίας και του ρυθμού, η εναρμόνιση, η συγγραφή σημείων, η διαμόρφωση, η χάραξη (γραφή). Προφανώς, αυτός ο κατάλογος δεν προορίζεται να είναι εξαντλητικός ή εύκολα να εφαρμόζεται σε κάθε μορφή μουσικής, αλλά είναι ένα

λογικό σημείο εκκίνησης, ειδικά για την κλασική μουσική. Όλες αυτές οι δραστηριότητες μπορούν να αυτοματοποιηθούν από τον υπολογιστή σε διάφορους βαθμούς και ορισμένες τεχνικές ή γλώσσες είναι πιο κατάλληλες για κάποιες από αυτές απ' ότι άλλες [Loy & Abbott, 1985]. Για σχετικά μικρό βαθμό αυτοματισμού, πλαίσια και γραφικά εργαλεία μπορούν να υποστηρίξουν πολύ συγκεκριμένα ή / και μονότονα καθήκοντα στη διαδικασία σύνθεσης ή να παρέχουν πρώτες ύλες για συνθέτες, προκειμένου να ξεκινήσουν το έργο της σύνθεσης ως πηγή έμπνευσης. Αυτό είναι γνωστό ως σύνθεση αλγορίθμου-μικροφώνου (CAAC) και αποτελεί έναν πολύ ενεργό τομέα έρευνας και ανάπτυξης του εμπορικού λογισμικού. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να δημιουργηθούν πολλά πακέτα λογισμικού και περιβάλλοντα προγραμματισμού, όπως το SuperCollider, το Csound (Bülaner, 2000), MAX / MSP, Kyma, Nyquist ή AC Toolbox. Η ανάπτυξη πειραματικών συστημάτων CAAC στο IRCAM (όπως το PatchWork, το OpenMusic και οι διάφορες επεκτάσεις τους) θα πρέπει επίσης να τονιστεί. Ο περιεκτικός χώρος αποθήκευσης των εργαλείων soft-ware της Ariza και οι ερευνητικοί πόροι για την αλγοριθμική σύνθεση αποτελούν ένα καλό σημείο εκκίνησης για τη διερεύνηση αυτού του οικοσυστήματος, καθώς και για την αλγοριθμική σύνθεση γενικά. [Ariza, 2005]

Η έρευνα μας ασχολείται περισσότερο με την αλγοριθμική σύνθεση με υψηλότερους βαθμούς αυτοματοποίησης των συνθετικών δραστηριοτήτων παρά με το τυπικό CAAC. Με άλλες λέξεις, εστιάζουμε περισσότερο στις τεχνικές, τις γλώσσες ή τα εργαλεία για να κωδικοποιούμε υπολογιστικά την ανθρώπινη μουσική δημιουργικότητα ή να κάνουμε αυτόματα δημιουργικές εργασίες σύνθεσης με ελάχιστη ή αν είναι δυνατό μηδενική ανθρώπινη παρέμβαση, αντί για γλώσσες ή εργαλεία των οποίων ο πρωταρχικός στόχος είναι να βοηθήσουν τους ανθρώπους με τις δικές τους δημιουργικές διαδικασίες. Προφανώς, το χάσμα μεταξύ των δύο άκρων του φάσματος αυτοματισμού (CAAC που αντιπροσωπεύει χαμηλό βαθμό αυτοματισμού, αλγοριθμική σύνθεση υψηλού βαθμού της αυτοματοποίησης) δεν είναι σαφής, διότι κάθε μέθοδος που αυτοματοποιεί την παραγωγή δημιουργικών έργων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την ενίσχυση των συνθετών και τα συστήματα με υψηλότερο βαθμό αυτοματισμού μπορούν να κατασκευαστούν προσαρμοσμένα πάνω από πολλά πλαίσια CAAC [Ariza, 2005].

Στην συνέχεια της εργασίας θα εξετάσουμε κάποιες μεθόδους με τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί ένας πολύ σημαντικός βαθμός αυτοματισμού σε μια συνθετική διαδικασία .

Με αυτές τις τεχνικές έχουν αναπτυχθεί πολλά μουσικά έργα καθώς και προγράμματα τα οποία συνδέονται άμεσα με το AI . Πολλές από αυτές τις τεχνικές μπορεί να προϋπήρχαν ως ιδέες και στο έργο του Ξενάκη ενώ κάποιες άλλες πιο σύγχρονες συναντώνται στους συνεχιστές του έργου του. Σημασία έχει να συνειδητοποιήσουμε την άμεση σχέση του έργου του Ξενάκη με αυτές τις πιο σύγχρονες τεχνικές σύνθεσης. Αλγόριθμοι και τεχνικές όπως αυτές που θα δούμε παρακάτω στην εργασία μας μπορεί ποτέ να μην έφταναν στο πάντρεμα τους με την σύγχρονη μουσική άμα δεν προϋπήρχε το έργο του Ξενάκη . Συνηθέστερες τεχνικές αλγοριθμικής σύνθεσης είναι η θεωρία του Χάους , τα κυτταρικά αυτόματα , τα L systems , οι γενετικοί αλγόριθμοι , ο θόρυβος, τα Φρακταλς και η διασπορά αλγορίθμων . Παρακάτω θα επιχειρήσουμε μια συνοπτική περιγραφή αυτών και θα παραθέσουμε μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα για το πάντρεμα αυτών με την μουσική σύνθεση . Επίσης θα γίνει μια σύντομη αναφορά σε μερικούς συνθέτες που χρησιμοποίησαν αυτά στο έργο τους , χωρίς δυστυχώς να είναι δυνατό να περιλάβουμε όλους τους συνθέτες στα πλαίσια αυτής της εργασίας .

Η θεωρία του Χάους μελετά τη συμπεριφορά ορισμένων μη γραμμικών δυναμικών συστημάτων, που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στις αρχικές συνθήκες, ένα αποτέλεσμα το οποίο ευρέως αναφέρεται ως το φαινόμενο της πεταλούδας. Πρωτοπόρος της θεωρίας του χάους είναι ο Γάλλος μαθηματικός Hendri Poincare και ανέπτυξε αυτή την θεωρία στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα . Τα χαοτικά συστήματα είναι απρόβλεπτα , καθώς χαρακτηρίζονται από την ευαίσθητη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες , όπως για παράδειγμα την θέση και την ταχύτητα . Το ίδιο μπορεί να συμβεί και σε μια συνθετική διαδικασία η οποία χρησιμοποιώντας χαοτικά συστήματα γίνεται να μετατραπεί σε μια τελείως τυχαία ( random ) ηχητική διαδικασία . Παραδείγματα στην μουσική μπορούμε να δούμε στο έργο του Steve Reich ο οποίος αλλάζει μικρές ρυθμικές δομές που τελικά οδηγούν σε μεγάλες αλλαγές στην μουσική. Στο έργο του György Ligeti Disorder (1985) παρατηρούμε το ίδιο φαινόμενο όπου το ένα χέρι παίζει αποκλειστικά σε άσπρα πλήκτρα ενώ το άλλο σε μαύρα . Μουσικοί όπως οι Charles Wuorinen , Gary Lee Nelson , David Clark Little είναι μερικοί από τους λίγους που χρησιμοποιούν την θεωρία τους Χάους στην μουσική τους και στην διαδικασία της μουσικής σύνθεσης. Η σύγχρονη συνθέτης Φανή Κοσώνα, μέλος της EEM, έχει επίσης χρησιμοποιήσει τη Θεωρία του Χάους στη σύνθεση μουσικών έργων. [ Diaz – Jerez, 2000].

ÉTUDE 1: «DÉSORDRE» Dédicé à Pierre Boulez György Ligeti 1965

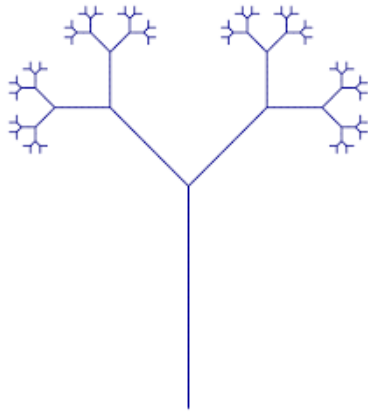
Molto vivace, Vigeroso, molto ritmico 0=76

Piano

Stets sehr zusammen Gebrauch des Pedals / Utilizzata pedale très discrètement (pendant toute la pièce)

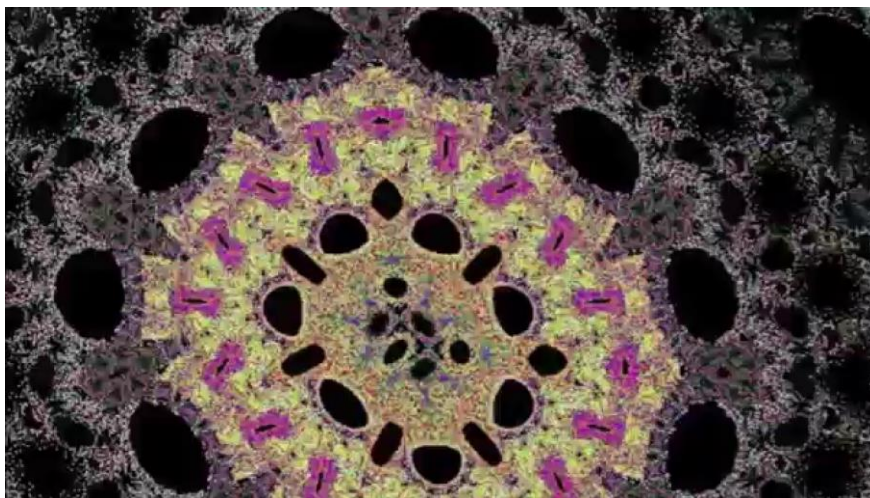
Εικόνα 14 . Παρτιτούρα του έργου Disorder του György Ligeti

