

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Εξαγωγή και Απεικόνιση Μελωδίας από Μουσικό
Περιεχόμενο (κιθάρα, πιάνο)»*



Της φοιτήτριας:
Μπαρμπαγιάννη Ελένη
Αρ. Μητρώου: it185239

Επιβλέπων:
Κωτσάκης Ρήγας
Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία 10/09/2024

Τίτλος Δ.Ε:

Εξαγωγή και Απεικόνιση Μελωδίας από Μουσικό Περιεχόμενο (κιθάρα, πιάνο)

Κωδικός Δ.Ε.: 23331

Όνοματεπώνυμο φοιτητή/τών:

Ελένη Μπαρμπαγιάννη

Όνοματεπώνυμο εισηγητή:

Ρήγας Κωτσάκης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. : 09/11/2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε: 10/09/2024

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Μπαρμπαγιάννη Ελένης που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Στους φίλους και την οικογένειά μου»

« *The aim and final end of all music should be none other than the refreshment of the soul...* »
- Johann Sebastian Bach

Πρόλογος

Η μουσική και η πληροφορική υπήρξαν πάντα δύο από τα μεγαλύτερα πάθη μου. Από νεαρή ηλικία, η μουσική αποτέλεσε για μένα μια μορφή έκφρασης και δημιουργικότητας, ενώ η πληροφορική με γοήτευε με τις απεριόριστες δυνατότητες που προσφέρει για την επίλυση προβλημάτων και τη δημιουργία νέων εργαλείων. Όταν συνειδητοποίησα ότι οι δύο αυτοί κόσμοι μπορούν να συνδυαστούν, βρήκα την ευκαιρία να εξερευνήσω και να ενσωματώσω τις γνώσεις μου και στα δύο πεδία με έναν τρόπο που θα μπορούσε να παράγει κάτι δημιουργικό και καινοτόμο.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την κορύφωση αυτής της αναζήτησης, καθώς επιχειρεί να γεφυρώσει τη μουσική και την πληροφορική μέσα από την ανάλυση και επεξεργασία ηχητικού περιεχομένου και τη μετατροπή του σε μουσική σημειογραφία. Το ενδιαφέρον μου για αυτό το αντικείμενο πηγάζει από την επιθυμία μου να κατανοήσω καλύτερα τις τεχνικές προκλήσεις που παρουσιάζονται σε αυτόν τον τομέα, αλλά και να συμβάλλω στη συνεχή πρόοδο της τεχνολογίας που υποστηρίζει τη μουσική δημιουργία και παραγωγή.

Ελπίζω ότι μέσα από αυτή την εργασία θα μπορέσω να προσθέσω κάτι πολύτιμο στο πεδίο της Μουσικής Πληροφορικής, αξιοποιώντας τόσο την αγάπη μου για τη μουσική όσο και τις δεξιότητες που έχω αναπτύξει στην πληροφορική.

Περίληψη

Κατά την τελευταία δεκαετία, η εξαγωγή μελωδίας έχει αναδειχθεί σε ένα ενεργό ερευνητικό θέμα στον τομέα της Μουσικής Πληροφορικής, το οποίο περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία προτεινόμενων αλγορίθμων που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την αναγνώριση μελωδίας από ηχογραφήσεις πιάνου και κιθάρας σε μορφή WAV, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένες τεχνικές επεξεργασίας ήχου και ηχητικών παραμέτρων. Αφού αναγνωριστεί η μελωδία, μετατρέπεται σε αρχείο MIDI και δημιουργείται η αντίστοιχη παρτιτούρα, επιτρέποντας τόσο την ακρόαση όσο και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας, εξετάζεται η φύση του ήχου και αναλύεται πώς ο συνδυασμός μεταξύ φυσικής, μουσικής, μαθηματικών και τεχνολογίας συντελεί στην παραγωγή και επεξεργασία του ηχητικού αποτελέσματος.

Στο πειραματικό μέρος, περιγράφεται η διαδικασία συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, με έμφαση στις ηχητικές παραμέτρους και τους αλγορίθμους που χρησιμοποιήθηκαν. Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στον αλγόριθμο Constant-Q Transform, ο οποίος επιλέχθηκε για την εξαγωγή της μελωδίας.

Ακόμη, αναλυτικά περιγράφεται η διαδικασία αναγνώρισης των νοτών αποκομίζοντας τις θεμελιώδεις συχνότητές τους, η μετατροπή τους σε MIDI αρχείο και η δημιουργία παρτιτούρας χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες Librosa, MIDIUtil και Music21. Καταλήγοντας, αξιολογείται η αποτελεσματικότητα του προγράμματος με βάση τα ποσοστά επιτυχίας που προέκυψαν και προτείνονται πιθανές βελτιώσεις για τη μελλοντική εξέλιξη του προγράμματος.

Λέξεις κλειδιά: Εξαγωγή μελωδίας, αναγνώριση νοτών, μετατροπή σε MIDI, Μουσική Πληροφορική, δημιουργία παρτιτούρας, θεμελιώδεις συχνότητες, Constant-Q Transform, librosa, MIDIUtil, music21.

Melody Extraction and Sheet Visualization from Musical Content (Guitar, Piano)

Abstract

Over the past decade, melody extraction has emerged as an active research topic in the field of Music Information Retrieval, encompassing a wide variety of proposed algorithms that cover a broad range of techniques. This thesis focuses on the recognition of melody from piano and guitar recordings in WAV format, utilizing specialized sound processing techniques and audio parameters. Once the melody is recognized, it is converted into a MIDI file and the corresponding sheet music is generated, allowing both auditory and visual analysis of the results.

The theoretical part of the thesis examines the nature of sound and analyzes how the collaboration of many fields, such as: physics, music, mathematics, and technology contributes to the production and processing of audio output.

In the experimental part, the process of data collection and analysis is described, with an emphasis on the sound parameters and algorithms used. Special attention is given to the Constant-Q Transform algorithm, which was chosen for melody extraction.

Furthermore, the process of note recognition by identifying their fundamental frequencies is described in detail, along with the conversion of these notes into a MIDI file and the creation of sheet music using the Librosa, MIDIUtil, and Music21 libraries. Finally, the program's effectiveness is evaluated based on the success rates obtained, and potential improvements are suggested for the future development of the program.

Keywords: *Music Information Retrieval, melody extraction, note recognition, conversion to MIDI, music sheet generation, music notation, fundamental frequencies, f_0 , Constant-Q Transform, librosa, MIDIUtil, music21.*

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην πραγματοποίησή της.

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ρήγα Κωτσάκη, για την πολύτιμη καθοδήγηση, την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Η επιστημονική του γνώση, ο χρόνος που αφιέρωσε και οι συμβουλές του υπήρξαν ανεκτίμητες για την επίτευξη αυτού του στόχου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους υπήρξαν στην πορεία μου στα χρόνια του πανεπιστημίου, είτε αυτοί είναι συμφοιτητές είτε καθηγητές. Το ενδιαφέρον, η αφοσίωση και οι γνώσεις σας αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης για εμένα και με βοήθησαν να εξελιχθώ τόσο ακαδημαϊκά όσο και προσωπικά.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ και στους φίλους μου, οι οποίοι με υποστήριξαν αμέτρητες φορές, τόσο στις δύσκολες όσο και στις ευχάριστες στιγμές. Η παρουσία σας, η κατανόησή σας και οι στιγμές γέλιου που μοιραστήκαμε, ήταν πραγματικά ανεκτίμητες και με βοήθησαν να παραμείνω δυνατή και συγκεντρωμένη στους στόχους μου.

Τέλος, οφείλω το μεγαλύτερο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, για την αμέριστη στήριξη και αγάπη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Η εμπιστοσύνη τους και η πίστη τους στις δυνατότητές μου, μου έδωσαν τη δύναμη να ξεπεράσω κάθε δυσκολία.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	i
Περίληψη	ii
Abstract	iii
Ευχαριστίες	iv
Περιεχόμενα	v
Κατάλογος Εικόνων.....	ix
Συνομογραφίες	xiii
Εισαγωγή	xiv
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	1
Κεφάλαιο 1ο: Η Φυσική του Ήχου	2
1.1 Εισαγωγή	2
1.2 Ιστορική αναδρομή	2
1.3 Ορισμός του ήχου.....	3
1.4 Ηχητικά κύματα	3
1.5 Χαρακτηριστικά ηχητικών κυμάτων.....	4
1.5.1 Περίοδος(Period) και Συχνότητα (Frequency).....	4
1.5.2 Ένταση (Amplitude)	4
1.5.3 Ηχηρότητα (Loudness)	5
1.5.4 Ύψος ή Τόνος (Pitch)	5
1.5.5 Χροιά (Timbre)	5
1.6 Ανθρώπινη αντίληψη του ήχου.....	6
Κεφάλαιο 2ο: Θεωρία της Μουσικής	7
2.1 Εισαγωγή	7
2.2 Ορισμός	7
2.3 Το πεντάγραμμα	8
2.3.1 Οι νότες στο πεντάγραμμα	8
2.3.2 Κλειδιά.....	8
2.4 Ρυθμός.....	9
2.4.1 Παλμοί Ανά Λεπτό (BPM)	9
2.4.2 Μέτρο	10

2.4.3	<i>Αξίες Νοτών</i>	10
2.4.4	<i>Παύσεις</i>	11
2.5	<i>Κλίμακες</i>	11
2.5.1	<i>Αλλοιώσεις</i>	12
2.5.2	<i>Οπλισμός</i>	12
2.6	<i>Παράδειγμα Παρτιτούρας</i>	14
Κεφάλαιο 3ο: Τα Μαθηματικά της Μουσικής		15
3.1	<i>Εισαγωγή</i>	15
3.2	<i>Το Μαθηματικό Πρόβλημα Κοιρδίσματος</i>	15
3.2.1	<i>Το Πυθαγόρειο σύστημα κοιρδίσματος (Pythagorean tuning)</i>	15
3.2.2	<i>Το συγκερασμένο σύστημα (Equal Temperaments)</i>	17
3.3	<i>Αρμονικές (Overtones)</i>	17
3.3.1	<i>Θεμελιώδης Συχνότητα (Fundamental Frequency)</i>	18
3.3.2	<i>Η Αρμονική Σειρά (The harmonic series)</i>	18
Κεφάλαιο 4ο: Ο Ήχος στην Τεχνολογία		20
4.1	<i>Εισαγωγή</i>	20
4.2	<i>Αναλογικός Ήχος</i>	20
4.3	<i>Ψηφιακός Ήχος</i>	21
4.3.1	<i>Δειγματοληψία (Sampling)</i>	22
4.3.2	<i>Φαινόμενο Αναδίπλωσης (Aliasing)</i>	22
4.3.3	<i>Κβάντιση (Quantization)</i>	23
4.4	<i>MIDI</i>	24
4.4.1	<i>Ορισμός</i>	24
4.4.2	<i>Νότες MIDI</i>	24
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ		27
Κεφάλαιο 5ο: Παρουσίαση του Θέματος		28
5.1	<i>Εισαγωγή</i>	28
5.2	<i>Περιγραφή Εργασίας</i>	28
5.3	<i>Αντίστοιχες Έρευνες</i>	29
5.3.1	<i>Music Information Retrieval (MIR)</i>	29
5.3.2	<i>Βιβλία που χρησιμοποιήθηκαν</i>	30
5.3.3	<i>Έρευνες Πάνω στην Αναγνώριση Μελωδίας</i>	31
Κεφάλαιο 6ο: Εισαγωγή στο Πειραματικό Μέρος		33
6.1	<i>Εισαγωγή</i>	33
6.2	<i>Περιβάλλον</i>	33

6.2.1	<i>Jupyter Notebook</i>	33
6.2.2	<i>MuseScore 4</i>	34
6.2.3	<i>Midiano</i>	35
6.3	<i>Βιβλιοθήκες</i>	36
6.3.1	<i>Librosa</i>	36
6.3.2	<i>MIDIUtil</i>	37
6.3.3	<i>Music21</i>	37
Κεφάλαιο 7ο: Συλλογή και Καταγραφή Δεδομένων		38
7.1	<i>Εισαγωγή</i>	38
7.2	<i>Συλλογή Δεδομένων</i>	38
7.3	<i>Καταγραφή Δεδομένων</i>	40
Κεφάλαιο 8ο: Αλγόριθμοι εξαγωγής μελωδίας		42
8.1	<i>Εισαγωγή</i>	42
8.2	<i>Ηχητικά χαρακτηριστικά</i>	42
8.2.1	<i>Amplitude Envelope</i>	42
8.2.2	<i>Root Mean Squared (RMS)</i>	45
8.2.3	<i>Onset</i>	45
8.2.4	<i>Mel-frequency Cepstral Coefficients (MFCCs)</i>	48
8.2.5	<i>Χρωματογράφημα (Chromagram)</i>	48
8.3	<i>Αλγόριθμοι</i>	49
8.3.1	<i>Fast Fourier Transform (FFT)</i>	49
8.3.2	<i>Short-Time Fourier Transform (STFT)</i>	51
8.3.3	<i>YIN και Probabilistic YIN (pYIN)</i>	52
8.3.4	<i>Constant-Q Transform (CQT)</i>	54
8.4	<i>Επιλογή Αλγορίθμου</i>	56
Κεφάλαιο 9ο: Διεξαγωγή Πειράματος		58
9.1	<i>Εισαγωγή</i>	58
9.2	<i>Εξαγωγή Μελωδίας</i>	58
9.2.1	<i>Εισαγωγή Βιβλιοθηκών και Αρχικοποίηση των Παραμέτρων</i>	58
9.2.2	<i>Φόρτωση του Κομματιού</i>	59
9.2.3	<i>Κόψιμο και Κανονικοποίηση των δεδομένων</i>	59
9.2.4	<i>Οι παράμετροι CQT και τα Frequency Bins</i>	60
9.2.5	<i>Εντοπισμός των Onset</i>	61
9.2.6	<i>Εύρεση των νοτών και των εντάσεών τους</i>	61
9.2.7	<i>Διαχωρισμός Μπάσου - Μελωδίας</i>	65

9.2.8	Καταγραφή αποτελεσμάτων σε Excel.....	67
9.3	Μετατροπή σε MIDI	69
9.3.1	Εκφόρτωση βιβλιοθήκης	69
9.3.2	Κανονικοποίηση των Εντάσεων	69
9.3.3	Μετατροπή Νοτών σε Αριθμούς νοτών MIDI.....	71
9.3.4	Εύρεση διάρκειας των onset	73
9.3.5	Δημιουργία του MIDI αρχείου.....	74
9.4	Δημιουργία Παρτιτούρας	75
9.4.1	Εκφόρτωση βιβλιοθηκών.....	76
9.4.2	Αρχικοποίηση παρτιτούρας.....	76
9.4.3	Αναγνώριση Τονικότητας	77
9.4.4	Αναγνώριση Tempo	78
9.4.5	Προσθήκη Τίτλου Τραγουδιού και Καλλιτέχνη	78
9.4.6	Καθορισμός Αξίας Μέτρου	79
9.4.7	Δημιουργία παύσεων	79
9.4.8	Εύρεση διάρκειας των νοτών	80
9.4.9	Μετατροπή διάρκειας των νοτών σε χτύπους (beats)	82
9.4.10	Προσθήκη των νοτών.....	84
9.4.11	Επεξεργασία τελευταίου μέτρου	85
9.4.12	Δημιουργία αρχείου παρτιτούρας	85
Κεφάλαιο 10ο:	Αποτελέσματα	87
10.1	Εισαγωγή	87
10.2	Αποτελέσματα Πιάνου	87
10.3	Αποτελέσματα Κιθάρας	106
Κεφάλαιο 11ο:	Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης.....	127
11.1	Συμπεράσματα.....	127
11.2	Προτάσεις βελτίωσης.....	128
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		129

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Οι πειραματισμοί του Πυθαγόρα με καμπάνες, έγχορδα και πνευστά όργανα.	1
Εικόνα 1.2: Οι φωνητικές χορδές προκαλούν την μετατόπιση των σωματιδίων του αέρα.	2
Εικόνα 1.3: Αναπαράσταση πυκνωμάτων και αραιωμάτων σε ένα ημιτονοειδές κύμα.	2
Εικόνα 1.4: Οπτική απεικόνιση σύνθετης κυματομορφής	3
Εικόνα 1.5: Οπτική αναπαράσταση της έντασης και της περιόδου με μια ημιτονοειδή κυματομορφή.	4
Εικόνα 1.6: Διάγραμμα του ανθρώπινου αυτιού.	5
Εικόνα 2.1: Μουσικοί του δρόμου στην Κούβα παίζουν παραδοσιακή μουσική	6
Εικόνα 2.2: Οι νότες με Αγγλική και Ελληνική ονομασία	7
Εικόνα 2.3: Οι νότες στο πεντάγραμμα με Αγγλική και Ελληνική ονομασία στο κλειδί του Σολ.	8
Εικόνα 2.4: Οι νότες στο πεντάγραμμα με Αγγλική και Ελληνική ονομασία στο κλειδί του Φα	8
Εικόνα 2.5: Παραδείγματα ενδείξεων μέτρου.	9
Εικόνα 2.6: Πίνακας αντιστοίχισης παύσεων με τις αντίστοιχες αξίες νοτών	10
Εικόνα 2.7: Ο οπλισμός των διέσεων και υφέσεων στο κλειδί του Σολ και Φα.	12
Εικόνα 2.8: Ο κύκλος των πεμπτών.	12
Εικόνα 2.9: Παρτιτούρα πιάνου.	13
Εικόνα 3.1: Οι αναλογίες διαστημάτων των νοτών	15
Εικόνα 3.2: Η απόκλιση που προκύπτει ανάμεσα στα δύο συστήματα κουρδίσματος	16
Εικόνα 3.3: Οι συχνότητες των νοτών μιας οκτάβας ανάμεσα στα δύο συστήματα κουρδίσματος	16
Εικόνα 3.4: Οι θεμελιώδεις συχνότητες των νοτών στο συγκερασμένο σύστημα.	17
Εικόνα 3.5: Οι πρώτες 16 αρμονικές της Λα στην πρώτη οκτάβα (A1)	18
Εικόνα 3.6: Η ένταση των αρμονικών της νότας C4 στο φλάουτο, όμποε και βιολί	18
Εικόνα 4.1: Αναλογικό Μαγνητόφωνο	20
Εικόνα 4.2: Παράδειγμα δειγματοληψίας	21
Εικόνα 4.3: Πάνω γράφημα: δειγματοληψία με θεώρημα Nyquist, κάτω γράφημα: φαινόμενο αναδίπλωσης.	22
Εικόνα 4.4: Παράδειγμα σταθμών κβάντισης 3όν bit σε σύγκριση με το αναλογικό σήμα.	22
Εικόνα 4.5: Ο αριθμός των νοτών MIDI, η αγγλική ονομασία των νοτών και οι συχνότητές τους.	24
Εικόνα 4.6: Ο αριθμός και οι συχνότητες των νοτών MIDI και η σημειογραφία τους στο πεντάγραμμα.	25
Εικόνα 5.1: Η Fourier ανάλυση ενός σήματος μιας νότας C4 σε πιάνο.	29
Εικόνα 5.2: Οι Ζώνες MFCCs	29
Εικόνα 5.3: Οι νότες που βρέθηκαν και η αντιστοιχία τους σε MIDI.	30
Εικόνα 5.4: Σύγκριση της αυθεντικής παρτιτούρας με αυτή του πειράματος.	31
Εικόνα 5.5: Τα αποτελέσματα των πειραμάτων	31
Εικόνα 6.1: Εντολή εκκίνησης του Jupyter Notebook.	32
Εικόνα 6.2: Εικόνα προσομοίωσης του περιβάλλοντος Jupyter Notebook.	33
Εικόνα 6.3: Εικόνα προσομοίωσης του περιβάλλοντος MuseScore 4.	34
Εικόνα 6.4: Εικόνα προσομοίωσης του περιβάλλοντος Midiano.	34
Εικόνα 6.5: Οπτικοποίηση του ήχου με τη χρήση της βιβλιοθήκης Librosa	35
Εικόνα 6.6: Κομμάτι κώδικα και το αποτέλεσμα που προκύπτει με τη χρήση της βιβλιοθήκης Music21	36
Εικόνα 7.1: Το κομμάτι Au Clair de la Lune στην ιστοσελίδα 8notes.	38
Εικόνα 7.2: Η επιλογή για λήψη του MIDI και MP3 αρχείου.	38
Εικόνα 7.3: Ο κώδικας εξαγωγής νοτών από το MIDI αρχείο.	39

Εικόνα 7.4: Η καταγραφή των σωστών νοτών κάθε τραγουδιού για πιάνο.	40
Εικόνα 7.5: Η καταγραφή των σωστών νοτών κάθε τραγουδιού για κιθάρα.	40
Εικόνα 8.1: Η αναπαράσταση των φάσεων του Amplitude Envelope αριστερά για νότα πιάνου και δεξιά για νότα βιολιού.	42
Εικόνα 8.2: Εκφόρτωση βιβλιοθηκών, του κομματιού και καθορισμός του frame και hop.	43
Εικόνα 8.3: Trimming του αρχείου και υπολογισμός της διάρκειάς του.	43
Εικόνα 8.4: Αναπαράσταση του Amplitude Envelope.	44
Εικόνα 8.5: Αναπαράσταση ενός Onset	45
Εικόνα 8.6: Εντοπισμός Onset με το Amplitude Envelope.	46
Εικόνα 8.7: Εντοπισμός Onset μέσω RMS.	46
Εικόνα 8.8: Οπτικοποίηση των onset και με τους δύο τρόπους και ο κώδικας των σχεδιαγραμμάτων.	47
Εικόνα 8.9: Ηχητική αναπαράσταση των Onset.	47
Εικόνα 8.10: Οπτικοποίηση και υπολογισμός του chromagram.	49
Εικόνα 8.11: Μετατροπή σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνότητας με τον FFT.	50
Εικόνα 8.12: Η συνάρτηση get_frame.	50
Εικόνα 8.13: Υπολογισμός του FFT.	50
Εικόνα 8.14: Οπτικοποίηση του FFT.	51
Εικόνα 8.15: Υπολογισμός του STFT και το Melspectrogram.	52
Εικόνα 8.16: Απεικόνιση του Melspectrogram.	52
Εικόνα 8.17: Η συνάρτηση του αλγορίθμου pYIN και ο κώδικας του φασματογράμματος.	53
Εικόνα 8.18: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου pYIN.	53
Εικόνα 8.19: Κώδικας και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του CQT.	55
Εικόνα 8.20: Τα Frequency bins του CQT.	55
Εικόνα 8.21: Εξαγωγή της νότας και έντασης του πρώτου frame μέσω του CQT.	56
Εικόνα 8.22: Η κατάτμηση των frequency bin στον FFT και CQT.	57
Εικόνα 9.1: Εισαγωγή βιβλιοθηκών και αρχικοποίηση παραμέτρων.	59
Εικόνα 9.2: Φόρτωση και ακρόαση του κομματιού.	59
Εικόνα 9.3: Κόψιμο, κανονικοποίηση και ακρόαση του κομματιού.	60
Εικόνα 9.4: Οι CQT παράμετροι, καθαρισμός δεδομένων και τα Frequency Bins.	60
Εικόνα 9.5: Εντοπισμός και ακρόαση των onset.	61
Εικόνα 9.6: Ο κώδικας της συνάρτησης find_notes.	63
Εικόνα 9.7: Κλήση της συνάρτησης find_notes.	63
Εικόνα 9.8: Τα αποτελέσματα της συνάρτησης find_notes.	64
Εικόνα 9.9: Ο κώδικας της συνάρτησης fist_two_notes.	65
Εικόνα 9.10: Κλήση της συνάρτησης fist_two_notes.	65
Εικόνα 9.11: Η συνάρτηση bass_melody.	65
Εικόνα 9.12: Κλήση της συνάρτησης bass_melody.	66
Εικόνα 9.13: Αποτελέσματα της συνάρτησης bass_melody.	66
Εικόνα 9.14: Ο κώδικας για την αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε αρχείο Excel.	67
Εικόνα 9.15: Εμφάνιση των αποτελεσμάτων του τραγουδιού στο αρχείο Excel.	68
Εικόνα 9.16: Εκφόρτωση βιβλιοθήκης MIDIUtil.	69
Εικόνα 9.17: Ο μαθηματικός τύπος της κανονικοποίησης των εντάσεων.	69
Εικόνα 9.18: Ο κώδικας της συνάρτησης normalize_volumes.	70
Εικόνα 9.19: Κλήση της συνάρτησης normalize_volumes.	70
Εικόνα 9.20: Οι εντάσεις πριν και μετά την κανονικοποίηση.	71
Εικόνα 9.21: Η συνάρτηση notes_to_MIDI_number.	72
Εικόνα 9.22: Κλήση της συνάρτησης notes_to_MIDI_number.	72
Εικόνα 9.23: Αποτελέσματα της συνάρτησης notes_to_MIDI_number.	72

Εικόνα 9.24: Κώδικας εύρεσης των διαρκειών.	73
Εικόνα 9.25: Οι διάρκειες κάθε νότας που υπολογίστηκαν.	73
Εικόνα 9.26: Αρχικοποίηση του MIDI αρχείου.	74
Εικόνα 9.27: Προσθήκη νοτών MIDI.	74
Εικόνα 9.28: Δημιουργία του MIDI αρχείου.	75
Εικόνα 9.29: Προσθήκη ήχου κιθάρας κατά την αναπαραγωγή του MIDI.	75
Εικόνα 9.30: Εκφόρτωση βιβλιοθήκης Music21.	76
Εικόνα 9.31: Δημιουργία του Stream.	76
Εικόνα 9.32: Ανάλυση τονικότητας.	77
Εικόνα 9.33: Προσθήκη του σπλισμού.	77
Εικόνα 9.34: Υπολογισμός και προσθήκη του tempo.	78
Εικόνα 9.35: Διαχωρισμός Τίτλου κομματιού - Καλλιτέχνη.	78
Εικόνα 9.36: Προσθήκη των metadata στην παρτιτούρα.	79
Εικόνα 9.37: Καθορισμός της χρονικής αξίας του μέτρου και προσθήκη του στην παρτιτούρα.	79
Εικόνα 9.38: Δημιουργία των παύσεων.	80
Εικόνα 9.39: Η συνάρτηση note_durations.	81
Εικόνα 9.40: Τα αποτελέσματα της συνάρτησης note_durations.	82
Εικόνα 9.41: Η συνάρτηση notes_to_beats.	83
Εικόνα 9.42: Τα αποτελέσματα της συνάρτησης notes_to_beats.	83
Εικόνα 9.43: Η περίπτωση των 6/8.	84
Εικόνα 9.44: Η συνάρτηση add_notes.	84
Εικόνα 9.45: Η συνάρτηση last_measure.	85
Εικόνα 9.46: Προσθήκη ένδειξης τέλους και των bass και treble part στο stream.	85
Εικόνα 9.47: Η δημιουργία του αρχείου παρτιτούρας mxl.	86
Εικόνα 9.48: Παράδειγμα αρχείου παρτιτούρας.	86
Εικόνα 10.1: Αποτελέσματα του Au Clair de la Lune.	88
Εικόνα 10.2: Παρτιτούρα του Au Clair de la Lune.	88
Εικόνα 10.3: Αποτελέσματα του Canon-Johann Pachelbel.	89
Εικόνα 10.4: Παρτιτούρα του Canon-Johann Pachelbel.	90
Εικόνα 10.5: Αποτελέσματα του Coming round the mountain.	91
Εικόνα 10.6: Παρτιτούρα του Coming round the mountain.	92
Εικόνα 10.7: Αποτελέσματα του Greensleeves.	93
Εικόνα 10.8: Παρτιτούρα του Greensleeves.	94
Εικόνα 10.9: Αποτελέσματα του Jupiter-Holst.	95
Εικόνα 10.10: Παρτιτούρα του Jupiter-Holst.	95
Εικόνα 10.11: Αποτελέσματα του Morning from Peer Gynt-E.Grieg.	96
Εικόνα 10.12: Παρτιτούρα του Morning from Peer Gynt-E.Grieg.	97
Εικόνα 10.13: Αποτελέσματα του Ode to Joy-Ludwig van Beethoven.	98
Εικόνα 10.14: Παρτιτούρα του Ode to Joy-Ludwig van Beethoven.	99
Εικόνα 10.15: Αποτελέσματα του Theme from Sonata in F K280 -W.A.Mozart.	100
Εικόνα 10.16: Παρτιτούρα του Theme from Sonata in F K280 -W.A.Mozart.	101
Εικόνα 10.17: Αποτελέσματα του Waltz from Sleeping Beauty-Pyotr Ilyich Tchaikovsky.	102
Εικόνα 10.18: Παρτιτούρα του Waltz from Sleeping Beauty-Pyotr Ilyich Tchaikovsky.	103
Εικόνα 10.19: Αποτελέσματα του Waltz-Johannes Brahms.	104
Εικόνα 10.20: Παρτιτούρα του Waltz-Johannes Brahms.	105
Εικόνα 10.21: Αποτελέσματα του Bourree-Le Couprey.	107
Εικόνα 10.22: Παρτιτούρα του Bourree-Le Couprey.	108

Εικόνα 10.23: Αποτελέσματα του Camptown Races-Traditional.	109
Εικόνα 10.24: Παρτιτούρα του Camptown Races-Traditional.	109
Εικόνα 10.25: Αποτελέσματα του Dallas Blues-C.H. Wand.	110
Εικόνα 10.26: Παρτιτούρα του Dallas Blues-C.H. Wand.	111
Εικόνα 10.27: Αποτελέσματα του I Can't Help Falling In Love-Jean Paul Egide Martini.	112
Εικόνα 10.28: Παρτιτούρα του I Can't Help Falling In Love-Jean Paul Egide Martini.	113
Εικόνα 10.29: Αποτελέσματα του Mary Had A Little Lamb-Traditional.	114
Εικόνα 10.30: Παρτιτούρα του Mary Had A Little Lamb-Traditional.	114
Εικόνα 10.31: Αποτελέσματα του Menuett-Georg Philipp Telemann.	115
Εικόνα 10.32: Παρτιτούρα του Menuett-Georg Philipp Telemann.	116
Εικόνα 10.33: Αποτελέσματα του Metsakukkia(Woodland Flowers)-Philip DeWalt.	117
Εικόνα 10.34: Παρτιτούρα του Metsakukkia(Woodland Flowers)-Philip DeWalt.	118
Εικόνα 10.35: Αποτελέσματα του Passepied-Georg Philipp Telemann.	119
Εικόνα 10.36: Παρτιτούρα του Passepied-Georg Philipp Telemann.	120
Εικόνα 10.37: Αποτελέσματα του Sinner Man-Traditional.	121
Εικόνα 10.38: Παρτιτούρα του Sinner Man-Traditional.	122
Εικόνα 10.39: Αποτελέσματα του The Entertainer-Scott Joplin.	123
Εικόνα 10.40: Παρτιτούρα του The Entertainer-Scott Joplin.	124
Εικόνα 10.41: Τελικά ποσοστά επιτυχίας στο πιάνο.	125
Εικόνα 10.42: Τελικά ποσοστά επιτυχίας στην κιθάρα.	125
Εικόνα 10.43: Τελικά ποσοστά επιτυχίας του συνολικού προγράμματος.	125

Συντομογραφίες

π.Χ	προ Χριστού
MIDI	Musical Instrument Digital Interface
BPM	Beats Per Minute
f ₀	Fundamental Frequency
ET	Equal Temperaments
κ.ο.κ	και ούτω καθεξής
MIR	Music Information Retrieval
FFT	Fast Fourier Transform
STFT	Short-Time Fourier Transform
MFCCs	Mel-frequency cepstral coefficients
CQT	Constant-Q transform
RMS	Root Mean Squared
PYIN	Probabilistic YIN

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην εξαγωγή μελωδίας από ηχογραφήσεις πιάνου και κιθάρας, χρησιμοποιώντας εξειδικευμένες τεχνικές επεξεργασίας ήχου. Η αναγνώριση της μελωδίας πραγματοποιείται μέσω εξαγωγής των θεμελιωδών συχνοτήτων και στη συνέχεια η μελωδία μετατρέπεται σε αρχείο MIDI και σε παρτιτούρα, επιτρέποντας τόσο την ακρόαση όσο και την οπτική αναπαράστασή της. Η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη: το θεωρητικό, όπου εισάγονται βασικές και αναγκαίες έννοιες για την περάτωσή της, και το πρακτικό, όπου περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε με εικόνες και επεξήγηση κώδικα.

Στο πρώτο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους εξηγείται η σύνδεση του επιστημονικού κλάδου της φυσικής με τον ήχο, περιλαμβάνοντας μια ιστορική αναδρομή, τον ορισμό του ήχου, την έννοια των ηχητικών κυμάτων και τα χαρακτηριστικά του ήχου. Επίσης, αναλύεται ο τρόπος που ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον ήχο μέσω του ανθρώπινου αυτιού.

Στο δεύτερο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους αναφέρονται οι βασικότερες έννοιες της θεωρίας της μουσικής. Δίνεται ο ορισμός της μουσικής και αναλύονται μουσικά στοιχεία όπως το πεντάγραμμα, η έννοια του ρυθμού και οι κλίμακες. Στο τέλος του κεφαλαίου, δίνεται ένα παράδειγμα παρτιτούρας, όπου γίνεται μια μουσική επεξήγηση των στοιχείων της.

Στο τρίτο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους αναλύεται η σχέση του ήχου με τα μαθηματικά. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται το μαθηματικό πρόβλημα του κουρδίσματος και στη συνέχεια οι αρμονικές του ήχου. Περιγράφεται πώς οι μαθηματικές αναλογίες καθορίζουν τις συχνότητες των νοτών και ο τρόπος που οι αρμονικές επηρεάζουν το αποτέλεσμα του ήχου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους περιγράφεται η συνεισφορά της τεχνολογίας στον ήχο. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στον αναλογικό ήχο και στη διαδικασία μετατροπής του σε ψηφιακό ήχο. Επίσης, περιγράφεται το πρωτόκολλο MIDI και δίνεται ο πίνακας αντιστοίχισης των νοτών σε νότες MIDI.

Από το πέμπτο κεφάλαιο ξεκινά το πειραματικό μέρος. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται το θέμα, περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για τη διεξαγωγή του πειράματος και παρουσιάζονται σχετικές βιβλιογραφικές έρευνες.

Το έκτο κεφάλαιο αποτελεί εισαγωγή στο πειραματικό μέρος, παρουσιάζοντας το περιβάλλον στο οποίο θα εκτελεστεί το πείραμα και τις βιβλιοθήκες που θα χρησιμοποιηθούν.

Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία συλλογής και καταγραφής των δεδομένων, καθώς και τα μέσα που χρησιμοποιήθηκαν.

Το όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζει τις υποψήφιες ηχητικές παραμέτρους και αλγόριθμους που εξετάστηκαν. Παρουσιάζονται τμήματα κώδικα υλοποίησης των αλγορίθμων και των ηχητικών παραμέτρων, και αναφέρεται η τελική επιλογή του αλγορίθμου και των παραμέτρων.

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο κώδικας του πειραματικού μέρους. Αναλύεται η διαδικασία εξαγωγής της μελωδίας και η αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε ένα φύλλο Excel. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η διαδικασία μετατροπής σε MIDI, καθώς και η αποτύπωση της μελωδίας σε παρτιτούρα.

Στο δέκατο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας σε μορφή πινάκων Excel, καθώς και οι παρτιτούρες που δημιουργήθηκαν. Εξετάζονται τα ποσοστά επιτυχίας του προγράμματος στην εξαγωγή μελωδίας όπου στη συνέχεια σχολιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Τέλος, στο ενδέκατο κεφάλαιο, συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας. Ακόμη, εξετάζονται οι περιορισμοί της παρούσας μεθοδολογίας, οι προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν κατά την υλοποίηση του προγράμματος και τελικά προτείνονται μέθοδοι για την μετέπειτα εξέλιξή του.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1ο: Η Φυσική του Ήχου

1.1 Εισαγωγή

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο ο ήχος σχετίζεται με τη φυσική, καθώς και οι βασικότερες έννοιές του. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή και στη συνέχεια δίνεται ο ορισμός του ήχου. Ακόμη, εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο ο ήχος διαδίδεται μέσω των ηχητικών κυμάτων και έπειτα περιγράφονται τα χαρακτηριστικά τους. Τέλος, μελετάται η ανθρώπινη ακοή και ο τρόπος με τον οποίο το ανθρώπινο αυτί συμβάλλει στην αντίληψη του ήχου.

1.2 Ιστορική αναδρομή

Η μουσική και η φυσική φαίνεται εκ πρώτης όψεως να απέχουν πολύ η μία από την άλλη. Ωστόσο, αποτελούν δύο αντικείμενα τα οποία συνδέονται στενά και με πολύ ενδιαφέροντες τρόπους. Η έρευνα για την συσχέτιση της μουσικής με τη φυσική ξεκίνησε ήδη από την αρχαιότητα, με ξακουστό παράδειγμα τον Πυθαγόρα και τους μαθητές του, οι οποίοι κατά τον 6ο αιώνα π.Χ. μελετούσαν τη σχέση μεταξύ του μήκους της χορδής και του ήχου που παράγεται. Επιπρόσθετα, οι Πυθαγόρειοι πίστευαν ότι το φαινόμενο της αρμονίας εκτείνεται πέρα από τα μαθηματικά και ότι η κανονικότητα της φύσης οφείλεται στην μουσική. Επιπλέον, πίστευαν ότι οι πλανήτες παράγουν αρμονικούς ήχους καθώς κινούνται, γεγονός το οποίο ονόμαζαν «Μουσική των σφαιρών»[1]. Σήμερα, ο κλάδος της φυσικής που ασχολείται με τον ήχο ονομάζεται ακουστική και εξετάζει την προέλευση του ήχου και τη διάδοσή του στον ελεύθερο χώρο[2].

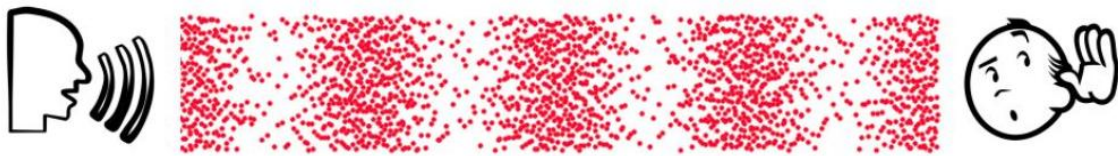


Εικόνα 1.1: Οι πειραματισμοί του Πυθαγόρα με καμπάνες, έγχορδα και πνευστά όργανα[1].

1.3 Ορισμός του ήχου

Ο ήχος ορίζεται ως η διάδοση κυμάτων πίεσης που εκπέμπονται από ένα δονούμενο σώμα μέσω ενός ελαστικού μέσου. Η διάδοση αυτή προκύπτει όταν τα κινούμενα σωματίδια μετατοπίζονται τα γειτονικά σωματίδια του μέσου. Για να προκληθεί μετατόπιση των σωματιδίων στο μέσο διάδοσης είναι απαραίτητη η δόνηση ενός σώματος όπως για παράδειγμα οι φωνητικές χορδές, ενώ ελαστικό μέσο θεωρείται κάθε ουσία στην οποία τα σωματίδια επιστρέφουν στην αρχική τους θέση μετά την μετατόπισή τους το συντομότερο δυνατόν, όπως ο αέρας.

Ο ήχος αποτελεί μία μορφή κίνησης και συνεπώς όλοι οι νόμοι της φυσικής που ισχύουν για τα κινούμενα σώματα μπορούν να εφαρμοστούν και στον ήχο. Για αυτό τον λόγο μπορούμε να προβλέψουμε και να αναλύσουμε την φύση του ήχου και όλων των αλληλεπιδράσεών του[3]. Στον τομέα της ανθρώπινης φυσιολογίας και ψυχολογίας, ο ήχος είναι η αντίληψη των ηχητικών κυμάτων από τον εγκέφαλο[4].

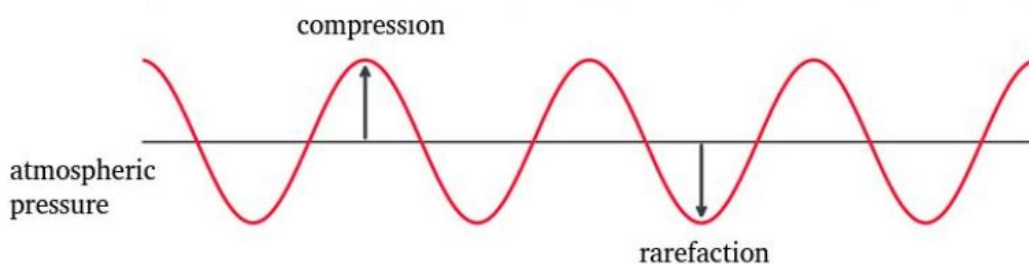


Εικόνα 1.2: Οι φωνητικές χορδές προκαλούν την μετατόπιση των σωματιδίων του αέρα.

1.4 Ηχητικά κύματα

Το ηχητικό κύμα στον αέρα είναι μια διαδοχή στρωμάτων χαμηλών και υψηλών πιέσεων, τα οποία ονομάζονται αραιώματα και πυκνώματα, αντίστοιχα. Έχει καθιερωθεί ότι τα ηχητικά κύματα αναπαρίστανται με κυματομορφές. Ένα παράδειγμα του πιο απλοποιημένου ηχητικού κύματος είναι το ημιτονοειδές κύμα, όπου οι κορυφές αναπαριστούν τα πυκνώματα και οι βυθίσεις τα αραιώματα[5].

Τα ηχητικά κύματα ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή από την πηγή προς όλες τις κατευθύνσεις και η έντασή τους μειώνεται όσο απομακρύνονται. Ανάλογα με το μέσο διάδοσης, ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα. Ωστόσο, δεν μπορούν να διαδοθούν στο κενό διάστημα[3].

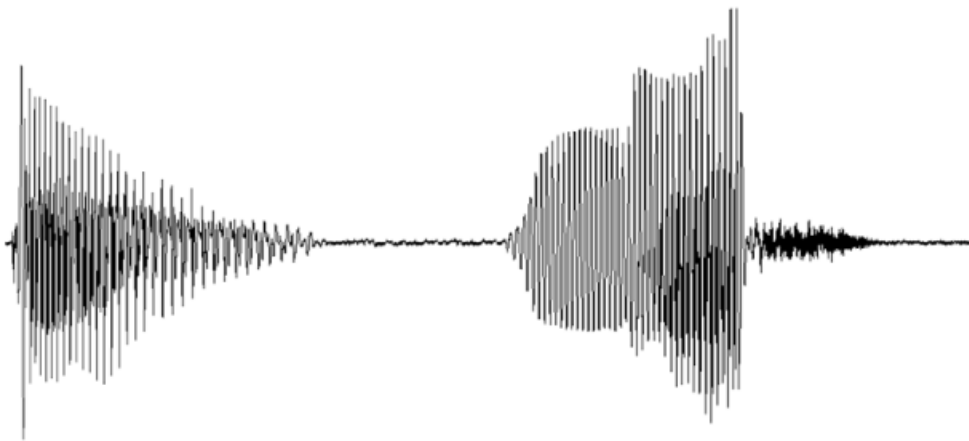


Εικόνα 1.3: Αναπαράσταση πυκνωμάτων και αραιωμάτων σε ένα ημιτονοειδές κύμα.

1.5 Χαρακτηριστικά ηχητικών κυμάτων

Οι ήχοι που παράγονται μπορούν να καταταχθούν σε απλούς και σύνθετους. Οι απλοί ήχοι είναι σπάνιοι στο φυσικό μας περιβάλλον και αναπαράγονται συνήθως σε εργαστήριο από γεννήτριες ή άλλα εργαλεία. Οι σύνθετοι ήχοι προέρχονται από πολλές πηγές και αποτελούνται από τον συνδυασμό πολλών συχνοτήτων. Η αναπαράστασή τους μπορεί να απεικονιστεί οπτικά με κυματομορφές, όπως στο παράδειγμα της εικόνας 1.4.

Τα χαρακτηριστικά του ήχου διακρίνονται σε αντικειμενικά, όπως η συχνότητα (frequency), η περίοδος (period) και η ένταση (amplitude) και υποκειμενικά, όπως η ηχηρότητα (loudness), η χροιά (timbre) και ο τόνος (pitch)[6].



Εικόνα 1.4: Οπτική απεικόνιση σύνθετης κυματομορφής[6].

1.5.1 Περίοδος(Period) και Συχνότητα (Frequency)

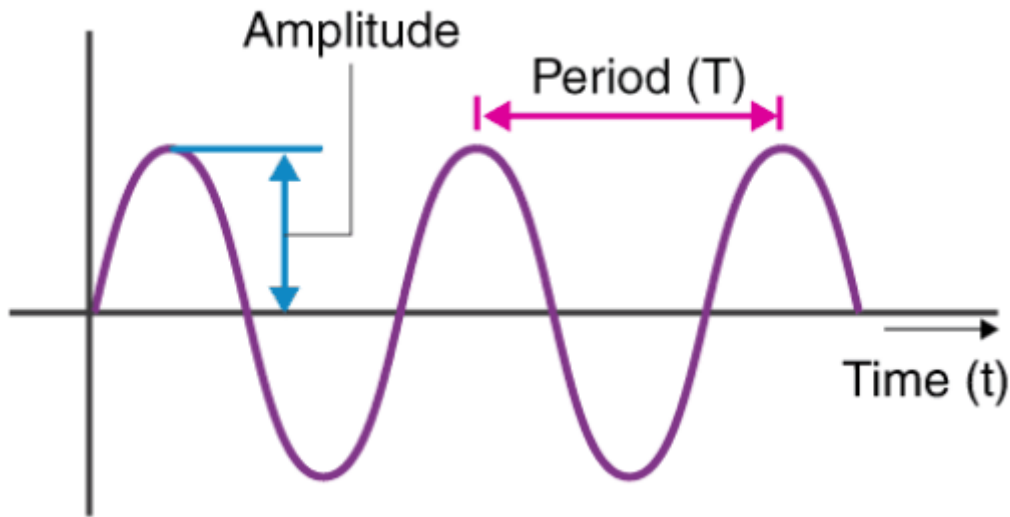
Η περίοδος συμβολίζεται με το κεφαλαίο γράμμα T και είναι ο χρόνος που μεσολαβεί για την ολοκλήρωση ενός κύκλου μιας πλήρους ταλάντωσης. Μετριέται σε δευτερόλεπτα (seconds).

Η συχνότητα συμβολίζεται με το γράμμα f και είναι ο αριθμός των επαναλήψεων ενός κύκλου ανά δευτερόλεπτο. Η συχνότητα ενός κύματος μετριέται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο (Hertz) και είναι αντίστροφη της περιόδου[7].

1.5.2 Ένταση (Amplitude)

Ένταση ενός κύματος είναι η τιμή της μέγιστης μετατόπισης των σωματιδίων ενός μέσου από τη μέση τιμή ισορροπίας του κύματος. Πρόκειται ουσιαστικά για το μέγεθος (magnitude) του κύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του κύματος τόσο δυνατότερος θα είναι ο ήχος[8]. Η ένταση του ηχητικού κύματος είναι ένα φυσικό, μετρήσιμο μέγεθος και μετριέται σε μονάδες της κλίμακας Ντεσιμπέλ (decibels, dB).

Το dB είναι μια λογαριθμική μονάδα η οποία συγκρίνει τον λόγο δύο μεγεθών και επομένως δεν είναι μια απόλυτη μονάδα μέτρησης. Αυτό σημαίνει ότι για να διπλασιαστεί η ένταση του ήχου πρέπει να προκύψει διαφορά που αντιστοιχεί σε 3 dB[6].



Εικόνα 1.5: Οπτική αναπαράσταση της έντασης και της περιόδου με μια ημιτονοειδή κυματομορφή.

1.5.3 Ηχηρότητα (Loudness)

Αντίθετα με την ένταση η ηχηρότητα αποτελεί ένα υποκειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου που εξαρτάται από την ένταση αλλά και από άλλους παράγοντες όπως το περιβάλλον, την ηλικία του ακροατή και της απόστασης του ακροατή από την πηγή του ήχου. Η ηχηρότητα ορίζεται ως η υποκειμενική αντίληψη της έντασης ενός ήχου[6].

1.5.4 Ύψος ή Τόνος (Pitch)

Ύψος ή τόνος είναι ένα υποκειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου που μας επιτρέπει να χαρακτηρίσουμε πόσο χαμηλός (βαθύς) ή πόσο υψηλός (οξύς) είναι ο ήχος. Το ύψος του ήχου εξαρτάται από την συχνότητα και συνδέεται άμεσα με αυτή. Πιο συγκεκριμένα, όσο υψηλότερη είναι η συχνότητα ενός ήχου τόσο πιο λεπτός ακούγεται[6].

1.5.5 Χροιά (Timbre)

Η χροιά είναι ένα υποκειμενικό χαρακτηριστικό του ήχου και είναι αυτή που μας επιτρέπει να ξεχωρίσουμε δύο ήχους διαφορετικών πηγών της ίδιας συχνότητας. Για παράδειγμα, η χροιά μας επιτρέπει να αναγνωρίσουμε αν η ίδια μουσική νότα προέρχεται από διαφορετικά μουσικά όργανα. Επομένως, μπορούμε να πούμε ότι η μοναδικότητα του κάθε ήχου οφείλεται στην χροιά του[6].

