**Εισαγωγή**

Η αρμονική ανάλυση αποτελεί θεμελιώδη διαδικασία στη μουσική θεωρία, ερμηνεία και σύνθεση, καθώς επιτρέπει την κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των συγχορδιών, του τονικού πλαισίου και της μορφής ενός μουσικού έργου. Με την είσοδο των υπολογιστικών μεθόδων στο πεδίο της μουσικής, παρατηρείται εντεινόμενο ενδιαφέρον για την αυτοματοποιημένη ανάλυση, κατηγοριοποίηση και δημιουργία αρμονικών δομών με στόχο τόσο την υποστήριξη της μουσικής έρευνας όσο και την επέκταση των εργαλείων σύνθεσης (Temperley, 2004; Rohrmeier & Graepel, 2012).

Μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις στον τομέα της υπολογιστικής αρμονίας είναι η δημιουργία αναπαραστάσεων συγχορδιών και αρμονικών ακολουθιών που να είναι ταυτόχρονα ακριβείς, ευέλικτες και επεκτάσιμες σε διαφορετικά μουσικά ιδιώματα. Σε αυτό το πλαίσιο, το υπολογιστικό σύστημα Chameleon αποτελεί μία ιδιαίτερα καινοτόμο προσέγγιση, αξιοποιώντας τεχνικές πιθανοτικής μοντελοποίησης — και συγκεκριμένα, κρυφά μοντέλα Markov (Hidden Markov Models, HMMs) — για την αυτόματη εναρμόνιση δεδομένων μελωδιών βάσει πολυδιάστατων χαρακτηριστικών όπως η GCT (General Chord Type) αναπαράσταση (Cambouropoulos et al., 2014; Cambouropoulos et al., 2015).

Το Chameleon επιχειρεί όχι μόνο να επιτύχει λειτουργικά ικανοποιητική εναρμόνιση, αλλά και να αντανακλά τα ιδιώματα διαφόρων μουσικών παραδόσεων, εντάσσοντας την έννοια της υπολογιστικής δημιουργικότητας (computational creativity) σε ένα σύστημα που προσαρμόζεται στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε ύφους. Το έργο εντάσσεται στο ευρύτερο ερευνητικό πεδίο της τεχνητής μουσικής νοημοσύνης, συμβάλλοντας στην κατανόηση των μηχανισμών που διέπουν τη δημιουργία και την αντίληψη της αρμονίας (Pachet & Roy, 2001; Pearce & Wiggins, 2006).

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση των θεωρητικών βάσεων που στηρίζουν τη λειτουργία του Chameleon, ξεκινώντας από τη στατιστική μοντελοποίηση (Markov, HMM), περνώντας στην GCT αναπαράσταση και καταλήγοντας στην αξιολόγηση της ποιότητας των παραγόμενων αποτελεσμάτων στο πλαίσιο συγκεκριμένων αρμονικών ιδιωμάτων.

**Μουσικές και θεωρητικές βάσεις**

Η κατανόηση της αρμονικής επεξεργασίας σε υπολογιστικά συστήματα, όπως το Chameleon, προϋποθέτει την εις βάθος γνώση ορισμένων βασικών εννοιών της μουσικής θεωρίας, με κυρίαρχες την τονικότητα, τις συγχορδίες και τη συμβολική αναπαράσταση των ήχων μέσω διανυσμάτων pitch class. Αυτές οι έννοιες αποτελούν τη θεμελιώδη γλώσσα μέσω της οποίας μεταφέρεται η αρμονική πληροφορία στο υπολογιστικό επίπεδο.

Η τονικότητα (tonality) αποτελεί ένα σύστημα ιεραρχικά οργανωμένων διαστημάτων που περιστρέφονται γύρω από έναν τονικό άξονα (τονική). Η τονικότητα δεν περιορίζεται μόνο στην κλίμακα, αλλά και στην προσδοκία επαναφοράς στην τονική συγχορδία, δηλαδή στην ενότητα ή "έλξη" της μουσικής φράσης γύρω από έναν κεντρικό ήχο (Krumhansl, 2001). Οι έννοιες της τονικής σταθερότητας και της λειτουργικής αρμονίας είναι αναγκαίες για την αναγνώριση αρμονικών κατηγοριών σε παραδοσιακά και σύγχρονα ιδιώματα.

Η συγχορδία ορίζεται ως η ταυτόχρονη ηχητική εκφορά τριών ή περισσότερων διαφορετικών φθόγγων. Από αναλυτική σκοπιά, οι συγχορδίες μπορούν να μελετηθούν ως δομές pitch class – δηλαδή ως σύνολα από φθόγγους χωρίς συγκεκριμένο τονικό ύψος αλλά με αναφορά μόνο στη θέση τους μέσα στο οκτάβα (Forte, 1973). Αυτή η ιδιότητα διευκολύνει την αφαίρεση του μουσικού υλικού από συγκεκριμένες υλοποιήσεις και επιτρέπει συγκρίσεις βασισμένες σε μορφικά κριτήρια.

Η έννοια του pitch class αναφέρεται στην ταυτότητα ενός φθόγγου ανεξαρτήτως οκτάβας (π.χ. όλες οι νότες "C" αποτελούν την ίδια pitch class). Ένα pitch class vector (PCV) είναι μια μαθηματική αναπαράσταση που κωδικοποιεί ποια pitch classes περιέχονται σε ένα σύνολο ή σε μια συγχορδία, δίνοντας τη δυνατότητα για συγκριτική και στατιστική ανάλυση (Ames, 1989). Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη μουσική πληροφορική, καθώς παρέχει έναν υπολογίσιμο τρόπο προσδιορισμού ομοιοτήτων και αποστάσεων μεταξύ συγχορδιών ή αρμονικών πεδίων (Richmond, 1981).

Η γενίκευση των pitch class αναπαραστάσεων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη θεωριών όπως η pitch-class set theory, η οποία οργανώνει τις συγχορδίες με βάση το σχήμα τους, ανεξαρτήτως τονικού κέντρου. Αν και τέτοιες μέθοδοι αρχικά αναπτύχθηκαν για ανάλυση ατονικής μουσικής (Forte, 1973), η χρησιμότητά τους έχει πλέον επεκταθεί και στη μελέτη της παραδοσιακής αρμονίας, κυρίως όταν συνδυάζονται με υπολογιστικά μοντέλα (Quinn, 2001).

Στο πλαίσιο του Chameleon, οι έννοιες αυτές χρησιμοποιούνται με σκοπό τη μετατροπή της μελωδίας σε αρμονική πληροφορία, δηλαδή σε κατάλληλες συγχορδίες που να εξυπηρετούν λειτουργικά και αισθητικά την δεδομένη μελωδική γραμμή. Μέσω της κατηγοριοποίησης των pitch classes, του προσδιορισμού του σχετικού τονικού πλαισίου και της εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων, επιτυγχάνεται μια αυτοματοποιημένη και εννοιολογικά πλούσια προσέγγιση στην εναρμόνιση.

