



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΥΦΥΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ, ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

**Ανάπτυξη Οντολογίας και Αλγορίθμου για την Αρμονική
Ανάλυση Ακολουθιών Μουσικών Συγχορδιών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ

Σπυρίδωνα Β. Κανταρέλη

Επιβλέπων: Γ. Στάμου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΥΦΥΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ, ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΚΑΙ
ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

**Ανάπτυξη Οντολογίας και Αλγορίθμου για την Αρμονική
Ανάλυση Ακολουθιών Μουσικών Συγχορδιών**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Σπυρίδωνα Β. Κανταρέλη

Επιβλέπων: Γ. Στάμου
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30η Οκτωβρίου 2019.

.....
Γ. Στάμου
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α-Γ. Σταφυλοπάτης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Φωτάκης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σπυρίδων Β. Κανταρέλης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright ©Σπυρίδων Β. Κανταρέλης, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ν.5343/1932, άρθρο 202).

Περίληψη

Η μουσική ανάλυση αποτελεί κατά μία έννοια την αντίθετη πράξη της σύνθεσης. Η πορεία που ακολουθείται στην ανάλυση είναι η αντίστροφη της πορείας που ακολούθησε ο συνθέτης κατά τη διάρκεια της σύνθεσης. Η δημιουργία ενός έργου είναι αποτέλεσμα μιας “κρυφής” διαδικασίας υπό το πρίσμα ότι ο ακροατής και στη συνέχεια ο αναλυτής της δεν είναι σε θέση να γνωρίζουν τον τρόπο σκέψης του δημιουργού. Σκοπός της ανάλυσης ενός μουσικού έργου δεν είναι να αναπαράγει τη διαδικασία της δημιουργίας αλλά να προσπαθήσει να το ερμηνεύσει.

Η μουσική ανάλυση ενός μουσικού κομματιού αποτελεί ένα μεγάλο αντικείμενο μελέτης του διεπιστημονικού πεδίου της Ανάκτηση Μουσικής Πληροφορίας (Music Information Retrieval - MIR). Στην παρούσα διπλωματική προτείνουμε δύο υλοποιήσεις για την μουσική ανάλυση ενός έργου: μια Οντολογία και έναν αλγόριθμο τον οποίο αναπτύξαμε μέσω της γλώσσας Python, ιδανικές για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Οι περισσότερες προσπάθειες πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο βασίζονται στη μελέτη και στην εφαρμογή των κανόνων της τονικής αρμονίας. Στη δική μας εργασία προσπαθούμε να διανθίσουμε αυτούς τους κανόνες κάνοντας χρήση των διατονικών παράλληλων τρόπων, καθώς και εισάγοντας λειτουργίες οι οποίες περιγράφουν και τις ακουστικές σχέσεις μεταξύ των μουσικών συγχορδιών.

Ακόμη, παρουσιάζουμε πώς το συγκεκριμένο αντικείμενο μπορεί να επεκταθεί πάνω στην αξιολόγηση και στο φιλτράρισμα μουσικών δεδομένων και εφαρμογών.

Λέξεις κλειδιά: μουσική ανάλυση, αρμονική ανάλυση, ανάκτηση μουσικής πληροφορίας, οντολογία, τονική αρμονία, τροπική αρμονία, μουσικές συγχορδίες, νευρωνικά δίκτυα

Abstract

Musical analysis is, in a manner of speaking, the opposite action of musical composition. The course of musical analysis is the reversed course of which the composer took during their composition. The creation of a musical piece is the result of a private procedure, considering that both the listener and the researcher are not in the position to know the composer's way of thinking. Musical analysis aims not to recreate this procedure but tries to interpret it.

Musical analysis is a big task of the interdisciplinary science of Music Information Retrieval (MIR). In this diploma thesis we suggest two ways of analyzing a musical piece: an Ontology and an algorithm using Python, ideal for educational purposes.

Most efforts on this field are based on the study and applications of tonal harmony's rules. In this diploma thesis we try to extend these rules by using the diatonic parallel modes, as well as introducing functions that describe the acoustic relationships between musical chords.

Furthermore, we present ways that show how this field can extend on the evaluation and the filtering of musical data and applications.

Keywords: musical analysis, harmonic analysis, music information retrieval, ontology, tonal harmony, modal harmony, music chords, neural networks

Ευχαριστίες

Θα ήθελα, καταρχάς, να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Στάμου για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Έντιμοντ Ντερβάκο για την ιδιαίτερα στενή και αποδοτική συνεργασία που είχαμε κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους μουσικούς μου δασκάλους κ. Μακρή, δισ. Χαρτοφύλακα, κ. Τσιλίδη και κ. Μαγουλά, καθώς και όλους τους μουσικούς με τους οποίους έχω συνεργαστεί όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους φίλους μου και τους συμφοιτητές μου για την υποστήριξή τους και ιδιαίτερα τον Γιάννη Δελημπαλταδάκη για όλες τις συζητήσεις μας.

Περιεχόμενα

Περίληψη	6
Abstract	8
Ευχαριστίες	10
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	14
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	14
1.2 Οργάνωση του κειμένου	15
Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό υπόβαθρο	17
2.1 Το συγκερασμένο δυτικό σύστημα	17
2.2 Κλίμακες και τρόποι	18
2.2.1 Διατονικοί τρόποι	19
2.2.2 Σχετικοί τρόποι	19
2.2.3 Παράλληλοι τρόποι	20
2.3 Τονικότητα και οπλισμός	20
2.4 Βαθμίδες	21
2.5 Χαρακτηρισμός διαστήματων	21
2.6 Συγχορδίες	22
2.6.1 Τρίφωνες συγχορδίες	23
2.6.2 Συγχορδίες με επεκτάσεις	25
2.6.3 Συγχορδίες με αναστροφή	26
2.6.4 Συγχορδίες με αναστολή (suspended chords)	27
2.6.5 Συγχορδίες με προστιθέμενη ένατη	27
2.6.6 Δευτερεύουσες συγχορδίες (secondary chords)	27
Κεφάλαιο 3 - Συλλογή δεδομένων	30
3.1 Τρόποι αναπαράστασης μουσικής πληροφορίας	30
3.1.1 Η μουσική παρτιτούρα	30
3.1.2 Το πρότυπο MusicXML	32
3.1.3 Το MIDI πρωτόκολλο - MIDI messages	35
3.2 Διαδικασία συλλογής δεδομένων	37
3.2.1 Περιγραφή διαδικασίας συλλογής δεδομένων	38
3.2.2 Προεπεξεργασία των δεδομένων	40

Κεφάλαιο 4 - Αρμονική ανάλυση μουσικού έργου	45
4.1 Λειτουργίες συγχορδιών που ανήκουν στην τονικότητα - ο κύκλος των πεμπτών	45
4.2 Ανάπτυξη Οντολογίας	47
4.3 Αρμονική ανάλυση μουσικού έργου μέσω αλγορίθμου	52
4.3.1 Η χρήση της Python	52
4.3.2 Χαρακτηρισμός λειτουργίας συγχορδίας που ανήκει στην τονικότητα	53
4.3.3 Συσχετισμός δανεισμένων και ξένων συγχορδιών με συγχορδίες της τονικότητας	54
4.3.4 Λειτουργία δανεισμένης συγχορδίας από παράλληλο τρόπο	54
4.3.5 Χρήση επαυξημένων και ελαττωμένων τρόπων	54
4.3.6 Η συγχορδία ως Python Dictionary	55
4.3.7 Περιγραφή αλγορίθμου	56
4.3.8 Μελέτη του Dataset	59
4.4 Το σύστημα Harmtrace	62
4.4.1 Οι κανόνες του Harmtrace	63
4.4.2 Διαγραφή συγχορδίας	65
4.4.3 Εισαγωγή συγχορδίας	65
4.4.4 Αποτελέσματα Harmtrace	65
4.5 Σύγκριση του αλγορίθμου μας με το σύστημα Harmtrace	66
4.5.1 Σύγκριση πάνω στα παραδείγματα του Harmtrace	66
4.5.2 Σύγκριση πάνω στο δικό μας Data set	69
Κεφάλαιο 5 - Αξιολόγηση LSTM νευρωνικού δικτύου για αυτόματη δημιουργία ακολουθιών μουσικών συγχορδιών	72
Κεφάλαιο 6 - Επίλογος	75
6.1 Συμπεράσματα	75
6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις	75
Βιβλιογραφία	77

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Παρ' όλο που για ένα μέσο ακροατή η μουσική μπορεί να φαντάζει αφηρημένη και η δημιουργία ενός έργου να θεωρείται μια πράξη με απόλυτη ελευθερία κινήσεων για τον συνθέτη, οι σχέσεις μεταξύ των μουσικών φθόγγων δρουν περιοριστικά και έτσι δίνεται η δυνατότητα θέσπισης βασικών κανόνων και η μελέτη ενός έργου βάσει αυτών.

Για να γίνει αυτό αντιληπτό μπορούμε να παρομοιάσουμε τη μουσική με τη φυσική γλώσσα. Όπως η φυσική γλώσσα έχει φθόγγους των οποίων ο συνδυασμός τους οδηγεί σε δημιουργία λέξεων έτσι και ο συνδυασμός μουσικών φθόγγων (νοτών) οδηγεί σε δημιουργία μουσικών φράσεων. Είναι γεγονός πως η σύνταξη των λέξεων, δηλαδή η διάταξή τους στα πλαίσια του λόγου, είναι απαραίτητη έτσι ώστε μια πρόταση να βγάζει νόημα. Το ίδιο συμβαίνει και με τη μουσική. Οι κανόνες είναι εκεί, λοιπόν, ώστε να βοηθούν τον αναλυτή να κατανοήσει τη λειτουργία κάθε φθόγγου σε ένα μουσικό έργο και στη συνέχεια με την πληροφορία αυτή να μπορέσει να δώσει τη δική του ερμηνεία.

Στη δική μας εργασία θα ασχοληθούμε με την αρμονική ανάλυση, ένα μεγάλο κομμάτι της ευρύτερης έννοιας της μουσικής ανάλυσης.

1.2 Οργάνωση του κειμένου

Η παρούσα διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια

Στο **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζουμε το αντικείμενο της διπλωματικής μας εργασίας και την οργάνωση του κειμένου.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** εισάγουμε τον αναγνώστη σε βασικές μουσικές έννοιες ώστε να είναι σε θέση να κατανοήσει στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τη διαδικασία που ακολουθήσαμε.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** αναφερόμαστε στους τρόπους αναπαράστασης μουσικής πληροφορίες και στις ενέργειες μας για να αποκτήσουμε ένα μεγάλο όγκο μουσικών δεδομένων για την εκπόνηση της εργασίας μας.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** αναπτύσσουμε τις υλοποιήσεις μας, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματά μας και τα συγκρίνουμε με ήδη υπάρχουσες δουλειές πάνω στο αντικείμενο.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** δείχνουμε πώς ο αλγόριθμός μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση ενός νευρωνικού δικτύου.

Στο **έκτο κεφάλαιο** καταλήγουμε σε συμπεράσματα και προτείνουμε μελλοντικές επεκτάσεις πάνω στο αντικείμενο της εργασίας μας.

Κεφάλαιο 2 - Θεωρητικό υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε βασικές έννοιες και όρους της δυτικής μουσικής θεωρίας [1], [2] έτσι ώστε ο αναγνώστης της εργασίας να είναι σε θέση να κατανοήσει το πεδίο της αρμονικής ανάλυσης ενός μουσικού έργου.

2.1 Το συγκερασμένο δυτικό σύστημα

Μπορούμε να ορίσουμε ως μουσικό φθόγγο/μουσική νότα ένα ηχητικό κύμα με σταθερή συχνότητα ανάμεσα στα 16 με 8000 Hz. Ορίζουμε ως οκτάβα το διάστημα μεταξύ ενός μουσικού φθόγγου και ενός άλλου με τη μισή ή τη διπλάσια συχνότητα. Στη μουσική σημειογραφία, οι φθόγγοι που απέχουν μια οκτάβα μεταξύ τους έχουν το ίδιο όνομα και λέμε ακόμη πως έχουν τον ίδιο “τόνο”, αφού ηχούν πανομοιότυπα. Στη δυτική μουσική, το διάστημα της οκτάβας χωρίζεται σε 12 ίσα διαστήματα. Είναι προφανές πως με τη διαίρεση αυτή, έχοντας μια συχνότητα την οποία επιλέγουμε εμείς ως συχνότητα αναφοράς, μπορούμε να αντιστοιχίσουμε αμφιμονοσήμαντα συγκεκριμένες συχνότητες σε συγκεκριμένους φθόγγους.

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι σε κάθε διάστημα οκτάβας περιέχονται 12 διαφορετικοί φθόγγοι. Το διάστημα μεταξύ δύο διαφορετικών φθόγγων της ίδιας οκτάβας το ονομάζουμε ημιτόνιο και αποτελεί το μικρότερο μουσικό διάστημα στο σύστημα που μελετάμε. Ονομάζουμε τόνο το διάστημα που ισούται με δύο ημιτόνια.

Είναι γνωστό πως στη μουσική θεωρία υπάρχουν επτά νότες που ακούν στα ονόματα Ντο, Ρε, Μι, Φα, Σολ, Λα και Σι, τις οποίες ονομάζουμε φυσικές. Θα εξηγήσουμε το λόγο που οι νότες είναι επτά στη συνέχεια.

Με βάση το μείζονα τρόπο (θα εξηγηθεί και αυτό παρακάτω) θεωρούμε ότι τα διαστήματα Ντο-Ρε, Ρε-Μι, Φα-Σολ, Σολ-Λα, Λα-Σι είναι τόνοι ενώ τα διαστήματα Μι-Φα και Σι-Ντο είναι ημιτόνια (προφανώς ισχύουν και αντίστροφα). Για να μπορούμε να αναφερόμαστε σε όλο το 12-φθόγγο σύστημα χρειαζόμαστε και δύο σημεία αλλοίωσης τα οποία υποδηλώνουν αν μια νότα είναι αυξημένη κατά ένα ημιτόνιο ή αν μια νότα είναι ελαττωμένη κατά ένα

ημιτόνιο. Τα σημεία αυτά ονομάζονται κατ' αντιστοιχία δίεση (#) και ύφεση (b). Έτσι, για παράδειγμα η νότα Ντο δίεση απέχει κατά ένα ημιτόνιο προς τα πάνω από την φυσική Ντο αλλά και κατά ένα ημιτόνιο προς τα κάτω από την φυσική Ρε. Το ίδιο ισχύει και για τη νότα Ρε ύφεση. Προφανώς, οι νότες Ντο δίεση και Ρε ύφεση ταυτίζονται ηχητικά, έχουν δηλαδή την ίδια συχνότητα.

2.2 Κλίμακες και τρόποι

Ορίζουμε μια νότα ως τονική. Είδαμε πως αν καλύψουμε ένα διάστημα οκτάβας, φτάνουμε ξανά σε μια νότα με το ίδιο όνομα και τόνο με την τονική. Λέγοντας κλίμακα ή σκάλα, εννοούμε μία σειρά από μουσικούς φθόγγους τους οποίους χρησιμοποιούμε για να καλύψουμε το διάστημα αυτό προς τα πάνω αλλά και προς τα κάτω. Στη δυτική μουσική είναι καθιερωμένο να χρησιμοποιούμε επτά μουσικούς φθόγγους για το σκοπό αυτό, γι αυτό και έχουν οριστεί ονομαστικά επτά νότες. Προφανώς, υπάρχουν και κλίμακες που σχηματίζονται με περισσότερους ή και λιγότερους φθόγγους. Η κλίμακα που δημιουργείται με τη χρήση και των 12 φθόγγων ονομάζεται χρωματική κλίμακα. Επίσης, στη δημιουργία κλιμάκων δε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε νότες που ταυτίζονται ηχητικά, πχ οι νότες Ντο δίεση και Ρε ύφεση δε μπορεί να ανήκουν στην ίδια κλίμακα.

Ο τρόπος δηλώνει τον τύπο σχηματισμού μιας επταφθογγικής κλίμακας, δηλαδή τη διαδοχή τόνων και ημιτονίων που επιλέγουμε μέχρι να διανύσουμε ένα διάστημα οκτάβας. Ας εξετάσουμε τώρα το μείζονα τρόπο με τονική νότα τη Ντο, δηλαδή το Ντο μείζονα τρόπο, ο οποίος δημιουργείται με την χρήση όλων των φυσικών νοτών. Βλέπουμε, λοιπόν, πως για να διανύσουμε το διάστημα της οκτάβας χρησιμοποιούμε διαδοχικά τις νότες Ντο-Ρε-Μι-Φα-Σολ-Λα-Σι και αντίστοιχα διαστήματα T-T-H-T-T-T-H, όπου το T είναι διάστημα τόνου και H διάστημα ημιτονίου. Αν τώρα ξεκινήσουμε από μια άλλη φυσική νότα πχ τη νότα Ρε, βλέπουμε πως μπορούμε με τις ίδιες νότες να ξαναφτάσουμε στη νότα Ρε αλλά η διαδοχή των διαστημάτων έχει αλλάξει. Τώρα έχουμε μια διαδοχή T-H-T-T-T-H-T, η οποία αποτελεί έναν διαφορετικό τρόπο από το μείζονα για την κάλυψη ενός διαστήματος οκτάβας. Με τονική κάθε φυσική νότα και χρήση μόνο φυσικών νοτών μπορούμε να κατασκευάσουμε επτά διαφορετικούς φυσικούς τρόπους οι οποίοι είναι οι εξής:

- Μείζων/Ιωνικός τρόπος (τρόπος του Ντο), major scale
- Δώριος τρόπος (τρόπος του Ρε), dorian scale
- Φρύγιος τρόπος (τρόπος του Μι), phrygian scale
- Λύδιος τρόπος (τρόπος του Φα), lydian scale
- Μιξολύδιος τρόπος (τρόπος του Σολ), mixolydian scale
- Ελάσσων/Αιολικός τρόπος (τρόπος του Λα), minor scale
- Λόκριος τρόπος (τρόπος του Σι), locrian scale

Στις αρχές του 16ου αιώνα, με τη μετάβαση από την Αναγέννηση στο Μπαρόκ, η μουσική προσανατολίστηκε κυρίως στη χρήση δύο μόνο μουσικών τρόπων, του Ιωνικού και του Αιολικού, οι οποίοι εν τέλει καθιερώθηκαν ως μείζονας τρόπος και ελάσσονας τρόπος. Αυτοί οι δύο τρόποι εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται κατά πλειοψηφία και στη σύγχρονη μουσική.

2.2.1 Διατονικοί τρόποι

Στη δυτική μουσική θεωρία ορίζουμε ως διατονική κλίμακα μια κλίμακα που αποτελείται από επτά διαφορετικούς φθόγγους και περιέχει πέντε διαστήματα τόνων και δύο διαστήματα ημιτονίων ανά διάστημα οκτάβας. Τα δύο διαστήματα ημιτονίων πρέπει να απέχουν μεταξύ τους τουλάχιστον δύο τόνους. Παρατηρούμε ότι και οι επτά τρόποι που εξετάσαμε παραπάνω είναι διατονικές κλίμακες. Μπορούμε να τους ονομάζουμε και διατονικούς τρόπους. Με τη μελέτη αυτών των τρόπων θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία, οπότε από εδώ και στο εξής όταν αναφερόμαστε σε τρόπο θα εννοούμε διατονικό τρόπο.

