



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΧΙΝΤΕΜΙΤ,  
ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΣΥΓΧΟΡΔΙΑΣ  
ΚΑΙ ΜΙΑ ΝΕΑ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ  
ΟΝΤΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΧΟΡΙΚΑ ΤΟΥ Γ. Σ. ΜΠΑΧ

HINDEMITH'S CRAFT OF MUSICAL COMPOSITION,  
AUTOMATED CHORD RECOGNITION AND  
A NOVEL ONTOLOGY-BASED HARMONIC ANALYSIS  
ON J. S. BACH CHORALES

*Θανάσης – Σπύρος Αποστολόπουλος*

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

Επιβλέπων Καθηγητής:  
Γιώργος Στάμου, Καθηγητής ΕΜΠ





# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΑΘΗΣΗ

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΤΟΥ ΧΙΝΤΕΜΙΤ,  
ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΣΥΓΧΟΡΔΙΑΣ  
ΚΑΙ ΜΙΑ ΝΕΑ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ  
ΟΝΤΟΛΟΓΙΕΣ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΧΟΡΙΚΑ ΤΟΥ Γ. Σ. ΜΠΑΧ

HINDEMITH'S CRAFT OF MUSICAL COMPOSITION,  
AUTOMATED CHORD RECOGNITION AND  
A NOVEL ONTOLOGY-BASED HARMONIC ANALYSIS  
ON J. S. BACH CHORALES

*Θανάσης – Σπύρος Αποστολόπουλος*

Αθήνα, Νοέμβριος 2021

Επιβλέπων Καθηγητής:  
Γιώργος Στάμου, Καθηγητής ΕΜΠ



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Ανάμεσα σε αυτούς που αισθάνεται κανείς την ανάγκη να ευχαριστήσει σε αυτό το σημείο, η πρώτη θέση στην περίπτωση μου ανήκει αναμφίβολα και δικαιωματικά – θάλεγε κανείς – στους καθηγητές της ΣΗΜΜΥ Γιώργο Στάμου και Ανδρέα Σταφυλοπάτη, για την πολύπλευρη βοήθεια και την εμπιστοσύνη που μου έχουν δείξει εδώ και πολλά χρόνια. Θέλω επίσης στο σημείο αυτό να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Έντυ Ντερβάκο και Σπύρο Κανταρέλη για την καλοσύνη τους να διαβάσουν την εργασία αυτή και για τις τόσο καίριες συμβουλές τους.

Από μια τέτοια σελίδα με ευχαριστίες, δεν θα ήταν σωστό να λείπει μια αναφορά στον καθηγητή Κώστα Κοντογιάννη, του οποίου η στήριξη στάθηκε για μένα κάτι παραπάνω από πολύτιμη, σε μια περίοδο όπου ξαναγυρνούσα στην επιστήμη του μηχανικού έχοντας ολοκληρώσει έναν πολύχρονο κύκλο μακριά από αυτήν.

Ευχαριστώ επίσης τον εξάίρετο πιανίστα και φίλο Στέφανο Νάσο για την ευγενική παραχώρηση της άδειας για ανατύπωση των μουσικών παραδειγμάτων από την ελληνική έκδοση του «Συστήματος Μουσικής Σύνθεσης» του Π. Χίντεμιτ. Πρέπει να πω εδώ ότι οι εκδόσεις Νάσος έχουν καλύψει, με επιμονή δεκαετιών και σχεδόν από μόνες τους, ένα τεράστιο κενό στο χώρο του μουσικοθεωρητικού βιβλίου στην ελληνική γλώσσα. Το εγκώμιο που τους αρμόζει υπερβαίνει φυσικά κατά πολύ τις δικές μου ταπεινές ευχαριστίες.

Στη γυναίκα μου Βασιλική αρμόζει κάτι πολύ πιο βαθύ από τις όποιες ευχαριστίες μπορώ ποτέ να της απευθύνω από τη θέση αυτή: της οφείλω άμετρη ευγνωμοσύνη που συνεχίζει (συχνά αναρωτιέμαι γιατί...) να είναι πάντα δίπλα μου και να με υπομένει.

*Πάνω απ' όλους και απ' όλα όμως, θα ήθελα να αφιερώσω την εργασία τούτη στους γονείς μου, τη Σουζάνα και τον Κώστα. **Και τους δυο** τους έχω και θα τους έχω **για πάντα** στο πλάι μου...*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η αναγνώριση συγχορδίας είναι ένα από τα ζητούμενα στα οποία καλείται να απαντήσει η ανάκτηση μουσικής πληροφορίας. Ανοίγει το δρόμο στην αρμονική ανάλυση και κατ' επέκταση στην παραγωγή μουσικής με μηχανικά μέσα, έτσι ώστε αυτή να ικανοποιεί στυλιστικά κριτήρια σε βαθμό που να μπορεί να συγκριθεί με αντίστοιχα ανθρώπινα δημιουργήματα. Μεγάλο μέρος της μέχρι τώρα έρευνας έχει εστιάσει στην τονική μουσική και δεσμεύεται από τονικά αρμονικά συστήματα. Το γεγονός αυτό αποτελεί δυνητικά έναν ανασχετικό παράγοντα κατά την ανάλυση μουσικής εκτός της τονικής νόρμας, όπως είναι η μουσική του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η τζαζ ή διάφορες λαϊκές μουσικές παραδόσεις. Ο Πάουλ Χίντεμιτ (1895-1963), μια σπουδαία προσωπικότητα του πρώτου μισού του περασμένου αιώνα, υιοθέτησε μια πρωτότυπη και ολιστική προσέγγιση στη μουσική σύνθεση. Στο *Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης* (1937), απορρίπτει ριζικά την τονική αρμονία, τις συγχορδίες που χτίζονται πάνω σε επάλληλες τρίτες και τις λειτουργίες τους στο πλαίσιο της τονικότητας. Αντί γι' αυτά, ταξινομεί εξαντλητικά τις συνηχήσεις, αποκλειστικά με βάση τη φύση των διαστημάτων που περιέχουν και ανεξάρτητα από το πλήθος των φθόγγων που τις απαρτίζουν. Πάνω σε αυτή τη βάση, κατασκευάζει ένα καινούργιο ολοκληρωμένο αρμονικό σύστημα.

Η παρούσα εργασία υλοποιεί τη θεωρητική κατασκευή του Χίντεμιτ στη μορφή ενός οντολογικού σχήματος αναπαράστασης γνώσης. Η βάση γνώσης που προκύπτει εκτελεί πλήρη αρμονική ανάλυση σε μια ακολουθία συγχορδιών, επεξεργαζόμενη τις συνηχήσεις με τα χαρακτηριστικά τους, τοποθετώντας τις στις αντίστοιχες υπο-ομάδες και παράγοντας παράλληλα αυτό που ο Χίντεμιτ ονομάζει *αρμονική διακύμανση*. Η ανάλυση αυτού του τύπου εφαρμόζεται στη συνέχεια στα χορικά του Μπαχ. Αρχικά, συγκρίνονται διαφορετικές επεξεργασίες της ίδιας μελωδίας, μέσα από τις οποίες αναδύονται χρήσιμα συμπεράσματα πάνω στην πρακτική της εναρμόνισης. Στη συνέχεια αναλύουμε ένα ικανό δείγμα από το σύνολο των χορικών του Μπαχ, αποθηκεύουμε τα αντίστοιχα ευρήματα σε μια βάση τριάδων (RDF triplestore) και προχωρούμε στη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων. Σε μελλοντικό στάδιο, η έρευνα μπορεί να εμπλουτίσει τη βάση γνώσης με τις θεωρίες του Χίντεμιτ γύρω από τα τονικά κέντρα και τις μελωδικές κινήσεις των φωνών, όπως επίσης και να την εφαρμόσει σε διαφορετικά μουσικά στυλ. Η βάση γνώσης μπορεί ακόμα να δουλέψει παράλληλα με άλλα προγράμματα – που βασίζονται στην τονική αρμονία – για την αυτοματοποιημένη συμπλήρωση των κενών σε μια εναρμόνιση χορικού (σε πρώτη φάση) και τελικά να προωθήσει την έρευνα γύρω από την παραγωγή μουσικής με μηχανικά μέσα.





## ABSTRACT

---

Chord recognition is one of the core tasks in music information retrieval. It enables harmonic analysis on a mechanical basis and ultimately the production of machine-made music, aiming to the simulation of stylistic precepts on a sufficiently high level as to render it comparable to human creations. A large part of existing research is focused on and limited by tonal music and tonal harmonic rule systems. This may prove a restricting factor when analyzing music outside the tonal norm, such as music of the XX century, jazz or diverse folk musical traditions. Paul Hindemith (1895-1963), a major figure of the first half of last century, has devised a novel and holistic approach to musical composition. In his *Craft of Musical Composition* (1937), he does radically away with tonal harmony, its chords built on superposed thirds and their functions within tonality. Instead, he classifies tone simultaneities in an exhaustive way, irrespective of the number of their distinct tones, solely upon the exact nature of intra-chord intervals. On this basis, he builds a new integrated harmonic system.

The thesis at hand implements Hindemith's original theoretical structure in the form of an ontological knowledge representation scheme. The ensuing knowledge base performs harmonic analysis of a chordal sequence, working with tone simultaneities and their features, assigning them to their respective chordal groups while also plotting Hindemith's harmonic fluctuation. Analysis in this form is then applied to Bach chorales, at first comparing different versions on the same melody and drawing useful insights on harmonic setting practices. We then select a large sample from Bach's chorale corpus, collect harmonic data in a RDF triplestore and finally perform statistical processing. Further research may direct our knowledge base toward Hindemith's theories on tonal centers and melodic voice leading, as well as apply it to diverse musical styles. This knowledge base may also work in parallel with other tonal-based programs, at first towards automated completion of a chorale harmonic setting, ultimately assisting in research on mechanical music production.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

1	<i>Εισαγωγή – Αντικείμενο και δομή εργασίας</i> .....	17
1.1	Ανάκτηση μουσικής πληροφορίας .....	17
1.2	Αναγνώριση συγχορδίας – Αυτοματοποιημένη αρμονική ανάλυση .....	18
1.3	Η παρούσα εργασία.....	19
2	<i>Σύντομη επισκόπηση της Υπολογιστικής Αρμονικής Ανάλυσης</i> .....	21
2.1	Μοντέλα μηχανικής μάθησης για την αναγνώριση συγχορδίας .....	21
2.2	Μοντέλα γνώσης για την αρμονική ανάλυση .....	22
2.3	Ερευνα πάνω στα χορικά του Γ. Σ. Μπαχ .....	23
3	<i>Στοιχεία Μουσικής Θεωρίας και Αρμονίας</i> .....	27
3.1	Διαστήματα – Μουσικοί τρόποι .....	27
3.2	Σύμφωνες και διάφωνες συγχορδίες .....	28
3.3	Διπλασιασμοί – Αναστροφές.....	29
3.4	Τονικές περιοχές – Μετατροπίες – Λειτουργική Αρμονία.....	30
3.5	Συγχορδίες με ξένους φθόγγους .....	30
3.6	Τα χορικά του Γ. Σ. Μπαχ.....	31
4	<i>Το αρμονικό σύστημα του Πάουλ Χίντεμιτ</i> .....	33
4.1	Σειρές 1 και 2 – Διαστήματα – Θεμέλιοι.....	33
4.2	Η Αρμονία στο Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης.....	35
4.3	Κατάταξη των συγχορδιών – Αρμονική διακύμανση .....	37
4.4	Δίφωνο πλαίσιο – Ακολουθίες θεμελίων .....	38
5	<i>Οντολογία, οντολογίες και ο Σημασιολογικός Ιστός</i> .....	43
5.1	Γενικά για τις οντολογίες .....	43
5.2	Συνδεδεμένα Δεδομένα.....	44
6	<i>Η RDF(S) και η γλώσσα ερωτημάτων SPARQL</i> .....	45
6.1	Πόροι και τριάδες RDF.....	45
6.2	Η γλώσσα RDF(S).....	46
6.3	Οντολογίες και RDF(S) .....	47

6.4	Η γλώσσα SPARQL.....	47
7	Περιγραφικές Λογικές.....	49
7.1	Σώματα ορολογίας και ισχυρισμών.....	49
7.2	Κατασκευαστές εννοιών και ρόλων.....	50
7.3	Περιγραφικές λογικές και συλλογιστική .....	52
8	Η γλώσσα οντολογίας OWL και το PROTÉGÉ.....	55
8.1	Η γλώσσα OWL .....	55
8.2	Η γλώσσα OWL 2.....	56
8.3	Το Protégé.....	58
9	Η οντολογία CoMC .....	61
9.1	Περιγραφή της CoMC .....	61
9.2	Το Owlready2 και η οντολογία CoMC.....	69
10	Εφαρμογές της οντολογίας CoMC – Αποτελέσματα.....	77
10.1	Το χορικό <i>Jesu, meine Freude</i> – Συγκριτική αρμονική ανάλυση .....	77
10.2	Στατιστικά ευρήματα πάνω στα χορικά του Γ. Σ. Μπαχ.....	83
11	Συμπεράσματα.....	99
12	Βιβλιογραφία .....	103
13	Παραρτήματα.....	109
13.1	Παράρτημα 1: Οι υπο-ομάδες στο Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης .....	111
13.2	Παράρτημα 2: Ενα παράδειγμα εφαρμογής του ΣΜΣ .....	112
13.3	Παράρτημα 3: Τονικά ύψη (έκταση του πιάνου) – Αντιστοιχία σε αριθμούς MIDI.....	115
13.4	Παράρτημα 4: Η ιεραρχία των κλάσεων στην οντολογία CoMC.....	116
13.5	παραρτημα 5: Το ακόρντο του Τριστάνου στην οντολογία CoMC.....	117
13.6	Παράρτημα 6: Το χορικό <i>Jesu, meine Freude</i> [ed. Breitkopf , #138].....	119
13.7	Παράρτημα 7: Τα χορικά του chorale_set.....	120
13.8	Παράρτημα 8: Κώδικας Python 3 / Owlready2 .....	123

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

Πίνακας 4.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του Συστήματος Μουσικής Σύνοθεσης .....	40
Πίνακας 8.1: Εκφραστικότητα της OWL .....	56
Πίνακας 8.2: Αντιστοιχία προφίλ OWL με περιγραφικές λογικές .....	57
Πίνακας 9.1: Η συνάρτηση chord_info(), ψευδοκώδικας .....	71
Πίνακας 9.2: Η συγχορδία του Τριστάνου .....	71
Πίνακας 9.3: Η ακολουθία της πρώτης φράσης του Τριστάνου .....	72
Πίνακας 9.4: Η συνάρτηση derone_progression(), ψευδοκώδικας .....	72
Πίνακας 9.5: Ελαττωμένη συγχορδία μεθ' εβδόμης (υπο-ομάδα VI) .....	73
Πίνακας 9.6: Η πτώση I - IV6 - VII7b – I στη ντο μείζ .....	73
Πίνακας 9.7: Jesu, meine Freude #138, csv_file, γραμμές 1-20 .....	74
Πίνακας 9.8: Jesu, meine Freude #138, η πρώτη φράση στην CoMC .....	75
Πίνακας 9.9: Η συνάρτηση chorale_load_ontology(), ψευδοκώδικας .....	75
Πίνακας 10.1: Προσθήκη ιδιοτήτων για τις υπο-ομάδες στο chorales_repository .....	88
Πίνακας 10.2: Ερώτημα SPARQL για τις μεταβάσεις (υπο-ομάδες) από μια συγχορδία στην επόμενη ...	89
Πίνακας 10.3: Ερώτημα για τις μεταβάσεις (ακολουθία θεμελίων) από μια συγχορδία στην επόμενη ..	90
Πίνακας 10.4: Μεταβάσεις με ίδια θεμέλιο ανάμεσα σε δύο διαδοχικά τέταρτα του μέτρου .....	91
Πίνακας 10.5: Συγχορδίες τύπου IV, ερώτημα α .....	92
Πίνακας 10.6: Συγχορδίες τύπου IV, ερώτημα β .....	93
Πίνακας 10.7: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα α .....	94
Πίνακας 10.8: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα β .....	95
Πίνακας 10.9: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα γ .....	95
Πίνακας 13.1: Τα 57 χορικά του chorale_set.....	121



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

---

Εικόνα 1: Σειρές 1 και 2 .....	34
Εικόνα 2: Οι θεμέλιοι των διαστημάτων .....	34
Εικόνα 3: Τρίτονα - Εκπρόσωποι της θεμελίου .....	35
Εικόνα 4: Θεμέλιοι συγχορδιών .....	36
Εικόνα 5: Συγχορδίες της υπο-ομάδας VI (θεμέλιος απροσδιόριστη) .....	37
Εικόνα 6: Συγχορδίες της Ομάδας B, θεμέλιοι και προσαγωγείς .....	38
Εικόνα 7: Ένα παράδειγμα αρμονικής διακύμανσης .....	38
Εικόνα 8: Ακολουθίες θεμελίων και κινήσεις προσαγωγέων, Ομάδα B προς Ομάδα A.....	39
Εικόνα 9: Ακολουθίες θεμελίων και κινήσεις προσαγωγέων, ακολουθίες Ομάδας B.....	39
Εικόνα 10: Στοίβα επιπέδων του Σημασιολογικού Ιστού .....	58
Εικόνα 11: CoMC, ιεραρχία κλάσεων .....	61
Εικόνα 12: CoMC, ιδιότητες αντικειμένων .....	62
Εικόνα 13: CoMC, ιδιότητες τύπου δεδομένων .....	62
Εικόνα 14: Ο ορισμός της κλάσης Interval .....	64
Εικόνα 15: Η περιγραφή της κλάσης Chord.....	64
Εικόνα 16: Οι Ομάδες και υπο-ομάδες στην CoMC .....	65
Εικόνα 17: Οι υποκλάσεις της PitchClass.....	65
Εικόνα 18: Η ιεραρχία της κλάσης Interval.....	66
Εικόνα 19: Η ιδιότητα δεδομένων series2.....	66
Εικόνα 20: Η περιγραφή της κλάσης Maj2nd.....	67
Εικόνα 21: Η περιγραφή της κλάσης Tritone.....	68
Εικόνα 22: Η περιγραφή της υπο-ομάδας IIb1.....	69
Εικόνα 23: Jesu, meine Freude, 1 <sup>η</sup> φράση / 1.....	79
Εικόνα 24: Jesu, meine Freude, 1 <sup>η</sup> φράση / 2.....	79
Εικόνα 25: Jesu, meine Freude, 1 <sup>η</sup> φράση / 3.....	79
Εικόνα 26: Jesu, meine Freude, 4 <sup>η</sup> φράση / 1.....	80
Εικόνα 27: Jesu, meine Freude, 4 <sup>η</sup> φράση / 2.....	80
Εικόνα 28: Jesu, meine Freude, 4 <sup>η</sup> φράση / 3.....	80
Εικόνα 29: Jesu, meine Freude, 6 <sup>η</sup> φράση / 1.....	81
Εικόνα 30: Jesu, meine Freude, 6 <sup>η</sup> φράση / 2.....	81
Εικόνα 31: Jesu, meine Freude, 6 <sup>η</sup> φράση / 3.....	81
Εικόνα 32: Jesu, meine Freude, (Μπαχ #138) – Αρμονική διακύμανση .....	83
Εικόνα 33: Jesu, meine Freude, (Μπαχ #138) – Αρμονική διακύμανση ανά όγδοο .....	86
Εικόνα 34: Ακολουθία βημάτων για την αρμονική ανάλυση χορικών μέσω της CoMC.....	87
Εικόνα 35: Η κατανομή των συγχορδιών του chorales_set ανά υπο-ομάδες.....	88
Εικόνα 36: Πίνακας μεταβάσεων, on_the_beat.....	89
Εικόνα 37: Πίνακας μεταβάσεων, off_the_beat .....	90

Εικόνα 38: Μεταβάσεις θεμελίων (ασθενές προς ισχυρό όγδοο) .....	91
Εικόνα 39: Αμετάβλητη θεμέλιος σε δύο διαδοχικούς χρόνους του μέτρου .....	91
Εικόνα 40: Συγχορδίες τύπου IV, ερώτημα α .....	92
Εικόνα 41: Συγχορδίες τύπου IV, ερώτημα β .....	93
Εικόνα 42: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα α .....	94
Εικόνα 43: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα β.....	95
Εικόνα 44: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα γ .....	96
Εικόνα 45: Η συγχορδία chord5009, τύπου III, από το χορικό BWV 124/6 .....	96
Εικόνα 46: Απόσπασμα από το χορικό BWV 124/6.....	97
Εικόνα 47: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 1 .....	112
Εικόνα 48: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 2 .....	113
Εικόνα 49: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 3 .....	113
Εικόνα 50: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 4 .....	114
Εικόνα 51: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 5 .....	114
Εικόνα 52: Η πρώτη φράση από την όπερα «Τριστάνος και Ιζόλδη» του Ρίχαρντ Βάγκνερ.....	117
Εικόνα 53: Το ακόρντο του Τριστάνου στην CoMC, 1 .....	117
Εικόνα 54: Το ακόρντο του Τριστάνου στην CoMC, 2 .....	118
Εικόνα 55: Το ακόρντο του Τριστάνου στην CoMC, 3 .....	118
Εικόνα 56: Το μέγεθος του chorales_repository .....	121
Εικόνα 57: Οι εναρκτήριες συγχορδίες των 57 χορικών του chorale_set.....	122



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

---

## 1.1 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

Η *Ανάκτηση Μουσικής Πληροφορίας* (Music Information Retrieval, ΑΜΠ) είναι ένα διεπιστημονικό πεδίο έρευνας που εστιάζει στην επαγωγή ουσιωδών χαρακτηριστικών της μουσικής και την ανάπτυξη σχημάτων αναζήτησης, διεπαφών χρήστη για την περιήγηση σε μουσικές συλλογές κ.ά. (Schedl, et al., 2014) Η κωδικοποίηση χαρακτηριστικών με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω σε διάφορα είδη μουσικής είναι βέβαια μια πρακτική γνωστή από παλιότερα στους μουσικολόγους. Από την άλλη μεριά, η πλατιά χρήση των υπολογιστών από το '60 και μετά άνοιξε νέους δρόμους στη μουσική ανάλυση, οδηγώντας στην ανάπτυξη της υπολογιστικής μουσικολογίας και της ανάκτησης μουσικής πληροφορίας. Τη δεκαετία του 1990, οι προσωπικοί υπολογιστές, το διαδίκτυο και ο παγκόσμιος ιστός έδωσαν νέα ώθηση στην έρευνα και παράλληλα επέτρεψαν την μαζική κυκλοφορία εφαρμογών που προορίζονται για απλούς χρήστες. Το πρώτο Διεθνές Συμπόσιο για την ΑΜΠ πραγματοποιήθηκε το 2000. Λίγο αργότερα, ιδρύθηκε η Διεθνής Εταιρία για την Ανάκτηση Μουσικής Πληροφορίας (International Society for Music Information Retrieval, *ISMIR*<sup>1</sup>), τα ετήσια συνέδρια της οποίας αποτελούν το κατεξοχήν φόρουμ προώθησης της έρευνας πάνω στην ΑΜΠ.

Η αναζήτηση μουσικού περιεχομένου είναι χωρίς αμφιβολία μια από τις πιο συχνότερες δραστηριότητες στο διαδίκτυο και ο όγκος της σχετικής πληροφορίας που καταχωρείται και αποθηκεύεται κάθε χρόνο αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς. Όλη αυτή η πληροφορία, από την πιο πρόσφατη κυκλοφορία ενός δημοφιλούς ποπ τραγουδιού μέχρι την πλέον εξειδικευμένη μουσική πληροφορία που βρίσκεται θαμμένη σε μια μουσική βιβλιοθήκη, μπορεί θεωρητικά να καταστεί προσβάσιμη με το πάτημα λίγων πλήκτρων στον υπολογιστή. Η υλοποίηση στην πράξη μιας τέτοιας διαδικασίας δεν είναι βέβαια καθόλου προφανής ή εύκολη υπόθεση.

Κατά την ανάκτηση μουσικής πληροφορίας, η είσοδος συνίσταται κατά κανόνα σε *ψηφιακά μουσικά δεδομένα*, τα οποία συναντούμε συνήθως σε κάποια από τις ακόλουθες τέσσερις μορφές: μουσικά χειρόγραφα ή τυπωμένες παρτιτούρες, συμβολικά μουσικά δεδομένα (λ.χ. MIDI αρχεία), αρχεία ήχου σε ψηφιακή μορφή και τέλος μετα-δεδομένα με ποικίλο περιεχόμενο. (Burgoyne, και συν., 2016)

Ανάμεσα στις εφαρμογές της ΑΜΠ συγκαταλέγονται, μεταξύ άλλων

- η αναγνώριση και ανάκτηση ενός μουσικού κομματιού από ορισμένα στοιχεία, όπως τις αρχικές νότες, κάποιο μικρό τμήμα του κοκ.

---

<sup>1</sup> <http://www.ismir.net>

- η υλοποίηση συστημάτων που συστήνουν μουσική (music recommendation systems) με βάση παλιότερες προτιμήσεις του χρήστη, τη διάθεσή του ή παρόμοια κριτήρια
- η δημιουργία λίστας μουσικών επιλογών (playlist)
- η υλοποίηση εξειδικευμένων διεπαφών χρήστη με στόχο την περιήγηση σε μουσικές συλλογές μεγάλων διαστάσεων και την ανάκτηση στοιχείων από αυτές με αποδοτικό τρόπο

Γενικά, οι τεχνικές της ΑΜΠ μπορούν να φανούν χρήσιμες στην έρευνα πάνω σε μεγάλο όγκο μουσικών δεδομένων, εκεί όπου η χειρωνακτική συλλογή στοιχείων θα ήταν μια υπερβολικά επίπονη και αδόκιμη διαδικασία. Μπορούν επίσης να επιτρέψουν τον τυπικό καθορισμό και την αυτοματοποίηση της γνώσης των ειδικών, αυτής που πολύ συχνά είτε δεν είναι άμεσα διαθέσιμη είτε διαφοροποιείται σημαντικά από το ένα άτομο στον άλλο. (Schedl, και συν., 2014) Στην τελευταία αυτή πλευρά της ΑΜΠ θα εστιάσουμε κατά κύριο λόγο στα επόμενα κεφάλαια.

## 1.2 ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΣΥΓΧΟΡΔΙΑΣ – ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η μουσική εξελίσσεται στο χρόνο, έχει λοιπόν εξ ορισμού μια *οριζόντια* διάσταση. Από την άλλη μεριά, όταν παράγονται ταυτόχρονα περισσότεροι από έναν ήχοι, η μουσική αποκτά και μια δεύτερη διάσταση, την *κατακόρυφη*, καθώς οι νότες γράφονται (τουλάχιστο στη δυτική μουσική) η μια κάτω από την άλλη. Επιπλέον, η μουσική διαθέτει και άλλες παραμέτρους, όπως ηχόχρωμα, ενορχήστρωση, ακουστική, ρυθμός, μελωδία, αρμονία, δομή κτλ. Κάποιες από αυτές τις παραμέτρους (λ.χ. ηχόχρωμα, ενορχήστρωση, ακουστική) αφορούν άμεσα στον παραγόμενο ήχο και γίνονται αντιληπτές στα αυτιά και στο μυαλό μας μέσα σε λίγα χιλιοστά του δευτερολέπτου. Η αίσθηση της δομής ενός μουσικού έργου από την άλλη μεριά σχηματίζεται προοδευτικά στη συνείδηση του ακροατή και απαιτεί αρκετό χρονικό διάστημα ίσαμε να ολοκληρωθεί. Ένα ενδιαμέσο επίπεδο περιγραφής ενός μουσικού κομματιού αποτελείται από το ρυθμό, τη μελωδία και την αρμονία. (Orio, 2006)

Η αρμονική δομή είναι λοιπόν, κατά κάποιο τρόπο, μια ερμηνεία ενός μουσικού έργου και καταγράφεται ως μια ακολουθία συγχορδιών που αναπαριστά την εξέλιξη του κομματιού. (Radicioni, et al., 2010) Η **αναγνώριση συγχορδίας** (chord recognition) συνίσταται στην εύρεση των χαρακτηριστικών αρμονικών στοιχείων, καταρχάς για μια συγχορδία, σε επόμενο στάδιο για ένα ολόκληρο μουσικό απόσπασμα. Στο πλαίσιο της τονικής αρμονίας, η αναζήτηση αυτή αφορά σε κάποια βασικά γνωρίσματα της συγχορδίας όπως λ.χ. τη θεμέλιο, τον τύπο (π.χ. μείζων τρίφωνη συγχορδία, ελάσων συγχορδία με μικρή έβδομη κοκ.), την κατάσταση (ευθεία ή σε αναστροφή), πιθανόν αλλοιώσεις ή ξένους φθόγγους καθώς και όποιο άλλο στοιχείο έχει να κάνει με τη φύση, τη μορφή, το άκουσμα και τη λειτουργία της συγχορδίας μέσα στο μουσικό έργο.

### 1.3 Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η εργασία που ακολουθεί έχει ως σημείο εκκίνησης την αρμονική θεωρία του Πάουλ Χίντεμιτ, όπως περιγράφεται στο βιβλίο του *Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης* (1<sup>ος</sup> τόμος, Θεωρητικό Μέρος / 1937). Σε αυτό το έργο, ο Χίντεμιτ απορρίπτει την αρμονική θεωρία με βάση τις τρίφωνες, τετράφωνες κοκ. συγχορδίες της τονικής αρμονίας. Το διατονικό σύστημα, ο κύκλος των 5<sup>ων</sup>, η εναλλαξιμότητα μείζονος – ελάσσονος κτλ. δεν υφίστανται εδώ – βρισκόμαστε στο πεδίο της πλήρους χρωματικότητας, με την έννοια της απόλυτης ισότητας των 12 φθόγγων. Τα ενδο-συγχορδιακά διαστήματα είναι εκείνα και μόνο που καθορίζουν το ενεργειακό δυναμικό μιας συγχορδίας και την εγγενή τάση της να συνδεθεί με κάποια άλλη. Ο πυρήνας της εργασίας είναι το *Κεφάλαιο 9*, όπου περιγράφεται μια αναπαράσταση αυτού του αρμονικού συστήματος σε μορφή οντολογικής γνώσης. Με αυτή την οντολογία ως εργαλείο, υλοποιείται στη συνέχεια η (μηχανική) αναγνώριση συγχορδίας και η αρμονική ανάλυση ενός μουσικού αποσπάσματος. Στη συνέχεια, αναλύουμε ένα σύνολο από 4φωνα χορικά του Γ. Σ. Μπαχ, τα οποία λαμβάνουμε στην είσοδο σε μορφή MIDI αρχείων, και μελετάμε τα αρμονικά χαρακτηριστικά τους.

Στο *Κεφάλαιο 2* αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες εργασίες πάνω στην αρμονική ανάλυση με τεχνικές μηχανικής μάθησης και αναγνώρισης προτύπων. Στη συνέχεια, στρέφουμε την προσοχή μας σε μοντέλα που είναι περισσότερο προσανατολισμένα στη γνώση και περιγράφουμε σε συντομία κάποια από αυτά, γύρω από τη μουσική πληροφορία γενικότερα και την αρμονία ειδικότερα. Τέλος, γίνεται αναφορά στην τετράφωνη εναρμόνιση χορικών – όπως αυτά του Γ. Σ. Μπαχ – και στη μηχανική παραγωγή τεχνητών κοράλ από εξειδικευμένα λογισμικά.

Το *Κεφάλαιο 3* αναφέρεται περιληπτικά σε κάποιες έννοιες της τονικής αρμονίας που θα μας χρειαστούν στα επόμενα.

Η θεωρία της γενικευμένης χρωματικότητας του Χίντεμιτ περιγράφεται στις βασικές της γραμμές στο *Κεφάλαιο 4*. Όπως αναφέρθηκε ήδη, του αρμονικό σύστημα του Χίντεμιτ είναι το μουσικοθεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο στηρίζεται ο σχεδιασμός και η υλοποίηση του οντολογικού μοντέλου στη συνέχεια.

Το *Κεφάλαιο 5* περιγράφει τις οντολογίες και τη χρήση τους γενικά για τον καθορισμό εννοιών και των μεταξύ τους σχέσεων. Με δυο λόγια, μια οντολογία μπορεί να περιγράψει μια οντότητα αναλύοντάς την στα ουσιώδη χαρακτηριστικά της. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια κατάλληλων μηχανισμών συλλογιστικής, μπορεί να συμπεράνει καινούργια γνώση για τα άτομα και να δημιουργήσει έτσι νέους σημασιολογικούς δεσμούς ανάμεσα στα αντικείμενα.

Το *Κεφάλαιο 6* πραγματεύεται τις γλώσσες RDF και RDFS. Η γνώση που αναπαριστάται με αυτές μπορεί να αποθηκευτεί σε τριάδες του τύπου <υποκείμενο κατηγορημα αντικείμενο> και να εξαχθεί με τη μορφή απαντήσεων σε ερωτήματα που διατυπώνουμε με τη γλώσσα ερωτήσεων SPARQL.

Το *Κεφάλαιο 7* αναφέρεται στη θεωρία των Περιγραφικών Λογικών, ενός αποφάνσιμου υποσυνόλου της κατηγορικής λογικής πρώτης τάξης. Οι Περιγραφικές Λογικές αποτελούν το υπόβαθρο για την

ανάπτυξη γλωσσών με αυξημένη εκφραστικότητα ως προς την RDF(S). Οι γλώσσες αυτές μπορούν να προσδώσουν ακριβή σημασιολογική ερμηνεία στα άτομα του κόσμου και σαν τέτοιες αποτελούν βασικά συστατικά των οντολογιών. Γίνεται επίσης αναφορά στους αλγορίθμους συλλογιστικής, που επιτρέπουν αφενός την ανάδειξη ασυνεπειών στην αναπαράσταση της γνώσης, αφετέρου την παραγωγή νέων συμπερασμάτων για τις οντότητες του κόσμου που μελετάμε.

Το *Κεφάλαιο 8* αποτελεί συνέχεια του προηγούμενου κεφαλαίου. Εισάγουμε τη γλώσσα οντολογιών OWL και περιγράφουμε σε γενικές γραμμές το συντακτικό της, αναδεικνύοντας τη στενή σχέση της με τις Περιγραφικές Λογικές. Παράλληλα, αναφερόμαστε στο Protégé, ένα ευρείας χρήσης λογισμικό για την αναπαράσταση οντολογικής γνώσης. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα που συνδυάζει τις λειτουργίες ενός επεξεργαστή (editor) και μιας διεπαφής χρήστη (user interface), έτσι ώστε να διευκολύνεται η κατασκευή και επεξεργασία μιας οντολογίας.

Με το *Κεφάλαιο 9* μπαίνουμε στο κύριο μέρος της παρούσας εργασίας παρουσιάζοντας την οντολογία CoMC (Craft of Musical Composition), της οποίας η διάρθρωση παρακολουθεί από κοντά τη θεωρία του Χίντεμιτ. Ορίζονται μεταξύ άλλων οι βασικές έννοιες του διαστήματος, της συγχορδίας, της ακολουθίας συγχορδιών καθώς και οι σχετικές ιδιότητες. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο πρόγραμμα Owlready2, που επιτρέπει τη διαχείριση οντολογιών σε περιβάλλον Python. Με τη βοήθεια του Owlready2 μπορούμε να εμπλουτίσουμε τους ορισμούς των εννοιών της οντολογίας. Η οντολογία CoMC, το Owlready2 και ο σχετικός κώδικας (σε Python) μας δίνουν ένα ισχυρό εργαλείο, χάρη στο οποίο μπορεί να υλοποιηθεί με μηχανικό τρόπο η αρμονική ανάλυση μιας ακολουθίας συγχορδιών, κάνοντας τις απαραίτητες επαγωγές και εξάγοντας τελικά τα ουσιώδη χαρακτηριστικά της κάθε συγχορδίας (θεμέλιος, προσαγωγέας κτλ.).

Στο *Κεφάλαιο 10* η οντολογία CoMC εφαρμόζεται στην αρμονική ανάλυση χορικών του Γ. Σ. Μπαχ. Αρχικά, μελετούμε την αρμονική διακύμανση του χορικού *Jesu, meine Freude* συγκρίνοντας διάφορες εκδοχές, του Μπαχ και άλλων συνθετών. Στη συνέχεια, επιλέγουμε έναν ικανό αριθμό κοράλ του Μπαχ, εμπλουτίζουμε την οντολογία με τις συγχορδίες και τα χαρακτηριστικά τους – εκτελώντας αρμονική ανάλυση, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο – και αποθηκεύουμε όλα τα ευρήματα σε ένα RDF triplestore. Τέλος, επεξεργαζόμαστε στατιστικά τα δεδομένα για να καταλήξουμε σε συμπεράσματα ως προς την πρακτική της εναρμόνισης, στον Μπαχ και γενικότερα.

Το *Κεφάλαιο 11* αποτελεί μια σύνοψη των αποτελεσμάτων μας. Παράλληλα, καταγράφει κάποιες κατευθύνσεις και μελλοντικές δυνατότητες σε ό,τι αφορά στην επέκταση της οντολογίας CoMC και τη σύνδεσή της σε επόμενο στάδιο με άλλα μηχανικά μοντέλα αρμονικής ανάλυσης και μουσικές οντολογίες, όπως επίσης την εφαρμογή της σε διάφορα είδη μουσικής εκτός της λεγόμενης κλασικής, όπως π.χ. τη μουσική του 20<sup>ου</sup> αιώνα ή τη τζαζ.

## 2 ΣΥΝΤΟΜΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΑΡΜΟΝΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

---

### 2.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΜΑΘΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ ΣΥΓΧΟΡΔΙΑΣ

Η μηχανική μάθηση συνιστά ένα βασικό υπόδειγμα (paradigm) στην περιοχή της ανάκτησης μουσικής πληροφορίας και έχει δώσει πολύ αξιόλογα αποτελέσματα. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα (Lee, et al., 2007), (Oudre, et al., 2010), (Mauch, et al., 2008) και (Radicioni, και συν., 2010) όπου χρησιμοποιούνται διακριτά μοντέλα μίξης (mixture models), ο αλγόριθμος EM και κρυφά μαρκοβιανά μοντέλα (hidden Markov models, HMMs) για την αναγνώριση συγχορδιών και την ταυτοποίηση του τρόπου (mode) ενός μουσικού κομματιού. Πιο πρόσφατα, έχει μελετηθεί η αναγνώριση και πρόγνωση συγχορδίας με τη βοήθεια μοντέλων πεπερασμένων συμφραζόμενων (finite context ή αλλιώς n-gram models) και νευρωνικών δικτύων RNN, όπως επίσης και με τεχνικές βαθιάς μάθησης, λ.χ. στα (Sears, και συν., 2018) και (Zhou, et al., 2015).

Όταν μιλάμε για μουσική, πρέπει να θυμόμαστε ότι πρόκειται για ένα σύνθετο ακουστικό φαινόμενο που εξαρτάται από πολυάριθμες παραμέτρους, συχνά με ασαφή χαρακτηριστικά. Καταρχήν, ο προσανατολισμός ενός μοντέλου στα δεδομένα (*data-oriented*) παραβλέπει το γεγονός ότι ένα σημαντικό κομμάτι της πληροφορίας τα ξεπερνάει, καθώς αφορά στο πώς σχηματίζεται η μουσική στη γνωσιακή και ψυχολογική συνείδηση του ακροατή. Έτσι, για παράδειγμα, η αρμονική δομή της μουσικής δεν έχει από μόνη της σαφή αντικειμενική υπόσταση, καθώς χτίζεται προοδευτικά στα αυτιά και στο μυαλό μας καθώς ερμηνεύουμε με δυναμικό τρόπο τη μουσική στη διάρκεια μιας ακρόασης – με βάση το προσωπικό αισθητήριο, τα συμφραζόμενα, τη γνώση του ύφους, τις εμπειρίες, τη διάθεση, τις προτιμήσεις μας κοκ. (de Haas, 2012) Άλλωστε, η ίδια η θεωρία της αρμονίας δεν έχει καθολική ισχύ<sup>2</sup> παρά μοιάζει περισσότερο με ένα εγχειρίδιο ορθών πρακτικών, παγιωμένων μέσα από εμπειρία αιώνων στην πρακτική της σύνθεσης. Οι παρεκκλίσεις εδώ είναι όχι μόνο συχνές αλλά και ευπρόσδεκτες – ας μην ξεχνάμε ότι η σχολαστική τήρηση των κανόνων επισύρει κατά κανόνα το στίγμα του ανέμπνευστου ή ατάλαντου. Κατά την αρμονική ανάλυση αναδύονται λοιπόν στην πράξη μια σειρά ζητήματα: ποιες συγχορδίες αποτελούν τον κύριο άξονα και ποιες μπορούν να παραλειφθούν ως περιστασιακές ή δευτερεύουσες, πώς καταλήγουμε στην πιο δόκιμη ανάμεσα στις διάφορες δυνατές ερμηνείες ενός τμήματος, πώς αντιμετωπίζουμε τις διαφωνίες και τους ξένους φθόγγους κτλ. Αν θέλουμε να περιλάβουμε τέτοιες παραμέτρους στην ανάλυσή μας, χρειάζεται να στραφούμε σε μοντέλα που θα συμπεριλαμβάνουν ακριβώς και τέτοιου είδους γνώση (*knowledge-oriented models*).

---

<sup>2</sup> Όπως έχει λεχθεί εύστοχα, πρόκειται για μια «θεωρία χωρίς θεωρήματα» (Fr. Pachet)

## 2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΝΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Από τη δεκαετία του 1990 και μετά έχουμε μια συστηματική προσπάθεια να αποτυπωθεί η λειτουργική αρμονία σε υπολογιστικά μοντέλα, βασισμένα κυρίως στις αρχές των γενετικών (generative) γραμματικών. Ο (Winograd, 1993) παραλληλίζει την «ιεραρχική» αντίληψη που έχει ο ακροατής ακούγοντας ένα μουσικό κομμάτι με τις γενετικές μεθόδους λειτουργίας της γλώσσας και επιχειρεί να δομήσει την αρμονική ανάπτυξη με κανόνες παραγωγής μιας **τυπικής γραμματικής**. Στην ίδια κατεύθυνση κινείται η θεωρητική δουλειά των Fred Lerdahl και Ray Jackendoff, κυρίως στο (Lerdahl, και συν., 1999), που συνιστά μια συνεκτική πρόταση ερμηνείας όλων των μουσικών συνιστωσών με τυπικές μεθόδους και άνοιξε νέους δρόμους στη σύγχρονη μουσική ανάλυση. Οι Lerdahl & Jackendoff προτείνουν την ιεραρχική ανάλυση ενός κομματιού με βάση α/ τις επιμέρους ενότητες, όπως τις αντιλαμβάνεται ο ακροατής ενόσω εκτυλίσσεται η μουσική, β/ το διαχωρισμό του χρόνου σε ισχυρά και ασθενή μέρη, γ/ τη βαρύτητα που παίρνει ένα μουσικό γεγονός σε συνάρτηση με τη διάρκειά του και τέλος δ/ τα μοτίβα έντασης και χαλάρωσης που διαδέχονται το ένα το άλλο στην εξέλιξη του κομματιού.<sup>3</sup> Για κάθε τέτοια συνιστώσα, οι ερευνητές προτείνουν τρία είδη κανόνων παραγωγής: α/ *συνθήκες ορθής κατασκευής* (well-formedness rules), που περιγράφουν τις ιεραρχικές σχέσεις των διαφόρων στοιχείων μεταξύ τους, β/ *μετασηματισμούς* (transformation rules), που επιτρέπουν ορισμένες αποδεκτές τροποποιήσεις ενός σχήματος και γ/ *κανόνες προτίμησης* (preference rules), που προκρίνουν ανάμεσα στις αποδεκτές περιγραφές εκείνες που απηχούν καλύτερα την πρόσληψη του έργου από τον ακροατή. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τελευταίοι αυτοί κανόνες δεν έχουν αντίστοιχους τέτοιους στις συνηθισμένες θεωρίες τυπικών γλωσσών, στη μουσική ανάλυση όμως παίζουν αποφασιστικό ρόλο. (Lerdahl, και συν., 1993).

Ο (Temperley, 2001) αναπτύσσει και επεκτείνει την ιδέα των κανόνων προτίμησης, εφαρμόζοντάς την με συστηματικό τρόπο στις ρυθμικές, μελωδικές, αντιστικτικές ή αρμονικές μουσικές δομές, δίνοντας ψηλότερη βαθμολογία στις πλέον προτιμώμενες και επανεκτιμώντας την ερμηνεία όσο εξελίσσεται η ακρόαση, στη λογική του δυναμικού προγραμματισμού. Ο (Rohrmeier, 2011) επικεντρώνεται κι αυτός στην ιεραρχική οργάνωση της αρμονίας επισημαίνοντας ότι, σε μια ακολουθία συγχορδιών, κάποιες από αυτές μπορούν να παραλειφθούν χωρίς να επηρεάσουν το αρμονικό αποτέλεσμα ενώ άλλες είναι κρίσιμες στον τρόπο με τον οποίο γίνεται αντιληπτή η αρμονική εξέλιξη. Στο (de Haas, et al., 2014) η τελευταία αυτή ιδέα συνδυάζεται με τις αρχές της λειτουργικής αρμονίας και από εκεί προκύπτει το HARMTRACE, ένα σύστημα αυτοματοποιημένης αρμονικής ανάλυσης υλοποιημένο σε Haskell, που δέχεται ως είσοδο μια ακολουθία συγχορδιών και παράγει ως αποτέλεσμα τη συντακτική ανάλυση (parsing) σε μορφή δέντρου.

Σε σχέση με τους διάφορους τρόπους **αναπαράστασης των συγχορδιών** μπορούμε να αναφέρουμε τα (Harte, et al., 2005), (Cambouropoulos, 2016) και (Giannos, και συν., 2017). Στις δύο τελευταίες εργασίες για

---

<sup>3</sup> Η θεωρία αυτή, όπως επίσης και η τεχνική της αφαίρεσης (reduction), με την έννοια της προοδευτικής ένταξης δευτερευόντων στοιχείων μέσα σε συμπαγείς δομικές μονάδες, είναι ιδιαίτερα επηρεασμένη από τον Heinrich Schenker (1868 – 1935) και τις θεωρίες του πάνω στη μουσική ανάλυση (κυρίως στο εμβληματικό τρίτομο έργο του *Neue musikalische Theorien und Phantasien: Harmonielehre, Kontrapunkt & Der Freie Satz*, Βιέννη 1906/10/35)

παράδειγμα προτείνονται δύο τρόποι<sup>4</sup> αναπαράστασης μιας συγχορδίας που μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικά περιβάλλοντα (τονικό, αλλά επίσης τροπικό, ατονικό, μινιμαλιστικό κτλ.). Στη δεύτερη από αυτές τις εργασίες μάλιστα συγκρίνονται οι θεμελίοι που παίρνουμε μέσω του αλγορίθμου GCT με αυτές που υπολογίζονται χειρωνακτικά με βάση το Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης του Π. Χίντεμιτ<sup>5</sup>. Στο (Rupprechter, 2016) προτείνεται ένας αλγόριθμος για τον καθορισμό της θεμελίου μιας συγχορδίας. Ο αλγόριθμος υλοποιείται σαν ένα δέντρο ταξινόμησης με μια σειρά κριτηρίων (παραμέτρων) στη βάση των οποίων πραγματοποιείται ο διαχωρισμός σε κάθε κόμβο. Στην εργασία αυτή γίνεται εκτενώς λόγος για τους ξένους φθόγγους και το πώς αυτοί επηρεάζουν τον καθορισμό της θεμελίου μιας συνήχησης (tone simultaneity). Η ανεύρεση και διαχείριση των ξένων φθόγγων σε μια αρμονική ακολουθία είναι ένα πρόβλημα που θα απασχολήσει και εμάς στα επόμενα κεφάλαια.

Γενικά, ένας εναλλακτικός τρόπος αναπαράστασης του αρμονικού περιεχομένου ενός μουσικού κομματιού είναι οι **οντολογίες**, εξ ορισμού μια εξαιρετικά δόκιμη μέθοδος αναπαράστασης εννοιών (και ειδικότερα στην περίπτωση μας μουσικών εννοιών). Μια βασική οντολογία, με διάφορα παρακλάδια για επιμέρους μουσικά πεδία, είναι η Music Ontology, που αποτελεί ένα τυπικό πλαίσιο διαχείρισης μουσικής πληροφορίας. Πρόκειται για μια οντολογία γενικού τύπου με βάση τις οντολογίες Timeline & Event και είναι σε θέση να αναπαραστήσει μια ευρεία γκάμα εννοιών της μουσικής παραγωγής. (Raimond, et al., 2007) Μια άλλη οντολογία, πιο κοντά στα ενδιαφέροντα της παρούσας εργασίας, είναι η Music Theory Ontology, που πραγματεύεται έννοιες βασικές για την κατανόηση και ανάλυση της μουσικής: μουσική σημειογραφία, διάρκειες, διαστήματα και ακολουθίες συγχορδιών. (Rashid, et al., 2018) Η τελευταία έχει χρησιμοποιήσει στοιχεία από δύο προηγούμενες, την MusicNote (Cherfi, et al., 2017) και την OMRAS2 Chord Ontology (Sutton, et al., 2007). Αξίζει εδώ να αναφέρουμε επίσης το (Wissmann, 2012), όπου χρησιμοποιούνται τεχνικές τυπικών γραμματικών πάνω σε ακολουθίες συγχορδιών υλοποιημένες σε μια γλώσσα οντολογίας όπως η OWL. Ας σημειωθεί ότι οι παραπάνω μέθοδοι βασίζονται κατά κανόνα στο μοντέλο της λειτουργικής (τονικής) αρμονίας και γι' αυτό δεν είναι εύκολο να λειτουργήσουν στο πλαίσιο ενός αρμονικού συστήματος ριζικά διαφορετικής φιλοσοφίας, όπως αυτό του Χίντεμιτ. Η οντολογία που αναπτύχθηκε παρακάτω χρειάστηκε λοιπόν να στηριχτεί εξ αρχής σε δικούς της ορισμούς για τις βασικές κλάσεις, με πιο δόκιμο (κατά Χίντεμιτ) τρόπο.