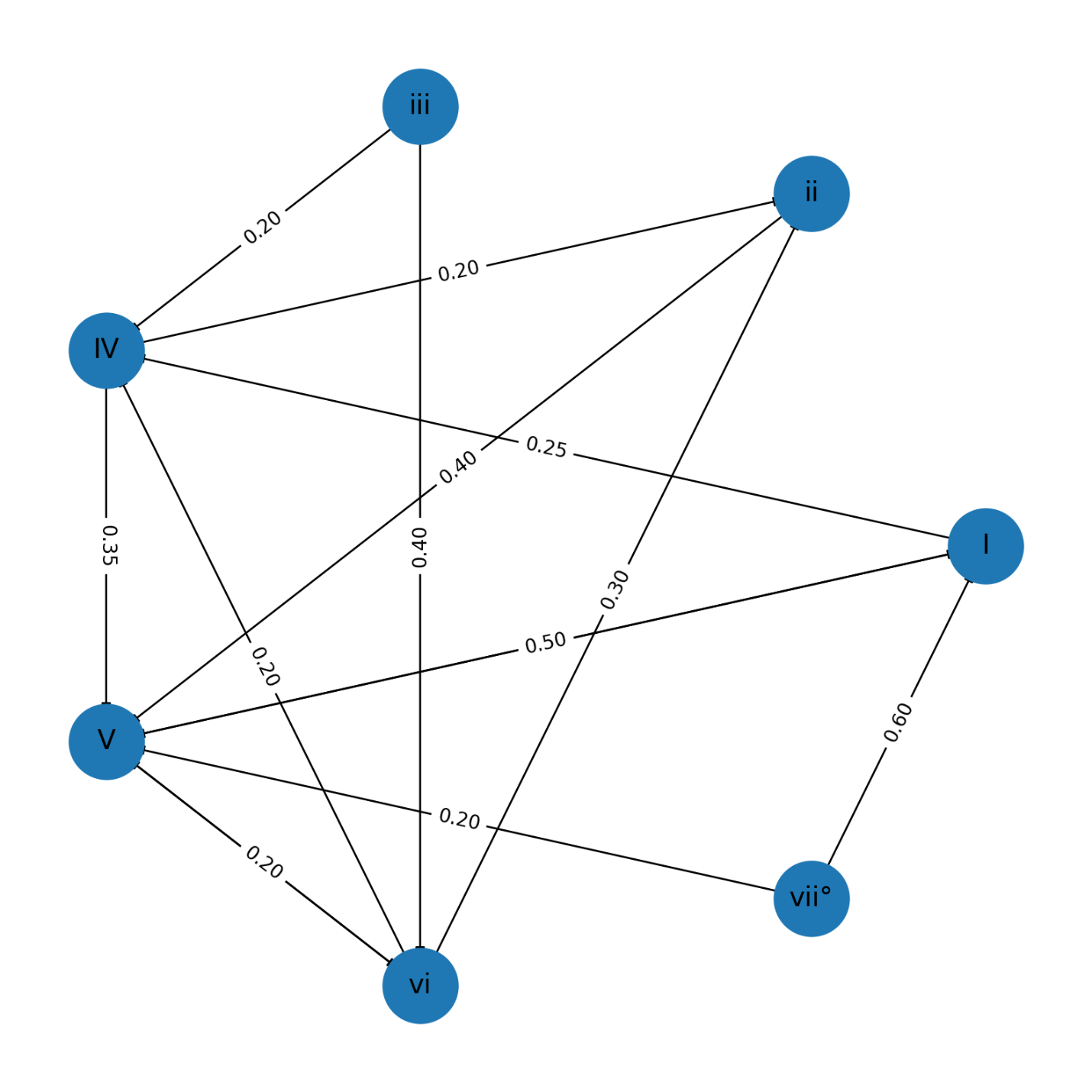
Καθίσταται σαφές ότι οι βασικές μουσικές έννοιες δεν είναι μόνο απαραίτητες για την ανθρώπινη ερμηνεία της μουσικής, αλλά και για τη λειτουργική μετάφρασή της σε δομές κατανοητές από τους αλγόριθμους. Η επιτυχία κάθε υπολογιστικού συστήματος που επιχειρεί εναρμόνιση ή ανάλυση, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια και τη λειτουργικότητα των θεωρητικών βάσεων στις οποίες στηρίζεται.

**Markov Models στη Μουσική**

Η θεωρία των Markov μοντέλων έχει μακρά και γόνιμη παρουσία στις εφαρμογές υπολογιστικής μουσικής, ιδιαίτερα στον τομέα της πρόβλεψης, ανάλυσης και σύνθεσης αρμονικών ακολουθιών. Τα μοντέλα Markov πρώτης τάξης βασίζονται στην παραδοχή ότι η πιθανότητα εμφάνισης ενός μουσικού γεγονότος εξαρτάται μόνο από την αμέσως προηγούμενη κατάσταση, καθιστώντας το ένα εργαλείο ιδιαίτερα κατάλληλο για την περιγραφή ακολουθιών συγχορδιών και μελωδιών (Allan & Williams, 2004; Herremans & Chew, 2017).

Στο πλαίσιο της μουσικής αρμονίας, κάθε συγχορδία μπορεί να θεωρηθεί ως μία διακριτή κατάσταση σε ένα πεπερασμένο σύνολο καταστάσεων. Η μετάβαση από τη μία συγχορδία στην επόμενη περιγράφεται από μία πιθανοτική μετάβαση (transition probability), η οποία καταγράφεται σε έναν πίνακα μετάβασης. Για παράδειγμα, σε ανάλυση έργων τονικής μουσικής, έχει παρατηρηθεί ότι η συγχορδία V έχει υψηλή πιθανότητα να ακολουθηθεί από την I, αντανακλώντας την κλασική λειτουργική σχέση τόνικης-δεσπόζουσας (Rohrmeier & Graepel, 2012).

Η προσέγγιση αυτή έχει εφαρμοστεί ευρύτατα στην πιθανοτική μοντελοποίηση συγχορδιακών ακολουθιών τόσο για αναλυτικούς όσο και για συνθετικούς σκοπούς. Σύγχρονες εργασίες έχουν εμπλουτίσει τα Markov μοντέλα με επιπλέον πληροφορίες, όπως μετρικά χαρακτηριστικά ή φωνητική διάταξη (voice leading), επιτρέποντας πιο μουσικά εύστοχες προβλέψεις (Whorley, 2013). Παράλληλα, η χρήση γραφοθεωρητικών μεθόδων πάνω σε Markov-based δίκτυα συγχορδιών έχει οδηγήσει σε εντοπισμό μοτίβων και δομικών επαναλήψεων σε μεγάλα μουσικά σύνολα (Conklin, 2013).



Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των Markov μοντέλων είναι η δυνατότητά τους να μάθουν από πραγματικά δεδομένα χωρίς την ανάγκη προκαθορισμένων θεωρητικών υποθέσεων. Μέσω εκμάθησης από corpus (data-driven learning), μπορούν να αποκτήσουν μια στατιστική "αίσθηση" της αρμονικής πρακτικής ενός συγκεκριμένου ύφους (π.χ. ρομαντική χορωδιακή μουσική, τζαζ ή ποπ).

Παρόλα αυτά, η βασική παραδοχή της πρώτης τάξης στα Markov μοντέλα – δηλαδή ότι η τρέχουσα κατάσταση εξαρτάται μόνο από την προηγούμενη – έχει χαρακτηριστεί ως περιοριστική σε ορισμένα μουσικά περιβάλλοντα όπου η αρμονική πορεία εξαρτάται από μακροχρόνιες σχέσεις. Ως απάντηση σε αυτό, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα ανώτερης τάξης ή συνδυαστικά μοντέλα, τα οποία λαμβάνουν υπόψη περισσότερες προηγούμενες συγχορδίες ή ενσωματώνουν ρυθμικές και μορφολογικές παραμέτρους (Raphael & Stoddard, 2004; Liang, 2016).

Επιπλέον, το γεγονός ότι τα Markov μοντέλα χειρίζονται μόνο παρατηρούμενες καταστάσεις τα καθιστά λιγότερο ευέλικτα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται αναγνώριση υποκείμενων, μη εμφανών δομών – όπως η λειτουργική κατηγορία μιας συγχορδίας ή ο ρόλος της στον αρμονικό κύκλο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα κρυφά μοντέλα Markov (Hidden Markov Models), τα οποία συζητούνται στην επόμενη ενότητα, προσφέρουν ανώτερη εκφραστικότητα.

Αξιοσημείωτη είναι η επιτυχία των Markov μοντέλων στη συγκεκριμενοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης σύνθετων συγχορδιών σε ύφη όπως η jazz, όπου η αρμονική γλώσσα είναι πλουσιότερη και ταυτόχρονα πιο προβλέψιμη λόγω φορμαλισμένων πρακτικών (Papadopoulos & Peeters, 2001). Σε αυτά τα συμφραζόμενα, η εφαρμογή Markov μοντέλων μπορεί να αποκαλύψει όχι μόνο ποια συγχορδία "έρχεται μετά", αλλά και με ποιον τρόπο αυτή η εναλλαγή στηρίζεται στατιστικά στο είδος.

**Hidden Markov Models και εφαρμογές**

Τα Hidden Markov Models (HMMs) αποτελούν μια εξέλιξη των απλών Markov μοντέλων, προσφέροντας αυξημένη εκφραστικότητα και δυνατότητα αναπαράστασης αφανών (μη παρατηρήσιμων) καταστάσεων. Σε αντίθεση με τα κλασικά Markov μοντέλα, στα οποία κάθε κατάσταση αντιστοιχεί σε μια άμεσα παρατηρήσιμη μονάδα (π.χ. συγχορδία), τα HMMs εισάγουν ένα ενδιάμεσο επίπεδο: τις κρυφές καταστάσεις (hidden states), οι οποίες δεν παρατηρούνται άμεσα αλλά επηρεάζουν την πιθανότητα εμφάνισης των παρατηρούμενων δεδομένων (Rabiner, 1989).

Αυτή η αρχιτεκτονική είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για τη μοντελοποίηση μουσικών φαινομένων, στα οποία η επιφάνεια του μουσικού κειμένου (π.χ. η μελωδία ή οι συγχορδίες) αντανακλά βαθύτερες λειτουργικές ή δομικές σχέσεις που δεν είναι άμεσα εμφανείς. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η λειτουργική κατηγοριοποίηση των συγχορδιών (π.χ. τονική, δεσπόζουσα, υποδεσπόζουσα), η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως μια αφανούς φύσης μεταβλητή που καθορίζει τη ροή της αρμονικής ακολουθίας (Boulanger-Lewandowski et al., 2012).

