



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ -
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**Παρακολούθηση της ποιότητας των νερών του Σπερχειού ποταμού με
χρονοσειρές δορυφορικών τηλεπισκοπικών δεδομένων**

Διπλωματική Εργασία

Της

Πηνελόπης – Μαρίας Μίχου

Που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα της ΣΑΤΜ – ΜΓ/ΕΜΠ για την εκπλήρωση των
υποχρεώσεων απόκτησης του Διπλώματος ΑΤΜ – ΜΓ/ΕΜΠ

Αθήνα: Ιούλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ -
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**Παρακολούθηση της ποιότητας των νερών του Σπερχειού ποταμού με
χρονοσειρές δορυφορικών τηλεπισκοπικών δεδομένων**

Διπλωματική Εργασία

Της

Πηνελόπης – Μαρίας Μίχου

Που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα της ΣΑΤΜ – ΜΓ/ΕΜΠ για την εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του Διπλώματος ΑΤΜ – ΜΓ/ΕΜΠ

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Βασιλεία Καραθανάση, Καθηγήτρια ΣΑΤΜ – ΜΓ/ Ε.Μ.Π.

Αθήνα: Ιούλιος 2024

Πνευματικά Δικαιώματα

Copyright © Πηνελόπη – Μαρία Μίχου

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Οι απόψεις και θέσεις που περιέχονται σε αυτήν την εργασία εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

*στο παλιό μου laptop που χάλασε όταν έτρεξα για 1^η φορά το
SNAP ESA και στο BEST Athens που χωρίς αυτό, θα είχα
αποφοιτήσει 1,5 χρόνο νωρίτερα*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία σηματοδοτεί το τελευταίο στάδιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών στη Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών φοίτησής μου, επέλεξα να εστιάσω στην επιστήμη της Τηλεπισκόπησης και της ανάλυσης γεωχωρικών δεδομένων, με έμφαση στην παρακολούθηση της μεταβολής της ποιότητας υδάτων ανά τον χρόνο. Στην παρούσα ερευνητική διαδικασία, μελέτησα και επεξεργάστηκα δεδομένα που αφορούν μια τρίμηνη χρονοσειρά του ποταμού Σπερχειού, χρησιμοποιώντας διάφορες τηλεσκοπικές τεχνικές αλλά και τεχνικές ανάλυσης δεδομένων (data analysis). Η συγκεκριμένη εργασία έχει την δυνατότητα να αποτελέσει πηγαίο κώδικα έμπνευσης για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό διαφόρων φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε υδάτινες περιοχές, εντός ενός διαρκούς εξελισσόμενου πλαισίου. Η παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων αποτελεί ουσιαστικό εργαλείο για τον προσδιορισμό περιοχών με προβλήματα ρύπανσης, ενώ παράλληλα μπορεί να αποτελέσει έναυσμα για τη λήψη αποφάσεων που έχουν ως σκοπό την βελτίωση των υποδομών ύδρευσης, είτε αυτές σχετίζονται με αστικές εκτάσεις είτε με άλλες χρήσεις γης.

Η μελέτη αυτή δεν θα μπορούσε να λάβει χώρα χωρίς την στήριξη και την συμβολή διαφόρων ανθρώπων εντός της ακαδημαϊκής κοινότητας. Ειδικότερα, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς την επιβλέπουσα καθηγήτρια κα Βασιλεία Καραθανάση για την καθοδήγηση και την υποστήριξη της τα τελευταία χρόνια, τόσο πριν, αλλά και κατά την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Η αμέριστη βοήθεια της χαρακτήρισε την προπτυχιακή μου ακαδημαϊκή πορεία, ενώ οι συμβουλές της και η βοήθεια της σηματοδότησαν σημαντικά και τα επόμενα ακαδημαϊκά μου βήματα, με το πέρας του σπουδών μου στο ΕΜΠ. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τόσο τον Βασίλειο Ανδρώνη (ΕΔΙΠ), αλλά και τον Διδάκτορα Κλεάνθη Καραμβάση οι οποίοι με βοήθησαν σε διάφορες εκπαιδευτικές και τεχνικές δυσκολίες μου σε αντικείμενα που ήταν η βάση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην αναφέρω τα άτομα του οικείου μου περιβάλλοντος τα οποία έδειξαν υπομονή και μου συμπαραστάθηκαν στις δυσκολίες αυτού του ταξιδιού. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους αγαπητούς γονείς μου και την αδελφή μου, που πάντα με στηρίζαν σε κάθε μου βήμα. Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους πιστούς μου φίλους, οι οποίοι είναι στο πλάι μου από το 1ο εξάμηνο μου στη ΣΑΤΜ – ΜΓ.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πηνελόπη – Μαρία Μίχου: Παρακολούθηση της ποιότητας των νερών του Σπερχειού ποταμού με χρονοσειρές δορυφορικών τηλεπισκοπικών δεδομένων

(Με την επίβλεψη της κα Βασιλείας Καραθανάση, Καθηγήτρια ΣΑΤΜ – ΜΓ, ΕΜΠ)

Ο πρωταρχικός στόχος αυτής της μελέτης είναι να ανιχνεύσει, να εντοπίσει και να τεκμηριώσει διακυμάνσεις στη σύνθεση ουσιών και υλικών εντός των υδάτινων οδών του Σπερχειού ποταμού σε διάστημα τριών μηνών. Η έρευνα στοχεύει όχι μόνο στην απεικόνιση και ερμηνεία της περιβαλλοντικής ζωτικότητας του οικοσυστήματος του ποταμού αλλά και στη διάκριση των εξελισσόμενων «κινήσεων» και μοτίβων με την πάροδο του χρόνου. Αρχικά, ως βασική πηγή δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα σύνολο δεδομένων που αποτελείται από δεκαέξι (16) δορυφορικές εικόνες Sentinel-2 και Skysat. Διάφοροι δείκτες υδατοκάλυψης χρησιμοποιήθηκαν για να τονιστούν σημαντικές αλλαγές εντός αυτής της χρονικής ακολουθίας. Σε μια επόμενη φάση, κάθε σύνολο δεδομένων υποβλήθηκε σε μια τεχνική μείωσης διαστάσεων για να καταστεί δυνατή η οπτικοποίηση των δεδομένων χρονοσειράς μέσα σε έναν δισδιάστατο χώρο, μειώνοντας έτσι τον χώρο των δεδομένων από τρεις διαστάσεις σε δύο. Στη συνέχεια, ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης που βασίζεται στην πυκνότητα των εικονοστοιχείων εφαρμόστηκε σε αυτόν τον συγκεκριμένο χώρο, με στόχο να τα κατηγοριοποιήσει σε τρεις διακριτές ομάδες. Συγκεκριμένα, ο Δείκτης Κανονικής Διαφοράς Χλωροφύλλης (NDCI) και ο Δείκτης Ιζημάτων (SI) εμφανίστηκαν ως βασικοί δείκτες που αντικατοπτρίζουν τις πιο έντονες αλλαγές με την πάροδο του χρόνου, υποδηλώνοντας τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης-α και την παρουσία ιζημάτων εντός των υδάτινων σωμάτων, αντίστοιχα. Για την ανάλυση των δεδομένων που σχετίζονται με αυτούς τους δύο βασικούς δείκτες, ο t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE) συνδυάστηκε με χωρική ομαδοποίηση εφαρμογών με θόρυβο βάσει ιεραρχικής πυκνότητας (HDBSCAN). Αυτή η μελέτη χρησιμοποιεί δύο προσεγγίσεις για την ανάλυση των δεδομένων. Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιεί το HDBSCAN πάνω από τα δεδομένα με μείωση του t-SNE για την αναγνώριση συστάδων σε ολόκληρη τη χρονοσειρά. Η δεύτερη προσέγγιση εφαρμόζει το HDBSCAN ανεξάρτητα σε καθεμία από τις δεκαέξι επιλεγμένες εικόνες για ανάλυση κάθε χρονικού σημείου ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα από αυτές τις δύο μεθόδους συγκρίνονται στη συνέχεια για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά τους στην αποτύπωση της χρονικής δυναμικής.

Τα ευρήματα αυτής της μελέτης υπογραμμίζουν τη χρησιμότητα του συνδυασμού προηγμένων τεχνικών μείωσης διαστάσεων και ομαδοποίησης για την παρακολούθηση και ανάλυση περιβαλλοντικών αλλαγών στα ποτάμια οικοσυστήματα. Τα μοτίβα που εντοπίστηκαν παρέχουν πολύτιμες γνώσεις για τη χρονική δυναμική της ποιότητας του νερού, αντανακλώντας τις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α και την παρουσία ιζημάτων.

Λέξεις Κλειδιά: δείκτες ποιότητας νερού, μείωση διαστάσεων, αλγόριθμος ομαδοποίησης, ταξινόμηση εικονοστοιχείων, ανίχνευση προτύπων

ABSTRACT

Pinelopi – Maria Michou: Assessing Water Quality Dynamics in the Sperchios River using Time Series Analysis of Satellite Remote Sensing Data

(Under the supervision of Vasileia Karathanasi, Professor SRS – GE, NTUA)

The primary objective of this study is to detect, pinpoint, and document variations in the composition of substances and materials within the waterways of the Sperchios River over a span of three months. The research aims not only to portray and interpret the environmental vitality of the river's ecosystem but also to discern the evolving “movements” and patterns over time. Initially, a dataset comprising of sixteen (16) Sentinel-2 and Skysat satellite images was employed as the foundational data source. Various water cover indices were utilized to highlight significant changes within this temporal sequence. In a subsequent phase, each dataset underwent a dimensionality reduction technique to enable the visualization of the time series data within a two – dimensional space, thereby reducing the space of the data from three dimensions to two. Subsequently, a clustering algorithm predicated on pixel density was applied to this specific space, aiming to categorize them into three distinct groups. Notably, the Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI) and the Sentiment Index (SI) emerged as pivotal indicators reflecting the most pronounced changes over time, signifying the concentration of chlorophyll-a and the presence of sediments within the water bodies, respectively. To analyse the data associated with these two key indicators, t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE) was coupled with hierarchical density-based spatial clustering of applications with noise (HDBSCAN).

This study employs two approaches to analyse the data. The first approach uses HDBSCAN over the t-SNE-reduced data to identify clusters across the entire time series. The second approach applies HDBSCAN independently to each of the sixteen selected images to analyse each time point separately. The results from these two methods are then compared to evaluate their effectiveness in capturing temporal dynamics.

This study's findings underscore the utility of combining advanced dimensionality reduction and clustering techniques to monitor and analyse environmental changes in river ecosystems. The identified patterns provide valuable insights into the temporal dynamics of water quality, reflecting the concentrations of chlorophyll-a and the presence of sediments.

Key – words: water quality indices, dimensionality reduction, clustering algorithm, pixel classification, pattern detection

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1	Ιστορικό	12
1.1.1	Περιεχόμενο Μελέτης	12
1.1.2	Παρακολούθηση Περιβάλλοντος μέσω Δορυφορικών Εικόνων – Satellite Imagery in Environmental Monitoring	13
1.1.2.1	Δορυφόρος SkySat: Ιστορία και Τεχνικά Χαρακτηριστικά	
1.1.2.2	Δορυφόρος Sentinel – 2: Ιστορία και Τεχνικά Χαρακτηριστικά	
1.1.2.3	Σπουδαιότητα συνδυασμού των Skysat και Sentinel – 2 δορυφόρων	
1.2	Ορισμός Προβλήματος: Ερευνητικό Κενό και Εστίαση Μελέτης	16
1.3	Ερευνητικοί Στόχοι	17
1.3.1	Κύριοι Στόχοι	17
1.3.2	Ειδικοί Στόχοι	17
1.4	Σπουδαιότητα της Μελέτης	18

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1	Επισκόπηση της Περιβαλλοντικής Παρακολούθησης με χρήση Δορυφορικών Εικόνων	20
2.1.1	Εισαγωγή στην Δορυφορική Απεικόνιση	20
2.1.2	Τύποι Δορυφόρων	22
2.1.2.1	Γεωστατικοί Δορυφόροι	
2.1.2.2	Δορυφόροι σε Πολική Τροχιά	
2.1.2.3	Δορυφόροι συγχρονισμένοι με τον Ήλιο	
2.1.2.4	Microsatellites και CubeSats	
2.1.2.5	Δορυφόροι Radar Συνθετικού Ανοίγματος (SAR)	
2.1.3	Εφαρμογές στην Παρακολούθηση της Ποιότητας του Νερού	27
2.1.3.1	Θολρότητα (Turbidity)	
2.1.3.2	Συγκέντρωση Χλωροφύλλης – α	
2.1.3.3	Μεταφορά Ιζημάτων	
2.2	Ανάλυση Χρονοσειρών (Time – Series)	32
2.2.1	Ορισμός και Σπουδαιότητα	32
2.2.2	Τεχνικές και Μέθοδοι	33
2.2.3	Εφαρμογές στην Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος	34
2.3	Δείκτες Ποιότητας Νερού	37
2.3.1	Εισαγωγή στους Δείκτες Ποιότητας του Νερού	38
2.3.2	Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Χλωροφύλλης – α (NDCI)	39
2.3.3	Δείκτης Ιζημάτων (SI)	39
2.4	Τεχνικές Μείωσης Διαστάσεων	39
2.4.1	Εισαγωγή στις Τεχνικές Μείωσης Διαστάσεων	39
2.4.2	t – Distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE)	42
2.5	Αλγόριθμοι Ομαδοποίησης	43
2.5.1	Εισαγωγή στην Ομαδοποίηση	43
2.5.2	Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise	44

Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Εισαγωγή στις Χρονοσειρές	46
3.2 Μείωση Διαστάσεων	46
3.2.1 Ορισμός και Εφαρμογές	46
3.2.2 Επισκόπηση Τεχνικών	47
3.2.2.1 Ορισμός – Χρησιμότητα	
3.2.2.2 Γραμμικές Τεχνικές: Linear Techniques	
3.2.2.3 Μη Γραμμικές Τεχνικές: Non – linear Techniques	
3.3 T – Distributed Stochastic Neighbor Embedding (t – SNE)	51
3.3.1 Προτερήματα και Μειονεκτήματα	52
3.4 Αλγόριθμοι Ομαδοποίησης	55
3.4.1 Ορισμός	55
3.4.2 Είδη Ομαδοποίησης	55
3.4.2.1 Κατάτμηση	
3.4.2.2 Πυκνότητα	
3.4.2.3 Ιεραρχία	
3.4.2.4 Διανομή	
3.4.3 Σύγκριση Μεθόδων	59
3.5 Hierarchical Density – Based Spatial Clustering of Applications with Noise	62
3.5.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	62
3.6 Συνδυασμός του t – SNE με το HDBSCAN για την ανάλυση Δορυφορικών Χρονοσειρών	63

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία

4.1 Περιοχή Μελέτης, Συλλογή Δεδομένων και Υετός	65
4.1.1 Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης (ΕΠΜ): Σπερχειός Ποταμός	65
4.1.2 Συλλογή Δεδομένων: Sentinel – 2 και SkySat Εικόνες	66
4.1.2.1 Δεδομένα SkySat	
4.1.2.2 Δεδομένα Sentinel – 2	
4.1.2.3 Αρχική Χρονοσειρά	
4.1.3 Υετός	71
4.2 Προ – Επεξεργασία των Δορυφορικών Εικόνων	72
4.2.1 Βασικές Έννοιες	72
4.2.2 Ατμοσφαιρική Διόρθωση	72
4.2.2.1 Εφαρμογή Ατμοσφαιρικής Διόρθωσης στις SkySat Εικόνες	
4.2.3 Ραδιομετρική Αναγωγή	82
4.2.3.1 Εφαρμογή Ραδιομετρικής Αναγωγής των Εικόνων SkySat και Sentinel – 2	
4.3 Καθορισμός Τελικών Ορίων Περιοχής Μελέτης	84
4.3.1 Normalized Difference Water Index (NDWI)	85
4.3.2 Κατωφλίωση – Όρια Περιοχής	86
4.4 Φασματικοί Δείκτες	87
4.4.1 Ορισμός	87
4.4.2 Μελέτη Καναλιών	88
4.4.2.1 Μπλε Κανάλι (Blue Band)	
4.4.2.2 Πράσινο Κανάλι (Green Band)	

4.4.2.3	Κόκκινο Κανάλι (Red Band)	
4.4.2.4	Κανάλι στο Εγγύς Υπέρυθρο (NIR Band)	
4.4.2.5	Γενικός Σχολιασμός των Καναλιών	
4.4.3	Τελική Επιλογή των Καταλληλότερων Φασματικών Δεικτών	97
4.4.3.1	Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Χλωροφύλλης – α: NDCI	
4.4.3.2	Δείκτης Ιζημάτων: SI	
4.4.3.3	Άλλοι Φασματικοί Δείκτες	
4.4.3.4	Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς: NDVI	
	Λόγος NIR/Red: SNR	
	Δείκτης Εδαφικής Βλάστησης: SAVI	
	Πράσινη Κανονικοποιημένη Διαφορά Βλάστησης: GNDVI	
4.4.4	Τελικός Σχολιασμός και Επιλογή των Φασματικών Δεικτών	107
4.5	Ελάττωση Διαστάσεων των Δεδομένων: Dimensionality Reduction	108
4.5.1	Προετοιμασία Δεδομένων	108
4.5.2	Εφαρμογή του t – SNE στα Δορυφορικά Δεδομένα	109
4.5.3	Αποτελέσματα Ελάττωσης των Διαστάσεων (t – SNE)	110
4.5.3.1	T – SNE: NDCI	
4.5.3.2	T – SNE: SI	
4.5.3.3	Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων του t – SNE	
4.6	1 ^η Προσέγγιση: Ομαδοποίηση Δεδομένων μέσω του HDBSCAN στα δεδομένα του t – SNE	
4.6.1	Αποτελέσματα της 1 ^{ης} Προσέγγισης	114
4.6.1.1	1 ^η Προσέγγιση Ομαδοποίησης: NDCI	
4.6.1.2	1 ^η Προσέγγιση Ομαδοποίησης: SI	
4.6.2	Τελική Επιλογή της Δοκιμής	119
4.6.2.1	NDCI	
4.6.2.2	SI	
4.6.3	Μεθοδολογία και Τελική Ομαδοποίηση του t – SNE	129
4.7	2 ^η Προσέγγιση: Ομαδοποίηση Δεδομένων μέσω του HDBSCAN σε κάθε εικόνα	130
4.7.1	Individual Clustering: NDCI	131
4.7.1.1	1 ^η Βήμα: Υπολογισμός των Μέσων Όρων κάθε συστάδας: NDCI	
4.7.1.2	2 ^ο Βήμα: Τελικός Καθορισμός του είδους των Κατηγοριών: NDCI	
4.7.2	Individual Clustering: SI	135
4.7.2.1	1 ^η Βήμα: Υπολογισμός των Μέσων Όρων κάθε συστάδας: SI	
4.7.2.2	2 ^ο Βήμα: Τελικός Καθορισμός του είδους των Κατηγοριών: SI	

Κεφάλαιο 5: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

5.1	Οπτικοποίηση του t – SNE της Τελικής Χρονοσειράς	139
5.2	Αποτελέσματα Ομαδοποίησης	141
5.2.1	1 ^η Προσέγγιση: t – SNE & HDBSCAN	141
5.2.2	2 ^η Προσέγγιση: HDBSCAN στις Individual Images: NDCI	156
5.2.2.1	Αποτελέσματα 1 ^{ης} Κατηγορίας – Χαμηλότερες Τιμές (Πορτοκαλί): NDCI	
5.2.2.2	Αποτελέσματα 2ης Κατηγορίας – Μεσαίες Τιμές (Πράσινο): NDCI	
5.2.2.3	Αποτελέσματα 3 ^{ης} Κατηγορίας – Υψηλότερες Τιμές (Κόκκινο): NDCI	
5.2.3	2 ^η Προσέγγιση: HDBSCAN στις Individual Images: SI	156
5.2.3.1	Αποτελέσματα 1 ^{ης} Κατηγορίας – Χαμηλότερες Τιμές (Πορτοκαλί): SI	
5.2.3.2	Αποτελέσματα 2 ^{ης} Κατηγορίας – Μεσαίες Τιμές (Πράσινο): SI	
5.2.3.3	Αποτελέσματα 3 ^{ης} Κατηγορίας – Υψηλότερες Τιμές (Κόκκινο): SI	
5.3	Χλωροφύλλη – α	160

5.3.1	1η Προσέγγιση: Αποτελέσματα Συγκέντρωσης: t – SNE	160
5.3.2	2 ^η Προσέγγιση: Αποτελέσματα Συγκέντρωσης: Individual Images	161
5.3.2.1	Αποτελέσματα 1 ^{ης} Κατηγορίας – Χαμηλότερες Τιμές (Πορτοκαλί): NDCI	
5.3.2.2	Αποτελέσματα 2 ^{ης} Κατηγορίας – Μεσαίες Τιμές (Πράσινο): NDCI	
5.3.2.3	Αποτελέσματα 3 ^{ης} Κατηγορίας – Υψηλότερες Τιμές (Κόκκινο): NDCI	
5.4	Ιζήματα	167
5.4.1	1η Προσέγγιση: Αποτελέσματα Συγκέντρωσης: t – SNE	167
5.4.2	2 ^η Προσέγγιση: Αποτελέσματα Συγκέντρωσης: Individual Images	168
5.4.2.1	Αποτελέσματα 1 ^{ης} Κατηγορίας – Χαμηλότερες Τιμές (Πορτοκαλί): SI	
5.4.2.2	Αποτελέσματα 2 ^{ης} Κατηγορίας – Μεσαίες Τιμές (Πράσινο): SI	
5.4.2.3	Αποτελέσματα 3 ^{ης} Κατηγορίας – Υψηλότερες Τιμές (Κόκκινο): SI	
5.5	Σύγκριση Προσεγγίσεων	174
5.5.1	NDCI: Χλωροφύλλη – α	175
5.5.2	SI: Ιζήματα	177

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Περαιτέρω Σχολιασμοί

6.1	Περίληψη των Ερευνητικών Στόχων	179
6.2	Ερμηνεία Αποτελεσμάτων	179
6.2.1	Χλωροφύλλη – α	183
6.2.2	Ιζήματα	185
6.3	Σύγκριση Προσεγγίσεων	188
6.4	Προτερήματα και Αδυναμίες στις Μεθοδολογίες	188
6.5	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	190
6.6	Τελευταίες Σκέψεις και Παρατηρήσεις	191
	Βιβλιογραφία	192
	Κατάλογος Εικόνων	196
	Κατάλογος Πινάκων	200
	Κατάλογος Διαγραμμάτων	201

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

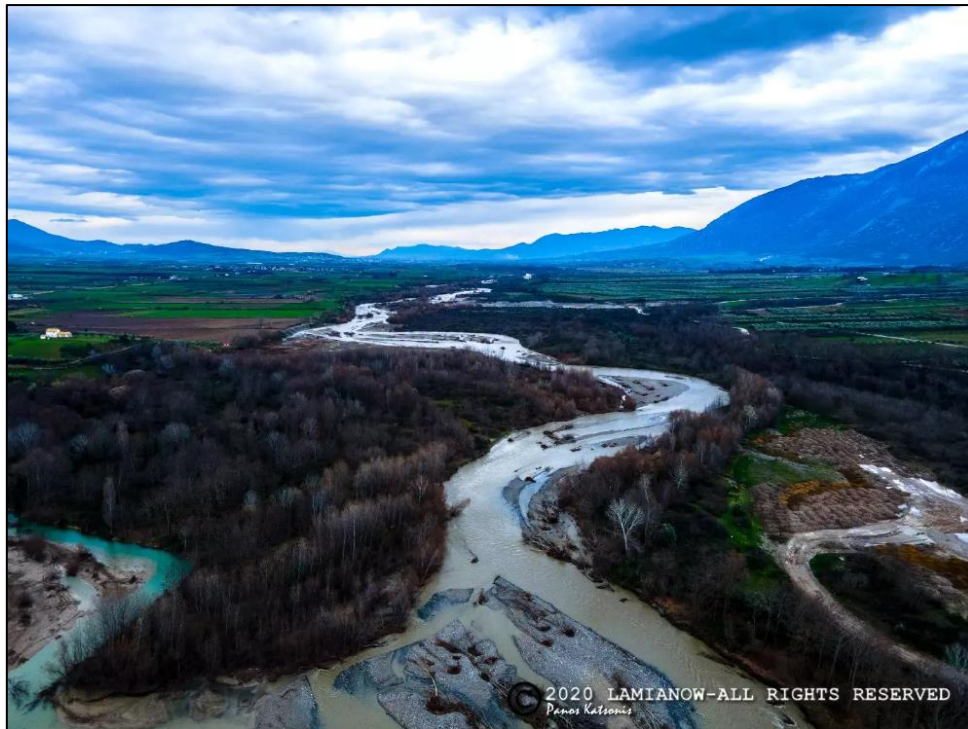
1.1 Ιστορικό

1.1.1 Περιεχόμενο Μελέτης

Κατά κοινή ομολογία, η Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος (ή αλλιώς Environmental Monitoring) διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην κατανόηση και τη διαχείριση της υγείας των οικοσυστημάτων, ιδιαίτερα στην αξιολόγηση της ποιότητας του νερού. Πιο συγκεκριμένα, η παρακολούθηση της ποιότητας των παραποτάμιων υδάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αυτά τα οικοσυστήματα παρέχουν πόρους πόσιμου νερού, ενισχύουν τη γεωργία, ενώ στηρίζουν και τη βιομηχανία. [1] Παράλληλα, η αξιολόγηση των αλλαγών στην ποιότητα του νερού με την πάροδο του χρόνου, βοηθά τόσο στον εντοπισμό των πηγών ρύπανσης, αλλά και στην κατανόηση των συνεπειών των φυσικών και των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων σε αυτά τα υδάτινα οικοσυστήματα. [2]

Οι δορυφορικές εικόνες έχουν αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο στον τομέα της Παρακολούθησης του Περιβάλλοντος, μιας και προσφέρουν μια εκτεταμένη κάλυψη της επιφάνειας της Γης σε μεγάλη κλίμακα. Αναλυτικότερα, οι δορυφόροι SkySat και Sentinel – 2 «τραβούν» απεικονίσεις υψηλής ανάλυσης, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό δεικτών, βοηθώντας έτσι στην ανάλυση της ποιότητας του νερού. Για τους παραπάνω λόγους, η δορυφορική απεικόνιση έχει διάφορα οφέλη στην παρακολούθηση της ποιότητας του νερού, διότι έχει την ικανότητα να εντοπίσει και να ερευνήσει δυσπρόσιτα σημεία, να παρακολουθήσει ευρύς γεωγραφικές περιοχές και να αναγνωρίσει τις αλλαγές που δημιουργούνται με την πάροδο του χρόνου, έχοντας, ταυτόχρονα, υψηλή χρονική ακρίβεια. [3]

Ο Σπερχειός Ποταμός, που βρίσκεται στην πεδινή περιοχή της Στερεάς Ελλάδας (Περιφερειακή Ενότητα Φθιώτιδας, μεταξύ της Ανθήλης και του Κόμματος), έχει σημαντικό οικολογικό και υδρολογικό ρόλο στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, υποστηρίζει μια ποικίλη χλωρίδα και πανίδα, ενώ παρέχει ζωτικής σημασίας αποθέματα νερού, τόσο για την ανθρώπινη χρήση, αλλά και για τη γεωργία, ενώ η υγεία του ποταμού έχει άμεσο αντίκτυπο στη διαβίωση των ανθρώπων, καθώς και στη γενική περιβαλλοντική ακεραιότητα της περιοχής. [4] Παρόλα αυτά, ο Σπερχειός, όπως και πολλοί άλλοι ποταμοί σε όλο τον κόσμο, υφίσταται πίεση από γεωργικές απορροές, βιομηχανικές απορρίψεις και άλλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες που μπορούν να βλάψουν την ποιότητα του νερού του και να καταστρέψουν τα υδρόβια είδη.



Εικόνα 1: "Δέλτα" Σπερχειού Ποταμού, Source: Panos Katsonis, LamiaNow (2020)

Με βάση όλα τα παραπάνω, είναι φυσικό και επόμενο να θεωρηθεί ότι η ποιότητα του νερού του Σπερχειού Ποταμού πρέπει να παρακολουθείται, προκειμένου να διατηρηθεί η φυσική του ισορροπία και να διασφαλιστεί η βιώσιμη χρήση των πόρων του. Η παρούσα εργασία, χρησιμοποιεί σύγχρονα εργαλεία δορυφορικής απεικόνισης και επεξεργασίας δεδομένων, που έχουν ως σκοπό τον εντοπισμό και την καταγραφή αλλαγών στην ποιότητα του νερού με την πάροδο του χρόνου. Στόχος είναι να δοθούν σημαντικές πληροφορίες για τη χρονική δυναμική του οικοσυστήματος του ποταμού χρησιμοποιώντας τεχνολογίες Τηλεπισκόπησης και εξελιγμένα αναλυτικά εργαλεία, που θα επιφέρουν αποτελεσματικές πρωτοβουλίες περιβαλλοντικής διαχείρισης.

1.1.2 Παρακολούθηση Περιβάλλοντος μέσω Δορυφορικών Εικόνων – Satellite Imagery in Environmental Monitoring

Όπως προαναφέρθηκε, η δορυφορική απεικόνιση είναι κρίσιμης σημασίας για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, μιας και παρέχει μια ολοκληρωμένη και επαναλαμβανόμενη, μεγάλης κλίμακας ικανότητα παρατήρησης, η οποία απαιτείται για την παρακολούθηση και την ανάλυση των αλλαγών στο περιβάλλον με την πάροδο του χρόνου. Μεταξύ των διαφόρων διαθέσιμων δορυφορικών πλατφορμών, οι Sentinel – 2 και SkySat ξεχωρίζουν για τις εξελιγμένες δυνατότητες απεικόνισης, οι οποίες είναι ιδιαίτερα πολύτιμες για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών αλλαγών, όπως η ποιότητα του νερού στα ποτάμια.

1.1.2.1 Δορυφόρος SkySat: Ιστορία και Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Ο δορυφόρος SkySat ανήκει σε έναν σχηματισμό (constellation) από είκοσι ένα (21) δορυφόρους υψηλής ανάλυσης, που έχουν ως σκοπό την απεικόνιση της Γης, παρέχοντας λεπτομερείς εικόνες και βίντεο της επιφάνειας του πλανήτη. Αναλυτικότερα, αυτοί οι δορυφόροι εκτοξεύτηκαν μεταξύ του 2013 και του 2020, με τον Skysat – 1 να είναι ο πρώτος στη σειρά το 2013. Αρχικά, οι δύο πρώτοι δορυφόροι (ο SkySat – 1 και ο SkySat – 2) ανήκαν στις γενιές A και B αντίστοιχα, ενώ οι υπόλοιποι δεκαεννιά (19) δορυφόροι ανήκουν στην εκσυγχρονισμένη γενιά C. Η γενιά C, η οποία και χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη περίπτωση, περιλαμβάνει τους δορυφόρους Skysat – 16 έως Skysat – 21, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε μη – σύγχρονες τροχιές για να βελτιώσουν την συχνότητα λήψης εικόνων. Όλη αυτή η διεργασία επέτρεψε έως και δώδεκα (12) επανεπισκέψεις την ημέρα σε ορισμένες περιοχές της Γης και καταφέρνει κατά μέσο όρο 6 με 7 επανεπισκέψεις ημερησίως παγκοσμίως. Ακόμα, οι δορυφόροι SkySat διαθέτουν κάμερες υψηλής απόδοσης με τηλεσκόπιο Cassegrain και εστιακή απόσταση 3.60 μέτρων. Οι κάμερες αυτές αποτελούνται από τρεις ανιχνευτές CMOS 5.5 megapixel που καλύπτουν διάφορες φασματικές ζώνες, όπως το μπλε (450 – 515 nm), το πράσινο (515 – 595 nm), το κόκκινο (605 – 695 nm) και το εγγύς υπέρυθρο (740 – 900 nm).



Εικόνα 2: SkySat Satellites, Source: ESA

Ο σχηματισμός των δορυφόρων SkySat περιλαμβάνει δύο τύπους τροχιών: τις ηλιο – σύγχρονες (sun – synchronous) και τις μη – ηλιοσύγχρονες (non – sun – synchronous) τροχιές. Συγκεκριμένα, οι δορυφόροι SkySat – 1 έως SkySat – 15 λειτουργούν σε ηλιο – σύγχρονες τροχιές, ενώ οι δορυφόροι SkySat – 16 έως SkySat – 21 βρίσκονται σε κεκλιμένες, μη – ηλιοσύγχρονες τροχιές. Αυτή η ποικιλία τροχιών βοηθά στην αύξηση της συχνότητας λήψης των εικόνων, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση του σχηματισμού. Το πλάτος των λωρίδων της εικόνας που καταγράφουν οι δορυφόροι SkySat ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του δορυφόρου. Για παράδειγμα, ο SkySat – 1 και ο SkySat – 2 έχουν πλάτος λωρίδας 8 km στο ναδίρ, ενώ ο SkySat – 3 έως και τον SkySat – 15 έχουν πλάτος 5.90 km και οι SkySat – 16 έως Skysat – 21 έχουν πλάτος 5.50 km. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγιστο μήκος μιας λωρίδας εικόνας φτάνει μέχρι και τα 200 km, επιτρέποντας έτσι μια εκτεταμένη κάλυψη της επιφάνειας της Γης με ένα μόνο πέρασμα. [5]

1.1.2.2 Δορυφόρος Sentinel – 2: Ιστορία και Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Ο Sentinel – 2 είναι ένας σημαντικός πυλώνας του προγράμματος Copernicus της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (ESA), μιας και περιλαμβάνει μια ομάδα δορυφόρων παρακολούθησης της Γης για την απόκτηση οπτικών εικόνων υψηλής ανάλυσης. Αναλυτικότερα, κάθε δορυφόρος Sentinel – 2 καταγράφει πληροφορίες σε διάφορες φασματικές ζώνες από το ορατό φάσμα έως το υπέρυθρο φάσμα, κάτι που επιτρέπει την αναλυτική αξιολόγηση της φύσης της επιφάνειας της Γης και την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών μεταβολών.



Εικόνα 3: Copernicus Sentinel 2, Source: Copernicus Data Space Ecosystem

Ο Sentinel - 2A εκτοξεύτηκε τον Ιούνιο του 2015, ενώ ο Sentinel - 2B ακολούθησε τον Μάρτιο του 2017, με τους δυο δορυφόρους να περιφέρονται σε συγχρονισμό με τον Ήλιο σε υψόμετρο 786 km, προσφέροντας έτσι σταθερές συνθήκες φωτισμού οι οποίες είναι ιδανικές για την απεικόνιση αυτή. Η φάση 180 μοιρών των δορυφόρων, επιτρέπει στους δορυφόρους να επισκέπτονται την ίδια περιοχή στη Γη κάθε 5 ημέρες, βελτιώνοντας έτσι την ανάλυση του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, το Multi – Spectral Instrument (MSI) των Sentinel - 2A και Sentinel - 2B καταγράφει δεδομένα σε δεκατρείς (13) φασματικές ζώνες, από το ορατό φως μέχρι το υπέρυθρο (infrared). Αυτή η φασματική ποικιλομορφία επιτρέπει την ανάλυση της κάλυψης του εδάφους, την υγεία της βλάστησης, την ποιότητα του νερού, αλλά και άλλες περιβαλλοντικές παραμέτρους. Η χωρική ανάλυση (spatial resolution) των εικόνων ποικίλλει από 10 έως 60 μέτρα, παρέχοντας, έτσι, λεπτομερείς πληροφορίες για την επιφάνεια της Γης και τις αλλαγές της. [6]

1.1.2.3 Σπουδαιότητα συνδυασμού των SkySat και Sentinel – 2 δορυφόρων

Ο συνδυασμός των δυο παραπάνω δορυφόρων, επιτρέπει μια πιο ισχυρή παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Αναλυτικότερα, το ευρύ φάσμα φασματικής κάλυψης (spectral coverage) του Sentinel – 2 και τα τακτικά διαστήματα επιστροφής του, επιτρέπουν την λεπτομερή παρακολούθηση και τον εντοπισμό των πιο εκτεταμένων περιβαλλοντικών αλλαγών. Αυτό ενισχύεται από την υψηλή χωρική ανάλυση (high spatial resolution) του SkySat, ο οποίος προσφέρει ακριβή αποτελέσματα, που βοηθούν στην επιβεβαίωση των συμπερασμάτων που εξάγονται από τα δεδομένα του Sentinel – 2. Θα μπορούσε να ειπωθεί, λοιπόν, ότι η ολοκληρωμένη ανάλυση της ποιότητας του νερού καθίσταται πιο δυνατή με τον συνδυασμό των δορυφορικών εικόνων του Sentinel – 2 και του SkySat. Η συγκεκριμένη μελέτη, μπορεί να εντοπίσει, να καταγράψει και να αναλύσει με ακρίβεια τις αλλαγές στη σύνθεση του νερού χρησιμοποιώντας τα πλεονεκτήματα και των δύο δορυφορικών συστημάτων, κάτι που θα βελτιώσει την κατανόησή της βιολογικής δυναμικής του ποταμού και θα διευκολύνει τη διαχείριση και την προστασία του περιβάλλοντος.

1.2 Ορισμός Προβλήματος: Ερευνητικό Κενό και Εστίαση στις Μελέτες

Παρ' όλη την πρόοδο στην Τηλεπισκόπηση και στη διαθεσιμότητα πολλών δορυφορικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης, υπάρχει ακόμα ένα κενό στην εφαρμογή τους για την πλήρη παρακολούθηση της ποιότητας του νερού του Σπερχειού Ποταμού. Σε προηγούμενες έρευνες, χρησιμοποιήθηκαν είτε εικόνες Landsat και ERS – 2 [7], είτε δειγματοληψίες από σταθμούς μέτρησης λεκανών απορροής [8]. Από την μία, οι απεικονίσεις Landsat και ERS – 2 είναι λιγότερο συχνές και έχουν μικρότερη ανάλυση, ενώ από την άλλη, οι σταθμοί δίνουν δεδομένα μόνο για συγκεκριμένα σημεία, τα οποία ενδέχεται να μην είναι σε θέση να μεταφέρουν πλήρως τις δυναμικές αλλαγές και την ευρύτερη χωρική μεταβλητότητα που εμφανίζονται σε ολόκληρη τη λεκάνη απορροής του ποταμού. Για την παροχή μιας ενδεδειγμένης και συνεχούς χρονικής μελέτης των δεικτών ποιότητας του νερού στον Σπερχειό Ποταμό, απαιτείται μια έρευνα που συνδυάζει και υψηλής ανάλυσης, πολυφασματικά δορυφορικά δεδομένα, μαζί με εξελιγμένες προσεγγίσεις επεξεργασίας εικόνας και ομαδοποίησης.

