

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



- πτυχιακή εργασία-

**«Αλγοριθμική Σύνθεση Ήχου και Μουσικής»**

**Κυριακή Υψηλάντη Π2004041**

**Επιβλέπων - Ανδρέας Φλώρος -**

24 Ιουνίου 2009

## **Επιβλέπων**

**Ανδρέας Φλώρος**, Επίκουρος Καθηγητής  
Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας

## **Τριμελής Επιτροπή**

**Ανδρέας Φλώρος**, Επίκουρος Καθηγητής  
Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Τεχνών Ήχου και Εικόνας

**Κωνσταντίνος Οικονόμου**, Λέκτορας  
Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Πληροφορικής

**Δημήτριος Σωτηρόπουλος**, διδάσκων ΠΔ/407  
Ιόνιο Πανεπιστήμιο, Τμήμα Πληροφορικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την τελευταία μου πράξη ως φοιτήτρια του  
τμήματος Πληροφορικής του Ιονίου Πανεπιστημίου.  
Την αφιερώνω στους γονείς μου για την στήριξή τους κατά τη συνολική διάρκεια των  
σπουδών μου.

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάδειξη της διαδικασίας σύνθεσης ήχου με τη βοήθεια αλγορίθμων, μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Συγκεκριμένα, γίνεται χρήση γενετικών αλγορίθμων και ειδικότερα μίας κατηγορίας αυτών, αυτής των κυτταρικών αυτομάτων για τη δημιουργία ενός συστήματος αλγοριθμικής ηχητικής σύνθεσης.

Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί μια εισαγωγή στην ηχητική σύνθεση και τα περιεχόμενά της και το πώς αυτή υλοποιείται στην παρούσα εργασία.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθεται η θεωρία που σχετίζεται με τους γενετικούς αλγόριθμους και τα κυτταρικά αυτόματα, το πώς αυτά λειτουργούν και η σχέση που έχουν με την μουσική και την ηχητική σύνθεση γενικότερα. Επίσης, παρατίθεται θεωρία που σχετίζεται με την ηχητική σύνθεση και τις κυριότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για επιτευχθεί, όπως είναι για παράδειγμα η σύνθεση με ηχητικές μονάδες (granular synthesis).

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται λεπτομερώς η υλοποίηση του συστήματος ηχητικής σύνθεσης που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας, τα στάδια υλοποίησης, οι παράμετροι που ελήφθησαν υπ' όψιν, τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη διάρκεια της υλοποίησης και το πώς αυτά αντιμετωπίστηκαν.

Στο τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις δοκιμές λειτουργίας του συστήματος και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτές για την χρήση των αλγορίθμων αλλά και των παραμέτρων τους στην διαδικασία της σύνθεσης. Τέλος, παρατίθεται και μία παράγραφος με προτάσεις για μελλοντική έρευνα, με σκοπό την επέκταση του συστήματος ηχητικής σύνθεσης που υλοποιήθηκε. Η επέκταση αφορά κυρίως την βελτιστοποίηση / παραμετροποίηση του τελικού ηχητικού αποτελέσματος. Η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος βασισμένο σε ένα κυτταρικό αυτόματο τριών διαστάσεων είναι μια πρόταση για την δημιουργία τρισδιάστατων ηχητικών τοπίων, στα οποία ο χρήστης θα μπορεί να εντοπίζει την θέση και την κατεύθυνση της ηχητικής πηγής.

## Πρόλογος και ευχαριστίες

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

# Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Α΄</b>	<b>10</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>10</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Β΄</b>	<b>14</b>
<b>ΘΕΩΡΙΑ</b>	<b>14</b>
<b>Β΄.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι</b>	<b>14</b>
Β΄.1.1 Υλοποίηση γενετικών αλγορίθμων	15
Β΄.1.1 Κωδικοποίηση	15
Β΄.1.2 Αξιολόγηση	15
Β΄.1.3 Διασταύρωση	16
Β΄.1.4 Μετάλλαξη	17
Β΄.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των γενετικών αλγορίθμων	20
Β΄.1.3 Γενετικοί αλγόριθμοι και ηχητική σύνθεση	21
<b>Β΄.2 Κυτταρικά αυτόματα</b>	<b>22</b>
Β΄.2.1 Λειτουργία των κυτταρικών αυτόματων	23
Μονοδιάστατα κυτταρικά αυτόματα	24
Β΄.2.2 Κυτταρικά αυτόματα και μουσική	26
CAMUS: Μουσική Μηχανή Βασισμένη στα κυτταρικά αυτόματα	27
Το παιχνίδι της ζωής	27
Δαιμονικό Κυκλικό Διάστημα	29
<b>Β΄.3 Μουσική Σύνθεση</b>	<b>33</b>
Β΄.3.1 Αλγοριθμική Σύνθεση Μουσικής	33
Β΄.3.2 Μέθοδοι ηχητικής σύνθεσης	34
Β΄.3.2.1 Τεχνικές ανάγνωσης δεδομένων από μνήμη	35
Β΄.3.2.2 Τεχνικές μοντελοποίησης φάσματος	35
Προσθετική Σύνθεση (additive synthesis)	35
Μικροδομική Σύνθεση (granular synthesis)	36
Β΄.3.2.3 Τεχνικές διαμόρφωσης του σήματος	36
Διαμόρφωση πλάτους (amplitude modulation)	36
Διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation)	37
Σύνθεση μετασχηματισμού κυματομορφής (wave shaping synthesis)	37
Β΄.3.2.4 Τεχνικές που προσπαθούν να μιμηθούν τον ήχο που παράγεται από μουσικά όργανα	38
Β΄.3.2.5 Τεχνικές σύνθεσης τρισδιάστατου ήχου	38
Σύνθεση Ηχητικού Τοπίου (Wave field Synthesis)	39
Β΄.3.3 Σύνθεση με Ηχητικές Μονάδες (Granular Synthesis)	39
Ασύγχρονη Σύνθεση με Ηχητικές Μονάδες (Asynchronous granular synthesis - AGS)	40
Σύνθεση με συγχρονισμό πλάτους (Pitch Synchronous Granular Synthesis - PSGS)	40
Chaosynth:	42

Σύστημα σύνθεσης μουσικής με ηχητικές μονάδες, με την βοήθεια κυτταρικών αυτόματων.	42
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Γ΄</b>	<b>44</b>
<b>ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ</b>	<b>44</b>
<b>Γ΄. 1. Στάδια Υλοποίησης</b>	<b>45</b>
Γ΄. 1. 1. Πρώτο Στάδιο	45
Γ΄. 1. 2. Δεύτερο Στάδιο	46
Γ΄. 1. 3. Τρίτο Στάδιο	47
Γ΄. 1. 4. Τεχνικές ανίχνευσης και αποφυγής περιοδικότητας και στασιμότητας	48
<b>Γ΄. 2. Παραλλαγές</b>	<b>50</b>
Γ΄. 2. 1. Διαφοροποίηση Αρχικών Πληθυσμών	50
Γ΄. 2. 2. Τροποποίηση Μεταβατικών Κανόνων	51
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ Δ΄</b>	<b>53</b>
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>53</b>
<b>Δ΄. 1. Εξέλιξη που ακολουθεί τους κανόνες του Conway</b>	<b>53</b>
Δ΄. 1. 1. Πληθυσμός «Γάτα»	53
Δ΄. 1. 2. Πληθυσμός «Σταυρός»	55
Δ΄. 1. 3. Πληθυσμός «Ανεμόπτερο»	56
Δ΄. 1. 4. Πληθυσμός «Σταυρός Τετάρτων»	58
<b>Δ΄. 2. Εξέλιξη που ακολουθεί το μοτίβο (1, 3, 3, 3)</b>	<b>61</b>
Δ΄. 2. 1. Πληθυσμός «Σταυρός Τετάρτων»	61
Δ΄. 2. 2. Πληθυσμός «Ανεμόπτερο»	62
Δ΄. 2. 3. Πληθυσμός «Σταυρός»	63
Δ΄. 2. 4. Πληθυσμός «Γάτα»	64
<b>Δ΄. 3. Συμπεράσματα</b>	<b>66</b>
<b>Δ΄. 4. Μελλοντική Έρευνα</b>	<b>67</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α΄</b>	<b>70</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>82</b>
<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ</b>	<b>86</b>
<b>ΓΛΩΣΣΑΡΙ ΞΕΝΙΚΩΝ ΟΡΩΝ</b>	<b>87</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα Β'.1 : Τα στάδια ενός γενετικού αλγόριθμου.....	19
Σχήμα Β'.2 : Ο παραλληλισμός του φυσικού κόσμου με τους γενετικούς αλγόριθμους .....	21
Σχήμα Β'.3.α : Οι οχτώ πιθανοί συνδυασμοί των κελιών σε ένα μονοδιάστατο κυτταρικό αυτόματο.....	24
Σχήμα Β'.3.β : Η επόμενη γενιά, σύμφωνα με τους κανόνες που τέθηκαν.....	24
Σχήμα Β'.3.γ : Ένα μονοδιάστατο κυτταρικό αυτόματο.....	25
Σχήμα Β'.4 : Τα δισδιάστατα κυτταρικά αυτόματα λειτουργούν σε έναν κυκλικό κόσμο, χωρίς αρχή και τέλος. Κάθε κελί επηρεάζει τους γείτονές του και επηρεάζεται από αυτούς.....	26
Σχήμα Β'.5: Το παιχνίδι της ζωής σε εξέλιξη (Game of Life) .....	29
Σχήμα Β'.6: Δαιμονικό κυκλικό διάστημα (Demon Cyclic Space).....	30
Σχήμα Β'.7 : Οι συντεταγμένες κάθε ενεργού κελιού καθορίζουν την τριπλέτα από νότες και το διάστημα μεταξύ τους.....	30
Σχήμα Β'.8: Για το κελί με συντεταγμένες (19,7) και αναφορικά με την νότα F1(ΦΑ), η δεύτερη νότα της τριπλέτας θα είναι η C3(ΝΤΟ) και θα απέχει 19 ημιτόνια από την F1, και η τρίτη νότα θα είναι η G3(ΣΙ) και θα απέχει 7 ημιτόνια από την προηγούμενή της, την C3.....	31
Σχήμα Β'.10 : Vincent Van Gogh "Sower at sunset", 1888 .....	41
Σχήμα Γ'.1 : Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος ηχητικής σύνθεσης....	44
Σχήμα Γ'. 2 : Το αποτέλεσμα της διαδικασίας γεμίματος με μηδενικά, είναι ένα διακεκομμένο ηχητικό αποτέλεσμα.( listenKenaDiasthmata.wav) .....	46
Σχήμα Γ'. 3 : Η Αντιστοίχιση των κελιών με τις μουσικές μονάδες. Η ονομασία υποδηλώνει σε ποια γραμμή και στήλη θα τοποθετηθεί η μουσική μονάδα.....	46
Σχήμα Γ'. 4 : Σύστημα μίξης ψηφιακών ηχητικών σημάτων.....	47
Σχήμα Γ'. 5 : Γενιές που εναλλάσσονται μεταξύ τους.....	49
Σχήμα Γ'. 6 : Περιοδικό ηχητικό υλικό. Μετά το τρίτο δευτερόλεπτο επαναλαμβάνεται το ίδιο μοτίβο.....	49
Σχήμα Γ'. 7 : Παραδείγματα αρχικών πληθυσμών που εμφανίζουν ενδιαφέρουσα συμπεριφορά μετά την εφαρμογή των μεταβατικών κανόνων του αυτόματου «Παιχνίδι της Ζωής».....	51



Σχήμα Γ΄. 8 : Γενιά Σταθεροποίησης Αρχικού πληθυσμού «Γάτα», μετά την εφαρμογή των κανόνων με σειρά (1, 3, 3, 3).....	52
Σχήμα Δ΄.1 : Το ηχητικό υλικό που καταγράφεται κατά τη διάρκεια εξέλιξης του πληθυσμού «Σταυρός Τετάρτων» είναι περιοδικό και επαναλαμβάνεται σε διάστημα περίπου έξι δευτερολέπτων.....	60
Σχήμα Δ΄. 2 : Αποτύπωση ηχητικού υλικού του αρχικού πληθυσμού «Γάτα», μετά την εφαρμογή των κανόνων με σειρά (1, 3, 3, 3).....	65

# Κεφάλαιο Α΄

## Εισαγωγή

**Α**ΛΓΟΡΙΘΜΙΚΗ σύνθεση ήχου ονομάζεται η χρήση αλγορίθμων για την σύνθεση μουσικής. Σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι να αναδείξει την ικανότητα σύνθεσης ήχων που είναι βασισμένη σε αισθητικά κριτήρια, αλλά η ανάδειξη της ίδιας της διαδικασίας της σύνθεσης όπως αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση και το συνδυασμό των κατάλληλων αλγορίθμων.

Ο κόσμος που ζούμε κατακλύζεται από ηχητικά σήματα. Τα σήματα αυτά άλλοτε προέρχονται από φυσικές πηγές (ανθρώπινη ομιλία, παφλασμοί κυμάτων, οι παλμοί της καρδιάς και άλλα), και άλλοτε προέρχονται από τεχνητές πηγές (ραδιόφωνο, σήματα τηλεπικοινωνιών, μουσικά όργανα και άλλα)[3]. Σε κάθε περίπτωση, τα ηχητικά σήματα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην επιβίωση. Τα σήματα που εκπέμπουμε βοηθούν στο να εκφράσουμε αυτά που έχουμε ανάγκη, με την ανθρώπινη ομιλία για παράδειγμα, αλλά και να εκφράσουμε αυτά που αισθανόμαστε, για

παράδειγμα με τη σύνθεση μουσικής. Τα ηχητικά σήματα που καταφθάνουν σε εμάς από το περιβάλλον μας δίνουν σημαντική πληροφορία για αυτό και μας δημιουργούν ανάλογα συναισθήματα, για παράδειγμα το αίσθημα της ηρεμίας ή του φόβου. Τέλος, τα τεχνητά ηχητικά σήματα που στη σύγχρονη εποχή κυριαρχούν στο περιβάλλον, συμβάλλουν σημαντικά στην διαδικασία της επικοινωνίας με απομακρυσμένες περιοχές, όπως είναι το τηλέφωνο και το διαδίκτυο, αλλά και στην ενημέρωση και την ψυχαγωγία, όπως είναι το ραδιόφωνο και η τηλεόραση.

Η τεχνητή νοημοσύνη έδωσε σημαντική ώθηση στην κατασκευή μηχανών οι οποίες μπορούν και συνθέτουν μουσική απίστευτα καλής ποιότητας, όμως αυτά τα συστήματα περιορίζονται στο να μιμούνται διάφορα μουσικά στυλ, ενώ δεν μπορούν να δημιουργήσουν καινούρια. Ακόμα και αν αυτό επιτευχθεί, το μουσικό αποτέλεσμα ακούγεται παράξενο στο ανθρώπινο αυτί γιατί δεν πληροί τα αισθητικά κριτήρια και τις πολιτισμικές αναφορές τα οποία εκτιμούμε όταν ακούμε μουσική [3, 41].

Υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες ήχων με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά για κάθε κατηγορία: Οι απλοί ήχοι (φθόγγοι), οι σύνθετοι ήχοι, οι θόρυβοι και οι κρότοι. Οι απλοί ήχοι έχουν μόνο μια χαρακτηριστική συχνότητα και παράγονται μόνο από εργαστηριακά όργανα όπως η γεννήτρια ακουστικών συχνοτήτων και το διαπασών. Οι σύνθετοι ήχοι είναι συνδυασμοί απλών ήχων και σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η ανθρώπινη ομιλία, οι φωνές των ζώων, οι ήχοι που βγαίνουν από τα μουσικά όργανα και άλλοι. Ο θόρυβος αποτελείται από το συνδυασμό σύνθετων ήχων, ενώ ο κρότος είναι ήχος που χαρακτηρίζεται από μεγάλη ένταση και μικρή διάρκεια και προκαλείται από μια ξαφνική και βίαιη ταλάντωση των μορίων του μέσου μετάδοσης, για παράδειγμα μια έκρηξη [59].

Με τον όρο ηλεκτρονικός ήχος περιγράφεται ο ήχος που προκύπτει από τη σύνθεση ψηφιακών ήχων με ηλεκτρονικά μέσα. Η σύνθεση ηλεκτρονικών ήχων μπορεί να υλοποιηθεί μέσω μίας μεγάλης ποικιλίας τεχνικών. Υπάρχουν τεχνικές που συνθέτουν προ-ηχογραφημένους ήχους, αποθηκευμένους σε πίνακες, ή όπως λέγονται πίνακες κυματομορφών. Άλλες τεχνικές χρησιμοποιούν την μοντελοποίηση του φάσματος, όπως η προσθετική σύνθεση [22,23] και η σύνθεση με μικροδομές [9], άλλες τεχνικές αναφέρονται στη διαμόρφωση του σήματος, όπως είναι η διαμόρφωση συχνότητας [25] ή η διαμόρφωση πλάτους [26] και η διαμόρφωση του σήματος με τη βοήθεια κάποιας συνάρτησης μετασχηματισμού κυματομορφής [27, 29]. Τέλος, οι τεχνικές που μιμούνται τον ήχο από διάφορα μουσικά όργανα, περιγράφουν με αριθμητικούς τύπους και διαφορικές εξισώσεις τον τρόπο με τον οποίο είναι κατασκευασμένο ένα μουσικό

όργανο ή προσομοιώνουν συστήματα που συμπεριφέρονται σαν ένα αληθινό μουσικό όργανο.

Σημαντικό ρόλο παίζει η τοποθέτηση του ηχητικού σήματος στον τρισδιάστατο χώρο. Οι ήχοι που καταφθάνουν στο ανθρώπινο αυτί είτε απ' ευθείας από την ηχητική πηγή είτε ανακλώμενοι στα διάφορα αντικείμενα του περιβάλλοντος, δίνουν στον εγκέφαλο όλες εκείνες τις πληροφορίες που χρειάζεται για να υπολογίσει την απόσταση της ηχητικής πηγής και την κατεύθυνσή της. Επιπλέον, από τις ανακλάσεις των ήχων που καταφθάνουν στο αυτί δίνεται σημαντική πληροφορία για το περιβάλλον μέσα στο οποίο βρισκόμαστε, όπως για το μέγεθος του χώρου, για τις υφές των αντικειμένων που υπάρχουν σε αυτό και άλλα. Προηγμένες τεχνικές σύνθεσης τρισδιάστατου ήχου όπως είναι η σύνθεση ηχητικού τοπίου, επιτυγχάνουν την ακριβή τοποθέτηση του ηχητικού σήματος στο χώρο. Απαραίτητη είναι βέβαια η σωστή κωδικοποίηση των δεδομένων αλλά και η χρήση κατάλληλα τοποθετημένου ηλεκτροακουστικού εξοπλισμού.

Υπάρχουν πολλοί «παραδοσιακοί αλγόριθμοι» οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την σύνθεση ήχου και μουσικής. Πολλοί από αυτούς κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν αρκετά χρόνια πριν, όμως η τεχνολογία των υπολογιστικών συστημάτων τότε ήταν ανεπαρκής. Η ευρεία διάδοση και εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων έδωσε τη δυνατότητα ανάπτυξης του τομέα της αλγοριθμικής ηχητικής σύνθεσης, κάνοντας χρήση αυτών των αλγόριθμων. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν και οι γενετικοί αλγόριθμοι και ειδικότερα μια υποκατηγορία αυτών, τα κυτταρικά αυτόματα. Οι γενετικοί αλγόριθμοι, εμπνευσμένοι από την βιολογία και τους κανόνες που ακολουθεί η αρχή της εξέλιξης των ειδών, χρησιμοποιούνται για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού τιμών και την επίλυση πολυπαραμετρικών προβλημάτων, εκμεταλλευόμενοι την ικανότητα των σημερινών υπολογιστών να εκτελούν ογκώδεις διεργασίες [13]. Τα κυτταρικά αυτόματα είναι μια κατηγορία γενετικών αλγορίθμων, που έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώνουν τη διαδικασία εξέλιξης ενός πληθυσμού αντικειμένων σύμφωνα με προκαθορισμένους κανόνες. Τα άτομα του πληθυσμού αυτού μπορούν να παραστήσουν πρακτικά οτιδήποτε. Αυτό το χαρακτηριστικό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα κυτταρικά αυτόματα εξελίσσονται με διακριτά συμβάντα στο χώρο και το χρόνο, τα καθιστά ιδανικά για τη μοντελοποίηση της μουσικής. Ενδεικτικά, η μηχανή CAMUS (Cellular Automata MUSic) είναι μία αλγοριθμική μηχανή που συνδυάζει δύο κυτταρικά αυτόματα για να συνθέσει μουσική, το «παιχνίδι της ζωής» του Conway (Conway's Game of Life) και το δαιμονικό κυκλικό διάστημα (Demon Cyclic Space). Το πρώτο καθορίζει την ακολουθία των

νοτών που θα ηγήσουν, ενώ το δεύτερο είναι υπεύθυνο για την ενορχήστρωσή τους [1, 8].

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος του Conway, το «Παιχνίδι της Ζωής», για τη δημιουργία ενός συστήματος ηχητικής σύνθεσης. Σύμφωνα με τον αλγόριθμο του Conway, τα άτομα ενός πληθυσμού εξελίσσονται μέσα σε ένα περιβάλλον σύμφωνα με προκαθορισμένους κανόνες.

Το περιβάλλον αναπαρίσταται από ένα πλέγμα κελιών στο κάθε ένα από τα οποία αντιστοιχεί ένα άτομο του πληθυσμού. Οι κανόνες της εξέλιξης καθορίζουν αν αυτό το άτομο θα επιβιώσει, αν θα πεθάνει ή αν θα ξαναγεννηθεί. Αυτή η προσομοίωση της εξέλιξης του πληθυσμού αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η ιδέα της δημιουργίας του συστήματος ηχητικής σύνθεσης, σύμφωνα με την οποία κάθε άτομο του πληθυσμού αντιστοιχίζεται ένα ηχητικό αρχείο. Κατά τη διάρκεια της εξέλιξης, τα ηχητικά αρχεία που αντιστοιχούν στα ενεργά άτομα του πληθυσμού μιξάρονται και το ηχητικό αποτέλεσμα κάθε γενιάς προστίθεται στο προηγούμενο.

Μετά το τέλος της εξέλιξης, προκύπτει το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα, το οποίο εξαρτάται από τις εκάστοτε μεταβάσεις που έλαβαν χώρα. Όσο εξελίσσεται όμως ο πληθυσμός, υπάρχει μια πιθανότητα να εμφανιστεί το φαινόμενο της περιοδικότητας, δηλαδή τα ενεργά άτομα να εναλλάσσονται μεταξύ τους ή ακόμα και να οδηγηθεί ο πληθυσμός σε πρόωρη εξαφάνιση. Τα δύο παραπάνω φαινόμενα είναι προφανώς ανεπιθύμητα, επειδή οδηγούν σε περιοδικά και μη επαρκή ηχητικά αποτελέσματα αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό, κρίθηκε επιτακτική η ανάγκη εφαρμογής περιορισμένου πλήθους παρεμβάσεων στον αλγόριθμο, με στόχο τη βελτίωση του τελικού ηχητικού αποτελέσματος.

Δοκιμάζοντας διαφορετικούς αρχικούς πληθυσμούς και αλλάζοντας τους μεταβατικούς κανόνες οδηγούμαστε σε διαφορετικά μοτίβα εξέλιξης και κατά συνέπεια σε διαφορετικά ηχητικά αποτελέσματα, τα οποία παρατίθενται στο τέταρτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

# Κεφάλαιο Β΄

## Θεωρία

**Σ**ΤΗΝ πρώτη ενότητα αυτού του κεφαλαίου αναφέρονται οι βασικές λειτουργίες και η χρήση των γενετικών αλγορίθμων και η σχέση που έχουν με την σύνθεση μουσικής. Στη δεύτερη ενότητα περιγράφονται τα κυτταρικά αυτόματα, η λειτουργία τους καθώς και εφαρμογές σύνθεσης μουσικής με κυτταρικά αυτόματα όπως το CAMUS, μια μηχανή σύνθεσης που συνδυάζει δύο αυτόματα, το παιχνίδι της ζωής και το δαιμονικό κυκλικό διάστημα. Η τρίτη ενότητα αναφέρεται στη μουσική σύνθεση και ειδικότερα στην αλγοριθμική σύνθεση ήχων μουσικής. Επίσης, παρουσιάζονται οι βασικές μέθοδοι μουσικής σύνθεσης και ιδιαίτερη σημασία δίνεται σε αυτές που χρησιμοποιούν τους γενετικούς αλγόριθμους και τα κυτταρικά αυτόματα, όπως η σύνθεση με μουσικές μονάδες. Τέλος, γίνεται μια μικρή αναφορά στην σύνθεση τρισδιάστατου ήχου και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται, όπως η σύνθεση ηχητικού πεδίου (wave field synthesis).

### Β΄.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μια μέθοδο επίλυσης προβλημάτων, για τα οποία υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις, αλλά η εκτίμησή της βέλτιστης λύσης τους δεν μπορεί να γίνει αν δεν τεθούν σε εφαρμογή. Τέτοια προβλήματα είναι αυτά που έχουν πολλές παραμέτρους / διαστάσεις και η επίλυσή τους γίνεται μια μη-αποτελεσματική διαδικασία όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητά τους. Επίσης, οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μία μέθοδο που εκμεταλλεύεται την ικανότητα του υπολογιστή να εκτελεί ογκώδεις και συνδυαστικές διεργασίες [1, 13].

Εμπνευσμένοι από τη βιολογία και ειδικότερα από τις διαδικασίες που σχετίζονται με την εξέλιξη των ειδών, οι γενετικοί αλγόριθμοι προσομοιώνουν μηχανισμούς που μοιάζουν με αυτούς της φυσικής επιλογής, της διασταύρωσης και της γενετικής

μετάλλαξης. Η δυναμική αυτών των μηχανισμών έγκειται στο γεγονός ότι επικεντρώνονται μόνο σε γόνιμους συνδυασμούς, δηλαδή σε συνδυασμούς λύσεων που έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να οδηγήσουν στη βέλτιστη λύση, όπως κάνει και η φύση [1].

Η υλοποίηση ενός γενετικού αλγόριθμου είναι μία σχετικά απλή διαδικασία, αρκεί κανείς να κατανοήσει μερικές βασικές έννοιες της βιολογίας, όπως αυτές της φυσικής επιλογής, της διασταύρωσης των ειδών και της γενετικής μετάλλαξης.

## **B'.1.1 Υλοποίηση γενετικών αλγορίθμων**

### **B'.1.1 Κωδικοποίηση**

Κάθε οργανισμός έχει κανόνες που περιγράφουν το πώς είναι φτιαγμένος, αποθηκευμένους στο DNA του. Οι αλληλουχίες DNA που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά των ατόμων ενός είδους ονομάζονται χρωμοσώματα και μπορούν να είναι διαφορετικά σε κάθε οργανισμό. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από μικρότερες δομικές μονάδες, τα γονίδια. Το σύνολο της πληροφορίας που αποθηκεύεται στα γονίδια ονομάζεται γενότυπος (genotype). Τα χαρακτηριστικά ενός οργανισμού δημιουργούνται με την αποκωδικοποίηση του γενότυπου, και αυτό που βλέπουμε τελικά ονομάζεται φαινότυπος (phenotype) [12].

Σε αντιστοιχία με έναν οργανισμό, ένα πολυπαραμετρικό πρόβλημα μπορεί να παίρνει διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους του, όπως κάθε γονίδιο μπορεί να είναι διαφορετικό για τους οργανισμούς που ανήκουν σε ένα συγκεκριμένο είδος. Ακολουθώντας τους κανόνες της γενετικής, ο αλγόριθμος διατηρεί ένα σύνολο κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων. Η κωδικοποίηση είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία, γι' αυτό και πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη μέθοδος για το κάθε πρόβλημα. Η πιο συνηθισμένη κωδικοποίηση είναι να αναπαρασταθεί το χρωμόσωμα σαν μια ακολουθία δυαδικών αριθμών. Για παράδειγμα, έστω ένας πληθυσμός  $R$  αποτελούμενος από  $n$  οντότητες, οι οποίες αναπαριστώνται από 8-bits :

$R = (r_1 = 11010110, r_2 = 10010111, r_3 = 01001001 \dots)$

### **B'.1.2 Αξιολόγηση**

Στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος του πληθυσμού-λύσεων για εξακριβωθεί αν εξυπηρετούν τον αντικειμενικό σκοπό, δηλαδή να δώσουν την βέλτιστη λύση για το πρόβλημα ή τη διεργασία. Η αξιολόγηση γίνεται σύμφωνα με κάποια συνάρτηση αξιολόγησης η οποία

αποτελεί μέτρο για την καταλληλότητα (fitness) του χρωμοσώματος να λύσει το πρόβλημα. Και σε αυτή την περίπτωση πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη συνάρτηση αξιολόγησης για το κάθε πρόβλημα. Οι περισσότερες συναρτήσεις καταλληλότητας είναι σχεδιασμένες ώστε μόνο ένα μικρό μέρος από τις μη- κατάλληλες λύσεις να επιλέγεται. Αυτό βοηθάει στο να διατηρείται η ποικιλότητα του πληθυσμού, αποφεύγοντας παράλληλα την πρόωμη σύγκλιση σε φτωχές λύσεις [13].