Στην πράξη, τα HMMs χρησιμοποιούνται για την πιθανοτική ανάθεση λειτουργικών ρόλων σε συγχορδίες ή μελωδικές φράσεις, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις πιθανότητες μετάβασης μεταξύ των κρυφών καταστάσεων όσο και τις πιθανότητες εκπομπής (emission probabilities), δηλαδή το πόσο πιθανό είναι ένα συγκεκριμένο παρατηρήσιμο (π.χ. συγχορδία) να προκύψει από μια δεδομένη κρυφή κατάσταση (Pardo & Birmingham, 2002). Η αλυσίδα Viterbi, που ενσωματώνεται στα περισσότερα HMMs, επιτρέπει την ανάκτηση της πιθανότερης ακολουθίας κρυφών καταστάσεων, γεγονός που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την αρμονική ανάλυση.

Μια σημαντική επέκταση των HMMs στη μουσική είναι η ενσωμάτωση μελωδικών δεδομένων ως βάρη (weights) που επηρεάζουν τις πιθανότητες μετάβασης ή εκπομπής. Το υπολογιστικό σύστημα Chameleon, για παράδειγμα, χρησιμοποιεί τη νότη της μελωδίας σε κάθε χρονική στιγμή ως πληροφορία που ενισχύει ή αποδυναμώνει τη συνοχή μιας αρμονικής πρότασης, λειτουργώντας ως πρόσθετο φίλτρο επιλογής συγχορδιών. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δεν εξετάζει μόνο την πιθανότητα μετάβασης από μια συγχορδία στην επόμενη, αλλά και το πόσο “συμβατή” είναι η συγχορδία με τη μελωδική γραμμή που συνοδεύει (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2023).

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην αντίληψη της διμερούς σχέσης μεταξύ μελωδίας και αρμονίας, όπου η μελωδία δεν αποτελεί απλώς αποτέλεσμα των συγχορδιών αλλά δρα και ως περιοριστικός παράγοντας που καθοδηγεί την αρμονική επιλογή (Westergaard, 1975). Η ενσωμάτωση αυτής της πληροφορίας στο HMM καθιστά δυνατή την παραγωγή πιο μουσικά πειστικών εναρμονίσεων, καθώς το σύστημα "μαθαίνει" να συντονίζει τις προτεινόμενες συγχορδίες με τη μελωδική ροή.

Επιπλέον, πρόσφατες έρευνες έχουν εστιάσει στην εφαρμογή παραμετρικών ή βαθύτερων παραλλαγών HMMs, όπως τα Dynamic Bayesian Networks (DBNs) και τα Hierarchical HMMs, τα οποία μπορούν να μοντελοποιήσουν πολλαπλά επίπεδα μουσικής δομής, όπως φράσεις, υποενότητες και φόρμες (Olarewaju et al., 2020; Ji et al., 2023). Η ικανότητα αυτών των μοντέλων να ενσωματώνουν χρονική πληροφορία σε διάφορες χρονικές κλίμακες τους καθιστά ιδανικούς για μουσικά έργα με πολύπλοκη μορφολογική ανάπτυξη.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η χρήση HMMs σε διασταυρούμενα μουσικά ιδιώματα, όπως πολυφωνικά παραδοσιακά τραγούδια ή τζαζ, όπου η αρμονική γλώσσα διαφέρει σημαντικά από τα δυτικά κλασικά πρότυπα. Σε αυτά τα περιβάλλοντα, η εκπαιδευσιμότητα των HMMs από μουσικά corpora επιτρέπει την προσαρμογή του μοντέλου σε συγκεκριμένες πρακτικές χωρίς την ανάγκη a priori θεωρητικοποίησης (Yeh et al., 2021).

Αξιοσημείωτο είναι ότι, παρόλο που τα HMMs είναι από τη φύση τους γραμμικά, με σωστή παραμετροποίηση μπορούν να ενσωματώσουν πληροφορία για ρυθμικές, τονικές ή ακόμα και φωνητικές (voice-leading) παραμέτρους, προσδίδοντας τους πολυτροπική ικανότητα ανάλυσης και σύνθεσης (Hadjeres et al., 2017).

**Το Υπολογιστικό Σύστημα Chameleon**

Το Chameleon αποτελεί ένα σύστημα αυτόματης εναρμόνισης μελωδιών, το οποίο συνδυάζει στατιστικά μοντέλα, αρμονική αναπαράσταση και έννοιες υπολογιστικής δημιουργικότητας με στόχο την παραγωγή αρμονιών που είναι συνεπείς με διαφορετικά μουσικά ιδιώματα. Το όνομά του αντικατοπτρίζει τον προσαρμοστικό του χαρακτήρα, καθώς μπορεί να τροποποιεί τη συμπεριφορά του ανάλογα με το μουσικό ύφος, χρησιμοποιώντας στατιστικά μοντέλα που εκπαιδεύονται σε επιλεγμένα αρμονικά corpora (Raczyński et al., 2013).

Η βασική αρχιτεκτονική του Chameleon στηρίζεται στην εφαρμογή Hidden Markov Models (HMMs), στα οποία οι κρυφές καταστάσεις αντιστοιχούν σε συγχορδίες σε μορφή General Chord Type (GCT) και τα παρατηρούμενα δεδομένα είναι οι νότες της μελωδίας. Η χρήση GCT παρέχει μια γενική και εκφραστική μορφή αναπαράστασης των συγχορδιών, ανεξάρτητη από συγκεκριμένο ιδίωμα, επιτρέποντας τη μοντελοποίηση τόσο τονικής όσο και μη τονικής αρμονίας (Cambouropoulos et al., 2015).

Η ροή λειτουργίας του συστήματος περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια. Πρώτον, εισάγεται η μελωδία προς εναρμόνιση, σε μορφή pitch sequence. Στη συνέχεια, γίνεται ανάλυση τονικού πλαισίου ή προσδιορισμός tonal center μέσω context-sensitive μεθόδων. Το τρίτο στάδιο αφορά την κατασκευή του HMM, στο οποίο κάθε πιθανή GCT συγχορδία σε κάθε χρονική στιγμή αποτελεί πιθανή κρυφή κατάσταση. Οι πιθανότητες μετάβασης μεταξύ των συγχορδιών (transition probabilities) και οι πιθανότητες εκπομπής της μελωδικής νότες από κάθε συγχορδία (emission probabilities) υπολογίζονται βάσει εκπαιδευτικών δεδομένων. Τέλος, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Viterbi για την επιλογή της βέλτιστης ακολουθίας συγχορδιών που εναρμονίζουν τη δοθείσα μελωδία.

Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του Chameleon είναι ότι υποστηρίζει πολυστυλιστική λειτουργία. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης διαφορετικών αρμονικών corpus (όπως τα Bach Chorales, η παραδοσιακή μουσική της Ηπείρου ή μουσικά δεδομένα jazz/pop), στα οποία βασίζεται η στατιστική εκπαίδευση των HMMs. Η στατιστική γνώση που αποκτά το σύστημα είναι άμεσα συνδεδεμένη με το μουσικό ύφος: οι πιθανότητες μετάβασης και εκπομπής διαφέρουν αισθητά ανάλογα με το idiom, επιτρέποντας στο Chameleon να μιμηθεί το "στυλ" του κάθε corpus (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2016).

Όσον αφορά τα δεδομένα εισόδου, το Chameleon δέχεται ως κύριο input μία μελωδική γραμμή σε MIDI format ή pitch sequence, και – όπου απαιτείται – τονικότητα (key signature). Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει με ή χωρίς παροχή αρμονικού πλαισίου (δηλαδή μπορεί να επιλέξει τονικό κέντρο μόνο του ή να το δεχθεί ως δεδομένο). Η έξοδος του συστήματος είναι μία ακολουθία συγχορδιών σε GCT μορφή, που μπορεί στη συνέχεια να μεταφραστεί σε οποιαδήποτε τυπική συμβολική μορφή (π.χ. Roman numeral, lead sheet, κ.λπ.) ή να χρησιμοποιηθεί για σύνθεση συνοδευτικής ύλης.

Επιπλέον, το Chameleon μπορεί να συμπεριλάβει εσωτερικούς περιορισμούς (constraints), όπως συγκεκριμένες συγχορδίες σε επιλεγμένες χρονικές στιγμές, ή αποκλεισμό συγκεκριμένων τύπων συγχορδιών, επιτρέποντας έτσι τη συνεργατική δημιουργία (co-creative music generation). Αυτή η ιδιότητα έχει χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο ερευνητικών προσεγγίσεων της υπολογιστικής δημιουργικότητας, όπου το σύστημα δεν παράγει απλώς στατιστικά ορθές εναρμονίσεις, αλλά εξερευνά δημιουργικές και εναλλακτικές μουσικές επιλογές (Colton, 2012).

Η πολυμορφική σχεδίαση του Chameleon επιτρέπει τη χρήση του τόσο ως εργαλείο αυτόματης εναρμόνισης όσο και ως ερευνητική πλατφόρμα για τη μελέτη των διαφορών μεταξύ μουσικών ιδιωμάτων. Με δυνατότητα ενσωμάτωσης νέων δεδομένων και αναπροσαρμογής των πιθανοτικών παραμέτρων, το σύστημα είναι εξαιρετικά επεκτάσιμο και κατάλληλο για εφαρμογές σε μη δυτικά μουσικά πλαίσια ή διαπολιτισμικά σύνολα (Zacharakis et al., 2018).