Επόμενη τεχνική αλγοριθμικής σύνθεσης που θα εξετάσουμε είναι τα L systems . Τα L systems πρωτοπαρουσιάστηκαν από τον Lindenmayer το 1968 και πρακτικά είναι ένα σύστημα παράλληλης επανεγγραφής και ένας τύπος τυπικής γραμματικής . Ένα L system έχει αλφάβητο και έναν ή περισσότερους κανόνες . Επίσης τα L systems αρχικά σχεδιάστηκαν ως ένα πρότυπο ανάπτυξης των φυτών . Ως γενετικό σύστημα, ένα σύστημα L λειτουργεί, ξεκινώντας από το αξίωμα, επανεγγράφοντας κατ'επανάληψη παράλληλα όλα τα σύμβολα που εμφανίζονται σε μια συμβολοσειρά χρησιμοποιώντας τους κανόνες παραγωγής . Τα L systems είναι μια νέα μέθοδος για την παραγωγή αλγορίθμων μουσικών αποτελεσμάτων η οποία απεικονίζεται με παραδείγματα. Η ιδέα είναι να δημιουργήσουμε μια σειρά συμβόλων χρησιμοποιώντας ένα L systems, και να ερμηνεύσουμε αυτή τη συμβολοσειρά ως ακολουθία σημειώσεων. Η προτεινόμενη μουσική ερμηνεία των L system είναι στενά συνδεδεμένη με τη γραφική ερμηνεία τους, η οποία με τη σειρά τους συνδέει τα L systems με τα κλάσματα [ Rodriguez , Ernesto , Amilcat , Machado , Tiago , 2017] .



Εικόνα 15 . Παράδειγμα L system

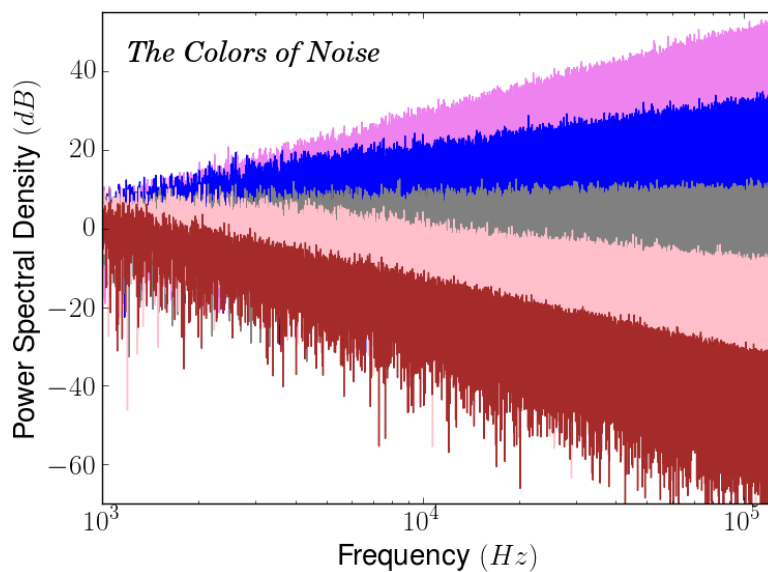
Ουσιαστικά ένα L system είναι ένα συγκεκριμένο υπό- είδος των Φρακταλς . Με τον διεθνή όρο Φρακταλ ονομάζεται ένα γεωμετρικό σχήμα που επαναλαμβάνεται αυτούσιο σε άπειρο βαθμό μεγέθυνσης, κι έτσι συχνά αναφέρεται σαν "απείρως περίπλοκο". Ο συνθέτης Τεραν Ολσον προσπάθησε να εξηγήσει τον τρόπο δημιουργίας μουσικής από μοτίβα φρακταλ . Ο μαθηματικός με το όνομα David Canright με την βοήθεια των Φρακταλς έδωσε μουσική υπόσταση στην ακολουθία Φιμπονατσι η οποία χρησιμοποιήθηκε και ως ρυθμικό θέμα ή ως τρόπος παραγωγής ρυθμών και ρυθμικών σχημάτων σε πολλές συνθέσεις του Bella Bartok. Πρακτικά τα Φρακταλς ξεκινάνε από μια βασική δομή και η οποία επαναλαμβάνεται (θεωρητικά μέχρι το άπειρο ). Επίσης ένα σημαντικό έργο που θα μπορούσε να θεωρηθεί και ως ωδή στα Φρακταλς είναι το έργο του Jonathan Coulton με το όνομα Mandelbrot Set [Rodriguez , Ernesto , Amilcat , Machado , Tiago , 2017].



Εικόνα 16 . Απεικόνιση αλγοριθμικής σύνθεσης με την βοήθεια των Φρακταλς .

Μια άλλη σύνηθες τεχνική είναι η χρησιμοποίηση ‘θορύβου’ σε σύγχρονες ηχογραφήσεις .Στην ηχητική μηχανική, το χρώμα του θορύβου αναφέρεται στο φάσμα ισχύος ενός σήματος θορύβου (ένα σήμα που παράγεται από μια στοχαστική διαδικασία) . Διαφορετικά χρώματα έχουν και διαφορετικές ιδιότητες και ως ήχοι θα ακούγονται διαφορετικά στα αυτιά ενός ανθρώπου . Συνήθως τα ονόματα των ήχων παίρνουν το όνομα από το φάσμα συχνοτήτων στο οποίο βρίσκονται . Αυτά τα χρώματα έχουν πολλές λειτουργίες στην σύγχρονη μουσική παραγωγή και τα συναντάμε συχνά σε σύγχρονα έργα αλγοριθμικής σύνθεσης καθώς και σε διάφορες παραδοσιακές ηχογράφησης σύγχρονης μουσικής ως εμπλουτισμό της αρχικής σύνθεσης .Αυτά τα ονόματα είναι : [ Jarke J. van Wijk, 1991]

1. White noise
2. Pink noise
3. Brownian noise
4. Blue noise
- 5 Violet noise
- 6 Grey noise

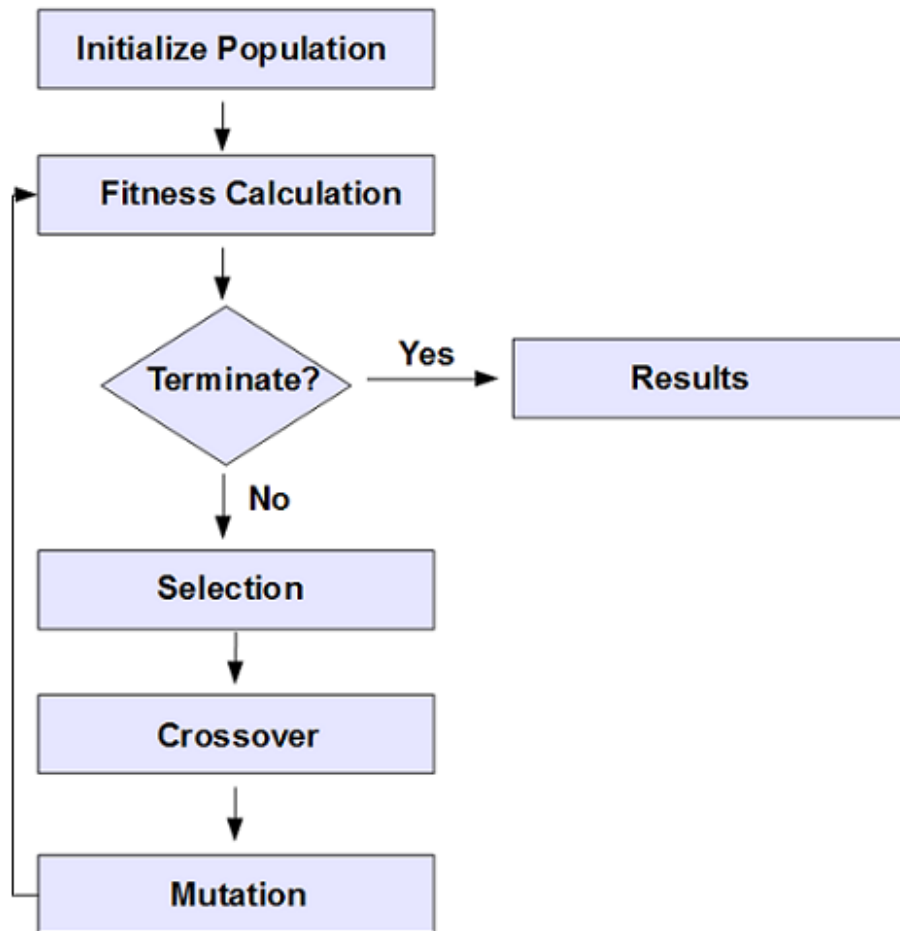


Εικόνα 17 . Τα χρώματα του θορύβου

Άλλη μια μέθοδος που συμβάλει στην αλγοριθμική σύνθεση είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι . Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι είναι μέρος των εξελικτικών αλγορίθμων οι οποίοι είναι μια ταχέως εξελισσόμενη περιοχή της τεχνητής νοημοσύνης και υλοποιήθηκαν αρχικά από τον Holland το 1975 . Ο Holland είχε ως στόχο, όχι το σχεδιασμό αλγορίθμων που να επιλύουν συγκεκριμένα προβλήματα, αλλά περισσότερο να εξετάσει κατά γενικό τρόπο το φαινόμενο της προσαρμογής, όπως αυτό παρατηρείται στη φύση, και να αναπτύξει τρόπους, ώστε να γίνει δυνατό μηχανισμοί της φυσικής προσαρμογής να προσαρμοσθούν σε υπολογιστικά συστήματα [Holland, 1992] . Είναι ένα στοιχείο εμπνευσμένο από τη διαδικασία φυσικής επιλογής που ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία εξελικτικών αλγορίθμων. Συνήθως χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν προβλήματα τα οποία βασίζονται σε βιο-εμπνευσμένους τελεστές όπως η μετάλλαξη, η διασταύρωση και η επιλογή. Ένας γενετικός αλγόριθμος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μουσικών συνθέσεων. Η αναπαράσταση θέσης του ρυθμού και η σχετική αναπαράσταση των βημάτων μετατόπισης (dt), βασισμένη στη σχέση μέτρησης από το αρχικό βήμα, επιτρέπουν έναν ευέλικτο και ισχυρό τρόπο κωδικοποίησης των μουσικών συνθέσεων. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει έναν προκαθορισμένο ρυθμό που εφαρμόζεται στον αρχικό πληθυσμό, δίνοντας καλές λύσεις εκκίνησης. Επίσης ,οι τροποποιημένοι γενετικοί τελεστές επιτρέπουν τον προγραμματισμό των βημάτων [Dragan , 2009] . Σύμφωνα με τον Diaz [ Diaz 200 ] αυτές οι τεχνικές αλγοριθμικής σύνθεσης θα πρέπει να αντιμετωπίζονται από τον συνθέτη περισσότερο ως πηγή έμπνευσης παρά ως ένα βήμα μουσικής λύσης.

