

**ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΚΑΛΩΝ ΤΕΧΝΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**



**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ**

**ΔΕΣΠΟΖΟΝΤΟΣ ΠΑΛΜΟΥ ΣΤΗ ΜΟΥΣΙΚΗ**

**ΘΕΩΡΙΑ, ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ**

**ΜΟΥΣΙΚΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ**

**Διπλωματική Εργασία της φοιτήτριας**

**Αναστασίας Κατσή**

**Α.Ε.Μ. 2032**

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Βασιλίου', is written over the printed name of the supervisor.

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:  
ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ-ΑΙΜΙΛΙΟΣ ΚΑΜΠΟΥΡΟΠΟΥΛΟΣ**

**Θεσσαλονίκη, Ιούνιος 2025**

## *Ευχαριστίες*

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κ. Καμπουρόπουλο ο οποίος είναι ο επιβλέπων καθηγητής αυτής της διπλωματικής εργασίας, ο οποίος δέχθηκε εξ'αρχής τη συνεργασία μας και μου επέτρεψε να ανακαλύψω πιο βαθιά, έναν ακόμα δρόμο της μουσικής, αυτόν της μουσικής τεχνολογίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την πολυδιάστατη έννοια του ρυθμού στη μουσική, εστιάζοντας στις παραμέτρους του παλμού, του τέμπο και της μετρικής διάταξης, τόσο από θεωρητική όσο και από υπολογιστική σκοπιά. Βασικός άξονας της μελέτης είναι η διερεύνηση της έννοιας του δεσπόζοντα παλμού - του χρονικού επιπέδου με τον οποίο οι ακροατές συγχρονίζονται φυσικά και τον οποίο συνιστά τη βάση για την αντίληψη της μουσικής ροής.

Η εργασία θεμελιώνεται θεωρητικά στη Γενετική Θεωρία της Τονικής Μουσικής (GTNM ) των Lerdahl και Jackendoff (1983), οι οποίοι προτείνουν ένα ιεραρχικό μοντέλο οργάνωσης του ρυθμού και της μετρικής δομής , βασισμένο στη γνωστική επεξεργασία του ακροατή. Οι Povel και Essens (1985) με τη σειρά τους, εστιάζουν στην αντίληψη του παλμού και του ρυθμού στη μουσική, εισάγοντας την ιδέα του εσωτερικού ρολογιού, βασισμένο στην ανθρώπινη αντίληψη. Τέλος, Οι Christopher Longuet-Higgins και C. S. Lee υπήρξαν από τους πρώτους που προσέγγισαν την αντίληψη του ρυθμού και της μετρικής μέσω υπολογιστικών μοντέλων, επιδιώκοντας να περιγράψουν πώς ο ανθρώπινος νους οργανώνει χρονικά ερεθίσματα σε δομημένες ρυθμικές μονάδες.

Στο πρακτικό μέρος της εργασίας χρησιμοποιείται το λογισμικό Sonic Visualiser, μαζί με Vamp plugins, για την ανάλυση και οπτικοποίηση της παλμικής δομής σε μουσικά παραδείγματα από διάφορα είδη μουσικής.

Μέσα από συγκριτική ανάλυση ανάμεσα στις θεωρητικές προσεγγίσεις και τα αποτελέσματα των εργαλείων, η εργασία δείχνει ότι η τεχνολογική ανάλυση μπορεί να προσεγγίσει σε μεγάλο βαθμό το δεσπόζοντα παλμό, ιδίως σε μουσικές με καθαρή μετρική δομή. Ωστόσο, σε περιπτώσεις πολυπλοκότερης ρυθμικής επιφάνειας, τα εργαλεία αυτά παρουσιάζουν αποκλίσεις, φανερώνοντας την αναγκαιότητα μιας συνδυαστικής προσέγγισης: θεωρία, ακρόαση και υπολογιστική ανάλυση λειτουργούν συμπληρωματικά.

Συμπερασματικά, η μελέτη επιδιώκει να αναδείξει την αξία της τεχνολογίας ως υποστηρικτικό μέσο για τη μουσικολογική κατανόηση του ρυθμού και να φωτίσει πτυχές της ανθρώπινης ρυθμικής εμπειρίας, συνδέοντας τη μουσική πράξη με τη γνωστική επιστήμη και τον υπολογισμό.

Λέξεις κλειδιά: ρυθμός, μέτρο, ανίχνευση παλμού, εξαγωγή τέμπο, εξαγωγή του μέτρου, υπολογιστικά μοντέλα

## **ABSTRACT**

This thesis examines the multidimensional concept of rhythm in music, focusing on the parameters of beat, tempo and metric arrangement, from a theoretical, cognitive and computational perspective. The main focus of the study is the exploration of the concept of beat - the temporal plane with which listeners naturally synchronize and which constitutes the basis for the perception of musical flow.

This thesis is theoretically grounded in the Genetic Theory of Tonal Music (GTTM) by Lerdahl and Jackendoff (1983), who propose a hierarchical model of rhythm and metric organization, based on the cognitive processing by the listener. Povel and Essens (1985) in turn focus on the perception of beat and rhythm in music, introducing the idea of the internal clock, based on human perception. Finally, Christopher Longuet-Higgins and C. S. Lee were among the first to approach the perception of rhythm and metric through computational models, seeking to describe how the human mind organizes temporal stimuli into structured rhythmic units.

In the practical part of the work, the Sonic Visualiser software is employed, together with beat tracking Vamp plugins, to analyze and visualize beat structure in musical examples from various genres of music.

Through a comparative analysis between theoretical approaches and the results of the tools, this study shows that computational analysis can approximate the beat tracking processes, especially in music with a clear metric structure. However, in cases of more complex expressive rhythmic surfaces, these tools show discrepancies, revealing the necessity of more sophisticated hierarchical multi-parametric listening approach.

In conclusion, the study seeks to highlight the value of technology as a supporting tool for the musicological understanding of rhythm and to illuminate aspects of the human rhythmic experience, connecting musical practice with cognitive science and computation.

Key words: rhythm, metre, beat tracking, tempo induction, metre induction, computational models

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Μουσικός ρυθμός και μέτρο**

1. <u>Εισαγωγή</u>	8
1.1 <u>Ιεραρχικά επίπεδα</u>	10
1.2 <u>Τονισμός</u>	10
1.3 <u>Μέτρο</u>	12
1.4 <u>Παλμός (beat)</u>	13
1.5 <u>Μετρική Ιεραρχία</u>	16
1.6 <u>Συμμετρικές και Ασύμμετρες ρυθμικές δομές</u>	18
1.7 <u>Συσχέτιση Μετρικής Δομής και Δομή Τοπικών Μελωδικών Ορίων</u>	22

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Υπολογιστικά-συστηματικά μοντέλα προσδιορισμού μετρικής δομής**

2. <u>Εισαγωγή</u>	25
2.1 <u>Γενετική Μετασχηματιστική Θεωρία της Τονικής Μουσικής – Κανόνες Μετρικής Δομής (Lerdahl and Jackendoff, 1983)</u>	26
2.2 <u>Σύστημα Εσωτερικών Ρολογιών (Povel &amp; Essens 1985)</u>	38
2.3 <u>Μοντέλο Αντίληψης Μουσικού Ρυθμού (Longuet-Higgins &amp; Lee, 1982)</u>	43
2.4 <u>Διαφορές και ομοιότητες των παραπάνω μοντέλων</u>	48

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Ρυθμική και υπολογιστική ανάλυση (θεωρία)**

3. <u>Εισαγωγή</u>	50
3.1 <u>Υπολογιστική ανάλυση στο πεδίο του ρυθμού</u>	50
3.1.1 <u>Onset detection</u>	50
3.1.2 <u>Tempo induction</u>	52

3.1.3	<a href="#">Beat Tracking</a>	54
3.1.4	<a href="#">Metre Induction</a>	54
3.1.5	<a href="#">Rhythm Recognition</a>	55
3.2	<a href="#">Προγράμματα και βιβλιοθήκες λογισμικού για ανίχνευση ρυθμού</a>	57
3.2.1	<a href="#">Sonic Visualiser</a>	57
3.2.2	<a href="#">Bar and Beat Tracker Bars</a>	58
3.2.3	<a href="#">Bar and Beat Tracker Beats</a>	61
3.2.4	<a href="#">BeatRoot Beat Tracker</a>	62

#### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ρυθμική υπολογιστική ανάλυση (πράξη)**

4.	<a href="#">Εισαγωγή</a>	65
4.1	<a href="#">Ρυθμική Υπολογιστική ανάλυση - ενδεικτικά παραδείγματα</a>	66
4.1.1	<a href="#">Ανίχνευση παλμού: Bar and Beat Tracker Beats &amp; BeatRoot</a>	66
4.1.2	<a href="#">Εξαγωγή μέτρου Bar and Beat Tracker Bars</a>	91
4.2	<a href="#">Συμπεράσματα</a>	98

<b><u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u></b>	100
----------------------------	-----

## 1. Μουσικός ρυθμός και μέτρο

### *ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια προσέγγιση της έννοιας του **ρυθμού**. Πιο συγκεκριμένα, θα αναλύσουμε τις έννοιες οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τον μουσικό ρυθμό. Οι έννοιες αυτές είναι **ο τονισμός, το μέτρο, παλμός (beat), το tactus, το tatum, και η μετρική ιεραρχία**. Επίσης θα γίνει μια γρήγορη αναφορά στις **ασύμμετρες μετρικές δομές** και στη συσχέτιση της **μετρικής δομής** και της **δομής τοπικών μελωδικών ορίων**.

Κάθε πολιτισμός έχει τη δική του μουσική, με μοναδικά ρυθμικά χαρακτηριστικά. Η λέξη "ρυθμός" προέρχεται από την αρχαία ελληνική λέξη και το ρήμα "ρέω," που υποδηλώνει κίνηση (London, 2001). Ο **ρυθμός** μπορεί να οριστεί ως το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της **μετρικής δομής**, η οποία παρέχει ένα **σταθερό, συμμετρικό χρονικό πλέγμα**, και της **δομής ομαδοποίησης**, η οποία οργανώνει τα μουσικά γεγονότα εντός του πλαισίου αυτού, με βάση αντιληπτικές αρχές συμμετρίας, αντίθεσης και ποικιλίας (Lerdahl and Jackendoff, 1983). Η ρυθμική αντίληψη, συνδυάζει τόσο 'αντικειμενικά' χαρακτηριστικά της μουσικής επιφάνειας, όσο και υποκειμενικά χαρακτηριστικά της ακουστικής επεξεργασίας από τον ακροατή. Ο κ. Παπαδέλης (2007), στο έργο του που επικεντρώνεται στη ρυθμική και μετρική ανάλυση, επισημαίνει ότι η μετρική συμμετρία δεν αποτελεί απλώς μια συμβατική τυποποίηση, αλλά βασίζεται σε βαθύτερα βιολογικά και αντιληπτικά χαρακτηριστικά του ανθρώπου, όπως η έμφυτη ανάγκη για κανονικότητα, επανάληψη και πρόβλεψη. Η αίσθηση της συμμετρίας στη μετρική δομή καθιστά εφικτή την αναγνώριση και πρόβλεψη των ρυθμικών μοτίβων, διευκολύνοντας τη γνωστική επεξεργασία του μουσικού υλικού. Παράλληλα, ο κ. Παπαδέλης, τονίζει τη σημασία του φαινομένου της συγκοπής (syncopation) και των ρυθμικών μετατοπίσεων, όπως είναι το offbeat και ανάκρουση, τα οποία λειτουργούν ως μηχανισμοί αποσταθεροποίησης της ρυθμικής προβλεψιμότητας και εισάγουν ένταση και εκφραστικότητα. Συνεπώς, ο ρυθμός δεν εκλαμβάνεται απλώς ως μία στατική, δομική συνιστώσα της μουσικής, αλλά ως μια δυναμική διαδικασία, όπου η ροή του χρόνου μετασηματίζεται σε ενέργεια και εκφραστικότητα, αποκαλύπτοντας τον ζωντανό και ενεργό χαρακτήρα του μουσικού φαινομένου.

Ο ρυθμός αναφέρεται σε ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο ισχυρών και ασθενών

γεγονότων, όπου το ένα γεγονός ακολουθεί το άλλο σε μια ακολουθία (Oxford English Dictionary, London, 2001). Στη μουσική, ο ρυθμός ορίζεται ως μια αλληλουχία χρονικών διαρκειών που σχηματίζουν ομάδες, οι οποίες γίνονται αντιληπτές από τον άνθρωπο (London, 2001).

Όσον αφορά τη μουσική, αν και ο όρος χρησιμοποιείται στις περισσότερες, αν όχι σε όλες, τις κουλτούρες του κόσμου, στην εθνομουσικολογία υποστηρίζεται ότι δεν υπάρχει ένας αντικειμενικός ορισμός για τη λέξη "μουσική". Αντίθετα, μπορεί να οριστεί ως "ήχος οργανωμένος από τον άνθρωπο," που διαφέρει από τον λόγο και βασίζεται στις αξίες κάθε πολιτισμού (Savage, Brown, Sakai & Currie, 2015).

Κατά τον Snyder, ο ρυθμός περιγράφει «γεγονότα τα οποία εντάσσονται στη χρονική κλίμακα της βραχύχρονης μνήμης». Αυτός ο χρόνος, ο οποίος είναι ανάμεσα στα 3 με 5 δευτερόλεπτα, είναι το ανώτερο όριο διάρκειας μιας φράσης (Snyder,2000,161).

Οι Lerdahl και Jackendoff παρουσιάζουν μια θεωρία μουσικής ανάλυσης που βασίζεται στον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται και οργανώνουν τα τονικά μουσικά έργα. Πιο αναλυτικά, αναφορικά με τη δομή ομαδοποίησης των μουσικών στοιχείων, αναλύουν τον τρόπο με τον οποίο ένας ακροατής ομαδοποιεί ένα μουσικό έργο σε φράσεις, μοτίβα κλπ. Σε σχέση με τη μετρική δομή, συνδυάζουν τη δομή ομαδοποίησης με τη διάκριση των εναλλαγών σε ένα μουσικό μέτρο, από ισχυρούς σε ασθενούς χτύπους (μετρική δομή). Οι εναλλαγές αυτές εκφράζονται μέσα σ' ένα επαναλαμβανόμενο πρότυπο το οποίο ονομάζεται **μέτρο**. Η **μετρική ιεραρχία** δημιουργείται από το μέτρο και είναι δομημένη σε διάφορα επίπεδα.

Είναι καλό να σημειωθεί πως η μετρική δομή δεν συναντάται σε όλους τους μουσικούς πολιτισμούς, ενώ η δομή ομαδοποίησης είναι πιο διαδεδομένη (Lerdahl and Jackendoff, 1983). «Ως ρυθμός μπορεί να οριστεί ο τρόπος με τον οποίο ένας ή περισσότεροι ασθενείς χτύποι, ομαδοποιούνται σε σχέση με έναν ισχυρό».(Cooper& Meyer,1960,6)

Τέλος, η έννοια του **τονισμού**, είναι πολύ σημαντική. Ο τονισμός προσφέρει στη μουσική την αίσθηση του μέτρου, βοηθάει τον ακροατή να αντιληφθεί τον παλμό.

## 1.1 Ιεραρχικά επίπεδα:

Η μουσική χαρακτηρίζεται από την ιεραρχική της οργάνωση, όπως περιγράφεται από τους Grosvenor Cooper και Leonard B. Meyer στο έργο τους "The Rhythmic Structure of Music" (1960). Αυτή η ιεραρχική οργάνωση αποτελείται από διάφορα επίπεδα ρυθμικών και μετρικών δομών που ο ακροατής αντιλαμβάνεται και ερμηνεύει για να κατανοήσει τη μουσική. Όπως τα γράμματα συνδυάζονται σε λέξεις και οι λέξεις σε προτάσεις, έτσι και στη μουσική η ρυθμική οργάνωση είναι μία διαδικασία στην οποία μικρά ρυθμικά μοτίβα λειτουργούν, ώστε να δημιουργήσουν μία μεγαλύτερη ρυθμική οργάνωση.

Το πρωταρχικό (primary) ρυθμικό επίπεδο είναι το χαμηλότερο επίπεδο στο οποίο μπορεί να γίνει αντιληπτή μια ρυθμική ομάδα και συμβολίζεται με τον αριθμό 1. Επίσης, το επίπεδο αυτό αποτελείται από νότες μικρότερης χρονικής αξίας και ρυθμικά μοτίβα τα οποία ονομάζονται κατώτερα (inferior) ρυθμικά επίπεδα και συμβολίζεται με το γράμμα i. Αν τα πρωταρχικά επίπεδα ενωθούν τότε δημιουργούνται ανώτερα (superior) ρυθμικά επίπεδα και συμβολίζονται με τον αριθμό 2.



**Σχήμα 1.1**

## 1.2 Τονισμός

Πριν αναφερθούμε στη μετρική δομή είναι απαραίτητο να εξηγήσουμε την έννοια του **τονισμού**. Είναι πολύ εύκολο στη μουσική να διακρίνουμε ποιοι φθόγγοι έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με άλλους, δηλαδή ποιοι είναι πιο τονισμένοι. Ο Benary σημειώνει πως ο τονισμός είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας του ρυθμού (Benary 1973).

Το φαινόμενο του τονισμού μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε φθόγγους μικρής διάρκειας, όσο και σε μεγαλύτερες ανεξαρτήτως τονικού ύψους. Σύμφωνα με τους Lerdahl & Jackendoff τα τονισμένα μουσικά γεγονότα (νότες) είναι αυτά που “εξέχουν” από τα υπόλοιπα (μη τονισμένα) και αποτελούν σημαντικό κριτήριο στη δομή της ρυθμικής οργάνωσης.

Στη συνέχεια πρέπει να αναφέρουμε τα τρία είδη τονισμών κατά τους Lerdahl & Jackendoff 1983:

Το πρώτο είδος είναι ο **φαινομενικός τονισμός**. Φαινομενικό τονισμό έχει «κάθε γεγονός στη μουσική επιφάνεια που δίνει έμφαση ή τονισμό σε κάποια στιγμή της μουσικής ροής» (Lerdahl & Jackendoff 1983,17), τα οποία μπορεί να είναι φθόγγοι οι οποίοι έχουν επηρεαστεί από διάφορες τεχνικές, όπως *sforzandi* ή άλλες δυναμικές ή ακόμα και φθόγγοι μεγάλης διάρκειας, με απόσταση μεγάλων διαστημάτων ή και σε σημεία αρμονικών αλλαγών. Το είδος αυτό τονισμού δεν επηρεάζεται από τη θέση στην οποία βρίσκεται μέσα σε μια ρυθμική φράση, δηλαδή αν βρίσκεται στην αρχή ή στο τέλος της.

Το δεύτερο είδος τονισμού είναι ο **δομικός τονισμός**. Αυτό το είδος γίνεται αντιληπτό σε σημαντικά σημεία της ρυθμικής φράσης και βρίσκονται συνήθως στην αρχή και στο τέλος της, όπως για παράδειγμα μελωδικά σημεία ή σημεία αρμονικής κορύφωσης όπως είναι οι πτώσεις.

Τέλος το τρίτο είδος τονισμού είναι ο **μετρικός τονισμός**. Ο μετρικός τονισμός παρουσιάζεται σε χτύπους, οι οποίοι αποτελούν την αρχή μετρικών ομάδων(μέτρα), δηλαδή εμφανίζεται σε σχετικά ισχυρές θέσεις του μέτρου.

Σύμφωνα με τους Lerdahl & Jackendoff ο φαινομενικός και ο δομικός τονισμός χρησιμοποιούνται από τον ακροατή για να αντιληφθεί το μέτρο ενώ, από την άλλη πλευρά ο μετρικός τονισμός είναι ένα νοητικό κατασκεύασμα που ενεργοποιείται από τα άλλα δύο είδη τονισμών. Ο Snyder αναφέρει ότι «όταν ο φαινομενικός και ο δομικός τονισμός λαμβάνουν χώρα σε τακτά χρονικά διαστήματα (...) ο ακροατής συχνά αντιλαμβάνεται ένα κανονικό επαναλαμβανόμενο σχήμα τονισμένο χτύπων που ονομάζεται μέτρο» (Snyder,2000,170). Η σταθερότητα της μετρικής δομής εξαρτάται από την περιοδικότητα των τονισμών. Όταν υπάρχει μικρή

περιοδικότητα στους τονισμούς σημαίνει ότι θα έχουμε μία αβέβαιη μετρική δομή, ενώ στην ισχυρή περιοδικότητα η μετρική δομή είναι σταθερή και πολυεπίπεδη (Lerdahl & Jackendoff 1983).

### **1.3 Μέτρο**

Το μέτρο στη μουσική αφορά την ομαδοποίηση μεμονωμένων παλμών, δημιουργώντας μια ιεραρχική δομή από ισχυρά και ασθενή γεγονότα. Για να μπορέσει ο ακροατής να αντιληφθεί το μέτρο, πρέπει πρώτα να έχει αντιληφθεί τον παλμό. Συγκεκριμένα, το μέτρο σχηματίζεται όταν ο ακροατής επιλέγει μια συγκεκριμένη θέση μέσα στη διαδοχή των παλμών ως τον ισχυρό παλμό, πάνω στον οποίο θα βασιστεί για να δημιουργήσει μια ιεραρχία από ισχυρά και ασθενή συμβάντα (London, 2012, Large & Kolen, 1994. Fitch, 2013).

Για να υφίσταται το μέτρο, κάποιοι από τους χτύπους πρέπει να είναι πιο τονισμένοι σε σχέση με τους υπόλοιπους. Οι τονισμένοι χτύποι ονομάζονται «ισχυροί», ενώ οι πιο ήπιοι «ασθενείς» (Cooper & Meyer, 1960, 4). Εκτός από τη συνεχόμενη εναλλαγή των χτύπων είναι απαραίτητο οι χτύποι αυτοί να έχουν ίση απόσταση μεταξύ τους. «Είναι δύσκολο να μετρήσουμε κάτι χωρίς να υπάρχει ένα σταθερό χρονικό διάστημα». (Lerdahl & Jackendoff, 1983, 19). Το μέτρο έχει ως βασικό χαρακτηριστικό του την περιοδικότητα, αφού υπάρχει η εναλλαγή ισχυρών και ασθενών χτύπων.

Η μετρική ένδειξη ενός κομματιού δεν καθορίζει πλήρως τη μετρική οργάνωση μέσα σε ένα μουσικό κομμάτι. Αν η μετρική ένδειξη είναι 4/4 δε σημαίνει ότι θα έχουμε μόνο τέσσερις ίσους σε απόσταση χτύπους, με χρονική αξία ενός τετάρτου. Η παραπάνω πρόταση θα επεξηγηθεί με τη βοήθεια του ακόλουθου σχήματος (βλέπε σχ. 1.1).



ακουστική εμπειρία. Αφού ο παλμός έχει καθοριστεί μέσα σε μια μουσική επιφάνεια, παραμένει εύκολα αντιληπτός. Ακόμα κι αν συμπέσει με μια στιγμή σιωπής ή με κάποιο στοιχείο που συμβαίνει εκτός του παλμικού πλαισίου —όπως μια συγκοπή ή μια παύση— η αίσθηση του παλμού διατηρείται χωρίς να διαταράσσεται ουσιαστικά. (Fleur L. Bouwer,2018)

Πιο συγκεκριμένα, παλμός είναι μια σειρά από επαναλαμβανόμενα ισοδύναμα ερεθίσματα, όπως είναι ο ήχος από τους δείκτες ενός ρολογιού (Cooper & Meyer,1960,3). Ο παλμός δεν έχει διάρκεια, αλλά θεωρείται ένα ιδεατό σημείο μέσα στον χρόνο, το οποίο σε συνδυασμό με την έναρξη ενός μουσικού συμβάντος μπορεί να γίνει αντιληπτό (Lerdahl & Jackendoff,1983, 18). Επίσης σημαντικό ρόλο έχει και η θέση της ατάκας (σχήμα 1.3) στο χρόνο στην οποία γίνεται αντιληπτός ο ήχος. «Όλοι οι ήχοι δεν έχουν την ίδια ατάκα. Για να έχει ένας ήχος ακριβή θέση στο χρόνο, πρέπει να ξεκινά και να φτάνει την μέγιστη έντασή του απότομα. Αυτό είναι που κάνει το σημείο της ατάκας ξεκάθαρο». (Sydner,2000). Τέλος, ο χτύπος δεν είναι απαραίτητο να συμπίπτει με ένα μουσικό γεγονός διότι θα μπορούσε να υφίσταται και η παύση.

Επίσης, παρακολουθώντας την εξέλιξη της μουσικής μέσα στους αιώνες, ο ρυθμός αποτελούσε πάντα ένα θέμα προβληματισμού για τους μουσικούς θεωρητικούς και όσους ασχολούνταν με τη μουσική. Όπως αναφέρει ο κ. Παπαδέλης (2007), ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο που σχετίζεται με το ρυθμό εμφανίστηκε για πρώτη φορά τον 14ο αιώνα. Εκείνη την εποχή, άρχισε να παρατηρείται μια σύνδεση των διαφόρων ρυθμικών διαρκειών με μια σταθερή χρονική μονάδα, η οποία προσδιοριζόταν με το λατινικό όρο *tactus* (που σημαίνει "χτύπος" ή "άγγιγμα"). Το *tactus* μετρούνταν με την κίνηση του χεριού ή του ποδιού και αποτελούνταν από μια θέση (*positio*) και μια άρση (*elevatio*). Πολλοί θεωρητικοί από τον 15ο έως τον 18ο αιώνα χρησιμοποιούσαν το ρυθμό των παλμών της καρδιάς ενός ανθρώπου σε κατάσταση ηρεμίας ως πρότυπο για τον προσδιορισμό της ρυθμικής αγωγής.

Με άλλα λόγια, ο όρος "*tactus*" στη μουσική ιστορία αναφέρεται στον σταθερό ρυθμικό παλμό που χρησιμοποιείται για την οργάνωση του χρόνου κατά την εκτέλεση μιας μουσικής σύνθεσης. Αυτός ο παλμός καθορίζει τη βασική μονάδα μέτρησης και αποτελεί τον ρυθμικό οδηγό για τους εκτελεστές.

Το *tactus* αναπτύχθηκε κατά την περίοδο της Αναγέννησης και του Μπαρόκ, όταν η

μουσική συνήθως δεν είχε αναγραφή για το ρυθμό όπως σήμερα. Αντίθετα, οι μουσικοί έπρεπε να βασίζονται σε έναν συνειδητά αποφασισμένο παλμό που θα καθόριζε την ταχύτητα και τη ρυθμική δομή του κομματιού. Το *tactus* χτυπιόταν με τη βοήθεια του χεριού ή του ποδιού και ήταν συνήθως συνεχής κατά τη διάρκεια μιας σύνθεσης, ενώ ο ρυθμός τηρούνταν αυστηρά ακόμα και κατά την αυτοσχεδιαστική εκτέλεση. Όπως αναφέρει ο London, η μετρική δομή είναι «πρωτίστως(...) θεμελιωμένη στο *tactus*. Το *tactus* εγκαθιδρύει τη συνέχεια της μουσικής κίνησης. Χωρίς αυτό δε νοείται καν το μέτρο»(London,2004,17).

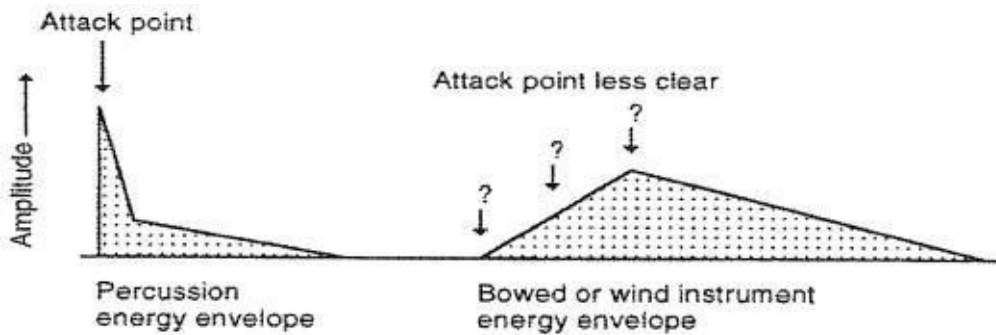
Οι τιμές οι οποίες είναι εφικτές να πάρει το *tactus* βρίσκονται ανάμεσα στα 30-300 συμβάντα ανά δευτερόλεπτο, ενώ οι πιο συνήθεις τιμές είναι ανάμεσα στα 60-120 συμβάντα ανά δευτερόλεπτο. Τα 100 συμβάντα ανά δευτερόλεπτο είναι ουσιαστικά το τέμπο το οποίο γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό στους περισσότερους ανθρώπους, αφού έχει μια μέση ταχύτητα. (Snyder,2000). Οι συγκεκριμένες τιμές είναι πολύ κοντά στο αυθόρμητο τέμπο που θα χτυπήσει ένας άνθρωπος, αν του ζητηθεί να χτυπήσει σταθερά έναν παλμό.

Ακόμη, είναι αναγκαίο να αναφερθούμε στον όρο *tatum*, ο οποίος είναι ο ταχύτερος παλμός που αντιλαμβανόμαστε και ακολουθούμε καθώς ακούμε και παίζουμε μουσική. Είναι η μικρότερη μονάδα χρόνου στην ιεραρχία του μουσικού ρυθμού, που λειτουργεί ως εσωτερικό ρολόι. Δεν μπορεί πάντα να ακουστεί απευθείας στη μουσική, αλλά το *tatum* μας βοηθά να υπολογίσουμε και να προβλέψουμε το χρονοδιάγραμμα των μουσικών γεγονότων. (Lerdahl & Jackendoff,1983)

Αυτός ο παλμός γίνεται αντιληπτός ασυνείδητα, όχι σαν το άμεσα αντιληπτό χτύπημα του ρολογιού. Αντ ' αυτού, ενεργοποιείται διαισθητικά και έρχεται στην επιφάνεια όταν χρειάζεται. Το *tatum* καθορίζεται από τα σύντομα διαστήματα μεταξύ διαδοχικών μουσικών γεγονότων στο έργο, δημιουργώντας έτσι έναν ρυθμικό οδηγό.

Το *tatum* είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανάλυση και την παρακολούθηση αλλαγών στο ρυθμό και τις ερμηνευτικές αποκλίσεις. Μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητά του σε *tatum* ανά λεπτό και να καταγράψουμε την απόκλιση από τον ιδανικό χρόνο κάθε *tatum*. Αυτές οι αποκλίσεις χρησιμοποιούνται συχνά για να

περιγράψουν τις λεπτές χρονικές διαφορές στη μουσική απόδοση και για να περιγράψουν την εκφραστικότητα του ερμηνευτή. (Jeffrey Bilmes,21,1993)



**Σχήμα 1.3**

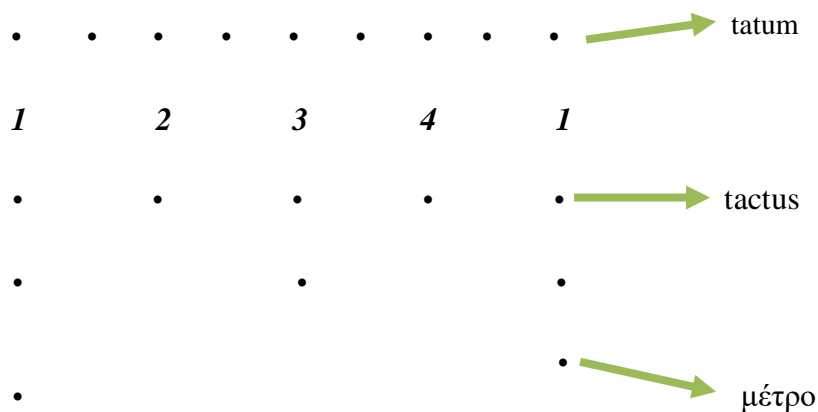
Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται μια γραφική αναπαράσταση ατάκας στον χρόνο ( attack point). Στην αριστερή πλευρά του σχήματος είναι ξεκάθαρη η απεικόνιση της ατάκας διότι η κάθετη γραμμή υποδηλώνει τη μέγιστη ένταση στο σημείο της ατάκας, κάτι το οποίο δε συμβαίνει στη δεξιά μεριά του σχήματος.