Ο κύριος στόχος αυτής της μελέτης είναι ο εντοπισμός και η καταγραφή αλλαγών στη χημική και στην υλική σύσταση των ρεμάτων του Σπερχειού Ποταμού σε μια περίοδο τριών μηνών. Χρησιμοποιώντας μια συλλογή από δεκαέξι (16) δορυφορικές απεικονίσεις Sentinel – 2 και SkySat, η έρευνα επιχειρεί να εντοπίσει αξιοσημείωτες παραλλαγές στην κάλυψη του νερού εντός αυτής της χρονικής περιόδου, χρησιμοποιώντας μια ποικιλία δεικτών κάλυψης του νερού. Αυτά τα δεδομένα των χρονοσειρών εμφανίζονται σε ένα δισδιάστατο χώρο και

χρησιμοποιώντας τεχνικές μείωσης διαστάσεων θα λάβει χώρα μια απλοποίηση αυτών των πολύπλοκων δεδομένων. Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά θα χωριστούν σε τρεις ομάδες χρησιμοποιώντας μια προσεγγιστική ομαδοποίηση που βασίζεται στην πυκνότητα των εικονοστοιχείων.

Επίκεντρο αυτής της μελέτης, θα είναι ο προσδιορισμός και η αξιολόγηση της ποσότητας της χλωροφύλλης – α και των ιζημάτων στον ποταμό, όπως φαίνεται από τον Δείκτη Κανονικοποιημένης Διαφοράς της Χλωροφύλλης (NDCI) και τον Δείκτη Ιζημάτων (SI). Μέσω της χρήσης του Hierarchical Density – Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN), σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση του t – distributed Stochastic Neighbor Embedding (t – SNE), η μελέτη συνδυάζει δύο μεθόδους ανάλυσης δεδομένων:

- 1) Εντοπισμός των συστάδων σε ολόκληρη τη χρονοσειρά
- 2) Ξεχωριστή ανάλυση των δεκαέξι (16) δορυφορικών εικόνων

Τα αποτελέσματα από αυτές τις δυο προσεγγίσεις θα συγκριθούν και θα αξιολογηθούν για την αποτελεσματικότητά τους στην αποτύπωση της χρονικής δυναμικής. Έτσι, παρέχοντας ένα πλαίσιο παρακολούθησης του Σπερχειού Ποταμού, μέσω της χρήσης τεχνικών τηλεπισκόπησης και ανάλυσης δεδομένων, επιδιώκεται να κλείσει το κενό γνώσης (knowledge gap), κάτι που θα οδηγήσει σε πιο επιτυχημένες στρατηγικές περιβαλλοντικής διαχείρισης.

1.3 Ερευνητικοί Στόχοι

1.3.1 Κύριοι Στόχοι

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, κύριος στόχος της μελέτης είναι ο εντοπισμός και η καταγραφή των αλλαγών στη σύσταση των ουσιών των ρεμάτων του Σπερχειού Ποταμού σε μια περίοδο τριών μηνών, με σκοπό να της αξιολόγηση της δυναμικής της ποιότητας του νερού μέσω δορυφορικών εικόνων και αναλυτικών μεθόδων.

Για αρχή, λαμβάνοντας υπόψη την οικολογική σημασία του Σπερχειού Ποταμού, είναι αναγκαίο να καταγραφεί η ποιότητα του νερού του ποταμού, που θα έχει ως σκοπό τη διατήρηση της υγείας του περιβάλλοντος και όχι μόνο. Ακόμα, η χρήση των δυο διαφορετικών δορυφόρων, θα επιτρέψει τον εντοπισμό σημαντικών ουσιών (χλωροφύλλη – α και ιζήματα), ενώ θα σκιαγραφηθούν γεωγραφικά οι περιοχές ενδιαφέροντος, στις οποίες και σημειώνονται οι πιο αξιοσημείωτες αλλαγές.

1.3.2 Ειδικό Στόχοι

Ο **πρώτος** ειδικός στόχος είναι η ανάλυση των δορυφορικών εικόνων χρησιμοποιώντας δείκτες υδατοκάλυψης όπως ο Δείκτης Κανονικής Διαφοράς Χλωροφύλλης (NDCI) και ο Δείκτης

Ιζημάτων (SI) για την παρακολούθηση των αλλαγών στη συγκέντρωση χλωροφύλλης – α και στην παρουσία ιζημάτων, αντίστοιχα. Αυτοί οι δείκτες είναι σημαντικοί για την κατανόηση της δυναμικής της ρύπανσης και της οικολογικής υγείας στο περιβάλλον του ποταμού.

Ο **δεύτερος** ειδικός στόχος είναι η εφαρμογή των τεχνικών μείωσης διαστάσεων και ειδικότερα του $t - SNE$ για την απεικόνιση της χρονικής δυναμικής των δεδομένων δορυφορικών εικόνων σε έναν δισδιάστατο χώρο. Έτσι, η εύρεση μοτίβων ή συμπλεγμάτων στα δεδομένα που μπορεί να μην είναι ορατά στον αρχικό πολυδιάστατο χώρο γίνεται ευκολότερη.

Ο **τρίτος** ειδικός στόχος είναι η χρήση αλγορίθμων ομαδοποίησης και ειδικότερα του HDBSCAN, για τον εντοπισμό και την κατηγοριοποίηση των σημαντικών χωρικών και χρονικών αλλαγών στους δείκτες ποιότητας του νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Τα αλλαγμένα δεδομένα θα ομαδοποιηθούν σε ομάδες με βάση τις χρονικές και τις γεωγραφικές ιδιότητες τους και με αυτόν τον τρόπο θα εντοπιστούν γεωγραφικά απομονωμένες περιοχές καθώς και επαναλαμβανόμενα μοτίβα στους δείκτες ποιότητας του νερού.

Ο **τέταρτος** και τελευταίος ειδικός στόχος είναι η σύγκριση της αποτελεσματικότητας των δυο διαφορετικών προσεγγίσεων ομαδοποίησης: η μια που αναλύει όλα τα δεδομένα χρονοσειράς ταυτόχρονα και η άλλη που αναλύει κάθε δορυφορική εικόνα ανεξάρτητα, έτσι ώστε να αξιολογηθούν οι αντίστοιχες ικανότητές τους στην καταγραφή της χρονικής δυναμικής και της χωρικής μεταβλητότητας.

1.4 Σπουδαιότητα στις Μελέτες

Η διασφάλιση της ασφαλούς παροχής νερού, η διατήρηση της βιοποικιλότητας και η υγεία του οικοσυστήματος εξαρτώνται κατά πολύ από την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού. Ειδικότερα, ο Σπερχειός Ποταμός υπόκειται σε μεγάλες περιβαλλοντικές προκλήσεις από την φυσική μεταβλητότητα και τις γεωγραφικές απορροές, γι' αυτό παρακολουθώντας και αναλύοντας τη δυναμική της ποιότητας των υδάτων του (μέσω της χρήσης, τόσο δορυφορικών εικόνων, όσο και αναλυτικών μεθόδων), επιχειρείται να υποστηριχθούν πολιτικές περιβαλλοντικής διαχείρισης που ελαχιστοποιούν τη ρύπανση, διατηρούν τη βιοποικιλότητα και προωθούν πρακτικές βιώσιμης χρήσης του νερού.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η επιστημονική κοινότητα θα επωφεληθεί πολύ από αυτή την εργασία σε διάφορους σημαντικούς τομείς. Για αρχή, η έρευνα διευρύνει τη χρήση της Τηλεπισκόπησης στην παρακολούθηση δυναμικών περιβαλλοντικών διεργασιών συνδυάζοντας δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης (Sentinel – 2 και SkySat) με μεθόδους ανάλυσης δεδομένων, όπως τον αλγόριθμο μείωσης διαστάσεων και ομαδοποίησης. Αυτές οι μέθοδοι παρέχουν ένα

πρότυπο για μελλοντικές μελέτες σε παρόμοια περιβάλλοντα και παρέχουν διαφοροποιημένες γνώσεις σχετικά με τη χρονική και τη γεωγραφική μεταβλητότητα των μετρήσεων της ποιότητας του νερού. Ακόμα, συνδέοντας την περιβαλλοντική επιστήμη, την ανάλυση δεδομένων και την Τηλεπισκόπηση, προωθείται η διεπαγγελματική συνεργασία διαφορετικών τομέων και τονίζεται πόσο σημαντικός είναι ο συνδυασμός τεχνολογιών, γεγονός που προάγει την επιστημονική γνώση και τη μεθοδολογική ανάπτυξη σε αυτούς τους τομείς.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι τα συμπεράσματα αυτής της έρευνας έχουν ποικίλες εφαρμογές σε αντικείμενα που αφορούν τη διατήρηση του περιβάλλοντος και τη διαχείριση των υδάτων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας αυτή την μελέτη, είναι δυνατή η δημιουργία κανόνων και πολιτικών που θα βελτιώσουν τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας του νερού και μέσω των αποτελεσμάτων, είναι δυνατό να προωθηθούν πρωτοβουλίες για ενίσχυση της κατανόησης του κόσμου για τη σημασία της διατήρησης των ποτάμιων οικοσυστημάτων. Η παρακολούθηση των δεικτών ποιότητας του νερού σε πραγματικό χρόνο, είναι πιθανό να βοηθήσει στον έγκαιρο εντοπισμό συμβάντων ρύπανσης και στην έγκαιρη δράση για τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Επισκόπηση στις Περιβαλλοντικής Παρακολούθησης με χρήση Δορυφορικών Εικόνων

2.1.1 Εισαγωγή στην Δορυφορική Απεικόνιση

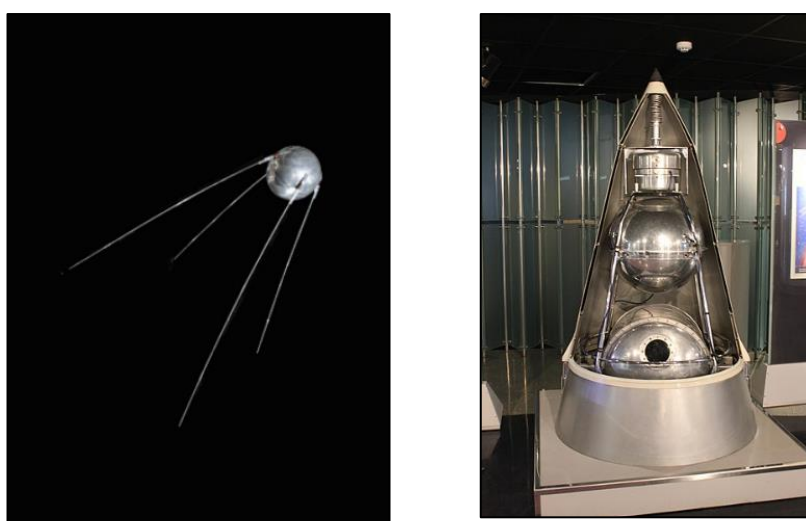
Οι δορυφορικές εικόνες καθιστούν δυνατή τη συνεχή και ενδελεχή παρατήρηση της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας της Γης και γι' αυτό από την εφεύρεση τους έως και τις τρέχουσες χρήσεις τους, η δορυφορική τεχνολογία έχει μεταμορφώσει την κατανόησή και την παρακολούθηση των περιβαλλοντικών αλλαγών, αλλά και τη μελέτη και τη διαχείριση των φυσικών πόρων.

1600 και 1700 1687 - Ο 21ος Ισαάκ Νεύτων (Sir Isaac Newton) συνοψίζει τους βασικούς νόμους της μηχανικής στο έργο του, Principia	Δεκαετία του '50 1950 - Εφεύρεση της τηλεπισκόπησης στο θηλαίο υπέρυθο από τα στρατά 1950 - 1953 Φωτοαναγνώριση από αέρα κατά τον Πόλεμο της Κορέας 1953 - Photogrammetric Record (Φωτογραμματικές Society, UK) 1954 - Η εταιρεία Westinghouse, Inc. κατασκευάζει αεροφωτογραφικό σύστημα ραντάρ πλεροφορικής παρατήρησης 1955 έως 1956 - Αμερικανικό Πρόγραμμα Genetics για αναγνώριση από αερόπλοια 1956 έως 1960 - Πρόγραμμα αναγνώρισης από αέρα με αεροσκάφη U-2 για τη CIA (Central Intelligence Agency) 1957 - Η Σοβιετική Ένωση εκτοξεύει το δορυφόρο Sputnik (Σπούτνικ) (4 Οκτωβρίου) 1958 - Οι ΗΠΑ εκτοξεύουν το δορυφόρο Explorer 1 (31 Ιανουαρίου)	Δεκαετία του '70 - Η φυσική επεξεργασία εικόνων υπέρυθου Δεκαετία του '70 - Η τηλεπισκόπηση ενώνεται με τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών 1972 - Εκτόξευση του δορυφόρου ERTS-1 (Earth Resource Technology Satellite) NASA 1973-1979 Πρόγραμμα Skylab (NASA) 1973 - Canadian Journal of Remote Sensing (Canadian RS Society) (Περιοδικό) 1975 - Εκτόξευση του δορυφόρου ERTS-1 (το οποίος μετονομάστηκε σε Landsat 2) 1975 - Manual of Remote Sensing (ASP) (Εγχειρίδιο Τηλεπισκόπησης) 1977 - Εκτόξευση του δορυφόρου METEOSAT-1 (Ευρωπαϊκή Space Agency) (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστημικού) 1978 - Εκτόξευση του δορυφόρου Landsat 3 (NASA) 1978 - Εκτόξευση του δορυφόρου Nimbus 7 - Coastal Zone Color Scanner (Εγχειρίδιο Συστήματος Παράτησης Ζώνης) 1978 - Εκτόξευση του δορυφόρου TIROS-N με αισθητήρα AVHRR 1978 - Εκτόξευση του δορυφόρου SEASAT (NASA Jet Propulsion Laboratory) (Εργαστήριο Αεροποροδότησης της NASA)	1990 - Εκτόξευση του δορυφόρου SPOT 2 (από την εταιρεία SPOT Image, Inc.) 1991 - Έναρξη της αποστολής "Mission to Planet Earth" («Ανασκόπηση στον Πλανήτη Γη») (NASA) 1991 - Εκτόξευση του δορυφόρου ERS-1 (Ευρωπαϊκή Space Agency) (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστημικού) 1992 - Η πρώτη U.S. Land Remote Sensing Policy Act γίνεται νόμος 1993 - Ο δορυφόρος Landsat 6 δεν τίθεται επίσημα σε τροιά (Landsat 6, 1993 - Εκτόξευση του δορυφόρου SPOT 3 (από την εταιρεία SPOT Image, Inc.) 1993 - Εκτόξευση του Space Shuttle Imaging Radar (SIR-C) (NASA) (Παντάρ Αποσκευών του Διαστημικού Λεωφορείου) 1995 - Εκτόξευση του δορυφόρου RADARSAT-1 (Καναδάς) 1995 - Εκτόξευση του δορυφόρου ERS-2 (Ευρωπαϊκή Space Agency) (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστημικού) 1995 - Εκτόξευση του δορυφόρου IRS-1C, IS-1S (Indian Remote Sensing Program) (Εθνική Πιλοτική Τηλεπισκόπησης) 1995 - Αποκαρκτηρισμός των αποσκευών από τη πρόσοψη CORONA, μεταφορά τους στα Εθνικά Αρχεία των ΗΠΑ 1996 - Manual of Photogrammetric Interpretation, 2nd Ed. (ASPRS) (Εγχειρίδιο Φωτογραμματικής, 2η Έκδοση) 1997 - Ο δορυφόρος Earlybird (της εταιρείας EarthView, Inc.) δεν τίθεται επίσημα σε τροιά 1998 - Η αποστολή Mission to Planet Earth ολοκληρώνεται, Earth Science Enterprise (Επιχειρήσιμη Επιτοξία) (NASA) 1998 - Manual of Remote Sensing - RADAR (από την εταιρεία Τηλεπισκόπησης - Panavia) 1999 - Εκτόξευση του δορυφόρου SPOT 4 (από την εταιρεία SPOT Image, Inc.) 1999 - Manual of Remote Sensing - Geospatial Data Analysis and Τηλεπισκόπησης - Βασισμένη στην Εφαρμογή 1999 - Εκτόξευση του δορυφόρου Landsat 7 (Επιχειρήσιμη Πιλοτική Θερματικό Χαρτογράφος) (NASA, 15 Απριλίου) 1999 - Ο δορυφόρος IKONOS δεν τίθεται επίσημα σε τροιά από την εταιρεία Space Imaging, Inc. 27 Απριλίου 1999 - Εκτόξευση του δορυφόρου IKONOS 2 (από την εταιρεία Space Imaging, Inc. 24 Σεπτεμβρίου) 1999 - Εκτόξευση του δορυφόρου Terra Earth Observing System (Σύστημα Παρατήρησης της Γης) (NASA) 1999 - Εκτόξευση του δορυφόρου ImageSat (Israel ImageSat International)
1900 1903 - Η εφεύρεση του αεροπλάνου από τους αδελφούς Ράιτ (Wright Brothers) (17 Δεκεμβρίου) 1903 - Ο Άλφρεντ Νόκ (Alfred Noth) κατονομάζει με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας μια φωτογραφική μηχανή λήψης φωτογραφιών από πτόραιο	Δεκαετία του '60 1960 - Αεροναυπηγική εταιρεία Willow Run στο Μίσιγκαν - ελεγχόμενα Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Ερευνών του Μίσιγκαν, ERIM (Environmental Research Institute of Michigan) Δεκαετία του '60 - First International Symposium on Remote Sensing of Environment (Πρώτο Διεθνές Συμπόσιο για την Τηλεπισκόπηση των Περιβάλλοντος) στην πόλη Άνν Άρμπορ (Ann Arbor) της πολιτείας Μίσιγκαν Δεκαετία του '60 - Το εργαστήριο τηλεπισκόπησης των δασών (Forestry Remote Sensing Lab) στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια στο Μέρσεϊντ (U.C., Berkeley) (από τον Ρόμπερτ Κάβελντ) (Robert Cabell) Δεκαετία του '60 - Το ITC - Delta (επί του Ντλάρ) εκπαιδεύει έλληνες φοιτητές στη φωτογραμματρία Δεκαετία του '60 - Η φυσική επεξεργασία εικόνων αρχίζει να εφαρμόζεται στα εργαστήρια LARS, Μιλγουόκι, Κάνσας, ERIM. Δεκαετία του '60 - Αποκαρκτηρισμός των ραντάρ και των θερμικών υπέρυθων συστημάτων αισθητήρων 1960 - 1972 Πρόγραμμα κατασκευαστικών δορυφόρων CORONA των ΗΠΑ 1960 - Manual of Photo-interpretation (ASP) (Εγχειρίδιο της Φωτογραμματικής) 1960 - Η Έβελιν Γκρόντ (Evelyn Pruitt) και άλλα μέλη του προσωπικού του Πρωτεύον Ναυτικού Εργαστηρίου ΗΠΑ (U.S. Office of Naval Research) ανέπτυξαν τον όρο remote sensing (τηλεπισκόπηση) 1961 - Ο Πιερ Γκαγκαρίν (Yuri Gagarin) είναι ο πρώτος άνθρωπος που ταξιδεύει στο διάστημα 1961 - 1963 Διαστημικό Πρόγραμμα Mercury 1962 - Θεωρητική Κρήση της Κοζιόβ - εικόνες φωτοαναγνώρισης από αεροσκάφη U-2 παρασπονδούνται στο κοινό 1964 - Σκόνη για τα αεροσκάφη SR-71 σε ανέναντη τύπου του Προέδρου των ΗΠΑ Λίντον Τζόνσον (Lyndon Johnson) 1965 έως 1966 - Διαστημικό Πρόγραμμα Gemini 1965 - ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing (Περιοδικό της ISPRS) 1969 - Έκδοση του περιοδικού Remote Sensing of the Environment (Elsevier)	Δεκαετία του '80 1980 - AAG Remote Sensing Specialty Group > 500 μέλη Δεκαετία του '80 - Αποστορά και αποστολή εμπνερασματοποίησης - EOSAT, Inc. 1980 - Η ISP γίνεται Intl. Soc. For Photogrammetry & Remote Sensing (ISPRS - Διεθνής Ένωση Φωτογραμματικής και Τηλεπισκόπησης) 1980 - International Journal of Remote Sensing (Remote Sensing Society) (Περιοδικό) 1980 - Δημιουργείται η ESA - European Space Agency (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστημικού) (30 Οκτωβρίου) 1980 - IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing (GRSS Society) (Περιοδικό) 1981 - First International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Το πρώτο Διεθνές Συμπόσιο Γεωεπιστημών και Τηλεπισκόπησης) 1981 - Έναρξη του προγράμματος NASA Space Shuttle (STS-1) (Διαστημικό Λεωφορείο της NASA) 1981 - Εκτόξευση του Space Shuttle Imaging Radar (SIR-A) (NASA) (Παντάρ Αποσκευών του Διαστημικού Λεωφορείου) 1982 - Εκτόξευση του δορυφόρου Landsat 4 - Θερματικός Χαρτογράφος TM και Πολυφασματικός Συστήματος MSS (NASA) 1983 - Manual of Remote Sensing, 2nd Ed. (ASP) (Εγχειρίδιο Τηλεπισκόπησης, 2η Έκδοση) 1984 - Εκτόξευση του δορυφόρου Landsat 5 - Θερματικός Χαρτογράφος και Πολυφασματικός Συστήματος MSS (NASA) 1984 - Εκτόξευση του Space Shuttle Imaging Radar (SIR-B) (NASA) (Παντάρ Αποσκευών του Διαστημικού Λεωφορείου) 1986 - Εκτόξευση του δορυφόρου SPOT 1 (από την εταιρεία SPOT Image, Inc.) 1986 - Έναρξη Geocarto International (Geocarto International Center) 1989 - The Earth Observer (NASA Goddard Space Flight Center)	2000-2006 2000 - Έναρξη του προγράμματος New Millennium (NASA) 2001 - Εκτόξευση του δορυφόρου Quickbird (από την εταιρεία DigitalGlobe, Inc.) 2002 - Εκτόξευση του δορυφόρου Aqua Earth Observing System (Σύστημα Παρατήρησης της Γης) (NASA) 2002 - Εκτόξευση του δορυφόρου ENVISAT (European Space Agency) (Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Διαστημικού) 2002 - Ανάπτυξη αλγόριθμων αντικειμενομετρικού κατάταξης εικόνων 2003 - Εκτόξευση του δορυφόρου OrbView-3 (από την εταιρεία ORBIMAGE, Inc.) 2004 - Έκδοση του GIScience & Remote Sensing (Bellwether Publishing, Inc.) 2004 - Manual of Photogrammetry, 5th Ed. (ASPRS) (Εγχειρίδιο Φωτογραμματικής, 5η Έκδοση) 2005 - Η Google Earth παρέχει δεδομένα από την DigitalGlobe και τον Landsat TM 2006 - Η εταιρεία ORBIMAGE αγοράζει την εταιρεία Space Imaging και μετονομάζεται σε GeoEye

Εικόνα 4: Ορόσημα Τηλεπισκόπησης, Source: Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος, Μια προοπτική για τα φυσικά δεδομένα: Κεφάλαιο 1, John R. Jensen

Η πρώτη φωτογραφία από εναέρια πλατφόρμα τραβήχτηκε το 1858 από τον Γκάσπερ Φελίξ Τουρνάσον (Gaspard Felix Tournachon) ή αλλιώς Ναντάρ (Nadar), ο οποίος φωτογράφησε υπονόμους και τις κατακόμβες του Παρισιού. [9] Σημαντικά άλματα στην τεχνική της

αεροφωτογραφίας, αλλά και σε άλλους τομείς συλλογής δεδομένων Τηλεπισκόπησης πραγματοποιήθηκαν κατά τον Α' και τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, τον Πόλεμο της Κορέας και του Βιετνάμ, αλλά και τον πόλεμο κατά της τρομοκρατίας. Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά την διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, δημιουργήθηκαν δορυφόροι για επιστημονικούς και στρατιωτικούς λόγους, ενώ οι πρώτες εικόνες της Γης παρήχθησαν από πρώιμους δορυφόρους της ΕΣΣΔ το 1957 (πχ: Sputnik) [10]. Ακολούθησαν διάφοροι καιρικοί δορυφόροι, οι οποίοι έθεσαν τα θεμέλια για μεταγενέστερες χρήσεις στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος, κάτι που είχε ως αποτέλεσμα να ανοίξουν την πόρτα, τόσο για εμπορικές, όσο και για επιστημονικές χρήσεις, αποδεικνύοντας έτσι ότι ήταν δυνατή η χρήση δορυφόρων για τη συλλογή δεδομένων και εικόνων σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές.



Εικόνα 5: Sputnik1 και Sputnik 2, source: NASA

Η πρόοδος στη δορυφορική τεχνολογία όλα αυτά τα χρόνια είχε ως αποτέλεσμα να λάβουν χώρα αξιοσημείωτες βελτιώσεις στις δυνατότητες των αισθητήρων, στη χωρική ανάλυση και στις μεθοδολογίες της επεξεργασίας δεδομένων. Οι σύγχρονοι δορυφόροι διαθέτουν προηγμένους αισθητήρες που μπορούν να καταγράφουν πολυφασματικά, υπερφασματικά, ακόμη και δεδομένα ραντάρ, παρέχοντας εις βάθος αναλύσεις μιας σειράς περιβαλλοντικών παραγόντων. Αυτοί οι αισθητήρες συλλέγουν πληροφορίες για την κάλυψη της γης, την υγεία της βλάστησης, την ποιότητα του νερού, τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και πολλά άλλα ανιχνεύοντας την ορατή, την υπέρυθη και την ακτινοβολία μικροκυμάτων που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης. Τα περισσότερα όργανα τηλεπισκόπησης καταγράφουν την Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία (EMR) η οποία μεταδίδεται από την πηγή με ταχύτητα $3 \times 10^8 \text{ m} * \text{s}^{-1}$, είτε άμεσα μέσα από το κενό του διαστήματος, είτε έμμεσα από ανάκλαση ή επανεκπομπή προς τον αισθητήρα. Οι αλλαγές στην ποσότητα και τις ιδιότητες της EMR όταν εντοπίζονται από τον αισθητήρα, αποτελούν πολύτιμη πηγή δεδομένων για την ερμηνεία

σημαντικών ιδιοτήτων του φαινομένου. [11] Αξίζει να αναφερθεί ότι χρησιμοποιούνται δορυφόροι που χρησιμοποιούν διαφορετικές τροχιές όπως για παράδειγμα η Χαμηλή Τροχιά (Low Earth Orbit – LEO), η Γεωστατική Τροχιά (Geostationary Orbit – GEO) και η πολική τροχιά. Πιο συγκεκριμένα, οι δορυφόροι πολικής τροχιάς εκτελούν μια παγκόσμια κάλυψη και καθιστούν δυνατή την παρατήρηση του τρόπου με τον οποίο αλλάζουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες με την πάροδο του χρόνου. Αντιθέτως, οι γεωστατικοί δορυφόροι προσφέρουν συνεχή παρακολούθηση των ατμοσφαιρικών φαινομένων και των καιρικών φαινομένων σε συγκεκριμένες περιοχές, μιας και είναι τοποθετημένοι πάνω από μια σταθερή θέση στον ισημερινό. [12]

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι χρήσεις της δορυφορικής τεχνολογίας στην περιβαλλοντική έρευνα έχουν αυξηθεί με την ενσωμάτωση δορυφορικών εικόνων με συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS). Με τα σημερινά δεδομένα, οι επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων μπορούν να παρακολουθούν τις αλλαγές στη χρήση γης, τα ποσοστά αποψίλωσης των δασών, την αστική ανάπτυξη, τις γεωργικές πρακτικές και τις φυσικές καταστροφές. [13] Επιπλέον, η Δορυφορική Τηλεπισκόπηση είναι ζωτικής σημασίας στην προσπάθεια διαχείρισης καταστροφών, διότι παρέχουν ακριβείς και γρήγορες πληροφορίες κατά τη διάρκεια των φυσικών καταστροφών όπως τυφώνες, πλημμύρες και σεισμούς, καθώς οι εφαρμογές του GIS περιλαμβάνει χρήση δορυφορικών εικόνων για την αξιολόγηση των επιπέδων των ζημιών, τον εντοπισμό ευάλωτων περιοχών και τη δημιουργία αποτελεσματικών στρατηγικών απόκρισης. [14]

2.1.2 Τύποι Δορυφόρων

Οι τροχιές και οι χρήσεις των δορυφόρων που χρησιμοποιούνται για περιβαλλοντική παρακολούθηση διαφέρουν, καθώς ο καθένας έχει μια ξεχωριστή λειτουργία στη συλλογή και επεξεργασία περιβαλλοντικών δεδομένων για τη Γη.

2.1.2.1 Γεωστατικοί δορυφόροι

Ένας δορυφόρος σε τροχιά γύρω από τη Γη που βρίσκεται ευθεία πάνω από τον ισημερινό σε ύψος περίπου 35.800 km είναι γνωστός ως γεωστατικός δορυφόρος, μιας και αυτοί οι δορυφόροι βρίσκονται σε τροχιά με τον ίδιο προσανατολισμό από τη Δύση προς την Ανατολή με τη Γη. Οι τροχιές αυτών των δορυφόρων ολοκληρώνονται σε περίπου είκοσι τέσσερις ώρες, δηλαδή στη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής της Γης στον άξονά της, ενώ από την οπτική γωνία κάποιου στη Γη, ο δορυφόρος φαίνεται να είναι ακίνητος αφού περιστρέφεται σε συμφωνία με αυτή. Χαρακτηριστικό των γεωστατικών δορυφόρων είναι οι αναμεταδότες (transporters), οι οποίοι λαμβάνουν, ενισχύουν και αναμεταδίδουν ραδιοφωνικά σήματα από και προς τη Γη.



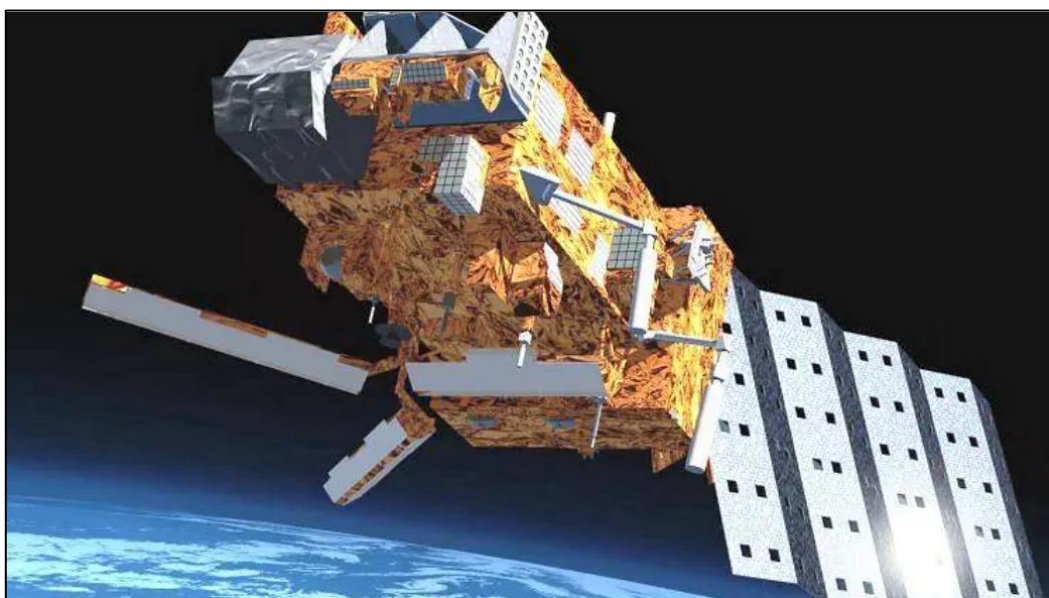
Εικόνα 6: Ο SES-17 είναι ένας γεωστατικός δορυφόρος υψηλής απόδοσης που τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το 2022, Source: Techtaraget.com, Mobile Computing

Περίπου το ένα τρίτο της επιφάνειας της Γης βρίσκεται εντός της οπτικής γωνίας ενός μεμονωμένου γεωστατικού δορυφόρου. Με άλλα λόγια, έχει την ικανότητα να «βλέπει» περίπου το ένα τρίτο της επιφάνειας της Γης από οποιαδήποτε τοποθεσία κοντά στον ισημερινό. Συνήθως, η τροχιά του δορυφόρου καλύπτει μια περιοχή γεωγραφικού πλάτους από 20 μοίρες βόρεια έως 20 μοίρες νότια. [15]

Οι συγκεκριμένοι δορυφόροι χρησιμοποιούνται κυρίως για μετεωρολογικές παρατηρήσεις, προσφέροντας συνεχή παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής σύνθεσης, της νεφοκάλυψης, των καιρικών προτύπων και των κλιματικών παραγόντων. Η Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) χρησιμοποιεί γεωστατικούς δορυφόρους, όπως αυτούς της σειράς GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites), για να παρακολουθεί έντονα καιρικά φαινόμενα, όπως καταιγίδες, κυκλώνες και τυφώνες. [16]

2.1.2.2 Δορυφόροι σε Πολική Τροχιά

Το δορυφορικό σύστημα POES, το οποίο ολοκληρώνει δεκατέσσερις (14) σχεδόν πολικές τροχιές κάθε μέρα σε υψόμετρο 520 μιλίων πάνω από τη Γη, παρέχει το πλεονέκτημα της καθημερινής παγκόσμιας κάλυψης. Σε κάθε τροχιά, η περιστροφή της Γης δίνει στον δορυφόρο μια νέα προοπτική (perspective) και κάθε μέρα, κάθε ένας δορυφόρος μεταδίδει δύο πλήρεις όψεις του παγκόσμιου καιρού. Δύο δορυφόροι σε πολική τροχιά, ο ένας με το όνομα POES και ο άλλος με το όνομα Metop, λειτουργούν συνεχώς από την NOAA σε συνεργασία με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό για την Εκμετάλλευση Μετεωρολογικών Δορυφόρων (European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites – EUMETSAT). [17]



Εικόνα 7: Ο MetOp-A είναι ο πρώτος δορυφόρος της Ευρώπης σε πολική τροχιά, αφιερωμένος στη μετεωρολογία. Λειτουργώντας σε πολύ χαμηλότερο υψόμετρο από τους γεωστατικούς δορυφόρους, ο MetOp-A συμπληρώνει μετεωρολογικούς δορυφόρους της NOAA και άλλων οργανισμών, Source: NASA.gov

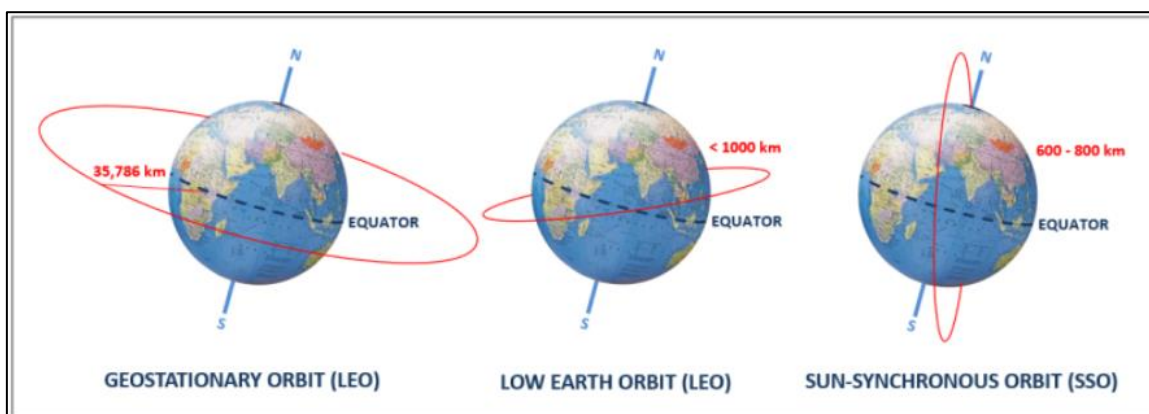
Ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών περιβαλλοντικής παρακολούθησης υποστηρίζεται από τα δεδομένα της σειράς POES, όπως την ανάλυση της παγκόσμιας βλάστησης, την παρακολούθηση ηφαιστειακών εκρήξεων, την πρόβλεψη και την ανάλυση του καιρού, την έρευνα και την πρόβλεψη του κλίματος, τις μετρήσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας της θάλασσας παγκοσμίως, τις ατμοσφαιρικές βυθομετρήσεις θερμοκρασίας και υγρασίας και της έρευνα δυναμικής των ωκεανών. [18]

2.1.2.3 Δορυφόροι συγχρονισμένοι με τον Ήλιο

Ένα συγκεκριμένο είδος πολικής τροχιάς (γνωστό ως ηλιοσύγχρονη τροχιά) εμφανίζεται όταν το τροχιακό επίπεδο ενός δορυφόρου περιστρέφεται γύρω από τη Γη με την ίδια ταχύτητα που η Γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο. Σε κάθε τροχιά, ο δορυφόρος περνά πάνω από ένα συγκεκριμένο σημείο στη Γη την ίδια τοπική ηλιακή ώρα χάρη σε αυτόν τον συγχρονισμό

μεταξύ του τροχιακού επιπέδου του δορυφόρου και της θέσης του Ήλιου. Επιπλέον, η τροχιακή κλίση (orbital inclination) και το ύψος του δορυφόρου επιλέγονται με ακρίβεια για να παράγουν μια τροχιά σύγχρονη με τον ήλιο. Το τροχιακό επίπεδο (orbital plane) του δορυφόρου είναι σχεδόν κάθετο στον ισημερινό της Γης λόγω της κλίσης που έχει επιλεγεί, η οποία είναι συχνά μεταξύ 98 και 99 μοιρών.