Ένας γενετικός αλγόριθμος είναι μια ευρετική αναζήτηση που εμπνέεται από τη θεωρία της φυσικής εξέλιξης του Charles Robert Darwin. Αυτός ο αλγόριθμος αντικατοπτρίζει τη διαδικασία της φυσικής επιλογής όπου τα πιο κατάλληλα άτομα επιλέγονται για αναπαραγωγή προκειμένου να παραχθούν απόγονοι της επόμενης γενιάς. Η διαδικασία της φυσικής επιλογής αρχίζει με την επιλογή των πιο κατάλληλων ατόμων από έναν πληθυσμό. Παράγουν απογόνους που κληρονομούν τα χαρακτηριστικά των γονέων και θα προστεθούν στην επόμενη γενιά. Εάν οι γονείς έχουν καλύτερη φυσική κατάσταση, οι απόγονοι τους θα είναι καλύτεροι από τους γονείς και τα οποία θα έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιβιώσουν. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται και στο τέλος, θα προκύψει μια γενιά με τα πιο ικανά άτομα [Duggan, J, 2018, 59-81].





Εικόνα 18 . Παράδειγμα Γενετικού αλγορίθμου

Αυτή η έννοια μπορεί να εφαρμοστεί για ένα πρόβλημα αναζήτησης. Θεωρούμε μια σειρά λύσεων για ένα πρόβλημα και επιλέγουμε το σύνολο των καλύτερων από αυτές. Πέντε φάσεις εξετάζονται σε έναν γενετικό αλγόριθμο.

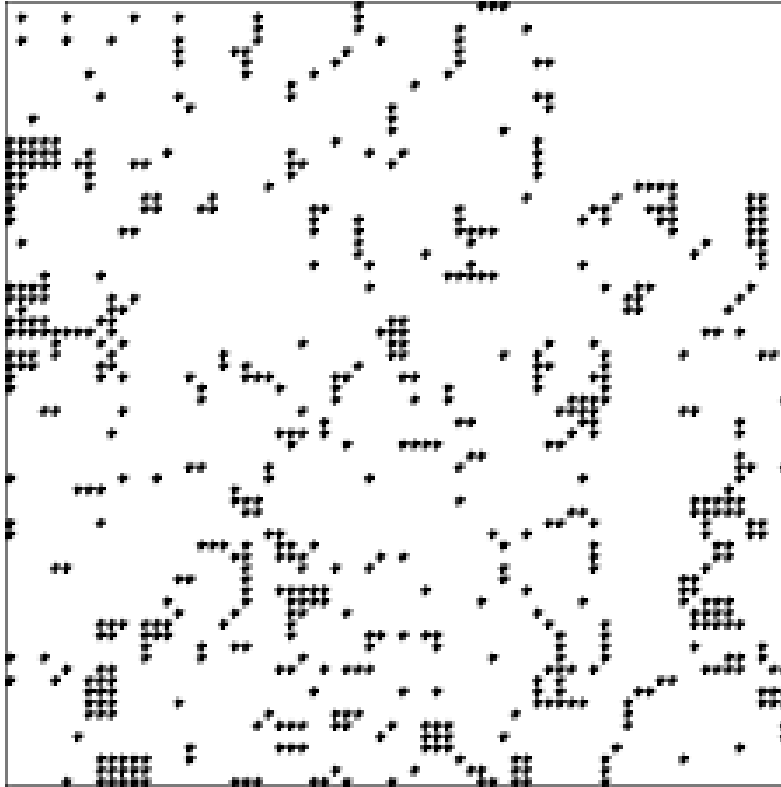
- i. Αρχικός πληθυσμός
- ii. Λειτουργία φυσικής κατάστασης
- iii. Επιλογή
- iv. Διασταύρωση
- v. Μετάλλαξη

Η διαδικασία ξεκινά με ένα σύνολο ατόμων που ονομάζεται Πληθυσμός. Κάθε άτομο είναι μια λύση στο πρόβλημα που θέλετε να λύσετε. Ένα άτομο χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων (μεταβλητών) γνωστών ως γονιδίων. Τα γονίδια ενώνονται σε ένα στρώμα για να σχηματίσουν ένα χρωμόσωμα (διάλυμα). Σε έναν γενετικό

αλγόριθμο, το σύνολο των γονιδίων ενός ατόμου αντιπροσωπεύεται χρησιμοποιώντας μια συμβολοσειρά, από την άποψη ενός αλφάβητου. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δυαδικές τιμές (συμβολοσειρά 1s και 0s). Λέμε ότι κωδικοποιούμε τα γονίδια σε ένα χρωμόσωμα. Η λειτουργία φυσικής κατάστασης καθορίζει το πόσο κατάλληλο είναι ένα άτομο (η ικανότητα ενός ατόμου να ανταγωνίζεται με άλλα άτομα). Η πιθανότητα να επιλεγεί ένα άτομο για αναπαραγωγή βασίζεται στο σκορ ικανότητάς του. Η ιδέα της φάσης επιλογής είναι να επιλέξετε τα πιο κατάλληλα άτομα και να τα αφήσετε να περάσουν τα γονιδιά τους στην επόμενη γενιά. Δύο ζεύγη ατόμων (γονέων) επιλέγονται με βάση τις βαθμολογίες τους. Τα άτομα με υψηλή φυσική κατάσταση έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιλεγούν για αναπαραγωγή. Η διασταύρωση είναι η πιο σημαντική φάση ενός γενετικού αλγορίθμου. Για κάθε ζεύγος γονέων που πρόκειται να ζευγαρώσουν, ένα σημείο διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία μέσα στα γονίδια. Οι απόγονοι δημιουργούνται με την ανταλλαγή των γονιδίων των γονέων μεταξύ τους μέχρι να επιτευχθεί το σημείο διασταύρωσης. Σε ορισμένους νέους απογόνους που σχηματίζονται, μερικά από τα γονιδιά τους μπορούν να υποβληθούν σε μια μετάλλαξη με χαμηλή τυχαιότητα. Αυτό σημαίνει ότι ορισμένα από τα δυαδικά ψηφία της συμβολοσειράς δυαδικών ψηφίων μπορούν να αναστραφούν. Η μετάλλαξη συμβαίνει για να διατηρηθεί η ποικιλομορφία εντός του πληθυσμού και να αποτραπεί η πρόωρη σύγκλιση (convergence). Ο αλγόριθμος τερματίζεται εάν ο πληθυσμός έχει συγκλίνει (δεν παράγει απογόνους οι οποίοι διαφέρουν σημαντικά από την προηγούμενη γενιά). Τότε λέγεται ότι ο γενετικός αλγόριθμος έδωσε ένα σύνολο λύσεων στο πρόβλημά μας. Ο πληθυσμός έχει σταθερό μέγεθος. Καθώς δημιουργούνται νέες γενιές, τα άτομα με λιγότερη καλή φυσική κατάσταση πεθαίνουν, παρέχοντας χώρο για νέους απογόνους. Η ακολουθία των φάσεων επαναλαμβάνεται για να παράγει άτομα σε κάθε νέα γενιά που είναι καλύτερα από την προηγούμενη γενιά [Grossmann, B., 2012].

Τέλος περνάμε στην τελευταία κατηγορία που θα μας πάει στην επόμενη ενότητα που θα εξετάσουμε σε αυτήν την εργασία, τα κυτταρικά αυτόματα (cellular automata). Τα κυτταρικά αυτόματα εισήχθησαν και μελετήθηκαν κατ' αρχήν στη δεκαετία του 1960 από τον Ούγγρο μαθηματικό John von Neumann που ερευνούσε την ύπαρξη και τις ιδιότητες μοντέλων "αυτομάτων" που έχουν την ιδιότητα της αναπαραγωγής, δηλαδή της παραγωγής αντιγράφων. Είναι δηλαδή ένα σύστημα με αυξανόμενη πολυπλοκότητα. Στην συνέχεια αυτής της εργασίας θα εξετάσουμε αναλυτικά ορισμένες λειτουργίες στοχαστικών κυτταρικών αυτομάτων σε προγράμματα

σύνθεσης μουσικής όπως για παράδειγμα το πρόγραμμα Camus του συνθέτη Eduardo Miranda το οποίο σχεδιάζει δισδιάστατα κυτταρικά αυτόματα με μουσικές παραμέτρους . Επίσης σημαντικό θα ήταν να αναφέρουμε το κομμάτι Entre l' Absurde et le Mystère που δημιουργήθηκε με το συγκεκριμένο πρόγραμμα [Diaz ,Jerez , 2000].