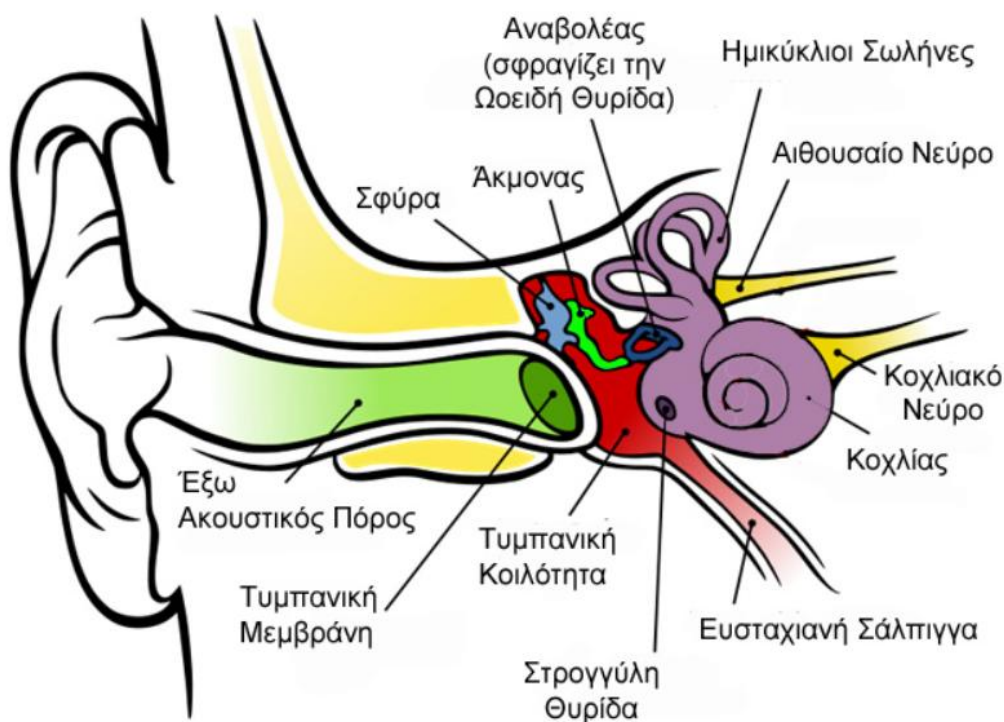
1.6 Ανθρώπινη αντίληψη του ήχου

Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον ήχο μέσω της ακοής του η οποία αποτελεί και μία από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Επομένως, έχει τη δυνατότητα να επεξεργάζεται τους ήχους που λαμβάνει από το περιβάλλον του λόγω του οργάνου ακοής που είναι το ανθρώπινο αυτί, το οποίο επίσης παίζει καθοριστικό ρόλο για την ισορροπία.

Το ανθρώπινο αυτί αποτελείται από τρία μέρη: το εξωτερικό αυτί, το μέσο αυτί και το εσωτερικό αυτί. Το εσωτερικό αυτί αποτελείται από δύο μέρη: το αιθουσαίο νεύρο για την ισορροπία και τον κοχλία για την ακοή. Το εξωτερικό και το μέσο αυτί μεταφέρουν τον ήχο στον κοχλία, ο οποίος επεξεργάζεται τα ηχητικά σήματα και διαχωρίζει τους ήχους ως προς τη συχνότητά τους προτού μετατραπούν σε νευρικό κώδικα στις ίνες του ακουστικού νεύρου[9].

Η ανθρώπινη ακοή κυμαίνεται από τα 20 Hz μέχρι τα 20.000 Hz και το ακουστικό εύρος επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες όπως η ηλικία του ακροατή ή η έκθεσή του σε δυνατούς θορύβους κατά τη διάρκεια της ζωής του. Οι ήχοι που γίνονται αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί ονομάζονται ακουστοί ήχοι. Αντίθετα, οι ήχοι συχνοτήτων κάτω από τα 20 Hz ονομάζονται υπόηχοι και πάνω από τα 20.000 Hz υπέρηχοι. Το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα είναι πιο ευαίσθητο στο συχνοτικό φάσμα που κυμαίνεται από 2.000 μέχρι 5000 Hz.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το κατώφλι πόνου της ανθρώπινης ακοής ξεκινάει από ήχους που ξεπερνούν τα 120 dB, ενώ η συνεχής έκθεση σε ήχους πάνω από 90 dB μπορούν να προκαλέσουν μόνιμη βλάβη στην ανθρώπινη ακοή[10].



Εικόνα 1.6: Διάγραμμα του ανθρώπινου αυτιού.

Κεφάλαιο 2ο: Θεωρία της Μουσικής

2.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι σημαντικό να γίνει αναφορά στους βασικούς όρους της μουσικής και της θεωρίας της, ώστε ο αναγνώστης να εξοικειωθεί με τις θεμελιώδεις μουσικές έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν στο πειραματικό μέρος. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι κύριες έννοιες της θεωρίας της μουσικής, όπως η σημειογραφία των νοτών του Ευρωπαϊκού μουσικού συστήματος στο πεντάγραμμο, ο ρυθμός και οι κλίμακες. Στο τέλος του κεφαλαίου, θα γίνει μια σύντομη περιγραφή μιας παρτιτούρας για πιάνο.

2.2 Ορισμός

Η έννοια της μουσικής είναι δύσκολο να οριστεί με έναν συγκεκριμένο και απόλυτο τρόπο καθώς ο ορισμός της διαφοροποιείται ανάλογα με την κουλτούρα και τον πολιτισμό του κάθε τόπου[11]. Παρόλα αυτά, ένας κοινά αποδεκτός ορισμός της είναι ότι η μουσική είναι η τέχνη η οποία συνδυάζει ήχους που προέρχονται από την ανθρώπινη φωνή ή από κάποιο μουσικό όργανο, αποσκοπώντας στη συναισθηματική έκφραση, συνήθως σύμφωνα με πρότυπα ρυθμού, μελωδίας και αρμονίας που ορίζει η κάθε κουλτούρα[12].

Στη μουσική, οι νότες είναι διακριτοί ήχοι που μεταφέρουν πληροφορίες όπως ο τόνος και η διάρκεια και αποτελούν τα πιο βασικά δομικά στοιχεία για το σύνολο σχεδόν της μουσικής[13].



Εικόνα 2.1: Μουσικοί του δρόμου στην Κούβα παίζουν παραδοσιακή μουσική[12].

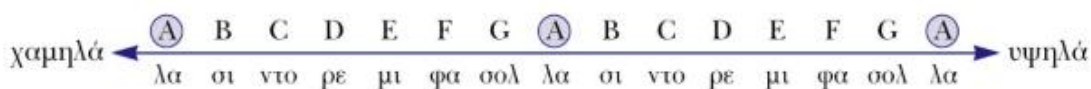
2.3 Το πεντάγραμμο

Στη Δυτικοευρωπαϊκή μουσική, η απεικόνιση της μουσικής γίνεται με την καταγραφή των νοτών στο μουσικό πεντάγραμμο. Το πεντάγραμμο αποτελείται από πέντε οριζόντιες, παράλληλες και ίσιες γραμμές, ενώ μεταξύ αυτών των γραμμών σχηματίζονται τέσσερα διαστήματα. Όλες οι νότες καταγράφονται πάνω στο πεντάγραμμο ή γύρω από αυτό, με τη χρήση βοηθητικών γραμμών όταν χρειάζεται[14].

2.3.1 Οι νότες στο πεντάγραμμο

Οι νότες στο Δυτικοευρωπαϊκό σύστημα είναι επτά και έχουν τα εξής ονόματα: Ντο, Ρε, Μι, Φα, Σολ, Λα και Σι. Στα Αγγλικά ονομάζονται με κεφαλαία γράμματα του λατινικού αλφαβήτου και είναι C, D, E, F, G, A και B αντίστοιχα. Οι φθόγγοι σημειώνονται είτε πάνω σε μία γραμμή στο πεντάγραμμο, είτε ενδιάμεσα σε δύο γραμμές του πενταγράμμου, δηλαδή σε ένα διάστημα[14].

Οι φθόγγοι σημειώνονται στο πεντάγραμμο, με τρόπο τέτοιο ώστε ο οξύτερος ήχος να συμπληρώνεται σε υψηλότερη θέση στο πεντάγραμμο σε σύγκριση με κάποιο βαρύτερο[15].






Εικόνα 2.2: Οι νότες με Αγγλική και Ελληνική ονομασία[15].

2.3.2 Κλειδιά

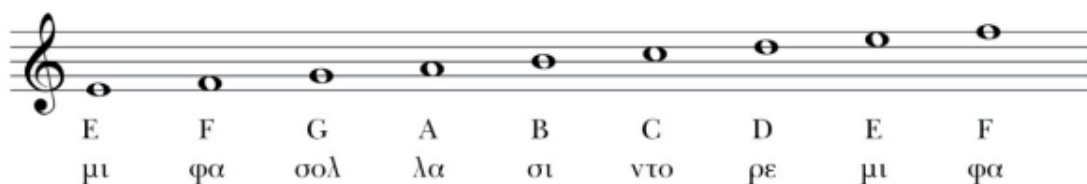
Στην αρχή κάθε πενταγράμμου υπάρχει ένα σύμβολο που ονομάζεται κλειδί και είναι υπεύθυνο για την σωστή απεικόνιση των νοτών στο πεντάγραμμο. Το κλειδί προσδιορίζει το όνομα και το ύψος κάθε νότας στο πεντάγραμμο.

Τα μουσικά κλειδιά είναι τρία:

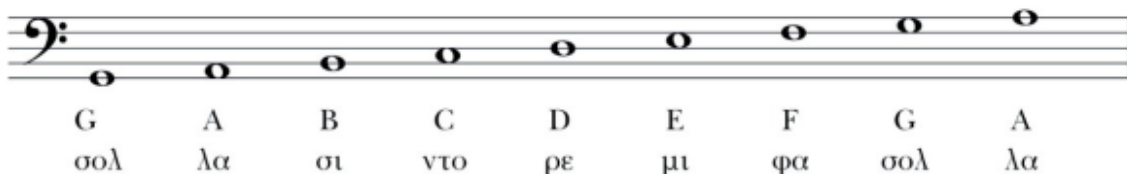
- 1) Κλειδί του Σολ: 
- 2) Κλειδί του Φα: 
- 3) Κλειδί του Ντο: 

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, θα επικεντρωθούμε μόνο στα δύο πρώτα κλειδιά.. Το κλειδί του Σολ χρησιμοποιείται για να αναπαραστήσει νότες με υψηλότερο τονικό ύψος (ψιλή φωνή), ενώ το κλειδί του Φα, γνωστό και ως κλειδί του Μπάσου, χρησιμοποιείται από όργανα με χαμηλότερο τονικό ύψος (βαθιά φωνή)[14].

Στην κιθάρα, οι νότες γράφονται αποκλειστικά στο κλειδί του Σολ. Στο πιάνο, ωστόσο, χρησιμοποιούνται συνήθως και τα δύο κλειδιά, με τις νότες να απεικονίζονται σε δύο πεντάγραμμα: το πάνω για το δεξί χέρι και το κάτω για το αριστερό. Το κλειδί του Φα τοποθετείται στο κάτω πεντάγραμμα, καθώς παίζονται πιο μπάσες νότες, ενώ στο πάνω πεντάγραμμα χρησιμοποιείται το κλειδί του Σολ.



Εικόνα 2.3: Οι νότες στο πεντάγραμμα με Αγγλική και Ελληνική ονομασία στο κλειδί του Σολ[15].



Εικόνα 2.4: Οι νότες στο πεντάγραμμα με Αγγλική και Ελληνική ονομασία στο κλειδί του Φα[15].

2.4 Ρυθμός

Οι νότες για να σχηματίσουν μια μελωδία πέρα από το ύψος πρέπει να περιλαμβάνουν πληροφορίες για τη διάρκειά τους. Έτσι, κατά τη σημειογραφία των νοτών, εκτός από το ύψος είναι απαραίτητο να ορίζεται και η διάρκεια της κάθε νότας[15].

Η χρονική οργάνωση των μουσικών ήχων αποκαλείται ρυθμός και είναι ο τρόπος με τον οποίο οι άτονοι χτύποι ομαδοποιούνται σε σχέση με έναν τονισμένο. Ο ρυθμός διακρίνεται από τον παλμό, το μέτρο και τους χτύπους ανά δευτερόλεπτο[16].

2.4.1 Παλμοί Ανά Λεπτό (BPM)

Οι Παλμοί Ανά Λεπτό (Beats Per Minute), γνωστοί και ως τέμπο (Tempo), καθορίζουν την ταχύτητα ενός μουσικού κομματιού και κατέχουν ουσιαστικό ρόλο στην εκτέλεσή του. Το τέμπο ορίζεται από τον συνθέτη με δύο τρόπους: είτε με δήλωση της ταχύτητας του μετρονόμου, που δηλώνεται με έναν αριθμό, είτε με ονομαστικές οδηγίες που δίνονται από τον συνθέτη[17]. Μερικές από τις πιο συνήθεις οδηγίες αυτές είναι καταγεγραμμένες στην Ιταλική γλώσσα και ονομάζονται[14]:

1. Adagio → Αργή ταχύτητα → 66-77 BPM
2. Andante → Αργή προς μέτρια ταχύτητα → 77-108 BPM
3. Moderato → Μέτρια ταχύτητα → 108-120 BPM
4. Allegro → Γρήγορη ταχύτητα → 120- 168 BPM
5. Presto → Πολύ γρήγορη ταχύτητα → > 168 BPM

2.4.2 Μέτρο

Το μέτρο είναι ο διαχωρισμός του πενταγράμμου σε μικρότερα μέρη, καθένα από τα οποία έχει ίση χρονική διάρκεια. Το μέτρο συμβολίζεται με μία κάθετη γραμμή, ενώ το τέλος ενός κομματιού σημειώνεται με διπλή γραμμή.

Στην αρχή κάθε πενταγράμμου, δίπλα στο κλειδί, υπάρχει ένας κλασματικός αριθμός που καθορίζει τη χρονική διάρκεια του κάθε μέτρου, εκτός αν δοθεί διαφορετική ένδειξη κατά τη διάρκεια του κομματιού. Ο αριθμητής του κλάσματος δηλώνει το άθροισμα των αξιών των νοτών του μέτρου, ενώ ο παρονομαστής προσδιορίζει την αξία κάθε χρόνου. Οι πιο συχνές ενδείξεις μέτρων είναι 4/4 (που συμβολίζεται και ως C), 3/4 και 6/8 [14].







Μερικές φορές, στην αρχή του κομματιού υπάρχει ένα μέτρο που δεν αντιστοιχεί στην πλήρη χρονική αξία που ορίζεται από το μέτρο. Αυτό το μέτρο αποτελεί εξαίρεση και ονομάζεται ελλιπές μέτρο.






Εικόνα 2.5: Παραδείγματα ενδείξεων μέτρου[14].

2.4.3 Αξίες Νοτών

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αντιληπτή η διάρκεια κάθε νότας ονομάζεται αξία της νότας. Ο κάθε φθόγγος μπορεί να έχει την εξής αξία:

- Αξία Ολόκληρου: Συμβολίζεται με  και διαρκεί τέσσερις χρόνους, δηλαδή τέσσερις ισόποσες χρονικές υποδιαιρέσεις.
- Αξία μισού: Συμβολίζεται με  και διαρκεί δύο χρόνους, δηλαδή δύο ισόποσες χρονικές υποδιαιρέσεις.
- Αξία τέταρτου: Συμβολίζεται με  και διαρκεί έναν χρόνο. Αποτελεί συνήθως τον παρονομαστή του μέτρου και ορίζει τη βάση υπολογισμού των χρονικών αξιών.
- Αξία όγδοου: Συμβολίζεται με  και διαρκεί μισό χρόνο. Δύο όγδοα αποτελούν ένα χρόνο.
- Αξία δέκατου έκτου: Συμβολίζεται με  και διαρκεί ένα τέταρτο του χρόνου. Τέσσερα δέκατα έκτα αποτελούν έναν χρόνο.
- Αξία τριακοστού δεύτερου: Συμβολίζεται με  και διαρκεί ένα όγδοο του χρόνου. Οκτώ τριακοστά δεύτερα αποτελούν έναν χρόνο[14].

Πέρα από τις αξίες που μόλις αναφέρθηκαν υπάρχει και ένα σημείο στίξης το οποίο παρατείνει τη διάρκεια της νότας. Πιο συγκεκριμένα, οι νότες που έχουν στα δεξιά τους μία τελεία ονομάζονται παρεστιγμένες και έχουν διάρκεια το άθροισμα της αξίας της κανονικής νότας και της μισής αξίας της.

Για παράδειγμα, ένα τέταρτο παρεστιγμένο συμβολίζεται με  και έχει διάρκεια:  +  δηλαδή ενάμιση χρόνο[14].

2.4.4 Παύσεις

Οι παύσεις αναπαριστούν τον χρόνο που ο ήχος διακόπτεται. Με άλλα λόγια μετρούν την ησυχία στο κομμάτι. Έχουν αντίστοιχες αξίες με τις νότες και συμβολίζονται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα[15]:

Παύση	Ονομασία	Αξία
	ολοκλήρου	
	δευτέρου	
	τετάρτου	
	ογδού	
	δεκάτου έκτου	
	τριακοστού δευτέρου	
	εξηκοστού τετάρτου	

Εικόνα 2.6: Πίνακας αντιστοίχισης παύσεων με τις αντίστοιχες αξίες νοτών[15].

2.5 Κλίμακες

Κλίμακα (scala) είναι η διάταξη των φθόγγων σε συνεχή ανιούσα ή κατιούσα σειρά και χρησιμοποιούνται ως βασικό υλικό για τη δημιουργία μουσικών συνθέσεων[15]. Οι κλίμακες είναι μία διαδοχή νοτών που καθορίζουν το ύφος και την τονικότητα του κομματιού. Στην Ευρωπαϊκή μουσική οι σημαντικότερες κλίμακες είναι οι μείζονες και οι ελάσσονες. Οι βασικότερες κλίμακες είναι 24 και χωρίζονται σε 12 μείζονες και 12 ελάσσονες [18].

2.5.1 Αλλοιώσεις

Υπάρχουν τρεις αλλοιώσεις στη μουσική: η δίεση, η ύφεση και η αναίρεση, οι οποίες σημειώνονται μπροστά από τη νότα. Οι αλλοιώσεις συνήθως καταγράφονται στην αρχή του κομματιού, αλλά συχνά συναντώνται και μέσα στο μέτρο. Όταν εφαρμόζονται μέσα στο μέτρο ονομάζονται τυχαία σημεία αλλοίωσης[15].

- Η δίεση συμβολίζεται με \sharp και υψώνει την νότα στην ακριβώς γειτονική της με μεγαλύτερο ύψος. Για παράδειγμα, η νότα Σολ θα γίνει Σολ \sharp ενώ η νότα Μι θα γίνει Μι \sharp , που αντιστοιχεί με τη νότα Φα.
- Η ύφεση συμβολίζεται με \flat και χαμηλώνει την νότα στην ακριβώς γειτονική της με χαμηλότερο ύψος. Για παράδειγμα, η νότα Ρε θα γίνει Ρε \flat , ενώ η νότα Ντο θα γίνει Ντο \flat , που αντιστοιχεί με τη νότα Σι.
- Η αναίρεση συμβολίζεται με \natural και αναιρεί όποια αλλοίωση είχε εφαρμοστεί στο ίδιο μέτρο στην νότα. Για παράδειγμα, αν μία νότα ήταν Φα \sharp αν χρησιμοποιηθεί αναίρεση στην ίδια νότα, αναιρεί την δίεση που εφαρμόστηκε προηγουμένως[15].

2.5.2 Οπλισμός

Στην αρχή κάθε κομματιού και δίπλα στον συμβολισμό του μέτρου μπορεί να υπάρχουν διέσεις και υφέσεις. Αυτή η ομάδα αλλοιώσεων ονομάζεται οπλισμός του κομματιού και μας επιτρέπει να αναγνωρίζουμε την τονικότητα του κομματιού[18].

Η τονικότητα ενός κομματιού είναι το τονικό κέντρο μιας μουσικής σύνθεσης, από το οποίο έλκονται και στο οποίο συγκλίνουν οι υπόλοιποι φθόγγοι και ορίζει το τελικό σημείο ευστάθειας και πληρότητας. Ένας φθόγγος ονομάζεται τονική γιατί στο αρμονικό περιβάλλον μέσα στο οποίο εντάσσεται οι σχέσεις των μουσικών φθόγων οργανώνονται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να αναδεικνύουν το συγκεκριμένο φθόγγο ως κέντρο της σύνθεσης[15].

Η τονικότητα του τραγουδιού εξαρτάται από τον οπλισμό και μπορεί να βρεθεί με τον κύκλο των πεμπτών, όπως καταγράφεται στην εικόνα 2.8.

Η σειρά των διέσεων και υφέσεων είναι προκαθορισμένη και είναι η εξής:

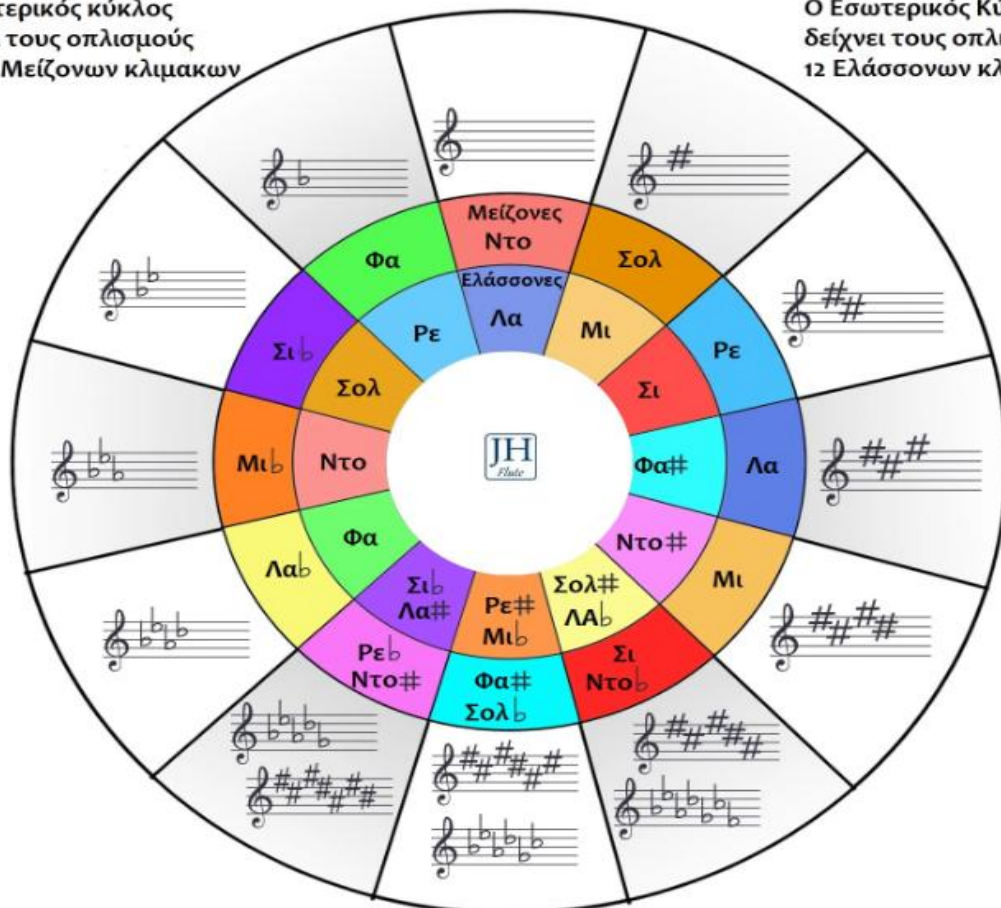


Εικόνα 2.7: Ο σπλισμός των διέσεων και υφέσεων στο κλειδί του Σολ και Φα[14].

Ο Κύκλος των Πέμπτων

Ο Εξωτερικός κύκλος δείχνει τους σπλισμούς των 12 Μείζονων κλιμακων

Ο Εσωτερικός Κύκλος δείχνει τους σπλισμούς των 12 Ελάσσονων κλιμάκων



Εικόνα 2.8: Ο κύκλος των πεμπτών.

2.6 Παράδειγμα Παρτιτούρας

**He's Got the Whole World
in His Hands**
Trad.

Χρονική ένδειξη μέτρου Η συνολική αξία ενός μέτρου διαρκεί 4 χρόνους

Κλειδιά του Σολ και Φα Ένδειξη τέλους πρώτου μέτρου

Παύσεις

Ένδειξη τέλους και επανάληψης

Εικόνα 2.9: Παρτιτούρα πιάνου.

Αρχικά, παρατηρούμε τα κλειδιά του Σολ και του Φα, τα οποία υποδηλώνουν ότι πρόκειται για παρτιτούρα πιάνου. Στη συνέχεια, εξετάζουμε τη χρονική ένδειξη του μέτρου, που είναι 4/4, κάτι που σημαίνει ότι κάθε μέτρο περιέχει τέσσερις χρόνους. Ωστόσο, το πρώτο μέτρο αποτελεί εξαίρεση σε αυτό τον κανόνα, καθώς είναι ελλιπές και περιλαμβάνει μόνο ενάμιση χρόνο, με τους υπόλοιπους δύο χρόνους να συμπληρώνονται στο τελευταίο μέτρο, διατηρώντας έτσι τη συμμετρία του κομματιού.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι δίπλα στην ένδειξη μέτρου δεν υπάρχουν αλλοιώσεις, πράγμα που σημαίνει ότι η τονικότητα του κομματιού είναι πιθανό να είναι είτε Ντο Μείζονα είτε Λα Ελάσσονα. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η μελωδική γραμμή βρίσκεται συνήθως στο κλειδί του Σολ, ενώ το αριστερό χέρι παίζει λίγες νότες ως συνοδεία. Στο τέλος του κομματιού υπάρχει η διπλή γραμμή που σηματοδοτεί την ολοκλήρωσή του, καθώς και διπλές τελείες που υποδεικνύουν να παιχτεί το κομμάτι άλλη μία φορά από την αρχή, ως επανάληψη.

Έτσι, έχοντας δει τα βασικότερα στοιχεία της θεωρίας της μουσικής, μπορούμε να προχωρήσουμε σε απλή ανάλυση κομματιών αρχάριου επιπέδου που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

Κεφάλαιο 3ο: Τα Μαθηματικά της Μουσικής

3.1 Εισαγωγή

Πολλές φορές συναντάμε την έκφραση "η μουσική είναι μαθηματικά". Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο τα μαθηματικά συνδέονται με τον ήχο και τη μουσική. Αρχικά, θα γίνει αναφορά στο μαθηματικό πρόβλημα του κουρδίσματος των οργάνων και η περαιτέρω περιγραφή δύο συστημάτων κουρδίσματος: του Πυθαγόρειου και του συγκερασμένου. Επιπλέον, θα αναλυθούν οι αρμονικές του ήχου, η θεμελιώδης συχνότητα, και η σειρά των αρμονικών.

3.2 Το Μαθηματικό Πρόβλημα Κουρδίσματος

Μελετώντας τις νότες του Δυτικοευρωπαϊκού μουσικού συστήματος, θα μπορούσε να αναρωτηθεί κανείς γιατί οι νότες είναι δώδεκα και γιατί έχουν τις συγκεκριμένες συχνότητες. Για παράδειγμα πώς έχει καθιερωθεί η συχνότητα της Λα στην τέταρτη οκτάβα να είναι 440 Hz ενώ της Σι στην αντίστοιχη οκτάβα να είναι 493.883 Hz; Αυτές οι απορίες απαντώνται καλύτερα αν μελετήσουμε το σύστημα κουρδίσματος που δημιούργησε ο Πυθαγόρας και το συγκερασμένο σύστημα που χρησιμοποιείται σήμερα[19].

3.2.1 Το Πυθαγόρειο σύστημα κουρδίσματος (Pythagorean tuning)

Ο Πυθαγόρας υποστήριζε ότι τα πάντα στον κόσμο μπορούν να εξηγηθούν μέσω των μαθηματικών. Ήταν ο πρώτος που έθεσε τις βάσεις της επιστήμης της μουσικής, αναπτύσσοντας μια επιστημονικά θεμελιωμένη θεωρία για τη μουσική. Επιπρόσθετα, ανακάλυψε τη σχέση μεταξύ του μήκους των χορδών και του ύψους του ήχου που παράγουν και μέσω μαθηματικών υπολογισμών καθόρισε τις αριθμητικές αναλογίες των διαστημάτων μεταξύ των νοτών και της αρμονίας του ήχου[20].

Ο Πυθαγόρας, μέσα από πειραματισμούς σε έγχορδα όργανα, παρατήρησε ότι ο αρμονικός συνδυασμός δύο νοτών προκύπτει από αναλογίες μαθηματικών πράξεων. Συμπέρανε ότι όσο πιο απλή είναι η αναλογία, τόσο πιο αρμονικός είναι ο ήχος. Για παράδειγμα, οι νότες που απέχουν μία οκτάβα, όπως η A4 και η A5, έχουν αναλογία 2:1— μια πράξη τόσο απλή που οι επιστήμονες θεωρούν αυτές τις νότες ίδιες. Αντίθετα, οι νότες που απέχουν διάστημα εβδόμης, δηλαδή με επτά νότες διαφορά, έχουν αναλογία 243:128, κάτι που καθιστά τον συνδυασμό τους λιγότερο αρμονικό[19].

Οι μαθηματικές αναλογίες του συνδυασμού των νοτών ίδιας οκτάβας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Scale Degree	Interval	Ratio
1	Uni.	1
2	M2	9/8
3	M3	81/64
4	P4	4/3
5	P5	3/2
6	M6	27/16
7	M7	243/128
8 = 1	Oct.	2/1

Εικόνα 3.1: Οι αναλογίες διαστημάτων των νοτών[19].

Για παράδειγμα, για να βρούμε το διάστημα τετάρτης, δηλαδή την τέταρτη νότα που ακολουθεί μια νότα των 300 Hz, αρκεί να πολλαπλασιάσουμε την συχνότητα αυτή με $4/3$, όπως φαίνεται στον πίνακα της εικόνας 3.1. Πιο συγκεκριμένα το αποτέλεσμα προκύπτει από την πράξη: $300 * 4 / 3 = 400$ Hz.

Στο Πυθαγόρειο κούρδισμα, οι νότες της οκτάβας προκύπτουν από τον διαδοχικό πολλαπλασιασμό ή διαίρεση ενός αρχικού τόνου με το $3/2$, δηλαδή με μια τέλεια πέμπτη. Μετά τη στοίβαξη δώδεκα διαδοχικών τέλειων πεμπτών και την τοποθέτησή τους στην ίδια οκτάβα, σχηματίζεται μια κλίμακα. Καθώς οι νότες αυτές μετά την στοίβαξή τους σε μία οκτάβα επαναλαμβάνονται, συμπεράνε πως ο ιδανικός αριθμός νοτών μιας κλίμακας είναι δώδεκα.

Ωστόσο, αυτό το σύστημα αποδείχτηκε προβληματικό διότι δημιουργείται απόκλιση όταν προσπαθούμε να βρούμε την νότα που βρίσκεται ενδιάμεσα από δύο νότες. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να βρούμε τη συχνότητα της νότας ενδιάμεσα στην Ντο και στην Ρε μπορούμε είτε να ξεκινήσουμε από την Ντο και να ανεβούμε ένα ημιτόνιο (δηλαδή, να προκύψει η νότα Ντο δίεση), είτε να ξεκινήσουμε από τη Ρε και να κατέβουμε ένα ημιτόνιο (δηλαδή να προκύψει η νότα Ρε ύφεση), καθώς όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία της μουσικής αυτές οι δύο νότες είναι οι ίδιες.

Στο Πυθαγόρειο σύστημα κουρδίσματος θα οδηγηθούμε σε διαφορετικές συχνότητες, δηλαδή θα προκύψει απόκλιση, γνωστή και ως "Πυθαγόρειο κόμμα", γεγονός που οδήγησε τους επιστήμονες στην αναζήτηση ενός διαφορετικού τρόπου κατανομής των νοτών[21].

3.2.2 Το συγκερασμένο σύστημα (Equal Temperaments)

Στη Δυτικοευρωπαϊκή μουσική, το σύστημα κατανομής των νοτών που επικρατεί σήμερα ονομάζεται συγκερασμένο σύστημα, συχνά συναντάται ως 12 ET, και λύνει το πρόβλημα του Πυθαγόρειου κόμματος. Στα ελληνικά, υπονοείται ο ίσος συγκερασμός, δηλαδή η διαίρεση της οκτάβας σε δώδεκα ίσα διαστήματα, σε αντίθεση με άλλα κουρδίσματα[22].

Αν λάβουμε υπόψη την ανακάλυψη του Πυθαγόρα, στο συγκερασμένο σύστημα κουρδίσματος όλες οι νότες είναι "εκτός τόνου". Αυτό συμβαίνει επειδή το συγκερασμένο σύστημα κουρδίσματος αποτελεί ουσιαστικά έναν συμβιβασμό για να διορθωθεί το πρόβλημα του Πυθαγόρειου κόμματος. Στην πραγματικότητα, δεν διορθώνει το πρόβλημα, αλλά καταργεί τις μαθηματικές αναλογίες του Πυθαγόρα, αντικαθιστώντας τις με ίσα διαστήματα μεταξύ κάθε νότας[23].

Το συγκερασμένο σύστημα διαιρεί την οκτάβα σε δώδεκα ίσα μέρη, των οποίων η αναλογία είναι ίση σε μια λογαριθμική κλίμακα, με λόγο ίσο με τη 12η ρίζα του 2, ($2^{1/12} \approx 1,05946$). Με άλλα λόγια, κάθε διαδοχικό ημιτόνιο σε μια οκτάβα έχει συχνότητα που πολλαπλασιάζεται με αυτόν τον λόγο, ώστε να επιτευχθεί η ισοκατανομή των δώδεκα ημιτονίων μέσα στην οκτάβα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από τη πράξη είναι το 1/12 της οκτάβας και ονομάζεται ημιτόνιο (μισός τόνος).

Στη σύγχρονη μουσική οι νότες καθορίζονται σε σχέση με ένα πρότυπο τονικό ύψος, αυτό της A4 στα 440 Hz, που σημαίνει ότι όλες οι υπόλοιπες νότες του οργάνου είναι κάποιο πολλαπλάσιο της νότας αυτής[24].

	tone	semitone
Equal temperament	$2^{1/12} = 1.122$	$2^{2/12} = 1.0595$
Pythagorean	$9/8 = 1.125$	$256/243 = 1.0535$

Εικόνα 3.2: Η απόκλιση που προκύπτει ανάμεσα στα δύο συστήματα κουρδίσματος[22].

	A	B	C#	D	E	F#	G#	A
Equal temperament	220.0	246.9	277.2	293.7	329.6	370.0	415.3	440.0
Pythagorean scale	220.0	247.5	278.4	293.3	330.0	371.3	417.7	440.0

Εικόνα 3.3: Οι συχνότητες των νοτών μιας οκτάβας ανάμεσα στα δύο συστήματα κουρδίσματος[22].

3.3 Αρμονικές (Overtones)

Όταν ένα δονούμενο αντικείμενο, όπως μια χορδή, τεθεί σε κίνηση, παράγεται μια συχνότητα που ονομάζεται θεμελιώδης από την οποία καθορίζεται ο τόνος, αλλά ταυτόχρονα παράγονται και άλλες συχνότητες με μικρότερη ένταση που ονομάζονται αρμονικές. Οι αρμονικές (ή υπέρτοννοι) που δημιουργούνται μπορούν να αναπαρασταθούν σε μια διατεταγμένη σειρά, η οποία ονομάζεται αρμονική σειρά. Αυτή η σειρά αποτελείται από ένα σύνολο συχνοτήτων που είναι διαδοχικά ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας[22].

3.3.1 Θεμελιώδης Συχνότητα (Fundamental Frequency)

Η θεμελιώδης συχνότητα, συχνά αναφέρεται απλώς ως η θεμελιώδης, είναι η χαμηλότερη συχνότητα μιας περιοδικής κυματομορφής. Στη μουσική η θεμελιώδης συχνότητα καθορίζει τον τόνο (ή ύψος) της νότας και αποτελεί την πρώτη στην αρμονική σειρά. Συχνά, συναντάται και ως f_0 που υποδηλώνει την πρώτη συχνότητα, υποδεικνύοντας τη χαμηλότερη συχνότητα της κλίμακας.

Εφόσον η θεμελιώδης συχνότητα είναι και η ισχυρότερη, οι αρμονικές της δεν διαχωρίζονται από το ανθρώπινο αυτί, αλλά αναμειγνύονται με την θεμελιώδη συχνότητα σχηματίζοντας έναν ενιαίο τόνο[25].

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι θεμελιώδεις συχνότητες των νοτών του συγκερασμένου συστήματος:

	Octave 0	Octave 1	Octave 2	Octave 3	Octave 4	Octave 5	Octave 6	Octave 7	Octave 8	Octave 9	Octave 10
C	16.35	32.70	65.41	130.81	261.63	523.25	1046.50	2093.00	4186.01	8372.02	16744.04
C#	17.32	34.65	69.30	138.59	277.18	554.37	1108.73	2217.46	4434.92	8869.84	17739.69
D	18.35	36.71	73.42	146.83	293.66	587.33	1174.66	2349.32	4698.64	9397.27	18794.55
D#	19.45	38.89	77.78	155.56	311.13	622.25	1244.51	2489.02	4978.03	9956.06	19912.13
E	20.60	41.20	82.41	164.81	329.63	659.26	1318.51	2637.02	5274.04	10548.08	
F	21.83	43.65	87.31	174.61	349.23	698.46	1396.91	2793.83	5587.65	11175.30	
F#	23.12	46.25	92.50	185.00	369.99	739.99	1479.98	2959.96	5919.91	11839.82	
G	24.50	49.00	98.00	196.00	392.00	783.99	1567.98	3135.96	6271.93	12543.86	
G#	25.96	51.91	103.83	207.65	415.30	830.61	1661.22	3322.44	6644.88	13289.75	
A	27.50	55.00	110.00	220.00	440.00	880.00	1760.00	3520.00	7040.00	14080.00	
A#	29.14	58.27	116.54	233.08	466.16	932.33	1864.66	3729.31	7458.62	14917.24	
B	30.87	61.74	123.47	246.94	493.88	987.77	1975.53	3951.07	7902.13	15804.26	

Εικόνα 3.4: Οι θεμελιώδεις συχνότητες των νοτών στο συγκερασμένο σύστημα.

3.3.2 Η Αρμονική Σειρά (The harmonic series)

Μια αρμονική σειρά περιλαμβάνει τους διάφορους τόνους που παράγονται ταυτόχρονα από ένα δονούμενο σώμα. Αυτό το φαινόμενο προκύπτει καθώς το σώμα, πέρα από τη δόνησή του ως μία ενιαία μονάδα, δονείται και τμηματικά. Μια χορδή, για παράδειγμα, δονείται σε όλο το μήκος της καθώς και σε μισά, τρίτα, τέταρτα κ.ο.κ.

Η αρμονική σειρά συνεχίζει επ' άπειρον, αλλά η ανάλυσή της πέρα από τα 20.000 Hz δεν έχει πρακτική σημασία, καθώς αυτό είναι το ανώτατο όριο της ανθρώπινης ακοής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χροιά κάθε οργάνου, είναι το αποτέλεσμα της ανθρώπινης αντίληψης του αυτιού στην ένταση των νοτών της σειράς αρμονικών κάθε οργάνου[25].

Οι αρμονικές κάθε νότας υπολογίζονται από τον εξής μαθηματικό τύπο:

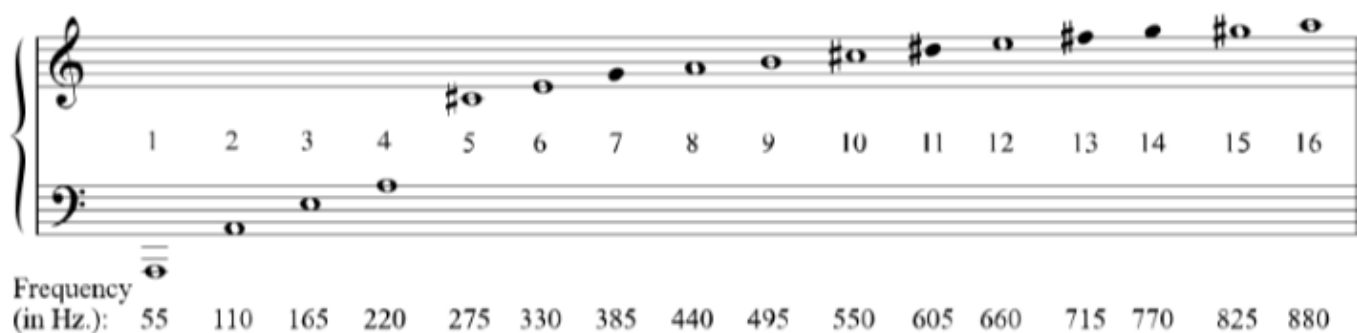
$$fn = n \times f_0$$

- Όπου f_n η συχνότητα της n -οστής αρμονικής,
- n ένας θετικός ακέραιος αριθμός
- και f_0 η θεμελιώδης συχνότητα.

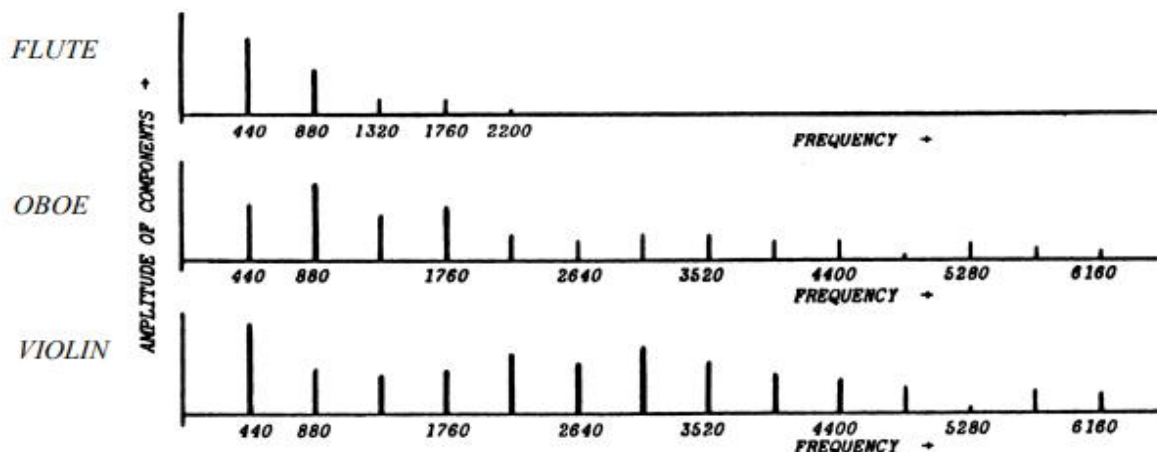
Για παράδειγμα οι πρώτες πέντε αρμονικές της νότας Λα στην πρώτη οκτάβα είναι οι εξής:

- 1) Η πρώτη αρμονική, δηλαδή η θεμελιώδης, είναι 55 Hz.
- 2) Η δεύτερη αρμονική, είναι μία οκτάβα πάνω από τη θεμελιώδη, δηλαδή 110 Hz.
- 3) Η τρίτη αρμονική, είναι τρεις φορές υψηλότερη από την θεμελιώδη συχνότητα και ακούγεται σαν μία τέλεια πέμπτη από την δεύτερη αρμονική. Υπολογίζεται στα 165 Hz.
- 4) Η τέταρτη, αρμονική είναι 4 φορές υψηλότερη από τη θεμελιώδη και απέχει ένα διάστημα τετάρτης από την τρίτη αρμονική. Υπολογίζεται στα 220 Hz.
- 5) Η πέμπτη αρμονική είναι 5 φορές υψηλότερη από τη θεμελιώδη και απέχει διάστημα τρίτης από την τέταρτη αρμονική. Υπολογίζεται στα 275 Hz.

Με αντίστοιχο τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε όλες τις αρμονικές της νότας[26].



Εικόνα 3.5: Οι πρώτες 16 αρμονικές της Λα στην πρώτη οκτάβα (A1)[25].



Εικόνα 3.6: Η ένταση των αρμονικών της νότας C4 στο φλάουτο, όμποε και βιολί[27].

Κεφάλαιο 4ο: Ο Ήχος στην Τεχνολογία

4.1 Εισαγωγή

Στην εποχή της σύγχρονης τεχνολογίας, ο ήχος έχει αποκτήσει μια καθοριστική θέση στην καθημερινή μας ζωή. Το κεφάλαιο αυτό εστιάζει στη μετάβαση από τον αναλογικό στον ψηφιακό ήχο, καθώς και στις τεχνολογίες που έχουν επιτρέψει αυτή την εξέλιξη. Αρχικά, εξετάζεται ο αναλογικός ήχος και στη συνέχεια, εισάγεται η έννοια του ψηφιακού ήχου, εξηγώντας βασικές έννοιες όπως η δειγματοληψία, το φαινόμενο της αναδίπλωσης και η διαδικασία μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Τέλος, παρουσιάζεται το πρωτόκολλο MIDI (Musical Instrument Digital Interface) και η αντιστοίχιση των συχνοτήτων και νοτών που αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια με τις νότες MIDI.

4.2 Αναλογικός Ήχος

Ο όρος αναλογικός ήχος αναφέρεται στον ήχο που αναπαρίσταται με συνεχείς κυματομορφές σε μορφή ανάλογη με τις φυσικές διακυμάνσεις του. Για παράδειγμα, αναλογικό σήμα αποτελεί η αναπαράσταση της ταχύτητας του διαφράγματος ενός μικροφώνου. Ένα τέτοιο σήμα είναι δισδιάστατο, εφόσον μεταφέρει μία τάση η οποία μεταβάλλεται σε σχέση με τον χρόνο [28].

Σχεδόν όλα τα σήματα του πραγματικού κόσμου, εκτός από κάποιες εξαιρέσεις όπως εκείνα που προκύπτουν από την καταμέτρηση αντικειμένων, είναι αναλογικά. Τα αναλογικά σήματα χαρακτηρίζονται ως συνεχούς ρεύματος και ως εναλλασσόμενου ρεύματος. Επιπρόσθετα, εφόσον αναπαρίστανται από κυματομορφές, χαρακτηρίζονται από την συχνότητα, την φάση και το ύψος τους. Τέλος, χρησιμοποιούνται για την ηχογράφηση και αναπαραγωγή του ήχου, όπως τα βινύλια ή για την μετάδοση ήχου, όπως τα ραδιόφωνα[29].

Πλεονέκτημα των αναλογικών σημάτων είναι ότι παραμένουν πιστά στον αυθεντικό ήχο και είναι απλά στην επεξεργασία τους από απλά ηλεκτρονικά συστήματα. Παρόλα αυτά, παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα όπως το ότι είναι επιρρεπή στον θόρυβο και κατά συνέπεια στην μείωση ποιότητας του ήχου. Αυτά τα προβλήματα έρχονται να λύσουν τα ψηφιακά σήματα, όπως θα δούμε στη συνέχεια.



Εικόνα 4.1: Αναλογικό Μαγνητόφωνο[10].

4.3 Ψηφιακός Ήχος

Ο όρος ψηφιακός ήχος αναφέρεται στην ψηφιοποίηση του φυσικού ήχου και γενικότερα σε κάθε μετατροπή αναλογικής πληροφορίας σε ψηφιακά δεδομένα. Για να γίνει η ψηφιοποίηση του ήχου, θα πρέπει πρώτα να μετατραπεί σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο γίνεται από μετατροπείς γνωστούς ως αναλογικο-ψηφιακούς μετατροπείς ADC(Analog to Digital Converters). Η αντίστροφη διαδικασία γίνεται από τους αντίστοιχους ψηφιακο-αναλογικούς μετατροπείς DAC((Digital to Analog Converters). Τυπικά, η διαδικασία κωδικοποίησης του αναλογικού ήχου σε ψηφιακό ονομάζεται παλμοκωδική (Pulse Code Modulation, PCM)[6].

Η ψηφιοποίηση του ήχου προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα σε σχέση με τον αναλογικό ήχο:

1. Η ποιότητα και αναπαραγωγή του ήχου σε ένα ψηφιακό σύστημα είναι ανεξάρτητη από το φυσικό μέσο αναπαραγωγής και εξαρτάται αποκλειστικά από τις διαδικασίες μετατροπής του ήχου σε ψηφιακό, γεγονός που καθιστά τον ψηφιακό ήχο λιγότερο επιρρεπή στον θόρυβο.
2. Τα ψηφιακά συστήματα μπορούν να προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες τις οποίες στερούνται τα αναλογικά σήματα, όπως το χαμηλό κόστος παραγωγής και συντήρησης τους.

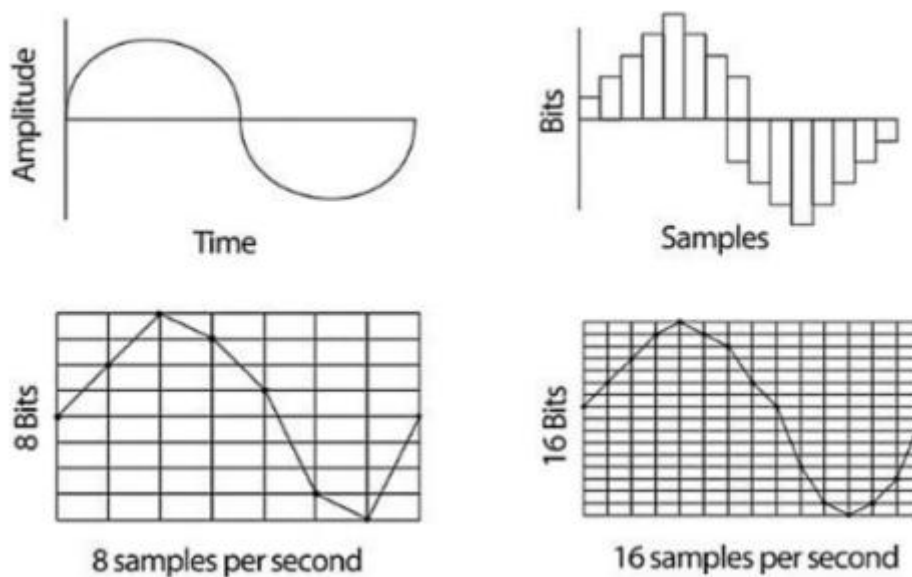
Ωστόσο πολλές φορές υστερεί σε σχέση με την φυσικότητα του ήχου που προσφέρει ο αναλογικός ήχος[28]. Η ψηφιοποίηση του ήχου αποτελείται από δύο στάδια: τη δειγματοληψία και την κβάντιση.

4.3.1 Δειγματοληψία (Sampling)

Η διαδικασία της δειγματοληψίας εξετάζει συγκεκριμένες τιμές ενός σήματος σε μία προκαθορισμένη και σταθερή χρονική τιμή. Όλες οι αλλαγές του αναλογικού σήματος ενδιάμεσα στις τιμές δειγματοληψίας αγνοούνται. Για αυτό, για να είναι επιτυχής η δειγματοληψία πρέπει πάντα να εφαρμόζεται το θεώρημα του Nyquist[30].

Το πλήθος των δειγμάτων που παίρνουμε ανά μονάδα χρόνου (δευτερόλεπτο) λέγεται συχνότητα δειγματοληψίας (sampling frequency) ή ρυθμός δειγματοληψίας (sampling rate), ενώ η χρονική απόσταση ανάμεσα σε δύο δείγματα λέγεται περίοδος δειγματοληψίας.

