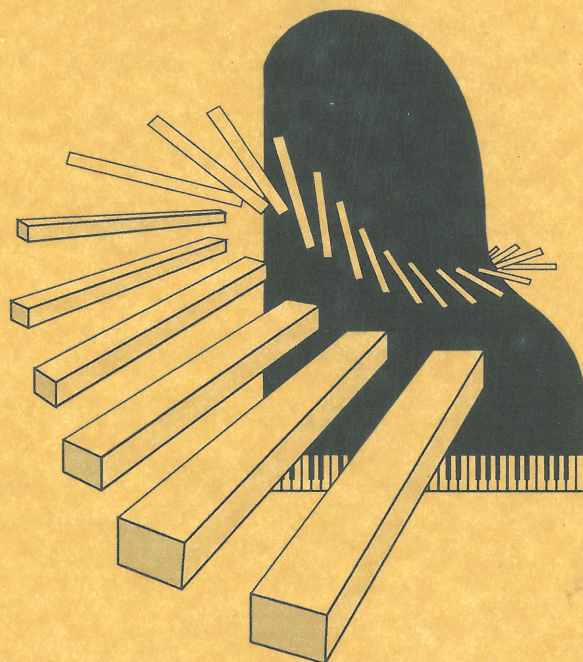


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΚΑΛΩΝ ΤΕΧΝΩΝ-ΤΜΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Δ Ι Π Λ Ω Μ Α Τ Ι Κ Η Ε Ρ Γ Α Σ Ι Α

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ  
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΟΝΙΚΟΤΗΤΑΣ  
ΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΤΩΝ LONGUET-HIGGINS  
ΚΑΙ KRUMHANSL**



*Διπλωματική εργασία του φοιτητή του Τ.Μ.Σ.: ΑΪΒΑΖΟΓΛΟΥ ΙΩΑΝΝΗ*

*Επιβλέπων Καθηγητής : ΑΙΜΙΛΙΟΣ ΚΑΜΠΟΥΡΟΠΟΥΛΟΣ, λέκτορας του Τ.Μ.Σ*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2006

---

---

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

---

|                |           |
|----------------|-----------|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ ..... | Σελ.<br>1 |
|----------------|-----------|

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

#### *ΤΟΝΙΚΟΤΗΤΑ-ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΚΑΙ ΓΝΩΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ*

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.1   | Ιστορικό πλαίσιο τονικότητας, .....                          | 2  |
| 1.2   | Τονικότητα στο γνωστικό επίπεδο .....                        | 3  |
| 1.2.1 | Ψυχολογικές Δεσμεύσεις την Σύνταξη Τονικών Κλιμάκων .....    | 5  |
| 1.3   | Τονική Αρμονική Μουσική - Βασικά χαρακτηριστικά .....        | 7  |
| 1.3.1 | Η τονική ιεραρχία .....                                      | 7  |
| 1.4   | Τονικές τάξεις – Μοντέλα αναπαράστασης τονικών στοιχείων ... | 10 |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

#### *Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ LONGUET – HIGGINS & STEEDMAN*

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Βάση και βήματα αλγόριθμου .....                          | 12 |
| 2.2 | Ελάσσονα τονικότητα-Μελωδική σύμβαση .....                | 15 |
| 2.3 | Κανόνας ημιτονίου .....                                   | 19 |
| 2.4 | Κριτική στον αλγόριθμο Longuet-Higgins και Steedman ..... | 21 |
| 2.5 | Σύνοψη .....  | 21 |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

#### *ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ KRUMHANSL & KESSLER*

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 3.1 | Γενική περιγραφή του αλγόριθμου .....   | 23 |
| 3.2 | Η τεχνική των φθόγγων διερεύνησης ..... | 23 |
| 3.3 | Μαθηματική περιγραφή αλγόριθμου .....   | 28 |

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

#### *ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ LONGUET HIGGINS & KRUMHANSL*

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.1 | Εισαγωγή .....  | 30 |
| 4.2 | Εφαρμογή των αλγορίθμων Longuet – Higgins και Krumhansl ... | 31 |
| 4.3 | Συμπεράσματα .....  | 48 |

|                    |    |
|--------------------|----|
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ..... | 50 |
|--------------------|----|

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί, εντάσσεται στα πλαίσια του κλάδου της υπολογιστικής και γνωσιακής μουσικολογίας και μελετά την έννοια της τονικότητας στο πλαίσιο αυτό.

Το θέμα της παρούσας εργασίας πραγματεύεται και αναλύει την λειτουργία και την αποτελεσματικότητα δύο αλγορίθμων αναφορικά με τον προσδιορισμό τονικότητας. Ο προσδιορισμός της τονικότητας, μαζί με διεργασίες όπως ο προσδιορισμός του αρμονικού ρυθμού και ο προσδιορισμός των θεμελίων συγχορδιών αποτελεί μία από τις βασικές διεργασίες της αρμονικής ανάλυσης. Η συστηματική περιγραφή της διαδικασίας του προσδιορισμού της τονικότητας ενός μουσικού αποσπάσματος από την οποία μπορεί να προκύψει ένας αλγόριθμος που μπορεί να εφαρμοστεί ως πρόγραμμα σε έναν Η/Υ αποτελεί επίκεντρο αυτής της εργασίας.

Με την ανάπτυξη του τομέα της μουσικής πληροφορικής το «παιχνίδι» των αριθμών σε σχέση με τη μουσική, γνωστό από την αρχαιότητα, πήρε νέα διάσταση μέσω νέων επιστημών όπως η γνωστική ψυχολογία και η τεχνητή νοημοσύνη. Η τονικότητα λοιπόν στο γνωστικό επίπεδο, το θέμα της παρούσης εργασίας, εξετάζει θεωρητικά τη συνοχή του τονικού υλικού και των αρμονικών σχέσεων αλλά και το πώς εκλαμβάνει ο κάθε ακροατής μέσω των αντιληπτικών μηχανισμών τις σχέσεις αυτές.

Αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω τον λέκτορα του Τμήματος Μουσικών Σπουδών του Α.Π.Θ., *Καμπουρόπουλο Αιμίλιο* για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθειά του που χωρίς αυτή θα ήταν αδύνατο να προχωρήσω στην σύνταξη της εργασίας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κλαίρη Πασσαλή και τον Φώτη Πασχαλούδη για την πολύτιμη συμβολή τους στην επιτυχή ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου.

M

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

# ΤΟΝΙΚΟΤΗΤΑ – ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΚΑΙ ΓΝΩΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

### 1.1. Ιστορικό Πλαίσιο Τονικότητας

Τονικότητα είναι η οργάνωση του τονικού υλικού δια του οποίου περισσότερο ή λιγότερο σημαντικά στοιχεία επιτρέπουν στη μουσική να εκφραστεί με τονική σαφήνεια στο χρόνο. Όλα τα συστήματα τονικότητας συγκλίνουν στην ιδέα ότι η μουσική εξελίσσεται, εξέλιξη η οποία συνήθως πραγματοποιείται μέσα από θεμελιώδη τονικά κέντρα τα οποία προσδιορίζουν τον ρόλο και την λειτουργία όλων των υπολοίπων διαθέσιμων φθόγγων μέσα σ' ένα έργο. Από το 1600 ως το 1900, στη μείζονα – ελάσσονα τονικότητα το τονικό υλικό και τελικώς το τονικό κέντρο διαμορφώνεται γύρω από τρεις βασικές συγχορδίες. Ο φθόγγος που βρίσκεται μια πέμπτη καθαρή πάνω από την τονική είναι ο δεύτερος πιο σημαντικός μετά την τονική, και, ο φθόγγος που βρίσκεται μια πέμπτη καθαρή κάτω από την τονική είναι ο επόμενος σημαντικότερος (στη Ντο μείζονα, οι φθόγγοι αυτοί είναι η τονική Ντο, η δεσπόζουσα Σολ και η υποδεσπόζουσα Φα). (Dunsby, 1983)

Η τονικότητα της μελωδίας στην Δυτική μουσική την περίοδο πριν τον 17<sup>ο</sup> αιώνα αποτελεί αντικείμενο συζήτησης. Ποικίλα τροπικά συστήματα έχουν περιγραφεί από θεωρητικούς του Μεσαίωνα. Γύρω στο 1600, μια περισσότερο ενοποιημένη γλώσσα στην Ευρωπαϊκή μουσική, βοήθησε στο να ξεχωρίσουν οι διαφορές μεταξύ των τρόπων, τονίζοντας την έννοια της μετατροπίας. Δύο τρόποι, ο Ιωνικός σε Ντο και ο Αιολικός σε Λα, γίνονται οι πιο συνήθεις σε χρήση. Η ιστορική εξέλιξη που συνδυάστηκε με την πρακτική του κουρδίσματος σε ίσα διαστήματα κατέληξε στο συγκεκριμένο σύστημα.

Ο όρος *τονικότητα* εμφανίστηκε για πρώτη φορά στα γαλλικά (tonalite) το 1821 από τους Castil-Blaze για να δηλώσει τις θεμελιώδεις νότες ενός κλειδιού: τονική, δεσπόζουσα, υποδεσπόζουσα. (Dahlhaus, 1980) Στη συνήθη του χρήση ο όρος τονικότητα δηλώνει, σε μια ευρύτερη χρήση, τις σχέσεις μεταξύ των τόνων και, πιο συγκεκριμένα, ένα σύστημα σχέσεων μεταξύ των τόνων, το οποίο έχει την τονική ως κεντρικό και πιο σημαντικό στοιχείο.

Τον 18<sup>ο</sup> αιώνα ο Rameau κωδικοποίησε την αρχή της αναστροφής: για κάθε κλειδί η τονικότητα θα μπορούσε να προσδιοριστεί με όρους μιας αλληλουχίας θεμελιωδών φθόγγων και των σχετικών τρίφωνων συγχορδιών τους, είτε ακούγεται η θεμέλιως στο μπάσο είτε όχι. (Dunsby, 1983)

Τον 19<sup>ο</sup> αιώνα ο Hugo Riemann πρότεινε την τονική, την υποδεσπόζουσα και την δεσπόζουσα ως βαθμίδες πρωτεύουσας σημασίας στην έκφραση και τον προσδιορισμό της τονικότητας. Το σημείο στο οποίο συγκλίνουν οι θεωρίες του Riemann και του Rameau θεσπίζει το πλαίσιο μιας θεμελιώδους λειτουργικής αρμονίας στο οποίο κάθε συγχορδία σχετίζεται άμεσα ή έμμεσα με την τονική, η οποία είναι η αρμονική βάση.

Σε αντιπαράθεση με τις παραπάνω θεωρίες, η μουσική που περιγράφει ο Schoenberg διατηρεί μια απόμακρη αίσθηση παραδοσιακών τονικών λειτουργιών, μέσα σ' ένα χρωματικό πλαίσιο διευρυμένης τονικότητας, πλαίσιο στο οποίο επικρατεί η άρνηση των εσωτερικών σχέσεων των φθόγγων. Επιπλέον, για πρώτη φορά έχουμε εισαγωγή του όρου «ατονάλ» (μη τονικός). (Dalhaus, 1980)

## 1.2. Τονικότητα στο γνωστικό επίπεδο

Η τονικότητα είναι ένα σύστημα σχέσεων μεταξύ των φθόγγων στο οποίο η τονική είναι το κεντρικότερο και σημαντικότερο στοιχείο. Η λειτουργία των υπόλοιπων τόνων μέσα στο σύστημα αυτό προσδιορίζεται σε σχέση με την τονική είναι, δηλαδή, ένα *σύστημα σημείων αναφοράς* με βασικές αρχές που διέπουν ένα τέτοιο σύστημα: αρχές οργάνωσης και κατηγοριοποίησης. Ένα δεύτερο σημαντικό σημείο είναι ο τρόπος με τον οποίο

γίνονται αντιληπτές αυτές οι τονικές σχέσεις από έναν ακροατή. Καθώς ένας ακροατής ακούει ένα μουσικό κομμάτι, υποσυνείδητα επεξεργάζεται μια μεγάλη ποσότητα πληροφοριών. Οι περισσότερες διαδικασίες μουσικής ανάλυσης γίνονται αυτόματα με ασυνείδητο τρόπο. Το ίδιο συμβαίνει και με τη γλώσσα όταν ένας ακροατής ακούει μια πρόταση. Τα στοιχεία της πρότασης υπόκεινται επεξεργασία γρήγορα χωρίς να δοθεί έμφαση σε κάθε λέξη χωριστά, αλλά στο σύνολο των λέξεων. Το πόσο γρήγορα γίνεται αυτή η επεξεργασία των στοιχείων (μουσικών και γλωσσικών) αφορά στην αντιληπτική γνώση και ικανότητα του ακροατή, αφορά στην εμπειρία του ακροατή. (Andrews & Dowling 1991) Μεταφέροντας την παραπάνω διαδικασία σε αμιγώς μουσικά πλαίσια, όταν ένας ακροατής προσπαθεί να εκτιμήσει την τονικότητα ενός κομματιού, δεν αναλύει κάθε φθόγγο του κομματιού ξεχωριστά, αλλά το σύνολο των φθόγγων, αρχικά υποσυνείδητα και ίσως έπειτα συνειδητά. Η τονικότητα, λοιπόν, δεν είναι μόνο ένα θεωρητικό σύστημα σχέσεων αλλά και ένας **τρόπος αντίληψης** των σχέσεων αυτών. Δεν υφίσταται μόνο ως ιστορικό στοιχείο αλλά έχει και μια *ψυχολογική – γνωστική διάσταση*.

Υπάρχουν τέσσερα βασικά ψυχοακουστικά χαρακτηριστικά του ήχου: το τονικό ύψος, η διάρκεια, η ένταση και η χροιά. Τα αντιληπτικά αυτά χαρακτηριστικά ελέγχονται από τους συνθέτες ή τους εκτελεστές, γίνονται αντιληπτά από τους ακροατές και οργανώνονται ή συστηματοποιούνται με όρους ψυχολογικών διαστάσεων. Το τονικό ύψος, η ένταση και η διάρκεια φαίνονται αρχικά ως μονοδιάστατα χαρακτηριστικά ενώ η χροιά ως πολυδιάστατο. Το τονικό ύψος διαφοροποιεί τους υψηλούς ήχους από τους χαμηλούς. Η ένταση και η διάρκεια λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο όπως και σε γενικά ακουστικά φαινόμενα. Η χροιά (ηχόχρωμα) αναφέρεται σε διαφορές της ποιότητας του ήχου που παράγουν διαφορετικά μουσικά όργανα, όπως και μεταξύ διαφόρων φωνημάτων. (Dowling & Harwood, 1991)

Από τα παραπάνω αντιληπτά χαρακτηριστικά, η τονική διαιρεί την κλίμακα σε διακριτές βαθμίδες και ο χρόνος οργανώνεται σε διακριτά

βήματα(π.χ. τέταρτα, μισά, ολόκληρα κ.λ.π. ) .Το ότι η κλίμακα διαιρείται σε διακριτές βαθμίδες δεν είναι μόνο ένα θεωρητικό στοιχείο αλλά σχετίζεται άμεσα με αντιληπτικές-ψυχολογικές δομές. Ο Helmholtz εισηγείται ότι μια κλίμακα ευδιάκριτων τονικών επιπέδων παρέχει ένα ψυχολογικό πρότυπο σύμφωνα με το οποίο ο ακροατής μπορεί να εκτιμήσει μια μελωδική κίνηση. Ακόμη και σε μελωδικές κινήσεις που περιέχουν συνεχείς αλλαγές τονικών υψών, όπως ο ήχος της σειρήνας, ο ακροατής θα πρέπει να προσδιορίσει μια «κλίμακα» για να μπορεί να εκτιμήσει μέγεθος των αλλαγών αυτών. Ο γνωστικός φόρτος εργασίας απλοποιείται πολύ με την οριοθέτηση του συνόλου των τόνων σε μία βαθμονομημένη κλίμακα. Γνωρίζοντας μια μουσική κλίμακα ο ακροατής αποκτά μια άμεση βάση, ώστε να μπορεί να συγκρίνει μεγέθη διαστημάτων και να εκτιμήσει την έκταση της μελωδικής κίνησης. Εκτός από την παροχή μέτρου μελωδικής κίνησης, η κλίμακα δημιουργεί το γνωστικό πλαίσιο, το οποίο διευκολύνει την μνήμη των τόνων μια μελωδίας .(Steedman, 1994 ).