Αξίζει να ειπωθεί ότι η συνεχή αλληλεπίδραση του δορυφόρου με τον Ήλιο και τη Γη κατά τη διάρκεια των διαφορετικών τροχιών τους καθίσταται δυνατή από τον συνδυασμό της μοναδικής κλίσης και του υψομέτρου. Ακόμα, το τροχιακό επίπεδο του δορυφόρου προχωρά καθώς η Γη περιστρέφεται γύρω από τον Ήλιο, διασφαλίζοντας έτσι ότι διατηρεί πάντα την ίδια γωνία με τον Ήλιο. Επομένως, ο δορυφόρος περνά πάνω από μια συγκεκριμένη θέση στην επιφάνεια της Γης περίπου την ίδια τοπική ηλιακή ώρα. [19]



Εικόνα 8: Διαφορές Τροχιάς των Γεωσταθερών Δορυφόρων, των Δορυφόρων Χαμηλής Τροχιάς και τον Ήλιο - σύγχρονων Δορυφόρων, Source: India's Space Programme, Spacecraft, Launchers and Exploration

2.1.2.4 Microsatellites και CubeSats

Αρχικά, από την μια πλευρά, οι Microsatellites είναι μικροί, ελαφροί δορυφόροι που συνήθως ζυγίζουν μεταξύ 10 και 100 κιλά. Λόγω του μικρότερου μεγέθους, του φθηνότερου κόστους και της απλούστερης διαδικασίας ανάπτυξης σε σύγκριση με πιο συμβατικούς, μεγαλύτερους δορυφόρους, αυτοί οι δορυφόροι χρησιμοποιούνται για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών τηλεπισκόπησης, ενώ μπορούν να παράγονται και να αναπτύσσονται πιο γρήγορα, επιτρέποντας ταχύτερους χρόνους αντίδρασης στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις και την πρόοδο της τεχνολογίας.



Εικόνα 9: Ανάπτυξη Μικροδορυφόρων, Source: Athanassios Staveris – Polykalas

Οι μικροδορυφόροι παρακολουθούν μια σειρά από μεταβλητές που σχετίζονται με την έρευνα για την κλιματική αλλαγή, όπως η κάλυψη του πάγου, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και η ατμοσφαιρική σύνθεση, ενώ μπορούν να παρακολουθήσουν την υγεία των καλλιεργειών και την υγρασία του εδάφους. Η αποτελεσματικότητά τους σε εφαρμογές τηλεπισκόπησης αυξάνεται περαιτέρω από την ικανότητά τους να δημιουργούν σχηματισμούς (constellations), στους οποίους αρκετοί μικροδορυφόροι συνεργάζονται για να προσφέρουν σταθερή και εκτεταμένη κάλυψη. [20]

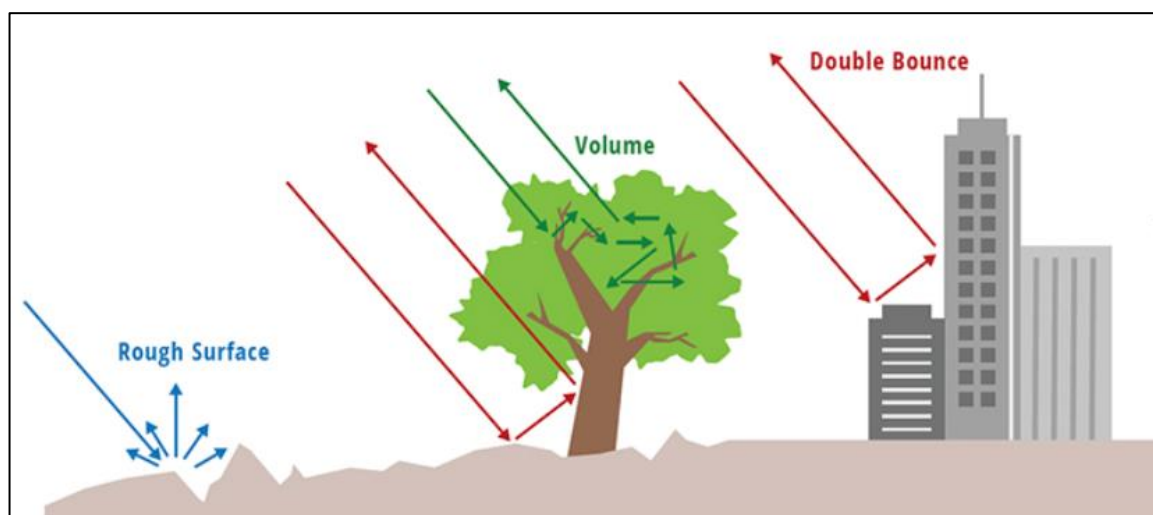
Από την άλλη πλευρά, τα CubeSats είναι νανοδορυφόροι που το σύνθετο βάρος τους κυμαίνεται από 1 έως 10 κιλά. Τα εξαρτήματα του δορυφόρου μπορούν να στοιβάζονται μεταξύ τους σύμφωνα με τις απαιτήσεις της αποστολής και είναι εύκολα προσβάσιμα από διάφορους κατασκευαστές. Επιπλέον, τα CubeSats με συμβατικές διαστάσεις μπορούν επίσης να ταξιδεύουν σε τροχιά μέσα σε εμπορευματοκιβώτια, γεγονός που μειώνει τις ανησυχίες για την ασφάλεια των πτήσεων και διευκολύνει συνάμα την προσαρμογή των εκτοξευτών. [21]

Τόσο τα Microsatellites όσο και τα CubeSats, χρησιμοποιούνται σε πειραματικές μελέτες για παρατηρήσεις γρήγορης απόκρισης.

2.1.2.5 Δορυφόροι Radar Συνθετικού Ανοίγματος (SAR)

Σε γενικές γραμμές, τα κύματα ραντάρ χρησιμοποιούνται σε δορυφορικές εικόνες SAR (Synthetic Aperture Radar) για την έρευνα της επιφάνειας της Γης. Οι μέθοδοι SAR δημιουργούν μια εικονική κεραία μήκους 10 km από την πραγματική κεραία 10 m προς την κατεύθυνση της πτήσης χρησιμοποιώντας την τροχιακή κίνηση του ραντάρ. Στη συνέχεια το

ραντάρ εκπέμπει συνεχώς παλμούς, οι οποίοι είναι σύντομες “εκρήξεις” (burst) σήματος που απέχουν χρονικά μεταξύ τους, και τελικά λαμβάνει τις ηχώ των παλμών που επιστρέφουν καθώς ταξιδεύει κατά μήκος της διαδρομής του, σαρώνοντας το αποτύπωμα της κεραίας στο έδαφος. [22] Οι δορυφόροι SAR μπορούν να δουν μέσα από τη βροχή, την ομίχλη και τα σύννεφα, καθώς λειτουργούν στην περιοχή μικροκυμάτων. Επειδή το SAR είναι ικανό να συλλέγει δεδομένα σε όλες τις καιρικές συνθήκες, είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την παρακολούθηση περιοχών που υπόκεινται σε τακτική νέφωση ή δυσμενή καιρικά μοτίβα. Σε αντίθεση με τους οπτικούς αισθητήρες που βασίζονται στο ηλιακό φως, το SAR μπορεί να καταγράψει εικόνες τόσο την ημέρα όσο και τη νύχτα. Αυτή η δυνατότητα είναι απαραίτητη για τη συνεχή επιτήρηση και για την καταγραφή δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα τη νύχτα ή σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού.



Εικόνα 10: Η ισχυρή σκέδαση VV αντιστοιχεί σε τραχιά επιφανειακή σκέδαση (π.χ. γυμνό έδαφος, νερό), η ισχυρή σκέδαση HH υποδηλώνει την κυριαρχία της σκέδασης διπλής αναπήδησης (π.χ., βλάστηση, ανθρωπογενείς δομές) και οι χωρικές διακυμάνσεις στη διπλή πόλωση, Source: NASA SAR Handbook

Στην υδρολογία, τα δεδομένα SAR χρησιμοποιούνται συχνά για την παρακολούθηση του πάγου των λιμνών και των ποταμών, τον υπολογισμό της περιεκτικότητας του εδάφους σε υγρασία και τον προσδιορισμό της έκτασης των πλημμυρών. Ακόμα, οι εφαρμογές που σχετίζονται με τις ακτές και τις θάλασσες περιλαμβάνουν την παρακολούθηση των κινήσεων των πλοίων, την καταγραφή των ανέμων και των ρευμάτων στην επιφάνεια του ωκεανού και την παρακολούθηση της διάβρωσης των ακτών.

2.1.3 Εφαρμογές στην Παρακολούθηση στις Ποιότητες του Νερού

Η δορυφορική απεικόνιση έχει αποδειχθεί χρήσιμη πηγή, όταν πρόκειται για την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού σε μια ποικιλία υδάτινων μαζών, όπως λίμνες,

ποτάμια και παράκτιες περιοχές. Αρκετές μελέτες έχουν δείξει πόσο αποτελεσματικές είναι οι δορυφορικές παρατηρήσεις για την παρακολούθηση της άνθησης των φυκιών, τον εντοπισμό των ρύπων και την κατανόηση της δυναμικής της μεταφοράς ιζημάτων, προκειμένου να αξιολογηθεί και να διαχειριστεί η ποιότητα του νερού.

2.1.3.1 Θολερότητα (Turbidity)

Η ποιότητα του νερού των ποταμών έχει αξιολογηθεί ευρέως χρησιμοποιώντας δορυφορικές απεικονίσεις, οι οποίες προσφέρουν κρίσιμες πληροφορίες για μια σειρά από περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά. Αναλυτικότερα, οι δορυφόροι είναι απαραίτητοι για τον έλεγχο της υγείας των παραποτάμιων οικοσυστημάτων και για την κατανόηση της δυναμικής τους λόγω της ικανότητάς τους να συλλέγουν συχνά, υψηλής ανάλυσης και μεγάλης κλίμακας δεδομένα.

Η οργανική ύλη και ο πηλός είναι παραδείγματα αιωρούμενων σωματιδίων που μπορούν να επηρεάσουν τη θολότητα, ένα μέτρο της διαύγειας του νερού. Σαν αποτέλεσμα αυτού, η ποιότητα του νερού και η υδρόβια ζωή μπορεί να επηρεαστούν από την υψηλή θολότητα.

Ο Gerald K. Moore στο άρθρο του με τίτλο «Satellite remote sensing of water turbidity / Sonde de télémessure par satellite de la turbidité de l'eau» που δημοσιεύτηκε στο Hydrological Sciences Journal [23], επιβεβαιώνει ότι η θολότητα και το χρώμα του νερού μπορούν να μετρηθούν οπτικά χρησιμοποιώντας έναν εξοπλισμό τηλεπισκόπησης. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι η θολότητα αυξάνει την οπισθοσκέδαση του φωτός, ενώ το χρώμα ενισχύει την απορρόφηση του φωτός στο νερό και μειώνει το σήμα που ανιχνεύεται εξ αποστάσεως. Συνεχίζει αναφέροντας ότι οι ιδιότητες της απορρόφησης του νερού παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της φασματικής ανάκλασης σε χαμηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων υλικών, ενώ η απορρόφηση των αιωρούμενων σωματιδίων παίζει σημαντικό ρόλο σε μεγαλύτερες συγκεντρώσεις. Τέλος, υπογραμμίζει ότι σε μελέτες μεγάλης κλίμακας η αναγνώριση των μοτίβων ρεύματος και κυκλοφορίας και η παρακολούθηση της καθίζησης, της παραγωγικότητας του νερού και του ευτροφισμού μπορούν όλα να ωφεληθούν πολύ από τη χρήση της τηλεπισκόπησης. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η διακύμανση στην απορρόφηση του φωτός και τη σκέδαση στην ατμόσφαιρα από τη μια στιγμή στην άλλη είναι μια σημαντική πρόκληση για τον υπολογισμό της θολότητας του νερού από μια εξ αποστάσεως καταγεγραμμένη ροή. Ακόμα αναφέρει ότι ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα είναι ότι μια οπισθοσκεδαζόμενη ροή θα μπορούσε να είναι ένας συνδυασμός της θολότητας που προκαλείται από το αιωρούμενο ίζημα, τη θολότητα που παράγεται από το πλαγκτόν, την ανάκλαση του πυθμένα και το χρώμα του νερού.

Συμπερασματικά, το άρθρο καταλήγει τονίζοντας ότι η βιωσιμότητα, το κόστος και η αξία του περιεχομένου πληροφοριών μιας δορυφορικής παρακολούθησης της ποιότητας του νερού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν ληφθεί μια απόφαση. Οι συμβατικές μέθοδοι που επιτρέπουν την ανάλυση ενός μόνο δείγματος νερού για πολλά συστατικά, ενδέχεται να υπερτερούν της δορυφορικής τηλεπισκόπησης διότι τα δύο κύρια συστατικά και χαρακτηριστικά του χερσαίου νερού είναι η θολότητα και το χρώμα. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα της χρήσης της Τηλεπισκόπησης είναι ποικίλα όταν γίνεται εστίαση στην παρακολούθηση του ευτροφισμού, της καθίζησης και της παραγωγικότητας του νερού, με σκοπό τον προσδιορισμό των προτύπων ρεύματος και κυκλοφορίας.

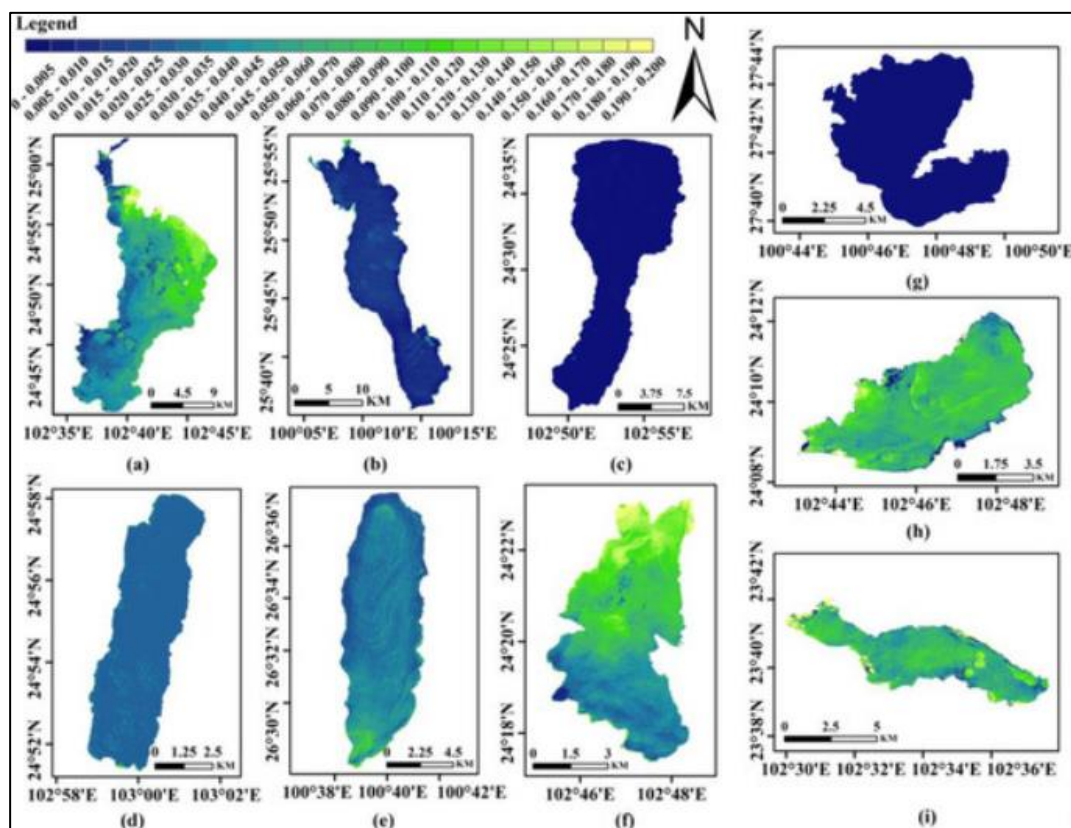
Variable	Explanation
Time of year	The Earth receives 7 per cent more energy from the sun on 1 January than on 1 July because of an oval orbit.
Sun-elevation angle	More solar energy is specularly reflected from water surfaces at low sun-elevation angles than at high angles. Also; the path length of solar energy through the atmosphere is longer at low sun-elevation angles, and more solar energy is absorbed and scattered.
Aerosol and molecular content of atmosphere	These constituents determine the amount of solar energy absorbed and scattered by the atmosphere. Some energy, received by a satellite, is backscattered before reaching the water surface.
Water-vapour content of the atmosphere	Water vapour affects energy absorption at near infrared and thermal infrared wavelengths.
Specular reflection of skylight from water surface	Specularly reflected skylight is received by a satellite. The intensity and wavelength distribution of this energy depends on atmospheric scattering, which produces skylight.
Roughness of water surface	A rough surface may produce more or less specular reflection than a smooth surface. At high sun-elevation angles, the area of sun glint may be within the satellite fields of view.
Film, foam, debris, or floating plants on water surface	These features may not be resolved on a satellite image, but they contribute to the spectral characteristics of the measured signal.
Water colour	Dissolved, coloured materials increase absorption of solar energy in water.
Water turbidity	The concentration, size, shape, and refractive index of suspended particles determine turbidity and increase the amount of energy backscattered in water bodies.
Reflectance and absorptance characteristics of suspended particles	Particles may be inorganic sediments, phytoplankton, zooplankton, or a combination. When present in high concentrations, particles affect the spectral distribution of backscattered energy.
Multiple reflections and scattering of solar energy in water	The spectral results of these processes are difficult to predict, but may not be important.
Depth of water and reflectance of bottom sediments	Water clarity determines the importance of bottom reflectance. Solar energy may not reach bottom in a turbid water.
Submerged or emergent vegetation	Vegetation may change bottom reflectance, obscure water surface, or contribute to the spectral characteristics of the measured signal.

Εικόνα 11: Μεταβλητές που μπορούν να επηρεάσουν την τηλεπισκόπηση των φυσικών χαρακτηριστικών ποιότητας του νερού, Source: Gerald K. Moore, *Satellite Remote Sensing of Water Turbidity*

2.1.3.2 Συγκέντρωση Χλωροφύλλης – α

Οι ανθίσεις των φυκιών και η βιομάζα φυτοπλαγκτού αντιπροσωπεύονται από τη χλωροφύλλη – α, κάτι που σημαίνει ότι τα αυξημένα επίπεδα τους μπορεί να είναι σημάδι ευτροφισμού και ρύπανσης από θρεπτικά συστατικά.

Οι Dong Wang, Bo-Hui Tang, Zhitao Fu, Liang Huang, Menghua Li, Guokun Chen και Xuejun Pan στο άρθρο με τίτλο «Estimation of Chlorophyll-A Concentration with Remotely Sensed Data for the Nine Plateau Lakes in Yunnan Province» που δημοσιεύτηκε στο «Special Issue Remote Sensing of Coastal Waters, Land Use/Cover, Lakes, Rivers and Watersheds II» [24] αναφέρουν ότι μια κρίσιμη τεχνική για την παρακολούθηση της κατάστασης των υδάτινων σωμάτων με χρήση τηλεπισκόπησης είναι η ποσοτική ανάκτηση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη – α. Τονίζουν ότι οι συμβατικές τεχνικές για τη μέτρηση των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης – α είναι επίπονες, ενώ αντ' αυτού οι εικόνες τηλεπισκόπησης μπορούν να προσομοιώσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια το περιεχόμενο χλωροφύλλης, εκτός από τις υδρολογικές παραμέτρους, τη γεωγραφική θέση και τους φυσικούς πόρους. Ακόμα, εστιάζουν στο γεγονός ότι η αναλογία των μπλε προς τις πράσινες ζώνες χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ποσότητας της χλωροφύλλης – α μέσω τηλεπισκόπησης, κυρίως γύρω από τους ωκεανούς και όχι για περιοχές με πολύπλοκα μοναδικά τοπικά χαρακτηριστικά, όπως οι λίμνες οροπεδίων.



Εικόνα 12: Ανάκτηση των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α σε εννέα λίμνες οροπεδίων στις 22 και 24 Ιουνίου 2020, Source: Estimation of Chlorophyll-A Concentration with Remotely Sensed Data for the Nine Plateau Lakes in Yunnan Province

Συνεχίζοντας, η έρευνα έδειξε ότι η χωρική ανάλυση και η υποδιαίρεση της ζώνης των κόκκινων άκρων των μπαντών του Sentinel – 2 MSI εφιστούν την προσοχή στις ιδιότητες της χλωροφύλλης του νερού, η οποία είναι ένα κρίσιμο εργαλείο ανίχνευσης για την αξιολόγηση των μετρήσεων ποιότητας του νερού των λιμνών οροπεδίου. Οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α των λιμνών εξετάστηκαν και οι επιφανειακές θερμοκρασίες των λιμνών οροπεδίων ανακτήθηκαν για να επιβεβαιωθεί η υπόθεση ότι η θερμοκρασία της επιφάνειας της λίμνης θα μπορούσε να αυξήσει τη συγκέντρωση χλωροφύλλης – α.

2.1.3.3 Μεταφορά Ιζημάτων

Η κατανόηση της διάβρωσης, της εναπόθεσης και των επιπτώσεων της αλλαγής της χρήσης γης στο σχήμα του ποταμού εξαρτώνται από την κίνηση των ιζημάτων του.

Οι M. Shafaie, H. Ghodosi και K. H. Mostofi στο άρθρο με τίτλο «River sediment monitoring using remote sensing and GIS» του «The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences» [25] αναφέρουν ότι πολυάριθμες έρευνες έχουν δείξει ότι είναι δυνατή η χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης για να γίνει πρόβλεψη του ρυθμού με τον οποίο εμφανίζονται τα αιωρούμενα ιζήματα. Συνεχίζουν λέγοντας ότι ενώ η χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης είναι ταχύτερη και ακριβέστερη από τη χρήση παραδοσιακών και τρεχουσών διαδικασιών και μπορεί να είναι μια αποτελεσματική στρατηγική, καθώς συλλέγει τις πληροφορίες και τις εικόνες της Γης μέσω της χρήσης αεροσκαφών, μπαλονιών και διαστημικών εφαρμογών όπως οι δορυφόροι. Ένας τρόπος λήψης δεδομένων από το περιβάλλον, λένε, είναι η ενσωμάτωση της τεχνολογίας τηλεπισκόπησης με συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), διότι οι δορυφόροι είναι σε θέση να συλλέξουν τα δεδομένα διάφορα σενάρια και κλίμακες ζώνης ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Συνεπώς, ένα ευρύ φάσμα εργασιών, ιδιαίτερα εκείνων που έχουν τοπική εμβέλεια, μπορούν να ολοκληρωθούν πιο γρήγορα και φθηνά με τη χρήση τεχνολογιών τηλεπισκόπησης. Ο τρόπος που χρησιμοποίησαν τις δορυφορικές εικόνες ήταν μέσω ταξινομήσεων. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρουν ότι η ταξινόμηση των δορυφορικών εικόνων μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κρίσιμο συστατικό της ερμηνείας των δορυφορικών δεδομένων, καθώς ο πρωταρχικός στόχος της τεχνολογίας της τηλεπισκόπησης είναι η ανίχνευση, η διαφοροποίηση και η κατηγοριοποίηση των επίγειων αντικειμένων.

2.2 Ανάλυση Χρονοσειρών (Time – Series)

2.2.1 Ορισμός και Σπουδαιότητα

Αρχικά, η ανάλυση μιας χρονοσειράς εξετάζει μια συλλογή σημείων δεδομένων που συγκεντρώθηκαν ή καταγράφηκαν σε διάφορες χρονικές στιγμές. Πιο συγκεκριμένα, αυτό το είδος ανάλυσης είναι απαραίτητο για την Τηλεπισκόπηση, επειδή καθιστά δυνατό τον εντοπισμό, την παρακολούθηση και την κατανόηση των αλλαγών στους περιβαλλοντικούς παράγοντες διαχρονικά. Έτσι, οι ερευνητές έχουν την δυνατότητα να εντοπίσουν τάσεις, εποχιακές διακυμάνσεις και ξαφνικές αλλαγές σε διαφορετικές περιβαλλοντικές μεταβλητές εξετάζοντας δορυφορικές εικόνες με την πάροδο του χρόνου.

Οι Dr. Zhe Zue, Dr. Wenping Yuan και Dr. Chengbin Deng στο άρθρο τους με τίτλο «Remote Sensing Time Series Analysis» που δημοσιεύτηκε στο «Journal of Remote Sensing: A Science Partner Journal» [26] αναφέρουν ότι υπάρχουν πολλές τεχνικές που χρησιμοποιούνται πολλές χρονοσειρές εικόνων για την παρακολούθηση ποικίλων φαινομένων όπως της γης, της θάλασσας και της ατμόσφαιρας. Αναφέρουν μάλιστα ότι η συχνότητα και η διάρκεια της ανάλυσης των χρονοσειρών αυξάνεται για να εξεταστεί η πρόοδος και οι δυνάμεις που οδηγούν στην αλλαγή, εξαιτίας της αφθονίας των δορυφορικών συνόλων δεδομένων που είναι διαθέσιμα. Συνεχίζουν λέγοντας ότι τα σύνολα δεδομένων τηλεπισκόπησης χρονοσειρών χρησιμοποιούνται πολύ πιο συχνά, κυρίως λόγω της ελεύθερης και ανοιχτής πρόσβασής τους, αλλά και της αυξημένης ικανότητας επεξεργασίας.

Οι Dr. Wei Yang, Dr. Xuehong Chen, Dr. Cong Wang, Dr. Ruyin Cao μαζί με τον Prof. Dr. Miaoogen Shen στο άρθρο τους με τίτλο «Time Series Analysis in Remote Sensing: Algorithm Development and Applications» [27] επιβεβαιώνουν ότι οι σημαντικές αλλαγές στο περιβάλλον της Γης επιβάλουν την ανάγκη κατανόησης της βιώσιμης ανάπτυξης της. Αναλυτικότερα, τονίζουν ότι με την βοήθεια της τηλεπισκόπησης, είναι δυνατή η παρακολούθηση και η αποτελεσματική μέτρηση των αλλαγών που συμβαίνουν σε όλο το κόσμο, αν και είναι πιο δύσκολη η ανάλυση των χρονοσειρών απ' ό,τι η σύγκριση πολλών διαφορετικών δορυφορικών εικόνων που λαμβάνονται σε διαφορετικά χρονικά σημεία.

2.2.2 Τεχνικές και Μέθοδοι

Κατά την ανάλυση δορυφορικών χρονοσειρών δεδομένων, συχνά χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές.

Ανίχνευση Αλλαγών (Change Detection)

Προκειμένου να ανακαλυφθούν αξιοσημείωτες αλλαγές στο περιβάλλον, πολλές φορές συγκρίνονται δορυφορικές απεικονίσεις

που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, με σκοπό την μετέπειτα ταξινόμηση (Post – Classification Comparison) και το Image Differencing.

Ο Zhe Zhu στο άρθρο του με όνομα «Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications» για το «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 130» [28] χρησιμοποίησε δεδομένα Landsat για να παράγει μια ενδελεχή ανάλυση τεσσάρων κατηγοριών της έρευνας για την ανίχνευσης αλλαγών: συχνότητα (frequency), Προ – Επεξεργασία (Pre – Processing), Μέθοδοι και Εφαρμογές. Αυτή η ανάλυση, έδειξε ότι υπάρχει μια τάση όπου η συχνότητα (frequency) χρήσης των χρονοσειρών Landsat αυξήθηκε με την πάροδο του χρόνου. Ακόμα, αναφέρει ότι οι τεχνικές ανίχνευσης αλλαγών κατηγοριοποιήθηκαν σε έξι ομάδες: παλινδρόμηση (regression), στατιστικό όριο (statistical boundary), τμηματοποίηση (segmentation), κατώφλι (thresholding), διαφοροποίηση (differencing) και ταξινόμηση τροχιών (trajectory classification), ενώ σε κάθε κατηγορία εξετάστηκαν έξι βασικά χαρακτηριστικά αλγορίθμων. Τέλος, ο Zhe Zhu εξερεύνησε διαφορετικές εφαρμογές ανίχνευσης αλλαγών, ταξινομώντας τις σε δύο ομάδες: (1) ανίχνευση παράγοντα αλλαγής (change agent detection) και (2) ανίχνευση στόχου αλλαγής (change target detection).

Ανάλυση Τάσεων (Trend Analysis)

Ο στόχος της ανάλυσης τάσεων είναι να εντοπίσει μακροπρόθεσμα μοτίβα στα δεδομένα χρονοσειρών, γι' αυτό είναι κοινή πρακτική η χρήση στατιστικών τεχνικών όπως η εποχιακή αποσύνθεση (seasonal decomposition), η δοκιμή Mann – Kendall και η γραμμική παλινδρόμηση (linear regression).

Οι Χ. Φειδιάς, Τ. Μακρογιάννης και Ε. Μπόρα – Σέντα στο άρθρο τους με όνομα «Trend analysis of air temperature time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955–2001» για το βιβλίο «Theoretical and Applied Climatology» [29] εξέτασαν τις τάσεις στις ετήσιες και εποχιακές χρονοσειρές της θερμοκρασίας του επιφανειακού αέρα (surface air) για 20 σταθμούς στην Ελλάδα την περίοδο 1955 – 2001, μαζί με δορυφορικά δεδομένα για την περίοδο 1980 – 2001, χρησιμοποιώντας δύο στατιστικές

δοκιμές με βάση τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και τη δοκιμή Mann – Kendall. Αναλυτικότερα, το αποτέλεσμα της έρευνας έδειξε ότι η Ελλάδα παρουσίασε μια τάση ψύξης το χειμώνα κατά την περίοδο 1955 – 2001, ενώ το καλοκαίρι παρουσίασε μια συνολική τάση θέρμανσης, ενώ τα δορυφορικά δεδομένα για την περίοδο 1980 – 2001 αποκάλυψαν μια σημαντική τάση αύξησης της θερμοκρασίας στις χειμερινές και καλοκαιρινές θερμοκρασίες στην Ελλάδα.

Αποσύνθεση Χρονοσειρών (Time – Series Decomposition)

Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική, τα δεδομένα χρονοσειρών χωρίζονται σε συστατικά μέρη (component parts), συμπεριλαμβανομένων των υπολειπόμενων (residual), εποχιακών (seasonal) και τάσεων (trend).

Οι Jinling Quan, Wenfeng Zhan και Yunhao Chen στο άρθρο τους «Time series decomposition of remotely sensed land surface temperature and investigation of trends and seasonal variations in surface urban heat islands» για το τεύχος 121 του «Journal of Geophysical Research: Atmospheres» [30] προτείνουν ένα μοντέλο για την αποσύνθεση των χρονοσειρών LST σε στοιχεία τάσης, εποχικότητας και θορύβου. Η συνιστώσα τάσης, που υποδεικνύει τη μακροπρόθεσμη κλιματική αλλαγή και την ανάπτυξη της γης, περιγράφεται ως μια αποσπασματική γραμμική συνάρτηση με επαναληπτική ανίχνευση σημείων διακοπής, ενώ η εποχιακή συνιστώσα, που απεικονίζει τις ετήσιες διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας, μοντελοποιείται ως ημιτονοειδής συνάρτηση στα δεδομένα αποκλίνουσας τάσης. Αναφέρουν επίσης ότι οι προηγούμενες μέθοδοι χρονοσειρών δυσκολεύτηκαν να χαρακτηρίσουν ταυτόχρονα εποχιακές, σταδιακές και απότομες αλλαγές στη θερμοκρασία της επιφάνειας της γης με τηλεπισκόπηση (LST).

2.2.3 Εφαρμογές στην Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος

Στην Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος, η ανάλυση χρονοσειρών δορυφορικών δεδομένων έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για να παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις αλλαγές σε πολλά οικοσυστήματα.

Παρακολούθηση της ποιότητας του νερού (Water Quality)

Οι Gordana Jakovljevic, Flor Álvarez-Taboada και Miro Govedarica στο άρθρο τους «Long-Term Monitoring of Inland Water Quality Parameters Using Landsat Time – Series and Back – Propagated ANN: Assessment and Usability in a Real – Case Scenario» για το «Remote Sensing and Artificial Intelligence in Inland Waters Monitoring» [31] μελέτησαν στην ανάπτυξη ενός μοντέλου για την πλήρη παρακολούθηση των διαφόρων παραμέτρων ποιότητας του νερού (WQPs) και την αξιολόγηση της σκοπιμότητάς του σε πραγματικά σενάρια, αντιμετωπίζοντας τους περιορισμούς της συμβατικής επιτόπιας δειγματοληψίας. Πιο

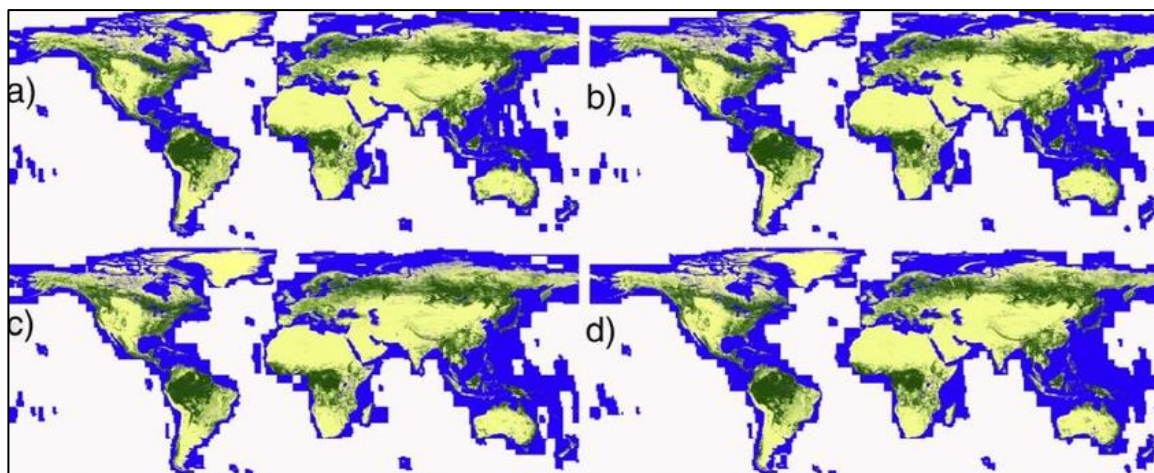
συγκεκριμένα, ανέπτυξαν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για την παρακολούθηση των WQP χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων 38 ετών εικόνων Landsat και επιτόπιων δεδομένων από το Σύστημα Πληροφοριών Υδάτων της Ευρώπης (WISE), χρησιμοποιώντας Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN). Αποδείχτηκε ότι η χρηστικότητα του αναπτυγμένου μοντέλου ήταν επιτυχής σε ένα πραγματικό σενάριο, αποδεικνύοντας έτσι ότι είναι ένα λειτουργικό εργαλείο για τη διαχείριση των υδάτων.

Παρακολούθηση της αποψίλωσης και αναδάσωσης

Ποικίλες έρευνες έχουν διεξαχθεί χρησιμοποιώντας χρονοσειρές για την ανίχνευση και την παρακολούθηση των δασών.

Οι Esteban Roitberg, Veronica Barraza, Mercedes Salvia και Francisco Grings στο άρθρο τους με θέμα « Remote Sensing Time Series Database for Deforestation Detection» [32] για το « Simposio Argentino de Ciencia de Datos y Grandes Datos» παρουσίασαν μια βάση δεδομένων που περιέχει φυσικά δάση (Native Forest) και Deforested χρονοσειρές τηλεπισκόπησης για το Argentine Chaco Forest για την περίοδο 2000 – 2020. Αυτό είχε ως στόχο να επιτρέψει την ανίχνευση αποψίλωσης σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, κάτι που αποδεικνύουμε ότι είναι κατάλληλο για αυτόν τον σκοπό.