2.2.2 Σχετικοί τρόποι

Στη δυτική μουσική θεωρία ονομάζουμε τρόπους σχετικούς μεταξύ τους, τους τρόπους οι οποίοι μοιράζονται τις ίδιες επτά νότες. Οι τρόποι που είδαμε παραπάνω είναι σχετικοί αφού δημιουργούνται όλοι από τις επτά φυσικές νότες. Μπορούμε, δηλαδή, να πούμε πως ο Ντο μείζων τρόπος έχει ως σχετικό φρύγιο τρόπο τον Μι φρύγιο τρόπο κ.ο.κ.

2.2.3 Παράλληλοι τρόποι

Είδαμε πώς με τη χρήση των επτά φυσικών νοτών δημιουργούνται επτά διαφορετικοί τρόποι, δηλαδή επτά διαφορετικές ακολουθίες διαστημάτων για την κάλυψη ενός διαστήματος οκτάβας. Ο τρόπος είναι, ουσιαστικά, αυτή η καθορισμένη ακολουθία. Οπότε, από κάθε διαφορετική νότα ως τονική, μπορούμε, τηρώντας αυτήν την ακολουθία, να παράξουμε και τους επτά διατονικούς τρόπους. Για παράδειγμα, ο δώριος τρόπος έχει την εξής διαδοχή διαστημάτων: T-T-H-T-T-T-H. Για να κατασκευάσουμε, λοιπόν το Ντο δώριο τρόπο ξεκινάμε από τη νότα Ντο ως τονική και επιλέγουμε την επόμενη νότα με βάση τα καθορισμένα διαστήματα. Έτσι, σχηματίζεται η εξής ακολουθία: Ντο-Ρε-Μι ύφεση-Φα-Σολ-Λα-Σι ύφεση. Οι επτά διαφορετικοί τρόποι που παράγονται από μία τονική νότα είναι παράλληλοι μεταξύ τους, δηλαδή για παράδειγμα ο Ντο μείζων τρόπος έχει ως παράλληλο λύδιο τρόπο τον Ντο λύδιο τρόπο.

2.3 Τονικότητα και οπλισμός

Ο μουσικολογικός όρος Τονικότητα υποδηλώνει τη χαρακτηριστική τάση της μουσικής γλώσσας να οργανώνεται στη βάση ενός ηχητικού πόλου έλξης, το επονομαζόμενο τονικό κέντρο. Η Τονικότητα είναι δηλαδή ένα σύστημα αξιακό, με συγκεκριμένες έλξεις και απωθήσεις μεταξύ των νοτών. Η τονική νότα του κάθε τρόπου αποτελεί το τονικό κέντρο του. Οπότε, κάθε τρόπος είναι και μια διαφορετική τονικότητα. Οι σχετικοί τρόποι, παρότι μοιράζονται τις ίδιες νότες, δεν έχουν την ίδια τονικότητα, αφού έχουν διαφορετικό τονικό κέντρο το οποίο οδηγεί σε διαφορετικές σχέσεις μεταξύ των νοτών. Οποιαδήποτε νότα η οποία χρησιμοποιείται σε ένα μουσικό έργο αλλά δεν ανήκει στον τρόπο στον οποίο ο δημιουργός συνθέτει το έργο χαρακτηρίζεται ως ξένη νότα. Για παράδειγμα αν ένα έργο είναι γραμμένο στο Μι φρύγιο τρόπο η νότα Φα δίεση χαρακτηρίζεται ως ξένη.

Είδαμε, όμως, ότι αν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε κάποιον μη φυσικό τρόπο, είναι αναγκαστική η χρήση σημείων αλλοίωσης. Το σύνολο των σημείων αλλοίωσης ενός τρόπου ονομάζεται οπλισμός. Είναι προφανές πως

όλοι οι σχετικοί μεταξύ τους τρόποι μοιράζονται τον ίδιο οπλισμό και πως οι φυσικοί τρόποι δεν έχουν οπλισμό.

2.4 Βαθμίδες

Στις επτάφθογγες κλίμακες έχει επικρατήσει ώστε η θέση που κατέχει κάθε φθόγγος στις κλίμακες αυτές να χαρακτηρίζεται ως "Βαθμίδα", με κάθε βαθμίδα να έχει τη δική της ονομασία. Οι βαθμίδες, προσδιορίζονται συνήθως με ρωμαϊκούς αριθμούς, με αρχική βαθμίδα την τονική.

Βαθμίδα (ρωμαϊκός αριθμός)	Ονομασία
I	Τονική (πρώτη βαθμίδα)
II	Επιτονική (δεύτερη βαθμίδα)
III	Μέση (τρίτη βαθμίδα)
IV	Υποδεσπόζουσα (τέταρτη βαθμίδα)
V	Δεσπόζουσα (πέμπτη βαθμίδα)
VI	Επιδεσπόζουσα (έκτη βαθμίδα)
VII	Προσαγωγέας (έβδομη βαθμίδα)

2.5 Χαρακτηρισμός διαστήματων

Με τη χρήση των διαστημάτων μπορούμε να περιγράψουμε κατά πόσο απέχουν δύο νότες μεταξύ τους.

Διάστημα	Απόσταση
Δευτέρα μικρή (ημιτόνιο)	Ημιτόνιο
Δευτέρα μεγάλη (τόνος)	Τόνος
Τρίτη μικρή	1 Τόνος και 1 ημιτόνιο
Τρίτη μεγάλη	2 Τόνοι
Τετάρτη καθαρή	2 Τόνοι και 1 ημιτόνιο
Τετάρτη αυξημένη (τρίτονο)	3 Τόνοι
Πέμπτη ελαττωμένη (τρίτονο)	2 Τόνοι και 2 Ημιτόνια
Πέμπτη καθαρή	3 Τόνοι και 1 Ημιτόνιο
Έκτη μικρή	3 Τόνοι και 2 Ημιτόνια
Έκτη μεγάλη	4 Τόνοι και 1 Ημιτόνιο
Εβδόμη μικρή	4 Τόνοι και 2 Ημιτόνια
Εβδόμη μεγάλη	5 Τόνοι και 1 Ημιτόνιο
Οκτάβα	5 Τόνοι και 2 Ημιτόνια

2.6 Συγχορδίες

Συγχορδία ονομάζεται στην θεωρία της μουσικής το σύνολο τριών τουλάχιστον φθόγγων που ηχούν ταυτόχρονα. Στο τροπικό μουσικό σύστημα που εξετάζουμε, η συγχορδία σχηματίζεται με επάλληλους φθόγγους που απέχουν μεταξύ τους διάστημα τρίτης, δηλ. με την προσθήκη της τρίτης, της πέμπτης, της έβδομης κ.ο.κ πάνω από ένα βασικό φθόγγο. Ο φθόγγος αυτός ονομάζεται θεμέλιος και αποτελεί τη βάση και το χαρακτηριστικότερο φθόγγο της συγχορδίας. Οι υπόλοιποι φθόγγοι ονομάζονται τρίτη, πέμπτη, έβδομη, ένατη, κ.ο.κ.

Μια συγχορδία μπορεί με την προσθήκη επάλληλων τριτών να επεκταθεί θεωρητικά απεριόριστα, στην πράξη όμως το πολύ μέχρι τη δέκατη τρίτη, αφού

η μετέπειτα επέκταση θα είναι φθόγγος ο οποίος ήδη βρίσκεται μέσα στη συγχορδία, σε υψηλότερη, βέβαια, οκτάβα.

2.6.1 Τρίφωνες συγχορδίες

Ανάλογα με τα διαστήματα που περιέχουν οι τρίφωνες συγχορδίες, διακρίνονται σε μείζονες, ελάσσονες, αυξημένες ή ελαττωμένες. Η μείζονα συγχορδία περιέχει κάτω μια μεγάλη τρίτη και πάνω μια μικρή τρίτη, ενώ η ελάσσονα συγχορδία περιέχει τη μικρή τρίτη κάτω και τη μεγάλη πάνω. Η αυξημένη συγχορδία σχηματίζεται από δύο μεγάλες τρίτες και η ελαττωμένη από δύο μικρές.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι με τη χρήση μόνο των νοτών ενός διατονικού τρόπου μπορούμε να παράξουμε μόνο μείζονες, ελάσσονες και ελαττωμένες συγχορδίες. Για την παραγωγή μιας αυξημένης συγχορδίας είναι αναγκαία η χρήση τυχαίου σημείου αλλοίωσης, δηλαδή σημείου αλλοίωσης που δεν ανήκει στον οπλισμό του τρόπου.

Οι μείζονες συγχορδίες συμβολίζονται με το κεφαλαίο λατινικό αριθμό που αντιστοιχεί στη βαθμίδα, οι ελάσσονες με μικρό λατινικό αριθμό, οι ελαττωμένες με μικρό λατινικό αριθμό και ένα όμικρον (o) ως εκθέτη, ενώ οι αυξημένες με τον όρο aug (augmented) μετά από κεφαλαίο λατινικό αριθμό. Ας δούμε κάποια παραδείγματα:

- I : μείζονα συγχορδία πρώτης βαθμίδας
- vi : ελάσσονα συγχορδία έκτης βαθμίδας
- iii^o : ελαττωμένη συγχορδία τρίτης βαθμίδας
- IV aug : αυξημένη συγχορδία τέταρτης βαθμίδας

Τώρα ας δούμε τις τρίφωνες συγχορδίες των βαθμίδων κάθε τρόπου:

Τρόπος	Ακολουθία τρίφωνων συγχορδιών
Μείζων	I - ii - iii - IV - V - vi - vii ^o
Δώριος	i - ii - III - IV - v - vi ^o - VII
Φρύγιος	i - II - III - iv - v ^o - VI - vii
Λύδιος	I - II - iii - iv ^o - V - vi - vii
Μιξολύδιος	I - ii - iii ^o - IV - v - vi - VII
Ελάσσων	I - ii ^o - III - iv - v - VI - VII
Λόκριος	i ^o - II - iii - iv - V - VI - vii

Τώρα ας δούμε τις τρίφωνες συγχορδίες των βαθμίδων όλων των παράλληλων τρόπων, με τις αλλοιώσεις τους ως προς τον σπλισμό του μείζονα τρόπου:

Τρόπος (παράλληλος)	Ακολουθία τρίφωνων συγχορδιών
Μείζων	I - ii - iii - IV - V - vi - vii ^o
Δώριος	i - ii - \flat III - IV - v - vi ^o - \flat VII
Φρύγιος	i - \flat II - \flat III - iv - v ^o - \flat VI - \flat vii
Λύδιος	I - II - iii - $\#$ iv ^o - V - vi - vii
Μιξολύδιος	I - ii - iii ^o - IV - v - vi - \flat VII
Ελάσσων	I - ii ^o - \flat III - iv - v - \flat VI - \flat VII
Λόκριος	i ^o - \flat II - \flat iii - iv - \flat V - \flat VI - \flat vii

2.6.2 Συγχορδίες με επεκτάσεις

Όπως είδαμε, μια συγχορδία μπορεί να έχει και ως τέσσερις επεκτάσεις (εβδόμη, ενάτη, ενδεκάτη και δέκατη τρίτη). Η επέκταση μεθ' εβδόμης συμβολίζεται ως μεγάλη (maj7) όταν το διάστημά της από την θεμέλιο της συγχορδίας είναι αντίστοιχα μια μεγάλη εβδόμη. Όταν το διάστημα είναι μια εβδόμη μικρή τότε η συγχορδία συμβολίζεται απλά εβδόμη (7).

Για την ονοματοδοσία των υπολοίπων επεκτάσεων χρησιμοποιούμε τον οπλισμό του μείζονα τρόπου της θεμελίου της συγχορδίας. Δηλαδή, ξεκινώντας από την επέκταση ενάτης και μετά, αν ο φθόγγος της επέκτασης δεν ανήκει στο μείζονα τρόπο της θεμελίου της συγχορδίας, πρέπει να σημειώνεται η αλλοίωσή του ως προς τον οπλισμό

Προφανώς, η επέκταση εβδόμης βαθμίδας σημαίνει ότι στη συγχορδία προστίθεται η νότα που απέχει διάστημα εβδόμης από την θεμέλιο της συγχορδίας, η επέκταση ενάτης σημαίνει ότι προστίθενται στη συγχορδία και η νότα που απέχει διάστημα εβδόμης από την θεμέλιο και η νότα που απέχει διάστημα ενάτης κ.ο.κ. Είναι προφανές ότι μια νότα που απέχει διάστημα ενάτης από μία άλλη νότα έχει τον ίδιο τόνο με τη νότα που απέχει διάστημα δευτέρας. Αντίστοιχα, το διάστημα ενδεκάτης ανάγεται σε διάστημα τετάρτης και το διάστημα δεκάτης τρίτης σε διάστημα έκτης. Ο συμβολισμός της τρίφωνης συγχορδίας παραμένει. Ας δούμε ένα παράδειγμα:

Έστω ότι έχουμε τη συγχορδία Imaj13(#11). Αρχικά, παρατηρούμε ότι πρόκειται για μείζονα συγχορδία της πρώτης βαθμίδας. Στη συνέχεια, παρατηρούμε ότι η νότα που αποτελεί την επέκταση της εβδόμης, απέχει διάστημα μεγάλης εβδόμης από την θεμέλιο, λόγω της ύπαρξης του συμβολισμού maj. Έπειτα, παρατηρούμε ότι οι νότες που αποτελούν τις επεκτάσεις της ενάτης και της δέκατης τρίτης ανήκουν στον μείζονα τρόπο της θεμελίου της συγχορδίας. Αντίθετα, η νότα που αποτελεί την επέκταση ενδεκάτης είναι αλλοιωμένη κατά μια δίεση από την νότα του μείζονα τρόπου της θεμελίου. Πιο αναλυτικά:

Έστω ότι το μουσικό κομμάτι που μελετάμε είναι γραμμένο σε κάποιο τρόπο του Ντο. Άρα, η συγχορδία μας έχει ως θεμέλιο την νότα Ντο. Τότε, ως μείζονα συγχορδία αποτελείται ακόμη από τις νότες Μι (ως τρίτη μεγάλη από την θεμέλιο), Σολ (ως τρίτη μικρή από τη νότα Μι), Σι (ως νότα που απέχει

διάστημα εβδόμης μεγάλης), Ρε (ως νότα του μείζονα τρόπου του Ντο που απέχει διάστημα ενάτης), Φα δίεση (ως αλλοιωμένη κατά μια δίεση νότα του μείζονα τρόπου του Ντο που απέχει διάστημα ενδεκάτης) και Λα (ως νότα του μείζονα τρόπου του Ντο που απέχει διάστημα δεκάτης τρίτης).

Ας δούμε αναλυτικά τον συμβολισμό όλων των επεκτάσεων του μείζονα τρόπου:

Βαθμίδα / Επέκταση	1	2	3	4	5	6	7
7	maj7	7	7	maj7	7	7	7
9	maj9	9	b 9	maj9	9	9	b 9
11	maj11	11	11 b 9	maj9(#11)	11	11	11(b 9)
13	maj13	13	11(b 9 b 13)	maj13(#11)	13	11(b 13)	11(b 9 b 13)

Βασιζόμενοι σε αυτόν τον πίνακα και στους σχετικούς τρόπους, μπορούμε να δημιουργήσουμε τους αντίστοιχους πίνακες όλων των τρόπων, αφού όλοι οι σχετικοί τρόποι μοιράζονται τις ίδιες νότες, άρα και τις ίδιες συγχορδίες. Το μόνο που αλλάζει είναι η σειρά των βαθμίδων. Για παράδειγμα, ο αντίστοιχος πίνακας του λύδιου τρόπου θα ξεκινάει με πρώτη βαθμίδα την τέταρτη βαθμίδα του πίνακά μας.

2.6.3 Συγχορδίες με αναστροφή

Μια συγχορδία βρίσκεται σε αναστροφή, όταν στη βάση της δε βρίσκεται η θεμέλιος αλλά μια άλλη νότα της συγχορδίας:

- 1η αναστροφή: Στη βάση της συγχορδίας βρίσκεται η τρίτη. Η συγχορδία συμβολίζεται ως (6) και ως (65) αν περιέχει και την εβδόμη
- 2η αναστροφή: Στη βάση της συγχορδίας βρίσκεται η πέμπτη. Η συγχορδία συμβολίζεται ως (64) και ως (43) αν περιέχει την εβδόμη.
- 3η αναστροφή: Στη βάση της συγχορδίας βρίσκεται η εβδόμη. Η συγχορδία συμβολίζεται ως (42).

2.6.4 Συγχορδίες με αναστολή (suspended chords)

Μια συγχορδία βρίσκεται σε αναστολή όταν η τρίτη της έχει αντικατασταθεί από τη δεύτερη ή την τέταρτη ή και από της δύο. Η συγχορδία συμβολίζεται αντίστοιχα με sus2, sus4, sus2sus4.

2.6.5 Συγχορδίες με προστιθέμενη ένατη

Μια συγχορδία ονομάζεται συγχορδία με προστιθέμενη ένατη, αν έχει προστεθεί η ένατη χωρίς την προσθήκη της εβδόμης. Η συγχορδία συμβολίζεται ως add9.

2.6.6 Δευτερεύουσες συγχορδίες (secondary chords)

Ονομάζουμε δευτερεύουσα συγχορδία ως προς μία βαθμίδα της τονικότητάς μας, τη συγχορδία που ανήκει στο μείζονα τρόπο με τονική τη βαθμίδα αυτή. Οι δευτερεύουσες συγχορδίες που χρησιμοποιούνται είναι αυτές της τέταρτης (υποδεσπόζουσας) βαθμίδας, της πέμπτης (δεσπόζουσας) βαθμίδας και της έβδομης (δεσπόζουσας) βαθμίδας, πάντα ως προς μία βαθμίδα της τονικότητάς μας. Προφανώς, οι συγχορδίες αυτές διατηρούν τις επεκτάσεις των αντίστοιχων βαθμίδων (τέταρτης, πέμπτης, έβδομης) του μείζονα τρόπου.