Εικόνα 19 . Εικονική αναπαράσταση ενός κυτταρικού αυτόματου

### 3.2 Στοχαστικά Μοντέλα στην τεχνητή νοημοσύνη και τη μουσική

Η έρευνα της Τεχνητής Νοημοσύνης [Artificial Intelligence (AI)] παράγει κυρίως συστήματα επίλυσης προβλημάτων που βοηθούν στην ανθρώπινη λήψη αποφάσεων και ταυτοποίηση. Η AI εφαρμόζεται συχνά σε προβλήματα όπως η διάγνωση, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση. Αυτά τα προβλήματα συχνά έχουν συγκεκριμένες λύσεις, έτσι ώστε τα αποτελέσματα του συστήματος AI να μπορούν να δοκιμαστούν με παρόμοιες λύσεις όπως αυτές που δημιουργούνται από εμπειρογνώμονες. Η έρευνα AI έχει επίσης εφαρμοστεί σε προβλήματα που περιλαμβάνουν τη δημιουργικότητα όπως η σύνθεση της ποίησης ή της μουσικής. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η παραγωγή πρέπει να κρίνεται με υποκειμενικά πρότυπα. Ωστόσο, όταν το AI χρησιμοποιείται για την επίλυση δημιουργικών προβλημάτων, ο αλγόριθμος AI πρέπει να αντικαταστήσει κάτι στη θέση της δημιουργικής σπίθας που φαίνεται να έχουν οι άνθρωποι, η τυχαίότητα από μόνη της δεν αρκεί. Παρόμοια με άλλες περιοχές της AI research, η εφαρμογή AI στη μουσική σύνθεση ποικίλλει σημαντικά τόσο από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο AI όσο και από το συγκεκριμένο πρόβλημα που επιλύεται. Στο ένα άκρο του φάσματος της μουσικής σύνθεσης είναι η χρήση του AI για να παράγει μια μουσική συνοδεία σε πραγματικό χρόνο την μουσική απόδοση. Στο άλλο άκρο είναι τα συστήματα AI που συνθέτουν μουσική από την αρχή. [Donnelly, Sheppard, 2011, 273-282].

Επίσης στο μείγμα είναι τα συστήματα AI που εκπαιδεύονται με βάση προηγούμενα κομμάτια μουσικής (π.χ. κλασικές μουσικές συνθέσεις του Bach και του Beethoven), οι οποίες δημιουργούν παρόμοιες συνθέσεις ήχου. Η μουσική σύνθεση που βασίζεται σε AI δεν πρέπει να συγχέεται με άλλες μορφές μουσικής που παράγεται από υπολογιστή, όπως η χρήση τεχνολογίας MIDI ή ψηφιακών δειγματοληπτών και συνθεσάιζερ. Η μουσική σύνθεση στους ανθρώπους γίνεται με διάφορους τρόπους. Μερικοί άνθρωποι "ακούν" τη μουσική στο μυαλό τους και τη μεταγράφουν σε πεντάγραμμο. Άλλοι σχεδιάζουν τη μουσική μέσα από μια συνειδητή διαδικασία. Ακόμα άλλοι δημιουργούν μουσική αυθόρμητα μέσω του "μπλοκαρίσματος" (conception en bloc) ή οι μουσικοί μπορούν να συνδυάσουν αυτές τις προσεγγίσεις. Στην AI, θα μπορούσαμε να εφαρμόσουμε αυτές τις τρεις προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας λογική σε συνδυασμό με στοχαστική προσέγγιση, προγραμματισμό ρουτίνας και γενετικούς αλγόριθμους αντίστοιχα. Στην πιο πρόσφατη έρευνα AI για τη

μουσική σύνθεση, η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι ο γενετικός αλγόριθμος (ή κάποια παραλλαγή). Άλλες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τα νευρωνικά δίκτυα, τη frame geometry και τις στοχαστικές προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας Markov αλυσίδες. Υπάρχουν πολλά έργα που έχουν εφαρμόσει γενετικούς αλγόριθμους στη δημιουργία της μουσικής, όπως για παράδειγμα το GenDash το οποίο υποδείχνει κάθε μέτρο ενός τραγουδιού ως διαφορετικό πληθυσμό για να εξελιχθεί, ή το έργο του Donnelly του Sheppard που εξελίσσει τις αρμονίες των μερών και το ρυθμό τους. [Tokui, Nao, and Hitoshi Iba., 2000] Το CONGA σε αντίθεση με τα προηγούμενα δύο προαναφερθέντα συστήματα, χρησιμοποιείται για την ανάλυση της μουσικής, αξιοποιώντας έτσι τη θεωρία της μουσικής για να αξιολογήσει τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να ανιχνευθεί ένα μουσικό κομμάτι. Το AMUSE χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει και να εξελίξει αυτοσχέδιες μελωδίες που δίνουν ένα αρμονικό πλαίσιο και το BlueJam χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό ευριστικών και γενετικών αλγορίθμων. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα στοχαστικών προσεγγίσεων στη δημιουργία μουσικής. [Özcan, E., and Erçal, T, 2008, 266-277]

Τα πιο ενδιαφέροντα αποτελέσματα έχουν ληφθεί όταν οι αλυσίδες Markov συνδυάζονται με άλλα αλγοριθμικά εργαλεία. Μια συναρπαστική προσέγγιση έχει υιοθετηθεί από τον Eduardo Miranda και την ερευνητική ομάδα του [McAlpine, Hoggar i Miranda, 1999]. Σήμερα διεξάγει έρευνα για τη νευροεπιστήμη της μουσικής και για προσομοιώσεις βιολογικών φυσικών διεργασιών στη μουσική προέλευση και εξέλιξη. Ο Μιράντα και η ομάδα του έχουν μετατρέψει τεχνητά μοντέλα ζωής για να συνεννοείται ο άνθρωπος με τους υπολογιστές στη σύνθεση μουσικής. Χρησιμοποίησαν κυτταρικά αυτοματοποιημένα συστήματα, τα οποία είναι διακριτά, δυναμικά συστήματα δεδομένου ότι αλλάζουν τα χαρακτηριστικά τους με την πάροδο του χρόνου. Τα κυτταρικά αυτοματοποιημένα συστήματα περιγράφονται συχνά ως συστοιχίες κυττάρων. Κάθε κύτταρο μπορεί να είναι σε μια από έναν πεπερασμένο αριθμό πιθανών καταστάσεων. Ένα συγκεκριμένο αυτόματο θα έχει μια αρχική διαμόρφωση που αναπτύσσεται με την πάροδο του χρόνου σύμφωνα με ορισμένους κανόνες εξέλιξης. Ο καθηγητής Eduardo Miranda κατασκεύασε στο Πανεπιστήμιο του Plymouth ένα ηλεκτρονικό σύστημα επεξεργασίας μουσικής ( Biocomputer music) που επιδρά άμεσα με τον εγκέφαλο του χρήστη συλλέγοντας τα πολύ χαμηλού σήματος ηλεκτρικά ερεθίσματα των νευρώνων . Κάτι που μπορεί να φανεί ιδιαίτερα

χρήσιμη σε ανθρώπους με σοβαρές κινητικές αναπηρίες, στην προσπάθεια να δημιουργήσουν μουσική είτε για ψυχαγωγικούς είτε για θεραπευτικούς σκοπούς [McAlpine, Hoggar , Miranda, 1999. 19-30].

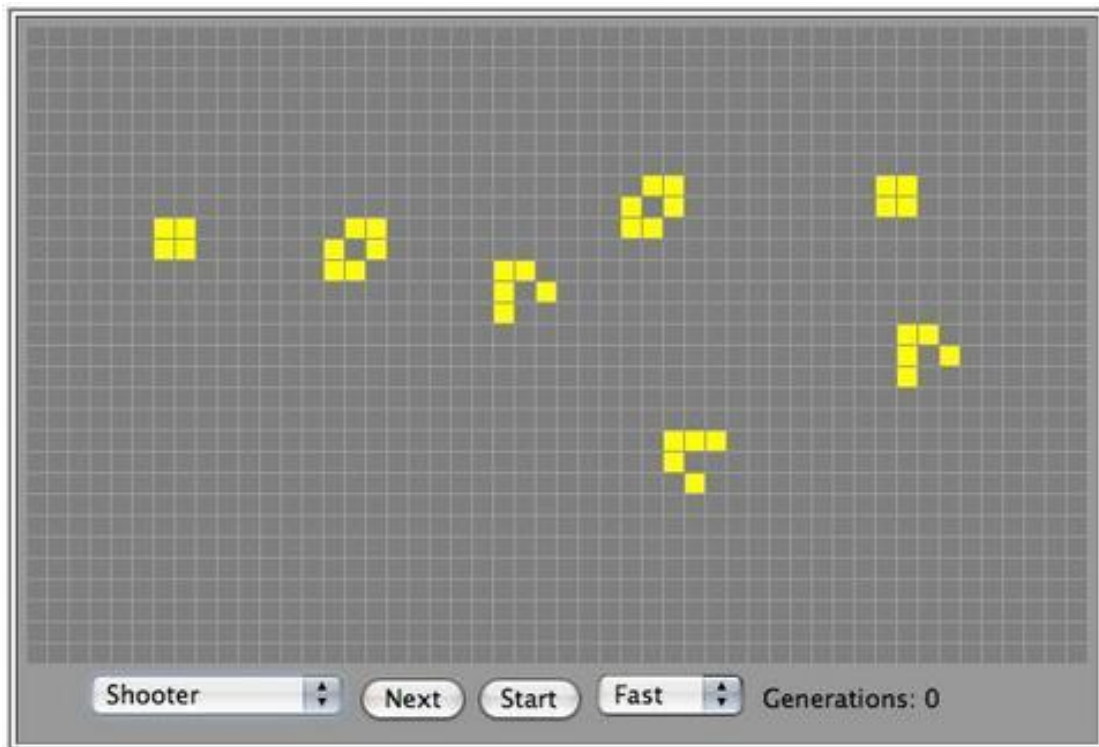


Εικόνα 21 . Eduardo Miranda και ο Μουσικός Βιο – υπολογιστής του

Ένα από τα πιο διάσημα παραδείγματα είναι το παιχνίδι της ζωής, που δημιουργήθηκε από τον John Horton Conway το 1970 [Gardner, 1970 , 120-123.].