### **1.2.1. Ψυχολογικές Παράμετροι στην Σύνταξη Τονικών Κλιμάκων**

Η δομή των Δυτικών μουσικών κλιμάκων παρέχει πρόσφορο έδαφος για να ξεκινήσει η περιγραφή των τονικών μουσικών κλιμάκων. Στην σύνταξη μιας τονικής μουσικής κλίμακας υπάρχουν ιδιαίτερες ψυχολογικές παράμετροι. (Dowling & Harwood, 1991)

Αρχικά, οι φθόγγοι μιας κλίμακας πρέπει να είναι διακριτοί από άλλους φθόγγους όταν παίζονται διαδοχικά. Στην Δυτική μουσική, το μικρότερο διάστημα μεταξύ των φθόγγων, το ημιτόνιο, αναπαριστά μια διαφορά συχνότητας της τάξεως του 5,9%. Από τη στιγμή που ο άνθρωπος είναι ικανός να διακρίνει διαφορές στη συχνότητα της τάξεως του 1%, το διάστημα του ημιτονίου φαίνεται να είναι ασφαλώς ευδιάκριτο.

Ένας δεύτερος περιορισμός είναι ότι οι τόνοι, των οποίων οι θεμέλιοι βρίσκονται σε αναλογία 2:1, γίνονται αντιληπτοί. Το διάστημα μεταξύ συχνοτήτων που έχουν αναλογία 2:1 ονομάζεται οκτάβα. Για παράδειγμα οι

τόνοι με θεμέλιες συχνότητες 32.75, 65.5, 131, 262, 524, 1048, 2096, 4192 Hz ονομάζονται όλοι Ντο.

Ένας τρίτος περιορισμός είναι πως, όταν η οκτάβα χωρίζεται σε διαστήματα, πρέπει να υπάρχει ένας σχετικά μικρός αριθμός διαφορετικών τόνων, ας πούμε 5 ή 7. Αυτή η δέσμευση προκύπτει από τον γνωσιακό περιορισμό στον αριθμό των διαφορετικών στοιχείων που ο άνθρωπος μπορεί να κατανοήσει χωρίς σύγχυση. Ο Miller (1956) υποστηρίζει ότι μέσα από ποικίλες αισθητηριακές αντιλήψεις, ο αριθμός των ερεθισμάτων που μπορεί ο άνθρωπος να απομνημονεύσει είναι  $7 \pm 2$ . Με παραπάνω από τόσους διαφορετικούς τόνους οι άνθρωποι τελικώς ακούνε δύο ή περισσότερους τόνους στην ίδια κατηγορία. (Dowling & Harwood, 1991)

Περιορισμός ο οποίος αφορά στη Δυτική μουσική, είναι η διαίρεση της οκτάβας σε μια ακολουθία μικρότερων διαστημάτων, των ημιτονίων, όλων ίσων στο μέγεθος, τα οποία προστίθενται για να συντάξουν όλα τα διαστήματα που χρησιμοποιούνται στις κλίμακες. Στην Ευρώπη, η διαίρεση οκτάβας γίνεται σε δώδεκα ημιτόνια.

Συνοπτικά, οι μουσικές και ψυχολογικές δεσμεύσεις – απαιτήσεις σύμφωνα με τις οποίες συντάσσεται μια κλίμακα είναι οι εξής:

1. Δυνατότητα διάκρισης των διαστημάτων
2. Ισοδυναμία φθόγγων που απέχουν οκτάβα
3. Ένας μέσος σχετικά μικρός αριθμός τόνων μέσα στην οκτάβα (συνήθως επτά)
4. Η χρήση ενός στοιχειώδους διαστήματος, του ημιτονίου, με το οποίο κατασκευάζουμε όλα τα διαστήματα των παραδοσιακά χρησιμοποιούμενων κλιμάκων



### **1.3. Τονική Αρμονική Μουσική – Βασικά Χαρακτηριστικά**

Στην τονική – αρμονική μουσική μπορούν να αναγνωριστούν τρεις ξεχωριστοί τύποι βασικών στοιχείων: μεμονωμένοι φθόγγοι, συγχορδίες και τονικότητα. (Dowling & Harwood, 1991) Στην Δυτική μουσική υπάρχουν 12 κατηγορίες τονικών υψών για κάθε οκτάβα, με συνολική χρήση περίπου 8 οκτάβων. Ψυχολογικά, αλλά και στον τομέα της σύνθεσης, υπάρχει μια φυσική ταυτοποίηση μεταξύ όμοιων τόνων σε διαφορετικές οκτάβες κι έτσι, τελικώς, έχουμε 12 κατηγορικές τονικών υψών (κλάσεις τονικών υψών). Οι συγχορδίες, αποτελούνται από τρεις ή περισσότερους φθόγγους οι οποίοι ακούγονται ταυτόχρονα. Οι τρίφωνες συγχορδίες δομούνται πάνω στους επτά φθόγγους της διατονικής κλίμακας, διαμορφώνοντας τον πυρήνα της αρμονίας στην μουσική του 18<sup>ου</sup> και 19<sup>ου</sup> αιώνα. Η τονικότητα ορίζεται από την εκάστοτε τονική και την κλίμακα (ή τον τρόπο, μείζονα ή ελάσσονα). Η τονική είναι ένας από τους 12 φθόγγους στην έκταση μιας οκτάβας και η κλίμακα είναι ένα συγκεκριμένο μονοπάτι διαστημάτων πάνω από την τονική. Οι μείζονες και οι ελάσσονες κλίμακες καθώς και οι δώδεκα τάξεις τονικών υψών δημιουργούν το σύνολο 24 τονικοτήτων.

#### **1.3.1. Η Τονική Ιεραρχία**

Στην αρχή του κεφαλαίου, ορίσαμε την τονικότητα ως ένα σύστημα σχέσεων μεταξύ των τόνων, ως ένα σύστημα σημείων αναφοράς. Στο σύστημα αυτό, η τονική έχει δεσπόζοντα ρόλο καθώς διαμορφώνει τις σχέσεις αυτές. Εδώ, όμως, πρέπει να σημειώσουμε μια σημαντική διαφορά: ενώ σε άλλα μη μουσικά αντιληπτικά συστήματα σημεία αναφοράς μπορεί να προσδιορίζονται άμεσα από τον αντιληπτικό μηχανισμό καθεαυτόν, η τονική εξαρτάται μόνο από το τονικό πλαίσιο που έχει ορίσει αυτή ως τον κεντρικό τόνο. Πιο συγκεκριμένα, κανένας τόνος δεν είναι εγγενώς περισσότερο «τονική» από άλλους, σε αντίθεση, για παράδειγμα με τον τομέα της ζωγραφικής, όπου συγκεκριμένα χρώματα φαίνονται να είναι περισσότερο εστιακά από άλλα.

Η σχετική σταθερότητα ενός τόνου μπορεί να εξαρτάται ως ένα βαθμό από την μεταχείρισή του μέσα σ' ένα συγκεκριμένο πλαίσιο σύνθεσης. (Krumhansl, 1990) Εντούτοις, είναι προϋπόθεση να υπάρχει μια περισσότερο αφηρημένη, αμετάβλητη ιεραρχία σταθερότητας που είναι τυπική ενός μουσικού στυλ. Αυτή η πιο αφηρημένη ιεραρχία είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό το οποίο συνεισφέρει στην προσλαμβανόμενη σταθερότητα κάθε τόνου μέσα σε μια σύνθετη μουσική ακολουθία. Ο Barucha (1984) κάνει τον ακόλουθο διαχωρισμό μεταξύ «περιστασιακών» και «τονικών» ιεραρχιών:

Οι περιστασιακές ιεραρχίες περιγράφουν την κωδικοποίηση συγκεκριμένων μουσικών κομματιών ενώ οι τονικές ιεραρχίες ενσωματώνουν την γνώση μας για την μουσική δομή ενός πολιτισμού. Ο τόνος Ντο μπορεί να εμφανίζεται πολλές φορές σ' ένα μουσικό κομμάτι. Κάθε εμφάνισή του είναι ένα ξεχωριστό μουσικό γεγονός. Όλες όμως οι εμφανίσεις του είναι περιπτώσεις μιας τάξης τονικών υψών που ονομάζεται Ντο. Στο πλαίσιο ενός δοσμένου μουσικού κομματιού, η «περιστασιακή ιεραρχία» αναπαριστά την λειτουργική σημασία κάθε εμφάνισης του Ντο σχετικής με άλλους τόνους, ενώ η «τονική ιεραρχία» αναπαριστά τη λειτουργική σημασία μιας τάξεως όλων των Ντο σχετικής με άλλες τονικές τάξεις.

Στην μελέτη του L.B. Meyer η έννοια της σταθερότητας συνδέεται με την αντίληψη που έχει ο ίδιος για την αίσθηση και το νόημα της μουσικής. (Krumhansl, 1990) Η τονική σταθερότητα παίζει ένα κεντρικό ρόλο στην μεταχείριση της μουσικής δομής αλλά στην παρουσίαση του Meyer έχει ένα συγκεκριμένο ψυχολογικό περιεχόμενο μέσα στο οποίο γενικεύει την θεωρία Gestalt για να συσχετίσει τις αρχές της τονικής οργάνωσης με την ανταπόκριση του ακροατή.

Εκτός από τις ψυχολογικές λειτουργίες που περιγράφηκαν από τον Meyer σχετικά με το ζήτημα της μουσικής σταθερότητας, η προσέγγισή του είναι αξιοσημείωτη και για δυο επιπλέον λόγους: Πρώτον, γιατί η γλώσσα και οι διάλογοι επικοινωνίας που χρησιμοποιεί μιλώντας για τονική ιεραρχία είναι εμφανέστατα όμοιοι με αυτούς των αντιληπτικών και γνωστικών σημείων αναφοράς της ψυχολογικής λογοτεχνίας. Δεύτερον, γιατί η προσέγγισή του

δίνει πολύ συγκεκριμένες προβλέψεις για τα αναμενόμενα της Δυτικής τονικής μουσικής. Γι' αυτούς τους λόγους είναι ενδιαφέρουσα η παρακάτω θεώρηση του Meyer για το θέμα της τονικότητας και των δομικών τόνων:

Ο όρος τονικότητα αφορά στις υπάρχουσες σχέσεις μεταξύ των τόνων ή των τονικών περιοχών εντός πλαισίου ενός συγκεκριμένου τύπου συστήματος. Κάποιοι από τους τόνους αυτούς είναι ενεργοί – τείνουν να κινηθούν προς περισσότερο σταθερά σημεία του συστήματος. Οι τόνοι αυτοί ονομάζονται *δομικοί- σταθεροί (πραγματικοί, υπαρκτικοί, μόνιμοι)*. Αλλά η ενεργητικότητα (δραστηριότητα) και η ηρεμία είναι σχετικοί όροι γιατί τα τονικά συστήματα είναι σε γενικές γραμμές ιεραρχικά: τόνοι οι οποίοι είναι ενεργοί τόνοι ροπής σε ένα επίπεδο μπορούν να γίνουν εστιακοί, βασικοί τόνοι σε ένα άλλο. Έτσι, στον μείζονα τρόπο στην Δυτική μουσική η τονική είναι ο τόνος της απόλυτης στήριξης, ο τόνος – βάση προς τον οποίο τείνουν να κινηθούν όλοι οι υπόλοιποι τόνοι. Στο επόμενο υψηλότερο επίπεδο η τρίτη και η πέμπτη του τρόπου, αν και είναι ενεργοί μελωδικοί τόνοι ως προς την τονική, ακολουθούν την τονική ως δομικοί τόνοι. Όλοι οι υπόλοιποι τόνοι, είτε διατονικοί είτε χρωματικοί, κινούνται προς έναν απ' αυτούς. Προχωρώντας ακόμη περισσότερο, οι υπόλοιποι διατονικοί τόνοι είναι δομικά εστιακά σημεία ως προς τους χρωματικούς φθόγγους οι οποίοι βρίσκονται ανάμεσά τους. Τελικώς, οποιοσδήποτε απ' αυτούς τους 12 χρωματικούς φθόγγους μπορεί να θεωρηθεί βασικός, σχετικά με ελαφρές αποκλίσεις από τα κανονικά τονικά τους ύψη. (Meyer, 1956)

Αυτή η ιεραρχία έχει αντιστοιχία με χαρακτηρισμούς των φθόγγων σε ποικίλα θεωρητικά μουσικά συστήματα. Ονόματα έχουν δοθεί στους δομικούς / βασικούς τόνους και οι υπόλοιποι τόνοι περιγράφονται σε σχέση μ' αυτούς. Στην Δυτική μουσική οι λιγότερο σταθεροί τόνοι έχουν ονόματα που αντικατοπτρίζουν την σχέση τους με τους περισσότερο σταθερούς (τονική και δεσπόζουσα). Για παράδειγμα, η τρίτη βαθμίδα λέγεται μέση, εξαιτίας της θέσης του ανάμεσα στην τονική και την δεσπόζουσα. Ο τόνος πριν την τονική λέγεται προσαγωγέας καθώς άγει στην τονική.

Συνοπτικά, αυτές οι συγκρίσεις μεταξύ μουσικών δομών και ψυχολογικών σημείων αναφοράς υποδηλώνουν την πιθανότητα ότι αρχές

οργάνωσης στη μουσική δομή είναι παρεμφερείς με τις γνωστικές και αντιληπτικές αρχές άλλων πεδίων της αντίληψης.

#### 1.4. Τονικές Τάξεις – Μοντέλα αναπαράστασης Τονικών Στοιχείων

Οι τονικές τάξεις είναι κατηγορίες στις οποίες δυο οποιοδήποτε τόνοι σε απόσταση μιας ή παραπάνω οκτάβων είναι μέλη της ίδιας κατηγορίας. (Temperley, 2001) Τονικά ύψη τα οποία σχετίζονται μεταξύ τους με διαστήματα τα οποία είναι ακέραια πολλαπλάσια της οκτάβας μεταχειρίζονται ως μια ισοδύναμη τάξη. (Purwins, 2005) Αυτές οι κατηγορίες έχουν υιοθετήσει ονόματα μουσικής ορολογίας.

|                |                |                |                |   |   |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|---|---|----------------|
| f              | F              | d              | D              | b | B | g <sup>#</sup> |
| b <sub>b</sub> | B <sub>b</sub> | g              | G              | e | E | c <sup>#</sup> |
| e <sub>b</sub> | E <sub>b</sub> | c              | C              | a | A | f <sup>#</sup> |
| a <sub>b</sub> | A <sub>b</sub> | f              | F              | d | D | b              |
| d <sub>b</sub> | D <sub>b</sub> | b <sub>b</sub> | B <sub>b</sub> | g | G | e              |

Σχ.1.1. Ο πίνακας συγγένειας κλειδιών του Weber (1851). Τα κεφαλαία γράμματα αναπαριστούν τις μείζονες τονικότητες ενώ τα μικρά τις ελάσσονες.