**General Chord Type (GCT) – Αναλυτικά**

Η αναπαράσταση της αρμονίας σε υπολογιστικά συστήματα είναι μία από τις πιο σύνθετες προκλήσεις της μουσικής πληροφορικής. Η ανάγκη για μία ευέλικτη, στιλιστικά ανεξάρτητη και υπολογιστικά διαχειρίσιμη μορφή αναπαράστασης οδήγησε στην ανάπτυξη του μοντέλου General Chord Type (GCT). Η GCT αποτελεί μια συμβολική μέθοδο αναπαράστασης συγχορδιών που βασίζεται στην έννοια της ανάλυσης pitch class, ενώ ενσωματώνει πληροφορία για τον τονικό άξονα (root), την αρμονική βάση (base) και τις επεκτάσεις (extensions) της συγχορδίας (Cambouropoulos et al., 2015).

Στο επίκεντρο της GCT βρίσκεται η pitch class set theory, η οποία θεωρεί τις νότες ως μέλη μιας κυκλικής δομής 12 φθόγγων (pitch classes), ανεξάρτητα από την οκτάβα. Μια συγχορδία όπως η C major ([C–E–G]) μετατρέπεται στο pitch class set [0, 4, 7]. Αυτή η απλοποίηση επιτρέπει τον συγκριτικό και μορφολογικό χειρισμό των συγχορδιών, απομονώνοντας τις σημαντικές τονικές σχέσεις χωρίς να επηρεάζονται από τη φωνητική διάταξη ή τη θέση στο φθογγικό ύψος (Richmond, 1981; Quinn, 2001).

Το GCT σύστημα χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες για να εντοπίσει το μεγαλύτερο υποσύνολο συμφωνικών διαστημάτων σε κάθε συγχορδία, δηλαδή αυτά που θεωρούνται “αρμονική βάση”. Τα υπόλοιπα μέλη της συγχορδίας (π.χ. 9ες, 11ες, αλλοιώσεις) καταγράφονται ως επεκτάσεις, προσαρτημένες στη βάση. Η χρήση δυαδικού διανύσματος συμφωνίας (consonance vector) επιτρέπει την ελαστικότητα του μοντέλου σε διαφορετικά ιδιώματα, καθώς τα κριτήρια για το τι θεωρείται “συμφωνία” μπορούν να τροποποιούνται αναλόγως (Cambouropoulos & Kaliakatsos-Papakostas, 2021).

Το root καθορίζεται ως ο χαμηλότερος φθόγγος της βάσης της συγχορδίας, δηλαδή του μέρους που αποτελείται αποκλειστικά από συμφωνικά διαστήματα. Το base είναι το σύνολο αυτών των pitch classes, ενώ το extension περιλαμβάνει τους υπόλοιπους φθόγγους που δημιουργούν μη συμφωνικά διαστήματα (δηλαδή “ένταση”) σε σχέση με τη βάση. Για παράδειγμα, η συγχορδία C7 (C–E–G–Bb) αναλύεται ως:

* Root: C (pitch class 0)
* Base: [0, 4, 7]
* Extension: [10] (δηλαδή Bb)

Η GCT αναπαράσταση της παραπάνω συγχορδίας είναι [0, [0, 4, 7, 10]], όπου το πρώτο 0 υποδηλώνει τη θέση του root σε σχέση με την τονική κλίμακα. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη συστηματική και μουσικά σημαίνουσα σύγκριση συγχορδιών, ακόμη και όταν αυτές παρουσιάζονται με προσθήκες ή παραλείψεις φθόγγων (Cambouropoulos & Kaliakatsos-Papakostas, 2014).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της GCT είναι η ιδιωματική της ανεξαρτησία. Η ίδια συγχορδία μπορεί να ερμηνευτεί με διαφορετικό τρόπο σε διαφορετικά μουσικά πλαίσια, αλλά η GCT επιτρέπει την ενιαία αναπαράσταση χωρίς την απώλεια πληροφορίας. Στην κλασική τονική μουσική, για παράδειγμα, η συγχορδία [0, 4, 7] ερμηνεύεται ως “I” ή “V”, ανάλογα με τη θέση της στην τονικότητα. Η GCT δεν αποδίδει λειτουργικό χαρακτηρισμό, αλλά καταγράφει τη δομή της συγχορδίας, αφήνοντας τον αλγόριθμο να καθορίσει τη λειτουργία μέσω της στατιστικής ανάλυσης μεταβάσεων.

Σε atonal ή modal μουσική, η GCT μπορεί να λειτουργήσει χωρίς προκαθορισμένη τονική βάση. Όταν όλες οι διαστηματικές σχέσεις θεωρούνται συμφωνικές (consonance vector = [1,1,...,1]), η GCT αναπαράγει τις λεγόμενες “normal orders” της pitch-class set theory (Forte, 1973), κάτι που την καθιστά κατάλληλη και για την ανάλυση της μουσικής του 20ού αιώνα, καθώς και παραδοσιακών μη-δυτικών ιδιωμάτων (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2014).

Συγκεκριμένα, στην ανάλυση παραδοσιακής πολυφωνίας (όπως στην Ήπειρο), η GCT έχει αποδειχθεί χρήσιμη, καθώς επιτρέπει την προτυποποίηση μη τονικών συμφωνιών και την μοντελοποίηση της στατιστικής τους συνέχειας με HMM (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2018). Αντίστοιχα, σε jazz ή pop μουσική, η GCT μπορεί να χειριστεί συγχορδίες με αλλοιώσεις και επεκτάσεις (π.χ. maj7, 13#11), παρέχοντας σταθερή συμβολική βάση για στατιστική εκμάθηση.

Ένα άλλο βασικό πλεονέκτημα της GCT είναι η δυνατότητα ομαδοποίησης (grouping) συγχορδιών σε λειτουργικές κατηγορίες. Χάρη στην κοινή δομή τους (π.χ. ίδιες βάσεις με διαφορετικές επεκτάσεις), διαφορετικές εκδοχές μιας συγχορδίας μπορούν να θεωρηθούν ως μέλη της ίδιας κατηγορίας. Για παράδειγμα, οι GCTs [0, [0, 4, 7]], [0, [0, 4, 7, 10]], και [0, [0, 4]] μπορούν να ενωθούν υπό τον τίτλο "tonic major".

Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία ενοποιημένων μοντέλων λειτουργικής ανάλυσης ανεξαρτήτως παρουσιαστικών διαφορών. Τέτοιες πρακτικές έχουν εφαρμοστεί στην ανάλυση Bach Chorales, οδηγώντας σε στατιστικά συνεπείς κατανομές συγχορδιών σε λειτουργικές κατηγορίες (tonic, dominant, subdominant) βάσει της GCT τους (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2023).

Παρά τη σημαντική ευελιξία της GCT, υπάρχουν περιπτώσεις όπου προκύπτουν αμφισημίες – κυρίως με συμμετρικές συγχορδίες (όπως diminished 7th) ή συγχορδίες με ελλιπείς φθόγγους, όπου η βάση μπορεί να μην αναγνωριστεί σωστά. Η ένταξη πληροφορίας για φωνητική διάταξη ή βαθύτερο συμφραζόμενο (π.χ. προηγούμενες συγχορδίες) θα μπορούσε να ενισχύσει την ακρίβεια των ερμηνειών, κάτι που αποτελεί αντικείμενο ενεργού έρευνας (Ji et al., 2023).

**Αξιολόγηση της GCT Αναπαράστασης (Kostka–Payne Dataset, αποτελέσματα)**

Η αξιολόγηση της αξιοπιστίας και της λειτουργικότητας της General Chord Type (GCT) αναπαράστασης αποτελεί κρίσιμο βήμα στην τεκμηρίωση της χρηστικότητάς της σε εφαρμογές αρμονικής ανάλυσης και αυτόματης εναρμόνισης. Μία από τις πληρέστερες μελέτες αξιολόγησης της GCT πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Kostka–Payne dataset, ενός καθιερωμένου μουσικοθεωρητικού corpus που περιλαμβάνει χορικά αποσπάσματα αναλυμένα σύμφωνα με τη ρωμαϊκή αριθμητική ονοματολογία (roman numeral analysis) (Temperley & Marvin, 2008).

Το συγκεκριμένο dataset βασίζεται σε παραδείγματα από το βιβλίο “Tonal Harmony” των Stefan Kostka και Dorothy Payne και περιλαμβάνει 46 αποσπάσματα με συνολικό πλήθος 919 συγχορδιών, με καθορισμένες αναλύσεις σε roman numerals, χωρίς όμως πληροφορία για αναστροφές ή φωνητική διάταξη. Η χρήση του ως μέτρο σύγκρισης κρίνεται κατάλληλη λόγω της αποδεδειγμένης εγκυρότητας της ανάλυσης και της επικέντρωσής του στην κοινή πρακτική τονική αρμονία (Quinn, 2019; Radicioni & Esposito, 2010).