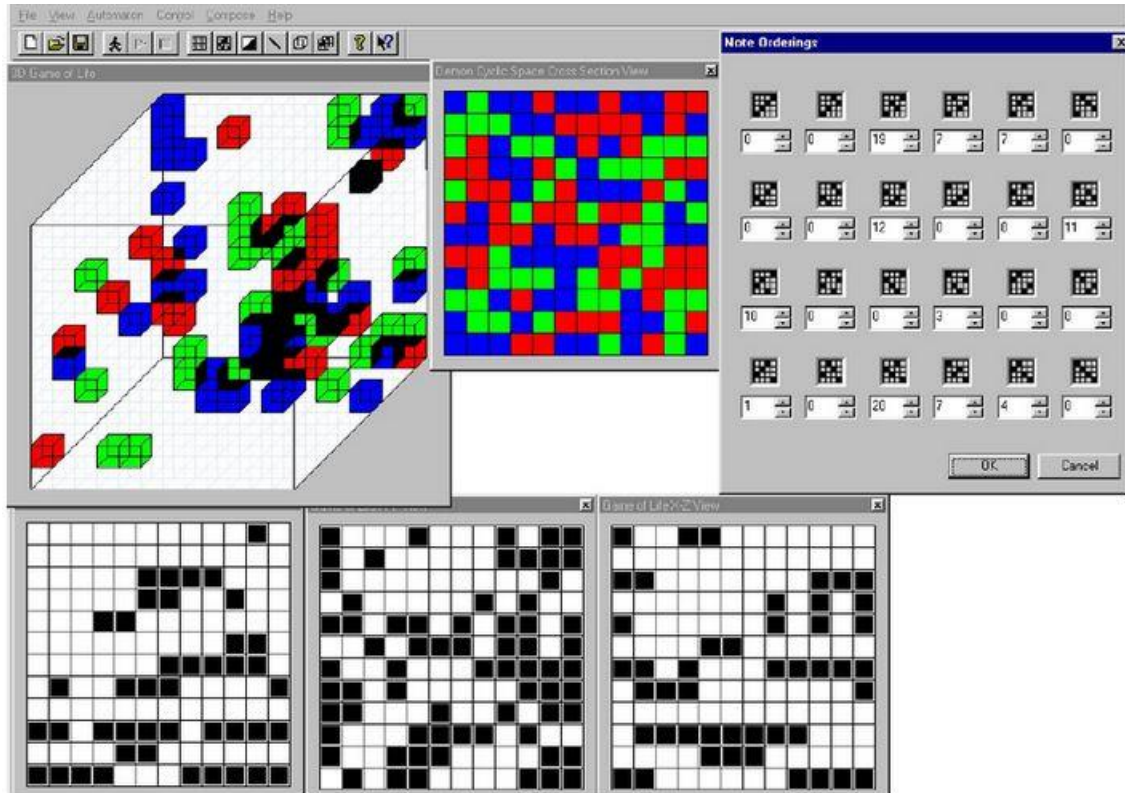
Σε αυτό υπάρχουν τέσσερις βασικοί κανόνες:

1. Κάθε ζωντανό κύτταρο με λιγότερους από δύο ζωντανούς γείτονες, πεθαίνει.
2. Κάθε ζωντανό κύτταρο με δύο ή τρεις ζωντανούς γείτονες επιβιώνει στην επόμενη γενεά.
3. Κάθε ζωντανό κύτταρο με περισσότερους από τρεις ζωντανούς γείτονες πεθαίνει.
4. Κάθε νεκρό κύτταρο με ακριβώς τρεις ζωντανούς γείτονες ζωντανεύει.



Εικόνα 22 . The game of life του John Horton Conway

Στο πρόγραμμα που κατασκεύασε ο Καθηγητής Eduardo Miranda με το όνομα Camus οι σημειώσεις, οι χρονικές θέσεις και οι διάρκειες δημιουργήθηκαν σύμφωνα με τα κυτταρικά αυτόματα, όπως στο The Game of Life. Ο κύριος περιορισμός της αρχικής μορφής του CAMUS αφορούσε την δημιουργία generator καθώς και τις ακολουθίες εξόδου ( output sequencing ) οι οποίες ήταν συνήθως ακανόνιστες και ήταν δύσκολο να ακουστούν, ενώ η διάρκεια των μηνυμάτων ακουγόταν εντελώς τυχαία. Επομένως, ο Miranda επέλεξε αλυσίδες Markov πρώτης τάξης για τον έλεγχο των ρυθμών. Αυτή η λύση, σε συνδυασμό με τρισδιάστατες εκτομές κυτταρικών αυτομάτων, είναι ο πυρήνας του διαδόχου της CAMUS , του CAMUS 3D. Τρεις συντεταγμένες (x, y, z) από το The Game of Life χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν ένα πεδίο . Οι αυτόματες μηχανές είναι εξ ολοκλήρου καθορισμένες: δηλαδή, αν τα αρχικά κελιά διατηρούνται σταθερά, η έξοδος θα είναι πάντα η ίδια. Το αντίστροφο ισχύει για στοχαστικές διεργασίες όπως οι Markov αλυσίδες: ξεκινώντας από τον ίδιο μεταβατικό πίνακα, προκύπτουν ποικίλα αποτελέσματα [Andrew Adamatzky,2010] .



Εικόνα 23 . Eduardo Miranda's CAMUS 3D

Όπως φαίνεται, οι αλυσίδες Markov διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στη μουσική του εικοστού και του εικοστού πρώτου αιώνα και θα συνεχίσουν να το κάνουν. Τα παραδείγματα που παρουσιάζονται είναι μόνο μερικές από τις αρχικές προσπάθειες να εφαρμοστούν οι έννοιες της Markov-αλυσίδας στη σύνθεση και την πρόβλεψη, αλλά βοήθησαν να δημιουργηθεί μια βάση για μια στοχαστική προσέγγιση της μουσικής. Ακολούθως θα μπορούσαν να υλοποιηθούν ευρύτερες δομές και αυτές να προσφέρουν νέες ευκαιρίες που συνδυάζουν τις αλυσίδες Markov με άλλες διαδικασίες. Ωστόσο, η χρησιμότητα των Markov αλυσίδων, και ταυτόχρονα ο περιορισμός τους, έγκειται στην επαναληψιμότητα. Με αυτόν τον τρόπο οι αλυσίδες Markov είναι παρόμοιες με τα πιο αναπτυγμένα προγράμματα υπολογισμών.

Ο ορισμός των αλυσίδων Markov υποδηλώνει ένα από τα πιθανά προβλήματα στην εφαρμογή τους στη μουσική. Έστω  $X_0, X_1, \dots$  είναι μια ακολουθία τυχαίων μεταβλητών με πιθανά αποτελέσματα  $X_t = x_t \in S$ . Ο χώρος κατάστασης  $S$  είναι πεπερασμένος ή μετρήσιμος. Για κάθε  $t \in \mathbb{N}$ ,  $P(X_{t+1} = j | X_0 = i_0, X_1 = i_1, \dots, X_t = i_t) = P(X_{t+1} = j | X_t = i_t)$ , είναι σχετικά εύκολο να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο Markov για να περιγράψει μια γνωστή διαδικασία. Στην πραγματικότητα, ο χώρος  $S$  είναι συνήθως προφανής - για παράδειγμα, τα χρωμοσώματα  $X$  και  $Y$ , τα στοιχεία του



DNA κλπ. Οι κανόνες που διέπουν το πρόβλημα που μελετάται είναι συνήθως πολύ γνωστοί και έτσι είναι σχετικά εύκολο να βρεθούν οι κατάλληλες πιθανότητες. Ακόμη και στον τομέα της γλωσσολογίας, οι αλυσίδες Markov φαίνεται να δίνουν καλύτερα αποτελέσματα απ' ό,τι στη μουσική. Για να εξηγήσουμε γιατί κάποιος πρέπει πρώτα να συνειδητοποιήσει ότι οι αλυσίδες Markov εφαρμόζονται σε ένα συγκεκριμένο τύπο γλώσσας και ορίζεται από ένα πεπερασμένο σύνολο κανόνων. Μαρκοβιανές αλυσίδες χρησιμοποιούνται στην αλγοριθμική σύνθεση μουσικής, ιδιαίτερα σε προγράμματα λογισμικού όπως CSound, Max ή SuperCollider. Σε μια πρώτης τάξης αλυσίδα, οι καταστάσεις του συστήματος γίνονται νότες ή τιμές τόνου και κατασκευάζεται ένα διάγραμμα πιθανοτήτων για κάθε νότα, συμπληρώνοντας μια μήτρα πιθανοτήτων μετάβασης. Μαρκοβιανές αλυσίδες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν δομικά, όπως στην Αναλογική A και B του Ξενάκη. Μαρκοβιανές αλυσίδες χρησιμοποιούνται επίσης σε συστήματα που χρησιμοποιούν ένα Μαρκοβιανό μοντέλο για να αντιδράσουν διαδραστικά στην εισαγωγή μουσικής [Verbeurgt, Dinolfo, Fayer, 2004].