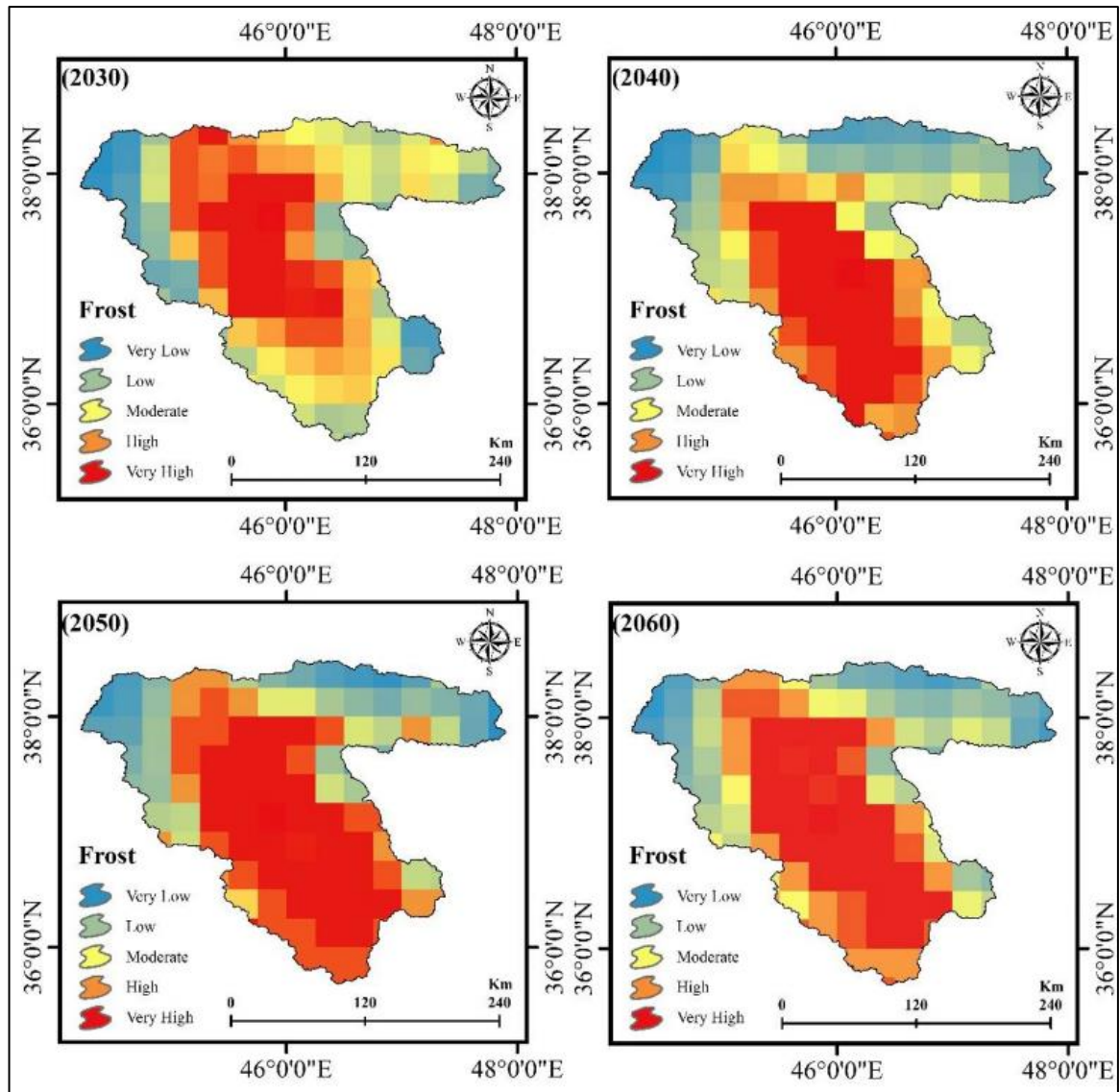
Αντίστοιχα οι Lilian Blanc, Valery Gond και Dinh Ho Tong Minh στο άρθρο τους «Remote Sensing and Measuring Deforestation» για το βιβλίο « Land Surface Remote Sensing» [33] αναφέρουν ότι οι τεχνικές για την ανίχνευση της αποψίλωσης των δασών με τη χρήση της οπτικής τηλεπισκόπησης και των ραντάρ, προσφέρουν ήδη επιχειρησιακά προϊόντα, αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν κάποια προβλήματα που αφορούν την τεχνική ανάλυση τους. Ωστόσο, συνεχίζουν τονίζοντας ότι η παραγωγή στατιστικών δεδομένων αποψίλωσης αναμένεται να προχωρήσει σημαντικά τις επόμενες δύο δεκαετίες λόγω πολλών παραγόντων, όπως για παράδειγμα η αυξανόμενη διαθεσιμότητα των εικόνων υψηλής και πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης από νέους δορυφόρους όπως ο Sentinel – 1 και ο Sentinel – 2, μαζί με τα προγράμματα όπως το AVHRR, το MODIS και το Landsat. Συγκεκριμένα αναφέρει ότι η ικανότητα των Sentinel – 1 και Sentinel – 2 να παρατηρούν τροπικά δάση κάθε πέντε ημέρες, επιτρέποντας την παρακολούθηση σχεδόν σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 13: Μωσαϊκά δασικής κάλυψης σε όλο τον κόσμο (σε σκούρο πράσινο) ανάλυσης 25 m από εικόνες ALOS-1/PALSAR. (α) 2007, (β) 2008, (γ) 2009, (δ) 2010, Source: Valery Gond, www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/palsar_fnf/data/index.htm

Ανάλυση των Επιπτώσεων της Κλιματικής Αλλαγής

Οι Mohammad Kazemi Garajeh, Behnam Salmani, Saeid Zare Naghadehi, Hamid Valipoori Goodarzi και Ahmad Khasraei στο άρθρο τους «An integrated approach of remote sensing and geospatial analysis for modeling and predicting the impacts of climate change on food security» [34] προσπάθησαν να αναλύσουν και να προβλέψουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο Food Security χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες Landsat και MODIS, μαζί με ποικίλες μεταβλητές (θερμοκρασία επιφάνειας γης (LST), εξατμισοδιαπνοή, βροχόπτωση, ηλιόλουστες ημέρες, αναλογία νεφών, αλατότητα εδάφους, υγρασία του εδάφους, υπόγεια ύδατα ποιότητα, τύποι εδάφους, ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο) για την περίοδο 2002 – 2021. Αυτή η προσέγγιση βασισμένη στην Τηλεπισκόπηση σε συνδυασμό με το μοντέλο αναλυτικής διεργασίας δικτύου (ANP) εντόπισε περιοχές που επηρεάστηκαν από τον παγετό. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο CA –Markov, έγινε πρόβλεψη ότι υπάρχει φόβος για το Food Security για το 2030, το 2040, το 2050 και το 2060. Επιβεβαιώνεται, λοιπόν, ότι οι κρίσιμες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην περιοχή, μαζί με τις προτεινόμενες μεθόδους που εφαρμόστηκαν θα μπορούσαν να βοηθήσουν τους ερευνητές να μοντελοποιήσουν και να ποσοτικοποιήσουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε διαφορετικές περιοχές και περιόδους.



Εικόνα 14: Αποτελέσματα της πρόβλεψης περιοχών που έχουν επηρεαστεί από παγετό χρησιμοποιώντας το μοντέλο CA-Markov για τα έτη 2030, 2040, 2050 και 2060, Source: An integrated approach of remote sensing and geospatial analysis for modeling and predicting the impacts of climate change on Food Security

2.3 Δείκτες Ποιότητας Νερού

Προκειμένου να διευκολυνθεί η αξιολόγηση και να είναι δυνατή η σύγκριση της ποιότητας του νερού με την πάροδο του χρόνου, οι δείκτες ποιότητας νερού είναι αριθμητικές εκφράσεις που συμπυκνώνουν πολύπλοκα δεδομένα σχετικά με την ποιότητα του νερού σε μια ενιαία τιμή. Αναλυτικότερα, αυτοί οι δείκτες συνδυάζουν διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων βιολογικών, χημικών και φυσικών ενδείξεων, για να δώσουν μια συνολική εικόνα της υγείας του νερού.

2.3.1 Εισαγωγή στις Δείκτες Ποιότητας του Νερού

Οι Tsitsi Bangira, Trylee Nyasha Matongera , Tafadzwanashe Mabhaudhi και Onesimo Mutanga στο άρθρο τους με θέμα «Remote sensing-based water quality monitoring in African reservoirs, potential and limitations of sensors and algorithms: A systematic review» για το τεύχος 134 στο «Physics and Chemistry of the Earth» [35] επικεντρώθηκαν στην προσπάθεια ενσωμάτωσης της επιτόπιας δειγματοληψίας με δεδομένα τηλεπισκόπησης για την ανάλυση δεικτών ποιότητας νερού (WQIs) όπως τη θολότητα, τη χλωροφύλλη – a (Chl-a) και τη έγχρωμη διαλυμένη οργανική ύλη (CDOM). Η ανασκόπηση αυτή αξιολόγησε συστηματικά τις φασματικές, χωρικές και χρονικές δυνατότητες των κοινώς χρησιμοποιούμενων αισθητήρων τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού. Ακόμα, προσδιόρισε τις υπάρχουσες προκλήσεις και τις μελλοντικές κατευθύνσεις για την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού με τη χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης σε ταμειυτήρες της ενδοχώρας της Αφρικής. Τα ευρήματα υπογράμμισαν ότι η χλωροφύλλη – a και τα ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS) είναι τα πιο εκτενώς μελετημένα WQI στην Αφρική, αξιοποιώντας πολυφασματικούς αισθητήρες όπως η σειρά Landsat και ο Sentinel – 2. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι απαιτούνται σημαντικές αναβαθμίσεις στη χρονική, φασματική και χωρική ανάλυση των αισθητήρων, καθώς και στην επέκταση της λίστας των παρακολουθούμενων WQI και στη βελτίωση της ακρίβειας αντιστροφής του μοντέλου.

Ακόμα, οι Mohammad Najafzadeh και Sajad Basirian στο «Evaluation of River Water Quality Index Using Remote Sensing and Artificial Intelligence Models» για το «Ecological Remote Sensing» [36] τονίζουν ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι για την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού είναι συχνά δαπανηρές και χρονοβόρες και γι' αυτό οι πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες τηλεπισκόπησης και η διαθεσιμότητα δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης έχουν ανοίξει σημαντικούς δρόμους για την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού. Η μελέτη τους εστιάζει στην εκτίμηση του Δείκτη Ποιότητας Νερού (WQI) για τον ποταμό Hudson χρησιμοποιώντας εικόνες Landsat 8 OLI-TIRS και μοντέλα Τεχνητής Νοημοσύνης (AI), όπως το M5 Model Tree (MT), τη Πολυμεταβλητή Προσαρμοστική Παλινδρόμηση Spline (MARS) και το Evolutionary Polynomial Regression (EPR). Κατά την περίοδο 14 Μαρτίου 2021 έως τις 16 Ιουνίου 2021 μετρήθηκαν 13 παράμετροι ποιότητας νερού (WQPs) συμπεριλαμβανομένων της Θολότητα, το Νάτριο, το Κάλιο, το Φθόριο, το Διαλυμένο Οξυγόνο, Χλώριο και το Αρσενικό. Δημιούργησαν μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) μεταξύ αυτών των WQP και των φασματικών δεικτών που προέρχονται από εικόνες Landsat 8 OLI-TIRS και στη συνέχεια οι πιο συσχετισμένοι φασματικοί δείκτες επιλέχθηκαν ως μεταβλητές εισόδου για τα μοντέλα AI. Έτσι, τα μοντέλα AI εκπαιδεύτηκαν, δοκιμάστηκαν και αξιολογήθηκαν, με το μοντέλο MARS να επιδεικνύει ανώτερη απόδοση στην εκτίμηση του WQI σε σύγκριση με άλλα μοντέλα. Όλα αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν

την ισχυρή αποτελεσματικότητα της ενσωμάτωσης των δορυφορικών εικόνων και μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης για ακριβή και αποτελεσματική παρακολούθηση της ποιότητας του νερού.

2.3.2 Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Χλωροφύλλης – α (NDCI)

Οι Sachidananda Mishra και Deepak R. Mishra στο άρθρο τους «Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters» για το Τεύχος 117 στο «Remote Sensing of Environment» [37] εισήγαγαν έναν κανονικοποιημένο δείκτη χλωροφύλλης διαφοράς (NDCI) που έχει σχεδιαστεί για να προβλέπει τη συγκέντρωση χλωροφύλλης-α (chl-a) από δεδομένα τηλεπισκόπησης σε θολά παραγωγικά νερά, εκβολές ποταμών και παράκτια ύδατα. Αναφέρουν ότι η βαθμονόμηση και η επικύρωση του NDCI με χρήση συνόλων δεδομένων προσομοιωμένων και μεσαίας ανάλυσης Imaging Spectrometer (MERIS) αποδεικνύουν την ευελιξία του σε διάφορους τύπους νερού και γεωγραφικές περιοχές. Το NDCI εφαρμόστηκε με επιτυχία σε εικόνες που καλύπτουν τον κόλπο Chesapeake, τον κόλπο Delaware, τον Mobile Bay και την περιοχή δέλτα του ποταμού Μισισσιπή στον βόρειο Κόλπο του Μεξικού, αποκαλύπτοντας μια συνολική κλίση (overall bias) περίπου κατά 12% σε αυτές τις περιοχές μελέτης. Αυτά τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι το NDCI είναι ικανό στην ποσοτική παρακολούθηση της χλωροφύλλης – α στα παράκτια και στα ύδατα των εκβολών ποταμών χρησιμοποιώντας εικόνες MERIS, ενώ τελειώνουν λέγοντας ότι το NDCI μπορεί να ανιχνεύσει αποτελεσματικά την άνθηση των φυκών και να παρέχει ποιοτικές πληροφορίες για τη συγκέντρωση χλωροφύλλης – α, παρόμοια με τον τρόπο που χρησιμοποιείται ο NDVI σε μελέτες χερσαίας βλάστησης.

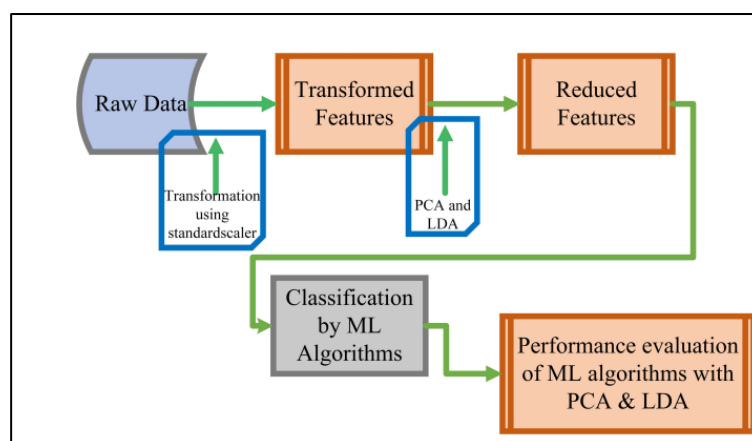
2.4 Τεχνικές Μείωσης Διαστάσεων

2.4.1 Εισαγωγή στις Τεχνικές Μείωσης Διαστάσεων

Η τεχνική της μείωσης του αριθμού των μεταβλητών ή των χαρακτηριστικών εισόδου ενός συνόλου δεδομένων, διατηρώντας παράλληλα τις κρίσιμες πληροφορίες που περιέχει είναι γνωστή ως «Μείωση Διαστάσεων». Η μείωση των διαστάσεων είναι σημαντική, επειδή τα φασματικά δεδομένα που καταγράφονται από αισθητήρες είναι υψηλών διαστάσεων στο πλαίσιο της δορυφορικής απεικόνισης και της τηλεπισκόπησης, καθώς εκατοντάδες ή και χιλιάδες φασματικές ζώνες ή μεταβλητές μπορούν να βρεθούν σε δορυφορικά σύνολα δεδομένων, γεγονός που καθιστά την ανάλυση και την ερμηνεία δύσκολη και υπολογιστικά δαπανηρή. Προκειμένου να ξεπεραστούν αυτές οι δυσκολίες, οι τεχνικές μείωσης των διαστάσεων μετατρέπουν τα δεδομένα σε ένα χώρο χαμηλότερης διάστασης, όπου η μειωμένη

συλλογή μεταβλητών διατηρεί σημαντικές πληροφορίες για μοντελοποίηση, ανάλυση και οπτικοποίηση.

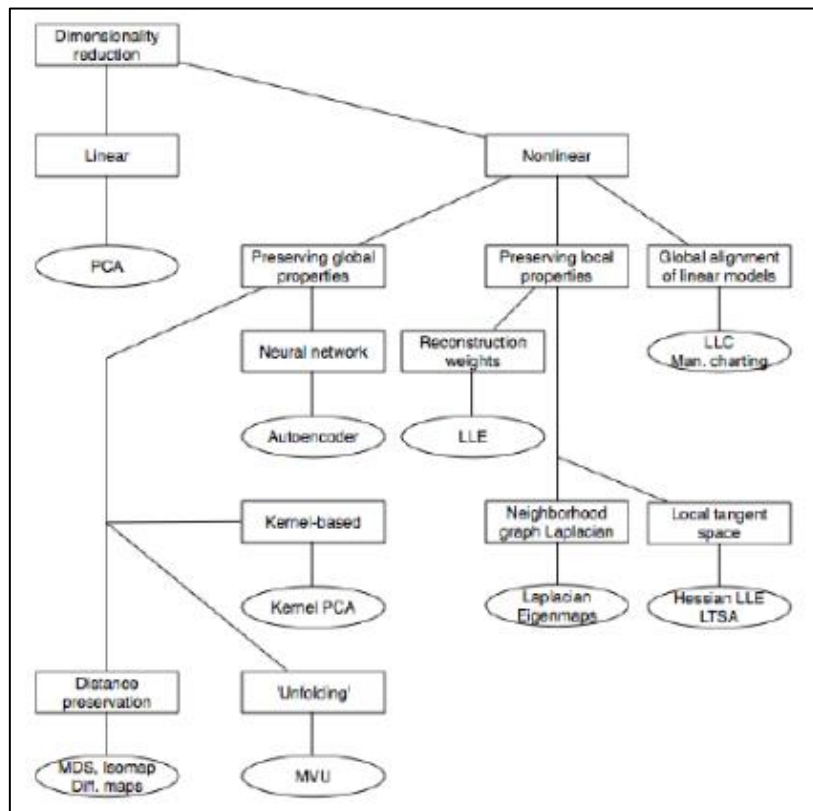
Οι Thippa Reddy, Praveen Kumar Reddy, Kuruva Lakshmana και Rajesh Kaluri στο άρθρο τους «Analysis of Dimensionality Reduction Techniques on Big Data» [39] διερεύνησαν την εφαρμογή δυο τεχνικών μείωσης διαστάσεων, της Γραμμικής Διακριτικής Ανάλυσης (LDA) και της Ανάλυσης Κύριων Στοιχείων (PCA), σε τέσσερις δημοφιλείς αλγόριθμους μηχανικής μάθησης: Decision Tree Induction, Support Vector Machine (SVM), Naive Bayes Classifier, και Random Forest Classifier. Συνολικά, η έρευνα υπογραμμίζει την αποτελεσματικότητα του PCA στη βελτίωση της απόδοσης των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, ιδιαίτερα σε σενάρια όπου εμπλέκονται δεδομένα υψηλών διαστάσεων. Υπογραμμίζει, επίσης τη διαφοροποιημένη επίδραση των τεχνικών μείωσης διαστάσεων σε διαφορετικούς τύπους συνόλων δεδομένων και μοντέλων μηχανικής μάθησης.



Εικόνα 15: Προτεινόμενο μοντέλο βασισμένο σε τεχνικές μείωσης διαστάσεων PCA και LDA, Source: G. Thippa Reddy et al.: Analysis of Dimensionality Reduction Techniques on Big Data

Οι Laurens van der Maaten, Eric Posta και H. Jaap Van Den Herik στο άρθρο «Dimensionality Reduction: A Comparative Review» για το «Journal of Machine Learning Research 10» [40] διεξήγαγαν μια ανασκόπηση και συνέκριναν τις παραδοσιακές μεθόδους, όπως την Principal Component Analysis (PCA) με τις μη γραμμικές τεχνικές μείωσης διαστάσεων, αξιολογώντας την απόδοσή τους τόσο σε τεχνητές όσο και σε φυσικές εργασίες. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αποκαλύπτουν ότι ενώ οι μη γραμμικές τεχνικές δείχνουν ισχυρή απόδοση σε συγκεκριμένες τεχνητές εργασίες, γενικά δεν ξεπερνούν την παραδοσιακή PCA όταν εφαρμόζονται σε εργασίες πραγματικού κόσμου. Αυτό συμβαίνει διότι στις τρέχουσες μη γραμμικές τεχνικές, εντοπίζονται αδυναμίες που αφορούν τον θόρυβο, την υπολογιστική πολυπλοκότητα και την διατήρηση τοπικών δομών σε δεδομένα υψηλών διαστάσεων. Για να βελτιωθεί η απόδοση των τεχνικών μείωσης μη γραμμικών διαστάσεων, προτείνουν τη

βελτίωση αλγορίθμων για τον καλύτερο χειρισμό δεδομένων με θόρυβο, την ανάπτυξη ισχυρών μεθόδων για τη διατήρηση τοπικών και παγκόσμιων δομών και τη βελτιστοποίηση της υπολογιστικής απόδοσης.



Εικόνα 16: Ταξινόμηση τεχνικών μείωσης διαστάσεων, Source: Dimensionality Reduction: A Comparative Review, van der Maaten, Postma, Van Den Herik

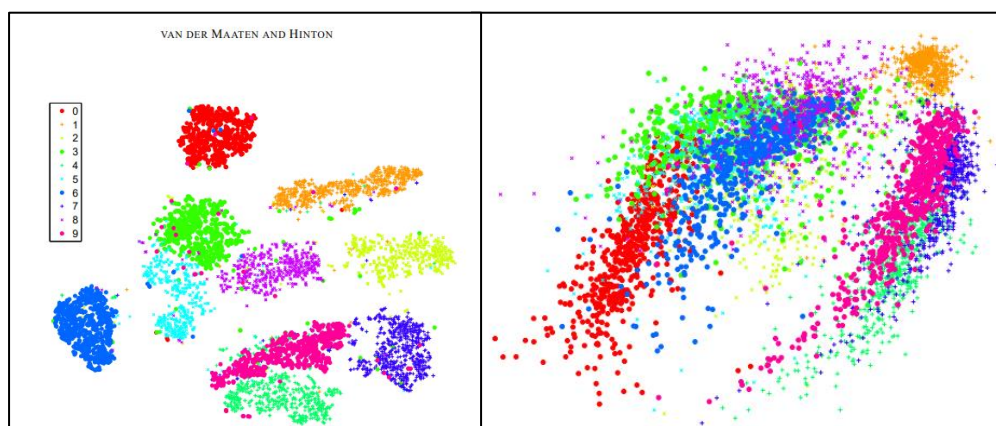
Οι Hao-Tian Zhang, Wen-Yong Guo και Wen-Ting Wang στο άρθρο «The dimensionality reductions of environmental variables have a significant effect on the performance of species distribution models» για το «Ecology and Evolution» [41] τονίζουν ότι οι τεχνικές μείωσης διαστάσεων (Dimensionality reduction techniques – DRTs) διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της προγνωστικής απόδοσης των μοντέλων κατανομής ειδών (species distribution models – SDMs) απλοποιώντας περιβαλλοντικά δεδομένα υψηλών διαστάσεων. Στη μελέτη τους, διερεύνησαν τον αντίκτυπο τεσσάρων DRTs: (1) Principal Component Analysis (PCA), (2) Independent Components Analysis (ICA), (3) Kernel Principal Component Analysis (KPCA) και (4) Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP). Αναλυτικότερα, συνέκριναν αυτές τις τεχνικές με βάση την ικανότητά τους να μειώνουν αποτελεσματικά τις διαστάσεις και να βελτιώνουν την ακρίβεια πρόβλεψης. Τα ευρήματά μας υποδεικνύουν ότι τα DRTs, ιδιαίτερα οι γραμμικές τεχνικές όπως το PCA και το ICA, βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του SDM σε σύγκριση με μοντέλα που χρησιμοποιούν τις αρχικές μεταβλητές. Συγκεκριμένα, το PCA έδειξε την υψηλότερη βελτίωση, ενισχύοντας την προγνωστική απόδοση κατά 2,55% κάτω από πολύπλοκες δομές μοντέλων και 2,68% με μεγαλύτερα μεγέθη

δειγμάτων. Αντίθετα, τα μη γραμμικά DRTs όπως το KPCA και το UMAP έδειξαν συγκριτικά χαμηλότερες βελτιώσεις στην προγνωστική ακρίβεια. Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της προσεκτικής επιλογής και εφαρμογής των DRTs στην οικολογική μοντελοποίηση για την ενίσχυση της ευρωστίας και της αξιοπιστίας των προβλέψεων κατανομής ειδών.

Linear Dimensionality Reduction Techniques» στο Τεύχος 6 του «International Journal of Computer Science and Information Technologies» [42] αναφέρουν ότι με την πρόοδο της τεχνολογίας, σημειώθηκε έκρηξη στον όγκο και τις διαστάσεις των δεδομένων που παράγονται σε διάφορα πεδία, κάτι που σημαίνει ότι η ανάλυση τέτοιων δεδομένων υψηλών διαστάσεων είναι απαραίτητη για τις ερευνητικές και τις παραγωγικές δραστηριότητες. Συνεχίζουν λέγοντας ότι οι τεχνικές μείωσης διαστάσεων προσφέρουν μια πρακτική λύση μειώνοντας τον αριθμό των μεταβλητών διατηρώντας παράλληλα σημαντικές πληροφορίες, ενώ υπογραμμίζουν ότι οι τεχνικές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε εποπτευόμενες και μη εποπτευόμενες, γραμμικές και μη γραμμικές μεθόδους. Τονίζουν ότι η μετατροπή σε χώρο χαμηλότερων διαστάσεων όχι μόνο μειώνει το υπολογιστικό κόστος, αλλά διευκολύνει επίσης τη συμπίεση δεδομένων, την οπτικοποίηση και ενισχύει την αποτελεσματικότητα της ανάλυσης μεγάλων δεδομένων. Τέλος, αναφέρουν ότι η μείωση διαστάσεων βρίσκει ποικίλες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα: regression analysis, cluster analysis, computer vision, image processing, και text categorization.

2.4.2 t – Distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE)

Μια ισχυρή μέθοδος μείωσης διαστάσεων που ονομάζεται t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE) χρησιμοποιείται κυρίως για οπτικοποίηση δεδομένων υψηλών διαστάσεων σε χώρους χαμηλών διαστάσεων. Αναλυτικότερα, το t-SNE επικεντρώνεται στη διατήρηση τοπικών δομών και προτύπων ομαδοποίησης σε αντίθεση με γραμμικές προσεγγίσεις όπως το PCA, που επιδιώκουν να διατηρήσουν παγκόσμιες δομές και αποστάσεις. Έτσι, λειτουργεί ιδιαίτερα καλά για διερευνητική ανάλυση δεδομένων. Οι Laurens van der Maaten και Geoffrey Hinton στο άρθρο «Visualizing Data using t-SNE» [43] αναφέρουν ότι το t – SNE παρουσιάζει μια νέα προσέγγιση για την οπτικοποίηση δεδομένων υψηλών διαστάσεων εκχωρώντας σε



Εικόνα 17: Οπτικοποίηση t - SNE και Isomap, Source: Visualizing Data using t-SNE, van der Maate, Hinton

κάθε σημείο δεδομένων μια θέση σε έναν δισδιάστατο ή τρισδιάστατο χάρτη. Πιο συγκεκριμένα, υποστηρίζουν ότι το $t - SNE$ προσφέρει καλύτερη βελτιστοποίηση και δημιουργεί πιο αποτελεσματικές απεικονίσεις μειώνοντας τη ομαδοποίηση σημείων στο κέντρο του χάρτη, ενώ υπερέχει έναντι των υπάρχουσών μεθόδων δημιουργώντας έναν ενοποιημένο χάρτη που αποκαλύπτει δομικές αποχρώσεις σε διάφορες κλίμακες, καθιστώντας τον ιδιαίτερα κατάλληλο για πολύπλοκα σύνολα, όπως διαφορετικές εικόνες αντικειμένων που προβάλλονται από διαφορετικές γωνίες. Η απόδοσή του αποδίδεται σε διάφορα σύνολα δεδομένων και συγκρίνεται ευνοϊκά με άλλες μη παραμετρικές τεχνικές οπτικοποίησης, όπως η χαρτογράφηση Sammon (Sammon mapping), η Isomap και η Τοπική Γραμμική Ενσωμάτωση (Locally Linear Embedding), παράγοντας με συνέπεια ανώτερες οπτικοποιήσεις σχεδόν σε όλα τα σύνολα δεδομένων.

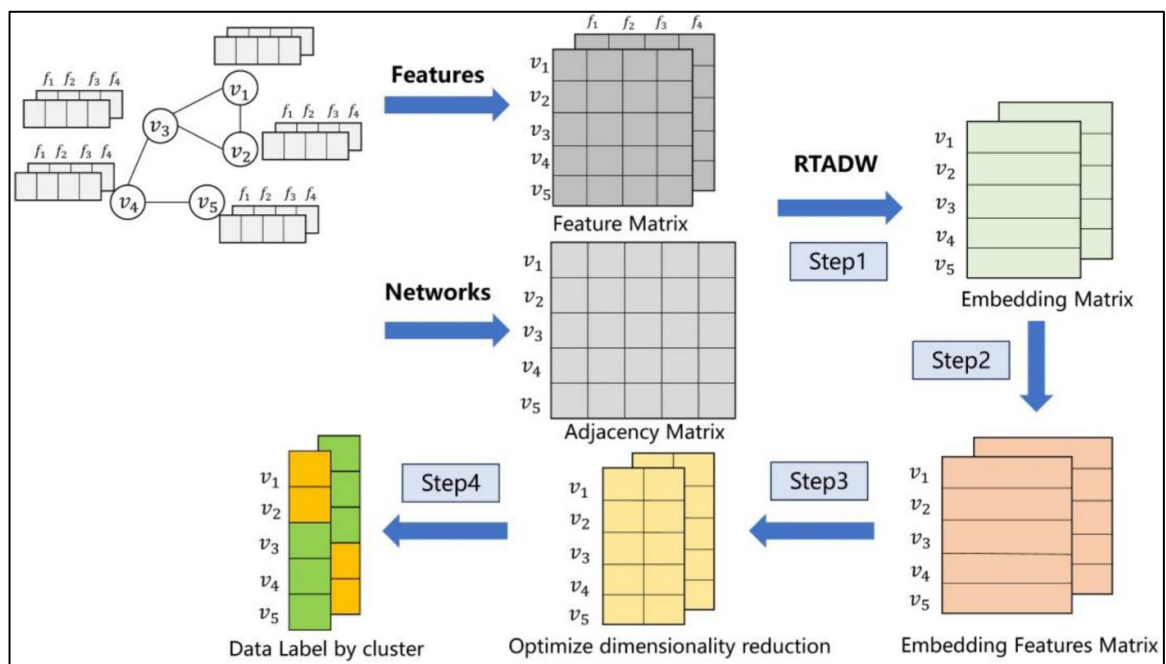
2.5 Αλγόριθμοι Ομαδοποίησης

2.5.1 Εισαγωγή στην Ομαδοποίηση

Μια βασική μέθοδος στην ανάλυση δεδομένων είναι η ομαδοποίηση, η οποία συνθέτει τα σχετικά σημεία δεδομένων σε τμήματα ή συστάδες σύμφωνα με τις εγγενείς ποιότητές τους. Αναλυτικότερα, η ο κύριος στόχος της ομαδοποίησης είναι η εύρεση φυσικών «ομάδων» μέσα στα δεδομένα, καθώς μπορεί να παρέχουν πληροφορίες για συσχετίσεις, τάσεις και ανωμαλίες που μπορεί να μην είναι ορατές. Όταν πρόκειται για ανάλυση περιβαλλοντικών δεδομένων, η ομαδοποίηση είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό χρονικών και χωρικών τάσεων, την οργάνωση των δεδομένων σε χρήσιμες ομάδες και την παροχή βοήθειας για τη λήψη αποφάσεων.

Ο Ιωάννης Πρίμπας και ο Μιχάλης Καρύδης στο άρθρο τους «Assessment of clustering algorithms in discriminating eutrophic levels in coastal waters» για το «Global Nest Journal 10» [44] τονίζουν ότι στο πλαίσιο της αξιολόγησης των ευτροφικών τάσεων στα παράκτια ύδατα, η ανάλυση συστάδων χρησιμεύει ως πολύτιμο εργαλείο για τη διάκριση τους. Συνεχίζουν λέγοντας ότι η αποτελεσματικότητα της ομαδοποίησης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η επιλογή των μεταβλητών, το μέτρο απόστασης που χρησιμοποιείται και ο ίδιος ο αλγόριθμος ομαδοποίησης. Στη μελέτη συγκρίθηκαν επτά αλγόριθμοι ομαδοποίησης χρησιμοποιώντας σύνολα δεδομένων από τοποθεσίες δειγματοληψίας με γνωστούς τύπους νερού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αλγόριθμος του Ward ξεπέρασε τις άλλες μεθόδους ομαδοποίησης στην ακριβή διάκριση μεταξύ των τοποθεσιών δειγματοληψίας διαφορετικών τροφικών καταστάσεων, ενώ οι υπόλοιποι αλγόριθμοι δεν παρουσίασαν σημαντική ευκρίνεια στην ταξινόμηση διαφορετικών τύπων νερού.

Οι Meng Fang, Li Lyu, Ning Wang, Xiaolei Zhou και Yankun Hu στο άρθρο τους «Application of unsupervised clustering model based on graph embedding in water environment» [45] εισαγάγουν μια βελτιωμένη έκδοση του αλγορίθμου TADW, που ονομάζεται RTADW και που έχει σχεδιαστεί ειδικά για την ανάλυση δεδομένων παρακολούθησης επιφανειακών υδάτων με χωροχρονικά χαρακτηριστικά. Στην παρούσα έρευνα, η ποιότητα των επιφανειακών υδάτων ποικίλλει μεταξύ διαφορετικών εποχών και γεωγραφικών περιοχών, θέτοντας προκλήσεις για τις τεχνικές ομαδοποίησης που πρέπει να αποτυπώνουν αποτελεσματικά τόσο στη χρονική όσο και στη χωρική δυναμική. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η τροποποίηση επιτρέπει στο μοντέλο να δημιουργήσει χωροχρονικά διανύσματα χαρακτηριστικών που ενσωματώνουν τόσο τη χρονική εξέλιξη όσο και τη χωρική κατανομή της ποιότητας των επιφανειακών υδάτων στα σημεία παρακολούθησης, μιας και το RTADW υπερέχει στη ομαδοποίηση σε σύγκριση με άλλες μεθόδους όπως ο αλγόριθμος DTW, επιτρέποντας έτσι μια ολοκληρωμένη ανάλυση χωροχρονικών περιφερειακών προτύπων σε πολλαπλές τοποθεσίες παρακολούθησης εντός της λεκάνης απορροής του ποταμού Liaohe.



Εικόνα 18: Η αρχιτεκτονική του αλγορίθμου, Source: Application of unsupervised clustering model based on graph embedding in water environment

2.5.2 Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN)

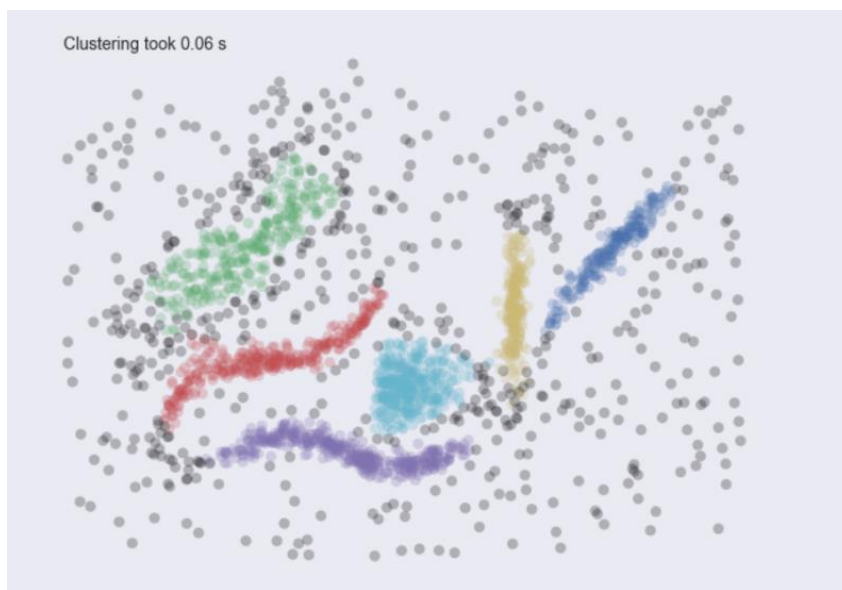
Το HDBSCAN είναι μια εξελιγμένη τεχνική ομαδοποίησης που βασίζεται στο DBSCAN, με την προσθήκη αρχών ιεραρχικής ομαδοποίησης (hierarchical clustering principles) και τον αυτόματο υπολογισμό του αριθμού των συστάδων. Σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές, που απαιτούν τον προκαθορισμό του αριθμού των συστάδων, το HDBSCAN ανιχνεύει

συστάδες διαφορετικών πυκνοτήτων και μεγεθών, διαχειριζόμενος αποτελεσματικά περίπλοκα σύνολα δεδομένων που περιέχουν θόρυβο και ανωμαλίες.

Εάν ένα σημείο στο HDBSCAN έχει επαρκή αριθμό κοντινών σημείων μέσα σε ένα συγκεκριμένο όριο απόστασης (distance threshold), θεωρείται βασικό σημείο, ενώ λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις άμεσες όσο και τις έμμεσες συνδέσεις που πραγματοποιούνται μέσω άλλων βασικών σημείων, αυτή η μέτρηση αξιολογεί πόσο συνδεδεμένα είναι δύο σημεία (Mutual Reachability Distance). Δημιουργώντας, έτσι, συνδέσεις μεταξύ προσβάσιμων γειτόνων (reachable neighbors), το HDBSCAN δημιουργεί μια ιεραρχία συμπλεγμάτων που αποτελούνται από διαφορετικές πυκνότητες.

Με βάση τις αποστάσεις αμοιβαίας προσβασιμότητας (mutual reachability distances), τα συμπλέγματα είναι διατεταγμένα σε μια δομή που μοιάζει με δέντρο που καθιστά δυνατό τον εντοπισμό σημαντικών συστάδων σε διάφορες λεπτότητες.

Οι Leland McInnes, Steve Astels και John Healy, στο άρθρο «hdbSCAN: Hierarchical density based clustering» για το «The Journal of Open Source Software 2» [46] αναφέρουν ότι το HDBSCAN παρέχει ποικίλα εργαλεία για οπτικοποίηση και για εξερεύνηση δομών συμπλέγματος, ενώ υποστηρίζει την πρόβλεψη και προσφέρει δυνατότητες ομαδοποίησης, καθιστώντας το ένα ευέλικτο εργαλείο για τη σύνθετη ανάλυση δεδομένων και την ανίχνευση ακραίων στοιχείων σε διάφορες εφαρμογές.



Εικόνα 19: Συστάδες που δημιουργήθηκαν μέσω του HDBSCAN, Source: hdbSCAN: Hierarchical density based clustering, McInnes, Healy, Astels

Οι Claudia Malzer και Marcus Baum στο άρθρο «A Hybrid Approach To Hierarchical Density-based Cluster Selection» για το [47] τονίζουν επίσης ότι ο HDBSCAN είναι ένας προηγμένος αλγόριθμος ομαδοποίησης με βάση την πυκνότητα που αξιοποιεί ένα δέντρο ιεραρχίας συστάδων για την εξαγωγή επίπεδων συστάδων με βάση ένα μέτρο σταθερότητας. Αναφέρουν ότι πρόσφατα προτάθηκε μια υβριδική προσέγγιση που συνδυάζει το DBSCAN* και το HDBSCAN, ενισχύοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της ομαδοποίησης για δεδομένα με ποικίλες πυκνότητες. Με την εισαγωγή ενός πρόσθετου ορίου, αυτή η υβριδική μέθοδος αντιμετωπίζει σενάρια που απαιτούν μικρά μεγέθη συστάδων, ενώ μετριάξει τις μικροσυστάδες σε περιοχές υψηλής πυκνότητας.

Κεφάλαιο 3: Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Εισαγωγή στις Χρονοσειρές

Η ανάλυση χρονοσειρών είναι μια στατιστική τεχνική που χρησιμοποιείται για την εξέταση σημείων δεδομένων που έχουν μετρηθεί σε βάθος χρόνου. Στην Τηλεπισκόπηση, η ανάλυση χρονοσειρών αναφέρεται στα εργαλεία και στις μέθοδοι εξαγωγής πληροφοριών σχετικά με το τοπίο που χαρακτηρίζεται τόσο από φασματικές, όσο και από χρονικές αλλαγές. [48] Όσον αφορά της Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος και ειδικότερα των υδάτων, η ανάλυση χρονοσειρών είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό των μετατοπίσεων και των προτύπων με μια σειρά παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων της βιολογικής δυναμικής, των κλιματικών μεταβλητών και των δεικτών ποιότητας του νερού.