### ***1.5 Μετρική Ιεραρχία***

Η μετρική ιεραρχία αναφέρεται στη σύνθεση των παλμών σε ένα σύνολο επιπέδων που αντικατοπτρίζουν διαφορετικούς βαθμούς έμφασης και σημασίας. Αυτή η ιεραρχία είναι κεντρική για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι ακροατές αντιλαμβάνονται και οργανώνουν τη χρονική δομή της μουσικής. (Lerdahl & Jackendoff,1983)

Βασικά στοιχεία της μετρικής ιεραρχίας είναι η μονάδα βασισμένη σε παλμούς(επίπεδο ρυθμού). Αυτό είναι το πιο βασικό επίπεδο στο οποίο ο παλμός κατανέμεται ομοιόμορφα και αποτελεί τη βασική μονάδα χρόνου της μουσικής. Επίσης, τα υπομετρικά επίπεδα τα οποία αναφέρονται στη μικρότερη χρονική

υποδιαίρεση των βασικών παλμών, όπως η μισή παλάμη ή ο 4ος παλμός. Αυτά τα επίπεδα προσθέτουν ρυθμική λεπτομέρεια και πολυπλοκότητα. Τέλος, τα υπερμετρικά επίπεδα οργανώνουν βασικούς παλμούς σε μεγαλύτερες μονάδες χρόνου, όπως μέτρα, φράσεις και μέρη της μουσικής. Τα υπερμετρικά επίπεδα καθορίζουν τις μεγαλύτερες δομικές μονάδες και τη συνολική ρυθμική αίσθηση του κομματιού. Μέσα σε ένα μέτρο υπάρχουν οι ισχυροί και οι ασθενείς παλμοί. (Cooper&Meyer,1960) Οι ισχυροί παλμοί βρίσκονται στο κύριο σημείο έμφασης εντός του μέτρου και συνήθως είναι στην αρχή του μέτρου ή σε σημαντική ρυθμική θέση. Έχουν μεγαλύτερη έμφαση και αποτελούν σημείο αναφοράς για τους ακροατές. Από την άλλη πλευρά οι ασθενείς ή αλλιώς αδύναμοι παλμοί είναι μεταξύ ισχυρών παλμών και έχουν μικρότερη έμφαση. Προσφέρουν μια ρυθμική ποικιλία και βοηθούν στη δημιουργία μιας μουσικής ροής. Για παράδειγμα σε ένα μέτρο των 4/4 ο πρώτος και ο τρίτος παλμός είναι πιο ισχυροί από τον δεύτερο και τον τέταρτο, ενώ συγχρόνως είναι και παλμοί στο επόμενο μέτρο.



**Σχήμα 1.4**

## **1.6 Συμμετρικές και Ασύμμετρες ρυθμικές δομές**

Με το πέρασμα των χρόνων, έχουν δημιουργηθεί αρκετά μοντέλα ανίχνευσης του παλμού (beat tracking), τα οποία ο στόχος τους είναι να εντοπίσουν σημαντικά ισόχρονα beats που υπάρχουν σε μουσικά δεδομένα. Αυτά μοντέλα έχουν ως αρχική υπόθεση την ύπαρξη ενός ισόχρονου tactus μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος ταχύτητας η οποία βρίσκεται συνήθως γύρω από το αυθόρμητο tempo. Η απόδοση αυτών των συστημάτων συνήθως χρησιμοποιείται σε μουσικά σύνολα δεδομένων που προέρχονται από τη δυτική μουσική (π.χ. κλασική, ροκ, ποπ, τζαζ), η οποία παρουσιάζει σχεδόν αποκλειστικά συμμετρικές ρυθμικές δομές (π.χ. 3/4, 4/4, 6/8 κ.λπ.) (Mckinney et al., 2007; Dixon, 2007; Davies et al., 2009).

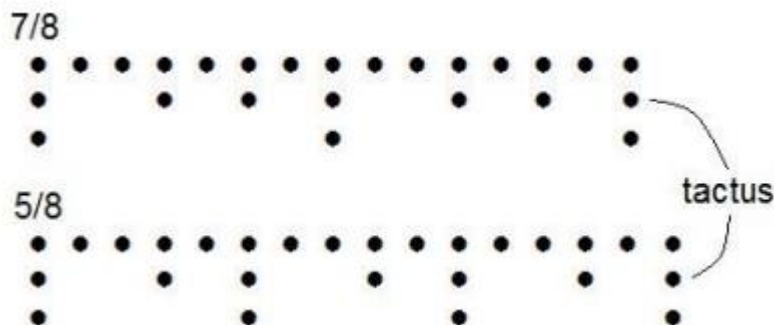
Από την άλλη πλευρά, η απόδοση των συστημάτων παρακολούθησης του ρυθμού σε μουσική που περιλαμβάνει ασύμμετρους ρυθμούς (π.χ. 5/8, 7/8) χρειάζονται αρκετές βελτιώσεις. Το tactus των ασύμμετρων/σύνθετων ρυθμών είναι μη ισόχρονο. Για παράδειγμα, ένα κομμάτι 7/8 συνήθως μετριέται/χορεύεται σε επίπεδο 3+2+2 (όχι σε χαμηλότερο ή υψηλότερο επίπεδο). Οι ασύμμετροι, μη ισόχρονοι αυτοί ρυθμοί είναι καλό να θεωρηθούν ως εξαιρέσεις στους τυπικούς ισόχρονους ρυθμούς του beat ή αλλιώς αν ένας ευρύτερος ορισμός του beat μπορεί να ενσωματώσει τους ασύμμετρους ρυθμούς (Fouloulis, Pikrakis, Cambourooulos, 2012).

Σύμφωνα με την έρευνα η οποία υλοποιήθηκε από τον κ. Φουλούλη ,τον κ. Πυκράκη και τον κ. Καμπουρόπουλο, είναι να εκτιμηθεί η απόδοση των συστημάτων εντοπισμού χτύπων στη μουσική με ασύμμετρους ρυθμούς, όπως 5/8 ή 7/8, και να υποδείξει θεωρητικές και πρακτικές βελτιώσεις στην εν λόγω αντίληψη του ρυθμού. Ένα θεμελιώδες ερώτημα είναι εάν οι ασύμμετροι, μη ισόχρονοι ρυθμοί θα έπρεπε να θεωρούνται εξαιρέσεις ή ανωμαλίες σε σχέση με τον "συνηθισμένο" ρυθμό ή αν είναι εφικτό να υιοθετηθεί ένας ευρύτερος ορισμός του ρυθμού, ο οποίος να συμπεριλαμβάνει φυσικά και ασύμμετρες δομές.

Στη δυτική μουσική, ο ρυθμός θεωρείται συνήθως ισόχρονος (οι αποκλίσεις από τον ισόχρονο ρυθμό θεωρούνται «ειδικές περιπτώσεις» ή ακόμη και «ασυνήθιστες περιπτώσεις»). Μια κεντρική παραδοχή είναι ότι το ρυθμικό επίπεδο (tactus) μιας μετρικής δομής δε χρειάζεται να είναι ισόχρονο. Το ίδιο το επίπεδο του tactus μπορεί επίσης να αποτελείται από μη ισόχρονες μονάδες. (Fouloulis, Pikrakis,

Cambouropoulos,2012).

Τα ασύμμετρα ρυθμικά σχήματα που εξετάζονται στη συγκεκριμένη έρευνα περιγράφονται ως ακολουθίες επαναλαμβανόμενων προτύπων, τα οποία συγκροτούνται από χρονικές μονάδες διαφορετικής διάρκειας — συνήθως "μακριές" (τριάδες) και "σύντομες" (δυάδες). Η μετρική ανάλυση τέτοιων δομών φανερώνει ότι αυτές οι χρονικές μονάδες εντάσσονται ανάμεσα σε δύο ισόχρονα επίπεδα: από τη μία, το κατώτερο υπο-ρυθμικό επίπεδο, το οποίο αντιστοιχεί στις μικρότερες χρονικές υποδιαίρεσεις, και από την άλλη, το ανώτερο μετρικό επίπεδο, που απεικονίζει τη γενικότερη χρονική οργάνωση του μέτρου. Με αυτόν τον τρόπο, τα ασύμμετρα μοτίβα «παρεμβάλλονται» ανάμεσα στα ισόχρονα επίπεδα και αποτελούν μια ιδιαίτερη αλλά συστηματική μορφή οργάνωσης του ρυθμικού χρόνου, όπως έχει περιγράψει και ο κ. Καμπουρόπουλος (1997). Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι παραπάνω προτάσεις.



**Σχήμα 1.5** (Fouloulis, Pikrakis, Cambouropoulos,2012)

Η μελέτη παρουσιάζει το μοντέλο των Pikrakis et al. (2004), το οποίο εστιάζει στην εξαγωγή μέτρου και τέμπο από πολυφωνικά μουσικά σήματα. Η προσέγγιση βασίζεται στην ανάλυση του ήχου σε μη επικαλυπτόμενα παράθυρα 10 δευτερολέπτων, μέσα στα οποία εφαρμόζεται υποκινούμενη ανάλυση MFCC (με βάση την ενέργεια και τη χρωματική πληροφορία). Για κάθε παράθυρο, δημιουργείται πίνακας αυτοομοιότητας (Self Similarity Matrix - SSM), και μέσω της ανάλυσης των διαγωνίων του SSM, εντοπίζονται περιοδικότητες σχετικές με το μέτρο

και το ρυθμό της μουσικής.

Η αξιολόγηση του μέτρου και του ρυθμού βασίζεται σε δύο κριτήρια. Το πρώτο εντοπίζει υποψήφιες περιοδικότητες βάσει τοπικών ελαχίστων και τις συνδυάζει για την εξαγωγή μέτρου, ενώ το δεύτερο λαμβάνει υπόψη την κλίση (ένταση) των κοιλάδων στο διάγραμμα των ελαχίστων για μεγαλύτερη ακρίβεια. Η τελική επιλογή μέτρου για το ολόκληρο μουσικό κομμάτι βασίζεται σε στατιστική σύνοψη των αποτελεσμάτων ανά παράθυρο, μέσω δημιουργίας ιστογραμμάτων. Για την αξιολόγηση, χρησιμοποιήθηκαν 30 ελληνικά παραδοσιακά τραγούδια με ποικίλα μέτρα ( $2/4$  έως  $11/8$ ), πολλά εκ των οποίων χαρακτηρίζονται από ασύμμετρο ρυθμό. Συγκρίθηκαν τρία συστήματα αυτό του S.Dixon το BeatRoot(2007) (αναλυτικό υποκεφάλαιο 3.2.4), του Davies & Plumbley (2007) και του Pikrakis et al. (2004).

Τα ευρήματα της έρευνας ανέδειξαν τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν τα δύο συστήματα beat tracking στην ανίχνευση μη ισόχρονων ρυθμικών δομών. Και τα δύο τείνουν να επιλέγουν ισόχρονους παλμούς, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου αυτοί δεν αντιστοιχούν στο πραγματικό μέτρο του μουσικού αποσπάσματος. Το σύστημα BeatRoot παρουσίασε προτίμηση προς ταχύτερους ρυθμούς, πιθανώς λόγω της εσωτερικής λειτουργίας των πρακτόρων του, ενώ το μοντέλο των Davies & Plumbley εμφάνισε αυξημένη ευαισθησία σε μετατοπίσεις φάσης, συχνά παραμορφώνοντας την εσωτερική ρυθμική οργάνωση.

Αντίθετα, το σύστημα των Pikrakis et al. κατέγραψε σημαντικά βελτιωμένη απόδοση σε περιπτώσεις ασύμμετρων μέτρων. Ήταν σε θέση να ανιχνεύσει τις κυρίαρχες περιοδικότητες ακόμη και όταν αυτές επεκτείνονταν σε διάστημα δύο μέτρων (π.χ. εντοπισμός  $14/8$  αντί του επιμέρους  $7/8$ ). Αξιοσημείωτο είναι ότι, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η κύρια έξοδος του μοντέλου δεν αντιστοιχούσε στο πραγματικό μέτρο, η σωστή περιοδικότητα υπήρχε ως δευτερεύουσα κορυφή στο ιστόγραμμα εξόδου. Οι βασικές αδυναμίες του μοντέλου εντοπίζονται κυρίως σε αποσπάσματα με υπερβολικά αργό ή ταχύ τέμπο, στα οποία το σύστημα παρουσιάζει μειωμένη ακρίβεια στην αναγνώριση του μέτρου.

Επομένως, τα ασύμμετρα μέτρα είναι δυνατόν να εντοπιστούν από τα υπολογιστικά μοντέλα.

Επιπλέον, συχνά, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, ένας

ακροατής μπορεί αυθόρμητα να χρησιμοποιήσει έναν ασύμμετρο tactus για να μετρήσει το χρόνο, καθώς αυτή είναι η πιο πιθανή εξήγηση για την οργάνωση των ρυθμικών ερεθισμάτων μέσα σε συγκεκριμένα μουσικά είδη. Ο ρυθμός και η τονικότητα μοιράζονται κοινά γνωστικά υποκείμενα (Parncutt, 1994; Krumbhansl, 2000). Οι ασύμμετρες δομές είναι όμοιες στον τονικό τομέα. Για παράδειγμα, οι μείζονες και οι ελάσσονες κλίμακες είναι ασύμμετρες. Οι ακροατές μαθαίνουν κλίμακες μέσω της έκθεσης σε ένα συγκεκριμένο μουσικό είδος και στη συνέχεια οργανώνουν αυτόματα τις τονικές σχέσεις γύρω από την υπονοούμενη ασύμμετρη κλίμακα. Οι ασύμμετρες κλίμακες είναι στην πραγματικότητα (γνωστικά) ανώτερες από τις συμμετρικές κλίμακες (π.χ. δωδεκατονικές κλίμακες ή όλων των τόνων κλίμακες).

Στην ελληνική παραδοσιακή μουσική, όπως και στις υπόλοιπες Βαλκανικές χώρες, οι ασύμμετροι ρυθμοί αποτελούν μοναδικό χαρακτηριστικό προσφέροντας πολυπλοκότητα και πλούτο στη μουσική εμπειρία. Οι ασύμμετροι ρυθμοί χαρακτηρίζονται από την εναλλαγή μεγάλων (3) και μικρών (2) χρονικών μονάδων μέσα σε έναν κύκλο μέτρου. Αυτή η ασυμμετρία δημιουργεί ρυθμικές δομές που αποκλίνουν από τον ισοχρονισμό, όπως ο απλός χρόνος τεσσάρων τετάρτων ή ο χρόνος τριών τετάρτων. Παραδείγματα ασύμμετρων ρυθμών περιλαμβάνουν: τα 7/8 (3+2+2): χρησιμοποιείται στον καλαματιανό, έναν από τους πιο δημοφιλείς ελληνικούς χορούς. Τα 9/8 (2+2+2+3): συναντάται σε χορούς όπως το ζεϊμπέκικο, που συνδυάζει την προσωπική έκφραση με την αυστηρότητα της ρυθμικής δομής. Τα 11/8 ή 13/8: συνηθισμένο στους βουλγαρικούς και σερβικούς χορούς, αντανακλώντας την πολύπλοκη φύση της βαλκανικής μουσικής.

## ***1.7 Συσχέτιση Μετρικής Δομής και Δομή Τοπικών Μελωδικών Ορίων***

Η Προσαρμογή Μετρικής Δομής στην Δομή Τοπικών Μελωδικών Ορίων αποτελεί έννοια σχετική με τη μουσική θεωρία και την ανάλυση μουσικής, ιδιαίτερα με την συσχέτιση μετρικής δομής και μελωδικών γραμμών. Η έννοια των τοπικών μελωδικών ορίων αναφέρεται σε συγκεκριμένα σημεία μέσα σε μια μελωδική γραμμή, στα οποία παρατηρούνται αλλαγές ή μεταβάσεις. Πιο ειδικά, τέτοια σημεία συμπεριλαμβάνουν καταλήξεις φράσεων, σημεία αλλαγής μοτίβου, όπου η μελωδία αλλάζει κατεύθυνση, χαρακτήρα ή θεματικό υλικό, και κορυφώσεις, σημεία δηλαδή που συνήθως εμφανίζουν αυξημένη ένταση. Συχνά, είναι επιθυμητό εκκινήσεις ή τέλη φράσεων, και γενικά σημεία ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, να συνάδουν με ισχυρούς χτύπους του παλμού — κατ' επέκταση, η έννοια της Προσαρμογής Μετρικής Δομής στην Δομή Τοπικών Μελωδικών Ορίων αφορά κατά κόρον τις τεχνικές επίτευξης του παραπάνω.

Αναφορικά με τα τοπικά όρια μελωδικών γραμμών, ο Arnold Schönberg, αναφέρεται, στο βιβλίο του *Fundamentals of Musical Composition* (1942), στα σημεία “αφίξεως,” που συχνά σηματοδοτούν το τέλος μιας φράσης ή ενότητας και συμβάλλουν στην ολοκλήρωση και ικανοποίηση της μουσικής δομής. Ο Schönberg, τονίζει τη σημασία της σωστής διαχείρισης αυτών των στιγμών στην ανάπτυξη ενός μουσικού έργου, καθώς η σωστή τοποθέτησή τους συμβάλλει καθοριστικά στην κατανόηση της μουσικής από τον ακροατή. Γενικά το συγκεκριμένο ζήτημα απαιτεί αρκετή ανάλυση, η οποία θα παραληφθεί, καθώς δεν αποτελεί βασικό θέμα της παρούσας εργασίας.

Σχετικά με το ρυθμό, λοιπόν, ο William Rothstein (1989) ασχολείται με τη σχέση μεταξύ φραστικής και ρυθμικής δομής στην τονική μουσική. Ο Rothstein αναλύει πώς οι μουσικές φράσεις οργανώνονται και πώς αυτές οι δομές συνεισφέρουν στην κατανόηση της μορφής ενός έργου. Συγκεκριμένα, οι μουσικές φράσεις επεκτείνονται, συντομεύουν, ή επαναλαμβάνονται ανάλογα με την εξέλιξη του κομματιού. Οι μετρικές δομές, λοιπόν, τείνουν να διαμορφώνονται κατάλληλα για να υποστηρίξουν τη φραστική δομή.

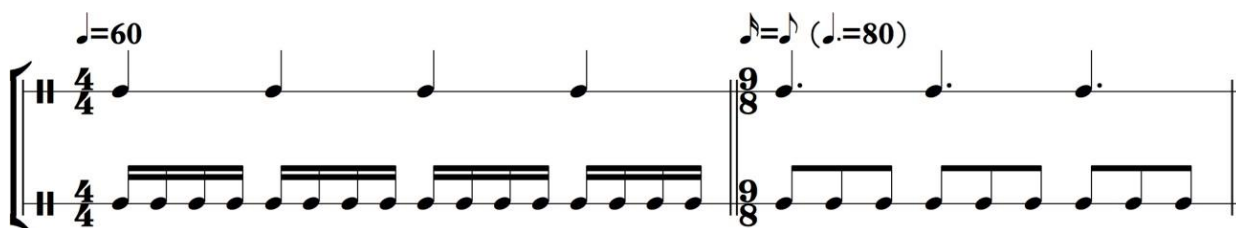
Γενικά, οι παραπάνω τεχνικές, καθώς και διάφορες τεχνικές προσαρμογής του παλμού στα μελωδικά όρια, αποτελούν και βασικές τεχνικές από πλευράς του συνθέτη που έχουν σκοπό την Προσαρμογή Μετρικής Δομής στην Δομή Τοπικών Μελωδικών Ορίων. Για παράδειγμα, η άφιξη μιας μελωδικής γραμμής σε ένα τοπικό μελωδικό κλείσιμο μπορεί να συνδυαστεί με μία σταδιακή επιβράδυνση του παλμού (*ritardando*), προκειμένου να δημιουργήσει μια αίσθηση κλεισίματος. Γενικά, η αλλαγή στην ταχύτητα και τη ροή του παλμού αποτελεί σημαντική — και προφανής — τεχνική μετρικής προσαρμογής.

Υπό αυτό το πρίσμα, ορισμένες φορές μπορεί να εφαρμοστεί και αλλαγή στην ομαδοποίηση του παλμού είτε προσωρινά είτε για εκτεταμένο διάστημα. Για παράδειγμα, ένα μελωδικό τμήμα σε 4/4 μπορεί να μεταβεί σε 3/4. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναλυθεί η τεχνική της “μετρικής μετατροπίας,” που αποτελεί υποσύνολο των περιπτώσεων αλλαγής μέτρου και ταχύτητας, αλλά ακολουθεί επιπλέον έναν ιδιαίτερα ενδιαφέροντα κανόνα. Συγκεκριμένα, η “μετρική μετατροπία” — αλλιώς “μετατροπία του τέμπο” — ορίζεται ως μια αλλαγή στη μετρική δομή μέσω μιας κοινής μονάδας διάρκειας (Benadon, 2004).

Ως αντικείμενο μελέτης, οι “μετρικές μετατροπίες” είναι πολυδιάστατες, εξαιρετικά σύνθετες, και μπορούν να επιτευχθούν με αρκετούς τρόπους. Κατά βάση, λειτουργούν μέσω της σύνδεσης υποδιαιρέσεων του παλμού. Για παράδειγμα, αν ένα μέτρο 4/4 υποδιαιρείται σε δέκατα-έκτα, και ένα μέτρο 9/8 υποδιαιρείται σε όγδοα, μια “μετρική μετατροπία” μεταξύ τους μπορεί να επιτευχθεί αν επιλεγθεί τέμπο κατάλληλο ώστε η διάρκεια ενός δεκάτου-έκτου στα 4/4 να είναι ισοδύναμη με τη διάρκεια ενός ογδόου στα 9/8. Αυτό συνήθως υπολογίζεται με πράξεις. Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα ενός τέτοιου υπολογισμού.

Η περιοδικότητα του παλμού σε BPM (χτύπους ανά λεπτό) μεταφράζεται σε χτύπους ανά δευτερόλεπτο, όπου, για παράδειγμα, 60 BPM αντιστοιχούν σε 1 χτύπο το δευτερόλεπτο. Σε ένα μέτρο 4/4, αυτό σημαίνει ότι ένα δέκατο-έκτο διαρκεί 0.25 δευτερόλεπτα. Στο μέτρο 9/8, ο χτύπος αναγράφεται σε τέταρτα παρεστιγμένα, που διαρκούν τρία όγδοα. Αν το όγδοο στα 9/8 διαρκεί όσο ένα δέκατο-έκτο στα 4/4, δηλαδή 0.25 δευτερόλεπτα, τότε το τέταρτο παρεστιγμένο διαρκεί 0.75 δευτερόλεπτα, που με τη σειρά του υπονοεί 80 BPM. Η “μετρική μετατροπία,” επομένως, από 4/4,

60 BPM, σε 9/8, 80 BPM, εξισώνει χρονικά τα δέκατα-έκτα με τα όγδοα. Οι παραπάνω προτάσεις απεικονίζονται στο σχήμα 1.6.



### Σχήμα 1.6

Η βασική ιδέα πίσω από την παραπάνω τεχνική έγκειται στο γεγονός ότι λειτουργεί σε διαφορετικά επίπεδα χρονικής αντίληψης του παλμού. Στη μικρότερη κλίμακα, εισάγει νέες δυνατότητες στη διαίρεση του ρυθμού. Σε μεγαλύτερη κλίμακα, επιτρέπει την εφαρμογή ενός δικτύου από τέμπο που συσχετίζονται μέσω μιας πληθώρας αναλογιών. Η τεχνική μπορεί να μεταβάλει το τέμπο χωρίς να αλλάζει τη διαίρεση του ρυθμού που αντιλαμβάνεται ο ακροατής, καθιστώντας την ένα διακριτικό αλλά ισχυρό εργαλείο για τους συνθέτες.

Γενικά, πάντως, οι τεχνικές που απαρτίζουν την Προσαρμογή Μετρικής Δομής στην Δομή Τοπικών Μελωδικών Ορίων μπορούν να αξιοποιηθούν ως μέτρα ανάλυσης από την πλευρά του ακροατή.

## 2. Υπολογιστικά - συστηματικά μοντέλα προσδιορισμού μετρικής δομής

### *ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν υπολογιστικά-συστηματικά μοντέλα αντίληψης του ρυθμού. Το πρώτο μοντέλο είναι η **Γενετική Μετασχηματιστική Θεωρία της Τονικής Μουσικής και οι Κανόνες Μετρικής Δομής των Lerdahl and Jackendoff (1983)**. Η Γενετική Μετασχηματιστική Θεωρία της Τονικής Μουσικής (GTTM), που αναπτύχθηκε από τους Lerdahl και Jackendoff το 1983, αποτελεί μια θεμελιώδη συνεισφορά στη μελέτη της τονικής μουσικής. Η θεωρία επιχειρεί να εξηγήσει πώς οι ακροατές αντιλαμβάνονται, αναλύουν και οργανώνουν τη μουσική σε μια δομημένη ιεραρχία μέσω ενός συνόλου κανόνων. Βασίζεται σε μεγάλο βαθμό σε έννοιες από τη γλωσσολογία, όπως οι γενετικοί γραμματικοί κανόνες, αλλά προσαρμόζεται στο πλαίσιο της τονικής μουσικής. Το δεύτερο μοντέλο είναι το **Σύστημα Εσωτερικών Ρολογιών** που προτάθηκε από τους **Povel και Essens (1985)** το οποίο είναι μία θεωρητική προσέγγιση που εξηγεί πώς οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται και οργανώνουν ρυθμικά πρότυπα στη μουσική. Η θεωρία αυτή βασίζεται στην ιδέα ότι ο ανθρώπινος εγκέφαλος χρησιμοποιεί **εσωτερικά χρονικά πλαίσια** ή «ρολόγια» για να συγχρονίζεται με εξωτερικά ρυθμικά ερεθίσματα. Το **Μοντέλο Αντίληψης Μουσικού Ρυθμού** των **Longuet-Higgins και Lee (1982)** είναι ένα σημαντικό υπολογιστικό μοντέλο που επικεντρώνεται στην αντίληψη του μουσικού ρυθμού και της δομής των ρυθμικών μοτίβων από τον ανθρώπινο εγκέφαλο. Το μοντέλο αυτό επιδιώκει να εξηγήσει πώς οι ακροατές αναγνωρίζουν και οργανώνουν ρυθμικές ακολουθίες, κατανοώντας τις δυναμικές και τις μετρικές σχέσεις που εμπεριέχουν οι μουσικές συνθέσεις. Αυτή η προσέγγιση αφορά τη σύνδεση της **μετρικής δομής** (ή του ρυθμικού πλαισίου) με τη δομή ομαδοποίησης στις μελωδικές γραμμές σε μουσικά έργα, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο η μουσική φόρμα και η μετρική οργάνωση επιδρούν στην αντίληψη του ρυθμού της μελωδικής γραμμής.

## **2.1 Γενετική Μετασχηματιστική Θεωρία της Τονικής Μουσικής – Κανόνες Μετρικής Δομής (Lerdahl and Jackendoff, 1983)**

Η Γενετική Μετασχηματική Θεωρία της Τονικής Μουσικής (Lerdahl and Jackendoff, 1983) βασίστηκε κατά κόρον στις γλωσσολογικές θεωρίες του Noam Chomsky (1957), οι οποίες βασίστηκαν με τη σειρά τους στην ιδέα ότι οι γραμματικοί κανόνες μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να παράγουν και να εξηγούν όλες τις αποδεκτές προτάσεις μίας γλώσσας. Με άλλα λόγια, μια “Γενετική Μετασχηματική” γραμματική — που συμπεριλαμβάνει κανόνες συντακτικού, λεξικής μορφολογίας, και σημασιολογίας — επιδιώκει να εξηγήσει πώς οι ομιλητές παράγουν και κατανοούν εξαιρετικά μεγάλο αριθμό προτάσεων, πολλές εκ των οποίων δεν έχουν ξανασυναντήσει. Κατά τους Lerdahl και Jackendoff (1983), μια Γενετική Μετασχηματική Θεωρία της Τονικής Μουσικής θα επιδίωκε παρόμοια λειτουργία, συγκεκριμένα την ανάλυση και εξήγηση του τρόπου που οι ακροατές αντιλαμβάνονται την τονική μουσική όχι ως μεμονωμένα μουσική συμβάντα, αλλά ως ένα σύνολο από οργανωμένα μοτίβα και γενικότερες μουσικές οντότητες.

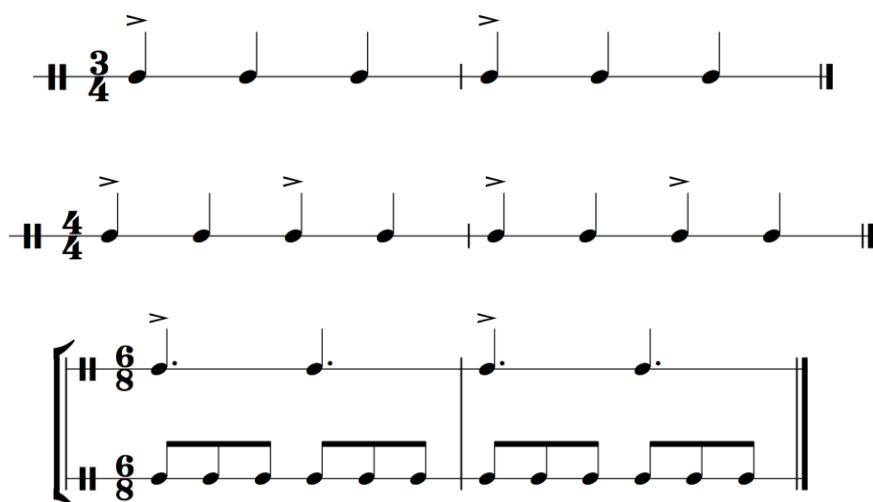
Η Γενετική Μετασχηματική Θεωρία της Τονικής Μουσικής (Lerdahl and Jackendoff, 1983) βασίζεται, λοιπόν, σε τέσσερις αρχές, που επεξηγούνται παρακάτω:

- **Γενετική Γραμματική:** Η μουσική έχει μια υποκείμενη “γενετική γραμματική,” η οποία αποτελείται από κανόνες που επιτρέπουν την κατασκευή μουσικών δομών.
- **Μετασχηματισμοί:** Οι μετασχηματισμοί είναι διαδικασίες που μεταμορφώνουν και συνδυάζουν τις βασικές δομές της μουσικής σε πιο σύνθετες μορφές.
- **Ιεραρχία:** Η μουσική δομή οργανώνεται ιεραρχικά, με βασικές δομές να υποστηρίζουν πιο σύνθετες δομές.
- **Καθολικότητα:** Υπάρχουν ορισμένοι καθολικοί κανόνες στη μουσική που καθορίζουν ποιες μουσικές ακολουθίες είναι αποδεκτές ανάλογα με το δεδομένο πλαίσιο.

Στο πλαίσιο της μελέτης του ρυθμού, οι Lerdahl και Jackendoff (1983) αναφέρονται διεξοδικά στη «μετρική δομή», την οποία θεωρούν θεμελιώδες στοιχείο για την αντίληψη και κατανόηση της χρονικής οργάνωσης της μουσικής. Η μετρική δομή περιγράφει το πρότυπο οργάνωσης και ομαδοποίησης των παλμών (beats) σε ένα μουσικό έργο, το οποίο καθιερώνει και ενισχύει την αίσθηση του ρυθμού και του χρονισμού στον ακροατή.

Οι χτύποι και οι ιδιότητές τους αποτελούν, λοιπόν, την κύρια ρυθμική έννοια που διαπραγματεύεται η Γενετική Μετασχηματική Θεωρία της Τονικής Μουσικής. Οι χτύποι ή παλμοί είναι συνήθως τακτικοί, επαναλαμβανόμενοι, και παρέχουν το χρονικό πλαίσιο για τη μουσική. Μπορούν να θεωρηθούν ως ο “καρδιακός παλμός” ενός κομματιού. Όπως προαναφέρθηκε, οι παλμοί οργανώνονται συνήθως σε μέτρα, τακτικά δηλαδή σύνολα από ομαδοποιημένους παλμούς που ακουστικά διαχωρίζονται μέσω “ισχυρών” και “ασθενών” τονισμών.

Κοινά ήδη μέτρων αποτελούν τα δίσημα (π.χ. 2/4, 4/4, 6/8), που ομαδοποιούν τους παλμούς ανά δύο σε ισχυρό-ασθενή, και τα τρίσημα (π.χ. 3/4, 9/8), που ομαδοποιούν τους παλμούς ανά τρία σε ισχυρό-ασθενή-ασθενή. Οι παλμοί συνήθως υποδιαιρούνται περαιτέρω· για παράδειγμα, τα 6/8 διαιρούνται αρχικά σε δύο παλμούς, και ο κάθε παλμός συνήθως υποδιαιρείται σε τρεις υπό-μονάδες. (σχήμα 2.1)



**Σχήμα 2.1**

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ξανά πως σε πολλά είδη μουσικής, οι παλμοί των μέτρων δεν είναι απαραίτητα συμμετρικοί· για παράδειγμα, τα 7/8 διαιρούνται συνήθως σε τρεις παλμούς, εκ των οποίων ο πρώτος ή ο τρίτος (ανάλογα με το είδος της μουσικής) διαρκεί μια υποδιαίρεση περισσότερο (3+2+2 ή 2+2+3), δημιουργώντας έτσι μια εσκεμμένη αίσθηση ασυμμετρίας. Παρόλα αυτά, καθώς οι κανόνες των Lerdahl and Jackendoff (1983) αποσκοπούν στην άμεση κατανόηση της

συμβατικής Ευρωκεντρικής τονικής μουσικής, στην οποία μέτρα όπως τα 7/8 σπανίζουν, το σύστημα της μετρικής δομής που αναλύουν οι συγγραφείς δεν εστιάζει ιδιαίτερος σε ασύμμετρους παλμούς.

Σε κάθε περίπτωση, αυτή η ανάλυση της έννοιας του παλμού κωδικοποιείται από τους Lerdahl and Jackendoff (1983) σε τρία επίπεδα μετρικής δομής. Συγκεκριμένα, τα επίπεδα, όπως προκύπτουν από την παραπάνω διερεύνηση, είναι τα εξής:

- **Επίπεδο Tactus:** Το επίπεδο στο οποίο οι χτύποι αισθάνονται πιο φυσικά από τους ακροατές. Η έννοια του tactus έχει ήδη αναλυθεί.
- **Επίπεδο Υποδιαίρεσης:** Η διαίρεση κάθε χτύπου σε μικρότερες μονάδες (π.χ. όγδοα ή δέκατα έκτα). Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, αυτό το επίπεδο ονομάζεται tatum.
- **Επίπεδο Μέτρου:** Η ομαδοποίηση των χτύπων σε μέτρα με τη χρήση ενός μοτίβου ισχυρών και αδύναμων χτύπων.