Αν ο πληθυσμός αποτύχει στην αξιολόγηση, το σύστημα εμποδίζει την δημιουργία επόμενης γενιάς. Μια από τις πιο δημοφιλείς συναρτήσεις αξιολόγησης είναι η 'επιλογή πρωταθλητή' (tournament selection): Ανάλογα με τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, επιλέγονται από τον πληθυσμό οι οντότητες που δείχνουν ότι οδηγούν στην βέλτιστη λύση. Οι επιλεγμένες οντότητες είναι αυτές που «ζευγαρώνουν» και αναπαράγονται στην επόμενη γενιά. Οι υπόλοιπες οντότητες συνήθως πεθαίνουν και έτσι τα χαρακτηριστικά τους δεν κληρονομούνται, συμβάλλοντας ώστε οι επόμενες γενιές να έχουν ολοένα και πιο βελτιωμένα χαρακτηριστικά.

Από τα προηγούμενα προκύπτει το συμπέρασμα ότι κάθε εκτέλεση του γενετικού αλγορίθμου μπορεί να συγκλίνει σε διαφορετική λύση και σε διαφορετικό χρόνο. Η απόδοση εξαρτάται κυρίως από τη συνάρτηση καταλληλότητας και από το κατά πόσο το μέτρο της περιγράφει την βέλτιστη λύση [13].

Άλλη μια συνάρτηση αξιολόγησης είναι ο τροχός της τύχης (roulette wheel), σύμφωνα με την οποία κάθε άτομο αντιστοιχεί σε κάποιο τομέα του τροχού και το μέγεθός του εξαρτάται από την καταλληλότητά του (όσο πιο κατάλληλο είναι, τόσο μεγαλύτερο το μέγεθός του). Έτσι, η μπίλια του τροχού έχει περισσότερες πιθανότητες να σταματήσει στα μεγάλα κομμάτια του τροχού, και αυτά να επιλεγούν [14].

### **B'1.3 Διασταύρωση**

Το επόμενο βήμα είναι αυτό της διασταύρωσης. Οι επιλεγμένες λύσεις συνδυάζονται με τυχαίο τρόπο και κληρονομούν τα χαρακτηριστικά τους στην επόμενη γενιά. Η διασταύρωση λειτουργεί παρόμοια με τον τρόπο της διασταύρωσης των ειδών. Όπως τα γονίδια των δύο γονέων συνδυάζονται τυχαία μεταξύ τους και σχηματίζουν τα γονίδια των απογόνων, έτσι και δύο λύσεις του προβλήματος ανταλλάσσουν τυχαία κάποιες από τις τιμές των παραμέτρων τους. Στο προηγούμενο παράδειγμα, οι οντότητες ανταλλάσσουν κομμάτια bits μεταξύ τους σχηματίζοντας διαφορετικές λύσεις. Εάν υποθέσουμε ότι η διαδικασία της διασταύρωσης επιλέγει την ανταλλαγή



των τριών τελευταίων bit, τότε οι οντότητες r6 και r10 ανταλλάσσουν τα bits τους ως εξής [1] :

r6: 11100[101] → 11100[100]

r10: 00101[100] → 00101[101]

Για κάθε πρόβλημα, η διαδικασία της διασταύρωσης περιγράφεται με διαφορετικό τρόπο και εξαρτάται από το βαθμό διασταύρωσης (crossover rate), εξυπηρετώντας πάντα την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Μια σημαντική παρατήρηση είναι το γεγονός ότι πάντα γίνεται ανταλλαγή των γονιδίων που βρίσκονται στην ίδια θέση, άρα περιγράφουν το ίδιο χαρακτηριστικό, επομένως το ίδιο ισχύει και στην ανταλλαγή των τιμών των παραμέτρων.

#### **B'.1.4 Μετάλλαξη**

Η επόμενη βασική γενετική διαδικασία που λαμβάνει χώρα είναι η μετάλλαξη (mutation). Στις μεταλλάξεις οφείλεται η ποικιλότητα των χαρακτηριστικών ενός πληθυσμού, ενώ παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στο παιχνίδι της επιβίωσης. Στην εξέλιξη των ειδών, οι μεταλλάξεις προκάλεσαν την αλλαγή των χαρακτηριστικών των οργανισμών και άλλοτε λειτούργησαν αρνητικά οδηγώντας τους στην εξαφάνιση και άλλοτε θετικά συμβάλλοντας στην επιβίωσή τους.

Κατά ένα παρόμοιο τρόπο, ειδικές συναρτήσεις προκαλούν τυχαίες αλλαγές στα bit από οποία αποτελούνται τα χρωμοσώματα, με κριτήριο το βαθμό μετάλλαξης (mutation rate). Στο προηγούμενο παράδειγμα, υποθέτοντας ότι η μετάλλαξη επιδρά στο πέμπτο bit αλλάζοντας την κατάστασή του από 0 σε 1 και το αντίστροφο, οι απόγονοι των οντοτήτων r6 και r10 θα τροποποιούνταν ως εξής [1]:

r6: 1110[0]100 → 11101100

r10: 0010[1]101 → 00100101

Όπως προαναφέρθηκε, οι μεταλλάξεις είναι πολύ σημαντικές για έναν πληθυσμό, όμως τείνουν να δημιουργούν απογόνους που δεν έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με τους γονείς τους, ειδικά όταν ο βαθμός μετάλλαξης είναι υψηλός, μειώνοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας της επιλογής [1].

Στη συνέχεια, η συνάρτηση καταλληλότητας εφαρμόζεται και πάλι στον πληθυσμό και εφ' όσον αυτός πληροί τα κριτήρια, ξεκινάει και πάλι η γενετική διαδικασία.

Η γενετική διαδικασία σταματάει όταν:

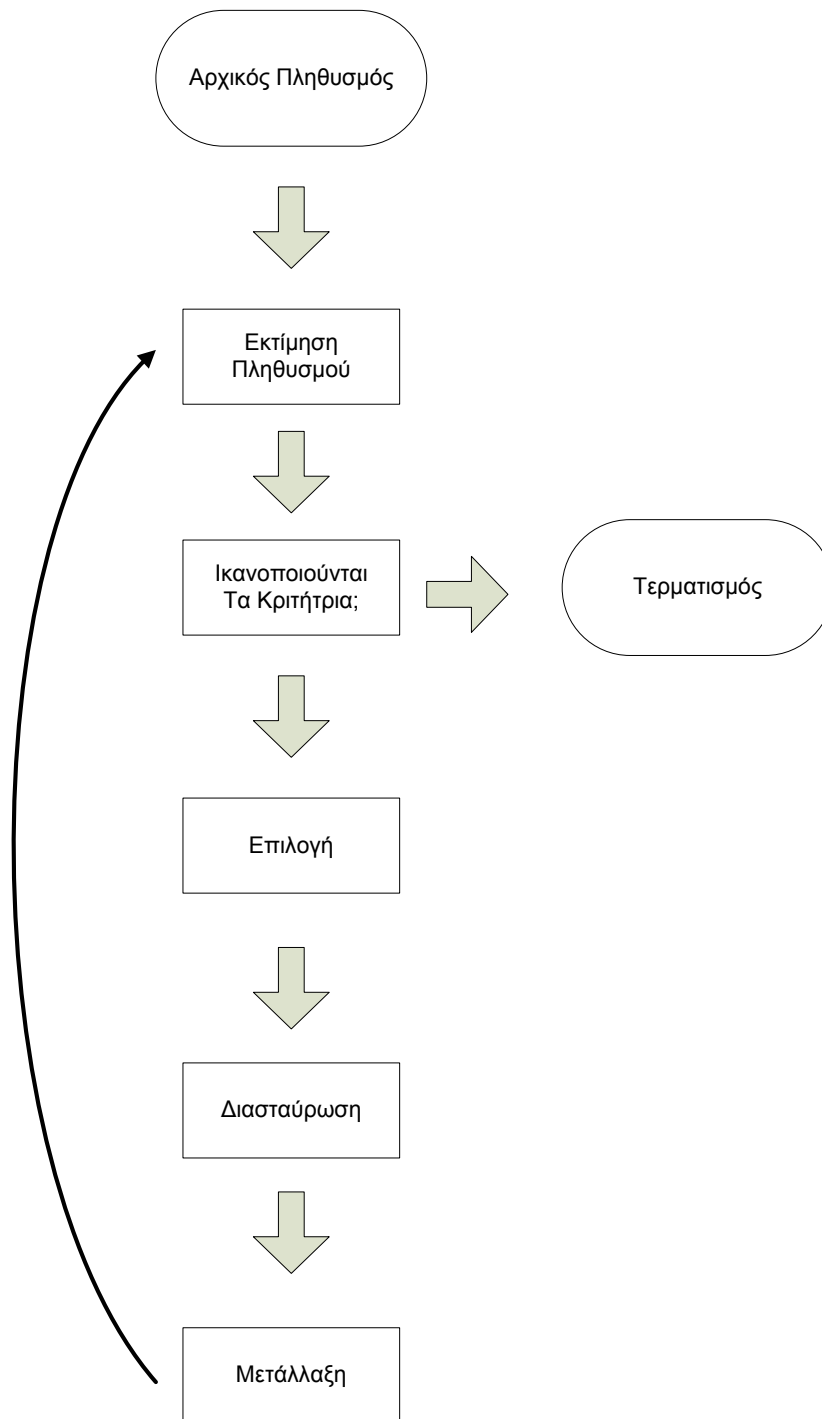
A) έχει συμπληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων.

Β) έχει βρεθεί ένας συνδυασμός χαρακτηριστικών ο οποίος ικανοποιεί την βέλτιστη λύση του προβλήματος.

Γ) μετά από συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων οι ανασυνδυασμένες λύσεις δεν παράγουν καλύτερα αποτελέσματα.

Συνοπτικά, τα στάδια ενός γενετικού αλγόριθμου περιγράφονται παρακάτω (Σχήμα Β'.1):

1. Κωδικοποίηση (Coding) - Αποκωδικοποίηση (Decoding)
2. Υπολογισμός ικανότητας ή αξιολόγηση (Fitness calculation ή evaluation)
3. Επιλογή (Selection)
4. Αναπαραγωγή (Reproduction)
5. Διασταύρωση (Crossover)
6. Μετάλλαξη (Mutation)
7. Επανάληψη από το βήμα (2) μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του Γενετικού Αλγορίθμου



Σχήμα Β'.1 : Τα στάδια ενός γενετικού αλγόριθμου.

## **Β'.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των γενετικών αλγορίθμων**

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν μία σειρά από πλεονεκτήματα [7]:

A) Μπορούν σε πολλές περιπτώσεις να λύσουν γρήγορα και αξιόπιστα δύσκολα προβλήματα, τα οποία δεν μπορούν να επιλυθούν ή και να διατυπωθούν με άλλους τρόπους, όπως μέθοδοι ελαχιστοποίησης ή νευρωνικά δίκτυα.

B) Έχουν μεγαλύτερη ευελιξία και ελευθερία να επιλέγουν την βέλτιστη λύση ανάλογα με τις προδιαγραφές του προβλήματος.

Γ) Μπορούν να συνεργαστούν με άλλα μοντέλα και συστήματα και δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις από το πρόβλημα προς επίλυση. Ο χρήστης κωδικοποιεί μόνο την διατύπωση του αντικειμενικού προβλήματος, και δεν χρειάζεται να κωδικοποιήσει τις παραμέτρους. Λόγω της απλότητάς τους μπορούν να συνδυαστούν υβριδικά και με άλλα πιο πολύπλοκα μοντέλα, επιταχύνοντας την διαδικασία της επίλυσής τους.

Δ) Είναι εύκολα εξελίξιμοι και επεκτάσιμοι.

Ε) Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται.

ΣΤ) Δεν ενδιαφέρει η σημασία της υπό εξέταση πληροφορίας. Οι οντότητες του προβλήματος μπορούν να αναπαριστούν πρακτικά οτιδήποτε.

Z) Εφαρμόζονται σε περισσότερα πεδία από κάθε άλλη υπολογιστική μέθοδο, λόγω του ότι απαιτούν ελάχιστες προγραμματιστικές γνώσεις, και μαθηματικά χαμηλού επιπέδου.[15]

H) Είναι πιο ανθεκτικοί σε σφάλματα. Πολλές φορές, η χρήση μη αξιόπιστων μηχανισμών αξιολόγησης μπορεί να οδηγήσει σε λάθος υπολογισμούς. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να ξεπεράσουν αυτό το πρόβλημα

Θ) Είναι μία μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας.

I) Επιδέχονται παράλληλη υλοποίηση. Εξ' αιτίας του ότι οι πιθανές λύσεις είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους, μπορούν να διατυπωθούν παράλληλες εκδοχές τους.

Στα μειονεκτήματα των γενετικών αλγορίθμων συγκαταλέγονται ο αργός χρόνος σύγκλισης στην υποτιθέμενη βέλτιστη λύση, και το γεγονός ότι τείνουν να εγκλωβίζονται σε τοπικά ελάχιστα της αντικειμενικής συνάρτησης.[12]

Τέτοια προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων και των συναρτήσεων για το προς επίλυση πρόβλημα.

Ανακεφαλαιώνοντας, οι γενετικοί αλγόριθμοι ανήκουν στις μεθόδους καθολικής βελτιστοποίησης, και μάλιστα είναι μια μέθοδος από τις πιο ευέλικτες που εφαρμόζεται σε πολλά προβλήματα. Στηρίζονται στην Αρχή της Εξέλιξης των Ειδών, επιλέγοντας τις φαινομενικά καλύτερες από μια ομάδα υποψήφιων λύσεων. Ο παραλληλισμός που κάνουν με τον φυσικό κόσμο συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας Β'.1):

Φυσικός Κόσμος	Γενετικοί Αλγόριθμοι
Χρωμόσωμα	Πίνακας Λύσεων
Γονίδιο	Στοιχείο Πίνακα
Φαινότυπος	Συνάρτηση του προβλήματος $f(x)$
Διασταύρωση	Ανταλλαγή στοιχείων ανάμεσα στους πίνακες
Μετάλλαξη	Τυχαία αλλαγή στοιχείων σε πίνακες

Σχήμα Β'.2 : Ο παραλληλισμός του φυσικού κόσμου με τους γενετικούς αλγόριθμους

Ενδεικτικά, μερικές από τις εφαρμογές τους είναι η επεξεργασία σήματος και φυσικής γλώσσας, τα γραφικά υπολογιστών, η ρομποτική, αεροναυπηγική, η κατασκευή τεχνητών νευρωνικών δικτύων και η σύνθεση μουσικής.[12]

### Β'.1.3 Γενετικοί αλγόριθμοι και ηχητική σύνθεση

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιήθηκαν από τον συνθέτη Gary Lee Nelson [60], για να συνθέσει μουσικά πρότυπα. Σε αυτή την περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της δυαδικής σειράς (binary string) για να αναπαραστήσει μια σειρά νοτών, η κάθε μια από τις οποίες αρθρώνεται αν το δυαδικό ψηφίο που αντιστοιχεί σε αυτή είναι 1. Η αξιολόγηση γίνεται συναρτήσει κάποιου κατωφλίου: αν ο αριθμός των ψηφίων που ισούνται με 1 είναι μεγαλύτερος του κατωφλίου, τότε το σύνολο των νοτών περνάει την επιλογή. Υψηλές τιμές κατωφλίου οδηγούν σε ρυθμούς υψηλής πυκνότητας, σε σημείο όπου όλες οι νότες είναι ενεργοποιημένες. Αντίθετα, χαμηλές τιμές οδηγούν σε πιο χαλαρές υφές, τείνοντας στη σιγή [1].

Οι Sato και Otori [6] χρησιμοποίησαν γενετικούς αλγόριθμους για να σχεδιάσουν μια αίθουσα συναυλιών με βέλτιστες ακουστικές ιδιότητες, μεγιστοποιώντας την ποιότητα του ήχου για το ακροατήριο, το μαέστρο και τους μουσικούς επάνω στη σκηνή. Το συγκεκριμένο έργο περιλαμβάνει την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλαπλών τιμών, και σύμφωνα με τους δημιουργούς του, τα αποτελέσματά του έχουν ιδιότητες που μοιάζουν πολύ με αυτές του Vienna's Grosser Musikvereinsaal, που θεωρείται ότι είναι μια από τις καλύτερες -αν όχι η καλύτερη αίθουσα συναυλιών στον κόσμο, όσον αφορά την ακουστική του χώρου. [16]

Γενικά, οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για την εύρεση βέλτιστων λύσεων σε πολυπαραμετρικά προβλήματα. Αν και συνήθως η διαδικασία της επιλογής βασίζεται σε προκαθορισμένα κριτήρια καταλληλότητας, υπάρχουν εφαρμογές κατά τις οποίες ο χρήστης καλείται να αλληλεπιδρά με το σύστημα κατά τη διάρκεια της επιλογής. Στην περίπτωση ενός προγράμματος μουσικής σύνθεσης, για παράδειγμα, ο χρήστης ορίζει κριτήρια αξιολόγησης για την ταξινόμηση ενός αριθμού μουσικών μεταβάσεων, σύμφωνα με αισθητικά κριτήρια ή κρίνοντας υποκειμενικά το πόσο κοντά είναι οι συγκεκριμένες μεταβάσεις με συγκεκριμένους μουσικούς στόχους [1].

## **B'.2 Κυτταρικά αυτόματα**

Τα κυτταρικά αυτόματα είναι εργαλεία μοντελοποίησης με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή που χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιούν συστήματα, στα οποία κάποιο χαρακτηριστικό τους αλλάζει σε σχέση με το χρόνο. Είναι κατάλληλα για να μοντελοποιούν δυναμικά συστήματα στα οποία ο χώρος και ο χρόνος είναι διακριτά μεγέθη και οι ποσότητες παίρνουν ένα πεπερασμένο πλήθος διακριτών τιμών[1].

Τα κυτταρικά αυτόματα εμφανίστηκαν το 1960 από τον Jon von Newman και Stanislaw Ulam, σαν ένα μοντέλο αυτό-αναπαραγόμενης μηχανής [51], στην προσπάθειά τους να μάθουν εάν μια αφηρημένη μηχανή θα μπορούσε να κατασκευάσει αυτόματα ένα αντίγραφο του εαυτού της. Το μοντέλο αποτελείται από ένα  $n$  - διάστατο πλέγμα από κελιά, το καθένα από τα οποία θεωρεί έναν αριθμό καταστάσεων, αναπαριστώντας τα συστατικά από τα οποία αποτελείται η προαναφερόμενη μηχανή. Σύμφωνα με προκαθορισμένους κανόνες που ορίζονται από τον χρήστη και από αλγόριθμους που περιγράφουν διάφορα κυτταρικά αυτόματα, η μηχανή μπορεί να δημιουργήσει πανομοιότυπα αντίγραφα του εαυτού της σε διάφορα σημεία πάνω στο πλέγμα. Από τότε, τα κυτταρικά αυτόματα έχουν χρησιμοποιηθεί σε μια σημαντικά

μεγάλη ποικιλία εφαρμογών όπως στην επεξεργασία εικόνας, στην οικολογία, τη βιολογία και την κοινωνιολογία.

Τα κυτταρικά αυτόματα είναι δυναμικά συστήματα, στα οποία ο χρόνος και ο χώρος παίρνουν διακριτές τιμές, και έχουν τραβήξει την προσοχή των ερευνητών, κυρίως λόγω της οργανωσιακής τους συμπεριφοράς. Μπορούν να έχουν πολλές διαστάσεις, αλλά τα πιο συνηθισμένα είναι μονοδιάστατα ή δισδιάστατα.

## **Β'.2.1 Λειτουργία των κυτταρικών αυτόματων**

Ένα κυτταρικό αυτόματο αποτελείται από έναν πίνακα στοιχείων που ονομάζονται κελιά, στα οποία και εφαρμόζονται οι κανόνες της εξέλιξης ή μεταβατικοί κανόνες. Αυτοί οι κανόνες είναι εκείνοι που καθορίζουν την συμπεριφορά του αυτόματου στο χρόνο. Οι κανόνες εφαρμόζονται ταυτόχρονα σε όλα τα κελιά του πίνακα, έτσι ώστε η εξέλιξη να έχει διακριτά βήματα. Το γεγονός ότι ένα κυτταρικό αυτόματο μπορεί να αναπαραστήσει οτιδήποτε, από μια απλή αριθμητική μεταβλητή μέχρι πολύπλοκες υπολογιστικές μονάδες, το καθιστά ένα πολύ δυναμικό εργαλείο. Η κατάσταση κάθε κελιού συνήθως σχετίζεται με κάποιο χρώμα, το οποίο διευκολύνει την απεικόνιση της συμπεριφοράς του. Η κλάση του κυτταρικού αυτόματου είναι το μέγεθος που περιγράφει την  $p$ -κατάσταση του αυτόματου, όταν τα κελιά του μπορούν να πάρουν  $p$  διαφορετικές καταστάσεις :  $0, 1, 2, \dots, p-1$ .

Ξεκινώντας από μία τυχαία κατάσταση, σε κάθε χτύπημα ενός εικονικού ρολογιού, οι τιμές όλων των κελιών αλλάζουν ταυτόχρονα, ανάλογα με τους κανόνες που εφαρμόζονται στο πλέγμα. Αυτοί οι κανόνες συνήθως λαμβάνουν υπ' όψιν τις τιμές των γειτονικών κελιών, ανάλογα πάντα με το σκοπό που θέλουν να πετύχουν.

Η λειτουργία ενός κυτταρικού αυτόματου αναπαρίσταται στην οθόνη του υπολογιστή σαν μια ακολουθία επαναλαμβανόμενων μοτίβων από μικροσκοπικά χρωματιστά κελιά, που αλλάζουν σύμφωνα με το χτύπημα του εικονικού ρολογιού σε ταυτόχρονο ρυθμό, σύμφωνα πάντα με τους κανόνες που εφαρμόζονται αλλά και την κατάσταση των γειτονικών κελιών. Τα μοτίβα που δημιουργούνται στα κελιά είναι το αποτέλεσμα της προκύπτουσας συμπεριφοράς του αυτόματου.

Υπήρξαν πολλές προσπάθειες να βρεθούν συστηματικές μέθοδοι για να ελεγχθούν τα κυτταρικά αυτόματα και να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με την συμπεριφορά τους. Ο Wolfram [62] είναι γνωστός για τις μελέτες του στις ιδιότητες των μονοδιάστατων κυτταρικών αυτόματων. Ο Langton [63] πρότεινε ένα είδος εικονικού μετρητή

πιθανότητας, ονομαζόμενο παράμετρο  $\lambda$ , για να περιγράψει τέσσερις τύπους κυτταρικών αυτόματων: σταθερό (fixed), κυκλικό (cyclic), σύνθετο (complex) και χαοτικό (chaotic). Παράμετροι σαν και αυτή είναι πολύ σημαντικοί καθώς διευκολύνουν την έρευνα για την σχέση που μπορεί να έχει η συμπεριφορά των αυτόματων με την μουσική την οποία παράγουν [1, 61].

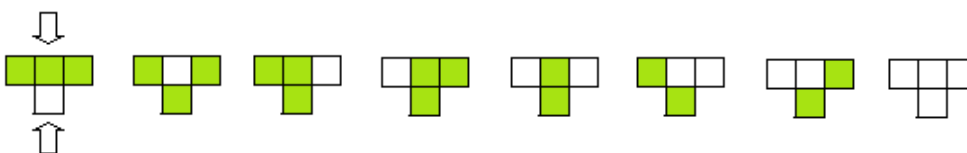
### Μονοδιάστατα κυτταρικά αυτόματα

Τα μονοδιάστατα κυτταρικά αυτόματα αποτελούν την απλούστερη μορφή κυτταρικών αυτομάτων. Αποτελούνται από μία σειρά κελιών, τα οποία μπορούν να βρίσκονται σε μια από τις δύο μόνο πιθανές καταστάσεις (ενεργό ή όχι, οι οποίες αντιστοιχούν σε 1 και 0 αντίστοιχα) και οι μεταβάσεις εξαρτώνται μόνο από την ίδια την κατάσταση του κάθε κελιού και από την κατάσταση των δύο γειτόνων. Θεωρώντας το κάθε κελί μαζί με τους γείτονές του ως μία τριπλέτα, υπάρχουν  $2 \times 2 \times 2 = 8$  πιθανοί συνδυασμοί (Σχήμα Β'.3.α). Έστω ότι ο κανόνας είναι ο εξής: «Αν ένα κελί είναι ενεργό, και οι γείτονές του είναι και οι δύο ενεργοί, τότε γίνεται μη ενεργό. Αν το κελί είναι μη ενεργό και οι δύο γείτονες είναι μη ενεργοί, τότε παραμένει μη ενεργό. Σε κάθε άλλη περίπτωση γίνεται ενεργό». Τότε η επόμενη γενιά θα είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα Β'.3.β.



Σχήμα Β'.3.α : Οι οχτώ πιθανοί συνδυασμοί των κελιών σε ένα μονοδιάστατο κυτταρικό αυτόματο.

Εξεταζόμενο Κελί



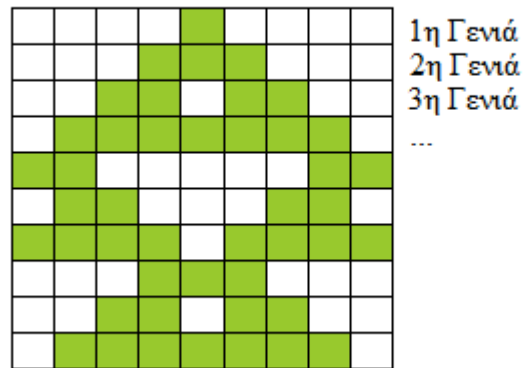
Η κατάσταση στη νέα γενιά

Σχήμα Β'.3.β : Η επόμενη γενιά, σύμφωνα με τους κανόνες που τέθηκαν.

Αρχίζοντας από ένα μόνο ενεργό κελί, η εξέλιξη του μονοδιάστατου αυτόματου με τους κανόνες που περιγράφηκαν παραπάνω, απεικονίζεται στο Σχήμα Β'. 2.γ. Εδώ θα



πρέπει να σημειωθεί ότι τα κελιά στις άκρες του πλέγματος θεωρούνται πως επικοινωνούν, δηλαδή ο κόσμος είναι κυκλικός. Οι γενιές καταγράφονται η μία κάτω από την άλλη, όμως αυτό δεν είναι απαραίτητο. Είναι επίσης σωστό να φαίνεται πως η νέα γενιά αντικαθιστά την προηγούμενη [57, 58].



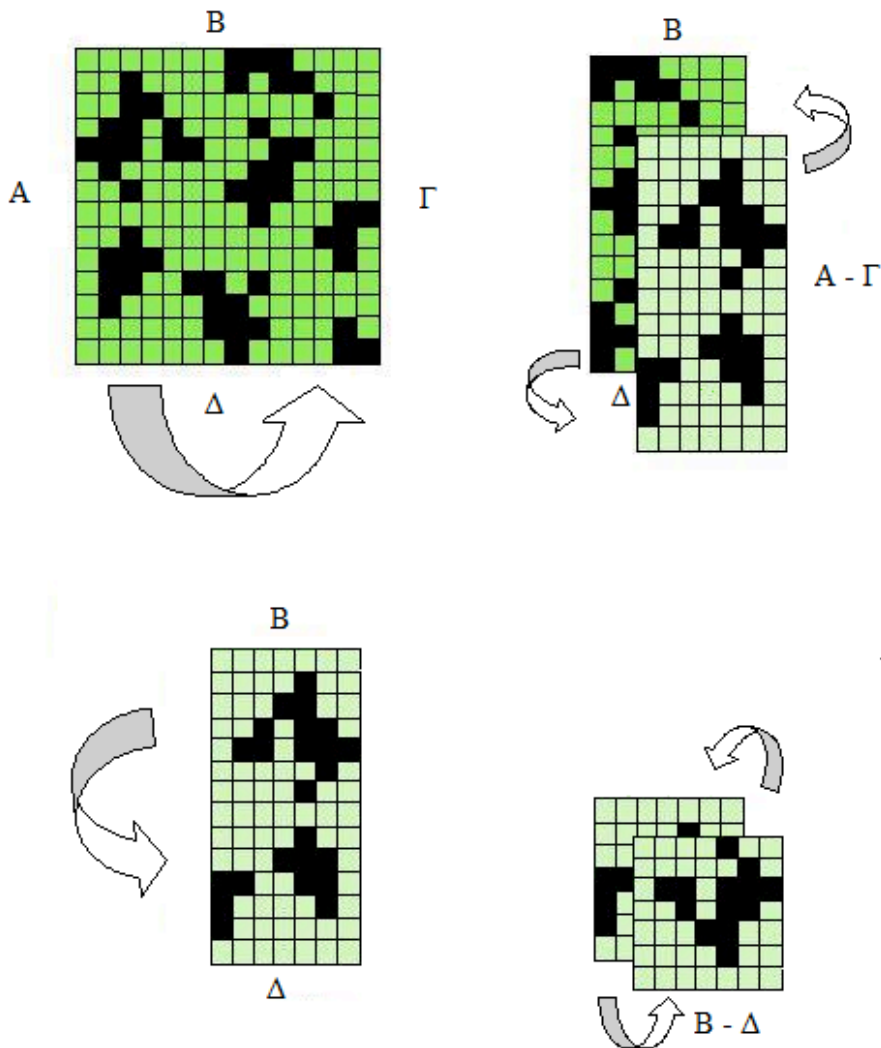
Σχήμα Β'.3.γ : Ένα μονοδιάστατο κυτταρικό αυτόματο.