## Συζήτηση

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε μια ιστορική αναδρομή του στοχασμού φιλοσοφικά, μαθηματικά και μουσικά – συνθετικά . Αλλά πιο σημαντικά αναδείχθηκε ο ρόλος του Ιάννη Ξενάκη σε αυτή την πορεία . Αφού παρουσιάσαμε την ιστορία του στοχασμού στην φιλοσοφία και των μαθηματικών στην μουσική, στην συνέχεια είδαμε πως όλα αυτά μέσα από το όραμα ενός μεγάλου συνθέτη , αρχιτέκτονα , μαθηματικού μας έφεραν εδώ που ήμαστε σήμερα σε μια σύνθεση η οποία μπορεί πλήρως να αυτοματοποιηθεί από έναν υπολογιστή . Ο Ξενάκης μελέτησε αυτά από πολλές διαφορετικές πτυχές , για παράδειγμα την σχέση της μουσικής με την φύση , την σχέση των μαθηματικών με την μουσική , την σχέση της αρχιτεκτονικής σε σχέση με τα προηγούμενα και φυσικά πίσω από όλα αυτά ο ρόλος της φιλοσοφίας . Ο καθένας από αυτούς τους κλάδους στην σύγχρονη εποχή και ως συνέχεια του έργου του Ξενάκη "οδηγεί" σε πολύ μεγάλα και ξέχωρα μονοπάτια που ταυτόχρονα είναι τόσο μακριά ,αλλά θα μπορούσαν και να συναντηθούν για την επίτευξη κοινών στόχων . Για παράδειγμα η μουσική σύνθεση με την βοήθεια υπολογιστή και το πάντρεμα με την επιστήμη της βιολογίας ,της φυσικής , των μαθηματικών , της γεωμετρίας κ.α. Δυο μεγάλα ερωτήματα πρακτικά εγείρονται από την εργασία αυτή και θα ήταν δυνατόν να ερευνηθούν σε επόμενες μελέτες . Καταρχάς η αισθητική της μουσικής σε έναν σύγχρονο κόσμο όπου όλες πια οι συνθετικές διεργασίες μπορούν να πραγματοποιηθούν από τον υπολογιστή και δεύτερον κατά ποσό οι συνθέτες συμμετέχουν στην διαδικασία της σύνθεσης και ποιος είναι ο βαθμός στον οποίον επιτρέπεται η τεχνητή νοημοσύνη ( AI) να πάρει τον ρόλο του συνθέτη και να δημιουργήσει αισθητικό περιεχόμενο . Ο Ξενάκης στο έργο του μπορεί να χρησιμοποίησε υπολογιστές και αλγοριθμικές διαδικασίες, αλλά όπως είδαμε ποτέ δεν υπήρχε κάποια παράμετρος σε απολυτή αφηρημένη σύνθεση . Η κάθε ξεχωριστή παράμετρος θα γινόταν είτε μέσω κάποιας μαθηματικής λειτουργίας (πιθανοτήτων κ.α. ) είτε από τον καθοδήγηση του συνθέτη προς κάποιον στόχο με σκοπό την στοχαστική σύνθεση .

Ο Ξενάκης επίσης μας έδωσε την εκκίνηση για την μελέτη της μουσικής μέσω της φύσης ή και το ανάποδο . Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας εξετάσαμε σε μικρό βαθμό, την ανάπτυξη που πήρε σήμερα αυτή η σκέψη . Καθώς η φύση είναι γεμάτη μουσική ακόμα και σε συχνότητες που ένα ανθρώπινο αυτί δεν μπορεί να αντιληφθεί,

υπάρχουν πιθανώς άπειροι ήχοι οι οποίοι συμβαίνουν καθημερινά τριγύρω μας χωρίς να το αντιλαμβανόμαστε . Σίγουρα με τα νέα τεχνολογικά μέσα η μελέτη της μουσικής στην φύση παραμένει ένα πεδίο για ερευνά και πιθανώς για παρατήρηση καθώς εξελίσσεται μαζί με την εξέλιξη του ανθρώπου στον πλανήτη γη και γιατί όχι και στο συμπάν που μας περιβάλλει .

Σίγουρα με την εξέλιξη των διαφορετικών επιστημονικών πεδίων (μαθηματικά , φυσική , βιολογία κ.α.) θα υπάρξει και εξέλιξη της σύνθεσης στην μουσική καθώς πλέον με τα εφόδια της σκέψης του Ξενάκη και άλλων μεγάλων συνθέτων μπορούμε πια να οραματιστούμε το πάντρεμα της κάθε πτυχής αυτών των επιστήμων με την διαδικασία της μουσικής σύνθεσης . Με αυτή την σκέψη πιθανώς να μπορούμε να "ακούσουμε" την μουσική του μέλλοντος και πιθανώς αυτή να μην είναι πολύ διαφορετική από την μουσική του Ιωάννη Ξενάκη .

Σε μια εποχή τόσο πολύπλοκη όσο είναι ο 21<sup>ος</sup> αιώνας η μουσική σύνθεση θα έπρεπε να παίξει ενεργό ρόλο στην κοινωνία . Καθώς λοιπόν η ανάπτυξη των συστημάτων για την δημιουργία μουσικής αυτοματοποιούνται ο μέσος άνθρωπος πια μπορεί να πάρει τον ρόλο του συνθέτη . Ίσως αυτό να ήταν και μια από τις βλέψεις του συνθέτη Ιάνη Ξενάκη όπου και ο ίδιος με λίγες γνώσεις πάνω στην θεωρία της μουσικής και στους τυπικούς κανόνες της κλασικής αρμονίας έδειξε τον δρόμο προς μια έκφραση με τα όπλα τα οποία αυτός ήδη κατείχε . Με αυτόν τον τρόπο σήμερα ακόμα περισσότερος κόσμος χωρίς γνώσεις σύνθεσης ή γνώσεις πάνω σε ένα όργανο μπορεί να δημιουργήσει μουσική και να εκφραστεί μέσα από αυτοματοποιημένες μεθόδους που υπάρχουν αυτή την στιγμή στους προσωπικούς υπολογιστές του καθενός μας. Ο συνθέτης πια πρέπει να ελέγχει τις παραμέτρους με σκοπό να παράγει το αποτέλεσμα που επιθυμεί, χωρίς να εξετάζει αυτές τις παραμέτρους με τις κλασικές έννοιες της αρμονίας και της σύνθεσης .

## Επίλογος

Στην εργασία είδαμε πως χρησιμοποιεί ο Ξενάκης τα διαφορετικά στοχαστικά μοντέλα σε κάποιες από τις συνθέσεις του , στην σύγχρονη εποχή όμως οι διαδικασίες αυτές γίνονται όλο και πιο περίπλοκες ,καθώς πια τα τεχνολογικά μέσα και η υπολογιστική δύναμη των συγχρόνων υπολογιστών έχουν αυξηθεί δραματικά . Ο Ιάννης Ξενάκης ,μέσα από τις συνθέσεις του ,έδειξε τον δρόμο προς μια αυτοματοποίηση της σύνθεσης και προς την ανάπτυξη διαφορετικών τεχνολογικών εργαλείων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να επεκτείνουν την μουσική εμπειρία ( πχ .βιο-υπολογιστής του Eduardo Miranda) . Για πάνω από δύο χιλιάδες χρόνια, οι συνθέτες χρησιμοποίησαν αλγόριθμους για να βοηθήσουν στη δημιουργία νέων έργων. Οι αλγόριθμοι για τη μουσική σύνθεση έχουν εξελιχθεί σε διάφορες κατηγορίες: τυχαίες μεθόδους [π.χ. Cage]. προσδιορισμός [π.χ. Schoenberg, Webern, και Berg]. και στοχαστικές μεθόδους [π.χ. Ξενάκης και Χίλλερ]. Οι συνθέτες εφαρμόζουν όχι μόνο μαθηματικά μοντέλα αλλά και βιολογικά παραδείγματα για τη δημιουργία μουσικής. Δεδομένου ότι σχεδόν οποιαδήποτε διαδικασία μπορεί να διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας έναν υπολογιστή, σχεδόν οποιοδήποτε μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση μουσικής. Τα βασικά ερωτήματα που αντιμετωπίζουν οι συνθέτες που χρησιμοποιούν αλγοριθμικές διαδικασίες στηρίζονται στην αισθητική και τη φιλοσοφία. Γιατί να χρησιμοποιήσετε αλγορίθμους στη σύνθεση της μουσικής; Τι είναι πιο σημαντικό - ο αλγόριθμος ή η σύνθεση; Πώς ένας συνθέτης ή ακροατής αποφασίζει αν μια αλγοριθμική σύνθεση είναι επιτυχής;

Η μουσική είναι ιεραρχικά δομημένη με πολλούς τρόπους και όλες αυτές οι μορφές οργάνωσης μοιράζονται βασικά μαθηματικά χαρακτηριστικά. Ένα γεωμετρικό κατασκεύασμα που ονομάζεται «πολύτοπο» συνοψίζει αυτές τις ομοιότητες και έχει μια πλούσια μαθηματική δομή. Αναγνωρίζοντας τις ιεραρχίες που προκύπτουν στη μουσική, μπορούμε να δούμε πώς πραγματοποιείται αυτή η πλούσια δομή σε πολλές πτυχές της μουσικής οργάνωσης. Επειδή το ίδιο μαθηματικό κατασκεύασμα πραγματοποιείται σε πολλαπλές μουσικές παραμέτρους, το πολύτοπο όχι μόνο περιγράφει τις σχέσεις μεταξύ ιεραρχιών σε μία μόνο παράμετρο αλλά και καθορίζει πρότυπα συμφωνίας και σύγκρουση μεταξύ ταυτόχρονων ιεραρχιών σε διαφορετικές παραμέτρους.