Γενικά, οι ακροατές τείνουν να συνάγουν σταθερό παλμό από μια ακολουθία νοτών, ακόμη κι αν αυτός δεν είναι ρητά σημειωμένος. Για παράδειγμα, σε μια μελωδική γραμμή, οι ακροατές συνηθίζουν να αντιλαμβάνονται παλμό ακόμη και αν δεν υπάρχουν κρουστά ή ρητοί τονισμοί, ή ακόμα κι αν γίνεται χρήση πολλών συγκοπών. Αυτή η ιδιότητα επαληθεύεται ευκολότερα όταν οι μετρικές δομές εμφανίζουν κανονικότητα, δηλαδή συνεπή εναλλαγή ισχυρών και αδύναμων χτύπων. Οι χτύποι είναι επίσης συνήθως οργανωμένοι σε μια ιεραρχία, με κάθε επίπεδο να υποδιαιρεί ή να ομαδοποιεί τους χτύπους του ανώτερου επιπέδου. Προαναφέρθηκε, για παράδειγμα, ότι ένα μέτρο 6/8 διαιρείται αρχικά σε δύο παλμούς, και ο κάθε παλμός υποδιαιρείται σε τρεις υπο-μονάδες. Μπορεί όμως, η κάθε υπο-μονάδα, που διαρκεί ένα όγδοο, να υποδιαιρεθεί περαιτέρω σε δέκατα έκτα.

Υπό αυτό το πρίσμα, οι Lerdahl and Jackendoff (1983) συστήνουν μερικούς κανόνες προτίμησης που βοηθούν στον καθορισμό φυσικών βάσεων για την διευκόλυνση των μετρικών ερμηνειών. Αρχικά, η προτίμηση σημαντικά μουσικά γεγονότα (αρχές θεματικού υλικού, αρμονικές αλλαγές, κ.λπ.) να ευθυγραμμίζονται με ισχυρούς χτύπους, προσφέρει έναν φυσικό τονισμό. Επιπλέον, η συνέπεια στην μετρική δομή καθ' όλη τη διάρκεια ενός μουσικού περάσματος, καταστεί πιο εύκολο

να ακολουθηθεί από τον ακροατή η μετρική δομή του κομματιού. Τέλος, η σαφήνεια αναφορικά με την μετρική δομή, που συγκεκριμένα επιτυγχάνεται μέσω καλά ορισμένων και αδιαμφισβήτητων ρυθμικών μοτίβων, συμβάλει στην ευκολότερη αντίληψη του ρυθμικού περιεχομένου από τον ακροατή. Η μετρική δομή που ταιριάζει με τη μουσική επιφάνεια, έτσι ώστε οι πιο ισχυρές-τονισμένες νότες να ταυτίζονται με τις ισχυρότερες θέσεις είναι αυτή που επιλέγεται από τον ακροατή.

Πιο αναλυτικά, οι κανόνες που προτείνουν οι Lerdahl and Jackendoff (1983) χωρίζονται σε δύο είδη κανόνων: στους Κανόνες Μετρικής Μορφολογικής Ορθότητας (Metrical Well-Formedness Rules—**MWFR**) και στους Κανόνες Μετρικής Προτίμησης (Metrical Preference Rules – **MPRs**). Παρακάτω θα αναλύσουμε τους κανόνες αυτούς.

Οι Κανόνες Μετρικής Μορφολογικής Ορθότητας (**MWFR**) είναι αυτοί που ορίζουν το σύνολο των πιθανών των μετρικών δομών και ποιοι από αυτούς είναι τυπικά ορθοί και είναι οι εξής:

**MWFR1:** Κάθε ατάκα νότας (attack point) πρέπει να ταυτίζεται με ένα παλμό ακόμη και στα μικρότερα επίπεδα διάρκειας της μετρικής δομής σε εκείνο το σημείο του κομματιού.

**MWFR2:** Κάθε παλμός (beat) σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο πρέπει να είναι επίσης παλμός και σε όλα τα μικρότερα επίπεδα που υπάρχουν σε εκείνο το σημείο του μουσικού κομματιού.

**MWFR3:** Στην κλασική τονική μουσική και σε κάθε μετρικό επίπεδο οι ισχυροί παλμοί πρέπει να έχουν απόσταση δύο ή τριών παλμών μεταξύ τους.

**MWFR4:** (αναθεωρημένος) Το επίπεδο του δεσπόζοντος παλμού (δηλαδή ο πιο ισχυρός ή τονισμένος παλμός μέσα σε μια μουσική φράση) καθώς και κάθε υψηλότερο μετρικό επίπεδο μπορεί να αποτελείται μόνο από ισαπέχοντες παλμούς. Στα κατώτερα μετρικά επίπεδα, οι ασθενείς παλμοί πρέπει να είναι ισόχρονα τοποθετημένοι ανάμεσα στους ισχυρούς παλμούς. (J. Coreý Knoll,2006,7)

Όπως έχουμε αναφέρει και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο δεσπόζων παλμός ή αλλιώς *tactus*, είναι το επίπεδο παλμού ενός μουσικού κομματιού, όπως το χειροκρότημα ή τα χορευτικά βήματα, στο οποίο ο ακροατής τείνει να συγχρονίζει

φυσικά τις κινήσεις του. Είναι μια σταθερή, αντιληπτή ρυθμική ακολουθία που καθοδηγεί την αίσθηση του ρυθμού και είναι το πιο προφανές σημείο αναφοράς για το ρυθμικό μοτίβο της μουσικής.

Η προτιμώμενη σταθερότητα μιας ορθής μετρικής δομής στην κλασική τονική μουσική καθορίζεται από ένα σύνολο κανόνων προτίμησης της μετρικής δομής (**MPRs**). Οι κανόνες μετρικής προτίμησης (**MPRs**) χρησιμοποιούνται για να χαρτογραφήσουν τις μετρικές δομές που ορίζονται από τους κανόνες καλοσχηματισμού της μετρικής δομής (**MWFR**) στην επιφάνεια της μουσικής και είναι οι ακόλουθοι:

**MPR1 (Παράλληλισμός):** Όταν δύο ή περισσότερα μουσικά τμήματα μπορούν να θεωρηθούν ‘παράλληλα’, τότε προτιμάται να σχηματίσουν παράλληλα τμήματα ομάδων.



### Σχήμα 2.2

Μετρική δομή ανά 4 όγδοα



### Σχήμα 2.3

Μετρική δομή ανά 6 όγδοα

Έτσι, σύμφωνα με τον MPR1, η μετρική δομή των παραπάνω σχημάτων επαναλαμβάνεται στο πρώτο ανά 4 όγδοα, ενώ στο δεύτερο ανά 6. Οι χτύποι που απεικονίζονται είναι ίδιου τονικού ύψους, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα οι χτύποι αυτοί να είναι εξίσου σημαντικοί.

Σε περίπτωση όμως που το παράδειγμα έχει τονικό ύψος, δηλαδή είναι μελωδικό (όπως το παρακάτω σχήμα), ο ισχυρός χτύπος γίνεται αντιληπτός από το μελωδικό πήδημα προς τα κάτω. Πιο συγκεκριμένα, ο ισχυρός χτύπος ηχεί στη νότα σι και δημιουργεί μία ομάδα σι-ντο-ρε-μι, ενώ θα μπορούσε να δημιουργηθεί και μια διαφορετική ομαδοποίηση ντο-ρε-μι-σι. Δυστυχώς δε γνωρίζουμε ποια από τις δύο εκδοχές είναι ορθή.



**Σχήμα 2.4**

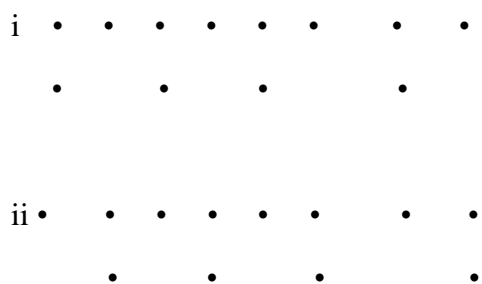
**MPR2 (Ισχυρός Παλμός Νωρίς):** Είναι προτιμότερη (ελαφρώς) μία μετρική δομή στην οποία ο ισχυρότερος παλμός εμφανίζεται σχετικά νωρίς στην ομάδα.

Στην παρακάτω εικόνα, σε κάθε ανοδικό πήδημα βρίσκεται ο ισχυρός παλμός.



**Σχήμα 2.5**

**MPR3 (Φθόγγοι):** Προτιμάται μια μετρική δομή στην οποία οι παλμοί του επιπέδου F , που ταυτίζονται με τις ατάκες μουσικών φθόγγων, είναι ισχυροί παλμοί του L .



**Σχήμα 2.6**



Στο παραπάνω παράδειγμα, η προτεινόμενη σωστή δομή είναι η πρώτη(i). Στη δεύτερη δομή(ii), οι ισχυροί χτύποι βρίσκονται στις μη τονισμένες νότες, με αποτέλεσμα να προκαλείται το αίσθημα της συγκοπής.

Ο MPR4 λειτουργεί όπως τον κανόνα MPR3, με τη μόνη διαφορά πως ο MPR4 μπορεί να διαχωρίσει τους χτύπους σε ισχυρούς και ασθενείς. Από την άλλη πλευρά, όπως έχει προαναφερθεί, ο κανόνας MPR3, ξεχωρίζει τους χτύπους με γνώμονα το αν οι χτύποι ταυτίζονται με ατάκες φθόγγων ή όχι.

**MPR5 (Διάρκεια):** Η έναρξη μιας μετρικής δομής προτιμάται να συμβαίνει στην αρχή ενός μεγάλου μουσικού γεγονότος, όπως μακράς διάρκειας, δυναμικής διάρκειας, φράσης ή μοτίβου άρθρωσης, ή στην αρχή μιας νότας ή αρμονίας στο αντίστοιχο επίπεδο αναγωγής.

α) Μεγάλη διάρκεια:



i . . . . .

. . . . .

ii . . . . .

. . . . .

Σχήμα 2.9

Σε αυτήν την περίπτωση προτιμάται η δομή i, διότι η πιο μεγάλη διάρκεια είναι το τέταρτο και δίνει τον ισχυρό χτύπο στο όγδοο.

β) Δυναμική διάρκεια



f            p            f            p            ...

### Σχήμα 2.10

Στο παραπάνω σχήμα οι δυναμικές εναλλαγές, από forte σε piano είναι αυτές που αναδεικνύουν τη μετρική δομή.

**MPR6 (Μπάσο):** Προτιμάται επίσης μια μετρικά σταθερή μπάσα γραμμή, το οποίο σημαίνει ότι το μπάσο είναι λιγότερο σύνηθες από τις υψηλότερες φωνές να συμμετάσχει σε συγκοπές ή άλλες μετρικές αστάθειες.



### Σχήμα 2.11



**MPR8 (Συγκοπές):** Προτιμάται περισσότερο μια μετρική δομή στην οποία η συγκοπή είναι σε ισχυρότερη θέση από ότι η λύση της.



i . . . . .

. . . . .

ii . . . . .

. . . . .

**Σχήμα 2.13**

Η πρώτη μετρική δομή (i) είναι προτιμότερη από τη δεύτερη, διότι η κάτω φωνή είναι αυτή που προκαλεί τη διαφωνία.

Αυτό έρχεται σε αντιπαράθεση με τους Lerdahl and Jackendoff οι οποίοι υποστηρίζουν πως οι πτώσεις πρέπει να έχουν σταθερή μετρική δομή όπως σε όλο το κομμάτι.

**MPR9 (Αλληλεπίδραση με Σύμπτυξη Χρονικών Τμημάτων):** Προτιμάται μια μετρική ανάλυση η οποία ελαχιστοποιεί συγκρούσεις στην σύμπτυξη χρονικών τμημάτων.

Πιο αναλυτικά, όταν δύο ή περισσότερα μουσικά στοιχεία πρέπει να ευθυγραμμιστούν στον ίδιο χρόνο, είναι επιθυμητή μια λύση όπου η συνύπαρξή τους δε δημιουργεί συγκρούσεις στην αντίληψη του υποκείμενου ρυθμού ή της τονικότητας.

Οι «συγκρούσεις» εδώ μπορεί να περιλαμβάνουν τονισμό που δεν ταιριάζει με τον πρωταρχικό χρονισμό ή υπερβολική σύμπτωση πολλών στοιχείων που μπορεί να μπερδέψει τον ακροατή σχετικά με τη ρυθμική ή μελωδική γραμμή.

**MPR10(Δυαδική Κανονικότητα):** Προτιμώνται οι μετρικές δομές στις οποίες κάθε δεύτερος παλμός είναι ισχυρός, δημιουργώντας μια ιδανική δυαδική δομή, δηλαδή οι μετρικές δομές στις οποίες σε κάθε επίπεδο οι παλμοί είναι εναλλάξ ισχυροί.

**MPR11 Μετρική Διαγραφή):** Η επικάλυψη ή η απάλειψη ομάδων συχνά δημιουργεί το φαινόμενο της μετρικής διαγραφής, κατά την οποία είτε ένας ισχυρός είτε ένας ασθενής παλμός απουσιάζει από την επιφάνεια της μουσικής. (J. Corey Knoll,2006,7-8)

Ως απόπειρα σχολιασμού της συγκεκριμένης αναφοράς των Lerdahl and Jackendoff (1983), αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω κανόνες είναι γενικά υποκειμενικοί και εφαρμόσιμοι σε ένα αρκετά εκτενές, αλλά χρονικά και τοπικά περιορισμένο σώμα έργων κλασσικής τονικής μουσικής. Παρόλα αυτά, οι ιδέες των συγγραφέων αναφορικά με τη μετρική δομή έχουν αρκετές επιπτώσεις στη μουσική γενικότερα.

Μια από τις σπουδαιότερες προσπάθειες προσαρμογής της GTTM στη μελέτη της τροπικής μουσικής εκπονήθηκε από τον Κώστα Τσούγκρα στο πλαίσιο της διδακτορικής του διατριβής, η οποία αναπτύχθηκε στο Τμήμα Μουσικών Σπουδών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (2002). Η διατριβή αυτή, έχει τίτλο Generative Theory of Tonal Music and Modality – Research based on the analysis of “44 Greek miniatures for piano” by Yannis Constantinidis. Το θεμελιώδες ερευνητικό αντικείμενο του κ. Τσούγκρα αφορά την εφαρμογή της GTTM στην τροπική μουσική του 20ού αιώνα, με επίκεντρο το έργο «44 Ελληνικές Μινιατούρες για πιάνο» του Γιάννη Κωνσταντινίδη. Το εν λόγω έργο, το οποίο συνδυάζει την ελληνική δημοτική μουσική με λόγιες τεχνικές σύνθεσης, προσφέρει ένα ιδιαίτερος γόνιμο πεδίο για τη διερεύνηση των ορίων της θεωρίας των Lerdahl και Jackendoff.

Η συμβολή του κ. Τσούγκρα εντοπίζεται κυρίως στην προσαρμογή των κανόνων και των αναλυτικών εργαλείων της GTTM, ώστε να ανταποκρίνονται στις ιδιαιτερότητες της τροπικής μουσικής – η οποία δεν βασίζεται στην λειτουργική αρμονία αλλά στην εναλλαγή, τη σταθερότητα και την ποικιλία των τροπικών δομών. Μέσω της ανάλυσης, προτείνεται μια σειρά από τροποποιήσεις στη θεωρία, που καθιστούν δυνατή την ερμηνεία της μουσικής μορφής, της μετρικής και της φραστικής οργάνωσης σε έργα με τροπικό χαρακτήρα.

Για παράδειγμα, οι εκτελεστές γενικά βασίζονται στις έννοιες της μετρικής δομής, αφενός στη μεταξύ τους συνεννόηση, αλλά και στην ερμηνεία τους προκειμένου να

καθοδηγήσουν το χρονισμό και τη φρασεολογία. Επιπλέον, οι συνθέτες γενικά χρησιμοποιούν μετρικές δομές — ενσυνείδητα, ή και ασυνείδητα — κάνοντας χρήση τονισμών, συγκοπών και ρυθμικών παραλλαγών που ευθυγραμμίζονται με τα επιθυμητά συναισθηματικά και αισθητικά αποτελέσματα. Καθώς οι μετρικές δομές είναι άρρητα συνδεδεμένες με την ανθρώπινη αντίληψη, οι ακροατές συνήθως κατανοούν τον ρυθμό μέσω των εννοιών που εξηγήθηκαν παραπάνω. Η μετρική δομή, όπως παρουσιάζεται από τους Lerdahl and Jackendoff (1983) στα πλαίσια της Γενετικής Μετασχηματικής Θεωρίας της Τονικής Μουσικής είναι, κατά συνέπεια, μια θεμελιώδης έννοια στην κατανόηση της χρονικής οργάνωσης της μουσικής.

## ***2.2 Σύστημα Εσωτερικών Ρολογιών (Povel & Essens 1985)***

Το Σύστημα Εσωτερικών Ρολογιών των Dirk Jan Povel & Peter Essens (1985) προσεγγίζει τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται και οργανώνουν τον χρόνο στο μυαλό τους. Πρόκειται για μια προσπάθεια να κατανοηθούν οι 29 λειτουργίες του ανθρώπινου νου αναφορικά με τη διαχείριση χρονικών πληροφοριών σε βραχυχρόνια και μακροχρόνια επίπεδα. Βασική υπόθεση της θεωρίας είναι ότι οι ακροατές δημιουργούν ένα εσωτερικό ρολόι — η έννοια θα ξηγηθεί παρακάτω — καθώς ακούνε ένα ρυθμικό μοτίβο ή γενικά επιχειρούν να αντιληφθούν ένα συμβάν στον χρόνο. Το ρολόι έχει ευέλικτη φύση και προσαρμόζεται στα χαρακτηριστικά του εκάστοτε συμβάντος. Η κατανομή τονισμένων και μη γεγονότων καθορίζει την δημιουργία του ρολογιού, ενώ παράλληλα, αν ένα ρολόι γίνει αντιληπτό, θα χρησιμοποιηθεί ως μέσο καθορισμού της δομής ενός μοτίβου στο μυαλό του ακροατή. Οι Povel & Essens ερεύνησαν πειραματικά την παραπάνω υπόθεση και κατέληξαν σε συμπεράσματα που γενικά συμφωνούσαν με αυτή.

Από αυτή την προκαταρκτική ανάλυση, λοιπόν, γίνεται αμέσως κατανοητό ότι το Σύστημα Εσωτερικών Ρολογιών των Povel & Essens (1985) επιχειρεί να εντοπίσει τον γνωστικό μηχανισμό που οδηγεί στην κατανόηση του χρόνου. Αν και είναι πιο γενική στους στόχους της, όταν η θεωρία εφαρμόζεται στη μουσική, εμφανίζει αρκετά κοινά με την έννοια της μετρικής δομής της Γενετικής Μετασχηματικής Θεωρίας της Τονικής Μουσικής των Lerdahl and Jackendoff (1983), κυρίως αναφορικά με την ιδέα ότι ρυθμικά συμβάντα ομαδοποιούνται ασυναίσθητα σε διάφορα επίπεδα.

Στις βασικές αρχές του Συστήματος Εσωτερικών Ρολογιών (Povel & Essens, 1985) συμπεριλαμβάνεται η έννοια της χρονικής αντίληψης και του διαχωρισμού των ρολογιών. Οι Povel & Essens υποστηρίζουν ότι οι άνθρωποι έχουν έμφυτη ικανότητα να αντιλαμβάνονται και να επεξεργάζονται τον χρόνο, δίνοντας στα σχετιζόμενα γνωστικά συστήματα το όνομα “εσωτερικά ρολόγια.” Το μοντέλο τους διαχωρίζει τα εσωτερικά ρολόγια σε διαφορετικές κατηγορίες που καλύπτουν διαφορετικές πτυχές της χρονικής αντίληψης, λειτουργώντας κατά συνέπεια με διαφορετικούς τρόπους.

Η θεωρία αυτή εξηγεί πώς οι άνθρωποι προσαρμόζονται σε διαφορετικές χρονικές απαιτήσεις είτε πρόκειται για την αναπαραγωγή σταθερών χρονικών διαστημάτων (απόλυτο ρολόι) είτε για την αντίληψη σχετικών διαφορών (σχετικό ρολόι) είτε για την αντίληψη σύνθετων ρυθμών (ιεραρχικό ρολόι).

Οι ερευνητές διαχωρίζουν λοιπόν τα εσωτερικά ρολόγια σε τρεις κατηγορίες: απόλυτα, σχετικά και ιεραρχικά ρολόγια τα οποία αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς 30 τρόπους αντίληψης και επεξεργασίας του χρόνου. Ας αναλύσουμε περαιτέρω αυτούς τους τύπους:

- Απόλυτο ρολόι :

Το απόλυτο ρολόι αναφέρεται στην ιδέα ότι το ανθρώπινο εσωτερικό σύστημα χρησιμοποιεί μια σταθερή μονάδα χρόνου για τη μέτρηση του χρόνου μεταξύ διαδοχικών ερεθισμάτων. Αυτό το μοντέλο υποθέτει ότι η αντίληψη του χρόνου είναι ακριβής και σταθερή και ότι το σύστημα λειτουργεί όπως ένα μηχανικό ρολόι που «μετράει» με ακρίβεια κάθε χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιείται κυρίως σε καταστάσεις όπου τα χρονικά διαστήματα είναι σταθερά και επαναλαμβανόμενα. Τα απόλυτα ρολόγια είναι κατάλληλα για ακολουθίες πανομοιότυπων χτύπων χωρίς διακυμάνσεις του ρυθμού και είναι ειδικά για να μετρούν απόλυτους χρόνους (π.χ. 200,400,600 m.s.) και να τους αποθηκεύουν στη μνήμη .(Peter Essens,1995)

- Σχετικό ρολόι :

Τα σχετικά ρολόγια βασίζονται σε χρονικές σχέσεις μεταξύ χρονικών διαστημάτων και όχι σε απόλυτες μονάδες. Σε αυτό το μοντέλο, δεν προσπαθεί κανείς να μετρήσει

με ακρίβεια κάθε διάστημα, αλλά εστιάζει στην αναλογία μεταξύ των διαστημάτων. Με άλλα λόγια, η αντίληψη του χρόνου προσαρμόζεται σε χρονοσειρές που μπορεί να διαφέρουν ως προς την ταχύτητα και το διάστημα. Τα σχετικά ρολόγια είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε σύνθετες ρυθμικές ακολουθίες, όπου τα διαστήματα δεν είναι ίσα και οι άνθρωποι εστιάζουν στη σχέση μεταξύ των διαστημάτων, δηλαδή στο πώς σχετίζονται μεταξύ τους (Peter Essens, 1995)

- **Ιεραρχικό ρολόι:**

Το ιεραρχικό ρολόι είναι το πιο σύνθετο μοντέλο και υποθέτει ότι οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται τον χρόνο σε πολλαπλά επίπεδα. Σε αυτό το μοντέλο, ο χρόνος οργανώνεται σε συστήματα που περιέχουν τόσο μικρά όσο και μεγάλα χρονικά διαστήματα, τα οποία είναι αλληλένδετα μεταξύ τους. Για παράδειγμα, τα πιο αργά «ρολόγια» παρακολουθούν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα και τα πιο γρήγορα ρολόγια παρακολουθούν μικρότερα χρονικά διαστήματα. Αυτή η ιεραρχική δομή βοηθά στην αντίληψη σύνθετων χρονικών μοτίβων, όπως αυτά που συναντώνται στη μουσική και σε άλλες ρυθμικές δραστηριότητες. Οι άνθρωποι χρησιμοποιούν ιεραρχικά ρολόγια για να κατασκευάσουν σύνθετες ακολουθίες που βασίζονται τόσο στον συνολικό ρυθμό όσο και σε μεμονωμένα στοιχεία. (Peter Essens, 1995)

Τα γεγονότα, σύμφωνα με το αναλυόμενο σύστημα, συντονίζονται νοητά, επιτρέποντας στον άνθρωπο να συγχρονίζει τις ενέργειες, και να διασφαλίζει ότι οι δραστηριότητες ολοκληρώνονται με τρόπο που είναι συνεπής με την χρονική ακολουθία τους. Με άλλα λόγια, το Σύστημα Εσωτερικών Ρολογιών συμπεριλαμβάνει μηχανισμούς διαχείρισης χρόνου.

Επιπλέον, λειτουργία του συστήματος αποτελεί η δυνατότητα αποθήκευσης χρονικών αναφορών, δηλαδή μνημονικών στοιχείων που συμβάλλουν στην ανάκληση πληροφοριών σχετικά με το πότε συνέβησαν τα γεγονότα. Αυτό είναι, παράδοξο, ιδιαίτερα σημαντικό στην ανάλυση του μουσικού ρυθμού, καθώς η ενθύμηση παλαιότερων συμβάντων, ακόμη κι αν αυτά συνέβησαν αρκετά πρόσφατα, είναι απαραίτητη στη διατήρηση παλμού και γενικού ρυθμικού χρονισμού.

Με αφορμή, λοιπόν, από αυτή την παρατήρηση, μπορούμε να πούμε ότι το Σύστημα Εσωτερικών Ρολογιών των Povel & Essens (1985) έχει σημαντικές εφαρμογές στη

μουσική, καθώς η μουσική είναι μια τέχνη που βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη χρονική οργάνωση και στην αντίληψη του ρυθμού. Το σύστημα προσφέρει έναν μηχανισμό αντίληψης του ρυθμού, που πιθανότατα εξηγεί τη λεπτομερή λειτουργία εννοιών που έχουν ήδη αναφερθεί, ή που πρόκειται να αναλυθούν παρακάτω. Τα εσωτερικά ρολόγια συμβάλλουν στην αντίληψη και διατήρηση ρυθμού κατά την ακρόαση και εκτέλεση.

Η μετρική δομή ενός κομματιού μπορεί κατά συνέπεια να κατανοηθεί και να αναλυθεί μέσω ενός συνδυασμού των τριών ειδών ρολογιών. Τα απόλυτα ρολόγια συμβάλλουν στην αντίληψη της διάρκειας και του χρόνου ανάμεσα στους χτύπους, τα σχετικά ρολόγια συνδυάζουν τους χρονισμούς διαφόρων συμβάντων, ενώ τα ιεραρχικά ρολόγια εξηγούν την αντίληψη της σειριακής φύσης των χτύπων. Όλα μαζί ξεκάθαρα συνθέτουν την αντίληψη του παλμού, και επιτρέπουν, όχι μόνο απλές, αλλά και σύνθετες, πολυρυθμικές, ή διαστρωματωμένες ρυθμικές δομές.

Λειτουργία του μοντέλου:

Τα δεδομένα που εισάγονται στο μοντέλο αναπαριστούν τις αποστάσεις μεταξύ των χτύπων, έχοντας ως μονάδα μια χρονική απόσταση που επιτρέπει τις αποστάσεις αυτές να εκφράζονται ως ακέραιοι αριθμοί. Ας πάρουμε ως παράδειγμα το μοτίβο του σχήματος 2.14.



### **Σχήμα 2.14**

Η μονάδα μας σε αυτό το μοτίβο θα είναι το όγδοο. Αν κωδικοποιήσουμε το συγκεκριμένο ρυθμικό μοτίβο το αποτέλεσμα θα είναι 1 2 2 1 1 2 3. Αφού εισάγουμε την παραπάνω πληροφορία, το μοντέλο την κωδικοποιεί σε μία νέα μορφή με 0 και 1. Με τον αριθμό 1 απεικονίζεται ο χτύπος, ενώ με το 0 η παύση. Έπειτα, το μοντέλο προσθέτει τους τονισμούς στους χτύπους οι οποίοι είναι οι σχετικά απομονωμένοι χτύποι, ο δεύτερος χτύπος μιας ομάδας δύο χτύπων και ο πρώτος και ο τελευταίος μιας

ομάδας τριών ή και περισσότερων χτύπων.

Οι τονισμένοι χτύποι κωδικοποιούνται με τον αριθμό 2, ενώ οι μη τονισμένοι με το 1. (Σιδηράς, 2007) (σχήμα 2.15)

	1	2	2	1	1	2		
input sequence	3							
transform into time scale notation	1	1	0	1	0	1	1	1
add accents	1	2	0	2	0	2	1	2
	unit	loc	+ev	0ev	-ev	div	strength	
generate all clocks	1	1	5	2	5	1	22	
(unit < 1/2 period)	2	1	0	2	4	1	18	
APPLY WEIGHTS and	2	2	5	0	1	1	4	
DETERMINE DIVISOR	3	1	2	2	0	1	2	
	3	2	2	0	2	1	8	
	3	3	1	0	3	1	12	
	4	1	0	1	2	1	9	
	4	2	3	0	0	1	0	
	4	3	0	1	2	1	9	
	4	4	2	0	1	1	4	
	5	1	1	1	1	0	5	
	5	2	1	1	1	0	5	
	5	3	1	1	1	0	5	
	5	4	2	0	1	0	4	
	5	5	1	0	2	0	8	
<u>Select best clock</u>	4	2	3	0	0	1	0	

### Σχήμα 2.15

Το μοντέλο εμφανίζει όλα τα πιθανά ρολόγια με περίοδο διάρκειας μικρότερο του μισού. Στην πρώτη στήλη (unit) απεικονίζεται η περίοδος του κάθε ρολογιού, ενώ στη δεύτερη (location) η πρώτη θέση του χτυπήματος του «ρολογιού». Οι υπόλοιπες στήλες δείχνουν το είδος του τονισμού κάθε ρολογιού. Στη στήλη +ev είναι ο αριθμός του τονισμένου χτύπου, στη στήλη 0ev ο αριθμός σε μη τονισμένο χτύπο και -ev ο αριθμός που αντιστοιχεί στην παύση. Στη στήλη div (divisor) βλέπουμε αν η περίοδος του ρολογιού είναι διαιρέτης της διάρκειας της ακολουθίας (1) ή όχι (0). Τέλος, στην τελευταία στήλη strength είναι η συνολική βαθμολογία του κάθε ρολογιού η οποία προκύπτει από τον τύπο  $C = (W * -ev) + (1 * 0ev)$ . Όπου το W είναι μια σταθερά που έχει να κάνει με τη σχετική αρνητική επίδραση των -ev και 0ev. Στο παραπάνω σχήμα το W

ισούται με 4 και είναι αρνητική, δείχνοντας αν οι χτύποι πέφτουν πάνω σε παύσεις ή σε μη τονισμένους χτύπους. Το ρολόι με τη χαμηλότερη βαθμολογία είναι το καταλληλότερο. (Σιδηράς, 2007)

### **2.3 Μοντέλο Αντίληψης Μουσικού Ρυθμού (Longuet-Higgins & Lee, 1982)**

Το Μοντέλο Αντίληψης Μουσικού Ρυθμού των Longuet-Higgins & Lee (1982) αποτελεί προσπάθεια να κατανοηθεί η διαδικασία με την οποία οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται και επεξεργάζονται τον ρυθμό στη μουσική μέσω υπολογιστικών μεθόδων. Σε αντίθεση με το γενικότερο Σύστημα Εσωτερικών Ρολογιών των Povel & Essens (1985), το οποίο διερευνά τους εσωτερικούς μηχανισμούς στον ανθρώπινο εγκέφαλο που οργανώνουν τον χρόνο συνολικά, έχοντας εφαρμογή στον ρυθμό εξαιτίας της συσχέτισης μεταξύ ρυθμού και οργάνωσης γεγονότων στον χρόνο, το Μοντέλο Αντίληψης Μουσικού Ρυθμού επικεντρώνεται συγκεκριμένα στον ρυθμό. Ειδικότερα, επιχειρεί να κατανοήσει τη διαδικασία με την οποία οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται και επεξεργάζονται τον ρυθμό στη μουσική μέσω υπολογιστικών μεθόδων και αλγορίθμων.

Εδώ υπεισέρχεται και η βασική θεματική της παρούσας ανάλυσης, συγκεκριμένα στο γεγονός ότι το Μοντέλο Αντίληψης Μουσικού Ρυθμού των Longuet-Higgins & Lee (1982) σχετίζεται με γενικά αυστηρά δομημένες διεργασίες και οντότητες. Γενικά, μέχρι τώρα, έγιναν αναλύσεις της έννοιας του ρυθμού υπό την αιγίδα διαφόρων μεθόδων και πλαισίων, αλλά αποφεύχθηκε ένας αυστηρός ορισμός του ρυθμού πέραν της ευρέως κατανοητής ιδέας ότι ο ρυθμός αναφέρεται στη χρονική διάσταση της μουσικής. Γενικά, η μουσική είναι μια τέχνη εφήμερη, με δεδομένη αρχή και τέλος, και κατά συνέπεια απαιτεί μεθόδους οργάνωσης των οντοτήτων της στον χρόνο.