Οι κανόνες σε ένα κυτταρικό αυτόματο κατασκευάζονται έτσι ώστε να λαμβάνουν υπ' όψιν μόνο τους άμεσους γείτονες γύρω από το κάθε κελί. Οι πιο απομακρυσμένοι γείτονες δεν μπορούν να το επηρεάσουν.

#### **Δισδιάστατα κυτταρικά αυτόματα**

Υπάρχουν και πιο πολύπλοκες εφαρμογές κυτταρικών αυτόματων, οι οποίες χρησιμοποιούν πίνακες δύο ή ακόμα και τριών διαστάσεων [1]. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα κελιά μπορούν να βρίσκονται σε περισσότερες από δύο καταστάσεις, οι οποίες θα διαχωρίζονται μεταξύ τους με διαφορετικά χρώματα. Στην περίπτωση του δισδιάστατου πίνακα, οι εξελικτικοί (μεταβατικοί) κανόνες μπορούν να λαμβάνουν υπ' όψιν τους τέσσερις ή οχτώ πλησιέστερους γείτονες, όμως και άλλοι κανόνες είναι δυνατό να επινοηθούν.

Για τα δισδιάστατα κυτταρικά αυτόματα ο κόσμος είναι κυκλικός: Η δεξιά πλευρά του πλέγματος διπλώνει για να ενωθεί με την αριστερή του πλευρά και η πάνω πλευρά διπλώνει για να ενωθεί με την κάτω. Έτσι το κάθε κελί έχει έναν γείτονα από τον οποίο επηρεάζεται και τον οποίο επηρεάζει. Στο σχήμα Β'.4 φαίνεται πώς η Α πλευρά διπλώνει για να ενωθεί με την Γ, σχηματίζοντας έναν κύλινδρο, και στη συνέχεια η Β πλευρά διπλώνει για να ενωθεί με τη Δ, δίνοντας στο τελικό σχήμα τη μορφή ενός κυλινδρικού δαχτυλιδιού.



Σχήμα Β'.4 : Τα δισδιάστατα κυτταρικά αυτόματα λειτουργούν σε έναν κυκλικό κόσμο, χωρίς αρχή και τέλος. Κάθε κελί επηρεάζει τους γείτονές του και επηρεάζεται από αυτούς.

## Β'.2.2 Κυτταρικά αυτόματα και μουσική

Η μουσική υπήρξε πάντα μια ενδιαφέρουσα περιοχή για την εφαρμογή νέων επιστημονικών μεθόδων, προκαλώντας τους συνθέτες να συνδυάσουν την καλλιτεχνική τους δημιουργικότητα με τις αυτές. Σήμερα είναι ολοένα και πιο σύνηθες για τους

μουσικούς συνθέτες να στρέφονται στην επιστήμη των υπολογιστών για να βελτιώσουν και να ολοκληρώσουν το έργο τους. Από την άλλη πλευρά, και οι επιστήμονες δείχνουν έντονο ενδιαφέρον για τις οργανωσιακές αρχές της μουσικής. Το γεγονός ότι τα επιστημονικά μοντέλα εμπεριέχουν ένα σημαντικό ποσοστό ανθρώπινης αφαιρετικής σκέψης, αποτελεί επίσης έμπνευση για την σύνθεση μουσικής, πάντα μέσα σε ένα διεπιστημονικό πλαίσιο [17].

Η συσχέτιση των κυτταρικών αυτομάτων με την μουσική οφείλεται στο γεγονός ότι η μουσική βασίζεται κατά κύριο λόγο στο χρόνο και τα μέρη από τα οποία αποτελείται (μουσικές νότες και μουσικά μοτίβα) είναι διακριτά συμβάντα που εξελίσσονται στο χρόνο και στο χώρο. Επίσης, η μουσική σύνθεση βασίζεται στην αναπαραγωγή προτύπων και τον τυπικό χειρισμό των παραμέτρων. Το γεγονός ότι τα κυτταρικά αυτόματα μπορούν να παράγουν μεγάλες ποσότητες προτυποποιημένων δεδομένων, τα καθιστά κατάλληλα και για την μοντελοποίηση μουσικής.[1]

### **CAMUS: Μουσική Μηχανή Βασισμένη στα κυτταρικά αυτόματα**

Μία αλγοριθμική μηχανή που παράγει μουσική χρησιμοποιώντας κυτταρικά αυτόματα είναι το CAMUS (Cellular Automata MUSic). Το CAMUS σχεδιάστηκε από τον Eduardo Reck Miranda και αναπτύχθηκε από τον Kenny McAlpine και τον Stuart Hoggart (University of Glasgow) [64]. Το CAMUS χρησιμοποιεί δύο αλγόριθμους που περιγράφουν κυτταρικά αυτόματα: ο πρώτος επινοήθηκε από τον John Horton Conway και έχει το όνομα 'Το παιχνίδι της ζωής' (Game of Life) και ο δεύτερος με το όνομα 'Δαιμονικό Κυκλικό Διάστημα' (Demon Cyclic Space), σχεδιάστηκε από τον David Griffeth (Dewdney, 1989). Αυτοί οι δύο αλγόριθμοι περιγράφονται παρακάτω:

#### **Το παιχνίδι της ζωής**

Το παιχνίδι της ζωής είναι ένα δισδιάστατο κυτταρικό αυτόματο, που αποτελείται από έναν πίνακα αποτελούμενο από κελιά, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να βρίσκεται σε δύο διαφορετικές καταστάσεις: ζωντανό και αναπαρίσταται με τον αριθμό 1 και νεκρό και αναπαρίσταται με τον αριθμό 0. Στην απεικόνισή τους στην οθόνη του υπολογιστή, τα ζωντανά κελιά χρωματίζονται και τα νεκρά κελιά παραμένουν λευκά.

Την κατάσταση ενός κελιού με την πάροδο του χρόνου, καθορίζουν οι καταστάσεις των οχτώ πλησιέστερων γειτόνων, όπως περιγράφεται από τους ακόλουθους κανόνες:

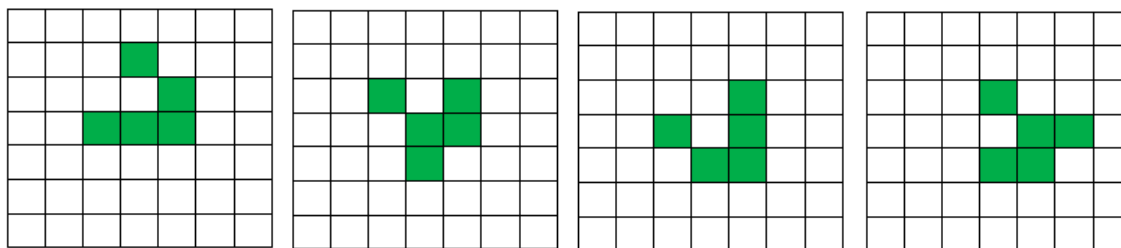
- Γέννηση : Ένα κελί, το οποίο είναι νεκρό κατά την χρονική στιγμή  $t$ , ζωντανεύει την χρονική στιγμή  $t + 1$ , εάν ακριβώς τρεις γείτονές του είναι ζωντανοί την χρονική στιγμή  $t$ .
- Θάνατος από υπερπληθυσμό (overcrowding) : Ένα κελί, το οποίο είναι ζωντανό κατά την χρονική στιγμή  $t$ , πεθαίνει την χρονική στιγμή  $t + 1$ , εάν τέσσερις ή παραπάνω γείτονές του είναι ζωντανοί την χρονική στιγμή  $t$ .
- Θάνατος από απομόνωση (exposure) : Ένα κελί, το οποίο είναι ζωντανό κατά την χρονική στιγμή  $t$ , πεθαίνει την χρονική στιγμή  $t + 1$ , εάν έχει έναν ή κανέναν ζωντανό γείτονα την χρονική στιγμή  $t$ .
- Επιβίωση : Ένα κελί, το οποίο είναι ζωντανό κατά την χρονική στιγμή  $t$ , παραμένει ζωντανό την χρονική στιγμή  $t + 1$ , μόνο αν έχει δύο ή τρεις ζωντανούς γείτονες την χρονική στιγμή  $t$ .

Υπάρχουν δύο διαφορετικοί συντελεστές που περιγράφουν το περιβάλλον του κάθε κελιού. Ο πρώτος είναι ο συντελεστής  $E$ , που περιγράφει τον αριθμό των ζωντανών γειτόνων ενός ζωντανού κελιού, και ο δεύτερος είναι ο συντελεστής  $F$ , αναφερόμενος και σαν συντελεστής γονιμότητας, ο οποίος περιγράφει τον αριθμό των ζωντανών γειτόνων ενός νεκρού κελιού. Εύλογο είναι το γεγονός ότι και οι δυο συντελεστές είναι διαφορετικοί για κάθε κελί και για κάθε χρονική στιγμή, καθώς το αυτόματο εξελίσσεται.

Σε συνάρτηση με αυτούς τους δύο τελεστές, ένα ζωντανό κελί παραμένει ζωντανό όταν  $2 \leq E \leq 3$  και ένα νεκρό κελί ξαναγεννιέται όταν  $3 \leq F \leq 3$ .

Εναλλακτικά, μπορούν να εφαρμοστούν και άλλοι κανόνες εκτός της ακολουθίας (2, 3, 3, 3). Η γενική φόρμα για τέτοιους κανόνες είναι η εξής:  $(E_{\min}, E_{\max}, F_{\min}, F_{\max})$ , όπου  $E_{\min} \leq E \leq E_{\max}$  και  $F_{\min} \leq F \leq F_{\max}$ .

Υπάρχουν μερικές αρχικές διατάξεις κελιών που οδηγούν σε ενδιαφέρουσες συμπεριφορές του αυτόματου, λειτουργώντας με τους αυθεντικούς κανόνες του Conway. Χωρίς να έχει εξακριβωθεί εάν είναι ένα συμπτωματικό γεγονός ή όχι, οδηγούν επίσης και σε καλύτερα μουσικά αποτελέσματα.



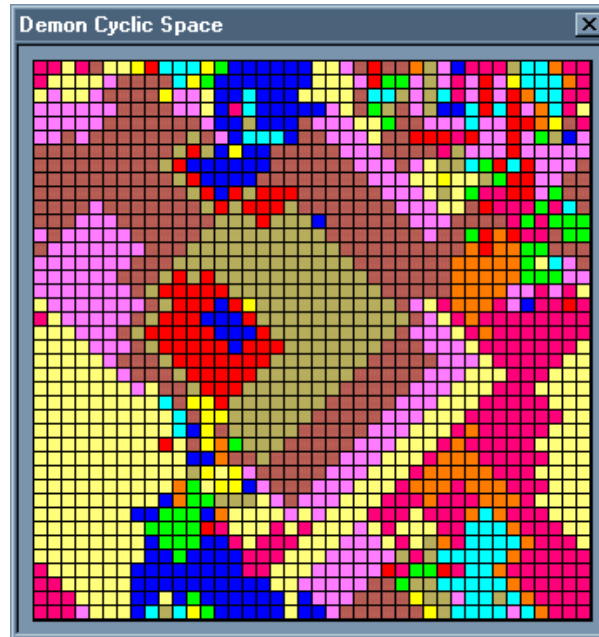
Σχήμα Β'.5: Το παιχνίδι της ζωής σε εξέλιξη (Game of Life)

### Δαιμονικό Κυκλικό Διάστημα

Σε αυτό το κυτταρικό αυτόματο, σε κάθε κελί του πλέγματος μπορούν να αντιστοιχούν περισσότερες από δυο καταστάσεις. Κάθε μία από τις  $n$  διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να πάρει αναπαρίσταται με διαφορετικό χρώμα και με έναν μοναδικό αριθμό, από 0 μέχρι  $n - 1$ . Η εφαρμογή των κανόνων λειτουργεί ως εξής:

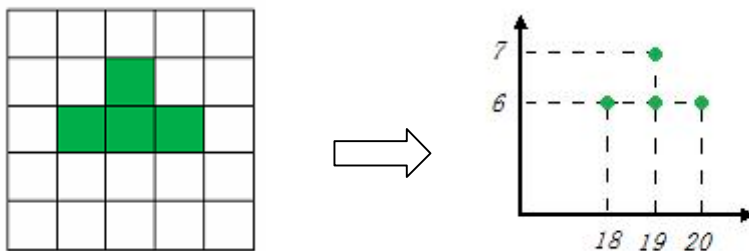
Ένα κελί που τυχαίνει να είναι στη θέση  $k$  τη χρονική στιγμή  $t$ , επηρεάζει κάθε γειτονικό κελί που βρίσκεται στην κατάσταση  $k - 1$ , το οποίο και αλλάζει την κατάστασή του από  $k - 1$  σε  $k$ . Ο κανόνας αυτός μοιάζει με μία αλυσίδα, στην οποία ένα κελί που βρίσκεται σε μία κατάσταση δύο, επηρεάζει ένα κελί που βρίσκεται στην κατάσταση ένα, αναγκάζοντάς το να αλλάξει χρώμα, ακόμα και αν το τελευταίο μπορούσε να επηρεάσει ένα γειτονικό κελί που βρίσκεται στην κατάσταση μηδέν.

Αυτή η αλυσίδα δεν έχει τέλος, αφού θεωρείται ότι ο κόσμος του αυτόματου είναι κυκλικός και το κελί που βρίσκεται στην κατάσταση 0 επηρεάζει τα γειτονικά κελιά του που βρίσκονται στην κατάσταση  $n - 1$ . Ξεκινώντας από μια τυχαία κατανομή χρωματιστών κελιών, το αυτόματο σταθεροποιείται σε προσθετικά (patchwork-type) μοτίβα.



Σχήμα Β'.6: Δαιμονικό κυκλικό διάστημα (Demon Cyclic Space)[65]

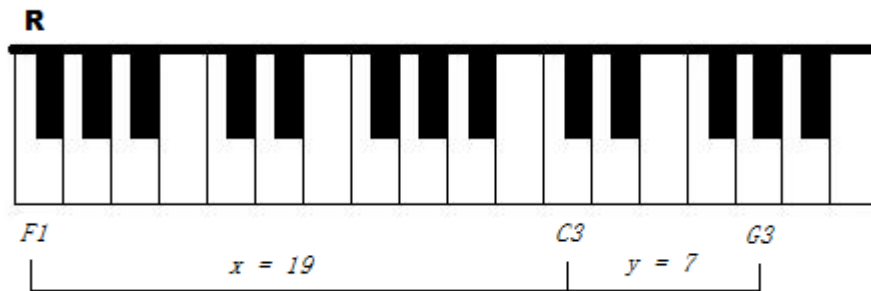
Η CAMUS, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιεί παράλληλα τα δύο αυτόματα για να συνθέσει μουσική. Το αυτόματο παιχνίδι της ζωής δημιουργεί τις μουσικές ακολουθίες, ενώ το δαιμονικό κυκλικό διάστημα καθορίζει την ενορχήστρωσή τους (Miranda, 1993). Αρχικά, τα κελιά του πρώτου αρχικοποιούνται με την τυχαία κατανομή που έχει οριστεί και αντιστοιχίζονται στο Καρτεσιανό μοντέλο. Σε κάθε κελί αντιστοιχίζεται μια τριπλέτα από νότες.



Σχήμα Β'.7 : Οι συντεταγμένες κάθε ενεργού κελιού καθορίζουν την τριπλέτα από νότες και το διάστημα μεταξύ τους.

Οι συντεταγμένες του κελιού καθορίζουν την απόσταση μεταξύ των νοτών, ή αλλιώς το διάστημα στη γλώσσα της μουσικής. Αναφορικά με μία νότα R(Reference Note) που ορίζεται από το χρήστη, η οριζόντια συντεταγμένη δηλώνει την απόσταση της δεύτερης νότας από την αναφερόμενη νότα, και η κάθετη συντεταγμένη δηλώνει την

απόσταση της τρίτης νότας από την δεύτερη [8]. Για την επιλογή της αναφορικής νότας μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες συναρτήσεις πιθανότητας.



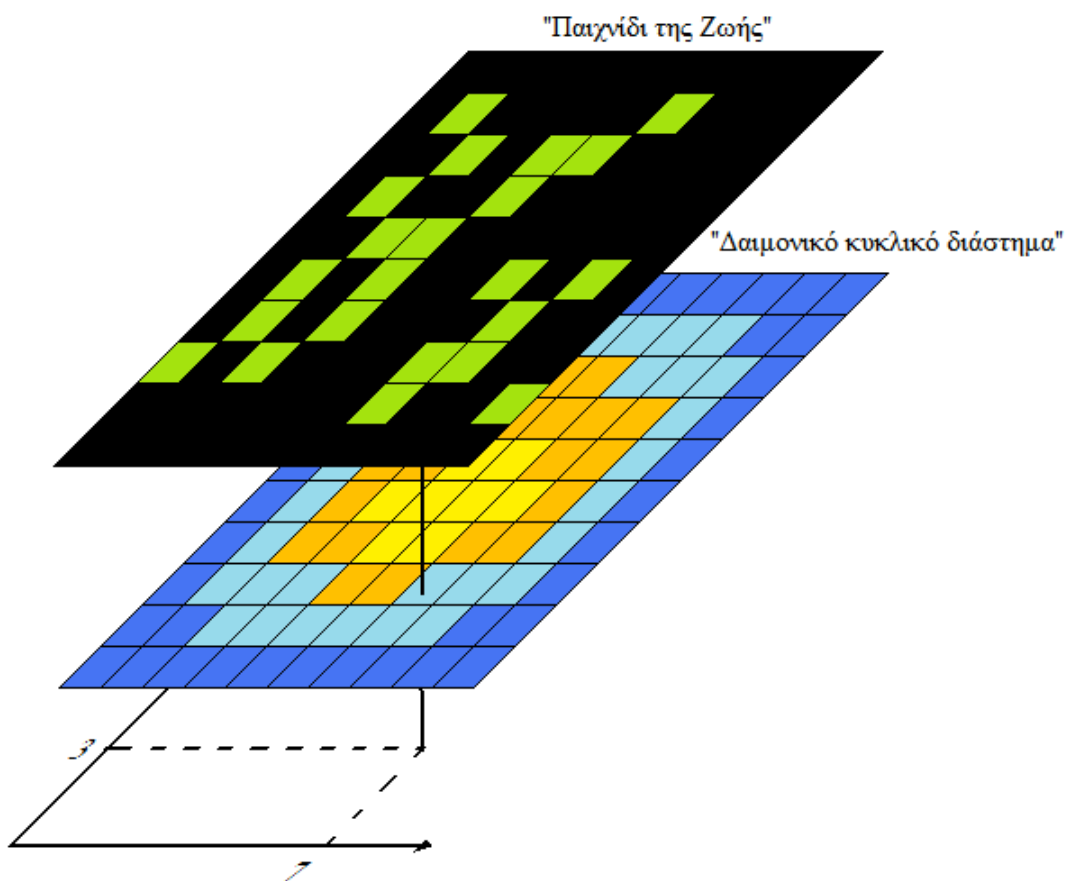
*Σχήμα Β'.8: Για το κελί με συντεταγμένες (19,7) και αναφορικά με την νότα F1(ΦΑ), η δεύτερη νότα της τριπλέτας θα είναι η C3(ΝΤΟ) και θα απέχει 19 ημιτόνια από την F1, και η τρίτη νότα θα είναι η G3(ΣΙ) και θα απέχει 7 ημιτόνια από την προηγούμενή της, την C3.*

Κάθε φορά που δημιουργείται ένα ζωντανό κελί, οι συντεταγμένες του λαμβάνονται υπ' όψιν για να δημιουργηθεί η μουσική τριπλέτα, με τον προαναφερόμενο τρόπο. Παράλληλα τρέχει και το 'δαιμονικό κυκλικό διάστημα', και ο χρήστης μπορεί να αντιστοιχίσει τα χρώματα που δηλώνουν τις διαφορετικές καταστάσεις του αυτόματου με μουσικά όργανα, σύμφωνα με το σύστημα MIDI (Musical Instrument Digital Interface – Ψηφιακή Διασύνδεση Μουσικών Οργάνων). Με αυτόν τον τρόπο, οι νότες που καθορίστηκαν από το παιχνίδι της ζωής, ηχούν από το όργανο που καθορίστηκε από το κυκλικό διάστημα. Τα δύο αυτόματα συγχρονίζονται για να ξεκινήσουν να τρέχουν σε παράλληλα διακριτά χρόνο-διαστήματα. Αυτό σημαίνει πως και οι μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων καθώς ο χρόνος τρέχει γίνονται παράλληλα. Εντούτοις, η CAMUS διαβάζει και παίζει τους πίνακες στήλη – στήλη, από πάνω προς τα κάτω, προτού προλάβει να λάβει χώρα η μετάβαση των αυτομάτων. Υπάρχει περίπτωση αυτές οι νότες να ηχούν ταυτόχρονα, αλλά αυτό δεν είναι πάντα αναγκαίο. Κάθε μουσικό κελί έχει το δικό του μουσικό ρυθμό, και οι νότες που το αποτελούν μπορεί να έχουν διαφορετική διάρκεια και επιπλέον μπορούν να ενεργοποιηθούν σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή [64].

Το ρυθμικό μοτίβο που θα ακολουθηθεί εξαρτάται και από την κατάσταση των γειτονικών κελιών στο αυτόματο παιχνίδι της ζωής. Υπάρχουν ορισμένοι ρυθμικοί κανόνες, οι οποίοι, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους την κατάσταση των γειτόνων καθορίζουν το ρυθμικό πρότυπο για κάθε κελί που ενεργοποιείται. Παρ' όλα αυτά,

αυτοί οι κανόνες καθορίζουν απλά τη θέση των νοτών στο πεντάγραμμο μιας τριπλέτας. Υπάρχουν και άλλες υπορουτίνες του προγράμματος που καθορίζουν την ακριβή χρονική έναρξη μιας νότας καθώς και την διάρκειά της [1].

Οι Hoggar και Mc Alpine [64] προχώρησαν πέρα από το CAMUS : εισήγαγαν το CAMUS 3D χρησιμοποιώντας τρισδιάστατα κυτταρικά αυτόματα και αλυσίδες Markov για να δημιουργήσουν τους ρυθμούς. Οι αλυσίδες Markov είναι πιθανοτικά συστήματα, σύμφωνα με τα οποία η πιθανότητα κάποιων γεγονότων να συμβούν εξαρτάται από το προηγούμενο ή τα προηγούμενα γεγονότα. Ο αριθμός των πεπερασμένων γεγονότων που λαμβάνονται υπ' όψιν είναι γνωστός ως «διάταξη» της αλυσίδας. Επομένως, μια αλυσίδα Markov που λαμβάνει υπ' όψιν μόνο τον αμέσως προηγούμενο πρόγονο – συμβάν είναι πρώτης διάταξης, ενώ μια αλυσίδα που λαμβάνει υπ' όψιν και τον πρόγονο του προγόνου είναι δεύτερης διάταξης, και ούτω καθ' εξής.



Σχήμα Β'.9 : Στιγμιότυπο: Τα δύο κυτταρικά αυτόματα 'τρέχουν' παράλληλα στην μουσική μηχανή CAMUS. Τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν σε διαφορετικά μουσικά όργανα.



Γενικά, τα κυτταρικά αυτόματα αποτελούν ένα ενδιαφέρον μαθηματικό μοντέλο, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος επιστημονικών θεμάτων. Τα κυτταρικά αυτόματα εξετάζονται και αναπτύσσονται ολοένα και περισσότερο τις τελευταίες τρεις δεκαετίες. Παρά την απλότητά τους, έχουν την δυνατότητα να μοντελοποιούν πολύπλοκα προβλήματα σε πολλές επιστημονικές περιοχές όπως η φυσική (για παράδειγμα, δυναμικά και χαοτικά συστήματα), η γενετική και η χημεία (χημικές αντιδράσεις και ανάπτυξη κρυστάλλων (crystal growth)).

## **B'.3 Μουσική Σύνθεση**

Μια μουσική σύνθεση είναι μια περίπλοκη ηχητική διαδικασία που αποτελείται από μικρά παρόμοια συμβάντα, που συνήθως αποκαλούμε νότες, η οποία υπακούει σε ορισμένους βασικούς αισθητικούς και ακουστικούς κανόνες. Πιο συγκεκριμένα, μια μουσική σύνθεση είναι απλά μια σειρά από καλώς συμμετρικά συμβάντα αναμειγμένα κατάλληλα με μη συμμετρικά συμβάντα κατά έναν τέτοιο τρόπο ώστε οι προσδοκίες του ακροατή να εκπληρώνονται απόλυτα. Στα μουσικά στοιχεία περιλαμβάνονται ο χρόνος, ο ρυθμός, η μελωδία, η αρμονία, η αντίστιξη, η ενορχήστρωση, και όλα είναι ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, και η μουσική σύνθεση είναι αυτή που εκφράζει τις ακριβείς κινήσεις αυτών των βασικών μουσικών στοιχείων στη μονάδα του χρόνου [18].

### **B'.3.1 Αλγοριθμική Σύνθεση Μουσικής**

Αλγοριθμική σύνθεση μουσικής ονομάζεται η τεχνική της χρήσης αλγορίθμων για την σύνθεση μουσικής. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές είναι σε θέση να συνθέσουν μουσική, εφ' όσον προγραμματιστούν κατάλληλα. Κατά κανόνα όμως, μουσική παράγεται μέσω υπολογιστών όταν οι αλγόριθμοι έχουν την ικανότητα να παίρνουν πρωτοβουλίες κατά την διαδικασία της σύνθεσης. Σημαντικό ρόλο παίζει και ο τρόπος και ο βαθμός συμμετοχής ενός αλγορίθμου στη σύνθεση, χωρίζοντάς τη σε μουσική σύνθεση μέσω υπολογιστή και σε μουσική σύνθεση με τη βοήθεια υπολογιστή. Υπάρχουν αλγόριθμοι που παρέχουν σημειογραφική πληροφορία για μουσικά όργανα, ενώ άλλοι παρέχουν έναν ανεξάρτητο τρόπο σύνθεσης. Υπάρχουν και άλλοι που κάνουν και τα δυο

Γενικά, δεν υπάρχει μέθοδος για να κατηγοριοποιηθούν αυτοί οι αλγόριθμοι σε κατηγορίες, παρ' όλα αυτά όμως, υπάρχει διάκριση ανάμεσα στα συστήματα που παράγουν μουσική χρησιμοποιώντας πιθανοκρατικές διαδικασίες και σε αυτά που

χρησιμοποιούν έτοιμες ρουτίνες και παράγουν ντετερμινιστικά αποτελέσματα, δίνοντας συγκεκριμένη είσοδο στον αλγόριθμο.[19]

Η εξέλιξη τεχνητής νοημοσύνης βοήθησε σημαντικά στην υλοποίηση μηχανών που μπορούν να συνθέσουν μουσική απίστευτα καλής ποιότητας. Η επιτυχία ή αποτυχία της σύνθεσης εξαρτάται κατά κύριο λόγο στο πώς θα αναπαρασταθούν τα μουσικά δεδομένα, δηλαδή στον τύπο και τον αριθμό των παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν ως ορίσματα. Αυτά τα συστήματα μπορούν να μιμηθούν διάφορα μουσικά στυλ, όμως προγραμματίζονται για να συνθέτουν μόνο ένα είδος μουσικής, ή μαθαίνουν να μιμούνται κάποιο είδος με μάθηση μέσω παραδειγμάτων. Είναι εύκολο για αυτά τα συστήματα να μιμηθούν χαρακτηριστικά στυλ, όπως μπαρόκ ή τζαζ [41]. Παρ' όλα αυτά είναι ακόμα πολύ δύσκολο για τους υπολογιστές να συνθέσουν νέα είδη μουσικής, γιατί είναι έτσι φτιαγμένοι ώστε ή να ενσωματώνουν έτοιμα πρότυπα, ή να μαθαίνουν από παραδείγματα. Επίσης, είναι δύσκολο να εκτιμήσουμε τα αποτελέσματα σε τέτοιες περιπτώσεις, επειδή ακούγονται παράξενα στο ανθρώπινο αυτί. Τα μουσικά κομμάτια που έχουν δημιουργηθεί με αυτόν τον τρόπο από υπολογιστές, τείνουν να υστερούν στις πολιτισμικές αναφορές από τις οποίες πιανόμαστε όταν εκτιμούμε την μουσική [3].

Μια εύλογη προσέγγιση σε αυτά τα προβλήματα είναι να προγραμματιστούν με αφηρημένα μοντέλα που ενισχύουν την κατανόησή μας για τη δυναμική της συνθετικής διαδικασίας. Μετά την επινόηση του υπολογιστή, πολλοί συνθέτες δοκίμασαν να συνθέσουν χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα, όπως συνδυαστικά συστήματα, στοχαστικά μοντέλα και fractals [10, 66, 67]. Μερικά από αυτά τα πειράματα απέδωσαν ενδιαφέρουσα μουσική και συνέβαλλαν στην έρευνα για την εφαρμογή μαθηματικών τύπων και υπολογιστικών μοντέλων στην σύνθεση μουσικής. Επίσης, το ενδεχόμενο της μοντελοποίησης της Τεχνητής Ζωής αποτελεί μια φυσική εξέλιξη της έρευνας για τη σύνθεση μουσικής μέσω υπολογιστών.