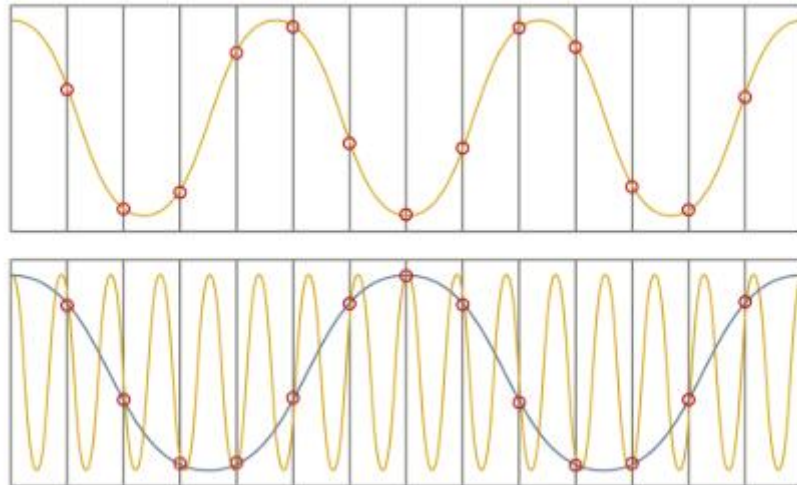
Σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist η σωστή αναπαραγωγή ενός σήματος συμβαίνει μόνο όταν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι τουλάχιστον διπλάσια της μέγιστης συχνότητας του σήματος. Ο ρυθμός δειγματοληψίας που χρησιμοποιείται στο πρότυπο CD είναι 44,1 KHz και είναι ο πιο συνήθης ρυθμός δειγματοληψίας[6].



Εικόνα 4.2: Παράδειγμα δειγματοληψίας[10].

4.3.2 Φαινόμενο Αναδίπλωσης (Aliasing)

Μπορεί κανείς να αναρωτηθεί τι θα προκύψει αν δεν τηρηθεί ο ρυθμός δειγματοληψίας σύμφωνα με το θεώρημα Nyquist; Το φαινόμενο αυτό λέγεται αναδίπλωση και το αποτέλεσμα της είναι ότι το σήμα που θα αναπαραχθεί μετά την δειγματοληψία δεν θα είναι πιστό στον αρχικό ήχο, αλλά θα έχει προκύψει σήμα πολύ μικρότερης συχνότητας. Στο παρακάτω παράδειγμα βλέπουμε να εφαρμόζεται ο ίδιος ρυθμός δειγματοληψίας σε 2 σήματα μεγάλης και μικρής συχνότητας[31].

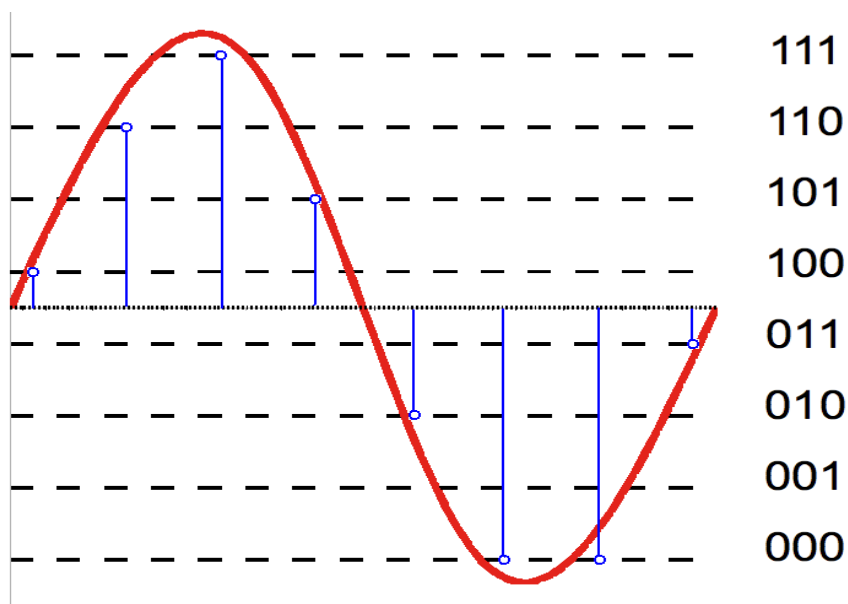


Εικόνα 4.3: Πάνω γράφημα: δειγματοληψία με θεώρημα Nyquist, κάτω γράφημα: φαινόμενο αναδίπλωσης[31].

4.3.3 Κβάντιση (Quantization)

Το δεύτερο στάδιο της ψηφιοποίησης, μετά τη δειγματοληψία, είναι αυτό της κβάντισης ή ποσοτικοποίησης (quantization). Σε αυτό το στάδιο τα δείγματα στρογγυλοποιούνται στην κοντινότερη τιμή ενός προκαθορισμένου συνόλου διακριτών τιμών. Ο αριθμός των σταθμών ποσοτικοποίησης εξαρτάται από τον αριθμό bits που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τα δείγματα. Για παράδειγμα, για ποιότητα ήχου CD χρησιμοποιούνται 16-bit πληροφορίας, δηλαδή οι διαθέσιμες στάθμες ποσοτικοποίησης είναι 65.536 ($2^{16} = 65.536$).

Μερικές φορές, λόγω του ότι οι στάθμες είναι πεπερασμένες προκύπτει σφάλμα κβαντισμού κατά την μετατροπή του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, το οποίο εμφανίζεται σαν θόρυβος[6].



Εικόνα 4.4: Παράδειγμα σταθμών κβάντισης 3ών bit σε σύγκριση με το αναλογικό σήμα.

4.4 MIDI

4.4.1 Ορισμός

Το MIDI είναι ακρωνύμιο για το “Musical Instrument Digital Interface” (ψηφιακή διεπαφή μουσικών οργάνων). Παρότι το MIDI έχει τεράστια επιρροή στον κόσμο της μουσικής, δεν χρησιμοποιείται για να περιγράψει μουσικούς ήχους. Αντιθέτως, αποτελεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας δεδομένων (data communications protocol) και μία συμφωνία μεταξύ κατασκευαστών μουσικού εξοπλισμού, υπολογιστών και λογισμικού που περιγράφει ένα μέσο για τα μουσικά συστήματα για την ανταλλαγή πληροφοριών και σημάτων ελέγχου.

Τα δεδομένα ενός MIDI αρχείου αναπαριστούν συμβολικά την πληροφορία με σκοπό την αποθήκευση και μετάδοσή της με πιο συμπαγή ή πιο εύκολα μεταδιδόμενη μορφή. Το MIDI λοιπόν, αναπαριστά συμβολικά τα βήματα που ακολουθούν οι ηλεκτρονικές συσκευές ώστε να παράγουν τους αντίστοιχους ήχους.

Με αυτό τον τρόπο, το πρωτόκολλο MIDI επιτρέπει να διαχειριστούμε και να αποθηκεύσουμε πολύπλοκες πληροφορίες ενός μουσικού αρχείου ως μεμονωμένα κομμάτια δεδομένων. Σημαντικό να αναφερθεί ότι ένα MIDI αρχείο δεν είναι αρχείο ήχου, άλλα ένα αρχείο πληροφοριών που περιέχει οδηγίες, όπως για παράδειγμα το τέμπο και η τονικότητα του κομματιού και καταλαμβάνει πολύ μικρότερο αποθηκευτικό χώρο σε ένα υπολογιστικό σύστημα[32].

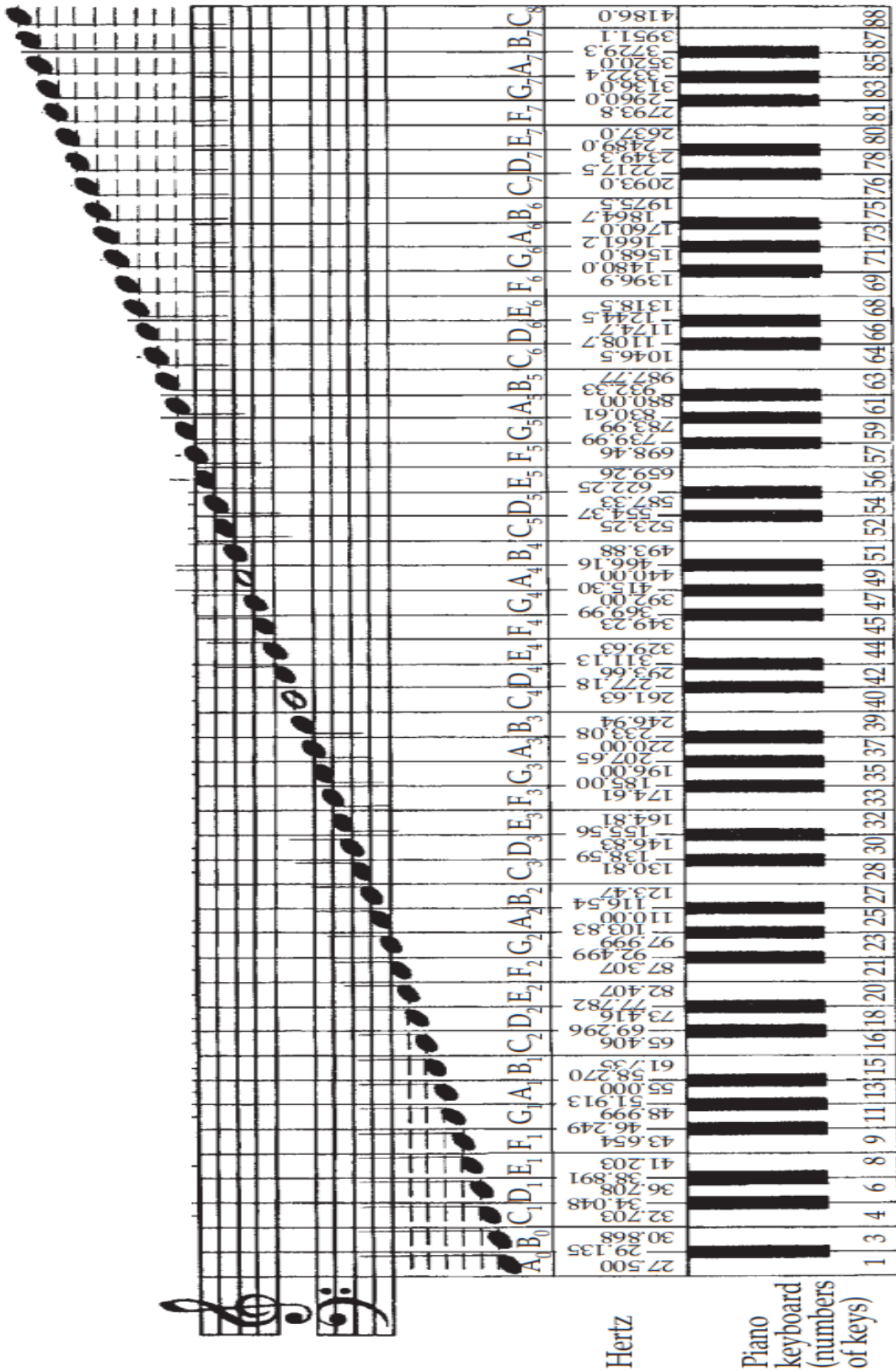
4.4.2 Νότες MIDI

Οι νότες MIDI είναι αριθμημένες από το 0 μέχρι το 127 και εκτείνονται από το C1 μέχρι το G9 και εκτείνονται πέρα από τις νότες του πιάνου. Δίπλα στις νότες με αγγλική ονομασία υπάρχει ένας αριθμός που δηλώνει την οκτάβα στο πιάνο ξεκινώντας από χαμηλό και καταλήγει σε υψηλό τονικό ύψος. Για παράδειγμα η νότα G1, αναπαριστά την νότα Σολ στο πιάνο στην δεύτερη οκτάβα και ο αριθμός MIDI που της αντιστοιχεί είναι το νούμερο 31.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζονται οι νότες στο πιάνο και φαίνονται οι συχνότητες, τα ονόματα των νοτών και οι συχνότητες κάθε νότας. Στην δεύτερη εικόνα καταγράφονται οι νότες στο πιάνο, οι συχνότητές τους και η σημειογραφία τους στο πεντάγραμμο, στο κλειδί του Φα για τις μπάσες νότες και στο κλειδί του Σολ για της υψηλότερες νότες.

MIDI number	Note name	Keyboard	Frequency Hz
21	A0		27.500
23	B0		30.868
24	C1		32.703
26	D1		36.708
28	E1		41.203
29	F1		43.654
31	G1		48.999
33	A1		55.000
35	B1		61.735
36	C2		65.406
38	D2		73.416
40	E2		82.407
41	F2		87.307
43	G2		97.999
45	A2		110.00
47	B2		123.47
48	C3		130.81
50	D3		146.83
52	E3		164.81
53	F3		174.61
55	G3		196.00
57	A3		220.00
59	B3		246.94
60	C4		261.63
62	D4		293.67
64	E4		329.63
65	F4		349.23
67	G4		392.00
69	A4		440.00
71	B4		493.88
72	C5		523.25
74	D5		587.33
76	E5		659.26
77	F5		698.46
79	G5		783.99
81	A5		880.00
83	B5		987.77
84	C6		1046.5
86	D6		1174.7
88	E6		1318.5
89	F6		1396.9
91	G6		1568.0
93	A6		1760.0
95	B6		1975.5
96	C7		2093.0
98	D7		2349.3
100	E7		2637.0
101	F7		2793.0
103	G7		3136.0
105	A7		3520.0
107	B7		3951.1
108	C8		4186.0

Εικόνα 4.5: Ο αριθμός των νοτών MIDI, η αγγλική ονομασία των νοτών και οι συχνότητές τους.



Εικόνα 4.6: Ο αριθμός, οι συχνότητες των νοτών και η σημειογραφία τους στο πεντάγραμμο[33].

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 5ο: Παρουσίαση του Θέματος

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, αναλύεται το θέμα που επιλέχθηκε και περιγράφονται τα επιμέρους στάδια που συνθέτουν το πειραματικό μέρος. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε σχετικές έρευνες και βιβλιογραφίες που αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης για την επιλογή του θέματος, το οποίο εστιάζει στην αναγνώριση μελωδίας. Τέλος, αναφέρονται επίσης σημαντικά βιβλία στον τομέα του Music Information Retrieval (MIR) που αποτέλεσαν πρότυπο κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της εργασίας.

5.2 Περιγραφή Εργασίας

Αυτή η διπλωματική εργασία έχει σκοπό της τη δημιουργία ενός κώδικα που θα επιτυγχάνει τρεις βασικούς στόχους: την εξαγωγή της μελωδίας από ένα αρχείο ήχου τύπου WAV, τη δημιουργία ενός MIDI αρχείου που αντιστοιχεί στη μελωδία που αναγνωρίστηκε, και τη μεταγραφή της μελωδίας αυτής σε παρτιτούρα.

Αρχικά, στο πρώτο και σημαντικότερο μέρος, στόχος είναι η εξαγωγή της μελωδίας από αρχεία ήχου WAV που περιέχουν ηχητικό υλικό από πιάνο ή κιθάρα. Η αναγνώριση της μελωδίας δεν γίνεται με τη χρήση μοντέλων μηχανικής μάθησης. Αντίθετα, προκύπτει μέσω της ανάλυσης του ηχητικού φάσματος, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια.

Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η ανάλυση του ήχου δεν είναι μια απλή διαδικασία, διότι οι συχνότητες συχνά αλληλοεπιδρούν και περιπλέκονται μεταξύ τους, ειδικά όταν παίζονται περισσότερες από μία νότες ταυτόχρονα. Επιπλέον, κάθε νότα περιέχει πολλές συχνότητες λόγω των αρμονικών της. Για αυτόν τον λόγο, η παρούσα εργασία περιορίζεται στην αναγνώριση μελωδίας που προέρχεται από μονοφωνικό ήχο ενός οργάνου, συγκεκριμένα κιθάρας ή πιάνου, ο οποίος μπορεί να περιλαμβάνει αρμονική συνοδεία μπάσου. Συμπερασματικά, ο κώδικας παρέχει αναγνώριση μελωδίας ομοφωνικού ήχου (μελωδία με συνοδεία που υποστηρίζει αρμονικά την κύρια μελωδία) και μπορεί να αναγνωρίσει έως και δύο νότες που παίζονται συγχρόνως.

Ωστόσο, οι τεχνικές ηχητικής ανάλυσης και επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιούνται έχουν τους περιορισμούς τους και εξαιτίας αυτών η ακρίβεια της εξαγωγής μελωδίας μειώνεται όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα του μουσικού κομματιού. Σε πιο σύνθετα κομμάτια ή όταν πρόκειται για πολυφωνικό ήχο (πολλές ανεξάρτητες μελωδικές γραμμές που ακούγονται ταυτόχρονα), η διαδικασία γίνεται εξαιρετικά πολύπλοκη και μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης, οι οποίες όμως δεν ακόμα έχουν ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια, καθώς αποτελεί έργο εξαιρετικά δύσκολο και η έρευνα σε αυτόν τον τομέα βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο.

Η επιλογή του πιάνου και της κιθάρας ως όργανα έγινε επειδή άλλα όργανα, όπως το βιολί, τα πνευστά ή η ανθρώπινη φωνή, χρησιμοποιούν πολλές τεχνικές (όπως το vibrato και το glissando) που καθιστούν την εξαγωγή της μελωδίας ακόμα πιο δύσκολη. Επίσης, όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια, η αναγνώριση των νοτών βασίζεται κυρίως στα onset (τα σημεία έναρξης των ήχων), τα

οποία ενεργοποιούνται μόνο σε όργανα όπου υπάρχει κάποιο είδος κρούσης, όπως η κρούση των σφυριών στις χορδές του πιάνου όταν πιέζονται τα πλήκτρα ή τη νύξη της χορδής με την πένα ή τα νύχια στην κιθάρα.

Στο δεύτερο μέρος, οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν από το πρώτο μέρος χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός MIDI αρχείου που περιέχει τις αναγνωρισμένες νότες, τη διάρκεια και την ένταση κάθε νότας.

Τέλος, στο τρίτο και τελευταίο μέρος, γίνεται η μεταγραφή μουσικής, όπου αποτυπώνονται σε παρτιτούρα οι πληροφορίες που έχουμε συλλέξει στο πρώτο μέρος έπειτα από αντίστοιχες μετατροπές. Ουσιαστικά πρόκειται για τη διαδικασία σημειογραφίας στην οποία γίνεται αυτόματα η μετατροπή του ήχου σε γραπτή μορφή.

5.3 Αντίστοιχες Έρευνες

5.3.1 Music Information Retrieval (MIR)

Το Music Information Retrieval (MIR) είναι η διεπιστημονική επιστήμη που ασχολείται με την ανάκτηση πληροφοριών από τη μουσική. Ο τομέας του MIR προαπαιτεί υπόβαθρο σε διάφορους κλάδους, όπως η μουσικολογία, η ακουστική, τα μαθηματικά, η επεξεργασία σήματος και η πληροφορική, γεγονός που καθόρισε την επιλογή των κεφαλαίων στο θεωρητικό κομμάτι της διπλωματικής αυτής εργασίας. Το MIR, ως ερευνητικό πεδίο, επικεντρώνεται στη δημιουργία εφαρμογών που διευκολύνουν τους χρήστες να εντοπίζουν μουσικά κομμάτια που παρουσιάζουν ομοιότητες, όπως στο είδος, τον ρυθμό, το ύφος ή σε άλλα χαρακτηριστικά της μουσικής. Μερικές από τις εφαρμογές που εντάσσονται στον κλάδο του MIR είναι η κατηγοριοποίηση μουσικής, η αναγνώριση οργάνων, ο διαχωρισμός των οργάνων σε ένα μουσικό κομμάτι, η αυτόματη μεταγραφή και η αυτόματη δημιουργία μουσικής, μεταξύ άλλων[34].

Κάποιοι οργανισμοί και ιστοσελίδες που έχουν προσφέρει ιδιαίτερα στην εξέλιξη του κλάδου είναι:

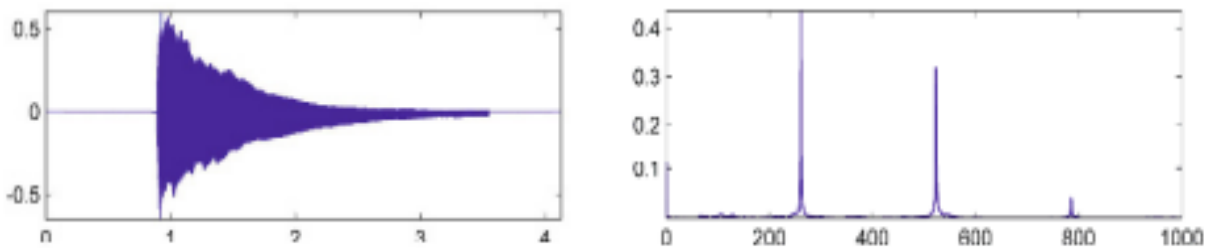
- Το International Society for Music Information Retrieval (ISMIR) – είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που αποσκοπεί στην ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων για την επεξεργασία, αναζήτηση, οργάνωση και πρόσβαση σε δεδομένα που σχετίζονται με τη μουσική. Το ISMIR ιδρύθηκε επίσημα το 2008, αλλά παραμένει ενεργό από το 2000, προσφέροντας έρευνες και ενθαρρύνοντας την ανταλλαγή ιδεών στον κλάδο του Music Information Retrieval (MIR). Κάθε χρόνο οργανώνει ένα από τα σημαντικότερα γεγονότα στην κοινότητα του MIR, το ετήσιο συνέδριο, όπου ερευνητές και επαγγελματίες του κλάδου συγκεντρώνονται για να παρουσιάσουν τα πιο πρόσφατα ευρήματά τους, να ανταλλάξουν ιδέες και να συζητήσουν τις εξελίξεις στον τομέα[35].
- Το MIREX (Music Information Retrieval Evaluation eXchange) – είναι μια ετήσια πρωτοβουλία αξιολόγησης, που έχει σχεδιαστεί για να αξιολογεί και να συγκρίνει αλγορίθμους και συστήματα που αναπτύσσονται στον τομέα του Music Information Retrieval (MIR). Οι κυριότερες δραστηριότητες του MIREX περιλαμβάνουν τους ετήσιους διαγωνισμούς και τις βάσεις δεδομένων που παρέχει για τη διεξαγωγή αυτών των διαγωνισμών. Με τη δημοσίευση των αποτελεσμάτων, συμβάλλει στην ανάδειξη των πιο αποτελεσματικών τεχνικών στον τομέα και προωθεί την περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη του MIR[36].

- Η επίσημη ιστοσελίδα του MIR – είναι μια πλούσια συλλογή εκπαιδευτικού υλικού στον κλάδο του Music Information Retrieval (MIR). Ο ιστότοπος αποτελεί πρότυπο για ερευνητές, επαγγελματίες και φοιτητές που ενδιαφέρονται για τον κλάδο, προσφέροντας ποικιλία εκπαιδευτικού υλικού, εργαλεία λογισμικού, κώδικα σε Python, σύνολα δεδομένων, και συνδέσμους προς άλλους σημαντικούς πόρους στον τομέα[37].

5.3.2 Βιβλία που χρησιμοποιήθηκαν

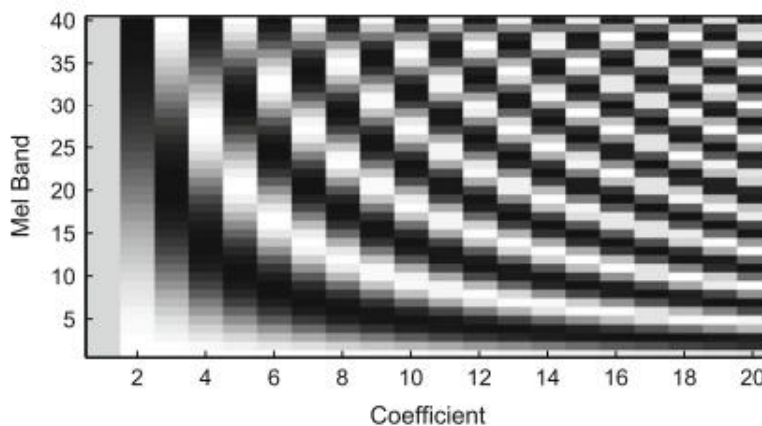
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και γενικότερα στον κλάδο του MIR, τα βιβλία που συνέβαλαν στην απόκτηση των απαραίτητων γνώσεων για την επίτευξη του στόχου είναι τα εξής:

- 1) Το βιβλίο με τίτλο **“Fundamentals of Music Processing”** του **Meinard Müller** αναλύει εις βάθος στοιχεία ακουστικής και ήχου, καθώς και τεχνικές επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία, όπως οι αλγόριθμοι Fast Fourier Transform (FFT) και Short-Time Fourier Transform (STFT). Περιλαμβάνει επίσης κεφάλαια όπως το 6ο, που αναφέρεται στο Tempo και Beat Tracking, και το Melody Extraction υποκεφάλαιο του 8ου κεφαλαίου, που αναλύει αλγορίθμους για την εξαγωγή μελωδίας[38].



Εικόνα 5.1: Η Fourier ανάλυση ενός σήματος μιας νότας C4 σε πιάνο[38].

- 2) Ένα ακόμη σημαντικό βιβλίο είναι το **“Music Similarity and Retrieval”** των **Peter Knees και Markus Schedl**. Στο 3ο κεφάλαιο, με τίτλο **“Audio Feature Extraction for Similarity Measurement”**, αναλύεται η έννοια των frames, samples και windows. Στο ίδιο κεφάλαιο αναφέρεται επίσης η ψυχοακουστική αντίληψη του ήχου από τον εγκέφαλο, καθώς και τα Mel-frequency cepstral coefficients (MFCCs)[39].



Εικόνα 5.2: Οι Ζώνες MFCCs[39].

- 3) Τέλος, στο βιβλίο με τίτλο “**Music Recommendation and discovery**” του **áOscar Celma**, όπου στο 3ο κεφάλαιο αναλύονται τα ηχητικά χαρακτηριστικά χαμηλού επιπέδου του ήχου (low-level timbre descriptors), όπως το amplitude envelope, energy και zero-crossing rate[40].

5.3.3 Έρευνες Πάνω στην Αναγνώριση Μελωδίας

Πηγή έμπνευσης για το θέμα της διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η έρευνα με τίτλο “**PITCH DETECTION BASED MONOPHONIC PIANO TRANSCRIPTION**” του **Qiaozhan Gao** που διεξήχθη το 2015. Στην έρευνα αυτή, επιδιώκεται η αναγνώριση μελωδίας από δύο ηχογραφήσεις μονοφωνικού πιάνου και η διαδικασία πραγματοποιείται σε τρία βήματα. Αρχικά, εντοπίζονται τα σημεία έναρξης ήχου (onset) και σε αυτά τα σημεία χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος YIN για την αναγνώριση της μελωδίας. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος για την αναγνώριση των χτύπων ανά δευτερόλεπτο (BPM), και οι νότες που έχουν εντοπιστεί μετατρέπονται στους αντίστοιχους MIDI αριθμούς, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Twinkle Twinkle Little Star			
Onset time	MIDI number	Note name	Beat (duration)
0.00	60	C4	1
0.50	60	C4	1
1.00	67	G5	1
1.50	67	G5	1
2.00	69	A5	2
3.00	67	G5	1
3.50	67	G5	1
4.00	65	F5	1
4.50	65	F5	1
5.00	64	E5	1
5.50	64	E5	1
6.00	62	D4	1
6.50	62	D4	1
7.00	60	C4	1

Table 5.1(a) MIDI information results of Twinkle Twinkle Litter Star

Εικόνα 5.3:Οι νότες που βρέθηκαν και η αντιστοιχία τους σε MIDI[41].

Τέλος, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν χρησιμοποιούνται για την αυτόματη δημιουργία της παρτιτούρας, η οποία στη συνέχεια συγκρίνεται με την αυθεντική παρτιτούρα για τον υπολογισμό του ποσοστού επιτυχίας. Τα ποσοστά επιτυχίας υπολογίζονται με βάση την ακρίβεια των νοτών που βρέθηκαν (note accuracy), των onset (onset accuracy) και των χτύπων που υπολογίστηκαν (beat accuracy)[41]. Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη της αρχικής έρευνας, καθώς προσφέρει αναγνώριση έως δύο νοτών ταυτόχρονα, αντί για μία, έχει επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει και κιθάρα πέρα από το πιάνο και δοκιμάστηκε σε δέκα πιο περίπλοκα κομμάτια κιθάρας και δέκα πιάνου, αντί για δύο μονοφωνικά κομμάτια πιάνου.

5.2.3 Music Score



Εικόνα 5.4: Σύγκριση της αυθεντικής παρτιτούρας με αυτή του πειράματος[41].

Piano Piece	Note Accuracy	Beat Accuracy	Onset Accuracy
Twinkle	96.88%	90.63%	100%
Yankee	91.67%	95.83%	100%

Εικόνα 5.5: Τα αποτελέσματα των πειραμάτων[41].

Επιπλέον, στη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από την έρευνα με τίτλο “**PROBABILISTIC MODEL FOR MAIN MELODY EXTRACTION USING CONSTANT-Q TRANSFORM**” των **Benoit Fuentes, Antoine Liutkus, Roland Badeau, και Gaël Richard**, η οποία δημοσιεύθηκε τον Μάρτιο του 2012. Στην εν λόγω έρευνα, η αναγνώριση της μελωδίας πραγματοποιείται μέσω του αλγορίθμου Constant-Q Transform (CQT)[42].

Στα επόμενα κεφάλαια, θα αναλύσουμε τον λόγο που στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας προτιμήθηκε ο αλγόριθμος CQT σε σύγκριση με τον αλγόριθμο YIN της προηγούμενης έρευνας ή σε σχέση με άλλους παρόμοιους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία σήματος.

Κεφάλαιο 6ο: Εισαγωγή στο Πειραματικό Μέρος

6.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί μία εισαγωγή στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής εργασίας, όπου παρουσιάζεται το περιβάλλον και οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν. Αρχικά, γίνεται μια περιγραφή του λογισμικού και των εργαλείων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη και την εκτέλεση των πειραμάτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βιβλιοθήκες που επιλέχθηκαν, με αιτιολόγηση της επιλογής τους και παραδείγματα χρήσης τους στον τομέα της παρούσας εργασίας.

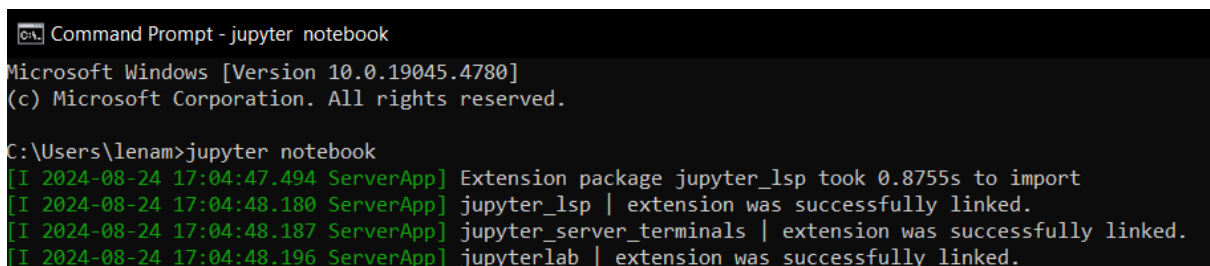
6.2 Περιβάλλον

Για την δημιουργία του πειραματικού μέρους χρησιμοποιήθηκαν ποικίλα λογισμικά και εργαλεία για την ανάπτυξη του κώδικα και για την εμφάνιση των αποτελεσμάτων. Παρακάτω, αναλύονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν.

6.2.1 Jupyter Notebook

Το περιβάλλον στο οποίο πλαισιώνεται η διπλωματική αυτή και έγινε η συγγραφή του κώδικα είναι το Jupyter Notebook. Το Jupyter Notebook είναι μία διαδικτυακή εφαρμογή ανοικτού κώδικα, μέρος του Project Jupyter, ενός προγράμματος για την ανάπτυξη λογισμικού ανοικτού κώδικα σε πολλές γλώσσες προγραμματισμού. Το Jupyter Notebook είναι ευρέως διαδεδομένο σήμερα, ειδικά στον τομέα της μηχανικής μάθησης (machine learning) και της επιστήμης δεδομένων (data science) καθώς είναι εύκολο στη χρήση του και επιτρέπει την εκτέλεση ανεξάρτητων κομματιών κώδικα, χωρίς την ανάγκη εκτέλεσης ολόκληρου του προγράμματος. Αυτό μειώνει τον χρόνο εκτέλεσης του κώδικα, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μεγάλα σύνολα δεδομένων, και καθιστά πιο άμεση την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων[43].

Για τη διεξαγωγή της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python 3. Η εκκίνηση του Jupyter Notebook πραγματοποιείται με την εντολή “jupyter notebook” σε κάποιο τερματικό, όπως το Command Prompt των Windows ή το Anaconda Prompt της Python.



```
Command Prompt - jupyter notebook
Microsoft Windows [Version 10.0.19045.4780]
(c) Microsoft Corporation. All rights reserved.

C:\Users\lenam>jupyter notebook
[I 2024-08-24 17:04:47.494 ServerApp] Extension package jupyter_lsp took 0.8755s to import
[I 2024-08-24 17:04:48.180 ServerApp] jupyter_lsp | extension was successfully linked.
[I 2024-08-24 17:04:48.187 ServerApp] jupyter_server_terminals | extension was successfully linked.
[I 2024-08-24 17:04:48.196 ServerApp] jupyterlab | extension was successfully linked.
```

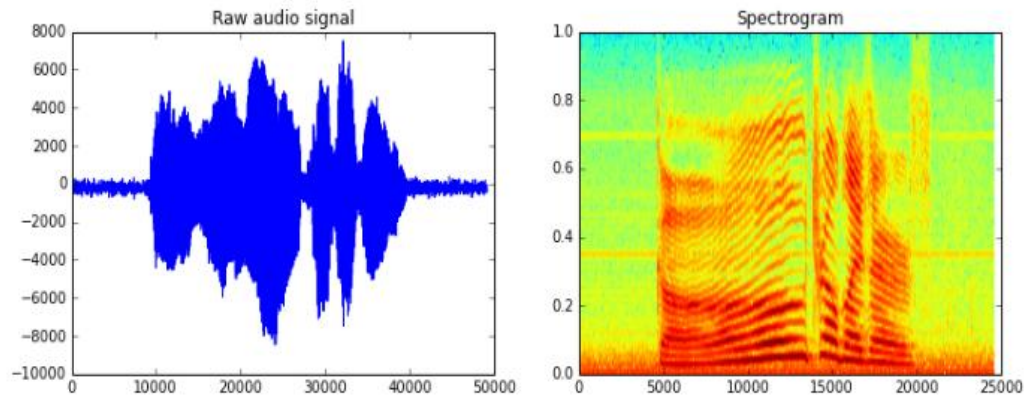
Εικόνα 6.1: Εντολή εκκίνησης του Jupyter Notebook.

We begin by loading a datafile using SciPy's audio file support:

```
In [1]: from scipy.io import wavfile
rate, x = wavfile.read('test_mono.wav')
```

And we can easily view its spectral structure using matplotlib's builtin specgram routine:

```
In [2]: %matplotlib inline
from matplotlib import pyplot as plt
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(1, 2, figsize=(12, 4))
ax1.plot(x); ax1.set_title('Raw audio signal')
ax2.specgram(x); ax2.set_title('Spectrogram');
```



Εικόνα 6.2: Εικόνα προσομοίωσης του περιβάλλοντος Jupyter Notebook.

6.2.2 MuseScore 4

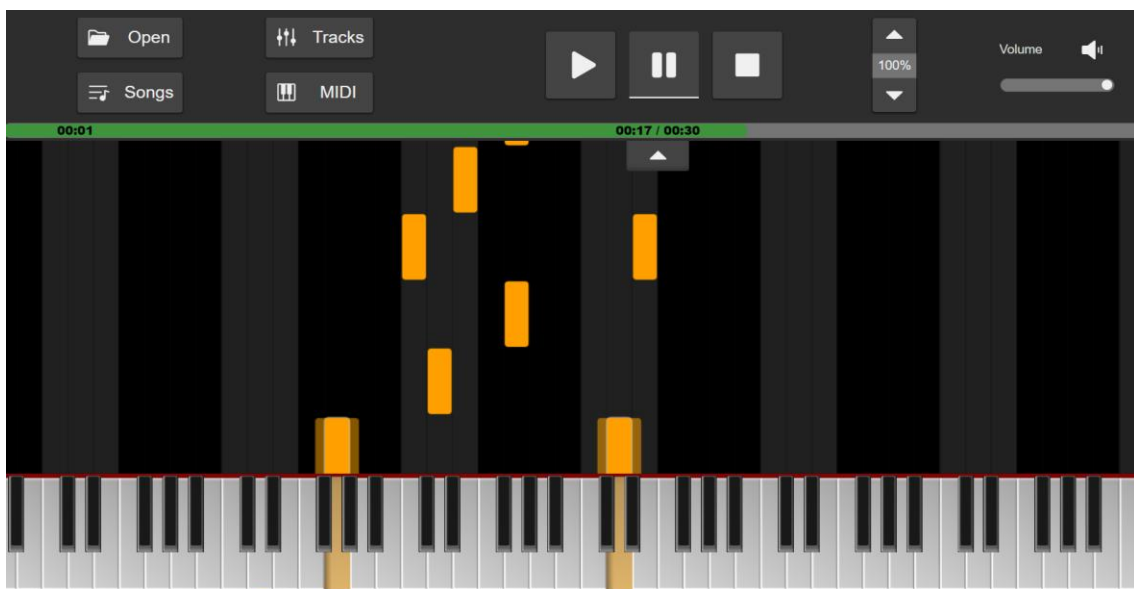
Το MuseScore 4 είναι η τελευταία έκδοση του MuseScore, ενός δημοφιλούς λογισμικού μουσικής σημειογραφίας ελεύθερου και ανοικτού κώδικα. Χρησιμοποιείται ευρέως από συνθέτες, ενορχηστρωτές, εκπαιδευτικούς και μουσικούς για διάφορους σκοπούς, καθώς προσφέρει στον χρήστη πολλές δυνατότητες στη σημειογραφία μουσικής. Οι σημαντικότερες λειτουργίες του MuseScore περιλαμβάνουν τη δημιουργία και την επεξεργασία παρτιτούρας, τη δυνατότητα αναπαραγωγής της παρτιτούρας, τις επιλογές εξαγωγής αρχείου σε πολλές μορφές καθώς και τη φιλική διεπαφή χρήστη που καθιστά την εφαρμογή πολύ εύκολη στην χρήση της, ακόμα και από χρήστες χωρίς προηγούμενη εμπειρία στον κλάδο της πληροφορικής[44]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία το MuseScore χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία της παρτιτούρας και τον τελικό έλεγχο των δεδομένων, διασφαλίζοντας έτσι την ακρίβεια και την ποιότητα των μουσικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 6.3: Εικόνα προσομοίωσης του περιβάλλοντος MuseScore 4.

6.2.3 Midiano

Το Midiano είναι μια δωρεάν, ανοιχτού λογισμικού διαδραστική εφαρμογή εκμάθησης πιάνου που λειτουργεί σε οποιοδήποτε πρόγραμμα περιήγησης. Επιτρέπει στον χρήστη να εκτελέσει οποιοδήποτε αρχείο MIDI και να αναπαράγει την ηχητική πληροφορία του, ενώ ταυτόχρονα παρέχει οπτική απεικόνιση των νοτών σε ένα εικονικό πιάνο[45]. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το Midiano χρησιμοποιήθηκε για τον ηχητικό έλεγχο των αρχείων MIDI, επιτρέποντας την αξιολόγηση της ακρίβειας και της ποιότητας του παραγόμενου ήχου.



Εικόνα 6.4: Εικόνα προσομοίωσης του περιβάλλοντος Midiano.

6.3 Βιβλιοθήκες

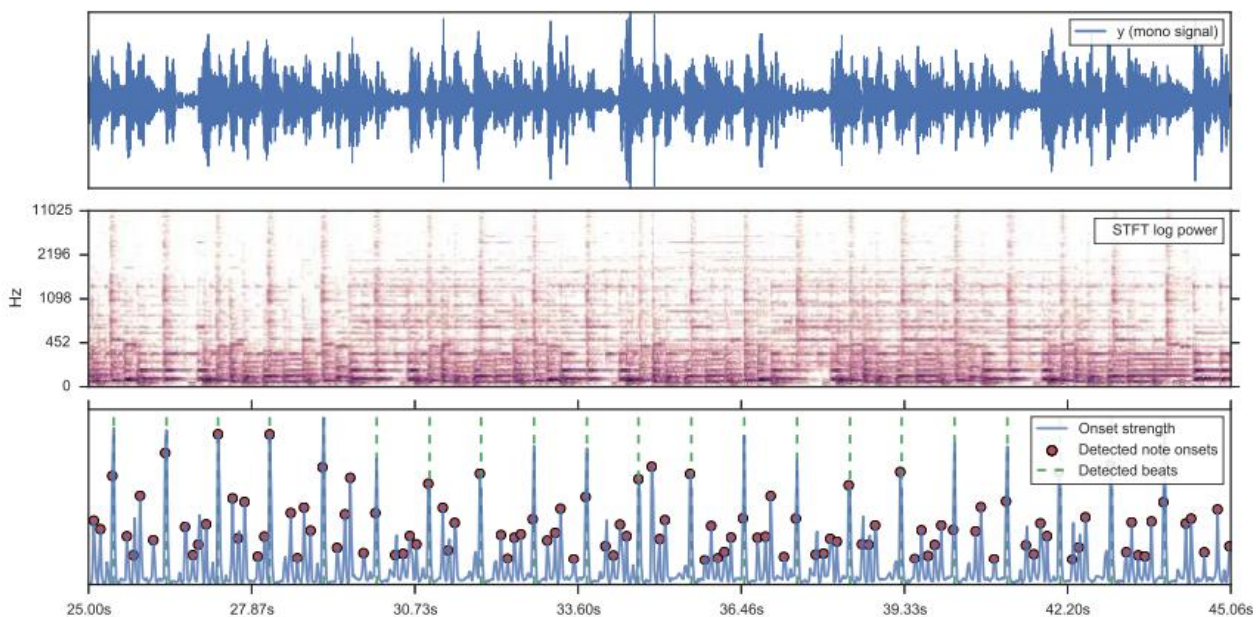
Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

1. *Librosa* για την ηχητική ανάλυση
2. *MIDIUtil* για τη δημιουργία του MIDI
3. *Music21* για τη μεταγραφή παρτιτούρας
4. *Matplotlib* για τη δημιουργία διαγραμμάτων
5. *IPython* για το άκουσμα των αρχείων
6. *xlwt* για την καταγραφή των αποτελεσμάτων σε Excel αρχείο
7. *NumPy* για μαθηματικές πράξεις

Οι πρώτες τρεις έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην διεξαγωγή της διπλωματικής και αναλύονται περαιτέρω στη συνέχεια.

6.3.1 Librosa

Η Librosa είναι μια βιβλιοθήκη της Python που χρησιμοποιείται για την επεξεργασία ήχου και μουσικού σήματος. Σε υψηλό επίπεδο, η Librosa παρέχει υλοποιήσεις μιας ποικιλίας κοινών συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται στον τομέα της Μουσικής Πληροφορικής (MIR). Επιπρόσθετα, προσφέρει πολλές δυνατότητες για την εξαγωγή δεδομένων από τον ήχο, καθώς και για τη δημιουργία φασματικών απεικονίσεων, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια. Επιπλέον, η Librosa δέχεται εκτεταμένη υποστήριξη από την κοινότητα και διαθέτει πλούσια τεκμηρίωση, καθιστώντας την ως την πιο δημοφιλή βιβλιοθήκη στον κλάδο του MIR[46]. Για όλους τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε για την εξαγωγή της μελωδίας στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Εικόνα 6.5: Οπτικοποίηση του ήχου με τη χρήση της βιβλιοθήκης Librosa[46].

6.3.2 MIDIUtil

Το MIDIUtil είναι μια βιβλιοθήκη της Python που επιτρέπει τη δημιουργία αρχείων MIDI πολλαπλών καναλιών μέσα από προγράμματα Python. Το MIDIUtil επιτρέπει τη δημιουργία MIDI αρχείων από το μηδέν, καθώς προσφέρει λειτουργίες, όπως την προσθήκη νοτών, την προσαρμογή του tempo, τον καθορισμό της έντασης, καθώς και την επεξεργασία άλλων μουσικών παραμέτρων. Η βιβλιοθήκη είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για προγραμματιστές που επιθυμούν να δημιουργήσουν μουσικά κομμάτια με προγραμματιστικό τρόπο ή να επεξεργαστούν υπάρχοντα MIDI αρχεία[47]. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, το MIDIUtil χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του MIDI αρχείου με τα δεδομένα που προέκυψαν από το πειραματικό μέρος της εξαγωγής μελωδίας.

6.3.3 Music21

Το Music21 είναι μια δωρεάν, ανοιχτού κώδικα εργαλειοθήκη βασισμένη στην Python για την υποβοηθούμενη από υπολογιστή μουσικολογία. Χρησιμοποιείται ευρέως από προγραμματιστές για τη μελέτη μεγάλων συνόλων δεδομένων μουσικής, τη δημιουργία μουσικών παρτιτούρων και την επεξεργασία της μουσικής σημειογραφίας. Το Music21 εκτυπώνει την παρτιτούρα χρησιμοποιώντας κάποια εξωτερική εφαρμογή, όπως το MuseScore, για την απεικόνιση των δεδομένων[48]. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, το Music21 χρησιμοποιήθηκε για την αυτόματη σημειογραφία της μελωδίας που αναγνωρίστηκε κατά τη διάρκεια του πειραματικού μέρους της αναγνώρισης μελωδίας.

```
littleMelody = converter.parse("tinynotation: 3/4 c4 d8 f g16 a g f#")
littleMelody.show()
```



Εικόνα 6.6: Κομμάτι κώδικα και το αποτέλεσμα που προκύπτει με τη χρήση της βιβλιοθήκης Music21[48].

Κεφάλαιο 7ο: Συλλογή και Καταγραφή Δεδομένων

7.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό ασχολείται με τη διαδικασία συλλογής και καταγραφής των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Η συλλογή δεδομένων αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο, καθώς τα δεδομένα που συγκεντρώνονται επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν και αναφέρονται τα μουσικά κομμάτια που αποτέλεσαν αντικείμενο των πειραμάτων. Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων αυτών.

7.2 Συλλογή Δεδομένων

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω της ιστοσελίδας 8notes.com. Το 8notes είναι μια πλατφόρμα που προσφέρει δωρεάν ή επί πληρωμή μουσικά έγγραφα και πόρους για μουσικούς όλων των επιπέδων (αρχάριο, εύκολο, μέτριο και προχωρημένο επίπεδο). Παρέχει παρτιτούρες για διάφορα μουσικά όργανα, όπως πιάνο, κιθάρα, βιολί και σαξόφωνο. Επιπλέον, προσφέρει στον χρήστη διάφορα εργαλεία, όπως μετρονόμο, δυνατότητες μετατροπής σε διαφορετικές τονικότητες, αρχεία MP3 καθώς και αρχεία MIDI των κομματιών[49].

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν είναι από κομμάτια σύγχρονης καθώς και κλασικής μουσικής αρχαρίου και εύκολου επιπέδου. Από αυτά εγκαταστάθηκαν τα MP3 αρχεία, στα οποία ακολούθησε η μετατροπή τους σε μορφή WAV για καλύτερη σαφήνεια των δεδομένων και συμβατότητα στο στάδιο της επεξεργασίας. Επίσης, συλλέχθηκαν τα MIDI αρχεία των κομματιών και οι παρτιτούρες τους. Τα αρχεία WAV που προέκυψαν χρησιμοποιούνται στο επόμενο στάδιο για την ηχητική ανάλυση και την εξαγωγή μελωδίας, ενώ τα MIDI αρχεία και οι παρτιτούρες που λήφθηκαν από την ιστοσελίδα χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων επιλέχθηκαν 10 κομμάτια για πιάνο και 10 για κιθάρα. Τα κομμάτια για πιάνο που επιλέχθηκαν είναι:

1. *Au Clair de la Lune*
2. *Canon του Johann Pachelbel*
3. *Coming round the mountain*
4. *Greensleeves*
5. *Jupiter του Holst*
6. *Morning from Peer Gynt του E.Grieg*
7. *Ode to Joy του Ludwig van Beethoven*
8. *Theme from Sonata in F K280 του W.A.Mozart*
9. *Waltz from Sleeping Beauty του Pyotr Ilyich Tchaikovsky*
10. *Waltz του Johannes Brahms*

Τα κομμάτια για κιθάρα που επιλέχθηκαν είναι τα:

1. *Bourree του Le Couprey*
2. *Camptown Races*
3. *Dallas Blues του C.H. Wand*
4. *I Can't Help Falling In Love του Jean Paul Egide Martini*
5. *Mary Had A Little Lamb*
6. *Menuett του Georg Philipp Telemann*
7. *Metsakukkia(Woodland Flowers) του Philip DeWalt*
8. *Passepied του Georg Philipp Telemann*
9. *Sinner Man*
10. *The Entertainer του Scott Joplin*

The screenshot shows the 8notes website interface. At the top, there is a search bar and navigation links for INSTRUMENTS, STYLES, ARTISTS, DISCOVER, and RESOURCES. The main content area displays the title 'Au claire de la lune' and 'Free Sheet music for Piano'. Below the title is a row of icons for play, user profile, key signature (B-flat), refresh, sheet music, print, settings, and full screen. The sheet music itself is titled 'Au Clair de la Lune' and shows two systems of music in 4/4 time, with a treble and bass clef. The first system starts with a first finger (1) on the treble clef and a fifth finger (5) on the bass clef. The second system continues with a fifth finger (5) on the treble clef and a fourth finger (4) on the bass clef.

Εικόνα 7.1: Το κομμάτι Au Clair de la Lune στην ιστοσελίδα 8notes.