Οι Longuet-Higgins & Lee (1982) εισάγουν, υπό αυτό το πρίσμα, την έννοια της αντίληψης του ρυθμού, που αφορά την ικανότητα του ανθρώπινου εγκεφάλου να οργανώνει και να κατανοεί τη ροή του χρόνου στη μουσική. Αυτή η διαδικασία δεν είναι απλώς μια παθητική καταγραφή των διαδοχικών χρονικών γεγονότων, αλλά μια ενεργητική κατασκευή που βασίζεται σε προηγούμενες εμπειρίες και στην ενσωμάτωση της πληροφορίας σε ένα σταθερό μετρικό πλαίσιο. Ο εγκέφαλος αναλύει

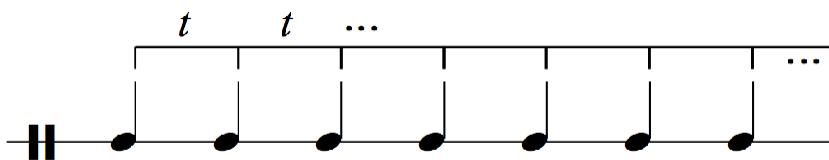
τις αλληλουχίες ηχητικών συμβάντων και προσπαθεί να τα τοποθετήσει σε διάφορα επίπεδα χρονικών ομάδων (παλμός, μέτρα, φράσεις). (H. C. Longuet-Higgins and C. S. Lee, 1984)

Γενικά, αυτή η ιδέα δεν είναι καινούρια ακόμη και στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Παρόλα αυτά, μια σχετιζόμενη γνωστική προσθήκη του συγκεκριμένου μοντέλου των Longuet-Higgins & Lee (1982) αποτελεί η έννοια και ο ρόλος της προσδοκίας. Κατά την αντίληψη του ρυθμού, ο ακροατής δημιουργεί συνεχώς προσδοκίες για το τι θα ακολουθήσει. Αυτές οι προσδοκίες βασίζονται σε γνωστά μοτίβα, τυπικές ρυθμικές δομές, και τις πρώτες ενδείξεις που παρέχει η μουσική. Εάν η μουσική δεν ακολουθήσει αυτές τις προσδοκίες, ο εγκέφαλος επαναπροσδιορίζει την ερμηνεία της ρυθμικής δομής. Εξωτερική γνώση, σε συνδυασμό με ρυθμικές δομές που υπονοούνται ή εισάγονται, εισηγούνται επανάληψη και επαναφορά.

Εννοείται πως έννοιες όπως οι μετρική δομή, η ισχύς ενός χτύπου, και τα διάφορα επίπεδα υποδιαίρεσης, αποτελούν κρίσιμο συστατικό του Μοντέλου Αντίληψης Μουσικού Ρυθμού των Longuet-Higgins & Lee (1982). Οι συγγραφείς ορίζουν την μετρική δομή ως τον τρόπο που ο μουσικός παλμός οργανώνεται σε ισχυρούς και αδύναμους χτύπους, που προσφέρει ένα μετρικό πλαίσιο — έναν σκελετό — στον οποίο τα μουσικά γεγονότα τοποθετούνται. Η ισχύς ενός χτύπου ορίζεται με βάση έννοιες που έχουν ήδη διερευνηθεί, ενώ τα επίπεδα υποδιαίρεσης επίσης χρησιμοποιούνται με τρόπο παρόμοιο με αυτό που παρατηρείται στους Κανόνες Μετρικής Δομής της Γενετικής Μετασχηματιστικής Θεωρίας της Τονικής Μουσικής (Lerdahl and Jackendoff, 1983). Γενικά, γίνεται η υπόθεση ότι ο εγκέφαλος προσπαθεί να αναγνωρίσει αυτές τις υποδιαίρεσεις και να τις οργανώσει σε ένα συνεκτικό μετρικό πλαίσιο.

Όπως προαναφέρθηκε, το Μοντέλο Αντίληψης Μουσικού Ρυθμού των Longuet-Higgins & Lee (1982) εισάγει έναν αλγόριθμο, που φαινομενικά εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τον ρυθμό — και που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από υπολογιστικά συστήματα. Η διαδικασία ξεκινά με την καταγραφή των χρονικών στιγμών που εμφανίζονται τα μουσικά γεγονότα. Αυτές οι χρονικές στιγμές αποτελούν τη βάση για την ανάλυση της ρυθμικής δομής. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα διαστήματα μεταξύ των διαδοχικών μουσικών γεγονότων, τα οποία είναι κρίσιμα για τον προσδιορισμό της ρυθμικής ροής.

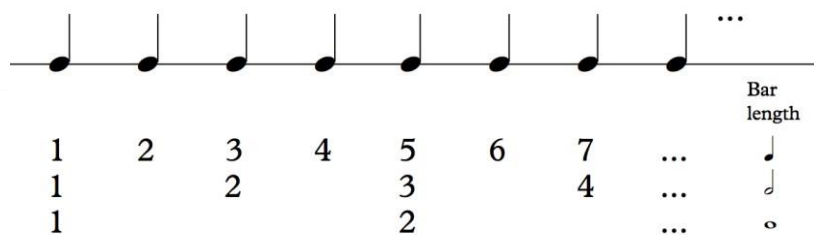
Έπειτα, ανακαλώνται υποψήφιες μετρικές δομές, πιθανά δηλαδή μοτίβα ισχυρών και αδύναμων χτύπων. Οι υποψήφιες δομές αξιολογούνται με βάση την πιθανότητά τους να εξηγήσουν τις παρατηρούμενες χρονικές σχέσεις, λαμβάνοντας υπόψη τα σταθερότητα και τη συνεκτικότητα του ρυθμού σε σχέση με τα μουσικά γεγονότα. Αν εντοπιστούν πολλαπλές δυνατές μετρικές δομές, επιλέγεται γενικά εκείνη που εξηγεί τα μουσικά γεγονότα με λιγότερη ασάφεια. Επιπλέον, δίδεται δυνατότητα προσαρμογής σε αλλαγές του ρυθμικού ή μετρικού πλαισίου κατά τη διάρκεια της μουσικής. Αν οι χρονικές σχέσεις αλλάξουν σημαντικά, η αρχική υπόθεση επανεξετάζεται και προσαρμόζεται στις νέες συνθήκες. Για παράδειγμα, αν δύο ηχητικά συμβάντα αντηχήσουν με χρονική απόσταση  $t$ , ο ακροατής θα περιμένει να παρατηρήσει το επόμενο συμβάν έπειτα από  $t$  χρονικές μονάδες. (σχήμα 2.16)



**Σχήμα 2.16**

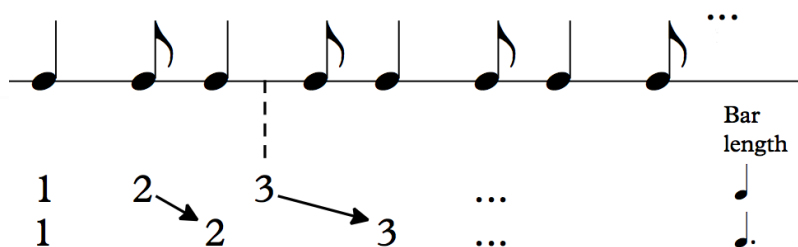
Οι εντολές **conflate**, **stretch**, **update** και **long note** εκτελούν λειτουργίες σχετικά με τη διαμόρφωση της υπόθεσης της μετρικής δομής ενός περάσματος.

Η εντολή **conflate** (συγχώνευση) χρησιμοποιείται για να συνδυάσει ή να συγχωνεύσει δύο διαφορετικές υποθέσεις ρυθμού όταν φαίνεται ότι αυτές οδηγούν στο ίδιο ή σε παρόμοιο αποτέλεσμα. Για παράδειγμα, έστω πως παρατηρείται, σε μια υπόθεση που το μέτρο διαρκεί ένα χτύπο, ότι οι συνεχόμενοι χτύποι ακολουθούν ένα μοτίβο ισχυρού-ασθενή. Έτσι, μια νέα υπόθεση μπορεί να συμπεριλάβει αυτή την πληροφορία, αποφασίζοντας ότι το μέτρο αποτελείται από δύο χτύπους. Με άλλα λόγια, δύο παλμοί συνενώνονται σε ένα παλμό στο αμέσως υψηλότερο μετρικό επίπεδο. (σχήμα 2.17)



**Σχήμα 2.17**

Η εντολή **stretch** (επιμήκυνση) αφορά την προσαρμογή του μοντέλου όταν τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των γεγονότων δεν ταιριάζουν απόλυτα με την υπόθεση. Το stretch επιτρέπει στο μοντέλο να “τεντώσει” το υποτιθέμενο μετρικό μοτίβο ώστε να προσαρμοστεί καλύτερα στον εκάστοτε ρυθμό. Δηλαδή, ο δεύτερος παλμός μετακινείται προς τον πλησιέστερο φθόγγο (επιμηκύνεται το διάστημα μεταξύ των παλμών) όταν αυτός ο φθόγγος έχει μεγαλύτερη διάρκεια (και εμφανίζεται πριν από τον επόμενο προσδοκώμενο παλμό). (σχήμα 2.18)

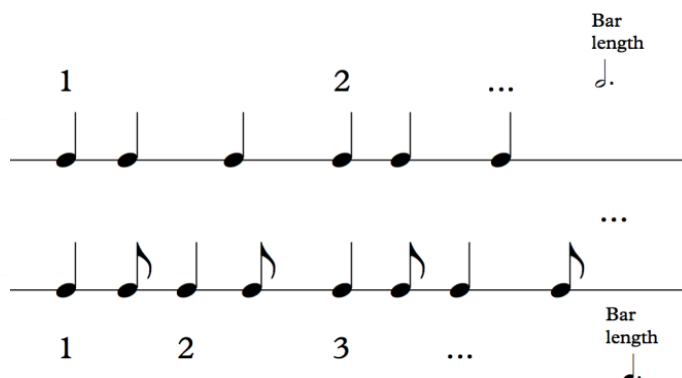


**Σχήμα 2.18**

Η εντολή **update** (μετατόπιση) αποτελεί μια γενική διαδικασία που επιτρέπει στο μοντέλο να αναθεωρεί και να προσαρμόζει τις υπάρχουσες υποθέσεις του καθώς λαμβάνει νέες πληροφορίες. Συγκεκριμένα, όταν το μοντέλο λαμβάνει νέες χρονικές ακολουθίες ή γεγονότα, η γενική εντολή update εφαρμόζεται για να ενσωματώσει αυτά τα νέα δεδομένα στις υπάρχουσες υποθέσεις. Ουσιαστικά, ο πρώτος παλμός μετατοπίζεται στην επόμενη νότα όταν αυτή είναι μεγαλύτερης διάρκειας.

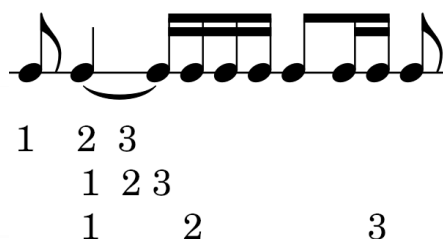
Σε περιπτώσεις που εντοπιστεί πολυρυθμία ,όπου ταυτόχρονα εμφανίζονται

πολλαπλά ρυθμικά μοτίβα, εξετάζεται η πιθανότητα ύπαρξης περισσότερων του ενός μετρικών πλαισίων. (σχήμα 2.19)



**Σχήμα 2.19**

Τέλος, στην εντολή **long note** (μακρά διάρκεια), το προηγούμενο μήκος παλμού εγκαταλείπεται, αν ο φθόγγος στον οποίο μετατίθεται ο πρώτος παλμός είναι μεγαλύτερος σε διάρκεια από την απόσταση δύο προσδοκώμενων παλμών. (σχήμα 2.20)



**Σχήμα 2.20**

Όπως ήδη αναπτύχθηκε, καθώς η μουσική εξελίσσεται, ο αλγόριθμος επικυρώνει συνεχώς την υπόθεσή του για το μετρικό πλαίσιο, προσαρμοζόμενος στα νέα δεδομένα. Έτσι, αν προκύψουν νέα μουσικά γεγονότα που δεν ταιριάζουν με την αρχική υπόθεση, ο αλγόριθμος αναθεωρεί το μετρικό πλαίσιο ώστε να ταιριάζει καλύτερα με τη ροή της μουσικής. Αυτή η δυναμική προσαρμογή επιτρέπει να διατηρείται ακρίβεια στην αντίληψη του ρυθμού.

Γενικά ο συγκεκριμένος αλγόριθμος — πιο συγκεκριμένα, η βάση ενός αλγορίθμου

— μπορεί να υλοποιηθεί σε υπολογιστές και κατά συνέπεια να επιτρέψει την αναγνώριση ενός ρυθμικού μοτίβου, καθώς παρέχει ένα καλά ορισμένο πλαίσιο για την κατανόηση του ρυθμού.

Το Μοντέλο Αντίληψης Μουσικού Ρυθμού των Longuet-Higgins & Lee (1982) είναι ίσως το πρώτο υπολογιστικό μοντέλο που δίνει μια ξεκάθαρη βάση αναφορικά με το πώς οι ακροατές αντιλαμβάνονται και οργανώνουν τον ρυθμό στη μουσική, επιτρέποντας επιπλέον στους ερευνητές να προσομοιώσουν την ανθρώπινη μουσική αντίληψη με υπολογιστικά εργαλεία.

## ***2.4 Διαφορές και ομοιότητες των παραπάνω μοντέλων***

Η μουσική ψυχολογία είναι η μελέτη του τρόπου με τον οποίο οι άνθρωποι αντιλαμβάνονται, δημιουργούν και αλληλεπιδρούν με τη μουσική. Όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, δύο σημαντικά μοντέλα που συμβάλλουν σε αυτή τη συζήτηση είναι η Γενετική Θεωρία της Τονικής Μουσικής (Generative Theory of Tonal Music - GTTM) των Fred Lerdahl και Ray Jackendoff και η θεωρία του Εσωτερικού Ρολογιού των David Povel και Paul Essens. Τα μοντέλα αυτά προσφέρουν διαφορετικές προσεγγίσεις για την κατανόηση της μουσικής και εστιάζουν σε διαφορετικές πτυχές της μουσικής αντίληψης και δομής.

Συνοπτικά, η GTTM προτείνει μια αναλυτική προσέγγιση της μουσικής δομής και των σχέσεων μεταξύ των μουσικών στοιχείων. Οι Lerdahl και Jackendoff αναγνωρίζουν ότι η αντίληψη της μουσικής βασίζεται σε γενετικούς κανόνες που διέπουν τη σύνθεση και την κατανόηση. Το μοντέλο τους περιλαμβάνει δύο κύριες πτυχές: την τυπολογία των μουσικών στοιχείων (μελωδία, αρμονία και ρυθμός) και τη διαδικασία αντίληψης της μουσικής (συμπεριλαμβανομένων των κανόνων και των στρατηγικών που χρησιμοποιεί ο ακροατής για να κατανοήσει τη μουσική). (Lerdahl and Jackendoff, 1983)

Οι Lerdahl και Jackendoff υποστηρίζουν ότι η μουσική δεν είναι απλώς μια σειρά ήχων, αλλά μια δομικά οργανωμένη εμπειρία που επηρεάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ του ακροατή και της τέχνης.

Αντίθετα, η θεωρία του εσωτερικού ρολογιού των Povel και Essens επικεντρώνεται

στις ψυχολογικές διαδικασίες αντίληψης του χρόνου στη μουσική. Η μελέτη τους, εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο οι ακροατές αντιλαμβάνονται και οργανώνουν τα ρυθμικά μοτίβα. Σύμφωνα με τους Povel και Essens, οι άνθρωποι έχουν έναν εσωτερικό ρυθμό για να κατανοούν, να επεξεργάζονται και να προβλέπουν τα μουσικά στοιχεία. (Povel & Essens, 1985)

Το μοντέλο τους τονίζει τη σημασία των επαναλαμβανόμενων ρυθμικών στοιχείων που συμβάλλουν στη διαμόρφωση της αντίληψης του χρόνου- οι Povel και Essens δείχνουν ότι οι ακροατές χρησιμοποιούν τα εσωτερικά τους ρολόγια για να δημιουργήσουν χρονικά μοτίβα που είναι θεμελιώδη για την κατανόηση της μουσικής. (Povel & Essens, 1985)

Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων είναι ότι εστιάζουν σε διαφορετικές πτυχές της μουσικής: η GTTM αναλύει τη δομή της μουσικής και τις σχέσεις μεταξύ των στοιχείων της, ενώ η θεωρία του εσωτερικού ρολογιού εστιάζει στην αντίληψη του χρόνου και στην ικανότητα του ακροατή να αναγνωρίζει και να επεξεργάζεται ρυθμικά μοτίβα.

Συνολικά, ο συνδυασμός αυτών των δύο μοντέλων παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της μουσικής αντίληψης: ενώ η GTTM παρέχει ένα θεωρητικό πλαίσιο για τη μουσική δομή, η θεωρία των Povel και Essens εστιάζει στις ψυχολογικές πτυχές της αντίληψης του χρόνου και δίνει έμφαση στην αλληλεπίδραση μεταξύ δομής και αντίληψης στη μουσική εμπειρία.

Τέλος, το μοντέλο των Longuet-Higgins & Lee (1982), επικεντρώνεται στην κατανόηση των στοιχείων της μουσικής και στον εντοπισμό των μεταξύ τους σχέσεων, με έμφαση στην αναγνώριση ρυθμικών και μελωδικών μοτίβων μέσω διαδικασιών αναγνώρισης μέσω του υπολογιστή.

Επίσης, το μοντέλο αυτό, εξετάζει την αντίληψη της μουσικής ως διαδικασία που βασίζεται σε αλγοριθμικά και υπολογιστικά μοντέλα και αναλύει τον τρόπο με τον οποίο οι ακροατές αναγνωρίζουν ρυθμικές δομές με βάση τη σειρά και τη σύνθεση των ήχων. Στόχος είναι η ανάπτυξη μοντέλων που μπορούν να προσομοιώσουν τη μουσική ανθρώπινη αντίληψη με υπολογιστικές μεθόδους, κάτι το οποίο δεν το υλοποιούν τα δύο άλλα μοντέλα.

### 3. Ρυθμική και υπολογιστική ανάλυση (θεωρία)

#### *ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στο πεδίο της σύγχρονης μουσικολογίας και μουσικής τεχνολογίας, όπου έχουν αναπτυχθεί υπολογιστικές διαδικασίες όπως το **onset detection**, **tempo induction**, το **beat tracking** και το **metre induction**, που προσπαθούν να προσομοιάσουν τον τρόπο με τον οποίο ο ανθρώπινος νους αντιλαμβάνεται και οργανώνει το ρυθμικό περιεχόμενο. Τέλος, θα εξηγηθούν θεωρητικά, το λογισμικό του Sonic Visuliser και τα Vamp plugins τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

#### *3.1 Υπολογιστική ανάλυση στο πεδίο του ρυθμού*

Όπως έχει προαναφερθεί η ανάλυση του ρυθμού αποτελεί βασικό πεδίο μελέτης στην υπολογιστική μουσικολογία και την επεξεργασία μουσικών σημάτων. Ο ρυθμός, ως θεμέλιο της μουσικής δομής, επιτρέπει στον ακροατή να κατανοεί και να "αισθάνεται" τη χρονική ροή ενός κομματιού. Οι υπολογιστικές μέθοδοι επιδιώκουν να εξάγουν αυτόματα τα βασικά χαρακτηριστικά του ρυθμού, όπως το **τέμπο** (ταχύτητα), το **beat** (παλμός) και το **metre** (μέτρο), προκειμένου να ενισχύσουν εφαρμογές όπως η αυτόματη μεταγραφή, η μουσική αναγνώριση, η δημιουργία ρυθμικών συνοδευτικών και η διαδραστική μουσική εκπαίδευση. Οι έννοιες του tempo induction, του beat tracking και του metre induction βρίσκονται στον πυρήνα αυτών των αναλύσεων και επιτρέπουν στα συστήματα να "κατανοήσουν" τον ρυθμό, όπως τον αντιλαμβάνεται ένας μουσικός ή ακροατής.

##### *3.1.1 Onset detection*

Η μουσική αποτελεί ένα φαινόμενο βασισμένο σε γεγονότα, τόσο για τον εκτελεστή όσο και για τον ακροατή. Η αίσθηση του ρυθμού και της μουσικής ροής συνδέεται άμεσα με την ικανότητα αναγνώρισης των σημείων όπου ξεκινά μια νότα ή ένας ήχος

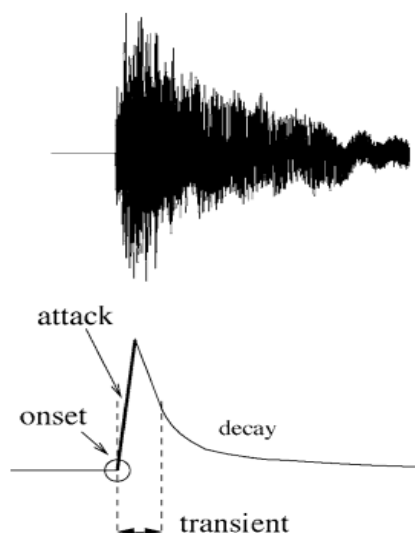
— τα λεγόμενα σημεία έναρξης (onsets).

Ο εντοπισμός σημείων έναρξης(εντοπισμός ατάκας) είναι η διαδικασία αυτόματης αναγνώρισης αυτών των σημείων έναρξης μέσα σε ένα ηχητικό σήμα. Η σημασία του έγκειται σε πολλές εφαρμογές, όπως η ψηφιακή επεξεργασία ήχου, η ευρετηρίαση και ανάκτηση μουσικού περιεχομένου, καθώς και η βελτίωση των αλγορίθμων συμπίεσης. Η σωστή ανίχνευση ατάκας επιτρέπει τη διάσπαση του σήματος σε ομοιογενή τμήματα, τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν πιο αποτελεσματικά.

Η διαδικασία ανίχνευσης βασίζεται στη μέτρηση της χρονικά μεταβαλλόμενης "έντασης" ή "δραστηριότητας" του σήματος μέσω μιας λειτουργίας ανίχνευσης (detection function), η οποία απλοποιεί την πολύπλοκη δομή του αρχικού σήματος. Η λειτουργία αυτή στη συνέχεια αναλύεται για την ανεύρεση κορυφών (peak-picking), που υποδεικνύουν πιθανά σημεία έναρξης.

Επιπλέον, η ανίχνευση ατάκας δεν είναι απλώς εντοπισμός ενός σημείου, αλλά και η κατανόηση των σχετικών εννοιών:

- Attack (ατάκα): Η χρονική περίοδος κατά την οποία αυξάνεται η ένταση μιας νότας.
- Transient (Μετάβαση): Ένα σύντομο χρονικό διάστημα κατά το οποίο το σήμα αλλάζει απότομα και γρήγορα, με μη προβλέψιμο τρόπο, όπως η στιγμή που ένα όργανο χτυπιέται.
- Onset (Έναρξη): Το ακριβές χρονικό σημείο που αντιπροσωπεύει την αρχή αυτής της μετάβασης.



**Σχήμα 3.1**

Η ανίχνευση της ατάκας γίνεται πολύ πιο πολύπλοκη όταν έχουμε πολυφωνικά σήματα, θόρυβο και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την καθαρότητα του σήματος. Για αυτό, οι μέθοδοι συνήθως περιλαμβάνουν προ-επεξεργασία (π.χ. φιλτράρισμα σε πολλαπλές ζώνες συχνοτήτων) και έπειτα την εξαγωγή της detection function.

Η ακριβής ανίχνευση onsets επιτρέπει και άλλες σημαντικές μουσικές αναλύσεις και επεξεργασίες, όπως η αλλαγή ρυθμού, η προσαρμογή τονικότητας και η επεξεργασία ηχητικών εφέ. (Bello, J. P., Daudet, L., Abdallah, S., Duxbury, C., Davies, M., & Sandler, M. B. 2005).

### ***3.1.2 Tempo induction***

Η εξαγωγή του τέμπο (tempo induction) είναι μια από τις πιο θεμελιώδεις διαδικασίες στη μουσική πληροφορική, η οποία αναγνωρίζει αυτόματα το τέμπο ενός μουσικού κομματιού, χωρίς τη χρήση προηγούμενης γνώσης. Το τέμπο, εκφρασμένος σε χτύπους ανά λεπτό (BPM), αποτελεί σημαντικό μέρος της μουσικής εμπειρίας και καθορίζει την αίσθηση του ρυθμού. Ο σωστός καθορισμός του τέμπο είναι απαραίτητη για εφαρμογές όπως η αυτόματη ταξινόμηση, η δημιουργία λίστας αναπαραγωγής, η ανάλυση και η επεξεργασία μουσικής. (Dixon S., 2001)

Η ανίχνευση του παλμού συνδέεται στενά με την έννοια του tactus, που όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, ορίζεται ως το μετρικό επίπεδο στο οποίο οι περισσότεροι ακροατές χτυπούν παλαμάκια ή τα πόδια τους, όταν ακούνε ένα μουσικό απόσπασμα κρατώντας το χτύπο σταθερά. Επίσης, διακρίνεται από το μέτρο, το οποίο αναφέρεται στους παλμούς που οργανώνονται σε μία κανονική μετρική ιεραρχία, όπως 4/4 ή 3/4. Ο σκοπός του tempo induction είναι να προσδιοριστεί το τέμπο που οι άνθρωποι αισθάνονται ενστικτωδώς, δηλαδή ο κύριος παμλός του κομματιού. (Scheirer E., 1998)

Η διαδικασία της εξαγωγής του τέμπο βασίζεται στην ανάλυση του ακουστικού σήματος με τη χρήση τεχνικών όπως η ανίχνευση της ατάκας (onset detection). Οι στιγμές αυτές ανιχνεύονται είτε από μια ξαφνική αύξηση της ενέργειας του σήματος είτε από μια αλλαγή στο φάσμα που υποδηλώνει την έναρξη ενός νέου ηχητικού γεγονότος με τη χρήση φίλτρων. Μία από τις βασικές τεχνικές ανάλυσης είναι η

αυτοσυσχέτιση (autocorrelation), η μέθοδος αυτή εξετάζει το σήμα για επαναλαμβανόμενα μοτίβα. Το autocorrelation υπολογίζεται για διάφορες χρονικές αποστάσεις και τα τοπικά μέγιστα αντιστοιχούν σε πιθανά τέμπο. Αυτή η προσέγγιση είναι χρήσιμη για την ανίχνευση σταθερών επαναλήψεων στο χρόνο. Εναλλακτικά, ο ρυθμός μπορεί να ανιχνευθεί σε διάφορες φασματικές υποζώνες με τη χρήση ενός φίλτρου Comb που ενισχύει συγκεκριμένες συχνότητες που αντιστοιχούν σε ρυθμικά μοτίβα. (Scheirer, E.1998).

Έχουν προταθεί διάφοροι αλγόριθμοι για την εξαγωγή του τέμπο. Ο Dixon (2001) ανέπτυξε έναν αλγόριθμο που ανιχνεύει τις στιγμές έναρξης με ανάλυση ενέργειας και εξάγει το τέμπο μέσα από την ομαδοποίηση χρονικών αποστάσεων και την ανάλυσή τους. Ο Klaruri (2006) ακολούθησε μια πιο σύνθετη προσέγγιση, συνδυάζοντας πληροφορίες από διαφορετικές υποζώνες συχνοτήτων και εφαρμόζοντας ένα φίλτρο Comb για την ταυτόχρονη ανίχνευση πολλαπλών επιπέδων ρυθμού, όπως το tatum και το tactus. Τέλος, ο Scheirer (1998) χρησιμοποίησε ένα φίλτρο bank για την ανίχνευση περιοδικών σημάτων και εντόπισε τους ρυθμούς με φασματική ανάλυση και ενίσχυση συγκεκριμένων συχνοτήτων. Αυτές οι προσεγγίσεις καταδεικνύουν τη σημασία της φασματικής ανάλυσης και της ανίχνευσης περιοδικότητας στην εξαγωγή του τέμπο.

Ωστόσο, υπάρχουν αρκετές προκλήσεις με αυτή τη διαδικασία. Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα είναι η ταυτόχρονη παρουσία πολύρυθμων, δηλαδή πολλαπλών ρυθμικών μοτίβων, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον εντοπισμό του κυρίαρχου παλμού. Επιπλέον, πολλά μουσικά κομμάτια παρουσιάζουν ρυθμικές μεταβολές, όπως σε ένα μουσικό έργο με αυθόρμητο εκτελεστή ή σε ζωντανή μουσική, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον εντοπισμό σταθερών παλμών. Ιδιαίτερα δύσκολη είναι η ανίχνευση του τέμπο σε κομμάτια με ασύμμετρους ρυθμούς, όπως 5/8, 7/8 και 9/8, οι οποίοι συναντώνται συχνά σε βαλκανικές μουσικές και της ανατολικής μεσογείου.

Η εξαγωγή του τέμπο έχει πολλές εφαρμογές, από την αυτόματη ταξινόμηση μουσικής μέχρι τη δημιουργία remix και τις ζωντανές παραστάσεις όπου απαιτείται συγχρονισμός. Παρά τις προκλήσεις, η πρόοδος των αλγορίθμων και η χρήση σύγχρονων τεχνικών επιτρέπουν την αξιόπιστη ανίχνευση τέμπο σε διάφορα είδη μουσικής, βελτιώνοντας την εμπειρία του ακροατή και διευκολύνοντας τη μουσική ανάλυση.

### **3.1.3 Beat tracking**

Μια άλλη προσέγγιση του προβλήματος της μεταβλητότητας του χρόνου είναι μια μορφή συγχρονισμού που ονομάζεται ανίχνευση του παλμού (beat tracking). Η ανίχνευση παλμού (beat tracking) από ένα μουσικό σήμα αναφέρεται στη διαδικασία εξαγωγής χρονικών στιγμών που πιθανώς αντιστοιχούν σε παλμούς τους οποίους θα αντιλαμβανόταν ο ακροατής ως σημεία συγχρονισμού, όπως όταν χτυπάει ρυθμικά το πόδι του. (Dixon, 2001) Η διαδικασία αυτή βασίζεται σε δύο βασικές προϋποθέσεις: πρώτον, οι παλμοί πρέπει να ευθυγραμμίζονται με χρονικά σημεία του σήματος που παρουσιάζουν απότομες ακουστικές αλλαγές — όπως η έναρξη μιας νέας νότας· δεύτερον, τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των παλμών πρέπει να παρουσιάζουν τοπική σταθερότητα.. Τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα δείχνουν ότι το έργο αυτό είναι πολύ πιο δύσκολο από ότι φαίνεται (Allen & Dannenberg, 1990).

Ο ρυθμός είναι θεμελιώδες στοιχείο της μουσικής, και αφορά την οργάνωση των χρονικών γεγονότων. Ο παλμός (beat) είναι μια επαναλαμβανόμενη μονάδα μέτρησης χρόνου, συχνά ταυτισμένη με την πιο σταθερή και προβλέψιμη πτυχή της μουσικής. Η ανθρώπινη αντίληψη του παλμού δεν εξαρτάται μόνο από ακουστικά χαρακτηριστικά (π.χ. κρουστά), αλλά και από γνωστικές διεργασίες πρόβλεψης και συγχρονισμού (London, 2004).

### **3.1.4 Metre induction**

Το metre induction (εξαγωγή μέτρου) αναφέρεται στη διαδικασία εντοπισμού και ερμηνείας της μετρικής δομής ενός μουσικού κομματιού. Η δομή αυτή περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο οι μουσικές χρονικές μονάδες οργανώνονται σε επίπεδα ισχυρών και ασθενών παλμών, σχηματίζοντας ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο γνωστό ως μέτρο (Dixon, 2001).

Το metre induction σχετίζεται στενά με το beat tracking ,αλλά εστιάζει περισσότερο στον εντοπισμό των ιεραρχικών επιπέδων του τέμπο και λιγότερο στον εντοπισμό του ίδιου του ρυθμού. Ενώ, η ανίχνευση του τέμπο προσδιορίζει τη χρονική θέση

των ρυθμικών παλμών, η εξαγωγή του μέτρου εξετάζει την περιοδικότητα και τις οργανωτικές αρχές αυτών των παλμών (Temperley, 2004).

Η διαδικασία εξαγωγής μέτρου περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1) Προσδιορισμός ρυθμικών γεγονότων (onsets): Το πρώτο στάδιο είναι ο προσδιορισμός της στιγμής κατά την οποία εμφανίζεται μια νέα ηχητική ενέργεια (π.χ. η αρχή ενός ρυθμού τυμπάνων ή μιας νότας). Αυτά τα γεγονότα αποτελούν τη βάση της ανάλυσης των μέτρων.

2) Εκτίμηση tempo: Ο ρυθμός επανάληψης (tempo) του παλμού υπολογίζεται με βάση το χρονικό διάστημα μεταξύ των onsets (Scheirer, 1998).

3) Καθορισμός της μετρικής ιεραρχίας: Δημιουργείται μια δομή που οργανώνει τους παλμούς σε επίπεδα ισχυρών και ασθενών νοτών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός υπολογιστικού μοντέλου που λαμβάνει υπόψη την περιοδικότητα και την ευθυγράμμιση των παλμών.

4) Αναγνώριση μετρικών μοτίβων: Τα μοτίβα αυτά (όπως 2/4 ή 6/8) επιλέγονται με βάση τη συνοχή τους με τα δεδομένα, καθώς και τις ακολουθίες εντάσεων και χρονικών διαστημάτων.

Τέλος, το metre induction έχει μελετηθεί μέσα από διάφορες μεθοδολογίες, όπως:

1) Κανόνες και συμβολικά μοντέλα: Πρώιμες προσεγγίσεις που βασίζονται σε κανόνες (π.χ., Longuet-Higgins & Lee, 1982).

2) Δυναμικός προγραμματισμός: Τεχνικές που βελτιστοποιούν το μέτρο με τη χρήση δυναμικής προσαρμογής σε δεδομένα (Dixon, 2001; Ellis, 2007).