Η χρήση της γεωμετρικής αναπαράστασης τονικών στοιχείων στο χώρο έχει μακρά ιστορία στην μουσική θεωρία. Ο Gottfried Weber (1851), θεωρητικός του 19<sup>ου</sup> αιώνα, αναπαριστά τονικότητες σε δισδιάστατη διάταξη, με τον κύκλο των 5<sup>ων</sup> στην μια κάθετη διάσταση και την μείζονα ή ελάσσονα, σχετική ή ομώνυμη στην άλλη (σχ.1.1). Ο «πίνακας σχέσεων» του Riemann (1915/1992) είναι δισδιάστατος με τρεις άξονες να αναπαριστούν πέμπτες καθαρές, τρίτες μεγάλες και τρίτες μικρές (σχ.1.2). Μια μείζονα ή ελάσσονα τριάδα αναπαρίστανται ως τρίγωνο στον πίνακα αυτό. Ο Longuet-Higgins (1962) προτείνει ένα μοντέλο τόνων με πέμπτες καθαρές στον ένα άξονα και τρίτες μεγάλες στον άλλο (λεπτομερέστερη περιγραφή του συγκεκριμένου μοντέλου γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο). Ο Shepard (1982) παρουσιάζει έναν

πενταδιάστατο σύνθετο πίνακα τόνων ο οποίος περιλαμβάνει σχέσεις οκτάβας, πεμπτών και ημιτονίων. Η Krumhansl (1990) παρουσιάζει μια χωρική αναπαράσταση σχέσεων ομοιότητας μεταξύ τονικοτήτων, η οποία βασίζεται σε δεδομένα σχετικά με την σταθερότητα των τόνων σε πλαίσιο διαφορετικών τονικοτήτων. Το μοντέλο που προκύπτει, είναι περίπου ίδιο με το δισδιάστατο μοντέλο του Weber (παρουσίαση του μοντέλου της Krumhansl γίνεται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας).

|  |                |                |                |                |                |                |                |                |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|  | b              | f#             | c#             | g#             | d#             | a#             | e#             | b#             |
|  | g              | d              | a              | e              | b              | f#             | c#             | g#             |
|  | e <sub>b</sub> | b <sub>b</sub> | f              | c              | g              | d              | a              | e              |
|  | c <sub>b</sub> | g <sub>b</sub> | d <sub>b</sub> | a <sub>b</sub> | e <sub>b</sub> | b <sub>b</sub> | f              | c              |
|  | a <sub>b</sub> | e <sub>b</sub> | b <sub>b</sub> | f <sub>b</sub> | c <sub>b</sub> | g <sub>b</sub> | d <sub>b</sub> | a <sub>b</sub> |

Σχ.1.2. Ο πίνακας συγγένειας κλειδιών του Riemann (1915/1992)

Το βασικό κίνητρο των παραπάνω απεικονίσεων είναι το ίδιο: να αναπαραστήσουν τις σχέσεις εγγύτητας ή ομοιότητας μεταξύ τονικών στοιχείων. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό όμοιο σε όλα τα μοντέλα είναι ο άξονας των πεμπτών. Αυτό εκφράζει την παραδοσιακή παραδοχή ότι *στοιχεία σχετιζόμενα με πέμπτες (τόνοι, συγχορδίες ή τονικότητες) έχουν συγγενική – συναφή σχέση.*

Τα υπολογιστικά μοντέλα που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια ενσωματώνουν την παραπάνω στις παραπάνω σχέσεις συγγένειας – συνάφειας και μέσω ενός αλγορίθμου προσδιορίζουν την τονικότητα ενός μουσικού αποσπάσματος. Ο αλγόριθμος είναι ένα σύστημα μεθόδου υπολογισμού το οποίο συνίσταται στο να φτάσει κανείς στο ζητούμενο αποτέλεσμα με μία ακολουθία πράξεων, τελείως καθορισμένη, η οποία επιτελείται σύμφωνα με συγκεκριμένους κανόνες.

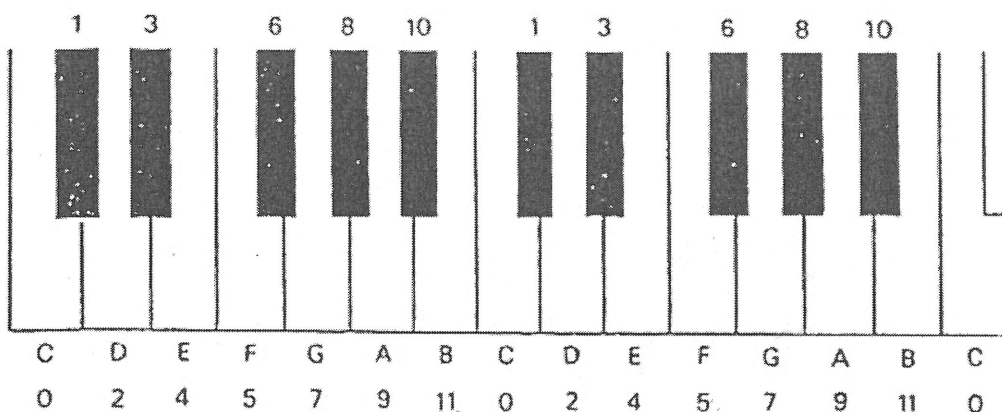
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ LONGUET – HIGGINS & STEEDMAN

#### 2.1. Βάση και Βήματα Αλγορίθμου

Ο αρμονικός αλγόριθμος Longuet-Higgins & Steedman (1971) είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα ανάλυσης, το οποίο προσδιορίζει την τονικότητα από τα πρώτα μέτρα ενός μουσικού θέματος. Σε ένα δεύτερο επίπεδο ο στόχος του υπολογιστικού μοντέλου είναι η ανάπτυξη πρότυπων για τον προσδιορισμό συγχορδιών, τονικών περιοχών και αρμονικής δομής.

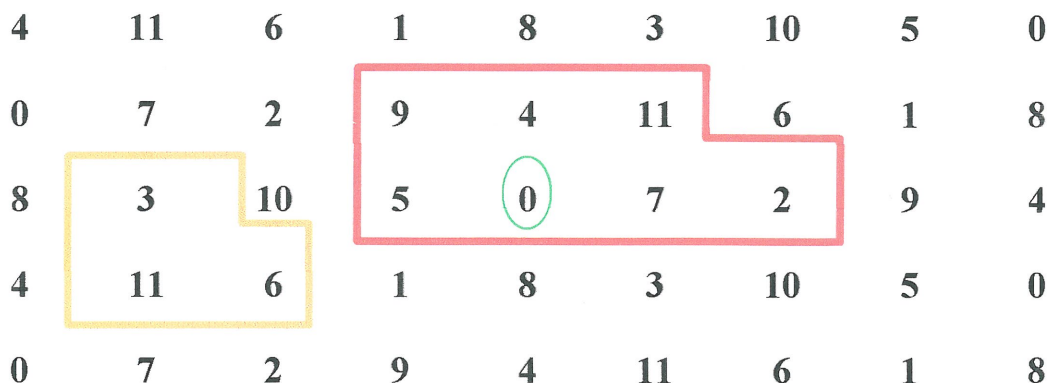
Το σχήμα 2.1. αναπαριστά τη διαίρεση ενός τμήματος του κλαβιέ στο οποίο κάθε νότα αριθμείται σύμφωνα με τη θέση της στην οκτάβα. Η Ντο μείζονα αποτελείται από τις κλάσεις τονικών υψών 0,2,4,5,7,9 και 11 και περιέχει τρεις μείζονες συγχορδίες.



Σχ. 2.1.

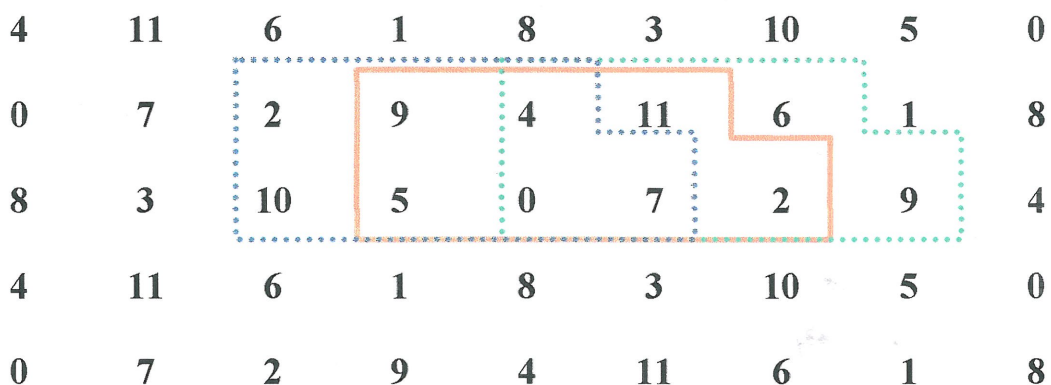
Το σχήμα 2.2. είναι ένα δισδιάστατο πλέγμα σύμφωνα με το οποίο κάθε νότα είναι μια καθαρή πέμπτη ψηλότερα από την νότα που βρίσκεται στα αριστερά της και μια μεγάλη τρίτη ψηλότερα από τη νότα που βρίσκεται κάτω

απ' αυτήν. Άρα, μια ομάδα τριών φθόγγων σχήματος L σχηματίζει μια μείζονα συγχορδία.



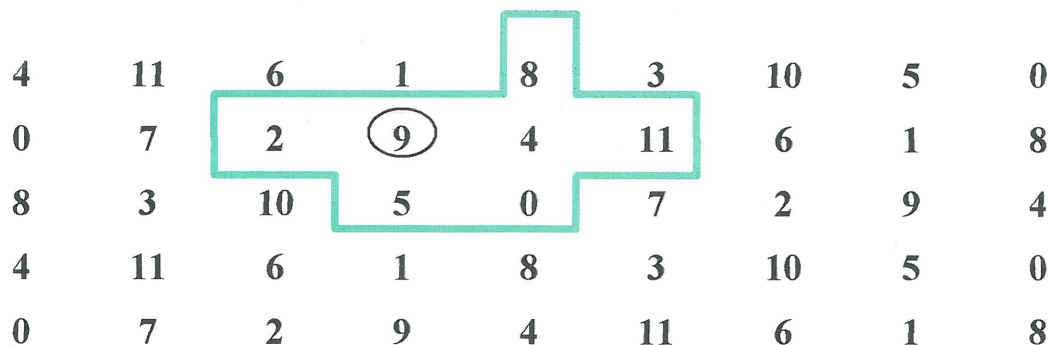
Σχ.2.2. Δισδιάστατος χώρος τονικών υψών οργανωμένων σε καθαρές πέμπτες και μεγάλες τρίτες.

Το σχήμα 2.3. περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο αναπαριστώνται οι αλλαγές τονικότητας στο δισδιάστατο πλέγμα. Όταν το σχήμα L μετακινείται προς τα δεξιά, γίνεται μετατροπή στην V της Ντο. Όταν το L μετακινείται προς τα αριστερά γίνεται μετατροπή στην IV της Ντο.



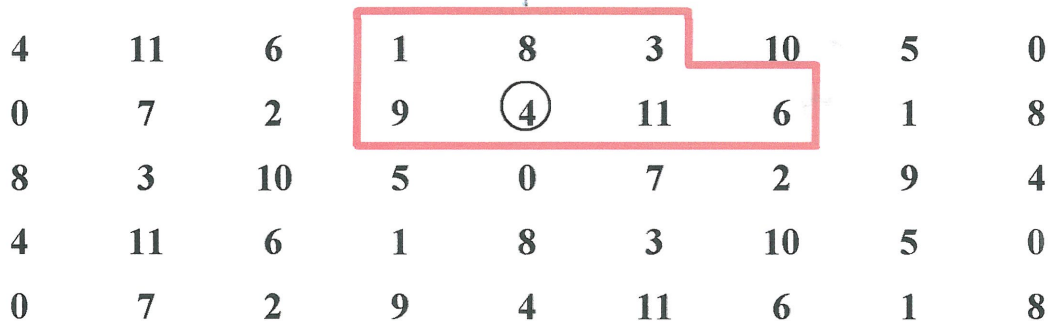
Σχ.2.3.

Στο σχήμα 2.4. αναπαριστάται το σχήμα της ελάσσονας τονικότητας στον δισδιάστατο χώρο των τονικών υψών.



Σχ.2.4. Σχηματική αναπαράσταση ελάσσονας τονικότητας. (Λα-).

Εξοπλισμένοι με την δισδιάστατη αναπαράσταση των αρμονικών σχέσεων, είμαστε σε θέση να δούμε πώς καθορίζεται η τονικότητα σε μια σειρά από νότες. Για παράδειγμα στη φούγκα Νο 9 του πρώτου βιβλίου από τις «48 Φούγκες για το καλά συγκεκριμένο κλειδοκύμβαλο» του J.S. Bach οι νότες του θέματος είναι: 1,3,4,6,8,9 και 11. Λαμβάνοντας υπόψιν το σχήμα 2.5., παρατηρούμε ότι το σχήμα L της μείζονας τονικότητας ταιριάζει με τις νότες αυτές, οι οποίες μάλιστα προσδιορίζουν την τονικότητα της ΜΙ μείζονας.



Σχ.2.5. Το κόκκινο περίγραμμα περικλείει τους φθόγγους της Μι μείζονας.



## 2.2. Ελάσσονα Τονικότητα – Μελωδική Σύμβαση

Η Ντο ελάσσονα αποτελείται από τις νότες Ντο, Ρε, ΜΙb, Φα, Σολ, Λαb, ΣΙ και Ντο. Σε μια ελάσσονα συγχορδία οι εξωτερικές νότες απέχουν μια πέμπτη καθαρή και η μεσαία νότα είναι περισσότερο μια τρίτη μεγάλη κάτω από την ψηλότερη παρά μια τρίτη μικρή πάνω από τη χαμηλότερη. Η διαφορά της Ντο μείζονας και της Ντο ελάσσονας είναι οι νότες ΛΑ και ΜΙ → ΛΑb, ΜΙb. Εδώ όμως υπάρχει μια πρόσθετη περιπλοκή. Στον καιρό του Bach, όταν ένας συνθέτης συνέθετε σε Ντο ελάσσονα χρησιμοποιούσε έκτη μεγάλη στην ανιούσα και 7<sup>η</sup> μικρή στην κατιούσα. Άρα λοιπόν:

α) Ανιούσα 7,8,11 → 7,9,11 [ΛΑb → ΛΑ ]

β) Κατιούσα 0,11,8 → 0,10,8 [ΣΙ → ΣΙb]

Αυτή η περίπτωση που λέγεται «*μελωδική σύμβαση*» σημαίνει ότι:

- α) Το 9 μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει στην Ντο ελάσσονα μόνο όταν λαμβάνει χώρα ως 7,9,11.
- β) Το 10 μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει στην Ντο ελάσσονα μόνο όταν λαμβάνει χώρα ως 0,10,8.