Η εξέταση δεδομένων που συλλέγονται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους επιτρέπει στους ερευνητές χρονοσειρών να βρουν μοτίβα στα δεδομένα τους, που δεν θα μπορούσαν να εντοπιστούν σε συγχρονικά δεδομένα υπό άλλες περιπτώσεις. Μερικές από τις εφαρμογές τους είναι η παρακολούθηση μακροπρόθεσμων περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού ή η μετατόπιση των συγκεντρώσεων θρεπτικών συστατικών. Ακόμα, σημαντική είναι η συνεισφορά τους στις επαναλαμβανόμενες εποχιακές τάσεις, όπως για παράδειγμα στις αλλαγές στη θολότητα ή στις εναλλαγές στα επίπεδα χλωροφύλλης – α που προκαλούνται από την άνθηση των φυκιών.

3.2 Μείωση Διαστάσεων

3.2.1 Ορισμός και Εφαρμογές

Η πρακτική της μείωσης των μεταβλητών ή των χαρακτηριστικών που λαμβάνονται υπόψη σε ένα σύνολο δεδομένων είναι γνωστή ως «μείωση διαστάσεων», η οποία γίνεται σημαντική στο πλαίσιο της περιβαλλοντικής παρακολούθησης και των δορυφορικών εικόνων λόγω της πολυπλοκότητας των δεδομένων που συλλέγονται από αισθητήρες. [49] Αναλυτικότερα, στις δορυφορικές εικόνες υπάρχουν πολλές φασματικές ζώνες και χωρικές αναλύσεις, με αποτέλεσμα τα σύνολα των δεδομένων να έχουν εκατοντάδες ή χιλιάδες διαστάσεις. Στόχος, λοιπόν, αυτής της τεχνικής είναι η μετατροπή δεδομένων υψηλών διαστάσεων σε χώρο χαμηλότερης διάστασης, διατηρώντας παράλληλα σημαντικά χαρακτηριστικά και συνδέσεις μεταξύ στοιχείων δεδομένων.

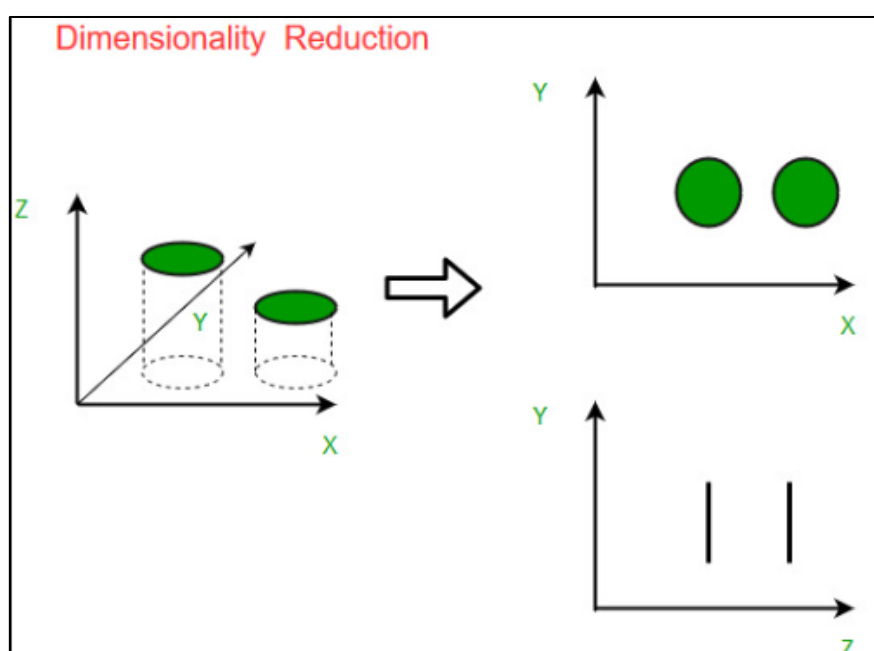
Αξίζει να αναφερθεί ότι η αναγκαιότητα της ελάττωσης των διαστάσεων είναι επιτακτική για πολλούς λόγους. Αρχικά, οι υπολογιστικές εργασίες γίνονται ευκολότερες όταν μειώνεται ο αριθμός των διαστάσεων, ενώ παράλληλα τα σύνθετα μοτίβα δεδομένων είναι πιο εύκολο να απεικονιστούν και να αναλυθούν όταν χρησιμοποιούνται αναπαραστάσεις χαμηλότερων

διαστάσεων. Σημαντικό είναι επίσης να αναφερθεί ότι η μείωση διαστάσεων συμβάλλει στη μείωση του θορύβου και της ανούσιας (irrelevant) μεταβλητότητας στα δεδομένα, εστιάζοντας στις πιο σημαντικές διαστάσεις, ενώ έτσι το σύνολο των δεδομένων μπορεί να γίνει απλούστερο, ώστε οι στατιστικές μέθοδοι και οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης να μπορούν να εφαρμοστούν με μεγαλύτερη επιτυχία.

3.2.2 Επισκόπηση Τεχνικών

3.2.2.1 Ορισμός – Χρησιμότητα

Η μείωση των διαστάσεων περιλαμβάνει τη μείωση του αριθμού των χαρακτηριστικών (ή των διαστάσεων) σε ένα σύνολο δεδομένων, διατηρώντας παράλληλα όσο το δυνατόν περισσότερες βασικές πληροφορίες. Αυτή η διαδικασία εξυπηρετεί διάφορους σκοπούς, όπως την απλοποίηση της πολυπλοκότητας του μοντέλου, τη βελτίωση της απόδοσης των αλγορίθμων εκμάθησης ή τη διευκόλυνση της οπτικοποίησης των δεδομένων. Υπάρχουν πολυάριθμες τεχνικές για τη μείωση των διαστάσεων, καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιεί μια ξεχωριστή προσέγγιση για την προβολή δεδομένων σε χώρο χαμηλότερης διάστασης, διατηρώντας παράλληλα κρίσιμες πληροφορίες. [50]

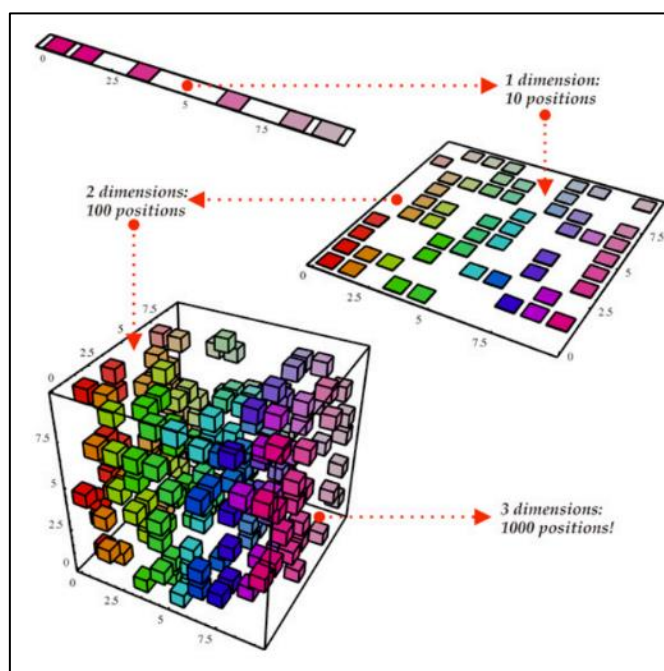


Εικόνα 20: Components of Dimensionality Reduction, Source: [geeksforgeeks.org](https://www.geeksforgeeks.org/)

Οι διαστάσεις (ή τα χαρακτηριστικά) αναφέρονται στις μεταβλητές πρόβλεψης που επηρεάζουν την έξοδο ενός μοντέλου, γνωστές και ως μεταβλητές εισόδου. Τα δεδομένα υψηλών διαστάσεων αναφέρονται σε σύνολα δεδομένων (datasets) με σημαντικό αριθμό μεταβλητών πρόβλεψης. Τα σύνολα δεδομένων υψηλών διαστάσεων παρουσιάζουν αρκετές

πρακτικές προκλήσεις για τους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης (machine learning), συμπεριλαμβανομένου του αυξημένου χρόνου υπολογισμού (computation time) και της ανάγκης για περισσότερο χώρο αποθήκευσης. Ωστόσο, το πιο σημαντικό ζήτημα είναι συχνά η μειωμένη ακρίβεια των μοντέλων πρόβλεψης. Τα μοντέλα που εκπαιδεύονται σε σύνολα δεδομένων υψηλών διαστάσεων τείνουν να μην γενικεύουν, οδηγώντας σε κακή απόδοση.

Καθώς ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου για ένα μοντέλο αυξάνεται, ο χώρος διαστάσεων (dimensional space) του μοντέλου επεκτείνεται. Ωστόσο, εάν ο αριθμός των σημείων δεδομένων παραμένει σταθερός, τα δεδομένα γίνονται αραιά σε αυτόν τον μεγαλύτερο χώρο. Για να αποτυπωθούν επαρκώς τα μοτίβα σε αραιά δεδομένα, τα μοντέλα μπορεί να καταλήξουν να προσαρμόζουν υπερβολικά τα δεδομένα εκπαίδευσης. Κατά συνέπεια, μια αύξηση της διάστασης μπορεί να οδηγήσει σε κακή γενίκευση. Η υψηλή διάσταση εμποδίζει επίσης την ερμηνευτικότητα του μοντέλου προκαλώντας πολυσυγγραμμικότητα (multicollinearity). Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών του μοντέλου, αυξάνεται και η πιθανότητα ορισμένες μεταβλητές να συσχετίζονται. (correlation). [51]



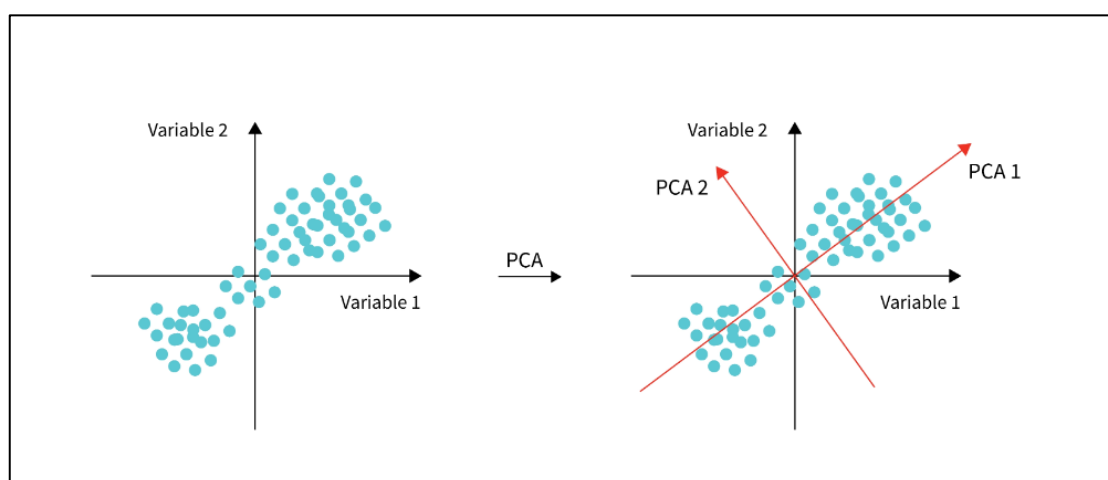
Εικόνα 21: Dimensionality Reduction, Source: teamraft.com

Η συλλογή περισσότερων δεδομένων μπορεί να μειώσει τη σπανιότητα των δεδομένων και να ελαττώσει την πρόβλημα της διάστασης. Ωστόσο, καθώς ο αριθμός των διαστάσεων σε ένα μοντέλο αυξάνεται, ο όγκος των δεδομένων που απαιτούνται για την καταπολέμηση του προβλήματος των διαστάσεων αυξάνεται εκθετικά. Η συλλογή αρκετών δεδομένων είναι συχνά ανέφικτη, υπογραμμίζοντας την αναγκαιότητα μείωσης των διαστάσεων για την ενίσχυση της ανάλυσης δεδομένων.

Οι τεχνικές μείωσης διαστάσεων συνήθως μειώνουν τον αριθμό των διαστάσεων σε ένα μοντέλο εξαγόντας ή συνδυάζοντας χαρακτηριστικά. Παρά αυτή την κοινή προσέγγιση, οι αλγόριθμοι μείωσης διαστάσεων διαφέρουν ως προς τις συγκεκριμένες μεθόδους και εφαρμογές τους.

3.2.2.2 Γραμμικές Τεχνικές: Linear Techniques

Principal component analysis (PCA): Ως μέθοδος εξαγωγής χαρακτηριστικών, ο PCA μετατρέπει τα αρχικά χαρακτηριστικά σε ένα νέο σύνολο χαρακτηριστικών γνωστών ως κύρια στοιχεία (principal components). Επιλέγοντας και προβάλλοντας τα δεδομένα σε έναν νέο χώρο που ορίζεται από αυτά τα κύρια στοιχεία, ο PCA συμπυκνώνει στις πληροφορίες, διατηρώντας τα βασικά μοτίβα και σχέσεις, ενώ απορρίπτει περιττές ή λιγότερο σημαντικές λεπτομέρειες. [52]



Εικόνα 22: Παράδειγμα PCA, Source: Sudheer Madala

Linear discriminant analysis (LDA): Όπως και το PCA, ο LDA στοχεύει στη μείωση της διάστασης των δεδομένων προβάλλοντάς τα σε έναν νέο χώρο χαμηλότερης διάστασης που προέρχεται από τα αρχικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, το LDA διαφέρει από το PCA στο ότι εστιάζει στη διατήρηση των ετικετών ταξινόμησης μέσα στο σύνολο δεδομένων. Ενώ το PCA δημιουργεί νέες μεταβλητές για να μεγιστοποιήσει τη συνολική διακύμανση των δεδομένων, το LDA δημιουργεί νέες μεταβλητές που μεγιστοποιούν τον διαχωρισμό μεταξύ διαφορετικών κλάσεων, ενισχύοντας τη διάκριση μεταξύ τους στον χώρο μειωμένων διαστάσεων. [53]

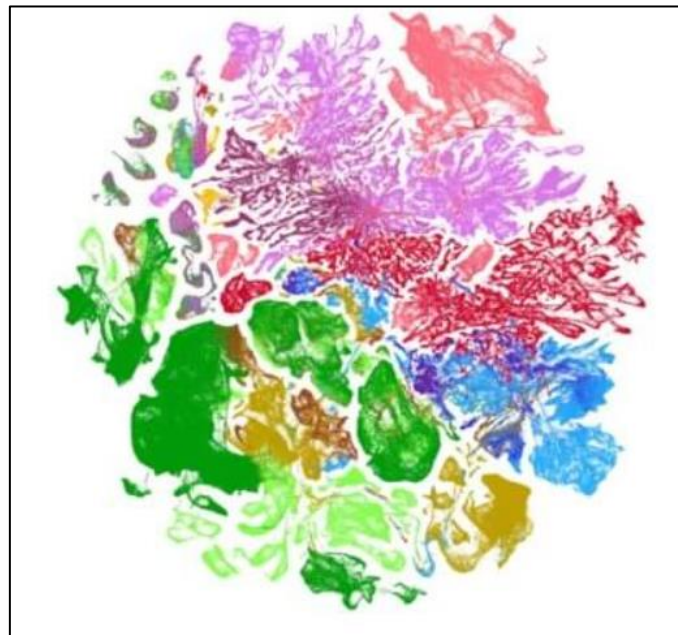
Στις γραμμικές τεχνικές είναι [54]:

Multidimensional Scaling (MDS): μια τεχνική που επιδιώκει να αναπαραστήσει τις pairwise αποστάσεις μεταξύ σημείων δεδομένων σε ένα χώρο χαμηλών διαστάσεων. Στο κλασικό MDS, αυτές οι αποστάσεις διατηρούνται ακριβώς στην αναπαράσταση χαμηλότερων διαστάσεων. Όταν χρησιμοποιείται ένας γραμμικός μετασχηματισμός, το κλασικό MDS είναι ισοδύναμο με το PCA. [55]

Factor Analysis (FA): μια στατιστική μέθοδος που υποθέτει ότι οι παρατηρούμενες μεταβλητές είναι γραμμικοί συνδυασμοί υποκείμενων λανθανόντων παραγόντων. Στόχος του είναι να αποκαλύψει αυτούς τους λανθάνοντες παράγοντες και να αναπαραστήσει τα δεδομένα ως προς αυτούς, μειώνοντας έτσι τη διαστασιότητά τους.

3.2.2.3 Μη Γραμμικές Τεχνικές: Non Linear Techniques

Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP): Το UMAP είναι ένας αλγόριθμος μείωσης διαστάσεων που βασίζεται σε πολλαπλές τεχνικές μάθησης και έννοιες από την τοπολογική ανάλυση δεδομένων. [56]



Προσφέρει ένα ευέλικτο πλαίσιο για πολλαπλή μάθηση και τη μείωση διαστάσεων, ενώ παρέχει επίσης συγκεκριμένες πρακτικές εφαρμογές. Το UMAP λειτουργεί κατασκευάζοντας μια γραφική παράσταση υψηλών διαστάσεων των δεδομένων, όπου κάθε σημείο δεδομένων συνδέεται με τους πλησιέστερους γείτονές του. Μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης, το UMAP στοχεύει να διατηρήσει τόσο τις τοπικές όσο και τις παγκόσμιες σχέσεις μεταξύ των σημείων δεδομένων σε αυτό το γράφημα. Με τη μοντελοποίηση της εγγενούς γεωμετρίας του

συνόλου δεδομένων, το UMAP μπορεί να συλλάβει πολύπλοκα μοτίβα και συμπλέγματα που υπάρχουν στα δεδομένα.

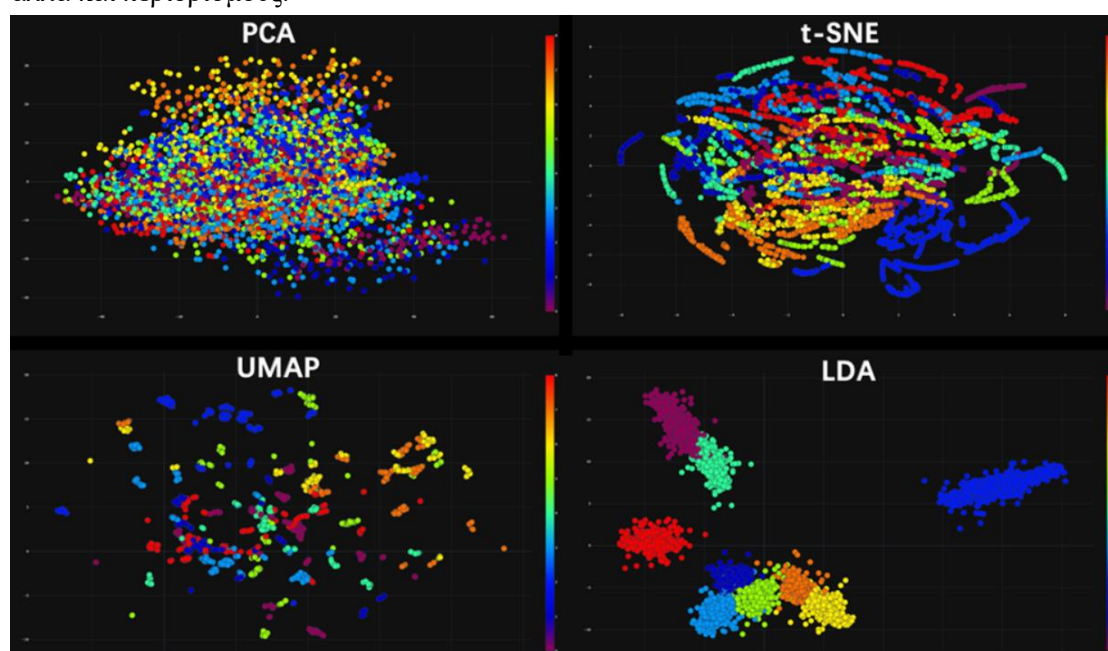
Άλλες μη – γραμμικές τεχνικές είναι:

Autoencoders: ένας τύπος τεχνητού νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιείται για μάθηση χωρίς επίβλεψη. Συμπιέζει τα δεδομένα εισόδου σε μια αναπαράσταση χαμηλότερης διάστασης (κωδικοποίηση) και ένα δίκτυο αποκωδικοποιητή που αναδομεί την αρχική είσοδο από αυτήν την αναπαράσταση. Οι autoencoders μπορούν να μάθουν μη γραμμικές αντιστοιχίσεις και χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μείωση διαστάσεων και τις εργασίες εκμάθησης χαρακτηριστικών. [57]

Kernel PCA (KPCA): Είναι μια επέκταση του PCA που χρησιμοποιεί μεθόδους πυρήνα για την εκτέλεση μη γραμμικής μείωσης διαστάσεων. Αντιστοιχίζει τα δεδομένα εισόδου σε ένα χώρο υψηλότερης διάστασης χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση πυρήνα, όπου στη συνέχεια εφαρμόζεται το γραμμικό PCA. Αυτό επιτρέπει στο KPCA να καταγράφει μη γραμμικές σχέσεις στα δεδομένα που δεν μπορούν να καταγραφούν από το τυπικό PCA. [58]

3.3 t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding (t – SNE)

Οι γραμμικές και οι μη γραμμικές μέθοδοι για τη μείωση των διαστάσεων είναι δύο διαφορετικές προσεγγίσεις που στοχεύουν στη μείωση του αριθμού των χαρακτηριστικών σε ένα σύνολο δεδομένων διατηρώντας παράλληλα στις σχετικές πληροφορίες. Κάθε μέθοδος λειτουργεί με το δικό της σύνολο τεχνικών και αρχών, προσφέροντας ποικίλα πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμούς.



Εικόνα 25: Σύγκριση διαφόρων μεθόδων μείωσης διαστάσεων (α) PCA, (β) t - SNE, (γ) UMAP, (δ) LDA, Source: Dimensionality Reduction for Data Visualization: PCA vs TSNE vs UMAP vs LDA, www.towardsdatascience.com

Από την μια, οι γραμμικοί μέθοδοι μείωσης των διαστάσεων (linear methods for dimension reduction), εστιάζουν στην καταγραφή γραμμικών σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι γραμμικές τεχνικές προσφέρουν ερμηνευτικότητα και υπολογιστική αποτελεσματικότητα, καθιστώντας τις κατάλληλες για σενάρια όπου οι υποκείμενες σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών είναι κυρίως γραμμικές. Ωστόσο, οι γραμμικές μέθοδοι έχουν ορισμένους περιορισμούς, μιας και υποθέτουν γραμμικότητα στα δεδομένα, η οποία μπορεί να μην ισχύει πάντα. Επιπλέον, οι γραμμικές μέθοδοι μπορεί να δυσκολεύονται να συλλάβουν περίπλοκες δομές που υπάρχουν στα δεδομένα, περιορίζοντας την αναπαραστατική τους δύναμη σε ορισμένα περιβάλλοντα.

Από την άλλη, οι μέθοδοι μείωσης των μη γραμμικών διαστάσεων (non – linear) αντιμετωπίζουν αυτούς τους περιορισμούς καταγράφοντας πολύπλοκες μη γραμμικές σχέσεις στα δεδομένα. Αναλυτικότερα, αυτές οι τεχνικές διακρίνονται στη διατήρηση των τοπικών ομοιοτήτων και στην καταγραφή πολλαπλών δομών που υπάρχουν σε δεδομένα υψηλών διαστάσεων. [59] Παρά τα πλεονεκτήματά τους, οι μη γραμμικές μέθοδοι έχουν τα δικά τους προβλήματα, μιας και τείνουν να είναι υπολογιστικά εντατικά, ιδιαίτερα για μεγάλα σύνολα δεδομένων, και μπορεί να μην έχουν την ερμηνευσιμότητα των γραμμικών ομολόγων τους. Τέλος, η κατανόηση της σχέσης μεταξύ των αρχικών χαρακτηριστικών και του ενσωματωμένου χώρου σε μη γραμμικές μεθόδους μπορεί επίσης να είναι πιο περίπλοκη.

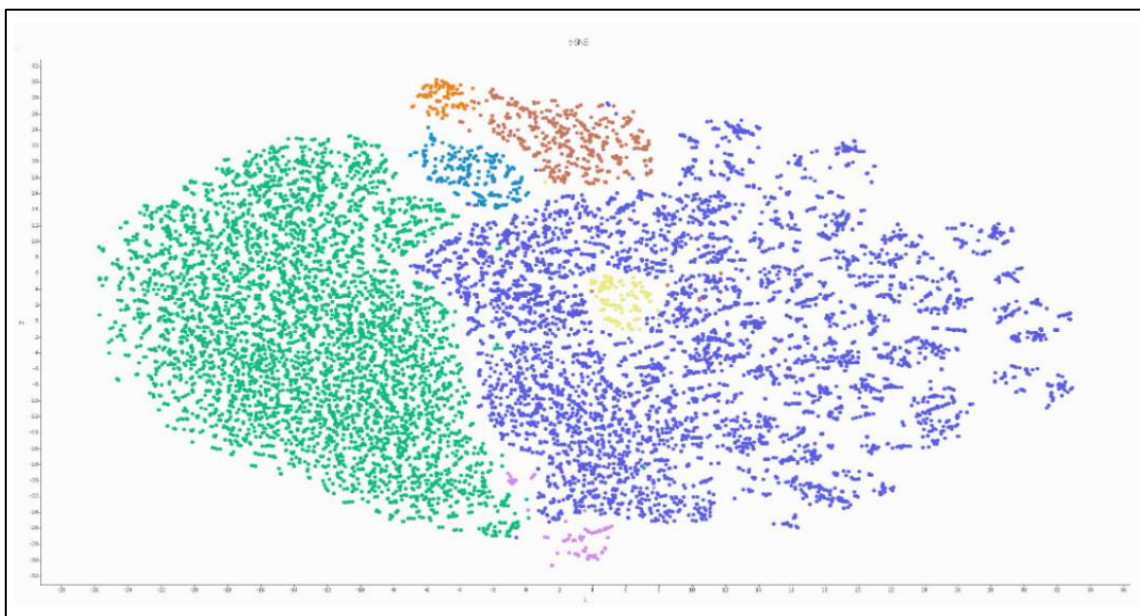
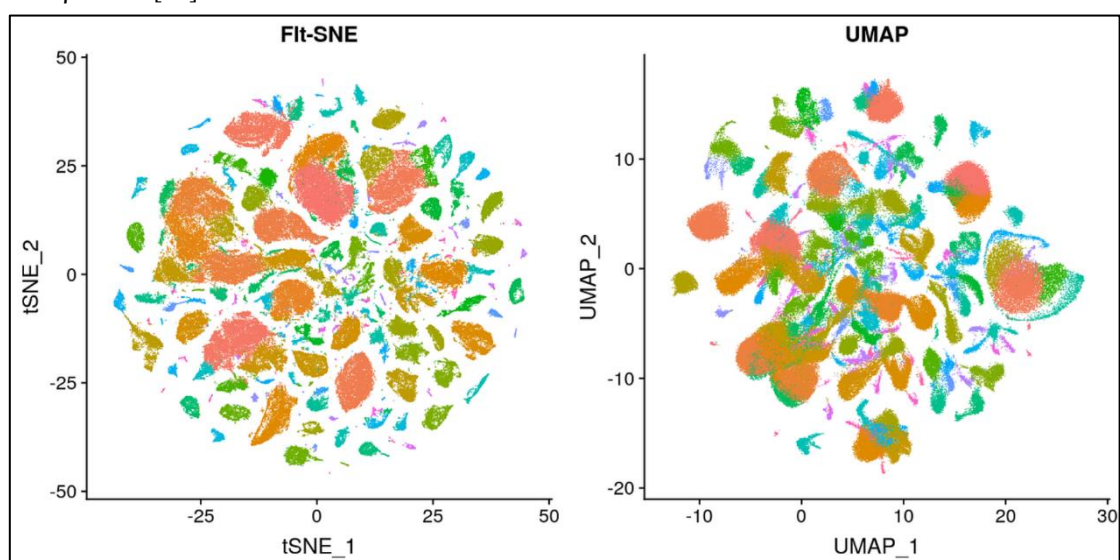


Figure 26: Παράδειγμα t - SNE, Source: glucore.com

Το t – SNE έχει σχεδιαστεί για να διατηρεί την τοπική δομή των δεδομένων όταν μειώνει τη διάστασή τους. Σε αντίθεση με τις μεθόδους γραμμικού μετασχηματισμού, το t-SNE χρησιμοποιεί μια μη γραμμική προσέγγιση μιας και υπολογίζει την ομοιότητα ζευγών των σημείων δεδομένων χρησιμοποιώντας έναν πυρήνα Gauss, διασφαλίζοντας ότι τα σημεία κοντά το ένα στο άλλο στον αρχικό χώρο υψηλών διαστάσεων παραμένουν κοντά στο χώρο μειωμένων διαστάσεων. Στη συνέχεια, το t-SNE χαρτογραφεί τα δεδομένα σε έναν δισδιάστατο ή τρισδιάστατο χώρο, προσπαθώντας να διατηρήσει τις σχέσεις μεταξύ γειτονικών σημείων, διατηρώντας έτσι την τοπική δομή των δεδομένων. [60]

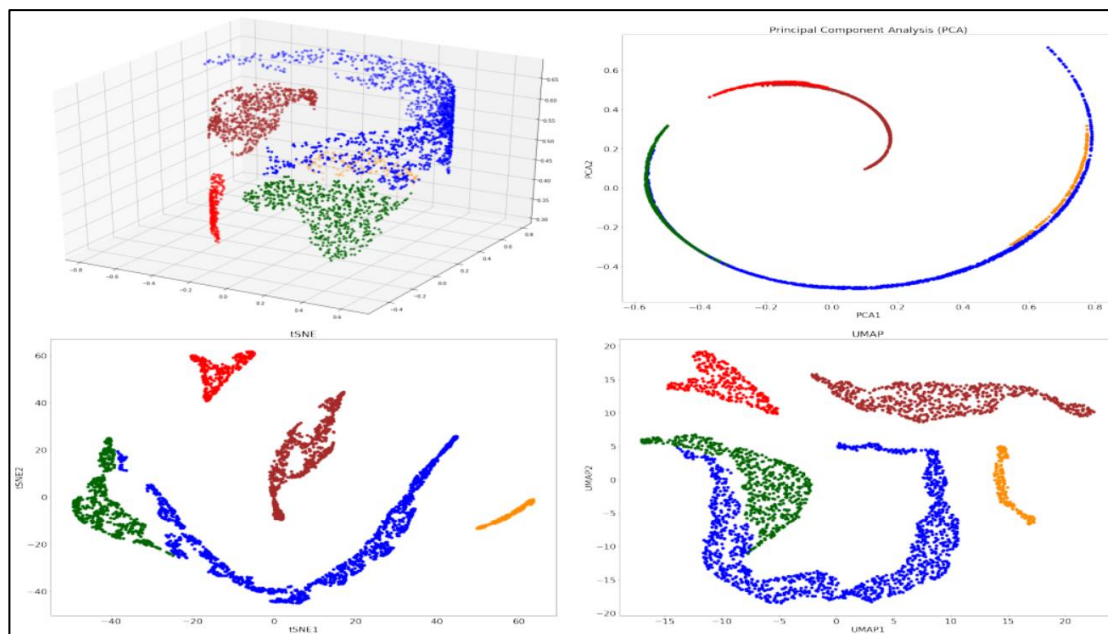
3.3.1 Προτερήματα και Μειονεκτήματα

Το t – SNE είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την εμφάνιση δεδομένων υψηλών διαστάσεων λόγω των πολυάριθμων πλεονεκτημάτων της. Αναλυτικότερα, η ικανότητά του να καταγράφει με ακρίβεια περίπλοκα μοτίβα και μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις που μπορεί να υπάρχουν στα δεδομένα είναι ένα από τα κύρια πλεονεκτήματά του. Σε αντίθεση με τις γραμμικές μεθόδους όπως η Principal Component Analysis (PCA), που προϋποθέτουν γραμμικές συσχετίσεις μεταξύ μεταβλητών, το t-SNE μπορεί να αποκαλύψει πολύπλοκα μοτίβα που θα ήταν δύσκολο να εντοπιστούν σε υψηλότερες διαστάσεις. Αυτή η ικανότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε τομείς όπως η παρακολούθηση του περιβάλλοντος, όπου οι μεταβλητές αλληλοεπιδρούν συχνά με μη γραμμικούς τρόπους, όπως η δυναμική των βιολογικών κοινοτήτων ή η γεωγραφική κατανομή των ρύπων. [61]



Εικόνα 27: tSNE vs. UMAP: Global Structure

Επιπλέον, τα τοπικά χαρακτηριστικά και τα συμπλέγματα που εντοπίζονται στον αρχικό χώρο υψηλών διαστάσεων διατηρούνται με τον t-SNE. Στην οπτικοποίηση μειωμένων διαστάσεων, εγγυάται ότι συγκρίσιμα σημεία δεδομένων από το αρχικό σύνολο δεδομένων παραμένουν κοντά το ένα στο άλλο, εστιάζοντας στη διατήρηση των σχετικών αποστάσεων μεταξύ γειτονικών κουκκίδων. Αυτή η ικανότητα είναι κρίσιμη για εργασίες που απαιτούν την αναγνώριση συστάδων ή ομαδοποιήσεων, συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης αλλαγών στους τύπους κάλυψης γης με την πάροδο του χρόνου ή της αναγνώρισης μοναδικών ζωνών ποιότητας νερού μέσα σε μια λεκάνη απορροής ποταμού.



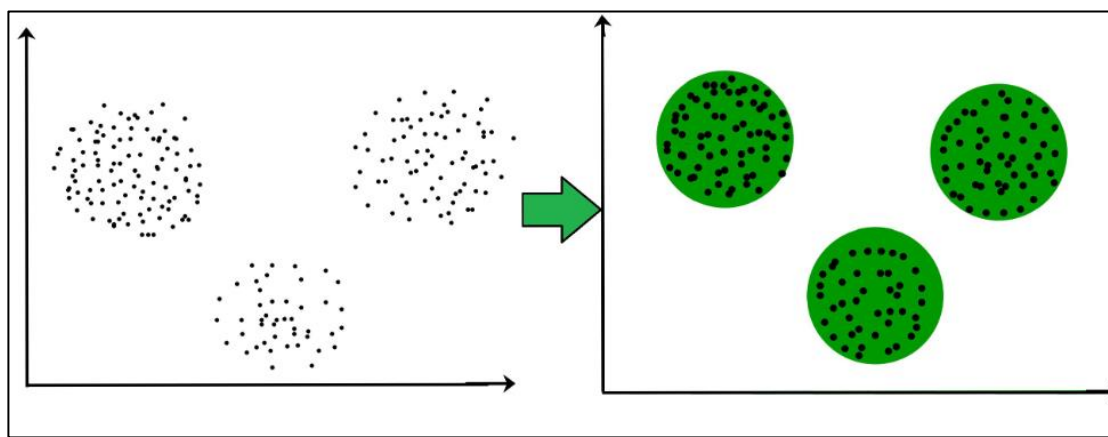
Εικόνα 28: tSNE vs. UMAP: Global Structure

Παρ' όλα τα θετικά, η υπολογιστική ένταση του t-SNE είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα, ιδιαίτερα όταν υφίστανται μεγάλα σύνολα δεδομένων. Οι υπολογιστικές απαιτήσεις του αλγορίθμου αυξάνονται γρήγορα με το μέγεθος των δεδομένων και εξαιτίας αυτού, το t-SNE μπορεί να μην είναι εφικτό για την αξιολόγηση πολύ μεγάλων συνόλων δεδομένων χωρίς την ανάγκη σημαντικών βελτιστοποιήσεων. Επιπλέον, το t-SNE χρησιμοποιεί τυχαίες φάσεις αρχικοποίησης και βελτιστοποίησης, τα αποτελέσματα από διαφορετικές εκτελέσεις αλγορίθμων ενδέχεται να αλλάξουν ελαφρώς και σε αντίθεση με άλλες μεθόδους, αυτή η τυχαιότητα εισάγει έναν βαθμό μεταβλητότητας στην ερμηνεία των απεικονίσεων t-SNE.