3) Νευρωνικά δίκτυα: Προσεγγίσεις που εκπαιδεύονται σε μεγάλα δεδομένα μουσικής για να αναγνωρίσουν μοτίβα (Temperley, 2004)

### **3.1.5 Rhythm Recognition**

Το Rhythm Recognition, δηλαδή η αναγνώριση του ρυθμού αναφέρεται στη διαδικασία κατανόησης, ανάλυσης και ανίχνευσης της ρυθμικής δομής ενός μουσικού

κομματιού ή ενός ηχητικού σήματος. Ο ρυθμός είναι η βασική χρονική δομή του ήχου και η αναγνώρισή του έχει εφαρμοστεί ευρέως σε τομείς όπως η αυτόματη μεταγραφή της μουσικής (Dixon, 2001), η αναγνώριση μουσικών ειδών (Gouyon et al., 2004) και η επεξεργασία ήχου (Scheirer, 1998).

Το Rhythm Recognition βασίζεται σε μια σειρά σταδίων:

1) Ανίχνευση ατάκας (Onset Detection): Σε αυτό το στάδιο, ανιχνεύονται τα χρονικά σημεία όπου ξεκινούν νέα ηχητικά γεγονότα, όπως νότες ή κρούσεις οργάνων. Για την ανίχνευση γεγονότων, χρησιμοποιούνται τεχνικές επεξεργασίας σήματος, όπως η στιγμιαία ενέργεια και η φασματική απόκλιση (Bello et al., 2005).

2) Εκτίμηση τέμπο (Tempo Estimation): Το τέμπο, δηλαδή η ταχύτητα του ρυθμού, εκτιμάται υπολογίζοντας τον ρυθμό επανάληψης των βασικών παλμών (beats). Συνήθεις μέθοδοι περιλαμβάνουν τον μετασχηματισμό Fourier και την αυτοσυσχέτιση (Grosche et al., 2010). (βλ. κεφάλαιο 3.1.1)

3) Ανίχνευση παλμού: (Beat Tracking): Το beat tracking αφορά τον εντοπισμό των χρονικών στιγμών όπου εμφανίζονται παλμοί σε ένα μουσικό κομμάτι. (βλ. κεφάλαιο 3.1.2)

4) Αναγνώριση ρυθμικών μοτίβων (Pattern Recognition): Μετά τον εντοπισμό των παλμών, αναγνωρίζονται ρυθμικά μοτίβα και εξετάζεται η δομή τους. Η ανάλυση αυτή μπορεί να αποκαλύψει αν ένα κομμάτι έχει χαρακτηριστικά π.χ. κλασικού ή χορευτικού ρυθμού (Gouyon et al., 2005).

## 3.2. Προγράμματα και βιβλιοθήκες λογισμικού για ανίχνευση ρυθμού

### 3.2.1 *Sonic Visualiser*

Το Sonic Visualiser ([Sonic Visualiser](#)) είναι μια δωρεάν, ανοιχτού κώδικα εφαρμογή για Windows, Linux και Mac, σχεδιασμένη για την οπτικοποίηση ηχητικών παραμέτρων και τη μελέτη μιας μουσικής ηχογράφησης. Έχει σχεδιαστεί για μουσικολόγους, αρχειοθέτες, ερευνητές επεξεργασίας σήματος και οποιονδήποτε άλλον τομέα που θέλει να εξετάσει τι βρίσκεται μέσα σε ένα ηχητικό αρχείο. Δημιουργήθηκε και αναπτύχθηκε στο Center of Digital Music, Queen Mary University of London.

Με το Sonic Visualiser, ο χρήστης μπορεί να φορτώσει αρχεία ήχου (όπως .wav ή .mp3) και να τα αναλύσει μέσα από μια ποικιλία οπτικών αναπαραστάσεων, όπως κυματομορφές, φασματικά διαγράμματα (spectrograms), και χρονοδιαγράμματα. Το πρόγραμμα επιτρέπει την προσθήκη σχολίων και ετικετών σε συγκεκριμένα σημεία του ήχου, βοηθώντας στην καταγραφή, μελέτη ή συγκριτική ανάλυση μουσικών στοιχείων. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του Sonic Visualiser είναι η δυνατότητα επέκτασης μέσω Vamp Plugins — εξειδικευμένες προσθήκες που εκτελούν αυτόματες αναλύσεις πάνω στο ηχητικό υλικό. Μέσω αυτών, το πρόγραμμα αποκτά λειτουργίες όπως ανίχνευση του παλμού (beat tracking), εξαγωγή τέμπο (tempo induction), εξαγωγή ατάκας (onset detection), ανάλυση αρμονίας, ακόμη και αναγνώριση μελωδίας ή συγχορδιών.

Το λογισμικό βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως την ανάλυση ρυθμικών και μελωδικών δομών σε μουσικά έργα, την εκπαιδευτική χρήση για την κατανόηση της σχέσης ήχου και θεωρίας, στην αυτόματη μεταγραφή μουσικών κομματιών με τη βοήθεια κατάλληλων plugins και τέλος στα ερευνητικά projects που αφορούν μουσική αναγνώριση, tempo tracking, pitch analysis κ.ά. Για παράδειγμα, ένας χρήστης μπορεί να φορτώσει ένα αρχείο ήχου, να εφαρμόσει ένα plugin για beat tracking, και να παρατηρήσει πού εντοπίζονται οι παλμοί του ρυθμού πάνω στο φασματικό διάγραμμα. Αυτή η πληροφορία μπορεί στη συνέχεια να εξαχθεί και να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω ανάλυση ή σύνθεση.

Το Sonic Visualiser αποτελεί ένα από τα πιο προσβάσιμα και ευέλικτα εργαλεία για τη διερεύνηση της μουσικής δομής μέσα από την οπτικοποίηση του ήχου, γεφυρώνοντας τη θεωρία της μουσικής με την ψηφιακή ανάλυση. Για όλους τους

παραπάνω λόγους το Sonic Visualiser επιλέχθηκε ως το καταλληλότερο για αυτή τη διπλωματική εργασία. Στο επόμενο υποκεφάλαιο θα αναλύσουμε τα Vamp Plugins που θα χρησιμοποιηθούν στο πρακτικό κομμάτι της εργασίας αυτής.

### **3.2.2 Bar and Beat Tracker Bars**

Το Bar and Beat Tracker (Bars) αποτελεί ένα από τα βασικά Vamp plugins που χρησιμοποιούνται στο περιβάλλον του Sonic Visualiser για την ανάλυση της ρυθμικής δομής ενός μουσικού κομματιού. Ειδικότερα, η λειτουργία του επικεντρώνεται στην ανίχνευση των σημείων έναρξης των μέτρων (bars) και όχι των επιμέρους παλμών (beats). Το plugin εντοπίζει τα τονισμένα σημεία του ρυθμού και υπολογίζει πότε αρχίζει ένα νέο μέτρο, βασιζόμενο στην περιοδικότητα και την ένταση των ηχητικών συμβάντων (onsets), καθώς και στο γενικότερο ρυθμικό μοντέλο του κομματιού. Η πληροφορία που εξάγεται από το Bar and Beat Tracker Bars είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τη μορφολογική ανάλυση της μουσικής, τη δημιουργία σημειώσεων (annotations), αλλά και τη χρονολογημένη αποτύπωση της ρυθμικής δομής ενός κομματιού. Σε ένα ρυθμικό πλαίσιο όπως το 4/4, για παράδειγμα, το plugin θα σημειώσει κάθε τέσσερις παλμούς, υποδεικνύοντας την έναρξη ενός νέου μέτρου.

Το εργαλείο Bar and Beat Tracker αναλύει ένα μοναδικό κανάλι ήχου και εκτιμά τις θέσεις των μετρικών γραμμών και τις αντίστοιχες χρονικές θέσεις μέσα στη μουσική. Ο πρώτος χτύπος κάθε μέτρου είναι "1", δηλαδή η έναρξη της μετρικής μέτρησης στον χρόνο της μουσικής.

Η μέθοδος που χρησιμοποιεί ξεκινάει με τον υπολογισμό της συνάρτησης η οποία ανιχνεύει το «Complex Domain» (σύνθετο χώρο). Στη συνέχεια, για την ανίχνευση του παλμού χρησιμοποιεί δύο διαδοχικές ενέργειες. Η πρώτη ξεκινάει με την εκτίμηση της καμπύλης του ρυθμού, ενώ η δεύτερη βασιζόμενη στην πρώτη ενέργεια προσδιορίζει τις θέσεις των χτύπων. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό των μετρικών και χρονικών θέσεων στη μουσική, βοηθώντας στην ανάλυση και την κατανόηση της ρυθμικής δομής ενός μουσικού κομματιού.

Για να αναγνωριστεί ο παλμός, η συνάρτηση ανίχνευσης έναρξης χωρίζεται σε πλαίσια 6 δευτερολέπτων με βήμα ολίσθησης 1,5 δευτερολέπτου. Η αυτοσυσχέτιση

κάθε συνάρτησης ανίχνευσης έναρξης 6 δευτερολέπτων περνά μέσω ενός φίλτρου συνδυασμού. Τα διαδοχικά σήματα εξόδου του φίλτρου συνδυασμού ενώνονται σε έναν πίνακα παρατηρήσεων της περιοδικότητας μέσω του χρόνου. Η βέλτιστη διαδρομή της περιοδικότητας μέσω αυτών των παρατηρήσεων εντοπίζεται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Viterbi, όπου ο πίνακας μετάβασης ορίζεται ως διαγώνια Γκαουσιανή. ([Vamp Plugins](#))

Με βάση τις εκτιμήσεις της περιοδικότητας, οι θέσεις των χτύπων υπολογίζονται εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο δυναμικού προγραμματισμού. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό μιας αναδρομικής συνάρτησης και την ανίχνευση της θέσης του καλύτερου προηγούμενου χτύπου σε κάθε δείγμα της εισόδου της συνάρτησης ανίχνευσης έναρξης στο χρόνο. Αφού υπολογιστούν το συσσωρευτικό σκορ και η θέση του καλύτερου προηγούμενου χτύπου για ολόκληρο το εισαγωγικό σήμα, εντοπίζεται αναδρομικά η καλύτερη διαδρομή μέσω των θέσεων των χτύπων δειγματίζοντας το σήμα επαναφοράς από το τέλος προς την αρχή του εισαγωγικού σήματος.

Αφού εντοπιστούν οι θέσεις των χτύπων, το εργαλείο πραγματοποιεί μια δεύτερη διέλευση πάνω από το εισαγωγικό ηχητικό σήμα, το οποίο διαιρείται σε πλαίσια που συγχρονίζονται με τον ρυθμό. Το ηχητικό περιεχόμενο εντός κάθε πλαισίου χτύπου δείγματος στη συνέχεια υποβάλλεται σε νέα συχνότητα δειγματοληψίας 2,8kHz. Στη συνέχεια, υπολογίζεται μια συγχρονισμένη με τον ρυθμό φασματική αναπαράσταση εντός κάθε πλαισίου, με τη χρήση της απόκλισης Jensen-Shannon για τη μέτρηση των φασματικών διαφορών. Τα όρια των μέτρων αναγνωρίζονται ως εκείνα τα χτυπήματα που προκαλούν τις πιο συνεπείς φασματικές αλλαγές, με βάση τον καθορισμένο αριθμό χτύπων ανά μπάρα.

Τα χαρακτηριστικά που βοηθούν στην ακριβή καταγραφή της ρυθμικής δομής μιας μουσικής σύνθεσης μέσω του Bar and Beat Tracker είναι τα εξής:

- 1) Παλμός ανά μέτρο (Beats): Ο αριθμός των χτυπημάτων ανά μέτρο θεωρείται σταθερός σε όλο το μουσικό κομμάτι.
- 2) Έξοδοι Χτυπήματα (Bars): Οι εκτιμώμενες θέσεις των χτυπημάτων επιστρέφονται ως ένα χαρακτηριστικό, με χρονοσήμανση για κάθε χτύπημα, αλλά χωρίς ακριβή τιμή, χρησιμοποιώντας συνεχόμενους αριθμούς για τα χτυπήματα εντός του μέτρου.

3) Γραμμές Μέτρου (Beat Count): Οι εκτιμώμενες θέσεις των γραμμών μέτρου επιστρέφονται ως ένα χαρακτηριστικό, με χρονοσήμανση για κάθε γραμμή.

4) Μέτρηση Χτυπημάτων (Beat Spectral Difference): Οι εκτιμώμενες θέσεις των χτυπημάτων επιστρέφονται ως ένα χαρακτηριστικό, με χρονοσήμανση και μία αριθμητική τιμή που αντιστοιχεί στον αριθμό του χτυπήματος εντός του μέτρου. Αυτό είναι παρόμοιο με τα χτυπήματα εξόδου εκτός από το ότι επιστρέφει μια συνάρτηση μέτρησης αντί για μια σειρά στιγμών.

Το εργαλείο Bar and Beat Tracker Vamp γράφτηκε από τους Matthew Davies και Adam Stark ([Vamp Plugins](#)).

Είναι αναγκαίο να σημειωθούν οι παράμετροι που διαθέτει το Bars and Beat Tracker. Οι bars οι οποίες καθορίζουν τη συμπεριφορά του κατά την ανάλυση της ρυθμικής δομής ενός μουσικού κομματιού. Η παράμετρος alpha καθορίζει την ισορροπία μεταξύ της ηχητικής πληροφορίας και του εσωτερικού ρυθμικού μοντέλου του plugin. Συγκεκριμένα, ένα χαμηλό alpha (π.χ. 0.2–0.3) κάνει το σύστημα πιο «ευαίσθητο» στις διακυμάνσεις του ήχου, δηλαδή λαμβάνει περισσότερο υπόψη τα δεδομένα των onsets και ενδέχεται να ανιχνεύει περισσότερα ή λιγότερο σταθερά bars. Αντίθετα, ένα υψηλό alpha (π.χ. 0.8–0.9) οδηγεί σε πιο «αυστηρή» ερμηνεία του ρυθμού, βασιζόμενο περισσότερο στην εσωτερική προβλεψιμότητα του μετρικού μοντέλου, κάτι που είναι χρήσιμο για σταθερούς ρυθμούς όπως σε pop, rock ή techno.

Η ρύθμιση Beats per Bar (παλμοί-χτύποι ανά μέτρο) επιτρέπει στο χρήστη να καθορίσει χειροκίνητα το μέτρο (time signature) του κομματιού, δηλαδή πόσοι παλμοί περιλαμβάνονται σε κάθε μέτρο. Για παράδειγμα, σε ένα τυπικό 4/4 κομμάτι, η τιμή είναι 4. Αυτό βοηθά τον αλγόριθμο να εντοπίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις αρχές των bars, καθώς γνωρίζει εκ των προτέρων τη ρυθμική μονάδα. Αν η παράμετρος αυτή δεν οριστεί σωστά, μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα στην αναγνώριση του μέτρου. Τέλος, η παράμετρος Tempo Hint δίνει στον αλγόριθμο μία προκαταρκτική εκτίμηση του ρυθμού (σε BPM) του κομματιού. Αν και το plugin μπορεί να ανιχνεύσει το tempo αυτόματα, η ύπαρξη ενός tempo hint βελτιώνει την ακρίβεια, ιδίως σε κομμάτια με αργούς ρυθμούς ή ρυθμικές ασάφειες. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει μία προσεγγιστική τιμή του tempo (π.χ. 90, 120 BPM) και το plugin θα χρησιμοποιήσει αυτήν την πληροφορία για να κατευθύνει την ανάλυσή του.

### 3.2.3 Bar and Beat Tracker Beats

Το Bar and Beat Tracker (Beats) είναι ένα ακόμα από τα βασικά Vamp plugins του Sonic Visualiser, φτιαγμένο για αυτόματη ανίχνευση των beats (παλμών) σε ένα μουσικό κομμάτι. Σε αντίθεση με το Bar and Beat Tracker Bars, που εντοπίζει μόνο την αρχή κάθε μέτρου, το beats παρέχει πλήρη χαρτογράφηση του ρυθμικού πλέγματος, τοποθετώντας markers σε κάθε beat. Αυτό το κάνει ιδανικό για λεπτομερείς αναλύσεις ρυθμικής αγωγής και μελέτη της εσωτερικής δομής του ρυθμού. Είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μοντέλα Markov και Bayesian inference για την παρακολούθηση των χτύπων και της μετρικής δομής. Στόχος του είναι η ταυτόχρονη ανίχνευση των παλμών (beats) και των ορίων μέτρων (bars), επιτρέποντας την κατανόηση της μετρικής ιεραρχίας της μουσικής. Ο tracker αυτός, έχει σχεδιαστεί για να μπορεί να χειρίζεται είδη μουσικής με εκφραστικές και μη μετρονομικές ερμηνείες, όπως η κλασική μουσική και η μουσική με πολυρυθμία ή ρυθμική ασάφεια.

Λειτουργεί αναγνωρίζοντας στιγμές μουσικής επίδρασης, όπως onsets ή αλλαγές στην ενέργεια, χρησιμοποιώντας εσωτερικά μοντέλα ρυθμικής κανονικότητας για τον εντοπισμό περιοδικών σημείων που αντιστοιχούν σε beats. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, διαθέτει παραμέτρους, επιτρέποντας στο χρήστη να επηρεάσει τη συμπεριφορά του μέσω των ρυθμίσεων alpha, beats per bar και tempo hint.

Η παράμετρος alpha ελέγχει το πόσο «ευέλικτα» αντιδρά το plugin στις αλλαγές του ηχητικού σήματος. Χαμηλές τιμές (π.χ. 0.2) οδηγούν σε μεγαλύτερη ευαισθησία, ανιχνεύοντας ακόμα και μικρές ρυθμικές μεταβολές. Υψηλές τιμές alpha (π.χ. 0.8) βασίζονται περισσότερο στο ρυθμικό μοντέλο και εξομαλύνουν αποκλίσεις, που είναι χρήσιμο σε μουσική με σταθερό tempo. Η παράμετρος beats per bar ορίζει τον αριθμό των παλμών ανά μέτρο, βοηθώντας τον αλγόριθμο να κατανοήσει τη μετρική οργάνωση του κομματιού. Αν για παράδειγμα επιλεγεί τιμή 4, το σύστημα γνωρίζει ότι κάθε τέσσερα beats σχηματίζουν ένα μέτρο. Τέλος, το tempo hint επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει μια εκτίμηση του ρυθμού του κομματιού σε BPM, καθοδηγώντας τον αλγόριθμο σε ασαφή ή μη σταθερό ρυθμό. ([Vamp Plugins](#))

### **3.2.4 BeatRoot Beat Tracker**

Σύμφωνα με τον Simon Dixon, το BeatRoot είναι ένα διαδραστικό σύστημα παρακολούθησης ρυθμού που χρησιμοποιείται εδώ και αρκετά χρόνια σε μελέτες της απόδοσης του χρονισμού. Στη νέα έκδοση του, έχουν διορθωθεί μερικά από τα μειονεκτήματα του αρχικού συστήματος. Ο απλός αλγόριθμος ανίχνευσης ατάκας (onset detection), που δημιουργούσε προβλήματα στην παρακολούθηση ρυθμού σε μουσική χωρίς έντονα χτυπήματα, έχει αντικατασταθεί με έναν πιο αξιόπιστο ανιχνευτή ατάκας. Έχουν εισαχθεί και νέες λειτουργίες, όπως η σημείωση πολλαπλών μετρικών επιπέδων και των ορίων φράσεων. Επιπλέον, η νέα έκδοση έχει υλοποιηθεί εξολοκλήρου σε Java, επιτρέποντας τη λειτουργία του σε όλες τις κύριες πλατφόρμες. Ο αλγόριθμος παρακολούθησης ρυθμού παραμένει σχεδόν ο ίδιος : το BeatRoot χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική που ταυτόχρονα εξετάζει διάφορες υποθέσεις για τον ρυθμό και τη θέση των μουσικών χτυπημάτων, με αποτέλεσμα την ακριβή παρακολούθηση του ρυθμού, γρήγορη ανάκαμψη από σφάλματα και ομαλή απόδοση σε περιπτώσεις όπου ο ρυθμός είναι ασαφώς υπονοούμενος από τα δεδομένα. (Dixon,2006)

Το BeatRoot δέχεται έναν ψηφιακό ήχο ως είσοδο και επεξεργάζεται τα δεδομένα offline για την ανίχνευση σημαντικών ρυθμικών γεγονότων. Η χρονική ακολουθία αυτών των γεγονότων αναλύεται για να δημιουργηθούν υποθέσεις σχετικά με τον ρυθμό σε διάφορα μετρικά επίπεδα.

Η καινοτομία του BeatRoot έγκειται στη χρήση μιας αρχιτεκτονικής πολλαπλών πρακτόρων (multiple-agent system), η οποία επιτρέπει την ταυτόχρονη εξέταση πολλών υποθέσεων σχετικά με τον ρυθμό και τη φάση των χτύπων, προσδίδοντας ευελιξία και αντοχή έναντι χρονικών αποκλίσεων ή ρυθμικής πολυπλοκότητας.

Η διαδικασία ανίχνευση παλμών στο BeatRoot ξεκινά με την ανάλυση του ήχου για τον εντοπισμό των χρονικών στιγμών όπου ξεκινούν νέοι ήχοι – τα λεγόμενα onsets. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ανάλυσης του φάσματος του σήματος, υπολογίζοντας μεταβολές στην ενέργεια μεταξύ διαδοχικών χρονικών παραθύρων. Τα onsets αποτελούν τα θεμελιώδη σημεία αναφοράς για την αναγνώριση των ρυθμικών μοτίβων.

Ακολουθεί η φάση της εξαγωγής τέμπο (tempo induction), κατά την οποία το σύστημα υπολογίζει πιθανά τέμπο βασισμένο στις χρονικές αποστάσεις μεταξύ των πρώτων διαστημάτων ανάμεσα στις ατάκες (inter-onset intervals). Η διαδικασία αυτή

καταλήγει σε ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με τον ρυθμό (σε BPM) και τη φάση (χρονική στιγμή του πρώτου παλμού). Για καθεμία από αυτές τις υποθέσεις, δημιουργείται ένας ξεχωριστός πράκτορας (agent).

Κάθε πράκτορας αναλαμβάνει να παρακολουθήσει τη ροή της μουσικής με βάση τη δική του υπόθεση για το τέμπο και τη φάση. Προβλέπει τους επόμενους πιθανούς χρόνους χτύπων και συγκρίνει τις προβλέψεις του με τα πραγματικά onsets που ανιχνεύονται στο μουσικό σήμα. Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των προβλέψεων, χρησιμοποιούνται παράθυρα ανοχής (tolerance windows), onsets που εμπίπτουν στο εσωτερικό παράθυρο θεωρούνται αληθινοί χτύποι, ενώ εκείνοι στο εξωτερικό παράθυρο θεωρούνται πιθανές, αλλά αβέβαιες συμπτώσεις. Η απόδοση κάθε πράκτορα αξιολογείται συνεχώς με βάση τη συνέπεια των προβλέψεών του και τη συσχέτισή τους με τα onsets.

Καθώς η ανάλυση προχωρά, οι πράκτορες ενημερώνουν δυναμικά τις παραμέτρους τους (ρυθμό και φάση), ώστε να διατηρούν τον συγχρονισμό τους με τη μουσική. Το σύστημα επιτρέπει την εμφάνιση νέων πρακτόρων εφόσον προκύψουν νέες πιθανές ερμηνείες του παλμού, ενώ συγχρόνως απορρίπτει πράκτορες των οποίων οι προβλέψεις παύουν να είναι συνεπείς με τα ακουστικά δεδομένα.

Στο τέλος της διαδικασίας, το BeatRoot επιλέγει τον πράκτορα με την υψηλότερη συνολική βαθμολογία, ο οποίος θεωρείται ότι έχει πετύχει την πιο αξιόπιστη αναπαράσταση των χρόνων των χτύπων. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα επιτυγχάνει ακρίβεια ακόμη και σε συνθήκες εκφραστικής ερμηνείας, όπου ο ρυθμός παρουσιάζει επιταχύνσεις, επιβραδύνσεις ή μικρές αποκλίσεις από τον μετρικά σταθερό χρόνο.

Αποτελέσματα: Το BeatRoot δοκιμάστηκε σε διάφορα μουσικά στυλ, όπως κλασική, τζαζ και δημοφιλή μουσική, με ποικιλία ρυθμών και μέτρων. Χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο δεδομένων που περιλάμβανε 13 πλήρεις πιανιστικές σονάτες, σόλο εκτελέσεις δύο τραγουδιών των Beatles και ένα μικρό σύνολο από δημοφιλή, τζαζ και λατινικά τραγούδια. Το σύστημα κατάφερε να εντοπίσει κατά μέσο όρο πάνω από το 90% των χτυπημάτων σε κάθε περίπτωση και συγκρίθηκε ευνοϊκά με έναν άλλο προηγμένο ανιχνευτή ρυθμού της εποχής. Παρά την απουσία υψηλού επιπέδου γνώσης της μουσικής, το BeatRoot ήταν ανθεκτικό στον υπολογισμό των χρόνων των χτυπημάτων και συνήθως ανακτούσε γρήγορα τον συγχρονισμό όταν τον έχανε. (Dixon,2006)

Συμπερασματικά, το BeatRoot Beat Tracker είναι ένα plug-in που εκτελείται στο λογισμικό Sonic Visualiser και αποτελεί μέρος τη συλλογής Vamp Plugins, η οποία

περιέχει plugins που αναλύουν ηχητικά σήματα και να εξάγουν χαρακτηριστικά από αρχεία ήχου. Το BeatRoot χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των ρυθμικών παλμών ενός μουσικού κομματιού και παρέχει τη δυνατότητα αυτόματης επισήμανσης της χρονικής στιγμής κατά την οποία εμφανίζεται ένας παλμός.

Η πρώτη λειτουργία είναι η λήψη του ήχου: αφού το αρχείο έχει φορτωθεί στον ηχητικό απεικονιστή, το BeatRoot αναλύει το ηχητικό σήμα. Έπειτα, είναι αναγκαία η εφαρμογή του plug-in: επιλέξτε το BeatRoot από το μενού Transform για να εξαγάγετε τα δεδομένα παλμού. Στη συνέχεια, οι παλμοί εμφανίζονται σε ξεχωριστό επίπεδο του Sonic Visualiser, πάνω από την κυματομορφή και άλλα γραφήματα (π.χ. φασματογράφημα). Τέλος, ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει διάφορες παραμέτρους ανάλυσης, όπως η ανάλυση του χρονικού παραθύρου, για να βελτιώσει την ακρίβεια της ανίχνευσης ρυθμών, ανάλογα με τον τύπο του μουσικού κομματιού.

## 4.Ρυθμική υπολογιστική ανάλυση (πράξη)

### *ΕΙΣΑΓΩΓΗ*

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα χρησιμοποιήσουμε το Sonic Visualiser το οποίο όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι σχεδιασμένο για την οπτικοποίηση ηχητικών χαρακτηριστικών και μελέτη μιας μουσικής ηχογράφησης. Πιο συγκεκριμένα, θα εφαρμόσουμε τα τρία εργαλεία (vamp plugins) Bar and Beat Tracker Bars, Bar and Beat Tracker Beats και το BeatRoot Beat Tracker σε διάφορα είδη και στυλ μουσικών ηχογραφήσεων-κομματιών. Στόχος αυτής της εφαρμογής είναι η μελέτη κάθε μουσικής ηχογράφησης. Στην προκειμένη περίπτωση, με τη βοήθεια των δύο αυτών εξ'αυτών εργαλείων (Bar and Beat Tracker Beats και το BeatRoot Beat Tracker) θα αξιολογήσουμε αν είναι δυνατή η ανίχνευση του δεσπόζοντα παλμού του κάθε κομματιού, αν μπορεί να τον κρατήσει σταθερό, αν αντιμετωπίζει δυσκολίες ή ακόμα και αν αδυνατεί να τον ανιχνεύσει. Επιπρόσθετα, με τη βοήθεια του Bar and Beat Tracker Bars θα αναζητήσουμε το μέτρο σε κάποια από τα κομμάτια αυτά.

Για να γίνει πιο ξεκάθαρη η αξιολόγηση των πρόσθετων αυτών εργαλείων θα διαχωρίσουμε τα κομμάτια που χρησιμοποιήσαμε, όχι τόσο ως προς το στυλιστικό είδος αλλά κυρίως ως προς τα κοινά χαρακτηριστικά των κομματιών με τις ιδιαιτερότητες τους και τα τυχόν προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι τρεις εφαρμογές. Πιο αναλυτικά, τα κομμάτια θα χωριστούν σε κατηγορίες με βασικό γνώμονα το tempo Στην πρώτη κατηγορία, θα ασχοληθούμε με κομμάτια τα οποία έχουν σταθερό tempo σε όλη τη διάρκειά τους (pop-rock, ελληνικά χορευτικά παραδοσιακά). Στη δεύτερη κατηγορία, μελετάμε τα πιο εκφραστικά κομμάτια τα οποία συνεχώς έχουν διακυμάνσεις στο tempo, ενώ στην τρίτη και τελευταία εξετάζουμε τα κομμάτια που εμφανίζουν σταδιακή μεταβολή στο tempo.

Εν συντομία σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθεί το ζήτημα της ανίχνευσης του δεσπόζοντα παλμού, χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που προαναφέραμε σε κομμάτια διαφορετικών στυλ και απαιτήσεων, για να δούμε πως ανταποκρίνονται τα εργαλεία αυτά. Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί πως σε όλα τα κομμάτια χρειάστηκε να διαμορφώσουμε τις παραμέτρους που έχουν οι trackers, ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε κομματιού.

## **4.1 Ρυθμική Υπολογιστική ανάλυση- ενδεικτικά παραδείγματα**

### **4.1.1. Ανίχνευση παλμού : *Bar and Beat Tracker Beats & BeatRoot***

#### **α) Σταθερό tempo:**

Η αρχική παράμετρος η οποία είναι βασικός γνώμονας της πρώτης κατηγορίας, είναι τα μουσικά κομμάτια τα οποία έχουν σταθερό tempo σε όλη τη διάρκεια τους. Κάποια από αυτά εμφανίζουν σε συγκεκριμένα σημεία τοπικές αλλαγές, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια. Τα κομμάτια αυτά ανήκουν στυλιστικά σε είδη όπως, στην pop- rock μουσική, αλλά και στην ελληνική χορευτική παραδοσιακή. Όπως είναι γνωστό, ο ρυθμός στη pop-rock μουσική αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη της γνωρίσματα. Συνήθως βασίζεται σε σταθερό μέτρο 4/4, με προβλέψιμη και επαναλαμβανόμενη δομή που καθιστά το άκουσμα της εύκολο για τον εντοπισμό του παλμού των κομματιών, ακόμα και από έναν άνθρωπο που δεν έχει μουσικές γνώσεις. Επίσης, ένα από τα πιο διακριτά στοιχεία της είναι η έμφαση στο λεγόμενο "backbeat", δηλαδή στο δεύτερο και τέταρτο χτύπο ενός μέτρου το οποίο συμβάλλει και αυτό στην αναγνώριση του παλμού των κομματιών. Αυτή η ρυθμική δομή δημιουργεί έναν χαρακτηριστικό παλμό που κάνει τα τραγούδια της pop-rock ιδανικά για χορό. Ο ρυθμός είναι συνήθως απλός, χωρίς πολύπλοκες αλλαγές ή ασυνήθιστα μέτρα, κάτι που ενισχύει τη σταθερότητα και την αμεσότητα του ήχου.(Dexter Hayes,2024). Από την άλλη πλευρά, τα ελληνικά παραδοσιακά κομμάτια εμφανίζουν ποικιλομορφία στους ρυθμούς, αντανακλώντας έτσι στην πολιτισμική πολυμορφία και τις ιστορικές επιρροές κάθε περιοχής της Ελλάδας. Σε αντίθεση με τη δυτική μουσική που βασίζεται κυρίως σε απλά μέτρα όπως το 4/4 ή 3/4, η παραδοσιακή ελληνική μουσική χρησιμοποιεί συχνά ασύμμετρα μέτρα όπως 7/8, 9/8. Παρόλα αυτά, επειδή συνήθως τα παραδοσιακά κομμάτια είναι χορευτικά, το tempo παραμένει σταθερό. Άλλος ένας βασικός παράγοντας που βοηθάει τα εργαλεία σε αυτά τα στυλ μουσικής για την εύρεση του παλμού είναι και

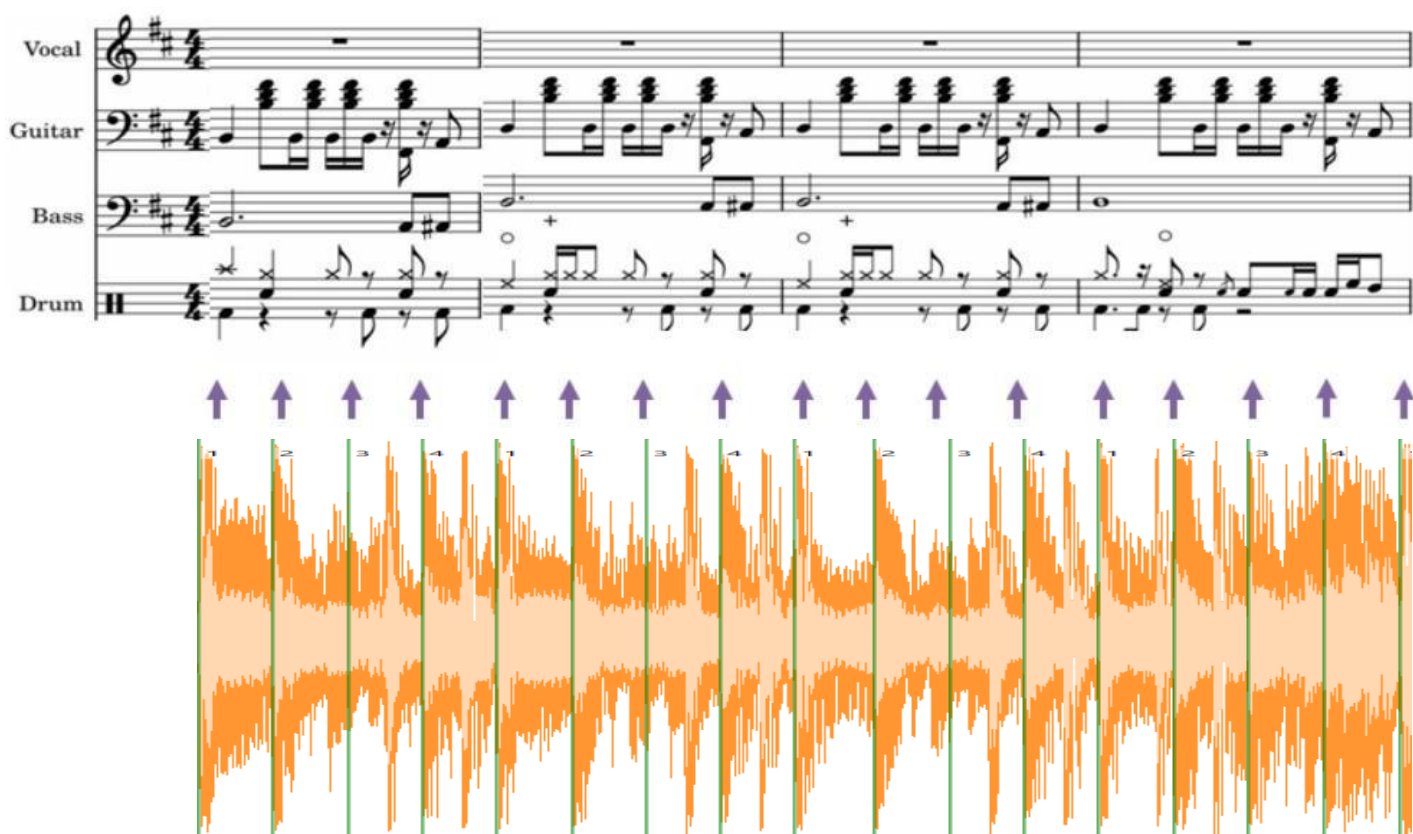
η συμμετοχή των κρουστών. Παρακάτω θα δούμε κάποια παραδείγματα βασιζόμενοι στις παραπάνω παραμέτρους.