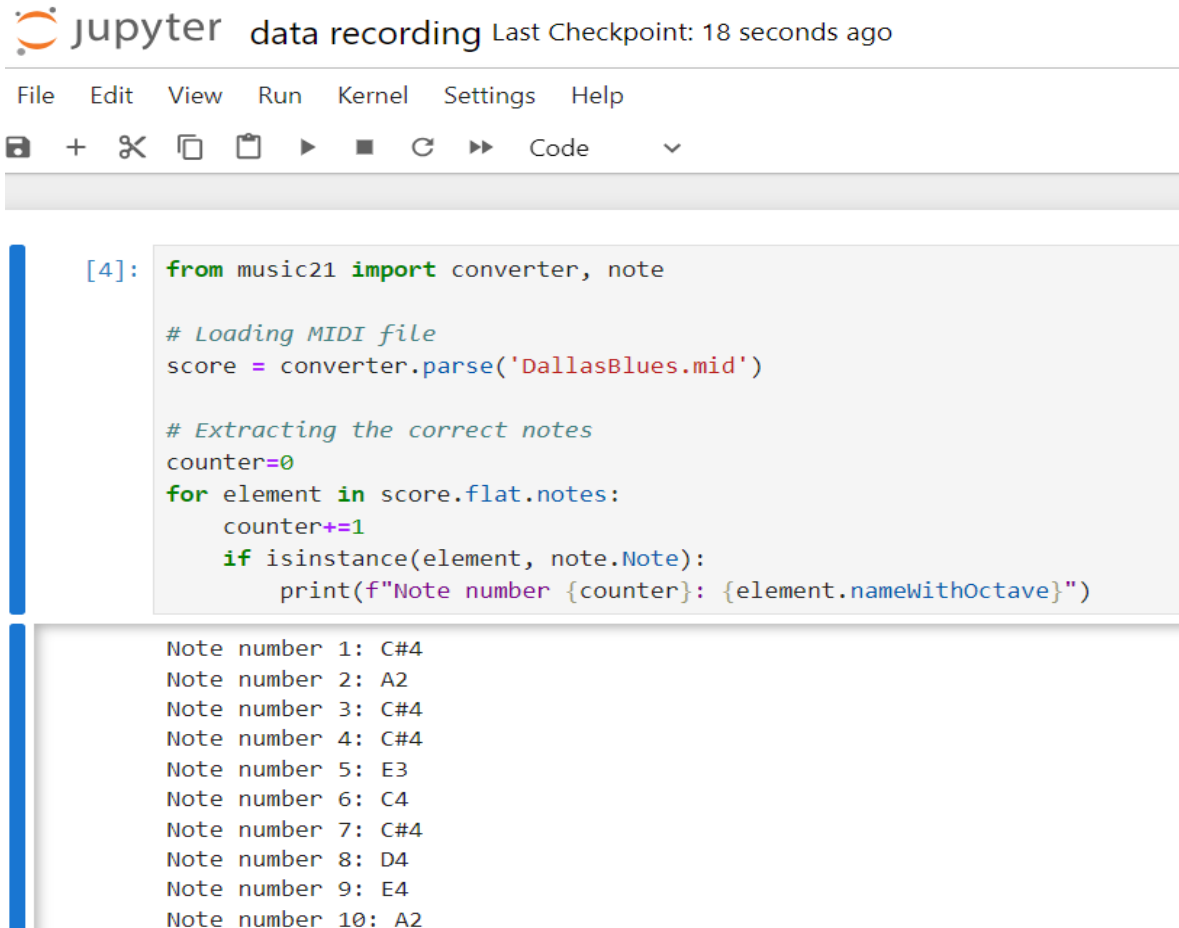
The screenshot shows the download options for the sheet music. There are two main sections: 'MIDI' and 'MP3s'. Under 'MIDI', there is a 'Download Midi File' button and a message: 'Sorry, Individual Midi Files not available for this piece.' Under 'MP3s', there is a 'Download MP3' button and a 'C# major Transposition' option.

Εικόνα 7.2: Η επιλογή για λήψη του MIDI και MP3 αρχείου.

7.3 Καταγραφή Δεδομένων

Από τις παρτιτούρες που συλλέχθηκαν πρώτο βήμα είναι να καταγραφούν τα δεδομένα με τις κατάλληλες νότες σε ένα Excel αρχείο. Αυτό το βήμα είναι απαραίτητο, προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων στα επόμενα στάδια της έρευνας και να υπολογιστεί το ποσοστό επιτυχίας του προγράμματος έπειτα από τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

Αρχικά, γίνεται η εξαγωγή των σωστών νοτών μέσω του MIDI αρχείου που λήφθηκε από την ιστοσελίδα και στη συνέχεια τα αποτελέσματα αντιγράφονται σε ένα αρχείο Excel, όπου στη συνέχεια ελέγχονται οπτικά σε σύγκριση με την παρτιτούρα.



The screenshot shows a Jupyter Notebook window titled "data recording" with a last checkpoint of 18 seconds ago. The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Run, Kernel, Settings, Help) and a toolbar with various icons. A code cell is active, showing the following Python code:

```
[4]: from music21 import converter, note

# Loading MIDI file
score = converter.parse('DallasBlues.mid')

# Extracting the correct notes
counter=0
for element in score.flat.notes:
    counter+=1
    if isinstance(element, note.Note):
        print(f"Note number {counter}: {element.nameWithOctave}")
```

The output of the code cell is a list of 10 notes:

```
Note number 1: C#4
Note number 2: A2
Note number 3: C#4
Note number 4: C#4
Note number 5: E3
Note number 6: C4
Note number 7: C#4
Note number 8: D4
Note number 9: E4
Note number 10: A2
```

Εικόνα 7.3: Ο κώδικας εξαγωγής νοτών από το MIDI αρχείο.

Στο αρχείο `ipythb` με το όνομα `data recording` γίνεται η καταγραφή δεδομένων. Στο συγκεκριμένο τμήμα του κώδικα, αρχικά φορτώνονται τα υποπακέτα `note` και `converter` από τη βιβλιοθήκη `music21`. Το υποπακέτο `note` περιέχει κλάσεις και συναρτήσεις που σχετίζονται με τις μουσικές νότες, ενώ το `converter` χειρίζεται την ανάλυση μουσικών αρχείων, συμπεριλαμβανομένων των αρχείων MIDI.

Στη συνέχεια, φορτώνεται το MIDI αρχείο του κομματιού "Dallas Blues" σε μια μεταβλητή με όνομα `score`. Έπειτα, σε έναν βρόχο επανάληψης, χρησιμοποιείται η ιδιότητα `flat.notes` για να ληφθεί μια επίπεδη λίστα από όλες τις νότες στο αρχείο, ανεξάρτητα από τα επίπεδα ή τα τμήματα της μουσικής δομής. Έπειτα, ελέγχεται αν το στοιχείο είναι νότα, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `isinstance(element, note.Note)` και αν είναι εμφανίζεται η νότα με την αγγλική ονομασία και την οκτάβα στην οποία βρίσκεται. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για κάθε κομμάτι.

Κεφάλαιο 7ο: Συλλογή και Καταγραφή Δεδομένων

Με αυτόν τον τρόπο, ο κώδικας παρέχει μια αρίθμηση των νοτών που περιέχονται στο MIDI αρχείο και τις εμφανίζει μία προς μία. Στη συνέχεια, δημιουργείται το Excel αρχείο με τις σωστές νότες για τη μελωδία και τη συνοδεία μπάσου.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	
Au Clair de la Lune		Canon		Coming round the mountai			Greensleeves		Jupiter		Morning from Peer Gynt		Ode to Joy		Theme from Sonat:		Itz from Sleeping Bea		Waltz										
Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody
C3	C4	C4	E4			G4			A4			E4		C3	G4			C3	C4		E5	C4			C4			E4	
G3	C4	G3	D4			A4			A3	C5			G4		E4				E4		F5			B3				C4	
E3	C4	A3	C4		C3	C5			D5		F4	A4			D4				F4		E5			C4				C4	
G3	D4	E3	B3		E3	C5			A3	E5			A4	E3	C4				G4		E5			A3				E4	
C3	E4	F3	A3		G3	C5			F5			C5			D4		G3	G4	A5				B3					E4	
G3		C3	G3		E3	C5			E5			B4			E4				F4		A5			C4				C4	
F3	D4	F3	A3		C3	A4			G3	D5			G4	C3	G4		G3	E4	G5		A3							C4	
G3		G3	B3		E3	G4			B4		E4	C5			E4				D4		F5			B3				E4	
E3	C4	C4	E4		G3	E4			G3	G4			E4		D4		C3	C4			E5				D4	G3		F4	
G3	E4	G3	D4		E3	G4			A4			C5	E3	C4				C4	F3	D5			G3	E4				E4	
F3	D4	A3	C4		C3	C5			B4			B4			D4				D4		C5				C#4	G3		D4	
D3	D4	E3	B3		E3				F3	C5	F4	A4			E4				E4		B5		D3	D4	C4			E4	
E3	C4	F3	A3		G3				A4			B4			D4		G3	E4		C5				G4				C4	
G3		C3	G3		E3				F3	A4		A4			E4				D4	E3				F#4				C4	
F3		F3	A3		C3				G#4			G4	C3		G4		G3	D4		D5				F4				G4	
D3		G3	B3		E3				A4			E4			E4				E4		C5			D4				A4	
C3	C4		C4		G3	C5			E3	B4		E4			G4		G3	E4		B4				F4				E4	
G3	C4	G3	D4		E3	D5			G#4			G4	C3		A4				F4		C5			E4				E4	
E3	C4		B3		C3	E5			E3	E4	F4	A4			E4				G4		D5			D4				G4	
G3	D4	A3	C4		E3	E5			A4			A4			A4		G3	G4	F3	D5				A4				A4	
C3	E4		E4		G3	E5			A3	C5		C5	C3		G4				F4		C5			G4				E4	
G3		E3	G4		E3	E5			D5			B4			E4		G3	E4		B5				F4				E4	
F3	D4	F3	A4		C3	G5			A3	E5		G4			D4				D4		C5			E4				G4	
G3			F4		E3	G5				F5	E4	C5	G3		C4	E3			C4	E3		D3		E4	B3			B4	
E3	C4	C3	E4		G3	G5				E5		D4	E3		C4				C4		B4			D4				A4	
G3	E4	F3	F4		E3	E5			G3	D5		E5	D3		D4				D4	A4				C#4				G4	
F3	D4	G3	D4		B2	D5			G3	G4	F4	E5		C3					E4	G#4		G3	D4		B3	F#4		G4	
B2	D4		C4		D3				G3	G4	F4	E5			E4		G3	D4		E5	A3			D4		E4		G4	
C3	C4		G4		G3					A4		D4			D4				C4		F5			B3				F4	
G3		G3	G4		D3					B4		C5	E3		C4		C3	C4		E5				C4				E4	
C3			A4		B2				F3	C5		D5			D4		G3	D4		E5				B3				C4	

Εικόνα 7.4: Η καταγραφή των σωστών νοτών κάθε τραγουδιού για πιάνο.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	
Bourree		Camptown Races		Dallas Blues		't Help Falling In		Mary Had A Little Lam		Menuett		Metsakukkia		Passepied		Sinner Man		The Entertaine											
Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody	Bass	Melody
G2	B3	G2	D4	A2	C#4	G3		G3	E4			G3	D4	A2	E3	A2	A3	A2		D3					D3				
A3			D4		C#4	C3	C4		D4					A3							E3				E3				E3
B3	C4	G3	B3	E3	C#4	E3			C4				C4							F3	B3	A3			C3			C3	
			D4		C#4	G3								G3	B3	E2	C4				A3			C4	A2			A2	
A3			D4		D4	D3	D4		D4		G3		D4		D4	B3					C3	E4	A2		B2			B2	
			D4		D4	D3			E4				E4		E3	G3	A2	E4			B2			E3				G2	
B3			D3	B3	E3	C3	E4		E4				E4		A3	A3				D3				C4				E4	
G3			A3		A2	E3			E3		G3		D4		C3	B3					E3	B3		A2				C4	
G2			A2		E4	G3			E4				D4		D3	A3					E3	B3				A3		A3	
			D3	B3		E4			C4				D4		G2	B3	A3				A3							B3	
G3			A3		E3	E4			E3				E4		G3						A3				C4			G3	
F#3			A2		F#4				E4				G4		A3						G#3				A2			D3	
A3			G2	D4	A2	G4	D3	F4		G4			G4		E2						A2	A3		E3				E3	
E3			D4		E3				G3				E4		B3						C4	A3						C3	
G3			G3	B3	D3	D4	F4						D4		C4						F3	B3		C4				A2	
D3			D4		D4		C3	E4					C4		G3	D4	A3				A3	A2	E4		E4			B2	
G2	B3	G2	E4	A3					D4				D4		G4						C3	E4	E3					A2	
			D4		B3				E4		G3		E4		G2	A3					B3				A3	C4		G#2	
			C4		G3	B3	D3	C4	G2	D4			E4		G3	B3	A2	E3			C3				B3			G2	
B3			D3	A3	B3				D3				E4		D4	A3					D3				A2	A3	G3	G4	
A3			D4		C4	A3			G3				E4		B3	B3					E3	B3		E3				D3	
			G3	B3	F#3				D4		G3		D4		E3	G3	E2	C4			A2	A3		A3				D#3	
			D3	A3					G3				D4		A3	B3					C4				C4			E3	
B3			G2	G3	A2	A3	F2	A3					E4		C3	B3	A3				F3	B3	A2	E4				C4	
G3			D3		E2				G2	B3			D4		D3	A3	D3	F4			A3			E4		E3		E3	
G2			E3						A2	C4	E3		C4		G2	G3	A3				C3	E4			E4			C4	
			G3		C3				B2	D4					B2						D4				D4	E3			
G3			A3		C#3				C2	E4					D3						C3			A2	E4			C4	
F#3			G3		E3				F2	A3					G3	D4					D3			E3				C4	
A3			A2	A3					D4						G4						E3	B3		G4				D4	
E3			E3						F4						G2						A3			E3				D#4	
C3					C#4	C3			E4						C2	B2	A2				C#2			C2	D4			E4	

Εικόνα 7.5: Η καταγραφή των σωστών νοτών κάθε τραγουδιού για κιθάρα.

Κεφάλαιο 8ο: Αλγόριθμοι εξαγωγής μελωδίας

8.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, σχολιάζονται τα ηχητικά χαρακτηριστικά που χρησίμευσαν κατά τη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους της εργασίας, καθώς και οι αλγόριθμοι που μελετήθηκαν για την εξαγωγή της μελωδίας. Αρχικά, περιγράφονται τα ηχητικά χαρακτηριστικά, όπου αναλύεται ο ρόλος τους στη διαδικασία, και παρέχεται το τμήμα κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή τους. Στη συνέχεια, εξετάζονται οι αλγόριθμοι που μελετήθηκαν πριν από την επιλογή του τελικού αλγορίθμου, με παραδείγματα κώδικα για τη χρήση του καθενός. Τέλος, παρουσιάζονται οι λόγοι για τους οποίους ο τελικός αλγόριθμος επιλέχθηκε έναντι των άλλων. Τα αποσπάσματα κώδικα των ηχητικών χαρακτηριστικών και των αλγορίθμων που αναφέρονται περιλαμβάνονται στο αρχείο .ipynb με τίτλο "Audio Features and Algorithms".

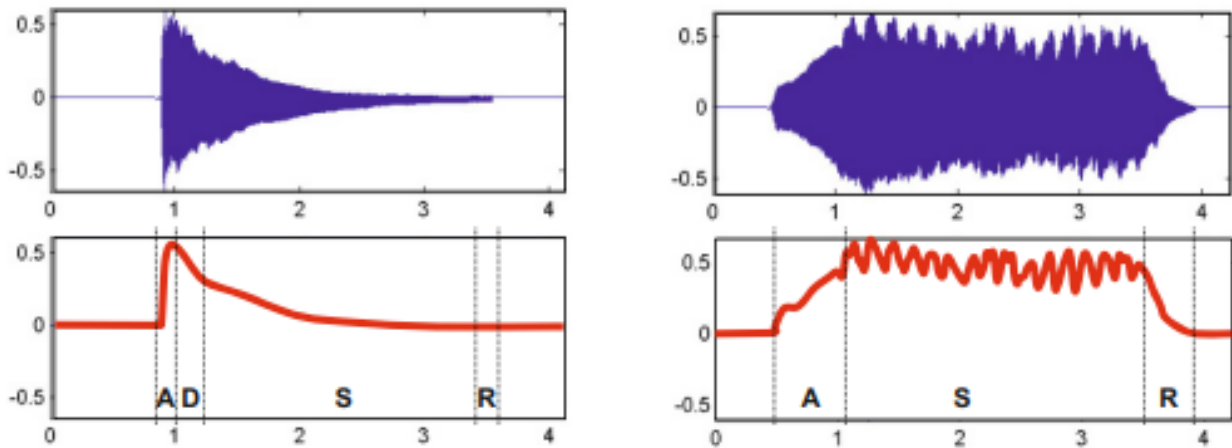
8.2 Ηχητικά χαρακτηριστικά

Οι αλγόριθμοι επεξεργασίας ηχητικού σήματος περιλαμβάνουν την ανάλυση του σήματος, την εξαγωγή των χαρακτηριστικών του και την αναγνώριση μοτίβων στο σήμα. Η διαδικασία εξαγωγής των ηχητικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιείται με σκοπό να αναδείξει τα κυρίαρχα στοιχεία του σήματος. Τα χαρακτηριστικά αυτά διακρίνονται βάσει των ιδιοτήτων του σήματος και ομαδοποιούνται σε κατηγορίες όπως: Χρονικά Χαρακτηριστικά (Time-Domain Features), Συχνотικά Χαρακτηριστικά (Frequency Domain Features), Χαρακτηριστικά Χρόνου-Συχνότητας (Time-Frequency Domain Features), Κεψτρικά Χαρακτηριστικά (Cepstral Domain Features), χαρακτηριστικά που σχετίζονται με το Chroma (Chroma Related Features), χαρακτηριστικά χρονικής τοποθέτησης (Temporal Features) και σε πολλές ακόμη κατηγορίες[50]. Στα πλαίσια της διπλωματικής θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά που διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην εξαγωγή της μελωδίας.

8.2.1 Amplitude Envelope

Το Amplitude Envelope ανήκει στα χρονικά χαρακτηριστικά (Time-Domain), του ήχου και αντιπροσωπεύει τον τρόπο με τον οποίο το πλάτος (ή ένταση) ενός ηχητικού σήματος μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Αποτυπώνει τη δυναμική ενός ήχου, δείχνοντας πώς εξελίσσεται η έντασή του από την αρχή έως το τέλος. Το Amplitude Envelope περιλαμβάνει τέσσερις ξεχωριστές φάσεις:

1. **Attack:** Στην αρχή ενός μουσικού τόνου, συχνά υπάρχει μία ξαφνική αύξηση της ενέργειας. Ο χρόνος που απαιτείται για να φτάσει ο ήχος από το σημείο ηρεμίας στο μέγιστο σημείο ενέργειας ονομάζεται χρόνος attack.
2. **Decay:** Αφού φτάσει στην κορυφή, το πλάτος αρχίζει να μειώνεται με σταθερό ρυθμό. Αυτή η περίοδος μείωσης του πλάτους μέχρι να φτάσει σε ένα σταθερό επίπεδο ονομάζεται χρόνος decay.
3. **Sustain:** Σε αυτή τη φάση, το πλάτος παραμένει σχετικά σταθερό, καθώς η νότα διατηρείται.
4. **Release:** Αυτή είναι η τελική φάση, όπου το πλάτος μειώνεται από το επίπεδο του sustain στο σημείο ηρεμίας, αναπαριστώντας το τέλος της νότας [38].



Εικόνα 8.1: Η αναπαράσταση των φάσεων του Amplitude Envelope αριστερά για νότα πιάνου και δεξιά για νότα βιολιού[38].

Η αναπαράσταση του Amplitude Envelope πραγματοποιείται με τα εξής τμήματα κώδικα:

Αρχικά, το πρώτο βήμα είναι η εκφόρτωση των απαραίτητων βιβλιοθηκών στο αρχείο. Στη συνέχεια, με την εντολή `librosa.load(file, sr=None, mono=True)`, φορτώνεται το αρχείο ήχου με όνομα `file` σε ένα πρόγραμμα Python που χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη `librosa`. Η παράμετρος `sr=None` δηλώνει ότι ο ρυθμός δειγματοληψίας θα είναι ο προκαθορισμένος του αρχείου και όχι ο 22050 που χρησιμοποιεί η βιβλιοθήκη `librosa`. Η παράμετρος `mono=True` δηλώνει ότι το αρχείο θα έχει ένα μόνο κανάλι.

Στη συνέχεια, εκτυπώνεται το σχήμα του `y`, που είναι ένας πίνακας `numpy` που περιέχει τα δεδομένα της χρονοσειράς ήχου και αντιπροσωπεύει το πλάτος του ηχητικού σήματος σε κάθε δείγμα. Ο ρυθμός δειγματοληψίας `sr` είναι 44100 δείγματα το δευτερόλεπτο.

Τέλος, οι παράμετροι `frames` και `hop` είναι κρίσιμες για την επεξεργασία του ήχου. Ο όρος `frame=2048` δηλώνει ότι κάθε `frame` περιέχει 2048 δείγματα, ενώ το `hop` αναφέρεται στο βήμα μετακίνησης του παραθύρου ανάλυσης κατά τη δημιουργία του επόμενου `frame` και συνήθως είναι το μισό του `frame`. Αυτή η ομαδοποίηση διευκολύνει την επεξεργασία των δεδομένων, καθώς ένα μόνο δείγμα είναι πολύ μικρό για να επιτρέψει ουσιαστική ανάλυση των δεδομένων.

```
import librosa
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import IPython.display as ipd

#Loading the data
file="piano/Au Clair de la Lune.wav"
y, sr= librosa.load(file, sr=None, mono=True)

# Audio data information
print("y Shape=", y.shape)
print("Sample rate sr=", sr)

#frame, hop
frame=2048
hop=1024

y Shape= (1067008,)
Sample rate sr= 44100
```

Εικόνα 8.2: Εκφόρτωση βιβλιοθηκών, του κομματιού και καθορισμός του `frame` και `hop`.

Το επόμενο βήμα είναι να αποκοπεί το τμήμα του ήχου όπου υπάρχει ησυχία (ένταση κάτω των 15 dB) χρησιμοποιώντας την εντολή `librosa.effects.trim(y, top_db=15)`. Στη συνέχεια, διαιρώντας το συνολικό πλήθος των δειγμάτων `y` με τον ρυθμό δειγματοληψίας, προκύπτει η διάρκεια του τραγουδιού σε δευτερόλεπτα. Το τελευταίο κομμάτι του κώδικα δημιουργεί μια σειρά από ομοιόμορφα καταναμημένα χρονικά σημεία που αντιστοιχούν στο ηχητικό σήμα `y`.

```
#trimming the sound
y,_=librosa.effects.trim(y,top_db=15)

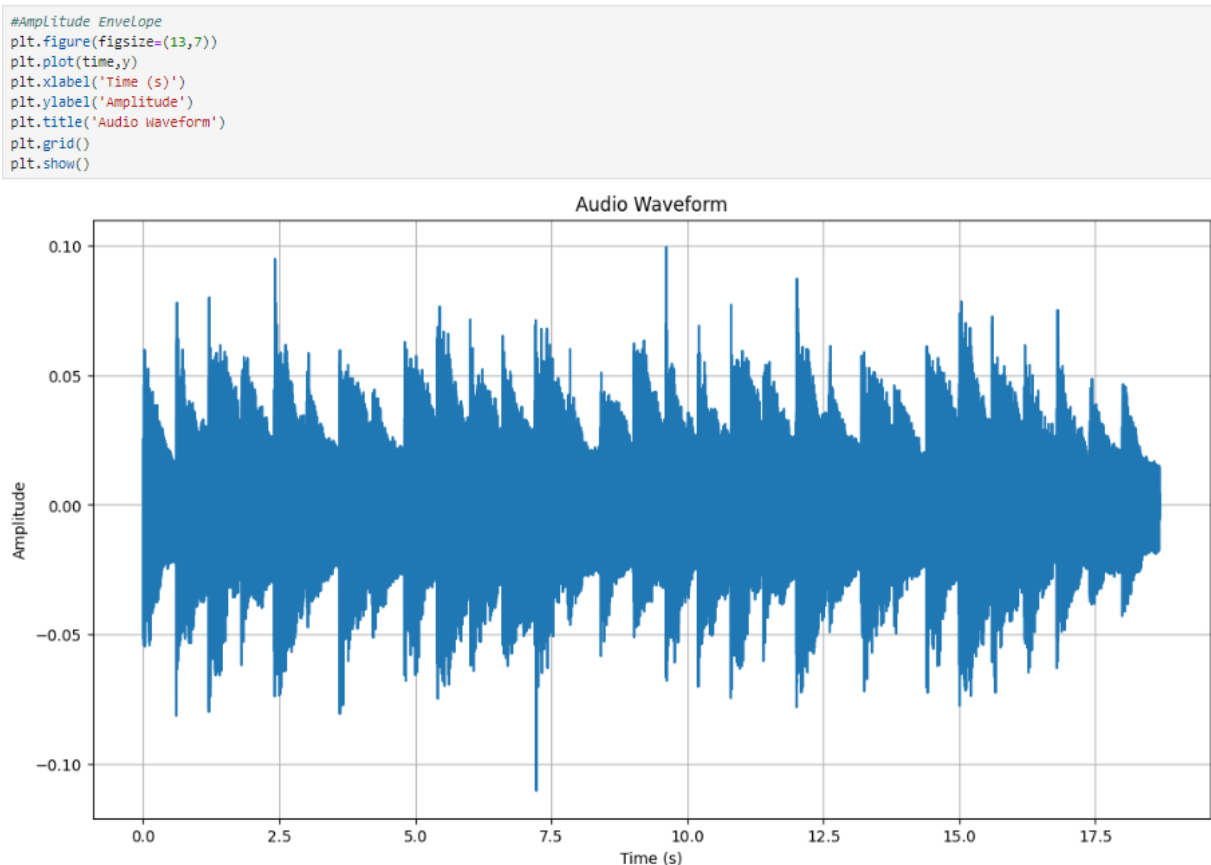
#finding the duration of the track after the trim
duration=y.shape[0]/sr
print(f"duration of audio file is {duration:.6f} seconds")

#breaking time into equal data parts
time = np.linspace(0, duration, len(y))

duration of audio file is 18.657234 seconds
```

Εικόνα 8.3: Trimming του αρχείου και υπολογισμός της διάρκειάς του.

Τέλος, γίνεται η οπτική αναπαράσταση του Amplitude Envelope χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη `matplotlib`.



Εικόνα 8.4: Αναπαράσταση του Amplitude Envelope.

8.2.2 Root Mean Squared (RMS)

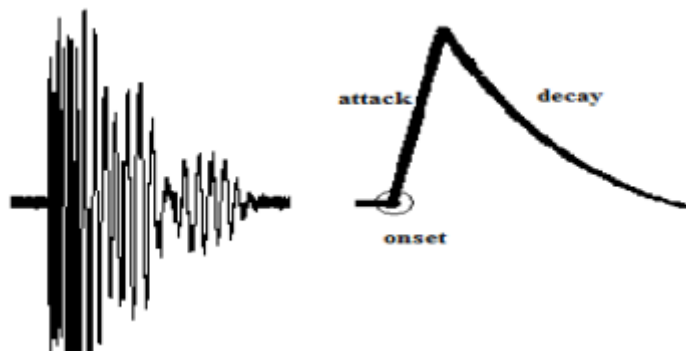
Το RMS (Root Mean Squared) είναι μια σημαντική μέτρηση που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της έντασης ενός σήματος, ιδιαίτερα στον τομέα της επεξεργασίας ηχητικών σημάτων και ανήκει στα χαρακτηριστικά του ήχου με βάση την ενέργεια (Energy Based Features). Επειδή το RMS υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του μέσου όρου των τετραγώνων των τιμών του σήματος, προσφέρει ένα πιο αντιπροσωπευτικό μέτρο της πραγματικής ισχύος ενός ήχου σε σύγκριση με το απλό μέγιστο πλάτος (peak amplitude). Το RMS εξομαλύνει τις μεταβολές του σήματος και αντανακλά καλύτερα την "πραγματική" ένταση, δηλαδή πώς ο ήχος γίνεται αντιληπτός σε βάθος χρόνου[50].

8.2.3 Onset

Τα *onset* ανήκουν στα χαρακτηριστικά χρονικής τοποθέτησης (Temporal Features) και είναι εξαιρετικά σημαντικά για την ανάλυση και επεξεργασία μουσικών σημάτων, καθώς μας επιτρέπουν να καθορίσουμε τη χρονική στιγμή που ξεκινάει μια νότα ή ένας ήχος. Η ανίχνευση των *onsets* είναι ουσιαστική για εφαρμογές όπως η μετατροπή ήχου σε MIDI, η ανάλυση ρυθμού και άλλες μουσικές εφαρμογές.

Η διαδικασία ανίχνευσης των *onsets* περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές επεξεργασίας σήματος, με σκοπό την αναγνώριση σημείων στο σήμα όπου υπάρχει σημαντική αλλαγή, όπως η έναρξη μιας νότας. Συγκεκριμένα, οι τεχνικές αυτές συνήθως βασίζονται στην ανάλυση των αλλαγών στο πλάτος του σήματος ή στο φασματικό του περιεχόμενο.

Οι πιο συνήθεις αλγόριθμοι ανίχνευσης των *onset* περιλαμβάνουν την ανίχνευση κορυφών (Peak Detection), όπου ανιχνεύονται οι κορυφές στο σήμα που αντιπροσωπεύουν ξαφνικές αυξήσεις στο πλάτος του Amplitude Envelope, υποδεικνύοντας την έναρξη ενός νέου ήχου. Μία ακόμη γνωστή μέθοδος για την ανίχνευση των *onset* είναι με βάση την ενέργεια (Energy-based methods). Αυτή η μέθοδος παρακολουθεί τις αλλαγές στην ενέργεια του σήματος, όπου ξαφνικές αυξήσεις στην ενέργεια μπορεί να υποδεικνύουν την έναρξη μιας νότας.[51].



Εικόνα 8.5: Αναπαράσταση ενός Onset[51]

Η βιβλιοθήκη **librosa** παρέχει ισχυρά εργαλεία για την ανίχνευση των *onset* σε ένα ηχητικό σήμα, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, όπως η ανίχνευση των *attack* στο amplitude envelope και η ανίχνευση μέσω της αύξησης της ενέργειας μέσω του RMS. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα κώδικα που χρησιμοποιεί αυτές τις μεθόδους:

Για την ανίχνευση των onset μέσω του **amplitude envelope** ακολουθούνται τα εξής βήματα:

- 1) Αρχικά με τη χρήση της συναρτήσης `librosa.onset.onset_strength(y=y, sr=sr)`, υπολογίζεται το *onset strength envelope* του σήματος, το οποίο αναδεικνύει τις μεταβολές στην ενέργεια του ήχου με την πάροδο του χρόνου. Οι κορυφές του amplitude envelope συχνά αντιστοιχούν σε σημεία όπου υφίστανται τα μουσικά γεγονότα.
- 2) Στη συνέχεια, η συνάρτηση `librosa.times_like` δημιουργεί χρονικές στιγμές που αντιστοιχούν σε κάθε τιμή του *onset strength envelope*, διευκολύνοντας τη σύνδεση του χρόνου με τις μεταβολές της ενέργειας.
- 3) Τέλος, η συνάρτηση `librosa.onset.onset_detect` χρησιμοποιείται για την ανίχνευση των onset με βάση το *onset strength envelope*. Αυτή η συνάρτηση επιστρέφει τα frames όπου ανιχνεύονται τα onset.

```
#onset detection
#Calculating the Onset Strength Envelope
oenv = librosa.onset.onset_strength(y=y, sr=sr)
times = librosa.times_like(oenv)

# Detect events from the amplitude envelope
onset_raw = librosa.onset.onset_detect(onset_envelope=oenv)
```

Εικόνα 8.6: Εντοπισμός Onset με το Amplitude Envelope.

Η διαδικασία εντοπισμού των onset μέσω του RMS έχει ως εξής :

1. Αρχικά, με τη συνάρτηση `np.abs(librosa.stft(y=y))` γίνεται η διαδικασία υπολογισμού της RMS τιμής από το STFT (Short-Time Fourier Transform) του σήματος και η ανάλυση των σημείων όπου υπάρχει σημαντική μεταβολή στην ενέργεια.
2. Στη συνέχεια υπολογίζεται η RMS τιμή του σήματος χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `librosa.feature.rms`.
3. Τέλος, οι χρονικές στιγμές που αντιστοιχούν στις τιμές RMS υπολογίζονται με τη συνάρτηση `librosa.times_like`.

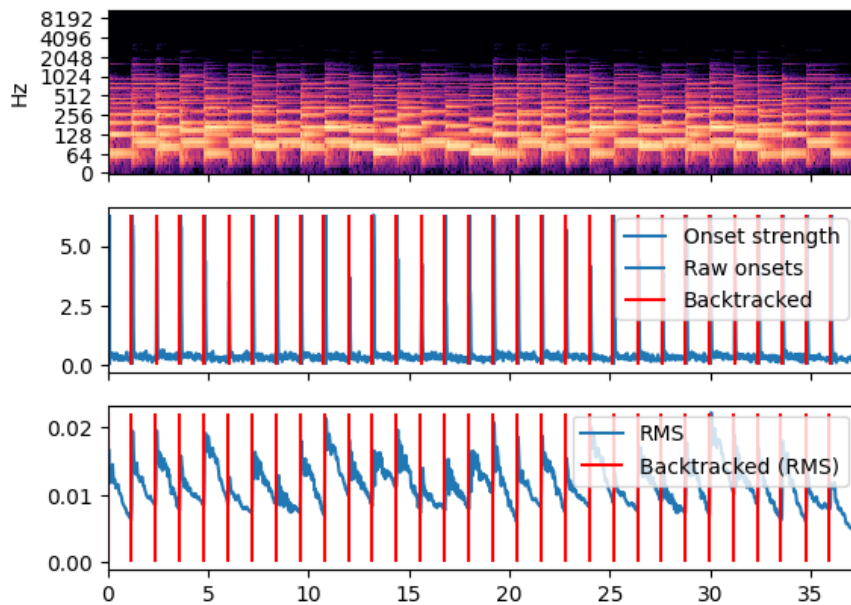
```
# Detecting onsets with RMS
S = np.abs(librosa.stft(y=y))
rms = librosa.feature.rms(S=S)
onset_bt_rms = librosa.onset.onset_backtrack(onset_raw, rms[0])
```

Εικόνα 8.7: Εντοπισμός Onset μέσω RMS.

Τέλος, για την απεικόνιση των δύο μεθόδων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το spectrogram, όπως φαίνεται στο παρακάτω απόσπασμα κώδικα χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `librosa.display.specshow`, και τα ανιχνευμένα onset οπτικοποιούνται με κόκκινες κάθετες γραμμές στο φάσμα. Τα frames στα οποία έγινε η ανίχνευση των onset μετατρέπονται σε χρονικές στιγμές με τη συνάρτηση `librosa.frames_to_time`.

```
#plotting the signals
fig, ax = plt.subplots(nrows=3, sharex=True)
librosa.display.specshow(librosa.amplitude_to_db(S, ref=np.max),
                        y_axis='log', x_axis='time', ax=ax[0])
ax[0].label_outer()
ax[1].plot(times, oenv, label='Onset strength')
ax[1].vlines(librosa.frames_to_time(onset_raw), 0, oenv.max(), label='Raw onsets')
ax[1].vlines(librosa.frames_to_time(onset_bt), 0, oenv.max(), label='Backtracked', color='r')
ax[1].legend()
ax[1].label_outer()
ax[2].plot(times, rms[0], label='RMS')
ax[2].vlines(librosa.frames_to_time(onset_bt_rms), 0, rms.max(), label='Backtracked (RMS)', color='r')
ax[2].legend()
```

<matplotlib.legend.Legend at 0x1cd976ae210>



Εικόνα 8.8: Οπτικοποίηση των onset και με τους δύο τρόπους και ο κώδικας των σχεδιαγραμμάτων.

Η δυνατότητα ακρόασης των *onset* που ανιχνεύθηκαν χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `librosa.clicks` είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της ακρίβειας της ανίχνευσης. Η συγκεκριμένη συνάρτηση παράγει ηχητικά "κλικ" στα σημεία όπου ανιχνεύθηκαν τα *onset*, επιτρέποντας στον χρήστη να ακούσει αν τα ανιχνευμένα σημεία αντιστοιχούν όντως στις αρχές των ηχητικών γεγονότων.

```
#hearing the onset detection with amplitude envelope
clicks=librosa.clicks(frames=onset_raw, sr=sr, length=len(y))
ipd.Audio(y+clicks,rate=sr)

#hearing the onset detection with RMS
clicks2=librosa.clicks(frames=onset_bt_rms, sr=sr, length=len(y))
ipd.Audio(y+clicks2,rate=sr)
```

Εικόνα 8.9: Ηχητική αναπαράσταση των Onset.

Μετά από τη μελέτη των δύο μεθόδων ανίχνευσης onset, μέσω του amplitude envelope και μέσω RMS, επιλέχθηκε η πρώτη μέθοδος, καθώς αποδείχθηκε πιο αποτελεσματική για όργανα όπως η κιθάρα και το πιάνο, όπου οι αλλαγές στο πλάτος είναι έντονες και εύκολα ανιχνεύσιμες. Παρά την επιλογή αυτή, οι δύο μέθοδοι παρουσίασαν πολύ κοινά αποτελέσματα, γεγονός που υποδεικνύει ότι και οι δύο είναι αξιόπιστες σε πολλές περιπτώσεις.

8.2.4 Mel-frequency Cepstral Coefficients (MFCCs)

Τα **Mel-Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs)** ανήκουν στα Κεντρικά Χαρακτηριστικά (Cepstral Domain Features) και αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία ήχου και ομιλίας. Τα MFCCs χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τον ήχο σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα με τρόπο που αποτυπώνει τις ιδιότητές του, ιδιαίτερα τα ηχοχρωματικά χαρακτηριστικά του.

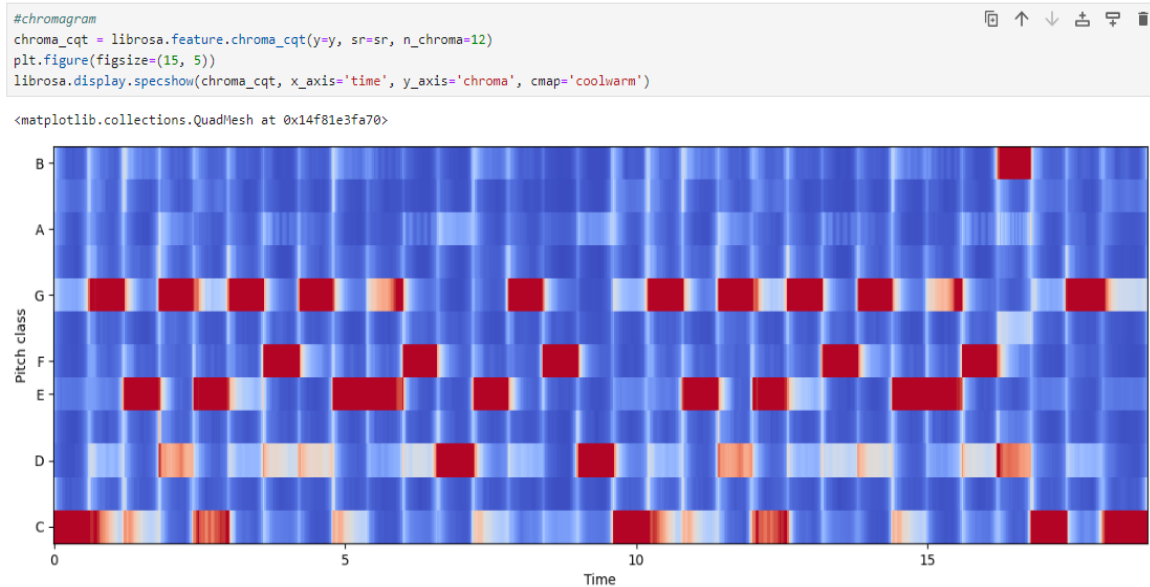
Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των MFCCs είναι η κλίμακα Mel η οποία προσομοιώνει τον τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο ακουστικό σύστημα αντιλαμβάνεται τις συχνότητες. Αυτό κάνει τα MFCCs εξαιρετικά αποτελεσματικά στην αναπαράσταση των φασματικών ιδιοτήτων ενός ηχητικού σήματος, όπως τις αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο αυτί.

Μέσω της μετατροπής των δεδομένων από το πεδίο της συχνότητας σε ένα σύνολο συντελεστών που αντικατοπτρίζουν την ακουστική αντίληψη του ανθρώπου, τα MFCCs προσφέρουν μια αναπαράσταση εξαιρετικά χρήσιμη σε πολλές εφαρμογές, όπως στην αναγνώριση ομιλίας, την ταξινόμηση μουσικής και την ανάλυση ηχητικών σημάτων[39].

8.2.5 Χρωματογράφημα (Chromagram)

Το χρωματογράφημα (chromagram) είναι ένα πολύτιμο χαρακτηριστικό στην επεξεργασία μουσικών σημάτων. Αποτυπώνει την κατανομή της ενέργειας στις 12 κατηγορίες τόνων της χρωματικής κλίμακας, δηλαδή στις 12 νότες που συνθέτουν μια οκτάβα. Το χρωματογράφημα παρέχει πληροφορίες για το αρμονικό περιεχόμενο ενός ηχητικού σήματος ανεξάρτητα από την οκτάβα, κάτι που το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανάλυση της μουσικής δομής, της μελωδίας και των συγχορδιών[38].

Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα κώδικα που υπολογίζει το χρωματογράφημα. Η συνάρτηση `librosa.feature.chroma_cqt(y=y, sr=sr, n_chroma=12)` χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του χρωματογραφήματος με τον αλγόριθμο Constant-Q Transform (CQT). Το `n_chroma=12` υποδεικνύει ότι το χρωματογράφημα θα έχει 12 ζώνες, μία για κάθε ημιτόνιο της χρωματικής κλίμακας. Το χρωματογράφημα οπτικοποιείται με τη χρήση της `librosa.display.specshow`.



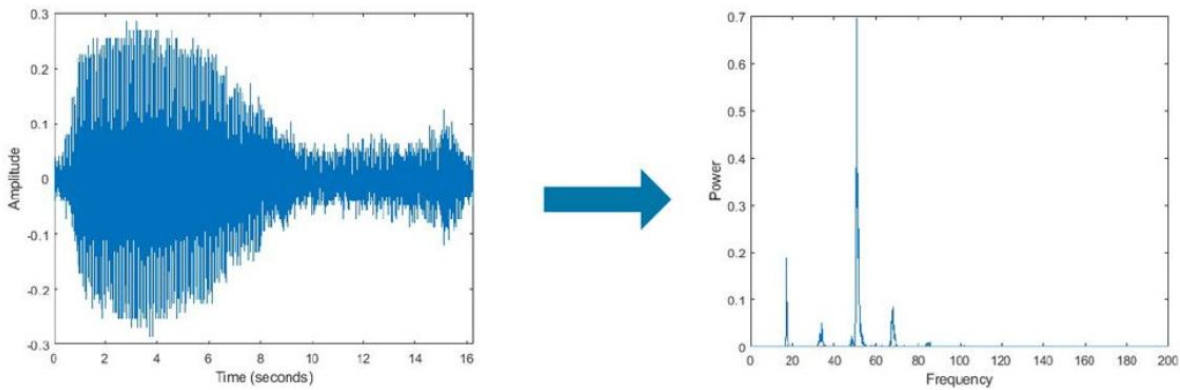
Εικόνα 8.10: Οπτικοποίηση και υπολογισμός του chromagram.

8.3 Αλγόριθμοι

Οι αλγόριθμοι εξαγωγής μελωδίας αποσκοπούν στην παραγωγή μιας ακολουθίας τιμών συχνοτήτων που αντιστοιχούν στις θεμελιώδεις συχνότητες των νοτών της κυρίαρχης μελωδίας από μια μουσική ηχογράφηση. Κατά την τελευταία δεκαετία, η εξαγωγή μελωδίας έχει αναδειχθεί σε ένα ενεργό ερευνητικό θέμα, που περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία προτεινόμενων αλγορίθμων που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τεχνικών[52]. Παρακάτω, θα αναλύσουμε τους αλγόριθμους που εξετάστηκαν για την εξαγωγή μελωδίας και τους λόγους επιλογής του αλγορίθμου που εν τέλει χρησιμοποιήθηκε.

8.3.1 Fast Fourier Transform (FFT)

Ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) είναι ένας αλγόριθμος που υπολογίζει τον διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT) μιας ακολουθίας ή τον αντίστροφό του. Η ανάλυση Fourier μετατρέπει ένα σήμα από το αρχικό του πεδίο, συνήθως από το πεδίο χρόνου, σε μια αναπαράσταση στο πεδίο της συχνότητας. Χρησιμοποιείται ευρέως στο πεδίο της επεξεργασίας σήματος και παρότι η κύρια χρήση του δεν είναι η εξαγωγή μελωδίας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξαχθεί η θεμελιώδης συχνότητα από κάθε frame του σήματος[38].



Εικόνα 8.11: Μετατροπή σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο συχνότητας με τον FFT.

Η μετατροπή του amplitude envelope στο φάσμα συχνοτήτων με τον αλγόριθμο FFT έγινε με τον εξής τρόπο:

Αρχικά, δημιουργήθηκε η συνάρτηση `get_frame`. Η συνάρτηση αυτή εξάγει ένα τμήμα (frame) του ηχητικού σήματος από μια δεδομένη θέση απομονώνοντας τα δείγματα ενδιάμεσα από την αρχική και τελική θέση ενός frame.

```
# calculating each frame of the audio file
def get_frame(index, hop=hop, frame=frame):
    start = hop * index
    end = start + frame
    frame_number = y[start:end]
    return frame_number
```

Εικόνα 8.12: Η συνάρτηση `get_frame`.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (FFT) για να μετατραπεί το frame του ηχητικού σήματος από το πεδίο χρόνου στο πεδίο συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `np.fft.fft(get_frame(1))`. Αυτός ο υπολογισμός παράγει το FFT του frame.

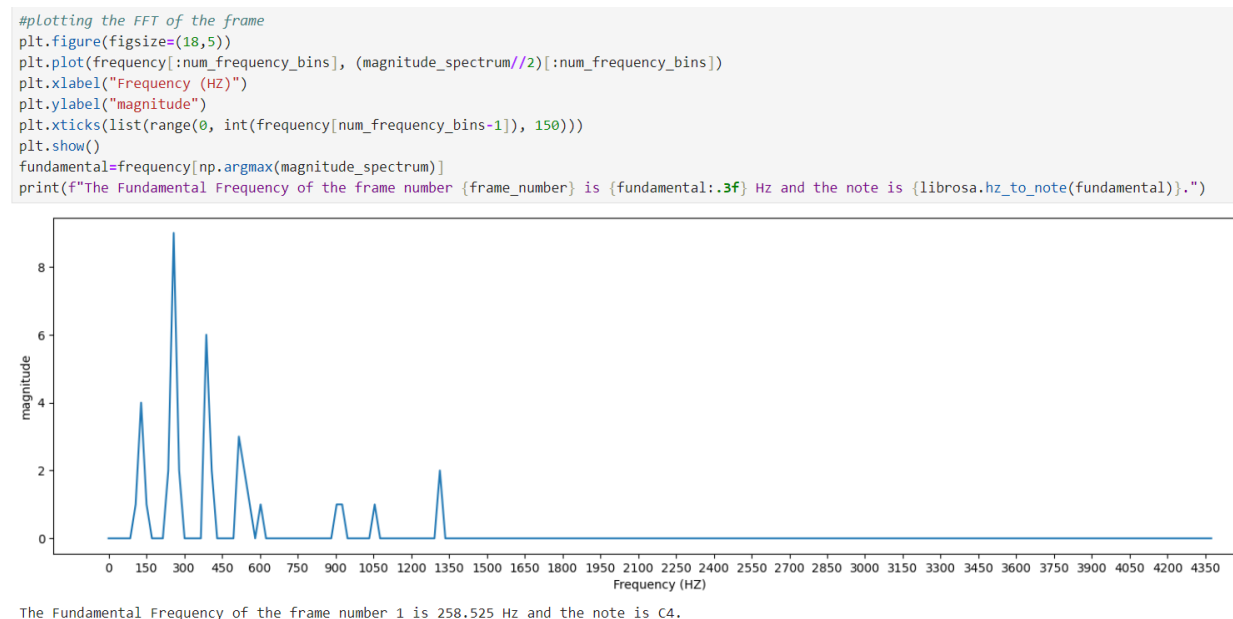
Αμέσως μετά, υπολογίζεται το magnitude spectrum του FFT για να προσδιοριστεί το πλάτος κάθε συχνότητας μέσω της συνάρτησης `np.abs(ft)`. Επίσης, η συνάρτηση `np.linspace(0, sr, len(magnitude_spectrum))` δημιουργεί μια σειρά ισόποσα κατανεμημένων τιμών μεταξύ 0 και του ρυθμού δειγματοληψίας `sr`. Ο κώδικας `int(len(frequency) * f_ratio)` χρησιμοποιείται για να εστιάσουμε σε ένα υποσύνολο bins του magnitude spectrum, με βάση την τιμή του `f_ratio`.

```
#calculating the fft algorithm
frame_number=1
f_ratio = 0.1

ft = np.fft.fft(get_frame(frame_number))
magnitude_spectrum = np.abs(ft)
frequency = np.linspace(0, sr, len(magnitude_spectrum))
num_frequency_bins = int(len(frequency)*f_ratio)
```

Εικόνα 8.13: Υπολογισμός του FFT.

Τέλος, η βιβλιοθήκη `matplotlib` χρησιμοποιείται για την οπτικοποίηση του FFT, και τα αποτελέσματα που προκύπτουν περιλαμβάνουν τον υπολογισμό της θεμελιώδους συχνότητας, η οποία μετατρέπεται στην αντίστοιχη μουσική νότα με τη βοήθεια της συνάρτησης `librosa.hz_to_note`.



Εικόνα 8.14: Οπτικοποίηση του FFT.

8.3.2 Short-Time Fourier Transform (STFT)

Το Short-Time Fourier Transform (STFT) είναι μια τεχνική που επεκτείνει τον κλασικό Μετασχηματισμό Fourier για να αναλύσει το περιεχόμενο συχνότητας ενός σήματος σε μικρά χρονικά διαστήματα. Σε αντίθεση με τον FFT, ο οποίος παρέχει μια συνολική εικόνα της συχνότητας για ολόκληρο το σήμα, το STFT μας επιτρέπει να εξετάσουμε πώς οι συνιστώσες συχνότητας ενός σήματος αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Αυτό τον καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανάλυση μη στάσιμων σημάτων, όπως μουσική ή ομιλία, όπου το φάσμα συχνοτήτων του σήματος μεταβάλλεται διαρκώς[38].