## 2.3 ΕΡΕΥΝΑ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΧΟΡΙΚΑ ΤΟΥ Γ. Σ. ΜΠΑΧ

Οι τετράφωνες εναρμονίσεις χορικών του Μπαχ αποτελούν ένα τυπικό εργαλείο για τη μελέτη της τονικής αρμονίας. Με την «καθαρή», κάθετη γραφή τους αναδεικνύουν ξεκάθαρα αφενός την αλληλουχία των συγχορδιών, αφετέρου τη στενή και οργανική πλοκή της με την αντιστικτική κίνηση των φωνών. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα ογκώδες σώμα πρωτογενών δεδομένων, και μάλιστα από τη

---

<sup>4</sup> Πρόκειται για τις General Chord Type Representation και Pitch Class Chord Transition Representation

<sup>5</sup> Έχει ενδιαφέρον ότι η παρούσα εργασία προτείνει ακριβώς μια *μηχανική* μέθοδο εύρεσης της (κατά Χίντεμιτ) θεμελίου, παράλληλα με τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μιας συνήχησης στο πλαίσιο μιας ολοκληρωμένης αρμονικής ανάλυσης.

γραφίδα ενός και μόνο συνθέτη. Για τους λόγους αυτούς έχουν μελετηθεί εκτενώς από παλιά – αλλά και πιο πρόσφατα με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, εστιάζοντας στα βασικά χαρακτηριστικά και τις δομικές λειτουργίες της αρμονίας.

Ο (de Haas, 2012) εξετάζει την αρμονική ομοιότητα (harmonic similarity) μεταξύ δύο συγχορδιακών ακολουθιών. Ορίζει αρχικά μια συνάρτηση απόστασης μεταξύ τους (Tonal Pitch Step Distance, TPSD), αποδίδοντας χαμηλές τιμές σε όμοιες ακολουθίες και ψηλότερες σε ακολουθίες με σημαντικές διαφορές. Εφαρμόζει στη συνέχεια αυτή τη μετρική πάνω στα χορικά του Γ. Σ. Μπαχ επιδιώκοντας να διακρίνει στατιστικά μοτίβα ανάμεσα στην ίδια μελωδία από τη μια μεριά και στις διάφορες εναρμονίσεις της από την άλλη. Τα αποτελέσματα δείχνουν γενικά ότι σε μεγάλες οικογένειες χορικών με παρόμοια μελωδική γραμμή, οι εναρμονίσεις εμφανίζουν σημαντικές ομοιότητες μεταξύ τους, με κάποιες λίγες εξαιρέσεις<sup>6</sup>.

Στα (Ebcioğlu, 1990) και (Ebcioğlu, 1993) παρουσιάζεται ένα σύστημα μηχανικής παραγωγής μουσικής με εφαρμογή στα χορικά του Μπαχ. Το CHORAL βασίζεται στον πρωτοβάθμιο κατηγορικό λογισμό και το λογικό προγραμματισμό και συνίσταται σε ένα σύνολο περίπου 350 κανόνων παραγωγής (της μορφής IF... THEN), φόρμουλες περιορισμών (που απορρίπτουν ορισμένους ισχυρισμούς σε κάθε βήμα, στη λογική του early pruning) και τέλος ευριστικούς τύπους (που κατευθύνουν κατά προτεραιότητα την αναζήτηση προς κάποιους αποδεκτούς ισχυρισμούς). Κάθε ισχυρισμός αξιολογείται με μια τιμή που υπολογίζεται ως το άθροισμα των βαρών των ευριστικών τύπων που ικανοποιεί. Αν σε κάποιο βήμα ο αλγόριθμος βρεθεί σε αδιέξοδο, εκτελεί back tracking προς το βήμα εκείνο που θεωρεί ως υπεύθυνο για τη λανθασμένη πορεία που ακολούθησε. Το χορικό αντιμετωπίζεται σαν ένα σύστημα 4 αυτομάτων που μεταπίπτουν ταυτόχρονα από τη μια κατάσταση στην επόμενη. Οι εναρμονίσεις με το CHORAL μπορούν να πετύχουν πολύ καλή προσομοίωση του στυλ, συγκρίσιμη, όπως σημειώνει ο δημιουργός του, με αυτήν ενός προχωρημένου σπουδαστή της αρμονίας.

Το HARMONET (Hild, et al., 1991) λειτουργεί με νευρωνικά δίκτυα και επιχειρεί να προσαρμόσει τους αλγορίθμους backpropagation σε ένα ιεραρχικό σύστημα με παράλληλη συνδρομή μουσικής πληροφορίας, ώστε να αποφύγει την παραγωγή μουσικής γραμμένης μεν σωστά αλλά εκτός στυλ. Η εναρμόνιση του κοράλ γίνεται σε στάδια: πρώτα στήνεται ο **αρμονικός σκελετός** (δηλ. βαθμίδες σε κάθε τέταρτο του μέτρου), στη συνέχεια προστίθεται ο σκελετός ως **συγχορδίες** (με τη συμπλήρωση των δύο μεσαίων φωνών και τον καθορισμό της αναστροφής) και τέλος μπαίνουν τα **ποικίλματα** ανά όγδοο. Το δεύτερο στάδιο καταλήγει σε μια βέλτιστη λύση που επιλέγεται μέσα από το σύνολο των αποδεκτών συγχορδιών, με βάση και τους περιορισμούς που έχουν τεθεί για τη σύνθεση ενός κοράλ.

Στο (Allan, et al., 2005) η μάθηση επιτυγχάνεται με δύο κρυφά μαρκοβιανά μοντέλα, το πρώτο από τα οποία υλοποιεί – όπως και πιο πάνω – τον αρμονικό σκελετό σε τέταρτα, ενώ το δεύτερο εξομαλύνει τις γραμμές των φωνών προσθέτοντας βηματικές κινήσεις ανά όγδοο.

---

<sup>6</sup> Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι 7 διαφορετικές εναρμονίσεις του χορικού *Herzlich tut mich verlangen*. Εδώ προκύπτουν δύο λίγο ως πολύ ομογενείς ομάδες με μεγάλη απόσταση μεταξύ τους: πρόκειται στ' αλήθεια για δύο ριζικά διαφορετικές οικογένειες εναρμονίσεων της ίδιας μελωδίας, η μια σε μείζονα και η άλλη σε ελάσσονα (σωστότερα μάλλον στο δώριο) τρόπο – η πρώτη τελειώνει με την τρίτη βαθμίδα στη σοπράνο, η δεύτερη με την πέμπτη βαθμίδα ως θεμέλιο πάνω σε μια συγχορδία δεσπόζουσας. (de Haas, 2012)



Από τις πιο πρόσφατες εργασίες, το DeepBach (Hadjeres, et al., 2017) χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο MCMC. Την ίδια χρονιά παρουσιάζεται και το BachBot (Liang, et al., 2017), ένα end-to-end σύστημα βαθιάς μάθησης με δίκτυα RNN-LSTM. Τα αποτελέσματα των παραπάνω δύο μοντέλων έχουν κάποιες φορές πετύχει πολύ καλή προσομοίωση με τα πραγματικά κοράλ, δεν αποφεύγονται όμως κάποτε αρμονικά λάθη και η κίνηση των φωνών υστερεί συχνά ως προς αυτή του ίδιου του Μπαχ.

Γενικά, σε συστήματα που μαθαίνουν από πιθανοτικά μοντέλα, δεν είναι εύκολο να εκτιμήσει κανείς με αντικειμενικό τρόπο το βαθμό προσαρμογής στο επιθυμητό στυλ προκειμένου για μηχανικά παραγόμενη μουσική. Προκύπτει συνεπώς η ανάγκη για αυτοματοποιημένες, καθολικά αποδεκτές, ερμηνεύσιμες και βασισμένες σε μουσικά κριτήρια μεθόδους αποτίμησης. Για παράδειγμα, οι (Fang, et al., 2020) ορίζουν μια συνάρτηση βαθμολόγησης ενός μηχανικά παραγόμενου χορικού ως προς την ομοιότητά του με τα πραγματικά. Εδώ ορίζονται **μετρικές απόστασης** ως προς κάποια γνωρίσματα και στη συνέχεια σχηματίζεται ένα σταθμισμένο άθροισμα. Υπάρχουν ενδείξεις ότι η συνάρτηση αυτή οδηγεί στην πράξη σε στατιστικά σημαντική διαφοροποίηση ανάμεσα στις κατανομές πραγματικών και τεχνητών κοράλ και επομένως μπορεί καταρχήν να χρησιμοποιηθεί για την αυτοματοποιημένη αποτίμηση της μηχανικά παραγόμενης μουσικής.

Είναι γνωστό ότι ένα από τα «μυστικά» του Μπαχ κρύβεται στις αντιστικτικές κινήσεις των τριών χαμηλότερων φωνών. Ο επιδέξιος χειρισμός των διαφωνιών που προκύπτουν δεν είναι καθόλου απλή υπόθεση και απαιτεί ανεπτυγμένο μουσικό αισθητήριο και σημαντική πρακτική εμπειρία στην εναρμόνιση μελωδίας. Στην πορεία αυτής της εργασίας, θα εστιάζουμε όλο και πιο πολύ στις περιστασιακές συνηχήσεις που προκύπτουν από τις κινήσεις αυτές στα χορικά του Μπαχ και, με εργαλείο τη χρωματική αρμονία του Πάουλ Χίντεμιτ, θα προσπαθήσουμε να διακρίνουμε κάποιους από τους ιδιαίτερους μηχανισμούς που τις διέπουν.



### 3 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΚΑΙ ΑΡΜΟΝΙΑΣ

---

Παρά τη μεγάλη επιλογή από παλιότερα και σύγχρονα εγχειρίδια αρμονίας, λίγα είναι αυτά που ξεκινούν με κάποιους βασικούς ορισμούς πριν προχωρήσουν σε επιμέρους περιγραφές των διαστημάτων και των συγχορδιών<sup>7</sup>. Ένα από αυτά ξεκινά με μια μικρή φράση, σχεδόν αφοριστική μέσα στη συντομία της:

- Αρμονία είναι η γραμματική της γλώσσας των μουσικών φθόγγων<sup>8</sup> [M. Loewengard, 1905]

Ένας φημισμένος Γερμανός θεωρητικός στα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα επικεντρώνει την προσοχή του στο τεχνικό κομμάτι, στη μηχανική κατά κάποιο τρόπο πλευρά της αρμονίας:

- Η θεωρία της Αρμονίας είναι αυτή της ορθολογικής και τεχνικά σωστής σύνδεσης των συγχορδιών (Riemann, 1896)

Ο σπουδαίος θεωρητικός και συνθέτης Άρνολντ Σένμπεργκ (1874 – 1951) γράφει εξάλλου:

- Αρμονία είναι η μελέτη της ταυτόχρονης συνηχίσεως (συγχορδίες) και της δυνατότητάς τους να συνδέονται εν σχέσει προς την αρχιτεκτονική, μελωδική και ρυθμική τους αξία, [καθώς] και τη σχετική βαρύτητα της μιας ως προς την άλλη (Schoenberg, 1911/1992) [μτφρ. Κ.Νάσος]

Λίγο πιο κοντά στην εποχή μας, ο Μανώλης Καλομοίρης δίνει ένα συνεκτικό ορισμό με απλά λόγια:

- Αρμονία είναι η τέχνη των συνδυασμών των ήχων σε συνηχίσεις που τις λέμε συγχορδίες. Η Αρμονία αποτελεί τη θεωρία (περιγραφή, καθορισμό και σχέση) των συγχορδιών και εξηγεί τον τρόπο με τον οποίο τις σχηματίζουμε και τις συνδέουμε τη μια με την άλλη. (Καλομοίρης, 1933)

#### 3.1 ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ – ΜΟΥΣΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ

Βασική δομική μονάδα της μουσικής θεωρίας είναι το διάστημα δύο φθόγγων, η «απόστασή» τους, που καθορίζεται από το λόγο των συχνοτήτων τους. Το μικρότερο διάστημα είναι το βήμα ή διάστημα

---

<sup>7</sup> Δεν είναι απίθανο κάποιοι συγγραφείς να προτιμούν, ίσως υποσυνείδητα, να αποφύγουν ορισμούς εγκλωβισμένους εξ αρχής στην τονική αρμονία – καταφανώς άκυρους προκειμένου για μουσικές εκτός της λεγόμενης «κλασικής», όπως για παράδειγμα ο μεταπολεμικός σειραϊσμός, η τζαζ και η ροκ, μουσικές πολιτισμών εκτός του ευρωπαϊκού από την Αναγέννηση και μετά κ.ά.

<sup>8</sup> Έχει ενδιαφέρον να προσέξουμε εδώ τη χρήση των λέξεων «γραμματική» και «γλώσσα» που, στα αυτιά ενός μηχανικού της επιστήμης των υπολογιστών, παραπέμπουν δίχως άλλο σε τυπικές γλώσσες και θεωρία αυτομάτων.

2<sup>ης</sup>, που μπορεί να είναι ημιτόνιο ή τόνος (δηλ. δύο γειτονικά ημιτόνια). Γενικά, τα διαστήματα μέσα στα όρια μιας οκτάβας<sup>9</sup> διακρίνονται από το πλήθος των ενδιάμεσων φθόγγων (έχουμε για παράδειγμα διαστήματα 3<sup>ης</sup>, 4<sup>ης</sup>, 7<sup>ης</sup> κτλ.) και το συνολικό αριθμό των ημιτονίων που περιλαμβάνουν (έχουμε έτσι διαστήματα μικρά, μεγάλα, καθαρά, αυξημένα ή ελαττωμένα).

Τα διαστήματα λογίζονται γενικά ως σύμφωνα ή διάφωνα:

- Σύμφωνα είναι τα διαστήματα 3<sup>ης</sup> (μεγάλης και μικρής), 4<sup>ης</sup> καθαρής, 5<sup>ης</sup> καθαρής και 6<sup>ης</sup> (μεγάλης και μικρής), όπως επίσης και οι καθαρές οκτάβες και οι ταυτοφωνίες.
- Διάφωνα διαστήματα είναι όλα τα υπόλοιπα, δηλ. 2<sup>ης</sup> (μεγάλης και μικρής), 4<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> (ελαττωμένης και αυξημένης) και 7<sup>ης</sup> (μεγάλης και μικρής)

Γενικά, κάθε τμήμα ενός μουσικού έργου ανήκει σε μια *τονικότητα*. Αυτή είναι συνήθως κάποιος μείζων ή ελάσσων τρόπος, σπανιότερα δε ένας από τους λεγόμενους εκκλησιαστικούς (δώριος, λύδιος, μιξολύδιος κτλ.). Ένας τρόπος σχηματίζεται από επτά διαδοχικούς φθόγγους. Η πρώτη νότα κάθε τέτοιας 7άδας ορίζει την τονική ή πρώτη βαθμίδα και οι επόμενες έξι βαθμίδες ονομάζονται διαδοχικά δεύτερη, τρίτη κοκ., συμβολίζονται δε κατά σύμβαση με λατινικούς χαρακτήρες (από I έως VII). Οι υπόλοιποι πέντε από τους 12 συνολικά φθόγγους μιας οκτάβας<sup>10</sup> θεωρούνται ξένοι προς τον τρόπο και προκύπτουν από τους 7 πρώτους μέσα από χρωματικές αλλοιώσεις (δηλ. οξύνοντας ή βαρύνοντας κατά ένα ημιτόνιο κάποιον από τους 7 βασικούς).

### 3.2 ΣΥΜΦΩΝΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΩΝΕΣ ΣΥΓΧΟΡΔΙΕΣ

Στην τονική αρμονία, οι συγχορδίες σχηματίζονται τοποθετώντας φθόγγους τον ένα επάνω στον άλλο, πάντοτε με απόσταση ένα διάστημα τρίτης. Τρεις τέτοιες νότες που ηχούν ταυτόχρονα σχηματίζουν μια *τρίφωνη* συγχορδία, που σχηματίζει δύο διαδοχικά διαστήματα 3ης και ένα διάστημα 5ης (αυτό μεταξύ της πρώτης και της τρίτης νότας της συγχορδίας). Η χαμηλότερη νότα ορίζει τη θεμέλιο και οι επάνω φωνές την τρίτη και πέμπτη της συγχορδίας. Η προσθήκη μιας τέταρτης νότας με την ίδια μέθοδο φτιάχνει μια *τετράφωνη* συγχορδία – εδώ σχηματίζεται επιπλέον ένα διάστημα 7ης ανάμεσα στις εξωτερικές φωνές και λέμε ότι έχουμε έτσι μια (τετράφωνη) συγχορδία μεθ' εβδόμης. Με ανάλογο τρόπο μπορούμε να κατασκευάσουμε συγχορδίες μετ' ενάτης, 11ης, 13ης κοκ.

Κάθε συνήχηση στην τονική αρμονία δεν μπορεί παρά να είναι σύμφωνα ή διάφωνα. Ως σύμφωνα λογίζονται δύο μόνο ειδών συνηχήσεις:

- Η μείζων (τρίφωνη) συγχορδία, όπου οι δύο ψηλότερες φωνές σχηματίζουν διαστήματα μεγάλης 3ης και καθαρής 5ης με τη χαμηλότερη φωνή (τη θεμέλιο της συγχορδίας)

<sup>9</sup> Οκτάβα είναι το διάστημα ανάμεσα σε δύο νότες, όταν η συχνότητα της μιας είναι διπλάσια από αυτήν της άλλης.

<sup>10</sup> Αναφερόμαστε βέβαια πάντοτε στο λεγόμενο συγκεκριμένο σύστημα χορδίσματος.

- Η ελάσσων (τρίφωνη) συγχορδία, όπου οι επάνω φωνές σχηματίζουν μικρή 3η και καθαρή 5η με τη θεμέλιο.

Οποιαδήποτε άλλη τρίφωνη συνήχηση, καθώς και όλες ανεξαιρέτως οι 4φωνες, 5φωνες κοκ. συγχορδίες, θεωρούνται διάφωνες. Γενικά, οι διάφωνες συνηχήσεις σχηματίζονται από φθόγγους που «δεν συνταιριάζονται εντελώς μεταξύ τους, αλλά χρειάζονται κάποια επανόρθωση, αυτή που με μια έννοια συνιστά τη λύση της διαφωνίας». (Καλομοίρης, 1933)

Ας σημειωθεί ότι η θεμέλιος είναι πάντοτε η βάση και αυτή που δίνει το όνομα σε ολόκληρη τη συνήχηση – λέμε π.χ. ότι έχουμε μια μείζονα τρίφωνη συγχορδία στην τρίτη (III) βαθμίδα της φα ελάσ. (δηλ. λαβ - ντο - μιb).

### 3.3 ΔΙΠΛΑΣΙΑΣΜΟΙ – ΑΝΑΣΤΡΟΦΕΣ

Στη «σχολική» αρμονία συνηθίζεται να γράφουμε κατά κανόνα για 4 φωνές<sup>11</sup> και επομένως σε μια τρίφωνη συγχορδία θα χρειαστεί να διπλασιάσουμε κάποιο φθόγγο. Κατά κανόνα διπλασιάζεται η θεμέλιος, σε πολλές περιπτώσεις όμως και για διάφορους λόγους μπορεί αντ' αυτής να επιλεγεί η πέμπτη και σπανιότερα η τρίτη. Από την άλλη μεριά, είναι επίσης δυνατό να παραλείψουμε μια νότα, συνήθως την πέμπτη της συγχορδίας, διπλασιάζοντας τη θεμέλιο και την τρίτη ή ακόμα και τριπλασιάζοντας τη θεμέλιο. Οι τετράφωνες συγχορδίες γράφονται καταρχήν πλήρεις, συχνά όμως προτιμούμε κι εδώ μια ελλιπή μορφή τους.

Σε περίπτωση που η θεμέλιος της συγχορδίας έχει παραχωρήσει τη θέση της στο μπάσο σε μια άλλη νότα της συγχορδίας, λέμε ότι η συγχορδία δε βρίσκεται πλέον σε *ευθεία* κατάσταση παρά εμφανίζεται σε *αναστροφή* – σε *α'* αναστροφή όταν στο μπάσο έχουμε την 3<sup>η</sup> της συγχορδίας, σε *β'* αναστροφή όταν έχουμε την 5<sup>η</sup>, σε *γ'* αναστροφή όταν στο μπάσο βρίσκεται η 7<sup>η</sup>. Οι αναστροφές χρησιμοποιούνται για να εμπλουτίσουν την αρμονία και ταυτόχρονα να επιτρέψουν πιο στρωτή κίνηση στις φωνές και περισσότερο μελωδικά διαστήματα στο μπάσο. Σε κάθε περίπτωση, ανεξάρτητα από το αν μια συγχορδία εμφανίζεται σε ευθεία κατάσταση ή σε αναστροφή, η δομική της λειτουργία δεν μεταβάλλεται καθώς η τελευταία δεν συναρτάται με το φθόγγο που τυχαίνει να βρίσκεται στη χαμηλότερη φωνή παρά μόνο με τη θεμέλιο (που θα απαντά σε μια ψηλότερη θέση) και τη βαθμίδα που εκπροσωπεί μέσα στον (μείζονα ή ελάσσονα) τρόπο. Αυτή η παραδοχή συνιστά την αρχή του *θεμελιώδους βασίμου* (*basse fondamentale*), που αποτελεί τον πυρήνα της αρμονικής θεωρίας του Ζαν Φιλίπ Ραμώ (Rameau, 1683 – 1764).

<sup>11</sup> Κατά σύμβαση, θεωρούμε ότι οι συγχορδίες γράφονται για 4φωνο χορωδιακό σύνολο, όπου τις 4 φωνές (από την ψηλότερη προς τη χαμηλότερη) τραγουδούν αντίστοιχα η σοπράνο (S), η κοντράλτο (A), ο τενόρος (T) και ο μπάσος (B).

### 3.4 ΤΟΝΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ – ΜΕΤΑΤΡΟΠΙΕΣ – ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗ ΑΡΜΟΝΙΑ

Οι συγχορδίες πάνω στην I (τονική), την IV (υποδεσπόζουσα) και την V (δεσπόζουσα) αποτελούν τις τρεις **κύριες** συγχορδίες. Οι συγχορδίες πάνω στις II, III, VI και VII θεωρούνται **δευτερεύουσες** και λειτουργούν κατά βάση ως αναπληρώτριες των κύριων. (Καλομοίρης, 1933) Είναι αξιοσημείωτο ότι η παράθεση των τριών κύριων συγχορδιών κάνει να ακούγονται σωρευτικά και οι 7 διατονικοί φθόγγοι της μουσικής κλίμακας. Αυτό είναι ένας από τους λόγους για τους οποίους η αρμονική αλληλουχία I – IV – V – I (η λεγόμενη *τέλεια πτώση*) συνιστά το βασικό κύτταρο της τονικής αρμονίας και είναι αυτή που καθορίζει πλήρως την τονικότητα. (Maler, 1931/1983) Κατά μία έννοια έχουμε δύο αντίρροπα πεδία γύρα από την τονική, την περιοχή της **υποδεσπόζουσας** και αυτήν της **δεσπόζουσας**. Δημιουργείται έτσι μια «πόλωση», μια διαλεκτική σχέση που λειτουργεί προωθητικά ώστε να επιστρέψουμε στην τονική.<sup>12</sup> Το αρχικό σχήμα μπορεί να γίνει πολύ πιο σύνθετο με εμπλουτισμό των περιοχών (λ.χ. με δευτερεύουσες δεσπόζουσες), απατηλές πτώσεις κτλ. Είναι επίσης δυνατό κάποια στιγμή να μετακινηθούμε πιο μόνιμα από μια τονικότητα σε μια άλλη, να κάνουμε δηλαδή μια *μετατροπία*. Κατά τις εμπλουτισμένες πτώσεις και τις μετατροπίες, περνάμε από διάφορες περιοχές, γειτονικές στην τονικότητα, οι οποίες έρχονται να προστεθούν σε αυτές της δεσπόζουσας και της υποδεσπόζουσας. Μπορούν μάλιστα κάποτε να προκύψουν συγχορδίες που δεν ανήκουν ξεκάθαρα σε κάποια περιοχή, αντίθετα διευκολύνουν το πέρασμα από τη μια στην άλλη. Τέτοιες αρμονίες με πολλαπλή σημασία (ελαττωμένες μεθ' εβδόμης, αυξημένες, αλλοιωμένες συγχορδίες κτλ. ή ακόμα και ολόκληρες ακολουθίες συγχορδιών) θεωρούνται ασταθείς ή *περιπλανώμενες* (*vagrant* ή, όπως τις ονομάζει ο Σένμπεργκ, *roving*<sup>13</sup> harmonies). Μια τέτοια θεώρηση προάγει την αρμονική ενότητα και, σε τελική ανάλυση, την ιδέα της μονοτονικότητας: «κάθε απομάκρυνση από την τονική θεωρείται ότι είναι ακόμη μέσα στην τονικότητα, αμέσως ή εμμέσως [...]. Με άλλα λόγια, σε κάθε κομμάτι υπάρχει μόνο μία τονικότητα και κάθε τμήμα [...] αποτελεί μόνο μία περιοχή, μια αρμονική αντίθεση μέσα στην τονικότητα αυτή.» (Schoenberg, 1948/1989)

### 3.5 ΣΥΓΧΟΡΔΙΕΣ ΜΕ ΞΕΝΟΥΣ ΦΘΟΓΓΟΥΣ

Ένα βασικό κεφάλαιο της αρμονίας αποτελούν οι περιστασιακοί αρμονικοί σχηματισμοί, συνδυασμοί φθόγγων δηλ. που δεν «δικαιούνται» να ονομάζονται συγχορδίες (της τονικής αρμονίας), καθώς δεν

---

<sup>12</sup> Αυτή είναι μια από τις βασικές ιδέες πίσω από τη θεωρία της *λειτουργικής αρμονίας*, η οποία αποδίδει ρόλους στις κύριες και – κατ' επέκταση – στις δευτερεύουσες συγχορδίες μέσα στο παραπάνω διαλεκτικό πλαίσιο.

<sup>13</sup> Δανειστήκαμε, κάπως καταχρηστικά, τον όρο *roving* στην οντολογία COMC (βλ. *Κεφάλαιο 9*) κατά την επεξεργασία των συγχορδιών των υπο-ομάδων V και VI στο Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης του Χίντεμιτ (βλ. *Κεφάλαιο 4*)

έχουν σχηματιστεί με υπέρθεση κατά τρίτες. Αντίθετα, προκύπτουν συμπτωματικά μέσα από τη μελωδική κίνηση των φωνών, χωρίς μολοντούτο να νοθεύουν τον πραγματικό χαρακτήρα της αρμονίας. (Tchaikovsky, 1900) Τέτοιες παρεκκλίσεις συμβαίνουν όταν υπεισέρχονται στην αρμονική υφή ξένοι φθόγγοι, δηλ. τόνοι που δεν ταιριάζουν στη συγχορδία και ακούγονται σαν κάτι ξένο μέσα στο σύνολο, αντικαθιστώντας ή/και προετοιμάζοντας έναν φθόγγο της συγχορδίας. (Καλομοίρης, 1933)

Τέτοιοι περιπτώσεις έχουμε είτε όταν κάποιος ή κάποιιοι φθόγγοι της συγχορδίας δεν ακούγονται ακριβώς στο χρονικό σημείο που αυτή εισάγεται, όπως

- ✓ στις καθυστερήσεις, φθόγγους της προηγούμενης συγχορδίας που παραμένουν κρατημένοι όταν έρχεται η νέα συγχορδία και λύνονται σε δεύτερο χρόνο
- ✓ στις επερείσεις (αποτζιατούρες), φθόγγους εκτός της συγχορδίας που ηχούν ταυτόχρονα με αυτήν και λύνονται βηματικά σε μια κανονική νότα σε δεύτερο χρόνο
- ✓ στις προηγήσεις, φθόγγους της επόμενης συγχορδίας που έχουν ήδη ηχήσει ενόσω βρισκόμαστε ακόμα στην προηγούμενη

είτε όταν έχουμε εντελώς ξένους με τη συγχορδία φθόγγους, λ.χ.

- ✓ διαβατικά, ενδιάμεσες νότες που γεμίζουν το διάστημα ανάμεσα σε δύο νότες της συγχορδίας
- ✓ ποικίλματα, νότες σε απόσταση βήματος από ένα κανονικό φθόγγο που ξαναγυρίζουν σε αυτόν
- ✓ εκφυγές, όπου η φωνή κινείται βηματικά από μια νότα της προηγούμενης συγχορδίας και στη συνέχεια με κάποιο άλμα κατά την αντίθετη κατεύθυνση προς κάποια νότα της επόμενης

Ιδιαίτερα αναλυτικό σχολιασμό των ξένων φθόγγων, των μελωδικών τους κινήσεων και των συνηγήσεων που δημιουργούν μπορεί να βρει κανείς στα (Dubois, 1921) και (Kœchlin, 1922). Αξίζει να επισημάνουμε από τώρα μια ουσιώδη διαφοροποίηση που θα συναντήσουμε αργότερα ανάμεσα στους διαβατικούς ή ποικιλματικούς φθόγγους από τη μια μεριά και στις καθυστερήσεις (και ελεύθερες καθυστερήσεις ή αποτζιατούρες) από την άλλη. Σε αντίθεση με τους πρώτους, οι καθυστερήσεις εισάγονται συγχρόνως με την αρμονία, φέρνουν αργότερα το άκουσμα της αναμενόμενης λύσης και επομένως δημιουργούν μια κατάσταση οξύτερης διαφωνίας. (Maler, 1931/1983) Στο *Κεφάλαιο 10* θα επιστρέψουμε σε αυτή τη διαφοροποίηση όταν εστιάσουμε στις συνηγήσεις που προκύπτουν από ξένους φθόγγους στα χορικά του Μπαχ.

### 3.6 ΤΑ ΧΟΡΙΚΑ ΤΟΥ Γ. Σ. ΜΠΑΧ

Τα χορικά ή κοράλ (Chorale, choral) είναι αρμονικές μουσικές επεξεργασίες μιας δοσμένης μελωδικής γραμμής, εναρμονισμένης κατά κανόνα για 4φωνα χορωδία. Πρόκειται για λατρευτικούς ύμνους, προορισμένους να ψάλλονται από το εκκλησίασμα κατά τη διάρκεια της Λουθηρανικής λειτουργίας. Η πρακτική της εναρμόνισης αυτών των ύμνων ξεκίνησε ήδη από το Λούθηρο και τους σύγχρονούς του

μουσικούς, έφτασε στο απόγειό της στο ύστερο μπαρόκ, ενώ διατηρήθηκε ζωντανή τόσο κατά τη ρομαντική περίοδο όσο και μέχρι τον 20<sup>ο</sup> αιώνα.

Ο Γιόχαν Σεμπάστιαν Μπαχ (1685 – 1750), από τη θέση του Κάντορα του Καθεδρικού ναού της Λειψίας, είχε αναλάβει να συνθέτει κάθε βδομάδα μια καινούργια θρησκευτική καντάτα για την τακτική κυριακάτικη λειτουργία. Καθώς οι καντάτες αυτές περιλαμβάνουν κατά κανόνα ένα ή περισσότερα κοράλ, ο Μπαχ συνέθεσε στη διάρκεια της ζωής του πάνω από 200 κοράλ για 4φωνα χορωδία, ως τμήματα κάποιου από τα πολυάριθμα χορωδιακά έργα του.<sup>14</sup> Άλλα κοράλ διακρίνονται για το αυστηρό, ιερατικό ύφος τους, ενώ άλλα εντυπωσιάζουν με την κινητικότητα των φωνών και τις αλληπάλληλες τολμηρές μετατροπές, πάντοτε σε άμεση συνάρτηση με τα λόγια και το γενικότερο χαρακτήρα του μουσικού έργου στο οποίο ανήκουν.

Κομβικό ρόλο στις εναρμονίσεις του Μπαχ παίζουν η επιδέξια χρήση των ξένων φθόγγων και οι μεταβάσεις από τη μια τονική περιοχή στην άλλη. Έχει ενδιαφέρον ότι ο Μπαχ δεν εισάγει ποτέ μια μετατροπία απλά ως επίδειξη δεξιότητας, αλλά πάντοτε για εκφραστικούς λόγους – για να σχολιάσει μουσικά το θέμα έτσι όπως επιβάλλουν κάθε φορά η μελωδία ή τα λόγια (Kæchlin, 1929). Όπως και με την χρήση ξένων φθόγγων, ο Μπαχ επιδιώκει κι εδώ να ανανεώνει συνεχώς το μουσικό ενδιαφέρον, δεν επιτρέπει όμως ποτέ σε τέτοιες μικρές ή μεγάλες «αποδράσεις» να αποδυναμώσουν το αίσθημα της τονικότητας.

---

<sup>14</sup> Υπάρχουν επίσης πολλά έργα του Μπαχ βασισμένα σε κοράλ, όπως τα χορικά πρελούδια και οι παρτίτες για εκκλησιαστικό όργανο, έργα για ορχήστρα κτλ. Ο συνολικός αριθμός των χορικών που συνέθεσε ο Μπαχ ξεπερνάει τα 400.



## 4 ΤΟ ΑΡΜΟΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΟΥ ΠΑΟΥΛ ΧΙΝΤΕΜΙΤ

---

*Η παλιά καλή μας φίλη, η Αρμονία, κάποτε απαραίτητη και αξεπέραστη μέθοδος διδασκαλίας, έχει πια αναγκαστικά κατέβει από το βάθρο όπου την είχε τοποθετήσει η γενική εκτίμηση*

*Πάουλ Χίντεμιτ, Παραδοσιακή Αρμονία (Traditional Harmony), Βιβλίο Ι, Schott & Co. 1943/68*

Ο πρώτος τόμος του έργου του Πάουλ Χίντεμιτ<sup>15</sup> Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης (Unterweisung im Tonsatz, The Craft of Musical Composition) εκδόθηκε το 1937. Το βιβλίο αυτό, με υπότιτλο *Θεωρητικό Μέρος*, ακολούθησαν δύο ακόμα τόμοι που πραγματεύονται το πρακτικό μέρος της σύνθεσης, για 2 και 3 φωνές αντίστοιχα. Ένας τέταρτος τόμος γύρω από τη σύνθεση για 4 φωνές παρέμεινε σε κάποια αρχικά σχεδιάσματα.

Στο Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης (ΣΜΣ), ο Χίντεμιτ προτείνει το χειρισμό των δώδεκα φθόγγων της χρωματικής κλίμακας με απόλυτα ισότιμο τρόπο μέσα σε ένα ενιαίο τονικό πλαίσιο. (Searle, 1955) Στην ουσία, αντί να παίρνει ως σημείο εκκίνησης τη διατονικότητα θεωρώντας τα όποια φαινόμενα χρωματικότητας ως περιστασιακές αποκλίσεις, αντιμετωπίζει καταρχήν τη χρωματικότητα ως το γενικό πλαίσιο και εκλαμβάνει στη συνέχεια τη διατονικότητα απλώς σαν μια ειδική περίπτωση.

### 4.1 ΣΕΙΡΕΣ 1 ΚΑΙ 2 – ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΑ – ΘΕΜΕΛΙΟΙ

Η βάση του ΣΜΣ είναι δύο ακολουθίες (βλ. *Εικόνα 1*), που ο Χίντεμιτ ονομάζει Σειρά 1 και Σειρά 2.<sup>16</sup> Η συνήχηση δύο φθόγγων δίνει πάντοτε, κατά το Χίντεμιτ, μια εγγενή εντύπωση κυριαρχίας του ενός

---

<sup>15</sup> Πάουλ Χίντεμιτ (1895 – 1963): σπουδαίος σολίστ της βιόλας, μαέστρος και πολυγραφότατος συνθέτης, από τους πιο σημαντικούς του α' μισού του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Συνέθεσε όπερες, συμφωνίες, κοντσέρτα, πολλή μουσική δωματίου, τραγούδια κ.ά. Τη δεκαετία του 1930 εγκατέλειψε τη ναζιστική Γερμανία και στις αρχές της επόμενης δεκαετίας βρέθηκε στις ΗΠΑ, όπου δίδαξε στο πανεπιστήμιο Yale. Μετά το τέλος του πολέμου, επέστρεψε στην Ευρώπη, συνέχισε να συνθέτει και να διδάσκει στο πανεπιστήμιο της Ζυρίχης, όπου εγκαταστάθηκε μέχρι το θάνατό του. Εκτός από το πολύτομο *Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης*, τα θεωρητικά του έργα περιλαμβάνουν ακόμα τη δίτομη *Παραδοσιακή Αρμονία* (Traditional Harmony) και το *Σύστημα Βασικής Μουσικής Εκπαίδευσης* (Elementary Training for Musicians).

<sup>16</sup> Η Σειρά 1 είναι η γνωστή *αρμονική σειρά*, που στηρίζεται στην ακολουθία των αρμονικών ενός φθόγγου. Η Σειρά 2, που είναι μια τελείως πρωτότυπη κατασκευή του Χίντεμιτ, βασίζεται στο ακουστικό φαινόμενο των *υπολειμματικών συχνοτήτων* (combination ή difference tones, Kombinationstöne). Κατά την ταυτόχρονη συνήχηση δύο φθόγγων, η υπολειμματική συχνότητα ακούγεται ως η *διαφορά* συχνοτήτων των δύο απευθείας παραγόμενων φθόγγων του διαστήματος. Ένας τέτοιος φθόγγος συνδυάζεται με τη σειρά του με τους δύο πρώτους και παράγει περαιτέρω συχνότητες δεύτερης, τρίτης τάξης κ.κ. Στην πράξη, μετά τις δύο πρώτες τάξεις, το φαινόμενο εξασθενεί τόσο που δεν γίνεται πλέον αντιληπτό – βλ. (Parncutt, 1988)

πάνω στον άλλο. Αυτό τον οδηγεί στην έννοια της **θεμελίου ενός διαστήματος**<sup>17</sup> (root, Grundton). Για παράδειγμα, είναι γεγονός ότι σαν κύριο φθόγγο μιας 5<sup>ης</sup> καθαρής ακούμε πάντα τη χαμηλότερη νότα: αυτή επομένως ορίζεται ως θεμέλιος. Η σύμπτωση της θεμελίου με το βαρύτερο φθόγγο είναι αυτή ακριβώς που δίνει στο διάστημα της 5<sup>ης</sup> καθαρής τη σταθερότητα που το χαρακτηρίζει. Αντίθετα, στο διάστημα της καθαρής 4<sup>ης</sup>, η ψηλότερη νότα είναι εκείνη που υπερισχύει και συνεπώς αυτή καθίσταται η θεμέλιος – γι' αυτό και το διάστημα αυτό (που δεν είναι παρά η αντιστροφή της πέμπτης) είναι πολύ λιγότερο σταθερό. Εξετάζοντας τα υπόλοιπα διαστήματα της Σειράς 2 παίρνουμε τις θεμελίου: *πέμπτη καθαρή* -> κάτω νότα, *τέταρτη καθαρή* -> πάνω,  *τρίτη* -> κάτω, *έκτη* -> πάνω, *δεύτερη* -> πάνω, *έβδομη* -> κάτω,  *τρίτονο* -> θεμέλιος ακαθόριστη.<sup>18</sup>



Εικόνα 1: Σειρές 1 και 2

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010



Εικόνα 2: Οι θεμέλιοι των διαστημάτων

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2, η Σειρά 2 αποτυπώνει (από αριστερά προς τα δεξιά) το *αρμονικό* και (από δεξιά προς τα αριστερά) το *μελωδικό* βάρος των διαστημάτων. Η οκτάβα και η ταυτοφωνία

<sup>17</sup> Πρέπει να τονιστεί ότι δεν υπάρχει αντίστοιχη έννοια για τη θεμέλιο ενός *διαστήματος* στην τονική αρμονία. Εξάλλου, η κατά Χίντεμιτ θεμέλιος (ενός *διαστήματος* ή και μιας *συγχορδίας*, όπως θα δούμε αργότερα) δεν έχει έτσι κι αλλιώς καμία σχέση με τη θεμέλιο μιας 3φωνης ή 4φωνης συγχορδίας της τονικής αρμονίας, όπως αυτή ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3.2

<sup>18</sup> Η μεθοδολογία καθορισμού των θεμελίων με βάση τους υπολειμματικούς φθόγγους είναι εκτενής και ιδιαίτερα λεπτομερειακή στο ΣΜΣ, ξεφεύγει όμως από τα όρια της παρούσας εργασίας.

αποτελούν τις πλέον ξεκάθαρες<sup>19</sup> συνηχήσεις δύο φθόγγων. Στο άλλο άκρο βρίσκεται το τρίτονο, σαν «αντίβαρο». Κατά τη λύση ενός τριτόνου, το αυτί εκλαμβάνει πάντοτε έναν από τους φθόγγους ως **προσαγωγέα**<sup>20</sup> (ή οδηγό φθόγγο) προς την επόμενη θεμέλιο. (Hindemith, 1937) Αν και στο τρίτονο δεν νοείται θεμέλιος, ορίζεται παρόλα αυτά ένας *εκπρόσωπος της θεμελίου* (root representative, stellvertretender Grundton). (βλ. *Εικόνα 3*)



Εικόνα 3: Τρίτονα - Εκπρόσωποι της θεμελίου

Π. Χίντεμιτ: *Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης*, εκδ. Νάσος, 2010

## 4.2 Η ΑΡΜΟΝΙΑ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Ο Χίντεμιτ ασκεί κριτική στη συμβατική θεωρία της αρμονίας, την οποία θεωρεί υπερβολικά «στενόχωρη» για τις ανάγκες της σύγχρονης μουσικής. Η κριτική αυτή εστιάζεται κατά κύριο λόγο στον τρόπο κατασκευής των συγχορδιών αποκλειστικά κατά τρίτες, όπως επίσης στις έννοιες της (τονικής) θεμελίου και της αναστροφής μιας συγχορδίας. Εξάλλου, η ερμηνεία των ξένων φθόγγων και των αλλοιωμένων συγχορδιών κατά την τονική αρμονία εισάγει, λέει ο Χίντεμιτ, ήδη υπερβολικά μεγάλη αβεβαιότητα στο σύστημα. Στη θέση της τονικής αρμονίας, ο Χίντεμιτ προτείνει ένα νέο αρμονικό σύστημα το οποίο, στις βασικές του γραμμές, περιγράφεται παρακάτω.

Καταρχήν, ο ορισμός της συγχορδίας γενικεύεται ώστε να συμπεριλάβει *οποιαδήποτε συνηχήση* τριών τουλάχιστον διακριτών<sup>21</sup> φθόγγων, ανεξάρτητα αν αυτοί έχουν προκύψει από υπέρθεση διαστημάτων τρίτης ή όχι. Οι έννοιες της συμφωνίας και διαφωνίας δεν έχουν πλέον κανένα νόημα. Στη θέση αυτών, και με κριτήριο τη σταθερότητα των συνηχήσεων, ο Χίντεμιτ κατανέμει όλες τις συγχορδίες σε δύο μεγάλες ομάδες, που ονομάζει **Ομάδα Α** και **Ομάδα Β**: η πρώτη περιλαμβάνει όλες τις συγχορδίες χωρίς τρίτονο, η δεύτερη εκείνες που περιέχουν ένα τουλάχιστο τρίτονο και είναι γι' αυτό πολύ πιο ασταθείς.

<sup>19</sup> Κατά το Χίντεμιτ, αυτό συμβαίνει γιατί οι υπολειμματικοί φθόγγοι ταυτίζονται με τους κύριους, ενισχύοντάς τους.

<sup>20</sup> Πρέπει και πάλι να προσέξουμε ότι οι έννοιες του προσαγωγέα στην τονική αρμονία και στο ΣΜΣ δεν έχουν καμία σχέση μεταξύ τους. Ο προσαγωγέας του Χίντεμιτ δεν αναφέρεται σε κάποιο τρόπο, αλλά σε κάποιο *διάστημα* τριτόνου ή κάποια *συγχορδία* που περιέχει τρίτονο.

<sup>21</sup> Η επανάληψη της ίδιας νότας σε διαφορετική οκτάβα δε λαμβάνεται εδώ υπόψη.

Γενικά, οι θεμέλιοι των ενδο-συγχορδιακών διαστημάτων επιδιώκουν να επιβάλουν την κυριαρχία τους στη συγχορδία. Έτσι, σε κάθε συγχορδία μπορούμε κατά κανόνα να αντιστοιχίσουμε μία **θεμέλιο της συγχορδίας**: για να τη βρούμε πρέπει να αναζητήσουμε το καλύτερο (με βάση τη Σειρά 2) ενδο-συγχορδιακό διάστημα (βλ. *Εικόνα 4*).<sup>22</sup>

Εικόνα 4: Θεμέλιοι συγχορδιών

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

Οι αναστροφές δεν έχουν επίσης νόημα στο ΣΜΣ. Από την άλλη μεριά, συγχορδίες με τη θεμέλιο στο μπάσο θεωρούνται γενικά ότι διαθέτουν μεγαλύτερο βάρος σε σχέση με άλλες, όπου η θεμέλιος βρίσκεται σε μια ψηλότερη φωνή.

Υπάρχουν συγχορδίες της Ομάδας Β όπου το τρίτονο δε μπορεί να εξουδετερωθεί πλήρως από άλλα πολύ πιο ισχυρά ενδο-συγχορδιακά διαστήματα και έτσι μπολιάζει με την ασάφεια που το χαρακτηρίζει ολόκληρη τη συγχορδία. Υπάρχουν μόνο 4 τέτοιοι τύποι συγχορδιών: η ελαττωμένη τρίφωνη συγχορδία (με τις δύο αναστροφές της) και η τετράφωνη συγχορδία ελαττωμένης εβδόμης (βλ. *Εικόνα 5*). Όπως και για το τρίτονο προηγουμένως, έτσι κι εδώ ένας φθόγγος της συγχορδίας καλείται να πάρει τη θέση της εκπροσώπου της θεμελίου.

<sup>22</sup> Ο (Parncutt, 1988) υπολογίζει πειραματικά για όλους τους 2φωνους, 3φωνους και 4φωνους *τονικούς* (και μόνο) συγχορδιακούς σχηματισμούς τη σχετική πιθανότητα ενός φθόγγου να εξέχει σε σχέση με τους υπόλοιπους (να λειτουργεί δηλ. σαν θεμέλιος). Είναι χαρακτηριστικό ότι, μολονότι για κάποια δίφωνα διαστήματα τα πειραματικά ευρήματα δε δίνουν πάντα σαφές προβάδισμα στις θεμελίους του Χίντεμιτ, τα ευρήματα για τις τονικές συγχορδίες συμπίπτουν πλήρως με τις επιταγές του ΣΜΣ. Έτσι, για παράδειγμα, η 3φωνη συγχορδία ντο-φα-σολ (sus4) έχει *δύο*, σχεδόν ισότιμους, εξέχοντες φθόγγους – όπως προβλέπει το ΣΜΣ, δηλ. το ντο της καθαρής 5<sup>ης</sup> και το φα της καθαρής 4<sup>ης</sup>. Ας σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή η τονική αρμονία θεωρεί ως θεμέλιο το ντο, ενώ το φα αποτελεί απλώς καθυστέρηση στην τρίτη της μείζονος συγχορδίας. Επίσης, η 4φωνη (μείζων ή ελάσσων) συγχορδία με μικρή εβδόμη ντο-μιβ-σολ(b)-σιβ έχει ως θεμέλιο το μιβ (όπως ακριβώς προβλέπει και ο Χίντεμιτ) και όχι το ντο (την αναμενόμενη δηλ. θεμέλιο της τονικής αρμονίας) – συναντούμε με άλλα λόγια εδώ την τρίφωνη συγχορδία με προσθήκη 6<sup>ης</sup>, τη *sixte ajoutée* του Ζαν Φιλίπ Ραμώ.

### 4.3 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΣΥΓΧΟΡΔΙΩΝ – ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ

Η Ομάδα Α υποδιαιρείται στις υπο-ομάδες I, III, και V, ενώ η Ομάδα Β στις υπο-ομάδες II, IV και VI. Περαιτέρω υποδιαιρέσεις με δείκτη 1 και 2 έχουν να κάνουν με το εάν η θεμέλιος συμπίπτει με το μπάσο ή όχι, αντίστοιχα. Οι υποδιαιρέσεις αυτές ορίζονται με πολύ λεπτομερή τρόπο στο ΣΜΣ και οδηγούν σε μια *εξαντλητική κατάταξη* όλων των δυνατών συνηρήσεων σχηματίζοντας υποσύνολα ανά δύο ξένα μεταξύ τους.

✓ Υπο-ομάδα I: περιλαμβάνει τις τρίφωνες μείζονες και ελάσσονες συγχορδίες ( $I_1$ ), καθώς και τις αναστροφές τους ( $I_2$ ).

✓ Υπο-ομάδα II: περιλαμβάνει συγχορδίες με τρίτονα εξαρτώμενα από ισχυρότερα διαστήματα. Στην κατηγορία IIa συναντούμε τις συνηθισμένες δεσπόζουσες μεθ' εβδόμης (δηλ. με μικρή έβδομη) σε ευθεία κατάσταση. Οι συγχορδίες της υπο-ομάδας II με μεγάλες δεύτερες κατατάσσονται στις κατηγορίες IIb<sub>1</sub>, IIb<sub>2</sub> και IIb<sub>3</sub> (οι τελευταίες είναι αυτές που περιέχουν δύο ή περισσότερα τρίτονα).

✓ Υπο-ομάδα III: πρόκειται για μια πολύ μεγάλη οικογένεια συγχορδιών. Ως ένα μικρό υποσύνολο αυτής συναντούμε εδώ τις γνωστές από την τονική αρμονία δευτερεύουσες συγχορδίες μεθ' εβδόμης (αυτές που δεν περιέχουν τρίτονα) και τις αναστροφές τους.

✓ Υπο-ομάδα IV: εδώ κατατάσσονται όλες οι συγχορδίες που περιέχουν τρίτονα σε συνδυασμό με οποιονδήποτε αριθμό διαστημάτων μικρής 2<sup>ης</sup> ή/και μεγάλης 7<sup>ης</sup>.