Η μέθοδος αξιολόγησης της GCT στη μελέτη των Cambouropoulos et al. (2015) συνίσταται στη σύγκριση της ετικέτας GCT κάθε συγχορδίας με την αντίστοιχη ρωμαϊκή ανάλυση. Λαμβάνοντας υπόψη μόνο το τονικό κέντρο και το είδος της συγχορδίας (χωρίς αναστροφές), κάθε GCT ετικέτα μεταφράζεται σε ρωμαϊκή συμβολή, και καταγράφεται ο βαθμός ταύτισης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ποσοστό επιτυχούς αντιστοίχισης 92.16%, γεγονός που υποδεικνύει τη σημαντική επάρκεια του συστήματος GCT στη συστηματική περιγραφή αρμονικών δεδομένων.

Αν και η συνολική απόδοση ήταν υψηλή, παρουσιάστηκαν ορισμένες συστηματικές αστοχίες στην αναπαράσταση συγκεκριμένων τύπων συγχορδιών. Οι κυριότερες κατηγορίες σφαλμάτων μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

* Συμμετρικές συγχορδίες (π.χ. diminished 7th): Οι συγχορδίες [0, 3, 6, 9] συχνά οδηγούν σε αμφισημίες ως προς το ποιος φθόγγος θεωρείται root, αφού όλα τα μέλη είναι ισοδύναμα από πλευράς δομής. Η GCT αποδίδει root βάσει της εσωτερικής ανακατανομής pitch classes, γεγονός που οδηγεί σε διαφοροποιήσεις σε σχέση με την ιεραρχική λογική της ρωμαϊκής ανάλυσης (MacRitchie & Milne, 2017).
* Ημιμειωμένες συγχορδίες ([0, 3, 6, 10]): Ερμηνεύτηκαν εσφαλμένα ως συγχορδίες minor add6 ([0, 3, 7, 9]), με αποτέλεσμα συγχορδίες όπως viiø7 να αποδίδονται ως ivadd6 – κάτι που παρατηρείται συστηματικά όταν η τρίτη της συγχορδίας είναι απούσα ή αδύναμα διατυπωμένη στο pitch set.
* Ελλιπείς συγχορδίες: Σε περιπτώσεις όπου λείπει σημαντικό μέλος της συγχορδίας (π.χ. η τρίτη ή η πέμπτη), η GCT πολλές φορές αποδίδει λάθος root ή παρανοεί τη λειτουργία της συγχορδίας. Για παράδειγμα, συγχορδία V7 χωρίς τρίτη μπορεί να αναλυθεί ως συγχορδία με ριζική ασυμβατότητα (Randolph, 2023).
* Pedal notes: Οι pedal tones, δηλαδή οι σταθεροί φθόγγοι στο μπάσο, μπορεί να επηρεάσουν την ερμηνεία του root στην GCT αν δεν αποκλείονται από την ανάλυση. Αυτό οδηγεί σε σύγχυση ως προς τη βασική δομή της συγχορδίας, κυρίως όταν οι pedal notes δεν συνδέονται λειτουργικά με τη συγχορδία (Gillick et al., 2010).
* Sus συγχορδίες ([0, 5, 7]): Η ανάλυση των sus4 συγχορδιών ως quartal ή επεκτάσεις με δευτερεύοντες φθόγγους (π.χ. [0, 5, 10]) ανέδειξε αδυναμία αναγνώρισης της λειτουργικής σχέσης της έκτης με την τονική βάση.

Συγκεκριμένες περιπτώσεις δείχνουν τη δύναμη αλλά και τους περιορισμούς της GCT:

* [G–B–D–F] αναγνωρίζεται ως [7, [0, 4, 7, 10]] → σωστά V7 στη C major.
* [F–A–D] (D minor 6 χωρίς root ΙΙ6) μπορεί να αποδοθεί ως IVadd6 → λάθος λειτουργικά.
* [C–E–Bb] ερμηνεύεται ως [0, [0, 4, 10]] → σωστά, αλλά απαιτεί context για πλήρη ερμηνεία.

Η ικανότητα της GCT να αναλύει συγχορδίες σε μικρές ή αρμονικά "φτωχές" υφές αποτελεί επιπλέον πλεονέκτημα σε corpus όπως χορωδιακά ή παραδοσιακά. Η απόδοση της GCT αναπαράστασης στο Kostka–Payne dataset αποδεικνύει την πρακτική της αξία στην αναγνώριση αρμονικών σχημάτων, ιδίως όταν χρησιμοποιείται ως ουδέτερη, τυπική περιγραφή (symbolic representation) και όχι ως πλήρως λειτουργική ερμηνεία. Σε αντίθεση με αναλύσεις που στηρίζονται εξολοκλήρου σε θεωρητικά μοντέλα (rule-based), η GCT προσφέρει πλαίσιο για στατιστική μάθηση και προσαρμογή σε διαφορετικά ύφη, χωρίς να επιβάλλει αυστηρή θεωρητική οπτική.

Η αξιολόγηση αυτή, πέρα από την τεχνική επιβεβαίωση της GCT, παρέχει και στοιχεία για μελλοντικές βελτιώσεις. Η χρήση context-aware μηχανισμών, όπως μεταβάσεις συγχορδιών ή φωνητική πληροφορία, μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω την ακρίβεια της ετικετοποίησης, ειδικά σε περιπτώσεις συμμετρίας, έλλειψης δεδομένων ή αρμονικών ασυμβατοτήτων.

**Ομαδοποίηση και λειτουργική ανάλυση GCT**

Η ποιοτική χρησιμότητα της αναπαράστασης GCT ενισχύεται σημαντικά όταν επεκτείνεται πέρα από την απομονωμένη ερμηνεία συγχορδιών και αξιοποιείται για την ομαδοποίηση και λειτουργική κατηγοριοποίηση αρμονικών στοιχείων σε μουσικά συμφραζόμενα. Η έννοια του chord grouping αφορά την ομαδοποίηση συγχορδιών με κοινές δομικές ή λειτουργικές ιδιότητες, ενώ η λειτουργική ανάλυση αναφέρεται στην αναγνώριση του ρόλου κάθε συγχορδίας (π.χ. τονική, δεσπόζουσα, υποδεσπόζουσα) βάσει της στατιστικής τους συμπεριφοράς σε ακολουθίες (Rohrmeier & Graepel, 2012).

Η GCT, πέρα από την αναπαράσταση μεμονωμένων συγχορδιών, παρέχει τη δυνατότητα κατηγοριοποίησης συγχορδιών σε ευρύτερες ομάδες, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική τους θέση στην κλίμακα (scale degree), την βάση (base) και τις επεκτάσεις (extensions). Η κατηγοριοποίηση βασίζεται σε κριτήρια όπως:

* Κοινή βαθμίδα (scale degree root)
* Σχέση υποσυνόλου στη βάση (subset relation)
* Συμβατότητα με το εκάστοτε μουσικό ιδίωμα (diatonic compatibility)

Για παράδειγμα, οι GCT συγχορδίες [0, [0, 4, 7]], [0, [0, 4]], και [0, [0, 4, 7, 11]] μπορούν να ενταχθούν στην ίδια κατηγορία “τονικής συγχορδίας”, καθώς έχουν κοινή βάση (major triad) και ίδια τονική ρίζα (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2016). Η χρήση ενός “εκπροσώπου” συγχορδίας (exemplar) για κάθε ομάδα επιτρέπει τη σύγκριση και την ανάλυση συγχορδιακών ακολουθιών με μειωμένη πολυπλοκότητα, χωρίς απώλεια ουσιαστικής πληροφορίας.

Η λειτουργική ανάλυση των συγχορδιών μέσω GCT γίνεται με βάση τις πιθανότητες μετάβασης μεταξύ των GCT κατηγοριών. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται ένας πίνακας πρώτης τάξης μεταβάσεων Markov, στον οποίο κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε μια GCT κατηγορία και τα στοιχεία της περιγράφουν την πιθανότητα μετάβασης σε άλλες κατηγορίες. Η στατιστική ανάλυση των πιθανοτήτων αυτών αποκαλύπτει λειτουργικές ομοιότητες: συγχορδίες που έχουν παρόμοιο πρότυπο μετάβασης (δηλαδή “τείνουν” να οδηγούν σε ίδιους αρμονικούς στόχους), θεωρούνται ότι ανήκουν στην ίδια λειτουργική ομάδα (Herremans & Chuan, 2017).

Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε σε συλλογή από Bach Chorales με εξαιρετικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, οι κατηγορίες GCT που περιλαμβάνουν συγχορδίες όπως [7, [0, 4, 7]] (V) και [11, [0, 3, 6]] (viio) συγκεντρώθηκαν στην κατηγορία δεσποζουσών, καθώς ακολουθούνται σχεδόν αποκλειστικά από τονικές συγχορδίες (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2023). Αντιθέτως, οι συγχορδίες [2, [0, 3, 7]] και [5, [0, 4, 7]] κατατάχθηκαν στην υποδεσπόζουσα ομάδα λόγω της προδιάθεσής τους να οδηγούν σε συγχορδίες με δεσποζουσά λειτουργία.