### **Β' .3.2 Μέθοδοι ηχητικής σύνθεσης**

Υπάρχουν τέσσερις γενικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι μέθοδοι σύνθεσης ήχου. Περιλαμβάνουν τεχνικές που επιτυγχάνουν την σύνθεση ηχητικού σήματος. Επίσης, σε αυτή την ενότητα αναφέρεται και η τεχνική σύνθεσης ηχητικού πεδίου (Wave field Synthesis – W.F.S.), η οποία επιτυγχάνει την ακριβή τοποθέτηση του ηχητικού σήματος στον τρισδιάστατο χώρο.

### **Β'.3.2.1 Τεχνικές ανάγνωσης δεδομένων από μνήμη**

Η πρώτη είναι η σύνθεση βασισμένη σε πίνακα (Table look-up Synthesis), η οποία περιλαμβάνει τεχνικές ανάγνωσης δεδομένων από κάποια μνήμη. Στην ουσία, η αναπαραγωγή του ήχου γίνεται με τη χρήση δειγμάτων φυσικών ήχων. Τα δεδομένα προς ανάγνωση είναι συνήθως οι τιμές της συνάρτησης πίεσης (pressure function) του επιθυμητού ήχου, και συγκεντρώνονται στον πίνακα κυματομορφής (wave table). Ο ήχος παράγεται συνδυάζοντας τα δεδομένα του πίνακα με τον κατάλληλο τρόπο.

Η πιο απλή εφαρμογή αυτού του τρόπου σύνθεσης είναι η δειγματοληψία (sampling) και μία πιο γενική μορφή της είναι η σύνθεση πίνακα κυματομορφής (wave table synthesis) [20,21].

### **Β'.3.2.2 Τεχνικές μοντελοποίησης φάσματος**

Η επόμενη κατηγορία βασίζεται σε τεχνικές μοντελοποίησης φάσματος (spectral modeling). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η σύνθεση του ήχου σχεδιάζεται έτσι ώστε να ταιριάζει με το φάσμα του αναφερόμενου σήματος σε κάθε χρονική στιγμή. Κάθε σήμα μπορεί να αναλυθεί σε ντετερμινιστικά και στοχαστικά στοιχεία, τα οποία αντιστοιχούν σε κοιλότητες (sinusoids) και θόρυβο αντίστοιχα [30,31]. Είναι επίσης δυνατόν να κατασκευαστεί ένα μοντέλο σύνθεσης όπου το σήμα θα αναπαρίσταται από μια περιοδική κυματομορφή ενισχυμένη με θόρυβο. Δύο τεχνικές που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι η προσθετική και η μικροδομική σύνθεση

#### ***Προσθετική Σύνθεση (additive synthesis)***

Η προσθετική σύνθεση (additive synthesis) είναι μια τεχνική σύνθεσης ήχου με την οποία παράγουμε σύνθετες κυματομορφές βασισμένοι σε απλούστερες και βασικές κυματομορφές. Για να αναπαραστήσουμε έναν ήχο με τη προσθετική σύνθεση (π.χ. ένα ήχο κιθάρας) πρέπει πρώτα να αναλύσουμε τον ήχο αυτό ως προς το περιεχόμενο των αρμονικών που περιέχει. Οι αρμονικές ενός μουσικού οργάνου παράγονται σε ποσότητες που μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου, και καθορίζουν τη χροιά του. Ο όρος «χροιά» αναφέρεται στα υποκειμενικά χαρακτηριστικά του ήχου που κάνουν δυνατό το διαχωρισμό δύο τόνων της ίδιας έντασης και θεμελιώδους συχνότητας [37]. Επομένως, η χροιά είναι αυτή που χαρακτηρίζει μοναδικά τα μουσικά όργανα, αλλά και την ανθρώπινη ομιλία. Η προσθετική σύνθεση μιμείται την χροιά των

μουσικών οργάνων συνδυάζοντας πολλά ακουστικά κύματα που ρίχνονται στις διαφορετικές αρμονικές, με μία διαφορετική περιβάλλουσα για κάθε ένα.

Μια βασική μέθοδος που χρησιμοποιείται για να εξετάσουμε σύνθετες κυματομορφές είναι η ανάλυση **Fourier** όπου αναλύει το περιεχόμενο συχνοτήτων μιας περιοδικής κυματομορφής, συγκεκριμένα, τις συχνότητες των αρμονικών που περιέχει.

Η προσθετική σύνθεση μπορεί επίσης να δημιουργήσει μη αρμονικούς ήχους (δηλαδή, ήχους που προκύπτουν από μη ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας).

Αυτό μπορεί να γίνει όταν μεμονωμένες επί μέρους συχνότητες δεν είναι όλες ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας [22,23].

#### ***Μικροδομική Σύνθεση (granular synthesis)***

Η σύνθεση που βασίζεται σε μονάδες ή αλλιώς μικροδομική σύνθεση αποτελεί μια επέκταση της προσθετικής μεθόδου και αναλύεται εκτενέστερα στην ενότητα 2. 3. 3.

Τέλος, σε αυτή την κατηγορία ανήκει η σύνθεση φίλτρου-πηγής (source-filter synthesis), σύμφωνα με την οποία το ντετερμινιστικό στοιχείο αναπαρίσταται από μια κυματική μορφή ενός φίλτρου (single-filtered).

### **Β'.3.2.3 Τεχνικές διαμόρφωσης του σήματος**

Η τρίτη κατηγορία βασίζεται σε τεχνικές διαμόρφωσης του σήματος. Με τον όρο 'διαμόρφωση' (modulation) εννοούμε τον επηρεασμό ενός ηχητικού σήματος από άλλο σήμα. Ο επηρεασμός αυτός μπορεί να αφορά τη συχνότητα, το πλάτος, ή τη φάση του ηχητικού σήματος. Το αρχικό σήμα ονομάζεται φέρον σήμα (carrier) ενώ το σήμα που θα το επηρεάσει ονομάζεται σήμα διαμόρφωσης (modulator). Ο επιθυμητός ήχος παράγεται από τον μετασχηματισμό του αρχικού σήματος από το σήμα διαμόρφωσης. Ο μετασχηματισμός αυτός μπορεί γενικά να είναι αυθαίρετος, αλλά υπάρχουν μερικές ειδικές περιπτώσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως [24].

#### ***Διαμόρφωση πλάτους (amplitude modulation)***

Μια από αυτές τις περιπτώσεις είναι η διαμόρφωση πλάτους (amplitude modulation), κατά την οποία, το πλάτος του αρχικού σήματος επηρεάζεται από το πλάτος του σήματος διαμόρφωσης. Το πλάτος κάθε δείγματος του αρχικού σήματος πολλαπλασιάζεται με το πλάτος κάθε δείγματος του σήματος διαμόρφωσης, το οποίο και καθορίζει την αλλαγή που θα υποστεί το πλάτος του τελικού σήματος. Κατά τον ίδιο τρόπο, η συχνότητα του σήματος διαμόρφωσης καθορίζει τη συχνότητα της μεταβολής της διαμόρφωσης του πλάτους στο τελικό ηχητικό σήμα. Αξίζει να

σημειωθεί ότι οι νέες συχνότητες στο τελικό ηχητικό σήμα γίνονται αντιληπτές, μόνο όταν η συχνότητα του σήματος διαμόρφωσης ξεπερνά τα 20 Hz [25].

### ***Διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation)***

Μια άλλη ειδική περίπτωση είναι η διαμόρφωση συχνότητας (frequency modulation) κατά την οποία διαφοροποιείται η συχνότητα του φέροντος σήματος, ενώ το πλάτος παραμένει σταθερό.

Το πλεονέκτημα της διαμόρφωσης συχνότητας είναι η πολύ μικρότερη ευαισθησία της σε εξωτερικό θόρυβο, δηλαδή σε ανεπιθύμητα σήματα παρεμβολής. Αυτό συμβαίνει γιατί ο θόρυβος επηρεάζει το μέγεθος της κυματομορφής μιας εκπομπής, όχι όμως και τις αυξομειώσεις συχνότητας που μεταφέρουν τις πληροφορίες του σήματος [26].

### ***Σύνθεση μετασχηματισμού κυματομορφής (wave shaping synthesis)***

Υπάρχει και μία τεχνική σύνθεσης γενικής διαμόρφωσης που ονομάζεται σύνθεση μετασχηματισμού κυματομορφής, κατά την οποία το σήμα διαμορφώνεται με την βοήθεια μιας μη γραμμικής συνάρτησης μετασχηματισμού (shaping function).

Γενικά, στηρίζεται σε έναν πίνακα κυματομορφών, όπως αυτός που αναφέρθηκε στην παράγραφο «Τεχνικές ανάγνωσης δεδομένων από μνήμη». Κάθε δείγμα του αρχικού σήματος τοποθετείται στον πίνακα κυματομορφών, με σειρά που καθορίζεται από τη συνάρτηση μετασχηματισμού. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αλλάζοντας το πλάτος του αρχικού σήματος, αλλάζει και το ποσοστό των δειγμάτων του πίνακα που χρησιμοποιούνται για τη σύνθεση. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εύκολο να ελεγχθεί το φάσμα του ήχου με το πέρασμα του χρόνου. Για παράδειγμα, όταν το εύρος του αρχικού σήματος είναι από -1 έως 1, τότε χρησιμοποιείται ολόκληρος ο πίνακας. Αν το εύρος κυμαίνεται από -0,33 έως 0,33 τότε χρησιμοποιείται μόνο το ένα τρίτο του πίνακα. Ο γενικός κανόνας που ισχύει είναι ότι όσο αυξάνεται το πλάτος του εισερχόμενου σήματος, τόσο πιο «φωτεινή χροιά» έχει το εξερχόμενο σήμα, δηλαδή έχει περισσότερες υψηλές συχνότητες. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το πλάτος του εισερχόμενου σήματος δεν έχει άμεση επιρροή στο πλάτος του εξερχόμενου σήματος, το οποίο κυρίως εξαρτάται από τις τιμές που δεικτοδοτούνται στον πίνακα.

Με τις εναλλαγές του πλάτους, είναι δυνατόν να αλλάζει και το φάσμα του ήχου, κάτι που παρατηρείται και στα ακουστικά μουσικά όργανα. Για το λόγο αυτό ο μετασχηματισμός κυματομορφής χρησιμοποιείται επιτυχώς για την σύνθεση παραδοσιακών μουσικών οργάνων [27, 29].

### **B'.3.2.4 Τεχνικές που προσπαθούν να μιμηθούν τον ήχο που παράγεται από μουσικά όργανα**

Στην τέταρτη κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές που προσπαθούν να μιμηθούν τον ήχο που παράγεται από τα μουσικά όργανα, για παράδειγμα την ταλάντευση των χορδών. Η τεχνική αυτή ονομάζεται φυσική μοντελοποίηση (physical modeling) και βασίζεται στην εφαρμογή αριθμητικών τύπων και διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τον φυσικό τρόπο με τον οποίο είναι κατασκευασμένα τα μουσικά όργανα, ή στην σχεδίαση ενός μοντέλου που συμπεριφέρεται όπως ένα αληθινό μουσικό όργανο [43,44,45]. Στην τροπική σύνθεση (modal synthesis), ο μηχανισμός παραγωγής ήχου ενός οργάνου μοντελοποιείται με ένα μικρό αριθμό ηχείων (resonators) τα οποία υποκινούνται από κάποιο σήμα για να παράγουν τον επιθυμητό ήχο. Η τεχνική digital waveguide modeling είναι μια άλλη τεχνική που ανήκει σε αυτή την κατηγορία και προσπαθεί να αντιγράψει την συμπεριφορά του οργάνου, υλοποιώντας ένα φυσικό μοντέλο της παραγωγής ήχου.[46]

### **B'.3.2.5 Τεχνικές σύνθεσης τρισδιάστατου ήχου**

Τρισδιάστατος ήχος ή όπως αλλιώς ονομάζεται χωρικός (spatial) είναι ο ήχος που ακούμε στην πραγματική ζωή. Οι καθημερινοί ήχοι που φτάνουν στα αφτιά μας προέρχονται από παντού και είναι αναγνωρίσιμοι από το ύψος, την χροιά, την ένταση, αλλά και από τη θέση τους στο χώρο. Οι ήχοι αυτοί μας δίνουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για το περιβάλλον μέσα στο οποίο βρισκόμαστε. Οι ανακλάσεις αυτών μας δίνουν σημαντική πληροφορία για τη θέση, το μέγεθος και το υλικό των αντικειμένων που υπάρχουν γύρω μας.

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε πρώτα το πώς ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τους τρισδιάστατους ήχους στην πραγματική ζωή και το πώς αντιδρά σε αυτούς, προκειμένου να μπορέσουμε να συνθέσουμε σωστά τρισδιάστατο ήχο, κάτι που θα ενισχύσει πολύ την δημιουργία ολοκληρωμένων τρισδιάστατων εικονικών χώρων. [32]

Η ακριβής τοποθέτηση του ήχου στον τρισδιάστατο χώρο γίνεται με προηγμένες τεχνικές, όπως η σύνθεση ηχητικού τοπίου (Wave field Synthesis), με μόνη προϋπόθεση την κατάλληλη κωδικοποίηση των ηχητικών δεδομένων, αλλά και την χρήση συγκεκριμένου ηλεκτροακουστικού εξοπλισμού.

### ***Σύνθεση Ηχητικού Τοπίου (Wave field Synthesis)***

Η σύνθεση ηχητικού τοπίου είναι μια τεχνική χωρικής (τρισεδιάστατης) ηχητικής απόδοσης, η οποία χρησιμοποιείται για την δημιουργία εικονικών ακουστικών περιβαλλόντων. Για την σύνθεση, παράγονται «τεχνητά» μέτωπα κυμάτων, τα οποία συνθέτονται από έναν μεγάλο αριθμό ανεξάρτητων ηχείων. Έτσι δίνεται η εντύπωση ότι τα κύματα προέρχονται από ένα εικονικό σημείο εκκίνησης, την εικονική πηγή. Η ιδέα της τεχνικής αυτής εμφανίστηκε πριν περισσότερα από πενήντα χρόνια, όμως η τότε τεχνολογία και άλλες τεχνικές δυσκολίες εμπόδισαν την εγκατάσταση ενός τόσο μεγάλου αριθμού ηχείων. Μια ιδιαιτερότητα της τεχνικής αυτής είναι ότι ο εντοπισμός των εικονικών πηγών δεν εξαρτάται από την θέση του ακροατή. [33, 34]

### **B'.3.3 Σύνθεση με Ηχητικές Μονάδες (Granular Synthesis)**

Ο λόγος που κάνει ιδιαίτερη και ενδιαφέρουσα αυτή την τεχνική μουσικής σύνθεσης είναι ότι μπορεί να συσχετιστεί με τα κυτταρικά αυτόματα και τους γενετικούς αλγόριθμους. Η σύνθεση μουσικής με μονάδες είναι κατά βάση μία τεχνική που βασίζεται στο χρόνο [5], ο οποίος είναι μια από τις πιο σημαντικές παραμέτρους του ήχου.

Δουλεύει παράγοντας μια πολύ γρήγορη ακολουθία από πολύ μικρά ηχητικά σήματα, που ονομάζονται ηχητικές μονάδες ή κόκκοι (granules), της τάξης των 35 milliseconds (κοντά στο κατώφλι της ανθρώπινης ακοής), τα οποία όλα μαζί συνθέτουν μεγαλύτερα χρονικά συμβάντα. Συνδυάζει σημαντική πληροφορία που σχετίζεται με το χρόνο, όπως χρόνος εκκίνησης, διάρκεια, πλάτος και συχνότητα του σήματος που αντιστοιχεί σε κάθε μονάδα.

Ο ακριβής έλεγχος αυτών των μονάδων είναι δύσκολος, αφού εκατοντάδες ή και χιλιάδες από αυτές συνδυάζονται για το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η χρήση γενετικών αλγορίθμων και κυτταρικών αυτομάτων διευκολύνει τον υψηλού επιπέδου χειρισμό των παραμέτρων των μονάδων αυτών. Ο πληθυσμός των μονάδων ελέγχεται από τους κανόνες της εξέλιξης, και έτσι η διαδικασία της εξέλιξης μετασχηματίζεται σε μια διαδικασία σύνθεσης, παράγοντας το επιθυμητό αποτέλεσμα. Φυσικό επακόλουθο είναι το τελικό αποτέλεσμα να επηρεάζεται άμεσα από την δομή των κανόνων της εξέλιξης, και την επιλογή της συνάρτησης αξιολόγησης που εφαρμόζονται στον αρχικό πληθυσμό.

Αν και οι μέθοδοι οργάνωσης αυτών των μονάδων είναι ποικίλες, η παραγωγή τους είναι συνήθως μια σχετικά απλή διαδικασία. Οι μονάδες παράγονται είτε από την εξαγωγή μικρών κομματιών από φυσικούς ήχους όπως η ανθρώπινη ομιλία, είτε από σύνθεση βασισμένη σε μαθηματικά μοντέλα. Η πιο απλή μέθοδος είναι η εξαγωγή μίας ηχητικής μονάδας και η πολλαπλή αναπαραγωγή της, ενώ πιο πολύπλοκες μέθοδοι περιλαμβάνουν την εξαγωγή μονάδων από περισσότερες μουσικές πηγές, οδηγώντας έτσι και σε πιο ενδιαφέροντα μουσικά αποτελέσματα. Ο συνθέτης μπορεί να πειραματιστεί με το να αλλάζει τη σειρά των μονάδων, την διάρκειά τους αλλά και το μεταξύ τους διάστημα [9]. Είναι πολύ σημαντικό όμως οι μονάδες να μην επικαλύπτονται κατά τη διάρκεια της σύνθεσης.

Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο εξάγονται οι μονάδες από τα σήματα, η σύνθεση με ηχητικές μονάδες χωρίζεται στις εξής κατηγορίες:

***Ασύγχρονη Σύνθεση με Ηχητικές Μονάδες (Asynchronous granular synthesis -AGS)***  
Στην ασύγχρονη σύνθεση με μονάδες, οι ηχητικές μονάδες διασκορπίζονται στατιστικά σε περιοχές στο πεδίο χρόνου-συχνότητας [28]. Αυτές οι περιοχές, που ονομάζονται σύννεφα (clouds), σχηματίζουν τις αρχικές μονάδες και έχουν διάφορες παραμέτρους: χρόνος εκκίνησης και διάρκεια του σύννεφου, χρονική διάρκεια και πυκνότητα των μουσικών μονάδων, συχνότητα του σύννεφου, πλάτος και εύρος σήματος (amplitude envelope), την κυματομορφή κάθε μονάδας και την χωρική κατανομή. Οι κόκκοι από ένα σύννεφο μπορούν να έχουν τυχαίες κυματομορφές που μοιάζουν μεταξύ τους, συνδυάζονται τυχαία μεταξύ τους και η κάθε μια από αυτές είναι διαφορετική σε σχέση με το χρόνο. Το εύρος μιας μονάδας επηρεάζεται από την διάρκειά της, επομένως, αλλάζοντας την διάρκεια των μουσικών μονάδων παράγεται μια ενδιαφέρουσα ποικιλία μουσικών χροίων (timbre). Η ασύγχρονη σύνθεση με μουσικές μονάδες μπορεί να αποδώσει αποτελεσματικά διάφορους ήχους που δεν μπορούν να παραχθούν από μουσικά όργανα, αλλά η παραγωγή ήχων που μοιάζουν με τους πραγματικούς ήχους της φύσης είναι ακόμα μια πολύ δύσκολη διαδικασία.

***Σύνθεση με συγχρονισμό πλάτους (Pitch Synchronous Granular Synthesis - PSGS)***  
Στην σύνθεση με συγχρονισμό πλάτους, οι μονάδες παράγονται μέσω του βραχύχρονου μετασχηματισμού Fourier (short-time Fourier Transform – STFT), και το υπό ανάλυση σήμα θεωρείται ότι είναι περιοδικό (nearly periodic). Η θεμελιώδης συχνότητα του σήματος υπολογίζεται και χρησιμοποιείται με συγχρονισμένη παραθυροποίηση με ορθογώνιο παράθυρο (synchronous windowing with rectangular



window), ενώ παράλληλα ελαχιστοποιεί τις συνέπειες (side effects) της παραθυροποίησης. Μετά την παραθυροποίηση, κάθε μουσική μονάδα ορίζεται να αντιστοιχεί σε μια περίοδο του σήματος, και από αυτές τις μονάδες προέρχονται οι αυθόρμητες αντιδράσεις που αντιστοιχούν σε σημαντικό περιεχόμενο στο πεδίο της συχνότητας. Αυτή η εκτίμηση προκύπτει χρησιμοποιώντας γραμμική κωδικοποίηση Linear Predictive (LP) για την αναπαράσταση του πεδίου της συχνότητας της μουσικής μονάδας. Ο παραγόμενος ήχος παράγεται από ένα σύνολο φίλτρων πεπερασμένων κρουστικών παλμών (Finite Impulse Response (FIR) [28].

Η παραγωγή και ο ανασυνδυασμός των μουσικών μονάδων δεν ήταν πάντα μια ενδιαφέρουσα διαδικασία: η πρόσφατη ανάπτυξη των επεξεργαστών ψηφιακής επεξεργασίας σήματος για συγκεκριμένους σκοπούς έκανε την σύνθεση με μουσικές μονάδες εφικτή σε πραγματικό χρόνο και με ένα λογικό κόστος σε υλικό. Αυτή η τεχνική μπορεί να παρομοιαστεί με την λειτουργία μιας κινούμενης εικόνας, στην οποία δίνεται η εντύπωση μιας συνεχούς κίνησης με τον εξής τρόπο: μια σειρά από εικόνες που διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους προβάλλονται η μια μετά την άλλη σε τέτοιο ρυθμό που είναι αδύνατον να γίνει αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι. Η σύνθεση με μουσικές μονάδες θυμίζει τον τρόπο με τον οποίο είναι φτιαγμένοι οι νέο-μπρεσιονιστικοί πίνακες, όπου ολόκληρο το έργο αποτελείται από μικρές πινελιές χρωμάτων των οποίων η μίξη γίνεται στο μάτι του παρατηρητή και όχι στην παλέτα του ζωγράφου. Έτσι και οι ήχοι που παράγονται με αυτή την τεχνική τείνουν να έχουν εξαιρετική αίσθηση της κίνησης και της ροής.[11]



Σχήμα Β'.10 : Vincent Van Gogh "Sower at sunset", 1888

Ο συνθέτης Iannis Xenakis [10] θεωρείται ένας από τους μέντορες της σύνθεσης με μουσικές μονάδες. Τα πρώτα δείγματα της δουλειάς του δημιουργήθηκαν από μικρά κομμάτια μαγνητικής ταινίας, τα οποία ανασυγκροτήθηκαν και σχημάτισαν μια νέα σειρά. Παρ' όλο που ο Xenakis ανέπτυξε τη θεωρία του στηριζόμενος στις αρχές αυτής της μεθόδου κατά τη δεκαετία του 1950, το πρώτο σύστημα που βασίζεται σε αυτή και υλοποιήθηκε σε ηλεκτρονικό υπολογιστή υλοποιήθηκε από τον Curtis Roads στη Αμερική και ήταν εξαιρετικά χρονοβόρο. Ο Καναδός Gary Truax (1988) ήταν αυτός που κατάφερε να το υλοποιήσει σε πραγματικό χρόνο. Από τότε η σύνθεση με μουσικές μονάδες έγινε προσιτή και διαθέσιμη σε ένα μεγάλο αριθμό από μουσικούς [9, 56].

***Chaosynth: Σύστημα σύνθεσης μουσικής με ηχητικές μονάδες, με την βοήθεια κυτταρικών αυτόματων.***

Το σύστημα Chaosynth είναι ένας συνθέτης μουσικής που βασίζεται στην Μουσική Σύνθεση με Μουσικές Μονάδες [4,5]. Μέχρι τώρα, τα περισσότερα συστήματα σύνθεσης μουσικής χρησιμοποιούσαν στοχαστικές μεθόδους για να ελέγξουν την παραγωγή των μουσικών μονάδων και επιπλέον, χρησιμοποιούσαν προ-ηχογραφημένες μονάδες για τη σύνθεση. Το σύστημα Chaosynth χρησιμοποιεί το κυτταρικό αυτόματο ChaOs(Chemical Oscillator), του οποίου η συμπεριφορά μοιάζει με τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται οι φυσικοί ήχοι που παράγονται από κάποια ακουστικά όργανα: Τείνουν να συγκλίνουν από μια τυχαία κατανομή των συστατικών τους σε περιοδικά μοτίβα. Επίσης, οι ήχοι παράγονται όλοι από την αρχή. Το κυτταρικό αυτόματο ChaOs μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας πίνακας κελιών που περιέχουν ηλεκτρονικά κυκλώματα, η συμπεριφορά των οποίων μοιάζει με ένα τεχνητό νευρώνα, ή perceptron [2]. Σε μια χρονική στιγμή, τα κελιά μπορούν να πάρουν μια από τις καταστάσεις: πολωμένο (σε ηρεμία), μη πολωμένο και καμένο. Το κάθε κελί αλληλεπιδρά με τους γείτονές του (συνήθως οχτώ) μέσω της ροής του ηλεκτρικού ρεύματος ανάμεσά τους. Υπάρχουν ελάχιστες ( $V_{min}$ ) μέγιστες ( $V_{max}$ ) τιμές κατωφλίου (threshold values) που χαρακτηρίζουν την κατάσταση ενός κελιού. Εάν η εσωτερική του τάση ( $V_i$ ) είναι κάτω της ελάχιστης τιμής, τότε το κελί είναι σε κατάσταση ηρεμίας (πολωμένο). Εάν είναι μεταξύ της ελάχιστης ( $V_{min}$ ) και της μέγιστης τιμής ( $V_{max}$ ) το κελί εκπολώνεται. Κάθε κελί έχει έναν πιθανό διαιρέτη (potential divider), που αποτελείται από δύο αντιστάτες  $R_1$  και  $R_2$  με σκοπό να διατηρεί την  $V_i$  κάτω από την ελάχιστη τιμή ( $V_{min}$ ). Όταν η  $V_i$  φτάσει την  $V_{min}$  τότε το κελί εκπολώνεται. Επίσης, υπάρχει ένας ηλεκτρικός πυκνωτής, ο οποίος ρυθμίζει το ρυθμό εκπόλωσης. Ανάμεσα στην κατάσταση πόλωσης και μη

πόλωσης υπάρχουν διαβαθμίσεις. Γενικά, τα κελιά έχουν την τάση να εκπολούνονται με τον χρόνο και να φτάνουν στο μέγιστο βαθμό. Όταν η  $V_i$  φτάσει την μέγιστη τιμή, το κελί καταρρέει (καμένο). Ένα καμένο κελί την χρονική στιγμή  $t$ , αντικαθίσταται αυτόματα από ένα κελί σε κατάσταση ηρεμίας την χρονική στιγμή  $t + 1$ .

Κάθε μουσική μονάδα που παράγεται από το Chaosynth αποτελείται από διάφορα φασματικά συστατικά. Κάθε ένα από αυτά τα συστατικά είναι μια κυματομορφή που παράγεται από έναν ψηφιακό ταλαντωτή, ο οποίος χρειάζεται δυο παραμέτρους για να λειτουργήσει: συχνότητα(Hz) και πλάτος(dB). Το κυτταρικό αυτόματο ChaOs συσχετίζει τις πιθανές καταστάσεις που μπορεί να πάρει ένα κελί με διαφορετικές τιμές συχνότητας και πλάτους. Το κυτταρικό πλέγμα διαχωρίζεται σε μικρότερους πίνακες και σε κάθε έναν από αυτούς τοποθετείται ένας ταλαντωτής. Σε κάθε επανάληψη, αυτοί παράγουν ταυτόχρονα σήματα τα οποία συνθέτουν το φάσμα της αντίστοιχης μουσικής μονάδας. Οι συχνότητες των συστατικών μιας μονάδας σε μια χρονική στιγμή καθορίζονται από τον αριθμητικό μέσο των συχνοτήτων των κελιών που σχετίζονται με τον συγκεκριμένο ταλαντωτή. Για παράδειγμα, αν υποθέσουμε ότι κάθε ταλαντωτής σχετίζεται με 9 κελιά σε μια χρονική στιγμή  $t$ , 3 κελιά αντιστοιχούν στη συχνότητα 110 Hz, 2 στη 220 Hz και τα υπόλοιπα 4 στα 880 Hz. Σε αυτή την περίπτωση η μέση συχνότητα του ταλαντωτή θα είναι 476,66 Hz. Η χρονική διάρκεια του ηχητικού συμβάντος καθορίζεται από τις επαναλήψεις του κυτταρικού αυτόματου και από τη χρονική διάρκεια των συστατικών του: για παράδειγμα, 100 επαναλήψεις των 35 millisecond μονάδων, έχει ως αποτέλεσμα ηχητικό συμβάν 3,5 δευτερολέπτων.