Ο συνδυασμός του STFT με την κλίμακα Mel, όπως γίνεται στα MFCCs, δημιουργεί ένα φασματογράφημα κλίμακας Mel (Mel-Spectrogram). Το Mel-Spectrogram εστιάζει κυρίως στις χαμηλότερες συχνότητες, γεγονός που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν ασχολούμαστε με τη θεμελιώδη συχνότητα (f_0) του σήματος, η οποία είναι η χαμηλότερη συχνότητα και το κύριο χαρακτηριστικό που θέλουμε να αναλύσουμε.

Η αναπαράσταση του STFT γίνεται με τον εξής κώδικα:

Αρχικά, χρησιμοποιείται η συνάρτηση `librosa.stft` για τον υπολογισμό του STFT του ηχητικού σήματος y . Στη συνέχεια, με τη συνάρτηση `np.abs(stft)` υπολογίζεται το Spectrogram, το οποίο οπτικοποιεί την ενέργεια του σήματος σε κάθε συχνότητα και χρονική στιγμή.

Στη συνέχεια η συνάρτηση `melspectrogram_plot` σχεδιάζει τη γραφική παράσταση του Mel-Spectrogram καθώς η τιμή του `y_axis` καθορίζει τον τύπο του άξονα y για την απεικόνιση των συχνοτήτων και έχει τεθεί σε "mel".

```

#calculating the stft algorithm
stft=librosa.stft(y,n_fft=frame,hop_length=hop)

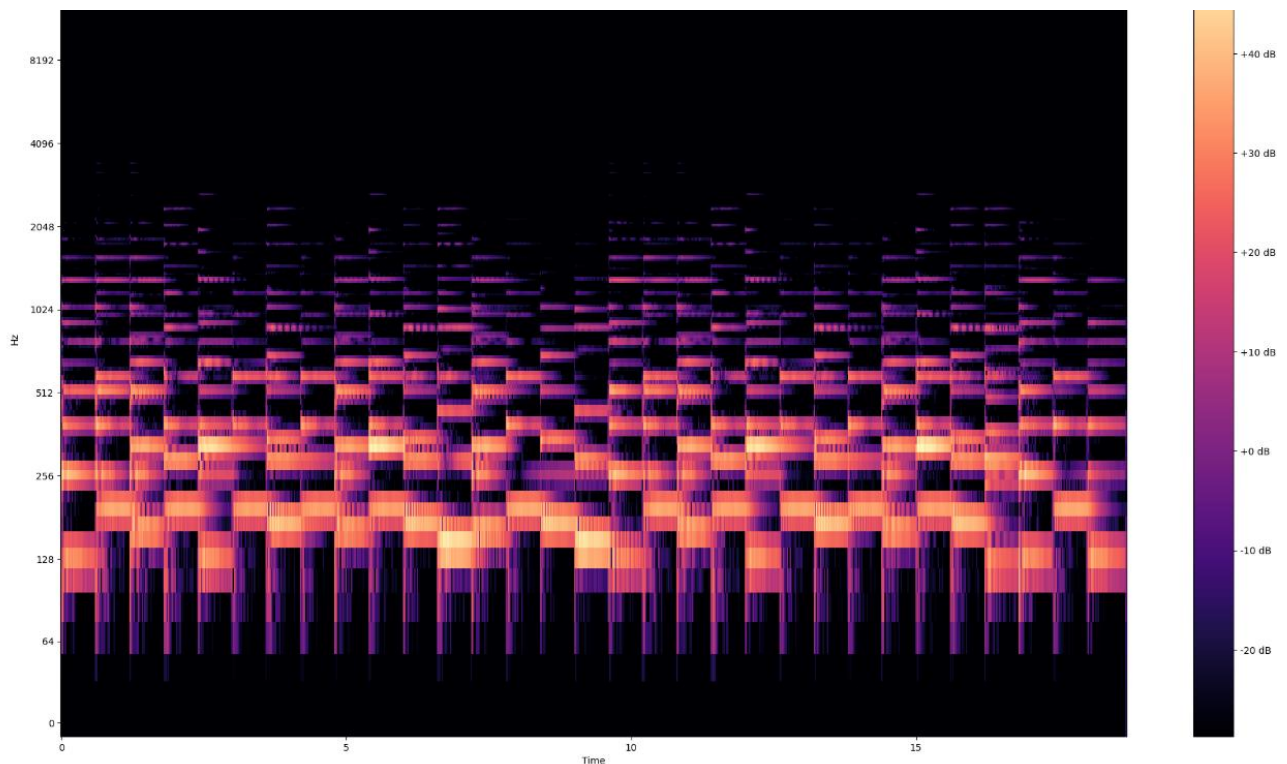
#calculating spectrogram
y_scale=np.abs(stft)**4

#melspectrogram
def melspectrogram_plot(Y,sr,hop_length, y_axis="mel"):
    plt.figure(figsize=(25,15))
    librosa.display.specshow(Y,
                             sr=sr,
                             hop_length=hop_length,
                             x_axis="time",
                             y_axis=y_axis)
    plt.colorbar(format="%+2.1f dB")

```

Εικόνα 8.15: Υπολογισμός του STFT και το Melspectrogram.

Παρακάτω φαίνεται η απεικόνιση του Mel-Spectrogram, όπου δεξιά βρίσκεται η κλίμακα των εντάσεων και χρωματισμένες φαίνονται οι ενέργειες συχνότητας με την πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 8.16: Απεικόνιση του Melspectrogram.

8.3.3 YIN και Probabilistic YIN (pYIN)

Οι YIN και pYIN είναι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση του τονικού ύψους (pitch detection), κυρίως στη μουσική και την επεξεργασία ηχητικού σήματος. Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν σχεδιαστεί ώστε να εκτιμούν τη θεμελιώδη συχνότητα ενός ήχου και είναι κατάλληλοι για την εκτίμηση της θεμελιώδους συχνότητας από μονοφωνικά σήματα ανθρώπινης φωνής.

Ωστόσο, ένα μειονέκτημα του αλγορίθμου YIN είναι ότι παρέχει μόνο μία εκτίμηση ανά frame, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα για πιο ευέλικτη ανάλυση του σήματος. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, ο αλγόριθμος pYIN επεκτείνει τον YIN ώστε να εξάγει πολλαπλές πιθανές εκτιμήσεις για

το τονικό ύψος, μαζί με τις σχετικές πιθανότητες για κάθε εκτίμηση. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει πιο ακριβή και προσαρμόσιμη ανάλυση του τονικού ύψους σε πιο σύνθετα ή ασαφή ηχητικά σήματα[53].

Ο παρακάτω κώδικας υλοποιεί μια συνάρτηση `pyin` που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο `pYIN` της βιβλιοθήκης `librosa` για την εκτίμηση της f_0 του ηχητικού σήματος. Αρχικά, η συνάρτηση `librosa.pyin` εφαρμόζεται στο ηχητικό σήμα y για να εκτιμήσει τη θεμελιώδη συχνότητα f_0 στο εύρος συχνοτήτων ενδιάμεσα του f_{min} και του f_{max}

Στη συνέχεια, οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου `pYIN` όπου η συνάρτηση `librosa.amplitude_to_db` υπολογίζει το Short-Time Fourier Transform (STFT) του σήματος y και το μετατρέπει σε κλίμακα ντεσιμπέλ (dB) και η συνάρτηση `librosa.display.specshow` εμφανίζει το φασματογράφημα.

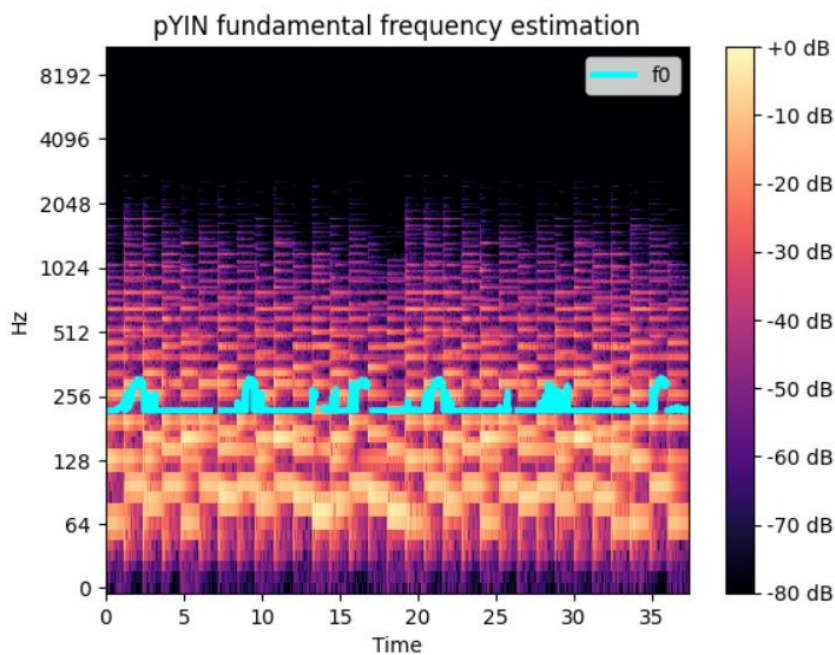
```
#pYIN algorithm
def pyin(y):
    f0, voiced_flag, voiced_probs = librosa.pyin(y,
                                                  fmin=librosa.note_to_hz('A3'),
                                                  fmax=librosa.note_to_hz('C6'))

    pyin_times = librosa.times_like(f0)
    return f0, voiced_flag, voiced_probs, pyin_times

#plotting the pYIN algorithm
def plot_pyin(y, f0, voiced_flag, voiced_probs, pyin_times):
    D = librosa.amplitude_to_db(np.abs(librosa.stft(y)), ref=np.max)
    fig, ax = plt.subplots()
    img = librosa.display.specshow(D, x_axis='time', y_axis='log', ax=ax)
    ax.set(title='pYIN fundamental frequency estimation')
    fig.colorbar(img, ax=ax, format="%+2.1f dB")
    ax.plot(pyin_times, f0, label='f0', color='cyan', linewidth=3)
    ax.legend(loc='upper right')
```

Εικόνα 8.17: Η συνάρτηση του αλγορίθμου `pYIN` και ο κώδικας του φασματογράμματος.

Παρακάτω φαίνεται το spectrogram και με υπογραμμισμένο αναπαρίστανται οι τιμές της θεμελιώδους συχνότητας που εντοπίστηκαν από τον αλγόριθμο `pYIN`.



Εικόνα 8.18: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου `pYIN`.

8.3.4 Constant-Q Transform (CQT)

Το Constant-Q Transform (CQT) είναι μια τεχνική ανάλυσης χρόνου-συχνότητας που προσφέρει μια αναπαράσταση ενός ηχητικού σήματος με λογαριθμικά καταναμημένα διαστήματα συχνοτήτων. Έτσι, προσομοιάζει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται τις νότες και τις μουσικές κλίμακες. Στον CQT αλγόριθμο, τα διαστήματα συχνοτήτων, γνωστά και ως "frequency bins", είναι γεωμετρικά καταναμημένα, και οι παράγοντες Q (Q-factors) είναι ίσοι για όλα τα διαστήματα[54].

Τα frequency bins είναι τα διαστήματα μέσα στα οποία χωρίζεται το φάσμα συχνοτήτων κατά την ανάλυση ενός ηχητικού σήματος. Το σταθερό Q-Factor δηλώνει ότι η σχέση μεταξύ της κεντρικής συχνότητας κάθε bin και του εύρους ζώνης της παραμένει ίδια για όλες τις συχνότητες. Αυτό επιτρέπει στον CQT να διανέμει τα frequency bins με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις χαμηλές συχνότητες, κάτι που βελτιώνει την ανάλυση στις χαμηλότερες περιοχές του φάσματος και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην εξαγωγή μελωδίας.

Το CQT χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές στον κλάδο του MIR, όπως στην ανίχνευση νοτών, την ανάλυση αρμονικού περιεχομένου, καθώς και σε άλλες εργασίες επεξεργασίας ηχητικού σήματος. Πέρα από τον εντοπισμό των θεμελιωδών συχνοτήτων, από τα αποτελέσματα του CQT μπορούν να εξαχθούν και άλλες χρήσιμες πληροφορίες, όπως οι εντάσεις (amplitudes) των νοτών, γεγονός που καθιστά τον αλγόριθμο ιδιαίτερα χρήσιμο.

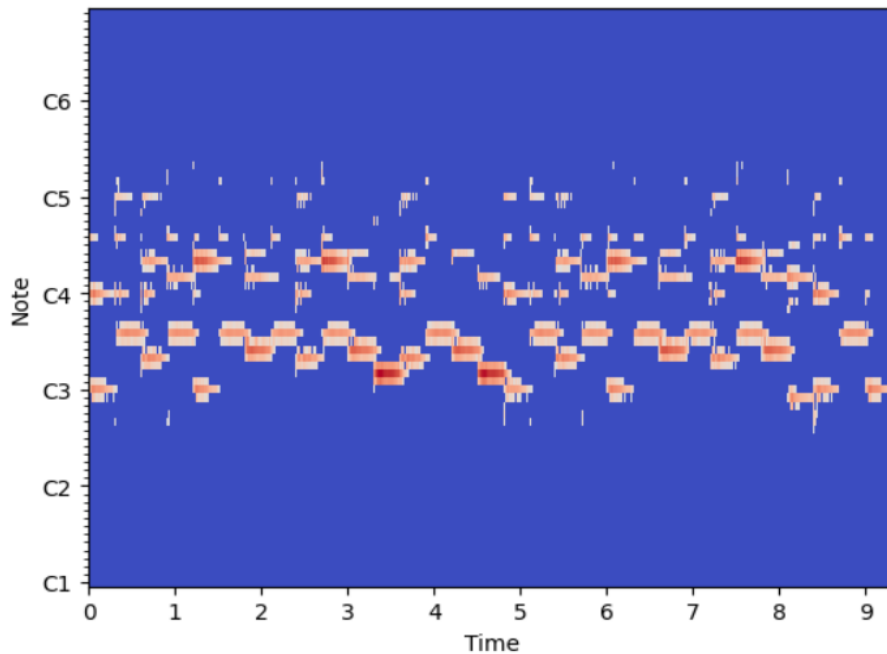
Στο παρακάτω κομμάτι κώδικα εκτελείται ο αλγόριθμος CQT για ένα ηχητικό σήμα, όπου επεξεργάζεται τα δεδομένα του για να τονίσει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, και στη συνέχεια οπτικοποιεί τα αποτελέσματα.

Αρχικά, με τη συνάρτηση `librosa.cqt(y, sr=sr, hop_length=hop, fmin=None, n_bins=72)` υπολογίζεται ο CQT αλγόριθμος. Το 72 θεωρείται ένας καλός αριθμός για τα frequency bins, καθώς παρέχει επαρκή ανάλυση για 6 μουσικές οκτάβες και προσφέρει μια καλή ισορροπία μεταξύ ανάλυσης και απόδοσης.

Στη συνέχεια, το `librosa.magphase` διαχωρίζει το φάσμα πλάτους από το φάσμα φάσης και απομονώνει μόνο το φάσμα πλάτους και το `librosa.amplitude_to_db` μετατρέπει το φάσμα πλάτους σε Decibel. Στο κομμάτι κώδικα `new_cqt[new_cqt < -61] = -120` τονίζονται οι σημαντικότερες εντάσεις και οι πολύ χαμηλές εξαλείφονται από το σήμα. Τέλος χρησιμοποιείται το `librosa.display.specshow` για να οπτικοποιηθεί το φασματογράφημα CQT.

```
#CQT Parameters
C = librosa.cqt(y, sr=sr, hop_length=hop, fmin=None, n_bins=72)
C_mag = librosa.magphase(C)[0]**4
CdB = librosa.amplitude_to_db(C_mag, ref=np.max)
new_cqt=np.copy(CdB)
new_cqt[new_cqt<-61]=-120
librosa.display.specshow(new_cqt, sr=sr, x_axis='time', y_axis='cqt_note', fmin=None, cmap='coolwarm')

<matplotlib.collections.QuadMesh at 0x2101a4830b0>
```



Εικόνα 8.19: Κώδικας και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του CQT.

Παρακάτω φαίνεται η αντιστοίχιση των frequency bins με τις συχνότητες του καθενός χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `librosa.cqt_frequencies`. Παίρνοντας ένα τυχαίο frequency bin μπορούμε να δούμε σε ποια νότα αντιστοιχεί. Για παράδειγμα το frequency bin με αριθμό 45 αντιστοιχεί στην νότα A4.

```
# Frequency Bins
cqt_bins=librosa.cqt_frequencies(n_bins=72, fmin=librosa.note_to_hz('C1'), bins_per_octave=12)
print(cqt_bins)
print("-----")
print(f" Frequency bin number 45 is {cqt_bins[45]:2f} Hz which is the note {librosa.hz_to_note(cqt_bins[45])}.")

[ 32.70319566  34.64782887  36.70809599  38.89087297  41.20344461
 43.65352893  46.24930284  48.9994295   51.9130872   55.
 58.27047019  61.73541266  65.40639133  69.29565774  73.41619198
 77.78174593  82.40688923  87.30705786  92.49860568  97.998859
103.82617439 110.
116.54094038 123.47082531 130.81278265
138.59131549 146.83238396 155.56349186 164.81377846 174.61411572
184.99721136 195.99771799 207.65234879 220.
233.08188076
246.94165063 261.6255653  277.18263098 293.66476792 311.12698372
329.62755691 349.22823143 369.99442271 391.99543598 415.30469758
440.
466.16376152 493.88330126 523.2511306  554.36526195
587.32953583 622.25396744 659.25511383 698.45646287 739.98884542
783.99087196 830.60939516 880.
932.32752304 987.76660251
1046.5022612 1108.73052391 1174.65907167 1244.50793489 1318.51022765
1396.91292573 1479.97769085 1567.98174393 1661.21879032 1760.
1864.65504607 1975.53320502]

-----
Frequency bin number 45 is 440.000000 Hz which is the note A4.
```

Εικόνα 8.20: Τα Frequency bins του CQT.

Τα αποτελέσματα του CQT έχουν τη μορφή ενός πίνακα που περιέχει κάθε συχνότητα των frequency bins και τις εντάσεις τους. Έτσι, κρατώντας το frequency bin με την μεγαλύτερη ένταση, μπορούμε να βρούμε τη κύρια συχνότητα από κάθε frame, και συνεπώς τη νότα, καθώς και να απομονώσουμε την έντασή του. Αξίζει να σημειωθεί ότι στον τομέα της τεχνολογίας ήχου το σημείο αναφοράς που έχει τεθεί για την μέγιστη ένταση είναι τα 0 dB και όλες οι υπόλοιπες τιμές των εντάσεων έχουν αρνητικές τιμές. Την ίδια λογική ακολουθεί και ο αλγόριθμος CQT.

Στο παρακάτω κομμάτι κώδικα πρόκειται για την εξαγωγή νότας από το πρώτο frame του σήματος:

Αρχικά, εκτυπώνονται τα frequency bins του πρώτου frame με την εντολή `print(new_cqt.T[1])`. Έπειτα με την εντολή `np.argsort(new_cqt.T[1])[-1]` ταξινομείται ο πίνακας και απομονώνεται το στοιχείο με τη μεγαλύτερη ένταση και με αυτό τον τρόπο βρίσκουμε τον αριθμό του frequency bin.

Έχοντας τον αριθμό του frequency bin βρίσκουμε ποια συχνότητα ανήκει στο συγκεκριμένο frequency bin και στη συνέχεια τη μετατρέπουμε σε νότα. Τέλος, με τον κώδικα `new_cqt.T[1][freq_bin]`, όπου δίνουμε σαν όρισμα τον αριθμό του frequency bin μπορούμε να απομονώσουμε την ένταση.

```
#Extracting the note and the volume of the first frame using the CQT algorithm
print(new_cqt.T[1])
freq_bin= np.argsort(new_cqt.T[1])[-1]
cqt_note=librosa.hz_to_note(cqt_freqs[freq_bin])
volume=new_cqt.T[1][freq_bin]
print("-----")
print(f"The Frequency Bin with the highest volume is bin number {freq_bin} which is the note {cqt_note} and its volume is {volume:.3f} dB.")

[ -120.    -120.    -120.    -120.    -120.    -120.
  -120.    -120.    -120.    -120.    -120.    -120.
  -120.    -120.    -120.    -120.    -120.    -120.
  -120.    -120.    -57.20222 -120.    -120.    -120.
  -49.823315 -120.    -120.    -120.    -120.    -120.
  -120.    -120.    -120.    -120.    -120.    -27.77982
  -13.878468  -33.478065 -120.    -120.    -120.    -120.
  -120.    -51.85968  -120.    -120.    -120.    -120.
  -120.    -120.    -120.    -120.    -120.    -120.
  -120.    -120.    -120.    -120.    -120.    -120.
  -120.    -120.    -120.    -120.    -120.    -120.
  -120.    -120.    -120.    -120.    -120.    -120. ]

-----
The Frequency Bin with the highest volume is bin number 36 which is the note C4 and its volume is -13.878 dB.
```

Εικόνα 8.21: Εξαγωγή της νότας και έντασης του πρώτου frame μέσω του CQT.

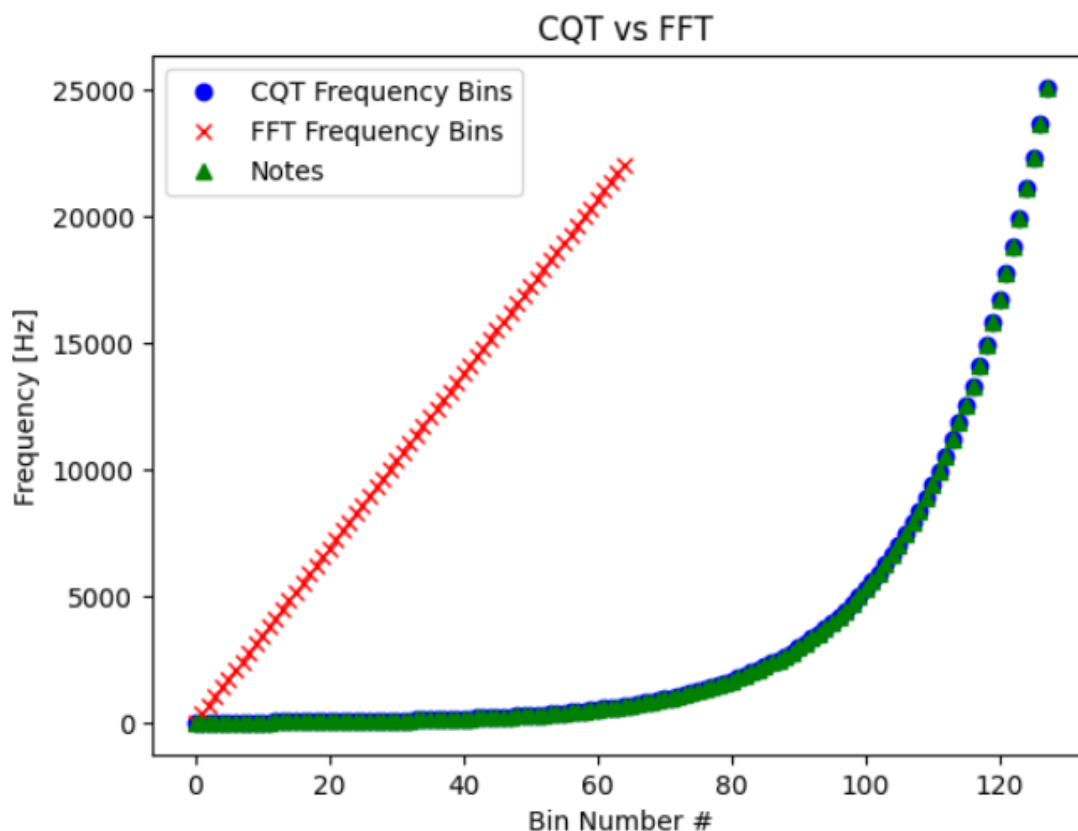
8.4 Επιλογή Αλγορίθμων

Έπειτα από λεπτομερή ανάλυση των αλγορίθμων που εξετάστηκαν, το συμπέρασμα που προέκυψε είναι ότι ο αλγόριθμος CQT (Constant-Q Transform) είναι ο καταλληλότερος για την εξαγωγή μελωδίας στα κομμάτια που επιλέχθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

Ο CQT υπερτερεί συγκριτικά με τους FFT, STFT και pYIN καθώς είναι καλύτερα προσαρμοσμένος για την αναγνώριση της μελωδίας και την ανάλυση του ηχητικού σήματος λόγω της λογαριθμικής κλιμάκωσης των συχνοτήτων, του σταθερού Q-factor, προσφέροντας έτσι υψηλότερη ανάλυση στις χαμηλές συχνότητες. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό επειδή οι χαμηλότερες συχνότητες συνήθως περιέχουν τις θεμελιώδεις συχνότητες που είναι καθοριστικές για την αναγνώριση της μελωδίας.

Σε αντίθεση με τον FFT και τον STFT, όπου τα frequency bins κατανέμονται γραμμικά, στον CQT κατανέμονται λογαριθμικά. Αυτό σημαίνει ότι οι χαμηλότερες συχνότητες λαμβάνουν μεγαλύτερη ανάλυση, κάτι που επιτρέπει την ακριβέστερη και αξιόπιστη εξαγωγή μελωδίας. Επίσης, ο αλγόριθμος CQT έχει προοπτικές για εξέλιξη και προσαρμογή του κώδικα για την αναγνώριση μελωδίας σε πιο σύνθετα κομμάτια και για την εξαγωγή πολλαπλών νοτών ταυτόχρονα, όπως θα εξεταστεί στο επόμενο κεφάλαιο. Ακόμη, σημαντικό πλεονέκτημα του CQT είναι η δυνατότητα εξαγωγής και των εντάσεων κάθε νότας. Τέλος, ο αλγόριθμος pYIN, αν και αποδίδει καλά στη φωνή, παρουσιάζει αστάθεια σε όργανα όπως το πιάνο και η κιθάρα. Συνολικά, τα χαρακτηριστικά του CQT τον καθιστούν την καλύτερη επιλογή για την ανάλυση μουσικών κομματιών στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Στο παρακάτω σχήμα, συγκρίνεται ο τρόπος που ταξινομούνται τα frequency bins στον CQT και στον FFT αλγόριθμο. Σε αντίθεση με τον παραδοσιακό Μετασχηματισμό Fourier (FFT), όπου τα διαστήματα συχνότητας είναι ισομερώς κατανεμημένα, ο CQT κατανέμει τα διαστήματα συχνότητας λογαριθμικά. Αυτό σημαίνει ότι οι χαμηλότερες συχνότητες έχουν μεγαλύτερη ανάλυση, καθώς αντιστοιχούν σε μικρότερα frequency bins, ενώ οι υψηλότερες συχνότητες έχουν μικρότερη ανάλυση. Όπως φαίνεται και στο σχεδιάγραμμα, ο τρόπος ταξινόμησης των frequency bins, συνάπτει συχνοτικά με τις συχνοτικές περιοχές όπου βρίσκονται και οι νότες.



Εικόνα 8.22: Η κατάτμηση των frequency bins στον FFT και CQT.

Κεφάλαιο 9ο: Διεξαγωγή Πειράματος

9.1 Εισαγωγή

Αξιοποιώντας τις τεχνικές ανάλυσης ήχου που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, το παρόν κεφάλαιο εμβαθύνει στη διαδικασία εξαγωγής μελωδίας από ηχητικά αρχεία. Αρχικά, περιγράφεται η ανίχνευση των νοτών από το ηχητικό σήμα, μια διαδικασία που απαιτεί ακρίβεια και ευαισθησία για να αποτυπωθεί πιστά η μουσική πληροφορία. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά μετατρέπονται σε μορφή MIDI, δίνοντας τη δυνατότητα ηχητικού ελέγχου και περαιτέρω επεξεργασίας. Τέλος, το πρόγραμμα επιτρέπει την εκτύπωση της παρτιτούρας της μελωδίας, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη οπτική απεικόνιση και ανάλυση του μουσικού κομματιού.

9.2 Εξαγωγή Μελωδίας

Συνδυάζοντας τις γνώσεις που αποκομίσαμε από τα προηγούμενα κεφάλαια, το πρώτο βήμα είναι η εξαγωγή της μελωδίας από κάθε μουσικό κομμάτι. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται σε δύο ξεχωριστά αρχεία, το Piano Melody Extraction.ipynb για το πιάνο και το Guitar Melody Extraction.ipynb για την κιθάρα. Καθώς ο κώδικας είναι κατά κύριο λόγο κοινός και στα δύο αρχεία, τα παραδείγματα που θα παρουσιάσουμε θα επικεντρωθούν στην εξαγωγή μελωδίας για το πιάνο. Τυχόν διαφοροποιήσεις για την κιθάρα θα επισημαίνονται όπου είναι απαραίτητο.

9.2.1 Εισαγωγή Βιβλιοθηκών και Αρχικοποίηση των Παραμέτρων

Αρχικά, το πρώτο βήμα περιλαμβάνει την εισαγωγή των απαραίτητων βιβλιοθηκών, όπως φαίνεται στο παρακάτω τμήμα του κώδικα. Αμέσως μετά, γίνεται η αρχικοποίηση των παραμέτρων, όπως ο αριθμός των δειγμάτων ανά frame, το μήκος του hop, και ο αριθμός των frequency bins.

```
#Importing the libraries
import matplotlib.pyplot as plt
import IPython.display as ipd
import librosa, librosa.display
import numpy as np
import xlwt

# Parameters for Signal Processing
frames = 1024 # length of each frame
hop_length = int(frames/2) # Number of samples between successive frames
n_bins = 72 # Number of frequency bins
```

Εικόνα 9.1: Εισαγωγή βιβλιοθηκών και αρχικοποίηση παραμέτρων.

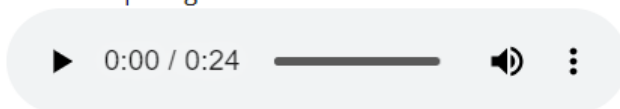
9.2.2 Φόρτωση του Κομματιού

Στη συνέχεια, με τη συνάρτηση `librosa.load` γίνεται η εκφόρτωση του WAV αρχείου του κομματιού, η οποία επιστρέφει τα δεδομένα x της ηχητικής χρονοσειράς και τον ρυθμό δειγματοληψίας sr . Στην προκειμένη περίπτωση το τραγούδι που φορτώθηκε πρόκειται για το Au Clair de la Lune για πιάνο. Έπειτα, με τη χρήση του `ipd.Audio` μπορούμε να ακούσουμε το κομμάτι.

```
# Loading audio file
song_name= "Au Clair de la Lune"
filename = f"piano/{song_name}.wav"
x, sr = librosa.load(filename, sr=None, mono=True)
print(f"The Sampling Rate is: {sr}")

# Playback audio file
ipd.Audio(x, rate=sr)
```

The Sampling Rate is: 44100



Εικόνα 9.2: Φόρτωση και ακρόαση του κομματιού.

9.2.3 Κόψιμο και Κανονικοποίηση των δεδομένων

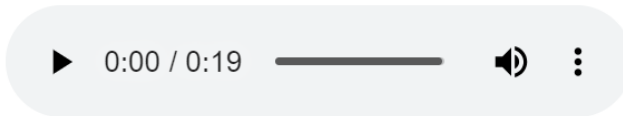
Η βιβλιοθήκη `librosa` προσφέρει τη συνάρτηση `librosa.effects.trim`, η οποία αποκόπτει τα τμήματα "σιωπής" από το αρχείο ήχου, χρησιμοποιώντας τη μέση RMS τιμή του σήματος. Αυτό γίνεται όταν η ένταση του σήματος πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο, το οποίο ορίζεται μέσω της μεταβλητής `top_db`.

Επιπλέον, η `librosa` παρέχει τη συνάρτηση `librosa.util.normalize`, η οποία κανονικοποιεί τις τιμές του σήματος σε έναν συγκεκριμένο άξονα, διασφαλίζοντας έτσι μια ομοιόμορφη κατανομή των τιμών. Τέλος, για να επιβεβαιώσουμε την αποτελεσματικότητα αυτών των διαδικασιών, μπορούμε να ακούσουμε ξανά το επεξεργασμένο αρχείο ήχου, που πλέον είναι `trimmed` και `normalized`.

```
#Trimming the Audio
trimmed_y, _ = librosa.effects.trim(x, top_db=20)

# Normalizing the Data
y = librosa.util.normalize(trimmed_y, axis=0)

#Listening to the Trimmed and Normalized file
ipd.Audio(y, rate=sr)
```



Εικόνα 9.3: Κόψιμο, κανονικοποίηση και ακρόαση του κομματιού.

9.2.4 Οι παράμετροι CQT και τα Frequency Bins

Οι παράμετροι του αλγορίθμου CQT καθορίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως στο παράδειγμα του κώδικα που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έπειτα, δημιουργείται ένας καινούριος πίνακας `new_cqt` στον οποίο εφαρμόζεται ένα κατώφλι στα -61 dB. Οι τιμές που βρίσκονται κάτω από το κατώφλι τίθενται στην χαμηλότερη ένταση του πίνακα η οποία ορίζεται ως τα -120 dB. Με αυτό τον τρόπο γίνεται ο καθαρισμός των δεδομένων που έχουν πολύ χαμηλή ένταση και μπορούν να θεωρηθούν ως θόρυβος.

Τέλος, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `librosa.cqt_frequencies`, καθορίζονται τα frequency bins σύμφωνα με την τιμή που έχουμε ορίσει στη μεταβλητή `n_bins`. Στην προκειμένη περίπτωση, ο αριθμός των frequency bins είναι 72.

```
#CQT Parameters
C = librosa.cqt(y, sr = sr, hop_length = hop_length, fmin = None, n_bins = n_bins)
C_mag = librosa.magphase(C)[0]**4
CdB = librosa.amplitude_to_db(C_mag, ref = np.max)
```

```
#Clearing the data if the threshold is -61
new_cqt = np.copy(CdB)
new_cqt[new_cqt<-61] = -120
```

```
#Frequency Bins
cqt_freqs = librosa.cqt_frequencies(n_bins = n_bins, fmin = librosa.note_to_hz('C1'), bins_per_octave = 12)
```

Εικόνα 9.4: Οι CQT παράμετροι, καθαρισμός δεδομένων και τα Frequency Bins.

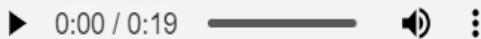
9.2.5 Εντοπισμός των Onset

Παρακάτω παρουσιάζεται η διαδικασία εύρεσης των onset, ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία όπως στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά, δημιουργούμε το onset strength envelope χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `librosa.onset.onset_strength`. Στη συνέχεια, εντοπίζουμε τα frames όπου συμβαίνει κάποιο onset με τη βοήθεια της συνάρτησης `librosa.onset_detect`, και τις χρονικές στιγμές που αυτά τα onsets εμφανίζονται μέσω της `librosa.frames_to_time`.

Τέλος, για να επιβεβαιώσουμε τον εντοπισμό των onsets, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη συνάρτηση `librosa.clicks`, η οποία παράγει ήχους "κλικ" στις χρονικές στιγμές που ανιχνεύθηκαν τα onsets, επιτρέποντας μας να τα ακούσουμε μέσα στο κομμάτι.

```
# Finding the Onset Frames and Onset Times
onset_env = librosa.onset.onset_strength(y=y, sr=sr)
onset_frames = librosa.onset.onset_detect(onset_envelope=onset_env,
                                         sr=sr, units='frames',
                                         hop_length=hop_length,
                                         backtrack=False)
onset_times = librosa.frames_to_time(onset_frames, sr=sr, hop_length=hop_length)

# Listening to the Onsets
clicks = librosa.clicks(frames=onset_frames, sr=sr, length=len(y))
ipd.Audio(y+clicks, rate=sr)
```



Εικόνα 9.5: Εντοπισμός και ακρόαση των onset.

9.2.6 Εύρεση των νοτών και των εντάσεών τους

Αυτό το κομμάτι του κώδικα είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς σε αυτό γίνεται η εξαγωγή μελωδίας. Ο σκοπός της συνάρτησης είναι να επιστρέψει δύο πίνακες: έναν με τις νότες (notes) και έναν με τις εντάσεις τους (volumes). Η λογική πίσω από τη συνάρτηση βασίζεται στον υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών έντασης που υπάρχουν μεταξύ κάθε onset. Αυτοί οι μέσοι όροι αποθηκεύονται σε έναν πίνακα με το όνομα `avg`. Αφού υπολογιστεί ο πίνακας με τους μέσους όρους, η πιο δυνατή τιμή αυτού του πίνακα μπορεί να αποθηκευτεί, αντιπροσωπεύοντας την κύρια νότα της μελωδίας, ειδικά σε περιπτώσεις μονοφωνικού ήχου με μία μόνο νότα.

Η διαδικασία θα ήταν σχετικά απλή αν τελείωνε εκεί πέρα. Ωστόσο, γίνεται αρκετά πιο περίπλοκη λόγω της παρουσίας ταυτόχρονων νοτών μπάσου και μελωδίας στα επιλεγμένα τραγούδια. Έτσι, πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος για την εξαγωγή της δεύτερης νότας και τον διαχωρισμό των νοτών αυτών από το υπόλοιπο ηχητικό περιβάλλον. Έτσι, με τον κατάλληλο χειρισμό των δυνατοτήτων του αλγορίθμου CQT καθίσταται δυνατή η απομόνωση της δεύτερης δυνατότερης νότας με αρκετά μεγάλη ακρίβεια, έπειτα από φιλτράρισμα των αρμονικών και των γειτονικών νοτών.

Στη συνάρτηση `find_notes` ακολουθεί η διαδικασία εύρεσης των νοτών. Η συνάρτηση αυτή δέχεται σαν παραμέτρους τα `frames` που εντοπίστηκαν τα `onset` (`onset_frames`), έναν πίνακα με τις τιμές του CQT αλγορίθμου (CdB), ένα κατώφλι έντασης (`threshold`) και ένα κατώφλι για τις αρμονικές με προκαθορισμένη τιμή 4 (`harmonic_thresh=4`).

Πρωτίστως, αρχικοποιούνται οι κενές λίστες `notes` και `volumes` και η λίστα `onsets` στην οποία αντιγράφεται η λίστα των `onset_frames`. Ακόμη, προστίθεται ένα επιπλέον στοιχείο στο τέλος της λίστας, που αντιστοιχεί στον συνολικό αριθμό των `frames`, το οποίο παίρνουμε μέσω του `len(CdB.T)`.

Έπειτα, δημιουργείται μια δομή επανάληψης `for`, η οποία διατρέχει κάθε `frame` που έχει `onset`, εκτός από το τελευταίο. Για να υπολογιστεί ο μέσος όρος των `frames` που παρεμβάλλονται, αρχικοποιούνται δύο τιμές: η `start`, που παίρνει την τιμή του τρέχοντος `onset frame`, και η `end`, που ορίζεται ως το μικρότερο μεταξύ του επόμενου `onset frame` και των επόμενων 30 `frames`. Αυτό το όριο των 30 `frames` χρησιμοποιείται για να διασφαλιστεί ότι η ένταση της κύριας νότας δεν μειώνεται σημαντικά αν υπάρχει μεγάλο διάστημα μέχρι την ανίχνευση του επόμενου `frame`.

Στη συνέχεια, εντοπίζεται η μέγιστη ένταση και από αυτή εξάγεται το αντίστοιχο `frequency bin`, δηλαδή η νότα με τη μέγιστη ένταση. Επιπλέον, δημιουργείται ένα δυναμικό κατώφλι για κάθε `onset`, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τον καθορισμό του αριθμού επαναλήψεων που θα προκύψουν στην δομή επανάληψης `while` που ακολουθεί.

Η λούπα `while`, η οποία θα εκτελεστεί τουλάχιστον μία φορά λόγω της μεταβλητής `first_note = True`, συνεχίζει να εκτελείται όσο οι νότες που ανιχνεύονται υπερβαίνουν το δυναμικό κατώφλι έντασης. Αυτό γίνεται για να εξασφαλιστεί ότι οι πολύ αδύναμες νότες δεν συμπεριλαμβάνονται στα τελικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, γίνεται το φιλτράρισμα των γειτονικών νοτών, καθώς διαπιστώθηκε μέσω πειραμάτων ότι αυτές τείνουν να έχουν υψηλή ένταση και μπορούν να επηρεάσουν τα αποτελέσματα. Επιπλέον, φιλτράρονται και οι πρώτες αρμονικές κάθε νότας, δηλαδή η οκτάβα, καθώς και αυτές τείνουν να έχουν υψηλή ένταση, ώστε να διαπιστωθεί αν όντως παίζονται δύο νότες με διαφορεά οκτάβας, ή αν ο αλγόριθμος έχει εντοπίσει την αρμονική της νότας.

Τέλος, έπειτα από το φιλτράρισμα των τιμών που επιστρέφονται από τον πίνακα `avg`, η συνάρτηση επιστρέφει τους πίνακες `notes` και `volumes` με τα αποτελέσματα, τα οποία περιέχουν τις κύριες νότες και τις αντίστοιχες εντάσεις τους.

Παρακάτω φαίνεται ο κώδικας της συνάρτησης `find_notes`:

```
# Extracting the notes and Volumes
def find_notes(onset_frames, CdB, threshold, harmonic_thresh=4):
    notes = [] , volumes = []
    onsets = list(onset_frames.copy())
    onsets.append(len(CdB.T))

    for i in range(len(onsets)-1):                # Loop that iterates through each onset
        notes.append([])
        volumes.append([])

        start = onsets[i]
        end=min(start + 30 , onsets[i+1])
        avg = np.copy(CdB.T[start])

        for array in CdB.T[start+1:end]:        # Loop that finds the average volumes for each freq bin
            avg += array
        avg /= (end-start)

        max_volume = max(avg)                   # finding the freq bin through its max volume
        frequency_bin = np.argmax(avg)
        note = librosa.hz_to_note(cqt_freqs[frequency_bin]) # finding the note through the frequency bin
        dynamic_threshold = max_volume - (120 + max_volume) * threshold

        first_note = True
        is_harmonic = False
        notes_to_db = {}

        while max_volume > dynamic_threshold or first_note: # adding the notes and volumes in notes[] and volumes[]
            first_note = False                       # filtering out the neighbour notes
                                                    # determining if the first harmonic(octave) is actually played or
                                                    # if it is Loud because it is a harmonic

            if not is_harmonic:
                notes[-1].append(note)
                volumes[-1].append(max_volume)      # the notes and volumes are added in notes[] and volumes[] here
                notes_to_db[note] = avg[frequency_bin]
                is_harmonic = False

            if frequency_bin > 0 :                   # filtering the neighbouring notes
                avg[frequency_bin-1] = -120
            if frequency_bin < len(cqt_freqs)-1:
                avg[frequency_bin+1] = -120
            avg[frequency_bin] = -120

            frequency_bin = np.argmax(avg)
            max_volume = max(avg)
            note = librosa.hz_to_note(cqt_freqs[frequency_bin])

            f0 = librosa.hz_to_note(cqt_freqs[frequency_bin-12]) # filtering the harmonic notes
            if cqt_freqs[11] < cqt_freqs[frequency_bin] and f0 in notes[-1] and max_volume < notes_to_db[f0] - harmonic_thresh:
                is_harmonic = True

    return notes, volumes
```

Εικόνα 9.6: Ο κώδικας της συνάρτησης `find_notes`.

Στο κομμάτι κώδικα που ακολουθεί γίνεται η επιστροφή των τιμών της συνάρτησης σε όνομα με μεταβλητές `cqt_notes` και `volumes`. Σαν ορίσματα δίνονται τα `onset_frames` που βρέθηκαν, τον φιλτραρισμένο πίνακα `new_cqt`, και θέτουμε το κατώφλι στην τιμή 0.3.

```
cqt_notes, volumes = find_notes(onset_frames, new_cqt, 0.3)
```

Εικόνα 9.7: Κλήση της συνάρτησης `find_notes`.

Τα αποτελέσματα που επιστράφηκαν από τη συνάρτηση έχουν τη μορφή εμφωλευμένων λιστών. Με τη σύγκριση των τιμών τους βλέπουμε ότι σε κάθε νότα που βρέθηκε αντιστοιχεί η κατάλληλη ένταση.

cqt_notes	volumes
['C4', 'C3'],	[-30.336336, -30.358715],
['G3', 'C4'],	[-31.131641, -47.356056],
['E3', 'C4', 'C5'],	[-27.519068, -49.700268, -53.22848],
['G3', 'D4'],	[-33.741848, -36.87655],
['E4', 'C3'],	[-15.857298, -28.991615],
['G3'],	[-32.555405],
['F3', 'D4'],	[-20.177921, -40.19874],
['G3'],	[-33.001785],
['E3', 'C4'],	[-29.44893, -46.24102],
['E4', 'G3'],	[-12.691031, -32.715996],
['F3', 'D4'],	[-19.897938, -41.526833],
['D3'],	[-4.5320783],
['E3', 'C4'],	[-26.315495, -47.49682],
['G3'],	[-29.73615],
['F3'],	[-18.351875],
['D3'],	[-5.9660707],
['C4', 'C3'],	[-29.784868, -37.44218],
['G3', 'C4'],	[-31.775074, -54.08024],
['E3'],	[-27.017569],
['G3', 'D4'],	[-35.022697, -37.348522],
['E4', 'C3'],	[-15.894696, -28.758291],
['G3'],	[-30.34463],
['F3', 'D4'],	[-17.943657, -40.85695],
['G3'],	[-32.103447],
['E3', 'C4'],	[-29.497387, -51.3393],
['E4', 'G3'],	[-10.656291, -32.74124],
['F3', 'D4'],	[-19.630442, -40.61721],
['D4', 'B2'],	[-33.20999, -35.836742],
['C4', 'C3'],	[-26.466282, -31.30008],
['G3'],	[-30.228516],
['C3']]	[-28.605562]]

Εικόνα 9.8: Τα αποτελέσματα της συνάρτησης find_notes.

Ωστόσο, όπως φαίνεται και από την τρίτη γραμμή των αποτελεσμάτων, μπορούν να υπάρχουν παραπάνω από δύο στοιχεία στην γραμμή της λίστας. Για αυτό ακολουθεί μια συνάρτηση που απομονώνει μόνο τα δύο πρώτα στοιχεία με όνομα first_two_notes, η οποία δέχεται ως ορίσματα τους πίνακες με τις νότες και τις εντάσεις και απομονώνει τα δύο πρώτα στοιχεία κάθε γραμμής των πινάκων.

```
# keeping the First Two Notes
def first_two_notes(old_notes, old_vols):
    new_notes = []
    new_vols = []
    for notes, vols in zip(old_notes, old_vols):
        new_notes.append(notes[:2])
        new_vols.append(vols[:2])
    return new_notes, new_vols
```

Εικόνα 9.9: Ο κώδικας της συνάρτησης fist_two_notes.

```
first_notes, first_volumes = first_two_notes(cqt_notes, volumes)
```

Εικόνα 9.10: Κλήση της συνάρτησης fist_two_notes.

9.2.7 Διαχωρισμός Μπάσου - Μελωδίας

Για να καταγραφούν τα αποτελέσματα σε ένα αρχείο Excel, είναι απαραίτητο να διαχωριστούν οι νότες με βάση το ύψος τους. Γι' αυτό τον σκοπό δημιουργήθηκε η συνάρτηση `bass_melody`, η οποία δέχεται ως ορίσματα έναν πίνακα με δύο νότες και ανακατανέμει τις νότες συγκρίνοντας το τονικό τους ύψος.

Αν μια γραμμή περιέχει μόνο μία νότα (`len(all_notes)==1`), η νότα συγκρίνεται με το ύψος της νότας C4, που συνήθως λειτουργεί ως μεταβατική νότα. Εάν η νότα είναι χαμηλότερη από την C4, προστίθεται στον πίνακα ως μπάσο. Αντίθετα, εάν είναι υψηλότερη, προστίθεται στον πίνακα ως την μελωδία. Η γραμμή της αντίθετης λίστας θα μείνει κενή να διατηρηθεί η αντιστοιχία των θέσεων.

Στην περίπτωση που υπάρχουν δύο νότες στη γραμμή, αυτές συγκρίνονται μεταξύ τους: η χαμηλότερη νότα προστίθεται στον πίνακα του μπάσου και η υψηλότερη στον πίνακα της μελωδίας. Αυτή η συνάρτηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όχι μόνο για την οργάνωση των δεδομένων στο Excel, αλλά και για τη μεταγραφή των στοιχείων σε παρτιτούρα.

```
def bass_melody(notes):
    bass, melody = [], []
    for all_notes in notes:
        if len(all_notes) == 1:
            if librosa.note_to_hz(all_notes[0]) < librosa.note_to_hz('C4'):
                melody.append([])
                bass.append(all_notes)
            else:
                melody.append(all_notes)
                bass.append([])
        elif len(all_notes) >= 2:
            note1, note2 = all_notes[:2]
            if librosa.note_to_hz(note1) < librosa.note_to_hz(note2):
                bass.append([note1])
                melody.append([note2])
            else:
                bass.append([note2])
                melody.append([note1])
    return bass, melody
```

Εικόνα 9.11: Η συνάρτηση `bass_melody`.

```
bass, melody = bass_melody(first_notes)
```

Εικόνα 9.12: Κλήση της συνάρτησης bass_melody.

Τα αποτελέσματα της συνάρτησης έχουν πλέον την παρακάτω μορφή:

bass	melody
['C3'],	['C4'],
['G3'],	['C4'],
['E3'],	['C4'],
['G3'],	['D4'],
['C3'],	['E4'],
['G3'],	[],
['F3'],	['D4'],
['G3'],	[],
['E3'],	['C4'],
['G3'],	['E4'],
['F3'],	['D4'],
['D3'],	[],
['E3'],	['C4'],
['G3'],	[],
['F3'],	[],
['D3'],	[],
['C3'],	['C4'],
['G3'],	['C4'],
['E3'],	[],
['G3'],	['D4'],
['C3'],	['E4'],
['G3'],	[],
['F3'],	['D4'],
['G3'],	[],
['E3'],	['C4'],
['G3'],	['E4'],
['F3'],	['D4'],
['B2'],	['D4'],
['C3'],	['C4'],
['G3'],	[],
['C3']]	[]]

Εικόνα 9.13: Αποτελέσματα της συνάρτησης bass_melody.