Η ομαδοποίηση αυτή βασίστηκε σε μέτρα ομοιότητας, όπως η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των γραμμών του πίνακα μεταβάσεων. GCT κατηγορίες με παρόμοια προφίλ διαδοχής συνδέθηκαν ιεραρχικά σε δενδρογράμματα (dendrograms), που οπτικοποιούν τη λειτουργική τους εγγύτητα (Cambouropoulos et al., 2015). Αυτή η προσέγγιση επιβεβαίωσε θεωρητικές μουσικολογικές αντιλήψεις περί λειτουργικής συγγένειας, χωρίς να στηρίζεται σε a priori θεωρία.

Η λειτουργική κατηγοριοποίηση των GCT συγχορδιών έχει εφαρμογή τόσο στην αρμονική ανάλυση όσο και στη σύνθεση μουσικής. Στο πλαίσιο του Chameleon, η πληροφορία αυτή επιτρέπει στο HMM να εκτιμά την πιθανότητα επιλογής συγχορδίας όχι μόνο βάσει ακολουθίας αλλά και λειτουργικού ρόλου, ενισχύοντας την αρμονική συνοχή (Kaliakatsos-Papakostas, 2021).

Περαιτέρω, η μέθοδος μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά μουσικά ιδιώματα, καθώς το σύστημα βασίζεται σε στατιστική μάθηση από δεδομένα. Σε ένα jazz corpus, για παράδειγμα, μπορεί να προκύψουν διαφορετικές λειτουργικές κατηγορίες, π.χ. “chromatic dominant”, που δεν υπάρχουν στην κλασική αρμονία, αλλά γίνονται εμφανείς μέσω της GCT/Markov ανάλυσης (Latif et al., 2023). Τέλος, η ομαδοποίηση GCT τύπων συντελεί στη μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, καθώς επιτρέπει κατατμημένη εκπαίδευση και σύμπτυξη του αλφαβήτου καταστάσεων των HMMs, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για real-time εφαρμογές ή μουσική δημιουργία σε κινητές συσκευές.

**Υπολογιστική Δημιουργικότητα και Εννοιολογική Ανάμειξη**

Η έννοια της υπολογιστικής δημιουργικότητας (computational creativity) αναφέρεται στη μελέτη και την υλοποίηση υπολογιστικών συστημάτων ικανών να επιτελέσουν έργο το οποίο, εάν παραγόταν από άνθρωπο, θα εθεωρείτο δημιουργικό. Στον χώρο της μουσικής, η δημιουργικότητα συνδέεται συχνά με την παραγωγή νέου υλικού (π.χ. μελωδίες, αρμονίες), την ανασυνδυαστική επεξεργασία μουσικών στοιχείων, ή την αυτόματη προσαρμογή ιδιωμάτων. Το Chameleon, ως σύστημα που εναρμονίζει μελωδίες σε διαφορετικά μουσικά στυλ μέσω πιθανοτικής προσαρμογής, εμπίπτει σε αυτό το ερευνητικό πλαίσιο (Colton & Wiggins, 2012).

Ένας από τους βασικούς γνωσιακούς μηχανισμούς που έχουν υιοθετηθεί στην υπολογιστική δημιουργικότητα είναι το conceptual blending (εννοιολογική ανάμειξη). Η θεωρία αυτή, που προέρχεται από τις γνωσιακές επιστήμες, περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο συνδυάζονται δύο ή περισσότερες έννοιες για τη δημιουργία ενός νέου, ενοποιημένου γνωστικού πλαισίου (Fauconnier & Turner, 2008). Στην περίπτωση της μουσικής, αυτό μεταφράζεται στη δυνατότητα ενός συστήματος να “συγχωνεύει” αρμονικές πρακτικές από διαφορετικά ιδιώματα, παράγοντας νέες, υβριδικές εναρμονίσεις.

Το ερευνητικό πρόγραμμα COINVENT (Computational Concept Invention) αξιοποίησε το conceptual blending ως βασικό μηχανισμό για δημιουργικές εφαρμογές στη μουσική, τη λογική και τα μαθηματικά. Στο πλαίσιο του COINVENT, το Chameleon αποτέλεσε ένα από τα βασικά παραδείγματα συστήματος που εφαρμόζει την έννοια της εννοιολογικής ανάμειξης στο πεδίο της αρμονικής δημιουργίας, καθώς συνδυάζει δεδομένα από διαφορετικά μουσικά corpora για την παραγωγή αρμονιών που δεν περιορίζονται αυστηρά σε έναν στυλιστικό κανόνα (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2014).

Η σημασία αυτής της προσέγγισης είναι διπλή. Πρώτον, επιτρέπει την ανοιχτή δημιουργικότητα (open-ended creativity), όπου το σύστημα δεν περιορίζεται από έναν και μόνο θεωρητικό κανόνα ή ύφος. Δεύτερον, ενισχύει τη συνεργατικότητα μεταξύ ανθρώπου και μηχανής: το Chameleon, για παράδειγμα, μπορεί να ενσωματώσει χρήστη-καθορισμένους περιορισμούς (π.χ. επιλεγμένες συγχορδίες ή στυλιστικά χαρακτηριστικά), λειτουργώντας ως συν-δημιουργός σε μια συνθετική διαδικασία (Gervás, 2009).

Η προσέγγιση του conceptual blending σε υπολογιστικά συστήματα όπως το Chameleon διαφοροποιείται από απλούς κανόνες σύνθεσης ή στατιστικά μοντέλα χωρίς γνωσιακή βάση. Εδώ, ο στόχος δεν είναι μόνο η “σωστή” παραγωγή, αλλά η καινοτόμος συνδυαστική σκέψη, η οποία επιτρέπει τη δημιουργία αρμονικών αποτελεσμάτων που είναι νέα αλλά και μουσικά συνεπή. Αυτή η δυνατότητα τοποθετεί το Chameleon όχι απλώς ως εργαλείο αρμονικής υποστήριξης, αλλά ως πλατφόρμα για τη μελέτη και την εφαρμογή της τεχνητής δημιουργικότητας στη μουσική.

**Σύγκριση GCT με άλλες αρμονικές αναπαραστάσεις**

Η αναπαράσταση της αρμονίας αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη ζητήματα στη μουσική θεωρία και ανάλυση. Στο πεδίο της υπολογιστικής μουσικής, η επιλογή αρμονικού μοντέλου είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική κατανόηση, κατηγοριοποίηση και δημιουργία μουσικού περιεχομένου. Η General Chord Type (GCT) αναπαράσταση συνιστά μια σύγχρονη πρόταση που επιδιώκει να υπερβεί τις περιορισμένες εφαρμογές των παραδοσιακών μεθόδων. Η παρούσα ενότητα επιχειρεί να συγκρίνει τη GCT με τρεις βασικές αναπαραστάσεις: τη Roman Numeral Analysis, τα Chord Symbols (lead sheet notation) και τα Tonal Pitch Space/Neo-Riemannian μοντέλα.

Η Roman Numeral Analysis (RNA) αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τρόπο αναπαράστασης αρμονίας στη θεωρία της δυτικής τονικής μουσικής. Κάθε συγχορδία χαρακτηρίζεται από τη βαθμίδα της ως προς την τονικότητα (I, ii, V, κ.λπ.), το ποιόν της (major, minor, diminished), καθώς και τις αναστροφές της (π.χ. V⁶₄). Η RNA είναι ιδιαιτέρως πλούσια ως προς τη θεωρητική πληροφορία που παρέχει, καθώς ενσωματώνει λειτουργικά συμφραζόμενα, τονικές ιεραρχίες και φωνητική θέση (Schachter & Aldwell, 2011).

Ωστόσο, η χρήση της RNA σε υπολογιστικά συστήματα παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις. Απαιτεί την εκ των προτέρων γνώση του τονικού κέντρου, καθώς και χειροκίνητη ανάλυση, εφόσον η μετατροπή pitch data σε RNA συμβολισμό δεν είναι αυτόματη και εμπεριέχει υψηλό επίπεδο μουσικής κρίσης (Temperley & Marvin, 2008). Αντίθετα, η GCT βασίζεται αποκλειστικά στα pitch classes, δεν προϋποθέτει γνώση τονικότητας και μπορεί να εξάγεται απευθείας από pitch data με υπολογιστικά μέσα (Cambouropoulos et al., 2015). Παρότι στερείται λειτουργικής πληροφορίας, αυτή μπορεί να προκύψει αργότερα, στατιστικά ή συμφραζομενικά.