Οι υπο-ομάδες V και VI δεν περιλαμβάνουν πολλές συγχορδίες, απαρτίζονται δε από τις συγχορδίες εκείνες των οποίων η θεμέλιος είναι απροσδιόριστη.

✓ Υπο-ομάδα V: περιλαμβάνει τις αυξημένες τρίφωνες συγχορδίες, όπως επίσης και αυτές που σχηματίζονται από επάλληλες τέταρτες.

✓ Υπο-ομάδα VI: αποτελείται από τις τρίφωνες ελαττωμένες και τις τετράφωνες ελαττωμένες συγχορδίες μεθ' εβδόμης (βλ. *Εικόνα 5*).



Εικόνα 5: Συγχορδίες της υπο-ομάδας VI (θεμέλιος απροσδιόριστη)

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

Στις συγχορδίες της Ομάδας Β, ο φθόγγος που ανήκει σε κάποιο τρίτονο και ταυτόχρονα σχηματίζει το καλύτερο ενδο-συγχορδιακό διάστημα με τη θεμέλιο της συγχορδίας λειτουργεί ως προσαγωγέας ολόκληρης της συγχορδίας<sup>23</sup> (βλ. *Εικόνα 6*).

<sup>23</sup> Και όχι κάποιου τρόπου – επαναλαμβάνουμε την ουσιώδη διαφορά για την αποφυγή σύγχυσης



Εικόνα 6: Συγχορδίες της Ομάδας Β, θεμέλιοι και προσαγωγείς

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

Όπως παρατηρεί ο Χίντεμιτ, η παραδοσιακή αρμονία περιλαμβάνεται σχεδόν ολόκληρη στις υπο-ομάδες I, II και VI, με κάποιες μόνο συγχορδίες μεθ' εβδόμης και μετ' ενάτης στις ενδιάμεσες κατηγορίες. Ο τεράστιος όγκος των υπο-ομάδων III, IV και V βρίσκεται ουσιαστικά εκτός του πλαισίου της τονικής αρμονίας. Η θεωρία της χρωματικής αρμονίας στο ΣΜΣ οδηγεί λοιπόν, κατά το Χίντεμιτ, σε μια ουσιώδη επέκταση της παραδοσιακής αρμονίας «μείζονος – ελάσσονος».

Η κατάταξη σε υπο-ομάδες φαίνεται συγκεντρωτικά στο διάγραμμα των συγχορδιών (βλ. Παράρτημα 0). Σε σχέση με αυτό το διάγραμμα, έχουμε να παρατηρήσουμε ότι κάθε βήμα προς τα κάτω ή προς τα δεξιά επιφέρει μείωση της αρμονικής αξίας, ενώ αντίστροφα κάθε βήμα προς τα πάνω ή προς τα αριστερά οδηγεί σε αύξηση. Την ίδια στιγμή, η μετάβαση από μια συγχορδία μεγαλύτερης σε μια μικρότερης αξίας αντιπροσωπεύει μια *αύξηση της αρμονικής έντασης*, ενώ η κίνηση κατά την αντίθετη κατεύθυνση συνιστά *μείωση της έντασης*. Αυτές ακριβώς τις αλληπάλληλες διεγέρσεις και εκτονώσεις της έντασης ονομάζει ο Χίντεμιτ **αρμονική διακύμανση**. Η αρμονική διακύμανση σημειώνεται με τη βοήθεια της αρίθμησης των υπο-ομάδων και των σχετικών διαγραμμάτων, όπως στην Εικόνα 7.



Εικόνα 7: Ένα παράδειγμα αρμονικής διακύμανσης

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

#### 4.4 ΔΙΦΩΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ – ΑΚΟΛΟΥΘΙΕΣ ΘΕΜΕΛΙΩΝ

Η γραμμή του μπάσου έχει καταρχήν καίρια σημασία στην αρμονική ανάπτυξη. Θεωρούμε ως αμέσως σημαντικότερη γραμμή μια από τις επάνω φωνές, συνήθως δε την ψηλότερη (σοπράνο), που κατά κανόνα είναι και η πιο προβεβλημένη. Οι δύο τούτες γραμμές καλούνται από το Χίντεμιτ *δίφωνο*

πλαίσιο και αποτελούν το αρμονικό περίγραμμα. Οι υπόλοιπες φωνές παίζουν δευτερεύοντα ρόλο σε αυτό το επίπεδο.

83

○ = Θεμέλιοι   ● = Οδηγοί φθόγγοι και λύση τους.   ] = Τρίτονο

Εικόνα 8: Ακολουθίες θεμελίων και κινήσεις προσαγωγέων, Ομάδα Β προς Ομάδα Α

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

89

Εικόνα 9: Ακολουθίες θεμελίων και κινήσεις προσαγωγέων, ακολουθίες Ομάδας Β

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

Κατά τις συνδέσεις των συγχορδιών, μεγάλη σημασία πρέπει να δίνεται στην **ακολουθία των Θεμελίων**. Η καθεμιά από αυτές τις τελευταίες, λέει ο Χίντεμιτ, συμπυκνώνει κατά κάποιο τρόπο ολόκληρη τη συγχορδία και αποτελεί, με μια έννοια, το ίχνος της. Αυτή η ακολουθία θεμελίων αποτελεί ταυτόχρονα και ένα διαγνωστικό εργαλείο: μια «κακή»<sup>24</sup> ακολουθία θεμελίων υποκρύπτει κατά κανόνα μια ελαττωματική αρμονική ακολουθία (Ο' Connell, 2011). Σε περιπτώσεις όπου μια συγχορδία της Ομάδας Β προηγείται μιας από την Ομάδα Α, έχουμε επιπλέον να διαχειριστούμε (το ή) τα τρίτονα της πρώτης που λύνονται στη δεύτερη. Εκτός από τη θεμέλιο, ο προσαγωγέας πρέπει επίσης να κινηθεί με

<sup>24</sup> Για παράδειγμα, συχνές επαναλήψεις μιας νότας ή υπερβολικά πολλά ελαττωμένα και αυξημένα διαστήματα κτλ., γενικότερα μια ακολουθία χωρίς κάποια στοιχειώδη μελωδική ενότητα

ένα καλό<sup>25</sup> διάστημα προς τη θεμέλιο της δεύτερης συγχορδίας. Μια τέτοια κίνηση είναι όταν ο προσαγωγέας κινείται βηματικά ή ακόμα καλύτερα όταν παραμένει κρατημένος στην ίδια νότα<sup>26</sup> (βλ. *Εικόνα 8*). Σε περίπτωση που περισσότερες συγχορδίες της Ομάδας Β διαδέχονται η μία την άλλη, πρέπει να φροντίσουμε εξίσου τη διαδοχή των θεμελίων και αυτή των προσαγωγέων. Όταν τελικά καταλήξουμε σε μια συγχορδία της Ομάδας Α, τόσο η θεμέλιος όσο και ο προσαγωγέας θα κινηθούν προς τη θεμέλιο της λύσης, όπως και παραπάνω (βλ. *Εικόνα 9*).

Ο Πίνακας 4.1 συγκεφαλαιώνει μερικά ισχυρά και αδύνατα σημεία του ΣΜΣ: (Ο' Connell, 2011)

Ισχυρά σημεία	Αδυναμίες
Ανεξαρτησία από το σύστημα μείζονος – ελάσσονος. Δεν υφίσταται τεχνητός διαχωρισμός ανάμεσα σε διατονικότητα και χρωματικότητα	Ελλιπής θεωρία της μετατροπίας. Η ισοδυναμία των 12 φθόγγων κάνει εξαρχής δυνατές όλες τις μεταβάσεις μεταξύ συγχορδιών, αλλά δε καθορίζει ποιες από αυτές είναι κατά περίπτωση πιο δόκιμες και πώς αυτές οδηγούν σε μια συγκεκριμένη επιθυμητή κατεύθυνση
Η προβολή <i>δύο ή περισσότερων</i> φωνών σε μία ακολουθία (αυτή των θεμελίων) δίνει έμφαση στη μελωδική φύση της αντίστιξης	Η εμμονή στις ακολουθίες θεμελίων και στα δίφωνα πλαίσια «καταδικάζει» τις μεσαίες αντιστικτικές φωνές σε ρόλο κομπάρσου
Το ΣΜΣ περιλαμβάνει μια λεπτομερή θεωρία για τη μελωδία	Η μουσική μορφολογία είναι παντελώς απύσχα από το ΣΜΣ. Οι αρμονικές ακολουθίες δε φαίνεται να αναφέρονται σε κάποιες πιο εκτεταμένες φόρμες
Συστηματική ανάπτυξη του υλικού	Ψευδαισθηση της καθολικότητας. Από τα μέσα του 20 <sup>ου</sup> αιώνα και μετά, θεωρίες που επαγγέλλονται μια «οικουμενική» ισχύ αντιμετωπίζονται με έντονο σκεπτικισμό
Δεν υπάρχει καμία εξάρτηση από το μουσικό στυλ	

Πίνακας 4.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του Συστήματος Μουσικής Σύνθεσης

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η πολύ περιληπτική περιγραφή του ΣΜΣ, κυρίως πάνω στα σημεία εκείνα που θα μας φανούν χρήσιμα για τη συνέχεια. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι πολλά στοιχεία της αρμονικής σκέψης του Χίντεμιτ παρουσιάζουν μεγάλη πρωτοτυπία και ενδιαφέρον, θεωρητικό και πρακτικό. Είναι επίσης κατανοητό ότι το αρμονικό του σύστημα εγείρει αρκετές αντιρρήσεις, εύλογες κάποιες από αυτές.<sup>27</sup> Ο ίδιος πάντως δεν έχασε ποτέ την εμπιστοσύνη του στο ΣΜΣ. Στις διαλέξεις του στο Χάρβαρντ την περίοδο 1949/50 σημείωνε χαρακτηριστικά: «Για κάποιους ερασιτέχνες και – φοβάμαι – πολύ περισσότερο για κάποιους μουσικούς αθεράπευτα προσηλωμένους στο συντηρητισμό, μέθοδοι σύνθεσης εμφορούμενες από ιδέες σαν κι αυτές όχι μόνο θα μοιάζουν

<sup>25</sup> Με κριτήριο τη Σειρά 1

<sup>26</sup> Μια συγχορδία της Ομάδας Α θεωρείται κατά το ΣΜΣ ότι έχει εξίσου έναν «προσαγωγέα», ο οποίος στην περίπτωση αυτή ταυτίζεται κατά σύμβαση με τη θεμέλιο – είτε σε ταυτοφωνία είτε σε οκτάβα

<sup>27</sup> Κι αυτό από καθαρά μουσικοθεωρητική άποψη, ανεξάρτητα από το ειδικότερο ενδιαφέρον που μπορεί την ίδια στιγμή να παρουσιάζει το ΣΜΣ για ένα μηχανικό οντολογία, όπως θα επιχειρήσουμε να δείξουμε παρακάτω.



υπερβολικές και αντι-καλλιτεχνικές, παρά θα αμφισβητηθεί ακόμα το αν και κατά πόσο είναι εφαρμόσιμες. [...] Εκείνοι οι μουσικοί που δε συμφωνούν σε μια πιο ολοκληρωμένη, πιο ορθολογική και – σε τελική ανάλυση – πιο ρεαλιστική διαχείριση του μουσικού υλικού θα έκαναν πάντως καλύτερα να δουν τα πράγματα κατά πρόσωπο: ούτε η συμπάθεια ούτε η αντιπάθειά τους μπορεί να επηρεάσει την αναπόφευκτη αναμόρφωση των μουσικών μας αντιλήψεων». (Hindemith, 1953)



## 5 ΟΝΤΟΛΟΓΙΑ, ΟΝΤΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ Ο ΣΗΜΑΣΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ

---

*λέγω δὲ καθόλου μὲν ὃ ἐπὶ πλείονων πέφυκε κατηγορεῖσθαι, καθ' ἕκαστον δὲ ὃ μὴ,  
οἷον ἄνθρωπος μὲν τῶν καθόλου Καλλίας δὲ τῶν καθ' ἕκαστον*

*ως καθολικά εννοώ αυτά που μπορούν να κατηγορηθούν σε πολλά,  
ενώ ως καθέκαστα αυτά που δεν μπορούν,  
λ.χ. ο άνθρωπος ανήκει στα καθολικά, ενώ ο Καλλίας στα καθέκαστα*

*Αριστοτέλους Περί Ερμηνείας 17a [μτφρ. Πάυλος Καλλιγιάς]*

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΟΝΤΟΛΟΓΙΕΣ

Ο όρος οντολογία απαντά γενικά με ποικίλες σημασίες σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία. Σε ό,τι μας αφορά, πρέπει καταρχήν να κάνουμε τη διάκριση ανάμεσα στην **Οντολογία** (με κεφαλαίο αρχικό) και την **οντολογία** (ή οντολογίες, με μικρό γράμμα). Στην πρώτη περίπτωση, αναφερόμαστε στον κλάδο της φιλοσοφίας που εξερευνά τη φύση και τη δομή του κόσμου. Ο Αριστοτέλης ασχολήθηκε σε βάθος με αυτό το ερώτημα στο έργο του «Μετά τα Φυσικά», το πρώτο γραπτό σύγγραμμα στην ιστορία που πραγματεύεται σε βάθος αυτό το φιλοσοφικό πρόβλημα. Στο έργο αυτό, η Οντολογία είναι η επιστήμη του *όντος ως όντος*, αυτή δηλαδή που μελετά τις οντότητες του κόσμου ως προς τα γνωρίσματα εκείνα που αφορούν στην ίδια τη φύση τους.

Η δεύτερη περίπτωση, αυτή που ενδιαφέρει κατά κύριο λόγο την Επιστήμη των Υπολογιστών, είναι κάπως διαφορετική. Για τον T. Gruber, «οντολογία είναι η (ρητή) προδιαγραφή μιας σύλληψης εννοιών». (Gruber, 1993) Μια ρητή *προδιαγραφή* προϋποθέτει μια ξεκάθαρη γλώσσα χωρίς αμφισημίες, δεκτική σε επεξεργασία τόσο από ανθρώπους όσο και από υπολογιστές. Η σύλληψη ή *επίνοια* (conceptualization) συνδέεται με τον καθορισμό ενός συνόλου εννοιών (concepts) και των σχέσεων (relations) μεταξύ τους. Γενικά, τέτοιες σχέσεις μπορεί να ορίζονται τόσο κατά την ένταση (intentional / conceptual) όσο και κατά την έκταση (extensional / ordinary). Το πεδίο ορισμού των σχέσεων αυτών είναι στην ουσία μια δομή  $\langle D, W \rangle$ , όπου D είναι ένα σύνολο αντικειμένων (οντοτήτων) και W το σύνολο των διαφορετικών δυνατών καταστάσεων των πραγμάτων ή αλλιώς το σύνολο των δυνατών κόσμων. Η επίνοια μπορεί να θεωρηθεί λοιπόν μια διατεταγμένη τριάδα  $\langle D, W, R \rangle$  όπου R ένα σύνολο οντολογικών σχέσεων πάνω στο ζευγάρι  $\langle D, W \rangle$ , πάνω δηλαδή στις οντότητες του κόσμου, που βρίσκονται σε μια δεδομένη κατάσταση, καθορίζονται με άλλα λόγια από συγκεκριμένες ιδιότητες. (Konstantinou, et al., 2015)

Σε αντίθεση με τις σχεσιακές βάσεις δεδομένων, οι οντολογίες αναπαριστούν τη γνώση με *ρητό* και ξεκάθαρο τρόπο μέσα από τη σημασιολογία που δίνουν στις διάφορες οντότητες. Παράλληλα, διαθέτουν μηχανισμούς αυτόματης συλλογιστικής (εργαλεία κατά πολύ ισχυρότερα από μια απλή γλώσσα ερωτήσεων, σαν την SQL) για να συμπεραίνουν περαιτέρω υπονοούμενη γνώση και την ίδια στιγμή να ελέγχουν τη βάση ως προς πιθανές ασυνέπειες. (Keet, 2020)

Μια οντολογία παρέχει ένα κοινό λεξιλόγιο σε όσους μοιράζονται πληροφορίες πάνω σε κάποιο πεδίο. Καθιερώνει τις βασικές έννοιες του πεδίου αποδίδοντας τους ορισμούς και τις σχέσεις μεταξύ τους, έτσι που να μπορούν να ερμηνευτούν με μονοσήμαντο τρόπο τόσο από ανθρώπους όσο και από μηχανές. Αυτή η κατανόηση της πληροφορίας και της δομής της μέσα από μια ενιαία και σαφή σημασιολογία καθιστά ακριβώς καίρια την ανάπτυξη των οντολογιών. Η κοινή από όλους αντίληψη ενός τμήματος του κόσμου επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση της γνώσης, απλώς ενσωματώνοντας ήδη γνωστά κομμάτια της τελευταίας σε κάποιο άλλο μοντέλο – για παράδειγμα, το (κοινά αποδεκτό) λεξιλόγιο FOAF που αφορά στη γνώση γύρω από τις σχέσεις μεταξύ ατόμων μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο ως μέρος του μοντέλου που κατασκευάζουμε για τις ανάγκες μας. Εξάλλου, ένας νεοεισερχόμενος χρήστης μπορεί να κατανοήσει με ευχέρεια τη σημασία και τη λειτουργία ενός άγνωστου σε αυτόν γνωστικού πεδίου μελετώντας τις έννοιες και τις σχέσεις, όπως αυτές δηλώνονται στην οντολογία. Η διατύπωση τέλος ρητών ισχυρισμών σε επίπεδο οντολογίας κάνει ευκολότερη μια πιθανή τροποποίησή τους μελλοντικά, ενώ η αναζήτηση τέτοιων προδιαγραφών και η τροποποίησή τους μέσα σε κώδικα λογισμικού θα ήταν μια πολύ πιο δύσκολη διαδικασία, σχεδόν αδύνατη μάλιστα για ένα χρήστη χωρίς εξοικείωση με τις γλώσσες προγραμματισμού. (Noy, et al.)

## 5.2 ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Τα ιδιαίτερα γνωρίσματα που αναπτύχθηκαν παραπάνω αναφορικά με τις οντολογίες (κοινό λεξιλόγιο, ενιαία σημασιολογία, δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης κοκ.) είναι αυτά ακριβώς τα οποία θέλουμε να χαρακτηρίζουν τη γνώση που αναζητούμε κατά την πλοήγησή μας στον παγκόσμιο ιστό. Ο ΠΙ είναι σήμερα μια κολοσσιαία δεξαμενή πληροφοριών και, χάρη στη δυνατότητα να μεταφερόμαστε από το ένα σημείο στο άλλο μέσω των υπερ-συνδέσμων, η πρόσβαση σε οποιοδήποτε σημείο είναι δυνατή και ανεμπόδιση. Αυτές οι πληροφορίες είναι όμως αποθηκευμένες μέσα σε ανεξάρτητους και απομακρυσμένους ιστότοπους και η γλώσσα HTML είναι προσανατολισμένη σχεδόν αποκλειστικά στην κειμενική αναπαράσταση της πληροφορίας και πολύ λιγότερο σε αυτά καθαυτά τα δεδομένα. Άλλωστε, η ίδια η πληροφορία είναι κατανεμημένη σε τέτοιο βαθμό που, χωρίς τη δυνατότητα κατανόησης, μεταφοράς και επαναχρησιμοποίησης της γνώσης από το ένα σημείο στο άλλο, παραμένει τελικά διαμοιρασμένη και εγκλωβισμένη σε *νησίδες* δεδομένων. Αυτό όμως που χρειαζόμαστε είναι ένας *παγκόσμιος χώρος* δεδομένων με δυνατότητες ενιαίας και αυτοματοποιημένης πρόσβασης σε κάθε σημείο. Ξεπερνώντας λοιπόν την HTML, χρειαζόμαστε ένα μοντέλο αναπαράστασης όχι απλώς εγγράφων αλλά των αντικειμένων στα οποία αυτά αναφέρονται, και ακόμα ένα μηχανισμό τυποποίησης που να μας επιτρέπει να καθορίσουμε σε έναν ορισμένο βαθμό τη σημασία των σχέσεων ανάμεσά τους. Αυτό είναι το σκεπτικό πίσω από τις έννοιες των *Συνδεδεμένων Δεδομένων* και του *Σημασιολογικού Ιστού* και στο πλαίσιο αυτό οι οντολογίες παίζουν πρωταρχικό ρόλο. (Heath, et al., 2011)

## 6 Η RDF(S) ΚΑΙ Η ΓΛΩΣΣΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΩΝ SPARQL

---

### 6.1 ΠΟΡΟΙ ΚΑΙ ΤΡΙΑΔΕΣ RDF

Η ενιαία κατανόηση του τεράστιου όγκου αποθηκευμένων πληροφοριών – από πολλούς διαφορετικούς χρήστες, ανθρώπους και κυρίως μηχανές – δεν μπορεί να γίνει εφικτή όσο δύο τυχαίοι και απομακρυσμένοι επισκέπτες του ιστού, που συναντούν λ.χ. κάπου στον ΠΙ τις πληροφορίες «ο εθνικός ποιητής της Ελλάδας» και «Διονύσιος Σολωμός», δεν είναι σε θέση να ταυτοποιήσουν χωρίς αμφιβολία τα ευρήματά τους σε ένα και το αυτό άτομο του κόσμου. Ο μόνος όμως τρόπος να καταφέρουμε κάτι τέτοιο είναι να αποδώσουμε ένα ενιαίο προσδιοριστικό στο άτομο αυτό και μαζί να δημιουργήσουμε έναν κοινά αποδεκτό μηχανισμό αναφοράς σε αυτό το άτομο, που θα μας επιτρέπει να αντιστοιχίζουμε πάνω του τις δύο παραπάνω ιδιότητες, μαζί με όποιες άλλες προκύψουν ακόμα, όπως «ο δημιουργός των Ελευθέρων Πολιορκημένων», «ο κόντες Δ. Σολωμός» κοκ.<sup>28</sup> Κάθε τέτοιο προσδιοριστικό αντιπροσωπεύει έναν *πόρο* (resource), δηλ. ένα «πράγμα» ή μια «οντότητα», χοντρικά κάτι πάνω στο οποίο θέλουμε να κάνουμε κάποιου είδους αναφορά. Το μοντέλο που χρειάζεται ώστε οι πληροφορίες να διαρθρώνονται με σωστό τρόπο είναι το **Πλαίσιο Περιγραφής Πόρων** (Resource Description Framework, RDF), ένα σε ευρύτατη χρήση πρότυπο της Κοινοπραξίας W3C<sup>29</sup>.

Με τη λογική της προηγούμενης παραγράφου, πόροι μπορεί να είναι ο,τιδήποτε ανήκει στον κόσμο που επιθυμούμε να περιγράψουμε: προφανώς άτομα σαν το Σολωμό, αλλά ακόμα και άψυχα ή άυλα αντικείμενα όπως π.χ. τραπέζια ή ιστοσελίδες, οικογένειες ή γένη πραγμάτων, ακόμα και ιδέες ή οντότητες που δεν υπάρχουν πια ή δεν υπήρξαν ποτέ, όπως π.χ. οι μονόκεροι ή ο Άγιος Βασίλης: πραγματικά, από τη στιγμή που αποτελούν δυνητικά αντικείμενα αναφοράς, *όλα (μπορούν να) είναι πόροι*. Οι πόροι στη γλώσσα<sup>30</sup> RDF συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας τριάδες (RDF triples) κατά το σχήμα **υποκείμενο – κατηγορήμα – αντικείμενο**, και μια τέτοια τριάδα με τη σειρά της μπορεί να συνδέεται με μια άλλη μέσω ενός κόμβου κοινού και στις δύο, έτσι ώστε προοδευτικά να σχηματίζεται ένας πολύ εκτεταμένος γράφος αποτελούμενος από κόμβους και κατευθυνόμενες ακμές.

---

<sup>28</sup> Σε αντίθεση με διάφορα συστήματα αποθήκευσης πληροφορίας όπως π.χ. τις βάσεις δεδομένων, ο πραγματικός κόσμος, του οποίου την αναπαράσταση επιδιώκουμε, δεν διέπεται από τη λεγόμενη *υπόθεση του μοναδικού ονόματος* (unique name assumption). Πράγματι, σε ένα περιβάλλον όπως ο παγκόσμιος ιστός, είναι δυνατόν να συναντήσουμε διαφορετικές ονομασίες, οι οποίες στην πορεία να αποδειχτεί ότι αναφέρονται στην ίδια οντότητα του κόσμου, όπως συμβαίνει παραπάνω με την περίπτωση του Δ. Σολωμού.

<sup>29</sup> World Wide Web Consortium, <https://www.w3.org/>

<sup>30</sup> Η ακριβής μετάφραση του όρου RDF είναι «πλαίσιο περιγραφής πόρων», άλλωστε δεν πρόκειται για κάποια γλώσσα προγραμματισμού αλλά πολύ περισσότερο για ένα πρότυπο μοντέλου οργάνωσης δεδομένων. Παρόλα αυτά, στα ελληνικά έχει επικρατήσει να χρησιμοποιείται καταχρηστικά η έκφραση *γλώσσα RDF* (και *γλώσσα RDFS*)

Όπως έγινε ήδη σαφές, η αναφορά σε κάποιο πόρο οφείλει να είναι ενιαία και συνεπώς χρειαζόμαστε ένα *Ενιαίο Προσδιοριστικό Πόρου* (Uniform Resource Identifier, URI): αυτό υλοποιείται ως επέκταση των URL, χάρη στα οποία έχουμε πετύχει την ενιαία αναγνώριση των ιστοσελίδων (που άλλωστε είναι επίσης πόροι) στον Ιστό. Κατά τη λογική μάλιστα των URL, προβλέπονται κι εδώ πεδία ονομάτων (namespaces), έτσι ώστε να διευκολύνεται και να τυποποιείται σε κάποιο βαθμό η απόδοση ενός URI σε κάποια οντότητα. Στην RDF μάλιστα, μπορούμε να ορίσουμε και πεδία ονομάτων για τις ειδικές λειτουργίες της γλώσσας: για παράδειγμα, αν έχουμε κάπου ορίσει τα πεδία ονομάτων *rdf:* και *hindemith:* μπορούμε να γράψουμε

```
hindemith:tristanChord rdf:type hindemith:Chord
hindemith:hasMIDIpitch rdf:type rdf:Property
```

υποδηλώνοντας ότι μια συγχορδία με το προσδιοριστικό *tristanChord* (μέσα στο πεδίο ονομάτων *hindemith:*) «είναι τύπου» *Chord*, όπως αυτή ορίζεται μέσα σε αυτό το πεδίο (στην προκειμένη περίπτωση, αυτό μπορεί να είναι η οντολογία που θα περιγράψουμε στο *Κεφάλαιο 9*) και ότι η *hasMIDIpitch* αντιπροσωπεύει μια «ιδιότητα» στη γλώσσα RDF.

## 6.2 Η ΓΛΩΣΣΑ RDF(S)

Συνεχίζοντας τη σκέψη μας, παρατηρούμε ότι η πληροφορία οργανώνεται καλύτερα όταν αποθηκεύεται μαζί με τη δομή της: κάτι ανάλογο έχουμε στον αντικειμενοστρεφή προγραμματισμό, όπου ένα συγκεκριμένο άτομο μπορούμε την ίδια στιγμή να το θεωρούμε και ως στιγμιότυπο κάποιας κλάσης. Ταυτόχρονα, είναι αναγκαία μια κάποια τυποποίηση και επιβολή περιορισμών στην πληροφορία, ώστε όταν αυτή γίνεται αποδεκτή κατά την εισαγωγή της να μην καθιστά τη συνολική γνώση ασυνεπή. Αυτό προϋποθέτει ένα επίπεδο πάνω από τη γλώσσα RDF, το *Σχήμα-RDF* (RDF Schema, RDFS). Μια από τις μεγάλες αρετές της RDF είναι ότι οι δηλώσεις στο Σχήμα προβλέφθηκε εξαρχής να γίνονται με τον ίδιο τρόπο όπως και οι απλές δηλώσεις για τους επιμέρους πόρους: οι συνδέσεις ατομικών πόρων με πόρους του Σχήματος-RDF υλοποιούνται με τη μορφή τριάδων, όπως ακριβώς αυτές ανάμεσα σε οποιουδήποτε πόρους. (Allemang, et al., 2011) Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας ένα ακόμα, πέρα από το *rdf:*, «ειδικό» πεδίο ονομάτων, το *rdfs:*

Έτσι, μπορούμε για παράδειγμα να σχηματίσουμε τις εξής δύο τριάδες:

```
hindemith:tristanChord rdf:type hindemith:Chord
hindemith:Chord rdf:type rdfs:Class
```

για να δηλώσουμε ότι ο πόρος *tristanChord* της οντολογίας μας «είναι τύπου» *Chord* (Συγχορδία) και ότι αυτή με τη σειρά της «είναι τύπου» *Class* στην RDFS. Η χρήση του *rdfs:Class*, σε συνδυασμό με το *rdf:type*, υλοποιεί λοιπόν μια ad-hoc τυποποίηση στα δεδομένα μας. Με την ίδια λογική μπορούμε να δηλώσουμε **ιεραρχίες** κλάσεων και ιδιοτήτων (μέσω των «ειδικών» πόρων *rdfs:subClassOf* και

`rdfs:subPropertyOf`) και **περιορισμούς** στο σύνολο ορισμού και το πεδίο τιμών μιας σχέσης (με τα `rdfs:domain` και `rdfs:range`, αντίστοιχα).

### 6.3 ΟΝΤΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ RDF(S)

Οι οντολογίες είναι ένα σπουδαίο εργαλείο για την πρόσβαση σε μεγάλο όγκο πληροφορίας και την υλοποίηση του Σημασιολογικού Ιστού, αρκεί τα αποθηκευμένα δεδομένα να μπορούν να διασυνδεθούν με έννοιες και σχέσεις της οντολογίας μας και να έχουμε στη διάθεσή μας κατάλληλους μηχανισμούς που υποστηρίζουν ένα τέτοιο ολοκληρωμένο μοντέλο οντολογίας / δεδομένων. Η διασύνδεση αυτή με τις οντολογίες επιτυγχάνεται αποθηκεύοντάς τις (όχι αποκλειστικά, αλλά πάντως κατά κανόνα) με τη βοήθεια της γλώσσας RDF(S): τα στιγμιότυπα της οντολογίας περνάνε σε κόμβους τριάδων RDF, ενώ η οντολογία με τη σειρά της αποτυπώνει την ίδια τη δομή της σε ένα Σχήμα-RDF. Στην πραγματικότητα, το Σχήμα αποθηκεύει ένα σύνολο μετα-ιδιοτήτων της οντολογικής δομής: ένταξη ενός στιγμιότυπου σε μια κλάση (*rdf:type rdfs:Class*, instance-of relationship), υπαγωγή κλάσεων (*rdfs:subClassOf*, class subsumption), υπαγωγή ιδιοτήτων (*rdfs:subPropertyOf*, property subsumption) και τέλος περιορισμούς στο πεδίο ορισμού και το σύνολο τιμών (*rdfs:domain* και *rdfs:range* αντίστοιχα).

Στο επίπεδο της υλοποίησης, η αναπαράσταση σε γλώσσα RDF προϋποθέτει αφενός ένα αποθετήριο για την αποθήκευση (δεδομένων και Σχήματος), αφετέρου ένα μεσολογισμικό (middleware) που τρέχει πάνω σε αυτό το αποθετήριο. Η καθαυτό αποθήκευση των δεδομένων, τόσο του Σχήματος όσο και των επιμέρους στιγμιότυπων, μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, ο συνηθέστερος από τους οποίους είναι μέσω ενός Συστήματος Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (ΣΔΒΔ). Το μεσολογισμικό υλοποιεί την πρόσβαση στο αποθετήριο: χάρη σε αυτό, η βάση γνώσης α/ μπορεί να διαβάσει από το αποθετήριο δεδομένα με τη μορφή τριάδων RDF, β/ ενεργοποιεί ένα μηχανισμό παραγωγής συμπερασμάτων και γ/ διαθέτει μεθόδους για την ενημέρωση (δημιουργία ή διαγραφή πληροφορίας) και τη διατύπωση ερωτημάτων πάνω στα δεδομένα. (Hertel, και συν., 2009)

### 6.4 Η ΓΛΩΣΣΑ SPARQL

Η διατύπωση ερωτημάτων στις βάσεις αποθήκευσης τριάδων (RDF triplestores) προϋποθέτει προφανώς μια κατάλληλα ορισμένη γλώσσα ερωτημάτων. Όταν το τελικό αποθετήριο είναι αποθηκευμένο στη μορφή μιας συνηθισμένης βάσης δεδομένων, θα πρέπει επίσης να παρεμβάλλεται ένας συντακτικός αναλυτής (parser) για να αναλύει τη σύνταξη της γλώσσας RDF, καθώς και ένα ενδιάμεσο στάδιο μετατροπής του αναλυμένου ερωτήματος σε σχεσιακό λογισμό, πριν αποσταλεί η τελική μορφή του ερωτήματος στη βάση, διατυπωμένη σε SQL. Καθώς η υλοποίηση του SQL ερωτήματος εξαρτάται από το συγκεκριμένο ΣΔΒΔ, είναι σκόπιμο να παρεμβάλλεται ένα ενδιάμεσο

επίπεδο. Αυτό από τη μια μεριά θα έρχεται σε απευθείας επαφή με τα δεδομένα, από την άλλη θα παρέχει τις απαραίτητες διεπαφές με τα ανώτερα επίπεδα του μεσολογισμικού, ώστε η όποια αλλαγή στον φυσικό τρόπο αποθήκευσης των δεδομένων να μην επηρεάζει αυτές καθαυτές τις μεθόδους ανάκτησης της πληροφορίας. (Hertel, και συν., 2009)

Η γλώσσα SPARQL, καθιερωμένη πλέον από την Κοινοπραξία W3C<sup>31</sup>, έχει σήμερα καταστεί η συχνότερα χρησιμοποιούμενη κύρια γλώσσα ερωτημάτων σε RDF triplestores. Η γλώσσα έχει τη λογική ταιριασματος σε **μοτίβα γράφων** (graph patterns), επιτρέποντάς μας να εισάγουμε σε μια RDF τριάδα μια **μεταβλητή** σε κάποια από τις τρεις θέσεις, στη θέση κάποιου συγκεκριμένου RDF όρου. Ένα SPARQL ερώτημα βασίζεται στο σχήμα SELECT – FROM – WHERE:

- η γραμμή SELECT υλοποιεί την προβολή (projection),
- η (προαιρετική) γραμμή FROM δηλώνει την πηγή άντλησης της πληροφορίας και
- η γραμμή WHERE θέτει προϋποθέσεις στις δυνατές λύσεις με τη μορφή συγκεκριμένου υποδείγματος στο μοτίβο γράφου και λογικών (boolean) περιορισμών. (Hertel, και συν., 2009)

Ένα ερώτημα όπως το ακόλουθο

```
PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX foaf: <http://xmlns.com/foaf/0.1/>
```

```
SELECT ?n
WHERE
{
    ?x rdf:type foaf:Person ;
    foaf:name ?n .
    ?c foaf:name "Bob" ;
    foaf:knows ?y .
    FILTER (?x = ?y) .
}
```

περιλαμβάνει εκτός των παραπάνω μια συνθήκη FILTER για να σηματοδοτήσει ένα λογικό περιορισμό. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το ερώτημα ανακτά όλα τα ονόματα των ατόμων που είναι γνωστά στο άτομο με το όνομα "Bob".<sup>32</sup>

Στο *Κεφάλαιο 10.2* θα χρησιμοποιήσουμε τη γλώσσα SPARQL για να κάνουμε ερωτήματα πάνω στην αρμονία των χορικών του Γ. Σ. Μπαχ.

---

<sup>31</sup> Ο οργανισμός W3C αναγνώρισε ως επίσημα προτεινόμενο μοντέλο τη SPARQL 1.0 το 2008 και τη SPARQL 1.1 το 2013.

<sup>32</sup> Αναλυτική τεκμηρίωση της γλώσσας SPARQL 1.1 είναι διαθέσιμη στην ιστοσελίδα <http://www.w3.org/TR/sparql11-query/>



## 7 ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΕΣ ΛΟΓΙΚΕΣ

---

Η γλώσσα RDF(S) δεν επαρκεί για να υποστηρίξει την αναπαράσταση γνώσης και την ανάπτυξη εφαρμογών στηριγμένων σε οντολογίες. Τέτοιες εφαρμογές απαιτούν μια πολύ μεγαλύτερη εκφραστικότητα που μόνο μια εξειδικευμένη γλώσσα οντολογίας μπορεί να παράσχει. Η γλώσσα αυτή πρέπει να είναι λεπτομερώς ορισμένη και σχεδιασμένη, ενώ παράλληλα να υποστηρίζεται από κατάλληλα εργαλεία συλλογιστικής. Χρειαζόμαστε λοιπόν α/ ένα πλήρως καθορισμένο συντακτικό, β/ μια λεπτομερή τυπική σημασιολογία, γ/ αποδοτική υποστήριξη κατά τη συλλογιστική, δ/ επαρκή εκφραστική ισχύ και ε/ εκφραστική ευκολία. (Antonίου, και συν., 2009)

Το λογικο-θεωρητικό υπόβαθρο τέτοιων γλωσσών και εργαλείων συλλογιστικής είναι οι περιγραφικές λογικές (description logics, DLs, ΠΛ). Πρόκειται στην ουσία για μια ολόκληρη οικογένεια γλωσσών αναπαράστασης γνώσης που χρησιμοποιούνται με σκοπό να αποτυπώσουν την πληροφορία με δομημένο και τυπικά διατυπωμένο τρόπο. Είναι σε θέση να περιγράψουν σύνθετες έννοιες, με βάση ατομικές **έννοιες** (concepts) και **ρόλους** (roles), ενώ ταυτόχρονα είναι εφοδιασμένες με μια τυπική λογική σημασιολογία. Η τελευταία παρέχει μια ακριβή προδιαγραφή για την *σημασία* των οντοτήτων που συναποτελούν το μέρος του κόσμου που εξετάζουμε, έτσι που άνθρωποι και μηχανές να ανταλλάσσουν πληροφορία χωρίς αμφιβολίες ως προς το τι εννοούν. Την ίδια στιγμή, αυτή ακριβώς η σημασιολογία επιτρέπει τη λογική επαγωγή πρόσθετης πληροφορίας με βάση τα δεδομένα που είναι ήδη ρητά διατυπωμένα στην οντολογία. Αυτό το τελευταίο σημείο αποτελεί μια ουσιώδη διαφορά ανάμεσα στις περιγραφικές λογικές και σε άλλες γλώσσες μοντελοποίησης, όπως για παράδειγμα την UML. (Keet, 2020)

### 7.1 ΣΩΜΑΤΑ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΙΣΧΥΡΙΣΜΩΝ

Ο φορμαλισμός των ΠΛ περιλαμβάνει από τη μια ένα **σώμα ορολογίας** (terminological box, TBox) – που αποτελεί με μια έννοια την καθαυτό οντολογία – και από την άλλη ένα **σώμα ισχυρισμών** (assertion box, ABox). Και τα δυο μαζί συνιστούν μια βάση γνώσης. Τα στοιχεία του κόσμου που αναπαριστώνται σε μια βάση γνώσης είναι *άτομα* (στιγμιότυπα μιας έννοιας), *έννοιες* (κατηγορίες ατόμων) και *ρόλοι* (διμελείς σχέσεις μεταξύ ατόμων).<sup>33</sup>

Το Tbox αποτελείται από ένα σύνολο **αξιωματών υπαγωγής / ισοδυναμίας** εννοιών και ρόλων. Κατά βάση, σε αυτό περιγράφονται ή ορίζονται έννοιες και ιδιότητες με βάση άλλες και με τη βοήθεια κατάλληλων κατασκευαστών. Κάθε κατασκευαστής προσθέτει μια επιπλέον εκφραστική δυνατότητα

---

<sup>33</sup> Κατά σύμβαση, τα αναγνωριστικά των εννοιών αρχίζουν με κεφαλαίο γράμμα και αυτά των ρόλων με πεζό.

στη γλώσσα. Το αντίστοιχο τίμημα είναι μια αυξανόμενη πολυπλοκότητα και συνεπώς μεγαλύτερη δυσχέρεια ή ακόμα και αδυναμία για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Μπορούμε να ορίσουμε σύνθετες έννοιες, γράφοντας λ.χ. το αξίωμα

Άνθρωπος Π  $\geq$  3 έχει\_παιδί  $\equiv$  Πολύτεκνος

όπου έχει γίνει χρήση των κατασκευαστών Π (τομή) και  $\geq n$  (το-λιγότερο n, όπου n κάποιος φυσικός αριθμός). Με το αξίωμα αυτό δηλώνουμε το γεγονός ότι οι πολύτεκνοι είναι ακριβώς αυτά τα άτομα που αφενός ανήκουν στην κλάση των ανθρώπων και αφετέρου έχουν τουλάχιστο 3 παιδιά.

Το Abox περιλαμβάνει **ισχυρισμούς** για συγκεκριμένα άτομα του κόσμου, που μπορεί να είναι

- ισχυρισμοί ισότητας / ανισότητας μεταξύ στιγμιοτύπων,
- ισχυρισμοί εννοιών, όπως π.χ.

Πολύτεκνος(Βασίλης)

όπου δηλώνεται ότι το άτομο με το αναγνωριστικό «Βασίλης» είναι στιγμιότυπο της κλάσης «Πολύτεκνος»,

- ισχυρισμοί ρόλων, λ.χ.

έχει\_παιδί(Κώστας,Μαρία)

όπου δηλώνουμε ότι ο Κώστας και η Μαρία έχουν σχέση γονιού με παιδί. (Στάμου, 2015)

Οι ΠΛ (και μαζί τους οι γλώσσες οντολογίας που προκύπτουν από αυτές, όπως η OWL) λειτουργούν με την *υπόθεση του ανοικτού κόσμου* (open world assumption, OWA): η σημασιολογία τους λαμβάνει γενικά υπόψη όλες τις δυνατές καταστάσεις (κοσμοθεωρήσεις) όπου μπορούν να έχουν ισχύ τα συγκεκριμένα αξιώματα. Είναι αναμενόμενο και αποδεκτό η μη ρητά προσδιορισμένη πληροφορία να παραμένει ανοικτή. Στον αντίποδα, η υπόθεση του κλειστού κόσμου (closed world assumption, CWA) «κλείνει» την ερμηνεία υπονοώντας ότι οποιοδήποτε γεγονός δεν είναι ρητά δηλωμένο είναι στην πραγματικότητα ψευδές. Αυτό που συμβαίνει στις ΠΛ είναι ότι όσο περισσότερα αξιώματα προστίθενται στη βάση γνώσης, τόσο εξειδικεύονται οι περιορισμοί που επιβάλλει πάνω στις πιθανές ερμηνείες και τόσο λιγοστεύουν οι ερμηνείες που συνεχίζουν να ικανοποιούν το σύνολο των αξιωμάτων. Από την άλλη πλευρά, όσο λιγότερες είναι οι αποδεκτές ερμηνείες, τόσο περισσότερα αξιώματα θα ισχύουν σε αυτές και τόσο περισσότερα θα είναι τα λογικά συμπεράσματα που μπορούν να προκύψουν. Η σημασιολογία των ΠΛ είναι λοιπόν *μονότονη*: πρόσθετα αξιώματα οδηγούν σε πρόσθετες λογικές συνέπειες – ή αλλιώς, όσο τροφοδούμε το σύστημα με παραπάνω γνώση, τόσο περισσότερα αποτελέσματα επιστρέφει. (Keet, 2020)

## 7.2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΕΣ ΕΝΝΟΙΩΝ ΚΑΙ ΡΟΛΩΝ

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, υπάρχει μια ολόκληρη γκάμα περιγραφικών λογικών, τις οποίες διακρίνει μια ολοένα αυξανόμενη εκφραστικότητα, ανάλογα με το ποιοι κατασκευαστές εννοιών ή

ρόλων επιλέγονται κάθε φορά. Ο κάθε κατασκευαστής υποδηλώνεται με κάποιο γράμμα, συγκεκριμένα

- U για την *ένωση* (union) δύο κλάσεων
- C για την *άρνηση* (complement), για να δηλώσουμε όλα τα άτομα που δεν είναι στιγμιότυπα μιας έννοιας
- E για το *υπάρχει*  $\exists$  (exists), όταν θέλουμε να δηλώσουμε ότι κάποιο άτομο συνδέεται μέσω κάποιου συγκεκριμένου ρόλου με τουλάχιστο ένα στιγμιότυπο μιας κλάσης, π.χ.

*Ξέχει\_παιδί.Αγόρι*

περιγράφει κάποιο άτομο με τουλάχιστο ένα παιδί που είναι αγόρι

- F για το *για-κάθε*  $\forall$  (for-all), όταν θέλουμε να δηλώσουμε ότι όλα τα άτομα (εάν υπάρχουν) που συνδέονται μέσω ενός ρόλου με κάποιο άτομο αποτελούν στιγμιότυπα μιας κλάσης, π.χ.

*Υέχει\_παιδί.Αγόρι*

σημαίνει ότι για το συγκεκριμένο άτομο του κόσμου, εάν έχει παιδιά, αυτά θα πρέπει να είναι όλα αγόρια

- O για τις *ονοματικές έννοιες* (one-of), για παράδειγμα στην ισοδυναμία

*ΕποχήΤουΧρόνου  $\equiv$  {Άνοιξη, Καλοκαίρι, Φθινόπωρο, Χειμώνας}*

η έννοια της «Εποχής» ορίζεται μέσα από το σύνολο στο δεξί μέλος και μπορεί να πάρει μια από αυτές τις 4 τιμές και μόνο

- N για τους *περιορισμούς πληθικότητας* (number restrictions)  $\geq n$  (τουλάχιστο),  $\leq n$  (το-πολύ) και  $=n$  (ακριβώς), για παράδειγμα

*=1έχει\_διευθυντή*

εκφράζει το αξίωμα ότι κάποιο άτομο (πιθανώς ένα τμήμα μιας επιχείρησης) έχει ακριβώς ένα διευθυντή

- Q για τους *περιορισμούς πληθικότητας με εξειδίκευση* (qualified number restrictions), που λειτουργούν όπως οι απλοί περιορίζοντας όμως παράλληλα και το δεύτερο όρισμα των ρόλων σε μια συγκεκριμένη κλάση, π.χ.

*$\geq 1$ έχει\_τμηματάρχη.ΜόνιμοςΥπάλληλος*

εκφράζει το αξίωμα ότι κάθε τμήμα μιας επιχείρησης έχει τουλάχιστο ένα τμηματάρχη που είναι μόνιμος υπάλληλος της επιχείρησης

- D για τους ορισμούς *τύπων δεδομένων*.

Αντίστοιχα έχουμε για τους κατασκευαστές ρόλων:

- I για την *αναστροφή* ρόλου (role inversion), π.χ. τρώει  $\equiv$  τρώγεται\_από<sup>-</sup>
- R για την *σύνθεση* ρόλων (role composition) π.χ. έχει\_θείο  $\equiv$  έχει\_πατέρα  $\circ$  έχει\_αδερφό
- H για τα αξιώματα *υπαγωγής* ρόλων (role subsumption), που μπορούμε να ορίσουμε κατ' ανάλογο τρόπο με αυτόν για την υπαγωγή εννοιών

Μια σχετικά απλή περιγραφική λογική είναι η ALC<sup>34</sup>. Σε αυτή χρησιμοποιούμε κατασκευαστές για την ένωση, τομή, άρνηση, υπάρχει και για-κάθε, ενώ ξεκινώντας από αυτήν και με διαδοχικές επεκτάσεις ορίζουμε τις SIN<sup>35</sup>, SHOIN, SHIQ, SHOIQ, SROIQ κοκ. Αξίζει να σημειώσουμε εδώ ότι η γλώσσα οντολογίας OWL2 (βλ. Κεφάλαιο 8) στηρίζεται στη SROIQ (D). (Στάμου, 2015)

### 7.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΕΣ ΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΙΣΤΙΚΗ

Σε μια οντολογία χρειάζεται να είμαστε σε θέση να ελέγχουμε με αυτοματοποιημένο τρόπο (δηλ. με κατάλληλους αλγόριθμους συλλογιστικής) ανά πάσα στιγμή την ικανοποιησιμότητα της βάσης μας. Την ίδια στιγμή – ξεκινώντας από τα αξιώματα που τοποθετούν μια κλάση στη σωστή ιεραρχική της θέση – θέλουμε να εφοδιάζουμε τη βάση με καινούργιους ισχυρισμούς στις περιγραφές των αντικειμένων που ανήκουν σε αυτήν. Γενικά, τα προβλήματα που προκύπτουν σε τέτοια συστήματα αναπαράστασης γνώσης έχουν να κάνουν είτε με την **ακεραιότητα** της βάσης είτε με τη διατήρηση της **συνέπειας** κατά την παραγωγή νέων δεδομένων ως λογικών συμπερασμάτων. Απαιτούνται λοιπόν εξειδικευμένοι αλγόριθμοι συλλογιστικής για περιγραφικές λογικές, τέτοιοι ώστε:

- προκειμένου για βάσεις εφοδιασμένες μόνο με αξιώματα ορολογίας (δηλ. χωρίς ισχυρισμούς): να απαντούν, με βάση το TBox, σε ερωτήματα ως προς την *ικανοποιησιμότητα* (ή μη) μιας έννοιας, ως προς το εάν αυτή υπάγεται (ή όχι) σε κάποια άλλη και τέλος εάν αυτές οι δύο είναι ισοδύναμες ή ξένες μεταξύ τους. Τα συμπεράσματα που θα προκύψουν θα ισχύουν για κάθε μοντέλο του TBox, ανεξάρτητα δηλ. από επιμέρους ισχυρισμούς γύρω από άτομα που μπορεί να εισαχθούν αργότερα στη βάση
- προκειμένου για βάσεις που συμπεριλαμβάνουν εξαρχής ισχυρισμούς: να παράγουν καινούργια συμπεράσματα για άτομα του κόσμου εμπλουτίζοντας τη γνώση μας με νέους ισχυρισμούς εννοιών και ρόλων για τα αντικείμενα. Ένα βασικό ζήτημα είναι ο έλεγχος *συνέπειας* του σώματος ισχυρισμών, σε συνδυασμό και με τα αξιώματα ορολογίας. (Στάμου, 2015)

Για την πρώτη ομάδα, αποδεικνύεται ότι όλα τα προβλήματα μπορούν να αναχθούν σε αυτό της *υπαγωγής* μεταξύ εννοιών. Στην περίπτωση που η γλώσσα υποστηρίζει άρνηση (κάτι που ισχύει πολύ συχνά σε μετρίως έως πολύ εκφραστικές ΠΛ, όχι όμως σε απλές εκδοχές όπως π.χ. η AL) η αναγωγή μπορεί ισοδύναμα να γίνει στο πρόβλημα της *ικανοποιησιμότητας* μιας έννοιας<sup>36</sup>. Για τη δεύτερη ομάδα, μπορούμε, υπό προϋποθέσεις, να αναγάγουμε τα υπόλοιπα προβλήματα σε αυτό της συνέπειας. Κατά βάση, αυτό συνδέεται με τα προβλήματα *α/ του ελέγχου στιγμιοτύπου* (instance

<sup>34</sup> Attributive concept Language with Complements (Schmidt-Schauss & Smolka, 1991).