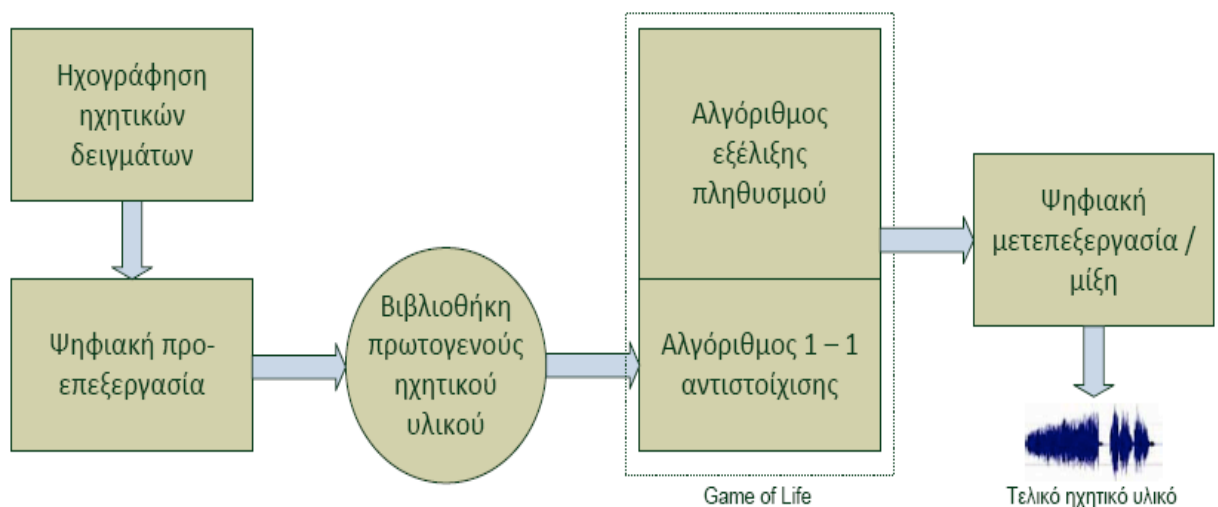
Το Chaosynth είναι ένα δυναμικό σύστημα, του οποίου οι ικανότητες να συνθέτει ασυνήθιστους ήχους είναι τεράστιες. Από τα πιο επιτυχημένα παραδείγματα, είναι η ομοιότητα που έχουν οι παραγόμενοι ήχοι με ήχους όπως το τρεχούμενο νερό, κελαηδίσματα πουλιών, ήχους από βάτραχους και έντομα[11]

# Κεφάλαιο Γ΄

## Υλοποίηση Συστήματος Ηχητικής Σύνθεσης

**Σ**Ε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση της τεχνικής ηχητικής σύνθεσης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η οποία παρουσιάζεται υπό τη μορφή διαγράμματος στο *σχήμα Γ΄.1*. Η διαδικασία θα μπορούσε να διαιρεθεί σε τρία βασικά στάδια: Στο πρώτο στάδιο περιλαμβάνεται η ψηφιακή προεπεξεργασία των ηχογραφημένων ηχητικών μονάδων για την δημιουργία της βιβλιοθήκης ηχητικού υλικού που θα αποτελέσει την «πρώτη ύλη» του συστήματος. Στο δεύτερο στάδιο περιλαμβάνεται ο συνδυασμός των δύο βασικών αλγορίθμων του συστήματος, του αλγορίθμου εξέλιξης πληθυσμού «παιχνίδι της ζωής» και του αλγόριθμου 1 – 1 αντιστοίχισης των κελιών του πρώτου αλγορίθμου με τις ηχητικές μονάδες. Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται η μίξη του τελικού ηχητικού υλικού και η ψηφιακή του μετεπεξεργασία για την απόδοση καλύτερου ηχητικού αποτελέσματος.

Επίσης, παρουσιάζονται κάποιες τεχνικές ανίχνευσης και αποφυγής περιοδικότητας και στασιμότητας του πληθυσμού. Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις που έγιναν στον αλγόριθμο εξέλιξης του πληθυσμού.



Σχήμα Γ΄.1 : Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος ηχητικής σύνθεσης.

## Γ'. 1. Στάδια Υλοποίησης

### Γ'. 1. 1. Πρώτο Στάδιο

Στο πρώτο στάδιο της υλοποίησης ανήκει η δημιουργία της βιβλιοθήκης του πρωτογενούς ηχητικού υλικού. Αυτό το υλικό θα αποτελέσει τις μουσικές μονάδες που θα συνδυαστούν και θα δώσουν το τελικό μουσικό αποτέλεσμα. Αρχικά έγινε η ηχογράφηση των ηχητικών δειγμάτων, διάρκειας 2 – 3 δευτερολέπτων.

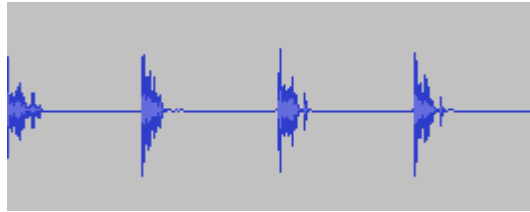
Το πλήθος των δειγμάτων θα πρέπει να είναι  $N \times N$ , όπου  $N$  η μέγιστη διάσταση της μήτρας του κυτταρικού αυτόματου "Παιχνίδι της ζωής", ούτως ώστε να γίνει η ένα προς ένα (1-1) αντιστοίχιση των ηχητικών μονάδων με τα κελιά του αυτόματου. Μήτρα του αυτόματου θεωρείται το περιβάλλον μέσα στο οποίο τοποθετείται ο αρχικός πληθυσμός και λαμβάνει χώρα η εξέλιξή του.

Η ανάλυση της αναπαράστασης στο πεδίο της συχνότητας εξαρτάται από το πλήθος  $N$  των δειγμάτων του σήματος, όπου ηχητικά δείγματα είναι οι διακριτές τιμές του ψηφιακού σήματος που αποθηκεύονται κατά την δειγματοληψία. Αύξηση του μήκους  $N$  συνεπάγεται καλύτερη ανάλυση σήματος. Επομένως, για δεδομένη τιμή του  $N$ , η ανάλυση μπορεί να αυξηθεί με προσθήκη μηδενικών δειγμάτων, και αυτό γίνεται συνήθως στο τέλος του σήματος. Η διαδικασία ονομάζεται «γέμισμα με μηδενικά» (zero padding) και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την επεξεργασία των ηχητικών μονάδων, τόσο για την βελτίωση της ανάλυσης αλλά και για τη βέλτιστη απόδοση της τεχνικής σύνθεσης, αφού δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας αρχείων με ίσο αριθμό δειγμάτων και ίδιας χρονικής διάρκειας.

Συγκεκριμένα, τα βήματα της προεπεξεργασίας των ηχητικών μονάδων είναι τα εξής: εντοπίζεται η μεγαλύτερη σε πλήθος δειγμάτων μουσική μονάδα και, έχοντας αυτό ως κριτήριο, στο τέλος κάθε αρχείου προστίθενται μηδενικά δείγματα ώστε όλα τα αρχεία να φτάσουν σε μήκος το μέγιστο.

Το βασικό μειονέκτημα της παραπάνω τεχνικής είναι ότι δημιουργεί κενά διαστήματα στο τέλος του ηχητικού σήματος (Σχήμα Γ'. 2), προκαλώντας διακεκομμένο ηχητικό αποτέλεσμα [35]. Η διόρθωση του προβλήματος γίνεται στο τελικό ηχητικό αποτέλεσμα, αφού έχει ολοκληρωθεί η μίξη των ηχητικών μονάδων, με την αποκοπή των τελευταίων μηδενικών στοιχείων. Μετά και την δημιουργία ηχητικών αρχείων με

ισάριθμα δείγματα, ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο της ψηφιακής προεπεξεργασίας των μουσικών μονάδων.



*Σχήμα Γ'. 2 : Το αποτέλεσμα της διαδικασίας γεμίματος με μηδενικά, είναι ένα διακεκομμένο ηχητικό αποτέλεσμα. (ηχητικό αρχείο στο συνοδευτικό Cd, στο φάκελο «αποτελέσματα»: listenKenaDiasthmata.wav)*

### **Γ'. 1. 2 Δεύτερο Στάδιο**

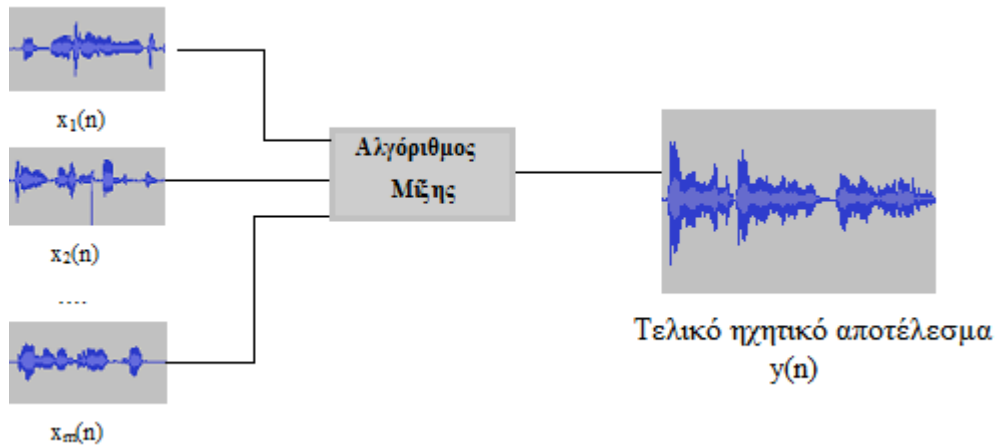
Στο δεύτερο στάδιο της υλοποίησης πραγματοποιείται η ένα προς ένα (1-1) αντιστοίχιση των ηχητικών μονάδων με τα κελιά του κυτταρικού αυτόματου, παράλληλα με τον αλγόριθμο εξέλιξης του πληθυσμού, ο οποίος περιγράφεται στο Β' κεφάλαιο (Κυτταρικό αυτόματο «Το παιχνίδι της ζωής»). Σε όλα τα μουσικά αρχεία δόθηκε ενιαία ονοματοδοσία, η οποία τα χαρακτηρίζει μοναδικά από την θέση που θα πάρει το κάθε αρχείο στην μήτρα του αυτόματου. Για παράδειγμα, το αρχείο audio11 είναι το αρχείο που θα αντιστοιχιστεί στο κελί με συντεταγμένες (1, 1), ενώ το κελί audio101 είναι το αρχείο που βρίσκεται στη δέκατη γραμμή και στην πρώτη στήλη. Στη συνέχεια, σε κάθε κελί αντιστοιχίζεται και μία μουσική μονάδα, η οποία θα ηχεί κάθε φορά που το κελί είναι ενεργό, κατά την εξέλιξη του αλγόριθμου. (Σχήμα Γ'. 3)

Audio11	Audio12	...	...	Audio110
Audio21	Audio22	...	...	Audio210
Audio31	Audio32	...	...	Audio310
...	...	...	...	...
Audio101	Audio102	...	...	Audio1010

*Σχήμα Γ'. 3 : Η Αντιστοίχιση των κελιών με τις μουσικές μονάδες. Η ονομασία υποδηλώνει σε ποια γραμμή και στήλη θα τοποθετηθεί η μουσική μονάδα*

### Γ'. 1. 3 Τρίτο Στάδιο

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται η μίξη των ηχητικών μονάδων που αντιστοιχούν στα ενεργά άτομα του πληθυσμού. Μίξη ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία δύο ή περισσότερα ηχογραφημένα σήματα συνδυάζονται σε ένα κανάλι ήχου. Περιλαμβάνει επίσης την επεξεργασία του ηχογραφημένου υλικού, για παράδειγμα την πρόσθεση ή την αφαίρεση διάφορων εφέ όπως το βάθος (reverb), την εισαγωγή φίλτρων, την επεξεργασία με παραμετρικούς ισοσταθμιστές κτλ. Η μίξη βοηθάει ώστε να γίνουν πιο εύκολα οι ρυθμίσεις που είναι απαραίτητες στο τελικό αποτέλεσμα [38, 40]. Στην περίπτωση που τα ηχητικά σήματα είναι ψηφιακά, η μίξη γίνεται με έναν απλό αλγόριθμο μίξης:



Σχήμα Γ'. 4 : Σύστημα μίξης ψηφιακών ηχητικών σημάτων.

Έστω  $x_m(n)$  το κανάλι ήχου  $m$ , όπου  $m = 1, 2, 3, \dots$  και το κάθε ένα από τα κανάλια ήχου έχει ένα ειδικό βάρος  $w_m$

Το άθροισμα  $M$  ηχητικών σημάτων παριστάνεται από τον τύπο:

$$\sum_{m=1}^M (w_m x_m(n)) \quad (1)$$

Για το άθροισμα  $W$  των βαρών των  $M$  ηχητικών σημάτων ισχύει:

$$W = \sum_{m=1}^M w_m \quad (2)$$

Το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα  $y(n)$  δίνεται από τον τύπο:

$$y(n) = \frac{1}{W} \sum_{m=1}^M (w_m x_m(n)) \quad (3)$$

Στην περίπτωση της ζυγισμένης μίξης, θεωρούμε ότι τα ηχητικά σήματα έχουν το ίδιο βάρος, δηλαδή  $w_1 = w_2 = w_3 \dots = w_m$

Επομένως, ο παραπάνω τύπος γίνεται :

$$y(n) = \sum_{m=1}^M x_m(n) \quad (4)$$

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται ζυγισμένη μίξη των ηχητικών σημάτων [37]. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε γενιά, προστίθεται το πλήθος των ηχητικών δειγμάτων της κάθε ηχητικής μονάδας που αντιστοιχεί σε ενεργό κελί και το άθροισμα αυτών διαιρείται με τον αριθμό των ενεργών κελιών. Το ηχητικό αποτέλεσμα που προκύπτει αποτελεί το ηχητικό υλικό της συγκεκριμένης γενιάς. Καθώς το κυτταρικό αυτόματο εξελίσσεται, το ηχητικό υλικό κάθε γενιάς προστίθεται στο προηγούμενο.

Σε αυτό το σημείο γίνεται η αποκοπή των μηδενικών διαστημάτων στο τέλος κάθε μουσικού αρχείου που δημιουργήθηκαν από την απαραίτητη για τη μίξη διαδικασία γεμίματος μηδενικών. Το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα παράγεται από το σύνολο των γενεών που προέκυψαν μετά το πέρας της εξομοίωσης λειτουργίας του κυτταρικού αυτόματου.

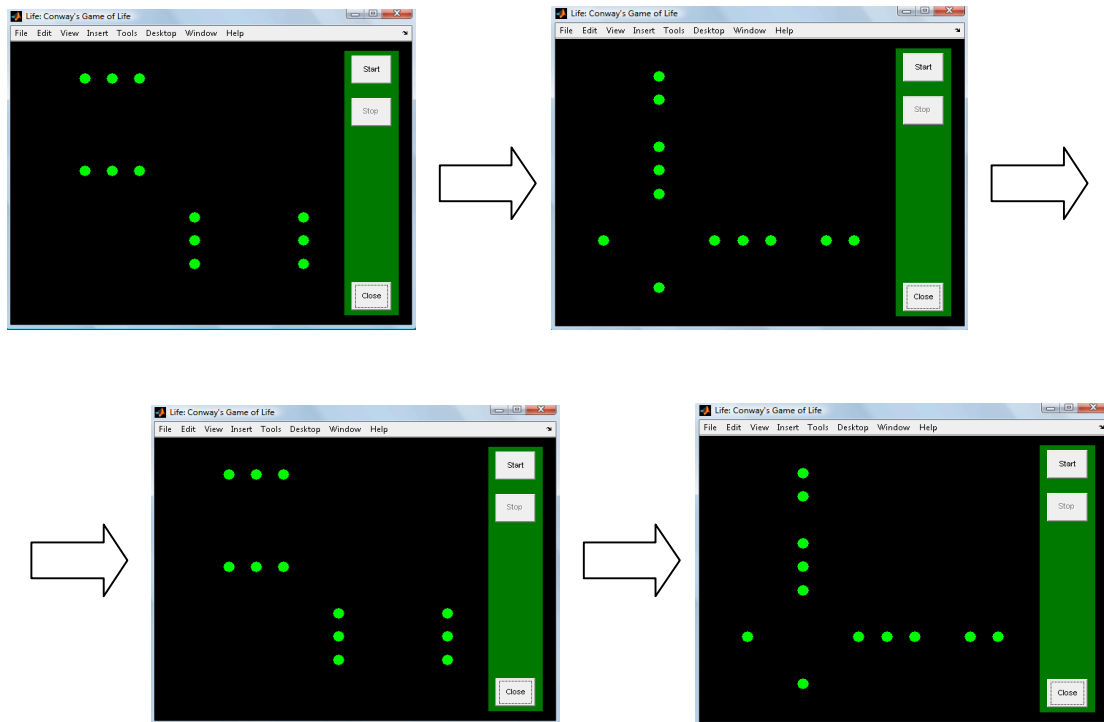
#### **Γ'. 1. 4. Τεχνικές ανίχνευσης και αποφυγής περιοδικότητας και στασιμότητας**

Μία ενέργεια που εκτελείται παράλληλα με το τρίτο στάδιο είναι ο έλεγχος για την αποφυγή του φαινομένου της περιοδικής εμφάνισης συγκεκριμένης ακολουθίας γενεών, καθώς και για την εμφάνιση στασιμότητας του πληθυσμού.

Η περιοδική εμφάνιση κάποιας ακολουθίας γενεών είναι ένα φαινόμενο που εξαρτάται από την γενεά έναρξης του αλγορίθμου εξέλιξης, εφ' όσον οι μεταβατικοί κανόνες παραμένουν οι ίδιοι σε κάθε εξομοίωση του κυτταρικού αυτόματου. Ο όρος περιοδικότητα αναφέρεται στην επανάληψη ενός φαινομένου κατά τακτά διαστήματα [36]. Κατά την διάρκεια εξέλιξης του πληθυσμού, κάποια γενιά μπορεί να επαναληφθεί, να έχουμε δηλαδή τον ίδιο αριθμό ζωντανών ατόμων στις ίδιες θέσεις,

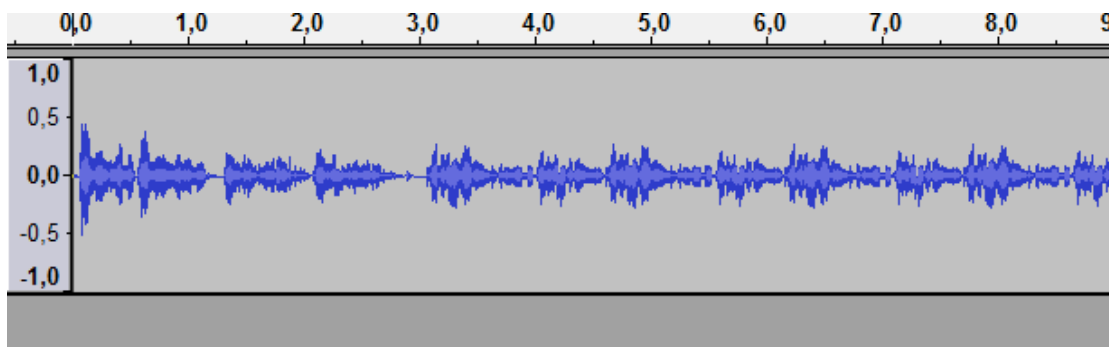


γεγονός που θα οδηγήσει στην επανάληψη και των γενεών που θα ακολουθήσουν, ή μπορεί δύο διαφορετικές γενιές να εναλλάσσονται συνεχώς μεταξύ τους (Σχήμα Γ'. 5).



Σχήμα Γ'. 5 : Γενιές που εναλλάσσονται μεταξύ τους.

Αυτή η περιοδικότητα οδηγεί στην δημιουργία «περιοδικού» ηχητικού υλικού, δηλαδή μουσικό αρχείο κατά το οποίο ένα ρυθμικό μοτίβο επαναλαμβάνεται συνεχώς. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το αρχείο listenPeriodikoQCross.wav (Σχήμα Γ'. 6). Μετά το τρίτο δευτερόλεπτο παρατηρείται το φαινόμενο της περιοδικότητας, το οποίο είναι εμφανές στο γραφικό περιβάλλον, όμως αυτό καταγράφεται και στο ηχητικό αρχείο.



Σχήμα Γ'. 6 : Περιοδικό ηχητικό υλικό. Μετά το τρίτο δευτερόλεπτο επαναλαμβάνεται το ίδιο μοτίβο.

Ο όρος στασιμότητα αναφέρεται στην περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει περαιτέρω εξέλιξη του πληθυσμού είτε γιατί τα ενεργά κελιά είναι σε τέτοια θέση ώστε οι μεταβατικοί κανόνες να μην επιτρέπουν την γέννηση ή το θάνατο νέων ατόμων, είτε γιατί η εξέλιξη οδήγησε σε πρόωρη εξαφάνιση του πληθυσμού. Σε αυτή την περίπτωση τα ηχητικά αποτελέσματα που παράγονται μετά τη σταθεροποίηση του πληθυσμού είναι μηδενικά.

### **1<sup>η</sup> Περίπτωση Στασιμότητας: Οι μεταβατικοί κανόνες δεν επιτρέπουν την γέννηση ή το θάνατο.**

Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το αρχείο listenStasimoCat.wav , όπου το ηχητικό αρχείο δεν ξεπερνά ποτέ τα τέσσερα δευτερόλεπτα, χρόνος που συμπίπτει με την σταθεροποίηση του πληθυσμού.

### **2<sup>η</sup> Περίπτωση Στασιμότητας: Πρόωρη εξαφάνιση του πληθυσμού.**

Όπως και στην πρώτη περίπτωση, το ηχητικό αρχείο listenDisCross.wav δεν μπορεί να ξεπεράσει τα τέσσερα δευτερόλεπτα, λόγω της απουσίας ζωντανών ατόμων του πληθυσμού.

Ο παραπάνω έλεγχος πραγματοποιείται ως εξής :

Κάθε νέα γενιά που προκύπτει συγκρίνεται με όλες τις προηγούμενες. Εάν εντοπιστεί γενιά που είναι όμοια με κάποια προηγούμενη, δηλαδή αν έχουν οι δύο γενιές τον ίδιο αριθμό ενεργών ατόμων και στις ίδιες θέσεις, τότε ενεργοποιείται τυχαία ένας αριθμός ατόμων. Η ενεργοποίηση αυτών των ατόμων έχει ως αποτέλεσμα την διαρκή εξέλιξη του πληθυσμού αλλά και την αποφυγή των περιοδικών μορφών εξέλιξης.

## **Γ'. 2. Παραλλαγές**

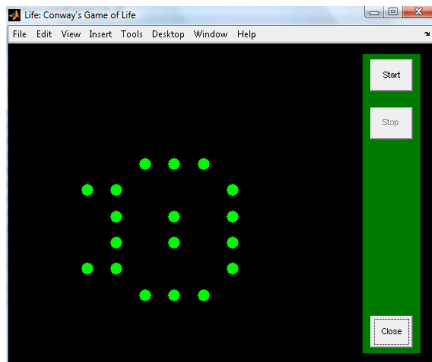
Προκειμένου να είναι πιο ολοκληρωμένη η μελέτη της εξέλιξης του πληθυσμού του κυτταρικού αυτόματου αλλά και του παραγόμενου ηχητικού αποτελέσματος, εφαρμόστηκαν στον αλγόριθμο όχι μόνο διαφορετικοί αρχικοί πληθυσμοί, αλλά έγινε και μια προσπάθεια τροποποίησης των μεταβατικών κανόνων που εφαρμόζονται σε αυτούς. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω:

### **Γ'. 2. 1 Διαφοροποίηση Αρχικών Πληθυσμών**

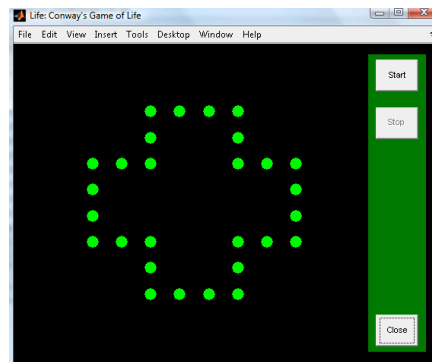
Για την παρούσα εργασία εφαρμόστηκε μία ομάδα αρχικών πληθυσμών (Σχήμα Γ'. 7), που έχει παρατηρηθεί ότι παρουσιάζουν ενδιαφέρουσα συμπεριφορά κατά την εξέλιξη του κυτταρικού αυτόματου «παιχνίδι της ζωής».

Επισημαίνεται ότι ο όρος «παιχνίδι της ζωής» αναφέρεται στο κυτταρικό αυτόματο που ακολουθεί τους κανόνες του Conway που περιγράφονται στο πρώτο κεφάλαιο.

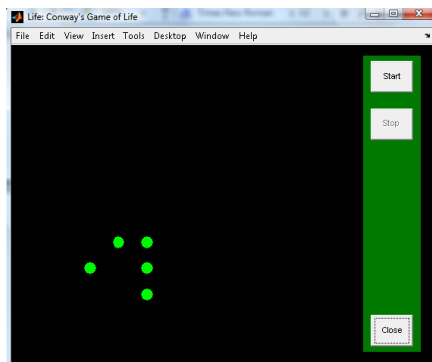
Συμπτωματικά ή όχι, αυτοί οι αρχικοί πληθυσμοί φαίνεται να οδηγούν και σε καλύτερα μουσικά αποτελέσματα.[1] Επίσης, οι εν λόγω πληθυσμοί επιλέχθηκαν λόγω του ότι μπορούν να οριοθετηθούν μέσα στη μήτρα του κυτταρικού αυτόματου που υλοποιήθηκε, η οποία για τις ανάγκες της εργασίας αυτής είναι περιορισμένου μεγέθους.



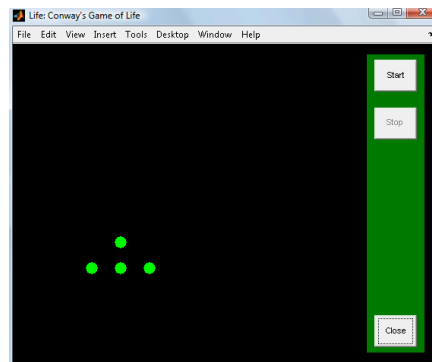
Γάτα (Cheshire Cat)



Σταυρός (Cross)



Ανεμοπλάνο (Glider)



Σταυρός Τετάρτων (Quarter Cross)

*Σχήμα Γ'. 7 : Παραδείγματα αρχικών πληθυσμών που εμφανίζουν ενδιαφέρουσα συμπεριφορά μετά την εφαρμογή των μεταβατικών κανόνων του αυτόματου «Παιχνίδι της Ζωής».*

## Γ'. 2. 2 Τροποποίηση Μεταβατικών Κανόνων

Οι προσπάθειες για την τροποποίηση των μεταβατικών κανόνων εστίαστηκαν στην αλλαγή των αριθμών που τους χαρακτηρίζουν. Εκτός από την αναλογία (2, 3, 3, 3) είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και άλλες εναλλακτικές αναλογίες αριθμών, ακολουθώντας πάντα τη γενική φόρμα ( $E_{min}$ ,  $E_{max}$ ,  $F_{min}$ ,  $F_{max}$ ) όπου  $E_{min} \leq E \leq E_{max}$

και  $F_{\min} \leq F \leq F_{\max}$ , [1] όπως αυτή περιγράφηκε στο Β' κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

Οι τροποποιήσεις που έγιναν αφορούν μόνο τους μεταβατικούς κανόνες, ενώ χρησιμοποιήθηκαν οι αρχικοί πληθυσμοί που περιγράφηκαν στην ενότητα Γ'. 1. 1

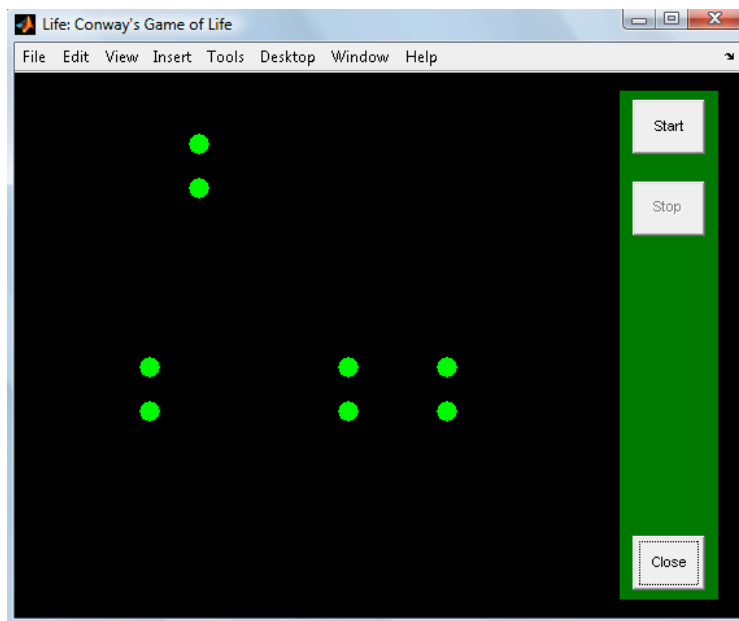
Παρατηρήθηκε ότι με την εφαρμογή του μοτίβου (4, 6, 6, 6) ο πληθυσμός οδηγείται σε εξαφάνιση σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα από ότι με τους κανόνες του Conway.

Το ίδιο αποτέλεσμα παρουσιάστηκε και με την εφαρμογή του μοτίβου (2, 6, 6, 6)

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοτίβου (1, 3, 3, 3) είναι το ίδιο με το προηγούμενο μοτίβο για τους πληθυσμούς «Σταυρό» «Σταυρό Τετάρτων» και «Ανεμόπτερο». Για το πληθυσμό «Γάτα», όμως παρατηρείται το εξής:

Στο γραφικό περιβάλλον φαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της εξέλιξής του ο πληθυσμός σταθεροποιείται (Σχήμα Γ'. 8). Όμως δεν συμβαίνει το ίδιο και για το ηχητικό αποτέλεσμα, στο οποίο μετά τη σταθεροποίηση του πληθυσμού επαναλαμβάνεται το ίδιο μουσικό μοτίβο που αντιστοιχεί στην τελευταία γενιά. Τα στάδια εξέλιξης του πληθυσμού καθώς και το ηχητικό αποτέλεσμα παρατίθενται στο Δ' κεφάλαιο.