9.2.8 Καταγραφή αποτελεσμάτων σε Excel

Για την τελική καταγραφή των αποτελεσμάτων και τον υπολογισμό του ποσοστού επιτυχίας του προγράμματος, είναι απαραίτητο να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα σε ένα αρχείο Excel. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη xlwt. Αρχικά, δημιουργείται το αρχείο Excel με κωδικοποίηση utf-8 και τίτλο φύλλου "Melody Extraction".

Στη συνέχεια, δημιουργούνται τρεις στήλες με τις ονομασίες "Timestamps", "Bass", και "Melody". Στη στήλη "Timestamps" καταγράφονται οι χρονικές στιγμές των onsets, στη στήλη "Bass" οι νότες που εντοπίστηκαν στο μπάσο, και στη στήλη "Melody" οι νότες της μελωδίας.

Τέλος, το αρχείο Excel αποθηκεύεται με το όνομα που έχει οριστεί στη μεταβλητή `song_name`.

```
: #Saving the results in an Excel File
book = xlwt.Workbook(encoding="utf-8")
sheet1 = book.add_sheet("Melody Extraction")

column_names = ['Timestamps', 'Bass', 'Melody']
for i, name in enumerate(column_names):
    sheet1.write(0, i, name)

for i, (left, right, times) in enumerate(zip(bass, melody, onset_times)):
    sheet1.write(i+1, 0, round(times, 4))
    sheet1.write(i+1, 1, left)
    sheet1.write(i+1, 2, right)

book.save(f"{song_name}.xls")
```

Εικόνα 9.14: Ο κώδικας για την αποθήκευση των αποτελεσμάτων σε αρχείο Excel.

Ανοίγοντας το αρχείο Excel, εμφανίζονται τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Στήλη "Timestamps": Περιέχει τις χρονικές στιγμές (timestamps) στις οποίες ανιχνεύθηκαν τα onsets.
- Στήλη "Bass": Περιέχει τις νότες που εντοπίστηκαν στο μπάσο για κάθε χρονική στιγμή.
- Στήλη "Melody": Περιέχει τις νότες της μελωδίας που εντοπίστηκαν για κάθε χρονική στιγμή.

Αυτή η δομή επιτρέπει μια σαφή και οργανωμένη ανασκόπηση των αποτελεσμάτων, διευκολύνοντας την αξιολόγηση της απόδοσης του προγράμματος και τον υπολογισμό του ποσοστού επιτυχίας στην εξαγωγή των νοτών.

	A	B	C	D	E	F
1	Timestamps	Bass	Melody			
2	0,0348	C3	C4			
3	0,6153	G3	C4			
4	1,219	E3	C4			
5	1,8112	G3	D4			
6	2,4149	C3	E4			
7	3,0186	G3				
8	3,6107	F3	D4			
9	4,2144	G3				
10	4,8181	E3	C4			
11	5,4102	G3	E4			
12	6,014	F3	D4			
13	6,6177	D3				
14	7,2098	E3	C4			
15	7,8135	G3				
16	8,4172	F3				
17	9,021	D3				
18	9,6131	C3	C4			
19	10,2168	G3	C4			
20	10,8205	E3				
21	11,4126	G3	D4			
22	12,0163	C3	E4			
23	12,62	G3				
24	13,2122	F3	D4			
25	13,8159	G3				
26	14,4196	E3	C4			
27	15,0117	G3	E4			
28	15,6154	F3	D4			
29	16,2191	B2	D4			
30	16,8112	C3	C4			
31	17,415	G3				
32	18,0187	C3				

Εικόνα 9.15: Εμφάνιση των αποτελεσμάτων του τραγουδιού στο αρχείο Excel.

9.3 Μετατροπή σε MIDI

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την ακρόαση των δεδομένων που εξαγάγαμε. Αυτό μπορεί να γίνει σχετικά απλό τρόπο, καθώς τα δεδομένα που συλλέξαμε μπορούν να μετατραπούν σε μορφή MIDI. Για να επιτευχθεί αυτή η μετατροπή, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις νότες και να τις αντιστοιχίσουμε στους κατάλληλους αριθμούς MIDI, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 4.4.2. Επιπλέον, χρειάζεται να καθορίσουμε τις εντάσεις των νοτών, οι οποίες πρέπει να κανονικοποιηθούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του MIDI αρχείου, καθώς και τις διάρκειες κάθε νότας και τη χρονική στιγμή έναρξής τους.

9.3.1 Εκφόρτωση βιβλιοθήκης

Αρχικά, για τη διαδικασία μετατροπής σε MIDI είναι απαραίτητη η εκφόρτωση της βιβλιοθήκης MIDIUtil, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 6.3.2. Η εκφόρτωση της βιβλιοθήκης αυτής απεικονίζεται στο παρακάτω απόσπασμα κώδικα.

```
: # Converting Data to MIDI
from midiutil import MIDIFile          # http://midiutil.readthedocs.io/en/1.2.1/
```

Εικόνα 9.16: Εκφόρτωση βιβλιοθήκης MIDIUtil.

9.3.2 Κανονικοποίηση των Εντάσεων

Όπως είδαμε προηγουμένως, οι εντάσεις που περιλαμβάνονται στα δεδομένα μας έχουν αρνητικές τιμές. Ωστόσο, για τη μετατροπή τους σε μορφή MIDI, οι τιμές των εντάσεων πρέπει να κυμαίνονται από 0 (ελάχιστη τιμή) έως 127 (μέγιστη τιμή). Για να πετύχουμε αυτή τη μετατροπή, είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση των τιμών των εντάσεων, η οποία επιτυγχάνεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$\frac{volume - global\ max}{global\ min - global\ max} * min\ volume + \frac{volume - global\ min}{global\ max - global\ min} * max\ volume$$

Εικόνα 9.17: Ο μαθηματικός τύπος της κανονικοποίησης των εντάσεων.

Όπου:

- **Volume:** η τιμή των εντάσεων που θέλουμε να γίνει η κανονικοποίηση.
- **min volume:** η χαμηλότερη τιμή της κανονικοποίησης.
- **max volume:** η υψηλότερη τιμή της κανονικοποίησης.
- **global min:** η χαμηλότερη τιμή στον πίνακα των εντάσεων πριν την κανονικοποίηση.
- **global max :** η υψηλότερη τιμή στον πίνακα των εντάσεων πριν την κανονικοποίηση.

Η κανονικοποίηση των εντάσεων πραγματοποιείται με τη συνάρτηση `normalize_volumes`, η οποία χρησιμοποιεί τη συνάρτηση `normalize` για να εφαρμόσει τον τύπο κανονικοποίησης και δέχεται σαν παραμέτρους τον πίνακα των εντάσεων και τις τιμές 127 για τη μέγιστη ένταση και 90 για την ελάχιστη ένταση. Αυτό εξασφαλίζει ότι οι εντάσεις του κομματιού δεν θα έχουν μεγάλες διαφοροποιήσεις.

Αρχικά, δημιουργούμε έναν μονοδιάστατο πίνακα `flattened_volumes` με όλες τις εντάσεις από τον αρχικό διδιάστατο πίνακα. Αυτό μας βοηθά να βρούμε την ελάχιστη (`global_min`) και τη μέγιστη τιμή (`global_max`) των εντάσεων πριν την κανονικοποίηση.

Στη συνέχεια, δημιουργούμε έναν νέο πίνακα `normalized_volumes` και με μία δομή επανάληψης αυτός γεμίζεται με τις κανονικοποιημένες εντάσεις. Στη δομή επανάληψης υπάρχει άλλη μία εμφωλευμένη δομή επανάληψης `for` η οποία εφαρμόζει στα δεδομένα κάθε σειράς την συνάρτηση `normalize`. Τέλος, με το πέρας των εμφωλευμένων `for` η συνάρτηση επιστρέφει τον πίνακα `normalized_volumes` με τις κανονικοποιημένες τιμές. Έπειτα καλείται η συνάρτηση δίνοντας ως όνομα μεταβλητής το όνομα `volumes`.

```
#normalizing the volumes according to MIDIUtil max and lowest volumes
def normalize_volumes(volumes, min_vol=90, max_vol=127):
    def normalize(volume, min_vol, max_vol, global_min, global_max):
        return (volume - global_max) * min_vol / (global_min - global_max) + \
            (volume - global_min) * max_vol / (global_max - global_min)

    # Flatten the list to find the global minimum and maximum volumes
    flattened_volumes = [volume for row in volumes for volume in row]           #2d conversion to 1d array
    global_min, global_max = min(flattened_volumes), max(flattened_volumes)     #needed to find min and max values

    # Normalize each volume in the original list
    normalized_volumes = []                                                     #new normalized volumes
    for volume_row in volumes:
        normalized_row = []
        for volume in volume_row:
            normalized_row.append(round(normalize(volume, min_vol, max_vol, global_min, global_max)))
        normalized_volumes.append(normalized_row)

    return normalized_volumes
```

Εικόνα 9.18: Ο κώδικας της συνάρτησης `normalize_volumes`.

```
#using the normalize_vols function
volumes = normalize_volumes(first_volumes)
```

Εικόνα 9.19: Κλήση της συνάρτησης `normalize_volumes`.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα πριν και μετά την κανονικοποίηση των τιμών. Η κανονικοποίηση των τιμών εξασφαλίζει ότι οι εντάσεις δεν υπερβαίνουν το εύρος των 127 και δεν μειώνονται κάτω από το 90.

: # before normalizing first_volumes	: # normalized_volumes results volumes
: [[-30.336336, -30.358715], [-31.131641, -47.356056], [-27.519068, -49.700268], [-33.741848, -36.87655], [-15.857298, -28.991615], [-32.555405], [-20.177921, -40.19874], [-33.001785], [-29.44893, -46.24102], [-12.691031, -32.715996], [-19.897938, -41.526833], [-4.5320783], [-26.315495, -47.49682], [-29.73615], [-18.351875], [-5.9660707], [-29.784868, -37.44218], [-31.775074, -54.08024], [-27.017569], [-35.022697, -37.348522], [-15.894696, -28.758291], [-30.34463], [-17.943657, -40.85695], [-32.103447], [-29.497387, -51.3393], [-10.656291, -32.74124], [-19.630442, -40.61721], [-33.20999, -35.836742], [-26.466282, -31.30008], [-30.228516], [-28.605562]]	: [[108, 108], [107, 95], [110, 93], [105, 103], [119, 109], [106], [115, 100], [106], [108, 96], [121, 106], [116, 99], [127], [111, 95], [108], [117], [126], [108, 102], [107, 90], [110], [104, 102], [119, 109], [108], [117, 100], [106], [108, 92], [122, 106], [116, 100], [106, 104], [111, 107], [108], [109]]

Εικόνα 9.20: Οι εντάσεις πριν και μετά την κανονικοποίηση.

9.3.3 Μετατροπή Νοτών σε Αριθμούς νοτών MIDI

Έχοντας κανονικοποιήσει τις εντάσεις, το επόμενο βήμα στη διαδικασία μετατροπής σε MIDI είναι η μετατροπή των νοτών που έχουμε βρει σε αριθμούς MIDI. Χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη *librosa*, μπορούμε να πραγματοποιήσουμε αυτή τη διαδικασία με τη συνάρτηση `librosa.note_to_midi`.

Αρχικά, δημιουργούμε τη συνάρτηση `notes_to_MIDI_number`, η οποία δέχεται ως όρισμα έναν πίνακα με τις νότες που έχουμε εντοπίσει. Στη συνέχεια, δημιουργούμε έναν κενό πίνακα `pitches`, ο οποίος θα γεμίσει με τους αριθμούς MIDI των νοτών. Χρησιμοποιούμε μια επανάληψη για να μετατρέψουμε κάθε νότα σε αριθμό MIDI με τη βοήθεια της βιβλιοθήκης *librosa* και έπειτα αποθηκεύουμε τα

αποτελέσματα στον πίνακα pitches. Τέλος, ο πίνακας ταξινομείται με βάση το τονικό ύψος και επιστρέφεται.

Αυτή η διαδικασία είναι κρίσιμη για την προετοιμασία των δεδομένων, καθώς η μετατροπή των νωτών σε αριθμούς MIDI είναι απαραίτητη για την τελική δημιουργία του αρχείου MIDI, επιτρέποντας την αναπαράσταση της μελωδίας που εξάγαμε.

```
#converting the notes to their MIDI number
def notes_to_MIDI_number(notes):
    pitches = []
    for i in range(len(notes)):
        pitches.append(librosa.note_to_midi(notes[i]))
    sorted_pitches = [sorted(row) for row in pitches]
    return sorted_pitches
```

Εικόνα 9.21: Η συνάρτηση notes_to_MIDI_number.

Στη συνέχεια, γίνεται η κλήση της συνάρτησης και εμφανίζονται τα αποτελέσματα.

```
#using the notes_to_pitch function
pitches= notes_to_MIDI_number(first_notes)
```

Εικόνα 9.22: Κλήση της συνάρτησης notes_to_MIDI_number.

```
: # results of notes_to_pitch function
pitches
: [[48, 60],
   [55, 60],
   [52, 60],
   [55, 62],
   [48, 64],
   [55],
   [53, 62],
   [55],
   [52, 60],
   [55, 64],
   [53, 62],
   [50],
   [52, 60],
   [55],
   [53],
   [50],
   [48, 60],
   [55, 60],
   [52],
   [55, 62],
   [48, 64],
   [55],
   [53, 62],
   [55],
   [52, 60],
   [55, 64],
   [53, 62],
   [47, 62],
   [48, 60],
   [55],
   [48]]
```

Εικόνα 9.23: Αποτελέσματα της συνάρτησης notes_to_MIDI_number.

9.3.4 Εύρεση διάρκειας των onset

Για να βρούμε τη διάρκεια κάθε νότας, αρκεί να υπολογίσουμε το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών εντοπισμών onset. Η μόνη εξαίρεση αφορά την τελευταία νότα, της οποίας η διάρκεια υπολογίζεται αφαιρώντας τον χρόνο που εντοπίστηκε το τελευταίο onset από τη συνολική διάρκεια του κομματιού.

Αυτή η διαδικασία απεικονίζεται στον παρακάτω κώδικα, όπου αρχικά υπολογίζεται η συνολική διάρκεια του κομματιού με τη χρήση της συνάρτησης `librosa.frames_to_time` δίνοντας ως όρισμα το `len(CdB.T)`, το οποίο είναι το μήκος των συνολικών frames.

Έπειτα, δημιουργούμε τον πίνακα `durations`, ο οποίος με μία δομή επανάληψης `for` γεμίζεται με τις διαφορές των χρονικών στιγμών των διαδοχικών onsets και στο τέλος προστίθεται η διάρκεια της τελευταίας νότας. Με την κλήση του πίνακα `durations` εμφανίζονται οι διάρκειες που βρέθηκαν.

```
#finding the duration of the last note
song_dur=librosa.frames_to_time(len(CdB.T), sr=sr)
last_note=song_dur-onset_times[-1]

#finding the durations of the notes
durations = []
for i in range(len(onset_times)-1):
    durations.append(onset_times[i+1]-onset_times[i])
durations.append(last_note)
```

Εικόνα 9.24: Κώδικας εύρεσης των διαρκειών.

```
#printing the durations
durations

[0.5804988662131518,
0.6037188208616782,
0.5921088435374149,
0.6037188208616782,
0.6037188208616779,
0.5921088435374147,
0.6037188208616784,
0.6037188208616779,
0.5921088435374147,
0.6037188208616779,
0.6037188208616779,
0.5921088435374156,
0.6037188208616779,
0.603718820861677,
0.6037188208616779,
0.5921088435374156,
0.6037188208616779,
0.6037188208616779,
0.5921088435374156,
0.6037188208616779,
0.6037188208616779,
0.5921088435374156,
0.6037188208616779,
0.6037188208616779,
0.5921088435374156,
0.6037188208616779,
0.6037188208616779,
0.5921088435374138,
0.6037188208616779,
0.6037188208616797,
0.5921088435374138,
0.6037188208616797,
0.6037188208616762,
1.1261678004535156]
```

Εικόνα 9.25: Οι διάρκειες κάθε νότας που υπολογίστηκαν.

9.3.5 Δημιουργία του MIDI αρχείου

Η δημιουργία του MIDI αρχείου γίνεται με την εξής διαδικασία:

Αρχικά, δημιουργούμε ένα αρχείο MIDI με τη χρήση του MIDIFile με ένα κανάλι και δύο tracks, ένα για το μπάσο και ένα για τη μελωδία. Στη συνέχεια προσθέτουμε όνομα στα tracks με τη χρήση της συνάρτησης `addTrackName`. Ακόμη, με τη συνάρτηση `addTempo` το μπάσο και η μελωδία ρυθμίζονται στα 60 BPM, διασφαλίζοντας ότι και τα δύο tracks παίζουν συγχρονισμένα.

```
# Initializing the MIDIFile object with 2 tracks
MyMIDI = MIDIFile(2)

track_bass = 0
track_melody = 1
channel = 0

# Setting the name and tempo for each track
MyMIDI.addTrackName(track_bass, 0, "Bass")
MyMIDI.addTrackName(track_melody, 0, "Melody")
MyMIDI.addTempo(track_bass, 0, 60)
MyMIDI.addTempo(track_melody, 0, 60)
```

Εικόνα 9.26: Αρχικοποίηση του MIDI αρχείου.

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την προσθήκη των νοτών στο αρχείο. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας δομής επανάληψης που θα διατρέξει από το πρώτο έως το τελευταίο στοιχείο του πίνακα των onset. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται έλεγχος για το αν παίζεται μία νότα ή δύο ταυτόχρονα. Αν παίζεται μία νότα, ελέγχεται αν ανήκει στο μπάσο ή στη μελωδία και προστίθεται στο αρχείο με τη χρήση της συνάρτησης `addNote`. Η συνάρτηση αυτή δέχεται ως παραμέτρους το track, το κανάλι, τη νότα σε μορφή MIDI, τη χρονική στιγμή έναρξης της νότας, τη διάρκειά της, καθώς και την κανονικοποιημένη ένταση. Στην περίπτωση που παίζονται δύο νότες ταυτόχρονα, προστίθενται και οι δύο.

```
#adding each note
for i in range(len(onset_times)):
    if len(pitches[i])==1:
        if pitches[i][0] < 60: #pitch < 60 represents bass
            MyMIDI.addNote(track_bass,channel,pitches[i][0],onset_times[i],durations[i],volumes[i][0])
        else:
            MyMIDI.addNote(track_melody,channel,pitches[i][0],onset_times[i],durations[i],volumes[i][0])

    else:
        MyMIDI.addNote(track_bass,channel,pitches[i][0],onset_times[i],durations[i],volumes[i][0])
        MyMIDI.addNote(track_melody,channel,pitches[i][1],onset_times[i],durations[i],volumes[i][1])
```

Εικόνα 9.27: Προσθήκη νοτών MIDI.

Τέλος, ακολουθεί η δημιουργία του αρχείου MIDI με τη συνάρτηση `writeFile`. Ως όνομα αρχείου χρησιμοποιείται το όνομα που έχει δοθεί στη μεταβλητή `song_name`. Μόλις δημιουργηθεί το αρχείο, μπορεί να αναπαραχθεί σε οποιοδήποτε συμβατό πρόγραμμα αναπαραγωγής MIDI, επιτρέποντας έτσι την ακρόαση και την περαιτέρω επεξεργασία του κομματιού.

```
# Creating the midi file
midi_file_name=f"MIDIs/Piano/{song_name}.mid"
binfile = open(midi_file_name, 'wb')
MyMIDI.writeFile(binfile)
binfile.close()

print(f"MIDI file '{song_name}.mid' created successfully.")
```

MIDI file 'Au Clair de la Lune.mid' created successfully.

Εικόνα 9.28: Δημιουργία του MIDI αρχείου.

Ο προκαθορισμένος ήχος κατά την αναπαραγωγή του MIDI είναι αυτός του πιάνου. Ωστόσο, αν το κομμάτι προορίζεται για κιθάρα, μπορούμε εύκολα να αλλάξουμε τον ήχο προσθέτοντας τον αντίστοιχο αριθμό ήχου κιθάρας χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `addProgramChange`. Αυτή η συνάρτηση επιτρέπει την αλλαγή του ήχου του οργάνου για ένα συγκεκριμένο κανάλι, διασφαλίζοντας ότι το MIDI αρχείο θα αναπαραχθεί με τον επιθυμητό ήχο.

```
guitar_program_number=24
MyMIDI.addProgramChange(track_bass,channel,0,guitar_program_number)
MyMIDI.addProgramChange(track_melody,channel,0,guitar_program_number)
```

Εικόνα 9.29: Προσθήκη ήχου κιθάρας κατά την αναπαραγωγή του MIDI.

9.4 Δημιουργία Παρτιτούρας

Το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση του κώδικα περιλαμβάνει τη μεταγραφή του κομματιού σε παρτιτούρα. Σε αυτό το στάδιο, συνδυάζουμε τα δεδομένα που εξάγαμε κατά την ανίχνευση της μελωδίας με εκείνα που προέκυψαν από τη δημιουργία του αρχείου MIDI. Η οπτικοποίηση του μουσικού κομματιού μέσω της παρτιτούρας δεν αποτελεί μόνο το τελικό προϊόν της διαδικασίας, αλλά και ένα πολύτιμο εργαλείο για μουσικούς, συνθέτες και ερευνητές. Η δυνατότητα της απεικόνισης της μουσικής επιτρέπει την ανάλυση της δομής, των μελωδικών γραμμών και της αρμονίας του κομματιού, ενώ παράλληλα διευκολύνει τη διαδικασία δημιουργίας και ανάπτυξης νέων μουσικών ιδεών.

9.4.1 Εκφόρτωση βιβλιοθηκών

Η βιβλιοθήκη που χρησιμοποιείται για την εκτύπωση της παρτιτούρας είναι η music21. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται οι υποβιβλιοθήκες converter, key, tempo, stream, metadata, instrument, midi, meter, clef και bar όπως φαίνεται και παρακάτω.

```
# Creating the Music Score

# importing the Music21 library
from music21 import converter, key, tempo, note, stream, metadata, instrument, midi, meter, clef, bar
```

Εικόνα 9.30: Εκφόρτωση βιβλιοθήκης Music21.

9.4.2 Αρχικοποίηση παρτιτούρας

Για να δημιουργήσουμε μια παρτιτούρα, το πρώτο βήμα είναι η αρχικοποίηση ενός stream, το οποίο λειτουργεί ως το κύριο στοιχείο για την αποθήκευση και την οργάνωση των μουσικών στοιχείων. Το stream μας επιτρέπει να προσθέσουμε διάφορα μέρη και όργανα, και να τα συνδυάσουμε για να συνθέσουμε το μουσικό κομμάτι.

Στη συνέχεια, δημιουργούμε τα μέρη του stream που θα αντιπροσωπεύουν τα διαφορετικά πεντάγραμμα της παρτιτούρας μας. Ειδικότερα για το πιάνο, δημιουργούμε δύο μέρη: το bass_part, στο οποίο προσθέτουμε το κλειδί του Φα, και το treble_part, στο οποίο προσθέτουμε το κλειδί του Σολ. Αυτά τα μέρη θα επιτρέψουν την αναπαράσταση των μουσικών γραμμών για το μπάσο και τη μελωδία, αντίστοιχα.

Για να ολοκληρώσουμε τη διαδικασία, ορίζουμε το όργανο για το οποίο προορίζεται η παρτιτούρα. Αν το όργανο του κομματιού πρόκειται για πιάνο, το ορίζουμε με την εντολή instrument.Piano. Αντιθέτως, αν το κομμάτι προορίζεται για κιθάρα, αρκεί να προσθέσουμε την εντολή για το όργανο instrument.Guitar, προσαρμόζοντας την παρτιτούρα αναλόγως.

```
#making a stream
s = stream.Stream()

#creating the parts and the clefs
bass_part = stream.Part()
bass_part.append(clef.BassClef())
treble_part=stream.Part()
treble_part.append(clef.TrebleClef())

#defining the instrument as a Piano
bass_part.insert(0, instrument.Piano())
treble_part.insert(0, instrument.Piano())
```

Εικόνα 9.31: Δημιουργία του Stream.

9.4.3 Αναγνώριση Τονικότητας

Όπως εξετάσαμε στο Κεφάλαιο 2, η αρχή κάθε παρτιτούρας περιλαμβάνει τον οπλισμό του κομματιού, δηλαδή την τονικότητα στην οποία είναι γραμμένο. Η βιβλιοθήκη Music21 παρέχει ισχυρά εργαλεία για την αναγνώριση της τονικότητας, αναλύοντας το MIDI αρχείο του κομματιού με ακρίβεια.

Η διαδικασία ξεκινά με την εντολή `converter.parse`, η οποία φορτώνει και αναλύει το MIDI αρχείο, μετατρέποντάς το σε ένα κατάλληλο μουσικό αντικείμενο που μπορεί να επεξεργαστεί η βιβλιοθήκη. Μετά την εκτέλεση της `converter.parse`, το αποτέλεσμα μπορεί να εξεταστεί με την εντολή `analyze('key')`. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να προσδιορίσουμε την τονικότητα του κομματιού, όπως φαίνεται και στο παρακάτω απόσπασμα κώδικα.

```
# Load a MIDI file
midi_file = converter.parse(midi_file_name)

# Perform a key analysis
key_analysis = midi_file.analyze('key')

# Display the result
print(f"Detected key: {key_analysis.tonic.name} {key_analysis.mode}")
```

Detected key: A major

Εικόνα 9.32: Ανάλυση τονικότητας.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα της ανάλυσης αποθηκεύονται σε μία μεταβλητή `k` με τη χρήση των εντολών `tonic.name` και `mode`. Από την μεταβλητή `k` γίνεται η ανάλυση της τονικότητας με την εντολή `KeySignature`. Τέλος, ο οπλισμός του κομματιού προστίθεται στα πεντάγραμμα με την εντολή `insert`.

```
#creating a key and a key_signature object
k=key.Key(key_analysis.tonic.name,key_analysis.mode)

key_signature = key.KeySignature(k.sharps)
```

```
#Adding the key in the score
bass_part.insert(0, key_signature)
treble_part.insert(0,key_signature)
```

Εικόνα 9.33: Προσθήκη του οπλισμού.

9.4.4 Αναγνώριση Tempo

Η βιβλιοθήκη librosa προσφέρει τη δυνατότητα ανάλυσης του τέμπο ενός μουσικού κομματιού μέσω της εντολής `librosa.feature.tempo`, η οποία αναλύει το onset envelope του κομματιού για να υπολογίσει το ρυθμό. Μετά την ανάλυση, το υπολογισμένο τέμπο μετατρέπεται σε ακέραιο αριθμό. Αυτή η μετατροπή είναι απαραίτητη για να είναι συμβατό με τη μορφή που απαιτεί το `MetronomeMark`, το οποίο χρησιμοποιείται για να καταγράψει το τέμπο στην παρτιτούρα. Τέλος προστίθεται το τέμπο στα bass και treble parts αντίστοιχα.

```
#finding the tempo of the song
tem = librosa.feature.tempo(onset_envelope=onset_env, sr=sr)

#converting tempo to integer
tem=int(2*round(tem[0]/2))

#adding the tempo metronome mark
tempo_mark = tempo.MetronomeMark(number=tem)

#Adding the tempo
bass_part.insert(0, tempo_mark)
treble_part.insert(0, tempo_mark)
```

Εικόνα 9.34: Υπολογισμός και προσθήκη του tempo.

9.4.5 Προσθήκη Τίτλου Τραγουδιού και Καλλιτέχνη

Η μεταβλητή `song_name` έχει διατυπωθεί με κατάλληλο τρόπο έτσι ώστε να περιλαμβάνει τόσο τον τίτλο του κομματιού όσο και τον καλλιτέχνη, διαχωρισμένα με μια παύλα. Το όνομα του τραγουδιού βρίσκεται πριν από την παύλα ενώ το όνομα του καλλιτέχνη μετά από αυτή. Εάν δεν αναφέρεται ο καλλιτέχνης, η παύλα δεν προστίθεται στον τίτλο, και έτσι το όνομα του τραγουδιού εμφανίζεται μόνο του. Στη συνέχεια φαίνεται ο κώδικας διαχωρισμού του ονόματος του κομματιού και του καλλιτέχνη.

```
# Seperating song name from artist name
if "-" in song_name:
    title= song_name[:song_name.find('-')]
else:
    title=song_name

if "-" not in song_name:
    artist="Unknown"
else:
    artist=song_name[song_name.find('-')+1:]
```

Εικόνα 9.35: Διαχωρισμός Τίτλου κομματιού - Καλλιτέχνη.

Έτσι, μπορούμε με τη χρήση της συνάρτησης `Metadata` μπορούμε να προσθέσουμε τις πληροφορίες για τον τίτλο και τον καλλιτέχνη στη παρτιτούρα.

```

: # adding the title and the artist
s.metadata = metadata.Metadata()
s.metadata.title = title
s.metadata.composer = artist

```

Εικόνα 9.36: Προσθήκη των metadata στην παρτιτούρα.

9.4.6 Καθορισμός Αξίας Μέτρου

Ο καθορισμός της αξίας του μέτρου ενός μουσικού κομματιού είναι μια σύνθετη διαδικασία, καθώς το ίδιο κομμάτι μπορεί να εκφράζεται με διαφορετικούς τρόπους, όπως 4/4, 2/2 ή 8/8. Αυτές οι διαφορές στην ένδειξη του μέτρου επηρεάζουν τη ρυθμική δομή του κομματιού, αλλά η αναγνώριση του μέτρου δεν είναι πάντοτε απλή υπόθεση.

Οι βιβλιοθήκες librosa και music21, αν και ισχυρές στην ανάλυση ήχου και μουσικής, δεν προσφέρουν συγκεκριμένες τεχνικές για την αυτόματη αναγνώριση του μέτρου. Η διαδικασία αυτή απαιτεί πιο προηγμένες μεθόδους μηχανικής μάθησης, οι οποίες ξεπερνούν το πεδίο αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Ως εκ τούτου, η αναγνώριση του μέτρου γίνεται μέσω ενός απλού user input. Ο χρήστης καλείται να εισάγει το μέτρο που ισχύει για το κομμάτι, και το σύστημα επαληθεύει αν η τιμή που παρέχεται είναι έγκυρη. Σε περίπτωση που δοθεί ένα κλάσμα που δεν ανήκει σε κοινά χρησιμοποιούμενα μέτρα, εμφανίζεται μήνυμα λάθους για να ενημερώσει τον χρήστη και να διασφαλίσει ότι μόνο έγκυρες τιμές μέτρου γίνονται αποδεκτές. Τέλος, το μέτρο προστίθεται στα bass και treble parts.

```

# adding the time signature
signature = input("Enter time signature:")
time_signatures=['3/4', '4/4', '2/4', '6/8', '2/2']
while signature not in time_signatures:
    print("Not a valid time signature. Try again.")
    signature = input("Enter time signature:")

```

```

Enter time signature: 2/3
Not a valid time signature. Try again.
Enter time signature: 4/4

```

```

#adding the time signature
time_signature = meter.TimeSignature(signature)
treble_part.append(time_signature)
bass_part.append(time_signature)

```

Εικόνα 9.37: Καθορισμός της χρονικής αξίας του μέτρου και προσθήκη του στην παρτιτούρα.

9.4.7 Δημιουργία παύσεων

Η δημιουργία των παύσεων γίνεται με το παρακάτω κομμάτι κώδικα. Ουσιαστικά, η λογική που ακολουθείται είναι εφόσον οι πίνακες bass και melody είναι στη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 9.13 μπορεί να περιέχουν κενά στους πίνακες. Η συνάρτηση `addRest` μετράει τα κενά και στην περίπτωση που υπάρχουν πολλά διαδοχικά κενά προσθέτει στο κενό μέρος του πίνακα τη λέξη `Rest`. Αυτό όπως θα δούμε στη συνέχεια θα αξιοποιηθεί για τη δημιουργία των παύσεων.

```

: #creating and adding rests to the piece
def addRest(notes):
    isRest = False
    if not notes[0]:
        notes[0] = ["Rest"]
        isRest = True
    elif notes[0][0] == "Rest":
        isRest = True

    countSpaces = 0
    for l in notes:
        if not l and isRest or l == ["Rest"]:
            continue
        if not l:
            countSpaces += 1
        if countSpaces >= 4:
            l.append("Rest")
            countSpaces = 0
            isRest = True
        elif l:
            countSpaces = 0
            isRest = False

: #adding the rest
addRest(bass)
addRest(melody)

```

Εικόνα 9.38: Δημιουργία των παύσεων.

9.4.8 Εύρεση διάρκειας των νοτών

Για την εύρεση των νοτών, βασική προϋπόθεση είναι να βρεθεί η χρονική διάρκεια της κάθε νότας ξεχωριστά, ώστε οι διάρκειες στη συνέχεια να μετατραπούν σε αξίες χτύπων (beats) και να καταγραφούν στην παρτιτούρα.

Αυτή η διαδικασία γίνεται με το παρακάτω κομμάτι κώδικα, όπου στην ουσία η συνάρτηση `note_durations` χειρίζεται τις νότες και τις κενές θέσεις των πινάκων, ώστε να βρει τους ακριβείς χρόνους για κάθε νότα.

Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζει τη διάρκεια κάθε νότας με βάση τους χρόνους έναρξης (`onset_times`) και τις νότες (`notes`). Αν ανάμεσα σε δύο θέσεις του πίνακα έχουν εντοπιστεί νότες τότε η διάρκεια της νότας αντιστοιχεί στον χρόνο που μεσολαβεί ανάμεσα στα δύο `onset`. Ειδικά, υπολογίζει τα κενά του πίνακα, προσθέτει τη διάρκεια των κενών στη διάρκεια `added_duration` και περιμένει μέχρι η επόμενη θέση του πίνακα να μην είναι άδεια. Όταν η επόμενη θέση του πίνακα δεν είναι άδεια, προσθέτει στην προηγούμενη νότα τη συνολική διάρκεια. Τέλος, υπολογίζει και τη διάρκεια της τελευταίας νότας μέχρι να τελειώσει το τραγούδι (`song_duration`).

Στη συνέχεια φαίνεται ο παρακάτω κώδικας, καθώς και η κλήση της συνάρτησης `note_durations` και τα αποτελέσματα της.

```
#finding the duration of each note
def note_durations(onset_times, notes, song_duration):
    durations = []
    added_duration = 0
    is_empty = False

    for i in range(len(onset_times) - 1):
        if notes[i+1]: # If the next note is not empty
            duration = onset_times[i+1] - onset_times[i]
            if is_empty:
                duration += added_duration
                added_duration = 0
                is_empty = False
            durations.append(duration)
        else: # If the next note is empty, add previous duration
            added_duration += onset_times[i+1] - onset_times[i]
            is_empty = True

    # Handle the duration of the last note
    last_note_duration = song_duration - onset_times[-1] + added_duration
    durations.append(last_note_duration)

    return durations

#using the note_durations function
durations_bass = note_durations(onset_times,bass,song_dur)
durations_melody = note_durations(onset_times,melody,song_dur)
```

Εικόνα 9.39: Η συνάρτηση `note_durations`.

#note_durations results durations_bass	#note_durations results durations_melody
[0.5804988662131518,	[0.5804988662131518,
0.6037188208616782,	0.6037188208616782,
0.5921088435374149,	0.5921088435374149,
0.6037188208616782,	0.6037188208616782,
0.6037188208616779,	0.5921088435374147,
0.5921088435374147,	0.6037188208616784,
0.6037188208616784,	0.6037188208616779,
0.6037188208616779,	1.1958276643990926,
0.5921088435374147,	1.2074376417233563,
0.6037188208616779,	0.5921088435374147,
0.6037188208616779,	0.6037188208616779,
0.5921088435374156,	1.1958276643990935,
0.6037188208616779,	2.4032653061224485,
0.603718820861677,	0.6037188208616779,
0.6037188208616779,	1.1958276643990935,
0.5921088435374156,	2.4032653061224485,
0.6037188208616779,	0.6037188208616779,
0.6037188208616779,	1.1958276643990935,
0.5921088435374156,	0.6037188208616779,
0.6037188208616779,	1.1958276643990935,
0.5921088435374156,	1.2074376417233559,
0.6037188208616779,	0.5921088435374138,
0.6037188208616779,	0.6037188208616779,
0.5921088435374138,	0.6037188208616797,
0.6037188208616797,	0.5921088435374138,
0.5921088435374138,	0.6037188208616797,
0.6037188208616797,	0.5921088435374138,
0.6037188208616762,	2.3336054421768715]
1.1261678004535156]	

Εικόνα 9.40: Τα αποτελέσματα της συνάρτησης note_durations.

Παρατηρούμε ότι οι πίνακες που δημιουργούνται δεν έχουν το ίδιο μέγεθος, καθώς παίζεται διαφορετικός αριθμός νοτών στο μπάσο και στη μελωδία.

9.4.9 Μετατροπή διάρκειας των νοτών σε χτύπους (beats)

Όπως θα δούμε παρακάτω, για την προσθήκη των νοτών στην παρτιτούρα, εκτός από τις ίδιες τις νότες, πρέπει να προσδιορίσουμε και τη χρονική τους αξία, σύμφωνα με τις τιμές που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.4.3. Η συνάρτηση της βιβλιοθήκης music21 δέχεται τις χρονικές αξίες σε δεκαδικούς αριθμούς με ακρίβεια τετάρτων. Για παράδειγμα, οι αξίες θα ήταν 0.5 για το όγδοο, 1.0 για το τέταρτο, 2.0 για το μισό, κ.ο.κ.

Ο παρακάτω κώδικας μετατρέπει τις διάρκειες των νοτών (duration) σε χρόνους beats (χτύπους) με βάση το τέμπο (tem) που υπολογίστηκε προηγουμένως. Για κάθε διάρκεια, υπολογίζει τον αριθμό των χτύπων και τον στρογγυλοποιεί στο πλησιέστερο μισό του.

```
# durations to beats
def notes_to_beats(duration):
    beats=[]
    for i in range(len(duration)):
        beats.append(round(tem * duration[i]/60 * 2 )/2)
    return beats

# using the notes_to_beats function
beats_bass = notes_to_beats(durations_bass)
beats_melody = notes_to_beats(durations_melody)
```

Εικόνα 9.41: Η συνάρτηση notes_to_beats.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της συνάρτησης. Η συνολική αξία των διαρκειών σε beats του μπάσου και της μελωδίας πρέπει να είναι ίδια, ώστε η παρτιτούρα να τελειώνει στο ίδιο σημείο.

<code>#notes_to_beats results</code> <code>beats_bass</code>	<code>#notes_to_beats results</code> <code>beats_melody</code>
[1.0,	[1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	2.0,
1.0,	2.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	2.0,
1.0,	4.0,
1.0,	1.0,
1.0,	2.0,
1.0,	1.0,
1.0,	2.0,
1.0,	2.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
1.0,	1.0,
2.0]	4.0]

Εικόνα 9.42: Τα αποτελέσματα της συνάρτησης notes_to_beats.

Εξαιρέση αποτελεί η περίπτωση που το μέτρο που έχει δοθεί από τον χρήστη έχει στον παρονομαστή την αξία των ογδών. Σε αυτή την περίπτωση, το παρακάτω κομμάτι κώδικα διαιρεί τους χτύπους (beats) της μελωδίας (beats_melody) και του μπάσου (beats_bass) στη μέση, προσαρμόζοντας έτσι τη διάρκεια των νοτών για το συγκεκριμένο μέτρο.

```

: if signature == '6/8':
    for i in range(len(beats_melody)):
        beats_melody[i] = beats_melody[i]/2
    for i in range(len(beats_bass)):
        beats_bass[i] = beats_bass[i]/2

```

Εικόνα 9.43: Η περίπτωση των 6/8.

9.4.10 Προσθήκη των νοτών

Έχοντας βρει τις διάρκειες σε χτύπους κάθε νότας, επόμενο βήμα είναι να προστεθούν οι νότες που έχουν βρεθεί στην παρτιτούρα. Αυτό γίνεται με τη συνάρτηση `add_notes` που δέχεται ως ορίσματα τον πίνακα με τις νότες, τις διάρκειές τους σε beats και το πεντάγραμμο που θα προστεθούν (bass part ή treble part).

Ουσιαστικά, η συνάρτηση αυτή προσθέτει τις νότες χρησιμοποιώντας τη μέθοδο `note.Note` από τη βιβλιοθήκη `music21`, η οποία παίρνει ως παραμέτρους το όνομα της νότας και τη διάρκειά της σε beats. Αν βρεθεί παύση στον πίνακα, χρησιμοποιείται η μέθοδος `note.Rest`, η οποία επίσης δέχεται ως όρισμα τη διάρκεια σε beats.

```

#adding the notes to the score
def add_notes(notes,beats,part):
    counter = 0
    for i in range(len(notes)):
        if notes[i] == []:
            continue
        if '#' in notes[i][0]:
            notes[i][0] = notes[i][0].replace('#','#')
        if notes[i][0] == 'Rest':
            part.append(note.Rest(quarterLength = beats[counter]))
        else:
            part.append(note.Note(notes[i][0], quarterLength = beats[counter]))
        counter+=1

```

```

# using the add notes function
add_notes(bass,beats_bass,bass_part)
add_notes(melody,beats_melody,treble_part)

```

Εικόνα 9.44: Η συνάρτηση `add_notes`.

9.4.11 Επεξεργασία τελευταίου μέτρου

Η συνάρτηση `last_measure` χρησιμοποιείται για να ελέγξει το τελευταίο μέτρο της παρτιτούρας, διασφαλίζοντας ότι το πεντάγραμμο του μπάσου και της μελωδίας τελειώνουν ταυτόχρονα. Λειτουργεί κυρίως ως έλεγχος, σε περιπτώσεις όπου ένα μέτρο δεν έχει συμπληρωθεί πλήρως με την απαιτούμενη χρονική του διάρκεια.

Συγκεκριμένα, ο κώδικας εντοπίζει το τελευταίο μέτρο της παρτιτούρας (`part`), υπολογίζει τον υπολειπόμενο χρόνο στο μέτρο, και προσαρμόζει τη διάρκεια της τελευταίας νότας ώστε να καλύψει αυτόν τον χρόνο.

```
#last measure
def last_measure(part):
    measures = part.makeMeasures(inplace=False)
    last_measure = measures[-1]
    last_note = part.flat.notes[-1]
    remaining_time = last_measure.barDuration.quarterLength - last_note.offset % last_measure.barDuration.quarterLength
    last_note.duration.quarterLength = remaining_time

# using the last_measure function
last_measure(treble_part)
last_measure(bass_part)
```

Εικόνα 9.45: Η συνάρτηση `last_measure`.

9.4.12 Δημιουργία αρχείου παρτιτούρας

Τελευταίο βήμα για τη δημιουργία της παρτιτούρας είναι η προσθήκη της ένδειξης τέλους, το οποίο γίνεται με την μέθοδο της `music21 bar.Barline('final')`. Έπειτα, προστίθεται το bass και το treble part στο stream. Έτσι, έχουν ολοκληρωθεί όλα τα στοιχεία απαραίτητα για τη δημιουργία της παρτιτούρας και το μόνο που απομένει είναι η δημιουργία του αρχείου `mxl`.

```
# adding the final barline in bass and treble part
bass_part.append(bar.Barline('final'))
treble_part.append(bar.Barline('final'))

#adding the parts in the stream
s.insert(0,treble_part)
s.insert(0,bass_part)
```

Εικόνα 9.46: Προσθήκη ένδειξης τέλους και των bass και treble part στο stream.

Το αρχείο Musescore δημιουργείται με τη συνάρτηση `write`, η οποία δημιουργεί ένα αρχείο παρτιτούρας σε μορφή MusicXML και το αποθηκεύει με το όνομα του τραγουδιού (`song_name`) και την κατάληξη `.mxl`.

```
# creating the music sheet
s.write('musicxml', fp=f'{song_name}.xml')
print(f"MuseScore file '{song_name}.xml' created successfully.")
```

MuseScore file 'Au Clair de la Lune.xml' created successfully.

Εικόνα 9.47: Η δημιουργία του αρχείου παρτιτούρας xml.

Τα αρχεία μπορούν να ανοιχτούν με λογισμικά παρτιτούρας, όπως το MuseScore που αναφέρεται στο κεφάλαιο 6.2.2. Εκεί, τα αποτελέσματα του κομματιού απεικονίζονται με τον τρόπο που φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Επιπλέον, το MuseScore προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής του αρχείου σε μορφή PDF.

Εικόνα 9.48: Παράδειγμα αρχείου παρτιτούρας.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

10.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη λειτουργία του προγράμματος. Αρχικά, τα αποτελέσματα χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: αυτά που αφορούν το πιάνο και αυτά που αφορούν την κιθάρα. Στη συνέχεια, καταγράφονται τα Excel αρχεία με τα αποτελέσματα καθώς και η παρτιτούρα που δημιουργήθηκε για κάθε κομμάτι. Τέλος, εξετάζονται τα ποσοστά επιτυχίας της εφαρμογής και συζητούνται οι επιδόσεις της σε κάθε κατηγορία.

10.2 Αποτελέσματα Πιάνου

Τα ποσοστά επιτυχίας των πειραμάτων βρίσκονται στον φάκελο *Results*, όπου τα αποτελέσματα της εξαγωγής μελωδίας από το αρχείο Excel που δημιουργήθηκε στο κεφάλαιο 9.2.8 συγκρίνονται με τις σωστές νότες που έχουν καταγραφεί στο κεφάλαιο 7.3. Για τη σύγκριση αυτή, χρησιμοποιείται η συνάρτηση *if* στο αρχείο Excel, η οποία συγκρίνει μεταξύ τους τις στήλες που αντιστοιχούν στη μελωδία και τις στήλες των μπάσων αντίστοιχα.

Οι στήλες *CQT Bass* και *CQT Melody* αντιστοιχούν στις νότες που βρέθηκαν στην εξαγωγή μελωδίας, ενώ οι στήλες *Correct Bass* και *Correct Melody*, αντιστοιχούν στις σωστές νότες. Οι στήλες *Bass* και *Melody Success Rate* περιλαμβάνουν τις ενδείξεις *True* σε περίπτωση που οι νότες των δύο στηλών είναι ίδιες ή *False* σε περίπτωση που διαφέρουν. Τέλος, αθροίζονται οι ενδείξεις *True* και *False*, ώστε να βρεθούν τα ποσοστά επιτυχίας. Σε περίπτωση που έχει εντοπιστεί κάποιο έξτρα *onset* ή που δεν έχει εντοπιστεί κάποιο ενώ θα έπρεπε, καταγράφεται με την ένδειξη *Miss*.

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα στα Excel αρχεία κάθε κομματιού για πιάνο, με τον τίτλο του κομματιού να καταγράφεται στην λεζάντα εικόνας. Ακόμη, εμφανίζεται και η παρτιτούρα των αντίστοιχων κομματιών. Οι παρτιτούρες που δημιουργήθηκαν βρίσκονται στον φάκελο *Extracted Music Scores*, ενώ οι σωστές παρτιτούρες στον φάκελο *Correct Music Scores*.

Timestamps	CQT Bass	CQT Melody		Correct Bass	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
0,0348	C3	C4		C3	C4		TRUE	TRUE
0,6153	G3	C4		G3	C4		TRUE	TRUE
1,219	E3	C4		E3	C4		TRUE	TRUE
1,8112	G3	D4	thresh=0.3	G3	D4		TRUE	TRUE
2,4149	C3	E4		C3	E4		TRUE	TRUE
3,0186	G3			G3			TRUE	TRUE
3,6107	F3	D4		F3	D4		TRUE	TRUE
4,2144	G3			G3			TRUE	TRUE
4,8181	E3	C4		E3	C4		TRUE	TRUE
5,4102	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
6,014	F3	D4		F3	D4		TRUE	TRUE
6,6177	D3			D3	D4		TRUE	FALSE
7,2098	E3	C4		E3	C4		TRUE	TRUE
7,8135	G3			G3			TRUE	TRUE
8,4172	F3			F3			TRUE	TRUE
9,021	D3			D3			TRUE	TRUE
9,6131	C3	C4		C3	C4		TRUE	TRUE
10,2168	G3	C4		G3	C4		TRUE	TRUE
10,8205	E3			E3	C4		TRUE	FALSE
11,4126	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
12,0163	C3	E4		C3	E4		TRUE	TRUE
12,62	G3			G3			TRUE	TRUE
13,2122	F3	D4		F3	D4		TRUE	TRUE
13,8159	G3			G3			TRUE	TRUE
14,4196	E3	C4		E3	C4		TRUE	TRUE
15,0117	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
15,6154	F3	D4		F3	D4		TRUE	TRUE
16,2191	B2	D4		B2	D4		TRUE	TRUE
16,8112	C3	C4		C3	C4		TRUE	TRUE
17,415	G3			G3			TRUE	TRUE
18,0187	C3			C3			TRUE	TRUE
						TOTAL:	31	29
							100%	94%
						Total Success:		97%
						Onset Success:		100%

Εικόνα 10.1: Αποτελέσματα του Au Clair de la Lune.