Η συμβολική ονοματολογία συγχορδιών σε jazz/pop μουσική – γνωστή και ως lead sheet notation – περιλαμβάνει ετικέτες όπως Cmaj7, Dm9, G7b9 κ.λπ., προσφέροντας υψηλό επίπεδο ακρίβειας και πρακτικής εφαρμογής στη σύγχρονη ερμηνευτική πράξη (Pardo & Birmingham, 2002). Το πλεονέκτημα αυτής της αναπαράστασης έγκειται στην πληρότητα της πληροφορίας, η οποία περιλαμβάνει root, ποιόν, επεκτάσεις και αλλοιώσεις.

Ωστόσο, οι chord symbols δεν είναι απολύτως τυποποιημένοι· διαφορετικοί εκδότες ή αναλυτές μπορεί να επιλέγουν διαφορετικές ετικέτες για την ίδια συγχορδία, ενώ η χρήση shorthand συμβόλων (π.χ. Δ για major 7) δημιουργεί ασάφειες στην υπολογιστική επεξεργασία. Επιπλέον, η αναγνώριση chord symbols απαιτεί την εξαγωγή root και ποιότητας, κάτι που μπορεί να προκαλέσει αστοχίες σε ελλιπή ή αρμονικά πολυσήμαντα περιβάλλοντα (Radicioni & Esposito, 2010).

Η GCT υπερτερεί εδώ ως προς τη μοναδική και μη αμφιλεγόμενη αναπαράσταση: κάθε pitch set μεταφράζεται σε ένα σταθερό GCT tag, χωρίς εξάρτηση από ερμηνευτικά πρότυπα ή shorthand. Ωστόσο, δεν ενσωματώνει άμεσα πληροφορίες εκτέλεσης ή συμφραζόμενης χρήσης, όπως κάνει το lead sheet, γι’ αυτό και θεωρείται περισσότερο "αναλυτικό" παρά "πρακτικό" εργαλείο.

Οι πιο προχωρημένες θεωρητικές αναπαραστάσεις, όπως το Tonal Pitch Space (TPS) του Lerdahl (2001) και οι Neo-Riemannian μετασχηματισμοί (π.χ. LPR operations), στοχεύουν στην αποτύπωση της αντίληψης της αρμονικής απόστασης και των διαδικασιών μετασχηματισμού μεταξύ συγχορδιών.

Στο TPS, κάθε συγχορδία τοποθετείται σε ένα πολυδιάστατο χώρο βασισμένο σε παραμέτρους όπως η κοινή τονική περιοχή, η διατονικότητα και η τονική απόσταση. Η Neo-Riemannian θεωρία, από την άλλη, αναλύει τις συγχορδιακές μεταβάσεις ως αποτέλεσμα λειτουργικών μετασχηματισμών (L: Leittonwechsel, P: Parallel, R: Relative), ιδιαίτερα χρήσιμων σε ρομαντική και μετα-τονική μουσική (Tymoczko, 2011).

Παρότι οι θεωρίες αυτές προσφέρουν βαθύτερη μουσικογνωστική ερμηνεία, η υπολογιστική τους υλοποίηση είναι περίπλοκη και εξαρτώμενη από προϋποθέσεις, όπως η ύπαρξη γνωστού τονικού πλαισίου και κανονικής φωνητικής διάταξης (Quinn, 2001). Η GCT, αντιθέτως, λειτουργεί πλήρως χωρίς αναφορά σε τονικότητα, επιτρέποντας την εφαρμογή της σε atonal, modal ή παραδοσιακά ιδιώματα, όπου το TPS ή οι Riemannian μετασχηματισμοί δεν έχουν σταθερή σημασιολογική αξία.

Επιπλέον, η GCT μπορεί να συνδυαστεί με μετασχηματιστικά μοντέλα, αφού τα σύνολα base-extension παρέχουν σαφή δομή για τον υπολογισμό αρμονικών "κινήσεων", ιδιαίτερα σε εφαρμογές αυτόματης σύνθεσης ή blending (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2014).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Αναπαράσταση** | **Πλεονεκτήματα** | **Μειονεκτήματα** |
| Roman Numerals | Θεωρητικά πλούσια, ενσωματώνει λειτουργία | Απαιτεί γνώση τονικότητας, όχι υπολογιστικά φιλική |
| Chord Symbols | Πλήρης πρακτική πληροφορία, ευρέως κατανοητά | Μη τυποποιημένα, ερμηνευτικά μεταβλητά |
| TPS / Riemann | Μοντελοποιεί αντίληψη, κατάλληλο για μετα-τονικό ρεπερτόριο | Πολύπλοκα, απαιτούν συμφραζόμενα και φωνητική πληρότητα |
| GCT | Τυπική, idiom-independent, στατιστικά φιλική | Δεν περιλαμβάνει λειτουργική πληροφορία εξ αρχής |

Η GCT υπερτερεί όταν το ζητούμενο είναι η αυτόματη ανάλυση, η πιθανοτική μάθηση και η πολυιδιωματική εφαρμογή. Αντίθετα, αναπαραστάσεις όπως η RNA ή η TPS είναι ανώτερες όταν απαιτείται λειτουργική ερμηνεία με θεωρητική ακρίβεια ή αντίληψη απόστασης.

**Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα**

Το Chameleon αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα της σύγχρονης προσέγγισης στην υπολογιστική αρμονία, ενσωματώνοντας θεωρητικές έννοιες από τη μουσική αναπαράσταση, μοντέλα πιθανοτικής πρόβλεψης (HMMs), και μεθόδους υπολογιστικής δημιουργικότητας. Η ανάλυση των βασικών συνιστωσών του συστήματος —συμπεριλαμβανομένων της General Chord Type (GCT) αναπαράστασης, των πιθανοτικών μεταβάσεων και της λειτουργικής κατηγοριοποίησης— ανέδειξε μια σειρά από πλεονεκτήματα που το καθιστούν κατάλληλο εργαλείο για την εναρμόνιση μελωδιών σε διαφορετικά ιδιώματα.

Η χρήση της GCT προσφέρει ιδιωματική ανεξαρτησία και υψηλή αναγνωρισιμότητα συγχορδιών, ενώ τα HMMs επιτρέπουν τη διαχείριση τόσο της τοπικής αρμονικής συνέχειας όσο και της σχέσης μεταξύ μελωδίας και αρμονίας. Τα ποσοστά ακρίβειας της GCT σε δοκιμές με το Kostka–Payne dataset (άνω του 92%) επιβεβαιώνουν την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης (Cambouropoulos et al., 2015), ενώ η εφαρμογή λειτουργικής κατηγοριοποίησης επιτρέπει την ανάλυση και αναπαραγωγή στιλιστικής συνέπειας σε πλήθος μουσικών ειδών (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2023).

Ωστόσο, το σύστημα παρουσιάζει και σημαντικούς περιορισμούς. Οι αμφισημίες στη ριζική ανάλυση συμμετρικών συγχορδιών, οι περιπτώσεις ελλιπών pitch sets και η έλλειψη φωνητικής πληροφορίας περιορίζουν την ακρίβεια σε περιβάλλοντα με πολύπλοκη υφή ή μη σαφείς αρμονικές λειτουργίες (MacRitchie & Milne, 2017). Επιπλέον, η στατιστική μάθηση από υπάρχοντα corpora ενέχει τον κίνδυνο αναπαραγωγής των προκαταλήψεων ή των ορίων του επιλεγμένου υλικού (Latif et al., 2023).

Οι προοπτικές εξέλιξης του Chameleon είναι πολυδιάστατες. Πρώτον, η ενσωμάτωση voice-leading constraints και ρυθμικής πληροφορίας μπορεί να οδηγήσει σε πιο μουσικά ευαίσθητα αποτελέσματα. Δεύτερον, η χρήση ιεραρχικών HMMs ή μοντέλων βαθύτερης μάθησης (π.χ. Transformers) θα επέτρεπε την κατανόηση μακροδομικών αρμονικών σχέσεων, οι οποίες υπερβαίνουν τις τοπικές ακολουθίες συγχορδιών (Ji et al., 2023).

Επιπλέον, η εφαρμογή του συστήματος σε μη-δυτικά ή μη-τονικά μουσικά ιδιώματα προσφέρει ένα σημαντικό πεδίο έρευνας. Η προσαρμοστικότητα της GCT σε περιβάλλοντα όπως η πολυφωνία της Ηπείρου, η jazz ή modal μουσική αποδεικνύει την ευρύτητα του μοντέλου, ενώ ανοίγει νέες δυνατότητες για διαπολιτισμική ανάλυση και σύνθεση (Kaliakatsos-Papakostas et al., 2018).

Τέλος, η επέκταση του Chameleon σε διαδραστικά περιβάλλοντα συν-δημιουργίας, όπου ο χρήστης ελέγχει παραμέτρους ύφους, περιορισμών και στόχων, θα εδραιώσει το σύστημα όχι μόνο ως αναλυτικό εργαλείο, αλλά και ως υπολογιστικό συνεργάτη στη σύνθεση. Συνολικά, η ερευνητική βάση που αναπτύχθηκε γύρω από το Chameleon επιβεβαιώνει ότι η υπολογιστική αρμονία μπορεί να συνδυάσει θεωρητική εγκυρότητα και δημιουργική ευελιξία. Το Chameleon δεν είναι μόνο εργαλείο εφαρμογής, αλλά και πλαίσιο μελέτης της μουσικής ως δυναμικού, προσαρμοστικού και σύνθετου συστήματος.