Ας δούμε τις δευτερεύουσες συγχορδίες όλων των τρόπων. Τα σημεία αλλοίωσης είναι με σημείο αναφοράς τον οπλισμό κάθε τρόπου:

ΜΕΙΖΩΝ ΤΡΟΠΟΣ							
Βαθμίδα / Δευτ/ουσα	1	2	3	4	5	6	7
5	V	VI	VII	I	II	III	#IV
7	vii°	#i°	#ii°	iii°	#iv°	#v°	#vi°
4	IV	V	VI	♭ VII	I	II	III
ΔΩΡΙΟΣ ΤΡΟΠΟΣ							
5	V	VI	VII	I	II	#III	IV
7	#vii°	#i°	ii°	iii°	#iv°	#v°	vi°
4	IV	V	♭ VI	VII	I	II	III
ΦΡΥΓΙΟΣ ΤΡΟΠΟΣ							
5	V	VI	VII	I	#II	III	IV
7	#vii°	i°	#ii°	#iii°	#iv°	v°	#vi°
4	IV	♭ V	VI	VII	I	II	III
ΛΥΔΙΟΣ ΤΡΟΠΟΣ							
5	V	VI	VII	#I	II	III	#IV
7	vii°	#i°	#ii°	#iii°	iv°	#v°	#vi°
4	♭ IV	V	VI	VII	I	II	III
ΜΙΞΟΛΥΔΙΟΣ ΤΡΟΠΟΣ							
5	V	VI	VII	I	II	III	IV
7	#vii°	#i°	#ii°	iii°	#iv°	#v°	vi°
4	IV	V	VI	VII	I	II	♭ III
ΕΛΑΣΣΩΝ ΤΡΟΠΟΣ							
5	V	#VI	VII	I	II	III	IV
7	#vii°	#i°	ii°	#iii°	#iv°	v°	#vi°
4	IV	V	VI	VII	I	♭ II	III

ΛΟΚΡΙΟΣ ΤΡΟΠΟΣ							
5	#V	VI	VII	I	II	III	IV
7	#vii°	i°	#ii°	#iii°	iv°	#v°	#vi°
4	IV	V	VI	VII	b I	II	III

Κεφάλαιο 3 - Συλλογή δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετήσουμε τρόπους αναπαράστασης της μουσικής πληροφορίας καθώς και τη διαδικασία που ακολουθήσαμε για να συλλέξουμε μουσική πληροφορία για την εκπόνηση της εργασίας μας.

3.1 Τρόποι αναπαράστασης μουσικής πληροφορίας

3.1.1 Η μουσική παρτιτούρα

Η μουσική παρτιτούρα είναι η πιο διαδεδομένη μορφή αναπαράστασης της μουσικής πληροφορίας. Ο όρος παρτιτούρα (εκ του ιταλικού partitura) αναφέρεται στην «τυπωμένη μουσική». Η λέξη τυπωμένη χρησιμοποιείται εδώ καταχρηστικά, μπορεί η μουσική να αποδίδεται και στην οθόνη του υπολογιστή. Είναι μια παραστατική απεικόνιση ενός έργου, ιδανική για το μουσικό στη μελέτη του έργου αλλά και στην εκτέλεσή του. Τα βασικά χαρακτηριστικά της μουσικής παρτιτούρας είναι τα εξής:

Το πεντάγραμμο

Το μουσικό πεντάγραμμο αποτελείται από πέντε παράλληλες ευθείες γραμμές σχεδιασμένες σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, πάνω και ανάμεσα στις οποίες γράφονται οι μουσικοί φθόγγοι.

Τα μουσικά κλειδιά

Στην αρχή του πενταγράμμου σημειώνεται ένα κλειδί, το οποίο αποτελεί σημείο αναφοράς για τον ορισμό των νοτών που αντιστοιχούν σε κάθε γραμμή και διάστημα. Υπάρχουν διάφορα μουσικά κλειδιά, με πιο συνηθισμένο αυτό του Σολ, που ορίζει ότι στη δεύτερη από κάτω γραμμή του πενταγράμμου η νότα που γράφεται είναι το σολ. Το κλειδί του Φα ορίζει ότι στην τέταρτη από κάτω γραμμή η νότα που γράφεται είναι το φα. Υπάρχουν και τα κλειδιά του Ντο που χρησιμοποιούνται πιο σπάνια και ορίζουν τη θέση που γράφεται η νότα ντο.



Στην εικόνα βλέπουμε κατά σειρά τα κλειδιά του Ντο, του Φα και του Σολ πάνω στο πεντάγραμμο.

Ο οπλισμός

Μετά το κλειδί μπορεί να σημειωθεί μια ή περισσότερες υφέσεις ή διέσεις, οι οποίες αποτελούν τον λεγόμενο οπλισμό.

Το μέτρο

Μετά το κλειδί και τον οπλισμό ακολουθεί το σύμβολο μεγέθους του μέτρου. Συνήθως έχει τη μορφή κλάσματος. Ο αριθμητής αντιπροσωπεύει τη χρονική αξία του κάθε μέτρου, ενώ ο παρονομαστής τη βασική χρονική μονάδα μέτρησης. Για τον διαχωρισμό των μουσικών μέτρων χρησιμοποιείται η διαστολή (μία γραμμή κάθετη στο πεντάγραμμο), από την οποία προκύπτουν τα μέτρα, τα οποία και αποτελούν ενότητες συγκεκριμένης χρονικής αξίας.

Γενικοί μουσικοί όροι

Υπάρχουν πολλοί μουσικοί όροι για να ορίσουν χαρακτηριστικά ενός έργου, όπως το τέμπο του, οι δυναμικές, το συναίσθημα κ.ά. Οι όροι αυτοί έχει καθιερωθεί να γράφονται στα ιταλικά.

Εν τέλει μια παρτιτούρα έχει την εξής μορφή:

PRELUDE IN C MAJOR

from THE WELL-TEMPERED CLAVIER, Book 1

SECONDO

By JOHANN SEBASTIAN BACH
(1685–1750)

Allegro



mp

4

Η παρτιτούρα μπορεί να είναι χειρόγραφη. Ωστόσο, στη σύγχρονη ψηφιακή εποχή έχουν αναπτυχθεί πολλά εργαλεία λογισμικού για τη δημιουργία ψηφιακής παρτιτούρας.

3.1.2 Το πρότυπο MusicXML

Το πρότυπο MusicXML [3] βασίζεται πάνω στη γνωστή γλώσσα XML για τη δημιουργία, επεξεργασία και δημοσίευση της ψηφιακής παρτιτούρας. Όπως αναφέραμε, υπάρχουν πάρα πολλά εργαλεία λογισμικού για τη δημιουργία ψηφιακής παρτιτούρας. Το MusicXML είναι αυτή τη στιγμή το καθιερωμένο πρότυπο για την επικοινωνία μεταξύ αυτών των λογισμικών.

Το πρότυπο αυτό εκμεταλλεύεται τις δυνατότητες που του δίνει η ιεραρχική δομή ενός εγγράφου xml αποτελώντας έτσι μια μορφή αναπαράστασης μουσικής πληροφορίας απλή και εύκολα αναγνώσιμη από έναν υπολογιστή αλλά και από τον άνθρωπο. Τώρα, θα παρουσιάσουμε τα βασικά στοιχεία του musicXML.

Σε αντιστοιχία με την παρτιτούρα αρχικά πρέπει να ορίσουμε τις ιδιότητες (attributes) του κομματιού:

```
<attributes>
  <divisions>24</divisions>
  <key>
    <fifths>-3</fifths>
    <mode>minor</mode>
  </key>
  <time>
    <beats>3</beats>
    <beat-type>4</beat-type>
  </time>
</attributes>
```

Εδώ βλέπουμε πώς ορίζονται ο αριθμός των μέτρων (divisions), η τονικότητα (key) και το μέτρο (time) του μουσικού κομματιού. Ας δούμε τώρα πως ορίζεται μια νότα (note):

```
<note>
  <pitch>
    <step>E</step>
    <alter>-1</alter>
    <octave>5</octave>
  </pitch>
  <duration>24</duration>
  <tie type="start"/>
</note>
```

Μια νότα, περιγράφεται από τον τόνο της (pitch) και τη διάρκειά της (duration). Στο pitch έχουμε τη νότα δοσμένη στην αγγλική σημειογραφία (A, B, C, D, E, F, G, ξεκινώντας από τη νότα Λα), στο στοιχείο step, την αλλοίωσή της, στο στοιχείο alter και την οκτάβα της στο στοιχείο octave. Η οκτάβα του μεσαίου Ντο στο πιάνο ορίζεται ως οκτάβα 4. Για τη διάρκεια ισχύει πως ένα τέταρτο του χρόνου ισοδυναμεί με 24. Η χρονική διάρκεια μιας νότας είναι ακέραιος αριθμός.

Για να ορίσουμε μια παύση χρησιμοποιούμε το στοιχείο rest:

```
<note>
  <rest measure="yes"/>
  <duration>72</duration>
</note>
```

Για να ορίσουμε μια συγχορδία, δηλαδή το ταυτόχρονο άκουσμα δύο ή περισσότερων νοτών, εισάγουμε το στοιχείο chord:

```
<note>
  <pitch>
    <step>C</step>
    <octave>4</octave>
  </pitch>
  <duration>1</duration>
</note>
<note>
  <chord/>
  <pitch>
    <step>E</step>
    <alter>-1</alter>
    <octave>4</octave>
  </pitch>
  <duration>1</duration>
</note>
<note>
  <chord/>
  <pitch>
    <step>G</step>
    <octave>4</octave>
  </pitch>
  <duration>1</duration>
</note>
```

3.1.3 Το MIDI πρωτόκολλο - MIDI messages

Το MIDI (Musical Instrument Digital Interface) [4] είναι ένα πρωτόκολλο με εφαρμογή στην επικοινωνία μεταξύ ηλεκτρονικών οργάνων, υπολογιστών και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών. Η επικοινωνία αυτή δε γίνεται μέσω κάποιου ηχητικού σήματος αλλά η μουσική πληροφορία στέλνεται με μηνύματα. Η ταχύτητα του μουσικού κομματιού προσδιορίζεται με τη χρήση ενός σήματος χρονισμού.

Οι προδιαγραφές του πρωτοκόλλου έχουν προβλέψει ώστε οι MIDI πληροφορίες να μπορούν να μεταδοθούν σε μέχρι και 16 διαφορετικά κανάλια. Αυτό σημαίνει πως υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης αναπαραγωγής μέχρι και 16 διαφορετικών ήχων.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ενός byte μηνύματος (message byte), το status byte και το data byte. Για το status byte το πλέον σημαντικό bit (MSB) ισούται πάντα με 1, ενώ για το data byte ισούται πάντα με 0. Το μέγιστο μήκος ενός πρότυπου MIDI μηνύματος είναι τρία bytes, αν και υπάρχουν κάποιοι τύποι MIDI μηνυμάτων με μικρότερο μήκος.

Status	Data 1	Data 2
1 t t t n n n n	0 x x x x x x x	0 x x x x x x x

Γίνεται αντιληπτό πως σε κάθε byte, απομένουν 7 bits για να περιγράψουν τη μοναδική πληροφορία που μεταφέρει κάθε μήνυμα. Αυτό σημαίνει πως υπάρχουν 128 διακριτές τιμές διαθέσιμες ανά byte. Υπάρχουν 8 θεμελιώδεις τύποι status μηνυμάτων. Για την περιγραφή τους χρησιμοποιούνται τα (t) bits του byte. Τα υπόλοιπα 4 (n) bits χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το κανάλι στο οποίο θα σταλεί το συγκεκριμένο μήνυμα.

Ας δούμε πώς περιγράφεται μια νότα με MIDI μηνύματα:

Message	Status	Data 1	Data 2
Note Off	8n	Note Number	Velocity
Note On	9n	Note Number	Velocity

Το μήνυμα Note On δηλώνει ότι εκείνη τη στιγμή “παίζεται” μια νότα, είτε από το μουσικό είτε από τον υπολογιστή. Με τη λήψη του μηνύματος Note Off η νότα παύει. Κάθε Note On μήνυμα πρέπει να ακολουθείται από το αντίστοιχο Note Off, αλλιώς η νότα θα “παίζεται” για πάντα.

Οι τιμές στο status message είναι σε δεκαεξαδική μορφή, άρα το n παίρνει τιμές από 0 έως F. Η νότα μπορεί να πάρει 128 διαφορετικούς τόνους, βασισμένους στο δυτικό συγκερασμένο σύστημα με το μεσαίο ντο να έχει την τιμή 60. Αντίστοιχα και η ένταση (velocity) της νότας περιγράφεται με 128 διακριτές τιμές.

Για τον ορισμό της ταχύτητας του μουσικού κομματιού γίνεται χρήση ενός τύπου MIDI μηνύματος, του MIDI meta message, το οποίο αποτελείται από έξι bytes. Ας αναλύσουμε ένα τέτοιο μήνυμα δοσμένο σε δεκαεξαδική μορφή:

0xFF 0x51 0x03 0x07 0xA1 0x20

Το πρώτο byte πληροφορίας έχει την τιμή *0xFF*, δηλώνοντας έτσι πως πρόκειται για MIDI meta message. Το δεύτερο byte πληροφορίας έχει την τιμή *0x51* δηλώνοντας έτσι πως το μήνυμα είναι Set Tempo message, δηλαδή μήνυμα ορισμού της ταχύτητας του κομματιού. Το τρίτο byte πληροφορίας έχει την τιμή *0x03* δηλώνοντας ότι ακολουθούν ακόμη τρία bytes πληροφορίας. Τα εναπομείναντα τρία bytes δηλώνουν πόσα microseconds διαρκεί ένα τέταρτο της νότας. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα το *0x07A120* ισούται με 500000. Άρα στο κομμάτι μας το κάθε τέταρτο νότας διαρκεί 500000 microseconds. Δεδομένου ότι το λεπτό ισούται 60000000 microseconds, βρίσκουμε πως η ταχύτητα του κομματιού μας είναι $60000000 / 500000 = 120$ bpm.

Σε περίπτωση που αυτό το μήνυμα δεν εμφανιστεί, η ταχύτητα τίθεται αυτόματα στα 120 bpm, που αποτελεί την προεπιλεγμένη ρύθμιση του πρωτοκόλλου MIDI.

Το πρωτόκολλο MIDI είναι ιδανικό για την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ ηλεκτρονικών συσκευών, αλλά όχι για την αναπαράσταση μουσικής πληροφορίας.

Παρατηρούμε πως, σε αντίθεση με το MusicXML, στα μηνύματα MIDI δεν υπάρχει άμεσα η πληροφορία για τη διάρκεια μιας νότας, αλλά πληροφορία για το πότε η νότα αρχίζει να ακούγεται και πότε τελειώνει. Αυτό κάνει την επεξεργασία των MIDI μηνυμάτων και την ανάκτηση μουσικής πληροφορίας μέσω αυτών πολύ δυσκολότερες σε σχέση με το MusicXML.

3.2 Διαδικασία συλλογής δεδομένων

Για τις ανάγκες της εργασίας ήταν απαραίτητη η δημιουργία ενός Dataset με τις ακολουθίες συγχορδιών μουσικών κομματιών από ένα ευρύ φάσμα μουσικών ειδών.

Οι περισσότερες υπάρχουσες δουλειές στο πεδίο της αρμονικής ανάλυσης μουσικών κομματιών χρησιμοποιούν κυρίως ως δεδομένα σύνολα μουσικών κομματιών που προέρχονται μόνο από ένα είδος μουσικής ή από συγγενικά είδη, οπότε και τα συμπεράσματά τους δε μπορούν να έχουν μια πιο καθολική εφαρμογή.

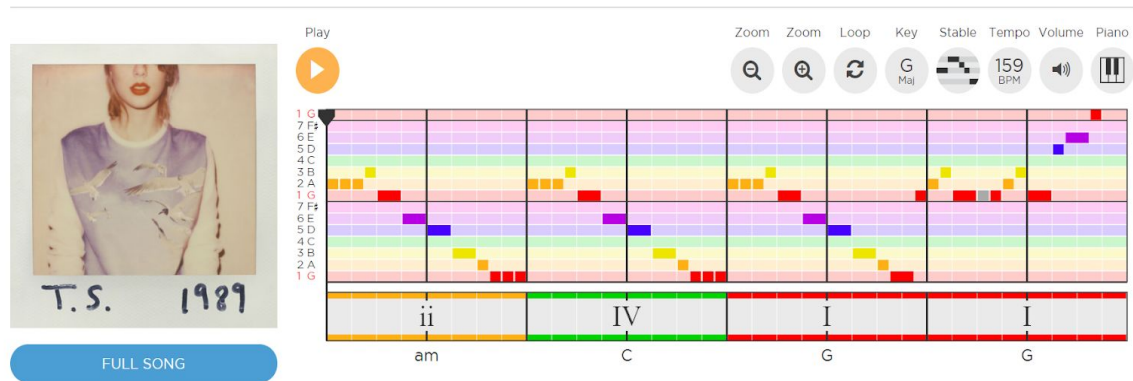
Εμείς επιλέξαμε για αυτό τον σκοπό την άντληση δεδομένων από την ιστοσελίδα www.hooktheory.com [5]. Η ιστοσελίδα αυτή δίνει τη δυνατότητα στους εγγεγραμμένους της χρήστες να μεταγράψουν οποιοδήποτε υπάρχον μουσικό κομμάτι της αρεσκείας τους και στη συνέχεια να ανεβάσουν το μεταγραμμένο κομμάτι στην ιστοσελίδα προσβάσιμο από όλους τους άλλους χρήστες, εγγεγραμμένους και μη.

Η μεταγραφή (transcription) του κάθε κομματιού γίνεται με τη βοήθεια του εργαλείου hookpad (<https://www.hooktheory.com/hookpad/app>).

Το εργαλείο αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να μεταγράψει τη μελωδία του κομματιού και τις συγχορδίες του. Για τη μελωδία ο χρήστης επιλέγει τις νότες και τη διάρκειά τους (piano roll), ενώ για τις συγχορδίες επιλέγει τη συγχορδία στη συμβολική μορφή που έχουμε περιγράψει και τη

διάρκειά της. Ακόμη επιλέγει τον τόνο, τον τρόπο και το τέμπο του κομματιού. Εν τέλει το κάθε μεταγραμμένο κομμάτι έχει την εξής μορφή:

“Shake It Off” by Taylor Swift



Η μεγάλη ποικιλία των μουσικών προτιμήσεων των χρηστών της ιστοσελίδας έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη μουσικών κομματιών από πολλά διαφορετικά είδη μουσικής.

3.2.1 Περιγραφή διαδικασίας συλλογής δεδομένων

Η άντληση των δεδομένων από την ιστοσελίδα www.hooktheory.com έγινε με τη βοήθεια Python scripts [6].

Κάθε κομμάτι διαθέτει ένα μοναδικό id. Στο σύνδεσμο :

<https://www.hooktheory.com/hookpad/app/id/> + id,

κάθε εγγεγραμμένος χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση στο κομμάτι και μέσω του εργαλείου hookpad.

Η μουσική πληροφορία κάθε κομματιού βρίσκεται σε μορφή XML. Σε κάθε κομμάτι αντιστοιχεί ένα μοναδικό XML αρχείο. Αναλύοντας τον πηγαίο κώδικα της ιστοσελίδας διαπιστώσαμε πως η ιστοσελίδα έχει πρόσβαση στο αρχείο αυτό κάνοντας αίτηση στον εξυπηρετητή μέσω μιας διεπαφής API σε ένα σύνδεσμο της μορφής:

<https://api.hooktheory.com/v1/songs/public/X?fields=ID,xmlData,song,jsonData>,

όπου το X είναι μοναδικό για κάθε κομμάτι. Η απάντηση στην αίτηση αυτή είναι το αρχείο XML που περιλαμβάνει τη μουσική πληροφορία του κομματιού.