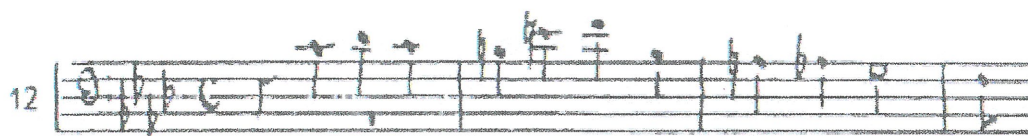
Στην φούγκα Νο. 4 του δεύτερου βιβλίου οι νότες του θέματος είναι 1,0,1,3,1,3,8,1,0,0,1,3,4,6. Από το σχήμα 2.6 βλέπουμε ότι η τονικότητα της Ντο# ελάσσονος περιέχει όλες αυτές τις νότες εκτός από το 10. Αλλά, η νότα 10 (ΛΑ#) που είναι η έκτη μεγάλη της τονικότητας εμφανίζεται στην ανιούσα 8,10,0 (ΣΟΛ#, ΛΑ#, ΣΙ#) άρα είναι κατανοητό ότι προκύπτει από την μελωδική συνθήκη.



|   |    |    |   |   |    |    |   |   |
|---|----|----|---|---|----|----|---|---|
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 |
| 8 | 3  | 10 | 5 | 0 | 7  | 2  | 9 | 4 |
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 |

Σχ.2.6.Σχηματική αναπαράσταση της Ντο# ελάσσονας στον πίνακα Longuet-Higgins.

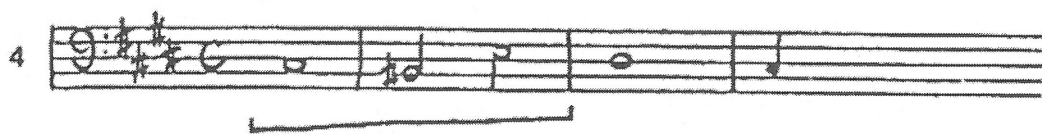
Παρ' όλα αυτά, είναι πιθανό για τις νότες του θέματος μιας φούγκας να περιφέρονται γύρω από την κύρια τονικότητα ακόμη κι αν ακολουθεί η μελωδική συνθήκη. Παράδειγμα τούτου αποτελεί η φούγκα Νο 12 του πρώτου βιβλίου (σχ.2.7), όπου οι πρώτες νότες του θέματος είναι οι 5,0,1,11 και 4. Από το σχήμα 2.6 φαίνεται πως δεν υπάρχει τονικότητα που να περιέχει τις νότες 0,1 και 11 (Ντο, Σι και Ντο#/Ρεβ). Η νότα 11 αποκλείει όλες τις πιθανές τονικότητες και για το λόγο αυτό πρέπει να είναι εκτός της αρχικής τονικότητας. Υπάρχει όμως μια τονικότητα που περιλαμβάνει τις πρώτες έξι νότες εκτός του 11, η Φα ελάσσονα, άρα αυτή είναι η ζητούμενη τονικότητα και το 11 χρωματικός φθόγγος.



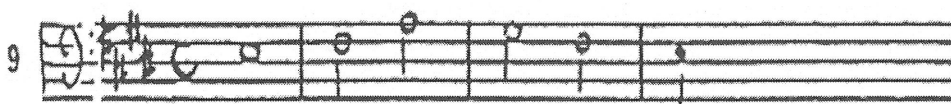
Σχ.2.7 Φούγκα Νο 12 (Φα -)

Σε μερικές περιπτώσεις είναι πιθανό να αποφασίσουμε για την τονικότητα μόλις ακούσουμε λίγες νότες του θέματος. Εντυπωσιακό παράδειγμα είναι η φούγκα Νο 4 του Πρώτου Βιβλίου(σχ.2.8), της οποίας το θέμα περιλαμβάνει τις νότες 1,0,4,3. Δυο τονικότητες περιέχουν το 1,0,4 → η

Φα ελάσσονα και η Ντο# ελάσσονα, αλλά μόνο η Ντο# ελάσσονα και τις τέσσερις. Άρα, είναι η ζητούμενη τονικότητα.



Σχ.2.8. Φούγκα Νο 4 (Ντο#)



Σχ.2.9. Φούγκα Νο 9 (Μι+)

Από τα παραπάνω παραδείγματα θα μπορούσαμε να προτείνουμε πως η τονικότητα μιας φούγκας προσδιορίζεται δια της *μεθόδου σταδιακής απαλοιφής* πριν το τέλος του θέματος, αλλά δεν είναι ακριβώς έτσι. Ένα απλό παράδειγμα είναι η φούγκα Νο 9 του δεύτερου βιβλίου (σχ.2.9). Οι νότες του θέματος είναι 4,6,9,8,6,4. Στο τέλος του θέματος η τονικότητα μπορεί να είναι η Μι μείζονα, η Λα μείζονα ή η Ντο# ελάσσονα. Για να αποφασίσουμε ανάμεσα σ' αυτές τις τρεις πιθανότητες επικαλούμαστε τη μουσική διαίσθηση και γνώση η οποία περιέχεται σε έναν από τους βασικούς κανόνες της φούγκας. Αυτός ο κανόνας δίνει κατεύθυνση στο να είναι η πρώτη νότα του θέματος η τονική ή η δεσπόζουσα (αν και ο Bach σπάει αυτό τον κανόνα στη φούγκα Νο.21 του δεύτερου βιβλίου). Αν επικαλούμασταν ευθέως αυτόν τον κανόνα της φούγκας θα υπήρχε σύγκρουση με το πνεύμα της έρευνας. Υιοθετούμε λοιπόν αντί για τον κανόνα προτίμησης τονικής – δεσπόζουσας το παρακάτω: *όταν παρουσιάζεται ένα δίλημμα επιλογής, η πρώτη προτίμηση δίνεται στην τονικότητα που η τονική είναι η πρώτη νότα του θέματος και η δεύτερη στην τονικότητα που η δεσπόζουσα είναι η πρώτη νότα του θέματος.*



οδηγούν σε νέα τονικότητα. Ιδανικό παράδειγμα αποτελεί η φούγκα Νο.24 του πρώτου βιβλίου (σχ. 2.11). Οι νότες του πρώτου μέτρου στηρίζουν την τονικότητα της Σι ελάσσονας, αλλά στο επόμενο μέτρο εμφανίζονται οι νότες 3,0 και 5 που δεν ανήκουν στην τονικότητα αυτή και γράφονται ως Ρε#, Ντο και Μι#. Στο τρίτο μέτρο υπάρχουν οι τρεις επιπλέον νότες 0,9 και 8 και τώρα το 0 γράφεται ως ΣΙ#. Το ερώτημα εγείρεται: πώς μπορεί ο ακροατής να πει πως οι έξι νότες εξετάζονται όπως τις ερμήνευσε ο Bach και ότι το 0 την πρώτη φορά είναι Ντο και την δεύτερη ΣΙ#; Για τις πρώτες τέσσερις νότες η λύση προβλέπεται από έναν άλλο κανόνα που φαίνεται ότι περιγράφει την χρήση που κάνει ο Bach στις χρωματικές κλίμακες με διαδοχή φθόγγων του τύπου  $(n, n=1, \dots, n+m)$  ή  $(n, n-1, \dots, n-m)$ .

### 2.3. Κανόνας Ημιτονίου

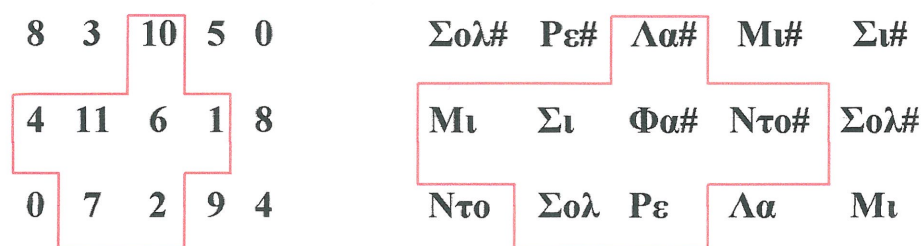
Σε μια χρωματική κλίμακα οι δυο πρώτες νότες σχετίζονται πάντα με το διατονικό ημιτόνιο, όπως επίσης και οι δυο τελευταίες. Με τον όρο «διατονικό ημιτόνιο» εννοούμε το διάστημα ημιτονίου ανάμεσα σε δυο διαδοχικές βαθμίδες μιας κλίμακας.

The figure shows two musical staves. The top staff is in treble clef with a key signature of one sharp (F#). It contains a sequence of notes with fingerings: 6, 2, 11, 7, 6, 11, 10, 4, 3, 0, 11. Above the notes, there are labels: E# above the first note, B# above the second, A above the third, G# above the fourth, D# above the eighth, and C above the ninth. The bottom staff is in bass clef with a key signature of one sharp (F#). It contains a sequence of notes with fingerings: 6, 5, 2, 1, 0, 1, 9, 6, 8, 6. Above the notes, there are labels: E# above the first, B# above the second, A above the third, G# above the fourth, and tr above the fifth.

Σχ.2.11.

Στο σχήμα 2.11 φαίνεται ότι στο δεύτερο μέτρο του παραπάνω θέματος της φούγκας υπάρχουν τρία χρωματικά διαστήματα ονομαστικά ως (4,3) (0,11)

και (6,5). Όμως, οι φθόγγοι 4,11 και 6 ταιριάζουν με την τονικότητα της Σι ελάσσονας. Επιπλέον, οι φθόγγοι 3,0 και 5 ερμηνεύονται ως Ρε#, ΝΤΟη και ΜΙ#. Στο τρίτο μέτρο το 0 είναι η τελευταία νότα της χρωματικής κλίμακας (2,1,0) και η πρώτη της κλίμακας (0,1). Για το λόγο αυτό, πρέπει να υπάρχει ένα διατονικό ημιτόνιο κάτω από το 1 και να ερμηνεύεται ως ΣΙ# αντί για ΝΤΟη. Παρ' όλα αυτά, ένα πρόβλημα γεννιέται με το 9 στο τρίτο μέτρο. Το 9 είναι εκτός της Σι ελάσσονας αλλά δεν είναι νότα χρωματικής κλίμακας. Μπορούμε – και αυτός είναι ο τελευταίος αρμονικός κανόνας – να το τοποθετήσουμε στην εγγύτερη αρμονική σχέση με τις νότες που έχουν ήδη ακουστεί. Μια πειστική ενέργεια είναι το σύνολο των *city block distances*.



Σχ.2.12.

Από όλες τις θέσεις στις οποίες προηγούμενες νότες αντικαταστάθηκαν και αυτό αναγνωρίζεται στο κάτω δεξιά Λα, είναι αδιάψευστα σωστό μουσικά, όπως πρέπει να είναι μια μεγάλη τρίτη κάτω από το προηγούμενο Ντο#. Τελικώς, στην τελευταία νότα του τρίτου μέτρου πρέπει να γίνει ανάθεση θέσης. Αν αγνοήσουμε την τρίλλια και μεταχειριστούμε την νότα ως ξεκάθαρο 8, παρατηρούμε ότι διαβάζεται με δυο διαφορετικούς τρόπους στο σχήμα 2.12 που δίνουν ίσες αξίες στο σύνολο των *city block distances* από ήδη κατειλημμένες θέσεις. Είτε το δεξί είτε το αριστερό ΣΟΛ# στο σχήμα εξυπηρετούν εξίσου καλά, αν και ερμηνεύονται με τον ίδιο τρόπο. Αυτή είναι η μόνη περίπτωση στην οποία ο κανόνας *city block distance* αποτυγχάνει στην ερμηνεία του περιστατικού, παρ' όλο που υποδεικνύει τρόπο ερμηνείας. Και

ακόμη και αυτή η μικρή ασάφεια θα εξαφανιστεί αν λάβουμε υπ' όψιν την υψηλότερη νότα της τρίλιας και απαιτήσουμε οι δυο νότες που εισάγονται στο σχήμα 2.12 να διαχωρίζονται από ένα διατονικό ημιτόνιο.

#### 2.4. Κριτική στον αλγόριθμο Longuet-Higgins και Steedman

Ίσως η πρώτη προσπάθεια υπολογιστικού συστήματος αναγνώρισης κλειδιού ήταν ο αλγόριθμος Longuet-Higgins και Steedman. Σχεδιασμένος μόνο για μονοφωνικά κομμάτια, ο αλγόριθμος επεξεργάζεται το κομμάτι από αριστερά προς τα δεξιά. Σε κάθε τόνο που επεξεργάζεται απαλείφει εκείνες τις τονικότητες που δεν περιέχουν τον τόνο αυτό. Όταν απομείνει ένα κλειδί, αυτό είναι και το προτεινόμενο. Αν κάνει ένα βήμα και απαλείφει όλα τα κλειδιά επανέρχεται σε προγενέστερη κατάσταση, εξετάζει την πρώτη νότα του κομματιού και αν αυτή είναι η τονική (ή σε δεύτερη προτίμηση η V) ενός από τα εναπομείναντα κλειδιά, επιλέγει το κλειδί αυτό. Αν φτάσει στο τέλος της μελωδίας με περισσότερα από ένα υποψήφια κλειδιά, τότε επανεκτελεί το τεστ της πρώτης νότας για να επιλέξει το κατάλληλο κλειδί.

Τα βασικά μειονεκτήματα του αλγόριθμου Longuet-Higgins και Steedman είναι τα εξής:

- i. *Είναι για μονοφωνική μουσική*
- ii. *Δε μπορεί να μεταχειριστεί τους χρωματικούς φθόγγους*
- iii. *Δε μπορεί να χειριστεί μια βασική δομική διάσταση της τονικότητας, την μετατροπία*

#### 2.5. Σύνοψη

Κάθε μείζονα ή ελάσσονα τονικότητα αναπαριστάται από ένα κουτί συγκεκριμένου σχήματος. Η πρώτη νότα του θέματος ταιριάζει με 14 τονικότητες και απαλείφει τις υπόλοιπες 10. Κάθε νότα που εισέρχεται εξετάζεται σε σχέση με τις εναπομείναντες τονικότητες, μια προς μια. Αν δεν ταιριάζει, η τονικότητα απαλείφεται, εκτός βέβαια αν το πλαίσιο της επιτρέπει την θεώρηση μελωδικής σύμβασης. Αν μια νότα απαλείψει και τα 24 κλειδιά,

τότε η διαδικασία ξεκινάει από την αρχή. Πρώτα, εξετάζεται αν η τονικότητα η οποία μόλις απαλείφθηκε ήταν εκείνη της οποίας η πρώτη νότα ήταν η τονική. Αν όχι, εξετάζεται το ίδιο με την δεσπόζουσα. Αν στην ίδια ερώτηση αναφορικά με την δεσπόζουσα η απάντηση είναι θετική, τότε η νότα της δεσπόζουσας προσδιορίζει την τονικότητα. Αν και στις δυο ερωτήσεις η απάντηση είναι αρνητική, τότε η διαδικασία ξεκινάει εκ νέου. Αν μια νότα απαλείψει όλες τις τονικότητες εκτός από μία, τότε αυτή είναι και η ζητούμενη τονικότητα. Αν στο τέλος του θέματος δυο ή περισσότερα κλειδιά επιβίωσαν από την διαδικασία της απαλοιφής, τότε ενεργοποιείται ο κανόνας *προτίμησης τονικής – δεσπόζουσας* για την τελική επιλογή.