Το πρώτο κομμάτι στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία το Bar and Beat Tracker και BeatRoot Beat Tracker είναι το «**Beggin**» ([link](#)) σε διασκευή του ροκ Ιταλικού συγκροτήματος Maneskin . Το κομμάτι αυτό είναι ένα pop-rock κομμάτι με σταθερό ρυθμό 4/4. Αυτό από μόνο του μας δίνει την υποψία πως οι beat trackers που θα χρησιμοποιήσουμε είναι πιθανό να κρατήσουν σταθερά το beat σε όλο το κομμάτι χωρίς να αντιμετωπίσουν δυσκολίες. Ας ξεκινήσουμε με την εφαρμογή του Bar and Beat Tracker Beats έχοντας ως σταθερούς παραμέτρους : το Beats per Bar θα ισούται με 4, το Alpha με 0.9 και το Tempo hint με 200.

The image displays a musical score for the song "Beggin" by Maneskin, arranged in a 4/4 time signature. The score is divided into four staves: Vocal, Guitar, Bass, and Drum. The Vocal staff is in treble clef with a key signature of one sharp (F#) and a dynamic marking of *mf*. The Guitar and Bass staves are in bass clef with a key signature of one sharp (F#) and dynamic markings of *mp* and *mf* respectively. The Drum staff is in a drum clef with a dynamic marking of *f*. Below the score is a waveform visualization of the audio, showing the amplitude of the sound over time. The waveform is orange and shows a clear, steady pulse corresponding to the 4/4 time signature. Above the waveform, there are vertical green lines indicating the detected beats, which are numbered 1 through 4, repeating every four bars.

**Σχήμα 4.1**

Στις παραπάνω εικόνες βλέπουμε την εισαγωγή του κομματιού με τη μελωδία της φωνής του τραγουδιστή σε συνδυασμό με το σχήμα της κυματομορφής που εξάγαμε μέσα από το Sonic Visualiser. Το γεγονός ότι, αυτό το σημείο είναι η έναρξη του τραγουδιού και ο τραγουδιστής ξεκινάει το κομμάτι με ρυθμική ελευθερία, χωρίς τη συνοδεία κάποιου οργάνου δημιουργεί προβλήματα στον tracker με αποτέλεσμα να μην κρατάει σταθερό το beat. Στη συνέχεια όμως, με την εισαγωγή των κρουστών και των υπόλοιπων οργάνων ο tracker εντοπίζει το beat και το κρατάει σταθερό σε όλο το κομμάτι χωρίς να εμφανίσει κάποια άλλη δυσκολία. Επομένως, οι εκφραστικές ελευθερίες του κάθε ερμηνευτή στα μουσικά κομμάτια επηρεάζουν τον tracker,διότι δεν μπορεί να εξάγει σωστά το τέμπο είτε λόγω του τραγουδιστή –ερμηνευτή ή των οργανοπαικτών.



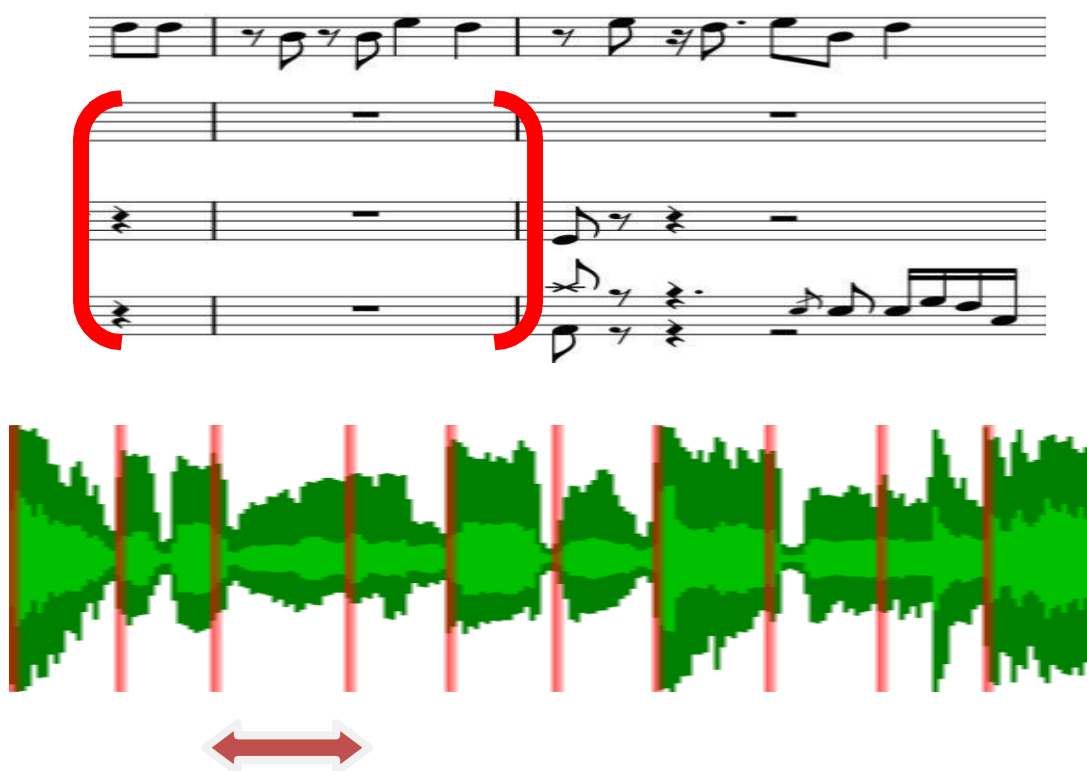
**Σχήμα 4.2**

Ας περάσουμε στο εργαλείο BeatRoot Beat Tracker με το οποίο η διαδικασία είναι η ίδια. Το BeatRoot εντοπίζει σταθερά το beat σε όλο το κομμάτι με εξαίρεση πάλι την εισαγωγή του κομματιού όπως προαναφέρθηκε και πιο πάνω με το Bar and Beat Tracker Beats. Οι παρακάτω εικόνες απεικονίζουν την παραπάνω πρόταση.

The image displays a musical score for a piece in 4/4 time with a key signature of one sharp (F#). The score consists of four staves: Vocal, Guitar, Bass, and Drum. The Vocal staff begins with a treble clef and a dynamic marking of *mf*. The Guitar staff begins with a bass clef and a dynamic marking of *mp*. The Bass staff begins with a bass clef and a dynamic marking of *mf*. The Drum staff begins with a drum clef and a dynamic marking of *f*. The score shows a vocal line starting with a rest, followed by a series of notes. The Guitar, Bass, and Drum parts are mostly silent, with some activity in the Bass and Drum parts towards the end of the phrase. Below the score is a green waveform visualization of the audio signal, showing the amplitude of the sound over time. The waveform is centered around a horizontal axis and shows a clear pulse corresponding to the vocal line.

**Σχήμα 4.3**

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί πως το BeatRoot αντιμετώπισε ένα επιπλέον πρόβλημα στο 2.12' του κομματιού το οποίο δεν εμφάνισε το Bar and Beat Tracker Beats. Σε αυτό το σημείο του κομματιού ο ερμηνευτής κάνει ένα γύρισμα (στολίδι) με τη φωνή του το οποίο δημιουργεί μία μικρή ρυθμική καθυστέρηση. Το γύρισμα της φωνής σε συνδυασμό με την απουσία όλων των οργάνων κάνει το εργαλείο να χάσει μόνο ένα beat και μετά να επανέλθει κανονικά. Εδώ είναι καλό να αναφερθεί πως το Bar and Beat Tracker Beats όπως έχει ήδη ειπωθεί, είναι πιο ευέλικτο και προσαρμόζεται στις μικρές αλλαγές του κάθε κομματιού, ενώ, το BeatRoot βγάζει ως χτύπο το μέσο όρο των χτύπων του κομματιού και αυτό χρησιμοποιεί σε όλο το κομμάτι.

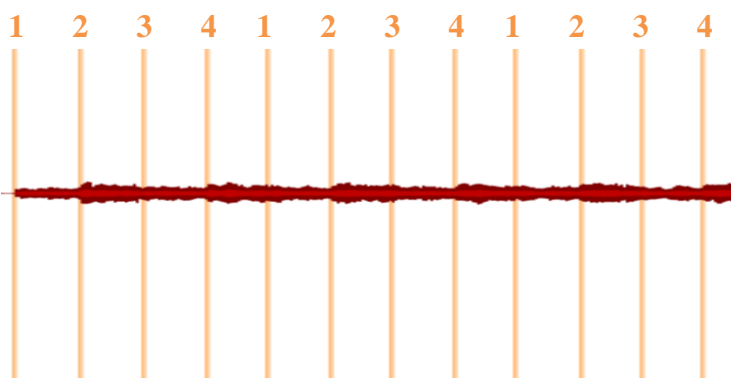


#### Σχήμα 4.4

Στην παραπάνω εικόνα το βελάκι απεικονίζει το δευτερόλεπτο που χάνεται το beat. Ενώ οι υπόλοιπες αποστάσεις είναι ίσες, σε εκείνο το χτύπο η απόσταση έχει μεγαλώσει.

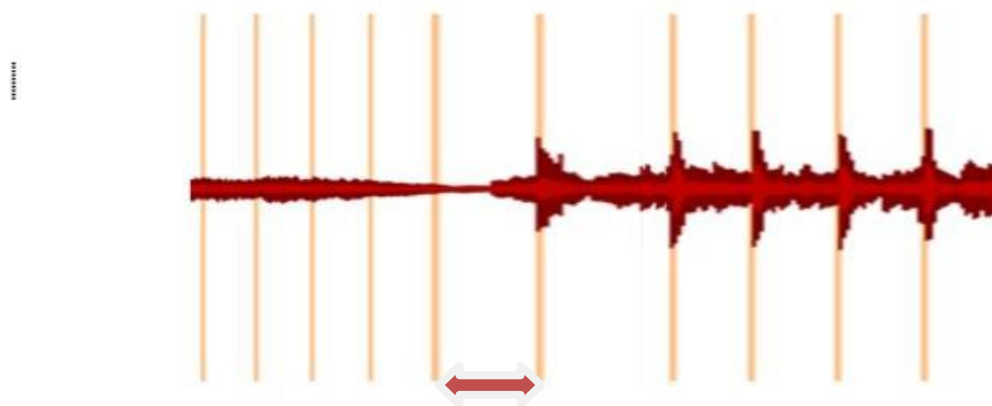
Το δεύτερο κομμάτι που ανήκει στην κατηγορία αυτή και είναι ηχογραφημένο με clicktrack είναι το «**Gimme Gimme**» (**A man after Midnight**) ([link](#)) των ABBA το οποίο πρωτακούστηκε τον Αύγουστο του 1979. Το κομμάτι έχει ρυθμική αγωγή κυρίως 4/4 εκτός από μία μικρή εναλλαγή όπου πηγαίνει στα 2/4. Ας ξεκινήσουμε την εφαρμογή του Bar and Beat Tracker Beats στο κομμάτι αυτό έχοντας ως σταθερούς παραμέτρους : το Beats per Bar θα ισούται με 2, το Alpha με 0.710 και το Tempo hint με 150.

The image shows a musical score for a 4/4 piece. The score includes staves for Voce, Chitarra elettrica, Basso elettrico, Sintetizzatore Rain, Piano, and Batteria. The guitar part has a rhythmic pattern of eighth notes. The tempo changes from 4/4 to 2/4 at measure 8.



### Σχήμα 4.5

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε πως το Bar and Beat Tracker Beats εντοπίζει σταθερά τον παλμό του κομματιού έως και το μέτρο 8. Στο μέτρο 8, όπως έχει προαναφερθεί η ρυθμική αγωγή του κομματιού από τα 4/4 γίνεται 2/4. Η τοπική αυτή εναλλαγή δημιουργεί ένα μικροπρόβλημα στον tracker , ο οποίος το αντιμετωπίζει απευθείας, βρίσκοντας αμέσως τον παλμό και διατηρώντας τον σε όλο το κομμάτι. Παρακάτω απεικονίζεται αυτό το ιδιαίτερο σημείο.



**Σχήμα 4.6**

Είναι λογικό η απότομη εναλλαγή της ρυθμικής αγωγής στο κομμάτι να επηρεάσει τον tracker, παρόλο που έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται ανάλογα στις δυσκολίες του εκάστοτε κομματιού. Στη συγκεκριμένη περίπτωση βέβαια καταφέρνει αμέσως να επανέλθει στο σωστό beat.

Το επόμενο βήμα είναι να εξετάσουμε το BeatRoot Beat Tracker και πως αυτό εντοπίζει τον παλμό του κομματιού.

The image shows a musical score for a 4/4 piece in B-flat major. The score includes staves for Voce, Chitarra elettrica, Basso elettrico, Sintetizzatore Rain, Piano, and Batteria. The Chitarra elettrica part is the only one with notes, showing a rhythmic pattern of eighth notes. The other parts are mostly rests.

### Σχήμα 4.7

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε το αποτέλεσμα του BeatRoot στην εισαγωγή του κομματιού. Το BeatRoot Beat Tracker αδυνατεί να εντοπίσει τον παλμό του κομματιού στα πρώτα μέτρα της εισαγωγής διότι η έλλειψη των κρουστών οργάνων παίζουν σημαντικό ρόλο για τον tracker αυτό. Όπως έχει αναφερθεί ήδη στο κεφάλαιο 3 (ενότητα 3.2.3) ο αλγόριθμος ανίχνευσης ατάκας (onset detection), που δημιουργεί προβλήματα στην παρακολούθηση ρυθμού σε μουσική χωρίς έντονα χτυπήματα. Αυτό είναι ένα πολύ ωραίο παράδειγμα ως προς την αδυναμία αυτή που έχει ο tracker. Ουσιαστικά ο παλμός εντοπίζεται σωστά στο μέτρο 10.

8

Vo.

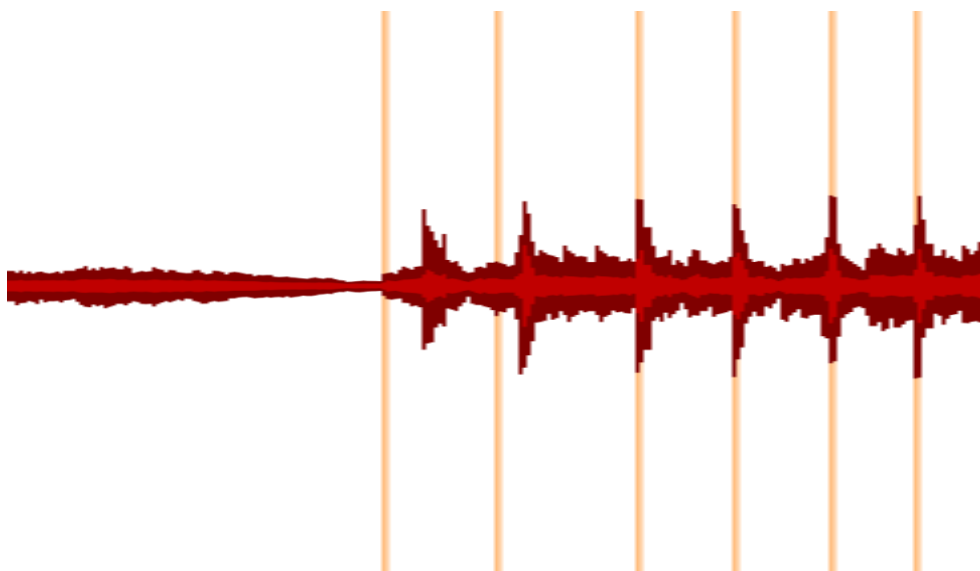
Chit. el.

B. el.

Sint.

Pf.

Batt.



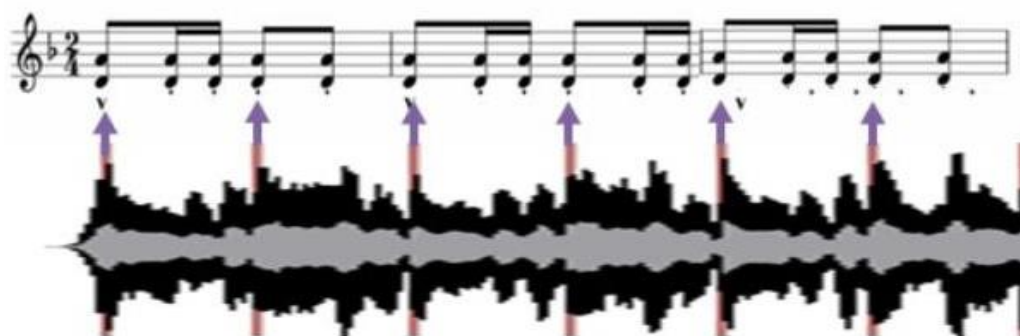
**Σχήμα 4.8**

Παραπάνω βλέπουμε πως στο μέτρο 9 ξεκινά ο tracker προσπαθεί να εντοπίσει τον παλμό ενώ στο μέτρο 10 το βρίσκει on tempo και τον κρατά σταθερά σε όλο το κομμάτι.

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε κομμάτια τα οποία κρατούν σταθερό tempo σε όλη τη διάρκειά τους χωρίς να εντοπίζεται κάποιο σφάλμα.

Το κομμάτι ο «**Ικαριώτικος**» ([link](#)), ένα ελληνικό παραδοσιακό τραγούδι που έχει ερμηνεύσει ο Πάριος, και όχι μόνο. Η μετρική του ένδειξη είναι σταθερή στα 2/4 σε όλη τη διάρκεια του κομματιού.

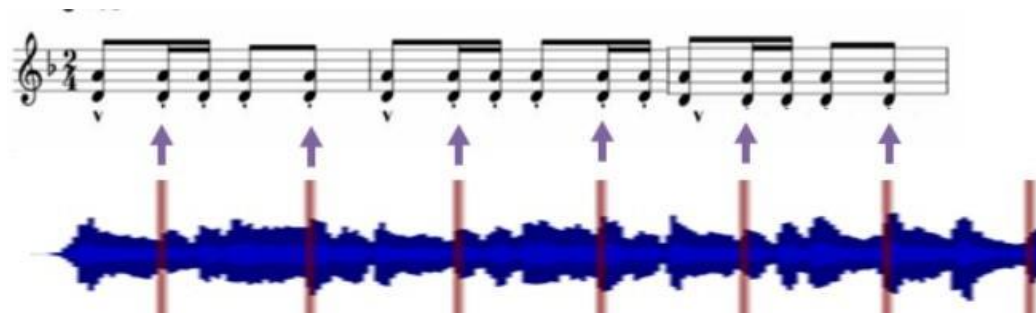
Εφαρμόζοντας το Bar and Beat Tracker Beats, με Beats per bar=2, Alpha= 0,9 και Tempo Hint = 120 BPM, αντιλαμβανόμαστε πως το εργαλείο μας βρίσκει σταθερά το χτύπο σε χρόνο τετάρτου καθ' όλη τη διάρκεια του κομματιού. Αυτό συμβαίνει διότι είναι ένα παραδοσιακό χορευτικό κομμάτι με σταθερό παλμό, ώστε ο κόσμος που χορεύει να μπορεί να ακολουθήσει τον παλμό. Αυτό βοηθά τον Tracker να κρατήσει σταθερά τον παλμό.



#### Σχήμα 4.11

Στη συνέχεια το εργαλείο BeatRoot Beat Tracker, ενώ εντοπίζει τον χτύπο στο τέταρτο, βρίσκεται offbeat. Ο όρος offbeat αναφέρεται σε χτύπους ή χρόνους που βρίσκονται εκτός των κύριων ή "δυνατών" χρόνων ενός μέτρου. Όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, στη δυτική μουσική, ειδικά στη ρυθμική δομή, υπάρχει συνήθως ένας κανονικός παλμός ή "beat". Για παράδειγμα, σε ένα μέτρο 4/4, οι ισχυροί χρόνοι είναι ο 1ος και ο 3ος, ενώ ο 2ος και 4ος χρόνος θεωρούνται "ασθενείς" ή δευτερεύοντες. Έτσι, και στον Ικαριώτικο τον παλμό τον

εντοπίζει offbeat, δηλαδή στο 2<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> χρόνο.

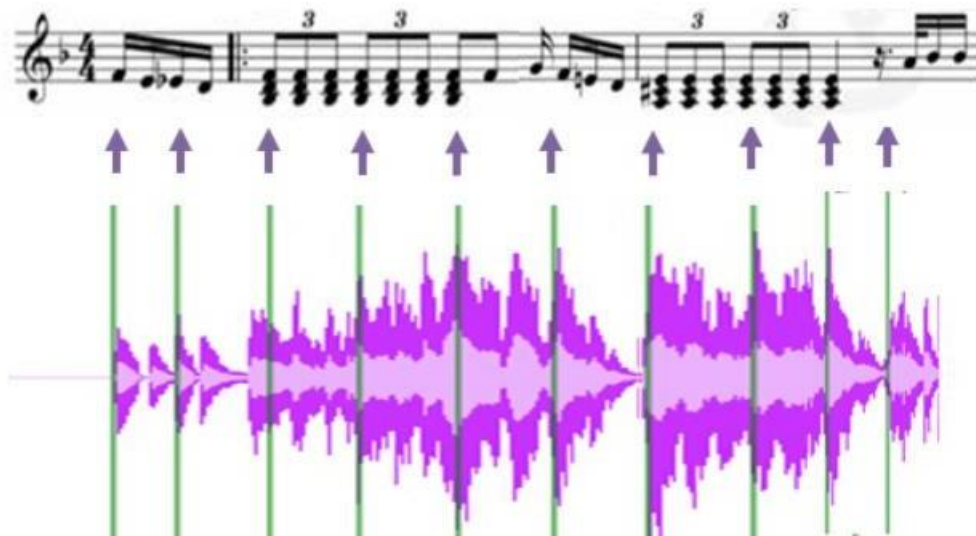


#### Σχήμα 4.12

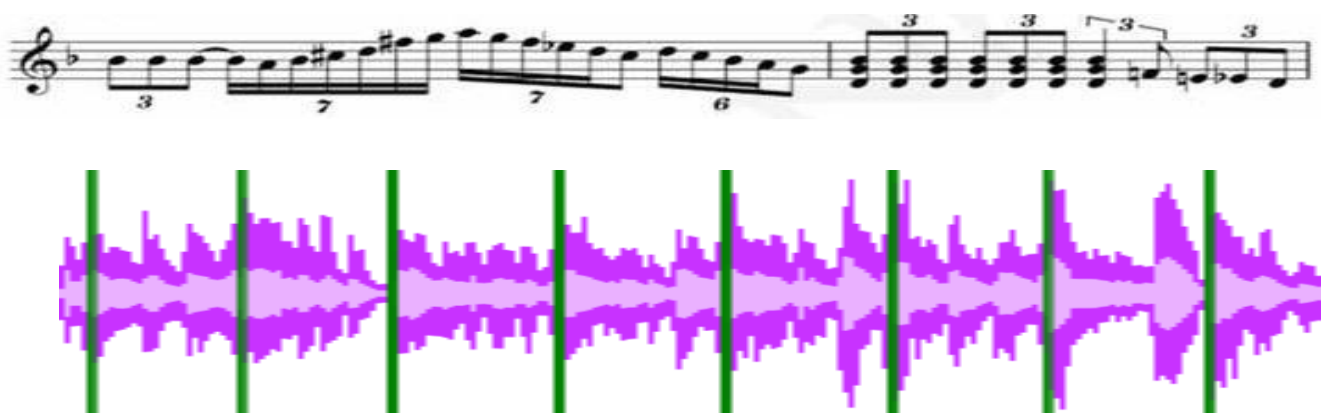
Ουσιαστικά σε αυτό το κομμάτι ο tracker εντοπίζει το tempo induction του κομματιού (δηλ. το τέμπο) και όχι την ανίχνευση του παλμού (beat tracking).

Το επόμενο κομμάτι είναι το «**Αχάριστη**» ([link](#)) του Βασίλη Τσιτσάνη. Μία από τις κορυφαίες στιγμές της δημιουργικής πορείας του Βασίλη Τσιτσάνη, είναι η «Αχάριστη», ένα αργό χασάπικο σε στίχους του ίδιου, που γράφτηκε το 1942 και ηχογραφήθηκε σε δίσκο γραμμοφώνου τον Ιούνιο του 1947. Η μετρική δομή του είναι 4/4. Στην εργασία θα χρησιμοποιηθεί ένα απόσπασμα από το κομμάτι έως το 1.18'.

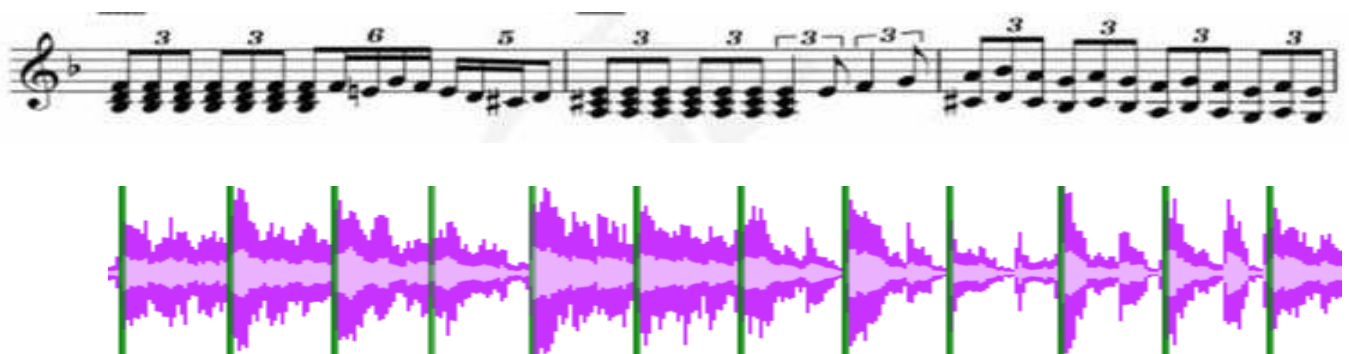
Ξεκινώντας από το εργαλείο Bar and Beat Tracker Beats, Beats per bar=4, Alpha=0,83 και Tempo Hint = 120 BPM βλέπουμε μία προσπάθεια από τον tracker να εντοπίσει το tempo, κάτι το οποίο αδυνατεί να κάνει μέχρι το τέλος της πρώτης πτώσης του κομματιού στο μέτρο 9 (σχήμα 4.13, 4.14, 4.15 και 4.16). Αυτό συμβαίνει διότι τα πρώτα αυτά μέτρα, είναι η εισαγωγή του κομματιού και ο παλμός είναι πιο ελεύθερος, αφού η μελωδική γραμμή του μπουζουκιού είναι αυτή που καθορίζει τον παλμό του κομματιού. Ως ένα γενικό συμπέρασμα σε αυτό το κομμάτι η απουσία των κρουστών παίζει σημαντικό ρόλο για την ανίχνευση του παλμού. Το Bar and Beat Tracker Beats εντοπίζει τον παλμό στο υπόλοιπο απόσπασμα του κομματιού, αφήνοντας όμως έναν ελαφρύ ενδοιασμό για το αν η ατάκα είναι τόσο ακριβής. Η ηχογράφηση είναι αρκετά παλιά και αυτό δυσκολεύει τον tracker να εντοπίσει με σιγουριά τον παλμό, χωρίς αυτό να σημαίνει πως είναι λάθος το αποτέλεσμα που φέρει.



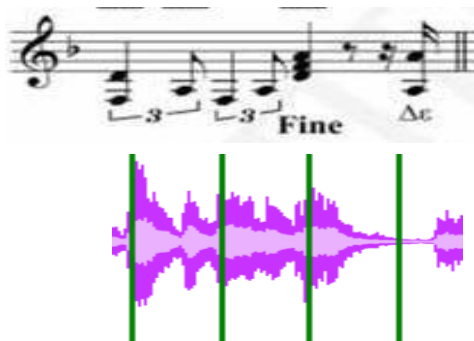
Σχήμα 4.13



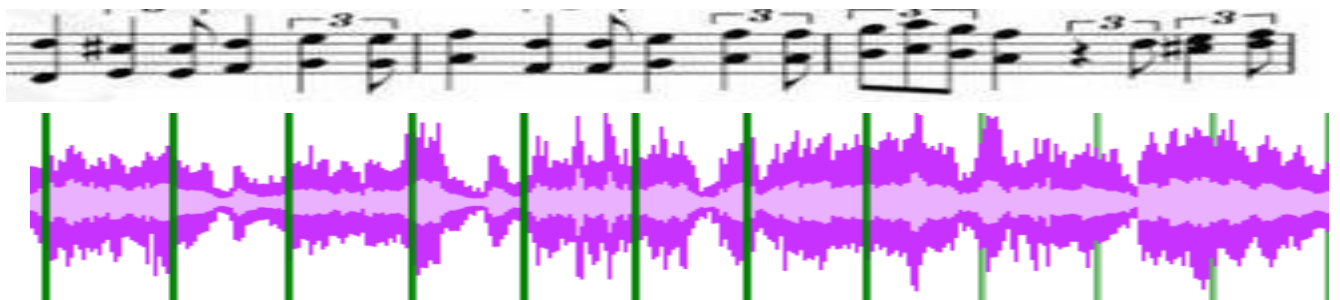
Σχήμα 4.14



Σχήμα 4.15

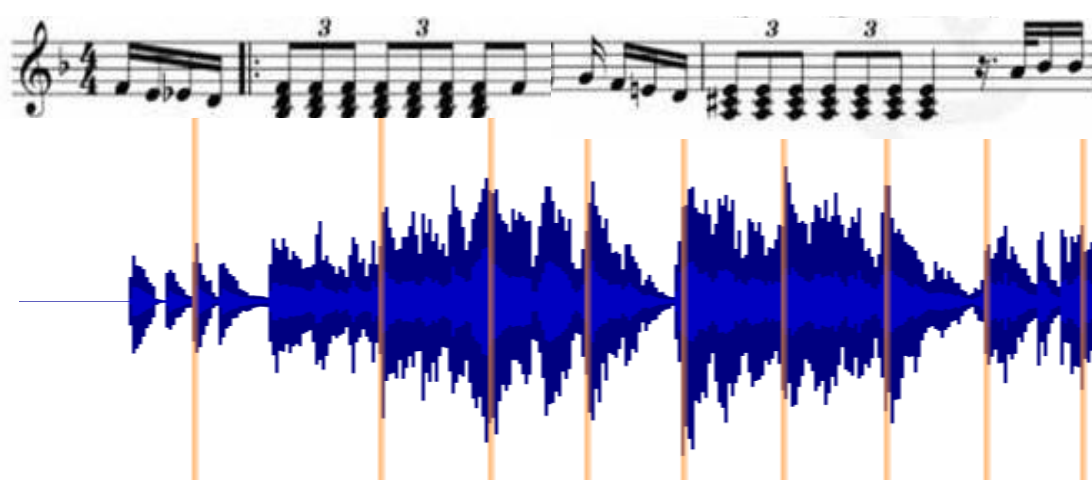


Σχήμα 4.16



Σχήμα 4.17

Από την άλλη πλευρά, το BeatRoot Beat Tracker, δεν αντιμετωπίζει κάποιο πρόβλημα στο σύνολο του κομματιού εκτός από την αρχή τα πρώτα δευτερόλεπτα, μέχρι να ανιληφθεί τον παλμό. Αυτό συμβαίνει διότι το BeatRoot βρίσκει έναν μέσο όρο τιμών και με αυτό τον παλμό ορίζει όλο το κομμάτι, σε αντίθεση με το Bar and Beat Tracker Beats που προσπαθεί να προσαρμοστεί σε κάθε μικρή εναλλαγή του tempo.