Οπότε, για να αποκτήσουμε τα XML αρχεία για κάθε κομμάτι έπρεπε να συλλέξουμε όλα τα διαφορετικά id's, έπειτα να μεταφερθούμε για κάθε id στο περιβάλλον του εργαλείου hookpad και εκεί να εντοπίσουμε στον πηγαίο κώδικα το αίτημα μέσω του API, ώστε να το εκτελέσουμε εμείς και να συλλέξουμε έτσι τα XML αρχεία όλων των κομματιών.

Για την απόκτηση των id χρησιμοποιήσαμε τις βιβλιοθήκες urllib.request και BeautifulSoup [7] της Python.

Για την απόκτηση του αιτήματος API χρησιμοποιήσαμε μια εντολή σε JavaScript [8] η οποία φέρνει όλα τα ονόματα των requests που έγιναν από τη σελίδα. Από εκεί απομονώσαμε και κρατήσαμε το αίτημα API για κάθε μουσικό κομμάτι. Για να έχουμε πρόσβαση στη σελίδα μέσω του python script χρησιμοποιήσαμε τον Selenium Webdriver [9].

```
scriptToExecute = "var performance = window.performance ||
window.mozPerformance || window.msPerformance ||
window.webkitPerformance || {}; var network =
performance.getEntries() || {}; return network;"
```

Συλλέξαμε 8716 μουσικά κομμάτια τα οποία ανήκουν στα παρακάτω είδη (ένα κομμάτι μπορεί να ανήκει σε παραπάνω από ένα είδος μουσικής):

Είδος μουσικής	Αριθμός μουσικών κομματιών
soundtrack	1422
pop	1325
video-game	1249
rock	1237
electronical	1070
dance	679
j-pop	547
alternative	496

r-and-b	472
hip-hop-rap	441
house	432
indie	387
classical	331
singer-songwriter	311
jazz	272
soul	244
country	239
folk	238
blues	231
k-pop	211
experimental	161
disney	148
childrens	142
metal	139
punk	136
alt-country	130
reggae	86
latin	81
vocal	79
techno	72
worship	56
holiday	41
world	37

3.2.2 Προεπεξεργασία των δεδομένων

Μετά τη συλλογή και αρχειοθέτηση των XML όλων των μουσικών κομματιών συνεχίσαμε με την επεξεργασία τους ώστε να καταλήξουμε σε μια μορφή δεδομένων ιδανική για τις ανάγκες της εργασίας μας, δηλαδή μια λίστα

που να περιλαμβάνει τις ακολουθίες των μουσικών συγχορδιών για κάθε μουσικό κομμάτι. Αυτή η διαδικασία έγινε με χρήση python script.

Το XML που αντιστοιχεί σε κάθε μουσικό κομμάτι χωρίζεται σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος περιέχει τις γενικές πληροφορίες του μουσικού κομματιού, το δεύτερο μέρος περιγράφει τη μελωδία του, ενώ το τρίτο περιγράφει τις συγχορδίες. Από το πρώτο μέρος του XML μας ενδιαφέρει η πληροφορία για τον τρόπο (mode) στον οποίο είναι γραμμένο το μουσικό κομμάτι.

Το μέρος της μελωδίας ακολουθεί τη μορφή του MusicXML, αφού η συγκεκριμένη μορφή είναι ιδανική και ευρέως διαδεδομένη για την αναπαράσταση μουσικής παρτιτούρας. Για την περιγραφή των συγχορδιών, για τις οποίες ενδιαφερόμαστε εμείς, η ιστοσελίδα χρησιμοποιεί μια μορφή αναπαράστασης η οποία βασίζεται στο MusicXML. Με τη μελέτη του εργαλείου hookpad και της μορφής των XML αυτών, έγινε αντιληπτό ότι κάθε συγχορδία περιγράφεται από τα εξής στοιχεία (XML elements):

- <sd>

Σε αυτό το XML element βρίσκεται η πληροφορία για τη βαθμίδα της συγχορδίας. Η τιμή του στοιχείου είναι ένας ακέραιος αριθμός από το 1 μέχρι το 7 ή το κενό. Σε περίπτωση που η τιμή είναι κενή τότε σημαίνει ότι έχω παύση.

- <fb>

Σε αυτό το XML element περιγράφονται οι επεκτάσεις και οι αναστροφές της συγχορδίας. Η τιμή του στοιχείου και η ερμηνεία της μπορεί να είναι μία από τις εξής:

- 6: πρώτη αναστροφή
- 64: δεύτερη αναστροφή
- 65: συγχορδία εβδόμης σε πρώτη αναστροφή
- 43: συγχορδία εβδόμης σε δεύτερη αναστροφή
- 42: συγχορδία εβδόμης σε τρίτη αναστροφή
- 7: συγχορδία εβδόμης

- 9: συγχορδία ενάτης
- 11: συγχορδία ενδεκάτης
- 13: συγχορδία δέκατης τρίτης
- (κενό): καμία αναστροφή ή επέκταση

- <sec>

Σε αυτό το XML element βρίσκεται η πληροφορία για το αν η συγχορδία έχει λειτουργία δευτερεύουσας τετάρτης, πέμπτης ή εβδόμης. Η τιμή του στοιχείου είναι ένας ακέραιος αριθμός από το 1 μέχρι το 7 ή είναι το κενό. Σε περίπτωση που δεν έχω κενή τιμή τότε το στοιχείο <sd> παίρνει τιμή 4, 5 ή 7 και δείχνει τι είδους δευτερεύουσας συγχορδίας έχω ενώ το στοιχείο <sec> δείχνει σε ποια βαθμίδα αναφέρεται. Για παράδειγμα εάν το στοιχείο <sd> έχει την τιμή 5 και το στοιχείο <sec> έχει την τιμή 2, τότε η συγχορδία μου είναι η δευτερεύουσα πέμπτη της δεύτερης βαθμίδας.

- <sus>

Σε αυτό το XML element βρίσκεται η πληροφορία για το αν η συγχορδία είναι suspended. Η τιμή που μπορεί να πάρει το στοιχείο αυτό είναι μία από τις εξής: sus2, sus4, sus2sus4 και το κενό.

- <borrowed>

Σε αυτό το XML element βρίσκεται η πληροφορία για το αν η συγχορδία είναι δανεισμένη από παράλληλο τρόπο. Η τιμή του στοιχείου είναι ένας ακέραιος αριθμός από το -12 μέχρι το 8 ή το κενό. Η τιμή αυτή δείχνει πόσα διαφορετικά σημεία αλλοίωσης έχει ο δανεικός τρόπος από το μείζονα τρόπο, στον οποίο αντιστοιχεί η τιμή 0. Για κάθε δίεση η τιμή ανεβαίνει κατά ένα ενώ για κάθε ύφεση η τιμή μειώνεται κατά ένα.

- <add>

Σε αυτό το XML element βρίσκεται η πληροφορία για το αν η συγχορδία είναι add9. Η τιμή του είναι το 9 ή το κενό.

Υπάρχουν και στοιχεία τα οποία περιγράφουν τη διάρκεια της συγχορδίας (ή της παύσης) τα οποία δε μας απασχολούν στη δημιουργία της βάσης δεδομένων μας.

Για την ανάλυση (parsing) των XML χρησιμοποιήσαμε τη βιβλιοθήκη BeautifulSoup.

Το parsing έγινε με την εντολή:

```
htmlParser = BeautifulSoup(f.read(), 'html.parser'),
```

όπου το “f” είναι το XML μας σε μορφή txt. Έπειτα, με την εντολή:

```
htmlParser.find_all(' XML element '),
```

είχαμε πρόσβαση στην τιμή του κάθε στοιχείου (XML element) που μας ενδιαφέρει.

Στη συνέχεια δημιουργήσαμε ξεχωριστές συναρτήσεις οι οποίες μας επέστρεφαν την κάθε τιμή του στοιχείου στη μορφή που χρειαζόμασταν για να αναπαραστήσουμε τη συγχορδία στη μορφή αναπαράστασης με ρωμαϊκούς αριθμούς και να την αποθηκεύσουμε σε μία λίστα που θα περιέχει όλες τις συγχορδίες κάθε κομματιού, δημιουργώντας έτσι την ακολουθία συγχορδιών του κάθε μουσικού κομματιού. Να αναφέρουμε εδώ πως περιπτώσεις παύσης ή επανάληψης της ίδιας συγχορδίας αγνοούνται, καθώς και τα μουσικά κομμάτια που αποτελούνται από τρεις ή λιγότερες συγχορδίες. Η ακολουθία αυτή αποθηκεύεται με τη σειρά της σε μία νέα λίστα. Αυτή η λίστα λιστών (list of lists) αποτελεί το Dataset μας.

Εν τέλει, στο Dataset μας βρίσκονται 8515 μουσικά κομμάτια με την παρακάτω συχνότητα εμφάνισης τρόπων στα οποία είναι γραμμένα:

Τρόπος	Αριθμός μουσικών κομματιών
Μείζων	3988
Ελάσσων	3702
Δώριος	373
Μιξολύδιος	293
Φρύγιος	79
Λύδιος	73
Λόκριος	7

Παρατηρούμε αμέσως την κυριαρχία των δύο τονικών τρόπων, του Μείζονα και του Ελάσσονα.

Ο αριθμός των συνολικών συγχορδιών είναι 119876, δηλαδή έχουμε 14.08 συγχορδίες ανά κομμάτι. Στο Dataset υπάρχουν 732 διαφορετικές συγχορδίες οι οποίες εμφανίζονται έστω και μια φορά. Είναι ενδιαφέρον να δούμε τις έντεκα πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συγχορδίες, οι οποίες εμφανίζονται σε συνολικό ποσοστό 58.6%:

Συγχορδία	Αριθμός εμφανίσεων	Ποσοστό (%)
I	11265	9.4
i	10798	9.0
V	9264	7.7
IV	8833	7.4
♭ VII	7389	6.2
♭ VI	6168	5.1
vi	4904	4.1
♭ III	4095	3.4
iv	2941	2.5
v	2421	2.0
ii	2143	1.8
Σύνολο	70221	58.6

Βλέπουμε πως οι πιο συχνές συγχορδίες είναι οι τρίφωνες συγχορδίες.

Κεφάλαιο 4 - Αρμονική ανάλυση μουσικού έργου

Στη νεότερη μουσική ορολογία η λέξη αρμονία χαρακτηρίζει γενικά το σύνολο των κανόνων που διέπουν το ταυτόχρονο άκουσμα δύο ή περισσότερων φθόγγων. Ένα μουσικό κομμάτι αποτελείται και μπορεί να διαχωριστεί κατά κύριο λόγο σε δύο μέρη: στη μελωδία και στις συγχορδίες που την υποστηρίζουν. Για την αρμονική ανάλυση θα μελετήσουμε το δεύτερο μέρος, αυτό των συγχορδιών, αφού οι λειτουργίες αυτών και οι σχέσεις μεταξύ τους είναι που χτίζουν σε ένα κομμάτι τον αρμονικό σκελετό του.

Έχουμε αναφέρει πως στη σύγχρονη μουσική οι πιο διαδεδομένοι τρόποι είναι ο μείζων και ο ελάσσων. Ορίζουμε ως τονική αρμονία τους κανόνες που διέπουν τα έργα που είναι γραμμένα σε μείζονες και ελάσσονες τονικότητες. Εμείς, προτείνουμε μια αρμονική ανάλυση η οποία βασίζεται στους κανόνες της τονικής αρμονίας αλλά διανθίζεται και με τη μελέτη και την χρήση των παράλληλων διατονικών τρόπων, δηλαδή μια τροπική αρμονική ανάλυση. Αυτή είναι και η κύρια διαφορά μας με τις ήδη υπάρχουσες δουλειές, οι οποίες ασχολούνται σχεδόν αποκλειστικά με τονικά μουσικά έργα.

Στα πλαίσια της εργασίας μας αναπτύξαμε δύο τρόπους ανάλυσης ενός μουσικού έργου: μια οντολογία και έναν αλγόριθμο σε περιβάλλον Python.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε αυτές τις δύο δουλειές μας και θα τις συγκρίνουμε με το σύστημα Harmtrace.

4.1 Λειτουργίες συγχορδιών που ανήκουν στην τονικότητα - ο κύκλος των πεμπτών

Αναφέραμε πως η τονική νότα κάθε τρόπου αποτελεί και το τονικό κέντρο του. Μια συγχορδία μπορεί να εξυπηρετεί τρεις λειτουργίες: τονική (tonic), δεσπόζουσα (dominant), υποδεσπόζουσα (subdominant).

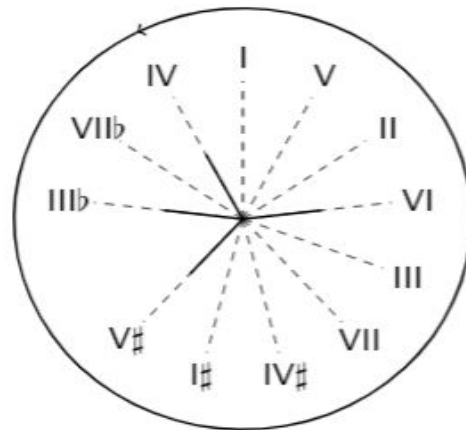
Μια συγχορδία χαρακτηρίζεται ως τονική όταν ηχητικά μας δίνει την εντύπωση ότι βρισκόμαστε στο τονικό κέντρο. Μια συγχορδία χαρακτηρίζεται ως δεσπόζουσα όταν ηχητικά δημιουργεί μια “αστάθεια” η οποία οδηγεί στην τονική ως λύση της. Μια υποδεσπόζουσα συγχορδία έχει μια πιο αφηρημένη

λειτουργία. Χωρίς να μας δίνει την εντύπωση του τονικού κέντρου, δεν ακούγεται τόσο ασταθής όσο η δεσπόζουσα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να “προετοιμάσει” μια δεσπόζουσα συγχορδία, αλλά μπορεί και να λυθεί σε μία τονική συγχορδία.

Στους τρόπους που μελετάμε, η συγχορδία με θεμέλιο την πρώτη βαθμίδα έχει πάντα τονική λειτουργία, καθώς η χαρακτηριστική βαθμίδα της αποτελεί το τονικό κέντρο. Οι συγχορδίες με θεμελίους την πέμπτη και έβδομη βαθμίδα έχουν πάντα λειτουργία δεσπόζουσας, ενώ οι συγχορδίες με θεμελίους τη δεύτερη και τέταρτη βαθμίδα έχουν πάντα λειτουργία υποδεσπόζουσας, πάντα σε σχέση με το τονικό κέντρο. Προφανώς, οι λειτουργίες δεσπόζουσας και υποδεσπόζουσας αφορούν το τονικό κέντρο, δηλαδή π.χ. η τρίφωνη συγχορδία πέμπτης βαθμίδας έχει δεσπόζουσα λειτουργία ως προς τις συγχορδίες που έχουν λειτουργία τονικής.

Οι λειτουργίες των συγχορδιών της τρίτης και έκτης βαθμίδας διαφέρουν ανάλογα με τον τρόπο. Για τον χαρακτηρισμό τους μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση μεταξύ των δύο τονικών τρόπων, του μείζονα και του ελάσσονα. Παρατηρούμε ότι η συγχορδία έκτης βαθμίδας του μείζονα τρόπου αποτελεί την τονική συγχορδία του σχετικού ελάσσονα τρόπου. Αντίστοιχα, η συγχορδία τρίτης βαθμίδας του ελάσσονα τρόπου αποτελεί την τονική συγχορδία του σχετικού μείζονα τρόπου. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι για το μείζονα τρόπο, η συγχορδία της έκτης βαθμίδας έχει λειτουργία τονικής με μεταφορά του τονικού κέντρου στη σχετική ελάσσονα τονικότητα και αντίστοιχα την ίδια λειτουργία εξυπηρετεί η συγχορδία της τρίτης βαθμίδας στον ελάσσονα τρόπο. Βασισμένοι σε αυτή την παραδοχή μπορούμε τώρα να χαρακτηρίσουμε και τις συγχορδίες τρίτης βαθμίδας στο μείζονα τρόπο και έκτης βαθμίδας στον ελάσσονα. Η συγχορδία τρίτης βαθμίδας στο μείζονα τρόπο αντιστοιχεί σε αυτήν της πέμπτης βαθμίδας του ελάσσονα τρόπου, άρα έχει λειτουργία δεσπόζουσας. Η συγχορδία έκτης βαθμίδας στον ελάσσονα τρόπο αντιστοιχεί σε αυτήν της τέταρτης βαθμίδας του μείζονα τρόπου, άρα έχει λειτουργία υποδεσπόζουσας. Στο λύδιο και μιξολύδιο τρόπο, όπου η τονική συγχορδία είναι ίδια με αυτή του μείζονα θα εφαρμόσουμε τις λειτουργίες του μείζονα τρόπου, ενώ στο φρύγιο και δώριο τρόπο, όπου η τονική συγχορδία είναι ίδια με αυτή του ελάσσονα θα εφαρμόσουμε τις λειτουργίες του ελάσσονα τρόπου. Στο λόκριο τρόπο, όπου η τονική συγχορδία είναι ελαττωμένη θα ακολουθήσουμε τις λειτουργίες του ελάσσονα τρόπου.

Μια ενδιαφέρουσα απεικόνιση των εννοιών της δεσπόζουσας και της υποδεσπόζουσας είναι ο κύκλος των πεμπτών:



Πηγαίνοντας προς τα δεξιά έχουμε τη σχέση υποδεσπόζουσας - τονικής, ενώ πηγαίνοντας προς τα αριστερά έχουμε τη σχέση δεσπόζουσας - τονικής.

4.2 Ανάπτυξη Οντολογίας

Η αρχική ιδέα στα πλαίσια της εργασίας μας ήταν να δημιουργήσουμε μια Οντολογία [10] για την αρμονική ανάλυση ακολουθιών συγχορδιών. Το μοντέλο μας είναι βασισμένο στον κύκλο των πεμπτών, στο συσχετισμό συγχορδιών και στο δανεισμό συγχορδιών από παράλληλους τρόπους. Επισημαίνεται ότι χρησιμοποιούμε μόνο τις τονικότητες της νότας Ντο.

Με βάση τον κύκλο των πεμπτών γνωρίζουμε πως αν κατευθυνόμαστε προς τα δεξιά, η συγχορδία μας αποτελεί υποδεσπόζουσα της επόμενης συγχορδίας και δεσπόζουσα της προηγούμενης. Κάθε συγχορδία ενός τρόπου, η οποία δεν ανήκει στον κύκλο των πεμπτών με βάση την τονική συγχορδία πρέπει να συσχετιστεί με μία συγχορδία του κύκλου των πεμπτών. Ονομάζουμε δύο συγχορδίες σχετικές, όταν οι τρίφωνές τους συγχορδίες μοιράζονται δύο νότες. Έτσι, για παράδειγμα η ii συγχορδία του μείζονα τρόπου είναι σχετική της IV, άρα έχει λειτουργία υποδεσπόζουσας. Με αυτό τον τρόπο, δηλαδή με τη λειτουργία κάθε συγχορδίας ως προς την τονική, μπορούμε να αναλύσουμε μια δοθείσα αλληλουχία συγχορδιών.