**Βιβλιογραφικές Αναφορές**

Allan, M., & Williams, C. (2004). Harmonising chorales by probabilistic inference. *Advances in neural information processing systems*, *17*.

Ames, C. (1989). The Markov process as a compositional model: A survey and tutorial. *Leonardo*, *22*(2), 175-187.

Boulanger-Lewandowski, N., Bengio, Y., & Vincent, P. (2012). Modeling temporal dependencies in high-dimensional sequences: Application to polyphonic music generation and transcription. *arXiv preprint arXiv:1206.6392*.

Cambouropoulos, E., & Kaliakatsos-Papakostas, M. (2021). Cognitive musicology and artificial intelligence: Harmonic analysis, learning, and generation. *Handbook of artificial intelligence for music: foundations, advanced approaches, and developments for creativity*, 263-281.

Cambouropoulos, E., Kaliakatsos-Papakostas, M. A., & Tsougras, C. (2014, September). An idiom-independent representation of chords for computational music analysis and generation. In *ICMC*.

Colton, S. (2012). The painting fool: Stories from building an automated painter. In *Computers and creativity* (pp. 3-38). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Colton, S., & Wiggins, G. A. (2012). Computational creativity: The final frontier?. In *ECAI 2012* (pp. 21-26). IOS Press.

Conklin, D. (2013). Multiple viewpoint systems for music classification. *Journal of New Music Research*, *42*(1), 19-26.

Fauconnier, G., & Turner, M. (2008). *The way we think: Conceptual blending and the mind's hidden complexities*. Basic books.

Forte, A. (1973). *The structure of atonal music* (Vol. 304). Yale University Press.

Gervás, P. (2009). Computational approaches to storytelling and creativity. *AI Magazine*, *30*(3), 49-49.

Gillick, J., Tang, K., & Keller, R. M. (2010). Machine learning of jazz grammars. *Computer Music Journal*, *34*(3), 56-66.

Hadjeres, G., Pachet, F., & Nielsen, F. (2017, July). Deepbach: a steerable model for bach chorales generation. In *International conference on machine learning* (pp. 1362-1371). PMLR.

Herremans, D., & Chew, E. (2017). MorpheuS: generating structured music with constrained patterns and tension. *IEEE Transactions on Affective Computing*, *10*(4), 510-523.

Herremans, D., & Chuan, C. H. (2017). Modeling musical context with word2vec. *arXiv preprint arXiv:1706.09088*.

Ji, S., Yang, X., & Luo, J. (2023). A survey on deep learning for symbolic music generation: Representations, algorithms, evaluations, and challenges. *ACM Computing Surveys*, *56*(1), 1-39.

Kaliakatsos-Papakostas, M. (2021). Evolutionary Music, Deep Learning and Conceptual Blending: Enhancing User Involvement in Generative Music Systems. *Artificial Intelligence and the Arts: Computational Creativity, Artistic Behavior, and Tools for Creatives*, 109.

Kaliakatsos-Papakostas, M. A., Zacharakis, A. I., Tsougras, C., & Cambouropoulos, E. (2015, October). Evaluating the General Chord Type Representation in Tonal Music and Organising GCT Chord Labels in Functional Chord Categories. In *ISMIR* (pp. 427-433).

Kaliakatsos-Papakostas, M., Katsiavalos, A., Tsougras, C., & Cambouropoulos, E. (2014). Harmony in the polyphonic songs of epirus: Representation, statistical analysis and generation. In *Proceedings of the 4th international workshop on folk music analysis* (pp. 21-28).

Kaliakatsos-Papakostas, M., Makris, D., Tsougras, C., & Cambouropoulos, E. (2016). Learning and creating novel harmonies in diverse musical idioms: An adaptive modular melodic harmonisation system. *Journal of Creative Music Systems*, *1*(1).

Kaliakatsos-Papakostas, M., Queiroz, M., Tsougras, C., & Cambouropoulos, E. (2017). Conceptual blending of harmonic spaces for creative melodic harmonisation. *Journal of New Music Research*, *46*(4), 305-328.

Kaliakatsos-Papakostas, M., Velenis, K., Pasias, L., Alexandraki, C., & Cambouropoulos, E. (2023). An HMM-Based Approach for Cross-Harmonization of Jazz Standards. *Applied Sciences*, *13*(3), 1338.

Kaliakatsos-Papakostas, M., Zacharakis, A., & Cambouropoulos, E. (2018). Chapter 9 Conceptual Blending in Melodic Harmonisation: Development and Empirical Evaluation in the Case of the CHAMELEON System. *Concept Invention: Foundations, Implementation, Social Aspects and Applications*, 241-274.

Krumhansl, C. L. (2001). *Cognitive foundations of musical pitch*. Oxford University Press.

Latif, S., Shoukat, M., Shamshad, F., Usama, M., Ren, Y., Cuayáhuitl, H., ... & Schuller, B. W. (2023). Sparks of large audio models: A survey and outlook. *arXiv preprint arXiv:2308.12792*.

Liang, F. (2016). Bachbot: Automatic composition in the style of bach chorales. *University of Cambridge*, *8*(19-48), 3-1.

MacRitchie, J., & Milne, A. J. (2017, July). Evaluation of the learnability and playability of pitch layouts in new musical instruments. In *Proceedings of the 14th Sound and Music Computing Conference, Espoo, Finland* (pp. 5-8).

Olarewaju, O., Kokkinakis, A., Demediuk, S., Robertson, J., Nölle, I., Patra, S., ... & Hook, J. (2020). Automatic generation of text for match recaps using esport caster commentaries. In *International Conference of Natural Language Computing* (pp. 117-131).

Pachet, F., & Roy, P. (2001). Musical harmonization with constraints: A survey. *Constraints*, *6*, 7-19.

Papadopoulos, H., & Peeters, G. (2007, June). Large-scale study of chord estimation algorithms based on chroma representation and HMM. In *2007 International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing* (pp. 53-60). IEEE.

Pardo, B., & Birmingham, W. P. (2002). Algorithms for chordal analysis. *Computer Music Journal*, *26*(2), 27-49.

Pearce, M. T., & Wiggins, G. A. (2006). Expectation in melody: The influence of context and learning. *Music Perception*, *23*(5), 377-405.

Quinn, I. (2001). Listening to similarity relations. *Perspectives of New Music*, 108-158.

Quinn, I. (2019). *Tonal harmony* (pp. 467-97). New York: Oxford University Press.

Rabiner, L. R. (1989). A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE*, *77*(2), 257-286.

Raczyński, S. A., Fukayama, S., & Vincent, E. (2013). Melody harmonization with interpolated probabilistic models. *Journal of New Music Research*, *42*(3), 223-235.

Radicioni, D. P., & Esposito, R. (2010). BREVE: an HMPerceptron-based chord recognition system. *Advances in Music Information Retrieval*, 143-164.

Randolph, D. A. (2023). *Toward Actionable Computational Models of Piano Fingering* (Doctoral dissertation, University of Illinois at Chicago).

Raphael, C., & Stoddard, J. (2004). Functional harmonic analysis using probabilistic models. *Computer Music Journal*, *28*(3), 45-52.

Richmond, B. (1981). Tonal implications of the diatonic set. *Theory Only*, *5*(6), 3-21.

Rohrmeier, M., & Graepel, T. (2012, June). Comparing feature-based models of harmony. In *Proceedings of the 9th International Symposium on Computer Music Modelling and Retrieval* (pp. 357-370). London: Springer.

Schachter, C., & Aldwell, E. (2011). Harmony & voice leading.

Temperley, D. (2004). *The cognition of basic musical structures*. MIT press.

Temperley, D., & Marvin, E. W. (2008). Pitch-class distribution and the identification of key. *Music Perception*, *25*(3), 193-212.

Tymoczko, D. (2011). *A geometry of music: Harmony and counterpoint in the extended common practice*. Oxford University Press.

Westergaard, P. (1975). *An introduction to tonal theory*. New York: Norton.

Whorley, R. P. (2013). *The construction and evaluation of statistical models of melody and harmony* (Doctoral dissertation, Goldsmiths, University of London).

Yeh, Y. C., Hsiao, W. Y., Fukayama, S., Kitahara, T., Genchel, B., Liu, H. M., ... & Yang, Y. H. (2021). Automatic melody harmonization with triad chords: A comparative study. *Journal of New Music Research*, *50*(1), 37-51.

Zacharakis, A., Kaliakatsos-Papakostas, M., Tsougras, C., & Cambouropoulos, E. (2018). Musical blending and creativity: An empirical evaluation of the CHAMELEON melodic harmonisation assistant. *Musicae Scientiae*, *22*(1), 119-144.