Σ' αυτό το μέρος του αλγόριθμου η λειτουργία του κανόνα καταλληλότητας είναι φαινομενική. Μέχρι να αναγνωριστεί η τονικότητα, κάθε νότα που δεν ταιριάζει με ένα κλειδί θεωρείται στοιχείο ενάντια σ' αυτό, εκτός αν απαλείψει όλα τα κλειδιά, που συμβαίνει συχνά. Αφού καθοριστεί η τονικότητα, μπορεί να συναντήσουμε νότε έξω απ' αυτή. Το δεύτερο μέρος του αλγόριθμου σχεδιάστηκε γι' αυτό το σκοπό. Πρώτα επικαλείται τον κανόνα του *ημιτονίου*, που χρησιμοποιείται για να ορίσει νότες που ανήκουν στο πρώτο ή στο τελευταίο ζευγάρι μιας χρωματικής κλίμακας, υπό την προϋπόθεση ότι η άλλη νότα του ζευγαριού ανήκει στο καθορισμένο κλειδί. Αν ο κανόνας του ημιτονίου αποτύχει στην αντικατάσταση της νότας, τότε ο αλγόριθμος καταφεύγει στον κανόνα *city block distance* για να προσδιορίσει – αντικαταστήσει τη νότα αυτή με βάση την πλησιέστερη αρμονική σχέση με την προηγούμενη νότα.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ KRUMHANSL & KESSLER

#### 3.1. Συνοπτική Περιγραφή Του Αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος προσδιορισμού τονικότητας της Carol L. Krumhansl βασίζεται στα προφίλ τονικότητων. Το προφίλ τονικότητας είναι ένα διάνυσμα δώδεκα αξιών, το οποίο αναπαριστά τη σταθερότητα δώδεκα τάξεων τονικών υψών, οι οποίες συσχετίζονται με το δοσμένο κλειδί. Ο αλγόριθμος επιλέγει την τονικότητα του μουσικού αποσπάσματος συσχετίζοντας κάθε προφίλ τονικότητας με το διάνυσμα εισόδου του αποσπάσματος. Το διάνυσμα εισόδου είναι το στατιστικό προφίλ του αποσπάσματος, το οποίο προκύπτει από το άθροισμα των διαρκειών καθενός από τους 12 χρωματικούς φθόγγους.

#### 3.2. Η Τεχνική των Φθόγγων Διερεύνησης

Η Krumhansl και ο Shepard εισήγαγαν το 1979 την τεχνική των φθόγγων διερεύνησης για να ερευνήσουν το πώς ένα τονικό πλαίσιο σχετίζεται με την ακρίβεια του τόνου. Μουσικοί θεωρητικοί περιγράφουν ότι σε μια ιεραρχία φθόγγων κάποιοι φθόγγοι είναι περισσότερο σταθεροί, δομικά χαρακτηριστικοί και ηχητικά καταληκτικοί σε σχέση με άλλους. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ιεραρχίας της σταθερότητας ονομάζεται «μέθοδος των φθόγγων διερεύνησης». (Krumhansl, 1990) Παρατηρούμε ότι όταν ακούγεται μια «ελλειπής» κλίμακα, όπως οι διαδοχικοί φθόγγοι Ντο, Ρε, Μι, Φα, Σολ, Λα και Σι αυτό δημιουργεί μεγάλες προσδοκίες για τη νότα που ακολουθεί. Η τονική από μόνη της -Ντο- ακούγεται ως η καλύτερη ολοκλήρωση, ενώ άλλοι τόνοι ολοκληρώνουν την ακολουθία λιγότερο καλά. Ένας τρόπος για να προσδιοριστεί η ιεραρχία της σταθερότητας

είναι ο εξής: παίζονται ελλειπείς κλίμακες ως προς την τελευταία νότα και ζητείται από τους ακροατές να εκτιμήσουν κατά πόσο ο κάθε φθόγγος διερεύνησης ολοκληρώνει τις κλίμακες.

### **Πείραμα 1**

Ατελής χρήση ανιούσας και κατιούσας μείζονας κλίμακας του Ντο. Η ανιούσα κλίμακα ακούγονταν στην οκτάβα κάτω από το μεσαίο Ντο με νότες Ντο, Ρε, Μι, Φα, Σολ, Λα και Σι και η κατιούσα δυο οκτάβες πάνω από το μεσαίο Ντο. Οι τόνοι διερεύνησης χρησιμοποιήθηκαν αργότερα και το έργο των ακροατών ήταν να τους εκτιμήσει ως ολοκλήρωση των πλαισίων κλίμακας (1: πολύ κακό ως 7: πολύ καλό). Οι τόνοι διερεύνησης ήταν ίσα συγκεκριμένα ημιτόνια της χρωματικής κλίμακας σε έκταση οκτάβας, ανάμεσα στο μεσαίο Ντο και στο Ντο μια οκτάβα πάνω απ' αυτό (Ντο, Ντο#, Ρε, Ρε#, Μι, Φα, Φα#, Σολ, Σολ#, Λα, Λα#, Σι). Οι τόνοι παράγονταν πάνω σ' ένα ηλεκτρονικό όργανο που χρησιμοποιούσε σταματήματα φλάουτου ως καλύτερη διαθέσιμη προσέγγιση σε μια γνήσια ημιτονοειδή ταλάντωση.

### **Πείραμα 2**

Ίδιο με το πείραμα 1, αλλά οι τόνοι παράγονταν από υπολογιστή που χρησιμοποιούσε ψηφιοποιημένα ημιτονοειδή κύματα που μετατρέπονταν σε αναλογικά. Επίσης, περιείχε ως τόνους διερεύνησης τεταρτημόρια τόνων ανάμεσα στους χρωματικούς φθόγγους (η μισή απόσταση δυο χρωματικών φθόγγων σε μια λογαριθμική κλίμακα).

Οι μετέχοντες στα πειράματα αυτά ήταν φοιτητές πανεπιστημίου με ποικίλα μουσικά ακούσματα. Αναλύοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων παρατηρούμε 3 σαφή μοντέλα:

|                   |   |
|-------------------|---|
| <b>Μοντέλο 1:</b> | Έμπειροι (χρόνια εκπαίδευσης:7.4, χρόνια εκτέλεσης: 5.6). Η τονική έλαβε τα υψηλότερα ποσοστά και οι τόνοι εκτός κλίμακας τα χαμηλότερα.  |
| <b>Μοντέλο 2:</b> | Μέσης εμπειρίας (χρόνια εκπαίδευσης:5,5, χρόνια εκτέλεσης: 3.3). Η τονική έλαβε τα υψηλότερα ποσοστά. Υπήρχε σύμφωνο αποτέλεσμα των μελών για τη διατονική κλίμακα αν και το αποτέλεσμα ήταν μειωμένο σε σχέση με τα μέλη της πρώτη ομάδας. |
| <b>Μοντέλο 3:</b> | Αρχάριοι (χρόνια εκπαίδευσης: 0,7, καμία εμπειρία εκτέλεσης). Οι τόνοι που ήταν πιο κοντά στην κλίμακα ήταν προτιμητέοι.  |

Τα αποτελέσματα και για τα τρία μοντέλα ήταν ίδια ανεξάρτητα από τον τρόπο παραγωγής των τόνων (ηλ. όργανο ή υπολογιστής). Τα τεταρτημόρια δεν έκαναν διαφορά καθώς αντιμετωπίστηκαν ως κύριοι τόνοι.

Τα παραπάνω πειράματα έδειξαν διαφορετικούς τρόπους ανταπόκρισης στο θέμα των τόνων διερεύνησης. Ακροατές με μικρή εμπειρία έδωσαν έμφαση στην έκταση – διάσταση του τονικού ύψους. Ακροατές με μεγαλύτερη εμπειρία έδωσαν έμφαση στην οκτάβα και στην ιεραρχία των τονικών λειτουργιών. Μια πιθανή ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι πως απαιτείται μεγάλη εμπειρία για την γνώση – αντίληψη της τονικής ιεραρχίας και κατανόησής της.

Το 1982, η Krumhansl και ο Kessler επέκτειναν την μέθοδο των φθόγγων διερεύνησης με μια ποικιλία διαφορετικών πλαισίων (συγχορδίες και πτώσεις) σε μείζονες αλλά και ελάσσονες τονικότητες. (Toivianinen & Krumhansl, 2001) Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης επιβεβαίωσαν τις

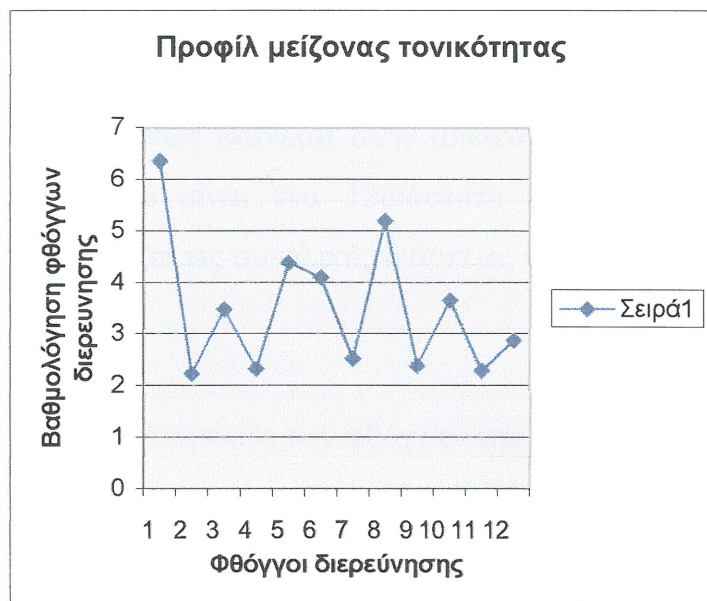
προβλέψεις των θεωρητικών μουσικών, με την τονική υψηλότερα στην ιεραρχία, ακολουθούμενη από την τρίτη και την πέμπτη της κλίμακας, ακολουθούμενη από τους υπόλοιπους φθόγγους της κλίμακας (II, IV, VI, VII) και τέλος οι μη διατονικοί φθόγγοι. Συνεπώς, τα δεδομένα προσδιορίστηκαν κατά μέσο όρο με συγκεκριμένους συντελεστές. Ονομάζουμε τα αποτελέσματα των τιμών *K-K profile* το οποίο μπορεί να αναπαρασταθεί ως διάνυσμα. Το διάνυσμα για τις μείζονες τονικότητες είναι:

1. k - k μείζον προφίλ {6,35, 2,23,3.48,2.33,4.38,4.09,2.52,5.19,2.39,3.66,2.29,2.88}

Το διάνυσμα για τις ελάσσονες κλίμακες είναι:

2. k - k ελάσσον προφίλ {6,33, 2.68, 3.52,5.38,2.60,3.53,2.54,4.75,3.98,2.69,3.34,3.17}

Τα προφίλ Κ-Κ περιγράφονται στο παρακάτω σχήμα 4.1 και 4.2 .



Σχ.4.1. Προφίλ μείζονας



Σχ.4.2. Προφίλ ελάσσονας

### 3.3. Μαθηματική Περιγραφή Αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος εντοπισμού τονικότητας κατά Krumhansl και Smuckler (1990) στηρίχθηκε στην ιδέα ότι σημαντικοί τόνοι σύμφωνα με την τονική ιεραρχία μπορούν να προκύψουν μέσω ενός ακριβούς και αποτελεσματικού αλγορίθμου, έναντι εκτιμήσεων για το αν οι τόνοι αυτοί είναι ή όχι μέλη μιας σκάλας. Όπως φαίνεται στην απεικόνιση του σχήματος 4.3 η είσοδος  $I$  του αλγορίθμου είναι ένα 12διάστατο διάνυσμα, όπου  $I=(d_1, d_2, \dots, d_{12})$  και προσδιορίζει τις συνολικές διάρκειες των 12 χρωματικών τόνων του μουσικού θέματος.

$I$  = Διάρκειες των φθόγγων του μουσικού θέματος

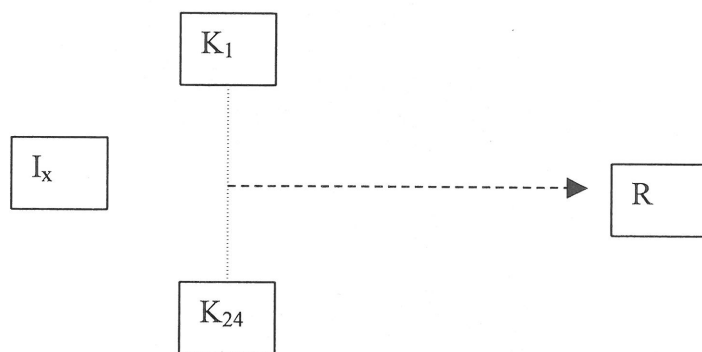
$(d_1 \dots d_{12})$

$K_i$  = Προφίλ τόνου διερεύνησης για την τονικότητα  $I$

$(P_{1i} \dots P_{12i})$

$R$  = Συσχετισμός μεταξύ διαρκειών και προφίλ

$(r_1 \dots r_{24})$



**Σχ. 4.3.** Ο αλγόριθμος εντοπισμού τονικότητας έχει ως είσοδο την κατανομή των διαρκειών των φθόγγων στο τμήμα εισόδου  $I$ . Συσχετίζεται με τα προφίλ των φθόγγων διερεύνησης (Krumhansl & Kessler, 1982) για κάθε μια από τις 24 μείζονες και ελάσσονες τονικότητες,  $K_i$ . Το διάνυσμα εξόδου είναι οι αριθμητικές εκτιμήσεις των συσχετισμών που υποδεικνύουν την δύναμη επιλογής κάθε τονικότητας,  $R$ .

Αναφορικά με το στόχο της μελέτης κάθε φορά, το διάνυσμα εισόδου μπορεί να επικεντρωθεί στο αρχικό τμήμα του μουσικού θέματος, στο τελικό ή

και σε ολόκληρο το θέμα. Η μεγαλύτερη αξία στο διάνυσμα εξόδου  $\{-1 \rightarrow 1\}$  θα δώσει την καταλληλότερη επιλογή τονικότητας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ LONGUET HIGGINS & KRUMHANSL

#### 4.1. Εισαγωγή

Τα μουσικά παραδείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή των υπολογιστικών μοντέλων του Longuet Higgins και της Carol L.Krumhansl είναι τα εξής:

1. *Dietrich Buxtehude (1637-1707)-Φούγκα σε Ντο μείζονα για εκκλησιαστικό όργανο.*
2. *J.S.Bach(1685-1750)-Φούγκα σε Μι ελάσσονα(Toccat&Fugue in E minor)*
3. *J.S.Bach-Φούγκα σε Ντο ελάσσονα σε θέμα του Legrenzi(Variant BWV 574a)*
4. *Charles Czerny(1751-1857)-Φούγκα σε Σολ ελάσσονα(Impromptu Fugue in G minor,op.776)*
5. *Johannes Brahms(1833-1897)-Φούγκα σε Λα ελάσσονα(1864) για recorder και Viola da gamba(η πρώτη έκδοση της φούγκας έλαβε χώρα το 1846 και γράφτηκε από τον ίδιο τον συνθέτη για εκκλησιαστικό όργανο σε Λαβ ελάσσονα).*
6. *Dmitri Shostakovich(1906-1975)-Φούγκα σε Φα ελάσσονα(24 Preludes and Fugues for piano,op.87)*
7. *Dmitri Shostakovich-Φούγκα σε Λαβ μείζονα(24 Preludes and Fugues for piano,op.87)*
8. *Paul Hindemith(1895-1963)-Φούγκα σε Φα μείζονα(Ludus Tonalis)*



Η επιλογή των παραπάνω μουσικών παραδειγμάτων έγινε με βάση τα εξής κριτήρια:

1. Τα παραδείγματα αυτά καλύπτουν και εκπροσωπούν χρονικά μια ευρεία ιστορική περίοδο(17<sup>ο</sup>-20<sup>ο</sup> αιώνα) και κατά συνέπεια μια περίοδο υφολογικής εξέλιξης από τη γένεση της φούγκας έως τους σύγχρονους πειραματισμούς πάνω σε αυτή.

2. Ποικιλία κλειδιών καθώς κινούνται στα πλαίσια ξεχωριστών διακριτών τονικοτήτων

3. Προσέγγιση και εφαρμογή όλων των πιθανών περιπτώσεων και κανόνων που ενσωματώνονται στους δυο αλγόριθμους.