Τα μουσικά επιτεύγματα του Ξενάκη όπως είδαμε και παραπάνω περιλαμβάνουν την εξαιρετικά πρωτότυπη προσέγγιση της ηχητικής σύνθεσης, η οποία προκαλεί δέος, και την αυστηρή σκέψη μέσα από την οποία δημιουργούνται οι στοχαστικές μουσικές συνθέσεις. Οι περισσότεροι συνθέτες ηλεκτροακουστικής μουσικής του σήμερα φαίνεται να έχουν ως στόχο τη δημιουργία καθαρών και απλών μη δυναμικών ήχων. Ο καινοτόμος Ξενάκης όμως, επιμένει, και φαίνεται πως δικαιώνεται, στο ότι οι απλοί ήχοι δεν έχουν μεγάλη εκφραστική δύναμη και παράλληλα εκφράζει την άποψη πως οι ηλεκτρονικοί ήχοι μπορούν να είναι δυναμικοί και παράλληλα αισθητικοί.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

Antonopoulos Antonios (2011), “Pithoprakta: The historical measures 52-59, New evidence in glissando speed formalization, Theory & theoretical applications “Aristotle University of Thessaloniki, Department of music

Antonopoulos Antonios (2005), “Ontology & Cosmology in Iannis Xenakis Poetics. Formalized music: Annotations – a critical survey “, Athens, International Symposium Iannis Xenakis. Conference Proceedings.

Allan, M., & Williams, C. K. (2014). “Harmonising Chorales by Probabilistic Inference”. Neural Information Processing Systems Conference.

Ariza, Christopher. (2005). An Open Design for Computer - Aided Algorithmic Music Composition: athenaCL. Florida: Boca Rat

Anne-Sylvie Barthel-Calvet (2001) “Chronologie, Portrait(s) de Iannis Xenakis “, Paris

Ana Rodriguez, Ernesto Costa, Amilcar Cardoso, Penousal Machado, Tiago Cruz. (2017). “Evolving L-systems with Musical notes “. University of Coimbra

Atkinson, Charles M. (2009). “The Critical Nexus: Tone-System, Mode, and Notation in Early Medieval Music”. New York: Oxford University Press

Arsenault, Linda Marie. 1996. “Iannis Xenakis’s Evryali: An introduction to structure, meaning and performance”. University of Alberta.

Anastasia Georgaki (2005). “The grain of Xenakis technological thought in the computer research of our days “. National and Kapodistrian University of Athens.

Anastasia Georgaki, Marcelo Queiroz (2015). “Virtual Tettix: Cicada’s sound analysis and modeling at plato’s academy “. Music Department, University of Athens, Greece

Bálint András Varga. (1996).” Conversations with Iannis Xenakis”, London, 47–48

Brigitte Robindoré (1997). “Interview with Andrew Sparling, Hear and Now, BBC Radio 3 “, London

Bonabeau E., Dorigo M. and G. Theraulaz. (2009). "Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems", Oxford University Press US

Brzezniak, Z., & Zastawniak, T. (1999). "Basic stochastic processes: a course through exercises ". Springer.

Bennet H -Clark, D Young (1994). "The scaling of song frequency in cicadas ".  
published by: The company of Biologistics

Donnelly, P., and Sheppard, J (2011). "Evolving four-part harmony using genetic algorithms.", Springer. 273-282

Duggan, J. (2018). "Using system dynamics and multi objective optimization to support policy analysis for complex systems. In Understanding Complex Systems". Springer Berlin. 59–81

Dragan Matic, (2010) "A Genetic algorithm for composing music ", University of Banjaluka, Bosnia and Herzegovina

Feller, W. (1968). "An Introduction to Probability Theory and Its Applications". New York: Wiley & Sons.

Gardner, M. (1970). "Mathematical games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". Scientific American, 120-123.

Glover, F. (2009). "Scatter search and path relinking, in New Ideas in Optimization". McGraw-Hill Ltd. 297–316

Grossmann, B. (2012). "Policy Optimization in Dynamic Models with Genetic Algorithms. International System Dynamics Conference" Palermo.

Halliday, M. (2013). "Introduction: On the "architecture" of human language. In J. Webster (Ed.), On Language and Linguistics. (Vol. 3)". London and New York: Continuum

Harley, James (2002) 'The Electroacoustic Music of Iannis Xenakis,' Computer Music Journal, Vol. 26. 33-57

Hoffmann, P. 2004. "'Something rich and strange': Exploring the Pitch Structure of GENDY3." Journal of New Music Research 33 .137-144

- Horowitz, D. (1994) "Generating rhythms with genetic algorithms", Proceedings of the 1994 International Computer Music Conference, ICMA, San Francisco, 1994
- Holland, (1992) J.H.: "Genetic algorithms". *Scientific american* .66–72
- Iannis Xenakis (1963). *Musiques Formelles = Revue Musicale n° 253–54* (Paris: Editions Richard-Masse, 1963). Translated and expanded in Iannis Xenakis. *Formalized Music: Thought and Mathematics in Composition*, 2nd Ed. (Harmonologia Series No. 6) (Hillsdale: Pendragon Press, 2001).
- Iannis Xenakis (1992). "Formalized Music ", Rev. Ed. (Stuyvesant, NY: Pendragon Press, 1992)
- Jones, P., & Smith, P. (2011). "Stochastic processes". Arnold
- Karsten Verbeurgt, Michael Dinolfo, Mikhail Fayer (2004), "Extracting Patterns in Music for Composition via Markov Chains ". State University of New York
- Kaliakatsos Papakostas, Epitropakis Floros, Vrahatis, (2012). "Interactive evolution of 8-bit melodies with genetic programming towards finding aesthetic measures for sound ". Malaga, Spain. 140-151
- Kanach, Sharon (2003) 'The Writings of Iannis Xenakis (Starting with "Formalized Music"', *Perspectives of New Music*, Vol. 41. 154-166
- Koenig, G.M. (1971) "The Use of Computer Programmes in Creating Music." *La Revue Musicale*, "Music and Technology". 93-115
- Mandelbrojt, J. Fremoit, and R. Malina, editors. (1999). *The Aesthetic Status of Technological Art*. *Leonardo* 32 (3):211-215.
- McAlpine, K., Hoggar, S., & Miranda, E. (1999). *Making Music with Algorithms: A Case-Study System*. *Computer Music Journal*, 23(2), 19-30.
- Luque, <sup>[L]</sup><sub>[SEP]</sub> Sergio (2009) 'The Stochastic Synthesis of Iannis Xenakis,' *Leonardo Music Journal*, Vol. 19, pp. 77-84
- Özcan, E., and Erçal, T (2008). "A genetic algorithm for generating improvised music." *Artificial Evolution*, p. 266-277, Springer.



- Simon, I., Morris, D., and Basu, S (2008). "MySong: automatic accompaniment generation for vocal melodies." Proceedings of the twenty-sixth annual SIGCHI conference on Human factors in computing systems. p. 727-734, ACM.
- Simoni M. (2003). "Algorithmic Composition: A Gentle Introduction to Music Composition Using Common LISP and Common Music ". Michigan Publishing, University of Michigan Library,
- Solomos, Makis (2001) 'The Unity of Xenakis's Instrumental and Electroacoustic Music: The Case for "Brownian Movements"', Perspectives of New Music, Vol. 39, No. 1, pp. 244-254.
- Sterken, Sven (2001) 'Towards a Space-Time Art: Iannis Xenakis's Polytopes,' Perspectives of New Music, Vol. 39, No. 2
- Sterken, Sven (2006) Music as an Art of Space: Interactions between Music and Architecture in the Work of Iannis
- Tokui, Nao, and Hitoshi Iba. (2000). "Music composition with interactive evolutionary computation." Proceedings of the 3rd International Conference on Generative Art. Vol. 17. No. 2. 2000, Generative Design Lab
- Varga, Bálint András. (2004). Synomilies me to Ianni Xenaki [Conversations with Iannis Xenakis]. Translated by Aleka Symeonidou. Athens: Potamos
- Wołkiewicz, J., Kulka, Z., & Kešelj, V. (2007). N-gram-based approach to composer recognition. Warsaw: Warsaw University of Technology
- Xenakis, I. (1971). Formalized Music. Bloomington: Indiana University Press. (Includes a chapter on "New Proposals in Microsound Structure".)
- Xenakis, I (1991a) Formalized Music. 2d ed. New York: Pendragon Press. (Includes a chapter on the program GENDY.)
- Γεωργάκη Α. (2009). «Φύση και ηχητικά τοπία στο έργο του Ι. Ξενάκη». Τόμος Π. Μιχελή. Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ίδρυμα Παναγιώτη και Έφης Μιχελή
- Σολωμός Μάκης,( 2006) , "Κυψελοειδή αυτόματα στη μουσική του Ι.Ξενάκη, θεωρία και πρακτική», στα Μουσικά, Εξάντας, Αθήνα, 2Μιχελής Π.,Αισθητικά Θεωρήματα, Ίδρυμα Π.κιΕ .Μιχελή

## Ιστότοποι

Sven Streken , 2006 ,Music as an Art of Space ανακτήθηκε από :

<https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/340882/1/Sven+Sterken+Proof+09+12+2006+FINAL.pdf>

Iannis Xenakis – Metastasis (1954) ,ανακτήθηκε από :

<https://classical20.com/2015/08/12/iannis-xenakis-metastasis-1954/>

Το μονόχορδο του Πυθαγόρα και η μουσική κλίμακα , 2016 , ανακτήθηκε από :

<https://christostsantis.com/2016/09/01/to-monoxordo-toy-pyuagora-kai-h-moysikh-klimaka/>