Σε κάθε περίπτωση πάντως, εφ' όσον υπάρχουν οι τεχνικές ελέγχου που περιγράφονται στην ενότητα 3. 1. 4 όποιο και να είναι το αποτέλεσμα, τα νέα άτομα που θα ενεργοποιηθούν δεν επιτρέπουν την στασιμότητα ή την εξαφάνιση του πληθυσμού.



Σχήμα Γ'. 8 : Γενιά Σταθεροποίησης Αρχικού πληθυσμού «Γάτα», μετά την εφαρμογή των κανόνων με σειρά (1, 3, 3, 3)

# Κεφάλαιο Δ΄

## Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

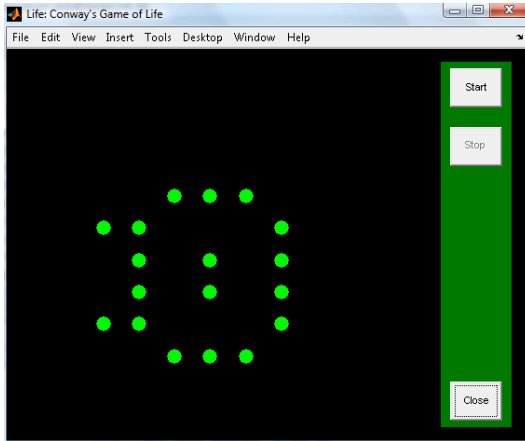
**Σ**ΤΗΝ πρώτη ενότητα αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζεται σε στάδια η εξέλιξη ενός αριθμού αρχικών πληθυσμών που διέπονται από τους μεταβατικούς κανόνες του Conway και ακολουθούν την φόρμα (2, 3, 3, 3), οι οποίοι οδηγούν στα φαινόμενα της περιοδικότητας και της στασιμότητας που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Στην δεύτερη ενότητα παρουσιάζονται τα στάδια της εξέλιξης των ίδιων πληθυσμών όταν οι μεταβατικοί κανόνες που εφαρμόζονται σε αυτούς ακολουθούν τη φόρμα (1, 3, 3, 3). Επίσης, σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθεται και μια ενότητα που αφορά προτάσεις για μελλοντική έρευνα και επέκταση της παρούσας εργασίας.

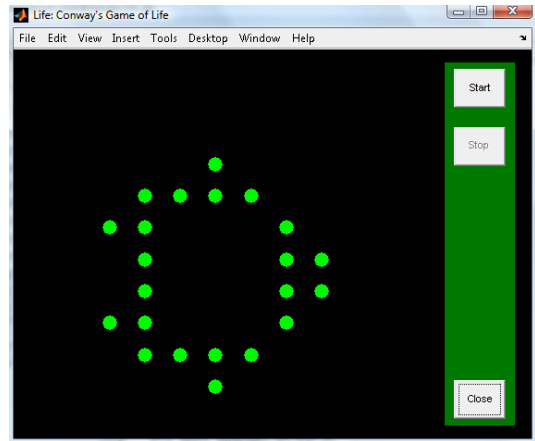
### Δ΄. 1 Εξέλιξη που ακολουθεί τους κανόνες του Conway

#### Δ΄. 1. 1 Πληθυσμός «Γάτα»

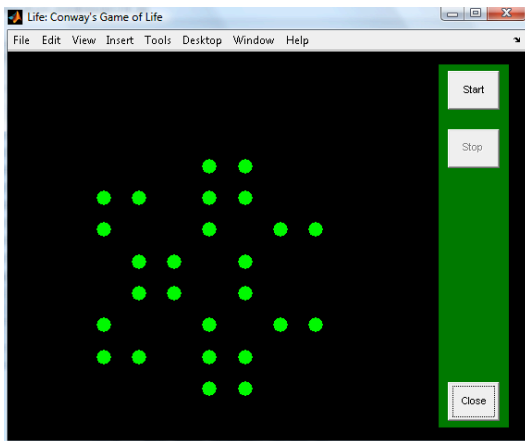
Αρχικά παρουσιάζεται η εξέλιξη του αρχικού πληθυσμού που ονομάζεται Γάτα (Cat), ο οποίος μετά τη δημιουργία δεκατριών γενεών παρουσιάζει το φαινόμενο της στασιμότητας. Τα ενεργά άτομα του πληθυσμού της δέκατης τρίτης γενιάς είναι σε τέτοια θέση, ώστε ο πληθυσμός δεν μπορεί να εξελιχθεί. Το κάθε άτομο επιβιώνει γιατί έχει ακριβώς δύο γείτονες. Το ηχητικό αποτέλεσμα σταματάει επίσης σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (listenStasimoCat.wav). Για το λόγο αυτό, στην επόμενη γενιά ενεργοποιούνται και πάλι τυχαία άτομα προκειμένου να συνεχιστεί η εξέλιξη.



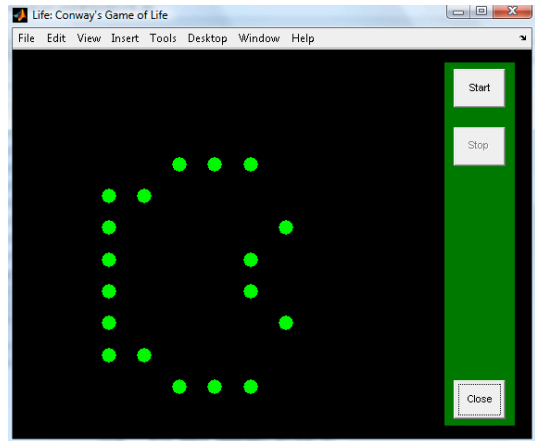
*Γενιά Πρώτη (Αρχ. Πληθυσμός «Γάτα»)*



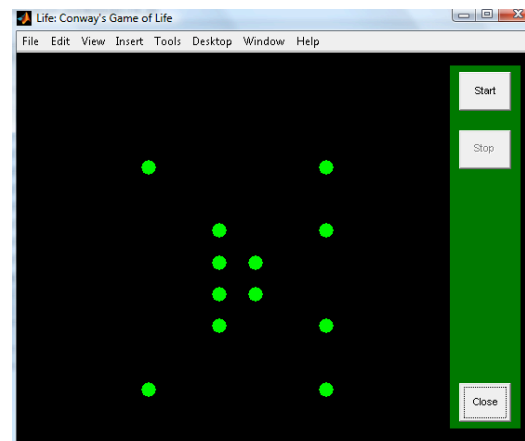
*Γενιά Δεύτερη...*



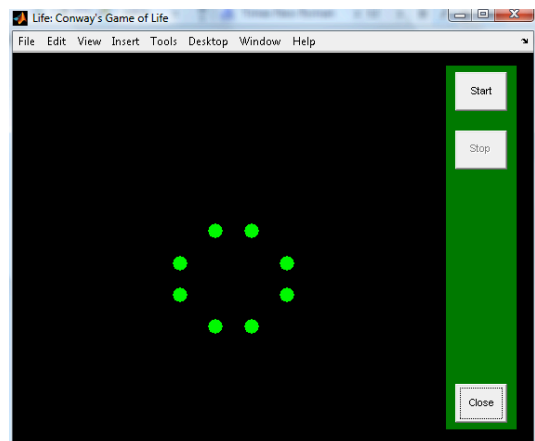
*Γενιά Τρίτη...*



*Γενιά Τέταρτη...*



*...Γενιά Δωδέκατη...*

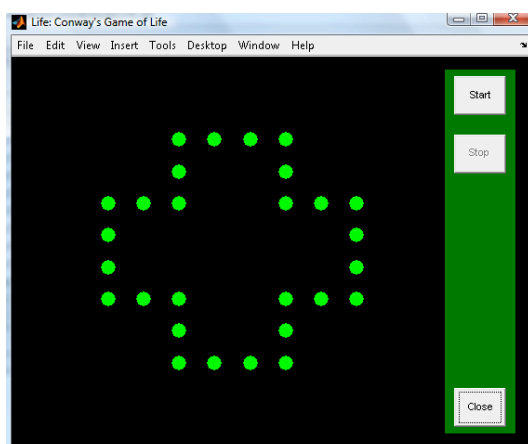


*...Γενιά Δέκατη Τρίτη.*

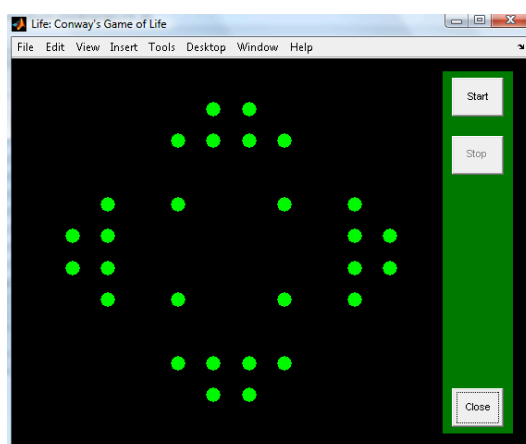
## Δ'. 1. 2 Πληθυσμός «Σταυρός»

Ακολουθεί η εξέλιξη του πληθυσμού Σταυρός (Cross), η οποία καταλήγει σε εξαφάνιση του αρχικού πληθυσμού, μόλις μετά από δέκα γενιές. Επομένως, σταματάει και η εξέλιξη του ηχητικού αποτελέσματος. (listenDisCross.wav)

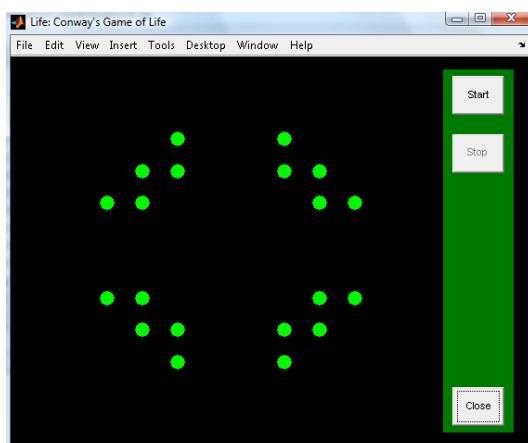
Η ενεργοποίηση τυχαίων ατόμων δίνουν και πάλι την ευκαιρία στον πληθυσμό να συνεχίσει την εξέλιξη.



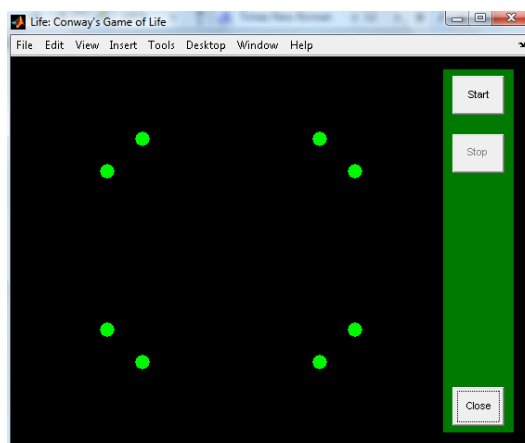
*Γενιά Πρώτη (Αρχ. Πληθυσμός «Σταυρός»)*...



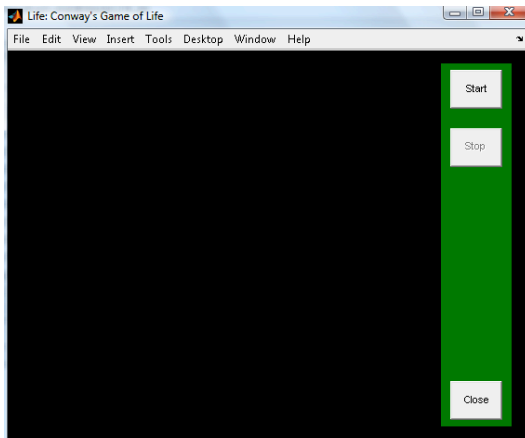
*Γενιά Δεύτερη...*



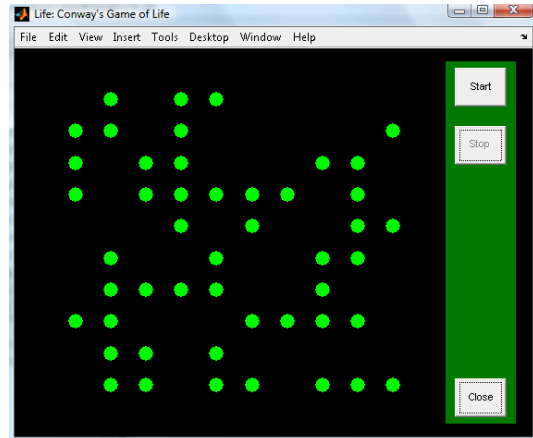
*Γενιά Τρίτη...*



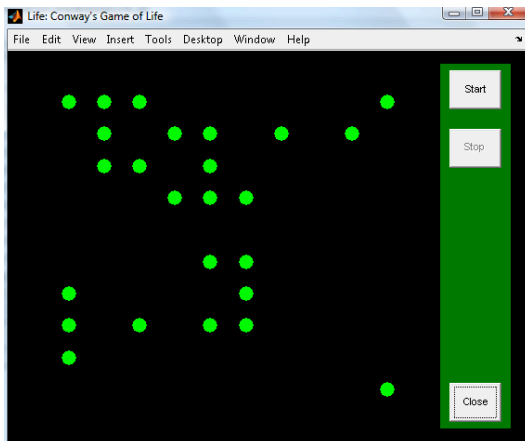
*...Γενιά Ένατη...*



...Γενιά Δέκατη...



...Γενιά Ενδέκατη...



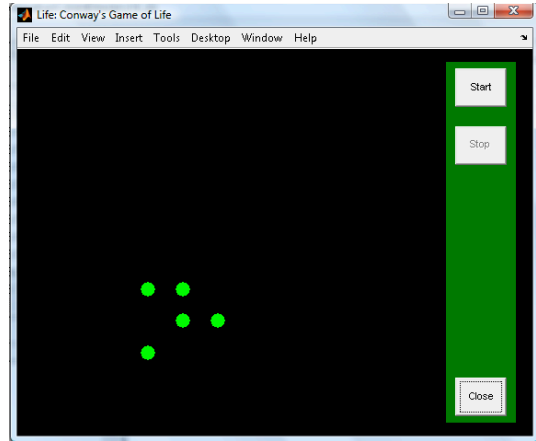
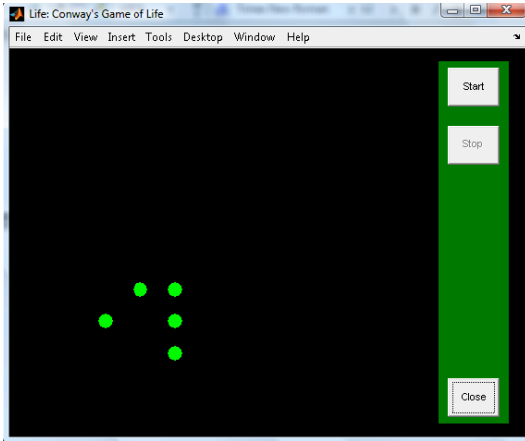
...Γενιά Δωδέκατη...

### Δ'. 1. 3 Πληθυσμός «Ανεμόπτερο»

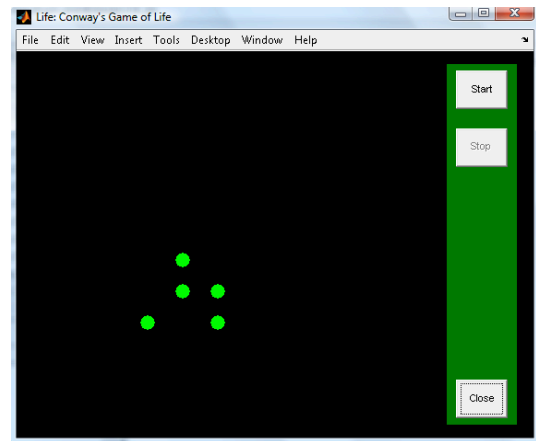
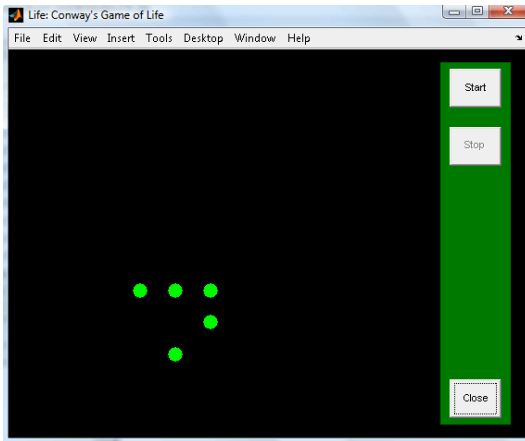
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται στιγμιότυπα από την εξέλιξη του αρχικού πληθυσμού “Ανεμόπτερο ”(Glider), ενός πληθυσμού που οδηγείται σε περιοδική εξέλιξη όταν εφαρμοστούν σε αυτόν οι μεταβατικοί κανόνες. Αυτό αποτυπώνεται και στο ηχητικό αρχείο, στο οποίο μετά από κάποιο σημείο, ένα συγκεκριμένο ηχητικό μοτίβο επαναλαμβάνεται επ’ άοριστον (listenPeriodicGlider.wav).

Μετά από σαράντα γενιές, παρατηρείται ότι η τεσσαρακοστή πρώτη γενιά είναι όμοια με την πρώτη. Για το λόγο αυτό, ενεργοποιούνται τυχαία άτομα προκειμένου να συνεχιστεί η εξέλιξη.



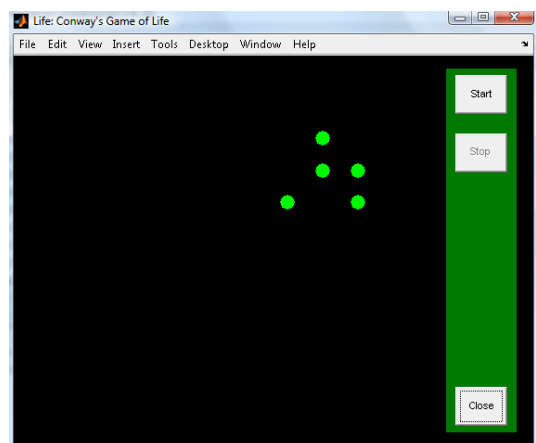
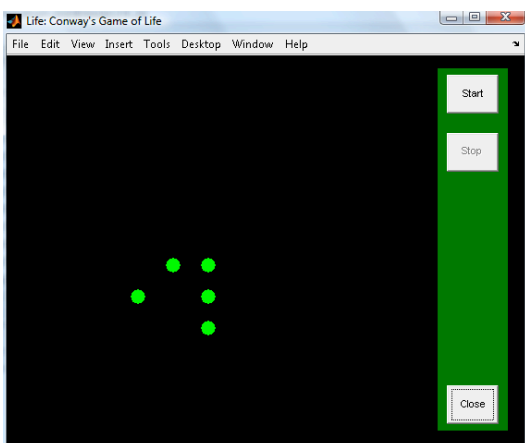


*Γενιά Πρώτη (Αρχ. Πληθυσμός “Ανεμόπτερο”)    Γενιά Δεύτερη...*



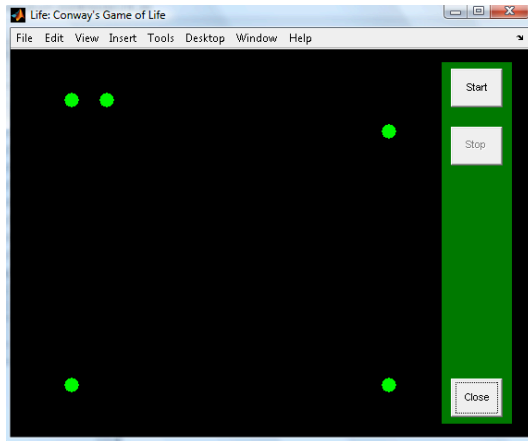
*Γενιά Τρίτη...*

*Γενιά Τέταρτη...*

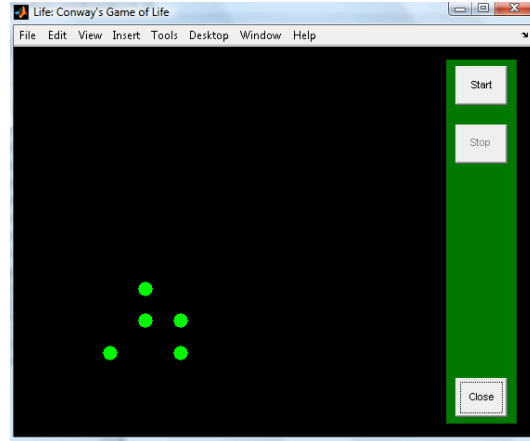


*Γενιά Πέμπτη...*

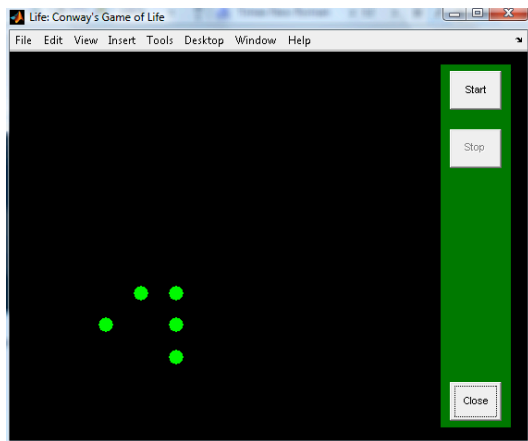
*...Γενιά Εικοστή...*



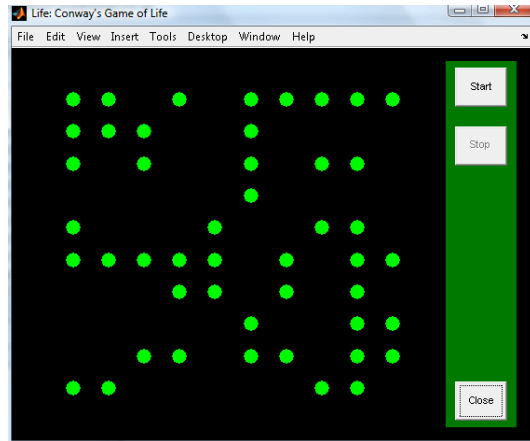
*...Γενιά Τριακοστή...*



*...Γενιά Τεσσαρακοστή...*



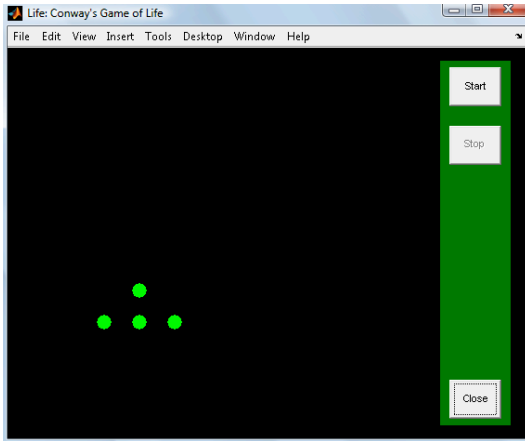
*Γενιά Τεσσαρακοστή Πρώτη...*



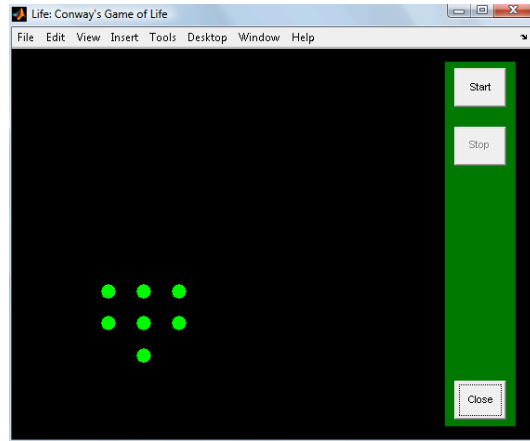
*Γενιά Τεσσαρακοστή Δεύτερη...*

#### **Δ'. 1. 4 Πληθυσμός «Σταυρός Τετάρτων»**

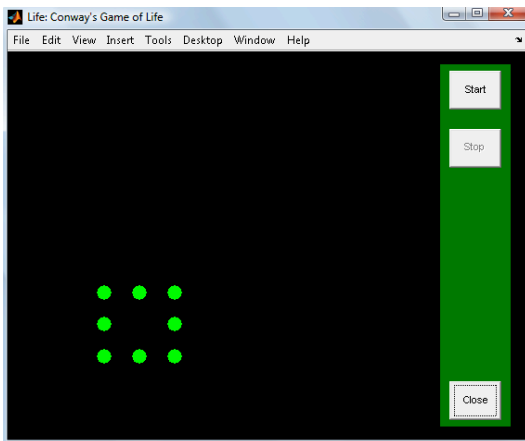
Τελευταία παρουσιάζεται η εξέλιξη του πληθυσμού που ονομάζεται Σταυρός Τετάρτων (quarter cross), κατά την οποία εμφανίζεται το φαινόμενο της περιοδικότητας. Η δέκατη και η ενδέκατη γενιά εναλλάσσονται μεταξύ τους και οι θέσεις των ενεργών ατόμων είναι τέτοιες, ώστε δεν επιτρέπουν το θάνατο ή τη γέννηση νέων ατόμων. Η τυχαία ενεργοποίηση νέων ατόμων θα οδηγήσει τον πληθυσμό σε συνεχή εξέλιξη.



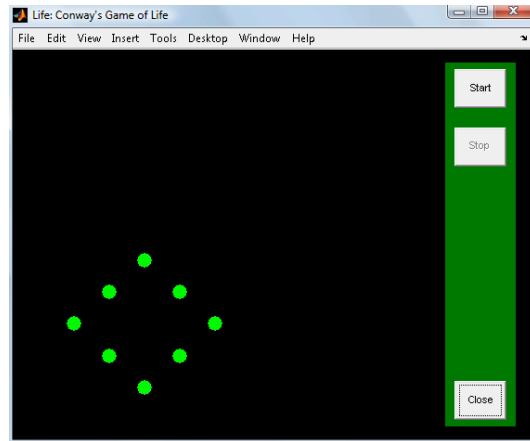
Γενιά Πρώτη...  
(Αρχ. Πληθυσμός «Σταυρός Τετάρτων»)



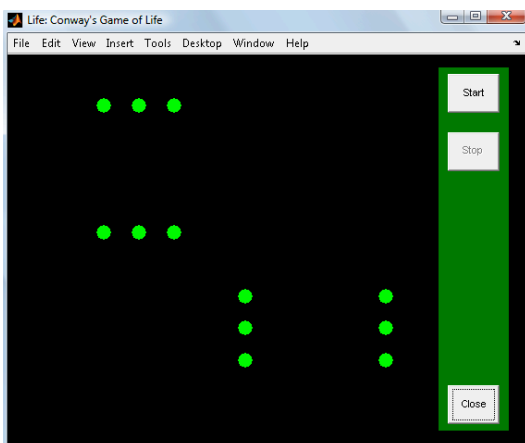
Γενιά Δεύτερη...



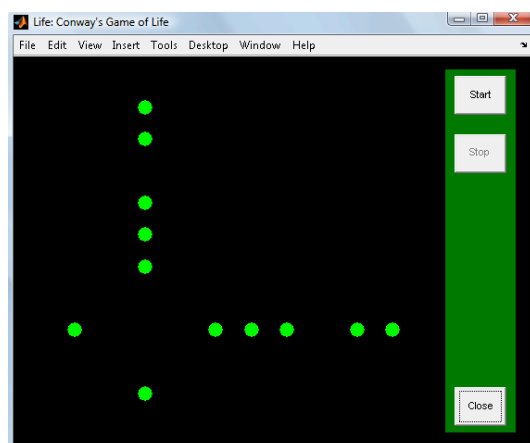
...Γενιά Πέμπτη...



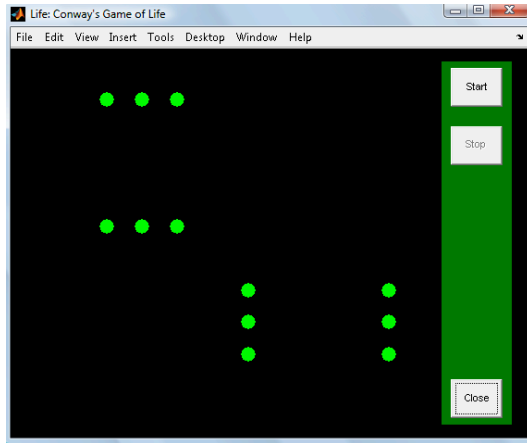
Γενιά Έκτη...



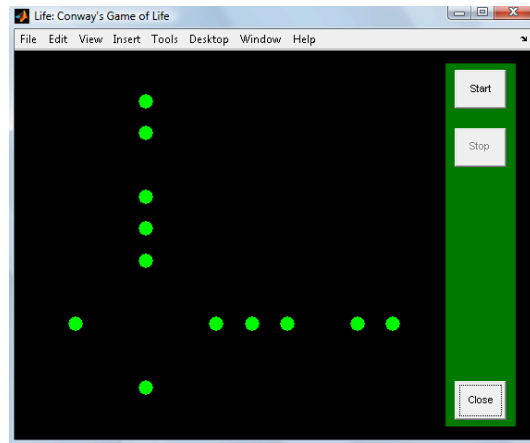
...Γενιά Δέκατη...