Επιλέχθηκε η φούγκα ως είδος μουσικής γραφής προς εξέταση καθώς η μορφολογική της δομή συνηγορεί σε έναν ευδιάκριτο προσδιορισμό κλειδιών. Η έκθεση του θέματος στην αρχή είναι μονοφωνική, κάτι που βοηθάει στην λειτουργία και του προγενέστερου μοντέλου L.Higgins αλλά και του εξελιγμένου υπολογιστικά Krumhasl.

#### 4.2. Εφαρμογή των αλγόριθμων Longuet – Higgins και Krumhansl

Στο παρακάτω σχήμα (1) παρατίθεται η αρχή της φούγκας σε Ντο μείζονα του Dietrich Buxtehude.

Buxtehude  
Fuga in C Major  
BuxWV 174



Σχ. 1

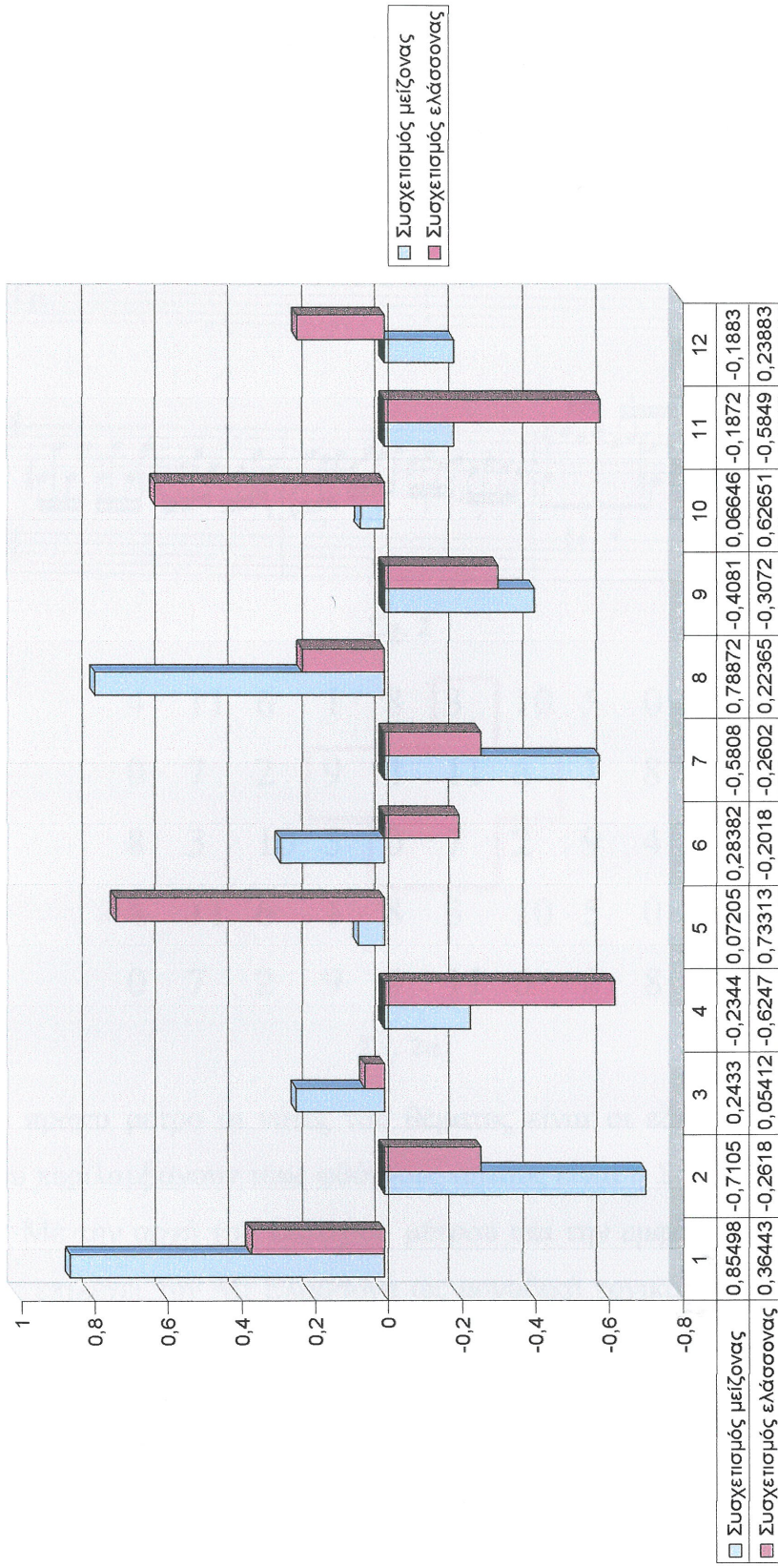
|   |    |    |   |   |    |    |   |   |
|---|----|----|---|---|----|----|---|---|
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 |
| 8 | 3  | 10 | 5 | 0 | 7  | 2  | 9 | 4 |
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 |

Σχ. 1α

Οι νότες του θέματος είναι οι  $\{0,2,4,5,6,7,9,10,11\}$ . Στο πρώτο μέτρο του θέματος οι φθόγγοι (0,4,7,9,10) καθορίζουν το κλειδί της Φα μείζονος και μόνο αυτό. Αυτό φαίνεται αν ταυτίσουμε το σχήμα L της μείζονος κλίμακας με τον παραπάνω πίνακα (Σχ. 1α). Στο σημείο αυτό ο αλγόριθμος εκτίμησε λάθος την τονικότητα. Η λάθος αυτή εκτίμηση προκύπτει από το γεγονός ότι ο αλγόριθμος δεν προχώρησε στο δεύτερο μέτρο όπου το σιβ αναιρείται και καθορίζεται εκ νέου η πραγματική τονικότητα της φουγκας, η Ντο μείζονα.

Στο σχήμα 1β παρατίθενται οι συσχετισμοί του γραφικού προφίλ της Krumhansl με το προφίλ συνολικών διαρκειών των τονικών υψών. Η Ντο μείζονα έχει το μεγαλύτερο συσχετισμό, (πλησιάζει στη μονάδα) σε σχέση με κάθε άλλη τονικότητα και είναι η επιλογή του αλγόριθμου. Ο αλγόριθμος Krumhansl εκτίμησε σωστά την τονικότητα.

### Buxtehude



Σχ. 2.

Παρατίθεται η αρχή της φούγκας σε μι ελάσσονα του J.S.Bach από την toccata&fugue σε μι ελάσσονα.



Σχ. 2

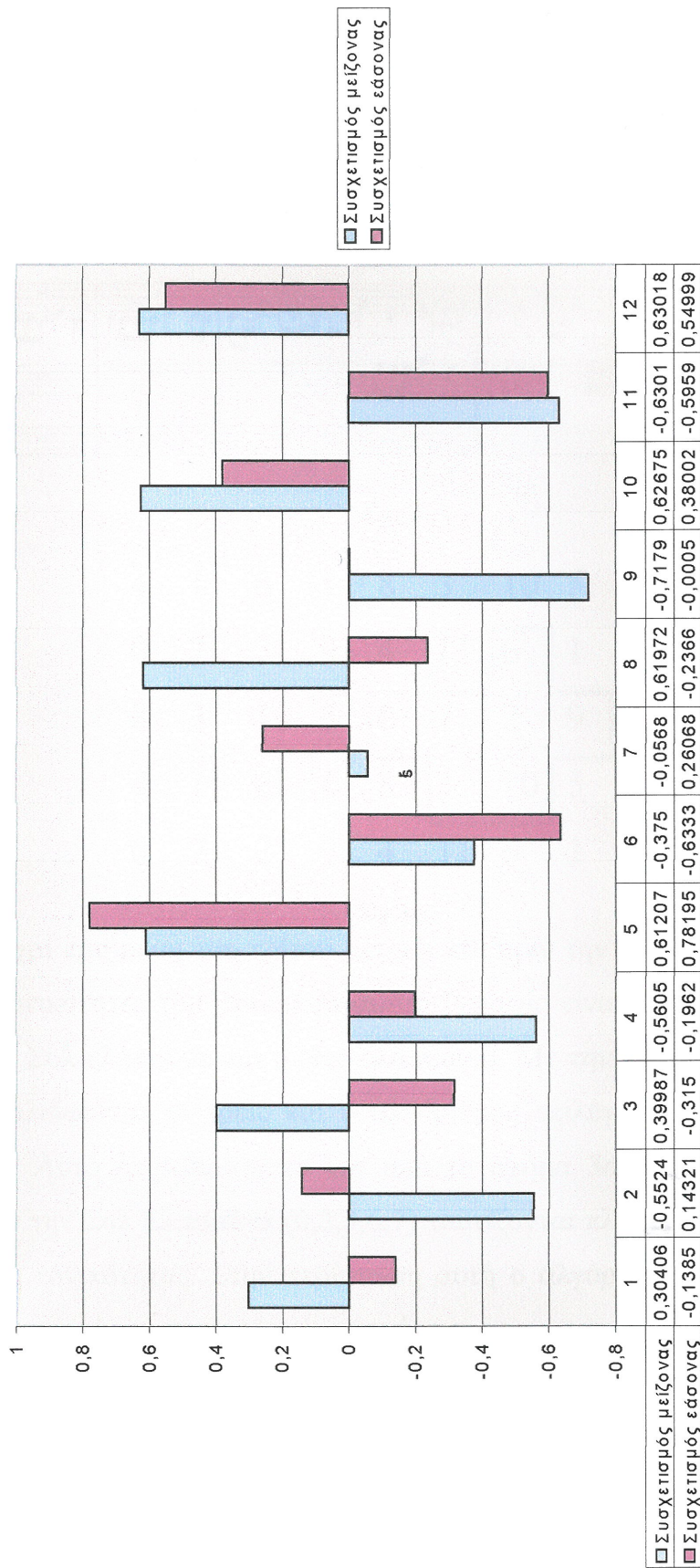
|   |    |    |   |   |    |    |   |   |
|---|----|----|---|---|----|----|---|---|
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 |
| 8 | 3  | 10 | 5 | 0 | 7  | 2  | 9 | 4 |
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 |

Σχ. 2α

Στο πρώτο μέτρο οι νότες του θέματος είναι οι εξής(0,4,6,7,9,11). Τα κλειδιά που περιλαμβάνουν τους φθόγγους αυτούς είναι η Σολ μείζονα και η μι ελάσσονα. Με την αρχή του δεύτερου μέτρου και την εμφάνιση του 3(Ρε#) ο αλγόριθμος επιλέγει την Μι Ελασσόνα ως μοναδική τονικότητα της φούγκας. Σε αυτό συμφωνεί απόλυτα και το αντίστοιχο σχήμα της ελάσσονος τονικότητας(Σχ.2α). Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος επέλεξε σωστά καθώς η τονικότητα της φούγκας είναι η Μι ελάσσονα.

Η εκτίμηση τους αλγόριθμου της Krumhansl απεικονίζεται στο παρακάτω γράφημα (Σχ.2β). Ο αλγόριθμος επιλέγει ορθώς την Μι ελάσσονα ως τονικότητα της φούγκας.

Bach-Fugue in e minor



Σχ. 2β

Στο σχήμα 3 απεικονίζεται η αρχή της φούγκας σε Ντο ελάσσονα του J.S.Bach σε μουσικό θέμα του Legrenzi.

J.S. Bach  
Fugue in C Minor  
on a Theme of Legrenzi: Variant  
BWV 574a



Σχ. 3

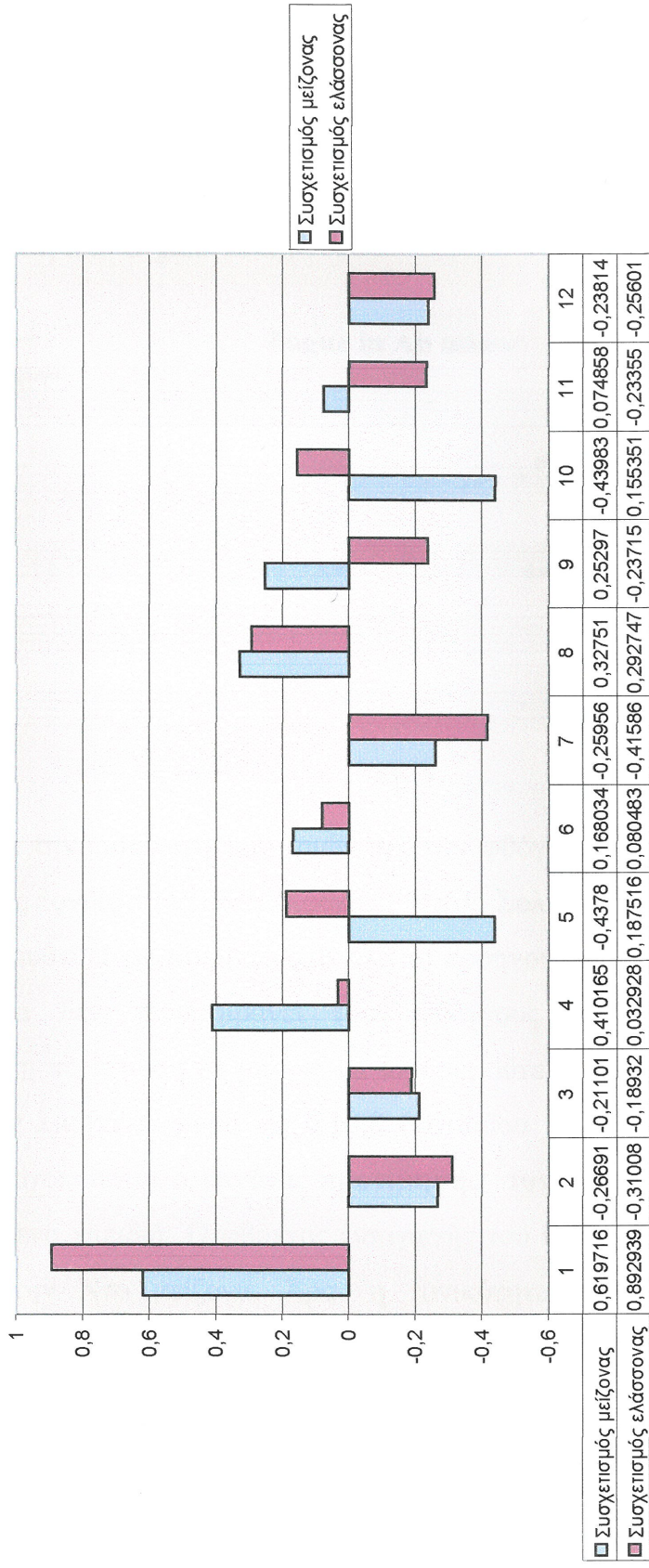
|   |    |    |   |   |    |    |   |   |
|---|----|----|---|---|----|----|---|---|
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 |
| 8 | 3  | 10 | 5 | 0 | 7  | 2  | 9 | 4 |
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 |

Σχ.3α

Μέχρι την μέση του τρίτου μέτρου και πριν την εμφανιστεί το Φα# οι πιθανές τονικότητες του μουσικού αυτού θέματος είναι 4 (Μιϋ μείζονα, Σιϋ μείζονα, η Σολ ελάσσονα και η Ντο ελάσσονα). Με την εμφάνιση της νότας 6 (Φα#) απαλείφονται οι τρεις και ο αλγόριθμος επιλέγει ως κλειδί την Σολ ελάσσονα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το σχήμα 3α καθώς οι νότες που αποτελούν την Σολ Ελασσόνα (0,2,3,6,7) ταυτίζονται πλήρως με το σχήμα της ελάσσονος τονικότητας. Στην περίπτωση αυτή ο αλγόριθμος επέλεξε λάθος τονικότητα αφού η πραγματική τονικότητα της παραπάνω φούγκας είναι η Ντο ελάσσονα.