Gareth E. Roberts , 2012 , Chaos and Fractals in Music , ανακτήθηκε από :

<http://mathcs.holycross.edu/~groberts/Courses/Mont2/2012/Handouts/Lectures/fractals-web.pdf>

Stephanos Thomopoulos, Evryali and the arborescences, ανακτήθηκε από:

<https://www.gold.ac.uk/media/documents-by-section/departments/music/07.2-Sefanos-Thomopoulos.pdf>

Ana Rodrigues, 2017, Evolving L-systems with Musical Notes, ανακτήθηκε από:

<https://cdv.dei.uc.pt/wp-content/uploads/2017/11/RodriguesCCMC16.pdf>

Ilias Chrissochoidis, 2005, Set theory in Xenakis Eonta ανακτήθηκε από:

<https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/166688/1/Set%20theory%20in%20Xenakis'%20EONTA.pdf>

Iannis, Xenakis ,1963 , Formalized Music , ανακτήθηκε από :

[https://monoskop.org/images/7/74/Xenakis\\_Iannis\\_Formalized\\_Music\\_Thought\\_and\\_Mathematics\\_in\\_Composition.pdf](https://monoskop.org/images/7/74/Xenakis_Iannis_Formalized_Music_Thought_and_Mathematics_in_Composition.pdf)

## Παράρτημα

### Βιογραφία

Ο Ξενάκης γεννήθηκε στη Μπράιλα της Ρουμανίας, το 1922 και ήταν ο μεγαλύτερος γιος ενός Έλληνα επιχειρηματία. Σε ηλικία 5 ετών μένει ορφανός από μητέρα και λίγα χρόνια αργότερα, εκείνος μαζί με τον αδελφό του μετακομίζουν στην Ελλάδα και μπαίνουν εσώκλειστοι σε οικοτροφείο αρρένων στις Σπέτσες. Έξι χρόνια μετά, το 1938, αποφοίτησε από το οικοτροφείο και εγγράφηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο για να σπουδάσει Αρχιτεκτονική και Μηχανική, ενώ παράλληλα σπούδαζε Μουσική και Αρμονία [Morse, Erik, 2011]. Η αρχική έκθεση του Ξενάκη στη μουσική έγινε στα πρώτα δέκα χρόνια της ζωής του, όταν περιβάλλεται από τη λαϊκή μουσική της ρουμανικής υπαίθρου και τη λειτουργία της Βυζαντινής Ορθόδοξης Εκκλησίας. Το 1942, όταν η οικογένειά του μετακόμισε στην Ελλάδα, εκτέθηκε για πρώτη φορά στη μουσική του Μπετόβεν και του και του Μπραμς [Luque, Sergio, 2009]. Η ζωή του έγινε έντονη όταν εγγράφεται στην Πολυτεχνική Σχολή της Αθήνας με πρόθεση να γίνει μηχανικός. Οι σπουδές του διακόπτονται απότομα το 1940 όταν οι ιταλικές δυνάμεις εισέβαλαν στην Ελλάδα κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου. Ο Ξενάκης εγκατέλειψε τις σπουδές του και έγινε μέλος της ελληνικής αντίστασης. Έντονα επηρεασμένος από τα κομμουνιστικά ιδεώδη προσχωρεί στο Εθνικό Απελευθερωτικό Μέτωπο (ΕΑΜ) και πολεμάει κατά των γερμανικών και ιταλικών δυνάμεων. Αργότερα, προσχώρησε και στον Ελληνικό Λαϊκό Απελευθερωτικό Στρατό (ΕΛΑΣ). Τον Δεκέμβριο του 1944, κατά τον Ελληνικό Εμφύλιο Πόλεμο, συμμετέχοντας σε μάχες στους δρόμους της Αθήνας εναντίον των βρετανικών δυνάμεων, τραυματίζεται σοβαρά. Αποτέλεσμα του τραυματισμού του εκείνου ήταν η παραμόρφωση της αριστερής πλευράς του προσώπου του και η απώλεια της όρασης του από το αριστερό του μάτι [Kanach, Sharon, 2003]. Παρά τον τραυματισμό του επιστρέφει στο Πολυτεχνείο από το οποίο και αποφοιτά το 1947. Στα τέλη της ίδια χρονιάς αυτό-εξορίζεται στο Παρίσι, όταν στην Ελλάδα την κυβέρνηση παίρνει το αντι-κομμουνιστικό κόμμα του Κων/νου Τσαλδάρη. Η ίδια κυβέρνηση τον καταδίκασε ερήμην του σε θάνατο, μια ποινή από την οποία απαλλάχτηκε το 1974 [Kanach, Sharon, 2003]. Ο ίδιος, σύμφωνα με λεγόμενα του, φαίνεται να μην ξεπέρασε ποτέ τις ενοχές του λόγω της αποχώρησης από τη χώρα για την οποία είχε αγωνιστεί. Είχε αφήσει πίσω φίλους και συναγωνιστές για τους οποίους ένιωθε ότι θα

έπρεπε να επιστρέψει αλλιώς θα τους πρόδιδε. Αυτές του οι σκέψεις ήταν η αφορμή για κάποιες από τις δημιουργίες του, σε μια προσπάθεια του να αφήσει πίσω του ένα έργο αξιοσημείωτο [Sterken, Sven, 2001].

Στο Παρίσι, ο Ξενάκης έκανε πολλές σημαντικές επαφές με τους Messiaen, Honegger, Milhaud και τον διάσημο αρχιτέκτονα Le Corbusier. Όλοι τους εντυπωσιάστηκαν από την πρωτοποριακή και λαμπρή πνευματική του προσέγγιση στη μουσική [Luque, Sergio, 2009].

Μετά τη συνεργασία του με τον Le Corbusier ο Ξενάκης ασχολήθηκε ιδιαίτερα με τον χωροταξικό σχεδιασμό και την αρχιτεκτονική, σχεδιάζοντας κάποιες τοποθεσίες – ορόσημα σε όλο τον κόσμο. Για αυτόν, η αρχιτεκτονική ήταν μουσική, και η μουσική ήταν αρχιτεκτονική. Χρησιμοποιούσε τη μουσική για να αντλήσει έμπνευση για την αρχιτεκτονική και το αντίστροφο, βασίζοντας κομμάτια σε προγράμματα υπολογιστών και σύνθετες μαθηματικές εξισώσεις. Αυτή η προσέγγιση οδήγησε σε εξαιρετικά θεωρητική, συστηματική μουσική που χαρακτηρίζεται από περίπλοκους ρυθμούς, πυκνούς και συχνά εκρηκτικούς, εκτεταμένες επιδράσεις και "σύννεφα" ήχου που περιέχουν αμέτρητα "σωματίδια". Το 1947 ο Ξενάκης ξεκινά να εργάζεται ως βοηθός μηχανικού στο αρχιτεκτονικό στούντιο του Le Corbusier, στο οποίο σύντομα απέκτησε ηγετικό ρόλο στη δημιουργία μηχανικών σχεδίων. Παράλληλα πλησιάζει τους Boulanger, Honegger και Milhaud στο Παρίσι, θέλοντας να σπουδάσει δίπλα τους μουσική. Οι Γάλλοι μουσικοί, όμως, τον απέρριψαν χαρακτηρίζοντας τον «νεαρό επαναστάτη με ελάχιστη μουσική παιδεία». Ο ίδιος δεν καταθέτει τα όπλα και πλησιάζει τον Γάλλο συνθέτη Olivier Messiaen. [Kanach, Sharon, 2003].

Ο Messiaen ενθαρρύνει τον Ξενάκη και τον συμβουλεύει να εκμεταλλευτεί την ελληνική του καταγωγή, τις σπουδές του στην αρχιτεκτονική και τις καλές του γνώσεις γύρω από τις Θετικές Επιστήμες και να εντάξει τα στοιχεία αυτά στις μουσικές του δημιουργίες. ο Ξενάκης άρχισε να παρακολουθεί το 1952 μαθήματα με τον Μεσιάν, ενώ στον λιγοστό ελεύθερό του χρόνο συνέθετε. Επίσης, το 1959 ο Le Corbusier τον εμπιστεύτηκε τόσο που τον αφήνει υπεύθυνο στο στούντιο του, μια δουλειά που καλύπτει τις βιοποριστικές ανάγκες του Έλληνα συνθέτη.

Ο Ξενάκης μερικά χρόνια μετά, το 1966, ιδρύει τη δική του σχολή, Equipe de Mathématique et Automatique Musicales (EMAMu), στην οποία και διδάσκεται η μουσική σύνθεση με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Το 1972 μετονομάζεται σε

CEMAMu , το 1985 Les Ateliers UPIC και τελικά το 2000 CCMIX ( Center for the composition of Music Iannis Xenakis ) .Από το 1967 ως το 1972 διδάσκει στο Πανεπιστήμιο της Ιντιάνα και από το 1973 ως το 1989 διδάσκει στο Πανεπιστήμιο της Σορβόνης. Παράλληλα αρθρογραφεί και δημοσιεύει δοκίμια σχετικά με τις στοχαστικές διαδικασίες, τη θεωρία των παιχνιδιών και τον προγραμματισμό των υπολογιστών στη μουσική. Το 1997, βαριά άρρωστος από χρόνια ασθένεια, αποσύρεται από τη διδασκαλία και το 1999 του απονέμεται το Σουηδικό Βραβείο Πολιτικής Μουσικής. Στις 04 Φεβρουαρίου του 2001 φεύγει από τη ζωή. Η σορός του, σύμφωνα με τη δική του επιθυμία, μεταφέρεται στο Παρίσι και μετά από πολιτική κηδεία αποτεφρώνεται κρύπτη του κοιμητηρίου Περ Λασαίζ [Solomos, Makis, 2001].