<sup>35</sup> Η συντομογραφία S αντιπροσωπεύει την ALC με μεταβατικούς ρόλους.

<sup>36</sup> Πράγματι, με βάση τη λογική πρώτης τάξης, εάν μια έννοια A υπάγεται σε μια έννοια B, τούτο ισοδυναμεί με τον ισχυρισμό ότι η έννοια  $A \sqsubseteq B$  είναι μη ικανοποιήσιμη.

checking), δηλ. τον έλεγχο της ισχύος ενός συγκεκριμένου ισχυρισμού ως συνεπαγωγή από το ABox και β/ της *πραγματοποίησης* (realization) δηλ. της εύρεσης της στενότερης κλάσης που περιέχει ένα σύνολο στιγμιοτύπων.

Για ΠΛ με περιορισμένη εκφραστικότητα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον *αλγόριθμο δομικής υπαγωγής*. Για πιο πλούσιες ΠΛ<sup>37</sup>, ο αλγόριθμος αυτός δεν έχει εφαρμογή και τα αντίστοιχα προγράμματα συλλογιστικής κάνουν χρήση του *αλγόριθμου tableau*. Στη δεύτερη αυτή περίπτωση, προκειμένου να ελέγξουμε την ικανοποιησιμότητα μιας έννοιας, θεωρούμε ένα αυθαίρετο καινούργιο άτομο ως στιγμιότυπο της έννοιας και προσπαθούμε να παραγάγουμε όσους νέους ισχυρισμούς γι' αυτό μπορούν να προκύψουν εκκινώντας από τους υπάρχοντες και χρησιμοποιώντας λογικά συμπεράσματα. Στο τέρμα αυτής της διαδικασίας, είτε θα έχουμε καταλήξει σε μια συνεπή βάση είτε όχι, κάτι που συνεπάγεται την ικανοποιησιμότητα ή μη (αντίστοιχα) της αρχικής έννοιας<sup>38</sup>.

Ανάμεσα στους διάφορους reasoners που υποστηρίζονται από τις ΠΛ μπορούμε να αναφέρουμε τον RacerPro και τους ελεύθερους και ανοιχτού κώδικα Hermit, Pellet και FaCT++.

---

<sup>37</sup> όπως αυτή που αντιστοιχεί στην οντολογία COMC, που θα εξετάσουμε στο Κεφάλαιο 9.1

<sup>38</sup> Στην πράξη, υπάρχουν περιπτώσεις (όπως συμβαίνει π.χ. με τις λογικές ενώσεις εννοιών) κατά τις οποίες πρέπει να ελέγξουμε έναν πεπερασμένο αριθμό εναλλακτικών «τεχνητά» κατασκευασμένων ABox το ένα μετά το άλλο, πράγμα που μπορεί να αυξήσει εκθετικά την πολυπλοκότητα. Γενικά, αύξηση της εκφραστικότητας συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση της πολυπλοκότητας και έχει επίπτωση στην αποδοτικότητα του αλγόριθμου.



## 8 Η ΓΛΩΣΣΑ ΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ OWL ΚΑΙ ΤΟ PROTÉGÉ

---

Όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το μοντέλο RDF(S), αν και επιτρέπει την αναπαράσταση οντολογικής γνώσης σε κάποιο περιορισμένο αρχικό επίπεδο, δεν καλύπτει την αναγκαία εκφραστικότητα στον επιθυμητό βαθμό. Πραγματικά, συχνά χρειάζεται κανείς να διατυπώσει προτάσεις, όπως ενδεικτικά οι παρακάτω, που δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν στην RDF(S) με επακριβή τρόπο:

- ✓ Κάθε τμήμα μιας επιχείρησης έχει τουλάχιστο έναν εργαζόμενο
- ✓ Ο Γιάννης και η Μαρία είναι οι υφιστάμενοι του Βασίλη
- ✓ Ο προϊστάμενος του προϊσταμένου μου είναι επίσης προϊστάμενός μου

Εξάλλου, δεν έχουμε τρόπο να ορίσουμε νέες κλάσεις ως ενώσεις, τομές ή συμπληρώματα άλλων κλάσεων, ή ακόμα να δηλώσουμε περιορισμούς στο πλήθος των διακριτών τιμών που μπορεί να λαμβάνει μια ιδιότητα (π.χ. «τουλάχιστον 3», «ακριβώς 2» κοκ.). Επιπλέον, με τη χρήση της RDF(S) μπορούμε μεν να δηλώσουμε την υπαγωγή (subsumption) μεταξύ κλάσεων, όχι όμως και ότι δύο κλάσεις είναι ξένες (disjoint) μεταξύ τους. Είναι σημαντικό ακόμη να μπορούμε να χαρακτηρίζουμε σχέσεις ως προς τη μεταβατικότητα (όπως για την ιδιότητα «προϊστάμενος» παραπάνω), μοναδικότητα της τιμής (π.χ. για την ιδιότητα «είναι μητέρα του X») ή την αναστροφή (π.χ. για το ζεύγος «τρώει το» / «τρώγεται από το»).

### 8.1 Η ΓΛΩΣΣΑ OWL

Η γλώσσα οντολογίας OWL<sup>39</sup> παρουσιάστηκε αρχικά το 2004 σε μια πρώτη μορφή<sup>40</sup>. Στη βάση της βρίσκεται η RDF(S), την οποία επεκτείνει σε σημαντικό βαθμό με περαιτέρω λειτουργικότητα που επιτυγχάνεται χάρη σε ένα επιπλέον (εκτός των `rdf:` και `rdfs:`) πεδίο ονομάτων (το *owl:*). Ο Πίνακας 8.1 περιλαμβάνει μερικές εξειδικευμένες εκφράσεις της OWL, συχνά απαραίτητες σε οντολογικές περιγραφές, τις οποίες η RDF(S) δεν μπορεί να καλύψει.

Όπως τονίστηκε ήδη πιο πάνω, όσο πιο πλούσια καθίσταται η γλώσσα μας, τόσο λιγότερο αποδοτική γίνεται στην παραγωγή συμπερασμάτων, ξεπερνώντας καμιά φορά και αυτό το όριο της μη-υπολογισιμότητας. Χρειαζόμαστε επομένως ανάλογα με την περίπτωση έναν ικανοποιητικό συμβιβασμό (tradeoff): μια γλώσσα εφοδιασμένη με κατά το δυνατόν αποδοτικά προγράμματα

---

<sup>39</sup> Αναλυτική τεκμηρίωση της γλώσσας OWL 2 είναι διαθέσιμη στην ιστοσελίδα <http://www.w3.org/TR/owl-ref/>

<sup>40</sup> Η μορφή αυτή, μετά την υιοθέτηση της πιο πλούσιας OWL 2 το 2009, αναφέρεται πλέον ως OWL 1.

συλλογιστικής και ταυτόχρονα αρκετά εκφραστική στην αποτύπωση μιας μεγάλης γκάμας οντολογικής γνώσης. (Antoniou, et al., 2009) Η ικανοποίηση των απαιτήσεων αυτών δε θα μπορούσε να είναι εφικτή από μια και μόνη γλώσσα οντολογίας, προτιμήθηκε λοιπόν εξ αρχής η OWL να προταθεί σε τρεις διαφορετικές παραλλαγές, έτσι που αυτές να ανταποκρίνονται καλύτερα στις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Από αυτές, η γλώσσα **OWL Full** έχει μεν το πλεονέκτημα της πλήρους συμβατότητας με την RDF(S), καθίσταται όμως τόσο ισχυρή εκφραστικά ώστε να μην μπορεί πλέον να υποστηρίξει πλήρως και αποδοτικά την παραγωγή συμπερασμάτων. Η γλώσσα **OWL DL** είναι μια υπογλώσσα της OWL Full που μας επιτρέπει να ανακτήσουμε την υπολογισσιμότητα, με τίμημα την απώλεια της πλήρους συμβατότητας με την RDF. Πράγματι, μολονότι κάθε έγκυρο έγγραφο OWL DL είναι αυτομάτως έγκυρο έγγραφο RDF, το αντίστροφο δεν ισχύει γενικά. Περιορίζοντας ακόμη περισσότερο την εκφραστικότητα καταλήγουμε στην **OWL Lite**. Ο χρήστης μπορεί γενικά να επιλέξει ανάμεσα στην OWL Lite και την OWL DL, ανάλογα με τις απαιτήσεις του σε εκφραστικότητα. Εξάλλου, σε σχέση με την OWL DL, η επαγωγή συμπερασμάτων μέσω της OWL Full είναι λιγότερο προβλέψιμη.<sup>41</sup> (Antoniou, και συν., 2009)

owl:allValuesFrom	For-all: $\forall r.C, \forall r.T$
owl:someValuesFrom	Exists: $\exists r.C, \exists r.T$
owl:hasValue	$\exists r.\{a\}$ , ειδική μορφή της προηγούμενης με πολύ συχνή χρήση
owl:oneOf	One-of: $C(\alpha)$ όπου $C = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$ και $a, a_1, a_2, \dots, a_k$ : στιγμιότυπα
owl:differentFrom	Διακριτά στιγμιότυπα. Εξαιτίας της υπόθεσης του μη-μοναδικού ονόματος στις οντολογίες, υπάρχει ανάγκη η μη-ισοδυναμία στιγμιοτύπων να δηλώνεται ρητά
owl:minCardinality owl:maxCardinality owl:cardinality	Περιορισμοί πληθικότητας (χωρίς εξειδίκευση)
owl:minQualifiedCardinality owl:maxQualifiedCardinality owl:qualifiedCardinality	Περιορισμοί πληθικότητας (με εξειδίκευση)
owl:complementOf	Συμπλήρωμα μιας κλάσης
owl:disjointWith	Κλάσεις ξένες μεταξύ τους

Πίνακας 8.1: Εκφραστικότητα της OWL

## 8.2 Η ΓΛΩΣΣΑ OWL 2

Καθώς η γλώσσα OWL άρχισε γρήγορα να κερδίζει έδαφος, το 2007 συστάθηκε μια Ομάδα Εργασίας στο πλαίσιο της Κοινοπραξίας του Παγκόσμιου Ιστού (W3C) με σκοπό να μελετήσει την επέκταση και τον εμπλουτισμό της με καινούργια χαρακτηριστικά. Η νέα έκδοση της γλώσσας παρουσιάστηκε το 2009 με το όνομα OWL 2 και, ως επίσημα προτεινόμενο πλέον πρότυπο του W3C, εφαρμόστηκε πολύ

<sup>41</sup> Στην ουσία, τόσο η OWL 1 Full όσο και η OWL 2 Full (βλ. Κεφάλαιο 8.2) χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τη μοντελοποίηση επινοιών σε περιπτώσεις όπου δεν απαιτούνται λειτουργίες αυτόματης συλλογιστικής. (Hitzler, και συν., 2010)



γρήγορα σε επεξεργαστές οντολογιών όπως το Protégé και προγράμματα συμπερασμού όπως τα Pellet, RacerPro, FaCT++ και HermiT, για να εξελιχτεί στις μέρες μας στην πλέον διαδεδομένη γλώσσα οντολογιών για το Σηματολογικό Ιστό. Ανάμεσα στις πιο σημαντικές προσθήκες αναφέρουμε την υιοθέτηση των περιορισμών πληθικότητας με εξειδίκευση (qualified number restrictions, το Q στη γλώσσα SROIQ), τη δυνατότητα περιγραφής και ιεράρχησης ρόλων (το R στη SROIQ), τις αλυσίδες ρόλων (role chains), τη δυνατότητα να ορίζεται ένας ανάστροφος ρόλος μέσω του αρχικού (και μόνο, χωρίς δηλ. να χρειάζεται να δοθεί συγκεκριμένο όνομα στο νέο ρόλο – το I στη SROIQ), τη δυνατότητα να μπορεί ένα σύνολο ρόλων να λειτουργήσει ως μοναδικό κλειδί (key) πάνω στα στιγμιότυπα μιας κλάσης κ.ά. Στην πορεία, παγιώθηκαν κάποιες παραλλαγές της OWL 2 ως συγκεκριμένα *προφίλ* της γλώσσας (OWL profiles). Με αυτή την έννοια, οι υπο-γλώσσες OWL 1 Full, OWL 1 DL και OWL 1 Lite μπορούν να θεωρηθούν ως προφίλ της OWL 2, μαζί με κάποιες ακόμα παραλλαγές που έχουν ξεχωρίσει εξαιτίας των ιδιαίτερων υπολογιστικών χαρακτηριστικών τους:

OWL Full	δεν υπάρχει αντιστοιχία με περιγραφική λογική
OWL DL	SHOIN (D)
OWL Lite	SHIF (D) <sup>42</sup>
OWL 2 Full	δεν υπάρχει αντιστοιχία με περιγραφική λογική
OWL 2 DL	SROIQ (D)
OWL 2 EL	EL <sup>++</sup>
OWL 2 QL	DL-Lite
OWL 2 RL	DLP

Πίνακας 8.2: Αντιστοιχία προφίλ OWL με περιγραφικές λογικές

- Η OWL 2 EL επιτρέπει την επαγωγή συμπερασμάτων σε πολυωνυμικό χρόνο πάνω σε πολύ μεγάλες, σχετικά ρηχές ιεραρχίες κλάσεων και ρόλων, εστιάζοντας περισσότερο στο TBox παρά σε ιδιαίτερες εκφραστικές απαιτήσεις πάνω στα στιγμιότυπα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η OWL 2 EL μπορεί να εμφανίζει καλύτερη υπολογιστική συμπεριφορά από την OWL 2 DL.
- Η OWL 2 QL μπορεί να λειτουργήσει πάνω σε συμβατικές σχεσιακές βάσεις δεδομένων. Επιτρέπει και πάλι συλλογιστική σε πολυωνυμικό χρόνο και παρέχει υποστήριξη OWL μέχρι ένα σημείο, χωρίς να θυσιάζεται η αποδοτικότητα μιας υλοποίησης σε βάση δεδομένων. Είναι επομένως κατάλληλη στο να θέτει ερωτήματα πάνω σε μεγάλο όγκο στιγμιότυπων
- Η OWL 2 RL συνδυάζει αλγόριθμους επαγωγής συμπερασμάτων πολυωνυμικού χρόνου με μηχανές συλλογιστικής βασισμένες σε συστήματα κανόνων (rule-based reasoning engines). Βασίζεται σε προγράμματα περιγραφικής λογικής (description logic programs, DLP) και παρέχει κάποιου βαθμού δια-λειτουργικότητα με γλώσσες αναπαράστασης γνώσης βασισμένες σε κανόνες.

<sup>42</sup> Για την ακρίβεια, το F εδώ αναφέρεται σε ρόλους που περιορίζονται σε μονότιμο δεύτερο όρισμα (role functionality, κατ' αναλογία χοντρικά με το πώς ορίζονται οι συναρτήσεις στα μαθηματικά). Οι συνήθεις περιορισμοί πληθικότητας, όταν προβλέπονται, υπερκαλύπτουν βέβαια αυτή τη συνθήκη (πράγματι, το μονότιμο είναι προφανώς ισοδύναμο με το  $\leq 1$ ). Στη συγκεκριμένη περίπτωση όμως, η OWL Lite δεν επιτρέπει τέτοιους περιορισμούς πληθικότητας, παρά μόνο τη δυνατότητα να απαιτήσουμε για κάποιο ρόλο να μη μπορεί το δεύτερο όρισμα να πάρει δύο διακριτές τιμές.

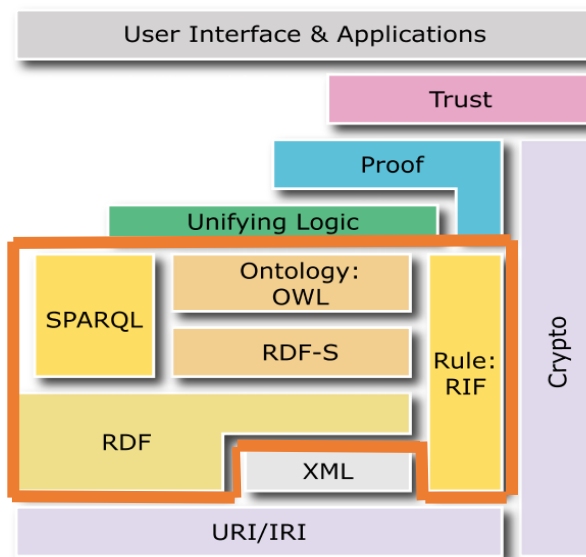
Οι υπο-γλώσσες της OWL που παρουσιάστηκαν σε συντομία παραπάνω βρίσκονται σε αντιστοιχία με συγκεκριμένες περιγραφικές λογικές, όπως δείχνει ο Πίνακας 8.2. (Hitzler, et al., 2010)

Ολοκληρώνοντας στο σημείο αυτό μια πολύ συνοπτική περιγραφή της γλώσσας OWL, είναι χρήσιμο να δούμε στο σύνολό της τη διάρθρωση των τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, όπως δείχνει η Εικόνα 10.

Εικόνα 10: Στοιβά επιπέδων του Σημασιολογικού Ιστού

Πηγή: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

Πρόκειται για τον Πύργο (ή αλλιώς Στοιβά) Επιπέδων του Σημασιολογικού Ιστού (Semantic Web Stack ή Semantic Web Cake), στην οποία βρίσκει κανείς συγκεντρωμένα τα πρότυπα W3C. Όπως μπορούμε να δούμε στο κόκκινο πλαίσιο, οι RDF, RDFS, SPARQL και OWL<sup>43</sup> καταλαμβάνουν ένα συμπαγές κομμάτι της ιεραρχίας, ακριβώς το τμήμα εκείνο που υλοποιεί την άμεση επέκταση του παγκόσμιου ιστού, όπως τον ξέρουμε σήμερα (και που αντιστοιχεί στα χαμηλότερα επίπεδα της στοιβάς, URI/IRI και XML). Όπως φαίνεται στο διάγραμμα, καθεμιά από αυτές τις τεχνολογίες καλύπτει ένα ξεχωριστό επίπεδο της ιεραρχίας και κάνει χρήση των δυνατοτήτων που παρέχουν οι τεχνολογίες των χαμηλότερων επιπέδων.



### 8.3 Το PROTÉGÉ

Το Protégé<sup>44</sup> είναι μια πλατφόρμα επεξεργασίας και ανάπτυξης οντολογιών. Πρόκειται για ελεύθερο και ανοιχτού κώδικα λογισμικό που αναπτύχθηκε από το Κέντρο Έρευνας Βιοϊατρικής Πληροφορικής (Center for Biomedical Informatics Research) της Ιατρικής Σχολής του Πανεπιστημίου Stanford (Musen, 2015). Με πάνω από 360.000 εγγεγραμμένους χρήστες, είναι σήμερα ένα από τα δημοφιλέστερα συστήματα διαχείρισης οντολογικής γνώσης. Είναι υλοποιημένο σε Java, υποστηρίζει πλήρως την OWL 2 και παρέχει μια γραφική διεπαφή χρήστη (GUI) για την καταγραφή και την επεξεργασία δεδομένων σε μια οντολογία. Περιέχει επίσης προγράμματα συλλογιστικής που ελέγχουν τη συνέπεια της βάσης

<sup>43</sup> μαζί με το RIF, που δε θα μας απασχολήσει στην παρούσα εργασία

<sup>44</sup> Η πλατφόρμα ανάπτυξης οντολογιών Protégé υποστηρίζεται από το κονδύλι GM10331601 του Ινστιτούτου Γενικής Ιατρικής, τμήματος των Εθνικών Ινστιτούτων Υγείας των ΗΠΑ. [https://protegewiki.stanford.edu/wiki/Main\\_Page](https://protegewiki.stanford.edu/wiki/Main_Page)

γνώσης και επίσης ενημερώνουν την ταξινόμηση των στιγμιοτύπων στις κλάσεις (τέτοια λογισμικά στο Protégé ονομάζονται και ταξινομητές, classifiers), για παράδειγμα το ELK, το HermiT, το Pellet κ.ο.κ.

Ένα βασικό δομικό στοιχείο μιας οντολογίας στο Protégé είναι, όπως και στην OWL, η κλάση (**class**). Η υπερκλάση όλων των κλάσεων, αυτή που περιέχει όλα τα πιθανά αντικείμενα του κόσμου, είναι η ειδική κλάση Thing (αντιστοιχεί στην έννοια T των ΠΛ) και περιέχεται εξαρχής σε μια οντολογία.

Τα άτομα (**individuals**) ή αντικείμενα ή στιγμιότυπα (instances) συμπεριφέρονται χοντρικά όπως οι αντίστοιχες οντότητες στις περιγραφικές λογικές και στην OWL.

Υπάρχουν τριών ειδών ιδιότητες (που στο Protégé αναφέρονται και ως slots): ιδιότητες αντικειμένου (**object properties**), που συσχετίζουν δύο αντικείμενα μέσω μιας διμελούς σχέσης, ιδιότητες τύπου δεδομένων (**data properties**), που αποδίδουν σε κάποιο άτομο μια (σταθερή) τιμή ενός συγκεκριμένου τύπου και ιδιότητες επισημείωσης (**annotation properties**), που καταγράφουν μεταδεδομένα πάνω σε κλάσεις, μεμονωμένα άτομα ή άλλες ιδιότητες. Ορίζονται επίσης ανάστροφες (inverse) ιδιότητες αντικειμένου, με την εναλλαγή των δύο ορισμάτων της διμελούς σχέσης. Οι ιδιότητες αντικειμένου μπορούν ακόμα να είναι συναρτησιακές (functional, όταν δεν επιτρέπονται δύο διαφορετικά αντικείμενα ως δεύτερα ορίσματα στο ίδιο πρώτο όρισμα), μεταβατικές (transitive), συμμετρικές (symmetric), ανακλαστικές (reflexive) ή α-συμμετρικές (asymmetric). Ορίζονται επίσης τα πεδία ορισμού (Domain) και σύνολο τιμών (Range) μιας ιδιότητας αντικειμένου.<sup>45</sup>

Προβλέπονται περιορισμοί πάνω σε ιδιότητες: πρόκειται στην ουσία για καινούργιες κλάσεις που περιλαμβάνουν ακριβώς τα αντικείμενα εκείνα που συμμετέχουν στις σχέσεις που ορίζουν οι ιδιότητες. Καταρχάς, θεωρούμε τους περιορισμούς ποσοδεικτών (quantifier restrictions), τους οποίους διακρίνουμε σε

- υπαρξιακούς (existential) περιορισμούς: κάνουν χρήση της της λέξης-κλειδί **some**, αντιστοιχούν στο owl:someValuesFrom της OWL και αποτελούν έκφραση των αναγκαίων (necessary) συνθηκών που πρέπει να ικανοποιεί μια κλάση.
- καθολικούς (universal) περιορισμούς: κάνουν χρήση της λέξης-κλειδί **only** και αντιστοιχούν στο owl:allValuesFrom. Ένα σημείο που πρέπει να προσέξουμε εδώ είναι ότι ο καθολικός περιορισμός υποχρεώνει ένα άτομο να ικανοποιεί τον περιορισμό ως προς όλα τα αντικείμενα με τα οποία συνδέεται μέσω της συγκεκριμένης ιδιότητας, *καθόσον αυτά υπάρχουν*. Αν δεν υπάρχουν (για την ώρα) ρητά δηλωμένα τέτοια στιγμιότυπα στην οντολογία, ο περιορισμός αφορά αυτά που τυχόν προστεθούν μελλοντικά και επομένως θεωρείται ότι ισχύει (έστω και με τετριμμένο, προς το παρόν, τρόπο)

Μια κλάση που έχει μόνο υπαρξιακούς περιορισμούς αναφέρεται στο Protégé ως **primitive class**. Ουσιαστικά, η περιγραφή της στο Protégé αντιστοιχεί σε ένα υποσύνολο της τομής αυτών των αναγκαίων συνθηκών. Αν θέλουμε η κλάση να γίνει σύνολο ακριβώς ισοδύναμο με την τομή των

---

<sup>45</sup> Ας σημειωθεί ότι αυτά δεν αποτελούν καταρχήν περιορισμούς ελέγχου της συνέπειας, αλλά μόνο αξιώματα για εξαγωγή συμπερασμάτων: έτσι, αν μια ιδιότητα έχει λ.χ. πεδίο ορισμού μια κλάση και προκύψει κάποιος ισχυρισμός, όπου το πρώτο όρισμα δεν ανήκει ήδη στην κλάση, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα, απλώς το συγκεκριμένο αντικείμενο θα ταξινομηθεί αυτομάτως (και) στη συγκεκριμένη κλάση. (Horridge, 2011)

περιορισμών της, πρέπει να ορίσουμε κάποιους περιορισμούς ως *αναγκαίους και ικανούς* – τότε η κλάση μετατρέπεται σε **defined class**, καθώς η τομή των περιορισμών αυτών δίνει τον ορισμό της κλάσης, καθορίζοντας όλα *ακριβώς* τα στιγμιότυπα της κλάσης (ενν. «αυτά και μόνον αυτά»).

Μπορούμε να δηλώσουμε ένα *αξίωμα κάλυψης* (covering axiom), ορίζοντας μια νέα κλάση (ενν. defined) ως ισοδύναμη με την *ένωση* ενός αριθμού *ξένων μεταξύ τους* κλάσεων. Μπορούμε ακόμα να καθορίσουμε μια *διαμοίραση τιμής* (value partition), όταν θέλουμε ένα άτομο να συνδέεται (συναρτησιακά) μέσω μιας ιδιότητας με κάποιο άλλο, το οποίο θα ανήκει σε μια κλάση που «καλύπτεται» με ένα αξίωμα κάλυψης. Σχετικά παραδείγματα αποτελούν αντίστοιχα οι κλάσεις *NormIntn* και *Group* της οντολογίας CoMC (βλ. Κεφάλαιο 9.1).

Επανερχόμενοι στο θέμα των περιορισμών, έχουμε ακόμα τους

- περιορισμούς (απλής και εξειδικευμένης) πληθικότητας (cardinality / quantified cardinality restrictions) με τις λέξεις-κλειδιά min, max, exactly και
- περιορισμούς τιμής (hasValue restrictions) με τη λέξη-κλειδί value.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, το Protégé χρησιμοποιεί προγράμματα συλλογιστικής ή **ταξινομητές** (classifiers)<sup>46</sup>. Με τη βοήθεια αυτών, ελέγχει ως προς την υπαγωγή μιας κλάσης σε μια άλλη (subsumption testing) και επίσης για τυχόν μη ικανοποιησιμες (inconsistent) κλάσεις, δηλ. τέτοιες που τα αξιώματα ορολογίας δεν τους επιτρέπουν *σε καμία περίπτωση* να περιέχουν στιγμιότυπα. Πρέπει να προσέξουμε ότι τέτοιες τυχόν ασύμβατες κλάσεις μπορούν κάλλιστα να υφίστανται μεμονωμένες σε μια οντολογία<sup>47</sup>, όσο δεν τους αποδίδονται άτομα είτε ρητά είτε ως λογικό συμπέρασμα. Μόλις προκύψει έστω και ένα τέτοιο στιγμιότυπο, αυτομάτως ολόκληρη η οντολογία καθίσταται μη ικανοποιήσιμη (ασύμβατη). Ο ταξινομητής προβαίνει επίσης σε περαιτέρω ταξινομήσεις των ατόμων σε κλάσεις (με την παραγωγή δηλ. καινούργιων ισχυρισμών), με βάση τα αξιώματα και τους ισχυρισμούς που ισχύουν μέχρι εκείνη τη στιγμή. Πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε φορά που η βάση συμπληρώνεται με ένα καινούργιο άτομο, αυτό ταξινομείται a priori μόνο (στην ή) στις κλάσεις στις οποίες αυτό έχει ρητά δηλωθεί (είναι πιθανό λ.χ. για την ώρα να ανήκει μόνο στην κλάση Thing). Μόλις τρέξει ο ταξινομητής, το άτομο θα καταταγεί επιπλέον σε όσες ακόμα κλάσεις προκύψει ότι εμπίπτει (ως λογικό συμπέρασμα των αξιωμάτων και των ισχυρισμών), ανάλογα με τις ιδιότητες και τους περιορισμούς στους οποίους μετέχει. Όπως αναφέρθηκε ήδη, εάν μια τέτοια a posteriori ταξινόμηση καταλήξει σε αντίφαση, ολόκληρη η οντολογία θα καταστεί αυτομάτως ασυνεπής. (Horridge, 2011)

---

<sup>46</sup> Ανάμεσα στα εξαρχής ενσωματωμένα plug-in προγράμματα συλλογιστικής που υποστηρίζει το Protégé αναφέρουμε το HermiT, το Pellet και το ELK.

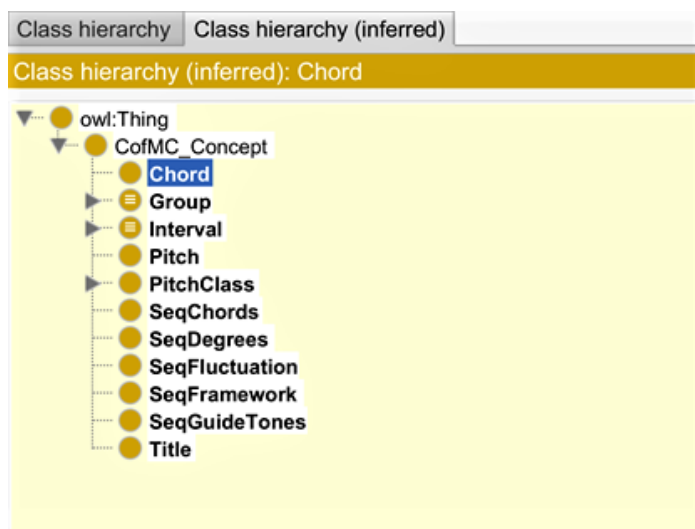
<sup>47</sup> και ταξινομούνται ως υποκλάσεις της ειδικής κλάσης Nothing (που αντιστοιχεί στο σύμβολο  $\perp$  των ΠΛ)

## 9 Η ΟΝΤΟΛΟΓΙΑ CoMC

### 9.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ CoMC

Η οντολογία CoMC (**C**raft **o**f **M**usical **C**omposition) προτείνει μια υλοποίηση της θεωρίας του ΣΜΣ στη μορφή οντολογικής γνώσης, μεταφέροντας με κάθε δυνατή λεπτομέρεια τους κανόνες και τους περιορισμούς που θέτει ο Χίντεμτ σε ένα σώμα οντολογικών αξιωμάτων.<sup>48</sup>

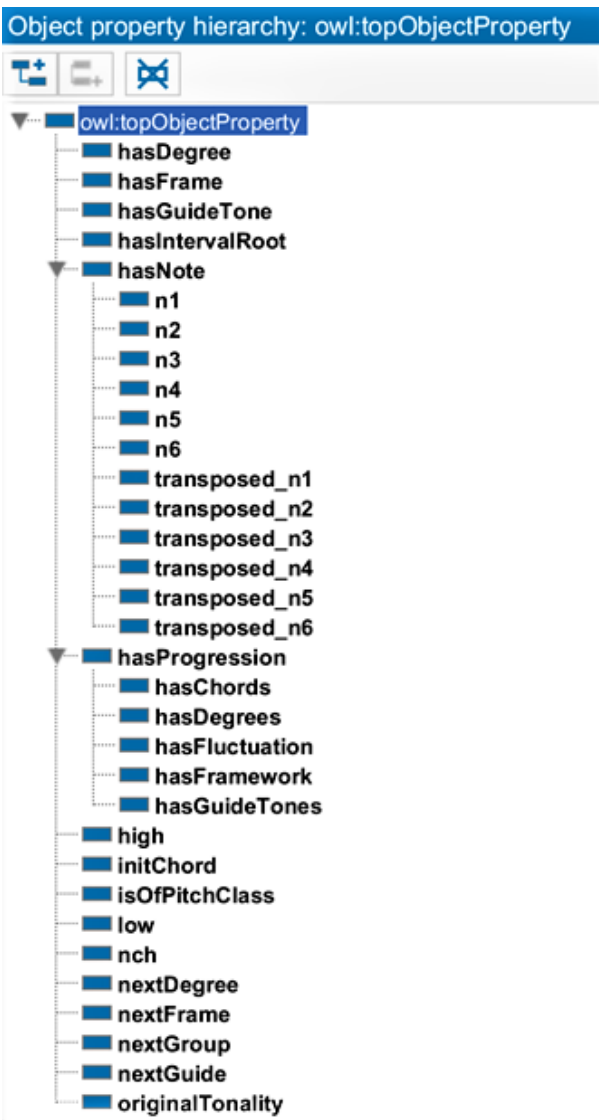
Ας ξεκινήσουμε με τις καρτέλες κλάσεων<sup>49</sup> (Εικόνα 11), ιδιοτήτων αντικειμένων (Εικόνα 12) και ιδιοτήτων δεδομένων (Εικόνα 13). Μπορεί εξάλλου να δει κανείς συγκεντρωτικά την ιεραρχία της οντολογίας στο Παράρτημα 13.3.



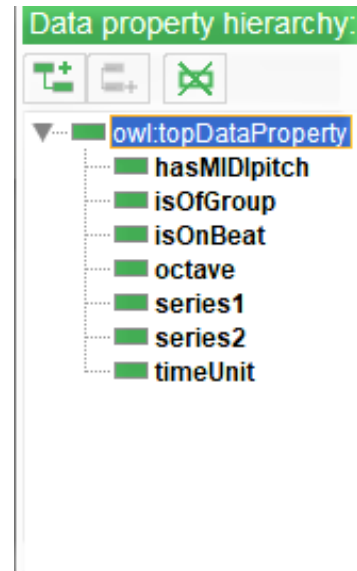
Εικόνα 11: CoMC, ιεραρχία κλάσεων

<sup>48</sup> Η οντολογία CoMC σχεδιάστηκε με τη βοήθεια της έκδοσης 5.5.0 του Protégé (<https://protege.stanford.edu>, [https://protegewiki.stanford.edu/wiki/Main\\_Page](https://protegewiki.stanford.edu/wiki/Main_Page)). Χρησιμοποιήθηκε επίσης το πακέτο Owlready2 (βλ. Κεφάλαιο 9.2) για την επεξεργασία οντολογιών στη γλώσσα Python. Ο κώδικας υλοποιήθηκε σε Python 3 και περιβάλλον Jupyter Notebook / Google Colab.

<sup>49</sup> Οι εικόνες που ακολουθούν έχουν ληφθεί αφού προηγουμένως έχει τρέξει ο ταξινομητής Hermit. Ό,τι εμφανίζεται με κίτρινη σκίαση αφορά σε πληροφορία που έχει προκύψει από την ταξινόμηση.



Εικόνα 12: CoMC, ιδιότητες αντικειμένων



Εικόνα 13: CoMC, ιδιότητες τύπου δεδομένων

Ακολουθούν οι βασικές κλάσεις της ιεραρχίας και μια σύντομη περιγραφή τους.

✓ **Pitch**: περιλαμβάνει τα τονικά ύψη που αντιστοιχούν περίπου στην έκταση του πιάνου, δηλαδή 7 πλήρεις οκτάβες, από το C1 / αριθμός MIDI 24 μέχρι το B7 / αριθμός MIDI 107<sup>50</sup>. Η συσχέτιση με τους αριθμούς MIDI γίνεται μέσω της ιδιότητας δεδομένων **hasMIDIpitch**.

✓ **PitchClass**: περιέχει 12 υποκλάσεις που αντιστοιχούν στις 12 τονικές κλάσεις της δυτικής μουσικής: Ντο, Ρεβ, Ρε, Μιβ, Μι, Φα, Σολβ, Σολ, Λαβ, Λα, Σιβ, Σι. Καθεμιά από αυτές περιέχει έναν

<sup>50</sup> Βλ. και Παράρτημα 13.3

αριθμό εναρμόνια ισοδύναμων φθόγγων: έτσι έχουμε για παράδειγμα  $C = \{c,bs,bh,dbb\}$ <sup>51</sup>,  $Gb = \{gb,fs,fh\}$ ,  $Db = \{db,ch,cs,bhh,bss\}$  κοκ. Ας σημειωθεί ότι οι 12 αυτές υποκλάσεις είναι εξ ορισμού ξένες μεταξύ τους. Η *Εικόνα 17* δείχνει την κλάση PitchClass με τις υποκλάσεις της.

✓ **Interval**: το διάστημα είναι βασική έννοια στην CoMC. Πρόκειται για μια defined κλάση που ορίζεται μέσω των δύο ιδιοτήτων αντικειμένου **high** και **low**, όπως βλέπουμε στην *Εικόνα 14*. Σημειώνεται ότι οι ιδιότητες αυτές είναι του τύπου some-restriction, επομένως κάθε άτομο που συνδέεται με μια low και μια high νότα είναι αυτομάτως τύπου Interval και θα ταξινομηθεί ως τέτοιο την επόμενη φορά που θα τρέξει ο reasoner.

✓ **Chord**: επίσης βασική έννοια στην CoMC. Ορίζεται ως μια οντότητα που διαθέτει (από μια) μέχρι έξι νότες, μέσω των ιδιοτήτων αντικειμένου **n1** (ενν. note1), **n2**, **n3**, **n4**, **n5**, **n6** (από τη χαμηλότερη προς την ψηλότερη φωνή αντίστοιχα)<sup>52</sup>. Η ιδιότητα δεδομένων **timeUnit** προσδίδει στη συγχορδία ένα φυσικό αριθμό που αντιπροσωπεύει τη χρονική θέση της στην ακολουθία (μονάδα μέτρησης είναι η βασική ρυθμική αξία του κομματιού, λ.χ. σε ένα κοράλ είναι το όγδοο του μέτρου). Η πλήρης περιγραφή της Chord φαίνεται στην *Εικόνα 15*.

✓ **Group**: η κλάση αυτή και οι υποκλάσεις της αντιστοιχούν στις Ομάδες και τις υπο-ομάδες του ΣΜΣ. Εκτός από το διαχωρισμό σε Ομάδες A και B και τις αντίστοιχες υπο-ομάδες, όπως περιγράψαμε στο *Κεφάλαιο 4.3*, προβλέπεται επίσης μια παράλληλη κατάταξη με κριτήριο της θέσης της θεμελίου: έχουμε την υποκλάση Group1 για τις συγχορδίες με τη θεμέλιο στο μπάσο, την υποκλάση Group 2 για τις συγχορδίες με τη θεμέλιο σε μια από τις επάνω φωνές και τέλος την υποκλάση Group0 για τις συγχορδίες όπου η θέση της θεμελίου είναι άγνωστη. Η ιεραρχία της κλάσης Group με όλες τις υποκλάσεις της φαίνεται στην *Εικόνα 16*.

✓ **Title**: είναι το αναγνωριστικό ενός μουσικού κομματιού. Πρόκειται στην ουσία για ένα δείκτη που δείχνει (μέσω της ιδιότητας αντικειμένου **initChord**) προς την πρώτη συγχορδία της ακολουθίας. Η ακολουθία έχει υλοποιηθεί ως μια συνδεδεμένη λίστα συγχορδιών και η κάθε συγχορδία συνδέεται με την επόμενη της μέσω της ιδιότητας αντικειμένου **nch** (ενν. next\_chord). Η τελευταία συγχορδία της ακολουθίας συνδέεται με την ειδικού τύπου συγχορδία chord\_nil<sup>53</sup>.

---

<sup>51</sup> Οι συντομογραφίες βασίζονται στο εξής σκεπτικό: το πρώτο γράμμα αντιστοιχεί στη νότα, τα δύο επόμενα στις αλλοιώσεις. Το b συμβολίζει τις υφέσεις (λόγω της ομοιότητας με το μουσικό σύμβολο της ύφεσης). Οι διέσεις συμβολίζονται με το s (από το sharp) και εναλλακτικά με το h (λόγω της σχετικής ομοιότητας με το σύμβολο της δίεσης #). Ο λόγος αυτού του διπλού συμβολισμού είναι ότι μια συντομογραφία όπως, για παράδειγμα, το As συμβολίζει το *Λα ύφεση* (και όχι *Λα δίεση*) στο γερμανικό σύστημα συντομογραφιών.

<sup>52</sup> Στην CoMC έχει καταρχήν γίνει πρόβλεψη για συγχορδίες που περιλαμβάνουν μέχρι το πολύ 6 διακριτά PitchClass.

<sup>53</sup> Το άτομο chord\_nil έχει οριστεί ως στιγμίοτυπο της κλάσης Chord

**Description: Interval**

Equivalent To

- CofMC\_Concept
  - and ((high some PitchClass)
  - and (low some PitchClass))

SubClass Of

General class axioms

SubClass Of (Anonymous Ancestor)

Instances

Target for Key

Disjoint With

Disjoint Union Of

Εικόνα 14: Ο ορισμός της κλάσης Interval

**Description: Chord**

Equivalent To

SubClass Of

- inverse (initChord) only Title
- CofMC\_Concept
- hasFrame some Interval
- hasNote max 6 PitchClass
- n1 some PitchClass
- n2 some PitchClass
- n3 some PitchClass
- n4 some PitchClass Asserted in: <http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2021/07/09>
- n5 some PitchClass
- n6 some PitchClass
- nch some (Chord or {{chord\_nil}})
- timeUnit some xsd:int

General class axioms

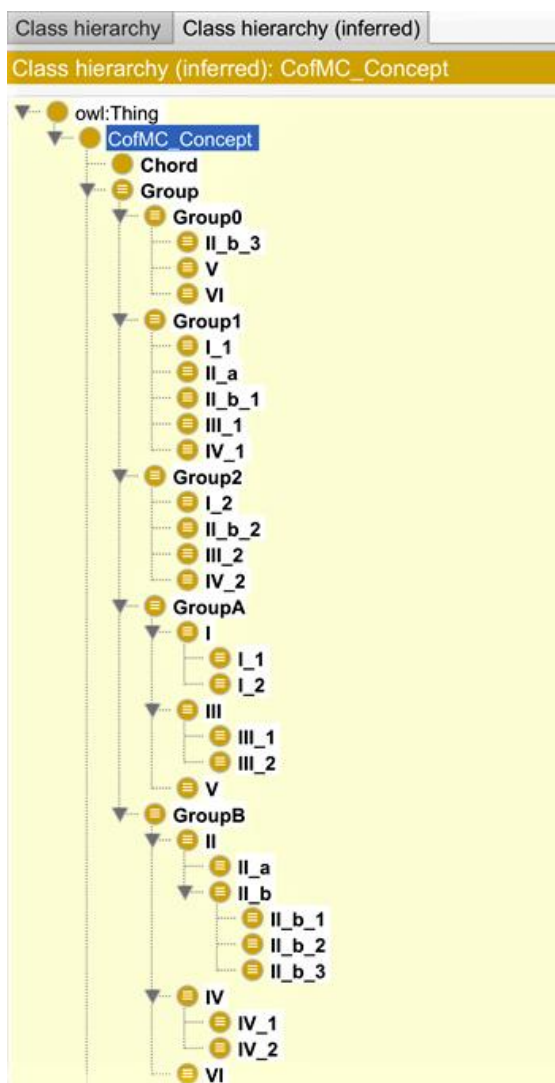
SubClass Of (Anonymous Ancestor)

Instances

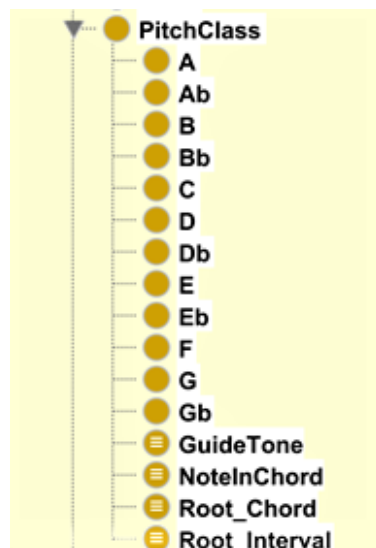
Target for Key

Εικόνα 15: Η περιγραφή της κλάσης Chord





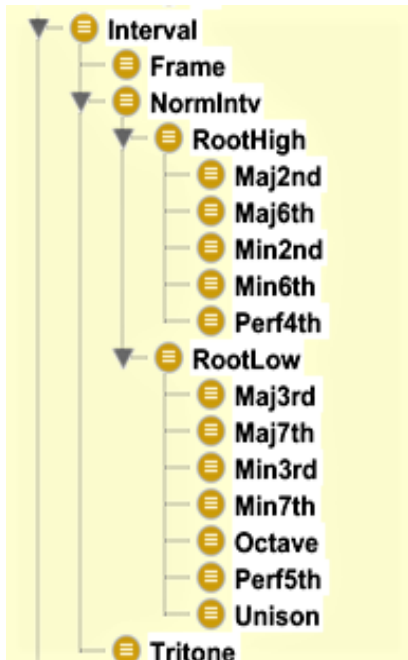
Εικόνα 16: Οι Ομάδες και υπο-ομάδες στην CoMC



Εικόνα 17: Οι υποκλάσεις της PitchClass

Στην Εικόνα 17 βλέπουμε την ιεραρχία της κλάσης PitchClass, με τις 12 υποκλάσεις της C, Db, D κοκ., όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Παρατηρούμε επίσης την υπαγωγή σε αυτήν των *defined* κλάσεων NoteInChord, Root\_Chord, Root\_Interval και GuideTone. Παρακάτω δίνουμε σύντομες περιγραφές των τεσσάρων αυτών υπο-κλάσεων της κλάσης PitchClass.

- ✓ **NoteInChord**: αναφέρεται σε μια νότα που ανήκει σε κάποια συγχορδία και έχει οριστεί ως *inverse(hasNote) some Chord*
- ✓ **Root\_Interval**: πρόκειται για τη θεμέλιο ενός διαστήματος και έχει οριστεί ως *inverse(hasIntervalRoot) some NormIntv*
- ✓ **Root\_Chord**: πρόκειται για τη θεμέλιο μιας συγχορδίας και ο ορισμός της είναι *inverse(hasDegree) some Chord*
- ✓ **GuideTone**: αναφέρεται στον προσαγωγέα μιας συγχορδίας, ο οποίος έχει οριστεί ως *inverse(hasGuideTone) some Chord*



Εικόνα 18: Η ιεραρχία της κλάσης Interval

Μπορεί κανείς να δει την ιεραρχία της κλάσης Interval με τις υποκλάσεις της στην *Εικόνα 18*. Όπως βλέπουμε, η ίδια η κλάση και όλες οι υποκλάσεις της είναι τύπου *defined*. Ένα διάστημα θα ανήκει είτε στην κλάση **Tritone** είτε στην κλάση **NormIntv** (που περιέχει όλα τα διαστήματα εκτός από τα τρίτονα). Η κλάση NormIntv είναι η ένωση δύο ξένων μεταξύ τους υποκλάσεων, της **RootHigh** και της **RootLow**, που διαχωρίζουν τα διαστήματα σε αυτά με τη θεμέλιό τους στην επάνω και στην κάτω φωνή αντίστοιχα. Η καθεμιά από αυτές τις δύο κλάσεις ορίζεται με τη σειρά της ως η ένωση των (ξένων μεταξύ τους) υποκλάσεων όπως δείχνει η *Εικόνα 18*: π.χ. η κλάση RootHigh είναι η *xor*-ένωση των διαστημάτων καθαρής 4<sup>ης</sup>, μεγάλης / μικρής 6<sup>ης</sup> και μεγάλης / μικρής 2<sup>ης</sup>.



Εικόνα 19: Η ιδιότητα δεδομένων series2

Ως παράδειγμα των παραπάνω, ας δούμε την περιγραφή των διαστημάτων μεγάλης 2<sup>ης</sup> στην *Εικόνα 20*. Τα διαστήματα αυτά συναποτελούν στην πραγματικότητα μια *defined* κλάση που είναι η ένωση όλων των δυνατών διαστημάτων με χαμηλή νότα Ντο και ψηλή Ρε, αυτών με χαμηλή νότα Ντο# και ψηλή Ρε#, αυτών με χαμηλή νότα Ρε και ψηλή Μι κοκ. μέχρι το ζευγάρι Σι – Ντο# (συνολικά δώδεκα τέτοια ζευγάρια τονικών κλάσεων).

Description: Maj2nd

Equivalent To +

- ((high some A) and (low some G)) or ((high some Ab) and (low some Gb)) or ((high some B) and (low some A)) or ((high some Bb) and (low some Ab)) or ((high some C) and (low some Bb)) or ((high some D) and (low some C)) or ((high some Db) and (low some B)) or ((high some E) and (low some D)) or ((high some Eb) and (low some Db)) or ((high some F) and (low some Eb)) or ((high some G) and (low some F)) or ((high some Gb) and (low some E))
- CofMC\_Concept and (series2 some {8})

SubClass Of +

- Maj2nd or Maj6th or Min2nd or Min6th or Perf4th
- RootHigh

General class axioms +

SubClass Of (Anonymous Ancestor)

- Maj2nd or Maj6th or Min2nd or Min6th or Perf4th

Instances +

Target for Key +

Disjoint With +

- Perf4th, Min6th, Maj6th, Min2nd

Εικόνα 20: Η περιγραφή της κλάσης Maj2nd

Με παρόμοιο τρόπο ορίζεται η κλάση που αφορά στα τρίτονα, όπως δείχνει η Εικόνα 21.