3.4 Αλγόριθμοι Ομαδοποίησης

3.4.1 Ορισμός

Η ομαδοποίηση ή αλλιώς clustering, στοχεύει στη δημιουργία ομάδων ομοιογενών σημείων δεδομένων (homogeneous datasets) από ένα ετερογενές σύνολο δεδομένων (heterogeneous datasets). Μετά από διάφορες διεργασίες και μετρήσεις, όπως η Ευκλείδεια απόσταση ή η ομοιότητα του συνημίτονου (cosine similarity), τα σημεία με τις υψηλότερες βαθμολογίες ομοιότητας ομαδοποιούνται, διευκολύνοντας τον εντοπισμό προτύπων και δομών μέσα στα δεδομένα. Τα συμπλέγματα μπορεί να έχουν αυθαίρετα σχήματα και πολλοί αλγόριθμοι είναι αποτελεσματικοί στην ανίχνευση αυτών των διαφορετικών μορφών συμπλέγματος. [62]

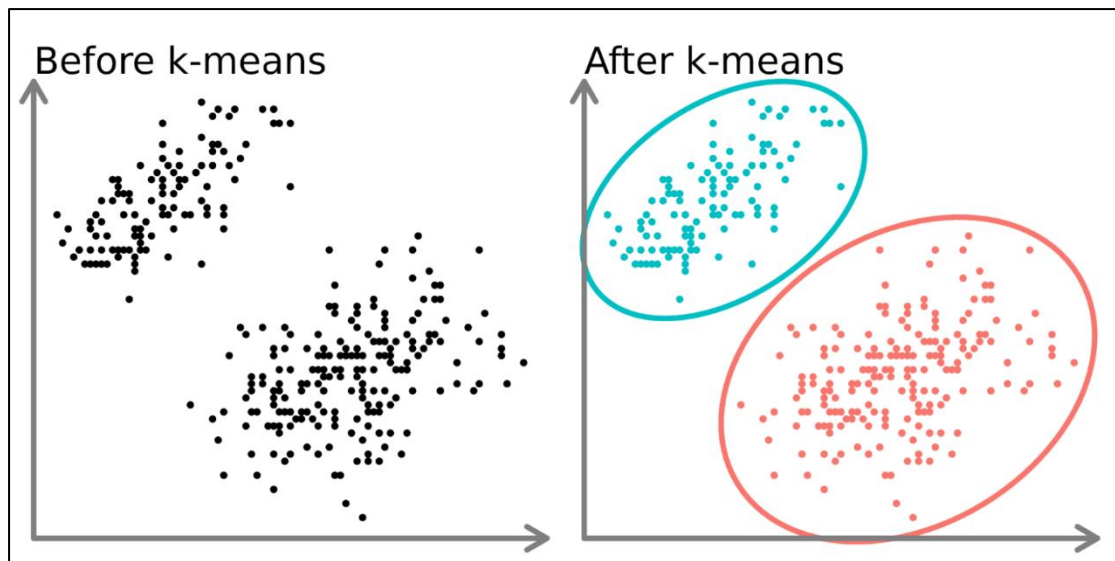


Εικόνα 29: Κυκλική ομαδοποίηση με βάση την απόσταση. Source: <https://www.geeksforgeeks.org/clustering-in-machine-learning/>

3.4.2 Είδη Ομαδοποίησης

Η ομαδοποίηση μπορεί γενικά να χωριστεί σε δύο υποομάδες: στην Hard Clustering και στην Soft Clustering. Στο Hard Clustering, κάθε σημείο δεδομένων εκχωρείται ακριβώς σε ένα σύμπλεγμα, που σημαίνει ότι ένα σημείο δεδομένων είτε ανήκει πλήρως σε ένα σύμπλεγμα είτε δεν ανήκει. Από την άλλη πλευρά, το Soft Clustering εκχωρεί μια πιθανότητα ή πιθανότητα ότι κάθε σημείο δεδομένων ανήκει σε ένα ή περισσότερα clusters. Αντί να κάνει μια οριστική ανάθεση, παρέχει έναν βαθμό συμμετοχής. [63]

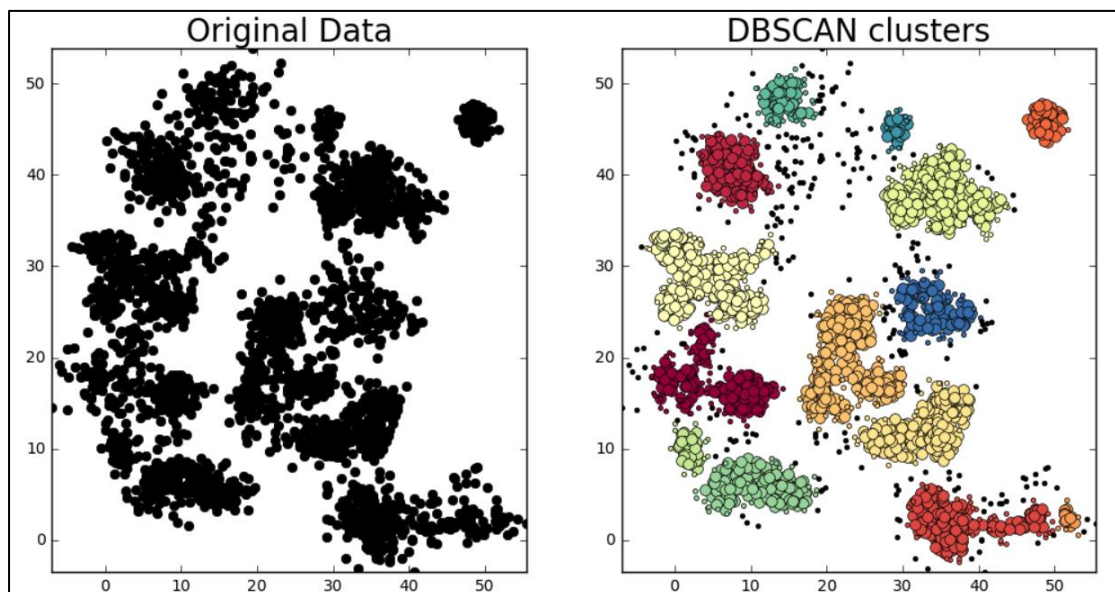
3.3.2.1 Κατάτμηση



Εικόνα 30: Ομαδοποίηση k - means, Source: <https://www.datacamp.com/tutorial/k-means-clustering-python>

Οι μέθοδοι κατάτμησης είναι από τους απλούστερους αλγόριθμους ομαδοποίησης, μιας και αυτές οι μέθοδοι ομαδοποιούν τα σημεία δεδομένων με βάση την εγγύτητά τους, χρησιμοποιώντας συνήθως μέτρα ομοιότητας όπως η Ευκλείδεια απόσταση. Τα δεδομένα χωρίζονται σε έναν προκαθορισμένο αριθμό συστάδων, με κάθε συστάδα να αντιπροσωπεύεται από ένα κέντρο. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των αλγορίθμων είναι η ανάγκη να καθοριστεί εκ των προτέρων ο αριθμός των συστάδων.

3.3.2.2 Πυκνότητα

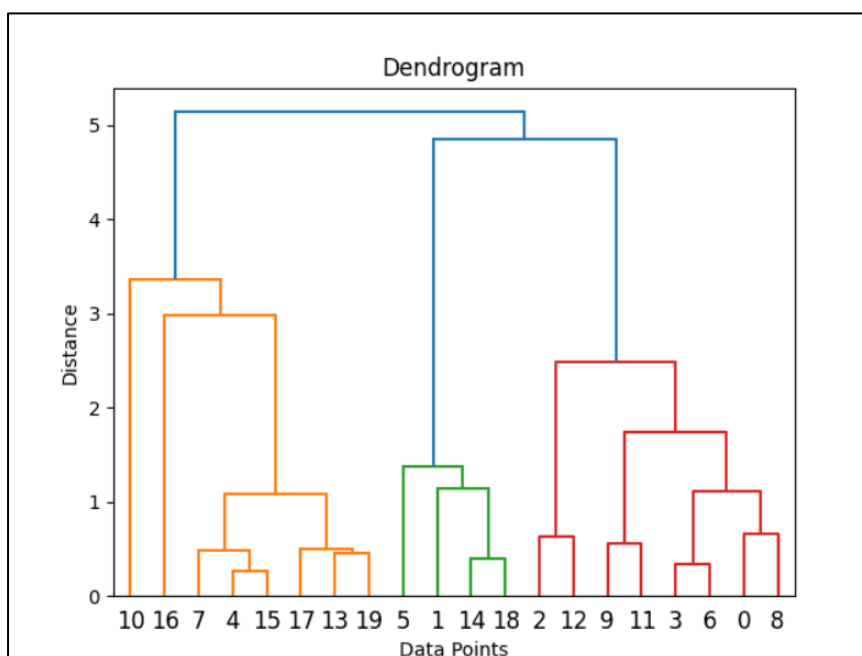


Εικόνα 31: Ομαδοποίηση DBSCAN, Source: <https://medium.com/@ipreethi/dbscan-algorithm-density-based-spatial-clustering-of-application-with-noise-a826538dcb42>

Η ομαδοποίηση με βάση την πυκνότητα, είναι μια μέθοδος που βασίζεται σε μοντέλα, προσδιορίζει συστάδες με βάση την πυκνότητα των σημείων δεδομένων. Σε αντίθεση με τις μεθόδους κατάτμησης, οι οποίοι απαιτούν έναν προκαθορισμένο αριθμό συστάδων, η ομαδοποίηση με βάση την πυκνότητα καθορίζει τον αριθμό των συστάδων αυτόματα και επηρεάζεται λιγότερο από τις αρχικές θέσεις. Αυτό καθιστά τις μεθόδους που βασίζονται στην πυκνότητα ιδιαίτερα αποτελεσματικές για το χειρισμό συστάδων διαφορετικών μεγεθών και σχημάτων. [65]

3.3.2.3 Ιεραρχία

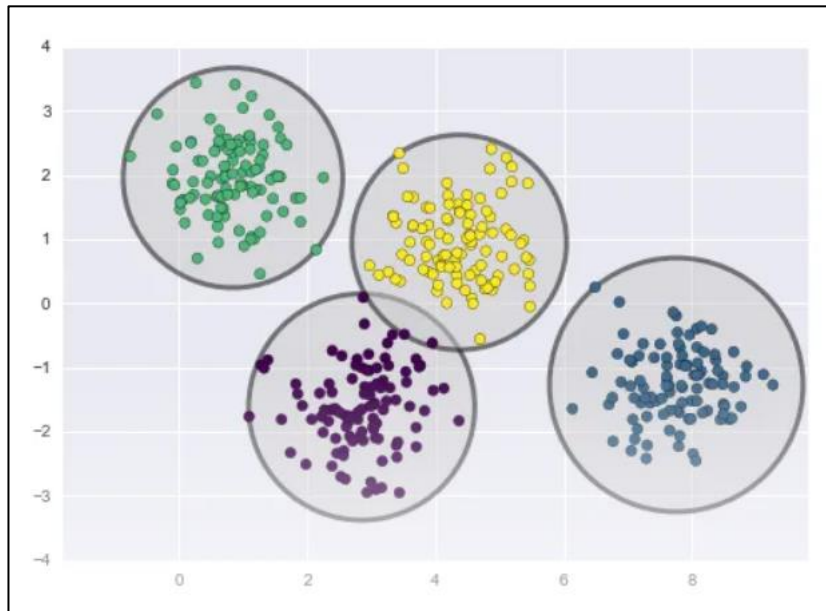
Η ιεραρχική ομαδοποίηση είναι μια μέθοδος για την ομαδοποίηση των σχετικών σημείων δεδομένων σε μια ιεραρχική δομή συστάδων. Αρχικά, κάθε σημείο δεδομένων θεωρείται ως το δικό του σύμπλεγμα. Αυτά τα μεμονωμένα συμπλέγματα στη συνέχεια συγχωνεύονται σταδιακά με τα πιο παρόμοια συμπλέγματα έως ότου όλα τα σημεία δεδομένων συνδυάζονται σε ένα ενιαίο, ολοκληρωμένο σύμπλεγμα. Ένα από τα πλεονεκτήματα της ιεραρχικής ομαδοποίησης είναι η δυνατότητα εξερεύνησης διαφορετικών επιπέδων ευαισθησίας. Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις για την ιεραρχική ομαδοποίηση: πάνω προς τα κάτω (divisive clustering: μεγάλο σύμπλεγμα \sim διαίρεση σε μικρότερα συμπλέγματα) και κάτω προς τα πάνω (agglomerative clustering \sim μεμονωμένα συμπλέγματα \sim συγχώνευση) [66]



Εικόνα 32: Ιεραρχική Ομαδοποίηση, Source: <https://spotintelligence.com/2023/09/12/hierarchical-clustering-comprehensive-practical-how-to-guide-in-python/>

3.3.2.4 Διανομή

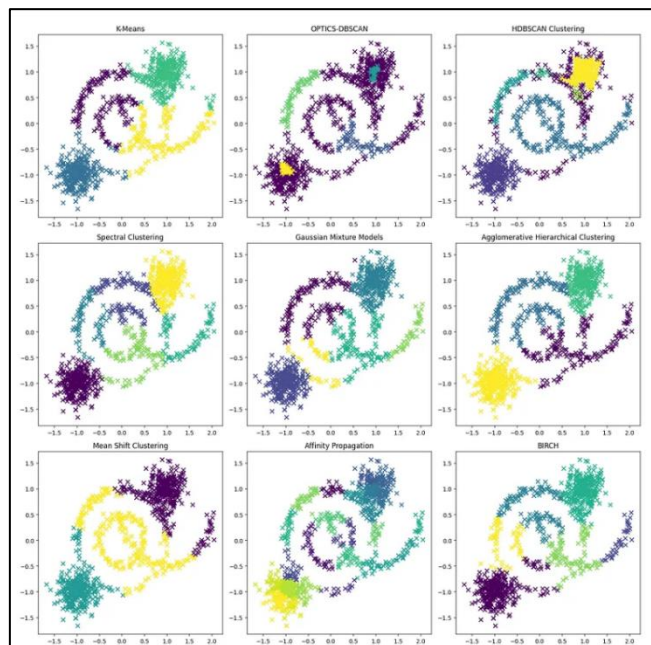
Στην ομαδοποίηση που βασίζεται στη διανομή, τα σημεία δεδομένων ομαδοποιούνται με βάση την πιθανότητα να ανήκουν στην ίδια κατανομή πιθανότητας. Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε στατιστικές κατανομές για να σχηματίσει συστάδες, συμπεριλαμβανομένων στοιχείων δεδομένων που έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να αποτελούν μέρος ενός συγκεκριμένου συμπλέγματος. Όσο πιο μακριά είναι ένα σημείο δεδομένων από το κεντρικό σημείο του συμπλέγματος, τόσο λιγότερο πιθανό είναι να συμπεριληφθεί σε αυτό το σύμπλεγμα. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των προσεγγίσεων ομαδοποίησης με βάση την πυκνότητα και τα όρια είναι η ανάγκη να καθοριστεί εκ των προτέρων ο αριθμός των συστάδων για ορισμένους αλγόριθμους ή/και να οριστεί το σχήμα συμπλέγματος για τους περισσότερους αλγόριθμους. [67]



Εικόνα 33: Ομαδοποίηση με βάση την διανομή, Source: <https://towardsdatascience.com/gaussian-mixture-models-d13a5e915c8e>

3.4.3 Σύγκριση Μεθόδων

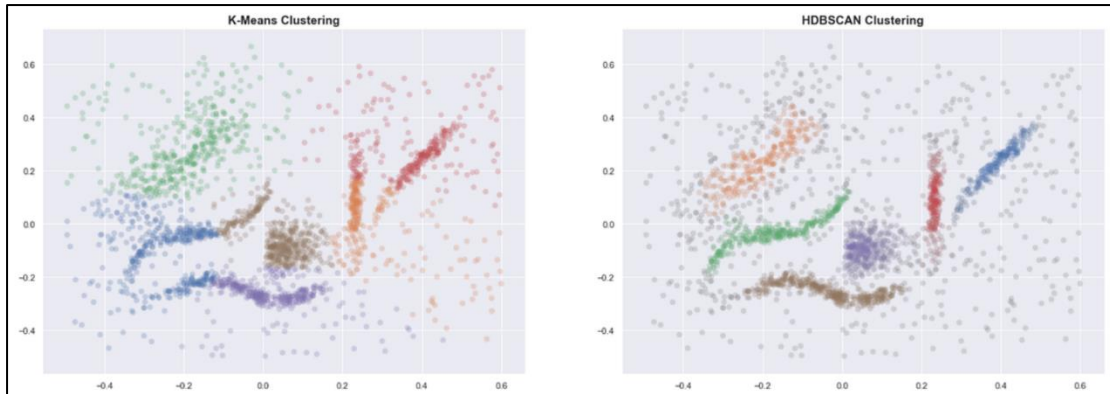
Οι μέθοδοι ομαδοποίησης προσφέρουν ποικίλες προσεγγίσεις για την αποκάλυψη προτύπων μέσα σε σύνολα δεδομένων, το καθένα συνοδευόμενο από το δικό του σύνολο πλεονεκτημάτων και περιορισμών.



Εικόνα 34: Comparing The-State-of-The-Art Clustering Algorithms, Source: <https://medium.com/@sina.nazeri/comparing-the-state-of-the-art-clustering-algorithms-1e65a08157a1>

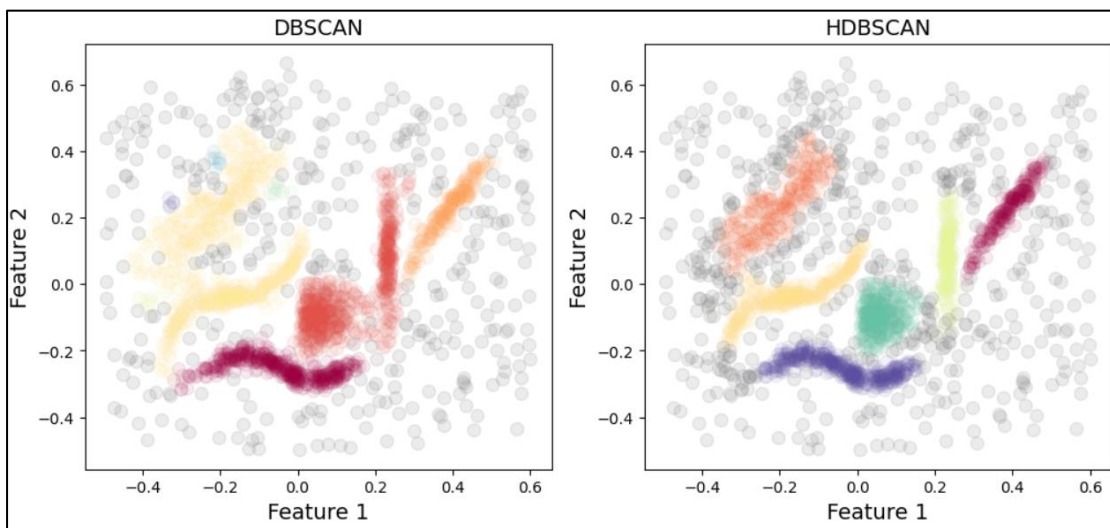
Από την μια, οι μέθοδοι κατάτμησης (partitioning methods), που παραδειγματίζονται από αλγόριθμους όπως ο K-means χρησιμοποιούνται ευρέως για την απλότητα και την υπολογιστική τους αποτελεσματικότητα, μιας και απαιτούν έναν προκαθορισμένο αριθμό συμπλεγμάτων, παρέχοντας έτσι μια απλή λύση για την τμηματοποίηση δεδομένων. Ωστόσο, η εξάρτησή τους από την αρχική τοποθέτηση του κέντρου και η εγγενής τους υπόθεση για σφαιρικές συστάδες μπορεί να περιορίσει την αποτελεσματικότητά τους, ιδιαίτερα όταν έρχονται αντιμέτωποι με σύνολα δεδομένων που περιέχουν ακανόνιστου σχήματος ή επικαλυπτόμενες συστάδες. [68]

Από την άλλη, οι τεχνικές ομαδοποίησης που βασίζονται στην πυκνότητα, όπως το DBSCAN λειτουργούν με τον εντοπισμό περιοχών υψηλής πυκνότητας δεδομένων. Αναλυτικότερα, η ικανότητά τους να προσδιορίζουν αυτόματα τον αριθμό των συστάδων και η ανθεκτικότητά τους έναντι του θορύβου τα καθιστούν κατάλληλα για σύνολα δεδομένων με ποικίλες κατανομές πυκνότητας και πολύπλοκα σχήματα συμπλέγματος. Όμως, η απόδοση αυτών των μεθόδων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ρυθμίσεις παραμέτρων και μπορεί να αντιμετωπίσουν προκλήσεις επεκτασιμότητας (scalability challenges) με μεγάλα σύνολα δεδομένων.



Εικόνα 35: Σύγκριση k - means και HDBSCAN, Source: <https://pberba.github.io/stats/2020/07/08/intro-hdbscan/>

Ακόμα, η ιεραρχική ομαδοποίηση, είτε μέσω διαιρετικής (divisive) είτε αθροιστικής (agglomerative) προσέγγισης, προσφέρει μια ιεραρχική διάταξη συστάδων, παρέχοντας πληροφορίες για τις σχέσεις συστάδων σε πολλαπλά επίπεδα ευαισθησίας. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η μέθοδος δεν απαιτεί τον καθορισμό του αριθμού των συστάδων εκ των προτέρων, επιτρέποντας την ευέλικτη εξερεύνηση των δομών ομαδοποίησης. Δυστυχώς, η υπολογιστική του πολυπλοκότητα και η ευαισθησία στο θόρυβο μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα, ιδιαίτερα με μεγάλα σύνολα δεδομένων. [69]



Εικόνα 36: Σύγκριση DBSCAN και HDBSCAN, Source: <https://towardsdatascience.com/density-based-clustering-dbscan-vs-hdbscan-39e02af990c7>

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, οι μέθοδοι ομαδοποίησης που βασίζονται σε διανομή, όπως τα μοντέλα Gaussian Mixture Models (GMM), προσφέρει ευελιξία στην αναπαράσταση συστάδων διαφόρων σχημάτων και μεγεθών και χειρίζεται αποτελεσματικά την αβεβαιότητα στα δεδομένα. Παρόλα αυτά, οι μέθοδοι που βασίζονται στη διανομή είναι επιρρεπείς σε

υπερπροσαρμογή, ιδιαίτερα όταν η υποτιθέμενη κατανομή δεν αποτυπώνει με ακρίβεια την υποκείμενη κατανομή δεδομένων. [70]

Για τους λόγους που περιγράφονται παραπάνω, εξαλείφθηκαν οι μέθοδοι κατάτμησης και ομαδοποίησης που βασίζονται στη διανομή. Οι πρώτες, αν και απλές και αποτελεσματικές, μπορεί να μην είναι κατάλληλες για σύνολα δεδομένων με ακανόνιστο σχήμα συστάδες ή ποικίλες πυκνότητες. Επιπλέον, η απαίτησή τους για προκαθορισμένο αριθμό συστάδων μπορεί να μην ευθυγραμμίζεται με σενάρια όπου ο βέλτιστος αριθμός συμπλεγμάτων είναι άγνωστος ή μεταβλητός. Ομοίως, οι μέθοδοι ομαδοποίησης που βασίζονται στη διανομή προσφέρουν ευελιξία και στατιστική αυστηρότητα, αλλά ενδέχεται να αντιμετωπίσουν προκλήσεις όπως προβλήματα υπερπροσαρμογής και εκτίμησης παραμέτρων, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η υποκείμενη κατανομή δεδομένων είναι πολύπλοκη ή ελάχιστα κατανοητή. Συμπεραίνεται ότι η ομαδοποίηση με βάση την πυκνότητα (density) ή η ιεραρχική ομαδοποίηση (hierarchical) μπορούν να φιλοξενήσουν καλύτερα σύνολα δεδομένων με ακανόνιστα σχήματα, ποικίλες πυκνότητες και αβέβαιο πλήθος συστάδων, παρέχοντας πιο ισχυρά και ερμηνεύσιμα αποτελέσματα ομαδοποίησης.

Το DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) και το HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) είναι δύο αλγόριθμοι ομαδοποίησης με βάση την πυκνότητα, ο καθένας με ξεχωριστά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα. Η επιλογή μεταξύ DBSCAN και HDBSCAN εξαρτάται από το σύνολο δεδομένων και τους στόχους ανάλυσης. Συνοπτικά, το DBSCAN προτιμάται για απλούστερα σύνολα δεδομένων με ομοιόμορφη πυκνότητα και άγνωστο αριθμό συστάδων, ενώ το HDBSCAN είναι πιο κατάλληλο για σύνθετα σύνολα δεδομένων με ποικίλες πυκνότητες και μεγέθη συστάδων, καθώς και όταν είναι επιθυμητός η ιεραρχική ομαδοποίηση και ο έλεγχος ευρωστίας.

Συμπερασματικά, δεδομένων των χαρακτηριστικών του συνόλου δεδομένων, τα οποία συνεπάγονται ποικίλες πυκνότητες και μεγέθη συστάδων, η ιεραρχική προσέγγιση του HDBSCAN προσφέρει ένα σαφές πλεονέκτημα στην αποτύπωση των διαφοροποιημένων σχέσεων μεταξύ των συστάδων. Παρά το γεγονός ότι δυνητικά απαιτεί λίγο περισσότερους υπολογιστικούς πόρους σε σύγκριση με το DBSCAN, η ικανότητα του HDBSCAN να χειρίζεται πολύπλοκα σύνολα δεδομένων και να παρέχει ισχυρές λύσεις ομαδοποίησης το καθιστά την προτιμώμενη επιλογή για αυτήν την ανάλυση.

3.5 Hierarchical Density – Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN)

Το HDBSCAN (Hierarchical Density – Based Spatial Clustering of Applications with Noise) είναι ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης που προορίζεται για να χειρίζεται υψηλών διαστάσεων και χωρικών δεδομένων πιο αποτελεσματικά από τις συμβατικές τεχνικές ομαδοποίησης. Η ικανότητα αναγνώρισης συστάδων διαφορετικών πυκνοτήτων και η αυτόματη αναγνώριση του βέλτιστου αριθμού συστάδων χωρίς να απαιτούνται σαφείς παράμετροι όπως ο αριθμός των συστάδων (όπως απαιτείται από αλγόριθμους όπως το K – means) είναι τα κύρια πλεονεκτήματα του HDBSCAN έναντι της παραδοσιακής ομαδοποίησης αλγόριθμους. [71]

Σαν «Σημεία πυρήνα» (Core Points) είναι τα data points που σε μια συγκεκριμένη απόσταση έχουν υψηλή πυκνότητα κοντινών σημείων. Παράλληλα, η μέγιστη απόσταση μεταξύ δυο σημείων ορίζεται ως η απόσταση που υπολογίζει την πυκνότητα των γύρω περιοχών (Mutual Reachability Distance). Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι το HDBSCAN δημιουργεί μια ιεραρχία συστάδων με τη σταδιακή διευκόλυνση των κριτηρίων πυκνότητας, επιτρέποντας την αναγνώριση των συστάδων διαφορετικών πυκνοτήτων, σε αντίθεση με το DBSCAN, το οποίο ανιχνεύει συστάδες με βάση ένα καθορισμένο όριο πυκνότητας. Έτσι, ο αλγόριθμος επιλέγει τα πιο σταθερά συμπλέγματα, δηλαδή αυτά που αντέχουν σε ένα εύρος ορίων πυκνότητας,

Τα σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα σύμπλεγμα ταξινομούνται ως θόρυβος από το HDBSCAN και συνήθως αυτά τα σημεία βρίσκονται σε αραιές περιοχές του χώρου δεδομένων, οι οποίες στερούνται οποιουδήποτε ευδιάκριτου σχεδίου ομαδοποίησης. Με την ανεξάρτητη επισήμανση των σημείων θορύβου, ο αλγόριθμος είναι σε θέση να επικεντρωθεί στις πραγματικές υποκείμενες δομές συστάδων.

3.5.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Συγκρίνοντας το HDBSCAN με τις συμβατικές μεθόδους ομαδοποίησης, υπάρχουν ορισμένα αξιοσημείωτα οφέλη. Πιο συγκεκριμένα, πέρα από την ικανότητά του να αναγνωρίζει συστάδες με διαφορετικές πυκνότητες, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δημιουργεί ένα ιεραρχικό δέντρο συστάδων σύμφωνα με διαφορετικά κατώφλια πυκνότητας, το οποίο του επιτρέπει να προσαρμόζεται στις εγγενείς διακυμάνσεις της πυκνότητας στα δεδομένα, κάτι που οι συμβατικοί αλγόριθμοι όπως ο K-means και ο DBSCAN, οι οποίοι συχνά «σπάνε» ένα μεμονωμένο σύμπλεγμα σε πολλά κομμάτια. Ακόμα, η ικανότητα του HDBSCAN να χειρίζεται τον θόρυβο και τα ακραία σημεία είναι ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα. Αναλυτικότερα, εξαιτίας των πολλών εξωτερικών επιρροών που επηρεάζουν τις μετρήσεις, ο θόρυβος και οι ακραίες τιμές εμφανίζονται συχνά σε περιβαλλοντικά σύνολα δεδομένων, όπως αυτά που παρακολουθούν την ποιότητα του νερού στα ποτάμια και γι' αυτό τα σημεία θορύβου αναγνωρίζονται με επιτυχία και διαχωρίζονται από τα συμπλέγματα με το HDBSCAN. Το

HDBSCAN διασφαλίζει ότι αυτές οι ανωμαλίες δεν παραμορφώνουν τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης ταξινομώντας το θόρυβο ως σημεία που δεν ανήκουν σε κανένα σύμπλεγμα σε οποιοδήποτε επίπεδο πυκνότητας. Από αυτό προκύπτει καθαρότερος και πιο αξιόπιστος προσδιορισμός συμπλέγματος, ο οποίος είναι απαραίτητος για ακριβή περιβαλλοντική ανάλυση και λήψη αποφάσεων. [72]

Ωστόσο, όπως και με το t – SNE, το HDBSCAN μπορεί να χρειαστεί πολλή ισχύς υπολογιστή για την ιεραρχική ομαδοποίηση, ειδικά για τεράστια σύνολα δεδομένων. Σε σύγκριση με λιγότερο σύνθετους αλγόριθμους όπως το K-means, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση πόρων και χρόνους επεξεργασίας και ως αποτέλεσμα, ενώ τα εξελιγμένα χαρακτηριστικά του HDBSCAN παρέχουν καλύτερα αποτελέσματα ομαδοποίησης, έχουν επίσης ως αποτέλεσμα υψηλότερες υπολογιστικές απαιτήσεις. Επίσης, Η ευαισθησία του HDBSCAN στην επιλογή υπερπαραμέτρων, όπως το ελάχιστο μέγεθος δείγματος και μέγεθος συμπλέγματος για ένα κεντρικό σημείο, είναι ένα άλλο μειονέκτημα, μιας και αυτές οι παράμετροι έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της διαδικασίας ομαδοποίησης, επομένως η επιλογή των σωστών τιμών μπορεί να απαιτεί εμπειρική ρύθμιση ή εξειδίκευση στον τομέα. Οι ανεπαρκείς διαμορφώσεις παραμέτρων ενδέχεται να παράγουν λιγότερο ιδανικά αποτελέσματα ομαδοποίησης, είτε αποτυγχάνοντας να προσδιορίσουν σημαντικές συστάδες, είτε προσδιορίζοντας εσφαλμένα σημεία θορύβου ως συστατικά συστάδων. [73]

3.6 Συνδυασμός του t – SNE με το HDBSCAN για την ανάλυση Δορυφορικών Χρονοσειρών

Συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα και των δύο μεθόδων για τον αποτελεσματικό χειρισμό δεδομένων υψηλών διαστάσεων και τον εντοπισμό σημαντικών μοτίβων, το t-SNE και το HDBSCAN μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση δεδομένων δορυφορικών εικόνων χρονοσειρών. Αναλυτικότερα, όπως περιγράφηκε, τα σύνθετα σύνολα δεδομένων μπορούν να γίνουν πιο διαχειρίσιμα, μειώνοντας τη διάστασή τους με τη χρήση του t – SNE, διατηρώντας όμως την τοπική δομή των δεδομένων. Παράλληλα, το HDBSCAN είναι εξειδικευμένο, τόσο στον αυτόματο προσδιορισμό του ιδανικού αριθμού συστάδων, στον αξιόπιστο έλεγχο του θορύβου, αλλά και στη ομαδοποίηση σημείων δεδομένων σε σημαντικές ομάδες με βάση τις διακυμάνσεις της πυκνότητας.

Αναμένεται ότι ο συνδυασμός του t – SNE και του HDBSCAN θα βελτιώσει την ακρίβεια και την ορατότητα της χρονικής ομαδοποίησης προτύπων στα δεδομένα των δορυφορικών εικόνων. Όπως αναφέρθηκε, το t – SNE διευκολύνει την οπτικοποίηση περίπλοκων και υψηλών

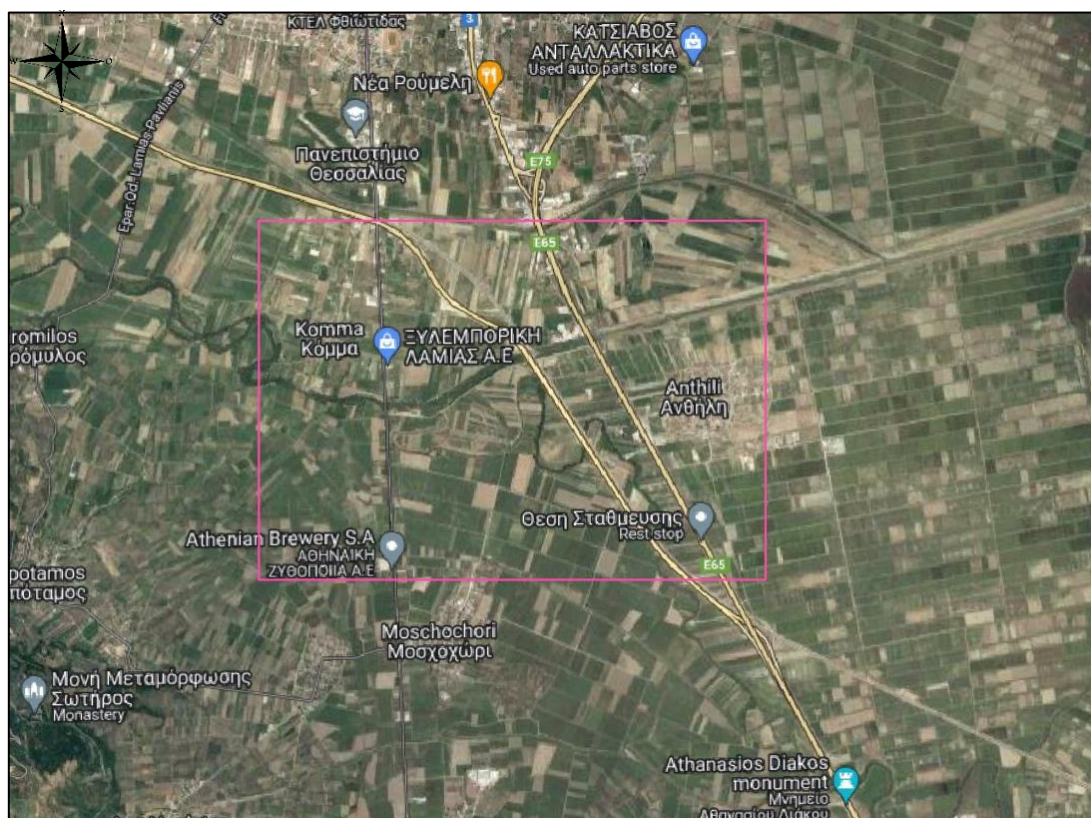
διαστάσεων δεδομένων σε ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο περιβάλλον που είναι κατανοητό. Η αναγνώριση μοτίβων και ανωμαλιών γίνεται πιο εύκολη, καθώς γίνεται κατανόηση των χωρικών και των χρονικών δεσμών μέσα στο σύνολο δεδομένων. Όλα αυτά σε συνδυασμό με την ικανότητα του HDBSCAN να διαχειρίζεται αποτελεσματικά το θόρυβο και να προσδιορίζει αυτόματα τον ιδανικό αριθμό συστάδων, αυξάνει την ακρίβεια της διαδικασίας ομαδοποίησης, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την Παρακολούθηση του Περιβάλλοντος και ειδικότερα στην ποιότητα του νερού. Τέλος, ο συνδυασμός αυτών των μεθόδων βελτιώνει την ικανότητα εντοπισμού αλλαγών και προτύπων με την πάροδο του χρόνου στη δορυφορική εικόνα, όπως τον εντοπισμό ρύπανσης ή τον προσδιορισμό εποχικών διακυμάνσεων.

Κεφάλαιο 4: Μεθοδολογία

4.1 Περιοχή Μελέτης, Συλλογή Δεδομένων και Υετός

4.1.1 Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης (ΕΙΠΜ): Σπερχειός Ποταμός

Ο Σπερχειός Ποταμός διαρρέει την περιφερειακή ενότητα Φθιώτιδας στην κεντρική Ελλάδα, ενώ γεωγραφικά ξεκινά από την οροσειρά Οέτα και διανύει περίπου 80 χιλιόμετρα για να φτάσει στον Μαλιακό κόλπο. Λόγω των πολλών οικοσυστημάτων του, ο Σπερχειός Ποταμός είναι σημαντικός οικολογικά, ενώ τροφοδοτεί την άρδευση του τόπου, η οποία είναι απαραίτητη για τη γεωργία της περιοχής, και επίσης επηρεάζει τη δυναμική των πλημμυρών και την αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων επηρεάζοντας την υδρολογία της περιοχής. [1]



Εικόνα 37: Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης σε Κλίμακα 1:50000, Source: Google Maps

4.1.2 Συλλογή δεδομένων: Sentinel-2 και SkySat Εικόνες

Βλ Κεφάλαιο 1.1.2: Παρακολούθηση Περιβάλλοντος μέσω Δορυφορικών Εικόνων – Satellite Imagery in Environmental Monitoring

4.1.2.1 Δεδομένα SkySat



Εικόνα 38: 23 Δεκεμβρίου 2020



Εικόνα 39: 24 Δεκεμβρίου 2020



Εικόνα 40: 28 Δεκεμβρίου 2020



Εικόνα 41: 5 Ιανουαρίου 2021



Εικόνα 42: 18 Φεβρουαρίου 2021



Εικόνα 43: 23 Φεβρουαρίου 2021



Εικόνα 44: 4 Μαρτίου 2021



Εικόνα 45: 13 Μαρτίου 2021



Εικόνα 16: 17 Μαρτίου 2021

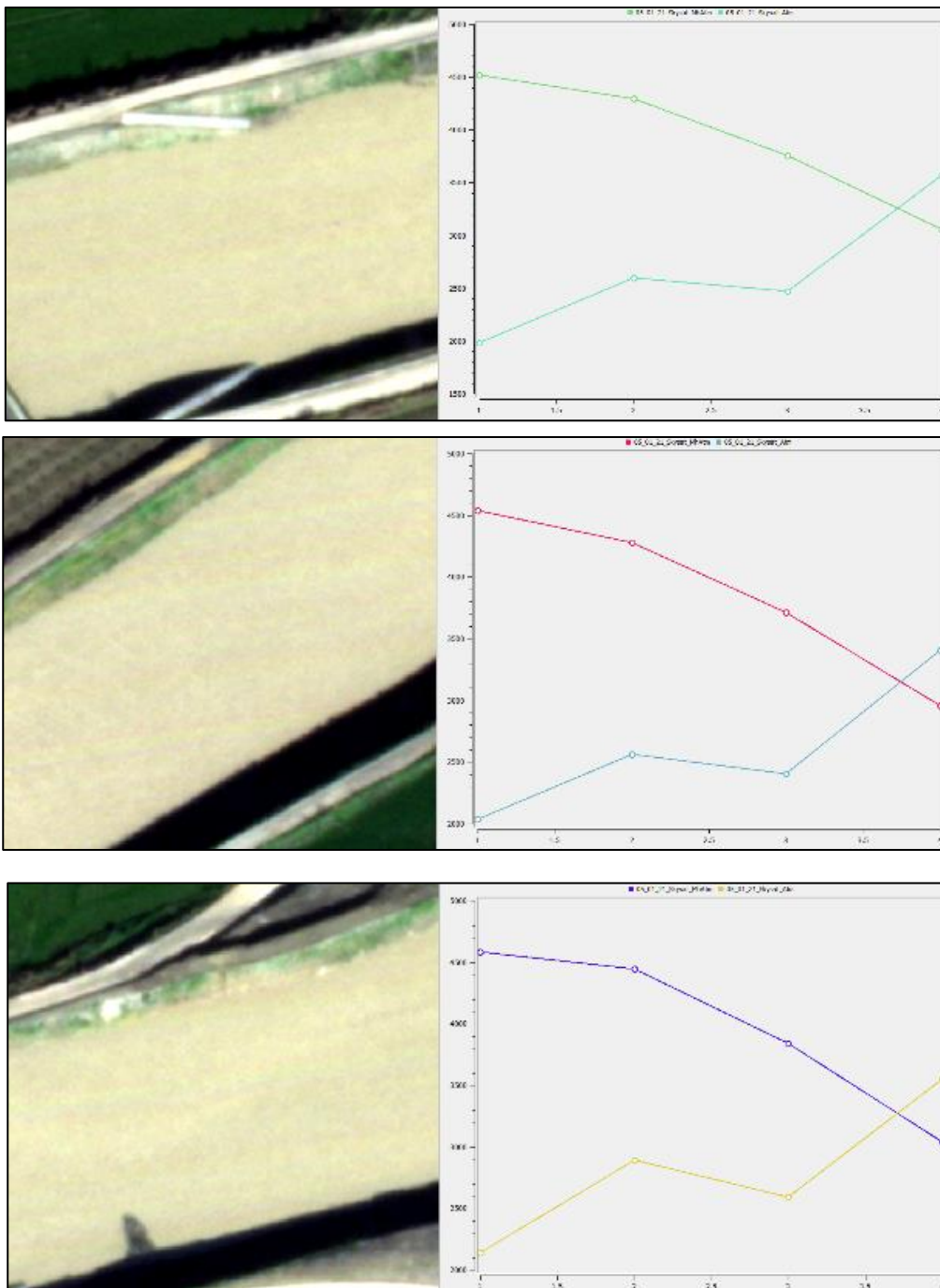


Εικόνα 48: 24 Μαρτίου 2021



Εικόνα 49: 30 Μαρτίου 2021

Όπως παρατηρείται φωτοερμηνευτικά, η δορυφορική εικόνα στις 04 Μαρτίου 2021 δεν είναι αρκετά «καθαρή» και παρουσιάζει μια ανωμαλία η οποία επηρεάζει την (Ευρύτερη) Περιοχή Μελέτης, επομένως η συγκεκριμένη εικόνα θα εξαιρεθεί και αυτή από την έρευνα. Ακόμα, μετά από μελέτη της εικόνας με ημερομηνία 05 Ιανουαρίου 2021, παρατηρήθηκε ότι οι πολλά εικονοστοιχεία σε όλο το εύρος της εικόνας έχουν αρνητικές τιμές, ενώ οι φασματικές υπογραφές στην φωτοερμηνευμένη περιοχή του νερού, δεν ακολουθεί τα πρότυπα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται σε όλο το εύρος του ποταμού μια εκτόξευση των τιμών στο τέταρτο κανάλι (NIR = 820 nm) που δεν δικαιολογείται.