Αρχικά ορίζουμε τη κλάση Chord και τις βαθμίδες ως υποκατηγορίες της:

First ⊂ *FlatSecond* ⊂ *Second* ⊂ *FlatThird* ⊂ *Third* ⊂ *Fourth* ⊂ *SharpFourth* ⊂
FlatFifth ⊂ *Fifth* ⊂ *FlatSixth* ⊂ *Sixth* ⊂ *FlatSeventh* ⊂ *Seventh* ⊆ *Chord*

Προφανώς ισχύει ότι:

SharpFourth ≡ *FlatFifth*

Μετά ορίζουμε όλες τις πιθανές συγχορδίες με δέκατη τρίτη επέκταση, οι οποίες εμφανίζονται στους διατονικούς τρόπους. Πχ για τις συγχορδίες πρώτης βαθμίδας έχουμε:

Imaj13 ⊂ *Imaj13s11* ⊂ *I13* ⊂ *i13* ⊂ *i11b9b13* ⊂ *i11b13* ⊂ *i11b5b9b13* ⊆ *First*

Επαναλαμβάνουμε για όλες τις βαθμίδες.

Έπειτα, ορίζουμε ως υποκατηγορίες της συγχορδίας με δέκατη τρίτη επέκταση, όλες τις άλλες συγχορδίες της βαθμίδας. Πχ για τις συγχορδίες πρώτης βαθμίδας έχουμε:

Imaj11 ⊆ *Imaj13*

Imaj9 ⊆ *Imaj11*

Imaj7 ⊆ *Imaj9*

I ⊆ *Imaj7*

Τώρα, λοιπόν, έχουμε ορίσει όλες τις πιθανές συγχορδίες όλων των παράλληλων διατονικών τρόπων. Πρέπει τώρα να τις αντιστοιχήσουμε σε κάθε τρόπο. Ορίζουμε τους τρόπους ως υποκατηγορίες της κλάσης Chord:

Ionian ⊂ *Dorian* ⊂ *Phrygian* ⊂ *Lydian* ⊂ *Mixolydian* ⊂ *Aeolian* ⊂ *Locrian* ⊆ *Chord*

Σε αυτές τις υποκατηγορίες αντιστοιχούμε τις αντίστοιχες συγχορδίες με δέκατη τρίτη επέκταση κάθε βαθμίδας. Τώρα, είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε για κάθε δοθείσα συγχορδία, σε ποιους τρόπους ανήκει. Η οντολογία μας είναι σε θέση να απαντάει ερωτήματα (queries) της μορφής:

chord_1 : Imaj7

chord_2 : I7

chord_3 : iiio9

Query $q_1(x) = \text{IoniantChord}(x)$

Answer: *chord_1*

Query: $q_2(x) = \{\text{chord_2}, \text{chord_3}\}$

Answer: *MixolydianChord(superclass)*

Στη συνέχεια ορίζουμε ως ρόλους τις έννοιες που περιγράφουν σχέσεις μεταξύ συγχορδιών. Αυτά είναι: *isDominantOf*, *isSubdominantOf*, *isMinorRelativeOf*, *isMajorRelativeOf*, *isParallelTo*, *isCounterParallelTo*, *isTritoneOf*. Αυτοί οι ρόλοι ουσιαστικά περιγράφουν σχέσεις μεταξύ δύο συγχορδιών των οποίων οι τονικές τους απέχουν ένα ημιτόνιο, μια τρίτη μεγάλη, μια τρίτη μικρή, μια τέλεια πέμπτη, μια τέλεια τετάρτη ή και ένα τρίτονο, είτε διαφέρουν κατά τρία έως επτά ημιτόνια.

Βασισμένοι στη μεθοδολογία που περιγράφεται στο “All elephants are bigger than all mice” [11], εισάγουμε την ιδέα των καρτεσιανών γινομένων, που δηλώνεται με \otimes . Για παράδειγμα η έκφραση “all Fifth chords are *isDominantOf* to all First Chords”, γράφεται ως:

$$\text{Fifth} \subseteq \otimes \text{isDominantOf.Fist}$$

Αυτό το επαναλαμβάνουμε για όλες τις βαθμίδες, και για όλους τους ρόλους που έχουμε ορίσει:

$$\text{Fourth} \subseteq \otimes \text{isSubDominantOf.Fist}$$

$$\text{vi11b13} \subseteq \otimes \text{isMinorRelativeOf.Imaj13}$$

$$\text{vi13} \subseteq \otimes \text{isMinorRelativeOf.Imaj13s11}$$

$$\text{vi11b9b13} \subseteq \otimes \text{isMinorRelativeOf.I13}$$

$$\text{bIIIImaj13} \subseteq \otimes \text{isMajorRelativeOf.i11b13}$$

$$\text{iii11b9b13} \subseteq \otimes \text{isParallelTo.Imaj13}$$

$$\text{bVIImaj13s11} \subseteq \otimes \text{isCounterParallelTo.i11b13}$$

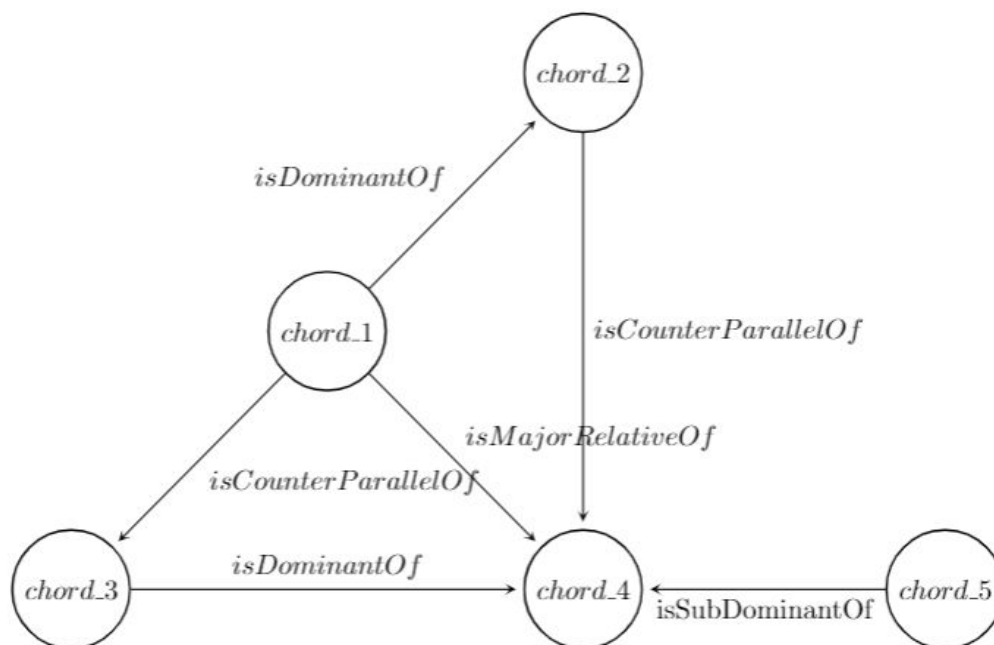
...

...

Τώρα, για παράδειγμα αν έχουμε τα άτομα:

chord_1 : *I*maj7
chord_2 : *IV*maj9
chord_3 : *iii*7
chord_4 : *vi*11
chord_5 : *II*9

βγαίνουν τα εξής συμπεράσματα από τον reasoner:



Είναι εμφανές πως κάτι τέτοιο μας βοηθάει στην αρμονική ανάλυση μιας δοσμένης ακολουθίας συγχορδιών.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούμε αλυσίδες ζευγαριών αυτών των ρόλων έτσι ώστε να μπορούμε να περιγράψουμε σχέσεις μεταξύ συγχορδιών που οι θεμέλιοί τους απέχουν μεταξύ τους οποιοδήποτε διάστημα, όπως για παράδειγμα για δύο συγχορδίες που απέχουν μεταξύ τους ένα τόνο:

$$isSubdominantOf \sqsubseteq isDominantOf \circ isDominantOf$$

Ακόμη, ορίζουμε τρεις νέους ρόλους, *isRelativeOf*, *isDominantOfRelativeOf*, *isSubdominantOfRelativeOf*:

isMinorRelativeOf \sqsubseteq *isMajorRelativeOf* \sqsubseteq *isParallelTo* \sqsubseteq *isCounterParallelTo* \sqsubseteq *isRelativeOf*
isDominantOfRelativeOf \sqsubseteq *isDominantOf* \circ *isRelativeOf*
isSubdominantOfRelativeOf \sqsubseteq *isSubdominantOf* \circ *isRelativeOf*

Ας δούμε κάποια στατιστικά της οντολογίας μας:

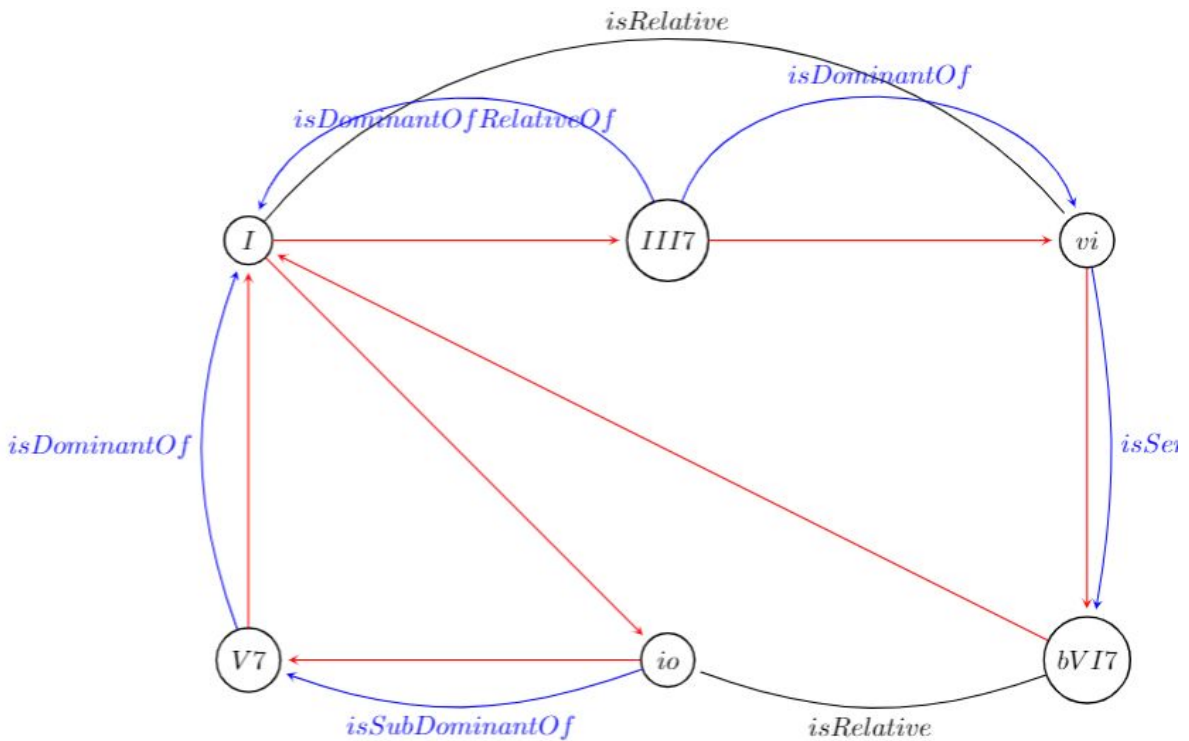
Axiom	1516
Logical axiom count	956
Declaration axiom count	562
Class count	459
Object property count	32
Individual count	72

Τέλος, ας παρατηρήσουμε τα συμπεράσματα του reasoner της οντολογίας μας για άτομα τις συγχορδίες από την ακολουθία του μουσικού κομματιού 'You've got a friend in me', γραμμένο σε μείζονα τρόπο:

Έχουμε, λοιπόν, τα άτομα:

c1: I
c2: III7
c3: vi
c4: b VI7
c5: io
c6: V7
c7: I9

για τα οποία λαμβάνουμε:



Η σειρά της ακολουθίας είναι: c1-c2-c3-c4-c1-c5-c6-c1-c6-c7

Παρατηρούμε πως αν και πρόκειται για μια ακολουθία συγχορδιών όχι τόσο κοινή, η οντολογία μας είναι ικανή στο να περιγράψει τις περισσότερες σχέσεις μεταξύ των συγχορδιών. Μόνο η υποακολουθία $bVI7 - I - io$, δε μπορεί να περιγραφεί.

Συμπερασματικά, η οντολογία μας είναι πολύ ικανή στην περιγραφή σχέσεων μεταξύ συγχορδιών. Όμως, λόγω της χρήσης του καρτεσιανού γινομένου, είναι πάρα πολύ χρονοβόρα.

4.3 Αρμονική ανάλυση μουσικού έργου μέσω αλγορίθμου

4.3.1 Η χρήση της Python

Η Python είναι διερμηνευόμενη (interpreted), γενικού σκοπού (general-purpose) και υψηλού επιπέδου, γλώσσα προγραμματισμού. Η γλώσσα αυτή είναι ιδανική για την ανάπτυξη του αλγορίθμου μας κυρίως λόγω των dictionaries, μια δομή που μας επιτρέπει να περιγράψουμε κατάλληλα όλα τα

στοιχεία που συνθέτουν μια μουσική συγχορδία. Επίσης, μέσω του περιβάλλοντος της Python αναπτύξαμε και την Οντολογία μας.

4.3.2 Χαρακτηρισμός λειτουργίας συγχορδίας που ανήκει στην τονικότητα

Στο πρόγραμμά μας, για τον χαρακτηρισμό μιας συγχορδίας η οποία ανήκει στην τονικότητα θα βασιστούμε στις λειτουργίες που περιγράψαμε παραπάνω σε συνδυασμό με τη σχετικότητα των τρόπων. Ο χαρακτηρισμός της συγχορδίας είναι πάντα σε αντιστοιχία με τις γειτονικές της συγχορδίες. Κάθε συγχορδία η οποία ανήκει σε έναν διατονικό τρόπο είναι τονικό κέντρο του αντίστοιχου σχετικού τρόπου με τονική τη βαθμίδα της συγχορδίας. Για παράδειγμα, σε ένα έργο με τονικότητα Ντο μείζονα τρόπου, η συγχορδία της δεύτερης βαθμίδας, η οποία είναι η Ρε ελάσσονα, είναι τονικό κέντρο κάποιου σχετικού τρόπου της Ρε, όπου η τρίφωνη συγχορδία πρώτης βαθμίδας είναι ελάσσονα. Ακόμη ξέρουμε ότι όλες οι συγχορδίες ενός διατονικού τρόπου είναι ίδιες με τις συγχορδίες όλων των σχετικών του τρόπων, μόνο που αντιστοιχούν σε άλλες βαθμίδες. Έτσι, μπορούμε να “μετακινήσουμε” τις βαθμίδες προς τη συγχορδία που θέλουμε να εξετάσουμε και να χαρακτηρίσουμε τη συγχορδία που προηγείται με βάση αυτή τη μετακίνηση. Αν στο παράδειγμά μας, η συγχορδία της δεύτερης βαθμίδας έχει ως προηγούμενη μια συγχορδία έκτης βαθμίδας, τότε μετακινούμενοι κατά μια θέση αριστερά ώστε να έχουμε τη δεύτερη βαθμίδα ως το εξεταζόμενο τονικό κέντρο, παρατηρούμε ότι η συγχορδία έκτης βαθμίδας έχει το ρόλο της δεσπόζουσας της ως συγχορδία πέμπτης βαθμίδας στο σχετικό τρόπο.

Στην υλοποίησή μας, ωστόσο, επιλέγουμε να χαρακτηρίζουμε τη λειτουργία της συγχορδίας πρώτης βαθμίδας πάντα ως τονική, γιατί εξετάζουμε κάθε έργο με το τονικό του κέντρο ως σημείο αναφοράς. Μόνο στις περιπτώσεις πρώτη βαθμίδα προς τέταρτη βαθμίδα και πρώτη βαθμίδα προς πέμπτη βαθμίδα αναφέρουμε πως εκτός από την τονική έχουμε αντίστοιχα και λειτουργίες δεσπόζουσας και υποδεσπόζουσας.

4.3.3 Συσχετισμός δανεισμένων και ξένων συγχορδιών με συγχορδίες της τονικότητας

Στο πρόγραμμά μας αντιστοιχούμε τις συγχορδίες που δεν ανήκουν στην τονικότητα με συγχορδίες της τονικότητας. Ονομάζουμε σχετικές (relative) συγχορδίες, τις συγχορδίες οι οποίες έχουν όλες τους τις νότες κοινές εκτός από μία. Με τον ορισμό αυτό μπορούμε να πούμε ότι δύο σχετικές συγχορδίες είναι αρκετά κοντά ηχητικά οπότε και είμαστε σε θέση να αντιστοιχίσουμε τη λειτουργία της συγχορδίας της τονικότητάς μας με την πραγματική συγχορδία του κομματιού, η οποία είναι ξένη.

Προφανώς, όταν μια συγχορδία έχει επεκτάσεις, θα τη συγκρίνουμε με τις επεκταμένες συγχορδίες της τονικότητας. Για τετράφωνες και πάνω συγχορδίες θέσαμε τον περιορισμό ότι για να χαρακτηριστεί μια συγχορδία σχετική με κάποια της τονικότητας θα πρέπει να περιέχει όλη την αντίστοιχη τρίφωνη συγχορδία, έτσι ώστε να υπάρχει η ηχητική αντιστοιχία.

4.3.4 Λειτουργία δανεισμένης συγχορδίας από παράλληλο τρόπο

Για το χαρακτηρισμό της λειτουργίας μιας δανεισμένης συγχορδίας κοιτάμε πρώτα αν η συγχορδία αυτή είναι σχετική με κάποια της τονικότητας οπότε και εξετάζουμε τη λειτουργία της σαν να είχαμε την σχετική της συγχορδία, δηλαδή σαν να ανήκει στην τονικότητα του έργου. Αν μια δανεισμένη συγχορδία δεν έχει σχετικές συγχορδίες τότε λειτουργεί ως αντικατάσταση (replacement) της συγχορδίας της ίδιας βαθμίδας και διατηρεί αυτή τη λειτουργία. Για παράδειγμα, στο μείζονα τρόπο, η συγχορδία $b\ II$, δεν έχει κάποια σχετική συγχορδία, άρα διατηρεί το ρόλο της δεύτερης βαθμίδας.

4.3.5 Χρήση επαυξημένων και ελαττωμένων τρόπων

Όπως έχουμε αναφέρει σε ένα διάστημα οκτάβας υπάρχουν 12 διαφορετικοί φθόγγοι. Αυτό σημαίνει πως στο συγκερασμένο δυτικό σύστημα υπάρχουν 12 διαφορετικοί οπλισμοί οι οποίοι ορίζουν τις τονικότητες των 12

επτάδων σχετικών τρόπων. Με τη χρήση των παράλληλων τρόπων μιας τονικότητας μπορούμε να μελετήσουμε και να χαρακτηρίσουμε συγχορδίες οι οποίες είναι δανεισμένες από τους τρόπους αυτούς, δηλαδή από έξι διαφορετικούς οπλισμούς από τον οπλισμό της τονικότητας του κομματιού που εξετάζουμε. Μια συγχορδία, όμως, μπορεί να μην υπάρχει σε αυτές τις τονικότητες, οπότε είναι αναγκαίο να ορίσουμε και επαυξημένους και ελαττωμένους τρόπους, δηλαδή τους τρόπους που δημιουργούνται από την επαυξημένη και ελαττωμένη πρώτη βαθμίδα ως τονικό κέντρο, έτσι ώστε να μπορούμε να εντάξουμε σε κάποιον τρόπο οποιαδήποτε δοθείσα συγχορδία.