Στην περίπτωση του αλγόριθμου Krumhansl ο αλγόριθμος επιλέγει σωστά την Ντο ελάσσονα(Σχ.3β).

### Bach-Legrenzi



Σχ. 3β

Το επόμενο μουσικό θέμα (σχ.4) που τίθεται υπό εξέταση από τον αλγόριθμο Longuet – Higgins είναι αυτό από την φούγκα του Johannes Brahms για recorders και Viola da Gamba(1864). Αυτή είναι η αναθεωρημένη έκδοση από τον ίδιο τον συνθέτη. Η πρώτη έκδοση της φούγκας έχει γραφτεί για εκτέλεση από Organ.(1846)

Johannes Brahms **Fugue in Ab minor** SATB recorders, Viola de Gamba

*Langsam*

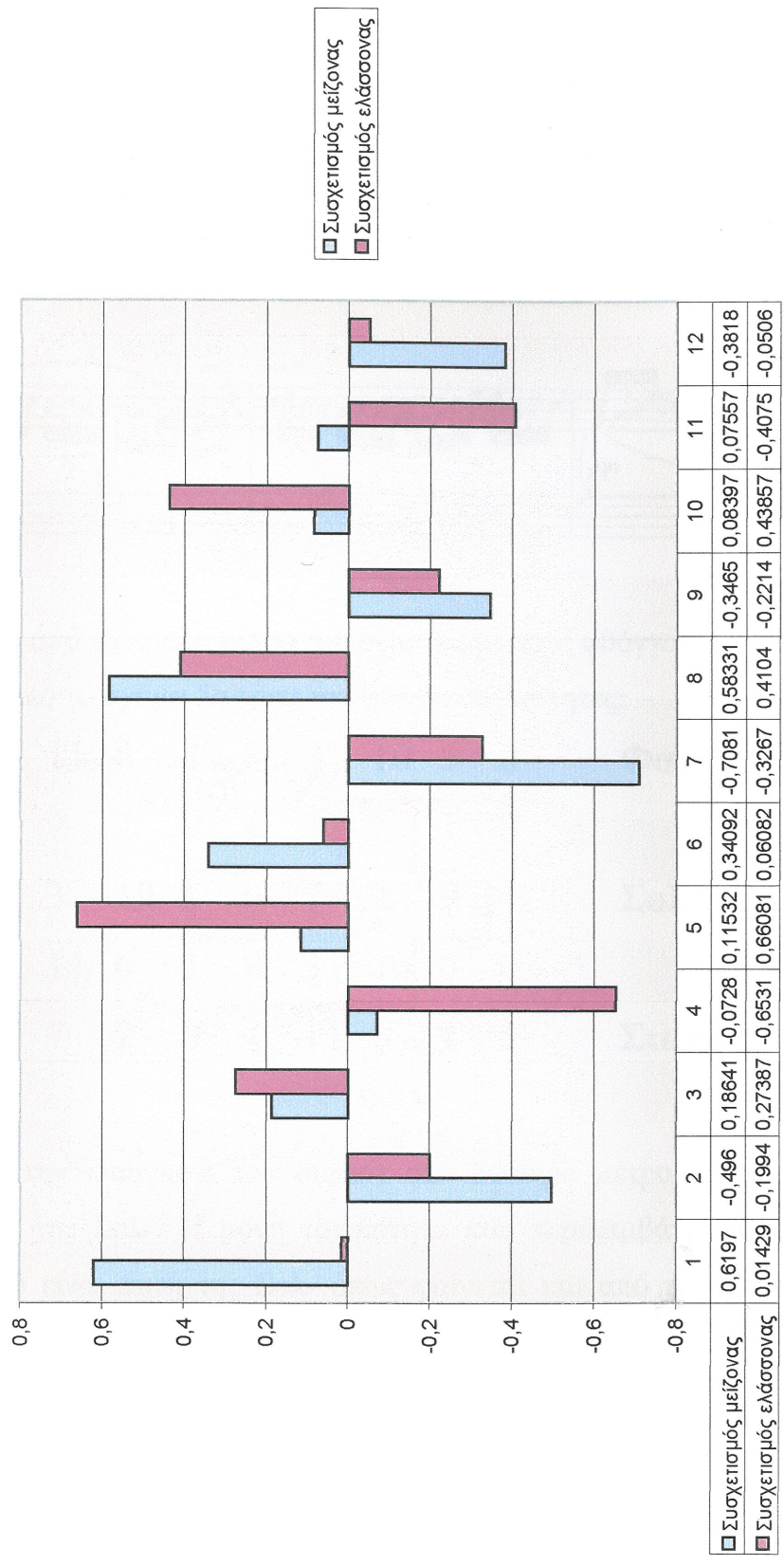
Σχ. 4

Με την εισαγωγή των τριών πρώτων φθόγγων του θέματος (0,11,4), οι υποψήφιες τονικότητες είναι τέσσερις: Ντο+, Σολ+, Λα-, Μι-. Ο φθόγγος Σιβ που ακολουθεί είναι ασύμβατος με όλα τα προηγούμενα κλειδιά, εφόσον καμία τονικότητα δεν περιλαμβάνει τους φθόγγους 0,10,11. Επιπλέον, στην προκειμένη περίπτωση δε μπορεί να ισχύσει ούτε η μελωδική σύμβαση, διότι το 10 δεν λαμβάνει χώρα ως 0,10,8 (κατιούσα της Ντο-). Στην περίπτωση αυτή, ενεργοποιείται ο κανόνας **προτίμησης τονικής / δεσπόζουσας** για τα προηγούμενα κλειδιά. Ο φθόγγος εισαγωγής του θέματος είναι το 0 και είναι τονική στην Ντο μείζονα. Άρα, η τονικότητα που επιλέγεται από τον αλγόριθμο είναι η Ντο μείζονα. Και σ' αυτή την περίπτωση ο αλγόριθμος επέλεξε **λάθος** τονικότητα. Η πραγματική τονικότητα του θέματος είναι η Λα ελάσσονα.

Και στην περίπτωση του αλγόριθμου Krumhansl η εκτίμηση της τονικότητας είναι λανθασμένη. Ο αλγόριθμός επιλέγει την Μι ελάσσονα.(Σχ.4α)



Brahms-Fugue in Ab minor



Σχ. 4α

Το επόμενο μουσικό παράδειγμα είναι από την Impromptu Fugue του Charles Czerny(σχ.5).



Σχ. 5

Ήδη από το πρώτο μέτρο του θέματος με τους φθόγγους 0,2,7,9 και 10 ορίζονται από το σχήμα 5α τρεις υποψήφιες τονικότητες:

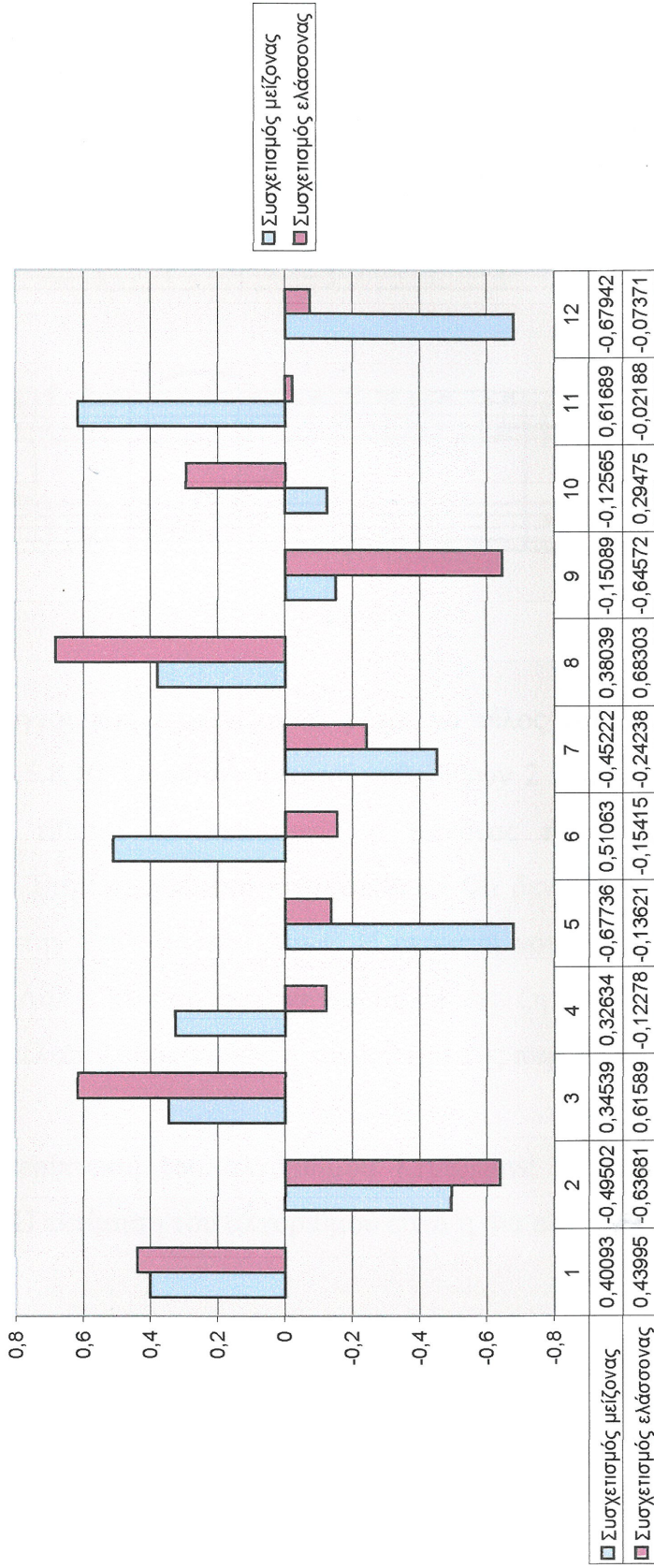
|   |    |    |   |   |    |    |   |   |           |
|---|----|----|---|---|----|----|---|---|-----------|
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 | Φα+       |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 |           |
| 8 | 3  | 10 | 5 | 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | Σολ- Σολ- |
| 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | 3  | 10 | 5 | 0 |           |
| 0 | 7  | 2  | 9 | 4 | 11 | 6  | 1 | 8 | Σιβ+      |

Σχ. 5α

Με την εισαγωγή του 6(φα#) στο δεύτερο μέτρο προσδιορίζεται η τονικότητα της Σολ-. Η μόνη τονικότητα που περιλαμβάνει τους φθόγγους 0,2,6,7,9,10 είναι αυτή της Σολ- όπως φαίνεται και από το σχήμα 5α. Στην περίπτωση αυτή το μοντέλο Longuet-Higgins προσδιόρισε σωστά την τονικότητα του μουσικού θέματος.

Στο σχήμα 5β παρουσιάζεται το γράφημα από την εξέταση του αλγόριθμου Krumhansl. Η Σολ- έχει την υψηλότερη τιμή στους συσχετισμούς και είναι η τονικότητα της φούγκας.

### Czerny-Improptu Fugue



Σχ. 5β

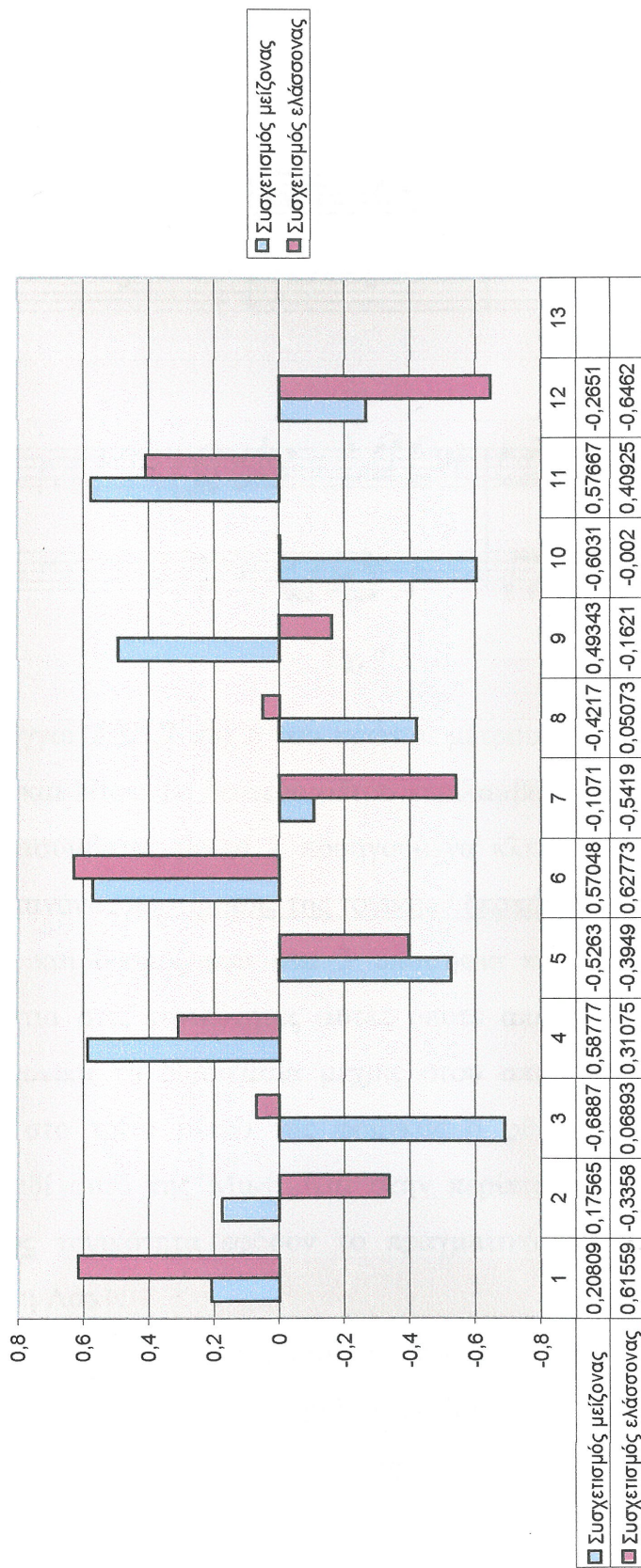
Στο σχήμα 6 αναπαρίσταται η φούγκα σε Φα- από τα 24 Πρελούνια και Φούγκες του Dmitri Schostakowitsch(αρ.18).

Σχ. 6

Οι φθόγγοι που εμφανίζονται μέχρι το τέλος του μουσικού θέματος είναι οι: 0,1,3,5,8,10. Οι φθόγγοι αυτοί καθορίζουν 2 κλειδιά(Ρεβ+ και Λαβ+) και συνεπώς τίθεται σε λειτουργία ο κανόνας **προτίμησης τονικής / δεσπόζουσας**. Στην προκειμένη περίπτωση το Φα δεν είναι ούτε τονική ούτε δεσπόζουσα στην Ρεβ+ ή στην Λαβ+. Η επόμενη νότα, δηλ. το 8(λαβ) είναι τονική στην Λαβ+ κι έτσι προτιμάται αυτή ως ζητούμενη τονικότητα. Ο αλγόριθμος επέλεξε λάθος καθώς η τονικότητα της παραπάνω φούγκας είναι η Φα-.