Au Clair de la Lune

Unknown

$\text{♩} = 100$

Piano

Piano

8

Pno

Pno

Εικόνα 10.2: Παρτιτούρα του Au Clair de la Lune.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Timestamp:	CQT Bass	CQT Melody			Correct Bass	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348		E4			C4	E4		FALSE	TRUE
3	1,5209	G3	D4			G3	D4		TRUE	TRUE
4	3,0302	A3	C4			A3	C4		TRUE	TRUE
5	4,5279	E3	B3			E3	B3		TRUE	TRUE
6	6,0256	F3	A3			F3	A3		TRUE	TRUE
7	7,5233	C3	G4		thresh=0.3	C3	G3		TRUE	FALSE
8	9,0326	F3	A3			F3	A3		TRUE	TRUE
9	10,5302	G3	B3			G3	B3		TRUE	TRUE
10	12,0279	C4	E4			C4	E4		TRUE	TRUE
11	13,5256	G3	D4			G3	D4		TRUE	TRUE
12	15,0233	A3	C4			A3	C4		TRUE	TRUE
13	16,521	E3	B3			E3	B3		TRUE	TRUE
14	18,0303	F3	A3			F3	A3		TRUE	TRUE
15	19,528	C3	G3			C3	G3		TRUE	TRUE
16	21,0257	F3	A3			F3	A3		TRUE	TRUE
17	22,5234	G3	B3			G3	B3		TRUE	TRUE
18	24,021		C4				C4		TRUE	TRUE
19	25,5303	G3	D4			G3	D4		TRUE	TRUE
20	26,2734	G3	B3				B3		FALSE	TRUE
21	27,028	A3	C4			A3	C4		TRUE	TRUE
22	27,7827		E4				E4		TRUE	TRUE
23	28,5257	E3	G4			E3	G4		TRUE	TRUE
24	30,0234	F3	A4			F3	A4		TRUE	TRUE
25	30,778	F3	F4				F4		FALSE	TRUE
26	31,5211	C3	E4			C3	E4		TRUE	TRUE
27	33,0304	F3	F4			F3	F4		TRUE	TRUE
28	34,5281	G3	D4			G3	D4		TRUE	TRUE
29	36,0258		C4				C4		TRUE	TRUE
30	36,7804		G4				G4		TRUE	TRUE
31	37,5234	G3				G3	G4		TRUE	FALSE
32	37,9066	G3	A4				A4		FALSE	TRUE
33	38,2781	G3	G4				G4		FALSE	TRUE
34	38,6496	G3	F4				F4		FALSE	TRUE
35	39,0327	A3	E4			A3	E4		TRUE	TRUE
36	39,7758		E4				E4		TRUE	TRUE
37	40,5304	E3				E3	E4		TRUE	FALSE
38	40,902	E3	F4				F4		FALSE	TRUE
39	41,2851	E3	E4				E4		FALSE	TRUE
40	41,6566		D4				D4		TRUE	TRUE
41	42,0281	F3	C5			F3	C4		TRUE	FALSE
42	43,5258	C3	G4			C3	G4		TRUE	TRUE
43	44,2805		E4				E4		TRUE	TRUE
44	45,0235	F3				F3	C4		TRUE	FALSE
45	45,7781	F3	F4				F4		FALSE	TRUE
46	46,1497		E4				E4		TRUE	TRUE
47	46,5328	G3	D4			G3	D4		TRUE	TRUE
48	47,2758	G3	G4				G4		FALSE	TRUE
49	47,659	G3	F4				F4		FALSE	TRUE
50	48,0305		C4			C4	C4		FALSE	TRUE
51	49,5282	G3	D4			G3	D4		TRUE	TRUE
52	50,2828	G3	B3				B3		FALSE	TRUE
53	51,0259	A3	C4			A3	C4		TRUE	TRUE
54	51,7805		E4				E4		TRUE	TRUE
55	52,5235	E3	G4			E3	G4		TRUE	TRUE
56	53,6497		A4				A4		TRUE	TRUE
57	54,0328	F3	F4			F3	F4		TRUE	TRUE
58	54,7759	F3	C4				C4		FALSE	TRUE
59	55,5305	C3	E4			C3	E4		TRUE	TRUE
60	56,2736		G4				G4		TRUE	TRUE
61	57,0282	F3	F4			F3	F4		TRUE	TRUE
62	57,7829	F3	E4				E4		FALSE	TRUE
63	58,5259	G3	D4			G3	D4		TRUE	TRUE
64	59,2805	G3	G4				G4		FALSE	TRUE
65	60,0236	C3	E4			C3	E4		TRUE	TRUE
66								TOTAL:	48	59
67									75%	92%
68								Total Success:	84%	
69								Onset Success	100%	

Εικόνα 10.3: Αποτελέσματα του Canon-Johann Pachelbel.

Canon

Johann Pachelbel

♩ = 80

Piano



10

Pno



16

Pno



Εικόνα 10.4: Παρτιτούρα του Canon-Johann Pachelbel.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamps	CQT Bass	CQT Melody		Correct B	Correct Melody	Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348		G4			G4	TRUE	TRUE
3	0,3831		A4			A4	TRUE	TRUE
4	0,7663	C3	C5		C3	C5	TRUE	TRUE
5	1,1378	E3	C5		E3	C5	TRUE	TRUE
6	1,5093	G3	C5		G3	C5	TRUE	TRUE
7	1,8924	E3	C5		E3	C5	TRUE	TRUE
8	2,2639	C3	A4		C3	A4	TRUE	TRUE
9	2,6471	E3	G4		E3	G4	TRUE	TRUE
10	3,0186	G3	E4		G3	E4	TRUE	TRUE
11	3,3901	E4	G4		E3	G4	FALSE	TRUE
12	3,7616	C3	C5		C3	C5	TRUE	TRUE
13	4,1564	E3		thresh=0.3	E3		TRUE	TRUE
14	4,5163	G3			G3		TRUE	TRUE
15	4,8994	E3			E3		TRUE	TRUE
16	5,2709	C3			C3		TRUE	TRUE
17	5,6424	E3			E3		TRUE	TRUE
18	6,014	G3	C5		G3	C5	TRUE	TRUE
19	6,3971	E3			E3	D5	TRUE	FALSE
20	6,7686	C3	E5		C3	E5	TRUE	TRUE
21	7,1401	E3	E5		E3	E5	TRUE	TRUE
22	7,5233	G3	E5		G3	E5	TRUE	TRUE
23	7,8948	E3	E5		E3	E5	TRUE	TRUE
24	8,2663	C3	G5		C3	G5	TRUE	TRUE
25	8,6378	E3	G5		E3	G5	TRUE	TRUE
26	9,021	G3	G5		G3	G5	TRUE	TRUE
27	9,3925	E3	E5		E3	E5	TRUE	TRUE
28	9,764	B2			B2	D5	TRUE	FALSE
29	10,1471	D3			D3		TRUE	TRUE
30	10,5186	G3	D5		G3		TRUE	FALSE
31	10,9018	D3			D3		TRUE	TRUE
32	11,2733	B2			B2		TRUE	TRUE
33	11,6448	D3			D3		TRUE	TRUE
34	12,0163	G3	G5		G3	G5	TRUE	TRUE
35	12,3878	D3			D3	F5	TRUE	FALSE
36	12,771	C3	E5		C3	E5	TRUE	TRUE
37	13,1425	E3	E5		E3	E5	TRUE	TRUE
38	13,514	G3	E5		G3	E5	TRUE	TRUE
39	13,8971	E3	E5		E3	E5	TRUE	TRUE
40	14,2687	C3			C3	D5	TRUE	FALSE
41	14,6402	E3	C5		E3	C5	TRUE	TRUE
42	15,0233	G3			G3		TRUE	TRUE
43	15,3948	E3			E3		TRUE	TRUE
44	15,7663	F3	C5		F3	C5	TRUE	TRUE
45	16,1379	A3	E5		A3	C5	TRUE	FALSE
46	16,521	C4	C5		C4	C5	TRUE	TRUE
47	16,8925	A3	E5		A3	C5	TRUE	FALSE
48	17,264	F3	F5		F3	F5	TRUE	TRUE
49	17,6472	G#3	F5		G#3	F5	TRUE	TRUE
50	18,0187		C4		C4		FALSE	FALSE
51	18,3902	G#3			G#3		TRUE	TRUE
52	18,7617	G3	E5		G3	E5	TRUE	TRUE
53	19,1449	C4	E5		C4	E5	TRUE	TRUE
54	19,5164		E4		E4	E5	FALSE	FALSE
55	19,8879	C4	E5		C4	E5	TRUE	TRUE
56	20,271	G3			G3	D5	TRUE	FALSE
57	20,6425	B3			B3	D5	TRUE	FALSE
58	21,0141	D4	E5		D4	E5	TRUE	TRUE
59	21,3856	B3			B3	D5	TRUE	FALSE
60	21,7687	C4	C5		C4	C5	TRUE	TRUE
61	22,1402		C4		C4		FALSE	FALSE
62	22,5117	G3			G3		TRUE	TRUE
63	22,8949	E3			E3		TRUE	TRUE
64	23,2664	C3			C3		TRUE	TRUE
65						TOTAL:	59	50
66							92%	78%
67						Total Success:	85%	
68						Onset Success	100%	

Εικόνα 10.5: Αποτελέσματα του Coming round the mountain.

Coming round the mountain

Unknown

The image displays a piano score for the piece "Coming round the mountain". The score is written in 4/4 time with a tempo marking of 162. It is organized into three systems of two staves each (treble and bass clef). The first system covers measures 1 through 7. The second system starts at measure 8 and continues to measure 14. The third system begins at measure 15 and ends with a double bar line. The notation includes various rhythmic values such as eighth and sixteenth notes, as well as rests and slurs.

Εικόνα 10.6: Παρτιτούρα του Coming round the mountain.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Time	stan	CQT Bass	CQT Melody		Correct B	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348			A4			A4		TRUE	TRUE
3	0,6269	A4		C5		A3	C5		FALSE	TRUE
4	1,8228			D5			D5		TRUE	TRUE
5	2,4265	A3		A4	thresh=0.3	A3	E5		TRUE	FALSE
6	3,3321			F5			F5		TRUE	TRUE
7	3,6339			E5			E5		TRUE	TRUE
8	4,226	G3				G3	D5		TRUE	FALSE
9	5,4335			B4			B4		TRUE	TRUE
10	6,0256	G3		G4		G3	G4		TRUE	TRUE
11	6,9312			A4			A4		TRUE	TRUE
12	7,233			B4			B4		TRUE	TRUE
13	7,8251	F3		C5		F3	C5		TRUE	TRUE
14	9,0326			A4			A4		TRUE	TRUE
15	9,6247	A4		C5		F3	A4		FALSE	FALSE
16	10,5302			G#4			G#4		TRUE	TRUE
17	10,8321			A4			A4		TRUE	TRUE
18	11,4242	E3		B4		E3	B4		TRUE	TRUE
19	12,6317			G#4			G#4		TRUE	TRUE
20	13,2238	E3				E3	E4		TRUE	FALSE
21	14,4312			A4			A4		TRUE	TRUE
22	15,0349	A4		C5		A3	C5		FALSE	TRUE
23	16,2307			D5			D5		TRUE	TRUE
24	16,8345	A3		A4		A3	E5		TRUE	FALSE
25	17,7284			F5			F5		TRUE	TRUE
26	18,0303			E5			E5		TRUE	TRUE
27	18,6224	G3				G3	D5		TRUE	FALSE
28	19,8298			B4			B4		TRUE	TRUE
29	20,4336	G3		G4		G3	G4		TRUE	TRUE
30	21,3275			A4			A4		TRUE	TRUE
31	21,6294			B4			B4		TRUE	TRUE
32	22,2331	F3		C5		F3	C5		TRUE	TRUE
33	23,1271			B4			B4		TRUE	TRUE
34	23,4289			A4			A4		TRUE	TRUE
35	24,0327	E3				E3	G#4		TRUE	FALSE
36	24,9382			F#4			F#4		TRUE	TRUE
37	25,2401			G#4			G#4		TRUE	TRUE
38	25,8322			A4		A3	A4		FALSE	TRUE
39	27,6317			A4		A3	A4		FALSE	TRUE
40	29,4313	C4		G5		C4	G5		TRUE	TRUE
41	31,2308			C4		C4	G5		FALSE	FALSE
42	32,1364			F5			F5		TRUE	TRUE
43	32,4383			E5			E5		TRUE	TRUE
44	33,0304	G3		G4		G3	D5		TRUE	FALSE
45	34,2262	G3		B4			B4		FALSE	TRUE
46	34,8299	G3		G4		G3	G4		TRUE	TRUE
47	35,7355			A4			A4		TRUE	TRUE
48	36,0374			B4			B4		TRUE	TRUE
49	36,6295	A3		A4		A3	C5		TRUE	FALSE
50	37,8369			A4			A4		TRUE	TRUE
51	38,429			A4		A3	A4		FALSE	TRUE
52	39,3346			G#4			G#4		TRUE	TRUE
53	39,6365			A4			A4		TRUE	TRUE
54	40,2286	E3		B4		E3	B4		TRUE	TRUE
55	41,436			G#4			G#4		TRUE	TRUE
56	42,0281	E3		B4		E3	E4		TRUE	FALSE
57	43,8277	C4		C5		C4	G5		TRUE	FALSE
58	45,6272	C4		C5		C4	G5		TRUE	FALSE
59	46,5328			F5			F5		TRUE	TRUE
60	46,8346			E5			E5		TRUE	TRUE
61	47,4268	G3				G3	D5		TRUE	FALSE
62	48,6342			B4			B4		TRUE	TRUE
63	49,2379	G3		G4		G3	G4		TRUE	TRUE
64	50,1319			A4			A4		TRUE	TRUE
65	50,4337			B4			B4		TRUE	TRUE
66	51,0375	F3		C5		F3	C5		TRUE	TRUE
67	51,9314	F3		B4			B4		FALSE	TRUE
68	52,2333	F3		A4			A4		FALSE	TRUE
69	52,837	E3		G#4		E3	G#4		TRUE	TRUE
70	53,731			F#4			F#4		TRUE	TRUE
71	54,0328			G#4			G#4		TRUE	TRUE
72	54,6366			A4		A3	A4		FALSE	TRUE
73	56,4361			A4		A3	A4		FALSE	TRUE
74							TOTAL:		60	58
75									82,2%	79,5%
76							Total Success:		80,9%	
77							Onset Success		100%	

Εικόνα 10.7: Αποτελέσματα του Greensleeves.

Greensleeves

Unknown

♩ = 100

Piano

9

Pno

17

Pno

25

Pno

Εικόνα 10.8: Παρτιτούρα του Greensleeves.

1	Timestamps	CQT Bass	CQT Melody		Correct Bas	Correct Melody	Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348		E4			E4	TRUE	TRUE
3	0,3947		G4			G4	TRUE	TRUE
4	0,7779	F4	A4		F4	A4	TRUE	TRUE
5	1,5209		A4	thresh=.3		A4	TRUE	TRUE
6	1,8924		C5			C5	TRUE	TRUE
7	2,2756		B4			B4	TRUE	TRUE
8	2,6471		G4			G4	TRUE	TRUE
9	3,0186	E4	C5		E4	C5	TRUE	TRUE
10	3,4017		E4			E4	TRUE	TRUE
11	3,7732		C5			C5	TRUE	TRUE
12	4,5279		B4			B4	TRUE	TRUE
13	5,2709	F4	A4		F4	A4	TRUE	TRUE
14	5,6541	F4	B4			B4	FALSE	TRUE
15	6,0256		A4			A4	TRUE	TRUE
16	6,7686		G4			G4	TRUE	TRUE
17	7,5233		E4			E4	TRUE	TRUE
18	9,021		E4			E4	TRUE	TRUE
19	9,4041		G4			G4	TRUE	TRUE
20	9,7756	F4	A4		F4	A4	TRUE	TRUE
21	10,5186		A4			A4	TRUE	TRUE
22	10,9018		C5			C5	TRUE	TRUE
23	11,2733		B4			B4	TRUE	TRUE
24	11,6564		G4			G4	TRUE	TRUE
25	12,0279	E4	C5		E4	C5	TRUE	TRUE
26	12,3995		E4			D4	TRUE	FALSE
27	12,771		E5			E5	TRUE	TRUE
28	13,5256		E5			E5	TRUE	TRUE
29	14,2687	F4	E5		F4	E5	TRUE	TRUE
30	14,6518		F4			D4	TRUE	FALSE
31	15,0233		C5			C5	TRUE	TRUE
32	15,7663		D5			D5	TRUE	TRUE
33	16,521	E4	C5		E4	C5	TRUE	TRUE
34							TOTAL:	31 30
35								93,94% 90,91%
36							Total Success:	92,43%
37							Onset Success	100%

Εικόνα 10.9: Αποτελέσματα του Jupiter-Holst.

Jupiter

Holst

The image displays a musical score for the piece 'Jupiter' by Gustav Holst. It features two systems of piano accompaniment. The first system consists of two staves, both labeled 'Piano'. The top staff uses a treble clef and a 3/4 time signature, with a tempo marking of quarter note = 80. The bottom staff also uses a treble clef and 3/4 time. The second system, starting at measure 7, shows two staves labeled 'Pno'. The top staff has a treble clef and the bottom staff has a bass clef. The music is written in a simple, melodic style characteristic of Holst's orchestral accompaniment.

Εικόνα 10.10: Παρτιτούρα του Jupiter-Holst.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody		Correct Bass	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	C3	G4		C3	G4		TRUE	TRUE
3	0,7779		E4			E4		TRUE	TRUE
4	1,5325		D4			D4		TRUE	TRUE
5	2,2756	E3	C4	thresh=.3	E3	C4		TRUE	TRUE
6	3,0302		D4			D4		TRUE	TRUE
7	3,7849		E4			E4		TRUE	TRUE
8	4,5279	C3	G4		C3	G4		TRUE	TRUE
9	5,2825		E4			E4		TRUE	TRUE
10	6,0372		D4			D4		TRUE	TRUE
11	6,7802	E3	C4		E3	C4		TRUE	TRUE
12	7,5349		D4			D4		TRUE	TRUE
13	7,9064		E4			E4		TRUE	TRUE
14	8,2779		D4			D4		TRUE	TRUE
15	8,661		E4			E4		TRUE	TRUE
16	9,0326	C3	G4		C3	G4		TRUE	TRUE
17	9,7872		E4			E4		TRUE	TRUE
18	10,5302		G4			G4		TRUE	TRUE
19	11,2849	C3	A4		C3	A4		TRUE	TRUE
20	12,0395		E4			E4		TRUE	TRUE
21	12,7826		A4			A4		TRUE	TRUE
22	13,5256	C3	G4		C3	G4		TRUE	TRUE
23	14,2803		E4			E4		TRUE	TRUE
24	15,0349		D4			D4		TRUE	TRUE
25	15,778	G3	C4		G3	C4		TRUE	TRUE
26	16,5326	E3			E3			TRUE	TRUE
27	17,2873	D3			D3			TRUE	TRUE
28	18,0303	C3	G4		C3	G4		TRUE	TRUE
29	18,7849		E4			E4		TRUE	TRUE
30	19,528		D4			D4		TRUE	TRUE
31	20,2826	E3	C4		E3	C4		TRUE	TRUE
32	21,0373		D4			D4		TRUE	TRUE
33	21,7803		E4			E4		TRUE	TRUE
34	22,535	C3	G4		C3	G4		TRUE	TRUE
35	23,278		E4			E4		TRUE	TRUE
36	24,0327		D4			D4		TRUE	TRUE
37	24,7757	E3	C4		E3	C4		TRUE	TRUE
38	25,5303	E3	D4			D4		FALSE	TRUE
39	25,9019		E4			E4		TRUE	TRUE
40	26,285		D4			D4		TRUE	TRUE
41	26,6565		E4			E4		TRUE	TRUE
42	27,028	C3	G4		C3	G4		TRUE	TRUE
43	27,7827		E4			E4		TRUE	TRUE
44	28,5373		G4			G4		TRUE	TRUE
45	29,2804	C3	A4		E3	A4		FALSE	TRUE
46	30,035		E4			E4		TRUE	TRUE
47	30,778		A4			A4		TRUE	TRUE
48	31,5327	G3			G3	B4		TRUE	FALSE
49	32,2873	G3	G4			G4		FALSE	TRUE
50	33,0304	G3	B4			B4		FALSE	TRUE
51	33,7734	C3	C5		C3	C5		TRUE	TRUE
52							TOTAL:	46	49
53								92%	96,08%
54							Total Success:	94,04%	
55							Onset Success:	100%	

Εικόνα 10.11: Αποτελέσματα του Morning from Peer Gynt-E.Grieg.

Morning from Peer Gynt

E.Grieg

♩ = 80

Piano

Piano

8

Pno

Pno

16

Pno

Pno

Εικόνα 10.12: Παρτιτούρα του Morning from Peer Gynt-E.Grieg.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody		Correct B	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	C3	E4		C3	C4		TRUE	TRUE
3	0,8824	G3	E4			E4		FALSE	TRUE
4	1,7299		F4			F4		TRUE	TRUE
5	2,589		G4			G4		TRUE	TRUE
6	3,4366		G4	thresh=0.3	G3	G4		FALSE	TRUE
7	4,2957	G3	F4			F4		FALSE	TRUE
8	5,1548	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
9	6,014	G3	D4			D4		FALSE	TRUE
10	6,8731	C3	G4		C3	C4		TRUE	FALSE
11	7,7322	G3	C4			C4		FALSE	TRUE
12	8,5914		D4			D4		TRUE	TRUE
13	9,4389		E4			E4		TRUE	TRUE
14	10,298	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
15	11,5868	G3	D4			D4		FALSE	TRUE
16	12,0163	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
17	13,723	C3	E4			E4		FALSE	TRUE
18	14,5937	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
19	15,4413		F4			F4		TRUE	TRUE
20	16,3004		G4			G4		TRUE	TRUE
21	17,1595	G3	G4		G3	G4		TRUE	TRUE
22	18,0187	G3	F4			F4		FALSE	TRUE
23	18,8662	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
24	19,7254	G3	D4			D4		FALSE	TRUE
25	20,5845	C3	G4		C3	C4		TRUE	FALSE
26	21,4436	G3	C4			C4		FALSE	TRUE
27	22,3028		D4			D4		TRUE	TRUE
28	23,1619		E4			E4		TRUE	TRUE
29	24,0094	D4	D5		G3	D4		FALSE	FALSE
30	25,2981	G3	C4			C4		FALSE	TRUE
31	25,7277	C3	C4		C3	C4		FALSE	TRUE
32	27,446	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
33	28,3051	G3	D4			D4		FALSE	TRUE
34	29,1643		E4			E4		TRUE	TRUE
35	30,0118		C4			C4		TRUE	TRUE
36	30,8709	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
37	31,7301		E4			E4		TRUE	TRUE
38	32,1596		F4			F4		TRUE	TRUE
39	32,5892		E4		G3	E4		FALSE	TRUE
40	33,4483	G3	C4			C4		FALSE	TRUE
41	34,2959	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
42	35,155	G3	E4			E4		FALSE	TRUE
43	35,5846	G3	F4			F4		FALSE	TRUE
44	36,0141	G#3	E4		G#3	E4		FALSE	TRUE
45	36,8733	G#3	D4			D4		FALSE	TRUE
46	37,7208	A3	C4		A3	C4		TRUE	TRUE
47	38,5916	F#3	D4		F#3	D4		FALSE	TRUE
48	39,4507	G3				G4		FALSE	FALSE
49	40,2982		E4			E4		TRUE	TRUE
50	41,1574		C4		C4			FALSE	FALSE
51	42,0165		E4			E4		TRUE	TRUE
52	42,8756	A#3	F4		A#3	F4		FALSE	TRUE
53	43,7348		G4			G4		TRUE	TRUE
54	44,5823	A3	G4		A3	G4		TRUE	TRUE
55	45,4415		F4			F4		TRUE	TRUE
56	46,3006	F3	E4		F3	E4		TRUE	TRUE
57	47,1597	F3	D4			D4		FALSE	TRUE
58	48,0189	E3	E4		E3	C4		TRUE	FALSE
59	48,8664	E3	E4		E3	C4		TRUE	FALSE
60	49,7255	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
61	50,5847	C4	E4		C4	E4		TRUE	TRUE
62	51,4438	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
63	52,7325	C4	C5			C4		FALSE	FALSE
64	53,1621	C3	G4		C3	C4		TRUE	FALSE
65							TOTAL:	37	54
66								60,32%	85,71%
67							Total Success:	73,02%	
68							Onset Success:	100%	

Εικόνα 10.13: Αποτελέσματα του Ode to Joy-Ludwig van Beethoven.

Ode to Joy

Ludwig van Beethoven

$\text{♩} = 70$

Piano



7

Pno



13

Pno



Εικόνα 10.14: Παρτιτούρα του Ode to Joy-Ludwig van Beethoven.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody			Correct Bas	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348		E5				E5		TRUE	TRUE
3	0,7663		F5				F5		TRUE	TRUE
4	1,0217		E5				E5		TRUE	TRUE
5	1,5093		E5				E5		TRUE	TRUE
6	2,5078		A5				A5		TRUE	TRUE
7	3,0186		A5				A5		TRUE	TRUE
8	5,0155		G5				G5		TRUE	TRUE
9	5,5147		F5				F5		TRUE	TRUE
10	6,014		E5				E5		TRUE	TRUE
11	9,0093	F3				F3	D5		TRUE	FALSE
12	9,764	F3	C5				C5		FALSE	TRUE
13	10,0194	F3	B4				B5		FALSE	FALSE
14	10,5186		C5				C5		TRUE	TRUE
15	12,0163	E3		Thresh=0.18		E3			TRUE	TRUE
16	12,771	E3					D5		FALSE	FALSE
17	13,0148		C5				C5		TRUE	TRUE
18	13,514		B4				B4		TRUE	TRUE
19	14,0132		C5				C5		TRUE	TRUE
20	14,5125	C5	D5				D5		FALSE	TRUE
21	15,0117	F3				F3	D5		TRUE	FALSE
22	15,7663	F3	C5				C5		FALSE	TRUE
23	16,0102	F3					B5		FALSE	FALSE
24	16,5094		C5				C5		TRUE	TRUE
25	18,0187	E3				E3			TRUE	TRUE
26	18,7617	E3	B4				B4		FALSE	TRUE
27	19,0171		A4				A4		TRUE	TRUE
28	19,5164		G#4				G#4		TRUE	TRUE
29	21,0141		E5				E5		TRUE	TRUE
30	21,7687		F5				F5		TRUE	TRUE
31	22,0125		E5				E5		TRUE	TRUE
32	22,5117		E5				E5		TRUE	TRUE
33	23,5102		A5				A5		TRUE	TRUE
34	24,0094		A5				A5		TRUE	TRUE
35	26,0063		G5				G5		TRUE	TRUE
36	26,5172		F5				F5		TRUE	TRUE
37	27,0164		E5				E5		TRUE	TRUE
38	30,0118	F3				F3	D5		TRUE	FALSE
39	30,7664	F3	C5				C5		FALSE	TRUE
40	31,0102	F3					B4		FALSE	FALSE
41	31,5095		C5				C5		TRUE	TRUE
42	33,0188	E3				E3			TRUE	TRUE
43	33,7618	E3					D5		FALSE	FALSE
44	34,0172		C5				C5		TRUE	TRUE
45	34,5165		B4				B4		TRUE	TRUE
46	35,0157		C5				C5		TRUE	TRUE
47	35,5149	C5	D5				D5		FALSE	TRUE
48	36,0141	F3				F3	D5		TRUE	FALSE
49	36,7688	F3	C5				C5		FALSE	TRUE
50	37,0126	F3					B4		FALSE	FALSE
51	37,5118		C5				C5		TRUE	TRUE
52	39,0211	E3				E3			TRUE	TRUE
53	39,7642	E3	B4				B4		FALSE	TRUE
54	40,0196		C5				C5		TRUE	TRUE
55	40,5188		C#5				D5		TRUE	FALSE
56	41,018		C5				C5		TRUE	TRUE
57	41,5173		B4				B4		TRUE	TRUE
58	42,0165	E3	E4			E3	B4		TRUE	FALSE
59	43,5142	A3	A4			A3	A4		TRUE	TRUE
60								TOTAL:	44	46
61									75,86%	79,31%
62								Total Success:	78%	
63								Onset Success:	100%	

Εικόνα 10.15: Αποτελέσματα του Theme from Sonata in F K280 -W.A.Mozart.

Theme from Sonata in F K280

W.A.Mozart

The image displays three systems of musical notation for the piano accompaniment of the Theme from Sonata in F K280 by W.A. Mozart. The first system is marked with a tempo of $\text{♩} = 120$. Each system consists of a treble clef staff and a bass clef staff, both labeled 'Piano'. The first system shows measures 1 through 6. The second system starts at measure 7 and continues to measure 12. The third system starts at measure 13 and concludes the piece with a double bar line. The notation includes various rhythmic values, slurs, and articulation marks.

Εικόνα 10.16: Παρτιτούρα του Theme from Sonata in F K280 -W.A.Mozart.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	LH CQT N	RH CQT Notes	Correct LH	Correct RH	CQT LH success rate	CQT RH success rate
2	0,0348	C4		C4		TRUE	TRUE
3	1,0565	B3		B3		TRUE	TRUE
4	2,1014	C4		C4		TRUE	TRUE
5	2,8096	A3	thresh=0.3	A3		TRUE	TRUE
6	3,1579	B3		B3		TRUE	TRUE
7	3,5062	C4		C4		TRUE	TRUE
8	3,8545	A3		A3		TRUE	TRUE
9	4,2028	B3		B3		TRUE	TRUE
10	4,8994		D4		D4	TRUE	TRUE
11	5,2477	G3	E4	G3	E4	TRUE	TRUE
12	5,9443	G3	C#5		C#4	FALSE	FALSE
13	6,2926	D3		D3	D4	TRUE	FALSE
14	8,3824		G4		G4	TRUE	TRUE
15	9,4273		F#4		F#4	TRUE	TRUE
16	10,4838		F4		F4	TRUE	TRUE
17	11,1804		D4		D4	TRUE	TRUE
18	11,5287		F4		F4	TRUE	TRUE
19	11,877		E4		E4	TRUE	TRUE
20	12,2253		D4		D4	TRUE	TRUE
21	12,5736		A4		A4	TRUE	TRUE
22	13,2702		G4		G4	TRUE	TRUE
23	13,6185		F4		F4	TRUE	TRUE
24	14,3151		E4		E4	TRUE	TRUE
25	14,6634	D3	E4	D3	E4	TRUE	TRUE
26	15,0233	D3			D4	FALSE	FALSE
27	15,3716	D3			C#4	FALSE	FALSE
28	15,7199	G3	D4	G3	D4	TRUE	TRUE
29	16,0682	A3		A3		TRUE	TRUE
30	16,4165	B3		B3		TRUE	TRUE
31	16,7648	C4		C4		TRUE	TRUE
32	17,7981	B3		B3		TRUE	TRUE
33	18,8546	C4		C4		TRUE	TRUE
34	19,5512	A3		A3		TRUE	TRUE
35	19,8995	B3		B3		TRUE	TRUE
36	20,2478	C4		C4		TRUE	TRUE
37	20,5961	A3		A3		TRUE	TRUE
38	20,9444	B3		B3		TRUE	TRUE
39	21,641		D4		D4	TRUE	TRUE
40	21,9893	G3	E4	G3	E4	TRUE	TRUE
41	22,6975	G3	C#5		C#4	FALSE	FALSE
42	23,0458	D3		D3	D4	TRUE	FALSE
43	25,1356		E4		E4	TRUE	TRUE
44	25,8322		F4		F4	TRUE	TRUE
45	26,1805		F4		F4	TRUE	TRUE
46	26,8771		F#4		F#4	TRUE	TRUE
47	27,2254		A4		A4	TRUE	TRUE
48	27,922		G4		G4	TRUE	TRUE
49	28,2703		G4		G4	TRUE	TRUE
50	28,9669		B4		B4	TRUE	TRUE
51	29,3152	D3		D3	C5	TRUE	FALSE
52	30,0118	D3			B4	FALSE	FALSE
53	30,3601	G3		G3	B4	TRUE	FALSE
54	31,0567	G3			D5	FALSE	FALSE
55	31,405	C4	C5	C4	C5	TRUE	TRUE
56	32,4615	C3		C3		TRUE	TRUE
57					TOTAL:	49	45
58						89,09%	80,36%
59					Total Success:	85%	
60					Onset Success:	100%	

Εικόνα 10.17: Αποτελέσματα του Waltz from Sleeping Beauty-Pyotr Ilyich Tchaikovsky.

Waltz from Sleeping Beauty

Pyotr Ilyich Tchaikovsky

♩ = 86

Piano

8

Pno

15

Pno

Εικόνα 10.18: Παρτιτούρα του Waltz from Sleeping Beauty-Pyotr Ilyich Tchaikovsky.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	QQT Bass	QQT Melody		Correct Bass	Correct Melody	Bass Success Rate	Melody Success Rate	
2	0,0348		E4			E4	TRUE	TRUE	
3	0,9172		C4			C4	TRUE	TRUE	
4	1,219		C4			C4	TRUE	TRUE	
5	1,5209		E4	thresh=0.3		E4	TRUE	TRUE	
6	1,8228		E4			E4	TRUE	TRUE	
7	2,7167		C4			C4	TRUE	TRUE	
8	3,0186		C4			C4	TRUE	TRUE	
9	3,3205		E4			E4	TRUE	TRUE	
10	3,6107		F4		G3	F4	FALSE	TRUE	
11	4,2144		E4			E4	TRUE	TRUE	
12	4,8181	G3	D4		G3	D4	TRUE	TRUE	
13	5,4102		E4		C4	E4	FALSE	TRUE	
14	6,3158		C4			C4	TRUE	TRUE	
15	6,6177		C4			C4	TRUE	TRUE	
16	6,9195		G4			G4	TRUE	TRUE	
17	7,2214		A4			A4	TRUE	TRUE	
18	8,1154		E4			E4	TRUE	TRUE	
19	8,4172		E4			E4	TRUE	TRUE	
20	8,7191		G4			G4	TRUE	TRUE	
21	9,021		A4			A4	TRUE	TRUE	
22	9,9149		E4			E4	TRUE	TRUE	
23	10,2168		E4			E4	TRUE	TRUE	
24	10,5186		G4			G4	TRUE	TRUE	
25	10,8089	B3	B4		B3	B4	TRUE	TRUE	
26	11,1224		A4			A4	TRUE	TRUE	
27	11,4126		G4			G4	TRUE	TRUE	
28	12,0163		F#4		B3	F#4	FALSE	TRUE	
29	12,62	E4	G4		E4	G4	TRUE	TRUE	
30	13,8159		F4			F4	TRUE	TRUE	
31	14,4196		E4			E4	TRUE	TRUE	
32	15,3136		C4			C4	TRUE	TRUE	
33	15,6154		C4			C4	TRUE	TRUE	
34	15,9173		E4			E4	TRUE	TRUE	
35	16,2191		E4			E4	TRUE	TRUE	
36	17,1131		C4			C4	TRUE	TRUE	
37	17,415		C4			C4	TRUE	TRUE	
38	17,7168		E4			E4	TRUE	TRUE	
39	18,0187		F4		G3	F4	FALSE	TRUE	
40	18,6108		E4			E4	TRUE	TRUE	
41	19,2145	G3	D4		G3	D4	TRUE	TRUE	
42	19,8182		E4		C4	E4	FALSE	TRUE	
43	20,7122		C4			C4	TRUE	TRUE	
44	21,0141	C4	C5			C4	FALSE	FALSE	
45	21,3159		G4			G4	TRUE	TRUE	
46	21,6178		A4			A4	TRUE	TRUE	
47	22,5117		E4			E4	TRUE	TRUE	
48	22,8136		E4			E4	TRUE	TRUE	
49	23,1155		G4			G4	TRUE	TRUE	
50	23,4173		A4			A4	TRUE	TRUE	
51	24,3113		E4			E4	TRUE	TRUE	
52	24,6132		E4			E4	TRUE	TRUE	
53	24,915		G4			G4	TRUE	TRUE	
54	25,2169	E4	C5		E4	C5	TRUE	TRUE	
55	25,5187	E4	G4			G4	FALSE	TRUE	
56	25,8206		F4		G3	F4	FALSE	TRUE	
57	26,4127		D4			D4	TRUE	TRUE	
58	27,0164		C4			C4	TRUE	TRUE	
59							TOTAL:	49	56
60							85,96%	98,25%	
61							Total Success:	92%	
62							Onset Success:	100%	

Εικόνα 10.19: Αποτελέσματα του Waltz-Johannes Brahms.

Waltz

Johannes Brahms

$\text{♩} = 100$

Piano



7

Pno



14

Pno



Εικόνα 10.20: Παρτιτούρα του Waltz-Johannes Brahms.

10.3 Αποτελέσματα Κιθάρας

Τα αποτελέσματα για την κιθάρα εξάγονται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο που ακολουθήθηκε και στο πιάνο και φαίνονται παρακάτω:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody			Correct Bass	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	G2	B3			G2	B3		TRUE	TRUE
3	0,6269	A3				A3			TRUE	TRUE
4	0,9288		C4				C4		TRUE	TRUE
5	1,2307	B3		thresh=0.2		B3			TRUE	TRUE
6	1,8228		D4				D4		TRUE	TRUE
7	2,4265	A3				A3			TRUE	TRUE
8	3,0302		C4				C4		TRUE	TRUE
9	3,6339	B3				B3			TRUE	TRUE
10	4,226	G3				G3			TRUE	TRUE
11	4,8298	G2				G2			TRUE	TRUE
12	5,4335	G2	E3				E3		FALSE	TRUE
13	5,7237	G3				G3			TRUE	TRUE
14	6,0372	F#3				F#3			TRUE	TRUE
15	6,6293	A3				A3			TRUE	TRUE
16	7,233	E3				E3			TRUE	TRUE
17	7,8251	G3				G3			TRUE	TRUE
18	8,4288	D3				D3			TRUE	TRUE
19	9,6247	G2	B3			G2	B3		TRUE	TRUE
20	10,24	G2	A3				A3		FALSE	TRUE
21	10,5302	G2					C4		FALSE	FALSE
22	10,8321	B3				B3			TRUE	TRUE
23	11,4358		D4				D4		TRUE	TRUE
24	12,0279	A3				A3			TRUE	TRUE
25	12,6317		C4				C4		TRUE	TRUE
26	13,2354	B3				B3			TRUE	TRUE
27	13,8275	G3				G3			TRUE	TRUE
28	14,4312	G2				G2			TRUE	TRUE
29	MISS						E3		TRUE	FALSE
30	15,0349	G2				G3			FALSE	TRUE
31	15,6386	F#3				F#3			TRUE	TRUE
32	16,2307	A3				A3			TRUE	TRUE
33	16,8345	E3				E3			TRUE	TRUE
34	17,4382	G3				G3			TRUE	TRUE
35	18,0303	D3				D3			TRUE	TRUE
36	19,2261	G2	D3			G2	D3		TRUE	TRUE
37	19,528	G2	E3				E3		FALSE	TRUE
38	19,8298	F#3				F#3			TRUE	TRUE
39	20,1317	G2				G2			TRUE	TRUE
40	20,4336	A3				A3			TRUE	TRUE
41	21,0257	B3				B3			TRUE	TRUE
42	21,6294		C4				C4		TRUE	TRUE
43	22,2331	A3				A3			TRUE	TRUE
44	22,8252		D4				D4		TRUE	TRUE
45	24,0327	G2	D3			G2	D3		TRUE	TRUE

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

45	24,021	G2	D3			G2	D3		TRUE	TRUE
46	24,3345	G2	D3				E4		FALSE	FALSE
47	24,6364	G2					D4		FALSE	FALSE
48	24,9266	G2	E4				E4		FALSE	TRUE
49	25,2285	G2	C4				C4		FALSE	TRUE
50	25,5303		D4				D4		TRUE	TRUE
51	25,8322		C4				C4		TRUE	TRUE
52	26,1341		D4				D4		TRUE	TRUE
53	26,4359	B3				B3			TRUE	TRUE
54	26,7262		C4				C4		TRUE	TRUE
55	27,028	A3				A3			TRUE	TRUE
56	27,3299		D4				D4		TRUE	TRUE
57	27,6317	B3				B3			TRUE	TRUE
58	28,2355	G3				G3			TRUE	TRUE
59	28,8276	G2				G2	D3		TRUE	FALSE
60	29,141	G2	E3				E3		FALSE	TRUE
61	29,4313	G2	F#3				F#3		FALSE	TRUE
62	29,7332	G3				G3			TRUE	TRUE
63	30,035	A3				A3			TRUE	TRUE
64	30,6387	B3				B3			TRUE	TRUE
65	31,2308		C4				C4		TRUE	TRUE
66	31,8346	A3				A3			TRUE	TRUE
67	32,4383		D4				D4		TRUE	TRUE
68	33,6341	G2	D3			G2	D3		TRUE	TRUE
69	33,936	G2	D3			G2	E4		TRUE	FALSE
70	MISS						D4		TRUE	FALSE
71	34,5397	D3					E4		FALSE	FALSE
72	34,8299		C4				C4		TRUE	TRUE
73	35,1318		D4				D4		TRUE	TRUE
74	35,4337		C4				C4		TRUE	TRUE
75	35,7355		D4				D4		TRUE	TRUE
76	36,0374	B3				B3			TRUE	TRUE
77	36,3276		C4				C4		TRUE	TRUE
78	36,6295	A3				A3			TRUE	TRUE
79	36,9313		D4				D4		TRUE	TRUE
80	37,2332	G3				G3			TRUE	TRUE
81								TOTAL:	67	71
82									84,81%	89,87%
83								Total Success:	87,39%	
84								Onset Success:	97,47%	

Εικόνα 10.21: Αποτελέσματα του Bourree-Le Couppey.

Bourree

Le Couppey

♩ = 100

Guitar



7

Gtr



12

Gtr



Εικόνα 10.22: Παρτιτούρα του Bourree-Le Couppey.

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody		Correct Bass	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	G2			G2	D4		TRUE	FALSE
3	0,6153	G2				D4		FALSE	FALSE
4	1,219	G3	B3		G3	B3		TRUE	TRUE
5	1,8228		D4	thresh=0.3		D4		TRUE	TRUE
6	2,4149	G2	E4		G2	E4		TRUE	TRUE
7	3,0186	G2				D4		FALSE	FALSE
8	3,6107	G3	B3		G3	B3		TRUE	TRUE
9	4,8181	D3	B3		D3	B3		TRUE	TRUE
10	5,4219		A3			A3		TRUE	TRUE
11	6,0256	A2	A3		A2			TRUE	FALSE
12	7,2214	D3	B3		D3	B3		TRUE	TRUE
13	7,8135	D3	A3			A3		FALSE	TRUE
14	8,4172	A2	A3		A2			TRUE	FALSE
15	9,6131	G2	D4		G2	D4		TRUE	TRUE
16	10,2168	G2				D4		FALSE	FALSE
17	10,8205	G3	B3		G3	B3		TRUE	TRUE
18	11,4242		D4			D4		TRUE	TRUE
19	12,0163	G2	E4		G2	E4		TRUE	TRUE
20	12,62	G2				D4		FALSE	FALSE
21	13,2238	G3	B3		G3	B3		TRUE	TRUE
22	14,4196	D3	A3		D3	A3		TRUE	TRUE
23	15,3136		C4			C4		TRUE	TRUE
24	15,6154	G3	B3		G3	B3		TRUE	TRUE
25	16,2191	D3	A3		D3	A3		TRUE	TRUE
26	16,8229	G2	G3		G2	G3		TRUE	TRUE
27	17,415		D3			D3		TRUE	TRUE
28	17,7168		E3			E3		TRUE	TRUE
29	18,0187		G3			G3		TRUE	TRUE
30	18,3205		A3			A3		TRUE	TRUE
31	18,6224		G3			G3		TRUE	TRUE
32						TOTAL:		25	23
33								83,33%	76,67%
34						Total Success:		80%	
35						Onset Success:		100%	

Εικόνα 10.23: Αποτελέσματα του Camptown Races-Traditional.

Camptown Races

Traditional

♩ = 100

Guitar

Guitar

Gtr

Gtr

Εικόνα 10.24: Παρτιτούρα του Camptown Races-Traditional.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody		Correct Bass	Correct Melody	Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	A2			A2	C#4	TRUE	FALSE
3	0,5457		C#4			C#4	TRUE	TRUE
4	1,0913	E3			E3	C#4	TRUE	FALSE
5	1,4048	E3	C4	thresh=0.3		C4	FALSE	TRUE
6	1,6254		C#4			C#4	TRUE	TRUE
7	1,9505		D4			D4	TRUE	TRUE
8	2,1595	A2	E4		A2	E4	TRUE	TRUE
9	3,2276	E3			E3		TRUE	TRUE
10	4,2957	A2	E4		A2	E4	TRUE	TRUE
11	4,6208	A2				E4	FALSE	FALSE
12	5,1664		E4			E4	TRUE	TRUE
13	5,3754	E3			E3	E4	TRUE	FALSE
14	5,9095	F#2				F#4	FALSE	FALSE
15	6,4435	A2	G4		A2	G4	TRUE	TRUE
16	7,5233	E3			E3		TRUE	TRUE
17	8,5914	D3			D3	D4	TRUE	FALSE
18	8,9165	D3				D4	FALSE	FALSE
19	9,4505	A3			A3		TRUE	TRUE
20	10,1936	B3			B3		TRUE	TRUE
21	10,7276	D3	C4		D3	C4	TRUE	TRUE
22	11,0527	B3			B3		TRUE	TRUE
23	11,5868	A3			A3		TRUE	TRUE
24	12,3414	F#3			F#3		TRUE	TRUE
25	12,8522	F#3	G#3	MISS			FALSE	FALSE
26	12,8871		A3		A2	A3	FALSE	TRUE
27	13,9436	E3			E2		FALSE	TRUE
28	14,2338	B3		MISS			FALSE	TRUE
29	14,2803	C3			C3		TRUE	TRUE
30	14,4776	C#3			C#3		TRUE	TRUE
31	14,8027	E3			E3		TRUE	TRUE
32	15,0117	A3	A3		A2	A3	FALSE	TRUE
33	16,0914	E3			E3		TRUE	TRUE
34	16,6255		C#4			C#4	TRUE	TRUE
35	16,9506		C4			C4	TRUE	TRUE
36	17,1595		C#4		E2	C#4	FALSE	TRUE
37	17,4846	B3			B3		TRUE	TRUE
38	18,0187	E3			E3		TRUE	TRUE
39	18,2393	E3			B2		FALSE	TRUE
40	18,7617		C#4			C#4	TRUE	TRUE
41	19,0868		C4			C4	TRUE	TRUE
42	19,3074	E3	C#4		E2	C#4	FALSE	TRUE
43	19,6325	B3			B3		TRUE	TRUE
44	19,8415	G#3			G#3		TRUE	TRUE
45	20,1665	E3			E3		TRUE	TRUE
46	20,3755		B3		E2	B3	FALSE	TRUE
47	20,7006	E3	B3			B3	FALSE	TRUE
48	21,2346	A3			A3	C#4	TRUE	FALSE
49	21,4552	A2			A2		TRUE	TRUE
50	22,5234	E3			E3		TRUE	TRUE
51	22,8368	E3	C#4			C#4	FALSE	TRUE
52	23,0574		C4			C4	TRUE	TRUE
53	23,3825		C#4			C#4	TRUE	TRUE
54	23,5915		A3		A2	A3	FALSE	TRUE
55	24,1255	E3			E3		TRUE	TRUE
56	24,6712	A2			A2		TRUE	TRUE
57						TOTAL:	39	46
58							70,91%	83,64%
59						Total Success:	77,28%	
60						Onset Success:	96,36%	

Εικόνα 10.25: Αποτελέσματα του Dallas Blues-C.H. Wand.

Dallas Blues

C.H. Wand

$\text{♩} = 112$

The image displays a musical score for the piece "Dallas Blues" by C.H. Wand. It consists of two guitar parts, each written on a five-line staff with a treble clef. The key signature is two sharps (F# and C#), and the time signature is 4/4. The tempo is marked as quarter note = 112. The score is divided into three systems, with measure numbers 1, 6, and 11 indicated at the beginning of each system. The first system (measures 1-5) shows the initial melodic and harmonic ideas. The second system (measures 6-10) continues the development of the piece. The third system (measures 11-14) concludes the piece with a final cadence. The notation includes various rhythmic values, accidentals, and phrasing slurs.

Εικόνα 10.26: Παρτιτούρα του Dallas Blues-C.H. Wand.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody			Correct B:	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	G3				G3			TRUE	TRUE
3	0,3135	C3				C3	C4		TRUE	FALSE
4	0,6153	E3				E3			TRUE	TRUE
5	0,9172	G3			thresh=0.3	G3			TRUE	TRUE
6	1,219	G2				G2	D4		TRUE	FALSE
7	1,5209	D3				D3			TRUE	TRUE
8	1,8228	G3				G3			TRUE	TRUE
9	2,113	C3	E4			C3	E4		TRUE	TRUE
10	2,4149	E3				E3			TRUE	TRUE
11	2,7167	G3				G3			TRUE	TRUE
12	3,0186		C4				C4		TRUE	TRUE
13	3,3205	E3				E3			TRUE	TRUE
14	3,6223	E3	E4				E4		FALSE	TRUE
15	3,9126	D3				D3	F4		TRUE	FALSE
16	4,226	G3				G3			TRUE	TRUE
17	4,5163	G3				F4			FALSE	TRUE
18	4,8181	C3				C3	E4		TRUE	FALSE
19	5,12	C3	D4				D4		FALSE	TRUE
20	5,4219	C3	E4				E4		FALSE	TRUE
21	5,7121	G2				G2	D4		TRUE	FALSE
22	6,014	D3				D3			TRUE	TRUE
23	6,3158	G3				G3			TRUE	TRUE
24	6,6177		D4				D4		TRUE	TRUE
25	7,2214	G3				G3			TRUE	TRUE
26	7,5117	F3	A3			F2	A3		FALSE	TRUE
27	8,4172	G2	B3			G2	B3		TRUE	TRUE
28	9,3228	A2	A3			A2	C4		TRUE	FALSE
29	9,6247	B3	D4			B2	D4		FALSE	TRUE
30	9,9149	C3	E4			C2	E4		FALSE	TRUE
31	10,2168	F3	A3			F2	A3		FALSE	TRUE
32	10,5186	F2	F3				D4		FALSE	FALSE
33	10,8205	F2	F3				F4		FALSE	FALSE
34	11,1224	G2				G2	E4		TRUE	FALSE
35	11,4242	G3				G3			TRUE	TRUE
36	11,7145		C4				C4		TRUE	TRUE
37	12,0163	G2				G2	D4		TRUE	FALSE
38	12,3298	B2	B3			B2			TRUE	FALSE
39	12,62	G3				G3			TRUE	TRUE
40	12,771	G3			MISS				FALSE	TRUE
41	12,9219	G3	C4				C4		FALSE	TRUE
42	13,2238	G3				G3			TRUE	TRUE
43	13,514	E3				E3			TRUE	TRUE
44	13,8159	C3	G3			C3	G3		TRUE	TRUE
45	16,2191	G3				G3			TRUE	TRUE
46	16,521	C3				C3	C4		TRUE	FALSE
47	16,8229	E3				E3			TRUE	TRUE
48	17,1247	G3				G3			TRUE	TRUE
49	17,415	G2	D4			G2	D4		TRUE	TRUE
50	17,7168	D3				D3			TRUE	TRUE
51	18,0187	G3				G3			TRUE	TRUE
52	18,3205	C3	E4			C3	E4		TRUE	TRUE
53	18,6224	E3				E3			TRUE	TRUE
54	18,9243	G3				G3			TRUE	TRUE
55	19,2145		C4				C4		TRUE	TRUE
56	19,5164	E3				E3			TRUE	TRUE
57	19,8182	E3	E4				E4		FALSE	TRUE
58	20,1201	D3				D3	F4		TRUE	FALSE
59	20,422	G3				G3			TRUE	TRUE
60	20,7238	G3				F4			FALSE	TRUE
61	21,0141	C3				C3	E4		TRUE	FALSE
62	21,3275	C3	D4				D4		FALSE	TRUE
63	21,6178	C3	E4				E4		FALSE	TRUE
64	21,9196	G2				G2	D4		TRUE	FALSE
65	22,2215	D3				D3			TRUE	TRUE
66	22,5234	G3				G3			TRUE	TRUE
67	22,8252		D4				D4		TRUE	TRUE
68	23,4173	G3				G3			TRUE	TRUE
69	23,7192	F3	A3			F2	A3		FALSE	TRUE
70	24,6132	G2	B3			G2	B3		TRUE	TRUE
71	25,5187	A2	A3			A2	C4		TRUE	FALSE
72	25,8206	B3	D4			B2	D4		FALSE	TRUE
73	26,1224	C3	E4			C2	E4		FALSE	TRUE
74	26,4243	F3	A3			F2	A3		FALSE	TRUE
75	26,7262	F2	F3				D4		FALSE	FALSE
76	27,0184	F2	F3				F4		FALSE	FALSE
77	27,3183	G2				G2	E4		TRUE	FALSE
78	27,6201	G3				G3			TRUE	TRUE
79	27,922		C4				C4		TRUE	TRUE
80	28,2239	G2				G2	D4		TRUE	FALSE
81	28,5257	B2	B3			B2			TRUE	FALSE
82	28,8276	G3				G3			TRUE	TRUE
83	29,1178		C4				C4		TRUE	TRUE
84	29,4197	G3				G3			TRUE	TRUE
85	29,7215	E3				E3			TRUE	TRUE
86	30,0234	C3	G3			C3	G3		TRUE	TRUE
87									TRUE	TRUE
88								TOTAL:	64	64
89									75,29%	75,29%
90								Total Success:	75,29%	
91								Onset Success:	98,82%	

Εικόνα 10.27: Αποτελέσματα του I Can't Help Falling In Love-Jean Paul Egide Martini.