4.3.6 Η συγχορδία ως Python Dictionary

Κάθε συγχορδία στο πρόγραμμά μας περιγράφεται μέσω της δομής dictionary. Κάθε συγχορδία έχει τα παρακάτω keys:

- `mode`: εδώ αντιστοιχίζεται ως `value` ο τρόπος στον οποίο είναι γραμμένος το μουσικό κομμάτι στο οποίο ανήκει η συγχορδία
- `integer`: εδώ αντιστοιχίζεται ως `value` η βαθμίδα της συγχορδίας (0 έως 6)
- `chord`: εδώ αντιστοιχίζεται ως `value` ο συμβολισμός της συγχορδίας με την χρήση των ρωμαϊκών αριθμών
- `chord_type`: εδώ αντιστοιχίζεται ως `value` ο τύπος της συγχορδίας (μείζονα, ελάσσονα ή ελαττωμένη)
- `base`: εδώ αντιστοιχίζεται ως `value` η νότα η οποία αποτελεί τη βάση της συγχορδίας (0 έως 11)
- `chord_base`: εδώ αντιστοιχίζεται ως `value` η νότα η οποία αποτελεί την θεμέλιο της συγχορδίας (0 έως 11)
- `borrows`: εδώ αντιστοιχίζεται ως `value` ένας πίνακας αληθείας που δείχνει σε ποιους τρόπους ανήκει η συγχορδία
- `is_sec`: εδώ αντιστοιχίζεται ως `value` `True` ή `False` ανάλογα για το αν η συγχορδία μας αποτελεί κάποια δευτερεύουσα δεσπόζουσα (συγχορδία πέμπτης ή έβδομης βαθμίδας) κάποιας συγχορδίας του τρόπου μας
- `is_sub`: εδώ αντιστοιχίζεται ως `value` `True` ή `False` ανάλογα για το αν η συγχορδία μας αποτελεί κάποια δευτερεύουσα υποδεσπόζουσα (συγχορδία τέταρτης βαθμίδας) κάποιας συγχορδίας του τρόπου μας

- notes: εδώ αντιστοιχίζεται ως value ένας πίνακας που περιέχει τις νότες της συγχορδίας μας (τιμές στοιχείων 0 έως 12)
- relative: εδώ αντιστοιχίζεται ως value ένας πίνακας που περιέχει τις βαθμίδες της τονικότητας με των οποίων τις συγχορδίες συσχετίζεται η συγχορδία μας (τιμές στοιχείων 0 έως 6)

4.3.7 Περιγραφή αλγορίθμου

Το πρόγραμμά μας δέχεται ως είσοδο μια ακολουθία από συγχορδίες σε συμβολική μορφή καθώς και τον τρόπο στον οποίο είναι γραμμένο το έργο. Όλες οι ακολουθίες είναι μεταφερμένες σε τονικότητες της Ντο. Για την αρμονική ανάλυση του έργου ακολουθούμε τα εξής βήματα:

1ο βήμα - εύρεση τρόπου συγχορδίας

Είναι αναγκαίο για την αρμονική ανάλυση να βρεθεί ο τρόπος στον οποίο ανήκει μια συγχορδία. Μια συγχορδία μπορεί να ανήκει σε παραπάνω από έναν παράλληλους τρόπους πχ. η συγχορδία I ανήκει στο μείζονα, στο λύδιο και στο μιξολύδιο τρόπο. Εμείς βρίσκουμε όλους τους τρόπους αυτούς και τους αποθηκεύουμε ως values στο key 'borrows' της συγχορδίας μας.

Στα μουσικά έργα είναι συχνό το φαινόμενο της αλλαγής τονικότητας (μετατροπίας), δηλαδή την ύπαρξη μικρών ενοτήτων μέσα στο ευρύτερο έργο, οι οποίες έχουν μεταφερθεί σε διαφορετική τονικότητα. Προφανώς, ο τρόπος στον οποίο είναι γραμμένο το μουσικό έργο δεν αλλάζει, αφού έχει καθοριστεί από την αρχή. Ωστόσο, το πρόγραμμά μας πρέπει να είναι σε θέση να αναγνωρίζει τυχόν αλλαγές στην τονικότητα. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση των παράλληλων τρόπων, καθώς όπως έχουμε πει κάθε τρόπος αντιστοιχεί και σε μία τονικότητα. Έτσι, εξετάζουμε τα values των συγχορδιών μας και αν εντοπίσουμε τρεις ή παραπάνω συγχορδίες στη σειρά, οι οποίες ανήκουν σε τρόπο διαφορετικό από αυτών του έργου, τότε θεωρούμε ότι αυτές οι συγχορδίες αποτελούν μια υποακολουθία με κοινή τονικότητα, διαφορετική της ορισμένης. Οπότε και η μετέπειτα μελέτη των σχέσεων μεταξύ τους θα γίνει βάσει της νέας τονικότητας της υποακολουθίας αυτής.

Όπως αναφέραμε, κάθε συγχορδία μπορεί να ανήκει σε παραπάνω από έναν τρόπους, οπότε είναι πιθανό μια υποακολουθία να ανήκει σε πολλές τονικότητες.

Για παράδειγμα, αν το έργο μας είναι γραμμένο στο μείζονα τρόπο και εντοπίσουμε μια υποακολουθία της μορφής $b\ III- b\ VI-iv$, τότε δε μπορούμε να αποφανθούμε αν η τονικότητα αυτής της υποακολουθίας είναι αυτή του παράλληλου ελάσσονα ή του παράλληλου φρύγιου τρόπου. Για να μπορέσουμε τελικά να επιλέξουμε τον τρόπο θα βασιστούμε πάνω στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη μελέτη του Dataset μας και δείχνουν σε σειρά ποιοι είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τρόποι.

Αν μια συγχορδία δεν είναι μέρος κάποιας υποακολουθίας και ανήκει στον τρόπο του κομματιού τότε επιλέγουμε αυτόν τον τρόπο.

2ο βήμα - εύρεση λειτουργίας συγχορδίας ως τονική, δεσπόζουσα και υποδεσπόζουσα

Ουσιαστικά η εύρεση της λειτουργίας των συγχορδιών μέσα σε μια ακολουθία αποτελεί και το βασικό στόχο της αρμονικής ανάλυσης. Η δική μας προσέγγιση βασίζεται στις τρεις κύριες λειτουργίες που έχουν περιγραφεί, δηλαδή της τονικής, της δεσπόζουσας και της υποδεσπόζουσας. Γι αυτό τον σκοπό εξετάζουμε τις συγχορδίες ανά ζευγάρια και τους αποδίδουμε τις αντίστοιχες λειτουργίες. Ουσιαστικά, χαρακτηρίζουμε μια συγχορδία σε σχέση με την επόμενη της.

Εδώ προκύπτει ένα σοβαρό ζήτημα: μια συγχορδία μπορεί να έχει παραπάνω από μία λειτουργία, όταν δεν ανήκει στην τονικότητα αφού μπορεί να έχει παραπάνω από μία σχετικές συγχορδίες. Έτσι, είναι αναγκαίο να ορίσουμε μια σειρά “προτεραιότητας λειτουργιών”. Για τη δημιουργία αυτή της σειράς προτεραιότητας βασιζόμαστε στην παραδοχή ότι η πιο βασική σχέση μεταξύ δύο συγχορδιών είναι αυτή της δεσπόζουσας - τονικής. Δηλαδή, αν μια συγχορδία λειτουργεί ως δεσπόζουσα της επόμενης (μαζί και με άλλες λειτουργίες), τότε επιλέγουμε αυτή τη λειτουργία. Η επόμενη λειτουργία στη σειρά προτεραιότητας είναι αυτή της σχέσης υποδεσπόζουσας - τονικής. Η επόμενη λειτουργία είναι αυτή της τονικής, δηλαδή η συγχορδία λειτουργεί ως τονικό κέντρο. Έπειτα ακολουθούν οι λειτουργίες ως δεσπόζουσα που δε λύνεται και ως υποδεσπόζουσα.

Από εδώ γίνεται αντιληπτό πως αν μια συγχορδία ανήκει στον τρόπο του κομματιού, πάντα θα χαρακτηρίζεται με μία από αυτές τις λειτουργίες. Οι δευτερεύουσες δεσπόζουσες και υποδεσπόζουσες εμπίπτουν στις πρώτες δύο σχέσεις αντίστοιχα. Αν μια συγχορδία δεν έχει κάποιο από τους παράπανω ρόλους, είναι δηλαδή τελείως ξένη, τότε προχωράμε στο επόμενο βήμα.

3ο βήμα - εύρεση λειτουργίας ξένης συγχορδίας

Στις ήδη υπάρχουσες δουλειές πάνω στην αρμονική ανάλυση μια συγχορδία της οποίας η λειτουργία δεν είναι κάποια από τις βασικές, χαρακτηρίζεται απλά ως ξένη, καθώς δεν προσφέρει κάτι στην αρμονία του κομματιού. Για αυτό το λόγο εμείς προτείνουμε και κάποιες λειτουργίες οι οποίες δε βασίζονται σε κανόνες της αρμονίας (τους οποίους έχουμε εξαντλήσει στο προηγούμενο βήμα) αλλά πάνω στο ηχητικό αποτέλεσμα που επιφέρει η σχέση μεταξύ δύο συγχορδιών. Εδώ ελέγχουμε αν μια συγχορδία αποτελεί “μεταφορά” της προηγούμενης ή της επόμενης συγχορδίας κατά ένα ημιτόνιο (step) ή κατά έναν τόνο (full step), δηλαδή αν οι νότες της μιας συγχορδίας κινούνται κατά ίσα διαστήματα προς την ίδια κατεύθυνση. Ακόμη, κοιτάμε αν έχουμε αντίστοιχη μεταφορά της βάσης (base step, full base step). Επίσης, μελετάμε αν μια συγχορδία αποτελεί μεταφορά κατά ένα ημιτόνιο της συγχορδίας, με κάποιες νότες όμως να παραμένουν κοινές και στις δύο (hold and steps). Αρκετό ενδιαφέρον έχει και η λειτουργία της προήγησης (presound), δηλαδή όταν δύο συγχορδίες διαφέρουν μόνο κατά μία νότα η οποία πραγματοποιεί πτώση κατά διάστημα ημιτονίου ή τόνου προς μία νότα της επόμενης συγχορδίας.

Ακόμη, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες μια συγχορδία πραγματοποιεί μια απλή αναστροφή της προηγούμενης χωρίς αυτό να επηρεάζει τη λειτουργία της. Επίσης, υπάρχει και η περίπτωση μιας δευτερεύουσας συγχορδίας η οποία δεν ακολουθείται από τη συγχορδία της βαθμίδας αναφοράς της.

Τέλος, μια συγχορδία μπορεί να είναι η τελευταία συγχορδία του μουσικού κομματιού, χωρίς να έχει κάποιο αρμονικό ρόλο.

Αν και μετά την ολοκλήρωση του 3ου βήματος δεν έχει βρεθεί κάποια λειτουργία που αντιστοιχεί στη συγχορδία, τότε χαρακτηρίζουμε τη συγχορδία ως ξένη.

4.3.8 Μελέτη του Dataset

Με τη βοήθεια του αλγορίθμου που υλοποιήσαμε, καταφέραμε να αναλύσουμε το Dataset μας και να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργικότητά του καθώς και γενικά συμπεράσματα για τις αρμονίες που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη μουσική.

Ας δούμε αρχικά ποιες συγχορδίες χρησιμοποιούνται:

Τρόπος συγχορδίας	Αριθμός εμφανίσεων	Ποσοστό (%)
Συγχορδίες που ανήκουν στον τρόπο του κομματιού	98830	82.44
Συγχορδίες δανεισμένες από παράλληλους τρόπους	14123	11.78
Δευτερεύουσες συγχορδίες	3694	3.1
Ξένες συγχορδίες	3229	2.68
Σύνολο	119876	100

Είναι αντιληπτό ότι σε μεγάλο ποσοστό οι συγχορδίες που συνθέτουν τον αρμονικό σκελετό ενός κομματιού ανήκουν στον τρόπο που είναι γραμμένο το κομμάτι.

Ας εξετάσουμε τώρα τις κύριες λειτουργίες (τονική, δεσπόζουσα και υποδεσπόζουσα). Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι η λειτουργία μιας συγχορδίας εξαρτάται κατά πρώτο λόγο από την επόμενη συγχορδία της ακολουθίας και κατά δεύτερο από την τονικότητα:

Κύρια λειτουργία	Αριθμός εμφανίσεων	Ποσοστό (%)
Τονική	37003	30.86
Δεσπόζουσα	40259	33.58
Υποδεσπόζουσα	32361	27.00
Σύνολο	109623	91.44

Φαίνεται πως μια συγχορδία σε ένα μουσικό κομμάτι κατά κύριο λόγο έχει μια κύρια λειτουργία. Είναι λογικό η κύρια λειτουργία με τη μεγαλύτερη εμφάνιση να είναι αυτή της δεσπόζουσας καθώς στόχος ενός μουσικού έργου είναι να δημιουργεί συνεχώς μικρές εντάσεις και αστάθειες που λύνονται διατηρώντας έτσι το ενδιαφέρον του ακροατή.

Ας μελετήσουμε τώρα τις λειτουργίες των συγχορδιών που δεν εκτελούν κύρια λειτουργία:

Λειτουργία	Αριθμός εμφανίσεων	Ποσοστό (%)
Μεταφορά κατά ημιτόνιο	1841	1.54
Μεταφορά κατά τόνο	2467	2.06
Μεταφορά βάσης	1766	1.47
Αναστροφή συγχορδίας	782	0.65
Προήγηση	38	0.03
Δευτερεύουσα συγχορδία	306	0.26
Μεταφορά με κοινή νότα	2203	1.84
Τελευταία συγχορδία	256	0.21
Καμία χρήση	594	0.50
Σύνολο	10253	8.56

Παρατηρούμε ότι οι “μεταφορές” συγχορδιών, δηλαδή η κίνηση από μία συγχορδία προς μια άλλη με κάποιας μορφής σύνδεση μεταξύ τους είναι η λειτουργία με τη μεγαλύτερη εμφάνιση μετά από αυτές των κύριων. Αυτό είναι λογικό, καθώς χωρίς να επιτελεί κάποιο αρμονικό ρόλο, μια μεταφορά συγχορδίας ή της βάσης της, δημιουργεί ένα διακριτό και ευχάριστο ακουστικό αποτέλεσμα.

Τέλος, βλέπουμε ότι με τη χρήση του αλγορίθμου μας είμαστε σε θέση να χαρακτηρίσουμε το 99.5 % όλων των συγχορδιών του Dataset που χρησιμοποιήσαμε.

Ας συγκρίνουμε την έξοδο του προγράμματός μας με το συμπέρασμα της οντολογίας μας για την ίδια ακολουθία συγχορδιών:

```
Give me mode : 0
Enter chords separated by comma : I,III7,vi,bVI7,I,io,V7,I,V7,I9
I --> belongs to major scale tonic
III7 --> secondary dominant of sixth
vi --> belongs to major scale base step with next chord
bVI7 --> borrowed from locrian hold and steps from next chord
I --> belongs to major scale hold and steps from next chord
io --> borrowed from locrian step distance with next chord
V7 --> belongs to major scale dominant of the next chord
I --> belongs to major scale tonic, acting as subdominant of the next chord
V7 --> belongs to major scale dominant of the next chord
I9 --> borrowed from mixolydian similar to tonic
```

Παρατηρούμε πως το πρόγραμμά μας είναι σε θέση να χαρακτηρίσει την υποακολουθία $bVI7 - I - io$, μέσω του βήματος 3 που έχουμε προσθέσει στον αλγόριθμο.

Ένα άλλο πλεονέκτημα του προγράμματός μας είναι η ικανότητά του να ομαδοποιεί συνεχόμενες συγχορδίες που ανήκουν σε διαφορετική τονικότητα από αυτή του κάθε κομματιού. Ας δώσουμε ένα παράδειγμα:

```
Give me mode : 0
Enter chords separated by comma : I,IV,ii,V,i,bvii,bIII,iv,i,V,vi,bVII,bIII,iv,I
I --> belongs to major scale tonic
IV --> belongs to major scale subdominant
ii --> belongs to major scale acting as dominant of the next chord
V --> belongs to major scale dominant of the next chord
i --> borrowed from phrygian tonic
bvii --> borrowed from phrygian acting as dominant of the next chord
bIII --> borrowed from phrygian acting as dominant of the next chord
iv --> borrowed from phrygian acting as subdominant of the next chord
i --> borrowed from phrygian similar to subdominant of the next chord
V --> belongs to major scale acting as dominant of the next chord
vi --> belongs to major scale base step with next chord
bVII --> borrowed from minor dominant of the next chord
bIII --> borrowed from minor acting as dominant of the next chord
iv --> borrowed from minor similar to subdominant of the next chord
I --> belongs to major scale tonic
```

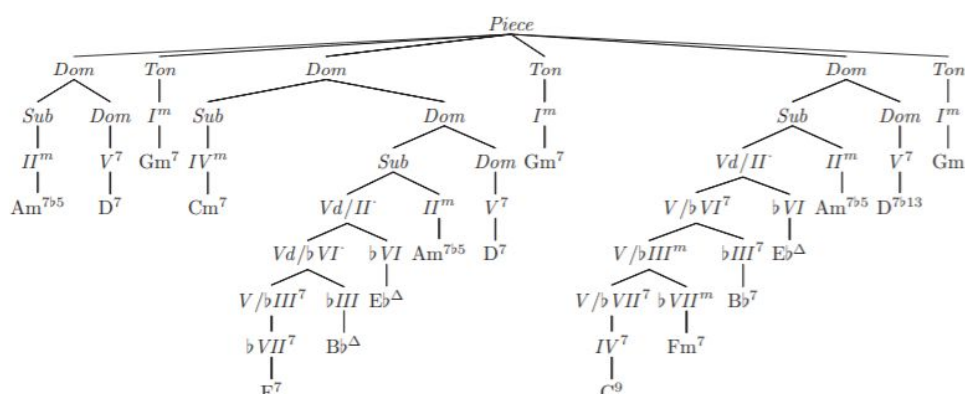
Εδώ δηλώνουμε ότι γράφουμε στο μείζονα τρόπο. Παρατηρούμε πώς το πρόγραμμα μας εντοπίζει μια υποακολουθία του φρύγιου τρόπου και έπειτα μια υποακολουθία του ελάσσονα τρόπου.