Γενιά Ενδέκατη...

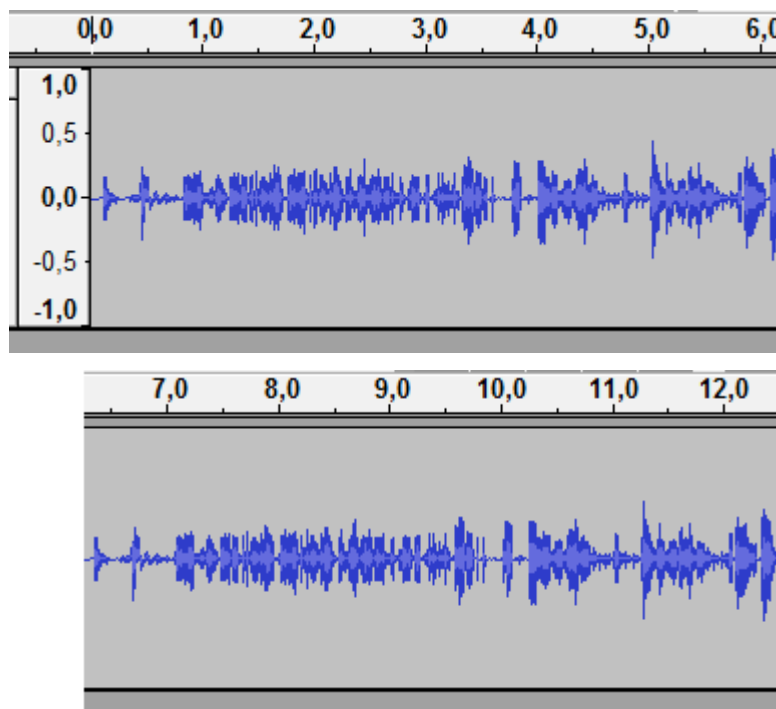


Γενιά Δωδέκατη...



Γενιά Δέκατη Τρίτη...

Στο παρακάτω σχήμα Δ'.1 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του ηχητικού υλικού που προκύπτει από την εξέλιξη του πληθυσμού (listenPeriodikoQCross.wav). Είναι φανερό πως επαναλαμβάνεται το ίδιο μοτίβο στο διάγραμμα χρόνου - συχνότητας διάρκειας περίπου έξι δευτερολέπτων.



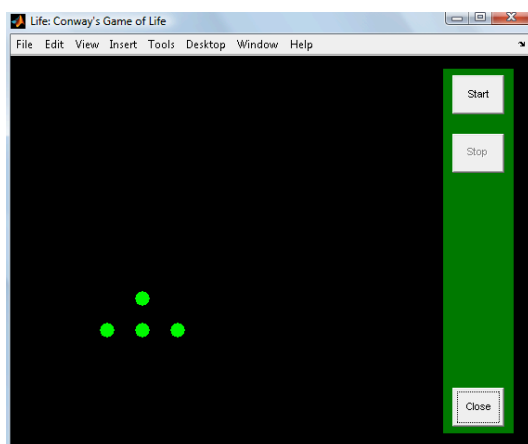
Σχήμα Δ'.1 : Το ηχητικό υλικό που καταγράφεται κατά τη διάρκεια εξέλιξης του πληθυσμού «Σταυρός Τετάρτων» είναι περιοδικό και επαναλαμβάνεται σε διάστημα περίπου έξι δευτερολέπτων.

## Δ'. 2 Εξέλιξη που ακολουθεί το μοτίβο (1, 3, 3, 3)

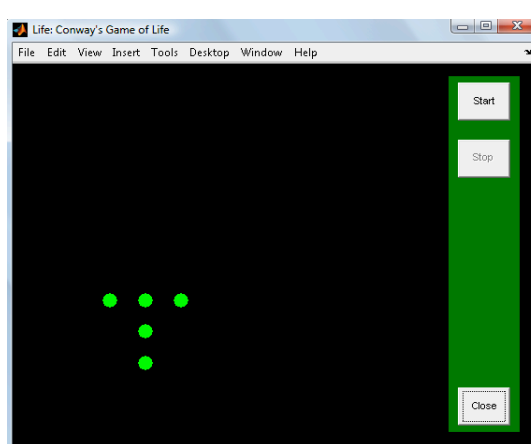
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για να ενεργοποιηθεί ένα άτομο πρέπει να έχει ακριβώς τρεις γείτονες, ενώ για να παραμείνει ενεργό, οι γείτονες θα πρέπει να είναι από ένας μέχρι τρεις.

### Δ'. 2. 1 Πληθυσμός «Σταυρός Τετάρτων»

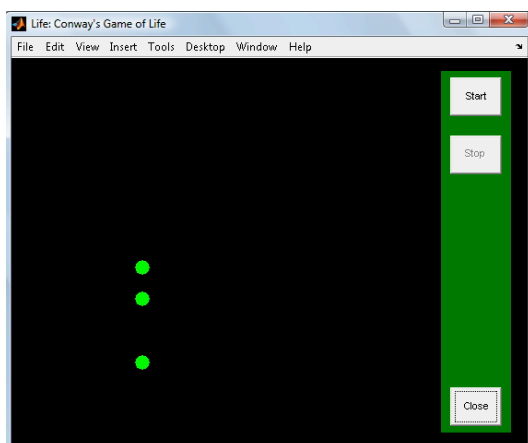
Η εφαρμογή του μοτίβου (1, 3, 3, 3) στον συγκεκριμένο πληθυσμό οδηγεί πολύ γρήγορα στην σταθεροποίηση του, μόλις σε τέσσερις γενιές. Το ηχητικό υλικό δεν ξεπερνάει το ένα δευτερόλεπτο (listen13stasimoQCross.wav).



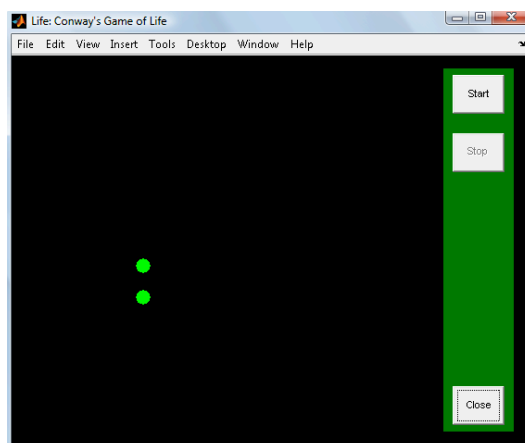
*Γενιά Πρώτη...*



*Γενιά Δεύτερη...*



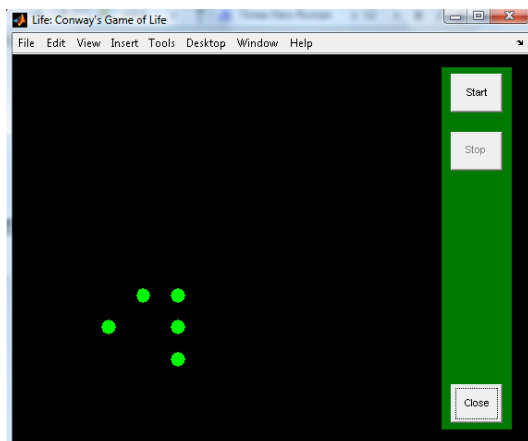
*Γενιά Τρίτη...*



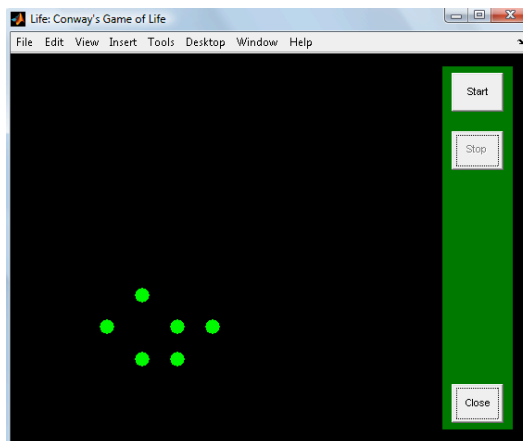
*Γενιά Τέταρτη.*

## Δ'. 2. 2 Πληθυσμός «Ανεμόπτερο»

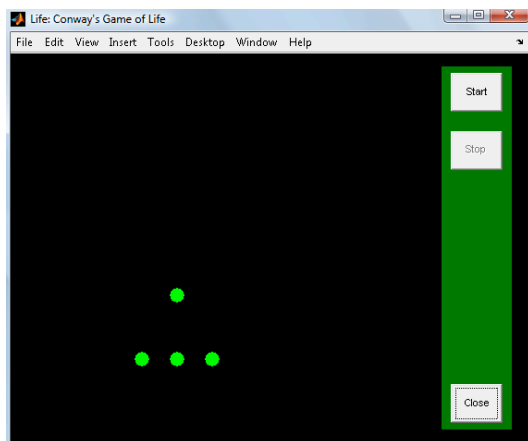
Η εξέλιξη του πληθυσμού σταματάει μετά την έκτη γενιά και οδηγείται σε εξαφάνιση, ενώ το ηχητικό υλικό είναι επίσης πολύ μικρής διάρκειας (listen13DisGlider.wav).



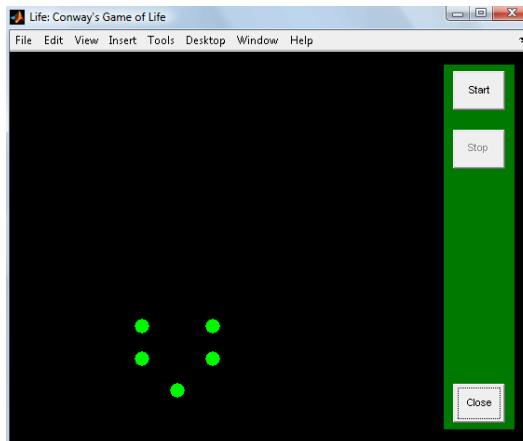
*Γενιά Πρώτη...*



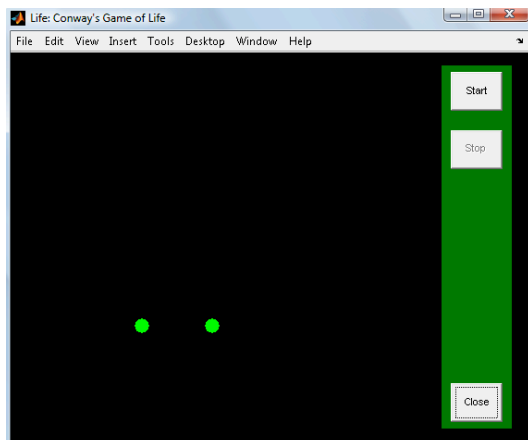
*Γενιά Δεύτερη...*



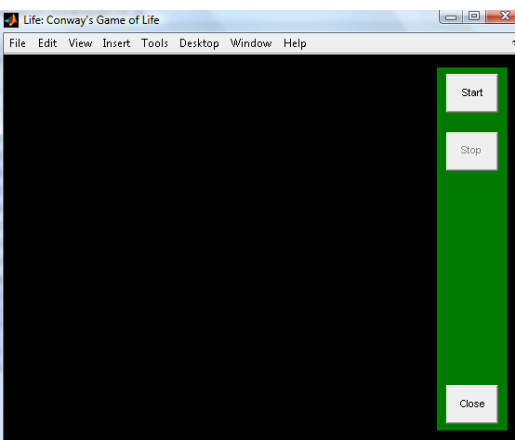
*Γενιά Τρίτη...*



*Γενιά Τέταρτη...*



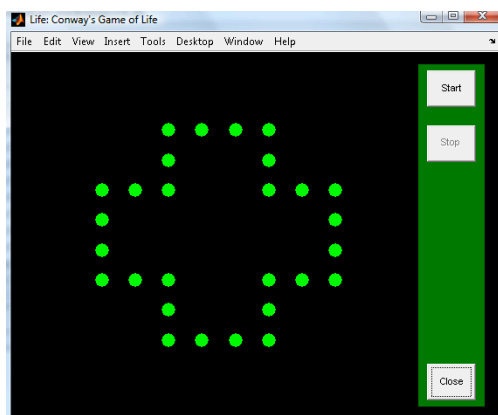
*Γενιά Πέμπτη...*



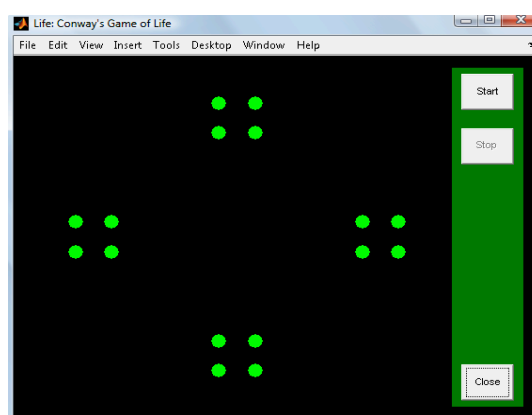
*Γενιά Έκτη.*

### Δ'. 2. 3 Πληθυσμός «Σταυρός»

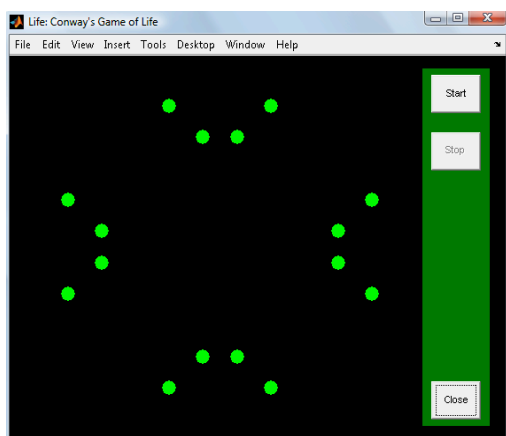
Παρόμοια αποτελέσματα με τους δύο προηγούμενους πληθυσμούς έχει και ο αρχικός πληθυσμός «Σταυρός», ο οποίος οδηγείται σε εξαφάνιση μετά από τέσσερις γενιές. Φυσικά αυτό οδηγεί και σε ένα πολύ μικρό χρονικά ηχητικό αποτέλεσμα (listen13DisCross.wav).



*Γενιά Πρώτη...*



*Γενιά Δεύτερη...*



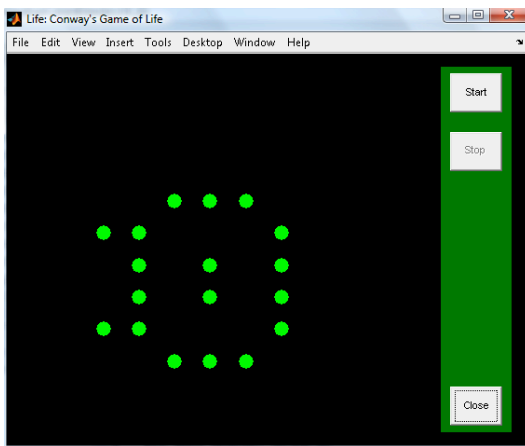
*Γενιά Τρίτη...*



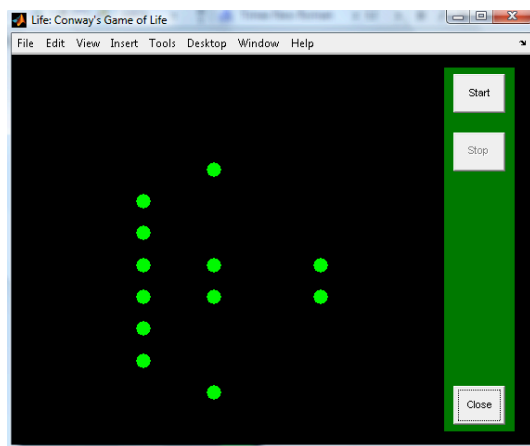
*Γενιά Τέταρτη.*

## Δ'. 2. 4 Πληθυσμός «Γάτα»

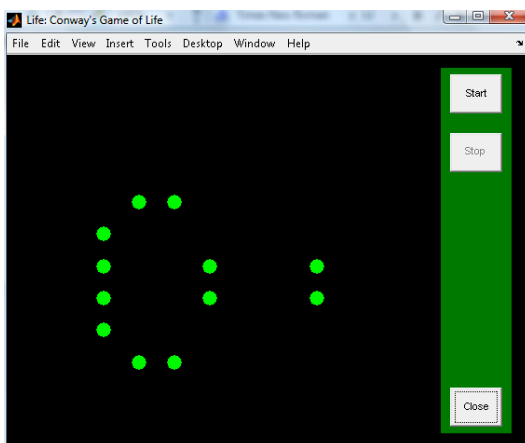
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέλιξη αυτού του πληθυσμού, κατά τη διάρκεια της οποίας στο γραφικό περιβάλλον φαίνεται ότι ο πληθυσμός σταθεροποιείται. Όμως δεν συμβαίνει το ίδιο και για το ηχητικό αποτέλεσμα, στο οποίο μετά τη σταθεροποίηση του πληθυσμού επαναλαμβάνεται το ίδιο μουσικό μοτίβο που αντιστοιχεί στην τελευταία γενιά, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του σχήματος Δ'.2 (listen13StasimoCat.wav). Αυτό ερμηνεύεται από τη θέση που έχουν τα ζωντανά άτομα σε σχέση με τους γείτονές τους, σε συνδυασμό με τους μεταβατικούς κανόνες που ισχύουν στην συγκεκριμένη περίπτωση.



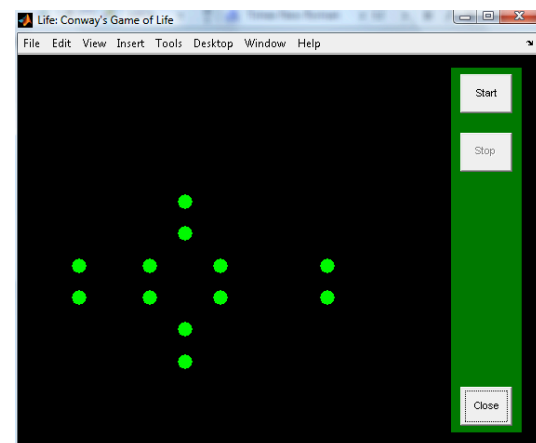
Γενιά Πρώτη...



Γενιά Δεύτερη...

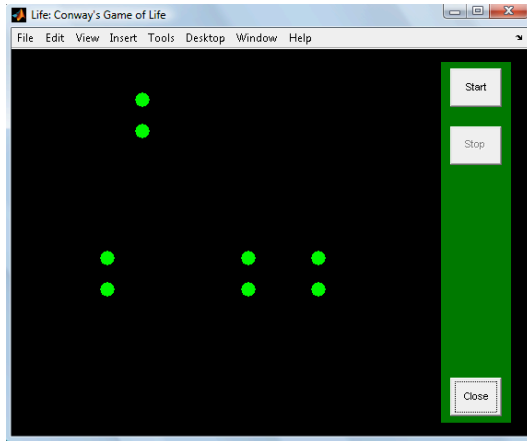


Γενιά Τρίτη...

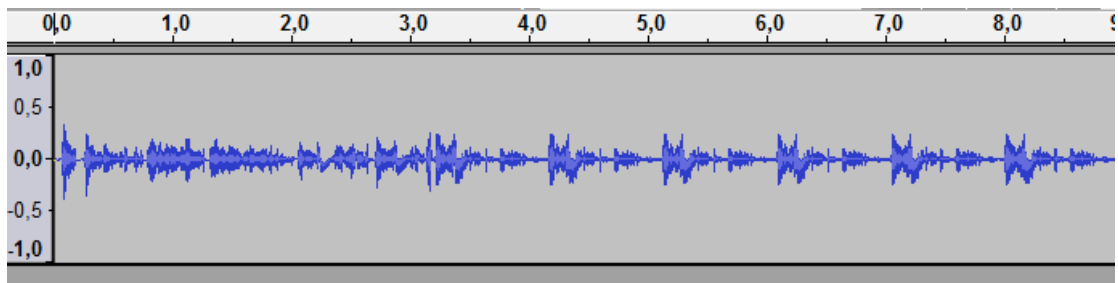


Γενιά Τέταρτη...





...Γενιά Δέκατη Έκτη.



*Σχήμα Δ'. 2 : Αποτύπωση ηχητικού υλικού του αρχικού πληθυσμού «Γάτα», μετά την εφαρμογή των κανόνων με σειρά (1, 3, 3, 3)*

Για όλους τους αρχικούς πληθυσμούς που προαναφέρθηκαν, η εξέλιξη συνεχίζεται κανονικά μετά την εφαρμογή των τεχνικών ανίχνευσης περιοδικότητας και στασιμότητας που περιγράφηκαν στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Τα ηχητικά αποτελέσματα που προκύπτουν, παρατίθενται στο συνοδευτικό Cd, στο φάκελο «αποτελέσματα»:

#### **Πληθυσμοί που ακολουθούν τον κανόνα του Conway (2, 3, 3, 3):**

Για τον πληθυσμό Γάτα : `listenConCat.wav`  
 Για τον πληθυσμό Σταυρό : `listenConCross.wav`  
 Για τον πληθυσμό Ανεμόπτερο : `listenConGlider.wav`  
 Για τον πληθυσμό Σταυρό Τετάρτων : `listenConQCross.wav`

#### **Πληθυσμοί που ακολουθούν το μοτίβο (1, 3, 3, 3):**

Για τον πληθυσμό Γάτα : `listenConCat13.wav`  
 Για τον πληθυσμό Σταυρό : `listenConCross13.wav`  
 Για τον πληθυσμό Ανεμόπτερο : `listenConGlider13.wav`  
 Για τον πληθυσμό Σταυρό Τετάρτων : `listenConQCross13.wav`

Πρέπει να σημειωθεί ότι μετά την εφαρμογή των τεχνικών για την αποφυγή της περιοδικότητας και της στασιμότητας, η ενεργοποίηση των ατόμων είναι τυχαία και σε κάθε περίπτωση διαφορετική. Επομένως, δεν είναι δυνατόν να καταγραφούν δύο όμοια ηχητικά αρχεία, ακόμα και αν αναφέρονται στον ίδιο αρχικό πληθυσμό.

### **Δ'.3 Συμπεράσματα**

Το σύστημα που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας συνδυάζει την τεχνική της μικροδομικής σύνθεσης ήχου με την ιδιότητα των κυτταρικών αυτομάτων να προσομοιώνουν την εξέλιξη ενός πληθυσμού, στην συγκεκριμένη περίπτωση τον πληθυσμό των ηχητικών μονάδων. Το κυτταρικό αυτόματο που χρησιμοποιήθηκε είναι το “Παιχνίδι της Ζωής” του Conway. Με τη βοήθεια του παραπάνω συστήματος, η διαδικασία της εξέλιξης μετατρέπεται σε διαδικασία σύνθεσης. Το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα που προκύπτει μετά το πέρας της εξέλιξης, είναι το αποτέλεσμα της ζυγισμένης μίξης του ηχητικού υλικού κάθε γενιάς που προέκυψε κατά τη διάρκεια της εξέλιξης.

Η υλοποίηση του συστήματος ξεκίνησε με τη δημιουργία της βιβλιοθήκης του πρωτογενούς ηχητικού υλικού και την ψηφιακή προεπεξεργασία αυτού με στόχο την καλύτερη ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας και την καλύτερη απόδοση της ηχητικής σύνθεσης. Στο δεύτερο στάδιο της υλοποίησης έγινε η 1 – 1 αντιστοίχιση των ηχητικών μονάδων με τα κελιά του αυτόματου, ενώ στο τρίτο και τελευταίο στάδιο έγινε η μίξη των ενεργών ηχητικών μονάδων κάθε γενιάς. Κατά τη φάση ανάπτυξης, κρίθηκε επιτακτική η ανάγκη εφαρμογής περιορισμένου πλήθους παρεμβάσεων στον αλγόριθμο, με στόχο τη βελτιστοποίηση του τελικού ηχητικού αποτελέσματος, κυρίως με κριτήρια αποφυγής επαναλήψεων και εμφάνισης περιοδικών ηχητικών κυματομορφών.

Ακολουθώντας τους μεταβατικούς κανόνες του Conway, μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί αρχικοί πληθυσμοί, ο καθένας από τους οποίους είχε διαφορετική εξέλιξη και οδήγησε σε διαφορετικά ηχητικά αποτελέσματα. Για τον αρχικό πληθυσμό “Σταυρό” η εξέλιξη σταμάτησε πρόωρα, αφού μετά από κάποιες γενιές δεν υπήρχαν πλέον ενεργά άτομα. Για τον πληθυσμό “Γάτα” η εξέλιξη σταμάτησε μετά από κάποιες γενιές, παρά το ότι υπήρχαν ενεργά άτομα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο αριθμός και η θέση των ατόμων ήταν τέτοια, ώστε δεν επέτρεπαν ούτε τη γέννηση νέων ατόμων αλλά ούτε και το θάνατο των ήδη ενεργών. Όσον αφορά τους πληθυσμούς

“Ανεμόπτερο” και “Σταυρό Τετάρτων”, αυτοί οδηγήθηκαν σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις περιοδικότητας. Για τον πρώτο, η περιοδικότητα αφορά την εμφάνιση μίας συνεχόμενης ακολουθίας γενεών, ενώ για τον δεύτερο η περιοδικότητα αφορά μόνο δύο συγκεκριμένες γενιές, οι οποίες εναλλάσσονται μεταξύ τους. Σε κάθε περίπτωση όμως, η συνέχεια της εξέλιξης εξασφαλίστηκε με την ενεργοποίηση νέων ατόμων, για κάθε φορά που εντοπίστηκαν τα φαινόμενα της περιοδικότητας και της στασιμότητας. Οι κανόνες του Conway οδηγούν σε ενδιαφέροντα μουσικά αποτελέσματα, όμως δεν συμβαίνει το ίδιο και με άλλες, εναλλακτικές ακολουθίες αριθμών, όπως για παράδειγμα το μοτίβο (1, 3, 3, 3).

## Δ'. 4 Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα υλοποίηση θα μπορούσε να γίνει ακόμα πιο ενδιαφέρουσα με μια σειρά βελτιώσεων και προσθηκών. Ακολουθούν προτάσεις οι οποίες αποσκοπούν στη βελτίωση κυρίως του τελικού ηχητικού αποτελέσματος, αφού η βασική υλοποίηση τέθηκε σε εφαρμογή στη συγκεκριμένη εργασία.

### **Βελτίωση 1<sup>η</sup> : Καλύτερη ποιότητα πρωτογενούς ηχητικού υλικού.**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το ηχητικό υλικό προήλθε από ηχογράφιση ήχων όπως χτυπημάτων, κουδουνισμάτων και άλλων συναφών καθημερινών ήχων. Μια πιο προσεγμένη μελέτη των ήχων που θα αντιστοιχιστούν στα κελιά του κυτταρικού αυτόματου, ενδεχομένως να δώσει αισθητικά καλύτερα ηχητικά αποτελέσματα.

### **Βελτίωση 2<sup>η</sup> : Μεγαλύτερη ποσότητα πρωτογενούς ηχητικού υλικού.**

Θέτοντας τις διαστάσεις της μήτρας του κυτταρικού αυτόματου σε  $10 \times 10$ , αυτομάτως η ποσότητα των ηχητικών αρχείων ανέρχεται στα εκατό. Επειδή σκοπός της εργασίας ήταν να δείξει κυρίως το πώς οι παραπάνω ήχοι συνθέτονται αλγοριθμικά, κρίθηκε επαρκές ο αριθμός των αρχείων να περιοριστεί στις παραπάνω διαστάσεις. Η διεύρυνση του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο θα εξελίσσεται ο πληθυσμός συνεπάγεται και αύξηση του αριθμού των ηχογραφημένων αρχείων, η μίξη όμως περισσότερων ενεργών ατόμων του πληθυσμού ίσως οδηγήσει και σε πιο ενδιαφέροντα μουσικά αποτελέσματα.