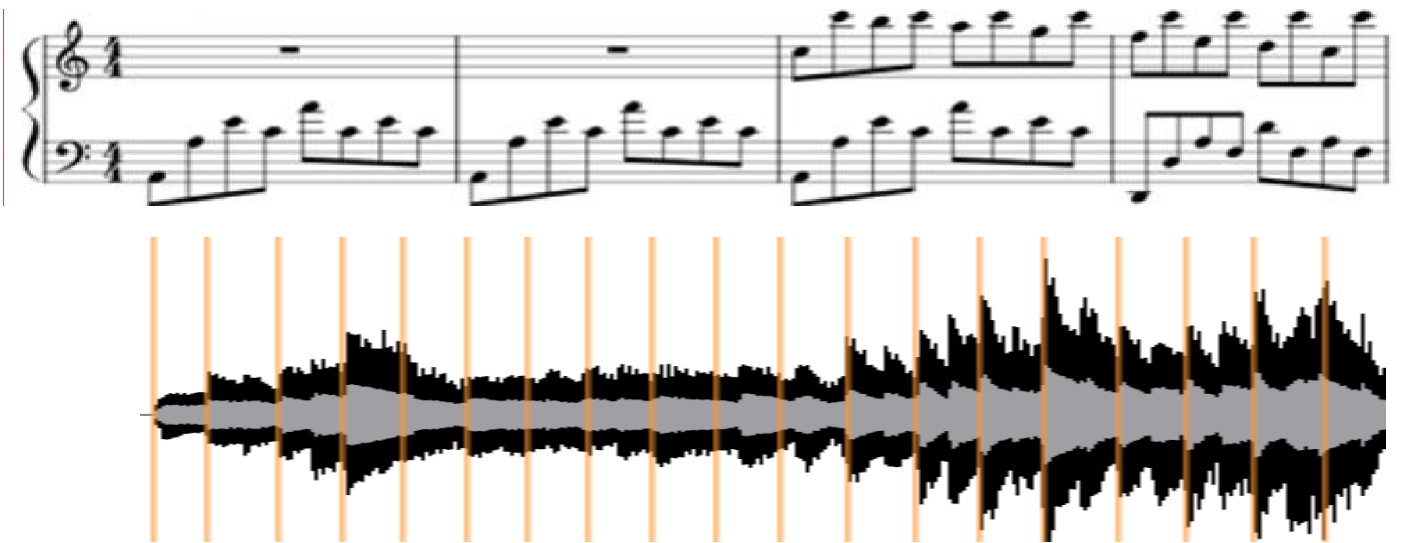
**Σχήμα 4.18**

### **β) Τοπικές εκφραστικές εναλλαγές tempo**

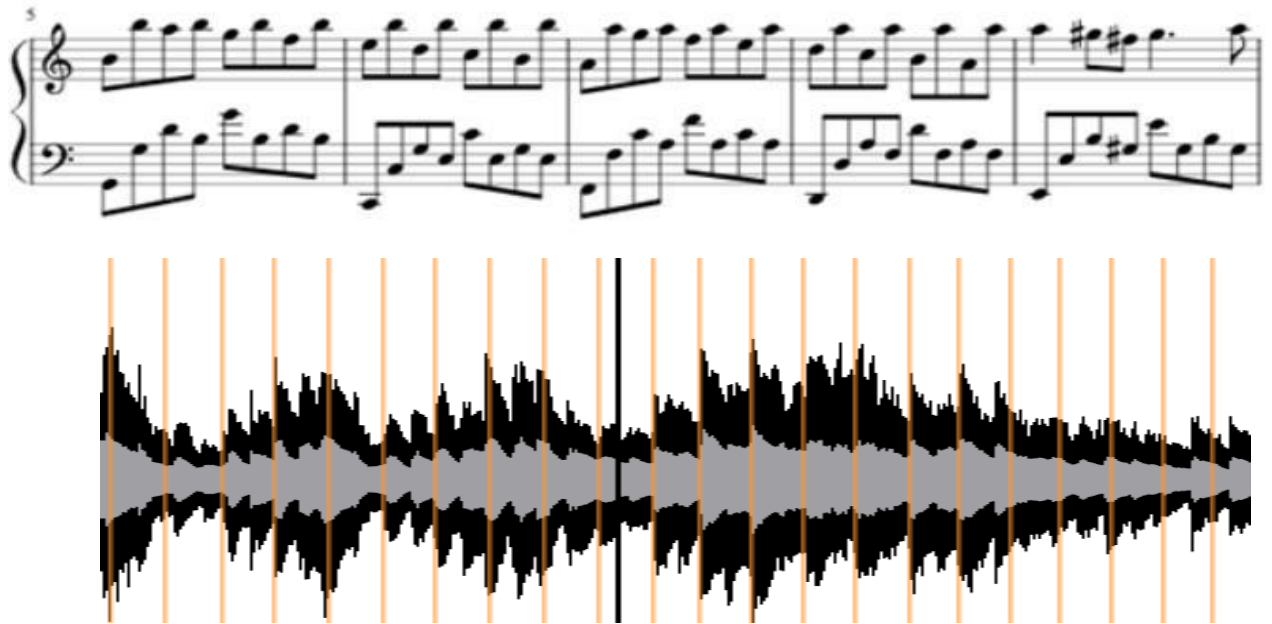
Το κομμάτι «**Passacaglia**» ([link](#)), είναι ένα μουσικό έργο που βασίζεται στο τελευταίο μέρος της σουίτας για τσέμπαλο σε σολ ελάσσονα, HWV 432, του Handel. Ωστόσο, έγινε ακόμη πιο δημοφιλές όταν του δόθηκε νέα πνοή από τον Νορβηγό συνθέτη Johan Halvorsen που δημοσίευσε το 1893 μια ρομαντική διασκευή για βιόλα και βιολί. Μέχρι και σήμερα, η εκδοχή του Halvorsen είναι εξαιρετικά δημοφιλής. Το απόσπασμα 1' της διασκευής που θα χρησιμοποιήσουμε στην εργασία είναι solo πιάνο με ρυθμική αγωγή 4/4.

Ξεκινώντας με το εργαλείο Bar and Beat Tracker Beats, με σταθερές παραμέτρους Beats per bar=4, Alpha= =0,9 και Tempo Hint = 100 BPM, βλέπουμε από την αρχή του κομματιού, πως ο Tracker αδυνατεί να βρει σταθερά τον χτύπο. Σε μερικά σημεία

μπορεί να τον εντοπίζει σωστά, ενώ σε άλλα τον χάνει. Αυτό συμβαίνει διότι το κομμάτι είναι πολύ εκφραστικό και ο ερμηνευτής έχει την ελευθερία και δυνατότητα να αλλάζει τοπικά το tempo, ανάλογα με το φρασάρισμα και την προσωπική του επιθυμία (σχήμα 4.19 και 4.20).

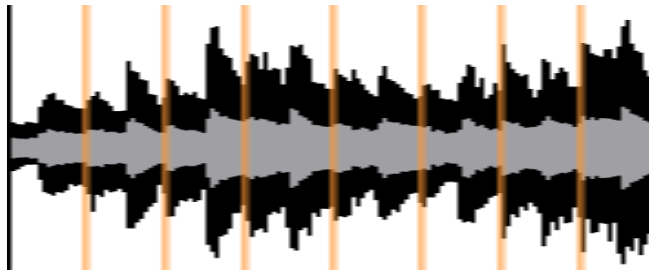


Σχήμα 4.19

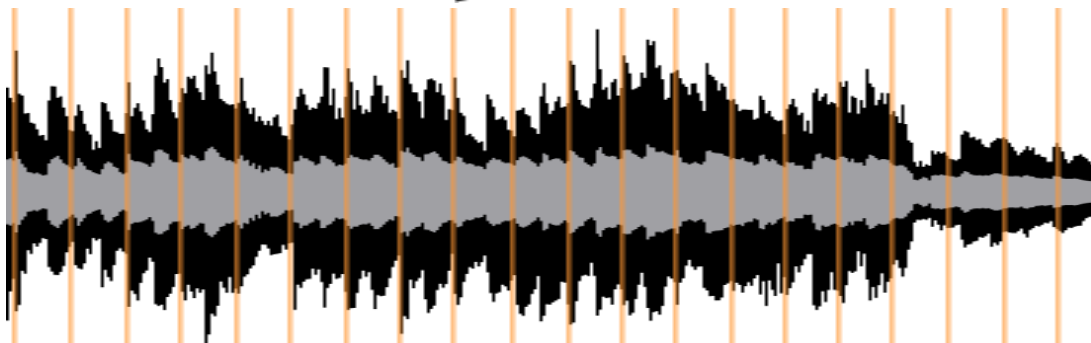


Σχήμα 4.20

Στα τελευταία μέτρα του αποσπάσματος του κομματιού ο tracker εντοπίζει σωστά τον παλμό και αυτό οφείλεται στη σταθερότητα του ερμηνευτή.



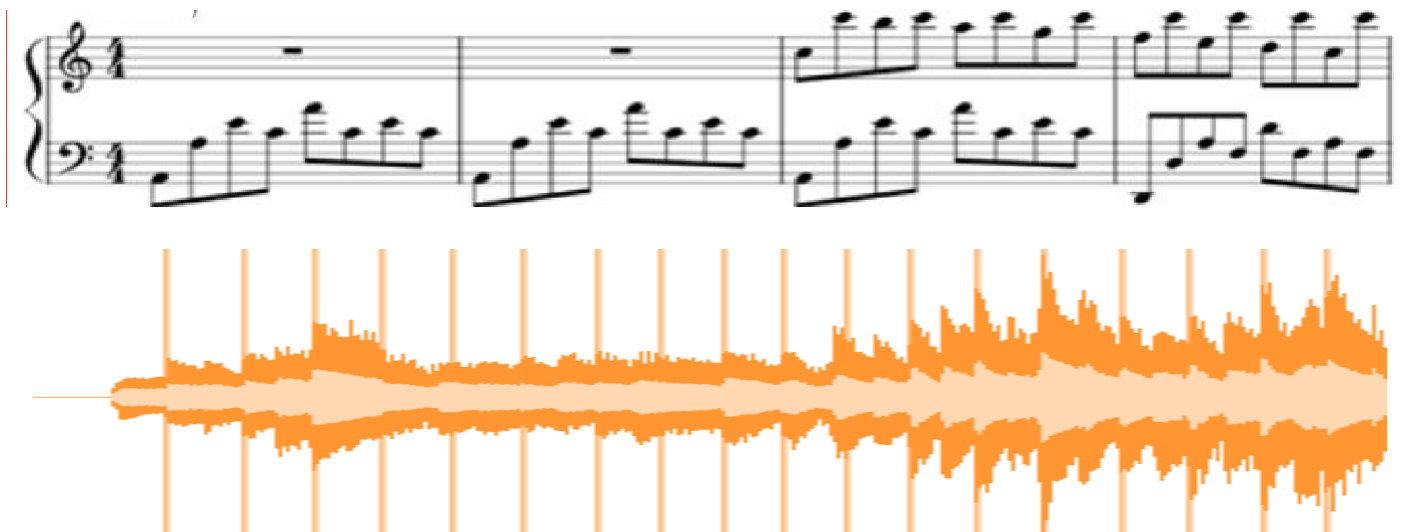
Σχήμα 4.21



Σχήμα 4.22

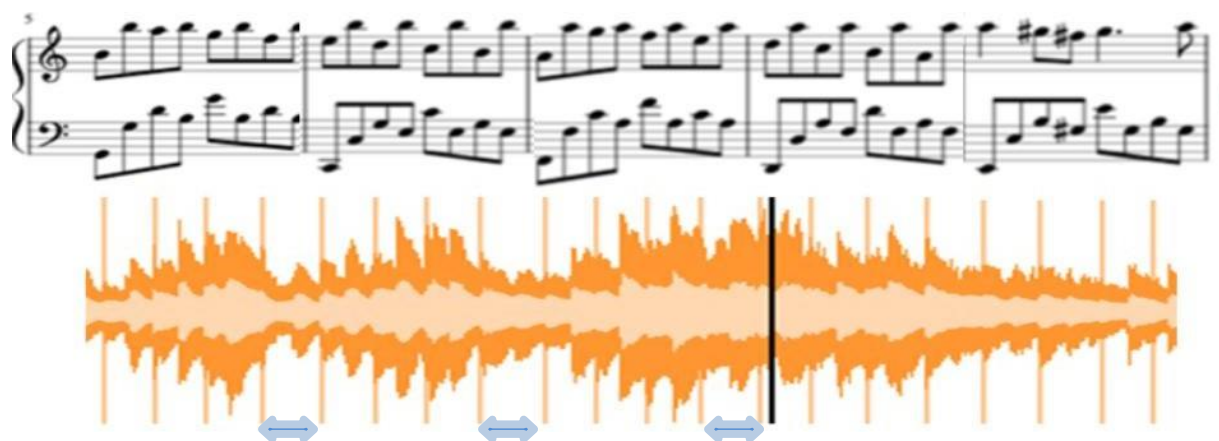
Σε ένα γενικό πλαίσιο, στα περισσότερα κομμάτια τα οποία είναι σόλο αντιμετωπίζει ο tracker παρόμοια προβλήματα, αφού η εκφραστικότητα του κάθε ερμηνευτή σε συνδυασμό με τις εγγραφόμενες ή και μη διαβαθμίσεις της ταχύτητας επηρεάζουν το tempo.

Ας περάσουμε στο BeatRoot Beat Tracker ξεκινώντας πάλι από τα πρώτα μέτρα του αποσπάσματος. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η προσπάθεια του tracker για την εύρεση του παλμού, η οποία δεν είναι επιτυχημένη.



**Σχήμα 4.23**

Στα επόμενα μέτρα όμως το BeatRoot εντοπίζει τον παλμό και καταφέρνει να τον κρατήσει σταθερό για κάποια μέτρα, χωρίς να εμφανιστεί κάποιο στιγμιαίο λάθος. Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε την επιτυχή ανίχνευση του παλμού και την απρόσμενη ευελιξία του BeatRoot στο συγκεκριμένο απόσπασμα. Τα μπλε βελάκια δείχνουν αυτήν την ευελιξία του tracker διότι σε αυτά τα σημεία ο ερμηνευτής κάνει συνεχώς μία μικρή εκφραστική επιβράδυνση.



**Σχήμα 4.24**

Στα επόμενα μέτρα ο tracker εντοπίζει σωστά τον παλμό εκτός από κάποια μικρά σε διάρκεια σημεία (ενός μέτρου) τα οποία είναι οι πτώσεις στο μέτρο 10 και 18 στα οποία εντοπίζεται και πάλι μία εκφραστική επιβράδυνση.

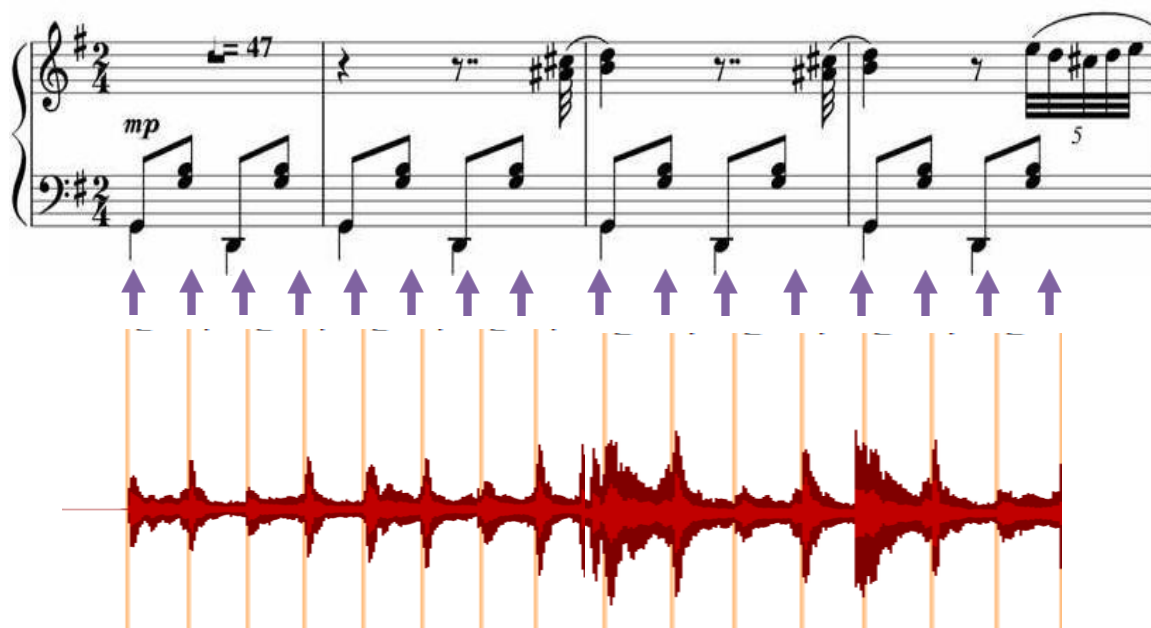
Τέλος, από το μέτρο 21 έως το μέτρο 25 ο παλμός, ενώ εντοπίζεται σωστά δεν είναι ακριβώς πάνω στην ατάκα της κυρίαρχης νότας αφήνοντας μία μικρή αστάθεια η οποία είναι δύσκολο να απεικονιστεί.

### γ) Σταδιακές αλλαγές tempo:

Σε αυτήν την κατηγορία εξετάζονται τα κομμάτια τα οποία ξεκινάνε με ένα αρχικό tempo, και στη συνέχεια αυτό αυξάνεται ή μειώνεται ομαλά.

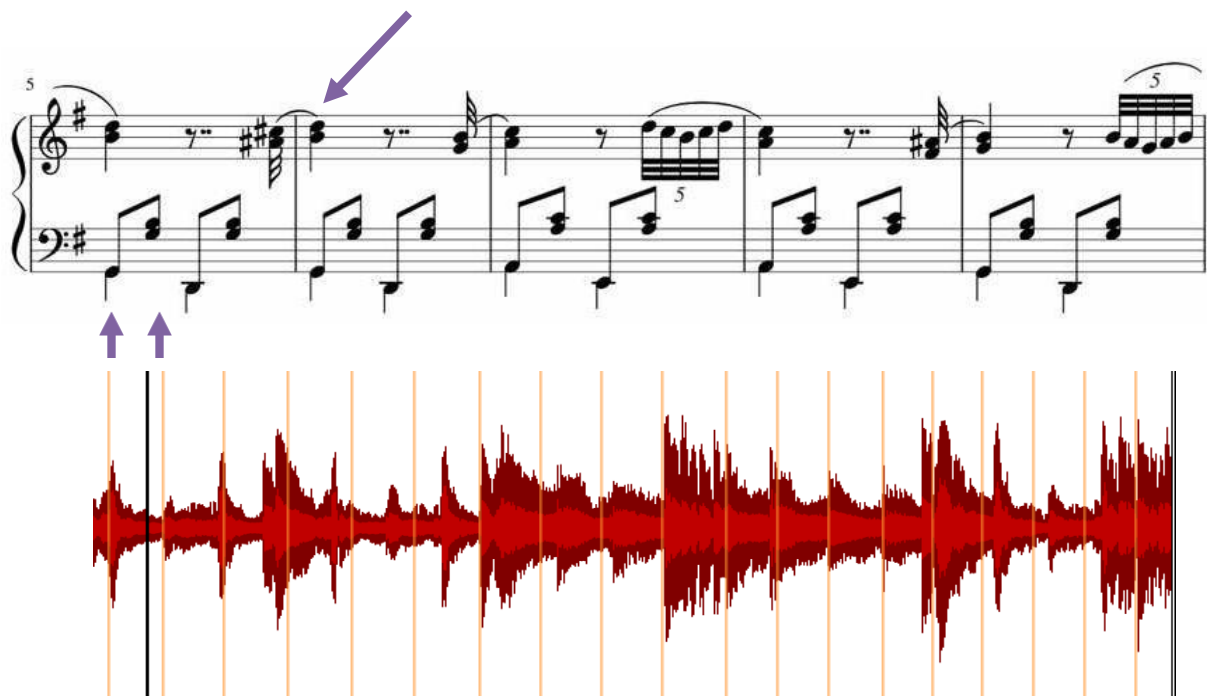
Το κομμάτι «Χορός του Ζορμπά»([link](#)) είναι ένα πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα για να επαληθευτεί η παραπάνω πρόταση. Ο Χορός του Ζορμπά είναι μια ορχηστρική σύνθεση του Μίκη Θεοδωράκη, η οποία συμπεριλήφθηκε στο δίσκο με τη μουσική που επένδυσε την ταινία «Αλέξης Ζορμπάς» (ή «Ζορμπάς ο Έλληνας», 1964), η οποία κυκλοφόρησε το 1965. Το κομμάτι έχει σταθερό μέτρο 2/4.

Ας ξεκινήσουμε χρησιμοποιώντας το Bar and Beat Tracker Beats με το Beats per Bar να ισούται με 2, το Alpha με 0.1 και το Tempo hint με 120.

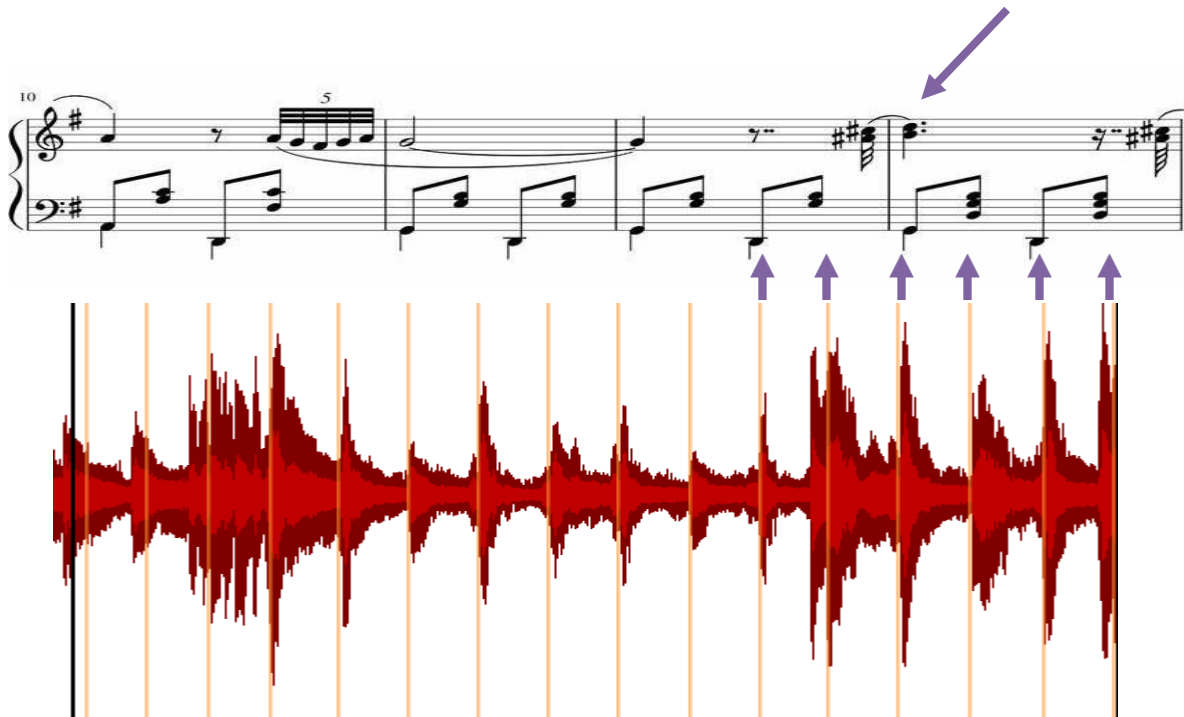


**Σχήμα 4.25**

Παραπάνω βλέπουμε τα πρώτα μέτρα του κομματιού, όπου ο παλμός εντοπίζεται σταθερά χωρίς κάποιο πρόβλημα. Στα επόμενα μέτρα όμως, και πιο συγκεκριμένα στο μέτρο 5 προς 6 και 13' δευτερόλεπτο, ο tracker χάνει τον παλμό και προσπαθεί να τον ξαναβρεί. Ο λόγος που το χάνει είναι η μικρή καθυστέρηση που κάνει το μπουζούκι στο σημείο του 64<sup>ου</sup> προς το τέταρτο, έτσι όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα(4.26). Ο tracker βρίσκει ξανά σωστά τον παλμό στο μέτρο 12 στο 28'(σχήμα 4.27)

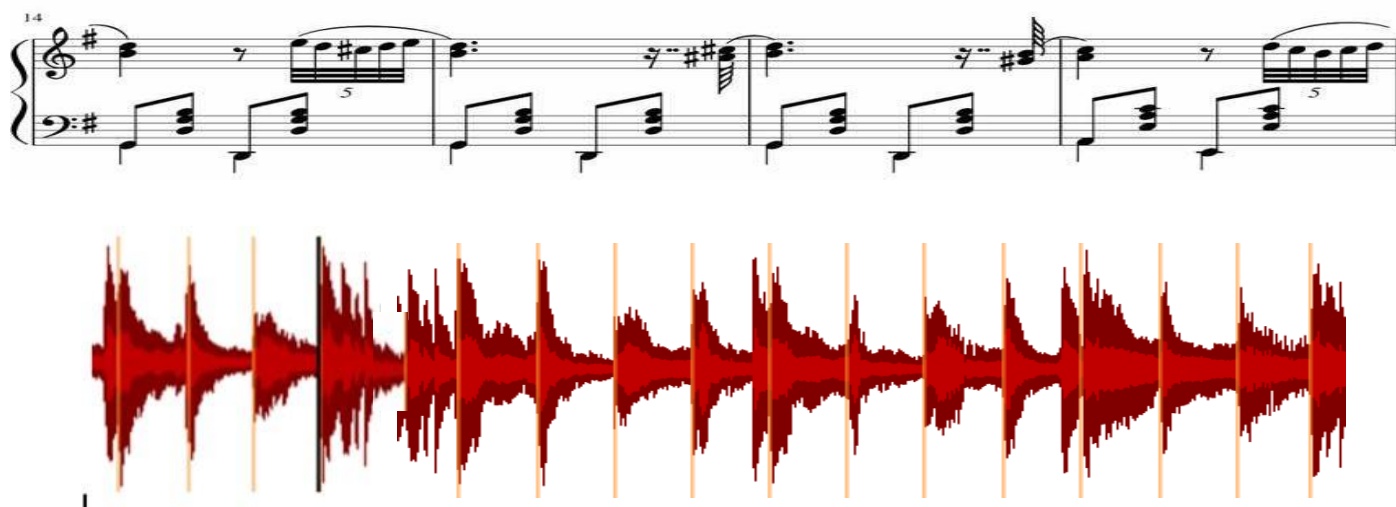


**Σχήμα 4.26**

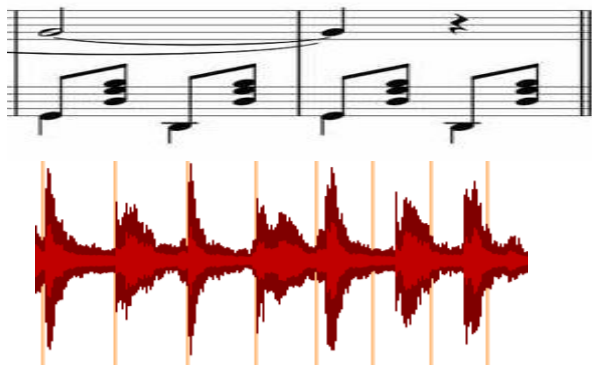


**Σχήμα 4.27**

Στο υπόλοιπο κομμάτι ο παλμός είναι σταθερός όπως απεικονίζεται παρακάτω, εκτός από δύο δευτερόλεπτα μεταξύ 52<sup>ου</sup> με 54<sup>ου</sup> δευτερολέπτου στα μέτρα 21 και 22. ( Σχήμα 4.29) Αυτό συμβαίνει γιατί ο tracker προσπαθεί να εισέλθει ομαλά στο νέο tempo του κομματιού.

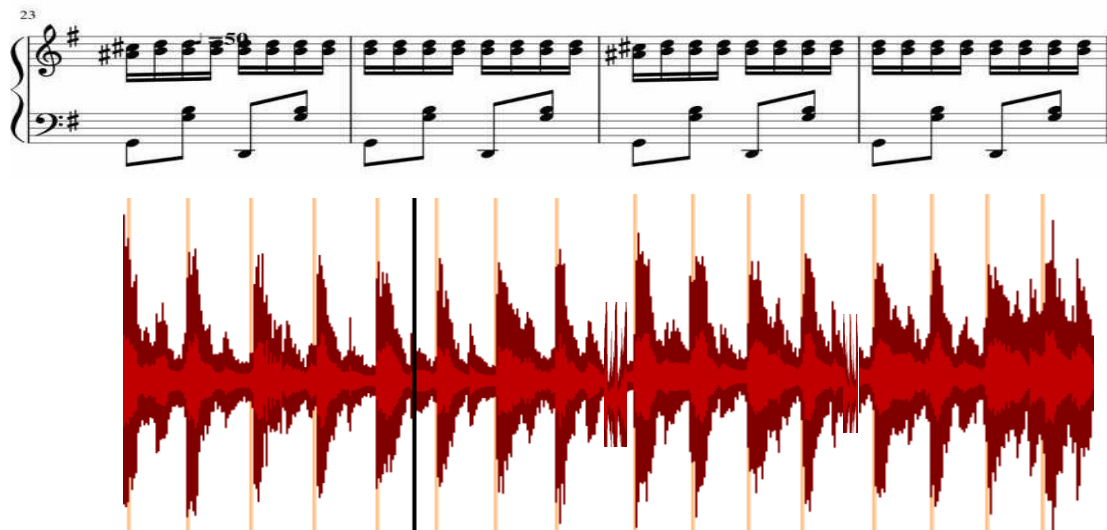


**Σχήμα 4.28**



**Σχήμα 4.29**

Στα επόμενα μέτρα ξεκινά η ομαλή επιτάχυνση του κομματιού και ο tracker κρατάει σταθερά τον παλμό. Η ευελιξία του Bar and Beat Tracker Beats επιβεβαιώνεται για ακόμα μια φορά.



**Σχήμα 4.30**

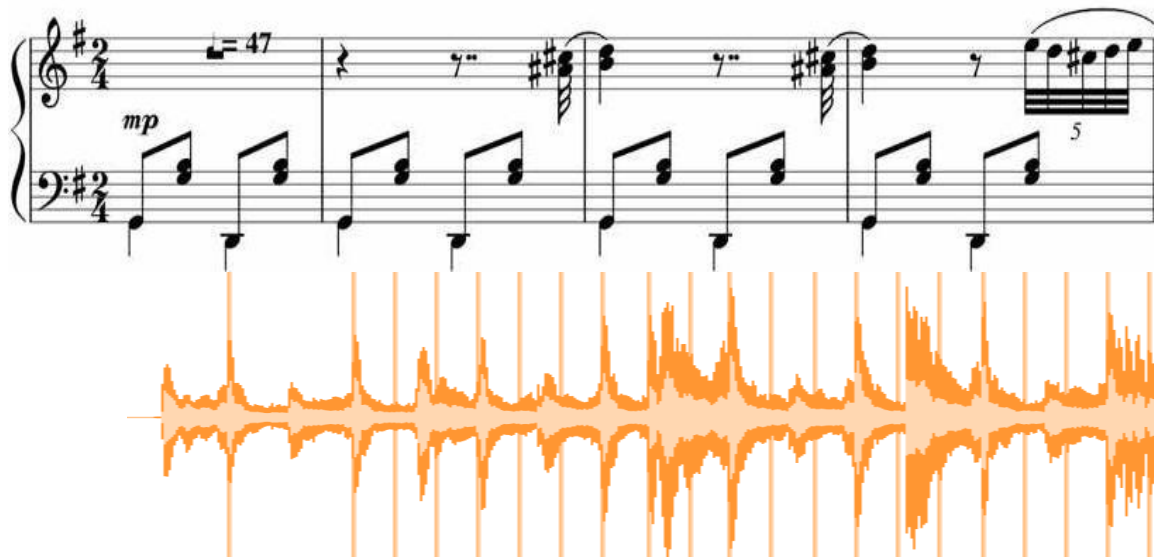
Περνώντας στο BeatRoot Beat Tracker βλέπουμε πως αδυνατεί να βρει σωστά τον παλμό του κομματιού. Αυτό συμβαίνει μέχρι το μέτρο 23. Όπως έχει προαναφερθεί, σε προηγούμενο κεφάλαιο το BeatRoot στη φάση της ανίχνευση του παλμού (beat tracking), υπολογίζει πιθανά tempo με βάση τα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στις ατάκες των νοτών (*onsets*). Για κάθε πιθανό tempo και αρχική φάση δημιουργείται ένας πράκτορας. Ο κάθε πράκτορας προβλέπει πού αναμένονται οι επόμενοι χτύποι και ελέγχει αν συμπίπτουν με πραγματικά *onsets*. Χρησιμοποιεί παράθυρα περιθωρίου για να κρίνει αν οι προβλέψεις του είναι επιτυχημένες ή όχι. Αν οι προβλέψεις του ταιριάζουν καλά με τα δεδομένα, ο πράκτορας ενισχύεται. Αν όχι, απορρίπτεται.