4.4 Το σύστημα Harmtrace

Το Harmtrace [12], [13] είναι ένα σύστημα για την αυτόματη συναρτησιακή αρμονική ανάλυση ενός μουσική έργου, βασισμένο στους κανόνες της τονικής αρμονίας. Αυτό σημαίνει πως εξετάζει κομμάτια γραμμένα μόνο στο μείζονα και στον ελάσσονα τρόπο. Το σύστημα δέχεται ως είσοδο την ακολουθία των συγχορδιών ενός κομματιού και την τονικότητά του.

Οι συγχορδίες δίνονται στη μορφή που περιγράφουν οι Christopher Harte, Mark Sandler, Samer Abdallah και Emilia Gomez [14].

Το σύστημα αφού αναλύει τη δοσμένη ακολουθία κάνει την ανάλυση (parsing) και στην έξοδο λαμβάνουμε ένα δέντρο αυτής της μορφής:



Το κομμάτι που αναπαριστάται στο συγκεκριμένο δέντρο είναι το Jazz Standard Autumn Leaves.

Παρατηρούμε πως εδώ η ανάλυση βασίζεται σε δύο λειτουργίες: της τονικής και της δεσπόζουσας. Το σύστημα δεν χαρακτηρίζει μόνο κάθε συγχορδία ξεχωριστά, αλλά με βάση αυτές τις δύο λειτουργίες ομαδοποιεί τις συγχορδίες. Έπειτα, κάθε ομάδα λαμβάνει μια από αυτές τις δύο λειτουργίες. Η λειτουργία της υποδεσπόζουσας περικλείεται είτε σε αυτή της δεσπόζουσας, αποτελώντας μια προετοιμασία της, είτε σε αυτής της τονικής όταν προετοιμάζεται και λύνεται σε αυτήν.

Το Harmtrace χρησιμοποιεί ένα συντακτικό βασισμένο στο συντακτικό των Γραμματικών χωρίς συμφραζόμενα (Context-free Grammars) για να περιγράψει κανόνες της τονικής αρμονίας. Λόγω του ότι βασίζεται πάνω σε

προηγμένες συναρτησιακές προγραμματιστικές τεχνικές, χρησιμοποιεί τη γλώσσα Haskell. Η γλώσσα Haskell είναι μια καθαρά συναρτησιακή γλώσσα με στατική τυπολόγηση, ιδανική για αυτή τη χρήση.

4.4.1 Οι κανόνες του Harmtrace

Ας δούμε τώρα τους κανόνες που χρησιμοποιεί το Harmtrace για την αρμονική ανάλυση. Αρχικά, ορίζονται οι βασικές λειτουργίες, της τονικής και της δεσπόζουσας:

1. $Piece_{\mathfrak{M}} \rightarrow Func_{\mathfrak{M}}^+$
2. $Func_{\mathfrak{M}} \rightarrow Ton_{\mathfrak{M}} \mid Dom_{\mathfrak{M}} \quad \mathfrak{M} \in \{\text{Maj}, \text{Min}\}$
3. $Dom_{\mathfrak{M}} \rightarrow Sub_{\mathfrak{M}} \mid Dom_{\mathfrak{M}}$

Έπειτα, έχουμε την αντιστοίχιση των συγχορδιών των δύο τονικών τρόπων σε κάθε λειτουργία:

4. $Ton_{\text{Maj}} \rightarrow I_{\text{Maj}} \mid I_{\text{Maj}} IV_{\text{Maj}} I_{\text{Maj}} \mid III_{\text{Maj}}^m$
5. $Ton_{\text{Min}} \rightarrow I_{\text{Min}}^m \mid I_{\text{Min}}^m IV_{\text{Min}}^m I_{\text{Min}}^m \mid \flat III_{\text{Maj}}$
6. $Dom_{\mathfrak{M}} \rightarrow V_{\mathfrak{M}}^7 \mid V_{\mathfrak{M}}$
7. $Dom_{\text{Maj}} \rightarrow VII_{\text{Maj}}^m \quad \mathfrak{M} \in \{\text{Maj}, \text{Min}\}$
8. $Dom_{\text{Min}} \rightarrow \flat VII_{\text{Min}}$
9. $Sub_{\mathfrak{M}} \rightarrow II_{\mathfrak{M}}^m$
10. $Sub_{\text{Maj}} \rightarrow IV_{\text{Maj}} \mid III_{\text{Maj}}^m IV_{\text{Maj}}$
11. $Sub_{\text{Min}} \rightarrow IV_{\text{Min}}^m \mid \flat III_{\text{Min}} IV_{\text{Min}}$

Στη συνέχεια έχουμε τους κανόνες που μετατρέπουν τις συγχορδίες από τη δοθείσα μορφή στη μορφή των βαθμίδων:

12. $I_{\text{Maj}} \rightarrow "C:\text{maj}" \mid "C:\text{maj}6" \mid "C:\text{maj}7" \mid "C:\text{maj}9" \mid \dots$
13. $I_{\text{Min}}^m \rightarrow "C:\text{min}" \mid "C:\text{min}7" \mid "C:\text{min}9" \mid "C:\text{min}(13)" \mid \dots$
14. $V_{\text{Maj}}^7 \rightarrow "G:7" \mid "G:7(\flat 9, 13)" \mid "G:(\#11)" \mid "G:7(\#9)" \mid \dots$
15. $VII_{\mathfrak{M}}^0 \rightarrow "B:\text{dim}(\flat\flat 7)"$

Είναι φανερό πως μέχρι στιγμής με τους συγκεκριμένους κανόνες, το Harmtrace μπορεί να αναλύσει οποιαδήποτε αλληλουχία συγχορδιών η οποία

περιέχει συγχορδίες μόνο από το μείζονα τρόπο ή μόνο από τον ελάσσονα τρόπο. Για τον χαρακτηρισμό ξένων συγχορδιών το Harmtrace θέτει και τους επόμενους κανόνες αντικατάστασης μιας συγχορδίας:

Αντικατάσταση μιας συγχορδίας από την δευτερεύουσα δεσπόζουσά της:

16. $\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^{\mathfrak{c}} \rightarrow V/\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^7 \mathfrak{x}_{\text{Maj}}^{\mathfrak{c}} \quad \mathfrak{c} \in \{\emptyset, m, 7, 0\}$
17. $\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^7 \rightarrow V/\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^m \mathfrak{x}_{\text{Maj}}^7 \quad \mathfrak{x} \in \{I, \flat II, II, \dots, VII\}$

Αντικατάσταση μιας συγχορδίας από τη διατονική πέμπτη της:

18. $\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^m \rightarrow Vd/\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^m \mathfrak{x}_{\text{Maj}}^m$
19. $\mathfrak{x}_{\text{Min}}^7 \rightarrow Vd/\mathfrak{x}_{\text{Min}}^7 \mathfrak{x}_{\text{Min}}^7$

Αντικατάσταση τριτόνου δεσπόζουσας:

20. $\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^7 \rightarrow \flat V/\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^7$

Η αντικατάσταση μιας δεσπόζουσας συγχορδίας με τη μείζονα συγχορδία που η θεμέλιός της απέχει τρεις τόνους από την θεμέλιο της δεσπόζουσας είναι συχνό φαινόμενο στην τζαζ αρμονία.

Έπειτα, θεσπίζονται και κανόνες για την ισοδυναμία των ελαττωμένων εβδομών:

21. $\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^0 \rightarrow \flat III/\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^0$
22. $\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^7 \rightarrow II\flat^{7\flat 9}/\mathfrak{x}_{\text{Maj}}^0$

Τέλος, έχουμε τους κανόνες για δανεισμό από παράλληλο τρόπο καθώς και την χρήση της ναπολιτάνικης συγχορδίας (ελαττωμένη δεύτερη) ως υποδεσπόζουσας:

23. $Func_{\text{Maj}} \rightarrow Func_{\text{Min}}$
24. $Func_{\text{Min}} \rightarrow Func_{\text{Maj}}$
25. $Sub_{\text{Min}} \rightarrow \flat II_{\text{Min}}$

4.4.2 Διαγραφή συγχορδίας

Σε περίπτωση που σε μια δοθείσα ακολουθία υπάρχει μια συγχορδία η οποία δεν εμπίπτει σε κανένα από τους παραπάνω κανόνες, τότε το σύστημα τη διαγράφει από το τελικό αποτέλεσμα καθώς η ύπαρξή της δεν έχει κάποια αρμονική λειτουργία.

4.4.3 Εισαγωγή συγχορδίας

Μια πολύ ενδιαφέρουσα λειτουργία του συστήματος, είναι η εισαγωγή συγχορδιών στο τελικό αποτέλεσμα για την καλύτερη ανάλυση ενός μουσικού κομματιού, με βάση των κύκλο των πεμπτών, δηλαδή τους κανόνες 18 και 19. Αν μελετήσουμε αυτούς τους κανόνες παρατηρούμε ότι μια συγχορδία μπορεί να αντικατασταθεί από τη διατονική πέμπτη της, δηλαδή από μια συγχορδία με λειτουργία δεσπόζουσας ως προς αυτήν. Αν η προηγούμενη συγχορδία είναι η διατονική πέμπτη αυτής της αντικατάστασης, τότε το σύστημα μπορεί να εισάγει αυτή την αντικατάσταση ανάμεσα από τις δύο δοθείσες συγχορδίες προσφέροντας έτσι μια πιο γενικευμένη αρμονική ανάλυση.

4.4.4 Αποτελέσματα Harmtrace

Το σύστημα Harmtrace δοκιμάστηκε σε δύο Dataset μουσικών κομματιών, ένα μικρό και ένα μεγάλο. Το μικρό περιέχει 72 διαφορετικές ακολουθίες συγχορδιών από το είδος της τζαζ. Το μεγάλο περιέχει 5.028 διαφορετικές ακολουθίες συγχορδιών από τα είδη της τζαζ, της λάτιν, της ποπ καθώς και της κλασσικής μουσικής. Στο μικρό dataset τα κομμάτια είναι επιλεγμένα ώστε να υπακούν στους περισσότερους κανόνες της τονικής αρμονίας κάτι που δε συμβαίνει με τα μουσικά κομμάτια του μεγάλου data set. Τα αποτελέσματα του συστήματος είναι τα εξής:

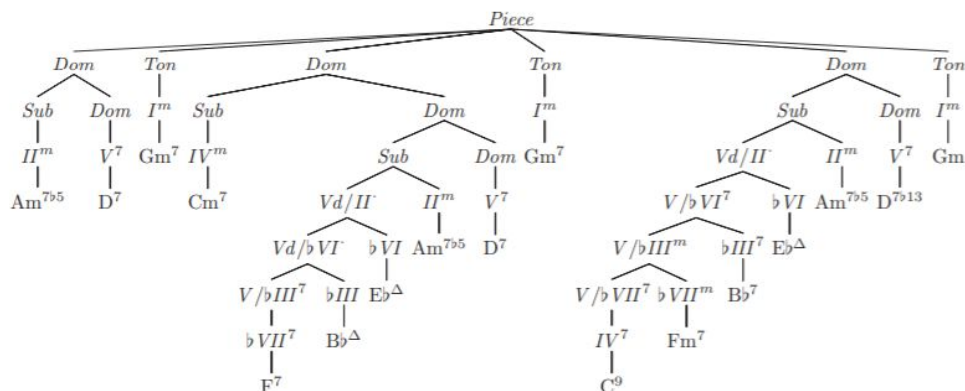
Data Set	Διαγραφές	Εισαγωγές	Διορθώσεις	Συγχορδίες	Χρόνος ανάλυσης	Συνολικός χρόνος
Μικρό	0.83	2.79	3.63	42.49	10.00	0.72
Μεγάλο	3.83	9.85	13.24	62.05	76.53	384.81

Οι διαγραφές, οι εισαγωγές και οι διορθώσεις (οι οποίες δεν περιγράφονται στην παρουσίαση του συστήματος) αναφέρονται σε κάθε μουσικό κομμάτι. Οι συγχορδίες είναι ο μέσος όρος συγχορδιών του κάθε Dataset. Ο χρόνος ανάλυσης είναι ο μέσος χρόνος ανάλυσης κάθε κομματιού σε msec, ενώ ο συνολικός χρόνος είναι ο συνολικός χρόνος ανάλυσης κάθε Dataset σε sec.

4.5 Σύγκριση του αλγορίθμου μας με το σύστημα Harmtrace

4.5.1 Σύγκριση πάνω στα παραδείγματα του Harmtrace

Οι δημιουργοί του Harmtrace χρησιμοποιούν στην παρουσίασή του κάποια παραδείγματα. Το πρώτο το έχουμε ήδη παρουσιάσει, είναι το γνωστό Jazz Standard, Autumn Leaves, γραμμένο στον Σολ ελάσσονα τρόπο. Αυτή είναι η έξοδος του συστήματος:

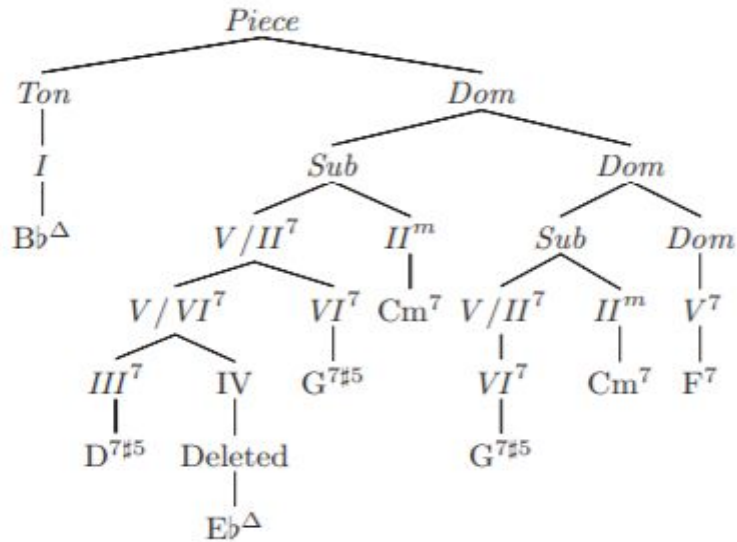


Ας δούμε τώρα την έξοδο του δικού μας προγράμματος στο τερματικό:

```
Give me mode : 1
Enter chords separated by comma : iio7,v7,i7,iv7,bVII7,bIIImaj7,bVIImaj7,iio7,v7,i7,IV9,bvii7,bIIImaj7,bVIImaj7,iio7,V13,i
iio7 --> belongs to minor scale hold and steps from next chord
v7 --> secondary dominant of first
i7 --> belongs to minor scale acting as dominant of the next chord
iv7 --> belongs to minor scale acting as dominant of the next chord
bVII7 --> belongs to minor scale dominant of the next chord
bIIImaj7 --> belongs to minor scale dominant of the next chord
bVIImaj7 --> belongs to minor scale acting as dominant of the next chord
iio7 --> belongs to minor scale hold and steps from next chord
v7 --> secondary dominant of first
i7 --> belongs to minor scale similar to dominant of the next chord
IV9 --> borrowed from dorian dominant of the next chord
bvii7 --> borrowed from phrygian acting as dominant of the next chord
bIIImaj7 --> belongs to minor scale dominant of the next chord
bVIImaj7 --> belongs to minor scale acting as dominant of the next chord
iio7 --> belongs to minor scale similar to dominant of the next chord
V13 --> secondary dominant of first
i --> belongs to minor scale tonic
```

Βλέπουμε πως οι διαφορές στις δύο εξόδους είναι πολύ λίγες. Η κύρια διαφορά που παρατηρούμε είναι πως το σύστημα Harmtrace χαρακτηρίζει τη συγχορδία πρώτης βαθμίδας πάντα ως τονική, ενώ το δικό μας πρόγραμμα την χαρακτηρίζει και ως δεσπόζουσα της επόμενης συγχορδίας όταν ακολουθείται από τη συγχορδία τέταρτης βαθμίδας. Ακόμη, το δικό μας σύστημα είναι σε θέση να αναγνωρίσει από ποιο παράλληλο τρόπο είναι δανεισμένη μια συγχορδία που δεν ανήκει στον τρόπο του κομματιού.

Ας δούμε άλλο ένα παράδειγμα, το μουσικό κομμάτι Someday My Prince Will Come, γραμμένο στον Σι ύφεση μείζονα τρόπο. Η έξοδος του Harmtrace:



Η έξοδος του προγράμματός μας:

```

Give me mode : 0
Enter chords separated by comma : Imaj7,III7,IVmaj7,VI7,ii7,VI7,ii7,V7
Imaj7 --> belongs to major scale tonic
III7 --> borrowed from s_phr base step with next chord
IVmaj7 --> belongs to major scale subdominant
VI7 --> secondary dominant of second
ii7 --> belongs to major scale acting as subdominant of the next chord
VI7 --> secondary dominant of second
ii7 --> belongs to major scale acting as dominant of the next chord
V7 --> belongs to major scale dominant of the next chord

```

Παρατηρούμε πάλι τις ελάχιστες διαφορές των δύο υλοποιήσεων. Εδώ βλέπουμε μια διαγραφή από το σύστημα Harmtrace. Το Harmtrace διαγράφει τη λειτουργία της τρίτης συγχορδίας καθώς θεωρεί πως η δεύτερη συγχορδία αποτελεί δεσπόζουσα της τέταρτης. Στο δικό μας πρόγραμμα θεωρούμε πως η λειτουργία της δεύτερης συγχορδίας είναι να “λύσει” τη βάση της κινώντας την κατά ένα ημιτόνιο προς τα πάνω στην τρίτη συγχορδία, η οποία είναι υποδεσπόζουσα της τονικότητάς μας. Ακόμη στο πρόγραμμά μας τονίζεται η σχέση υποδεσπόζουσας - τονικής μεταξύ των συγχορδιών ii7 - VI7. Τέλος, θεωρώντας πως το μουσικό κομμάτι μπορεί να επαναληφθεί επισημαίνουμε την σχέση μεταξύ της τελευταίας και της πρώτης συγχορδίας.

4.5.2 Σύγκριση πάνω στο δικό μας Data set

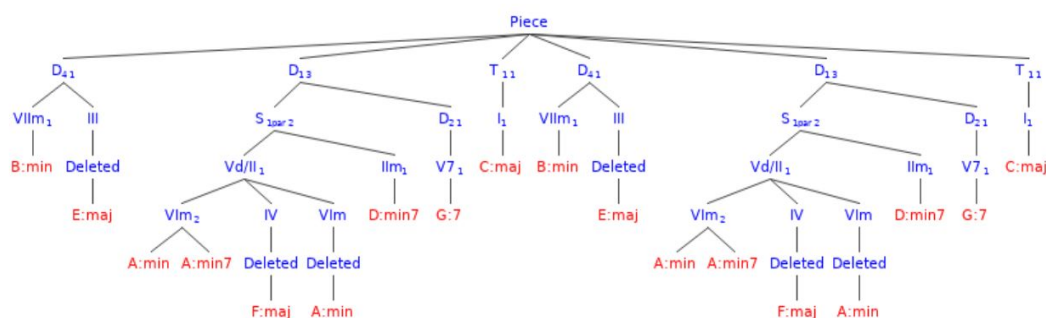
Για τη σύγκριση του αλγορίθμου μας με το σύστημα Harmtrace ήταν αναγκαία η δημιουργία ενός dataset. Καθώς τα dataset που έχουν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση του Harmtrace δεν είναι ανοιχτά, δημιουργήσαμε ένα dataset επιλέγοντας μουσικά κομμάτια από το δικό μας. Επειδή το Harmtrace ασχολείται μόνο με την τονική μουσική επιλέξαμε κομμάτια γραμμένα μόνο στο μείζονα και στον ελάσσονα τρόπο. Ακόμη, επιλέξαμε κομμάτια με πάνω από 16 συγχορδίες το κάθε ένα, χωρίς συγχορδίες με αναστροφές, με αναστολή δεύτερης και με επεκτάσεις μεγαλύτερες της ενάτης. Συνολικά έχουμε 483 κομμάτια με μέσο όρο 23.58 συγχορδίες ανά κομμάτι, σύνολο 11389 μουσικά κομμάτια.