Εικόνες 50 - 52: Παραδείγματα "ανωμαλιών" στην φασματική υπογραφή του νερού στην Εικόνα: 05 Ιανουαρίου 2021

Επομένως, οι εναπομείναντες εικόνες SkySat είναι οι εξής:

Πίνακας 1: Χρονοσειρά των SkySat Εικόνων

Ημερομηνία	Ωρα Λήψης
23 Δεκεμβρίου 2020	08:56:47
24 Δεκεμβρίου 2020	09:04:16
28 Δεκεμβρίου 2020	09:09:12
18 Φεβρουαρίου 2021	11:52:38
23 Φεβρουαρίου 2021	08:55:07
13 Μαρτίου 2021	06:19:01
17 Μαρτίου 2021	09:35:14
24 Μαρτίου 2021	09:03:16
30 Μαρτίου 2021	12:16:03

4.1.2.2 Δεδομένα Sentinel – 2



Εικόνα 53: 24 Δεκεμβρίου 2020



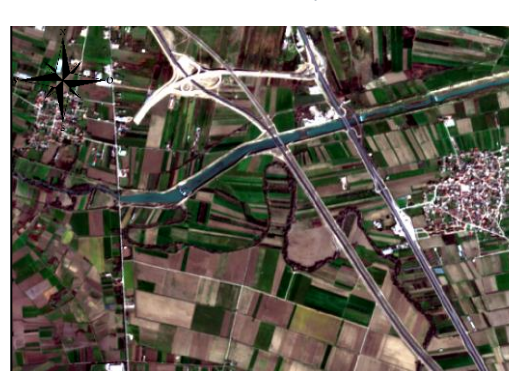
Εικόνα 54: 28 Ιανουαρίου 2021



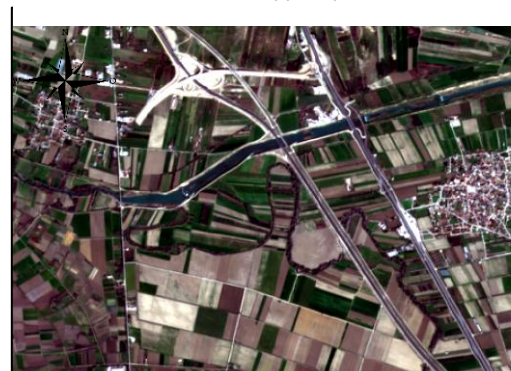
Εικόνα 55: 12 Φεβρουαρίου 2021



Εικόνα 56: 17 Φεβρουαρίου 2021



Εικόνα 57: 22 Φεβρουαρίου 2021



Εικόνα 2: 27 Φεβρουαρίου 2021



Εικόνα 59: 4 Μαρτίου 2021



Εικόνα 60: 24 Μαρτίου 2021



Εικόνα 61: 29 Μαρτίου 2021

Είναι φανερό ότι υπάρχουν δυο ημερομηνίες (24 Δεκεμβρίου 2020 και 24 Μαρτίου 2021) οι οποίες είναι κοινές, τόσο στον δορυφόρο SkySat, όσο και στον δορυφόρο Sentinel – 2. Οι δύο εικόνες Skysat έχουν «τραβηχτεί» δεκαεννιά και δεκαεπτά λεπτά, αντίστοιχα, πριν τις δυο εικόνες Sentinel – 2.

Από την μια, η εικόνα στις 24 Μαρτίου 2021 του δορυφόρου Sentinel – 2, αν και είναι σχετικά καθαρή, καλύπτεται από μικρά σύννεφα στο νοτιοδυτικό κομμάτι του Σπερχειού Ποταμού, επομένως για αποφυγή μελλοντικών λαθών, θα **αποκλειστεί** από την έρευνα.

Επομένως, οι διαθέσιμες ατμοσφαιρικά διορθωμένες δορυφορικές εικόνες από το Copernicus για το χρονικό διάστημα που μελετιέται είναι οι εξής:

Πίνακας 2: Χρονοσειρά των Sentinel – 2 Εικόνων

<u>Ημερομηνία</u>	<u>Όνομα Εικόνας</u>	<u>Ωρα Λήψης</u>
24 Δεκεμβρίου 2020	S2B_MSIL2A_20201224T092319_N0214_R093_T34SFJ_20201224T114945	09:23:19
28 Ιανουαρίου 2021	S2A_MSIL2A_20210128T092241_N0214_R093_T34SFJ_20210128T125002	09:22:41
12 Φεβρουαρίου 2021	S2B_MSIL2A_20210212T092029_N0214_R093_T34SFJ_20210212T112719	09:20:29
17 Φεβρουαρίου 2021	S2A_MSIL2A_20210217T092041_N0214_R093_T34SFJ_20210217T120354	09:20:41
22 Φεβρουαρίου 2021	S2B_MSIL2A_20210222T092029_N0214_R093_T34SFJ_20210222T120056	09:20:29
27 Φεβρουαρίου 2021	S2A_MSIL2A_20210227T092031_N0214_R093_T34SFJ_20210227T123819	09:20:31
04 Μαρτίου 2021	S2B_MSIL2A_20210304T092029_N0214_R093_T34SFJ_20210304T114320	09:20:29
29 Μαρτίου 2021	S2A_MSIL2A_20210329T092031_N0214_R093_T34SFJ_20210329T124804	09:20:31

4.1.2.3 Αρχική Χρονοσειρά

Συνολικά έχουν προκύψει δεκαεπτά (17) καθαρές δορυφορικές απεικονίσεις που καλύπτουν διαφορετικούς χρόνους κατά τη διάρκεια της τρίμηνης περιόδου, προκειμένου να αποτυπωθούν οι χρονικές διακυμάνσεις τους. Οι απεικονίσεις του Sentinel – 2 κανονικά προκύπτουν περίπου κάθε πέντε ημέρες για να εξασφαλιστεί η συνεχής επιτήρηση, ωστόσο εξαιτίας της ακαταλληλότητας του καιρού ή/και της φύσης της εικόνας, παρέμειναν οι εικόνες που φαίνονται στον Πίνακα 2.

Συγκεντρωτικά και σύμφωνα με ό,τι έχει προαναφερθεί, τα αρχικά δορυφορικά δεδομένα της Ευρύτερης Περιοχής Μελέτης (τα οποία έχουν διορθωθεί ατμοσφαιρικά) διαμορφώνουν μια χρονοσειρά η οποία αποτελείται από δεκαεπτά (17) εικόνες SkySat και Sentinel – 2, οι οποίες παρουσιάζονται με χρονολογική σειρά στον παρακάτω Πίνακα:

Πίνακας 3: Αρχική Χρονοσειρά

Ημερομηνία	Αισθητήρας	Ώρα Λήψης	Διάστημα
23 Δεκεμβρίου 2020	Skysat	08:56:47	
24 Δεκεμβρίου 2020	SkySat	09:04:16	1 ημέρα
24 Δεκεμβρίου 2020	Sentinel 2	09:23:19	1 ημέρα
28 Δεκεμβρίου 2020	SkySat	09:09:12	4 ημέρες
28 Ιανουαρίου 2021	Sentinel 2	09:22:41	23 ημέρες
12 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2	09:20:29	15 ημέρες
17 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2	09:20:41	5 ημέρες
18 Φεβρουαρίου 2021	SkySat	11:52:38	1 ημέρα
22 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2	09:20:29	4 ημέρες
23 Φεβρουαρίου 2021	SkySat	08:55:07	1 ημέρα
27 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2	09:20:31	4 ημέρες
04 Μαρτίου 2021	Sentinel 2	09:20:29	6 ημέρες
13 Μαρτίου 2021	SkySat	06:19:01	9 ημέρες
17 Μαρτίου 2021	SkySat	09:35:14	13 ημέρες
24 Μαρτίου 2021	SkySat	09:03:16	7 ημέρες
29 Μαρτίου 2021	Sentinel 2	09:20:31	5 ημέρες
30 Μαρτίου 2021	SkySat	12:16:03	1 ημέρα

Παρατηρείται φυσικά, ότι στις 24 Δεκεμβρίου του 2020, έχουμε εικόνες και από τους δυο δορυφόρους, κάτι που θα αναλυθεί και θα σχολιαστεί στη συνέχεια.

4.1.3 Υετός

Πριν ξεκινήσει η οποιαδήποτε επεξεργασία της χρονοσειράς, είναι σημαντικό να ερευνηθούν τα καιρικά φαινόμενα που λάμβαναν χώρα εκείνη την περίοδο. Η πιθανή παρουσία βροχής και υγρασίας, τείνουν να επηρεάζουν σημαντικά τις τιμές ανακλαστικότητας που λαμβάνονται από τον αισθητήρα.

Πίνακας 4: Καιρικές Συνθήκες που επικρατούν στην Αρχική Χρονοσειρά

Datetime	Temp	Humidity	Precip (mm)	Preciptype	Description
2020-12-23	9.1	86.1	0		Partly cloudy throughout the day.
2020-12-24	9.4	80.7	0		Clear conditions throughout the day.
2020-12-28	10.5	73.1	1.8	rain	Partly cloudy throughout the day with a chance of rain throughout the day.
2021-01-28	2.7	55.7	0.3	rain, snow	Partly cloudy throughout the day with early morning snow or rain.
2021-02-12	9.8	62	0		Partly cloudy throughout the day.
2021-02-17	2	56.1	0		Partly cloudy throughout the day.
2021-02-18	6.1	58.9	0		Partly cloudy throughout the day.
2021-02-22	6.8	83.7	0		Partly cloudy throughout the day.
2021-02-23	6.1	82.9	0		Clear conditions throughout the day.
2021-02-27	10.6	74.9	0		Clear conditions throughout the day.
2021-03-13	9.8	63.1	0		Becoming cloudy in the afternoon with morning rain.
2021-03-17	10.7	40.7	0.1	rain	Partly cloudy throughout the day with morning rain.
2021-03-24	7.7	56.8	0		Becoming cloudy in the afternoon.
2021-03-29	12.9	64.6	0.1	rain	Partly cloudy throughout the day with late afternoon rain.
2021-03-30	11.8	75.1	0		Partly cloudy throughout the day.

Source: <https://www.visualcrossing.com/>

Για τις τέσσερις ημερομηνίες που φαίνεται να υπήρξε βροχή:

- 28 Δεκεμβρίου 2020: έπεσαν 1.2 mm βροχής από τα μεσάνυχτα μέχρι τις 6 το πρωί όπου και σταμάτησε.
- 28 Ιανουαρίου 2021: έπεσαν 0.3 mm βροχής 6 ώρες αφού τραβήχτηκε η απεικόνιση
- 17 Μαρτίου 2021: έπεσε 0.1 mm βροχής 1 ώρα αφού τραβήχτηκε η απεικόνιση
- 29 Μαρτίου 2021: έπεσε 0.1 mm βροχής 10 ώρες αφού τραβήχτηκε η απεικόνιση

Αξίζει να αναφερθεί ότι μια ημέρα πριν από την εικόνα στις 28 Δεκεμβρίου 2020 (δηλαδή 27 Δεκεμβρίου 2020), έπεσαν συνολικά 8 mm βροχής. Στις 11 και 16 Φεβρουαρίου 2021, έπεσαν 5.8 mm και 18 mm βροχής, αντίστοιχα. Τέλος, την περίοδο 21 – 23 Φεβρουαρίου 2021 έπεσαν συνολικά 31.6 mm βροχής.

4.2 Προ – Επεξεργασία των Δορυφορικών Εικόνων

4.2.1 Βασικές Έννοιες

Η διόρθωση των ψηφιακών εικόνων με σκοπό την δημιουργία μιας πιο ρεαλιστικής αναπαράστασης του αρχικού πεδίου, είναι το πρωταρχικό και συνάμα βασικό στάδιο για την ομαλή διαδικασία της ανάλυσης των δορυφορικών δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι επεξεργασίες έχουν ως σκοπό να διορθώσουν τυχόν γεωμετρικές παραμορφώσεις, να ρυθμίσουν ραδιομετρικά τα δεδομένα, αλλά και να εξαλείψουν πιθανούς θορύβους που μπορεί να εμφανίζονται στην ψηφιακή εικόνα. Κατά κύριο λόγο, λοιπόν, η διόρθωση μιας εικόνας, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του δέκτη που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη αυτών των δεδομένων. [75]

Παράλληλα, η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης μεθόδου «Προ επεξεργασίας» είναι πολύ αναγκαία για την μετέπειτα επεξεργασία και μελέτη των ψηφιακών εικόνων. Η προ επεξεργασία λαμβάνει χώρα πριν οποιαδήποτε τεχνική επεξεργασία και ανάλυση και περιλαμβάνει Γεωμετρικές Διορθώσεις και Ραδιομετρικές Επεξεργασίες. Η πρόθεση αυτών των δυο ενεργειών είναι να εξαλειφθούν τυχόν γεωμετρικές και ραδιομετρικές παραμορφώσεις στις εικόνες, οι οποίες προέκυψαν από την διαδικασία λήψης των εικόνων. Αναλυτικότερα, το είδος του σαρωτή, η πλατφόρμα λήψης και το οπτικό πεδίο, είναι μερικές από τις παραμέτρους που επηρεάζει το είδος και το ύφος των πιθανών παραμορφώσεων σε μια ψηφιακή εικόνα. [76]

4.2.2 Ατμοσφαιρική Διόρθωση

Η **Ατμοσφαιρική Διόρθωση** βασίζεται στα αποτελέσματα της διόρθωσης του αισθητήρα, μιας και εξάγει την ακτινοβολία ή την ανάκλαση της επιφάνειας από της διορθωμένες DN. Αυτά τα «σφάλματα» προέρχονται από την επίδραση των συστατικών της ατμόσφαιρας. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανακλάται από την γήινη επιφάνεια, επιστρέφει στο διάστημα, διέρχεται από την ατμόσφαιρα και τα συστατικά της (πχ: αερολύματα) αλλοιώνουν την ποσότητα της εισερχόμενης στον αισθητήρα, ακτινοβολίας.

Η αφαίρεση της επίδρασης της ατμόσφαιρας είναι απαραίτητη, διότι η ποσοτική ανάλυση της επιφανειακής ακτινοβολίας είναι αυτή που έχει σημασία, μιας και η ακτινοβολία διέρχεται από την ατμόσφαιρα πριν συλλεχθεί από το όργανο. Για να είναι δυνατή αυτή η αφαίρεση, πρέπει να είναι γνωστές κάποιες ιδιότητες, όπως:

- Ποσότητα υδρατμών
- Κατανομή αερολυμάτων
- Ορατότητα σκηνής

Τα παραπάνω, σπάνια υφίστανται ως άμεσα μετρήσιμα δεδομένα, επομένως χρησιμοποιείται το αποτύπωμα τους σε δεδομένα υπερφασματικής ακτινοβολίας. Αυτές οι ιδιότητες χρησιμοποιούνται για να παράξουν μια εκτίμηση της πραγματικής ανάκλασης της επιφάνειας. Οι ατμοσφαιρικές διορθώσεις μπορούν να εφαρμοστούν ανά εικονοστοιχείο, μιας και κάθε pixel σε μια υπερφασματική εικόνα περιέχει ανεξάρτητες μετρήσεις ζωνών απορρόφησης υδρατμών. [77]

4.2.2.1 Εφαρμογή Ατμοσφαιρικής Διόρθωσης στις SkySat Εικόνες

Η παρακάτω διαδικασία είναι κόμματι των Θερινών Ασκήσεων Τηλεπισκόπησης, η οποία διεξήχθη από την συγγραφέα στο 8^ο Ακαδημαϊκό Εξάμηνο της ΣΑΤΜ – ΜΓ του ΕΜΠ, με Υπεύθυνη Καθηγήτρια την κα Βασιλεία Καραθανάση. Θα ακολουθήσει μια περιληπτική περιγραφή.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την ατμοσφαιρική διόρθωση είναι το FLAASH της ENVI, το οποίο κάνει μια γρήγορη ατμοσφαιρική ανάλυση της οπτικής γωνίας υπερκύβων. Πιο συγκεκριμένα, το FLAASH διορθώνει μήκη κύματος από το ορατό φάσμα, μέχρι το εγγύς υπέρυθρο (έως 3μm) και ενσωματώνει τον κωδικό μεταφοράς ακτινοβολίας MODTRAN4.

Επίσης το FLAASH:

- Διορθώνει το εφέ γειννίαςσης (δηλαδή την ανάμειξη των εικονοστοιχείων λόγω διασποράς της ακτινοβολίας που ανακλάται στην επιφάνεια)
- Υπολογίζει την μέση ορατότητα σκηνής (αεροζόλ/θολότητα)
- Ταξινομεί τα νέφη

1^ο Στάδιο: Προϋποθέσεις Δεδομένων Εισόδου

Η εικόνα εισόδου πρέπει να είναι μια ραδιομετρικά βαθμονομημένη εικόνα ακτινοβολίας BIL ή BIP. Για να πραγματοποιηθεί ανάκτηση νερού, οι ζώνες πρέπει να εκτείνονται σε 1050 -1210 nm, 770 – 870 nm και 870 – 1020 nm, ενώ για να πραγματοποιηθεί ανάκτηση αεροζόλ, απαιτείται πρόσθετη κάλυψη μήκους κύματος.

A. Input Radiance Image

Τα Spectral Bands του Skysat είναι:

- Blue 450 – 515 nm
- Green 515 – 595 nm
- Red 605 – 695 nm
- NIR 740 – 900 nm
- PAN 450 - 900 nm

Οι τιμές που υπολογίστηκαν και εισήχθησαν σαν μήκη κύματος είναι:

- Band 1: 482,50 nm, $(450+515)/2$
- Band 2: 555,00 nm, $(515+595)/2$
- Band 3: 650,00 nm, $(605+695)/2$
- Band 4: 820,00 nm, $(740+900)/2$

B. Scene and Sensor Information

- Θέση Κέντρου Σκηνής (Γεωγραφικό Πλάτος και Μήκος) = 38.849300, 22.455200
- Τύπος Αισθητήρα = Pleiades – 1B (ίδια οικογένεια εικόνων)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση του πολυφασματικού αισθητήρα, το είδος του αισθητήρα χρησιμοποιείται για την αυτόματη εκχώρηση των σωστών συναρτήσεων φασματικής απόκρισης για τις ζώνες της εικόνας.

- Ύψος Αισθητήρα = 450 km (το 2020 οι επιστήμονες, κατέβασαν τους SkySat C από τα 500km στα 450km)
- Μέσο Υψόμετρο Εδάφους = 0.010 m (μέσος όρος του υψομέτρου της Ανθήλης και του Κόμματος)
- Μέγεθος Εικονοστοιχείου = 0.5 m
Χρησιμοποιείται για να διορθωθεί το εφέ γειτνίασης.
- Flight Date, Flight Time GMT = εξαρτάται από την εικόνα που εισχωρείται στο λογισμικό

Συγκεκριμένα:

- 23 Δεκεμβρίου 2020: 08:56:47
- 24 Δεκεμβρίου 2020: 09:04:16
- 28 Δεκεμβρίου 2020: 09:09:12
- 18 Φεβρουαρίου 2021: 11:52:38
- 23 Φεβρουαρίου 2021: 08:55:07
- 13 Μαρτίου 2021: 06:19:01
- 17 Μαρτίου 2021: 09:35:14
- 24 Μαρτίου 2021: 09:03:16
- 30 Μαρτίου 2021: 12:16:03

C. Selecting Atmospheric Model Settings

Συνέχεια έχει η επιλογή του μοντέλου MODTRAN, το οποίο θα πρέπει να έχει παρόμοια τυπική ποσότητα υδρατμών στήλης με την αναμενόμενη στην σκηνή. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν πληροφορίες για τους υδρατμούς στην σκηνή, επιλέγεται μια ατμόσφαιρα με βάση την αναμενόμενη θερμοκρασία του επιφανειακού αέρα, η οποία και σχετίζεται με τους υδρατμούς. Αν και αυτή η θερμοκρασία είναι άγνωστη, επιλέγεται μια ατμόσφαιρα που βασίζεται σε μοντέλο θερμοκρασίας επιφάνειας εποχικού γεωγραφικού πλάτους.

Πίνακας 5: Υδρατμοί και Θερμοκρασία Επιφάνειας (1)

Model Atmosphere	Water Vapor (std atm-cm)	Water Vapor (g/cm²)	Surface Air Temperature
Sub-Arctic Summer (SAS)	2589	2.08	14 °C or 57 °
Mid-Latitude Summer (MLS)	3636	2.92	21 °C or 70 °
Tropical (T)	5119	4.11	27 °C or 80 °

Πίνακας 6: Υδρατμοί και Θερμοκρασία Επιφάνειας (2)

Latitude (°N)	Jan.	March	May	July	Sept.	Nov.
80	SAW	SAW	SAW	MLW	MLW	SAW
70	SAW	SAW	MLW	MLW	MLW	SAW
60	MLW	MLW	MLW	SAS	SAS	MLW
50	MLW	MLW	SAS	SAS	SAS	SAS
40	SAS	SAS	SAS	MLS	MLS	SAS
30	MLS	MLS	MLS	T	T	MLS
20	T	T	T	T	T	T
10	T	T	T	T	T	T
0	T	T	T	T	T	T
-10	T	T	T	T	T	T
-20	T	T	T	MLS	MLS	T
-30	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS	MLS
-40	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS	SAS
-50	SAS	SAS	SAS	MLW	MLW	SAS
-60	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-70	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW	MLW
-80	MLW	MLW	MLW	SAW	MLW	MLW

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, με βάση του μήνες και το Latitude του κέντρου της σκηής, επιλέχθηκε το ατμοσφαιρικό μοντέλο “**Mid – Latitude Summer (MLS)**”.

D. Selecting an Aerosol Model

Η επιλογή του μοντέλου δεν είναι κρίσιμη, αν η ορατότητα είναι μεγαλύτερη από 40km.

- Rural: μη αστική/βιομηχανική περιοχή
- Urban: αστική/βιομηχανική περιοχή
- Maritime: ωκεανός ή περιοχή που επικρατεί άνεμος λόγω ωκεανού
- Tropospheric: καθαρές περιοχές (ορατότητα μεγαλύτερη από 40km)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέχθηκε το μοντέλο “**Rural**”.

2^ο Βήμα: **Advanced Settings**

A. CO2 Mixing Ratio (ppm):

Το 2021 η τιμή του CO2 ήταν 417 ppm, επομένως η τιμή που θα εφαρμοστεί είναι:
 $420 + 20 = 440 \text{ ppm}$

B. Setting Viewing Geometry Parameters

Η ζενίθια γωνία ορίζεται στον αισθητήρα ως η γωνία μεταξύ της οπτικής γραμμής και του ζενίθ. Πρέπει οι τιμές της ζενίθιας γωνίας να είναι μεταξύ ενενήντα (90) και εκατόν ογδόντα (180) μοιρών.

Το αζιμούθιο ορίζεται στον αισθητήρα ως η γωνία μεταξύ της γραμμής όρασης και του βορρά, όπως φαίνεται από το έδαφος. Πρέπει οι τιμές του αζιμούθιου να είναι μεταξύ του μείον εκατόν ογδόντα (-180) και του ογδόντα (180).

Γενικότερα ισχύει:

- Zenith angle = sun elevation (from metadata.json file) + 90
- Azimuth angle = - (360 - satellite azimuth (from metadata.json file))

Ενώ σε αυτή την περίπτωση, ισχύει:

Πίνακας 7: Ζενίθια Γωνία και Αζιμούθιο SkySat Εικόνων

Date	Sun Elevation	Satellite Azimuth	Zenith Angle	Zenith Angle'	Azimuth Angle
24 Δεκεμβρίου	24.6	93.6	65.40	114.60	-86.40
28 Δεκεμβρίου	25.00	285.90	65.00	115.00	105.90
18 Φεβρουαρίου	37.20	99.70	52.80	127.20	-80.30
23 Φεβρουαρίου	35.30	98.10	54.70	125.30	-81.90
13 Μαρτίου	17.30	229.70	72.70	107.30	49.70
17 Μαρτίου	47.40	332.50	42.60	137.40	152.50
24 Μαρτίου	47.10	290.30	42.90	137.10	110.30
30 Μαρτίου	48.2	284.8	41.80	138.20	104.80

3^ο Βήμα: Water Retrieval

Για να λυθούν οι εξισώσεις μεταφοράς ακτινοβολίας που επιτρέπουν τον υπολογισμό της ανάκλασης, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της ποσότητας υδρατμών της στήλης ανά εικονοστοιχείο.

Το FLAASH χρησιμοποιεί μια μέθοδο για την εύρεση της ποσότητας νερού για κάθε εικονοστοιχείο, που παράγει πιο ακριβής διόρθωση από την χρήση σταθερής ποσότητας νερού για όλη την σκηνή. Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος, η εικόνα πρέπει να έχει μπάντες που εκτείνονται σε: 1050 – 1210 nm, 870 – 1020 nm, 770 – 870 nm.

Στην παρούσα εργασία, οι μπάντες είναι οι εξής:

- Band 1: 482,50 nm
- Band 2: 555,00 nm
- Band 3: 650,00 nm
- Band 4: 820,00 nm

Στην περίπτωση των πολυφασματικών αισθητήρων, όπως συμβαίνει τώρα (Pleiades – B), δεν γίνεται ανάκτηση νερού, διότι δεν διατίθεται οι κατάλληλες ζώνες για να γίνει αυτή η ανάκτηση. Επομένως, χρησιμοποιείται σταθερή ποσότητα υδρατμών για όλα τα εικονοστοιχεία, η οποία προσδιορίζεται με την τυπική ποσότητα υδρατμών για το επιλεγμένο ατμοσφαιρικό μοντέλο (MLS), πολλαπλασιασμένη με ένα προαιρετικό πολλαπλασιαστή στήλης νερού (1.00, default value).

4^ο Βήμα: Δοκιμές

Για την εύρεση του ιδανικότερου συνδυασμού των παραμέτρων, οι παρακάτω διεργασίες θα εφαρμοστούν, επιλέχθηκαν τρεις (3) εικόνες: 24 Δεκεμβρίου 2020), 28 Δεκεμβρίου 2020 και 18 Φεβρουαρίου 2021. Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν σημεία όπου απεικονίζεται Τσιμέντο, διότι δεν υπόκειται σε μεταβολές λόγω χρόνου, επομένως η όποια αλλαγή στην φασματική υπογραφή οφείλεται μόνο στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 62: Σημεία που επιλέχθηκαν για το Τσιμέντο

Οι παράμετροι που θα επιπέσουν σε δοκιμές είναι:

- Aerosol Retrieval
- Initial Visibility

Οι **αρχικές δοκιμές** ήταν οι εξής:

- **1η Δοκιμή:** Aerosol Retrieval με Lower Channel = 3 και Visibility = 40 km
- **2η Δοκιμή:** Aerosol Retrieval με Lower Channel = 1 και Visibility = 40 km
- **3η Δοκιμή:** Aerosol Retrieval με Lower Channel = 3 και Visibility = 15 km
- **4η Δοκιμή:** Aerosol Retrieval με Lower Channel = 1 και Visibility = 15 km
- **5η Δοκιμή:** οχι Aerosol Retrieval και Visibility = 40 km
- **6η Δοκιμή:** οχι Aerosol Retrieval και Visibility = 15 km

Η συλλογή των αντίστοιχων δεδομένων για την δημιουργία των κατάλληλων Πινάκων και Διαγραμμάτων έδειξε τα παρακάτω:

Στην εικόνα του Δεκέμβρη, η 1η Δοκιμή ταυτίζεται με 3η και την 5η, ενώ η 2η Δοκιμή ταυτίζεται με την 4^η, κάτι που σημαίνει ότι στην περίπτωση που γίνει Aerosol Retrieval, η αλλαγή του Visibility δεν έχει κάποια επίπτωση στο αποτέλεσμα. (Δοκιμή 1 = Δοκιμή 3 και Δοκιμή 2 = Δοκιμή 4). Ακόμα, αποδεικνύεται ότι είτε γίνει Aerosol Retrieval με Lower Channel

το Κανάλι 3 είτε δεν γίνει καμία ανάκτηση αερολύματος, το αποτέλεσμα είναι επίσης ίδιο (Δοκιμή 1 = Δοκιμή 5).

Αντίστοιχα, στην εικόνα του Φλεβάρη, η 1η Δοκιμή ταυτίζεται με 3η και την 5η, ενώ η 2η Δοκιμή ταυτίζεται με την 4^η, κάτι που σημαίνει ότι στην περίπτωση που γίνει Aerosol Retrieval, η αλλαγή του Visibility δεν έχει κάποια επίπτωση στο αποτέλεσμα. (Δοκιμή 1 = Δοκιμή 3 και Δοκιμή 2 = Δοκιμή 4). Ακόμα, αποδεικνύεται ότι είτε γίνει Aerosol Retrieval με Lower Channel το Κανάλι 3 είτε δεν γίνει καμία ανάκτηση αερολύματος, το αποτέλεσμα είναι επίσης ίδιο (Δοκιμή 1 = Δοκιμή 5).

Τέλος, στην εικόνα του Μάρτη, η 1η Δοκιμή ταυτίζεται με 3η, ενώ η 2η Δοκιμή ταυτίζεται με την 4η. Επιβεβαιώνεται και εδώ ότι αν γίνει Aerosol Retrieval, η αλλαγή του Visibility δεν έχει κάποια επίπτωση στο αποτέλεσμα. (Δοκιμή 1 = Δοκιμή 3 και Δοκιμή 2 = Δοκιμή 4).

Συμπερασματικά, η ανάκτηση αερολύματος με Lower Channel το Κανάλι 3, έχει επίπτωση μόνο στην εικόνα του Μαρτίου, καθώς στις άλλες δύο ημερομηνίες, είτε κάνουμε ανάκτηση αερολύματος με Lower Channel το Κανάλι 3, είτε δεν κάνουμε καθόλου ανάκτηση αερολύματος, το αποτέλεσμα είναι ίδιο. Το ίδιο ισχύει και στις περιπτώσεις που το Lower Channel είναι το Κανάλι 1.

Τα αποτελέσματα των **Ορατοτήτων** από τις έξι (6) παραπάνω Δοκιμές είναι τα εξής:

Στην εικόνα του Δεκέμβρη, οι ορατότητες που έβγαλε η ατμοσφαιρική διόρθωση ήταν:

- 1η Δοκιμή = 3η Δοκιμή = 6η Δοκιμή = 40 km
- 2η Δοκιμή = 4η Δοκιμή = 29,7742 km
- 5η Δοκιμή = 15 km

Στην εικόνα του Φλεβάρη, οι ορατότητες που έβγαλε η ατμοσφαιρική διόρθωση ήταν:

- 1η Δοκιμή = 3η Δοκιμή = 6η Δοκιμή = 40 km
- 2η Δοκιμή = 4η Δοκιμή = 23,5146 km
- 5η Δοκιμή = 15 km

Γι' αυτό, οι **τελικές Δοκιμές** των Ατμοσφαιρικών Διορθώσεων διαμορφώνονται ως εξής:

- Δοκιμή 1: Ατμοσφαιρική Διόρθωση **με ανάκτηση aerosol και Initial Visibility = 40 km.**
- Δοκιμή 2: Ατμοσφαιρική Διόρθωση **χωρίς ανάκτηση aerosol και Initial Visibility = 40 km.**
- Δοκιμή 3: Ατμοσφαιρική Διόρθωση **με ανάκτηση aerosol και Initial Visibility = 15 km.**
- Δοκιμή 4: Ατμοσφαιρική Διόρθωση **χωρίς ανάκτηση aerosol και Initial Visibility = 15 km.**

Σε αυτές τις τέσσερις περιπτώσεις, οι παράμετροι που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο εδάφιο (*Scene and Sensor Information, Atmospheric and Aerosol Model, Geometry Parameters*) παραμένουν σταθερές.

5° Βήμα: Ανάκτηση Aerosol (Δοκιμή 1 και Δοκιμή 3)

Το FLAASH έχει μια μέθοδο ανάκτηση της ποσότητας αερολύματος και μια μέθοδο εκτίμησης μιας μέσης ορατότητας σκηνης, χρησιμοποιώντας μια μέθοδο αναλογίας ανάκλασης σκούρου εικονοστοιχείου, με βάση τον Kaufman.

Αυτή η μέθοδος ανάκτησης σκούρων εικονοστοιχείων γης, απαιτεί την παρουσία καναλιών των αισθητήρων με 660 nm και 2100 nm. Αν η εικόνα εισαγωγής έχει ζώνες κοντά στα 800 nm και 420 nm, εκτελείται πρόσθετος έλεγχος που εξαλείφει τα εικονοστοιχεία που είναι σκιές ή υδάτινα σώματα.

Πίνακας 8: Προτεινόμενα μήκη κύματος

Aerosol Retrieval	KT upper	2100 - 2250 nm
	KT lower	640 - 680 nm

Στις Δοκιμές 1 και 3, επιλέχθηκε να γίνει Aerosol Retrieval με την μέθοδο 2 – Band Kaufman – Tanre. Σαν **Upper Channel** επιλέχθηκε η 4^η μπάντα (820 nm) και σαν **Lower Channel** επιλέχθηκε η 3^η μπάντα (650 nm), μιας και έχουμε μόνο τέσσερις μπάντες.

Αν δεν βρεθούν τα κατάλληλα εικονοστοιχεία (σκούρα), τότε χρησιμοποιείται η τιμή στο *Initial Visibility*.

6° Βήμα: Εισαγωγή Initial Visibility Value

Σε αυτή την παράμετρο, εισάγεται μια εκτίμηση της ορατότητας της σκηνης. Όπως αναφέρθηκε και πριν, αυτή η τιμή θα χρησιμοποιηθεί για την ατμοσφαιρική διόρθωση αν το αεροζόλ δεν μπορεί να ανακτηθεί.

Πίνακας 9: Τιμές Ορατότητας Σκηνης

Weather Condition	Scene Visibility
Clear	40 to 100 km
Moderate Haze	20 to 30 km
Thick Haze	15 km or less

Θα γίνουν δυο δοκιμές με Initial Visibility = 40 km (Δοκιμή 1 και Δοκιμή 2) και δυο δοκιμές με Initial Visibility = 15 km (Δοκιμή 3 και Δοκιμή 4).

Στο Παράρτημα Πινάκων και Διαγραμμάτων, παρουσιάζονται συνολικά όλοι οι Πίνακες με στις τιμές των εικονοστοιχείων για κάθε μια από στις έξι (6) εικόνες, σε κάθε μια από στις έξι (6) Δοκιμές.

7^ο Βήμα: Τελική Επιλογή Παραμέτρων

Με βάση στις στις μετρήσεις που έλαβαν χώρα και απεικονίζονται στα διαγράμματα και στις Πίνακες, φαίνεται ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στις μεταβολές των φασματικών υπογραφών του τσιμέντου κατά την εφαρμογή διαφόρων δοκιμών.

Η 1^η δοκιμή (Aerosol Retrieval με Lower Channel = 3 και Visibility = 40 km) στις ειπώθηκε, ταυτίζεται με την 3^η δοκιμή (Aerosol Retrieval με Lower Channel = 3 και Visibility = 15 km)

Η 2^η δοκιμή (όχι Aerosol Retrieval και Visibility = 40 km) ταυτίζεται με την 1^η και την 3^η τον Δεκέμβριο, τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο, ενώ τον Μάρτιο οι τιμές των εικονοστοιχείων είναι αυξημένες κατά 300 – 400.

Επομένως, η Δοκιμή που φαίνεται να είναι η ιδανικότερη για εφαρμογή στο σύνολο των εικόνων είναι αυτή στις **1^ης Δοκιμής** (η οποία ταυτίζεται με την 3^η) μιας και είναι η πιο «πλήρης» Δοκιμή, διότι έχει πραγματοποιηθεί Aerosol Retrieval στα σωστά κανάλια, έχουν χρησιμοποιηθεί οι σωστές ζενιθίες γωνίες και τα αζιμούθια, ενώ επιτυγχάνεται και το μεγαλύτερο δυνατό Visibility.