Σε αυτό το σημείο μπορούμε να δούμε πώς έχει υλοποιηθεί η Σειρά 2 στο Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης. Κάθε διάστημα αντιστοιχεί σε ένα φυσικό αριθμό από 1 έως 12: η οκτάβα (και η ταυτοφωνία) παίρνουν την τιμή 1 ενώ το τρίτονο παίρνει την τιμή 12. Τα διαστήματα, όπως εμφανίζονται στη Σειρά 2 (βλ. Εικόνα 1), συνδέονται με τις αντίστοιχες τιμές τους μέσω της ιδιότητας τύπου δεδομένων **series2**, η περιγραφή της οποίας φαίνεται στην Εικόνα 19. Έτσι π.χ., τα στιγμιότυπα της κλάσης Maj2nd απεικονίζονται, μέσω της series2, στην τιμή 8.

Τέλος, ως παράδειγμα περιγραφής μιας υπο-ομάδας του ΣΜΣ, μπορούμε να δούμε αυτήν που αφορά στην υπο-ομάδα IIb1 στην Εικόνα 22.

Description: Tritone

Equivalent To

- CofMC\_Concept
  - and (series2 some {12})
- ((high some A)
  - and (low some Eb) or ((high some Ab)
  - and (low some D) or ((high some B)
  - and (low some F) or ((high some Bb)
  - and (low some E) or ((high some C)
  - and (low some Gb) or ((high some D)
  - and (low some Ab) or ((high some Db)
  - and (low some G) or ((high some E)
  - and (low some Bb) or ((high some Eb)
  - and (low some A) or ((high some F)
  - and (low some B) or ((high some G)
  - and (low some Db) or ((high some Gb)
  - and (low some C)

SubClass Of

- NormIntv or Tritone
- Interval

General class axioms

SubClass Of (Anonymous Ancestor)

- CofMC\_Concept
  - and ((high some PitchClass)
  - and (low some PitchClass)

Instances

Target for Key

Disjoint With

- NormIntv

Εικόνα 21: Η περιγραφή της κλάσης Tritone

Από τα παραπάνω είναι φανερό ότι η οντολογία CoMC διαθέτει την εκφραστικότητα μιας περιγραφικής λογικής τύπου SHIQ<sup>54</sup> (βλ. Κεφάλαιο 7.2). Πράγματι, πέρα από την εκφραστικότητα μιας γλώσσας ALC έχουμε αξιώματα υπαγωγής ρόλων – π.χ. η ιδιότητα *n1* υπάγεται στην *hasNote*, αντιστροφές ρόλων – π.χ. η κλάση *Frame* υπάγεται στον περιορισμό *high some (inverse(hasNote) some Chord)*, καθώς και περιορισμούς πληθικότητας με εξειδίκευση – π.χ. η κλάση *Chord* υπάγεται στον περιορισμό *hasNote max 6 PitchClass*. Μια τέτοια οντολογία είναι αποφάνσιμη (decidable), αν και με δυνητικά πολύ υψηλή πολυπλοκότητα (επιπέδου EXPTIME).

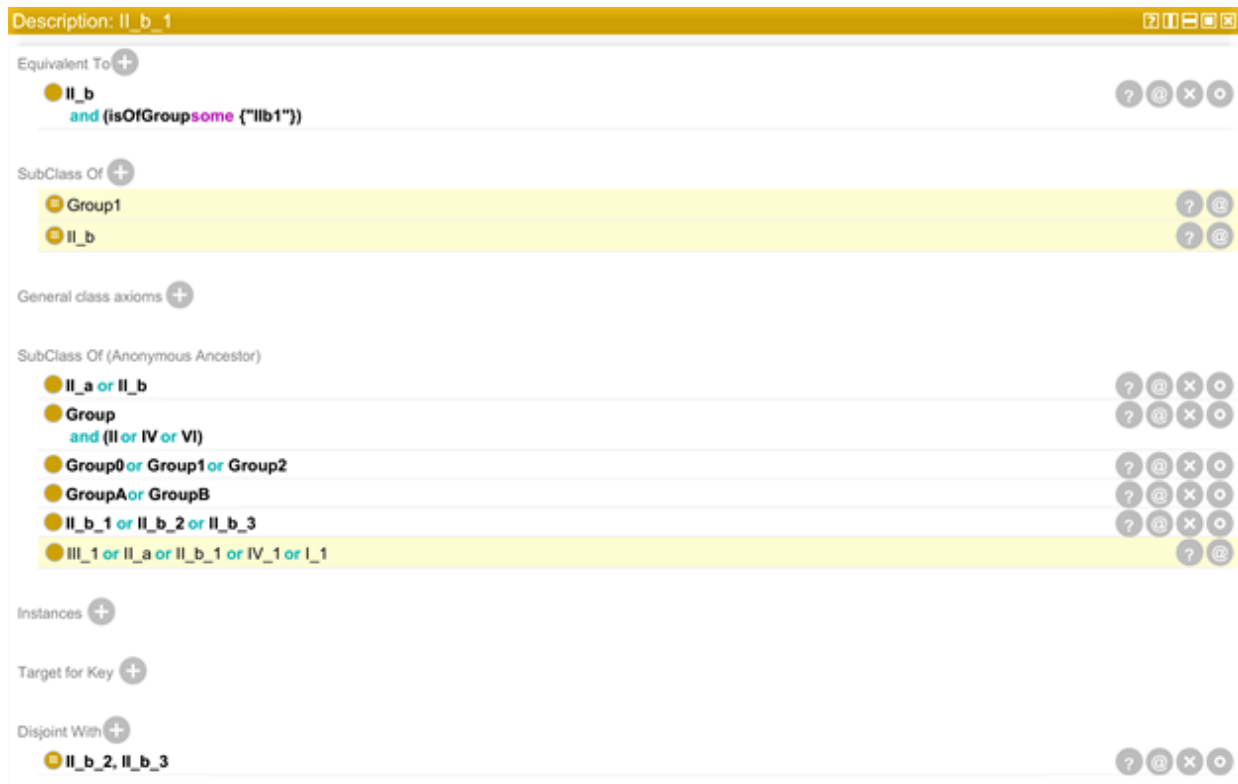
<sup>54</sup> Η γλώσσα αυτή είναι υποσύνολο της SROIQ και το αντίστοιχο προφίλ OWL είναι αυτό της OWL 2 DL (βλ. Πίνακα 2).

## 9.2 Το OWLREADY2 ΚΑΙ Η ΟΝΤΟΛΟΓΙΑ CoMC

Το Owlready2<sup>55</sup> είναι ένα πακέτο λογισμικού που αναπτύχθηκε από τον Jean-Baptiste Lamy του πανεπιστημίου της Σορβόνης Paris Nord και επιτρέπει την επεξεργασία σε γλώσσα Python οντολογιών σχεδιασμένων σε OWL 2.0. (Lamy, 2017) Μέσω του πακέτου αυτού μπορούμε να φορτώσουμε, να εμπλουτίσουμε, να τροποποιήσουμε ή να αποθηκεύσουμε οντολογίες, ταυτόχρονα δε υποστηρίζεται η επαγωγή συμπερασμάτων μέσω των προγραμμάτων συλλογιστικής Hermit (σαν default επιλογή) και Pellet. Πιο συγκεκριμένα, με το Owlready2, μπορούμε λ.χ.

- ✓ να δημιουργούμε νέες κλάσεις και ιδιότητες στην οντολογία – συνδυάζοντας κατασκευές της OWL με μεθόδους της Python
- ✓ να δημιουργούμε και να διαχειριζόμαστε περιορισμούς και λογικούς τελεστές
- ✓ να αποκτούμε πρόσβαση στις υπάρχουσες κλάσεις
- ✓ να δημιουργούμε καινούργια άτομα και να ταξινομούμε στιγμιότυπα και κλάσεις.

Η τροποποιημένη και εμπλουτισμένη οντολογία μπορεί τελικά να αποθηκευτεί εκ νέου σε ένα αρχείο OWL. (Lamy, 2020)



Εικόνα 22: Η περιγραφή της υπο-ομάδας IIb1

<sup>55</sup> <https://owlready2.readthedocs.io/en/v0.35/>

Μπορούμε επίσης να προσθέτουμε μεθόδους σε μια κλάση OWL: έτσι, για παράδειγμα<sup>56</sup>, στην κλάση Interval της CoMC ορίζουμε τη μέθοδο root(), που βρίσκει τη θεμέλιο του διαστήματος ανάλογα με τον τύπο του ή τη μέθοδο series\_2(), που αποδίδει σε κάθε διάστημα μια τιμή από 1 έως 12 ανάλογα με τη θέση στη Σειρά 2 του ΣΜΣ.

Ο κώδικας αναπτύσσεται σε γενικές γραμμές παρακολουθώντας βήμα-βήμα τους κανόνες που έχει θέσει ο Χίντεμιτ στο ΣΜΣ, όπως εκτίθενται στο *Κεφάλαιο 4*. Συγκεκριμένα

✓ Η συνάρτηση **dict\_()** βρίσκει τα χαρακτηριστικά μιας συγχορδίας (θεμέλιος, προσαγωγέας κτλ.) Καταρχάς, δημιουργεί από ένα καινούργιο αντικείμενο για καθένα ενδο-συγχορδιακό διάστημα, στη συνέχεια τρέχει τον Hermit ώστε να ταξινομήσει τα νέα άτομα κατά τον τύπο τους και τέλος υπολογίζει τη θεμέλιο, τον προσαγωγέα (αν υπάρχει τρίτονο) και την υπο-ομάδα στην οποία ανήκει η συγχορδία.

✓ Ο Πίνακας 9.1 παρουσιάζει τον ψευδοκώδικα για τη συνάρτηση **chord\_info()**, η οποία ενσωματώνει την dict\_() και δίνει ως έξοδο τα χαρακτηριστικά μιας συγχορδίας.

Ο Πίνακας 9.2 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της 4φωνης συγχορδίας με την οποία ξεκινάει η όπερα του Ρ. Βάγκνερ «Τριστάνος και Ιζόλδη» (βλ. και *Παράρτημα 13.5*). Πρόκειται για το εμβληματικό για τη δυτική μουσική «ακόρντο του Τριστάνου», Φα – Σι – Ρε# – Σολ#. Βλέπουμε ότι το ΣΜΣ και η CoMC κατατάσσουν τη συγχορδία στην υπο-ομάδα IIa και της αποδίδουν ως θεμέλιο την νότα 4, δηλαδή τη σοπράνο (Σολ#) και ως προσαγωγέα την νότα 1, δηλαδή το μπάσο (Φα).<sup>57</sup> Βλέπουμε επίσης τους τύπους των ενδο-συγχορδιακών διαστημάτων. Με την εντολή

➤ `derove_progression(hind.tristan)` (βλ. παρακάτω)

μπορούμε να αναλύσουμε ολόκληρη την πρώτη φράση του Τριστάνου που αποτελείται από τέσσερις συνολικά συγχορδίες, όπως δείχνει ο Πίνακας 9.3. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η CoMC έχει επισημάνει την αύξηση της αρμονικής έντασης (βλ. Πίνακας 9.3, στα σημεία με κίτρινο χρώμα) στην τρίτη συγχορδία Μι – Σολ# – Ρε – Λα#. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σύμπτωση στις δύο ερμηνείες (τονικής αρμονίας και ΣΜΣ) για την τέταρτη συγχορδία Μι – Σολ# – Ρε – Σι. Εδώ έχουμε μια δεσπίζουσα μεθ' εβδόμης στη Λα ελάσσονα κατά την τονική αρμονία, με θεμέλιο το Μι και προσαγωγέα το Σολ# (βλ. Πίνακας 9.3, στα σημεία με πράσινο χρώμα).

✓ Η συνάρτηση **derove\_progression()** προσπαθεί να ορίσει θεμέλιο και προσαγωγέα για τις συγχορδίες της υπο-ομάδας V και VI (που στον κώδικα αναφέρονται ως `roving`, βλ. υποσημείωση στο *Κεφάλαιο 3.5*). Οι συγχορδίες αυτές έχουν παραμείνει με τη θεμέλιο απροσδιόριστη, κι αυτό γιατί η θεμέλιος σε αυτές δεν ορίζεται από τα ενδο-συγχορδιακά διαστήματα της ίδιας της συγχορδίας παρά εξαρτάται από την επόμενη συγχορδία στην ακολουθία. Ο Πίνακας 9.4 δείχνει σε ψευδοκώδικα αυτή τη διαδικασία, που ακολουθεί την αντίστοιχη μέθοδο προσδιορισμού στο ΣΜΣ.

<sup>56</sup> Ο αναγνώστης παραπέμπεται επίσης στο Παράρτημα 13.8

<sup>57</sup> Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγχορδία αυτή είναι περιβόητη για τις διάφορες αντικρουόμενες αντιλήψεις γύρω από την «ορθή» τονική ερμηνεία της. Κατά μια τέτοια ερμηνεία, πρόκειται για μια τεχνητή δεσπίζουσα (V/V) πάνω στη II βαθμίδα της λα ελασσ. με *βαρυμένη 5<sup>η</sup>* και *βαρυμένη 7<sup>η</sup>* (το Σολ#, που έρχεται ως αποτζιατούρα στο Λα της επόμενης συγχορδίας). Κατά την ερμηνεία αυτή, (τονική) θεμέλιος είναι το Σι και (τονικός) προσαγωγέας το Ρε#

### def chord\_info()

Είσοδος: μια συγχορδία ch  
Έξοδος: η θεμέλιος, ο προσαγωγέας και η υπο-ομάδα της ch

- ❖ Κατασκεύασε όλα τα ενδο-συγχορδιακά διαστήματα και σχημάτισε τον πίνακα `intv_matrix`
- ❖ Τρέξε τον `reasoner` για να κατατάξεις τα καινούργια στιγμιότυπα στους τύπους τους (π.χ. `Maj2nd`, `Perf4th` κ.κ.) και σχημάτισε τον πίνακα `types_matrix`
- ❖ Βρες το καλύτερο ενδο-συγχορδιακό διάστημα (ως προς τη Σειρά 2) ανάμεσα στα στοιχεία του πίνακα `types_matrix`
- ❖ Με αναφορά στον πίνακα `types_matrix`, υπολόγισε (εάν και) πόσα τρίτονα περιέχει η συγχορδία ch
- ❖ Εξετάζοντας τους τύπους των ενδο-συγχορδιακών διαστημάτων, δες εάν η συγχορδία ch ανήκει στις υπο-ομάδες V ή VI. Αν ναι, κάνε τη θεμέλιο της συγχορδίας `undef`, αλλιώς πάρε τη θεμέλιο του καλύτερου ενδο-συγχορδιακού διαστήματος και κάνε την θεμέλιο της συγχορδίας ch
- ❖ Εάν η συγχορδία ch ανήκει στην Ομάδα A (δηλ. δεν υπάρχουν τρίτονα)
  - Με βάση τους τύπους των διαστημάτων στον πίνακα `types_matrix`, υπολόγισε την υπο-ομάδα της Ομάδας A στην οποία ανήκει η συγχορδία ch
- ❖ Αλλιώς (αν δηλαδή υπάρχουν τρίτονα)
  - Με βάση τους τύπους των διαστημάτων στον πίνακα `types_matrix`, υπολόγισε την υπο-ομάδα της Ομάδας B στην οποία ανήκει η συγχορδία ch
  - Ο φθόγγος κάποιου τριτόνου της συγχορδίας που σχηματίζει το καλύτερο διάστημα με τη θεμέλιο ορίζεται ως προσαγωγέας της συγχορδίας. Αν η θεμέλιος είναι απροσδιόριστη (δηλ. η συγχορδία έχει βρεθεί σε προηγούμενο βήμα ότι ανήκει στην υπο-ομάδα VI), κάνε (για την ώρα) τον προσαγωγέα επίσης ίσο με `undef`
- ❖ Συμπλήρωσε την οντολογία με τη θεμέλιο και τον προσαγωγέα της συγχορδίας ch

Πίνακας 9.1: Η συνάρτηση `chord_info()`, ψευδοκώδικας

```
{'grouping': 'IIa',  
'guide': [1, comc_bach.f],  
'intra-chord interval types': ('\n',  
{comc_bach.Interval,  
comc_bach.Maj3rd,  
comc_bach.Maj6th,  
comc_bach.Min3rd,  
comc_bach.Min7th,  
comc_bach.Perf4th,  
comc_bach.Tritone}),  
'root': [4, comc_bach.gs]}
```

Πίνακας 9.2: Η συγχορδία του Τριστάνου

```
{'degree progression': [[4, comc_bach.gs],
[1, comc_bach.f],
[1, comc_bach.e],
[1, comc_bach.e]],
'guide tone progression': [[1, comc_bach.f],
[4, comc_bach.a],
[2, comc_bach.gs],
[2, comc_bach.gs]],
'harmonic fluctuation': ['Ila', 'Ila', 'Ib3', 'Ila']}
```

Πίνακας 9.3: Η ακολουθία της πρώτης φράσης του Τριστάνου

### def derove\_progression()

Είσοδος: μια ακολουθία title

Έξοδος: τα χαρακτηριστικά (θεμέλιος, προσαγωγέας και υπο-ομάδα) κάθε συγχορδίας της ακολουθίας title

Για κάθε συγχορδία στην title

- ❖ Βρες όλα τα ενδο-συγχορδιακά διαστήματα
- ❖ Εάν η συγχορδία ανήκει στην Ομάδα A, κάνε τον προσαγωγέα και τη θεμέλιο της συγχορδίας να ταυτίζονται
- ❖ Εάν η συγχορδία ανήκει στις υπο-ομάδες V ή VI (δηλ. είναι απροσδιόριστη)
  - Εάν η επόμενη συγχορδία είναι επίσης απροσδιόριστη, μην κάνεις τίποτα
  - Σε αντίθετη περίπτωση, βρες τις αποστάσεις των φθόγγων της συγχορδίας από τη θεμέλιο και τον προσαγωγέα της επόμενης. Η θεμέλιος της συγχορδίας είναι εκείνη η νότα που σχηματίζει το καλύτερο διάστημα με τη θεμέλιο της επόμενης. Ο προσαγωγέας της συγχορδίας είναι εκείνη η νότα που βρίσκεται πλησιέστερα (με βάση τη Σειρά 1) στον προσαγωγέα της επόμενης.

Πίνακας 9.4: Η συνάρτηση derove\_progression(), ψευδοκώδικας

Ας θεωρήσουμε ως παράδειγμα μια πτώση (cadence) της μορφής I – IV<sup>6</sup> – VII<sup>7b</sup> – I στη ντο μείζ. Παρατηρούμε ότι, στην τρίτη συγχορδία, αντί για δεσπόζουσα έχουμε περάσει μια 7<sup>η</sup> βαθμίδα<sup>58</sup> με ελαττωμένη εβδόμη. Για αυτή τη συγχορδία της υπο-ομάδας VI δεν ορίζεται καταρχήν θεμέλιος και προσαγωγέας, είναι δηλ. περιπλανώμενη (βλ. Πίνακας 9.5). Τα χαρακτηριστικά αυτά συμπληρώνονται σε δεύτερη φάση μέσα στο πλαίσιο ολόκληρης της ακολουθίας με τον καθορισμό εκπροσώπων (βλ. Κεφάλαιο 4.2) της θεμελίου (Φα) και του προσαγωγέα (Σι) μέσω της εντολής

<sup>58</sup> Ο Σένμπεργκ, όπως και άλλοι θεωρητικοί, θα τη θεωρούσε εύλογα ως απλό μετασχηματισμό της δεσπόζουσας με ταυτόχρονη παράλειψη της θεμελίου.



➤ `derove_progression(hind.cadence)`,

Ο Πίνακας 9.6 δείχνει τα αποτελέσματα που παίρνουμε (βλ. τα σημεία με πράσινη σκίαση).

```
{'grouping': 'VI', 'guide_tone': None, 'root': None}
```

Πίνακας 9.5: Ελαττωμένη συγχορδία μεθ' εβδόμης (υπο-ομάδα VI)

```
{'degree progression': [[1, comc_bach.c],  
[2, comc_bach.f],  
[0, comc_bach.f],  
[1, comc_bach.c]],  
'guide tone progression': [[0, comc_bach.c],  
[0, comc_bach.f],  
[0, comc_bach.b],  
[0, comc_bach.c]],  
'harmonic fluctuation': ['I1', 'I2', 'VI', 'I1']}
```

Πίνακας 9.6: Η πτώση I - IV6 - VII7b - I στη ντο μείζ.

Ο κώδικας κάνει χρήση της βιβλιοθήκης `py_midicsv`<sup>59</sup> από το PyPI, έτσι ώστε να μετατρέπει τα midi αρχεία που λαμβάνει στην είσοδο σε μορφή csv. Ο Πίνακας 9.7 παρουσιάζει τις 20 πρώτες γραμμές από το κοράλ με αριθμό 138 του Γ. Σ. Μπαχ (ως αρχείο csv)<sup>60</sup>. Όπως βλέπουμε, η πληροφορία εμφανίζεται ως ένας πίνακας, του οποίου οι γραμμές είναι συμβολοσειρές. Στην πρώτη στήλη κάθε γραμμής δηλώνεται το track, στη δεύτερη ο χρόνος και στη συνέχεια η εντολή. Έτσι, παραδείγματος χάρη, στα σημεία με πράσινο χρώμα (βλ. Πίνακας 9.7) καταγράφονται οι νότες Σι (αριθμός MIDI 71) – Σι – Λα (αριθμός MIDI 69) κοκ.

Επανερχόμαστε τώρα στην περιγραφή των συναρτήσεων του κώδικα:

✓ Η συνάρτηση **quaver\_voice()** μετατρέπει την csv-μορφή του αρχείου MIDI στην είσοδο σε 4 λίστες με τις νότες των συνηχήσεων, από μια λίστα για κάθε φωνή του κοράλ.

<sup>59</sup> <https://pypi.org/project/py-midicsv/>

<sup>60</sup> Υπενθυμίζουμε ότι ένα αρχείο midi (midi file) περιέχει τις οδηγίες για την παραγωγή των ηχητικών σημάτων που συναπαρτίζουν ένα μουσικό κομμάτι, είναι δηλαδή στην πραγματικότητα μια ψηφιοποιημένη παρτιτούρα. Πρόκειται για ένα stream γεγονότων (events), το καθένα από τα οποία συνιστά ένα ζευγάρι <χρόνος, μήνυμα>. Ο χρόνος καταγράφει τη χρονική στιγμή από την αρχή του κομματιού. Το μήνυμα περιλαμβάνει μια εντολή π.χ. Note\_on\_c, Note\_off\_c κοκ. και διάφορες παραμέτρους, όπως τη νότα (εκφρασμένη σε MIDI number) που ξεκινάει ή σταματάει να ακούγεται τη συγκεκριμένη στιγμή και την ταχύτητα (velocity), δηλ. την ηχητική ένταση σε dB.

✓ Η συνάρτηση **chorale\_load\_ontology()** συνδυάζει τα δεδομένα από τις φωνές και κατασκευάζει τις συγχορδίες και την ακολουθία τους. Οι δύο τελευταίες συναρτήσεις λειτουργούν στην ουσία σαν ένας parser με είσοδο ένα χορικό σε μορφή Standard MIDI file και έξοδο την αντίστοιχη ακολουθία συγχορδιών. Οι συγχορδίες καταγράφονται με default χρονικό βήμα ίσο με 512, τιμή που αντιστοιχεί στο όγδοο του μουσικού μέτρου. Έτσι, το csv αρχείο (Πίνακας 9.7) μετατρέπεται στην ακολουθία συγχορδιών της CoMC (Πίνακας 9.8), με την εντολή της Python

➤ `chorale_load_ontology(chorale, chorale0138, starttime=0, endtime=6144, timestep=512)`

Ο Πίνακας 9.9 παρουσιάζει σε μορφή ψευδοκώδικα τη συνάρτηση `chorale_load_ontology()`, η οποία διαβάζει μία-μία τις συγχορδίες από την είσοδο και τις φορτώνει στην οντολογία.

✓ Η συνάρτηση **analyze\_progression()** ενημερώνει την οντολογία με τα χαρακτηριστικά (θεμέλιο, προσαγωγή, υπο-ομάδα, αρμονική ένταση) καθεμιάς συγχορδίας σε μια ακολουθία.

✓ Η συνάρτηση **plot\_data()** σχεδιάζει την αρμονική διακύμανση της ακολουθίας.

```
['0, 0, Header, 1, 6, 1024\n',  
'1, 0, Start_track\n',  
'1, 0, Time_signature, 4, 2, 24, 8\n',  
'1, 0, Key_signature, 1, "minor"\n',  
'1, 0, Tempo, 625000\n',  
'1, 77824, End_track\n',  
'2, 0, Start_track\n',  
'2, 0, Title_t, "Instrument 1"\n',  
'2, 0, Note_on_c, 0, 71, 96\n',  
'2, 1024, Note_off_c, 0, 71, 0\n',  
'2, 1024, Note_on_c, 0, 71, 96\n',  
'2, 2048, Note_off_c, 0, 71, 0\n',  
'2, 2048, Note_on_c, 0, 69, 96\n',  
'2, 3072, Note_off_c, 0, 69, 0\n',  
'2, 3072, Note_on_c, 0, 67, 96\n',  
'2, 4096, Note_off_c, 0, 67, 0\n',  
'2, 4096, Note_on_c, 0, 66, 96\n',  
'2, 6144, Note_off_c, 0, 66, 0\n',  
'2, 6144, Note_on_c, 0, 64, 96\n',  
'2, 8192, Note_off_c, 0, 64, 0\n']
```

Πίνακας 9.7: *Jesu, meine Freude #138, csv\_file, γραμμές 1-20*

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η αρμονική ανάλυση του χορικού που διαβάζεται στην είσοδο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι αρμονίες που σχηματίζονται σε ένα μουσικό κομμάτι (όπως π.χ. ένα χορικό) συνεπάγονται τη δημιουργία ολόενα και περισσότερων ενδο-συγχορδιακών διαστημάτων και συγχορδιών, αντικείμενα που ο κώδικας `O1wready2 / CoMC` ονοματίζει με ονόματα της μορφής `hind.intervalXXXX` και `hind.chordXXXX` (όπου `XXXX` ένα ξεχωριστό αριθμητικό για κάθε τέτοιο νέο

αντικείμενο). Στη συνέχεια, αυτά τα νέα αντικείμενα πρέπει αμέσως να ταξινομηθούν στις κλάσεις τους ώστε να χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς σε επόμενα στάδια του αλγορίθμου. Η επανειλημμένη εφαρμογή της αντίστοιχης εντολής *sync\_reasoner()*, παρά την όποια βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται με κατάλληλη ομαδοποίηση όσο το δυνατόν περισσότερων τέτοιων νέων αντικειμένων, οδηγεί σε υπερφόρτωση και καθυστερήσεις στην ολοκλήρωση της αρμονικής ανάλυσης, τόσο δε μεγαλύτερες όσο ο αριθμός των προς ταξινόμηση αντικειμένων μέσα στην οντολογία αυξάνεται. Για το λόγο αυτό χρειάζεται τα περιττά αντικείμενα να απορρίπτονται αμέσως μόλις αυτά δεν είναι πλέον αναγκαία για περαιτέρω επεξεργασία. Η λειτουργία αυτή του «καθαρισμού» της οντολογίας υλοποιείται με τις ειδικές συναρτήσεις *clear\_chord()* και *clear\_interval()* (βλ. τον κώδικα στο Παράρτημα 13.8)

```
#quaver / chord_name / chord.n1 / chord.n2 / chord.n3 / chord.n4 / chord.nch
1 comc_bach.chord18 comc_bach.e comc_bach.e comc_bach.g comc_bach.b comc_bach.chord19
2 comc_bach.chord19 comc_bach.gb comc_bach.e comc_bach.g comc_bach.b comc_bach.chord20
3 comc_bach.chord20 comc_bach.g comc_bach.d comc_bach.g comc_bach.b comc_bach.chord21
4 comc_bach.chord21 comc_bach.g comc_bach.d comc_bach.gb comc_bach.b comc_bach.chord22
5 comc_bach.chord22 comc_bach.c comc_bach.c comc_bach.e comc_bach.a comc_bach.chord23
6 comc_bach.chord23 comc_bach.d comc_bach.c comc_bach.e comc_bach.a comc_bach.chord24
7 comc_bach.chord24 comc_bach.e comc_bach.b comc_bach.e comc_bach.g comc_bach.chord25
8 comc_bach.chord25 comc_bach.e comc_bach.b comc_bach.e comc_bach.g comc_bach.chord26
9 comc_bach.chord26 comc_bach.a comc_bach.c comc_bach.e comc_bach.gb comc_bach.chord27
10 comc_bach.chord27 comc_bach.a comc_bach.c comc_bach.e comc_bach.gb comc_bach.chord28
11 comc_bach.chord28 comc_bach.b comc_bach.b comc_bach.eb comc_bach.gb comc_bach.chord29
12 comc_bach.chord29 comc_bach.b comc_bach.a comc_bach.eb comc_bach.gb comc_bach.chord30
13 comc_bach.chord30 comc_bach.e comc_bach.g comc_bach.b comc_bach.e None
```

Πίνακας 9.8: *Jesu, meine Freude #138*, η πρώτη φράση στην *CoMC*

#### **def chorale\_load\_ontology()**

Είσοδος: οι 4 φωνές του κοράλ όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των αρχείων MIDI & csv, το χρονικό σημείο εκκίνησης για το απόσπασμα που μας ενδιαφέρει, το σημείο τερματισμού και το χρονικό βήμα (timestep, default τιμή = 512)  
Έξοδος: [return None]

Για κάθε χρονικό σημείο καταγραφής από το σημείο εκκίνησης ως το σημείο τερματισμού με βήμα timestep

- ❖ Δημιούργησε ένα καινούργιο άτομο τύπου Chord
- ❖ Δημιούργησε 4 ακολουθίες φθόγγων, από μια για κάθε φωνή
- ❖ Δώσε την τιμή False / True στην ιδιότητα δεδομένων isOnBeat για την νέα συγχορδία, ανάλογα αν το timeUnit αυτής είναι περιττός ή άρτιος αριθμός αντίστοιχα
- ❖ Πρόσθεσε στις ακολουθίες των 4 φωνών τις αντίστοιχες νότες από την είσοδο και ενημέρωσε τη νέα συγχορδία

Πίνακας 9.9: Η συνάρτηση *chorale\_load\_ontology()*, ψευδοκώδικας



## 10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ CoMC – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

Δεν είναι δύσκολο να διακρίνει κανείς ομοιότητες ανάμεσα στη συστηματική σκέψη του Χίντεμτ, όπως αυτή περιγράφεται στο *Κεφάλαιο 4*, και στο σκεπτικό πίσω από τα αυτοματοποιημένα συστήματα αναπαράστασης γνώσης. Άλλωστε, η ίδια η κατάταξη των συγχορδιών σε υπο-ομάδες παραπέμπει άμεσα στην έννοια της ιεραρχίας σε μια οντολογία. Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η οντολογία CoMC χρησιμοποιεί το ΣΜΣ για να πραγματοποιήσει μια – εναλλακτική προς την τονική – **αρμονική ανάλυση** ενός μουσικού κομματιού και να καταλήξει στη συνέχεια σε συμπεράσματα για τις συγχορδίες και την αρμονική διακύμανσή τους.

Για την εφαρμογή της οντολογίας, επιλέχθηκαν τα χορικά του Μπαχ και κάποιων ακόμη συγχρόνων του συνθετών. Η επιλογή αυτή στηρίζεται σε κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των εναρμονισμένων χορικών, ανάμεσα στα οποία μπορούμε να αναφέρουμε τα παρακάτω:

- Τα κοράλ θεωρούνται γενικά υποδείγματα της «καθαρής» τονικής αρμονίας.
- Η τετράφωνη, κάθετη χορωδιακή γραφή καθορίζει τις αρμονίες με μονοσήμαντο τρόπο
- Για αρκετά κοράλ, έχουμε στη διάθεσή μας περισσότερες της μιας διαφορετικές εναρμονίσεις και επομένως έχουμε τη δυνατότητα συγκριτικής μελέτης
- Το corpus των εναρμονισμένων για 4φωνη χορωδία κοράλ, του Γ. Σ. Μπαχ και μόνο, είναι τόσο μεγάλο που επιτρέπει την εξαγωγή στατιστικά σημαντικών αποτελεσμάτων.

### 10.1 Το χορικό *Jesu, meine Freude* – ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Θα εκτελέσουμε αρχικά αρμονική ανάλυση πάνω σε διάφορες εναλλακτικές εναρμονίσεις του ίδιου κοράλ, δίνοντας φυσικά βάρος σε αυτές του Γ. Σ. Μπαχ (1685 – 1750). Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκε ο ύμνος *Jesu, meine Freude*, που ο ίδιος ο Μπαχ έχει εναρμονίσει σε έξι διαφορετικές 4φωνες εκδοχές – πρόκειται για τα κοράλ με αριθμό 96, 138, 263, 283, 324 και 356 στην έκδοση *Breitkopf, 371 vierstimmige Chorale* (Bach, 1787). Παράλληλα με αυτές τις 6 εκδοχές, εξετάζουμε κάποιες εναρμονίσεις του ίδιου κοράλ από τρεις ακόμα συνθέτες της ίδιας εποχής: του Friedrich Wilhelm Zachow (1663 – 1712), του Wilhelm Friedemann Bach (πρόκειται για το μεγαλύτερο γιο του Γ. Σ. Μπαχ, 1712 – 1784), και του Johann Christian Kittel (που υπήρξε ένας από τους τελευταίους μαθητές του Μπαχ, 1732 – 1809).

Το χορικό *Jesu, meine Freude* αποτελείται από 6 φράσεις, η καθεμιά από τις οποίες καταλήγει σε κορώννα (Orgelpunkt, fermata). Οι τρεις πρώτες φράσεις επαναλαμβάνονται αυτούσιες και με την ίδια εναρμόνιση αν και με διαφορετικά λόγια, όπως συμβαίνει σε πολλά κοράλ αυτού του είδους, και στη

συνέχεια ακολουθούν οι τρεις τελευταίες. Επιλέχθηκαν ενδεικτικά για αρμονική ανάλυση τρεις φράσεις: η πρώτη, η τέταρτη (αυτή δηλαδή αμέσως μετά το σημείο της επανάληψης) και η τελευταία.

Αρχικά καταγράφηκε η αρμονική διακύμανση στις διάφορες εκδοχές. Λήφθηκε υπόψη καταρχήν ο *βασικός αρμονικός σκελετός*, όπως είναι η συνήθης πρακτική κατά την αρμονική ανάλυση ενός μουσικού αποσπάσματος, παραλείποντας την ίδια στιγμή σε μεγάλο βαθμό τις περαστικές συνηχήσεις που προκύπτουν κατά τις αντιστικτικές κινήσεις των φωνών.<sup>61</sup>

Καταρχάς, εξετάζουμε την 1<sup>η</sup> φράση του χορικού στις διάφορες εκδοχές (βλ. *Εικόνα 23*, *Εικόνα 24* και *Εικόνα 25*). Στον οριζόντιο άξονα καταγράφεται ο *χρόνος*<sup>62</sup> (με χρονική μονάδα το όγδοο, που αντιστοιχεί στο timeUnit της συγχορδίας στην οντολογία CoMC). Στον κατακόρυφο άξονα καταγράφεται η *αρμονική ένταση*, ανάλογα με την υπο-ομάδα στην οποία ταξινομείται η κάθε συγχορδία.

Μπορούμε ήδη στο σημείο αυτό να κάνουμε μερικές γενικές παρατηρήσεις:

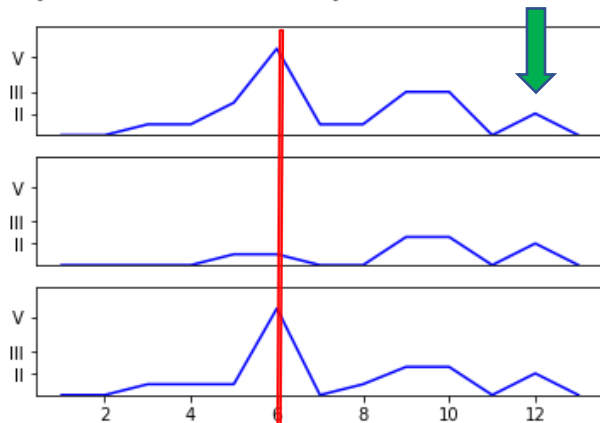
- απότομες κορυφές διάρκειας ενός μουσικού ογδού αντιστοιχούν σε περαστικές εντάσεις που προέρχονται κατά κανόνα από διαβατικούς φθόγγους. Χαρακτηριστική είναι η χαμηλή κορυφή που απαντά συχνά πριν το τέλος μιας φράσης και αντιστοιχεί στη δεσπόμενη συγχορδία μεθ' εβδόμης (τύπου IIa στο ΣΜΣ) ανάμεσα σε δύο συγχορδίες τύπου I, την απλή τρίφωνη δεσπόμενη και την τονική (βλ. πράσινο βέλος στην *Εικόνα 23*: Jesu, meine Freude, 1η φράση / 1)
- πλατύτερες κορυφές (οροπέδια), ιδίως όταν ξεκινούν από ισχυρό μέρος του μέτρου, αντιστοιχούν σε αρμονικές εντάσεις που δεν εκτονώνονται αμέσως παρά διατηρούνται και στο επόμενο όγδοο (ασθενές). Εδώ κατά κανόνα δεν έχουμε να κάνουμε με διαβατικές αρμονίες.
- μεσαίου ύψους κορυφές αντιστοιχούν σε συγχορδίες τύπου III και IV. Κατά κανόνα αυτές οι συνηχήσεις δεν υφίστανται ως αυθύπαρκτες συγχορδίες μέσα στο πλαίσιο της τονικής αρμονίας (βλ. *Κεφάλαιο 4.3*) και επομένως πρόκειται για συγχορδίες με ξένους φθόγγους.
- μεγάλου ύψους κορυφές αντιστοιχούν σε συγχορδίες τύπου V και VI. Στην εποχή του Μπαχ, οι αρμονίες αυτές, κυρίως οι δεύτερες, χρησιμοποιούνται συχνά σε σημεία μέγιστης αρμονικής έντασης η οποία εκτονώνεται βαθμηδόν στη συνέχεια, κατά κανόνα με διαδοχικά κύματα μειούμενης έντασης όπως στα χρονικά σημεία 9 και 12 (βλ. την *Εικόνα 23* και εξής, στο χρονικό σημείο που δείχνει η κόκκινη γραμμή)

---

<sup>61</sup> Σε αντιδιαστολή με τις διαβατικές συνηχήσεις, λήφθηκαν υπόψη ως ένα βαθμό οι συγχορδίες που προκύπτουν από καθυστερήσεις, καθώς αυτές αποτελούν αρμονικά φαινόμενα. Πραγματικά, κατά μία έννοια, αυτή καθαυτή η καθυστέρηση εισάγεται ουσιαστικά ακριβώς για τη δημιουργία τεχνητής *αρμονικής έντασης*, ενώ οι διαβατικοί και ποικιλιατικοί φθόγγοι χρησιμοποιούνται περισσότερο για *αντιστικτικούς σκοπούς*. (βλ. και *Κεφάλαιο 3.5*)

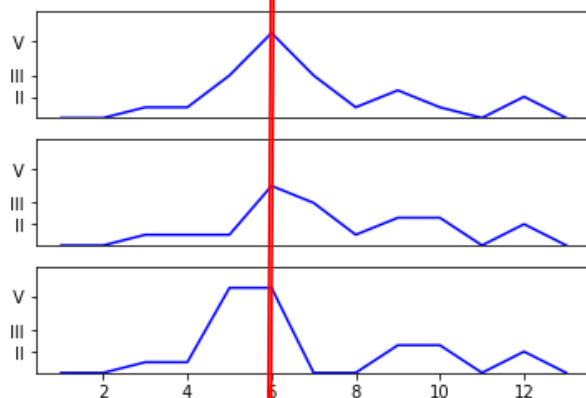
<sup>62</sup> Στην έκδοση Breitkopf, οι μελωδίες στην επάνω φωνή είναι γραμμένες σε μέτρο 3/4 ή 4/4 και το «αρμονικό βήμα» του Μπαχ είναι κατά βάση το όγδοο. Οι εναρμονίσεις των άλλων συνθετών έχουν, όπου χρειάζεται, προσαρμοστεί σε αυτό το σχήμα.

Jesu, meine Freude - Line 1 / J.S.Bach nos 96,138,263



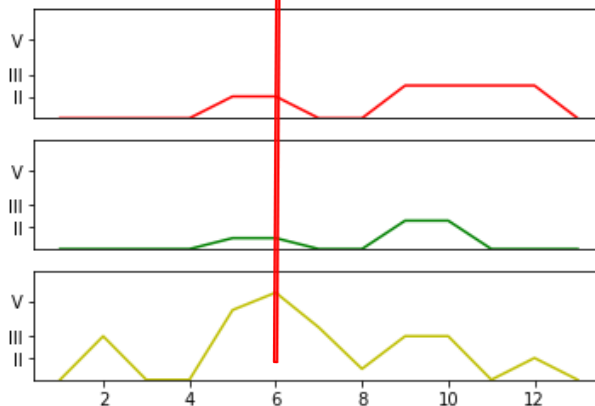
Εικόνα 23: Jesu, meine Freude, 1<sup>η</sup> φράση / 1

Jesu, meine Freude - Line 1 / J.S.Bach no 283,324,356



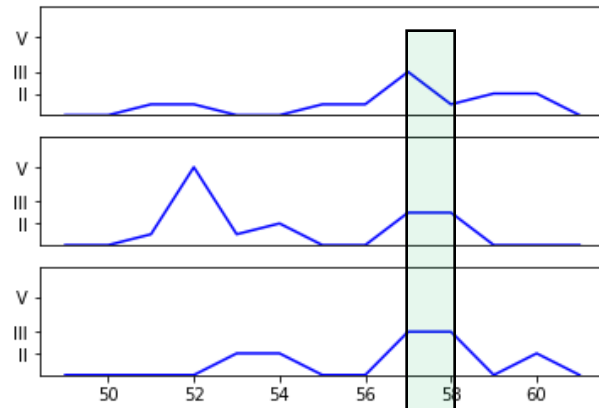
Εικόνα 24: Jesu, meine Freude, 1<sup>η</sup> φράση / 2

Jesu, meine Freude - Line 1 / J. Friedemann, Zachow & Kittel



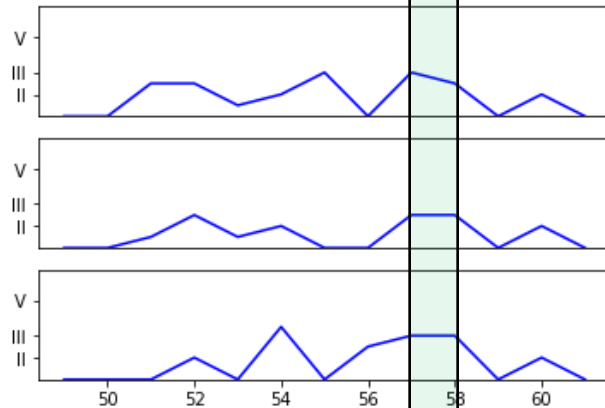
Εικόνα 25: Jesu, meine Freude, 1<sup>η</sup> φράση / 3

Jesu, meine Freude - Line 4 / J.S.Bach nos 96,138,263



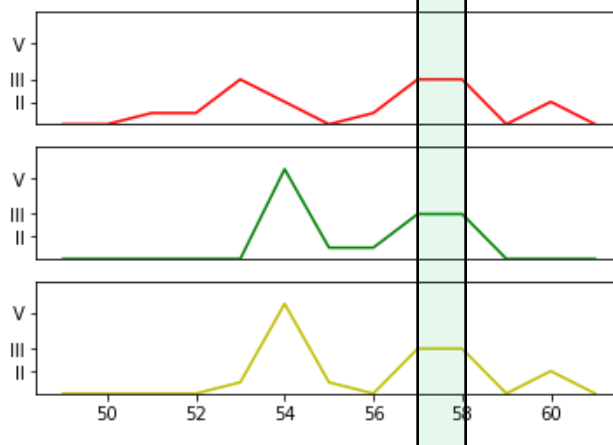
Εικόνα 26: Jesu, meine Freude, 4<sup>η</sup> φράση / 1

Jesu, meine Freude - Line 4 / J.S.Bach no 283,324,356



Εικόνα 27: Jesu, meine Freude, 4<sup>η</sup> φράση / 2

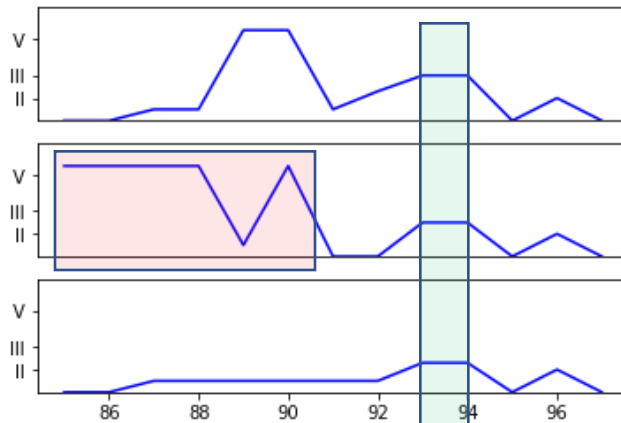
Jesu, meine Freude - Line 4 / J. Friedemann, Zachow & Kittel



Εικόνα 28: Jesu, meine Freude, 4<sup>η</sup> φράση / 3

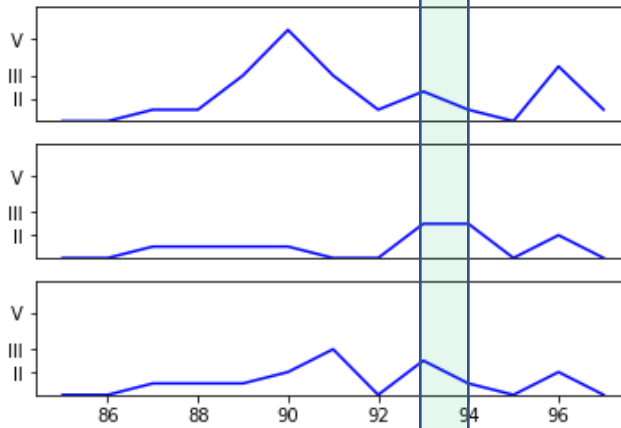


Jesu, meine Freude - Line 6 / J.S.Bach nos 96,138,263



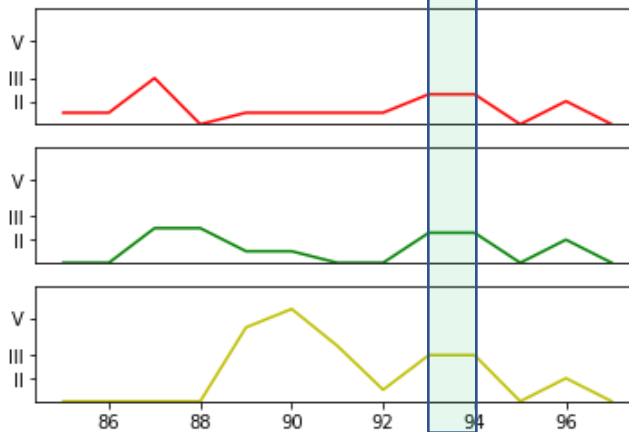
Εικόνα 29: Jesu, meine Freude, 6<sup>η</sup> φράση / 1

Jesu, meine Freude - Line 6 / J.S.Bach no 283,324,356



Εικόνα 30: Jesu, meine Freude, 6<sup>η</sup> φράση / 2

Jesu, meine Freude - Line 6 / J. Friedemann, Zachow & Kittel



Εικόνα 31: Jesu, meine Freude, 6<sup>η</sup> φράση / 3

Η αρμονική διακύμανση για τις επόμενες φράσεις παρουσιάζεται ως εξής:

- ✓ για την 4<sup>η</sup> φράση (*Εικόνα 26, Εικόνα 27 και Εικόνα 28*)
- ✓ για την 6<sup>η</sup> φράση (*Εικόνα 29, Εικόνα 30 και Εικόνα 31*)

Όπως φαίνεται στα διαγράμματα, μπορούμε να κάνουμε αρμονική ανάλυση και να σχεδιάσουμε την αρμονική διακύμανση για κάθε εναρμόνιση ξεχωριστά, αναδεικνύοντας έτσι με εποπτικό τρόπο τις διαφορές ανάμεσα στις διαφορετικές εναρμονίσεις. Για παράδειγμα, στην 1<sup>η</sup> φράση του κοράλ, παρατηρούμε ότι ο Μπαχ φαίνεται να δημιουργεί μεγάλη ένταση με μια ελαττωμένη συγχορδία σχετικά νωρίς και, κατά κανόνα, στο ίδιο σημείο (στο 6<sup>ο</sup> όγδοο, βλ. κόκκινη κατακόρυφη γραμμή).

Στην 4<sup>η</sup> φράση του κοράλ, όλες σχεδόν οι εναρμονίσεις συμφωνούν κατευθύνοντας τη φράση προς την πέμπτη νότα της μελωδίας (σημεία 57 και 58, στο πλαίσιο με πράσινο χρώμα) με μια συγχορδία μεθ' εβδόμης (τύπου IIb στο ΣΜΣ) που κρατάει ολόκληρο το τέταρτο του μέτρου.