Σε αυτό το Dataset, το σύστημα Harmtrace πραγματοποίησε 4.43 διαγραφές ανά κομμάτι. Αυτό δείχνει πως το σύστημα Harmtrace, παρόλο που είναι ιδανικό για τη μελέτη μουσικών κομματιών γραμμένων με την χρήση των κανόνων αρμονίας, δεν ανταποκρίνεται εξίσου καλά σε μουσικά κομμάτια που δεν ακολουθούν πιστά τους κανόνες αρμονίας.

Αντίθετα, το πρόγραμμά μας δε μπόρεσε να χαρακτηρίσει μόνο 28 συγχορδίες δηλαδή 0.06 συγχορδίες ανά κομμάτι.

Ας δούμε δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα:

Πρώτο παράδειγμα στον Ντο μείζονα τρόπο. Έξοδος στο Hamtrace:



Έξοδος στο πρόγραμμά μας:

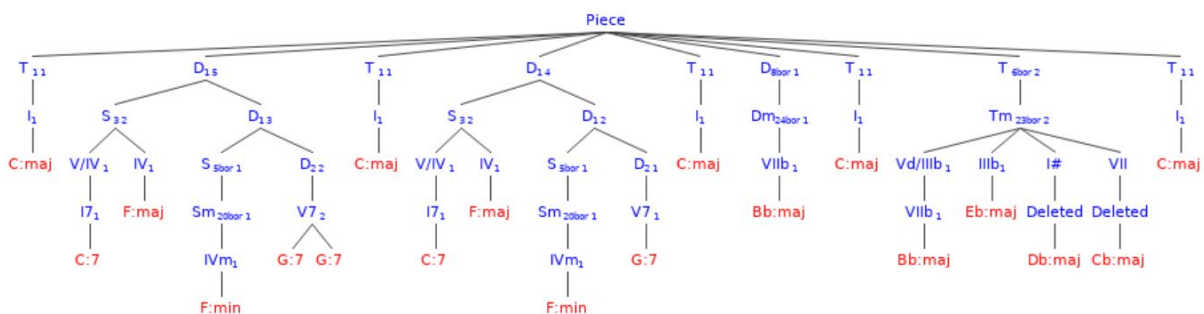
```

Give me mode : 0
Enter chords separated by comma : vii,III,vi,vi7,IV,vi,ii7,V,I,vii,III,vi,vi7,IV,vi,ii7,V,I
vii --> borrowed from lydian acting as dominant of the next chord
III --> secondary dominant of sixth
vi --> belongs to major scale acting as tonic
vi7 --> belongs to major scale acting as dominant of the next chord
IV --> belongs to major scale subdominant
vi --> belongs to major scale acting as dominant of the next chord
ii7 --> belongs to major scale acting as dominant of the next chord
V --> belongs to major scale dominant of the next chord
I --> belongs to major scale tonic
vii --> borrowed from lydian acting as dominant of the next chord
III --> secondary dominant of sixth
vi --> belongs to major scale acting as tonic
vi7 --> belongs to major scale acting as dominant of the next chord
IV --> belongs to major scale subdominant
vi --> belongs to major scale acting as dominant of the next chord
ii7 --> belongs to major scale acting as dominant of the next chord
V --> belongs to major scale dominant of the next chord
I --> belongs to major scale tonic

```

Το παραπάνω κομμάτι αποτελείται από δύο πανομοιότυπα μουσικά μέρη. Ας μελετήσουμε το πρώτο μισό. Παρατηρούμε ότι παρόλο που συγχορδία III αποτελεί δεσπόζουσα της vi, το Harmtrace διαγράφει τη λειτουργία της καθώς δε λαμβάνει υπόψη την τονική λειτουργία της vi. Ακόμη διαγράφει τις συγχορδίες IV και vi, καθώς θεωρεί πως η τρίτη συγχορδία (vi7) αποτελεί δεσπόζουσα της εβδόμης συγχορδίας (ii7) και οι ανάμεσά τους συγχορδίες δεν επιτελούν κάποιο ρόλο. Στο δικό μας πρόγραμμα, όμως, λόγω της σχετικότητας των συγχορδιών μπορούμε να βρούμε τη σχέση δεσπόζουσας - τονικής των συγχορδιών vi7 - IV, καθώς η συγχορδία vi7 είναι σχετική με τη συγχορδία I, που αποτελεί δεσπόζουσα της συγχορδίας IV.

Δεύτερο παράδειγμα στον Ντο μείζονα τρόπο. Έξοδος στο Harmtrace:



Έξοδος στο πρόγραμμά μας:

```
Give me mode : 0
Enter chords separated by comma : I,I7,IV,iv,V,V7,I,I7,IV,vi,V7,I,bVII,I,bVII,bIII,bII,bI,I
I --> belongs to major scale tonic
I7 --> secondary dominant of fourth
IV --> belongs to major scale similar to subdominant
iv --> borrowed from minor similar to subdominant
V --> belongs to major scale dominant
V7 --> belongs to major scale dominant of the next chord
I --> belongs to major scale tonic
I7 --> secondary dominant of fourth
IV --> belongs to major scale subdominant
vi --> belongs to major scale acting as tonic
V7 --> belongs to major scale dominant of the next chord
I --> belongs to major scale tonic
bVII --> borrowed from mixolydian full step distance with previous chord
I --> borrowed from mixolydian tonic
bVII --> borrowed from mixolydian dominant of the next chord
bIII --> borrowed from minor acting as dominant
bII --> borrowed from phrygian full step distance with previous chord
bI --> borrowed from f_lyd full step distance with previous chord
I --> belongs to major scale tonic
```

Εδώ αξίζει να σχολιάσουμε το τελευταίο μέρος του κομματιού, καθώς στο υπόλοιπο δε συναντάμε πολλές διαφορές. Το Harmtrace διαγράφει τις δύο συγχορδίες πριν την τελευταία τονική ενώ το πρόγραμμά μας είναι σε θέση να αναγνωρίσει ότι πρόκειται για δύο συνεχόμενες μεταφορές συγχορδιών κατά ένα τόνο προς τα κάτω.

Κεφάλαιο 5 - Αξιολόγηση LSTM νευρωνικού δικτύου για αυτόματα δημιουργία ακολουθιών μουσικών συγχορδιών

Έχοντας στη διάθεση μας ένα αρκετά μεγάλο Dataset με ακολουθίες μουσικών συγχορδιών, το χρησιμοποιήσαμε για να εκπαιδύσουμε ένα LSTM νευρωνικό δίκτυο. Το συγκεκριμένο νευρωνικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο που επεξεργάζεται φυσική γλώσσα, οπότε η είσοδός μας για την εκπαίδευσή του ήταν το Data set μας σε μορφή txt [15].

Η αξιολόγηση των ακολουθιών μουσικών συγχορδιών που δημιουργεί το νευρωνικό μας δίκτυο γίνεται κυρίως με βάση τις τρεις κύριες βασικές λειτουργίες των συγχορδιών και κατά πόσο οι δημιουργημένες συγχορδίες τις εκτελούν, καθώς κάθε μουσική ακολουθία πρέπει να έχει μια αρμονική συνέχεια.

Ας δούμε κάποιες ακολουθίες που δημιούργησε το νευρωνικό μας για διάφορα diversity και με seed την ακολουθία "III I ♭ III I V ♭ VII V IV V IV V ♭ VII ♭ II":

diversity 0.2:

```
III I ♭III I V ♭VII V IV V IV V ♭VII ♭III IV I ♭VII IV I V IV I V IV I V I
V I V IV V I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV V I V IV I V I
V V I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV
I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V
IV V I V IV I V IV V I V IV I V IV I V IV V I V IV I V IV V I V IV V I V I
V I V IV I V IV V I V IV I V IV I V IV I V IV V I V IV I V IV V I V IV V I V
```

Παρατηρούμε, όπως είναι φυσικό, με χαμηλό diversity, το νευρωνικό να παράγει μόνο τις τρεις πιο συχνές συγχορδίες. Η αρμονική αξιολόγησή τους δεν είναι ενδιαφέρουσα.

diversity 0.5:

```
III I ♭III I V ♭VII V IV V IV V ♭VII ♭III IV I V IV I V IV I V IV I V I V
IV I V IV I V IV I V IV V I V IV V I V IV I V IV I V IV I V I IV V I V IV I
V IV V I V IV I V IV I V IV V I IV I V IV V I V IV I V IV I V IV V I V IV
V I IV V I V IV I V IV I V IV V I V IV I V IV I V IV I V IV V I IV I V V I
IV I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV V I V IV I V IV I V IV V I V IV V I
V IV V I V IV V I V IV I V IV I V IV I V IV I V IV V I V IV V I V IV V
```

Το αποτέλεσμα παραμένει σχεδόν πανομοιότυπο με κάποιες εμφανίσεις των συγχορδιών νί και ν.

diversity 1.0:

```
III I bIII I V bVII V IV V IV V bVII bIII vi bVI V I bVII I
IV bVII IV bVImaj7 Vsus2 IVsus2sus2sus4 IVadd9 ii IVadd9 IVsus2 IVsus2 Vsus4 I
V I Vsus2I V
IV IVadd9 ii7 IV64 V IV I IV
IV IV I IV I V IV V I V IV IV V I IV I IV I V vi IV I V IV vi I V ii IV I V IV
I V
IV I V vi Vsus4 Vsus4#v I Imaj7sus2
IV vi vi IV I V ii7 iii vi ii V I V7 IV I VsV iio viio vi IV bVII IV V I IV vi
V ii I
IV vi V vi IV vi V IV V I V I V IV V I V V V vi I V IV
```

Τώρα, οι ακολουθίες που παράγονται αρχίζουν να αποκτούν παραπάνω μουσικό ενδιαφέρον. Παρατηρούμε, ωστόσο, ότι το νευρωνικό μας δίκτυο παράγει και συγχορδίες που δεν υπάρχουν (Vsus4#v), καθώς όπως έχουμε επισημάνει το δίκτυο αυτό επεξεργάζεται φυσική γλώσσα.

diversity 1.2:

```
III I bIII I V bVII V IV V IV V bVII bIII I bIII IV6 IV
IV IV iii vi vi IV I V vi V IV V vi V6 ii VI iiadd9 IV V I IV V vi V IV I IV I
V
bVI v bIII v bVII bVII v bIII IV6 i
i9 v v bIII i bVII i bVI
bIII IV V I V bVI bIII #vo isus2 iv i v IV6
bVI IV V i V i bVII bviv bVI bVII i bVII i bVII bIII bVII I bVII v bVI v bVII
v i bVII bVII i bVII i v
iv7 bVImaj7 iv7 bVI7 i7 i9sus4# iv7sus2 i bVI i iv7 bIII bVImaj765 v iv7sus2 i
bvi7 ivadd9 iadd
```

Και εδώ λαμβάνουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Μπορούμε να απομονώσουμε την ακολουθία “ b III IV V I V b VI b III #vo isus2 iv i v IV6” και να την αναλύσουμε με τη χρήση του αλγορίθμου μας, επιλέγοντας να δηλώσουμε ότι η ακολουθία είναι γραμμένη σε ελάσσονα τρόπο, καθώς εκεί ανήκουν οι περισσότερες συγχορδίες που εμφανίζονται:

```
Give me mode : 1
Enter chords separated by comma : bIII,IV,V,I,V,bVI,bIII,#vo,iskus2,iv,i,v,IV6
bIII --> belongs to minor scale full step distance with next chord
IV --> borrowed from major full step distance with next chord
V --> borrowed from major dominant of the next chord
I --> borrowed from major subdominant of the next chord
V --> borrowed from major similar to dominant
bVI --> belongs to minor scale acting as subdominant of the next chord
bIII --> belongs to minor scale dominant of the next chord
#vo --> borrowed from s_phr similar to subdominant of the next chord
iskus2 --> belongs to minor scale tonic
iv --> belongs to minor scale acting as subdominant of the next chord
i --> belongs to minor scale tonic, acting as subdominant of the next chord
v --> belongs to minor scale similar to dominant of the next chord
IV6 --> borrowed from major similar to subdominant
```

Παρατηρούμε ότι οι κύριες λειτουργίες εμφανίζονται αρκετά συχνά, κάτι που μας δείχνει ότι η ακολουθία αυτή θα έχει ένα καλό ηχητικό αποτέλεσμα αν χρησιμοποιηθεί.

Κεφάλαιο 6 - Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Με την παρούσα εργασία θέλαμε να παρουσιάσουμε δύο διαφορετικές υλοποιήσεις για την αρμονική ανάλυση μιας ακολουθίας μουσικών συγχορδιών. Θεωρούμε ως καλύτερη υλοποίηση αυτή του αλγορίθμου σε σχέση με αυτή της Οντολογίας καθώς είναι πιο εύχρηστη και εξαιρετικά πιο γρήγορη. Επίσης, θεωρούμε πως η υλοποίηση αυτή είναι ιδανική για πολλές χρήσεις. Είτε ως εκπαιδευτικό εργαλείο στα χέρια καθηγητών και μαθητών της μουσικής, είτε ως μέσω αξιολόγησης και φιλτραρίσματος μεγάλων Dataset μουσικών κομματιών. Η μεγαλύτερη συνεισφορά του αλγορίθμου μας στις ήδη υπάρχουσες δουλειές πάνω στο αντικείμενο, είναι η δυνατότητά του να μπορεί να χαρακτηρίζει συγχορδίες οι οποίες δεν έχουν κάποιο προφανή αρμονικό ρόλο στο σκελετό ενός μουσικού κομματιού. Ακόμη, είναι σε θέση να αναγνωρίζει πάντοτε σε ποιον παράλληλο διατονικό τρόπο ανήκει μια ξένη ως προς την τονικότητα συγχορδία, να τις ομαδοποιεί και έτσι να εντοπίζει αλλαγές στην τονικότητα.

6.2 Μελλοντικές επεκτάσεις

Το πρόγραμμα που υλοποιήσαμε θα μπορούσε να επεκταθεί προς διάφορες κατευθύνσεις. Πιο συγκεκριμένα:

- Επέκταση ως μέσο για την αξιολόγηση ή την εκπαίδευση μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας αντικατάστασης συγχορδιών μιας δοσμένης ακολουθίας [16], συγκρίνοντας τη λειτουργία των συγχορδιών που αντικαθίστανται με αυτή των νέων και ελέγχοντας έτσι την εγγύτητα του νέου ακουστικού αποτελέσματος προς το δοσμένο.

- Επέκταση ως μέσο για την αξιολόγηση αυτοματοποιημένων διαδικασιών μουσικής σύνθεσης [17].
- Επέκταση ως μέσο για την εύρεση μετατροπιών (αλλαγή τονικότητας) μέσα σε ένα μουσικό κομμάτι. Παρόλο που όπως είπαμε το πρόγραμμά μας μπορεί να ομαδοποιεί συνεχόμενες συγχορδίες που ανήκουν σε κάποιο παράλληλο τρόπο και να τις θεωρεί ως αλλαγή στην τονικότητα, δεν είναι σε θέση να μπορεί να συμπεραίνει ποιο είναι το νέο τονικό κέντρο αυτής της συγκεκριμένης υποακολουθίας, καθώς σε κάθε παράλληλο τρόπο αντιστοιχούν άλλοι έξι σχετικοί τρόποι με ίδιο οπλισμό.

Βιβλιογραφία

[1] Paul Hindemith: A concentrated Course in TRADITIONAL HARMONY with emphasis on exercises and a minimum of rules. 1943 by Associated Music Publishers, Inc. by permission of B. SCHOTT'S SOHNE, Mainz

[2] Paul Hindemith: TRADITIONAL HARMONY, Advanced Exercises. 1949, by Schott & Co., London by permission of B. SCHOTT'S SOHNE, Mainz

[3] MusicXML, the standard open format for exchanging digital sheet music, <https://www.musicxml.com/>

[4] The MIDI association, <https://www.midi.org/>

[5] Hooktheory, Software And Books That Help You Make Amazing Music, <https://www.hooktheory.com/>

[6] Python, <https://www.python.org/>

[7] Beautiful Soup, a Python library, <https://www.crummy.com/software/BeautifulSoup>

[8] JavaScript, <https://www.javascript.com/>

[9] Selenium WebDriver, <https://www.seleniumhq.org/projects/webdriver/>

[10] Γιώργος Στάμου: Αναπαράσταση Οντολογικής Γνώσης και Συλλογιστική. 2015 ΣΕΑΒ. ISBN: 987-960-603-157-1

[11] Rudolph, S., Krotzsch, M., & Hitzler, P. (2008). All Elephants are Bigger than All Mice. CEUR Workshop Proceedings, 353. <https://corescholar.libraries.wright.edu/cse/220>

- [12] Jose Pedro Magalhaes and W. Bas de Haas. Experience Report: Functional Modelling of Musical Harmony. International Conference on Functional Programming, 2011. <http://dreixel.net/research/pdf/fmmh.pdf>
- [13] W. Bas de Haas, et al. "Automatic Functional Harmonic Analysis." Computer Music Journal 37.4 (2013): 37-53.
- [14] Christopher Harte, Mark Sandler, Samer Abdallah and Emilia Gomez. SYMBOLIC REPRESENTATION OF MUSICAL CHORDS: A PROPOSED SYNTAX FOR TEXT ANNOTATIONS. Proc. 4th Int. Conf. on Music Information Retrieval (ISMIR), 2005
- [15] Keunwoo Choi, George Fazekas, Mark Sandler. Text-based LSTM networks for Automatic Music Composition. 1st Conference on Computer Simulation of Musical Creativity, 2016
- [16] Cheng-Zhi Anna Huang, David Duvenaud, and Krzysztof Z. Gajos. Chordripple: Recommending chords to help novice composers go beyond the ordinary. In Proceedings of the 21st International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '16, pages 241–250, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [17] Delalande, F. Towards an Analysis of Compositional Strategies. Circuit: Musiques contemporaines 17, 1 (2007).
- [18] Mark J. Steedman. A Generative Grammar for Jazz Chord Sequences. 1984 by the regents of the University of California. In Music Perception, Fall 1984, Vol. 2, No. 1, 52-77
- [19] Fukayama, S., Yoshii, K., and Goto, M. Chord-sequence-factory: A chord arrangement system modifying factorized chord sequence probabilities. International Society for Music Information Retrieval Conference ISMIR (2013).