Στην περίπτωση του αλγόριθμου Krumhansl έχουμε σωστή επιλογή τονικότητας. Η εκτίμηση του αλγόριθμου είναι η Φα ελάσσονα(Σχ.6α).

### Schostakowitsch-Fugue in f-



Σχ. 6α

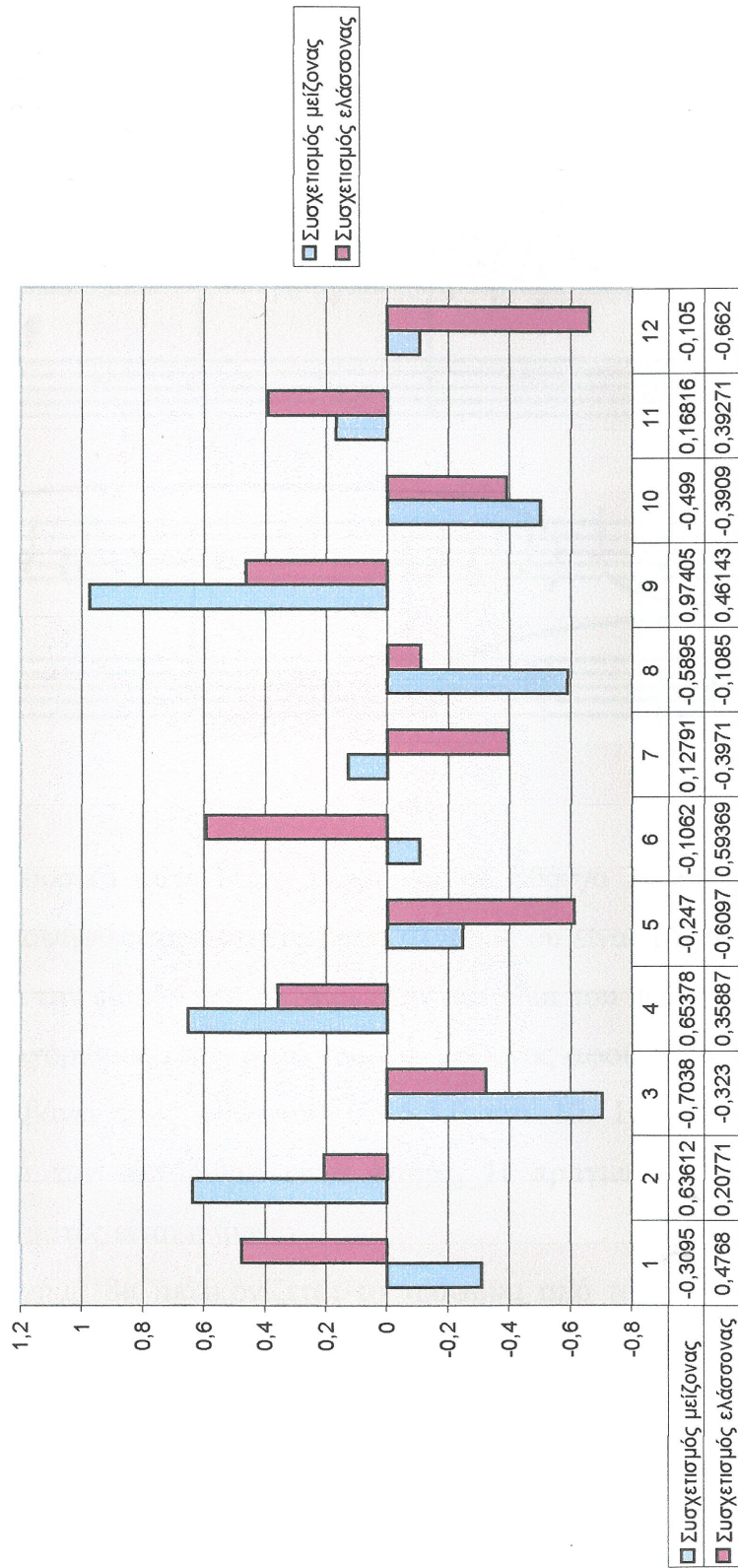
Το επόμενο μουσικό παράδειγμα που ακολουθεί(σχ.7) είναι επίσης από τα 24 Πρελούδια και Φούγκες του Dmitri Schostakowitsch (αρ17).

Σχ. 7

Οι φθόγγοι 2,3,5,7 και 8 του πρώτου μέτρου καθορίζουν 2 υποψήφια κλειδιά: Μιϑ+και Ντο-. Το δεύτερο μέτρο περιλαμβάνει τον φθόγγο 1 (Ρεβ) ο οποίος είναι ασύμβατος με τα 2 προηγούμενα κλειδιά. Συνεπώς τίθεται σε λειτουργία ο κανόνας προτίμησης της τονικής / δεσπόζουσας. Το Λαβ δεν είναι τονική ούτε και δεσπόζουσα στα 2 υποψήφια κλειδιά κι έτσι θεωρείται στοιχείο ενάντια στις τονικότητες αυτές όποτε απαλείφεται. Ο αλγόριθμος συνεχίζει κανονικά τη διαδικασία μέχρις ότου απομείνει ένα μόνο κλειδί. Πραγματικά, στο τρίτο μέτρο της φούγκας ο φθόγγος 10(Σιϑ) ορίζει ως μοναδικό κλειδί αυτό της Μιϑ+. Και στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος επέλεξε λάθος τονικότητα εφόσον το πραγματικό κλειδί του παραπάνω θέματος είναι η Λαβ+.

Στο σχήμα 7α παρουσιάζεται το γράφημα των συσχετισμών κατά Krumhansl . Όπως φαίνεται ο αλγόριθμος εκτίμησε σωστά την τονικότητα και μάλιστα με πολύ υψηλό ποσοστό συσχετισμού(0,97).

# Schostakowitch-Fugue in Ab-



Σχ. 7α

Το τελευταίο μουσικό παράδειγμα που τίθεται υπό εξέταση από τον αλγόριθμο Longuet Higgins είναι από το Ludus Tonalis του Hindemith (σχ.8).

**FUGE IN F**

Andante ♩ ca 96



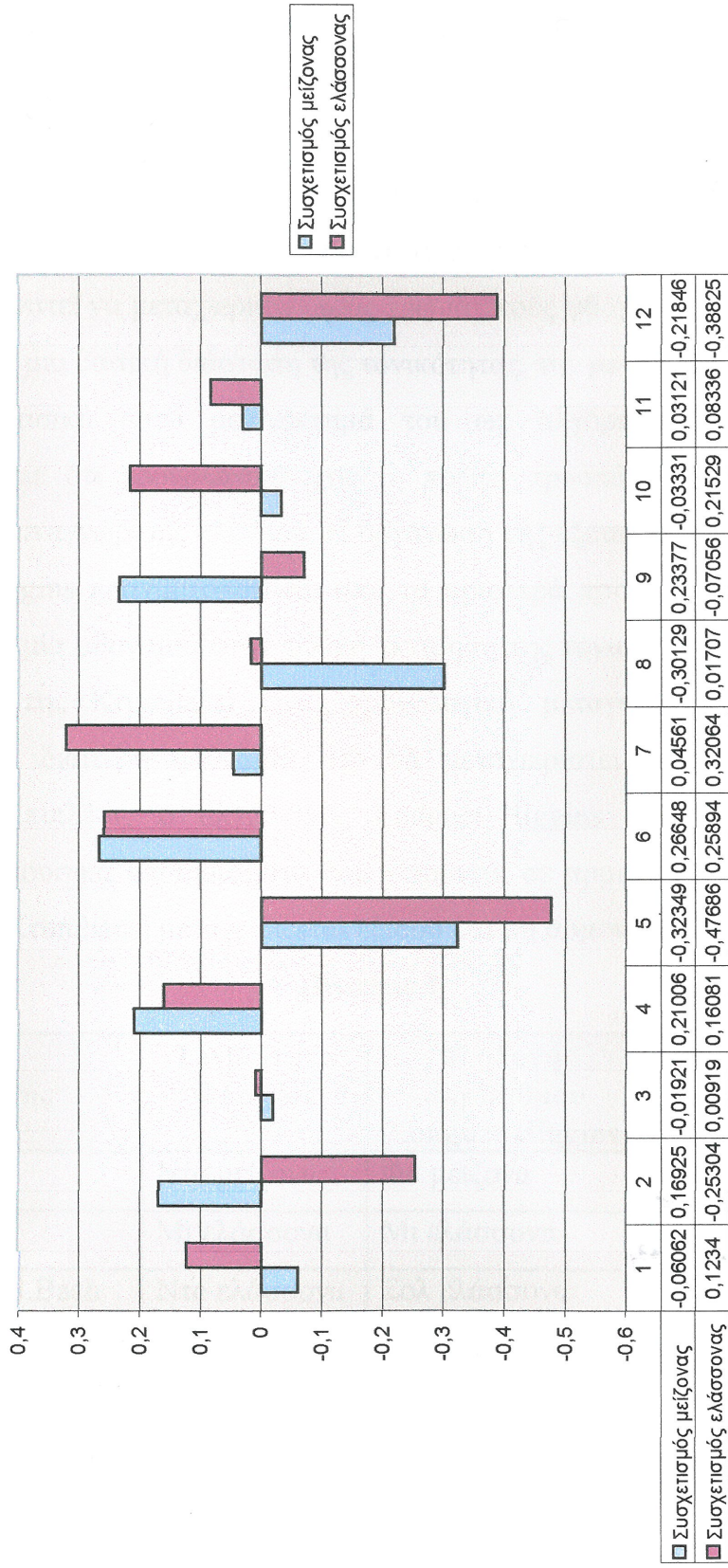
Σχ. 8

Στο μουσικό αυτό θέμα, μέχρι και το φθόγγο 10 (Σι<sub>b</sub>) του δεύτερου μέτρου οι υποψήφιες τονικότητες βάση αλγόριθμου είναι της Φα<sup>+</sup> και της Σι<sub>b</sub> μείζονος. Με την είσοδο του 3 (Μι<sub>b</sub>) στην μελωδία του θέματος το κλειδί που επιλέγει ο αλγόριθμος είναι αυτό της Σι<sub>b</sub> μείζονος αφού είναι το μόνο κλειδί που περιλαμβάνει τους φθόγγους 0,3,5,7,9 και 10. Η επιλογή αυτού του κλειδιού από τον αλγόριθμο είναι λάθος. Η πραγματική τονικότητα του παραπάνω θέματος είναι η Φα<sup>+</sup>.

Στο σχήμα 8α απεικονίζεται το γράφημα από τους συσχετισμούς του αλγόριθμου Krumhansl. Οι τιμές των συσχετισμών κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα και σε μικρή αριθμητική απόσταση μεταξύ τους. Η τονικότητα με τον μεγαλύτερο συσχετισμό είναι αυτή της Φα<sup>#</sup> ελάσσονος. Η εκτίμηση του αλγόριθμου είναι λανθασμένη.



# Hindemith-Fugue in F+



Σχ. 8α

### 4.3. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας , παρατηρούμε ότι από τα 8 μουσικά θέματα που τέθηκαν ως προς εξέταση από τους αλγόριθμους Longuet–Higgins και Krumhansl ο αλγόριθμος Krumhansl έχει με διαφορά μεγαλύτερο ποσοστό επιτυχίας στην επιλογή τονικότητας (πίνακας 1). Η αδυναμία του αλγόριθμου Longuet–Higgins να επιλέξει τη σωστή τονικότητα συνίσταται στο γεγονός ότι σαν μοντέλο αδυνατεί να μεταχειριστεί τους χρωματικούς φθόγγους και δεν μπορεί να επιληφθεί μια βασική διάσταση της τονικότητας, την **μετατροπία**.

Το βασικό αυτό μειονέκτημά του ως αλγόριθμος εξηγείται αν αναλογιστούμε ότι χρονολογικά ήταν η πρώτη προσπάθεια υπολογιστικού συστήματος αναγνώρισης κλειδιού. Η οργάνωση της εξέτασης του αλγόριθμου Longuet–Higgins πραγματοποιείται από τα αριστερά προς τα δεξιά, γεγονός που συνιστά μία αδυναμία στην τελική εκτίμηση της τονικότητας. Αντίθετα, ο αλγόριθμος της Krumhansl είναι χρονολογικά μεταγενέστερος, και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη αδυναμία στο να μεταχειριστεί τους χρωματικούς φθόγγους. Επιπλέον, ο αλγόριθμος Longuet–Higgins είναι σχεδιασμένος κυρίως για μουσικά αποσπάσματα που κινούνται σε αρμονικά πλαίσια ενώ ο αλγόριθμος Krumhansl μεταχειρίζεται εξίσου και μη αρμονικά.

Πίνακας 1

| Συνθέτης          | Τονικότητα Φούγκας | Επιλογή αλγόριθμου Longuet Higgins | Επιλογή αλγόριθμου Krumhansl |
|-------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Buxtehude         | Ντο μείζονα        | Φα μείζονα                         | Ντο μείζονα                  |
| J.S.Bach          | Μι ελάσσονα        | Μι ελάσσονα                        | Μι ελάσσονα                  |
| Legrenzi&J.S.Bach | Ντο ελάσσονα       | Σολ ελάσσονα                       | Ντο ελάσσονα                 |
| Johannes Brahms   | Λαβ ελάσσονα       | Ντο μείζονα                        | Μι ελάσσονα                  |
| Charles Czerny    | Σολ ελάσσονα       | Σολ ελάσσονα                       | Σολ ελάσσονα                 |
| Schostakowitsch   | Φα ελάσσονα        | Λαβ μείζονα                        | Φα ελάσσονα                  |
| Schostakowitsch   | Λαβ μείζονα        | Μιβ μείζονα                        | Λαβ μείζονα                  |
| Hindemith         | Φα μείζονα         | Σιβ μείζονα                        | Φα# ελάσσονα                 |

Εν κατακλείδι, ο αλγόριθμος Longuet–Higgins είχε μικρότερα ποσοστά επιτυχίας στην επιλογή τονικότητας από τον αλγόριθμο της Krumhansl, αλλά δικαιωματικά ήταν η πρώτη προσπάθεια υπολογιστικού μοντέλου στην οποία στηρίχθηκαν μετέπειτα έρευνες για τον προσδιορισμό της τονικότητας.

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- Andrews, M. W., & Dowling, W. J. (1991) *The Development of Perception of Interleaved Melodies and Control of Auditory Attention. Music Perception*
- Dahlhaus, Carl (1980). *The New Grove Dictionary of music and musicians*. Edited by Stanley Sadie
- Dowling, W. Jay and Harwood, Dane L. (1986) *Music Cognition*. Academic Press Series I-Cognition and Perception .
- Dunsby, Jonathan (1983). *The New Oxford Companion to Music (vol.2)*, Edited by Denis Arnold
- Krumhansl, Carol L.(1990) *Cognitive Foundations of Musical Pitch*. Oxford Psychology Series 17.
- Longuet-Higgins, H. C., and M. J. Steedman. (1971). *On Interpreting Bach*. Machine Intelligence 6.
- Meyer, L.B.(1956) *Emotion and meaning in music*. Chicago:University of Chicago Press
- Purwins Hendrik. (2005) *Profiles of Pitch Classes-Circularity of Relative Pitch and Key- Experiments, Models, Computational Music Analysis, and Perspectives*. Retrieved August 15, 2005 from the World Wide Web: <http://www.upei.ca/~musicog/research/Musicalstructure.html>
- Steedman, Mark (1994). *The Well Tempered Computer*. Retrieved November 1994 from the World Wide Web: <http://www.music-cog.ohiostate.edu>
- Temperley, David. (2001) *The Cognition of Basic Musical Structures*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.