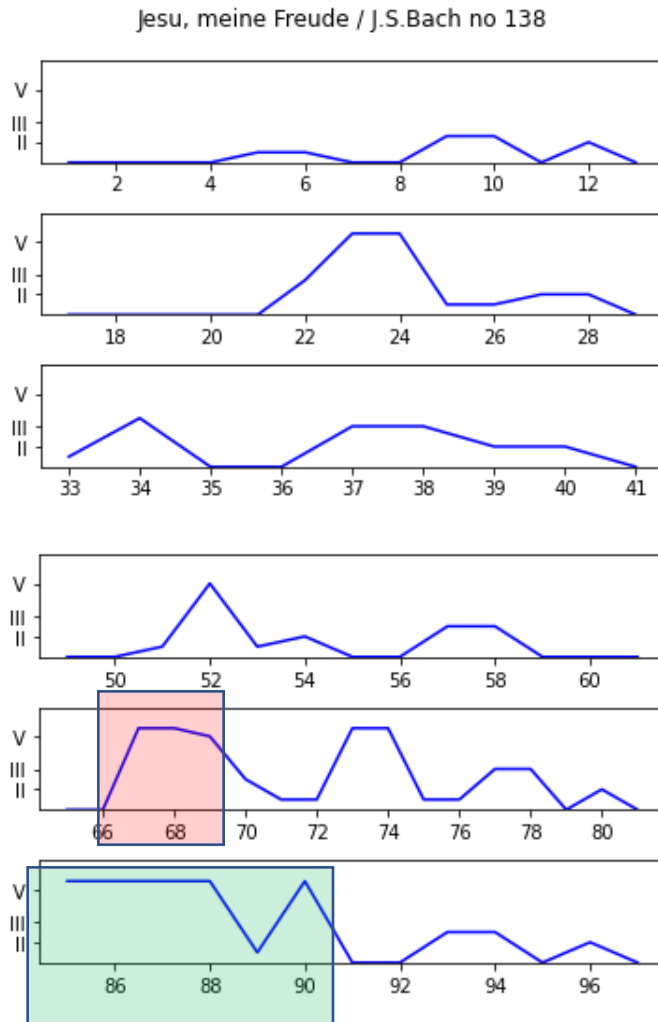
Στην 6<sup>η</sup> και τελευταία φράση του κοράλ, αξίζει να προσεχτεί ιδιαίτερα η εναρμόνιση #138: ο Μπαχ φέρνει τη μέγιστη ένταση με την πρώτη κιάλας νότα της φράσης (στο πλαίσιο με κόκκινο χρώμα στην *Εικόνα 29*) με διαδοχικές συγχορδίες τύπου VI (ελαττωμένες). Παρατηρούμε επίσης και πάλι ότι οι εναρμονίσεις συμφωνούν λίγο πριν το τέλος του χορικού (βλ. πλαίσιο με πράσινο χρώμα): έχουμε σχεδόν πάντα μια συγχορδία τύπου II, μέτριας έντασης σε ολόκληρο το τέταρτο πριν τη λύση στην τονική.

Στην *Εικόνα 32* έχουμε ολόκληρο το χορικό *Jesu, meine Freude* σε μια εναρμόνιση του Γ. Σ. Μπαχ, αυτή με αριθμό 138. Μελετώντας την αρμονική διακύμανση και την εξέλιξή της σε όλη την έκταση του κοράλ, παρατηρούμε κάποια ακόμη σημεία:

✓ Ο Μπαχ φροντίζει να χρησιμοποιεί τακτικά ελαττωμένες συγχορδίες (υπο-ομάδα VI) σε διάφορα σημεία. Στην αρχή της τελευταίας φράσης μάλιστα παραθέτει πολλές τέτοιες συγχορδίες στη σειρά, όπως έχουμε ήδη επισημάνει. Είναι φανερό ότι στο σημείο αυτό έχουμε την αρμονική κορύφωση του χορικού – ακολουθεί στη συνέχεια η προοδευτική εκτόνωση στα τελευταία τέταρτα.

✓ Στην 5<sup>η</sup> φράση (βλ. *Εικόνα 32*, στο κόκκινο πλαίσιο), ο Μπαχ χρησιμοποιεί μια αυξημένη τρίφωνη συγχορδία (υπο-ομάδα V, όχι πολύ συνηθισμένη στην αρμονική γλώσσα του συνθέτη), αμέσως μετά από μια ελαττωμένη συγχορδία. Η παράθεση δύο απροσδιόριστων συνηρήσεων τύπου VI και V αφήνει, κατά το ΣΜΣ, την πρώτη από αυτές (δηλ. την ελαττωμένη) χωρίς θεμέλιο και επομένως επιτείνει το αίσθημα αστάθειας στην αρμονία.

✓ Εξετάζοντας συνολικά την *Εικόνα 32*, είναι φανερό η ολοένα εντονότερη αρμονική διακύμανση, από τους χαμηλούς λόφους και την ομαλή γραμμή της πρώτης φράσης ίσαμε τις κορυφές και τις απότομες μεταπτώσεις των δύο τελευταίων. Στο σημείο αυτό, το διάγραμμα της αρμονικής διακύμανσής μας επιτρέπει να διακρίνουμε καθαρά και με εποπτικό τρόπο την προοδευτική και ελεγχόμενη αύξηση της αρμονικής έντασης, βασικό εργαλείο της τεχνικής του Γ. Σ. Μπαχ.



Εικόνα 32: *Jesu, meine Freude*, (Μπαχ #138) – Αρμονική διακύμανση

Στο Παράρτημα 13.5 παρατίθεται ολόκληρο το μουσικό κείμενο της εναρμόνισης του χορικού αρ. 138 *Jesu, meine Freude* μαζί με το διάγραμμα της αρμονικής διακύμανσης.

## 10.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΕΥΡΗΜΑΤΑ ΠΑΝΩ ΣΤΑ ΧΟΡΙΚΑ ΤΟΥ Γ. Σ. ΜΠΑΧ

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ο ερευνητής που κάνει μια αρμονική ανάλυση καλείται να επιλέξει, με βάση τη γνώση και την εμπειρία του, τις συνηγήσεις εκείνες που ο ίδιος θεωρεί σημαντικές, αφήνοντας κατά μέρος τις υπόλοιπες, αυτές δηλαδή που σχηματίζονται κατά την αντιστικτική κίνηση των φωνών από διαβατικά, καθυστερήσεις, αλλοιώσεις κ.ά. Ας διαχωρίσουμε από δω και μπρος τις συνηγήσεις αυτές

και ας ονομάσουμε *λειτουργικές συγχορδίες* τις πρώτες και *συμπληρωματικές* τις δεύτερες. Η πρακτική που περιγράψαμε πιο πάνω αφήνει εκ των πραγμάτων εκτός ανάλυσης ένα σημαντικό μέρος του υλικού, ακριβώς αυτές τις συμπληρωματικές συγχορδίες, μολονότι δεν υπάρχει αμφιβολία ότι και αυτές αποτελούν αρμονικά φαινόμενα και συνδιαμορφώνουν την αρμονική ακολουθία μαζί με τις υπόλοιπες. Η παραδοσιακή αρμονική θεωρία, όπως έχουμε δει παραπάνω, δεν μπορεί να καταγράψει και να αναλύσει τις συμπληρωματικές συγχορδίες ως ξεχωριστές οντότητες. Στο πλαίσιο της τονικής αρμονίας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν κάποιες εργασίες που παραθέτουν μεγάλο αριθμό παραδειγμάτων πάνω στο χειρισμό των ξένων φθόγγων από τον ίδιο το Μπαχ και επιδιώκουν έτσι να αναδείξουν κάποια συνηθισμένα μοτίβα – όπως στα (Kœchlin, 1922) και (Kœchlin, 1929). Τα παραδείγματα αυτά όμως δεν αρκούν για να περιγράψουμε απόλυτα το μηχανισμό ούτε μπορούν να χρησιμεύσουν στην προσομοίωση της εναρμόνισης με μηχανικά μέσα.

Το ΣΜΣ, από την άλλη μεριά, δεν κάνει αποκλεισμούς – πραγματικά, η οντολογία CoMC μπορεί να βρει τα χαρακτηριστικά οποιασδήποτε συνήχησης της ζητηθεί μέσα σε μια αρμονική ακολουθία. Εδώ μπορούμε να παρατηρήσουμε και πάλι ότι οι 3φωνες και 4φωνες συγχορδίες της τονικής αρμονίας αποτελούν (με μερικές εξαιρέσεις<sup>63</sup>) υποσύνολο των υπο-ομάδων I, II, V, VI και μόνο. Διαθέτουμε λοιπόν μέσω του ΣΜΣ ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση των συμπληρωματικών συγχορδιών, καθώς αυτές ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τις συγχορδίες των υπο-ομάδων III και IV.

Ο αρμονικός ρυθμός στα κοράλ του Μπαχ είναι κατά βάση το τέταρτο του μέτρου.<sup>64</sup> Μπορούμε επομένως να διακρίνουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις για τα δύο συνεχόμενα όγδοα (ισχυρό και ασθενές) που συναπαρτίζουν ένα τέταρτο:

- ✓ Και στα δύο όγδοα έχουμε την ίδια ή δύο διαφορετικές λειτουργικές συγχορδίες
- ✓ Στο πρώτο όγδοο έχουμε λειτουργική συγχορδία και στο δεύτερο συμπληρωματική. Η τελευταία θα εμφανίζεται πάνω σε όγδοο με άρτια αρίθμηση (η συγχορδία στην CoMC θα έχει δηλ.  $\text{timeUnit} = 2, 4, 6, 8, 10, 12, \dots$ ). Πρόκειται σχεδόν πάντα για συγχορδίες με **διαβατικούς** φθόγγους σε μία ή περισσότερες φωνές.
- ✓ Στο πρώτο όγδοο έχουμε συμπληρωματική και στο δεύτερο λειτουργική συγχορδία. Η πρώτη θα εμφανίζεται πάνω σε όγδοο με περιττή αρίθμηση (θα έχουμε με άλλα λόγια  $\text{timeUnit} = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$ ) και θα πρόκειται κατά κανόνα για κάποια συγχορδία με **καθυστέρηση**.<sup>65</sup>
- ✓ Και στα δύο όγδοα έχουμε συμπληρωματικές συγχορδίες. Εδώ θα πρόκειται συνήθως για την ίδια συγχορδία με καθυστέρηση σε ολόκληρο το τέταρτο, με τη λύση να έρχεται στο επόμενο τέταρτο

---

<sup>63</sup> Οι τονικές αρμονίες των υπο-ομάδων III και IV περιορίζονται σε κάποιες δευτερεύουσες βαθμίδες μεθ-εβδόμης (κυρίως αυτές με μεγάλη 7<sup>η</sup>) και στις συγχορδίες μετ' ενάτης. Και οι μεν και οι δε δεν εμφανίζονται έτσι κι αλλιώς ποτέ ως αυτούσιες λειτουργικές αρμονίες στα κοράλ, παρά μόνο ως συμπληρωματικές συνήχησεις.

<sup>64</sup> Συναντάμε βέβαια συχνά περιπτώσεις όπου η αρμονία αλλάζει ανά όγδοο, λ.χ. με μια βαθμίδα II<sup>7</sup> (συνήθως σε κάποια αναστροφή) στο σχετικώς ισχυρό και V (ή και ελαττωμένη τρίφωνη συγχορδία στην VII) στο δεύτερο όγδοο (ασθενές). Πάντως, οι κινήσεις στις φωνές θα είναι σχεδόν πάντα βηματικές, επομένως στο συγκεκριμένο παράδειγμα η πρώτη συγχορδία είναι σωστότερο να θεωρηθεί έτσι κι αλλιώς ως διαβατική ή αποτζιατούρα πάνω στη δεσπόζουσα στο δεύτερο όγδοο.

<sup>65</sup> Μπορεί πιο σπάνια να πρόκειται για αποτζιατούρα ή ακόμα και διαβατικό φθόγγο στο ισχυρό, όπως συναντάμε καμιά φορά στο Μπαχ, βλ. (Kœchlin, 1922)

(στην ίδια ή διαφορετική συγχορδία, κάτι που ο Μπαχ συνηθίζει αρκετά συχνά), χωρίς βέβαια να αποκλείονται άλλες πιο σύνθετες περιπτώσεις.

Με το παραπάνω σκεπτικό, προχωρήσαμε καταρχάς στη μηχανική καταγραφή και ανάλυση της αρμονίας για κάθε ξεχωριστό όγδοο. Όπως ήταν αναμενόμενο, η αρμονική διακύμανση που πήραμε στην έξοδο είχε διαφορετική, πιο περίπλοκη μορφή από αυτή που συναντήσαμε μέχρι τώρα. Το διάγραμμα για το γνωστό μας κοράλ *Jesu, meine Freude* με αριθμό 138 φαίνεται στην *Εικόνα 33*. Η αντιπαραβολή με την *Εικόνα 32* είναι ιδιαίτερα αποκαλυπτική: οι αυξομειώσεις (κυρίως στο υψόμετρο των υπο-ομάδων III ή IV) είναι τώρα πολύ περισσότερες, κατά κανόνα όμως διαρκούν ένα μόνο όγδοο και αντιστοιχούν σε απότομες, μυτερές κορυφές. Τα οροπέδια είναι πάνω κάτω τα ίδια με εκείνα που παρατηρήσαμε στην προηγούμενη ενότητα και αντιστοιχούν κατά κανόνα σε βασικές αρμονίες (τύπου II, V και VI στο ΣΜΣ). Πάντως, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η μεγάλη συχνότητα εμφάνισης συγχορδιών τύπου III (και κάπως σπανιότερα IV), γεγονός που καταδεικνύει ακριβώς τη σημασία τους στην αρμονική εξέλιξη.

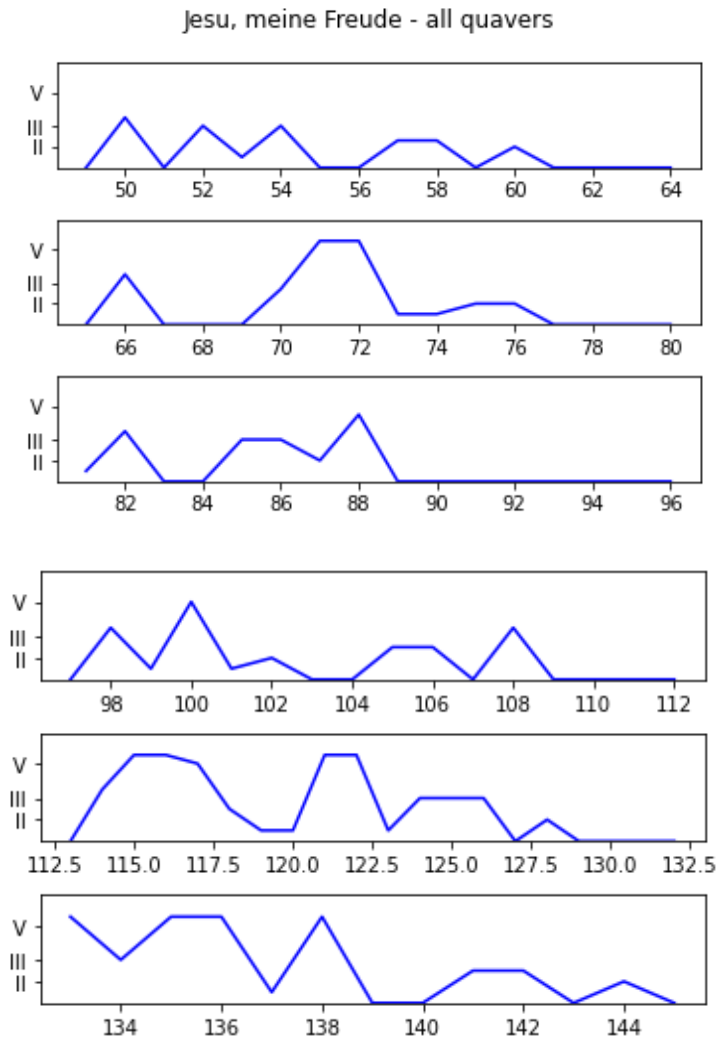
Στη συνέχεια, συλλέξαμε έναν αριθμό από τυχαία επιλεγμένα χορικά<sup>66</sup> του Μπαχ και δημιουργήσαμε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα. Το *Παράρτημα 13.7* περιλαμβάνει έναν κατάλογο με τα 57 χορικά που επιλέχτηκαν και αποτέλεσαν το σύνολο *chorale\_set*. Στη συνέχεια, έγινε αρμονική ανάλυση με μηχανικό τρόπο – μέσω δηλαδή της CoMC, συμπληρώνοντας την οντολογία με τα χαρακτηριστικά της καθεμιάς συγχορδίας (ανά όγδοο) για όλα τα χορικά του *chorale\_set*. Πρέπει να σημειωθεί ότι, σε όσα χορικά επαναλαμβάνονται αυτούσιες οι πρώτες φράσεις, απορρίφθηκε το τμήμα μέχρι το σημείο της επανάληψης και η αρμονική ανάλυση ξεκίνησε από το σημείο αυτό και πέρα, γιατί θεωρήσαμε ότι σε αντίθετη περίπτωση θα είχαμε εισαγάγει μεροληψία στα τελικά μας αποτελέσματα. Έτσι για παράδειγμα, στο γνωστό μας χορικό #138, οι αρμονίες καταγράφηκαν από το όγδοο 49 (χωρίς δηλαδή τα 6 πρώτα μέτρα 4/4 του αντίστοιχου αρχείου εισόδου) μέχρι το τέλος. Όλα τα δεδομένα που συλλέχθηκαν με αυτό τον τρόπο μεταφέρθηκαν σε μορφή RDF/XML σε ένα αποθετήριο τριάδων RDF με το όνομα *chorales\_repository*. Στο αποθετήριο συλλέξαμε τελικά συνολικά 5449 συγχορδίες μαζί με τα χαρακτηριστικά τους, όπως προέκυψαν από την αρμονική ανάλυση που προηγήθηκε (βλ. και *Παράρτημα 13.7*). Η παραπάνω διαδικασία με τα διαδοχικά βήματά της παρουσιάζεται σχηματικά στο διάγραμμα που βλέπουμε στην *Εικόνα 34*.

Έχοντας κανείς ολοκληρώσει την παραπάνω διεργασία μέχρι και την κατασκευή του αποθερίου *chorales\_repository*, μπορεί στη συνέχεια να προχωρήσει σε στατιστική επεξεργασία με τη βοήθεια του λογισμικού GraphDB της Ontotext<sup>67</sup> και να πάρει απαντήσεις σε κατάλληλα διατυπωμένα ερωτήματα σε γλώσσα SPARQL.

---

<sup>66</sup> Χρησιμοποιήθηκε ως πηγή ο ιστότοπος [www.kunstderfuge.com](http://www.kunstderfuge.com) που διαθέτει μια πολύ μεγάλη συλλογή έργων του Μπαχ (όπως και πολλών άλλων συνθετών) σε συμβολική μορφή (Standard MIDI files)

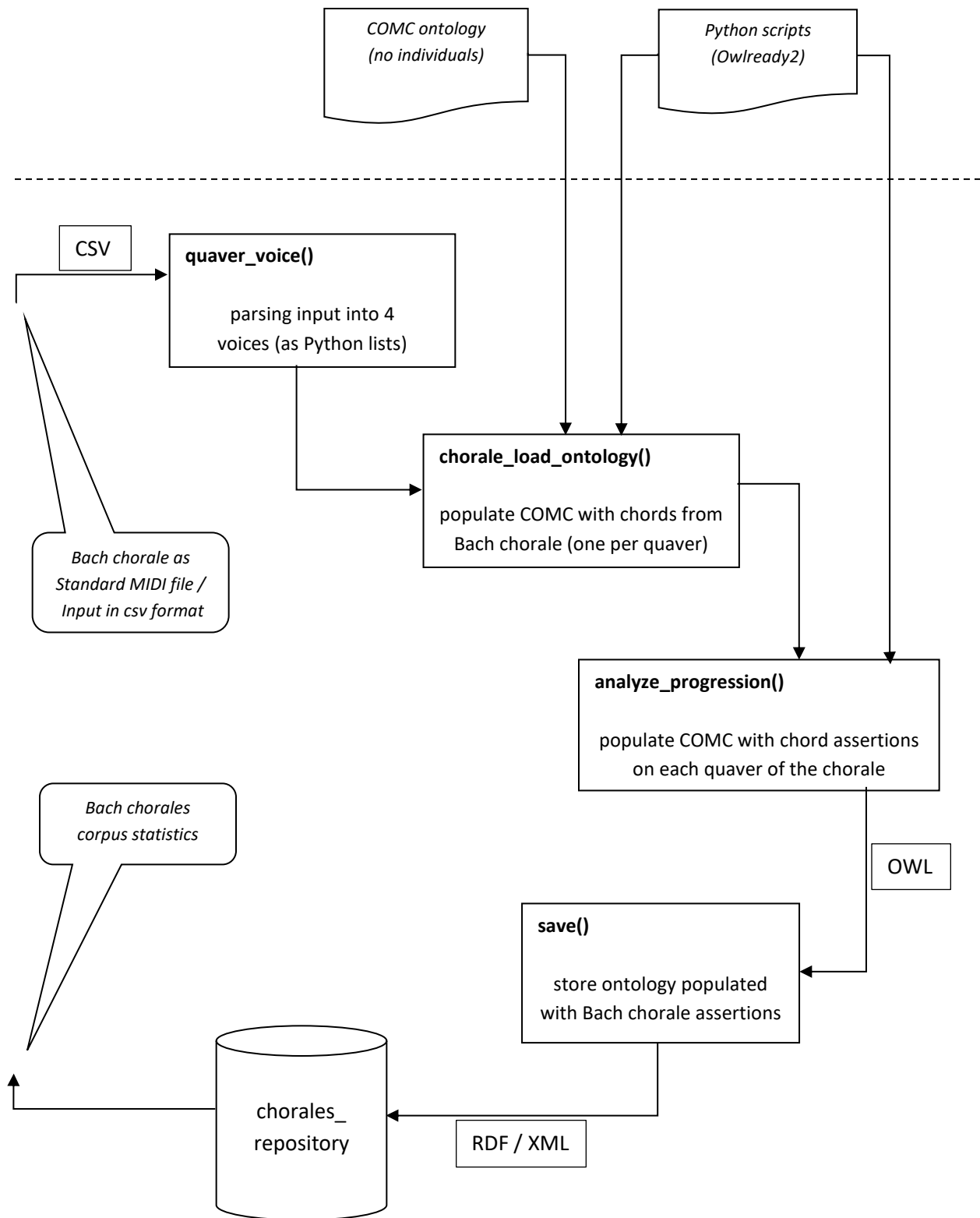
<sup>67</sup> Το GraphDB είναι ένα σύστημα βάσης δεδομένων σε μορφή τριάδων (RDF triplestore), εφοδιασμένο με διεπαφή χρήστη και reasoner για την επεξεργασία και την επαγωγή συμπερασμάτων. Υποστηρίζει πλήρως την SPARQL 1.1 ως γλώσσα ερωτημάτων και διαθέτει συλλογιστική πλήρως συμβατή με τις RDFS, OWL 2 RL & QL. Είναι σε θέση να διαχειρίζεται αποδοτικά τεράστιο όγκο δεδομένων και να εκτελεί σημασιολογικού περιεχομένου επαγωγές σε μεγάλη κλίμακα πάνω στην αποθηκευμένη



Εικόνα 33: Jesu, meine Freude, (Μπαχ #138) – Αρμονική διακύμανση ανά όγδοο

Πρέπει να σημειώσουμε ότι στο *chorales\_repository* οι συγχορδίες ήταν αρχικά ταξινομημένες σε κάποια υπο-κλάση (π.χ. στην  $II_2$ ), όχι όμως και στην αντίστοιχη υπερ-κλάση (π.χ. στην  $II$ ). Χρειάστηκε λοιπόν να προστεθούν κάποια επιπλέον τμήματα γράφου στον αρχικό, με τις κατάλληλες εντολές SPARQL *construct...where*, έτσι ώστε να συμπληρωθεί η βάση με τις αντίστοιχες ιδιότητες. Ο Πίνακας 10.1 δείχνει για παράδειγμα ένα τέτοιο ερώτημα, συγκεκριμένα για την (υπερ-)ομάδα  $II_b$ , που σχηματίζεται ως ένωση των  $II_{b_1}$ ,  $II_{b_2}$  &  $II_{b_3}$ . Αντίστοιχα ήταν τα ερωτήματα που τέθηκαν για τις άλλες υπο-ομάδες, π.χ. την  $I$  ως ένωση των  $I_1$  και  $I_2$  κοκ.

πληροφορία παράγοντας νέα δεδομένα. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία είναι η GraphDB Free Edition και διατίθεται ελεύθερα. <https://www.ontotext.com/products/graphdb/>



Εικόνα 34: Ακολουθία βημάτων για την αρμονική ανάλυση χορικών μέσω της CoMC

PREFIX : <<http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2020/11/untitled-ontology-2#>>

```

construct {?chord a :II_b} where {
  {? chord a :II_b_1 .} union
  {? chord a :II_b_2 .} union
  {? chord a :II_b_3 .}
}

```

Πίνακας 10.1: Προσθήκη ιδιοτήτων για τις υπο-ομάδες στο *chorales\_repository*

Μετά από αυτά, υπολογίζουμε το πλήθος των συγχορδιών στο αποθετήριο ανά υπο-ομάδα, όπως δείχνει η *Εικόνα 35*. Πρέπει πάντως να έχουμε υπόψη ότι η κατανομή στην *Εικόνα 35* δεν αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τις πραγματικές κατανομές ανά κατηγορία στο δείγμα. Αρκεί γι' αυτό να σκεφτεί κανείς ότι μια συγχορδία που διαρκεί ένα ολόκληρο τέταρτο του μέτρου αντιστοιχεί σε δύο (ενν. με διαφορετικό όνομα) όμοιες συγχορδίες στο αποθετήριο. Ακόμα, κάθε τέλος φράσης (κορώνα) έχει κατά κανόνα αξία ενός ημίσεος (ίση δηλαδή με 4 όγδοα) και, καθώς η αρμονία πάνω στις κορώνες είναι συνήθως τύπου I, κάθε τέλος φράσης συμβάλλει στο σύνολο με τέσσερις τέτοιες συγχορδίες, αυξάνοντας κάθε φορά πλασματικά το πλήθος τους.

I	↕	II_1	↕	II_2	↕		
"3271"xsd:integer		"2334"xsd:integer		"937"xsd:integer			
II	↕	II_a	↕	II_b	↕		
"662"xsd:integer		"373"xsd:integer		"289"xsd:integer			
II_b	↕	II_b_1	↕	II_b_2	↕	II_b_3	↕
"289"xsd:integer		"79"xsd:integer		"206"xsd:integer		"4"xsd:integer	
III	↕	III_1	↕	III_2	↕		
"1070"xsd:integer		"621"xsd:integer		"449"xsd:integer			
IV	↕	IV_1	↕	IV_2	↕		
"56"xsd:integer		"17"xsd:integer		"39"xsd:integer			
V	↕	VI	↕				
"73"xsd:integer		"317"xsd:integer					

Εικόνα 35: Η κατανομή των συγχορδιών του *chorales\_set* ανά υπο-ομάδες

Ένα πρώτο ερώτημα αφορά γενικά σε μεταβάσεις από μια συγχορδία στην επόμενη. Συγκεκριμένα, ο Πίνακας 10.2 παρουσιάζει το ερώτημα για μεταβάσεις από μια συγχορδία σε περιττό όγδοο (ισχυρό



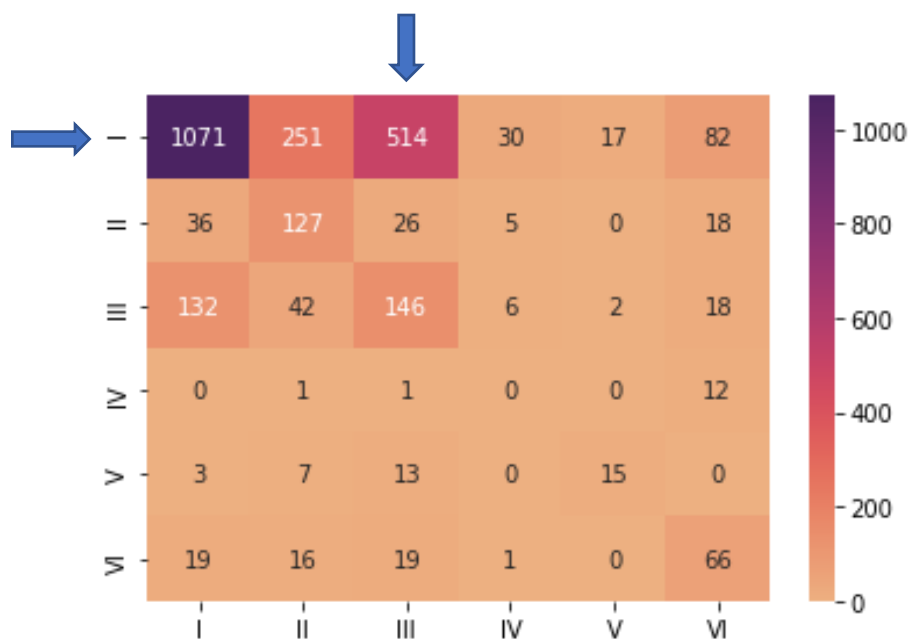
μέρος του μέτρου, *on\_the\_beat*) σε αυτήν πάνω στο επόμενο όγδοο (ασθενές, *off\_the\_beat*). Η απάντηση στο ερώτημα οδηγεί στον πίνακα μεταβάσεων που βλέπουμε στην *Εικόνα 36*. Το ερώτημα για τις μεταβάσεις από ασθενές σε ισχυρό τίθεται με εντελώς ανάλογο τρόπο και ο αντίστοιχος πίνακας μεταβάσεων είναι αυτός στην *Εικόνα 37*.

```

PREFIX : <http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2020/11/untitled-ontology-2#>
select (count(?this_quaver) as ?onTheBeat) ?this_quaver (count(?nxt) as ?next_chord) ?next_quaver
where {
  ?chord a ?this_quaver .
  ?chord :isOnBeat True .
  ?chord :nch ?nxt .
  ?nxt a ?next_quaver .
  filter ((?this_quaver in (:I,:II,:III,:IV,:V,:VI)) && (?next_quaver in (:I,:II,:III,:IV,:V,:VI)))
}
group by ?this_quaver ?next_quaver

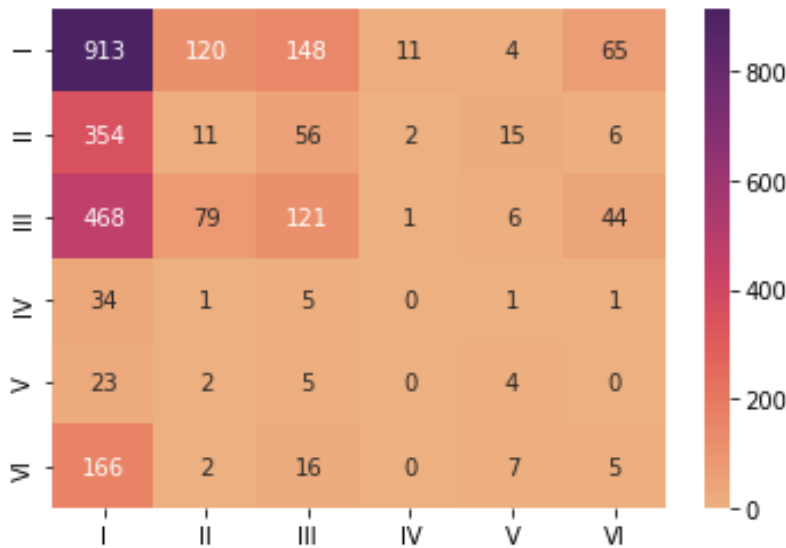
```

Πίνακας 10.2: Ερώτημα SPARQL για τις μεταβάσεις (υπο-ομάδες) από μια συγχορδία στην επόμενη



Εικόνα 36: Πίνακας μεταβάσεων, *on\_the\_beat*

Σημ. η μετάβαση νοείται εδώ από την ετικέτα μιας γραμμής προς αυτή μιας στήλης και από μια συγχορδία σε ισχυρό όγδοο (περιττό *timeUnit* / *on\_the\_beat*) προς την επόμενη συγχορδία (*off\_the\_beat*). Για παράδειγμα, βλέπουμε (στα σημεία με τα βέλη) ότι το *chorales\_set* περιλαμβάνει συνολικά 514 συγχορδίες *on\_the\_beat* τύπου I που μεταβαίνουν σε συγχορδίες *off\_the\_beat* τύπου III στο επόμενο όγδοο.



Εικόνα 37: Πίνακας μεταβάσεων, *off\_the\_beat*

Σημ. η μετάβαση νοείται εδώ από τη συγχορδία με ετικέτα γραμμής που βρίσκεται στο ασθενές (άρτιο *timeUnit / off\_the\_beat*) προς την επόμενη συγχορδία (*on\_the\_beat*) με ετικέτα στήλης, π.χ. το *chorales\_set* περιλαμβάνει συνολικά 354 συγχορδίες *off\_the\_beat* τύπου II που μεταβαίνουν σε συγχορδίες *on\_the\_beat* τύπου I στο επόμενο όγδοο.

Μπορούμε να αναζητήσουμε πολύ περισσότερες πληροφορίες για τις μεταβάσεις από μια συγχορδία στην επόμενη. Για παράδειγμα, ο Πίνακας 10.3 αφορά στο ερώτημα που ομαδοποιεί τις μεταβάσεις ανάλογα με το ζευγάρι των θεμελίων (π.χ. υπολογίζει το πλήθος των μεταβάσεων από θεμέλιο Ντο προς θεμέλιο Σολ, από Ντο προς Φα, από Ντο προς Φα# κοκ. για όλα τα ζευγάρια τονικών κλάσεων). Στη συγκεκριμένη περίπτωση το ερώτημα έχει διατυπωθεί για μεταβάσεις από ασθενές προς ισχυρό. Η διατύπωση για την μετάβαση αντίθετης φοράς είναι εντελώς ανάλογη.

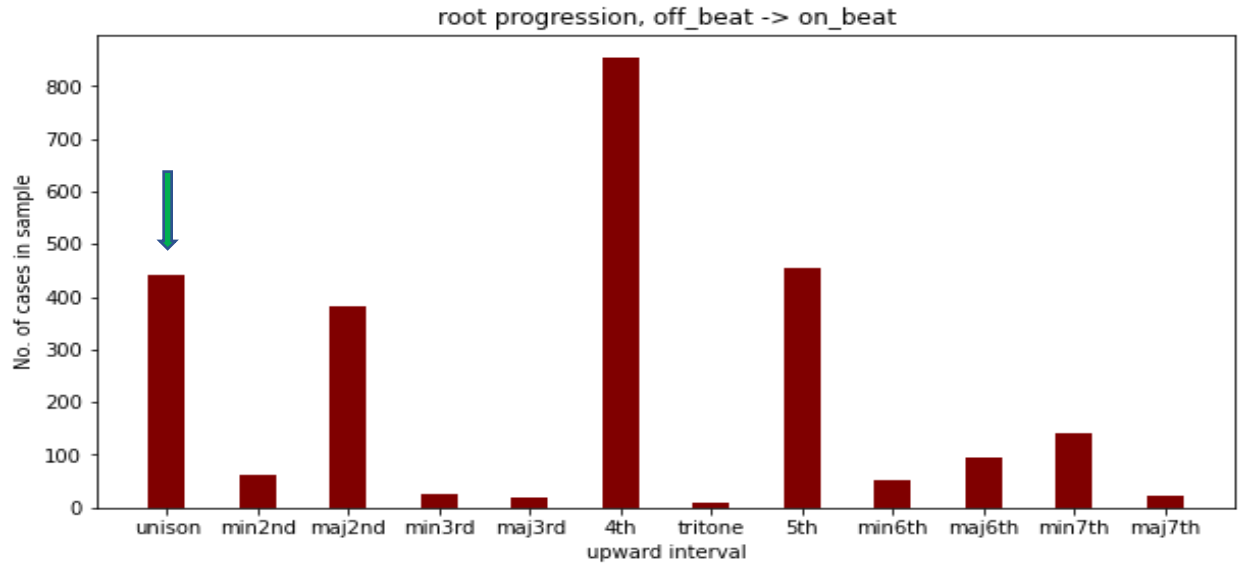
Μπορούμε να ομαδοποιήσουμε ακόμα περισσότερο τα αποτελέσματα που παίρνουμε ως απάντηση στο τελευταίο ερώτημα, αν συγκεντρώσουμε μαζί όλα τα ζευγάρια θεμελίων που αντιστοιχούν στο ίδιο ανιόν ή κατιόν διάστημα – λ.χ. τα ζευγάρια που αφορούν σε ανιόν διάστημα 4<sup>ης</sup> καθαρής σολ – ντο, λα – ρε, φα – σιβ κοκ. και αντίστοιχα για κάθε άλλο διάστημα μεταξύ των θεμελίων. Παίρνουμε έτσι τα συγκεντρωτικά στοιχεία που παρουσιάζει η Εικόνα 38.

```

PREFIX : <http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2020/11/untitled-ontology-2#>
select (count(?chord) as ?offTheBeat) ?this_degree ?next_degree where {
  ?chord :hasDegree ?this_degree .
  ?chord :isOnBeat False .
  ?chord :nch ?nxt .
  ?nxt :hasDegree ?next_degree .
}
group by ?this_degree ?next_degree

```

Πίνακας 10.3: Ερώτημα για τις μεταβάσεις (ακολουθία θεμελίων) από μια συγχορδία στην επόμενη



Εικόνα 38: Μεταβάσεις θεμελίων (ασθενές προς ισχυρό όγδοο)

Το διάστημα ανιούσας 4<sup>ης</sup> καθαρής αντιστοιχεί στο πρότυπο V – I και έτσι το μεγάλο πλήθος αυτών των μεταβάσεων είναι αναμενόμενο. Επίσης αναμενόμενες είναι και οι μεταβάσεις κατά ανιόν διάστημα 5<sup>ης</sup> ή ισοδύναμα κατιούσα 4<sup>η</sup> καθαρή. Πολύ μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το αποτέλεσμα για τις μεταβάσεις με αμετάβλητη τη θεμέλιο, συνολικά 443 (βλ. πράσινο βέλος). Αν εξειδικεύσουμε το ερώτημα για αυτές σε σχέση και με την προηγούμενη συγχορδία (αυτήν στο προηγούμενο ισχυρό όγδοο), όπως δείχνει ο Πίνακας 10.4, παίρνουμε το μάλλον μη αναμενόμενο αποτέλεσμα που δείχνει η Εικόνα 39. Το αποτέλεσμα αυτό σημαίνει ότι στη μεγάλη πλειονότητα των μεταβάσεων από ασθενές σε ισχυρό με αμετάβλητη θεμέλιο (σε 411 από τις συνολικά 443 περιπτώσεις), η θεμέλιος αυτή είναι σταθερή ήδη από τον προηγούμενο ισχυρό, δηλ. τουλάχιστο για 3 συνολικά όγδοα.

```

PREFIX : <http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2020/11/untitled-ontology-2#>
select (count(?chord) as ?offTheBeat) where {
  ?chord :hasDegree ?this_degree .
  ?chord :isOnBeat False .
  ?chord :nch ?nxt .
  ?prev :nch ?chord .
  ?prev :hasDegree ?this_degree .
  ?nxt :hasDegree ?this_degree .
}

```

Πίνακας 10.4: Μεταβάσεις με ίδια θεμέλιο ανάμεσα σε δύο διαδοχικά τέταρτα του μέτρου

same_root_on_two_beats	
1	*411**xsd:integer

Εικόνα 39: Αμετάβλητη θεμέλιος σε δύο διαδοχικούς χρόνους του μέτρου

Επανερχόμενοι στους πίνακες μεταβάσεων για τις υπο-ομάδες (*Εικόνα 36* και *Εικόνα 37*), παρατηρούμε ότι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά συγχορδιών τύπου III και IV, αυτών δηλ. που αντιστοιχούν σε *συμπληρωματικές* συγχορδίες με ξένους φθόγγους. Για τις συγχορδίες τύπου IV (εκείνες που περιέχουν τρίτονο), μπορούμε να παρατηρήσουμε από τους πίνακες μετάβασης ότι εμφανίζονται κατά κύριο λόγο σε όγδοα άρτιου αριθμού (off\_the\_beat) – πρόκειται επομένως κατά βάση για **διαβατικές συγχορδίες**. Επίσης, βλέπουμε ότι σε μεγάλο ποσοστό έρχονται πριν και μετά από συγχορδίες τύπου I, δηλ. απλές τρίφωνες και ελάσσονες συγχορδίες, σε ευθεία κατάσταση ( $I_1$ ) ή σε αναστροφή ( $I_2$ ). Εξάλλου, είναι εύκολο να δείξουμε ότι δεν υπάρχει ούτε μία συγχορδία τύπου IV στο δείγμα μας κρατημένη σε όλη τη διάρκεια ενός τέταρτου, άρα τέτοιες συγχορδίες έχουν (σχεδόν) πάντα χαρακτήρα διαβατικό με διάρκεια όσο ένα (συνήθως ασθενές) όγδοο. Το σχετικό ερώτημα SPARQL και το αντίστοιχο αποτέλεσμα δείχνουν ο *Πίνακας 10.5* και η *Εικόνα 40*.

```

PREFIX : <http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2020/11/untitled-ontology-2#>
select (count(?ch) as ?IV_full_quaver) where {
  ?ch a :IV .
  ?ch :isOnBeat True .
  ?ch :nch ?nxt .
  ?nxt a :IV .
}

```

*Πίνακας 10.5: Συγχορδίες τύπου IV, ερώτημα α*

	IV_full_quaver
1	*0**xsd:integer

*Εικόνα 40: Συγχορδίες τύπου IV, ερώτημα α*

Οι συγχορδίες τύπου IV (συμπληρωματικές με τρίτονο) πάνω σε *ισχυρό* όγδοο είναι, όπως βλέπουμε στην *Εικόνα 36*, εξαιρετικά σπάνιες και κατευθύνονται σχεδόν αποκλειστικά (12 σε σύνολο 14 περιπτώσεων) σε ελαττωμένες συγχορδίες (τύπου VI, επίσης με τρίτονο). Ένα ενδιαφέρον ερώτημα σε αυτό το σημείο είναι τι συμβαίνει με τον **προσαγωγέα** κατά τη διαδοχή αυτή μεταξύ υπο-ομάδων IV - VI. Ο *Πίνακας 10.6* και η *Εικόνα 41* απαντούν στο ερώτημα για τις περιπτώσεις (=5) όπου ο προσαγωγέας μένει αμετάβλητος. Βλέπουμε λοιπόν ότι στις υπόλοιπες 7 από τις 12 συνολικά περιπτώσεις ο προσαγωγέας δεν παραμένει ο ίδιος. Αυτό είναι μια πιθανή ένδειξη ότι στα σημεία αυτά έχουμε επανερμηνεία της ελαττωμένης συγχορδίας λ.χ. για να μεταφερθούμε σε διαφορετική τονική περιοχή. Μπορούμε να εξετάσουμε από κοντά τις περιπτώσεις αυτές απομονώνοντας μία προς μία τις συγκεκριμένες συγχορδίες στη βάση και να εκτελώντας στη συνέχεια μια στοχευμένη αναζήτηση στα μουσικά αποσπάσματα από τα αντίστοιχα χορικά. Δεν θα προχωρήσουμε παραπέρα σε αυτή τη φάση, κάτι ανάλογο πάντως θα συνατήσουμε σε μια αντίστοιχη περίπτωση παρακάτω.

```

PREFIX : <http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2020/11/untitled-ontology-2#>
select (count(?ch) as ?IV_full_quaver) where {
  ?ch a :IV .
  ?ch :isOnBeat True .
  ?ch :hasGuideTone ?gt .
  ?ch :nch ?nxt .
  ?nxt a :VI .
  ?nxt :hasGuideTone ?gt
}

```

Πίνακας 10.6: Συγχορδίες τύπου IV, ερώτημα β

IV_VI	
1	"5"^^xsd:integer

Εικόνα 41: Συγχορδίες τύπου IV, ερώτημα β

Ας εστιάσουμε τώρα στις συγχορδίες τύπου III. Αυτές, όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία του ΣΜΣ, δεν περιέχουν κάποιο τρίτονο. Στο `chorales_set` τις συναντούμε με συχνότητα κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτή για τις συγχορδίες τύπου IV, όπως φαίνεται από τους πίνακες μεταβάσεων. Βλέπουμε ότι οι συγχορδίες αυτές εμφανίζονται στην πλειονότητά τους και πάλι σε ασθενές όγδοο, που σημαίνει ότι αφορούν σε διαβατικούς ξένους φθόγγους. Βλέπουμε όμως παράλληλα ότι, σε αντιδιαστολή με τις συγχορδίες τύπου IV, έχουμε εδώ αρκετές περιπτώσεις συγχορδιών τύπου III πάνω σε ισχυρό όγδοο (`on_the_beat`).

Έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε στον αντίστοιχο πίνακα μεταβάσεων ότι 146 από αυτές τις συγχορδίες μεταβαίνουν σε συγχορδία επίσης τύπου III στο επόμενο όγδοο (`off_the_beat`). Αξίζει να αναζητήσουμε εάν πρόκειται για διαφορετική ή την ίδια συγχορδία – στη δεύτερη περίπτωση, ο Μπαχ έχει προφανώς επιλέξει να εναρμονίσει ολόκληρο το τέταρτο του μέτρου με την ίδια συγχορδία κρατώντας καθυστέρηση σε κάποια φωνή, με τη διαφωνία να λύνεται στον επόμενο (ισχυρό) χρόνο. Ο Πίνακας 10.7 και η Εικόνα 42 απαντούν στο ερώτημα α που αφορά σε αυτή τη δεύτερη περίπτωση, καταγράφοντας και τη συγχορδία της λύσης στον επόμενο χρόνο. Όπως μπορούμε να δούμε, οι συγχορδίες με καθυστέρηση σε ολόκληρο το τέταρτο είναι συνολικά 82.

Ας εστιάσουμε τώρα στις υπόλοιπες περιπτώσεις, δηλαδή αυτές όπου έχουμε δύο διαφορετικές συγχορδίες τύπου III μέσα στο ίδιο τέταρτο. Σε αυτή την περίπτωση, αναμένουμε μάλλον ταυτόχρονες κινήσεις σε περισσότερες από μια φωνές και επομένως μεγαλύτερη ένταση στην αρμονική υφή. Αξίζει να μελετήσουμε από πιο κοντά αυτές τις περιπτώσεις, προσθέτοντας στο ερώτημα ένα φίλτρο ώστε να απαιτήσουμε οι συγχορδίες να μην έχουν την ίδια θεμέλιο (και επομένως να είναι σίγουρα διαφορετικές, βλ. Πίνακας 10.8, σήμανση με κόκκινο χρώμα). Η απάντηση στο ερώτημα β φαίνεται στην Εικόνα 43.

```

PREFIX : <http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2020/11/untitled-ontology-2#>
select (count(?chIII) as ?III_full_quaver) ?next_on_the_beat where {
  ?chIII a :III .
  ?chIII :n1 ?n1 .
  ?chIII :n2 ?n2 .
  ?chIII :n3 ?n3 .
  ?chIII :n4 ?n4 .
  ?chIII :isOnBeat True .
  ?chIII :nch ?nxt .
  ?nxt a :III .
  ?nxt :n1 ?n1 .
  ?nxt :n2 ?n2 .
  ?nxt :n3 ?n3 .
  ?nxt :n4 ?n4 .
  ?nxt :nch ?nxtnxt .
  ?nxtnxt a ?next_on_the_beat .
  filter (?next_on_the_beat in (:I,:II,:III,:IV,:V,:VI))
} group by ?next_on_the_beat

```

Πίνακας 10.7: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα α

	III_full_quaver	next_on_the_beat
1	"51"xsd:integer	:I
2	"9"xsd:integer	:II
3	"18"xsd:integer	:III
4	"4"xsd:integer	:VI

Εικόνα 42: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα α


Προχωρώντας στην ίδια κατεύθυνση, παρατηρούμε στα αποτελέσματα που μόλις πήραμε ότι υπάρχουν 6 περιπτώσεις στο δείγμα μας (βλ. σχετική σήμανση) όπου η διαφωνία δε λύνεται ούτε στην συγχορδία που έρχεται στο ισχυρό του επόμενου τέταρτου, με άλλα λόγια έχουμε διαδοχή τριών διαφορετικών συγχορδιών με ξένους φθόγγους στη σειρά. Αυτό είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο στο ύφος του Μπαχ και αξίζει να διερευνήσουμε την κάθε περίπτωση ξεχωριστά. Έχουμε στην περίπτωση αυτή τη δυνατότητα να κάνουμε μια στοχευμένη αναζήτηση για αυτές τις 6 περιπτώσεις, παίρνοντας τις ονομασίες των 6 αυτών συγχορδιών ως απάντηση στο αντίστοιχο ερώτημα γ (Πίνακας 10.9, Εικόνα 44).

```

PREFIX : <http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2020/11/untitled-ontology-2#>
select (count(?ch) as ?III_on_the_beat) ?next_on_the_beat where {
  ?ch a :III .
  ?ch :hasDegree ?x .
  ?ch :isOnBeat True .
  ?ch :nch ?nxt .
  ?nxt a :III .
  ?nxt :hasDegree ?y .
  ?nxt :nch ?nxt2 .
  ?nxt2 a ?next_on_the_beat
  filter ((?x!=?y) && (?next_on_the_beat in (:I,:II,:III,:IV,:V,:VI)))
}
group by ?next_on_the_beat

```

Πίνακας 10.8: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα β

	III_on_the_beat		next_on_the_beat
1	"30"^^xsd:integer		:I
2	"4"^^xsd:integer		:II
3	"6"^^xsd:integer		
4	"2"^^xsd:integer		:VI

Εικόνα 43: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα β

```

PREFIX : <http://www.semanticweb.org/thana/ontologies/2020/11/untitled-ontology-2#>
select (?ch as ?three_III_in_a_row) where {
  ?ch a :III .
  ?ch :hasDegree ?x .
  ?ch :isOnBeat True .
  ?ch :nch ?nxt .
  ?nxt a :III .

  ?nxt :hasDegree ?y .
  ?nxt :nch ?nxt2 .
  ?nxt2 a :III
  filter (?x!=?y)
}

```

Πίνακας 10.9: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα γ

three_III_in_a_row	
1	:chord5009
2	:chord4326
3	:chord4328
4	:chord4334
5	:chord4336
6	:chord5348

Εικόνα 44: Συγχορδίες τύπου III, ερώτημα γ

Ας αναζητήσουμε για παράδειγμα τη συγχορδία με την ονομασία *chord5009* στην οντολογία και τη βάση των τριάδων RDF. Μπορούμε να δούμε τα χαρακτηριστικά (ως ιδιότητες αντικειμένων και δεδομένων) που αφορούν σε αυτό το στιγμιότυπο και έχουν αποθηκευτεί στο triplestore, όπως στην Εικόνα 45. Με τα στοιχεία αυτά μπορούμε να αναζητήσουμε το όνομα της συγχορδίας στην οντολογία και στη συνέχεια (με αναφορά και στον κατάλογο που βρίσκουμε στο Παράρτημα 13.7) να βρούμε το ακριβές σημείο εμφάνισής της στο αντίστοιχο χορικό. Στην περίπτωση μας, πρόκειται για το χορικό *Jesum lass ich nicht von mir*, BWV 124/6 και, όπως βλέπουμε στην εικόνα, μιλάμε για τη συγχορδία στο 27<sup>ο</sup> όγδοο, δηλαδή το τρίτο όγδοο του τέταρτου μέτρου.

	subject	predicate	object
1	:chord5009	:hasDegree	:gb
2	:chord5009	:hasGuideTone	:gb
3	:chord5009	:isOnBeat	"true"^^xsd:boolean
4	:chord5009	:n1	:db
5	:chord5009	:n2	:gb
6	:chord5009	:n3	:b
7	:chord5009	:n4	:eb
8	:chord5009	:nch	:chord5010
9	:chord5009	:timeUnit	"27"^^xsd:integer
10	:chord5009	rdf:type	:Chord
11	:chord5009	rdf:type	:III
12	:chord5009	rdf:type	:III_2
13	:chord5009	rdf:type	owl:NamedIndividual

Εικόνα 45: Η συγχορδία *chord5009*, τύπου III, από το χορικό BWV 124/6



Το αντίστοιχο απόσπασμα του χορικού, με σημειωμένες μέσα σε πλαίσιο τις συγκεκριμένες τρεις συγχορδίες φαίνεται στην *Εικόνα 46*. Παρατηρούμε ότι έχουμε εδώ διπλή κίνηση: στο μπάσο (με το διαβατικό φθόγγο ντο#) και τη σοπράνο (με την εκφυγή μι), όπως επίσης την προετοιμασία της διαφωνίας σι στην κοντράλτο. Όπως βλέπουμε, στην περίπτωση αυτή οι συνεχόμενες συγχορδίες τύπου III προέκυψαν εξαιτίας της επιλογής του Μπαχ να μην εναρμονίσει το μι της σοπράνο με κάποια συγχορδία αλλά να το θεωρήσει ως *εκφυγή* πριν την επόμενη συγχορδία.