I Can't Help Falling In Love

Jean Paul Egide Martini

♩ = 100

Guitar

Guitar

4

Gtr

Gtr

8

Gtr

Gtr

Εικόνα 10.28: Παρτιτούρα του I Can't Help Falling In Love-Jean Paul Egide Martini.

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody		Correct B	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
3	0,6153	G3	D4			D4		FALSE	TRUE
4	1,219		C4			C4		TRUE	TRUE
5	1,6718	A3	D4	MISS				FALSE	FALSE
6	1,8228		D4			D4		TRUE	TRUE
7	2,4149	G3	E4	thresh=0.6	G3	E4		TRUE	TRUE
8	3,0186		E4			E4		TRUE	TRUE
9	3,6223		E4			E4		TRUE	TRUE
10	4,8181	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
11	5,4219	G3	D4			D4		FALSE	TRUE
12	6,0256		D4			D4		TRUE	TRUE
13	7,2214	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
14	7,8135	G3				G4		FALSE	FALSE
15	8,4172		G4			G4		TRUE	TRUE
16	9,6131	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
17	10,2168	G3	D4			D4		FALSE	TRUE
18	10,8205		C4			C4		TRUE	TRUE
19	11,4242		D4			D4		TRUE	TRUE
20	12,0163	G3	E4		G3	E4		TRUE	TRUE
21	12,62		E4			E4		TRUE	TRUE
22	13,2238		E4			E4		TRUE	TRUE
23	13,8159		E4			E4		TRUE	TRUE
24	14,4196	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
25	15,0233	G3	D4			D4		FALSE	TRUE
26	15,6154		E4			E4		TRUE	TRUE
27	16,2191		D4			D4		TRUE	TRUE
28	16,8229	E3	C4		E3	C4		TRUE	TRUE
29									
30							TOTAL:	21	25
31								77,78%	92,59%
32							Total Success:	85,19%	
33							Onset Successes:	96,30%	

Εικόνα 10.29: Αποτελέσματα του Mary Had A Little Lamb-Traditional.

Mary Had A Little Lamb

Traditional

$\text{♩} = 100$

The image displays a musical score for the traditional song 'Mary Had A Little Lamb'. It consists of two systems of staves. The first system has two staves, both labeled 'Guitar', in a 4/4 time signature. The tempo is marked as 100. The top staff contains a melodic line with eighth and quarter notes, and the bottom staff contains a harmonic accompaniment with quarter and half notes. The second system also has two staves, both labeled 'Gtr', continuing the melodic and harmonic lines from the first system.

Εικόνα 10.30: Παρτιτούρα του Mary Had A Little Lamb-Traditional.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody		Correct B	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,058	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
3	0,6502	G3			G4			FALSE	TRUE
4	1,2539	G2			G2			TRUE	TRUE
5	1,8576	G3	B3		G3	B3		TRUE	TRUE
6	2,4497	G3	D4			D4		FALSE	TRUE
7	3,0534	B2	B3		B2			TRUE	FALSE
8	3,6571	E3	G3		E3	G3		TRUE	TRUE
9	3,959	E3	A3			A3		FALSE	TRUE
10	4,2493	C3	B3		C3	B3		TRUE	TRUE
11	4,853	D3	A3		D3	A3		TRUE	TRUE
12	5,4567	G2	B3		G2	B3		TRUE	TRUE
13	6,0604	G2	G3			G3		FALSE	TRUE
14	6,3507	G2	A3			A3		FALSE	TRUE
15	6,6525	A3	B3	MISS				FALSE	FALSE
16	6,7686	B3			B3			TRUE	TRUE
17	6,9544		C4			C4		TRUE	TRUE
18	7,2446	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
19	7,8135	G3				G4		FALSE	FALSE
20	8,4172	G2			G2			TRUE	TRUE
21	9,021	G3	B3	thresh=0.6	G3	B3		TRUE	TRUE
22	9,6247		D4			D4		TRUE	TRUE
23	10,2168	B3			B3			TRUE	TRUE
24	10,8205	E3	G3		E3	G3		TRUE	TRUE
25	11,1224	E3	A3			A3		FALSE	TRUE
26	11,4242	C3	B3		C3	B3		TRUE	TRUE
27	12,0163	D3	A3		D3	A3		TRUE	TRUE
28	12,62	G2	G3		G2	G3		TRUE	TRUE
29	13,2238	B2	B3		B2			TRUE	FALSE
30	13,8159	D3			D3			TRUE	TRUE
31	14,4196	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
32	15,0233	G3			G4			FALSE	TRUE
33	15,6154	G2			G2			TRUE	TRUE
34	16,2191	G3	B3		G3	B3		TRUE	TRUE
35	16,8229		D4			D4		TRUE	TRUE
36	17,415	B2	B3		B2			TRUE	FALSE
37	18,0187	E3	G3		E3	G3		TRUE	TRUE
38	18,3205	E3	A3			A3		FALSE	TRUE
39	18,6224	C3	B3		C3	B3		TRUE	TRUE
40	19,2145	D3	A3		D3	A3		TRUE	TRUE
41	19,8182	G2	B3		G2	B3		TRUE	TRUE
42	20,422	G2	G3			G3		FALSE	TRUE
43	20,7238	G2	A3			A3		FALSE	TRUE
44	21,0257	A3	B3	MISS				FALSE	FALSE
45	21,1418	B3			B3			TRUE	TRUE
46	21,3159		C4			C4		TRUE	TRUE
47	21,6178	G3	D4		G3	D4		TRUE	TRUE
48	22,2215	G3			G4			FALSE	TRUE
49	22,8252	G2			G2			TRUE	TRUE
50	23,4173	G3	B3		G3	B3		TRUE	TRUE
51	24,021		D4			D4		TRUE	TRUE
52	24,6248	B3			B3			TRUE	TRUE
53	25,2169	E3	G3		E3	G3		TRUE	TRUE
54	25,5187	E3	A3			A3		FALSE	TRUE
55	25,8206	C3	B3		C3	B3		TRUE	TRUE
56	26,4243	D3	A3		D3	A3		TRUE	TRUE
57	27,0164	G2	G3		G2	G3		TRUE	TRUE
58							TOTAL:	41	50
59								73,21%	89,29%
60							Total Succses:	81,25%	
61							Onset Succses:	96,43%	

Εικόνα 10.31: Αποτελέσματα του Menuett-Georg Philipp Telemann.

Menuett

Georg Philipp Telemann

$\text{♩} = 100$

Guitar

Guitar

Gtr

Gtr

Gtr

Gtr

Εικόνα 10.32: Παρτιτούρα του Menuett-Georg Philipp Telemann.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody		Correct Ba	Correct Melody		Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	A2	A3		A2	E3		TRUE	FALSE
3	0,3715	A3			A3			TRUE	TRUE
4	0,7314	B3			B3			TRUE	TRUE
5	1,0913	E3	B3	thresh=0.3	E2	C4		FALSE	FALSE
6	1,4512	B3			B3			TRUE	TRUE
7	1,7995	A3			A3			TRUE	TRUE
8	2,1595	A3			A2	E4		FALSE	FALSE
9	2,3452	A3			A3			TRUE	TRUE
10	2,5194		C4			C4		TRUE	TRUE
11	2,6703	A3		MISS				FALSE	TRUE
12	2,7051	A3			A3			TRUE	TRUE
13	2,8793		C4			C4		TRUE	TRUE
14	3,0534	A3			A3			TRUE	TRUE
15	3,2392	E3	B3		E2			FALSE	FALSE
16	3,4133	A3			A3			TRUE	TRUE
17	3,5875		C4			C4		TRUE	TRUE
18	3,7732	A3			A3			TRUE	TRUE
19	3,9474		C4			C4		TRUE	TRUE
20	4,1215	A3			A3			TRUE	TRUE
21	4,3073	A3	E3		A2	E3		FALSE	TRUE
22	4,6672	A3			A3			TRUE	TRUE
23	5,0155	B3			B3			TRUE	TRUE
24	5,3754	E3	B3		E2	C4		FALSE	FALSE
25	5,7353	B3			B3			TRUE	TRUE
26	6,0952	A3			A3			TRUE	TRUE
27	6,4435	D3			D3	F4		TRUE	FALSE
28	6,6293	A3			A3			TRUE	TRUE
29	6,8034		D4			D4		TRUE	TRUE
30	6,9892	A3			A3			TRUE	TRUE
31	7,1634		D4			D4		TRUE	TRUE
32	7,3375	A3			A3			TRUE	TRUE
33	7,5233	A3			A2			FALSE	TRUE
34	7,6974	A3			A3			TRUE	TRUE
35	7,8716		D4			D4		TRUE	TRUE
36	8,0573	A3			A3			TRUE	TRUE
37	8,2315		D4			D4		TRUE	TRUE
38	8,4172	A3			A3			TRUE	TRUE
39	8,5914	D3			D3	D4		TRUE	FALSE
40	8,9513	D3				E4		FALSE	FALSE
41	9,1254	A3			A3			TRUE	TRUE
42	9,2996	A3				F4		FALSE	FALSE
43	9,6595	D3			D3	F4		TRUE	FALSE
44	10,0194	C3			C2	E4		FALSE	FALSE
45	10,3793	B3			B2	D4		FALSE	FALSE
46	10,7276	A3			A2	E4		FALSE	FALSE
47	10,9134	E3			E3			TRUE	TRUE
48	11,0875	A3			A3			TRUE	TRUE
49	11,2733		C4			C4		TRUE	TRUE
50	11,4474	A3			A3			TRUE	TRUE
51	11,6216	E3			E3			TRUE	TRUE
52	11,8073	A2			A2	C4		TRUE	FALSE
53	12,1673	G2			G2			TRUE	TRUE
54	12,5156	F2	F3		F2			TRUE	FALSE
55	12,8755	E3	E3		E2	E3		FALSE	TRUE
56	13,2354	G#3			G#3			TRUE	TRUE
57	13,4095	D3	G#3		D3			TRUE	FALSE
58	13,5953	D3	B3			B3		FALSE	TRUE
59	13,9436	E3	D4		E3	D4		TRUE	TRUE
60	14,3035	G#3			G#3	C4		TRUE	FALSE
61	14,6634	E3	B3		E3	B3		TRUE	TRUE
62	14,7795	E3	B3	MISS				FALSE	FALSE
63	15,0233	A3			A3			TRUE	TRUE
64	15,1975	E3	A3		E3			TRUE	FALSE
65	15,3832	C3			C3			TRUE	TRUE
66	15,5574	E3			E3			TRUE	TRUE
67	15,7431	B2	B3		B2			TRUE	FALSE
68	15,9173	E3			E3			TRUE	TRUE
69	16,0914	A2			A2			TRUE	TRUE
70							TOTAL:	53	48
71								77,94%	70,59%
72							Total Success:	74,27%	
73							Onset Success:	97,06%	

Εικόνα 10.33: Αποτελέσματα του Metsakukkia(Woodland Flowers)-Philip DeWalt.

Metsakukkia(Woodland Flowers)

Philip DeWalt

♩ = 166

Guitar

Guitar

Gtr

Gtr

Gtr

Gtr

Εικόνα 10.34: Παρτιτούρα του Metsakukkia(Woodland Flowers)-Philip DeWalt.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody	Correct B	Correct Melody	Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	A2		A2	A3	TRUE	FALSE
3	0,6153		C4		C4	TRUE	TRUE
4	1,219	F3	B3	F3	B3	TRUE	TRUE
5	1,8112	F3	A3		A3	FALSE	TRUE
6	2,4149	C3	E4	C3	E4	TRUE	TRUE
7	2,7167	B2	B3	B2		TRUE	FALSE
8	3,0186	C3		C3		TRUE	TRUE
9	3,3205	D3		D3		TRUE	TRUE
10	3,5759	D3	MISS			FALSE	TRUE
11	3,6223	E3	B3	E3	B3	TRUE	TRUE
12	4,1215	B3	MISS			FALSE	TRUE
13	4,2144	A3		A3		TRUE	TRUE
14	4,5163	G#3		G#3		TRUE	TRUE
15	4,8181	A2	A3	A2	A3	TRUE	TRUE
16	5,4102		C4		C4	TRUE	TRUE
17	6,014	F3	B3	F3	B3	TRUE	TRUE
18	6,6177	F3	A3		A3	FALSE	TRUE
19	7,2098	C3	E4	C3	E4	TRUE	TRUE
20	7,5233	B3	E4	B3		TRUE	FALSE
21	7,8135	C3		C3		TRUE	TRUE
22	8,1154	D3		D3		TRUE	TRUE
23	8,4172	E3	B3	E3	B3	TRUE	TRUE
24	9,6131	A2		A2	A3	TRUE	FALSE
25	10,2168		C4		C4	TRUE	TRUE
26	10,8205	F3	B3	F3	B3	TRUE	TRUE
27	11,4126	F3	A3		A3	FALSE	TRUE
28	12,0163	C3	E4	C3	E4	TRUE	TRUE
29	12,3298	B3		B3		TRUE	TRUE
30	12,62	C3		C3		TRUE	TRUE
31	12,9219	D3		D3		TRUE	TRUE
32	13,2122	E3	B3	E3	B3	TRUE	TRUE
33	13,8159	A3		A3		TRUE	TRUE
34	14,1177	G#3		G#3		TRUE	TRUE
35	14,4196	A2		A2		TRUE	TRUE
36	15,0117	A2	C4		C4	FALSE	TRUE
37	15,6154	F3	B3	F3	B3	TRUE	TRUE
38	16,2191	F3	A3		A3	FALSE	TRUE
39	16,8112	C3	E4	C3	E4	TRUE	TRUE
40	17,1247	B2	B3	B2		TRUE	FALSE
41	17,415	C3		C3		TRUE	TRUE
42	17,7168	D3		D3		TRUE	TRUE
43	18,0187	E3	B3	E3	B3	TRUE	TRUE
44	19,2145	A2	A3	A2	A3	TRUE	TRUE
45	19,5164	B3		B3		TRUE	TRUE
46	19,8182		C4		C4	TRUE	TRUE
47	20,1201	A3		A3		TRUE	TRUE
48	20,422	F3		F3	D4	TRUE	FALSE
49	21,0141	D3		D3		TRUE	TRUE
50	21,6178	G2	B3	G2	B3	TRUE	TRUE
51	21,9198	G2	C4		C4	FALSE	TRUE
52	22,1288	G3	MISS			FALSE	TRUE
53	22,2215		D4		D4	TRUE	TRUE
54	22,5234	B3		B3		TRUE	TRUE
55	22,8138	G3		G3	E4	TRUE	FALSE
56	23,3244	G3	MISS	G3		TRUE	TRUE
57	23,4173	C3		C3		TRUE	TRUE
58	24,021	F3		F3	D4	TRUE	FALSE
59	24,6132	E3		E3	C4	TRUE	FALSE
60	25,2189	D3	B3	D3	B3	TRUE	TRUE
61	25,8208	C3	A3	C3	A3	TRUE	TRUE
62	26,4127	D3	B3	D3	B3	TRUE	TRUE
63	27,0164	E3	A3	E3	A3	TRUE	TRUE
64	27,3183	G#3		G#3		TRUE	TRUE
65	27,8201	C3	A3	C3	A3	TRUE	TRUE
66	28,2122	C3	E4		E4	FALSE	TRUE
67	28,816	A2	A3	A2	A3	TRUE	TRUE
68	29,1178	A2	B3		B3	FALSE	TRUE
69	29,4197	A2	C4		C4	FALSE	TRUE
70	29,7215	A3		A3		TRUE	TRUE
71	30,0118	F3		F3	D4	TRUE	FALSE
72	30,6155	D3		D3		TRUE	TRUE
73	31,2192	G2	B3	G2	B3	TRUE	TRUE
74	31,5211	G2	G3		C4	FALSE	FALSE
75	31,7301	G3	MISS			FALSE	TRUE
76	31,8229		D4		D4	TRUE	TRUE
77	32,1132	B3		B3		TRUE	TRUE
78	32,4151	G3		G3	E4	TRUE	FALSE
79	33,0188	C3		C3		TRUE	TRUE
80	33,6225	F3		F3	D4	TRUE	FALSE
81	34,2148	E3		E3	C4	TRUE	FALSE
82	34,8183	D3	B3	D3	B3	TRUE	TRUE
83	35,422	C3	A3	C3	A3	TRUE	TRUE
84	36,0141	D3	B3	D3	B3	TRUE	TRUE
85	36,6179	E3	A3	E3	A3	TRUE	TRUE
86	36,9197	G#3		G#3		TRUE	TRUE
87	37,2216	A2		A2	A3	TRUE	FALSE
88						72	71
89						83,72%	82,56%
90						Total Success:	83,14%
91						Onset Success:	94,19%

Εικόνα 10.35: Αποτελέσματα του Passetpied-Georg Philipp Telemann.

Passepied

Georg Philipp Telemann

$\text{♩} = 100$

The musical score consists of two guitar staves. The first system (measures 1-5) shows the beginning of the piece with a tempo marking of quarter note = 100. The second system (measures 6-10) continues the melody and accompaniment. The third system (measures 11-16) shows further development of the piece. The fourth system (measures 17-18) concludes the piece with a double bar line.

Εικόνα 10.36: Παρτιτούρα του Passepied-Georg Philipp Telemann.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody	Correct B:	Correct Melody	Bass Success Rate	Melody Success Rate	
2	0,0348	A2		A2		TRUE	TRUE	
3	0,3135	E3		E3		TRUE	TRUE	
4	0,6153	A3		A3		TRUE	TRUE	
5	0,9172		C4		C4	TRUE	TRUE	
6	1,219	A2		A2		TRUE	TRUE	
7	1,5209	E3		E3		TRUE	TRUE	
8	1,8228	A3		A3		TRUE	TRUE	
9	2,113		C4		C4	TRUE	TRUE	
10	2,4149	A2		A2		TRUE	TRUE	
11	2,7167	E3		E3		TRUE	TRUE	
12	3,0186	A3		A3		TRUE	TRUE	
13	3,3205		C4		C4	TRUE	TRUE	
14	3,6223	A2		A2		TRUE	TRUE	
15	3,9242	E3		E3		TRUE	TRUE	
16	4,2144	A3		A3		TRUE	TRUE	
17	4,5163		C4		C4	TRUE	TRUE	
18	4,8181	A2	E4	A2	E4	TRUE	TRUE	
19	5,12	E3		E3		TRUE	TRUE	
20	5,4219	A3		A3	C4	TRUE	FALSE	
21	5,7237	B3		B3		TRUE	TRUE	
22	6,014	A2	A3	A2	A3	TRUE	TRUE	
23	6,3158	E3		E3		TRUE	TRUE	
24	6,6177	A3		A3		TRUE	TRUE	
25	6,9195		C4		C4	TRUE	TRUE	
26	7,2214	A2	E4	A2	E4	TRUE	TRUE	
27	7,5233	A2			E4	FALSE	FALSE	
28	7,8135		E4		E4	TRUE	TRUE	
29	8,1154		D4		D4	TRUE	TRUE	
30	8,4172	A2	A3	A2	E4	TRUE	FALSE	
31	8,7191	E3		E3		TRUE	TRUE	
32	9,021	E3			G4	FALSE	FALSE	
33	9,3228	E3		E3		TRUE	TRUE	
34	9,6131	G2		G2	D4	TRUE	FALSE	
35	9,9149		D3		D3	TRUE	TRUE	
36	10,2168	B3		B3		TRUE	TRUE	
37	10,5186	A3		A3		TRUE	TRUE	
38	10,8205	G3		G3		TRUE	TRUE	
39	11,1224	G2	G3	G2		TRUE	FALSE	
40	11,4242	D3		D3		TRUE	TRUE	
41	11,7261	G3		G3		TRUE	TRUE	
42	12,0163	G2		G2	D4	TRUE	FALSE	
43	12,3182	G2	D4		D4	FALSE	TRUE	
44	12,62	G2			D4	FALSE	FALSE	
45	12,9219	G2			C4	FALSE	FALSE	
46	13,2122	G2		G2	D4	TRUE	FALSE	
47	13,514	D3		D3		TRUE	TRUE	
48	13,8159	D3			F4	FALSE	FALSE	
49	14,1177	D3		D3		TRUE	TRUE	
50	14,4196	A2	A3	A2	E4	TRUE	FALSE	
51	14,7215	E3		E3		TRUE	TRUE	
52	15,0117	A3		A3	C4	TRUE	FALSE	
53	15,3252	B3		B3		TRUE	TRUE	
54	15,6154		A3	A2	A3	FALSE	TRUE	
55	15,7663	A2	MISS			FALSE	TRUE	
56	15,9173	E3		E3		TRUE	TRUE	
57	16,2191	A3		A3		TRUE	TRUE	
58	16,521		C4		C4	TRUE	TRUE	
59	16,8229	A2	E4	A2	E4	TRUE	TRUE	
60	17,1131	A2			E4	FALSE	FALSE	
61	17,415		E4		E4	TRUE	TRUE	
62	17,7168		D4		D4	TRUE	TRUE	
63	18,0187	A2	A3	A2	E4	TRUE	FALSE	
64	18,3205	E3		E3		TRUE	TRUE	
65	18,6224	E3			G4	FALSE	FALSE	
66	18,9243	E3		E3		TRUE	TRUE	
67	19,2145	A2		A2	E4	TRUE	FALSE	
68	19,8182	E3	A3	E3	A3	TRUE	TRUE	
69	20,422	E3	B3	E2	D4	FALSE	FALSE	
70	20,7238	B3		B3		TRUE	TRUE	
71	21,0141	B3	G3	G2	G3	FALSE	TRUE	
72	21,6178	A2	E3	A2	E3	TRUE	TRUE	
73	22,2215	A3		A3		TRUE	TRUE	
74	22,5234		C4		C4	TRUE	TRUE	
75	22,8252	A2		A2		TRUE	TRUE	
76	23,1155	E3		E3		TRUE	TRUE	
77	23,4173	A3		A3		TRUE	TRUE	
78	23,7192		C4		C4	TRUE	TRUE	
79	24,021	A2		A2		TRUE	TRUE	
80	24,3229	E3		E3		TRUE	TRUE	
81	24,6248	A3		A3		TRUE	TRUE	
82	24,915		C4		C4	TRUE	TRUE	
83	25,2285	A2		A2		TRUE	TRUE	
84	25,5187	E3		E3		TRUE	TRUE	
85	25,8206	A3		A3		TRUE	TRUE	
86	26,1224		C4		C4	TRUE	TRUE	
87						TOTAL:	73	67
88							85,88%	78,82%
89						Total Success:	82,35%	
90						Onset Success:	98,82%	

Εικόνα 10.37: Αποτελέσματα του Sinner Man-Traditional.

Sinner Man

Traditional

$\text{♩} = 100$

The musical score is written for two guitars. The top guitar part (Guitar) and the bottom guitar part (Guitar) are both in 4/4 time. The tempo is marked as $\text{♩} = 100$. The score is divided into three systems. The first system contains four measures. The second system starts at measure 5 and includes a solo line for the top guitar (Gtr) and a guitar part (Gtr) below it. The third system starts at measure 9 and ends with a double bar line.

Εικόνα 10.38: Παρτιτούρα του Sinner Man-Traditional.

Κεφάλαιο 10ο: Αποτελέσματα

1	Timestamp	CQT Bass	CQT Melody	Correct B1	Correct Melody	Bass Success Rate	Melody Success Rate
2	0,0348	D3		D3		TRUE	TRUE
3	0,1974	E3		E3		TRUE	TRUE
4	0,3947	C3		C3		TRUE	TRUE
5	0,5805	A2	A3	A2		TRUE	FALSE
6	0,952	B3		B2		FALSE	TRUE
7	1,1378	G2		G2		TRUE	TRUE
8	1,5093		D4		D4	TRUE	TRUE
9	1,7067		E4		E4	TRUE	TRUE
10	1,8924		C4		C4	TRUE	TRUE
11	2,0782	A3		A3		TRUE	TRUE
12	2,4497	B3		B3		TRUE	TRUE
13	2,8471	G3		G3		TRUE	TRUE
14	3,0188	D3		D3		TRUE	TRUE
15	3,2044	E3		E3		TRUE	TRUE
16	3,4017	C3		C3		TRUE	TRUE
17	3,5759	A2	A3	A2		TRUE	FALSE
18	3,9474	B3		B2		FALSE	TRUE
19	4,1448	A2	A3	A2		TRUE	FALSE
20	4,3305	G#2	G#3	G#2		TRUE	FALSE
21	4,5183	G2	G3	G2		TRUE	FALSE
22	5,2593	G3		G3	G4	TRUE	FALSE
23	5,8424	D3		D3		TRUE	TRUE
24	5,8282	D#3		D#3		TRUE	TRUE
25	6,014	E3		E3		TRUE	TRUE
26	6,1997		C4		C4	TRUE	TRUE
27	6,5829	E3		E3		TRUE	TRUE
28	6,757		C4		C4	TRUE	TRUE
29	7,1401	E3		E3		TRUE	TRUE
30	7,3259		C4		C4	TRUE	TRUE
31	8,4521		C4		C4	TRUE	TRUE
32	8,6378		D4		D4	TRUE	TRUE
33	8,8236		D#4		D#4	TRUE	TRUE
34	9,0093		E4		E4	TRUE	TRUE
35	9,2067		C4		C4	TRUE	TRUE
36	9,3925		D4		D4	TRUE	TRUE
37	9,5782		E4		E4	TRUE	TRUE
38	9,9498	B3		B3		TRUE	TRUE
39	10,1355		D4		D4	TRUE	TRUE
40	10,5186		C4		C4	TRUE	TRUE
41	11,8448	D3		D3		TRUE	TRUE
42	11,8306	D#3		D#3		TRUE	TRUE
43	12,0163	E3		E3		TRUE	TRUE
44	12,2021		C4		C4	TRUE	TRUE
45	12,5736	E3		E3		TRUE	TRUE
46	12,7594		C4		C4	TRUE	TRUE
47	13,1425	E3		E3		TRUE	TRUE
48	13,3186		C4		C4	TRUE	TRUE
49	14,8402	A3		A3		TRUE	TRUE
50	14,8259	G3		G3		TRUE	TRUE
51	15,0117	F#3		F#3		TRUE	TRUE
52	15,1975	A3		A3		TRUE	TRUE
53	15,3832		C4		C4	TRUE	TRUE
54	15,5806		E4		E4	TRUE	TRUE
55	15,9521		D4		D4	TRUE	TRUE
56	16,1379		C4		C4	TRUE	TRUE
57	16,3352	A3		A3		TRUE	TRUE
58	16,5094		D4		D4	TRUE	TRUE
59	17,6366	D3		D3		TRUE	TRUE
60	17,8213	D#3		D#3		TRUE	TRUE
61	18,0187	E3		E3		TRUE	TRUE
62	18,1928		C4		C4	TRUE	TRUE
63	18,576	E3		E3		TRUE	TRUE
64	18,7617		C4		C4	TRUE	TRUE
65	19,1449	E3		E3		TRUE	TRUE
66	19,319		C4		C4	TRUE	TRUE
67	20,4452		C4		C4	TRUE	TRUE
68	20,8309		D4		D4	TRUE	TRUE
69	20,8283		D#4		D#4	TRUE	TRUE
70	21,0141		E4		E4	TRUE	TRUE
71	21,1998		C4		C4	TRUE	TRUE
72	21,3856		D4		D4	TRUE	TRUE
73	21,5713		E4		E4	TRUE	TRUE
74	21,9545	B3		B3		TRUE	TRUE
75	22,1402		D4		D4	TRUE	TRUE
76	22,5117		C4		C4	TRUE	TRUE
77	23,6379		C4		C4	TRUE	TRUE
78	23,8237		D4		D4	TRUE	TRUE
79	24,0094		E4		E4	TRUE	TRUE
80	24,2068		C4		C4	TRUE	TRUE
81	24,3926		D4		D4	TRUE	TRUE
82	24,5783		E4		E4	TRUE	TRUE
83	24,9498		C4		C4	TRUE	TRUE
84	25,1356		D4		D4	TRUE	TRUE
85	25,333		C4		C4	TRUE	TRUE
86	25,5187		E4		E4	TRUE	TRUE
87	25,7045		C4		C4	TRUE	TRUE
88	25,8902		D4		D4	TRUE	TRUE
89	26,076		E4		E4	TRUE	TRUE
90	26,4475		C4		C4	TRUE	TRUE
91	26,8333		D4		D4	TRUE	TRUE
92	26,8307		C4		C4	TRUE	TRUE
93	27,0164		E4		E4	TRUE	TRUE
94	27,2022		C4		C4	TRUE	TRUE
95	27,3879		D4		D4	TRUE	TRUE
96	27,5737		E4		E4	TRUE	TRUE
97	27,9568	B3		B3		TRUE	TRUE
98	28,1426		D4		D4	TRUE	TRUE
99	28,5141		C4		C4	TRUE	TRUE
100					TOTAL:	96	92
101					Total Success:	97,96%	93,88%
102					Onset Success:	95,92%	
103						100%	

Εικόνα 10.39: Αποτελέσματα του The Entertainer-Scott Joplin.

The Entertainer

Scott Joplin

$\text{♩} = 108$

The image displays a musical score for the piece 'The Entertainer' by Scott Joplin, arranged for guitar. The score is presented in four systems, each with two staves labeled 'Guitar' or 'Gtr'. The first system begins with a tempo marking of $\text{♩} = 108$. The notation includes various rhythmic patterns, accidentals, and articulation marks. The second system starts at measure 5, the third at measure 10, and the fourth at measure 14. The score concludes with a double bar line.

Εικόνα 10.40: Παρτιτούρα του The Entertainer-Scott Joplin.

10.4 Ποσοστά Επιτυχίας και Σχολιασμός

Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για την εξαγωγή μελωδίας από ηχητικό περιεχόμενο παρουσίασε συνολικό ποσοστό επιτυχίας που υπερβαίνει το 80%. Το ποσοστό αυτό κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητικό, λαμβάνοντας υπόψη τη φύση των δεδομένων και την πολυπλοκότητα της διαδικασίας ανάλυσης του ήχου.

Αρχικά, τα αποτελέσματα για το πιάνο και την κιθάρα αναλύθηκαν ξεχωριστά, με το πρόγραμμα να αποδίδει ελαφρώς καλύτερα για το πιάνο. Το υψηλό ποσοστό επιτυχίας στο πιάνο οφείλεται στο έντονο attack των νοτών, που επιτρέπει πιο εύκολη αναγνώριση, όπως φαίνεται και από την επιτυχία του εντοπισμού των onset, η οποία ήταν άριστη. Η κιθάρα, αν και επίσης έχει έντονο attack, παρουσίασε μικρή απόκλιση στα αποτελέσματα, πιθανόν λόγω της παρουσίας αλληλοεπικαλυπτόμενων συχνοτήτων που προέρχονται από τους συνδυασμούς χορδών.

Piano Song Name	Bass Success	Melody Success	Total Success	Onset Success
<i>Au Clair de la Lune</i>	100%	93,55%	96,78%	100%
<i>Canon-Johann Pachelbel</i>	75%	92,19%	83,6%	100%
<i>Coming round the mountain</i>	92,19%	78,13%	85,16%	100%
<i>Greensleeves</i>	82,19%	79,45%	80,82%	100%
<i>Jupiter-Holst</i>	93,94%	90,91%	92,43%	100%
<i>Morning from Peer Gynt-E.Grieg</i>	92%	96,08%	94,04%	100%
<i>Ode to Joy-Ludwig van Beethoven</i>	60,32%	85,71%	73,02%	100%
<i>Theme from Sonata in F K280 -W.A.Mozart</i>	75,86%	79,31%	77,59%	100%
<i>Waltz from Sleeping Beauty-Pyotr Ilyich Tchaikovsky</i>	89,09%	80,36%	84,69%	100%
<i>Waltz-Johannes Brahms</i>	85,96%	98,25%	92,10%	100%
Total Scores:	84,66%	87,39%	86,02%	100%

Εικόνα 10.41: Τελικά ποσοστά επιτυχίας στο πιάνο.

Guitar Song Name	Bass Success	Melody Success	Total Success	Onset Success
<i>Bourree-Le Couppey</i>	84,81%	89,87%	87,39%	97,47%
<i>Camptown Races-Traditional</i>	83,33%	76,67%	80%	100%
<i>Dallas Blues-C.H. Wand</i>	70,91%	83,64%	77,28%	96,36%
<i>I Can't Help Falling In Love-Jean Paul Egide Martini</i>	75,29%	75,29%	75,29%	98,82%
<i>Mary Had A Little Lamb-Traditional</i>	77,78%	92,59%	85,19%	96,30%
<i>Menuett-Georg Philipp Telemann</i>	73,21%	89,29%	81,25%	96,43%
<i>Metsakukkia(Woodland Flowers)-Philip DeWalt</i>	77,94%	70,59%	74,27%	97,06%
<i>Passepied-Georg Philipp Telemann</i>	83,72%	82,56%	83,14%	94,19%
<i>Sinner Man-Traditional</i>	85,88%	78,82%	82,35%	98,82%
<i>The Entertainer-Scott Joplin</i>	97,96%	93,88%	95,92%	100%
Total Scores:	81,08%	83,32%	82,21%	97,54%

Εικόνα 10.42: Τελικά ποσοστά επιτυχίας στην κιθάρα.

Total Piano and Guitar Success Score:	82,87%	85,36%	84,11%	98,77%
--	---------------	---------------	---------------	---------------

Εικόνα 10.43: Τελικά ποσοστά επιτυχίας του συνολικού προγράμματος.

Παρά το ικανοποιητικό ποσοστό επιτυχίας, εντοπίστηκαν ορισμένες περιπτώσεις όπου το πρόγραμμα απέδωσε λιγότερο αποτελεσματικά. Μια από αυτές είναι στην περίπτωση που μία νότα έχει παιχτεί με πολλή ένταση, ιδιαίτερα αν πρόκειται για νότα μπάσου, συνεχίζει να εντοπίζεται ακόμη και στα επόμενα onset. Για παράδειγμα, στο κομμάτι Ode to Joy του πιάνου εντοπίζεται συχνά το μπάσο και στα επόμενα onset, με αποτέλεσμα να μειώσει αρκετά το ποσοστό επιτυχίας του μπάσου.

Ακόμη, ιδιαίτερα δύσκολη αποδείχτηκε η δημιουργία παρτιτούρας, στην περίπτωση που το κομμάτι ξεκινάει με ελλιπές μέτρο, όπως στην περίπτωση του κομματιού Greensleeves για πιάνο. Αυτό δημιουργεί επιπρόσθετες προκλήσεις για τον αλγόριθμο που παράγει την παρτιτούρα, καθώς πρέπει να αναγνωρίσει και να καταγράψει σωστά το χρονικό σημείο έναρξης της πρώτης νότας, πρόβλημα το οποίο δεν κατέστη δυνατό να επιλυθεί.

Συνολικά, το πρόγραμμα αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε απλές μονοφωνικές συνθέσεις, παρουσιάζοντας συνολικό ποσοστό επιτυχίας 84,11%. Παρόλο που υπήρχαν κάποιες δυσκολίες στην αναγνώριση πιο σύνθετων μελωδιών ή στη διαχείριση οργάνων με χαμηλότερο attack, τα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά και παρέχουν μια ισχυρή βάση για περαιτέρω ανάπτυξη. Με τις κατάλληλες βελτιώσεις, το πρόγραμμα θα μπορούσε να επεκτείνει τις δυνατότητές του και να αυξήσει την ακρίβειά του σε ευρύτερο φάσμα μουσικών συνθέσεων και οργάνων.

Κεφάλαιο 11ο: Συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης

11.1 Συμπεράσματα

Με το πέρας της διπλωματικής αυτής εργασίας, αναδείχθηκαν σημαντικές γνώσεις και συμπεράσματα σχετικά με την εξαγωγή μελωδίας από ηχητικό περιεχόμενο σε μορφή wav, που προέρχεται από όργανα όπως το πιάνο και η κιθάρα, καθώς και τη μετατροπή αυτής της μελωδίας σε μορφή MIDI και την απεικόνισή της σε παρτιτούρα.

Αρχικά, διαπιστώθηκε ότι η ανάλυση του ήχου αποτελεί έναν απαιτητικό τομέα, ο οποίος απαιτεί συνδυασμό θεωρητικών και πρακτικών γνώσεων. Ειδικότερα, η εξέταση και η επιλογή κατάλληλων αλγορίθμων και τεχνικών για την αναγνώριση των νοτών από ηχητικά σήματα είναι καθοριστική για την επιτυχία της διαδικασίας. Η ανάλυση φασματικών χαρακτηριστικών του ήχου είναι ζωτικής σημασίας για την απομόνωση και αναγνώριση των επιμέρους στοιχείων της μελωδίας.

Μετά από μελέτη των αλγορίθμων, η τελική επιλογή του αλγορίθμου CQT για την εξαγωγή της μελωδίας προσέφερε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα στην αναγνώριση των μουσικών νοτών. Ο CQT αλγόριθμος αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικός στην ανάλυση του ηχητικού φάσματος, καθώς έχει υψηλότερη ευκρίνεια στις χαμηλές συχνότητες λόγω των λογαριθμικά ταξινομημένων frequency bins του.

Έπειτα, η μετατροπή της αναγνωρισμένης μελωδίας σε μορφή MIDI αποτέλεσε ένα σημαντικό κομμάτι καθώς επιβεβαίωσε την ακρίβεια της αρχικής ανάλυσης, εφόσον οποιοδήποτε σφάλμα σε αυτή τη φάση επηρεάζει την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος.

Τέλος, η απεικόνιση της παρτιτούρας ανέδειξε τον ρόλο της σωστής κωδικοποίησης των μουσικών πληροφοριών, αλλά και τις προκλήσεις που παρουσιάζονται κατά την αυτόματη παραγωγή μουσικής σημειογραφίας. Η πιστή απόδοση της αρχικής μελωδίας σε παρτιτούρα αποδείχθηκε μια ιδιαίτερα περίπλοκη και απαιτητική διαδικασία, η οποία συνδυάζει γνώσεις τόσο από το πεδίο της τεχνολογίας, όσο και της μουσικολογίας, ενώ αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως τη σωστή χρονική τοποθέτηση των νοτών στην παρτιτούρα.

11.2 Προτάσεις βελτίωσης

Συνολικά, η χρήση και ο συνδυασμός των κατάλληλων αλγορίθμων και βιβλιοθηκών μας επέτρεψαν να επιτύχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα στην εξαγωγή μελωδίας από ηχητικό περιεχόμενο πιάνου και κιθάρας, ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτά είναι περιορισμένα σε απλά μουσικά κομμάτια που περιέχουν μία κύρια μελωδία και συνοδεία μπάσου.

Ωστόσο, καθώς οι περισσότερες μουσικές συνθέσεις είναι πολυφωνικές, για να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα του προγράμματος και να επεκταθεί η λειτουργικότητά του σε πιο σύνθετες συνθέσεις και διαφορετικά μουσικά όργανα, μπορούν να γίνουν αρκετές αναβαθμίσεις στο πρόγραμμα.

Αρχικά, ο κώδικας είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός για όργανα με έντονο attack, όπως το πιάνο και η κιθάρα. Ωστόσο, δεν είναι κατάλληλος για όργανα όπως το βιολί ή το σαξόφωνο, όπου οι νότες έχουν πιο ήπιο και σταδιακό attack. Μία βελτίωση θα ήταν η ενσωμάτωση αλγορίθμων ανάλυσης που είναι σχεδιασμένοι να αναγνωρίζουν τις νότες σε σήματα με πιο ομαλή δυναμική μετάβαση, όπως στο βιολί, στην ανθρώπινη φωνή και στα πνευστά όργανα.

Επιπρόσθετα, ενώ ο συνδυασμός των αλγορίθμων και βιβλιοθηκών που χρησιμοποιήθηκαν οδήγησε σε ικανοποιητικά αποτελέσματα, η χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια του προγράμματος. Με την εκπαίδευση ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης σε ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων από διαφορετικά όργανα και στυλ μουσικής, το πρόγραμμα θα μπορούσε να μάθει να αναγνωρίζει πιο πολύπλοκες μελωδίες και να προσαρμόζεται σε διαφορετικά ηχητικά περιβάλλοντα. Με τη χρήση της μηχανικής μάθησης θα μπορούσε να βελτιωθεί σημαντικά η απόδοση του προγράμματος στην αναγνώριση και επεξεργασία μουσικών κομματιών που περιλαμβάνουν πολλαπλές ταυτόχρονες φωνές ή όργανα.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο κλάδος του MIR είναι ένας κλάδος με συνεχή ανάπτυξη. Οι εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα ανοίγουν συνεχώς νέες προοπτικές για τη βελτίωση των αλγορίθμων και των εργαλείων που χρησιμοποιούνται, γεγονός που προσφέρει αισιοδοξία για περαιτέρω βελτιώσεις και νέες εφαρμογές στον τομέα της ανάλυσης και επεξεργασίας μουσικών δεδομένων.

Συνολικά, το πρόγραμμα αυτό είναι ευέλικτο και διαθέτει σημαντικά περιθώρια βελτίωσης. Η ευελιξία του επιτρέπει την προσαρμογή του σε διάφορες μουσικές εφαρμογές, ενώ οι προτεινόμενες βελτιώσεις θα μπορούσαν να το καταστήσουν πιο ακριβές και αποτελεσματικό, επεκτείνοντας την εφαρμογή του σε ακόμα περισσότερα μουσικά όργανα και συνθέσεις.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κεφάλαιο 1ο:

- [1] White, Harvey E., and Donald H. White. Physics and music: the science of musical sound. Courier Corporation, 2014. p.4
- [2] Kuttruff, H. (2007). Acoustics: an introduction. CRC Press. p.4
- [3] Sataloff, J., & Sataloff, J. (2005). The Physics of Sound. 2. Hearing Loss, 2. p.3-4
- [4] Freeman, R. L. (2005). Fundamentals of telecommunications. John Wiley & Sons p.2.1
- [5] Photinos, P. (2021). The Physics of Sound Waves: Music, instruments, and sound equipment. IOP Publishing. p.3
- [6] Κολοκυθάς, Κ. (2016). ΗΧΟΣ.
- [7] Speaks, C. E. (2017). Introduction to sound: Acoustics for the hearing and speech sciences. Plural Publishing.
- [8] Randall, R. H. (2012). An introduction to acoustics. Courier Corporation.
- [9] Møller, A. R. (2012). Hearing: anatomy, physiology, and disorders of the auditory system. Plural Publishing.
- [10] Dittmar, T. (2017). Audio Engineering 101: A Beginner's Guide to Music Production. Routledge.

Κεφάλαιο 2ο:

- [11] Mithen, S. J. (2006). The singing Neanderthals: The origins of music, language, mind, and body. Harvard University Press.
- [12] Epperson, G. (2024, May 22). music. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/art/music>
- [13] Nattiez, J. J. (1990). Music and discourse: Toward a semiology of music. Princeton University Press.
- [14] Lekkas, C. (2021, December 21). “Η Θεωρία της μουσικής” – εγχειρίδιο του Χρήστου Λέκκα - Ανοικτή Βιβλιοθήκη. Ανοικτή Βιβλιοθήκη - Ελεύθερα ψηφιακά βιβλία // Ελληνικά δωρεάν e-books. <https://www.openbook.gr/i-theoria-tis-mousikis/>
- [15] ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΠΥΡΓΙΩΤΗΣ, ΜΟΥΣΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΗ. (2000). FAGGOTO. <https://www.politeianet.gr/books/9789607075692-purgiotis-dimitris-fagotto-mousiki-theoria-kai-praktiki-228843>
- [16] Cooper, G. W., Cooper, G., & Meyer, L. B. (1963). The rhythmic structure of music. University of Chicago press. p.6
- [17] Costa, D. (2024, March 5). tempo. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/art/tempo-music>
- [18] Pilhofer, M., & Day, H. (2019). Music theory for dummies. John Wiley & Sons. p.91

Κεφάλαιο 3ο:

- [19] Roberts, G. E. (2016). From Music to Mathematics: exploring the connections. JHU Press.
- [20] Μουσική Α' Γενικού Λυκείου. (2013). Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων Διόφαντος. http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/pdf/8547/2508/22-0099_02_Mousiki_A-Lykeiou-Epilogis_Vivlio-Mathiti
- [21] Coxeter, H. S. M. (1968). MUSIC AND MATHEMATICS. The Mathematics Teacher, 61(3), 312–320. <http://www.jstor.org/stable/27957839>
- [22] Winterson, J. (2024). Maths & Music. p.108
- [23] Halewood, M. (2015). On equal temperament: Tuning, modernity and compromise. History of the Human Sciences, 28(3), 3-21.
- [24] Ellis, A. J. (1880). The history of musical pitch. FAM Knuf.p. 493–511.
- [25] Benward, B. (2009). Music in theory and practice Vol. 1. p. xv
- [26] Sethares, W. A. (2005). Tuning, timbre, spectrum, scale. Springer Science & Business Media.
- [27] Petersen, M. (2001). Mathematical Harmonies. Universidad de Carolina del Sur.

Κεφάλαιο 4ο:

- [28] Watkinson, J. (2013). Introduction to digital audio. Routledge.
- [29] Pallás-Areny, R., & Webster, J. G. (1999). Analog signal processing. John Wiley & Sons.
- [30] Self, D., Duncan, B., Sinclair, I., Brice, R., Hood, J. L., Singmin, A., ... & Watkinson, J. (2009). Audio engineering: know it all (Vol. 1). Newnes. p.478
- [31] Por, E., van Kooten, M., & Sarkovic, V. (2019). Nyquist–Shannon sampling theorem. Leiden University, 1(1), 5.
- [32] Rothstein, J. (1995). MIDI: A comprehensive introduction (Vol. 7). AR Editions, Inc..
- [33] Everest, F. A. (2022). Master handbook of acoustics. p.100

Κεφάλαιο 5ο:

- [34] Schedl, M., Gómez, E., & Urbano, J. (2014). Music information retrieval: Recent developments and applications. Foundations and Trends® in Information Retrieval, 8(2-3), 127-261.
- [35] Home. ISMIR. <https://www.ismir.net/>
- [36] Mirex Home. MIREX Wiki. https://www.music-ir.org/mirex/wiki/MIREX_HOME
- [37] musicinformationretrieval.com. <https://musicinformationretrieval.com/>
- [38] Müller, M. (2015). Fundamentals of music processing: Audio, analysis, algorithms, applications (Vol. 5, p. 62). Cham: Springer.
- [39] Knees, P., & Schedl, M. (2016). Music similarity and retrieval: an introduction to audio-and web-based strategies (Vol. 36). Heidelberg: Springer.
- [40] Oscar Celma. (2010). Music Recommendation and Discovery: The Long Tail, Long Fail, and Long Play in the Digital Music Space. Springer.
- [41] Gao, Q. (2015). Pitch detection based monophonic piano transcription. Yankee, 7(60), C4.
- [42] Fuentes, B., Liutkus, A., Badeau, R., & Richard, G. (2012, March). Probabilistic model for main melody extraction using constant-Q transform. In 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 5357-5360). IEEE.

Κεφάλαιο 6ο:

- [43] Project jupyter. NumFOCUS. (2021, December 31). <https://numfocus.org/project/project-jupyter>
- [44] The world's Most popular notation app. MuseScore.. <https://musescore.org/>
- [45] Midiano. midiano.com.. <https://midiano.com/>
- [46] McFee, B., Raffel, C., Liang, D., Ellis, D. P., McVicar, M., Battenberg, E., & Nieto, O. (2015, July). librosa: Audio and music signal analysis in python. In SciPy (pp. 18-24).
- [47] MIDIUtil. <https://midiutil.readthedocs.io/en/1.2.1/#>
- [48] What is music21? - music21 Documentation. <https://www.music21.org/music21docs/about/what.html>

Κεφάλαιο 7ο:

- [49] 8notes - About Us.<https://www.8notes.com/help/about.asp>

Κεφάλαιο 8ο:

- [50] Sharma, G., Umopathy, K., & Krishnan, S. (2020). Trends in audio signal feature extraction methods. Applied Acoustics, 158, 107020.
- [51] Hess, A. (2011). Beat Detection for Automated Music Transcription: An exploration of Onset Detection Algorithms (Doctoral dissertation, MSc thesis, Thomas J. Watson School of Engineering and Applied Science State University of New York at Binghamton).
- [52] Salamon, J., Gómez, E., Ellis, D. P., & Richard, G. (2014). Melody extraction from polyphonic music signals: Approaches, applications, and challenges. IEEE Signal Processing Magazine, 31(2), 118-134.
- [53] Mauch, M., & Dixon, S. (2014, May). pYIN: A fundamental frequency estimator using probabilistic threshold distributions. In 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 659-663). IEEE.
- [54] Schörkhuber, C., & Klapuri, A. (2010, July). Constant-Q transform toolbox for music processing. In 7th Sound and Music Computing Conference, Barcelona, Spain (pp. 3-64). SMC.