Καθώς εξελίσσεται η μουσική, οι πράκτορες προσαρμόζουν τις προβλέψεις τους. Το σύστημα μπορεί να δημιουργήσει νέους πράκτορες για νέες υποθέσεις ή να απορρίψει εκείνους που δεν αποδίδουν καλά.

Τελικά, επιλέγεται ο πράκτορας με τις πιο ακριβείς προβλέψεις, ο οποίος δίνει και τη βέλτιστη σειρά χτύπων. Με αυτόν τον τρόπο, το BeatRoot εντοπίζει τον ρυθμό με ακρίβεια ακόμη και σε εκφραστικές ή ελεύθερες ερμηνείες χωρίς όμως πάντα να είναι σωστό, αφού όταν υπάρχει συστηματική σταδιακή αλλαγή, επιλέγει έναν συνολικό πράκτορα ο οποίος είναι βέλτιστος για όλο το κομμάτι.

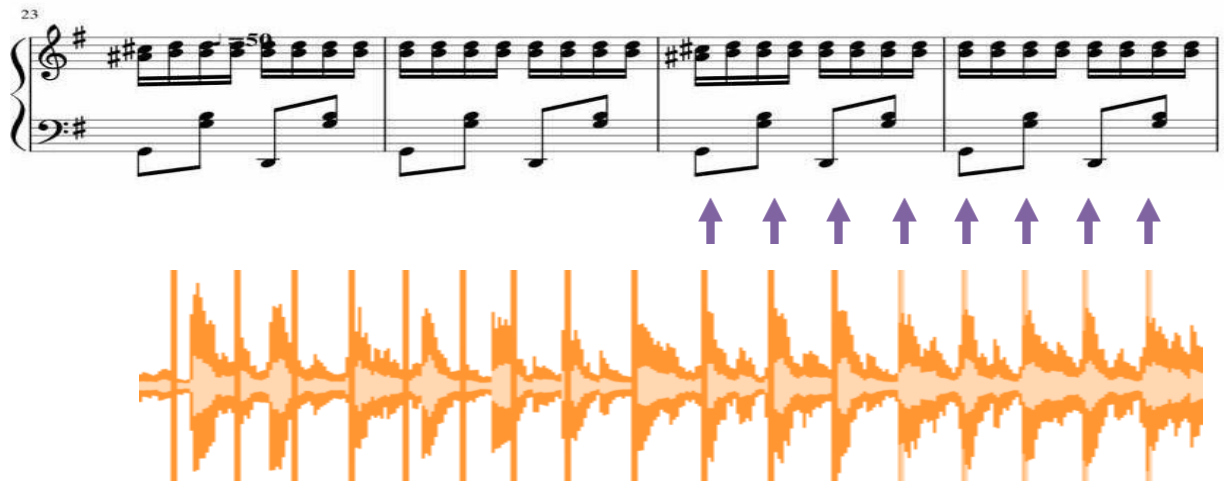
Με άλλα λόγια, το BeatRoot βρίσκει το μέσο όρο των χτύπων που ξεχωρίζουν σε όλη τη διάρκεια του κομματιού και με αυτό το γνώμονα κρατάει σταθερά το χτύπο σε όλο το κομμάτι.

Άρα στο συγκεκριμένο κομμάτι του Ζορμπά είναι αναμενόμενο να μην μπορεί ο tracker να εντοπίσει σωστά τον παλμό σε όλο το κομμάτι, αφού το tempo δεν παραμένει σταθερό και αυξάνεται σταδιακά.



**Σχήμα 4.31**

Από το μέτρο 25 και μετά το BeatRoot εντοπίζει σωστά τον παλμό διότι, χρησιμοποιεί τη συγκεκριμένη τιμή tempo ως χτύπο, η οποία εμφανίζεται από αυτό το σημείο του κομματιού και έπειτα.



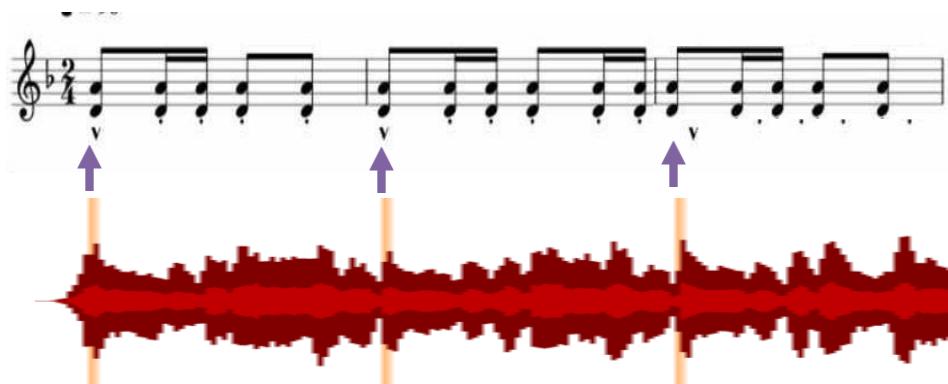
**Σχήμα 4.32**

### 4.1.2 Εξαγωγή μέτρον: *Bar and Beat Tracker Bars*

Σε αυτή την ενότητα θα εξετάσουμε κάποια κομμάτια που ήδη έχουμε χρησιμοποιήσει, σε συνδυασμό με νέες προσθήκες ώστε να εξετάσουμε τα σφάλματα ή και μη που μπορεί να παρουσιάσει το Bar and Beat Tracker Bars, ο οποίος είναι σχεδιασμένος για να ανιχνεύει τη θέση στο μέτρο των κομματιών.

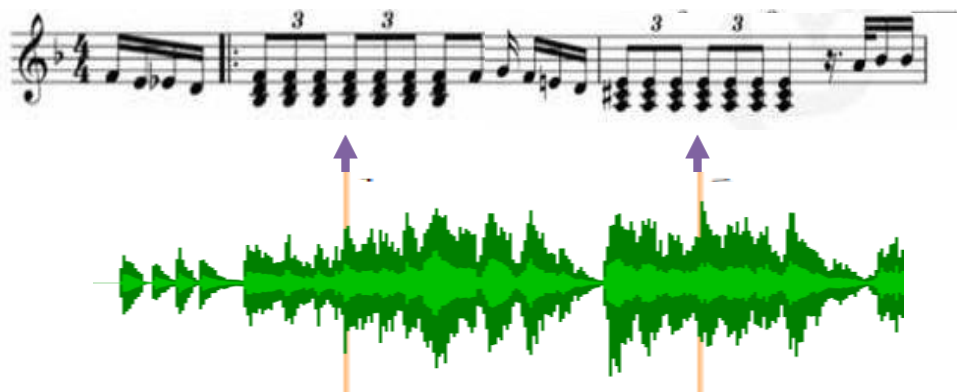
#### α) Σταθερή μετρική δομή:

Το πρώτο κομμάτι είναι ο «**Ικαριώτικος**». Εφαρμόζοντας το Bar and Beat Tracker Bars, με σταθερές παραμέτρους Beats per bar=2, Alpha= 0,980 και Tempo Hint = 120 BPM, αντιλαμβανόμαστε πως το εργαλείο μας βρίσκει σταθερά τον χτύπο σε χρόνο μισού καθ' όλη τη διάρκεια του κομματιού, δηλαδή στον ισχυρό χρόνο κάθε μέτρου.



**Σχήμα 4.33**

Έπειτα το επόμενο κομμάτι είναι το «**Αχάριστη**», Beats per bar=4, Alpha= 0,83 και Tempo Hint = 120 BPM με το αποτέλεσμα αυτού να μην είναι αυτό που θα περιμέναμε σε ένα κομμάτι με απλό μέτρο 4/4. Από την αρχή του κομματιού το εργαλείο αδυνατεί να βρει το μέτρο σε όλο το κομμάτι.



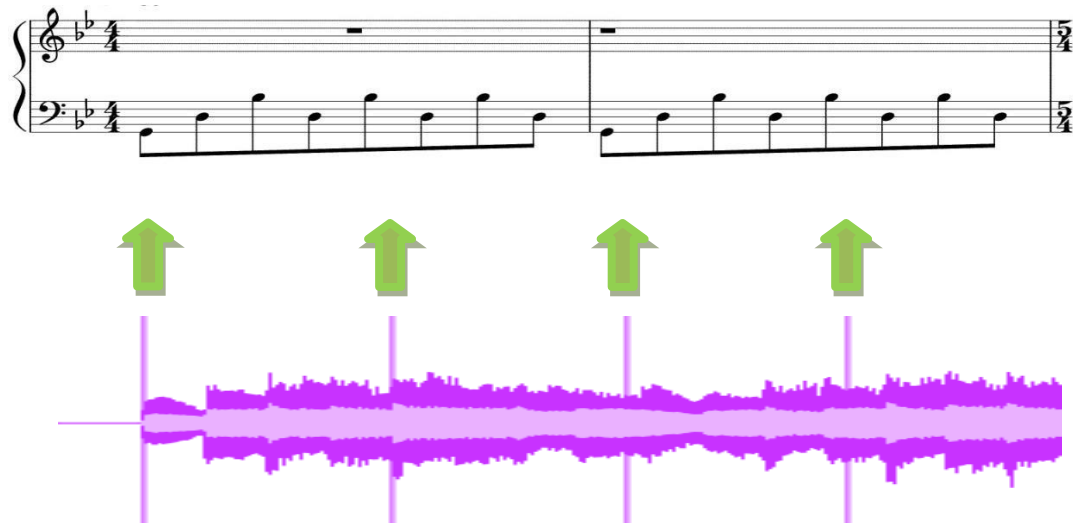
**Σχήμα 4.34**

**β) Συνεχής εναλλαγή ρυθμικής αγωγής:**

Το επόμενο κομμάτι είναι το «**Mariage d’amour**» ([link](#)). Το κομμάτι αυτό είναι ένα σόλο πιάνου που συνέθεσε ο Γάλλος Paul de Senneville το 1978 και ερμηνεύτηκε για πρώτη φορά από τον πιανίστα Richard Clayderman. Είναι ένα ρομαντικό βαλς με πολλαπλές εναλλαγές μέτρου, εμπεριέχοντας συγχρόνως και σύνθετο ρυθμό. Το κομμάτι ξεκινάει με 4/4 στα δύο πρώτα μέτρα, ενώ στο τρίτο μέτρο η μετρική ένδειξη γίνεται 5/4 και στο τέταρτο μέτρο επιστρέφει πάλι στα 4/4. Οι εναλλαγές αυτές είναι συνεχείς και αξιοσημείωτη είναι η εναλλαγή από 5/4 σε 3/4 (μέτρο 10) και στο επόμενο μέτρο η μετρική ένδειξη γίνεται 4/4 όπου παραμένει σταθερή μέχρι το μέτρο 20. Οι παραπάνω συνεχείς εναλλαγές μετρικής ένδειξης σε συνδυασμό με το ύφος του μουσικού κομματιού και τις διαβαθμίσεις της ταχύτητας, δημιουργούν δυσκολίες στα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση του παλμού. Πιο συγκεκριμένα, στο 11<sup>ο</sup> μέτρο του κομματιού υπάρχει ένα ritartando το οποίο είναι πολύ χαρακτηριστικό και θα αναλυθεί παρακάτω.

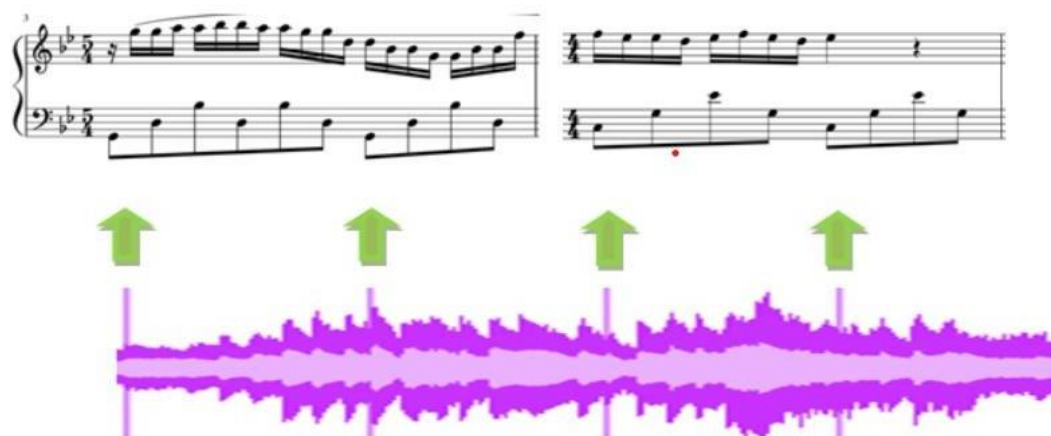
Στις ακόλουθες εικόνες βλέπουμε την παρτιτούρα του κομματιού σε συνδυασμό με την κυματομορφή που δημιουργείται εάν χρησιμοποιήσουμε το εργαλείο Bar and Beat Tracker Bars στο Sonic Visualiser με Beats per bar=4, Alpha= 0,170 και Tempo Hint = 120 BPM. Τα πράσινα βέλη σε συνδυασμό με τις κάθετες μωβ γραμμές απεικονίζουν το χτύπο που έφερε ως αποτέλεσμα το Bar and Beat Tracker Bars. Από τις παρακάτω εικόνες μπορούμε να αντιληφθούμε ότι από την αρχή του κομματιού το

Bar and Beat Tracker Bars μπορεί να εντοπίσει τον παλμό του κομματιού.



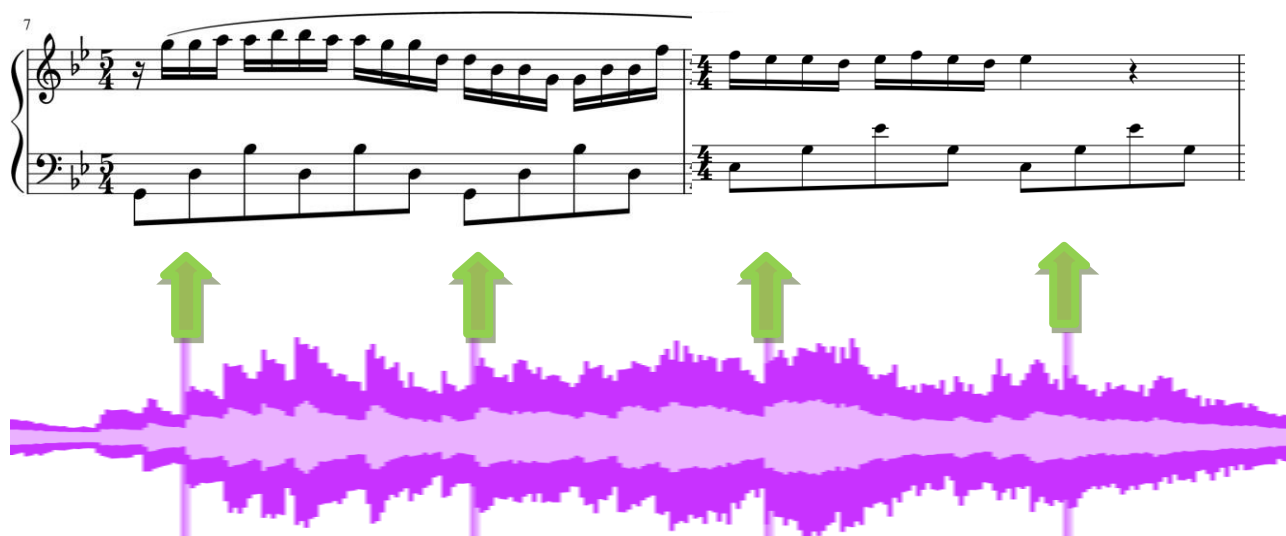
**Σχήμα 4.35**

Στα επόμενα δύο μέτρα η ρυθμική αγωγή από απλή γίνεται σύνθετη στα 5/4. Ο tracker καταφέρνει να εντοπίσει τα σύνθετα μέτρα και αυτό απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 4.36**

Στη συνέχεια του κομματιού, μετά το 6<sup>ο</sup> μέτρο, ο ερμηνευτής μουσικός πραγματοποιεί μια άγραφη προσωπική “καθυστέρηση”, κάτι το οποίο είναι σύνηθες στα ρομαντικά κομμάτια. Η μικρή αυτή καθυστέρηση έχει ως αποτέλεσμα τη μη σωστή λειτουργία του εργαλείου. Σε αυτό το σημείο το πρόγραμμα εντοπίζει τον ισχυρό πρώτο χρόνο του μέτρου με καθυστέρηση ενός δεκάτου έκτου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αναλυτικά.



**Σχήμα 4.37**

Επίσης, στα μέτρα 9,10 και 11 ο παλμός του κομματιού που εντοπίζει το Sonic Visualiser συνεχίζει να είναι λανθασμένος λόγω της εναλλαγής της μετρικής ένδειξης από 4/4 σε 3/4. παλμό.



**Σχήμα 4.38**

### γ) Ασύμμετροι ρυθμοί:

Το «**Take five**» ([link](#)) είναι ένα κομμάτι που συνέθεσε ο Paul Desmond , η έμπνευση όμως πίσω από αυτό ανήκει αναμφίβολα στον Dave Brubeck. Το 1959, ο Brubeck συνέλαβε την ιδέα και την υλοποίησε με το κουαρτέτο του στο άλμπουμ Time Out. (Leonardo Ravera) Αυτό το άλμπουμ ξεχώρισε για τα ασυνήθιστα μέτρα του, αμφισβητώντας την παραδοσιακή προσέγγιση της τζαζ, η οποία βασιζόταν κυρίως στο 4/4 και περιστασιακά στο 3/4 του τζαζ βαλς. Στο Take Five, μετά την παρουσίαση του θέματος και το σόλο του σαξοφώνου από τον Desmond, το πιάνο αναλαμβάνει να διατηρεί σταθερό το ρυθμό μέσω ενός επαναλαμβανόμενου vamp. Αυτή η ρυθμική βάση στηρίζει το εκτενές σόλο των ντραμς, το οποίο διαρκεί περισσότερο από το διπλάσιο του σόλο του σαξοφώνου και καταλαμβάνει πάνω από το μισό του κομματιού. Αυτή η αντιστροφή ρόλων, με το πιάνο να συνοδεύει ρυθμικά και τα ντραμς να αναλαμβάνουν τον πρωταγωνιστικό ρόλο, αντικατοπτρίζει τη δημιουργικότητα και την πειραματική διάθεση του κουαρτέτου.

Το Take Five δεν είναι απλώς ένα επιτυχημένο μουσικό κομμάτι, αλλά και μια εμβληματική χρήση του μέτρου 5/4. Η πιανιστική συνοδεία και οι μετρημένες, ακριβείς φράσεις του σαξοφώνου επιτρέπουν στον ακροατή να αντιληφθεί εύκολα τη ρυθμική δομή και να "μετρήσει" μέχρι το πέντε, ακολουθώντας τον μοναδικό παλμό του κομματιού. Ο τίτλος του κομματιού προΐδεάζει τον ακροατή για το ρυθμικό του "μυστικό", κάνοντάς τον συμμετοχο στην εμπειρία. Έτσι, το Take Five λειτουργεί όχι μόνο ως ένα καλλιτεχνικό επίτευγμα, αλλά και ως ένα σύντομο "μάθημα" σχετικά με το πεντάσημο μέτρο. (Leonardo Ravera )

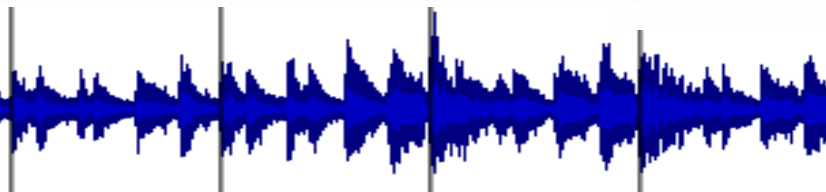
Εφαρμόζοντας το Bar and Beat Tracker Bars στο πρώτο λεπτό του Take Five με παραμέτρους, Beats per bar= 5, Alpha=0,550 και Tempo Hint=120 βλέπουμε τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Klavier



**Σχήμα 4.39**

Klavier



**Σχήμα 4.40**

A. Sax.

E<sup>b</sup>m B<sup>b</sup>m7 E<sup>b</sup>m B<sup>b</sup>m7 E<sup>b</sup>m B<sup>b</sup>m7

Klav.



**Σχήμα 4.41**

Στα παραπάνω σχήματα βλέπουμε πως το Bar and Beat Tracker Bars, ανιχνεύει με επιτυχία το μέτρο του Take 5, παρόλο που η ρυθμική του αγωγή είναι 5/4. Αυτό συμβαίνει διότι οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι κατάλληλες ώστε ο tracker να μπορεί να λειτουργήσει σωστά. Η βασική παράμετρος που είχε καθοριστικό ρόλο για αυτό το αποτέλεσμα είναι αυτή του Beats per Bar=5, η οποία δίνει εντολή στον tracker για το πόσα beats θέλουμε να έχουμε σε κάθε μέτρο. Με αυτόν τον τρόπο το βοηθάμε να αντιληφθεί τη ρυθμική αγωγή του κομματιού. Στο υπόλοιπο κομμάτι όπου το τέμπο είναι πιο ελεύθερο, ο Tracker δεν μπορεί να το εντοπίσει σωστά.

## ***4.2 Συμπεράσματα***

Το Bar and Beat Tracker όπως έχει προαναφερθεί στη σχετική ενότητα, είναι ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μοντέλα Markov και Bayesian inference για την παρακολούθηση των χτύπων και της μετρικής δομής. Στόχος του είναι η ταυτόχρονη ανίχνευση των χτύπων (beats) και των ορίων μέτρων (bars), επιτρέποντας την κατανόηση της μετρικής ιεραρχίας της μουσικής. Ο tracker αυτός, έχει σχεδιαστεί για να μπορεί να χειρίζεται είδη μουσικής με εκφραστικές και μη μετρονομικές ερμηνείες, όπως η κλασική μουσική και η μουσική με πολυρυθμία ή ρυθμική ασάφεια. Η ικανότητά του να προβλέπει τις εναλλαγές του tempo σε όλη τη διάρκεια ενός κομματιού και να μπορεί να προσαρμόζει τον χτύπο του ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες, είναι το σημαντικότερο πλεονέκτημά του.

Από την άλλη πλευρά, το BeatRoot Beat Tracker βασίζεται σε ένα σύστημα πολλαπλών πρακτόρων (multi-agent system), οι οποίοι αξιολογούν υποθέσεις σχετικά με το tempo και τη φάση, με βάση την ανίχνευση των onsets – δηλαδή τις χρονικές ατάκες όπου ξεκινάει ένας ήχος. Αν και έχει αποδειχθεί αποτελεσματικό σε πολλά μουσικά είδη, η απόδοσή του είναι σημαντικά καλύτερη σε μουσική με σταθερό ρυθμό, όπως pop-rock κομμάτια ή ηχογραφήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί με χρήση clicktrack, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Το BeatRoot λειτουργεί με τη λογική της σταθερής υπόθεσης: κάνει αρχικά μια εκτίμηση για το tempo και τη διατηρεί σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του κομματιού, χωρίς να επανεκτιμά αν προκύψουν αλλαγές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, σε κομμάτια με ρυθμική

μεταβλητότητα ή με έλλειψη έντονων ρυθμικών στοιχείων (όπως τύμπανα), να εμφανίζει χαμηλότερη ακρίβεια, όπως φάνηκε και στο παράδειγμα των ABBA με το «A Man After Midnight», όπου αδυνατεί να εντοπίσει τον παλμό μέχρι να εισαχθούν στο κομμάτι όλα τα όργανα μαζί.

Βέβαια, είναι αναγκαίο να σημειωθεί πως το BeatRoot κατάφερε να εντοπίσει τις εκφραστικές ελευθερίες του ερμηνευτή στο κομμάτι «Passacaglia» και αυτό είναι η απόδειξη πως όλα τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις που έγιναν σε αυτό το κεφάλαιο βασίζονται στο γενικό σύνολο των κομματιών, έχοντας βέβαια και εξαιρέσεις.

Επιπλέον, το Bar and Beat Tracker έχει τη δυνατότητα να προσαρμοστεί ακόμα και σε κομμάτια με ασύμμετρο ρυθμό, όπως για παράδειγμα το “Take Five”, το οποίο ήδη αναλύθηκε. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όμως, είναι απαραίτητο ο χρήστης να προβεί σε σωστή παραμετροποίηση του συστήματος (π.χ. ορισμός Beats per Bar = 5), ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Εάν ο χρήστης δεν χρησιμοποιήσει τις κατάλληλες παραμέτρους, το πιο πιθανό είναι πως δε θα έχει το ίδιο επιθυμητό αποτέλεσμα. Από την άλλη πλευρά, στο παράδειγμα του “Marriage d’amour”, παρατηρείται ότι, ενώ ο tracker μπορεί να ανταποκριθεί σε ορισμένα σημεία, οι συνεχείς εναλλαγές της ρυθμικής αγωγής καθιστούν δύσκολη τη συνεχή προσαρμογή του, φανερώνοντας τις δυσκολίες στην απόδοσή του όταν η μουσική χαρακτηρίζεται από έντονη και απρόβλεπτη εκφραστικότητα. Σε αυτό το παράδειγμα, ο χρήστης ότι αριθμό και αν δώσει στην παράμετρο beats per bar δε θα μπορέσει να ανταποκριθεί στις προσδοκίες του, αφού οι εναλλαγές της ρυθμικής δομής είναι συνεχής.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας το Bar and Beat Tracker Beats με το BeatRoot Beat Tracker θα καταλήξουμε εύκολα στο γεγονός πως το Bar and Beat Tracker Beats είναι ένας tracker με μεγαλύτερη ευελιξία και έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται στην εκάστοτε ρυθμική μεταβολή στη διάρκεια ενός κομματιού, έχοντας βέβαια και απρόσμενες εξαιρέσεις (Passacaglia) σε σχέση με το BeatRoot ο οποίος χρησιμοποιεί τον ίδιο γνώμονα στην διάρκεια ενός κομματιού, χωρίς διαφοροποιήσεις.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **ΕΛΛΗΝΙΚΗ**

Πάριος, Γ. (1982). *Ικαριώτικος* [Βίντεο]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=Roltz\\_Q\\_IQ4](https://www.youtube.com/watch?v=Roltz_Q_IQ4)

(accessed 06/06/2025)

Καμπουρόπουλος, Α. (2001). Αυτόματη Μελωδική ανάλυση με Υπολογιστικές Μεθόδους. *Μουσικός Λόγος*; 3 σελ 64-76.

Παπαδέλης, Γ. (2007). Ζητήματα αντίληψης του μουσικού ρυθμού. University Studio Press.

Σαρακατσιάνος Αντώνης (2004). Διπλωματική εργασία. *Προσδιορισμός Μετρικής Δομής* (Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Καλών Τεχνών. Τμήμα Μουσικών Σπουδών).

Σιδηράς Χρήστος (2007) . Διπλωματική εργασία. *Υπολογιστικά Μοντέλα Αντίληψης Ρυθμού*. (Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Καλών Τεχνών. Τμήμα Μουσικών Σπουδών).

Τσιτσάνης, Β. (1947). *Το Αχάριστη* [Τραγούδι]. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=JD6aRnEkAkM> (accessed 06/06/2025)

Τσούγκρας, Κ. (2002). *Γενετική θεωρία της τονικής μουσικής και τροπικότητα-έρευνα με βάση την ανάλυση του έργου: 44 παιδικά κομμάτια πάνω σε λαϊκούς ελληνικούς σκοπούς του Γιάννη Κωνσταντινίδη* (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Καλών Τεχνών. Τμήμα Μουσικών Σπουδών).

## ΕΕΝΗ

- ABBA. (2009). *Gimme! Gimme! Gimme! (A Man After Midnight)* [Βίντεο]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=XEjLoHdbVeE> (accessed 06/06/2025)
- Allen, P. E., & Dannenberg, R. B. (1990, September). Tracking musical beats in real time. In *ICMC*.
- Alonso, M., David, B., & Richard, G. (2004). Tempo and beat estimation of musical signals. *ISMIR Conference*.
- Benadon, F. (2004, January). Towards a theory of tempo modulation. 8th International Conference on Music Cognition and Perception (ICMCP8). (563-566).
- Bello, J. P., Daudet, L., Abdallah, S., Duxbury, C., Davies, M., & Sandler, M. B. (2005). A tutorial on onset detection in music signals. *IEEE Transactions on speech and audio processing*, 13(5), 1035-1047.
- Bouwer, F. L., Burgoyne, J. A., Odijk, D., Honing, H., & Grahn, J. A. (2018). What makes a rhythm complex? The influence of musical training and accent type on beat perception. *PLoS One*, 13(1).
- Brubeck Quartet, D. (1959). *Take Five* [Μουσικό κομμάτι]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=EFJ7kDva7JE> (accessed 06/06/2025)
- Chris Cannam, Christian Landone, and Mark Sandler, *Sonic Visualiser: An Open Source Application for Viewing, Analysing, and Annotating Music Audio Files*, in Proceedings of the ACM Multimedia 2010 International Conference, <https://www.sonicvisualiser.org/> (accessed 06/06/2025)
- Cannam, C., Figueira, L., Barthet, M., & Davies, M. (2020). *QM Vamp Plugins*. Centre for Digital Music, Queen Mary University of London. <https://github.com/c4dm/qm-vamp-plugins> (accessed 06/06/2025)
- Cooper, G. W., & Meyer, L. B. (1963). *The rhythmic structure of music*. University of

Chicago press.

Clayderman, R. (1979). *Mariage d'amour* [Μουσικό κομμάτι]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=EFJ7kDva7JE> (accessed 06/06/2025)

Dexter Hayes, *Exploring Rhythmic Elements: What is a Backbeat?*, Legacy Recording Studios, May 17, 2024, <https://www.legacyrecordingstudios.com/techniques/what-is-a-backbeat/> (accessed 06/06/2025)

Dixon, S. (2006). MIREX 2006 audio beat tracking evaluation: Beatroot. *MIREX 2006*, 27.

Dixon, S. (2001). Automatic extraction of tempo and beat from expressive performances. *Journal of New Music Research*, 30(1), 39-58.

Ellis, D. P. (2007). Beat tracking by dynamic programming. *Journal of New Music Research*, 36(1), 51-60.

Epstein, D. (1999). " Shaping Time: Music, the Brain, and Performance", a Response to William Rothstein. *Journal of Music Theory*, 43(1), 165-190.

Essens, P. (1995). Structuring temporal sequences: Comparison of models and factors of complexity. *Perception & Psychophysics*, 57, 519-532.

Fouloulis, A., Pikrakis, A., & Cambouropoulos, E. (2012). Asymmetric beat/tactus: Investigating the performance of beat-tracking systems on traditional asymmetric rhythms. In Proceedings of the Joint Conference ICMPC-ESCOM 2012.

Gouyon, F., Dixon, S., Pampalk, E., & Widmer, G. (2004). "Evaluating rhythmic descriptors for musical genre classification." *Proceedings of the AES 25th International Conference*.

Grosche, P., Müller, M., & Kurth, F. (2010). "Cyclic tempogram – A mid-level tempo representation for music signals." *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 5522–5525.

Handel, G. F. / Halvorsen, J. (2023). *Passacaglia* [Μουσικό κομμάτι]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=ApCL2GomTD4>(accessed 06/06/2025)

- Hayes, D. (2024, May 17). *What is the backbeat in music?* Hello Music Theory. <https://hellomusictheory.com/learn/backbeat/>
- Klapuri, A. (2006). Multiple temporal resolution analysis for rhythm tracking. *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, 14(1), 1–12.
- Knoll, J. C. (2006). *Prolongation, Expanding Variation, and Pitch Hierarchy: A Study of Fred Lerdahl's Waves and Coffin Hollow* (Master's thesis, Bowling Green State University).
- Leonardo Ravera (2013-2021) *Dave Brubeck and Paul Desmond, Take Five. An unexpected success.*
- Lerdahl, Fred, & Jackendoff, Ray S. (1983). *A Generative Theory of Tonal Music*, MIT press, Cambridge (Ma)
- London, J. (2004). *Hearing in time: Psychological aspects of musical meter*. Oxford University Press.
- Longuet-Higgins, H. C., & Lee, C. S. (1984). The rhythmic interpretation of monophonic music. *Music Perception*, 1(4), 424-441.
- Måneskin. (2021) *.Beggin* [Τραγούδι]. Σε *Chosen* [Άλμπουμ]. Youtube [.https://www.youtube.com/watch?v=W2MpGCL8-9o](https://www.youtube.com/watch?v=W2MpGCL8-9o) (accessed 06/06/2025)
- McGuiness, A. (2005). *Microtiming deviations in groove*. Australian National University.
- Povel, D. J., & Essens, P. (1985). Perception of temporal patterns. *Music perception*, 2(4), 411-440.
- Rothstein, W. N. (1989). Phrase rhythm in tonal music.
- Savage, P. E., Brown, S., Sakai, E., & Currie, T. E. (2015). Statistical universals reveal the structures and functions of human music. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(29), 8987-8992.
- Scheirer, E. (1998). Tempo and beat analysis of acoustic musical signals. *Journal of the*

*Acoustical Society of America.*

Schoenberg, A., Strang, G., & Stein, L. (1967). *Fundamentals of musical composition*. (Chaps. 3–4) St. Martin's Press.

Snyder, B. (2000). *Music and memory: An introduction*. MIT press.

Tzanetakis, G., & Cook, P. (2002). *Musical genre classification of audio signals*.