Το παράδειγμα αυτό δείχνει πώς η βάση γνώσης της CoMC είναι σε θέση να ανιχνεύει και να απομονώνει με μηχανικό τρόπο τέτοια μάλλον σπάνια αρμονικά φαινόμενα, αρκεί να τεθούν τα σωστά SPARQL ερωτήματα στο RDF triplestore.

The image shows a musical score snippet from BWV 124/6. It consists of two staves. The top staff is the vocal line, and the bottom staff is the piano accompaniment. The lyrics are: "geh ihm e - wig an der Sei - ten". A blue rectangular box highlights a specific section of the vocal line, corresponding to the words "an der Sei". This section shows a double motion: the bass line (ντο#) and the soprano line (μι) moving in opposite directions. The piano accompaniment has some notes highlighted in orange.

*Εικόνα 46: Απόσπασμα από το χορικό BWV 124/6*



## 11 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Η τονική αρμονία εστιάζει κυρίως στις λειτουργίες των συγχορδιών και τη διαλεκτική σχέση ανάμεσα στις τονικές περιοχές. Η ερμηνεία που δίνει σε μια αρμονική ακολουθία είναι άμεσα συνυφασμένη με τη μορφολογική ανάλυση της (λεγόμενης) κλασικής μουσικής, δηλαδή ουσιαστικά της δυτικοευρωπαϊκής μουσικής παράδοσης, χοντρικά από τον 17<sup>ο</sup> αιώνα ίσαμε τις αρχές του 20<sup>ου</sup>. Μπορεί ακόμα να εξηγήσει αρμονικά φαινόμενα σε μουσικές που στηρίζονται λιγότερο ή περισσότερο στο τονικό ιδίωμα, όπως τη μουσική κινηματογράφου, το έντεχνο τραγούδι, την ποπ κ.ά. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η αρμονία νοηματοδοτείται μόνο μέσα από τα συμφραζόμενα – μια συγχορδία δεν διαθέτει ένα «δυναμικό» από μόνη της, ξέχωρα από τις γειτονικές της.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της αρμονικής ανάλυσης μέσω του ΣΜΣ (και της οντολογίας CoMC) είναι δίχως άλλο η δυνατότητα καταγραφής της αρμονικής διακύμανσης μέσα από την ταξινόμηση των συνηρήσεων στις υπο-ομάδες – και αυτό με μια κατανοητή, εποπτική και κυρίως συνεπή μέθοδο. Η CoMC επιτρέπει την αρμονική ανάλυση ενός μουσικού κομματιού και την κατασκευή των διαγραμμάτων αρμονικής διακύμανσης με αυτοματοποιημένο τρόπο. Επομένως, μπορεί να χρησιμεύσει ως εκπαιδευτικό εργαλείο (ίσως μάλιστα το μόνο με *εποπτικές* δυνατότητες) κατά τη διδασκαλία της αρμονίας και της σύνθεσης. Παράλληλα, όπως δείξαμε παραπάνω για λίγες ενδεικτικές περιπτώσεις, δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την αρμονική δομή μέσα σε μια ακολουθία, σε συνάρτηση με το ύφος ενός συνθέτη ή μιας εποχής. Μπορεί επομένως να αποδειχτεί χρήσιμη προσθήκη στην εργαλειοθήκη του μουσικολόγου ερευνητή, τόσο σε ό,τι αφορά στη θεωρητική σκέψη του ίδιου του Χίντεμιτ όσο και στην ανάλυση μουσικής από διαφορετικούς τόπους και χρονικές περιόδους.

Το ΣΜΣ δεν εξαντλείται στην ταξινόμηση των συγχορδιών σε υπο-ομάδες και την εξόρυξη των βασικών χαρακτηριστικών τους. Ένα άλλο κομμάτι του ασχολείται με τις μελωδικές κινήσεις των φωνών, το δίφωνο πλαίσιο καθώς και με τον καθορισμό τονικών κέντρων. Μια κατεύθυνση για τη μελλοντική έρευνα είναι η διεύρυνση της οντολογίας CoMC έτσι που να κάνει δυνατή την αναπαράσταση και αυτών των παραμέτρων, εστιάζοντας έτσι περισσότερο στην «οριζόντια» διάσταση. Έχει ενδιαφέρον να μελετήσει κανείς ένα παράδειγμα ολοκληρωμένης εφαρμογής του ΣΜΣ από τον ίδιο το Χίντεμιτ στο (Hindemith, 1937), που παρατίθεται στο *Παράρτημα 13.2* σε μια συντομευμένη εκδοχή. Παίρνουμε έτσι μια ιδέα για το πώς μπορούν να συνδυαστούν όλες οι παράμετροι του ΣΜΣ κατά το μετασχηματισμό ενός εξαρχής προβληματικού μουσικού αποσπάσματος. Με ανάλογες μεθόδους μπορούμε να συμπληρώσουμε μια εναρμόνιση με βάση κάποια δοσμένα στοιχεία, λ.χ. το δίφωνο πλαίσιο και την επιθυμητή αρμονική διακύμανση. Σε σχέση με την οριζόντια διάσταση που αναφέρθηκε προηγουμένα, μπορούμε επιπλέον να επισημειώσουμε τις συγχορδίες ενός χορικού με την οριζόντια απόστασή τους από την επόμενη πτώση (cadence) ή κορώνα (fermata). Ενδέχεται να προκύψουν στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά των συγχορδιών, ανάλογα με την απόσταση αυτή.

Αυτό θα αναδείξει επιπλέον εξειδικευμένα κριτήρια με σκοπό την καλύτερη προσομοίωση μιας σύνθεσης από ανθρώπινο χέρι.

Όπως αναφέρθηκε στο εισαγωγικό *Κεφάλαιο 2.2*, η εργασία του (Rupprechter, 2016) αφορά σε δέντρα ταξινόμησης και κανόνες επιλογής σε κάθε φύλλο. Οι δοκιμές με βάση αυτά τα κριτήρια χρησιμεύουν στη (μηχανική) **εξόρυξη των ξένων φθόγγων** σε μια συγχορδία. Τα κριτήρια αυτά δεν μπορούν βέβαια όλα να μεταφερθούν αυτούσια στην περίπτωση του ΣΜΣ του Χίντεμιτ, είναι σημαντικό όμως να αναζητηθεί ένα αντίστοιχο σύνολο κριτηρίων, τέτοιο που να ενσωματώνει το ΣΜΣ. Από τη στιγμή που θα είμαστε σε θέση να ταυτοποιήσουμε με ικανοποιητική ακρίβεια τους ξένους φθόγγους, θα μπορούμε να καθορίσουμε τη θεμέλιο και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μιας συνήχησης λαμβάνοντάς του ή μη υπόψη κατά περίπτωση.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω ευρήματα, μπορεί σε επόμενο στάδιο η οντολογία CoMC να κάνει χρήση αυτοματοποιημένων μεθόδων για να συμπληρώνει τα κενά σε μια εναρμόνιση, μαθαίνοντας αρχικά από το υπάρχον δείγμα των χορικών και επιλέγοντας τη μετάβαση στην επόμενη συγχορδία με βάση τις θεμελίους, τους προσαγωγείς, την επιθυμητή αρμονική διακύμανση κοκ. Για ένα δοσμένο χορικό, θα είναι με άλλα λόγια σε θέση να αναζητά την επόμενη ή κάποια από τις επόμενες συγχορδίες, ικανοποιώντας παράλληλα κάποιους περιορισμούς (constraints) ή σημεία αγκύρωσης (anchor points, όπως στο (Kaliakatsos-Parakostas, et al., 2014)), ώστε να μειώνεται η διάσταση του χώρου των δυνατών λύσεων και συνεπώς η πολυπλοκότητα του προβλήματος. Κατά μία έννοια, μπορούμε να ορίσουμε ένα σύνολο *πιθανοτικών κανόνων* (όπως π.χ. αυτόν που προκύπτει από την *Εικόνα 39*), σε αντιδιαστολή με τους αποκλειστικούς, *ντετερμινιστικούς* κανόνες της τονικής αρμονίας, και να αναζητήσουμε την επόμενη συγχορδία πάνω σε μια τέτοια βάση.

Γενικότερα, μπορεί να θεωρήσει κανείς το πρόβλημα της αυτόματης σύνθεσης (σε στυλ κοράλ) ως ένα συνδυασμό δύο επιμέρους προβλημάτων, τα οποία θα επιχειρήσουμε να επιλύσουμε κατά σειρά:

α/ σχηματισμός του αρμονικού σκελετού (για τέταρτα του μέτρου) και της βασικής συγχορδιακής ακολουθίας με κάποιον τρόπο από αυτούς που αναφέρθηκαν στο *Κεφάλαιο 2* ή την οντολογία CoMC και

β/ καθορισμός των κινήσεων των φωνών και των συμπληρωματικών συνηχήσεων (ανά όγδοο) με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια.

Η οντολογία CoMC λειτουργεί σε μια τέτοια περίπτωση ως εργαλείο αφενός για την αρμονική ανάλυση (για το σκελετό, επικουρικά με άλλες μεθόδους) και αφετέρου για τη λεπτομερειακή και ακριβή μίμηση του στυλ (για τις αρμονίες στα όγδοα). Στην παρούσα φάση, οι επιμέρους κινήσεις των φωνών (voice leading) θα πρέπει να συμπληρωθούν με χειρωνακτικό τρόπο – μια αυτοματοποιημένη τέτοια μέθοδος προϋποθέτει είτε μια πλουσιότερη αναπαράσταση μέσω της CoMC είτε τη σύνδεση με άλλα οντολογικά συστήματα αρμονικής ανάλυσης. Καταρχήν, η τελευταία αυτή σύνδεση με τέτοιες εξειδικευμένες οντολογίες (Chord Ontology, MusicNote κοκ.), οι οποίες στηρίζονται κατά κύριο λόγο στην τονική αρμονία, δεν είναι μια εύκολη υπόθεση. Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό η μελλοντική έρευνα να εστιάσει ιδιαίτερα σε αυτό το σημείο.

Μια εφαρμογή που αξίζει να μελετηθεί σε βάθος μπορεί να αφορά σε χορικά που έχουν ήδη συντεθεί με αυτοματοποιημένες μηχανικές μεθόδους. Μπορούμε για παράδειγμα να φορτώσουμε στην οντολογία ένα χορικό που έχει δημιουργηθεί με το πρόγραμμα CHORAL ή μέσα από τα DeerBach και BachBot και να μελετήσουμε τα χαρακτηριστικά της αρμονικής ακολουθίας. Μπορούμε στη συνέχεια να συγκρίνουμε στατιστικά τα ευρήματα με τα αντίστοιχα δεδομένα που έχουμε από τη βάση γνώσης και το `chorales_repository`, να ορίσουμε κατάλληλες μετρικές και να απαντήσουμε έτσι σε ερωτήματα ως προς το βαθμό με τον οποίο ένα μηχανικά δημιουργημένο κοράλ είναι σε θέση να προσομοιώσει ικανοποιητικά το στυλ του ίδιου του Μπαχ.

Από την άλλη μεριά, μπορούμε να εξερευνήσουμε τις δυνατότητες του ΣΜΣ και της οντολογίας CoMC σε άλλα είδη μουσικής, πέρα από την 4φωνα εναρμόνιση χορικών. Πρέπει να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι οι τονικές ιδιότητες των συγχορδιών πολύ συχνά δε συμβαδίζουν με τα χαρακτηριστικά τους με βάση το ΣΜΣ. Για παράδειγμα, μια ελαττωμένη συγχορδία πάνω στην VII βαθμίδα (που λειτουργεί ως δεσπόζουσα) έχει μεν στο ΣΜΣ τον αναμενόμενο προσαγωγέα αλλά θεμέλιο την 2<sup>η</sup> ή την 4<sup>η</sup>. Επίσης η συνηθισμένη τρίφωνη συγχορδία με προσθήκη έκτης (*sixte ajoutée*) έχει στο ΣΜΣ ως θεμέλιο τη βάση της τρίφωνης συγχορδίας<sup>68</sup>, διαφορετική με άλλα λόγια από τη θεμέλιο που έχει στο τονικό σύστημα (δηλ. την έκτη). Θα είναι επομένως πολύ δύσκολη η πλήρης αντιστοίχιση χαρακτηριστικών μιας συγχορδίας, όπως η υπο-ομάδα ή η θεμέλιος, με την πραγματική (τονική ή άλλη) λειτουργία της μέσα στο μουσικό κομμάτι. Θα χρειαστεί πιθανώς και εδώ η οντολογία CoMC να χρησιμοποιηθεί παράλληλα με άλλα συστήματα αυτοματοποιημένης αρμονικής ανάλυσης.

---

<sup>68</sup> Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς την σύμπτωση στην ερμηνεία αυτή με εκείνη που συναντούμε στη τζαζ και αλλού.



## 12 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- Aldwell, Edward και Schachter, Carl. 2002.** *Harmony and Voice leading*. 3rd. s.l. : Schirmer, 2002.
- Allan, Moray και Williams, Christopher K. I. 2005.** Harmonising chorales by probabilistic inference. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2005.
- Allemang, Dean και Hendler, James. 2011.** *Semantic Web for the Working Ontologist*. [επιμ.] Morgan Kaufmann. 2η. 2011.
- Antoniou, Grigoris και van Harmelen, Frank. 2009.** *A Semantic Web Primer / Εισαγωγή στο Σημασιολογικό Ιστό*. 2η. s.l. : MIT Press / Κλειδάριθμος, 2009.
- Association, MIDI.** <https://www.midi.org/specifications-old/item/the-midi-1-0-specification>. [Ηλεκτρονικό]
- Baader, Franz και Nutt, Werner. 2010.** Basic Description Logics. [επιμ.] Franz Baader, και συν. *The Description Logic handbook*. 2. 2010.
- Baader, Franz, Horrocks, Ian και Sattler, Ulrike. 2009.** Description Logics. [επιμ.] Steffen Staab και Rudi Studer. *Handbook of Ontologies*. 2. s.l. : Springer, 2009.
- Baader, Franz, και συν., [επιμ.]. 2010.** *The Description Logic Handbook*. 2nd. s.l. : Cambridge University Press, 2010.
- Bach, Johann Sebastian. 1787.** *371 vierstimmige Choräle*. [επιμ.] J. P. Kirnberger και C. P. E. Bach. s.l. : Breitkopf, 1787.
- Barbancho, Ana M., και συν. 2013.** *Database of Piano Chords, An Engineering View of Harmony*. s.l. : Springer, 2013.
- Briot, Jean-Pierre, Hadjeres, Gaëtan και Pachet, François-David. 2019.** *Deep Learning Techniques for Music Generation*. s.l. : Springer, 2019.
- Burgoyne, John Ashley, Fujinaga, Ichiro και Downie, J. Stephen. 2016.** Music Information Retrieval. *A new companion to Digital Humanities*. s.l. : Wiley, 2016.
- Cambouropoulos, Emiliios. 2016.** The harmonic musical surface and two novel chord representation schemes. [επιμ.] David Meredith. *Computational Music Analysis*. s.l. : Springer, 2016.
- Cherfi, Samira Si-Said, και συν. 2017.** Ontology-based annotation of music scores. *The Knowledge Capture Conference*. 2017.

- de Haas, W. Bas, και συν. 2014.** Automatic functional harmonic analysis. *Computer Music Journal*. 2014.
- de Haas, Willem Bas. 2012.** *Music Information Retrieval Based on Tonal Harmony*. Utrecht University. 2012. PhD thesis.
- de la Motte, Diether. 1975/1998.** *Harmonielehre - Αρμονία, η Θεωρία και η Πρακτική της*. Αθήνα : Νάσος, 1975/1998.
- Dubois, Théodore. 1921.** *Traité d' Harmonie Théorique et Pratique*. Paris : Heugel, 1921.
- Ebcioğlu, Kemal. 1990.** An expert system for harmonizing chorales in the style of J. S. Bach. *The Journal of Logic Programming*. 1990.
- . **1993.** An expert system for harmonizing four-part chorales. [επιμ.] Stephan M. Schwanauer και David A. Levitt. *Machine Models of Music*. s.l. : MIT Press, 1993.
- Fang, Alexander, και συν. 2020.** Bach or Mock?, A grading function for chorales in the style of J. S. Bach. *ICML*. 2020.
- Giannos, Konstantinos και Cambouropoulos, Emiliios. 2017.** Chord encoding and root-finding in tonal and non-tonal contexts: theoretical, computational and cognitive perspectives. [επιμ.] Peter M. C. Harrison. *Proceedings of the 10th International Conference of Students of Systematic Musicology*. London, UK : s.n., 2017.
- Grilo, Carlos και Cardoso, Amilcar. 2003.** Musical pattern extraction using genetic algorithms. *Computer Music Modeling and Retrieval*. 2003.
- Gruber, Thomas R. 1993.** A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*. 1993, 5(2), σσ. 199-220.
- Guarino, Nicola, Oberle, Daniel και Staab, Steffen. 2009.** What is an ontology? [επιμ.] Steffen Staab και Rudi Studer. *Handbook of Ontologies*. 2nd. s.l. : Springer, 2009.
- Hadjeres, Gaëtan, Pachet, François και Nielsen, Frank. 2017.** DeepBach, A steerable model for Bach chorales generation. *ISML*. 2017.
- Harasim, Daniel, Rohrmeier, Martin και O'Donnell, Timothy J. 2018.** A generalized parsing framework for generative models of harmonic syntax. *ISMIR*. 2018.
- Harte, Christopher A., και συν. 2005.** Symbolic representation of musical chords. *ISMIR*. 2005.
- Heath, Tom και Bizer, Christian. 2011.** *Linking Data, involving the Web into a global data space*. s.l. : Morgan & Claypool, 2011.
- Hertel, Alice, Broekstra, Jeen και Stuckenschmidt, Heiner. 2009.** RDF storage and retrieval systems. [επιμ.] Steffen Staab και Rudi Studer. *Handbook of Ontologies*. 2nd. s.l. : Springer, 2009.



- Hild, Hermann, Feulner, Johannes και Menzel, Wolfram. 1991.** HARMONET, a neural net for harmonizing chorales in the style of J. S. Bach. *NIPS*. 1991.
- Hindemith, Paul. 1953.** *A Composer's World, horizons and limitations*. Cambridge : Harvard University Press, 1953.
- . **1943/68.** *A Concentrated Course in Traditional Harmony*. s.l. : Schott, 1943/68.
- . **1937.** *Craft of Musical Composition / Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης*. [μεταφρ.] Γ. Νάσος. 2η (2010). s.l. : Associated Music Publishers, Inc. / Νάσος, 1937.
- Hitzler, Pascal, Kroetzsch, Markus και Rudolph, Sebastian. 2010.** *Foundations of Semantic Web Technologies*. s.l. : CRC Press, 2010.
- Horridge, Matthew. 2011.** *A practical guide to building OWL ontologies using Protégé 4 and CO-ODE tools*. s.l. : University of Manchester, 2011.
- Kaliakatsos-Papakostas, Maximos και Cambouropoulos, Emilios. 2014.** Probabilistic harmonization with fixed intermediate chord constraints. *ICMC-SMC*. 2014.
- Keet, C. Maria. 2020.** *An Introduction to Ontology Engineering*. v1.5. Cape Town : s.n., 2020.
- Kœchlin, Charles. 1929.** *Étude sur le Choral d' École d' après J. S. Bach*. Heugel. Paris : s.n., 1929.
- . **1922.** *Étude sur les Notes de Passage*. Paris : Max Eschig, 1922.
- . **1928.** *Traité de l' Harmonie*. Paris : Max Eschig, 1928.
- Konstantinou, Nikolaos και Spanos, Dimitrios-Emmanuel. 2015.** *Materializing the Web of Linked Data*. s.l. : Springer, 2015.
- Korzeniowski, Filip και Widmer, Gerhard. 2018.** Improved chord recognition by combining duration and harmonic language models. *ISMIR*. 2018.
- Kostka, Stefan, Payne, Dorothy και Almén, Byron. 2017.** *Tonal Harmony, with an introduction to post-tonal music*. 8th. s.l. : McGraw Hill, 2017.
- Kufferath, Hubert Ferdinand.** *Ecole Pratique du Choral*. Bruxelles : Schott.
- Lamy, Jean-Baptiste. 2017.** Owlready: ontology-oriented programming in Python with automatic classification and high level constructs for biomedical ontologies. *Artificial Intelligence in Medicine*. 2017, 80.
- . **2020.** *Owlready2 documentation, Release 0.23*. 2020.
- Lee, Kyogu και Slaney, Malcolm. 2007.** A unified system for chord transcription and key extraction using Hidden Markov Models. *ISMIR*. 2007.

- Lerdahl, Fred και Jackendoff, Ray. 1993.** An overview of hierarchical structure in music. [επιμ.] Stephan M. Schwanauer και David A. Levitt. *Machine Models of Music*. s.l. : MIT Press, 1993.
- Lerdahl, Fred και Jackendorff, Ray. 1999.** *A Generative Theory of Tonal Music*. 2. s.l. : MIT Press, 1999.
- Liang, Feynman, και συν. 2017.** Automatic stylistic composition of Bach chorales with deep LSTM. *ISMIR*. 2017.
- Maler, Wilhelm. 1931/1983.** Σύστημα Διδασκαλίας της Αρμονίας Μείζονος-Ελάσσονος [*Beitrag zur durmolltonalen Harmonielehre*]. Αθήνα : Νάσος, 1931/1983.
- Mauch, Matthias και Dixon, Simon. 2008.** A discrete mixture model for chord labelling. *ISMIR*. 2008.
- Musen, Mark A. 2015.** The Protégé Project: a look back and a look forward. *AI Matters*. 2015, Τόμ. 1, 4.
- Neumeyer, David. 1986.** *The Music of Paul Hindemith*. s.l. : Yale University Press, 1986.
- Noy, Natalia F. και McGuinness, Debora L.** *Ontology Development: a guide to creating your first ontology*. Stanford University. Stanford, CA : s.n.
- O' Connell, Kevin. 2011.** Hindemith's voices. *The Musical Times*. 2011.
- Orio, Nicola. 2006.** Music Retrieval. a tutorial and review. *Foundations and Trends in Information Retrieval*. 2006, Τόμ. 1, 1.
- Oudre, Laurent, Févotte, Cédric και Grenier, Yves. 2010.** Probabilistic framework for template-based chord recognition. *MMSP*. 2010.
- Parncutt, Richard. 1988.** *Harmony, a psychoacoustical approach*. s.l. : Springer-Verlag, 1988.
- Piston, Walter. 1949/2001.** *Αρμονία [Harmony]*. Αθήνα : Ορφέως, 1949/2001.
- Radicioni, Daniele P. και Esposito, Roberto. 2010.** BREVE, an HMPeception-based chord recognition system. [επιμ.] Zbigniew W. Raś και Alicja A. Wierzchowska. *Advances in Music Information Retrieval*. s.l. : Springer-Verlag, 2010.
- Raimond, Yves, και συν. 2007.** The Music Ontology. *ISMIR*. 2007.
- Rashid, Sabbir M., de Roure, David και McGuinness, Deborah L. 2018.** A Music Theory Ontology. *ISWC*. 2018.
- Riemann, Hugo. 1896.** *Harmony Simplified, the theory of the tonal functions of chords*. London : Augener, 1896.
- Rohrmeier, Martin. 2011.** Towards a generative syntax of tonal harmony. *Journal of Mathematics and Music*. 2011.

- Rupprechter, Samuel. 2016.** *Automatic Determination of Chord Roots*. Institute of Computer Science, University of Innsbruck. 2016. B.Sc. Thesis.
- Schedl, Markus, Gómez, Emilia και Urbano, Julián. 2014.** Music Information Retrieval, recent developments and applications. *Foundations and Trends in Information Retrieval*. 2014, Τόμ. 8, 2-3.
- Schoenberg, Arnold. 1948/1989.** *Δομικές Λειτουργίες της Αρμονίας [Structural functions of Harmony]*. [μεταφρ.] Κ. Νάσος. Αθήνα : Νάσος, 1948/1989.
- **1911/1992.** *Θεωρητική Αρμονία [Harmonielehre]*. [μεταφρ.] Κ. Νάσος. Αθήνα : Νάσος, 1911/1992.
- Searle, Humphrey. 1955.** *20th Century Counterpoint*. 2nd. London : Ernest Benn, 1955.
- Sears, David R.W., Korzeniowski, Filip και Widmer, Gerhard. 2018.** Evaluating language models for tonal harmony. *ISMIR*. 2018.
- Sutton, Christopher, Raimond, Yves και Mauch, Matthias. 2007.** <http://purl.org/ontology/chord>. [Ηλεκτρονικό] 2007.
- Tchaikovsky, Piotr Ilyitch. 1900.** *Guide to the Practical Study of Harmony*. Leipzig : Jurgenson, 1900.
- Temperley, David. 2001.** *The Cognition of Basic Musical Structures*. s.l. : MIT Press, 2001.
- Weih, Claus, και συν., [επιμ.]. 2017.** *Music Data Analysis, Foundations and Applications*. s.l. : CRC Press, 2017.
- Winograd, Terry. 1993.** Linguistics and the computer analysis of tonal harmony. [επιμ.] Stephan M. Schwanauer και David A. Levitt. *Machine Models of Music*. s.l. : MIT Press, 1993.
- Wissmann, Jens Sebastian. 2012.** *Chord Sequence Patterns in OWL, music representation and reasoning with description logics for the Semantic Web*. School of Informatics, City University London. 2012. PhD Thesis.
- Zhou, Xinqun και Lerch, Alexander. 2015.** Chord detection using deep learning. *ISMIR*. 2015.
- Καλομοίρης, Μανώλης. 1933.** *Τα Θεωρητικά της Μουσικής, Αρμονία, τόμοι I και II*. Αθήνα : Μουσικός Εκδοτικός Οίκος Στεφ. Γαϊτάνου, 1933.
- Στάμου, Γιώργος. 2015.** *Αναπαράσταση Οντολογικής Γνώσης και Συλλογιστική*. s.l. : ΣΕΑΒ, Κάλλιπος, 2015.
- Στεφανιδάκης, Μιχαήλ, Ανδρόνικος, Θεόδωρος και Παπαδάκης, Ιωάννης. 2015.** *Ανοικτά Συνδεδεμένα Δεδομένα και Εφαρμογές*. s.l. : ΣΕΑΒ, Κάλλιπος, 2015.






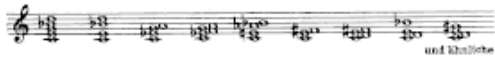








## 13 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

---



# 13.1 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1: ΟΙ ΥΠΟ-ΟΜΑΔΕΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Tabelle zur Akkordbestimmung

A Klänge ohne Tritonus	B Klänge mit Tritonus
<p><b>I Ohne Sekunden und Septimen</b></p> <p>1. Grundton und Baßton sind derselbe</p>  <p>2. Grundton liegt höher im Akkord</p> 	<p><b>II Ohne kleine Sekunden und große Septimen. Tritonus untergeordnet</b></p> <p>a Nur mit kleiner Septime (ohne große Sekunde) Grundton und Baßton sind derselbe</p>  <p>b Mit großer Sekunde und kleiner Septime</p> <p>1. Grundton und Baßton sind derselbe</p>  <p>2. Grundton liegt höher im Akkord</p>  <p>3. Mit mehreren Tritoni</p> 
<p><b>III Mit Sekunden und Septimen</b></p> <p>1. Grundton und Baßton sind derselbe</p>  <p>2. Grundton liegt höher im Akkord</p> 	<p><b>IV Mit kleinen Sekunden und großen Septimen. Ein Tritonus oder mehrere untergeordnet</b></p> <p>1. Grundton und Baßton sind derselbe</p>  <p>2. Grundton liegt höher im Akkord</p> 
<p><b>V Unbestimmbar</b></p> 	<p><b>VI Unbestimmbar. Tritonus übergeordnet</b></p> 

Paul Hindemith, Unterweisung im Tonsatz, Schott (1937)

## 13.2 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2: ΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΣΜΣ

Ας θεωρήσουμε την ακολουθία των 5φωνων συγχορδιών που βλέπουμε στην *Εικόνα 47*<sup>69</sup>:

(117)

1 2 3 4 5 6 7 8 9

] = Τρίτονο

Δίφωνο Πλαίσιο

Οδηγοί φθόγγοι

Θεμέλιοι (Ακολουθία βαθμίδων)

Αρμονική διακύμανση IV<sub>1</sub> III<sub>1</sub> IV<sub>2</sub> IV<sub>1</sub> III<sub>1</sub> IV<sub>2</sub> IV<sub>1</sub> III<sub>1</sub> I<sub>1</sub>

Προσχεδιασμένη αρμονική ένταση

Πραγματική αρμονική ένταση

Εικόνα 47: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 1

Π. Χίντεμιτ: *Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης*, εκδ. Νάσος, 2010

Ας υποθέσουμε ακόμη ότι πρόθεση του συνθέτη ήταν ένα αρμονικό κρεσέντο, με την ένταση να αυξάνει από την πρώτη προς την πέμπτη συγχορδία, ακολουθούμενο από ένα ντιμινουέντο (βλ. πράσινη σκίαση). Η πραγματική αρμονική διακύμανση υποδεικνύεται αντίστοιχα με κόκκινη σκίαση.

**Δίφωνο πλαίσιο.** Η αδύναμη τέταρτη σολ-ντο στην πέμπτη συγχορδία υπονομεύει την πρόθεση για κορύφωση σε αυτό το σημείο. Απαιτείται μάλλον ένα ισχυρό διάστημα (πέμπτης ή τρίτης) παρά μια αναστροφή που, όπως γνωρίζουμε, δεν διαθέτει αρκετή ενέργεια.

Η τροποποίηση του δίφωνου πλαισίου στην *Εικόνα 48* διατηρεί σε γενικές γραμμές τόσο την ομαλή, βηματική προς τα κάτω κίνηση του μπάσου όσο και τη γωνιώδη μορφή της επάνω φωνής.

<sup>69</sup> Το παράδειγμα αυτό είναι δανεισμένο από τις τελευταίες σελίδες του Θεωρητικού Μέρους του ΣΜΣ. Τα διαγράμματα και παραδείγματα που ακολουθούν έχουν ληφθεί από τη 2<sup>η</sup> ελληνική έκδοση του Συστήματος Μουσικής Σύνθεσης, εκδόσεις Νάσος (2010). Τα συνοδευτικά σχόλια είναι του ίδιου του Χίντεμιτ, αναγκαστικά συντομευμένα σε αρκετά μεγάλο βαθμό.





Εικόνα 48: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 2

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

Ας προσέξουμε εδώ ότι το προτεινόμενο νέο πλαίσιο κορυφώνεται στην τρίτη συγχορδία. Με δεδομένο ότι η αρμονική κορύφωση αναμένεται στην πέμπτη συγχορδία, θα προκύψει μια αντίθεση μεταξύ του δίφωνου πλαισίου και της αρμονικής διακύμανσης, που θα λειτουργήσει θετικά, καθώς θα δώσει ενδιαφέρον στην τονική υφή. Η συμπλήρωση των συγχορδιών με τις τρεις εσωτερικές φωνές μπορεί να γίνει με μια σχετική ελευθερία, επιλέγουμε όμως καταρχήν λύσεις που οδηγούν σε καλές μελωδικές κινήσεις (βλ. Εικόνα 49)

Ακολουθία βαθμίδων. Η σχετική ακινησία και οι επαναλήψεις των θεμελίων που έχουν προκύψει (βλ. το σκιασμένο πεντάγραμμα στην Εικόνα 49) μας περιορίζουν ως προς την αρμονική ανάπτυξη. Η βελτίωση που επιφέραμε παραπάνω στο δίφωνο πλαίσιο είχε ως συνέπεια μια ακόμα χειρότερη ακολουθία θεμελίων. Μπορούμε όμως να κάνουμε κάποιες βελτιώσεις, κρατώντας το ίδιο δίφωνο πλαίσιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 50, όπου οι βαθμίδες σημειώνονται επίσης με σκιασμένο πλαίσιο.

Τονικότητα. Το τονικό κέντρο του αρχικού παραδείγματος φαίνεται να είναι το Σολ# (Λαβ). Μπορούμε να ισχυροποιήσουμε κι άλλο αυτό το φθόγγο, αντικαθιστώντας στη συγχορδία αρ. 7 τη βαθμίδα Ρε, που απέχει τρίτονο από το Σολ# (βλ. Εικόνα 50) με το Σολ#, όπως στην Εικόνα 51 (βλ. σκιασμένο πλαίσιο με μπλε χρώμα και κόκκινο βέλος) .

119

Σχεδιασμένη νέα αρμονική διακύμανση

Παρεμβολή της αρμονικής διακύμανσης στο δίφωνο πλαίσιο

Κατανομή της εντάσεως

Οδηγοί φθόγγοι και αλληλουχία βαθμίδων

Εικόνα 49: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 3

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

120 Βελτιωμένη αλληλουχία βαθμίδων  
Σχεδιασμένη αρμονική διακύμανση

1 2 3 4 5 6 7 8 9

I<sub>1</sub> III<sub>1</sub> III<sub>2</sub> IV<sub>1</sub> IV<sub>2</sub> IV<sub>2</sub> II<sub>2</sub> II<sub>b2</sub> I<sub>1</sub>

Σύνδεση αλληλ. βαθμίδων αρμον. διακυμάνσεως και δίφωνου πλαισίου

Οδηγοί φθόγγου

Εικόνα 50: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 4

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

121 Τελική αλληλουχία βαθμίδων  
Βελτιωμένη αρμον. διακύμανση

1 2 3 4 5 6 7 8 9

I<sub>1</sub> III<sub>1</sub> III<sub>2</sub> IV<sub>1</sub> IV<sub>2</sub> III<sub>2</sub> III<sub>2</sub> II<sub>b2</sub> I<sub>1</sub>

Τελική εκδοχή

Οδηγοί φθόγγου

Εικόνα 51: Χίντεμιτ / ΣΜΣ, παράδειγμα αρμονικής ανάλυσης – 5

Π. Χίντεμιτ: Σύστημα Μουσικής Σύνθεσης, εκδ. Νάσος, 2010

Μπορούμε στο τελικό στάδιο να επιφέρουμε μικρές επιπλέον τροποποιήσεις, όπως στη συγχορδία στην 6η θέση, διατηρώντας πάντα την επιθυμητή κατεύθυνση στην αρμονική διακύμανση, έτσι ώστε να πετύχουμε καλύτερες κινήσεις στις εσωτερικές φωνές (βλ. Εικόνα 51, σκίαση με πράσινο χρώμα). Στο σημείο αυτό έχουμε πλέον σε μεγάλο βαθμό «διορθώσει» τις ατέλειες της αρχικής αρμονικής ακολουθίας. Κάποιες μικρές αδεξιότητες που παρατηρούνται στις κινήσεις των μεσαίων φωνών μπορούν να θεωρηθούν ανεκτές χωρίς ιδιαίτερο πρόβλημα.

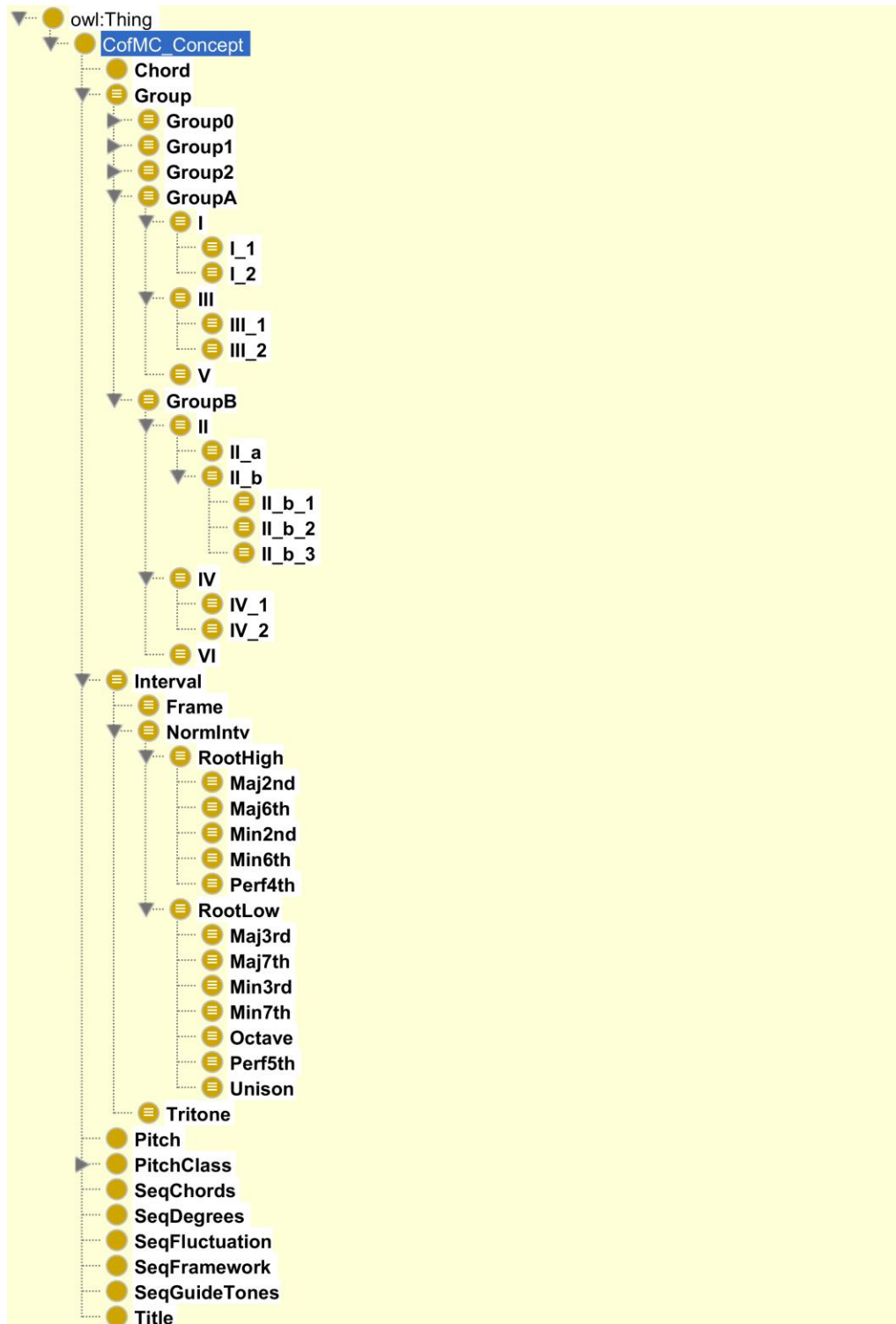
### 13.3 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3: ΤΟΝΙΚΑ ΥΨΗ (ΕΚΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΙΑΝΟΥ) – ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΑ ΣΕ ΑΡΙΘΜΟΥΣ MIDI

Frequency	Keyboard	Note name	MIDI number
4186.0		C8	108
3951.1		B7	107
3729.3		A7	106
3322.4		G7	104
2960.0		F7	102
2637.0		E7	100
2489.0		D7	99
2217.5		C7	97
1975.5		B6	95
1864.7		A6	94
1661.2		G6	92
1480.0		F6	90
1318.5		E6	88
1244.5		D6	87
1108.7		C6	85
987.77		B5	83
932.33		A5	82
830.61		G5	80
739.99		F5	78
659.26		E5	76
622.25		D5	75
554.37		C5	73
493.88		B4	71
466.16		A4	70
415.30		G4	68
369.99		F4	66
349.23		E4	64
311.13		D4	63
277.18		C4	61
246.94		B3	59
233.08		A3	58
207.65		G3	56
185.00		F3	54
164.81		E3	52
155.56		D3	51
138.59		C3	49
123.47		B2	47
116.54		A2	46
103.83		G2	44
97.999		F2	42
92.499		E2	40
82.407		D2	39
77.782		C2	37
69.296		B1	35
61.735		A1	34
58.270		G1	32
51.913		F1	30
48.999		E1	28
46.249		D1	27
43.654		C1	25
41.203		B0	23
38.891		A0	22
36.708			
34.648			
32.703			
30.868			
29.135			
27.500			

Σημ.: ο τύπος μετατροπής μιας συχνότητας  $f$  (σε Hz) στον αντίστοιχο αριθμό MIDI είναι  $f_{MIDI} = 69 + 12 \log_2 (f/440)$

πηγή: wikipedia

### 13.4 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 4: Η ΙΕΡΑΡΧΙΑ ΤΩΝ ΚΛΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΟΝΤΟΛΟΓΙΑ CoMC



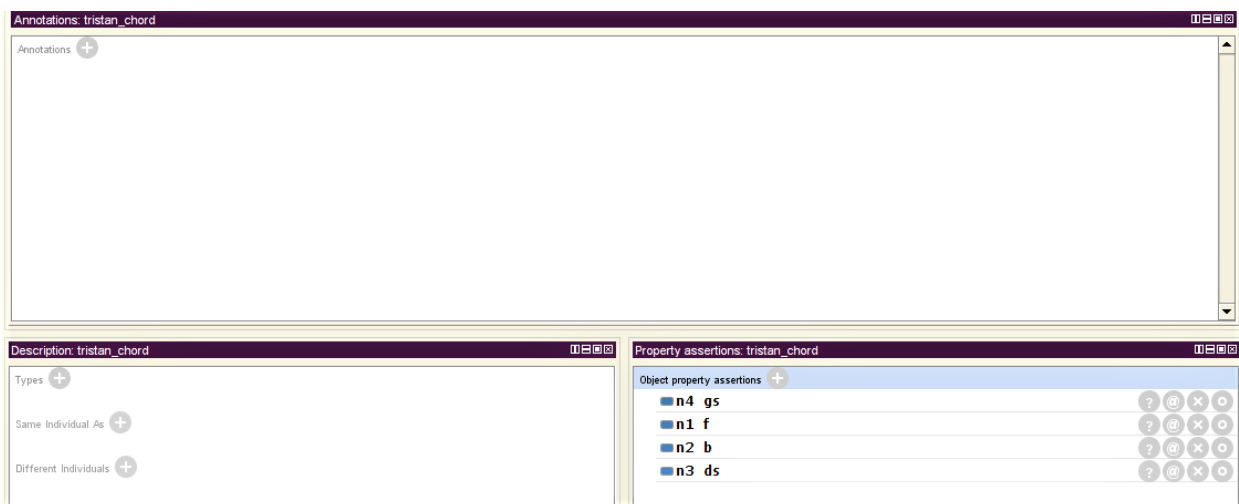
## 13.5 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 5: ΤΟ ΑΚΟΡΝΤΟ ΤΟΥ ΤΡΙΣΤΑΝΟΥ ΣΤΗΝ ΟΝΤΟΛΟΓΙΑ CoMC

Η όπερα του Ριχ. Βάγκνερ (1813 – 1883) *Τριστάνος και Ιζόλδη* ξεκινάει με μια 4φωνα συγχορδία, της οποίας οι ερμηνείες, σύμφωνα πάντα με την τονική αρμονία, είναι όχι μόνο περισσότερες από μια αλλά και ξεσήκωσαν έντονες συζητήσεις και διαφωνίες ανάμεσα σε συνθέτες και μουσικολόγους, ήδη από τη στιγμή της πρώτης παρουσίασης της όπερας στο Μόναχο του 1865. Η πρώτη φράση του έργου φαίνεται στην *Εικόνα 52* (μετά την πρώτη φράση στα τσέλα έρχεται η συγχορδία στο τρίτο μέτρο και είναι σημειωμένη με κόκκινο χρώμα):

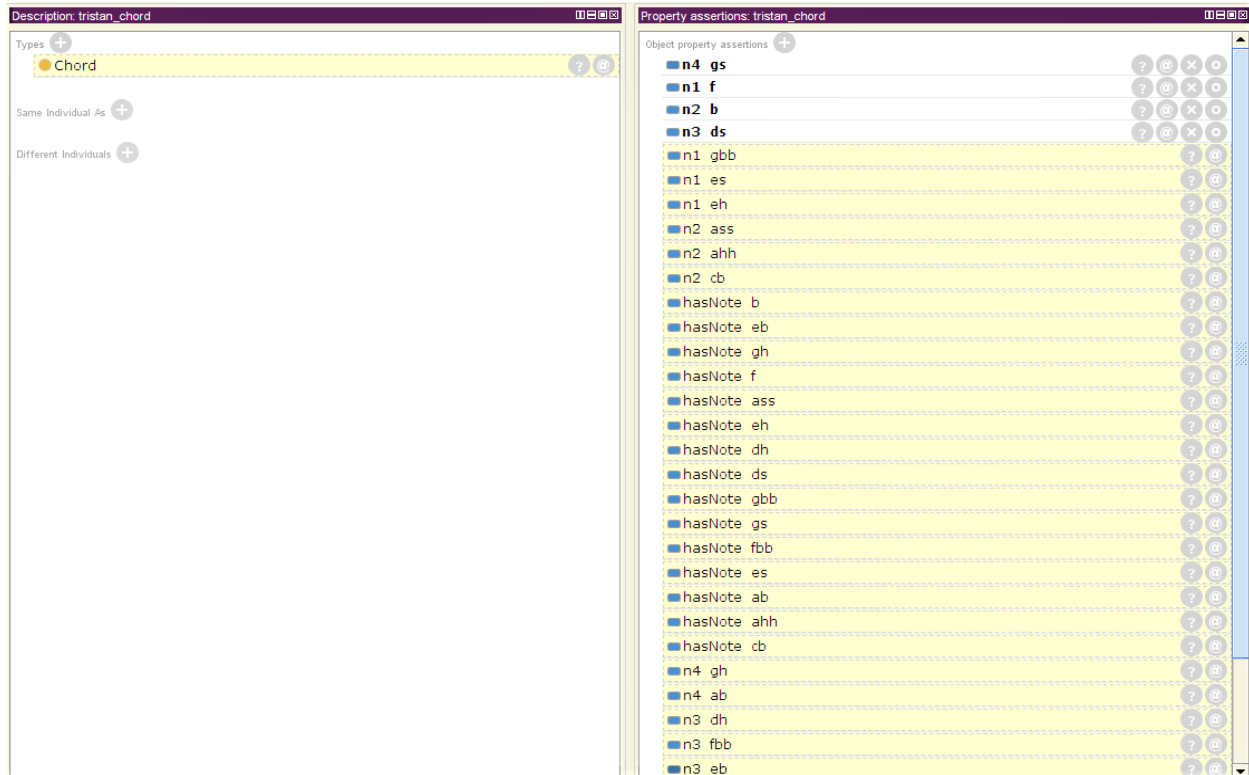


Εικόνα 52: Η πρώτη φράση από την όπερα «Τριστάνος και Ιζόλδη» του Ρίχαρντ Βάγκνερ

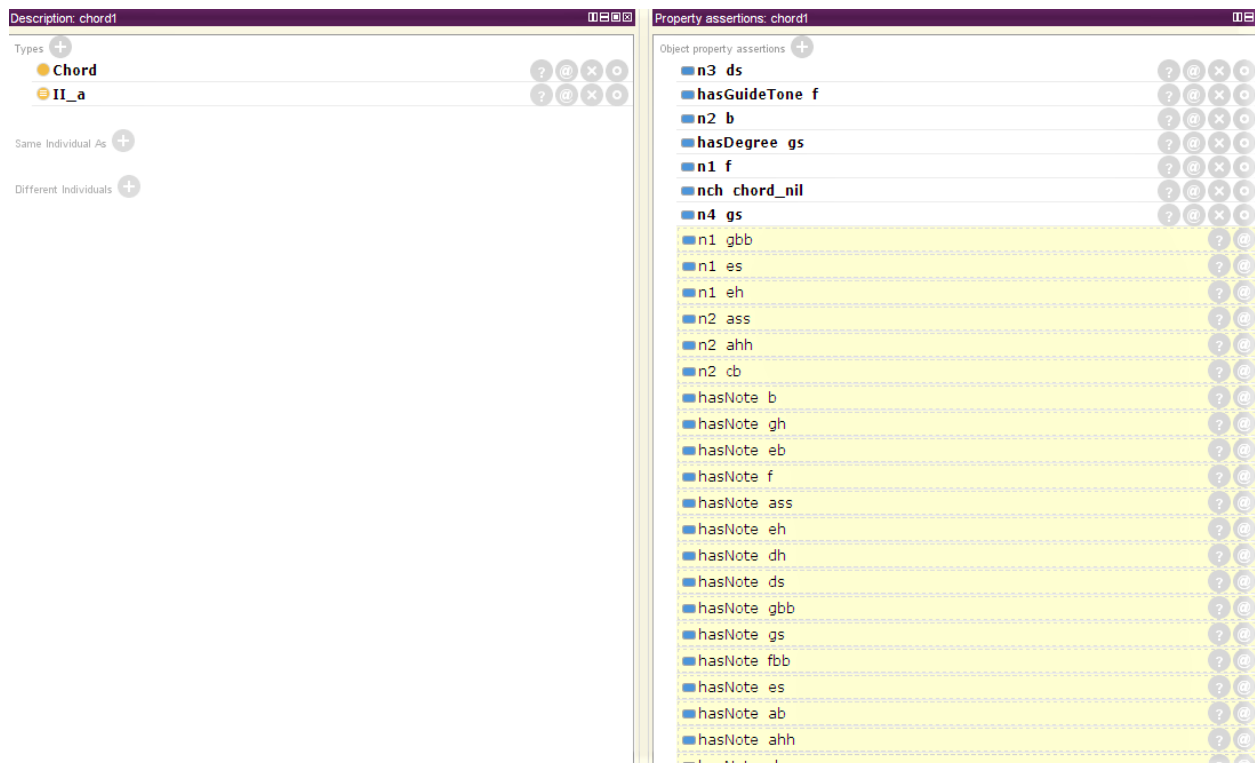
Στην *Εικόνα 53* παρουσιάζεται η συγχορδία αυτή όπως εισάγεται αρχικά στην οντολογία χειρωνακτικά, με την εγγραφή των 4 φθόγγων της και μόνο. Η *Εικόνα 54* δείχνει την ίδια συγχορδία αφού τρέξει ο reasoner Hermit 1.3.8 και η *Εικόνα 55* την ίδια συγχορδία με συμπληρωμένα τα χαρακτηριστικά της (θεμέλιος, προσαγωγέας και υπο-ομάδα), αφού αναλυθεί η συγχορδία αυτή με τη βοήθεια του κώδικα Python του *Παραρτήματος 13.8* και τρέξει για ακόμα μια φορά ο ταξινομητής.