### **Βελτίωση 3<sup>η</sup> : Μελέτη για την εύρεση αρχικών πληθυσμών με ενδιαφέρουσα εξέλιξη.**

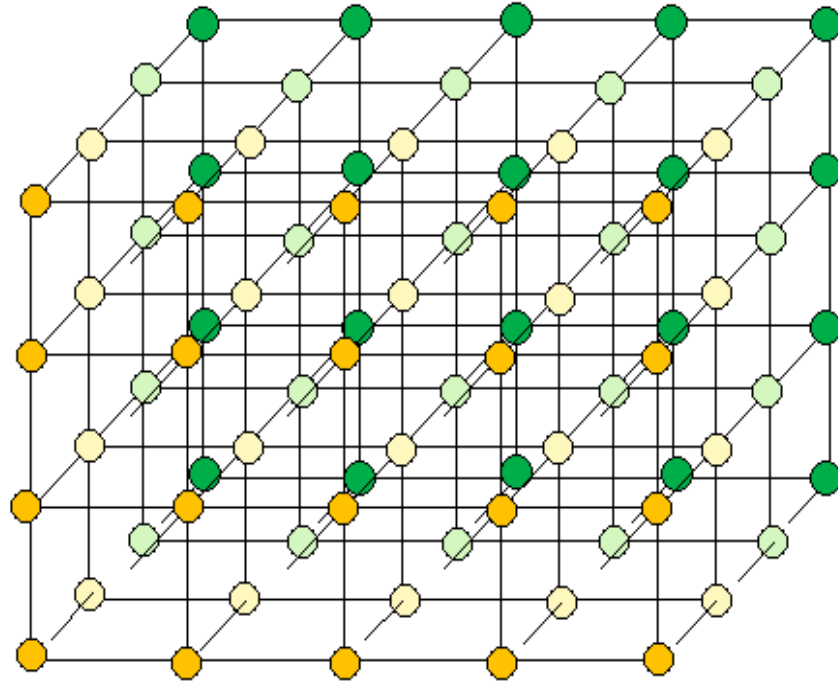
Αν και τα προβλήματα της περιοδικότητας και της στασιμότητας επιλύθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία και έτσι εξασφαλίστηκε η συνεχής εξέλιξη του πληθυσμού, η λύση που δόθηκε στηρίζεται στην τυχαιότητα. Επομένως, από ένα σημείο και έπειτα δεν είναι δυνατή η μελέτη της εξέλιξης του πληθυσμού ούτε στο γραφικό περιβάλλον, αλλά ούτε και στο ηχητικό αποτέλεσμα. Η έρευνα για την εύρεση αρχικών πληθυσμών που σε συνεργασία με του μεταβατικούς κανόνες που τους διέπουν εξασφαλίζουν την συνεχή εξέλιξη του πληθυσμού χωρίς επαναλήψεις και στατικούς οργανισμούς, θα δώσει την δυνατότητα για περαιτέρω μελέτη των πληθυσμών αυτών και την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων σε διάφορες εφαρμογές, και όχι απαραίτητα μόνο εφαρμογές που αφορούν τον ήχο και τη μουσική.

### **Βελτίωση 4<sup>η</sup> : Υλοποίηση συστήματος τρισδιάστατης ηχητικής σύνθεσης**

Ο βασικός αλγόριθμος του συστήματος, «Το παιχνίδι της ζωής» έχει ήδη υλοποιηθεί σε τρισδιάστατο περιβάλλον (Leandro Barajas, 2004).

Ισχύει ο γενικός κανόνας σύμφωνα με τον οποίο κάθε N- διάστατο κυτταρικό αυτόματο έχει  $3^N - 1$  γείτονες. Έτσι, αν στο δισδιάστατο κυτταρικό αυτόματο οι γείτονες είναι οχτώ, για το τρισδιάστατο οι γείτονες είναι είκοσι έξι. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία περισσότερων μεταβατικών κανόνων, και κατά συνέπεια σε πλουσιότερες δομές και καλύτερους σχηματισμούς πληθυσμών [42].

Ακολουθώντας την λογική της υλοποίησης της παρούσας εργασίας, η ηχητική σύνθεση θα μπορούσε να βασιστεί σε ένα τρισδιάστατο αυτόματο, στα κελιά του οποίου θα αντιστοιχίζονται οι ηχητικές μονάδες με διάφορες παραμέτρους όπως η ένταση, το βάθος και η χροιά του ήχου, υποστηρίζοντας τη σύνθεση ολοκληρωμένων τρισδιάστατων ηχοτοπίων. Στο σχήμα Δ'3 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο κυτταρικό αυτόματο, στα επίπεδα του οποίου μπορεί να αντιστοιχιστεί ήχος με μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά.



*Σχήμα Δ'.3 : Ένα τρισδιάστατο κυτταρικό αυτόματο. Σε κάθε επίπεδο τα χαρακτηριστικά του ήχου μπορούν να μεταβάλλονται.*

# Παράρτημα Α΄

Σε αυτό το παράρτημα παρατίθεται ο πηγαίος κώδικας της υλοποίησης του συστήματος ηχητικής σύνθεσης. Η υλοποίηση έγινε σε κώδικα MATLAB και περιλαμβάνει τέσσερα .m αρχεία:

life.m, MakeName.m, CreateEqualLengths.m, και SoundMixing.m

Στο CD που συνοδεύει την παρούσα εργασία, υπάρχει το αρχείο

Initial\_configurations.m, στο οποίο υπάρχουν οι πίνακες που ορίζονται ως αρχικοί πληθυσμοί στην υλοποίηση του συστήματος. Ο χρήστης μπορεί να αλλάζει κάθε φορά τον πίνακα που ορίζει τον αρχικό πληθυσμό, προσέχοντας παράλληλα να αλλάζει και τις διαστάσεις του πίνακα που ορίζουν το περιβάλλον.

Το τελικό ηχητικό αποτέλεσμα αποθηκεύεται στο αρχείο listen.wav

## 1) life.m

Το αρχείο life.m αποτελεί το κύριο μέρος της υλοποίησης. Σε αυτό ορίζεται το γραφικό περιβάλλον μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η υλοποίηση του αλγόριθμου «παιχνίδι της ζωής». Επίσης, σε αυτό το αρχείο λαμβάνει χώρα ο έλεγχος για την αποφυγή των φαινομένων της περιοδικότητας και της στασιμότητας, καθώς και η εγγραφή του τελικού μουσικού αποτελέσματος στο αρχείο listen.wav

```

function life(action)
%LIFE    MATLAB's version of Conway's Game of Life.
%    "Life" is a cellular automaton invented by John
%    Conway that involves live and dead cells in a
%    rectangular, two-dimensional universe. In
%    MATLAB, the universe is a sparse matrix that
%    is initially all zero.
%
%    Whether cells stay alive, die, or generate new
%    cells depends upon how many of their eight
%    possible neighbors are alive. By using sparse
%    matrices, the calculations required become
%    astonishingly simple. We use periodic (torus)
%    boundary conditions at the edges of the
%    universe. Pressing the "Start" button
%    automatically seeds this universe with several
%    small random communities. Some will succeed
%    and some will fail.

%    C. Moler, 7-11-92, 8-7-92.
%    Adapted by Ned Gulley, 6-21-93
%    Copyright 1984-2002 The MathWorks, Inc.
%    $Revision: 5.10 $    $Date: 2002/04/15 03:34:09 $

% Possible actions:
% initialize
% start

% Information regarding the play status will be held in
% the axis user data according to the following table:
play= 1;

```

```

stop=-1;

if nargin<1,                                     %number
of input arguments < 1
    action='initialize';
end;

if strcmp(action,'initialize'),
%string compare
    figNumber=figure( ...
        'Name','Life: Conway's Game of Life', ...
        'NumberTitle','off', ...
        'DoubleBuffer','on', ...
        'Visible','off', ...
        'Color','black', ...
        'BackingStore','off');
    axes( ...
        'Units','normalized', ...
        'Position',[0.05 0.05 0.75 0.90], ...
        'Visible','off', ...
        'DrawMode','fast', ...
        'NextPlot','add');

    text(0,0,'Press "Start" ', ...
        'HorizontalAlignment','center');
    axis([-1 1 -1 1]);

%=====
% Information for all buttons
labelColor=[0.8 0.8 0.8];
yInitPos=0.90;
xPos=0.85;
btnLen=0.10;
btnWid=0.10;

```



```

    % Spacing between the button and the next command's
label
    spacing=0.05;
%=====

    % The CONSOLE frame
    frmBorder=0.02;
    yPos=0.05-frmBorder;
    frmPos=[xPos-frmBorder yPos btnLen+2*frmBorder
0.9+2*frmBorder];
    h=uicontrol( ...
        'Style','frame', ...
        'Units','normalized', ...
        'Position',frmPos, ...
        'BackgroundColor',[0.0 0.50 0.0]);
%=====

    % The START button
    btnNumber=1;
    yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnWid+spacing);
    labelStr='Start';
    cmdStr='start';
    callbackStr='life(''start'');';

% Generic button information
    btnPos=[xPos yPos-spacing btnLen btnWid];
    startHndl=uicontrol( ...
        'Style','pushbutton', ...
        'Units','normalized', ...
        'Position',btnPos, ...
        'String',labelStr, ...
        'Interruptible','on', ...
        'Callback',callbackStr);
%=====

```

```

% The STOP button
btnNumber=2;
yPos=0.90-(btnNumber-1)*(btnWid+spacing);
labelStr='Stop';
% Setting userdata to -1 (=stop) will stop the demo.
callbackStr='set(gca, 'UserData', -1)';

% Generic button information
btnPos=[xPos yPos-spacing btnLen btnWid];
stopHndl=uicontrol( ...
    'Style','pushbutton', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',btnPos, ...
    'Enable','off', ...
    'String',labelStr, ...
    'Callback',callbackStr);

% The CLOSE button
labelStr='Close';
callbackStr='close(gcf)';
closeHndl=uicontrol( ...
    'Style','push', ...
    'Units','normalized', ...
    'Position',[xPos 0.05 btnLen 0.10], ...
    'String',labelStr, ...
    'Callback',callbackStr);

% Uncover the figure
hdlList=[startHndl stopHndl closeHndl];
set(figNumber, 'Visible', 'on', ...
    'UserData', hdlList);

elseif strcmp(action, 'start'),
    cla;

```

```

axHndl=gca;
figNumber=gcf;
hndlList=get(figNumber,'Userdata');
startHndl=hndlList(1);
stopHndl=hndlList(2);
infoHndl=hndlList(3);
%closeHndl=hndlList(4);
%set([startHndl closeHndl infoHndl],'Enable','off');
set(stopHndl,'Enable','on');

% ===== Start of Demo
set(axHndl, ...
    'UserData',play, ...
    'DrawMode','fast', ...
    'Visible','off');

m = 10;
Audio_to_save = [];
Xpast = []; % initialize
Xpast:history of arrays
X = sparse(m,m)
Xprevious = X;

C = [0 1 0 0 1 0;
     0 1 1 1 1 0;
     1 0 0 0 0 1;
     1 0 1 1 0 1;
     1 0 0 0 0 1;
     0 1 1 1 1 0]
X(2:7, 2:7)= C;

% The following statements plot the initial
configuration.

```

```

    % The "find" function returns the indices(index) of the
nonzero elements.
    [i,j] = find(X);
    figure(gcf);
    plothandle = plot(i,j, '.', ...
        'Color','green', ...
        'MarkerSize',40);
    axis([0 m+1 0 m+1]);

    pause(2)

    % Whether cells stay alive, die, or generate new cells
depends
    % upon how many of their eight possible neighbors are
alive.
    % Here we generate index vectors for four of the eight
neighbors.
    % We use periodic (torus) boundary conditions at the
edges of the universe.

    n = [m 1:m-1];
    e = [2:m 1];
    s = [2:m 1];
    w = [m 1:m-1];

    counter = 1;
    while get(axHndl, 'UserData')==play,

        Xprevious = X;

        % How many of eight neighbors are alive.
        N = X(n,:) + X(s,:) + X(:,e) + X(:,w) + ...
            X(n,e) + X(n,w) + X(s,e) + X(s,w);

```

```

        % A live cell with two live neighbors, or any cell
with three
        % neighbours, is alive at the next time step.
        %X = (X & (N == 4)) | (N == 6);
        %X = (X & (N == 1)) | (N == 3);
        X = (X & (N == 2)) | (N == 3);

        NewData = SoundMixing(X);
        Audio_to_save = [Audio_to_save ; NewData];
        %copyfile('test.wav', makewav(i,j)); Debugging

        cell{counter}=X;          %ka8e genia mpainei ston
pinaka cell
        counter=counter+1;      %gia ka8e genia afksanetai o
counter kata ena

        flag=0;
        if counter > 2          % counter = 1 einai o
trexwn pinakas
            for i=1:counter-2    % mexri kai ton prohgomeno
pinaka
                flag=0;
                for j=1:10
                    %sarwnw ton pinaka
                    for k=1:10
                        if cell{counter-
1}(j,k)~=cell{i}(j,k)    %an estw kai ena keli einai
diaforetiko
                            flag=1;
                        end
                    end
                end
            end
            if flag == 0          %gia na mhn
ksanaginei o elegxos

```

```

                break;
            end
        end
    end

    if (flag==0)
        if(counter > 2)
            X=floor(rand(10,10)+0.5);
        end
    end;

    %   if (X==Xprevious)
    %           X=floor(rand(10,10)+0.5);           %elegxos
mono gia stasimothta
    %   end;

    % Update plot.
    [i,j] = find(X);
    set(plothandle,'xdata',i,'ydata',j)

    drawnow
        pause(0.5)
    end;

    fs = 44100;
    N = 16;
    % ===== End of Demo
    set([startHndl],'Enable','on');
    set(stopHndl,'Enable','off');
    wavwrite(Audio_to_save, fs, N, 'listen.wav');

elseif strcmp(action,'info');
    helpwin(mfilename);

```

```
end; % if strcmp(action, ...
```

## 2) CreateEqualLengths.m

Η συνάρτηση CreateEqualLengths είναι απαραίτητη για την προεπεξεργασία των ηχητικών αρχείων που δημιούργησαν την βιβλιοθήκη πρωτογενούς ηχητικού υλικού. Η συνάρτηση εντοπίζει το μεγαλύτερο σε μέγεθος ηχητικό αρχείο κι έπειτα «γεμίζει» με μηδενικά δείγματα τα υπόλοιπα αρχεία, ώστε να φτάσουν σε μέγεθος το μεγαλύτερο.

```
max_length = 0;
for i = 1:10
    for j = 1:10
        audio_file = MakeName(i,j);
        [data,fs,N]=wavread(audio_file);
        current_length = length (data);

        if (max_length < current_length )
            max_length = current_length;
        end
    end
end

max_length

for i = 1:10
    for j = 1:10
        audio_file = MakeName(i,j)
        [data,fs,N]=wavread(audio_file);
        current_length = length (data);

        zeros_to_add = max_length - current_length
        data = [data; zeros(zeros_to_add,1)];
        wavwrite(data, fs, N, audio_file);
```

```
end  
end
```

### 3) MakeName.m

Η συνάρτηση MakeName δημιουργήθηκε στα πλαίσια της προεπεξεργασίας των ηχητικών αρχείων, προκειμένου να τους δοθεί ενιαία ονοματολογία και να γίνει δυνατή η μετέπειτα επεξεργασία τους.

```
function [s]=MakeName(i,j);  
  
% Create the s1 part of the filename  
s=sprintf('audio%d%d',i,j);
```

### 4) SoundMixing.m

Η συνάρτηση SoundMixing είναι η δεύτερη κύρια συνάρτηση μετά τη life, όσον αφορά την υλοποίηση του συστήματος. Εδώ γίνεται η μίξη των ήχων που προέρχονται από τα ζωντανά άτομα του πληθυσμού του οποίου η εξέλιξη προσομοιώνεται από τον αλγόριθμο «παιχνίδι της ζωής».

```
function [final_data] = SoundMixing(X)  
  
audio_file = MakeName(1,1);  
[data,fs,N]=wavread(audio_file);  
final_data = zeros(length(data),1);  
  
s=1;  
m = 10;  
  
for i = 1:m  
    for j = 1:m  
  
        if (X(i,j) == 1)  
            audio_file = MakeName(i,j);
```



```

        [data,fs,N]= wavread(audio_file);
        final_data = final_data + data;
        s = s + 1;
    end
end
end

final_data = final_data / s;

%length(final_data); (= 177664)

i = find(final_data == 0, 177664 , 'last');

    final_data = final_data(1:min(i),1);           %opou thewrw
to dianysma einai typou sthlhs

```

# Βιβλιογραφία

- [1] Miranda, E. R., “Composing Music with Computers”, Focal Press, 2002, ISBN
- [2] Hertz, J., Krogh, A., and Palmer, R. G., Introduction to the Theory of neural computation. Redwood City (CA): Addison- Wesley Publishing Company, 1991
- [3] Miranda, E.R., “On making music with artificial models”, Conscious Reframed 2003.
- [4] Miranda, E. R., “Granular Synthesis of Sounds by Means of a Cellular Automaton”,  
Leonardo, Vol.28, No 4, 1995
- [5] Miranda, E. R., Computer Sound Synthesis for the Electronic Musician, Focal Press, 1998
- [6] Sato, S., K. Otori, A. Takizawa, H. Sakai, Y. Ando and H. Kawamura. "Applying genetic algorithms to the optimum design of a concert hall." *Journal of Sound and Vibration*, vol.258, no.3, p. 517-526 (2002).
- [7] Σωκράτης Κάτσικας, Εξελικτικός προγραμματισμός: Νέες μέθοδοι βελτιστοποίησης
- [8] Miranda, E. R., “Cellular automata: From sound synthesis to musical forms”
- [9] Miranda, E.R., “Computer Sound Design, Synthesis Techniques and programming, Focal Press, 2002, ISBN 0 240 51693 1
- [10] I. Xenakis. *Formalized Music*. Indiana University Press, Bloomington, 1971.
- [11] Miranda, E. R., “Evolving cellular Automata Music: From Sound Synthesis to Composition”
- [12] Ι. Τσούλος, Γενετικοί Αλγόριθμοι, 2008 (τελευταία επίσκεψη Νοε. 2008)
- [13] [http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic\\_algorithms](http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_algorithms) (τελευταία επίσκεψη Νοε. 2008)

- [14] <http://www.ai-junkie.com/ga/intro/gat2.html> (τελευταία επίσκεψη Νοε.2008)
- [15] [www.coder.gr](http://www.coder.gr) (τελευταία επίσκεψη Δεκ.2008)
- [16] <http://www.talkorigins.org/faqs/genalg/genalg.html> (τελευταία επίσκεψη Νοε.2008)
- [17] <http://x.i-dat.org/~csem/UNESCO/8/8.pdf> (τελευταία επίσκεψη Νοε.2008)
- [18] [http://www.artissimo.gr/greek/cm\\_workshopx/musicx\\_compositionx\\_definitionx.htm](http://www.artissimo.gr/greek/cm_workshopx/musicx_compositionx_definitionx.htm) (τελευταία επίσκεψη Νοε.2008)
- [19] [http://en.wikipedia.org/wiki/Algorithmic\\_composition](http://en.wikipedia.org/wiki/Algorithmic_composition) (τελευταία επίσκεψη Νοε.2008)
- [20] [www.aegean.gr/culturaltec/economoud/modules/PS/Audio.ppt](http://www.aegean.gr/culturaltec/economoud/modules/PS/Audio.ppt)(τελευταία επίσκεψη Απρ.2009)
- [21] <http://www.iwn.gr/book.asp?cid=2446>(τελευταία επίσκεψη Μάιος.2009)
- [22] [www.users.auth.gr/~giathan/projects/mousiki\\_pliforiki.ppt](http://www.users.auth.gr/~giathan/projects/mousiki_pliforiki.ppt) (τελευταία επίσκεψη Μάιος.2009)
- [23] <http://www.sonicspace.org/ver4/additive.htm> (τελευταία επίσκεψη Μάιος.2009)
- [24] [http://www.musgradthes.gr/Arthra%20-%20Matziris%20-%20Sound\\_Synthesis.pdf](http://www.musgradthes.gr/Arthra%20-%20Matziris%20-%20Sound_Synthesis.pdf)
- [25] [http://www.musgradthes.gr/Arthra%20-%20Matziris%20-%20Sound\\_Synthesis.pdf](http://www.musgradthes.gr/Arthra%20-%20Matziris%20-%20Sound_Synthesis.pdf) (τελευταία επίσκεψη Μάιος.2009)
- [26] <http://www.neo.gr/website/ergasiamathiti/42.htm> (τελευταία επίσκεψη Μάιος.2009)
- [27] [http://www.cs.sfu.ca/~tamaras/waveshapeSynth/Waveshaping\\_Synthesis.html](http://www.cs.sfu.ca/~tamaras/waveshapeSynth/Waveshaping_Synthesis.html) (τελευταία επίσκεψη Ιουν.2009)
- [28] C. Roads, “Granular synthesis of sound,” in Foundations of Computer Music (C. Roads and J. Strawn, eds.), pp. 145–159, The MIT Press, 1985.
- [29] <http://www.cycling74.com/docs/max5/tutorials/msp-tut/mspchapter12.html> (τελευταία επίσκεψη Ιουν.2009)
- [30] X. Serra and J. O. Smith, “Spectral modeling synthesis: A sound analysis/synthesis system based on a deterministic plus stochastic decomposition,” Computer Music Journal, vol. 14, no. 4, pp. 12–24, 1990.

- [31] X. Serra, “Musical sound modeling with sinusoids plus noise,” in *Musical Signal Processing* (C. Roads, S. T. Pope, A. Piccialli, and G. De Poli, eds.), ch. 3, pp. 91–122, Swets & Zeitlinger, 1997.
- [32] <http://www.hitl.washington.edu/scivw/EVE/I.B.1.3DSoundSynthesis.html> (τελευταία επίσκεψη Ιουν.2009)
- [33] [http://www.deutsche-telekom-laboratories.de/~sporssas/publications/2008/AES124\\_Spors\\_WFS\\_Theory.pdf](http://www.deutsche-telekom-laboratories.de/~sporssas/publications/2008/AES124_Spors_WFS_Theory.pdf)
- [34] [http://en.wikipedia.org/wiki/Wave\\_field\\_synthesis#See\\_also](http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_field_synthesis#See_also) (τελευταία επίσκεψη Ιουν.2009)
- [35] [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) (τελευταία επίσκεψη Ιουν.2009)
- [36] <http://el.thefreedictionary.com> (τελευταία επίσκεψη Απρ.2009)
- [37] [http://www.ionio.gr/~floros/lessons/avarts\\_dap\\_lesson05.pdf](http://www.ionio.gr/~floros/lessons/avarts_dap_lesson05.pdf) (τελευταία επίσκεψη Απρ.2009)
- [38] <http://dSPACE.lib.uom.gr/bitstream/2159/3468/2/XaritosPE2007.pdf> (τελευταία επίσκεψη Απρ.2009)
- [39] [artemis.cslab.ntua.gr/Dienst/UI/1.0/Download/artemis.ntua.ece/DT2008-0158](http://artemis.cslab.ntua.gr/Dienst/UI/1.0/Download/artemis.ntua.ece/DT2008-0158) (τελευταία επίσκεψη Απρ.2009)
- [40] [http://en.wikipedia.org/wiki/Live\\_sound\\_mixing](http://en.wikipedia.org/wiki/Live_sound_mixing) (τελευταία επίσκεψη Απρ.2009)
- [41] Miranda, E. R., (Ed.) *Readings in Music and Artificial Intelligence*, Gordon and Breach/Harwood Academic Publishers, 2000
- [42] <http://www.ibiblio.org/e-notes/Life/Game.htm> (τελευταία επίσκεψη Ιουν.2009)
- [43] V. Välimäki, J. Huopaniemi, M. Karjalainen, and Z. Jánosy, “Physical modeling of plucked string instruments with application to real-time sound synthesis,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 44, pp. 331–353, May 1996.
- [44] V. Välimäki, “Physics-based modeling of musical instruments,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 90, pp. 611–617, July/August 2004.
- [45] V. Välimäki, J. Pakarinen, C. Erkut, and M. Karjalainen, “Discrete-time modelling of musical instruments,” *Reports on Progress in Physics*, vol. 69, pp. 1–78, January 2006.
- [46] Jussi Pekonen, “Computationally Efficient Music Synthesis –Methods and Sound Design”, 2007).
- [47] Miranda, E. R., *Wee Batucada Scotica*, musical score, Goldberg Edicoes Musicais, 2001.

- [48] Miranda, E. R., (Ed) Readings in Music and Artificial Intelligence, Gordon and Breach/ Harwood Academic Publishers, 2000
- [49] Worrall, D., “Studies in metamusical methods for sound image and composition”, *Organized Sound*, Vol. 1, No 3, 1996.
- [50] Xenakis, I., *Formalized Music*, Indiana University Press, 1971.
- [51] Cood, E. F., *Cellular Automata*, London (UK): Academic Press, 1968.
- [52] W.B. Snow. Basic principles of stereophonic sound. IRE Transactions on Audio, 3:42–53, March 1955.
- [53] A.J. Berkhout. A holographic approach to acoustic control. Journal of the Audio Engineering Society, 36:977–995, December 1988.
- [54] A.J. Berkhout, D. de Vries, and P. Vogel. Acoustic control by wave field synthesis. Journal of the Acoustic Society of America, 93(5):2764–2778, May 1993.
- [55] [http://books.google.com.au/books?id=YxnqcAR7xjkC&dq=microsound&pg=PP1&ots=c-yfQ\\_ZvYY&sig=qRNZosJ2YtxOC9D7RUda3aj84Rw&hl=en#PPA91,M1](http://books.google.com.au/books?id=YxnqcAR7xjkC&dq=microsound&pg=PP1&ots=c-yfQ_ZvYY&sig=qRNZosJ2YtxOC9D7RUda3aj84Rw&hl=en#PPA91,M1)  
(τελευταία επίσκεψη 12/06/2009)
- [56] <http://www.granularsynthesis.com/books.php> (τελευταία επίσκεψη 12/06/2009)
- [57] <http://math.hws.edu/xJava/CA/CA.html>
- [58] <http://mathworld.wolfram.com/ElementaryCellularAutomaton.html>
- [59] [http://www.clab.edc.uoc.gr/physics/sound/sound\\_18.htm](http://www.clab.edc.uoc.gr/physics/sound/sound_18.htm)
- [60] Nelson, G.L. (1995) *Sonomorphs : An application of Genetic Algorithms to the Growth and Development Of Musical Organisms*, unpublished paper, Oberlin (USA): Conservatory of Music.
- [61] Miranda, E. R., *Cellular Automata Music : From Sound Synthesis to Musical Forms*
- [62] Wolfram, S. (1994). Universality and complexity in cellular automata. *Physica D* 10: 1-35
- [63] Langton, C. 1990. Computation at the edge of chaos: Phase transitions and emergent computation. *Physica D* 42: 12-37
- [64] McAlpine, K. (1999). *Applications of Dynamical Systems to Music Composition*, PhD Thesis, Department of Mathematics, University of Glasgow
- [65] <http://x2.i-dat.org/~csem/UNESCO/8/index.html#>
- [66] Dodge, C., Jerse, T. A., *Computer Music: Synthesis, Composition and Performance*, New York (NY): Schirmer Books, 1985

[67] Worrall, D., “Studies in metamusical methods for sound image and composition”,  
Organized Sound, 1(3), 1996

## **Συντμήσεις**

AGS	Asynchronous Granular Synthesis
Bit	Binary Digit
CA	Cellular Automaton
CAMUS	Cellular Automata MUSIC
ChaOs	Chemical Oscillator
Chaosynth	Chemical Oscillator Synthesis
DNA	DeoxyriboNucleic Acid
FIR	Finite Impulse Response
GOL	Game Of Life
MIDI	Musical Instrument Digital Interface
PSGS	Pitch Synchronous Granular Synthesis
STFT	Short-time Fourier Transform
WFS	Wave Field Synthesis

# Γλωσσάρι Ξενικών Όρων

Genotype	Γενότυπος
Phenotype	Φαινότυπος
Fitness	Καταλληλότητα
Tournament Selection	Επιλογή Πρωταθλητή
Roulette Wheel	Τροχός της Τύχης
Crossover Rate	Βαθμός Διασταύρωσης
Mutation Rate	Βαθμός Μετάλλαξης
Coding	Κωδικοποίηση
Fitness Evaluation	Συνάρτηση Καταλληλότητας
Selection	Επιλογή
Reproduction	Αναπαραγωγή
Crossover	Διασταύρωση
Mutation	Μετάλλαξη
Game of Life	Παιχνίδι της Ζωής
Demon Cyclic Space	Δαιμονικό Κυκλικό Διάστημα
Wave Field Synthesis	Σύνθεση Ηχητικού Πεδίου
Table look – up Synthesis	Σύνθεση βασισμένη σε πίνακα Κυματομορφής
Sampling	Δειγματοληψία
Spectral Modeling	Μοντελοποίηση Φάσματος
Additive Synthesis	Προσθετική Σύνθεση
Granular Synthesis	Σύνθεση Βασισμένη σε Ηχητικές Μονάδες
Modulation	Διαμόρφωση
Amplitude Modulation	Διαμόρφωση Πλάτους
Frequency Modulation	Διαμόρφωση Συχνότητας
Waveshaping Synthesis	Σύνθεση Μετασχηματισμού Κυματομορφής
Shaping Function	Συνάρτηση Μετασχηματισμού
Physical Modeling	Φυσική Μοντελοποίηση
Modal Synthesis	Τροπική Σύνθεση
Granules	Κόκκοι
Asynchronous Synthesis	Συγχρονισμένη Σύνθεση
Pitch Synchronous Synthesis	Σύνθεση με Συγχρονισμό Πλάτους
Perceptron	Τεχνητός Νευρώνας



Threshold Value

Chemical Oscillator

Zero Padding

Τιμή Κατωφλίου

Χημικός Ταλαντωτής

Γέμισμα με μηδενικά

# Ευρετήριο

γενετικοί αλγόριθμοι  
κωδικοποίηση  
αξιολόγηση  
διασταύρωση  
μετάλλαξη  
βέλτιστη Λύση  
μουσική Σύνθεση  
κυτταρικά Αυτόματα  
μεταβατικοί Κανόνες  
μουσική Σύνθεση  
ανάγνωση Δεδομένων  
μοντελοποίηση φάσματος  
προσθετική σύνθεση  
fourier  
μικροδομική Σύνθεση  
διαμόρφωση  
μετασχηματισμός κυματομορφής  
φυσική μοντελοποίηση  
τροπική σύνθεση  
ηχητικές μονάδες  
ασύγχρονη σύνθεση  
σύνθεση με συγχρονισμό πλάτους  
μίξη  
περιοδικότητα  
στασιμότητα, 70