Εικόνα 53: Το ακόρντο του Τριστάνου στην CoMC, 1



Εικόνα 54: Το ακόντιο του Τριστάνου στην CoMC, 2



Εικόνα 55: Το ακόντιο του Τριστάνου στην CoMC, 3

13.6 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 6: ΤΟ ΧΟΡΙΚΟ *JESU, MEINE FREUDE* [ED. BREITKOPF, #138]

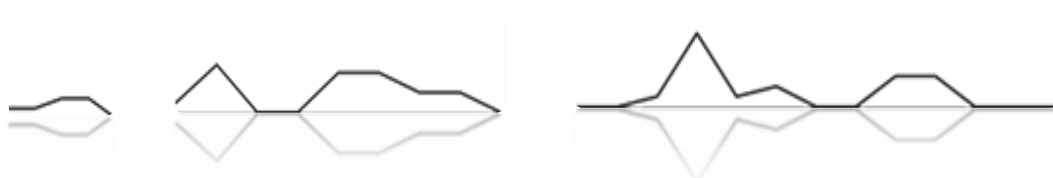
(Cant. 64. Sehet, welch' eine Liebe. B. A. 10, 132)

Joh. Krüger 1039

Gu - te Nacht, o We - sen, das die Welt er -  
 Gu - te Nacht, ihr Sün - den, blei - bet weit da -



le - sen! mir ge - fälltst du nicht. Gu - te Nacht, du Stolz und Pracht!  
 hin - ten, kommt nicht mehr an's Licht!



dir sei ganz, o La - ster - le - ben, gu - te Nacht ge - ge - ben!  
3 Str. (Str. 3 des Liedes: Jesu, meine Freude)



## 13.7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 7: ΤΑ ΧΟΡΙΚΑ ΤΟΥ CHORALE\_SET

Ο Πίνακας 13.1 περιλαμβάνει τα 57 χορικά του Γ. Σ. Μπαχ που αποτέλεσαν τη βάση του *chorales\_repository*. Οι αριθμοί της πρώτης στήλης παραπέμπουν στην έκδοση 371 *vierstimmige Choräle, Breitkopf & Härtel, Wiesbaden [ed. J. Kirnberger & C.P.E. Bach / A. Riemenschneider]*. Η στήλη BWV (Bach Werke Verzeichnis) αναφέρεται στον αριθμό έργου του Μπαχ που περιλαμβάνει το αντίστοιχο κοράλ, π.χ. BWV38/6 αντιστοιχεί στο 6<sup>ο</sup> μέρος της Καντάτας αρ. 38<sup>70</sup>. Οι στήλες chordXXXX και chordYYYY αφορούν στις ονομασίες με τις οποίες έχουν καταχωρηθεί στην οντολογία και στο *chorales\_repository* η πρώτη και η τελευταία συγχορδία για το αντίστοιχο χορικό.

Chorale Title	BWV	No	first and last chord name	
			chordXXXX	chordYYYY
Ach, Herr, lass dein lieb Engelein	149/7	-	4553	4707
Ach, ich habe schon erblicket	162/6	-	4708	4800
Alles ist an Gottes Segen	263	128	5181	5273
Aus tiefer Not schrei ich zu dir	38/6	10	5084	5180
Befiehl du deine Wege	270	286	98	188
Befiehl du deine Wege	271	367	280	370
Befiehl du deine Wege	135/6	-	4801	4891
Christ lag in Todesbanden	277	15	371	461
Christ lag in Todesbanden	158/4	261	462	552
Christ lag in Todesbanden	278	371	553	610
Christ, der du bist der helle Tag	230	273	5274	5352
Christus, der uns selig macht	245/37	113	611	768
Christus, der uns selig macht	283	198	769	901
Christus, der uns selig macht	245/15	81	5353	5477
Das walt Gott Vater und Gott Sohn	290	224	902	964
Durch Adams Fall ist ganz verderbt	18/5	100	5636	5734
Ein feste Burg ist unser Gott	80/8	273	965	1059
Gott des Himmels und der Erden	248/53	35	1060	1122
Herr Christ, der ein'ge Gottes Sohn	164/6	101	1487	1567
Herr Jesu Christ, du hoechstes Gut	113/8	294	1568	1650
Herr Jesu Christ, du hoechstes Gut	168/6	92	1651	1733
Herr, nun lass in Friede	337	190	1734	1826
Herr, wie du willst, so schick's mit mir	156/6	317	1827	1917
Herzlich lieb hab ich dich, o Herr	174/5	58	1918	2068
Herzlich tut mich verlangen	153/5	21	2069	2159
Herzliebster Jesu, was hast du verbrochen	244/46	105	2160	2242
Herzliebster Jesu, was hast du verbrochen	245/17	111	2243	2325
Herzliebster Jesu, was hast du verbrochen	245/3	59	2326	2408

<sup>70</sup> Ας σημειωθεί ότι οι αριθμοί BWV 244, 245 και 248 αναφέρονται στα Πάθη κατά Ματθαίον, στα Πάθη κατά Ιωάννην και στο Ορατόριο των Χριστουγέννων αντίστοιχα.

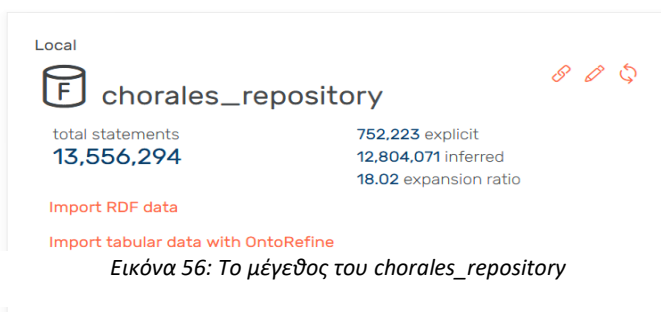


Hier ist das rechte Osterlamm	158/4	-	4892	4982
Ich ruf zu dir, Herr Jesu Christ	177/5	71	2409	2511
Jesu, meine Freude	64/8	138	2512	2608
Jesu, meine Freude	81/7	324	2706	2802
Jesu, meine Freude	358	356	2803	2899
Jesu, meine Freude	87/7	96	2900	2996
Jesum lass ich nicht von mir	124/6	-	4983	5083
Nimm von uns, Herr, du treuer Gott	101/7	292	2997	3091
Nun bitten wir den heiligen Geist	169/7	97	3092	3206
Nun komm, der Heiden Heiland	62/6	170	3207	3267
Nun ruhen alle Waelder	13/6	103	3268	3362
Nun ruhen alle Waelder	44/7	355	3363	3457
Nun ruhen alle Waelder	245/11	63	3458	3552
O grosser Gott von Macht	46/6	82	3553	3707
O Haupt voll Blut und Wunden	248/5	345	1123	1213
O Haupt voll Blut und Wunden	244/44	80	1214	1304
O Haupt voll Blut und Wunden	244/62	89	1305	1395
O Haupt voll Blut und Wunden	244/15	98	1396	1486
Vater unser im Himmelreich	102/7	110	3708	3802
Vater unser im Himmelreich	90/5	267	3803	3897
Was Gott tut, das ist wohlgetan	69a/6	293	3898	3976
Was mein Gott will, das g'scheh allzeit	244/25	115	3977	4071
Wer nur den lieben Gott laesst walten	197/10	62	5478	5548
Werde munter, mein Gemuete	154/3	233	4072	4164
Werde munter, mein Gemuete	55/5	95	4165	4259
Wie schoen leuchtet der Morgenstern	36(1)/5	86	4260	4370
Wir Christenleut	110/7	55	4371	4457
Wir Christenleut	40/3	321	5549	5635
Wo soll ich fliehen hin	148/6	25	4458	4552

Πίνακας 13.1: Τα 57 χορικά του *chorale\_set*

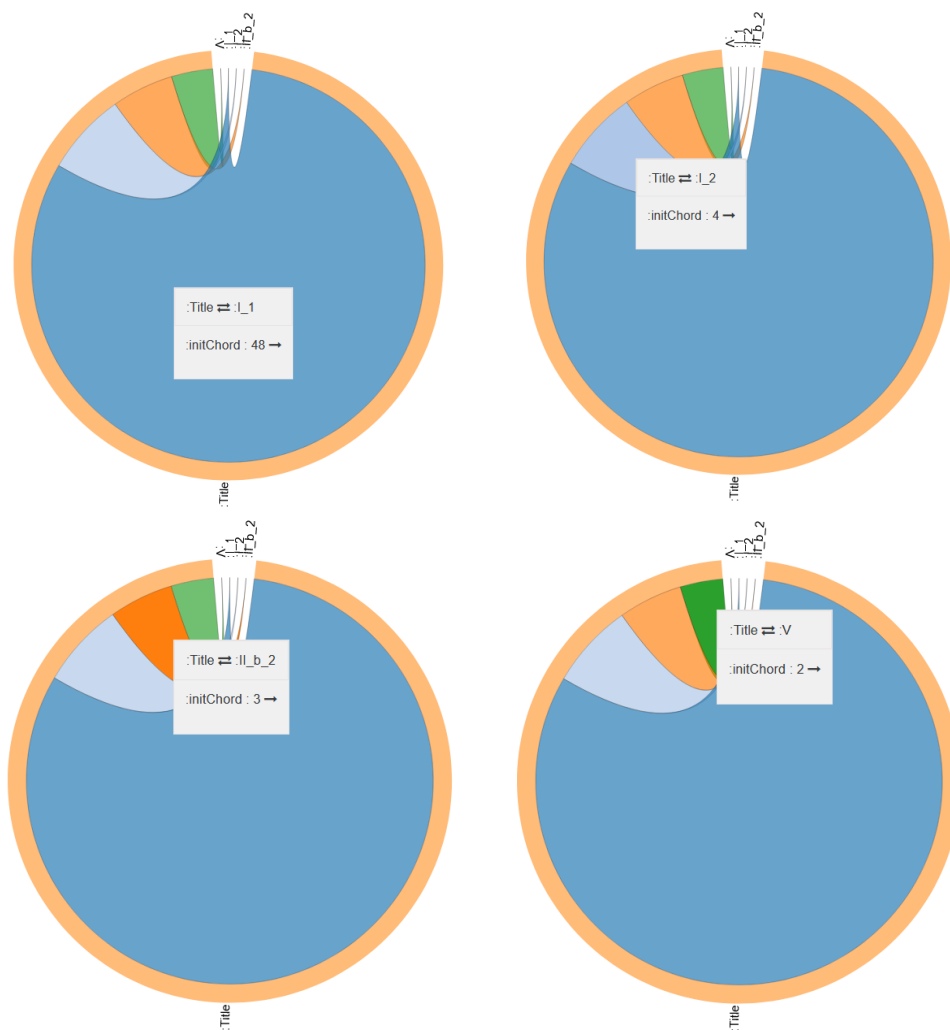
Όπως αναφέρθηκε στο *Κεφάλαιο 10.2*, το αποθετήριο *chorales\_repository* προέκυψε από την επεξεργασία των χορικών του *chorale\_set*, στη συνέχεια τον εμπλουτισμό της οντολογίας CoMC με τα χαρακτηριστικά για κάθε συγχορδία καθενός χορικού και τέλος τη μεταφορά όλων των δεδομένων σε

#### Active repository



ένα RDF triplestore με τη βοήθεια του GraphDB. Η *Εικόνα 56* δείχνει το συνολικό πλήθος των ισχυρισμών που προκύπτουν κατά το σχηματισμό του αποθετηρίου. Στην *Εικόνα 57* βλέπουμε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα του GraphDB αναφορικά με τις υπο-ομάδες στις οποίες κατατάσσονται οι εναρκτήριες συγχορδίες των 57 χορικών. Σε 48 από αυτά, η πρώτη συγχορδία είναι τύπου  $I_1$  (δηλ. τρίφωνη συγχορδία σε

ευθεία κατάσταση) και σε 4 από αυτά τύπου  $I_2$  (τρίφωνη συγχορδία σε αναστροφή). Από τα υπόλοιπα πέντε χορικά, τα 3 ξεκινούν με συγχορδία που ανήκει στην υπο-ομάδα  $IIb_2$ , δηλ. συγχορδία με τρίτονο – καταρχήν θα πρόκειται εδώ για μια συγχορδία μεθ’ εβδόμης σε κάποια αναστροφή<sup>71</sup>. Τέλος, τα υπόλοιπα 2 χορικά ξεκινούν με συγχορδία τύπου  $V$ . Θα αναμέναμε εδώ δύο αυξημένες τρίφωνες συγχορδίες, στην πραγματικότητα πρόκειται όμως για δύο από τις μάλλον σπάνιες εμφανίσεις συγχορδιών με λιγότερους από 3 διακριτούς φθόγγους (οι οποίες δεν ανήκουν σε κάποια υπο-ομάδα και για τις οποίες η κατηγοριοποίηση δεν δίνει ακριβή αποτελέσματα στην οντολογία).



Εικόνα 57: Οι εναρκτήριες συγχορδίες των 57 χορικών του *chorale\_set*

<sup>71</sup> Μπορούμε εύκολα να το επιβεβαιώσουμε βρίσκοντας, ως απάντηση σε ένα απλό ερώτημα SPARQL, ότι πρόκειται για τα χορικά με αριθμούς 10, 21 και 105 στην έκδοση Breitkopf. Έχουμε πραγματικά να κάνουμε με τρεις δεσπόζουσες μεθ’ εβδόμης, μία σε α’ και δύο σε γ’ αναστροφή.

## 13.8 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 8: ΚΩΔΙΚΑΣ ΡΥΘΜΟΝ 3 / OWLREADY2

```
!pip3 install -U owlready2 rdflib
# installing owlready2

!pip3 install py_midicsv
# installing module to convert MIDI files to csv format

from owlready2 import *

import py_midicsv as pm
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import numpy as np

hind = get_ontology("/content/drive/MyDrive/owl_comc_files/comc_bach.owl").load(reload_if_newer = True)
# loading Hindemith's Craft_of_Musical_Composition (CoMC) "bare" ontology, meaning no specific individuals

#####

CoMC class definitions

#####

#adding Python methods to comc.Interval, comc.Chord, comc.Title class definitions
#####

class Interval(hind.CofMC_Concept):

    # interval root is defined as high/low note of this interval, depending on respective type,
    # comc.RootHigh or comc.RootLow
    def root(self):
        if hind.RootLow in self.INDIRECT_is_a: return self.low
        elif hind.RootHigh in self.INDIRECT_is_a: return self.high
        else: return hind.pitch_undef # the default value for undefined pitch class in CoMC

    # matching intervals to Hindemith's Series 2, assigning integer values from 1 to 12
    def series_2(self):

        if hind.Octave in self.INDIRECT_is_a: return 1
        elif hind.Unison in self.INDIRECT_is_a: return 1
        elif hind.Perf5th in self.INDIRECT_is_a: return 2
        elif hind.Perf4th in self.INDIRECT_is_a: return 3
        elif hind.Maj3rd in self.INDIRECT_is_a: return 4
        elif hind.Min6th in self.INDIRECT_is_a: return 5
        elif hind.Min3rd in self.INDIRECT_is_a: return 6
        elif hind.Maj6th in self.INDIRECT_is_a: return 7
        elif hind.Maj2nd in self.INDIRECT_is_a: return 8
        elif hind.Min7th in self.INDIRECT_is_a: return 9
```

```

elif hind.Min2nd in self.INDIRECT_is_a: return 10
elif hind.Maj7th in self.INDIRECT_is_a: return 11
else: return 12 # for tritones as well as intervals between undefined notes

#####
class Chord(hind.CofMC_Concept):

    # storing max 6 notes of a chord in a Python list
    # NB: any undefined notes will be assigned to 'None' values in the list
    def notes (self):

        return [self.n1, self.n2, self.n3, self.n4, self.n5, self.n6]

    # intv_matrix returns a 2-dim array storing intra-chord intervals with their Owlready2 names
    # NB: intervals are automatically given fresh names by Owlready2, e.g. interval256, interval37 etc.
    # NB: lower triangular part of the array is made to mirror upper part
    def intv_matrix (self):

        nrnotes = len(self.notes())

        # initialize all cells with some dummy unison interval name
        dummy_unison= hind.Interval(low=hind.c, high=hind.c)
        mtx = [[dummy_unison for x in range(nrnotes)] for y in range(nrnotes)]

        # NB: some entries may equal to 'None'
        mtx[0][1] = hind.Interval(low=self.notes()[0], high=self.notes()[1])
        mtx[0][2] = hind.Interval(low=self.notes()[0], high=self.notes()[2])
        mtx[0][3] = hind.Interval(low=self.notes()[0], high=self.notes()[3])
        mtx[0][4] = hind.Interval(low=self.notes()[0], high=self.notes()[4])
        mtx[0][5] = hind.Interval(low=self.notes()[0], high=self.notes()[5])
        mtx[1][2] = hind.Interval(low=self.notes()[1], high=self.notes()[2])
        mtx[1][3] = hind.Interval(low=self.notes()[1], high=self.notes()[3])
        mtx[1][4] = hind.Interval(low=self.notes()[1], high=self.notes()[4])
        mtx[1][5] = hind.Interval(low=self.notes()[1], high=self.notes()[5])
        mtx[2][3] = hind.Interval(low=self.notes()[2], high=self.notes()[3])
        mtx[2][4] = hind.Interval(low=self.notes()[2], high=self.notes()[4])
        mtx[2][5] = hind.Interval(low=self.notes()[2], high=self.notes()[5])
        mtx[3][4] = hind.Interval(low=self.notes()[3], high=self.notes()[4])
        mtx[3][5] = hind.Interval(low=self.notes()[3], high=self.notes()[5])
        mtx[4][5] = hind.Interval(low=self.notes()[4], high=self.notes()[5])

        # mirroring lower triangular part to the upper part
        for i in range(nrnotes):
            for j in range(i+1,nrnotes):
                mtx[j][i] = mtx[i][j] # inverting indices

        return mtx

    # types_matrix returns a 2-dimensional array drawn from intv_matrix,
    # replacing interval names with respective types
    # NB: this method needs to run sync_reasoner()
    # in order to classify fresh individuals from intv_matrix as Maj2nd, Min3rd etc.

```

```

def types_matrix (self):

    nrnotes = len(self.notes())
    intvs = self.intv_matrix()
    # initialize all cells to a unison interval type
    types = [[hind.Unison for x in range(nrnotes)] for y in range(nrnotes)]

    sync_reasoner(debug=0)          # run to assign intra-chord intervals to respective types

    for i in range(nrnotes):
        for j in range(nrnotes):

            types[i][j] = intvs[i][j].is_a[0]
            # interval type (Maj3rd, Perf4th...) should appear as first element in the is_a list
            # NB: "comc.Interval" will be returned for any undefined intervals
    return types

# setting the frame (interval between bass and highest note) of a chord
def set_frame(self):

    notequeue = list(self.notes())

    bass = notequeue[0]
    melody = notequeue[-1]

    while melody == None:
        # for chords with less than 6 notes, must find the highest defined note from bass upwards
        notequeue.pop()
        melody = notequeue[-1]

    # sets hasFrame object property for some chord & assigns a name to respective frame
    d = hind.Interval(low=bass, high=melody, name=(self.name + '_frame'))
    self.hasFrame = d
    #returns None

# a boolean flag for 'chords' with less than 3 distinct pitch-classes,
# namely simple two-note intervals or note simultaneities containing octave doublings
# NB: Hindemith does not consider such simultaneities as chords in his CoMC
def few_notes (self):

    note_set = set(self.notes()) - {None}
    return (True if len(note_set) <= 2 else False)

#####
class Title (hind.CofMC_Concept):

    # transpose all notes in all chords of a Title
    def transpose (self,semitones=0):

        # if Title has already a transposedSemitones property asserted, store it in local variable trnsp,

```

```

# otherwise use function parameter 'semitones'
# NB: default for parameter 'semitones' signifies non-transposition
trnsp = semitones if self.transposedSemitones == None else (self.transposedSemitones + 12) % 12

# initializing to first chord of sequence
ch = self.initChord
tones = [hind.c, hind.db, hind.d, hind.eb, hind.e, hind.f, \
        hind.gb, hind.g, hind.ab, hind.a, hind.bb, hind.b]

while ch != hind.chord_nil:
# NB: all chord sequences should have comc.chord_nil as their final element

for i,note in enumerate(ch.notes()):
    if note == None: continue
    else:
        x = tones[0]
        while ((x != note) and (x not in note.INDIRECT_equivalent_to)):
            tones = tones[1:]
            tones.append(x) #...simulating a circular list
            x = tones[0]

# replacing original chord notes with the new transposed pitch-classes
if i==0: ch.n1 = tones[trnsp]
elif i==1: ch.n2 = tones[trnsp]
elif i==2: ch.n3 = tones[trnsp]
elif i==3: ch.n4 = tones[trnsp]
elif i==4: ch.n5 = tones[trnsp]
elif i==5: ch.n6 = tones[trnsp]

ch = ch.nch

#####

#####

CoMC / Python functions

#####

# providing chord data: root, guide-tone, sub-group and intra-chord interval types

def dict_(chord,mat1,mat2):
# parameter 'mat1': 2-dim array / intra-chord interval names,
# parameter 'mat2': 2-dim array / intra-chord interval types

nrnotes = len(chord.notes())

### STEP 1: find the 'best' interval in chord, i.e. with highest Series2 value
# NB: between similar Series2 intervals, preference is given to the lowest

# searching for some intra-chord interval to initialize local parameter best_intv
unison = hind.Interval(low=hind.c, high=hind.c)

```

```

best_intv = unison # initialize
for i in range(1,nrnotes):
    if mat2[0][i] not in {hind.Octave, hind.Unison}:
        best_intv = mat1[0][i]
        break
if best_intv == unison: chord.few_notes = True # only octaves and/or unisons found...

k,m = 0,1

for i in range(nrnotes):
    for j in range(nrnotes):
        cell = mat1[i][j]

        if cell.series_2() == 1 : continue
            # need to exclude prime diagonal elements, as well as octave doublings in chord

        elif cell.series_2() < best_intv.series_2():
            # update best_intv and respective indices in array
            best_intv = cell
            k,m = i,j
        else: continue

### STEP 2: find total sum of tritones in chord

nr_tritones = 0
set_of_intvtypes = set() # create a bin for all distinct interval-types in the chord

for i in range(nrnotes):
    for j in range(nrnotes):

        if mat2[i][j]==hind.Tritone: nr_tritones+=1

        # ignore prime diagonal elements
        if i==j: continue
        # otherwise, add interval-type in the bin
        else: set_of_intvtypes.add(mat2[i][j])
            # NB: enters "comc.Interval" for any undefined intervals

nr_tritones = nr_tritones//2
    # NB: tritones reckoned twice, for upper as well as lower triangular section

### STEP 3: classify chord in its respective sub-group (e.g. I2, IIb3 etc.)

# boolean flag for augmented triads, Group V, i.e. c - e - aflat
# chord contains only maj3rds, min6ths, octaves (or any undefined intervals)
group_v = set_of_intvtypes.issubset({hind.Maj3rd, hind.Min6th, hind.Unison, \
    hind.Octave, hind.Interval})
# NB: the definition below is slightly different from Hindemith's one in CoMC,
# makes computations easier while not considerably affecting results

# boolean flag for diminished chords, Group VI, i.e. c - eflat - fsharp
# chord contains only min3rds, maj6ths, octaves, tritones (or any undefined intervals)
group_vi = set_of_intvtypes.issubset({hind.Min3rd, hind.Maj6th, hind.Unison, hind.Octave, \

```

```

        hind.Interval, hind.Tritone})

if group_v or group_vi:
    # leaves root indeterminate, will depend on next chord's root / harmony considered "roving"
    chord_root = hind.undef
    root_pos = 0
    # NB: local parameter 'root_pos'=1 if root is in the bass, 2 for root in the tenor etc.
else:
    # finding the root of the chord, i.e. local parameter 'chord_root'
    chord_root = best_intv.root()
    # finding chord-root's position on the chord
    if hind.RootLow in best_intv.INDIRECT_is_a: root_pos = k+1    # root is lower note in interval
    elif hind.RootHigh in best_intv.INDIRECT_is_a: root_pos = m+1    # root is higher note in interval
    else: root_pos = 0

# classifying chord in Subgroups (vide Hindemith's nomenclature), in Groups A or B
# CASE 1: chord belongs to Group A
if nr_tritones == 0:
    # guide-tone is irrelevant, its position in the chord a dummy one
    guide_pos, guide_tone = 0, hind.undef

        # ...chord belongs to Subgroup V
    if group_v: group = "V"                # indeterminate root, augmented triads
    elif set_of_intvtypes.isdisjoint([hind.Maj2nd, hind.Min2nd, hind.Maj7th, \
        hind.Min7th]):
        # ...chord belongs to Subgroup I
        if root_pos == 1: group = "I1"      # chord-root and bass tone coincide
        else: group = "I2"                # chord-root in one of upper voices
    else:
        # ...chord belongs to Subgroup III
        if root_pos == 1: group = "III1"    # chord-root in the bass
        else: group = "III2"              # chord-root in an upper voice

# CASE 2: chord is in Group B
# NB: will also need to reckon with guide-tone and its exact position in the chord
else:

    if group_vi:
        # ...chord belongs to Subgroup VI
        group = "VI"                       # indeterminate root, diminished chords
    elif set_of_intvtypes.isdisjoint([hind.Min2nd, \
        hind.Maj7th]):
        # ...chord belongs to Subgroup II
        if hind.Maj2nd not in set_of_intvtypes:
            group = "IIa"
        else:
            if nr_tritones > 1: group = "IIb3"
            elif root_pos == 1: group = "IIb1"    # chord root in the bass
            else: group = "IIb2"                # chord root in an upper voice

        # ...chord belongs to Subgroup IV
    elif root_pos==1: group = "IV1"          # chord root in the bass
    else: group = "IV2"                    # otherwise

```



```

### STEP 4: calculate guide_tone
# NB: only applicable to Group B chords at this stage, see below for guide-tones in GroupA chords

if chord_root == hind.undef:          # ...that is, if chord is in Group VI
    # no guide-tone defined at this stage, issue depends on next chord
    guide_pos = 0
    guide_tone = hind.undef

else:
    guide_value = 12      # initialize local parameter 'guide_value'
    guide_pos = root_pos  # initialize local parameter 'guide_pos'

for i in range(nrnotes):
    for j in range(i+1,nrnotes):

        # consider all tritone/s in the chord
        if mat2[i][j] != hind.Tritone: continue
        else:

            # single out the best interval between notes belonging to some tritone
            # and the chord-root, then update guide_value and guide_pos accordingly
            if mat1[i][root_pos-1].series_2() in range(2,guide_value+1):
                guide_tone = chord.notes()[i]
                guide_pos = i+1
                guide_value = mat1[i][root_pos-1].series_2()
            if mat1[j][root_pos-1].series_2() in range(2,guide_value+1):
                guide_tone = chord.notes()[j]
                guide_pos = j+1
                guide_value = mat1[j][root_pos-1].series_2()

set_ = set_of_intvtypes - {hind.Interval}

return {"intra-chord interval types":('\n',set_), "root": [root_pos,chord_root], \
        "guide": [guide_pos,guide_tone], "grouping": group}

#####
# adding property assertions to some comc.Chord entity about its root and guide-tone
# NB: may return 'None' for root and/or guide-tone at this stage,
# harmony may 'de-rove' itself at a later stage; see below

def chord_info (ch):

    x1 = ch.intv_matrix()      # all intra-chord interval names
    x2 = ch.types_matrix()    # all intra-chord interval types
    d = dict_(ch,x1,x2)
    ch.hasDegree = d['root'][1] # setting hasDegree object property back into the ontology
    ch.hasGuideTone = d['guide'][1] # setting hasGuideTone object property back into the ontology

```

```

return {'root':ch.hasDegree, 'guide_tone': ch.hasGuideTone, 'grouping': d['grouping']}

#####
# de-roving attempts to set a chord-root on harmonies left roving up to this stage
# NB: denoting root of a roving chord depends on next chord in progression
# NB: harmonies will remain roving, if preceding yet another roving harmony

def derove_progression (title):

    ### STEP 1: store all intra-chord intervals of a whole progression
    # storing takes place in a Python list of 2-dimensional arrays, one list element for each chord
    # NB: progression is represented as an indexed list of chords, end element is comc.chord_nil

    # initialize local parameters
    progr_intvs = []
    elem = title.initChord # initialize to first chord in progression

    while elem != hind.chord_nil:
        # construct Python list 'progr_intvs' from intv_matrices for all chords in progression
        progr_intvs.append(elem.intv_matrix())
        elem = elem.nch # index from one chord to the next

    # need to classify intra-chord intervals
    # NB: action will take place in one go for all chords in progression
    sync_reasoner(debug=0)

    notes = []
    chords = []
    roots = []
    guides = []
    groups = []

    count = 0 # to denote position of a chord in progression

    rootintvs = []
    guideintvs = []

    elem = title.initChord # initialize to first chord in progression

    progr_types = []

    ### STEP 2: store all intra-chord interval types in a list
    while elem != hind.chord_nil:

        chords.append(elem)
        s = elem.notes()
        notes.append(s)

        # initialize all entries to unison
        elem_types = [[hind.Unison for x in range(len(s))] for y in range(len(s))]
        for i in range(len(s)):

```

```

for j in range(len(s)):
    # returns types for each chord in progression
    elem_types[i][j] = progr_intvs[count][i][j].is_a[0]

progr_types.append(elem_types)

### STEP 3: calculating distances between notes in this and root / guide-tone in next chord

d = dict_(elem, progr_intvs[count], elem_types)
roots.append(d['root'])
guides.append(d['guide'])
groups.append(d['grouping'])

# if chord in GroupA, guide-tone is set to coincide with chord root; see Hindemith CoMC
if groups[-1] in {'II', 'II2', 'III1', 'III2', 'V'}: guides[-1][1] = roots[-1][1]

if count: # ...to prevent applying following snippet to initial chord of progression
    # NB: local parameter 'count' has been initialized to 0

    # storing notes of previous chord in a list
    # NB: only asserted notes in previous chord considered, excluding 'None' values
    notes_prev = [notes[-2][i] for i in range(len(notes[-2])) if notes[-2][i] != None]

    # storing distances to root and guide-tone of next chord in respective lists
    dists_to_next_root = [hind.Interval(high=notes_prev[i],low=roots[-1][1]) for i in range(len(notes_prev))]
    dists_to_next_guide = [hind.Interval(high=notes_prev[i],low=guides[-1][1]) for i in range(len(notes_prev))]

    rootintvs.append(dists_to_next_root)
    guideintvs.append(dists_to_next_guide)

elem = elem.nch
count += 1

# again need to classify fresh intervals
sync_reasoner(debug=0)

### STEP 4: attempt to de-rove harmonies in progression

for index_ in range(1,count):

    if groups[index_-1] not in {'V','VI'}:
        # previous harmony is not roving anyway
        if guides[index_-1][1] == hind.undef:
            # chord is in Group A, therefore will make guide-tone coincide with chord-root
            guides[index_-1][1] = roots[index_-1][1]

    elif groups[index_] in {'V','VI'}:
        # current harmony is also roving, de-roving not applicable
        continue

    else:
        # proceed to de-rove previous harmony

```

```

chord1 = chords[index_-1] # ...previous chord
chord2 = chords[index_] # ...current chord
chord2_intvs = chord2.intv_matrix()
chord2_root = roots[index_][1]
chord2_guide = guides[index_][1]

previous_len = len(notes[index_-1])
notelist1 = [notes[index_-1][i] for i in range(previous_len) if notes[index_-1][i] != None]

srs_r = [rootintvs[index_-1][i].series_2() for i in range(len(notelist1))]
indx_r = srs_r.index(min(srs_r))

# local parameter 'rootrep_prev' denotes root representative of roving chord
rootrep_prev = [0, notelist1[indx_r] ]

srs_g = [guideintvs[index_-1][i].series_2() for i in range(len(notelist1))]

if min(srs_g) == 1:    indx_g = srs_g.index(min(srs_g))
else:                indx_g = srs_g.index(max(srs_g))

# local parameter 'guiderep_prev' denotes guide-tone representative of roving chord
guiderep_prev = [0, notelist1[indx_g] ]

# updating with root and guide-tone representatives
roots[index_-1] = rootrep_prev
guides[index_-1] = guiderep_prev

# returns final lists (viz. after de-roving) for roots, guide-tones and sub-groups
return {'degree progression': roots, \
        'guide tone progression': guides, \
        'harmonic fluctuation': groups}

#####
# in case chord has less than 3 distinct notes,
# making assertions about chord-root, guide-tone and subgroup

def few_notes_data (chord):

    note_set = set(chord.notes()) - {None}
    if len(note_set) == 2:
        # note simultaneity is actually an interval
        l = chord.n1
        note_set.remove(l)
        h = note_set.pop()

    else:
        # then chord is a single pitch-class, possibly doubled in several octaves
        l = note_set.pop()
        h = l

# create a fresh interval, then classify for its interval type

```

```

interval = hind.Interval (low=l, high=h)
sync_reasoner(debug=0)

note_set = set(chord.notes()) - {None}
root = interval.root()
note_set.remove(root)
other = note_set.pop()

# find Subgroup for 'reduced' chord, either I or IIb, further sub-index 1 or 2
# depending on root found in bass or higher voice respectively
if interval.series_2() == 12: # ...then the interval is a tritone
    guide = other
    subgroup = 'IIb1' if chord.n1 == root else 'IIb2'
    # local parameter 'tension' represents a metric of harmonic fluctuation,
    # its (real) values for different Subgroups are set arbitrarily
    tension = 1.3 if chord.n1 == root else 1.5
else:
    guide = root
    subgroup = 'I1' if chord.n1 == root else 'I2'
    tension = 0 if chord.n1 == root else 0.5

# NB!: Individuals will be named as comc_bach.xxxxxxx in Owlready2,
# therefore first 10 characters should be dropped
return (str(root)[10:],str(guide)[10:],subgroup,tension)

#####
# creating a Python list of intervals representing the framework of a progression

def framework (title):

    frmwrk = []

    elem = title.initChord # initialize to first chord in progression

    while elem != hind.chord_nil:

        elem.set_frame() # using relevant method for ontology class comc.Chord
        frmwrk.append(elem.hasFrame)

        elem = elem.nch

    return frmwrk

#####
# removes all fresh chords (named as 'comc.chordXXX') before saving ontology

def clear_chord():

    for x in hind.search(iri="*chord*"):
        destroy_entity(x)

```

```

print ("number of un-named chords in the ontology: ",len(hind.search(iri="*chord*")))

#####
# removes all fresh intervals (named as 'comc.intervalXXX') before saving ontology

def clear_interval():

    for x in hind.search(iri="*interval*"):
        destroy_entity(x)

    print ("number of un-named intervals in the ontology: ",len(hind.search(iri="*interval*")))

#####

#####

conversion from MIDI files / Python functions

#####

# assigning any given MIDI-pitch between c1=24 and b7=107 (7 full octaves)
# to respective pitch-class (comc.c,comc.db,..., comc.b) in the ontology

def MIDIpitch_to_pitchclass (pitch):

    if pitch in {'24','36','48','60','72','84','96'}: return hind.c
    # equivalent to pitch = 24 + 12*k + offset, for k=0,1,...,6 and offset=0
    elif pitch in {'25','37','49','61','73','85','97'}: return hind.db
    # same as above for offset=1, and so forth
    elif pitch in {'26','38','50','62','74','86','98'}: return hind.d
    elif pitch in {'27','39','51','63','75','87','99'}: return hind.eb
    elif pitch in {'28','40','52','64','76','88','100'}: return hind.e
    elif pitch in {'29','41','53','65','77','89','101'}: return hind.f
    elif pitch in {'30','42','54','66','78','90','102'}: return hind.gb
    elif pitch in {'31','43','55','67','79','91','103'}: return hind.g
    elif pitch in {'32','44','56','68','80','92','104'}: return hind.ab
    elif pitch in {'33','45','57','69','81','93','105'}: return hind.a
    elif pitch in {'34','46','58','70','82','94','106'}: return hind.bb
    elif pitch in {'35','47','59','71','83','95','107'}: return hind.b
    # offset=11
    else: return hind.pitch_undef

#####
# putting data from csv_string into 4 Python lists, one for each voice in the chorale
# NB: for 4-voice harmony, as in Bach chorales,
# input parameter 'csv_string' will be a list of 4 comma-separated strings,
# one such string per MIDI signal (viz. voice)

```

```

def quaver_voice (csv_string):

    S_list = []          # S_ for soprano
    A_list = []          # A_ for (contr-)alto etc.
    T_list = []
    B_list = []

    v = [B_list, T_list, A_list, S_list]

    for x in csv_string:

        row = x.split(sep=',') # splitting into separate entries in record
        row[1] = int(row[1])
        row[2] = row[2][5:-2]
        del row[-3]

        # driving each channel to its respective voice
        if x[0] == '2': v[3].append(row[1:-1])
        elif x[0] == '3': v[2].append(row[1:-1])
        elif x[0] == '4': v[1].append(row[1:-1])
        elif x[0] == '5': v[0].append(row[1:-1])

    voices = [None for i in range(4)] # initialize list of 4 voices

    # strip each voice list of two first introductory records,
    # convert MIDI-pitches to pitchclasses,
    # discard redundant 'Note_off_c' MIDI-signal records,
    # discard 'on' signals, also redundant

    for i in range(4):

        v[i] = v[i][2:-1]
        v[i] = [[x,y,MIDIpitch_to_pitchclass(z)] for [x,y,z] in v[i] if [x,y,z][1]!='on']
        voices[i] = [y[0::2] for y in v[i]]

    return voices

#####
# checking if voice sings a new note at some particular time
# if not, return the note already sounding
# NB: quaver will be considered as elementary time unit

def note_load (voice, time, current):

    if time != voice[0][0]: # no new note sounding at this quaver
        return current # returns note already in the list
    else: # voice sounds new note at this quaver
        current = voice[0][1]
        del voice[0] # drop current note from voice list

    if (voice != [] and (voice[0][0]%512 != 0)): del voice[0]

```

```

# in case of voice singing in semi-quavers, skip next entry
# NB: time=512 is the standard duration of a quaver in MIDI files,
# therefore any note/s between will not be recorded in CoMC ontology

return current      # return new note

#####
# assign notes 1-4 to individual representing tone simultaneity for each quaver
# then connect this chord to chord built on next quaver

def chorale_load_ontology (title, csv_str, starttime=0, endtime=-1, timestep=512):
# NB: timestep=512 is the default value for quaver in chorale MIDI files
# NB: default value of -1 for 'endtime' signifies going until end of 'title'

if endtime == -1:
    endtime = quaver_voice(csv_str)[3][-1][0]
    # NB: chorale will be considered ending at the last soprano note,
    # any subsequent part, e.g. eventual plagal cadence on 3 lower voices, will be ignored

chord = hind.Chord()      # create a new comc.Chord individual
title.initChord = chord  # assert it as the first chord in title

time = starttime

temp = quaver_voice(csv_str)

for i in range(4):
    while temp[i][0][0] != time: del temp[i][0]
    # drop initial records till desired 'starttime' (e.g. just after fermata in chorales)
basso = temp[0]
tenoro = temp[1]
contralto = temp[2]
soprano = temp[3]

#initialize current_notes to the first notes in respective voice lists
s_curr = soprano[0][1]
c_curr = contralto[0][1]
t_curr = tenoro[0][1]
b_curr = basso[0][1]

while time < endtime + timestep:
    chord.timeUnit = time // timestep + 1    # ...first chord should have timeUnit = 1
    if chord.timeUnit % 2 == 0: chord.isOnBeat = False
    else: chord.isOnBeat = True
    # setting data property 'isOnBeat' for chord

    # making property assertions for notes 1-4 in chord
    chord.n4 = note_load (soprano,time,s_curr) # adding assertion for soprano
    s_curr = chord.n4                          # updating current value for soprano
    chord.n3 = note_load (contralto,time,c_curr)# ibid for alto
    c_curr = chord.n3
    chord.n2 = note_load (tenoro,time,t_curr)  # ibid for tenor

```



```

t_curr = chord.n2
chord.n1 = note_load (basso,time,b_curr) # ibid for bass
b_curr = chord.n1

# making property assertion for next chord
if time == endtime:
    # reached end of desired music excerpt, terminate chord progression
    chord.nch = hind.chord_nil
    print (chord.timeUnit, chord, chord.isOnBeat, chord.n1, chord.n2, chord.n3, chord.n4, chord.nch)
else:
    nextchord = hind.Chord() # fresh individual for next chord in progression
    chord.nch = nextchord # link 'nextchord' to current chord
    print (chord.timeUnit, chord, chord.isOnBeat, chord.n1, chord.n2, chord.n3, chord.n4, chord.nch)
    chord = nextchord # ...if not reached end of progression, repeat while-loop

time += timestep
# return None

```

```
#####
```

CoMC harmonic analysis / Python functions

```
#####
```

```
#####
```

```
# updating chord individuals in the ontology with new data (incl. eventual de-roving)
```

```
def analyze_progression (title):
```

```
seq_data = derove_progression (title)
```

```
# matching grouping labels to comc sub-groups, then to tension values
```

```
group_alloc = list(zip(['I1', 'I2', 'IIa', 'IIb1', 'IIb2', 'IIb3', 'III1', 'III2', 'IV1', 'IV2', 'V', 'VI'],\
    [hind.I_1, hind.I_2, hind.II_a, hind.II_b_1, hind.II_b_2, hind.II_b_3,\
    hind.III_1, hind.III_2, hind.IV_1, hind.IV_2, hind.V, hind.VI],\
    [0, 0.5, 1, 1.3, 1.5, 1.7, 2, 2.4, 2.8, 3.2, 3.6, 4]))
```

```
data = []
```

```
indx = 0
```

```
elem = title.initChord # initialize to first chord in progression
```

```
while elem != hind.chord_nil:
```

```
    degree = seq_data['degree progression'][indx][1] # root of chord in progression
```

```
    guide = seq_data['guide tone progression'][indx][1] # guide-tone of same chord
```

```
    subgroup = seq_data['harmonic fluctuation'][indx] # grouping label of same chord
```

```
# adding comc.hasDegree, comc.hasGuideTone object property assertions, also updating Type
```

```
# with subgroup for each individual chord (after eventual de-roving) in progression
```

```
elem.hasDegree = degree
```

```

elem.hasGuideTone = guide
elem.is_a.append([g[1] for g in group_alloc if g[0] == subgroup][0])
tension = [g[2] for g in group_alloc if g[0] == subgroup][0]

if elem.few_notes():
    data.append(few_notes_data(elem))
else:
    # NB!: Individuals will be named as comc_bach.xxxxxxx in Owlready2,
    # therefore first 10 characters should be dropped
    data.append((str(degree)[10:],str(guide)[10:], subgroup, tension))

elem = elem.nch
indx += 1

return data

#####
# returning a tuple of Python lists, viz. chord info (from analyze_progression()),
# timeUnits and respective tensions, the latter two lists to act
# as x- and y-axis for the harmonic fluctuation plot

def plot_data (title):

    x_axis = []
    y_axis = []
    progression_data = analyze_progression(title)
    tensions_reversed = [g[3] for g in progression_data][::-1]

    ch = title.initChord
    # initialize local parameter 'indx' to that of first chord in progression
    indx = title.initChord.timeUnit
    # NB: timeUnit data property stores elementary rhythmic unit, generally quaver in Bach chorales

    while ch != hind.chord_nil:

        if indx != ch.timeUnit:
            # no new chord in this time unit, pad plot with tension from previous chord
            s = y_axis[-1]
            y_axis.append(s)
        else:
            # new chord in this time unit, update with new chord's tension
            s = tensions_reversed.pop()
            y_axis.append(s)
            ch = ch.nch

        x_axis.append(indx)
        indx+=1

    return progression_data, x_axis, y_axis

```

```

#####

#####

CoMC harmonic analysis / Main Python code

#####

clear_chord()
# in case comc ontology is already populated with previous individuals

clear_interval()
# in case comc ontology is already populated with previous individuals

sync_reasoner()
# always run on bare comc ontology before performing harmonic analysis

chorale_csv = pm.midi_to_csv("/content/drive/MyDrive/bach_chorales/bach_AusTieferNot_10_bwv38_6.mid")
# loading a Bach chorale (MIDI file) and parsing it into CSV format
chorale_csv

quaver_voice(chorale_csv)
# stripping csv format into 4 Python lists, one for each voice

chorale = hind.Title()

chorale_load_ontology (chorale,chorale_csv,starttime=20480)
# populating comc ontology with chords from the chorale excerpt, one fresh individual per quaver
# first n bars of 8 quavers (4/4 time) may repeat, therefore starttime = 8*n*512
# for Bach chorale "Aus tiefer Not schrei ich zu dir", n=5 => starttime = 40*512 = 20480

plotdata = plot_data(chorale)
plotdata      # ignites analyze_progression() with repeated sync_reasoner()
# returns a 3-element tuple containing root, guide-tone, subgroup, tension
# for each chord in progression as well as x,y axes for harmonic fluctuation plot

fig = plt.figure(figsize=(20, 4))
ax = fig.add_subplot(111)
ax.plot(plotdata[1], plotdata[2])
ax.set_ylim(0,5)
ax.set_yticks((1, 2, 3,6))
ax.set_yticklabels(('II', 'III', 'V'))

plt.show()

fig = plt.figure()

ax1 = fig.add_subplot (411)
ax1.plot (plotdata[1][0:39], plotdata[2][0:39], 'b-')
ax1.set_ylim(0,5)

```

```
ax1.set_yticks((1, 2, 3.6))
ax1.set_yticklabels(('II', 'III', 'V'))

ax2 = fig.add_subplot (412)
ax2.plot (plotdata[1][40:56], plotdata[2][40:56], 'b-')
ax2.set_ylim(0,5)
ax2.set_yticks((1, 2, 3.6))
ax2.set_yticklabels(('II', 'III', 'V'))

ax3 = fig.add_subplot (413)
ax3.plot (plotdata[1][60:76], plotdata[2][60:76], 'b-')
ax3.set_ylim(0,5)
ax3.set_yticks((1, 2, 3.6))
ax3.set_yticklabels(('II', 'III', 'V'))

ax4 = fig.add_subplot (414)
ax4.plot (plotdata[1][80:96], plotdata[2][80:96], 'b-')
ax4.set_ylim(0,5)
ax4.set_yticks((1, 2, 3.6))
ax4.set_yticklabels(('II', 'III', 'V'))

plt.subplots_adjust(hspace=0.5)

plt.show()

hind.save("/content/drive/MyDrive/owl_comc_files/done_comc/enriched_comc.owl")
# saving ontology freshly populated with chorale chord progression info
```