4.2.3 Ραδιομετρική Αναγωγή

Στόχος στις **Ραδιομετρικής Αναγωγής** είναι η ραδιομετρική βαθμονόμηση των Digital Numbers (DNs). Αυτές οι ραδιομετρικές διορθώσεις μειώνουν το ανεπιθύμητο ποσοστό θορύβου και στις αλλαγές στις ποσότητες στις εισερχόμενης ακτινοβολίας από αισθητήρες και οφείλονται σε σφάλματα που προέρχονται από τεχνικά στοιχεία στις διαδικασίας στις καταγραφής και στις μετάδοσης. Με άλλα λόγια, η διαδικασία μετάφρασης των ακατέργαστων ψηφιακών αριθμών (DN) που κατέλαβαν οι δορυφορικοί αισθητήρες σε φυσικώς σχετικές τιμές, στις η ανάκλαση, είναι γνωστή ως ραδιομετρική βαθμονόμηση. Κατά τη σύγκριση των απεικονίσεων που λαμβάνονται σε διαφορετικές περιόδους, η ραδιομετρική βαθμονόμηση είναι απαραίτητη, καθώς κανονικοποιεί τα δεδομένα και μειώνει τη μεταβλητότητα λόγω των αισθητήρων. [78]

4.2.3.1 Εφαρμογή Ραδιομετρικής Αναγωγής των Εικόνων SkySat και Sentinel – 2

Σαν εικόνα αναφοράς, επιλέχθηκε η ατμοσφαιρικά διορθωμένη εικόνα στις 29 Μαρτίου 2021 του δορυφόρου Sentinel 2. Η συγκεκριμένη εικόνα επιλέχθηκε για την καθαρότητα της, μέσω ποιοτικών διαδικασιών (φωτοερμηνεία). Μιας και δεν είναι διαθέσιμες στις βοηθητικές πληροφορίες, όπως για παράδειγμα το οπτικό πάχος της ατμόσφαιρας για κάποιους μήνες, επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τρόπος επιλογής.



Εικόνα 63: Εικόνα Αναφοράς, 29 Μαρτίου 2021

Απόσπασμα του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε

```
# Φόρτωση 1ης Εικόνας
with rasterio.open(img_a_path) as src:
    img_a = src.read()
    profile_a = src.profile

# Φόρτωση Εικόνας Αναφοράς
with rasterio.open(img_b_path) as src:
    img_b = src.read()
    profile_b = src.profile

# Εφαρμογή Histogram Matching
img_matched = np.zeros_like(img_b)
for band in range(img_b.shape[0]):
    img_matched[band, :, :] = match_histograms(img_b[band, :, :], img_a[band, :, :],
    multichannel=False)
```

4.3 Καθορισμός Τελικών Ορίων Περιοχής Μελέτης

Η παρούσα έρευνα, αφορά τις υδάτινες περιοχές και συγκεκριμένα τον Σπερχειό Ποταμό, που απεικονίζεται στην Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης. Βασικός σκοπός είναι η απομόνωση της υπό – επιφανειακής ογκομετρικής ακτινοβολίας L_v , η οποία προέρχεται από την κατερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία και την ατμοσφαιρική ακτινοβολία και διαπερνά τη διεπιφάνεια αέρα – νερού, αλληλοεπιδρά με το νερό, τα οργανικά και τα ανόργανα συστατικά και στη συνέχεια εξέρχεται από τα ύδατα χωρίς να συναντά τον πυθμένα. Ως αποτέλεσμα, εξάγονται πληροφορίες σχετικά με το εσωτερικό των υδάτων. [79]

Αξίζει να αναφερθεί ότι το καθαρό νερό δεν περιέχει καμία οργανική ή ανόργανη ύλη και γι' αυτό απορροφά επιλεκτικά το φως του Ήλιου που προσπίπτει στην επιφάνεια του νερού.

Οι ιδανικές περιοχές μηκών κύματος για τον διαχωρισμό εδάφους – νερού είναι το εγγύς και το μέσο υπέρυθρο (740 – 2500 nm). Αυτό συμβαίνει διότι σε εκείνο τον χώρο τα υδάτινα σώματα απορροφούν όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει, ενώ οι χερσαίες επιφάνειες ανακλούν την ακτινοβολία στην ίδια περιοχή. [80]

Ωστόσο, όταν υπάρχουν οργανικά ή/και ανόργανα σώματα μέσα στα ύδατα, λαμβάνει χώρα επιφανειακή ανάκλαση στο εγγύς υπέρυθρο, αυξάνοντας έτσι σημαντικά της ποσότητα ακτινοβολίας που εξέρχεται.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στην συγκεκριμένη εργασία, οι δορυφορικές εικόνες Skysat και Sentinel 2 έχουν τέσσερις μπάντες:

Πίνακας 10: Τιμές Καναλιών

SkySat	Sentinel – 2
Blue	
482.5	490
Green	
555	560
Red	
650	665
NIR	
820	842

4.3.1 Normalized Difference Water Index (NDWI)

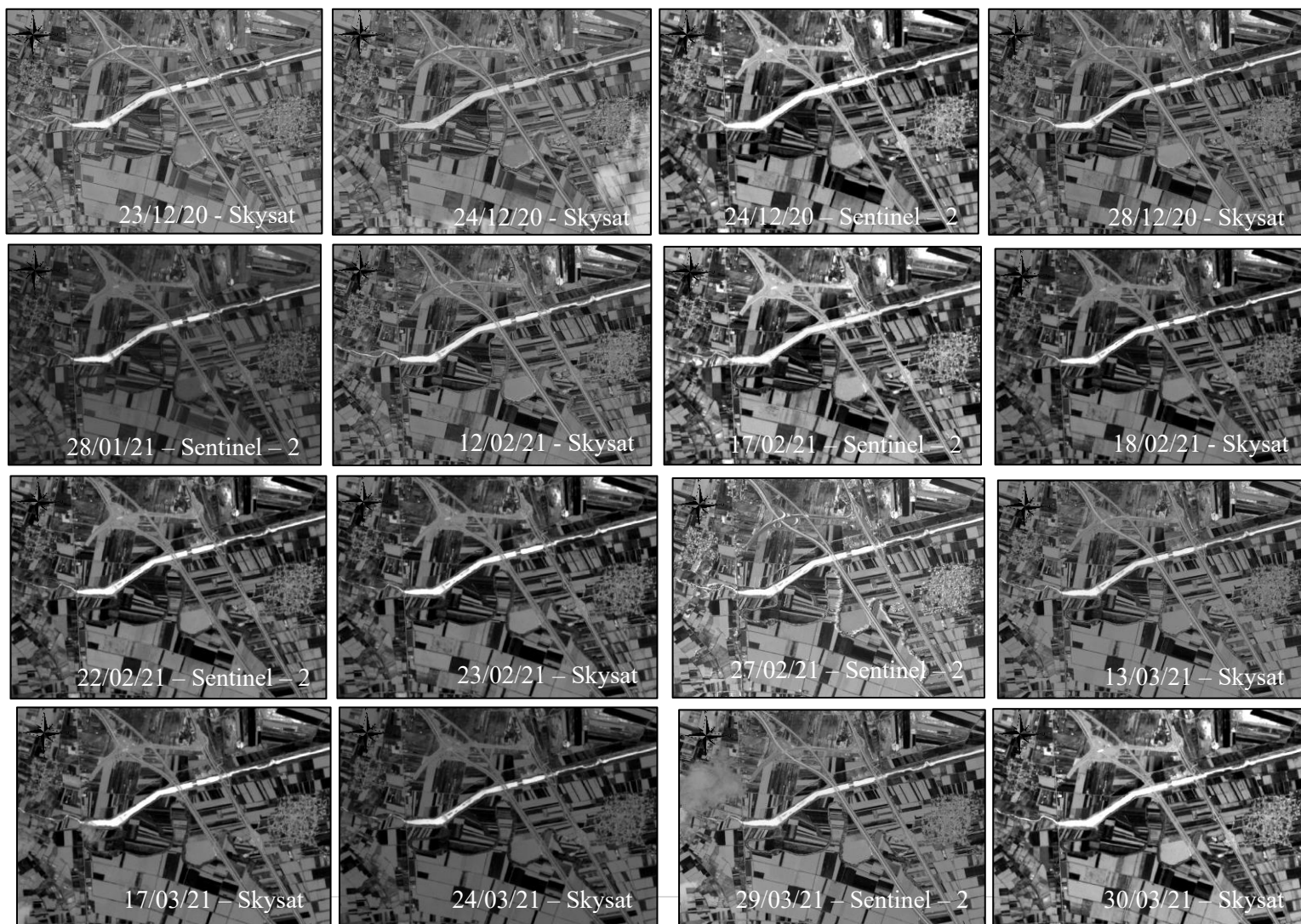
Ο δείκτης NDWI χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της παρουσίας υδάτινων σωμάτων σε διάφορα περιβάλλοντα και είναι ιδανικός για να γίνει διαχωρισμός μεταξύ εδάφους και νερού.

$$\text{NDWI} = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}}$$

- Με Green Band = 500 – 600 nm. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 555 nm για τις Skysat Εικόνες και 560 nm για τις Sentinel 2 εικόνες.
- Με NIR = 700 nm – 1100 nm. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι 820 nm για τις Skysat Εικόνες και 842 nm για τις Sentinel 2 εικόνες.

Το σύνολο τιμών του NDWI είναι από το -1 έως το +1, με τις τιμές που είναι πιο κοντά στο +1 να υποδεικνύουν υδάτινα, ενώ οι τιμές πιο κοντά στο -1 υποδεικνύουν βλάστηση ή μη υδάτινες επιφάνειες. [81]

Όσο πιο ανοιχτόχρωμο είναι το απεικονιζόμενο εικονοστοιχείο στην Grayscale χρωματική κλίμακα, τόσο πιο κοντά βρίσκεται στην τιμή +1 και επομένως τόσο πιο καθαρό είναι το νερό.



Εικόνα 64 - 79: Αποτέλεσμα του NDWI σε όλο το εύρος της χρονοσειράς

4.3.2 Κατωφλίωση – Όρια Περιοχής Μελέτης

Επόμενο βήμα είναι η κατωφλίωση των εικόνων NDWI για να αυτόματη εξαγωγή των εικονοστοιχείων που απεικονίζουν υδάτινες περιοχές.

Η Περιοχή Μελέτης θα είναι η τομή των ορίων των εικόνων που συμμετέχουν.

Για κάθε μια από τις εικόνες του Πίνακα 3, έγινε κατωφλίωση (thresholding) του NDWI, έτσι ώστε να γίνει εξαγωγή των εικονοστοιχείων που βρίσκονται στο περιοχή του Σπερχειού Ποταμού.

Πίνακας 11: Κατώφλια NDWI

Ημερομηνία	Αισθητήρας	Κατώφλι NDWI
23 Δεκεμβρίου 2020	SkySat	0.6
24 Δεκεμβρίου 2020	SkySat	0.6
24 Δεκεμβρίου 2020	Sentinel 2	0.3
28 Δεκεμβρίου 2020	SkySat	0.5
28 Ιανουαρίου 2021	Sentinel 2	0.45
12 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2	0.3
17 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2	0.6
18 Φεβρουαρίου 2021	SkySat	0.6
22 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2	0.55
23 Φεβρουαρίου 2021	SkySat	0.6
27 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2	0.45
04 Μαρτίου 2021	Sentinel 2	0.4
13 Μαρτίου 2021	SkySat	0.9
17 Μαρτίου 2021	SkySat	0.55
24 Μαρτίου 2021	SkySat	0.6
29 Μαρτίου 2021	Sentinel 2	0.55
30 Μαρτίου 2021	SkySat	0.5

Μιας και υπάρχουν **δύο** εικόνες από την ημερομηνία 24 Δεκεμβρίου 2020, πρέπει να αποφασιστεί και επιλεγθεί η καταλληλότερη. Γι' αυτό θα εφαρμοστούν **δοκιμές**.

Οι δοκιμές που θα εφαρμοστούν θα είναι δύο:

1. 1^η Δοκιμή: στις οι ημερομηνίες στον Πίνακα 11 χρησιμοποιώντας την εικόνα SkySat στις 24 Δεκεμβρίου 2021 (σύνολο 16 εικόνες)
2. 2^η Δοκιμή: στις οι ημερομηνίες στον Πίνακα 11 χρησιμοποιώντας την εικόνα Sentinel στις 24 Δεκεμβρίου 2021 (σύνολο 16 εικόνες)

Παρατηρείται ότι η 1^η και η 2^η Δοκιμή, περιλαμβάνουν τον ίδιο αριθμό εικονοστοιχείων (600.562). Αυτό συμβαίνει διότι τα όρια των εικόνων στις 24 Δεκεμβρίου 2020, τόσο για την SkySat, όσο και στις Sentinel – 2, είναι εκτός στις τομές των υπολοίπων δεκατεσσάρων (14) εικόνων. Γι' αυτό τον λόγο, όταν δημιουργείται η τομή των δεκαέξι (16) εκάστοτε εικόνων στις δύο δοκιμές, το αποτέλεσμα είναι ίδιο και ανεπηρέαστο από στις εναλλαγές μεταξύ αυτών των δύο εικόνων.



Εικόνα 80: Τελική Όρια Περιοχή Μελέτης πάνω στην Εικόνα: 23 Δεκεμβρίου 2020

4.4 Φασματικοί Δείκτες

4.4.1 Ορισμός

Ένας φασματικός δείκτης είναι ένας μαθηματικός συνδυασμός δύο ή περισσότερων μηκών κύματος που ενισχύει το περιεχόμενο πληροφοριών των δεδομένων. Πιο συγκεκριμένα, οι φασματικοί δείκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ή ιδιότητες της επιφάνειας της Γης, όπως η πυκνότητα της βλάστησης, η υγρασία του εδάφους ή η ποιότητα του νερού. [82]

Στόχος είναι να γίνει εντοπισμός μοτίβων της περιβαλλοντικής υγείας της καθορισμένης Περιοχής Μελέτης, έχοντας δορυφορικές εικόνες μιας τρίμηνης χρονοσειράς, οι οποίες έχουν τέσσερις (4) μόνο μπάντες στο Ορατό και στο Εγγύς Υπέρυθρο. Γι' αυτό τον λόγο, έγιναν δοκιμές χρησιμοποιώντας ποικίλους δείκτες βλάστησης (και όχι μόνο), με σκοπό τον εντοπισμό του κατάλληλου δείκτη που δείχνει τις μεγαλύτερες μεταβολές μέσα στην χρονοσειρά.

4.4.2 Μελέτη Καναλιών

Ο μεγάλος περιορισμός είναι ο μικρός αριθμός καναλιών που έχουν οι δορυφορικές εικόνες:

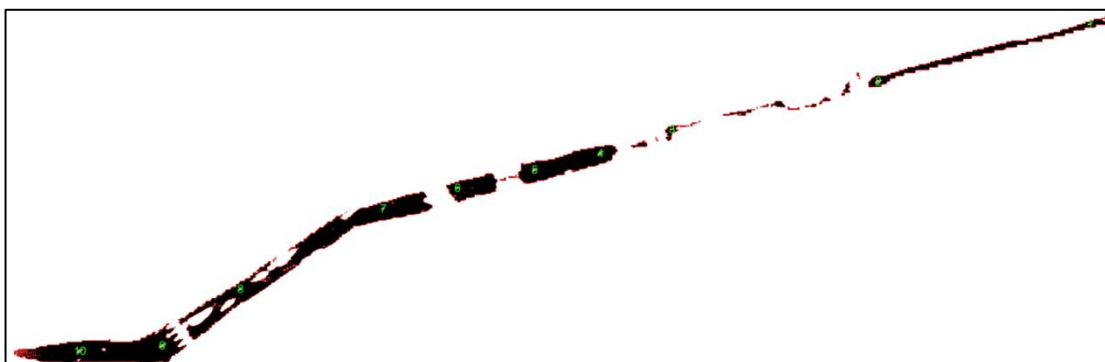
Πίνακας 12: Τιμές Καναλιών

SkySat	Sentinel – 2
Blue	
482.5	490
Green	
555	560
Red	
650	665
NIR	
820	842

Πριν γίνει οποιαδήποτε χρήση των δεικτών, έγινε μελέτη των ίδιων των μπαντών κάθε εικόνας. Πιο συγκεκριμένα, λήφθηκαν τα ίδια δέκα 10 δείγματα εντός της Περιοχής Μελέτης για κάθε ένα από τα κανάλια: Blue, Green, Red, NIR.

Για λόγους εξοικονόμησης και σωστής οπτικοποίησης, δημιουργήθηκαν **δύο** χρονοσειρές, μια η οποία περιλαμβάνει την εικόνα **Skysat στις 24 Δεκεμβρίου 2020**, και μια που περιλαμβάνει την εικόνα **Sentinel 2 στις 24 Δεκεμβρίου 2020**.

Μιας και κάθε μια από τις δυο δοκιμές, έχουν ίδιες Περιοχές Μελέτης, μιας και δεν μεταβάλλεται το όριο της, στην συγκεκριμένη δημιουργία διαγραμμάτων, τα δέκα (10) δείγματα (πολύγωνα) θα παρθούν εντός των κοινών ορίων που δημιουργούνται.



Εικόνα 81: Τα δέκα δείγματα πάνω στα Κοινά Όρια της Περιοχής Μελέτης

Η φασματική απορρόφηση του νερού, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αντιστοιχεί σε απορρόφηση της ενέργειας στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι ή αλλιώς NIR. Με λίγα λόγια, το νερό απορροφά την υπέρυθη ακτινοβολία ως ποτάμι και γι' αυτό η οριοθέτηση υδάτινων μαζών γίνεται σχετικά εύκολα στο NIR.

Το καθαρό νερό απορροφά μικρή ενέργεια σε μήκη κύματος μικρότερα των 600 nm, παρουσιάζοντας έτσι έναν υψηλό συντελεστή μετάδοσης ενέργειας στο μπλε και πράσινο κανάλι. Ωστόσο, άμα το νερό δεν είναι τόσο καθαρό, είτε λόγω φερτών υλικών, είτε εξαιτίας ιζημάτων, είτε εξαιτίας της παρουσίας χλωροφύλλης, η ανακλαστικότητα μεταβάλλεται. Συγκεκριμένα, τα ιζήματα προκαλούν υψηλή ανακλαστικότητα, ενώ η χλωροφύλλη ελαττώνει την ανακλαστικότητα του νερού στο μπλε κανάλι, ενώ στο πράσινο κανάλι αυξάνεται.

Με λίγα λόγια, για τα καθαρά νερά, αναμένεται:

- Υψηλές τιμές σε μπλε – πράσινο κανάλι
- Χαμηλές τιμές στο NIR

Συγκριτικά με τα καθαρά:

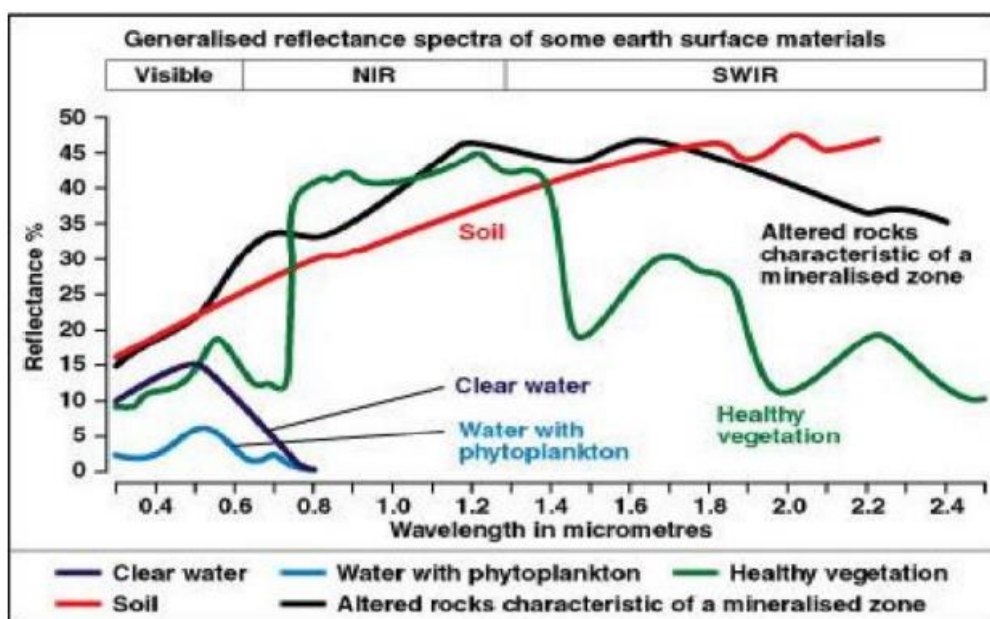
τα νερά που περιέχουν χλωροφύλλη, αναμένεται να έχουν:

- Χαμηλότερες τιμές στο μπλε κανάλι
- Ψηλότερες τιμές στο πράσινο κανάλι

τα νερά που περιέχουν ιζήματα, αναμένεται να έχουν:

- Υψηλότερες τιμές σε όλα τα κανάλια

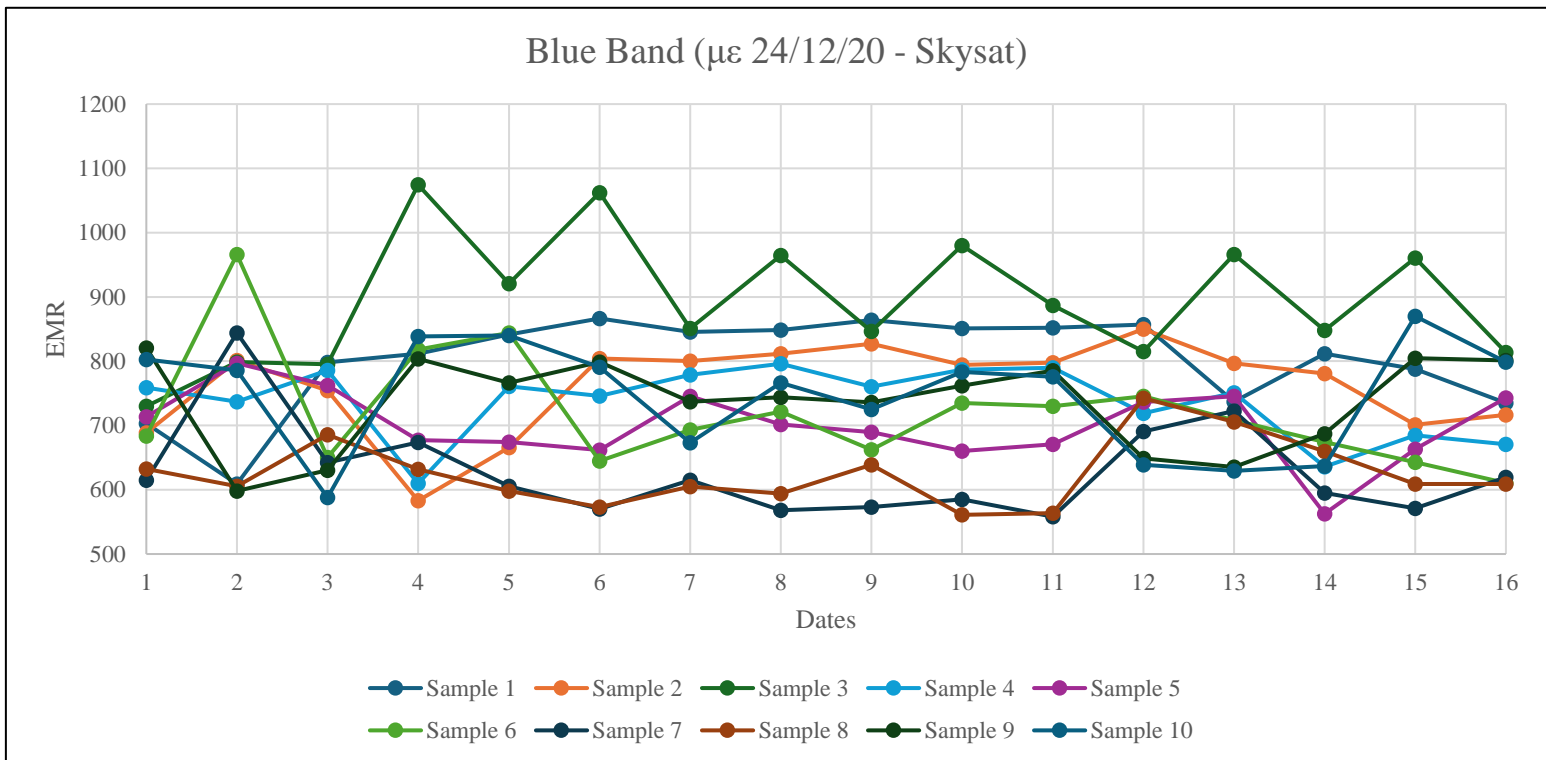
Χρονοσειρά	
a/a	Date
1	23 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat
2	24 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat
3	28 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat
4	28 Ιανουαρίου 2021 - Sentinel 2
5	12 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2
6	17 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2
7	18 Φεβρουαρίου 2021 - Skysat
8	22 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2
9	23 Φεβρουαρίου 2021 - Skysat
10	27 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2
11	04 Μαρτίου 2021 - Sentinel 2
12	13 Μαρτίου 2021 - Skysat
13	17 Μαρτίου 2021 - Skysat
14	24 Μαρτίου 2021 - Skysat
15	29 Μαρτίου 2021 - Sentinel 2
16	30 Μαρτίου 2021 - Skysat



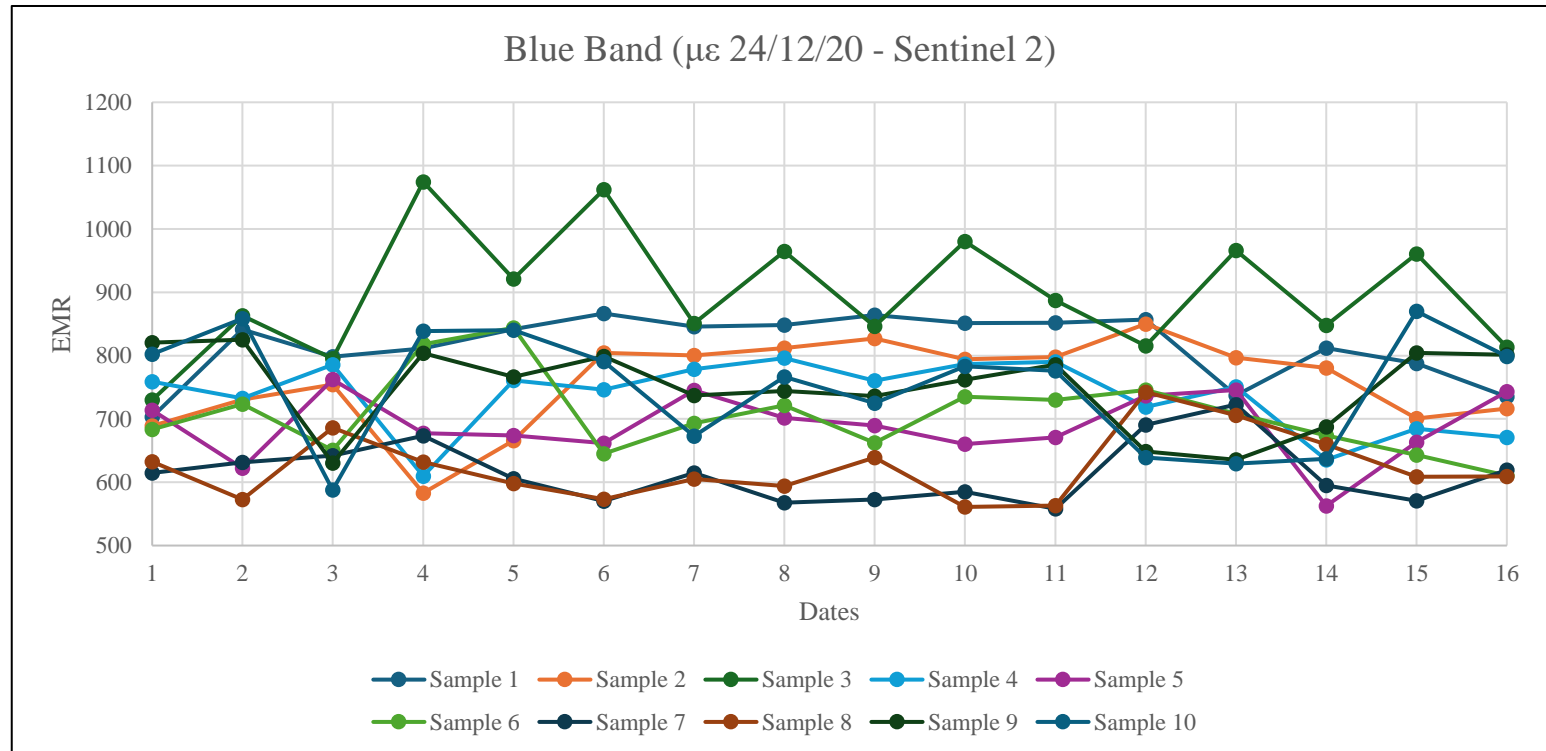
Εικόνα 82: Φασματικές Υπογραφές, Source: ESA

4.4.2.1 Μπλε Κανάλι (Blue Band)

Διάγραμμα 1α: Δειγματοληψία στο Μπλε Κανάλι (1)



Διάγραμμα 1β: Δειγματοληψία στο Μπλε Κανάλι (2)



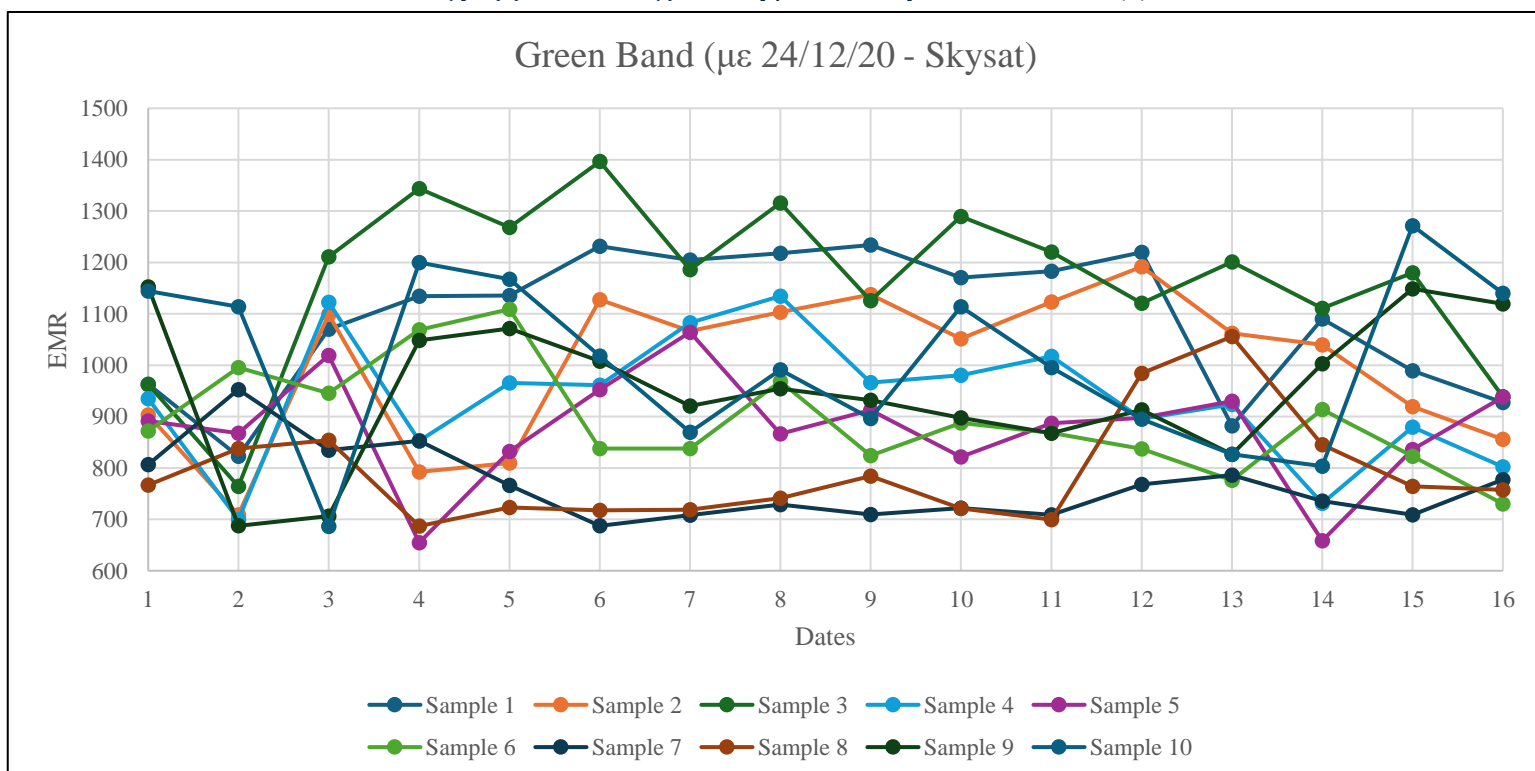
Σχολιασμός για το Μπλε Κανάλι

Όπως αναφέρθηκε πιο πριν, το καθαρό νερό στο μπλε κανάλι προβλέπεται να έχει υψηλό δείκτη συντελεστή μεταφοράς ενέργειας. Αναλυτικότερα, οι τιμές ανάκλασης ολόκληρης της χρονικής περιόδου, όπως φαίνεται από τα Διαγράμματα 2 και 3, κυμαίνονται από 550 έως 1100, με σημαντική συσσώρευση μεταξύ 600 και 800, ενώ καμία ημερομηνία δεν εμφανίζει σταθερά υψηλές ή χαμηλές τιμές και στα 10 Δείγματα. Είναι ενδιαφέρον ότι σε κάποιες ημέρες στη μέση της χρονοσειράς (από 28 Ιανουαρίου 2021 - Sentinel 2 έως 22 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2), το Δείγμα 3, το οποίο βρίσκεται κατά μήκος των οχθών του ποταμού, έχει σημαντικά υψηλότερες τιμές. Ωστόσο, μέχρι τις 4 Μαρτίου 2021 – Sentinel 2, τα Δείγματα 7 και 8, που βρίσκονται στο κέντρο της Περιοχής Μελέτης, έχουν σταθερά τις χαμηλότερες τιμές σε σύγκριση με τα άλλα δείγματα.

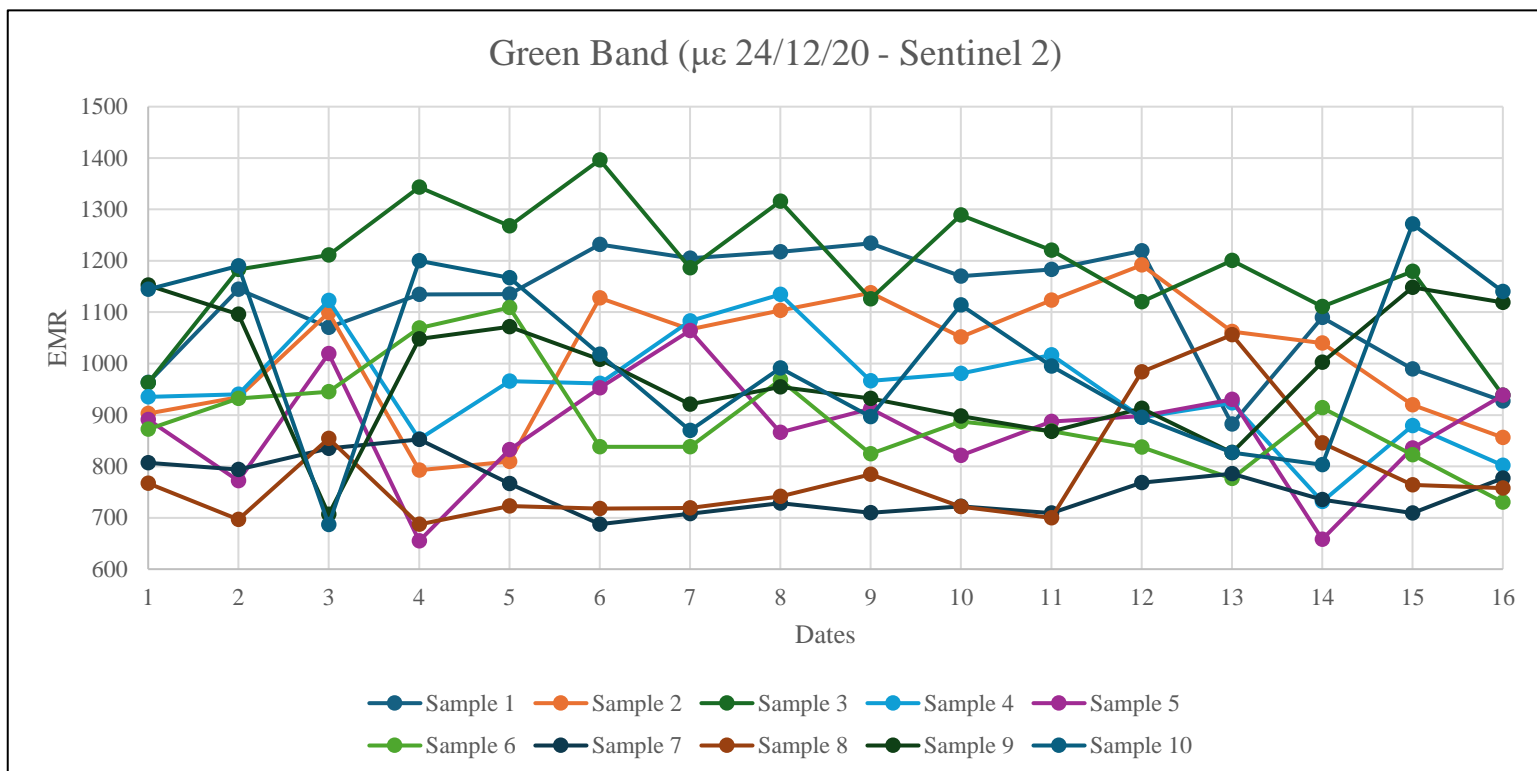
Επιπλέον, οι τιμές σε έξι Δείγματα των δύο απεικονίσεων στις 24 Δεκεμβρίου 2021 είναι ίδιες, με εξαίρεση το 5^ο και το 6^ο Δείγμα, όπου και η εικόνα Skysat καταγράφει τις υψηλότερες τιμές σε σχέση με την εικόνα Sentinel-2.

4.4.2.2 Πράσινο Κανάλι (Green Band)

Διάγραμμα 2α: Δειγματοληψία στο Πράσινο Κανάλι (1)



Διάγραμμα 2β: Δειγματοληψία στο Πράσινο Κανάλι (2)



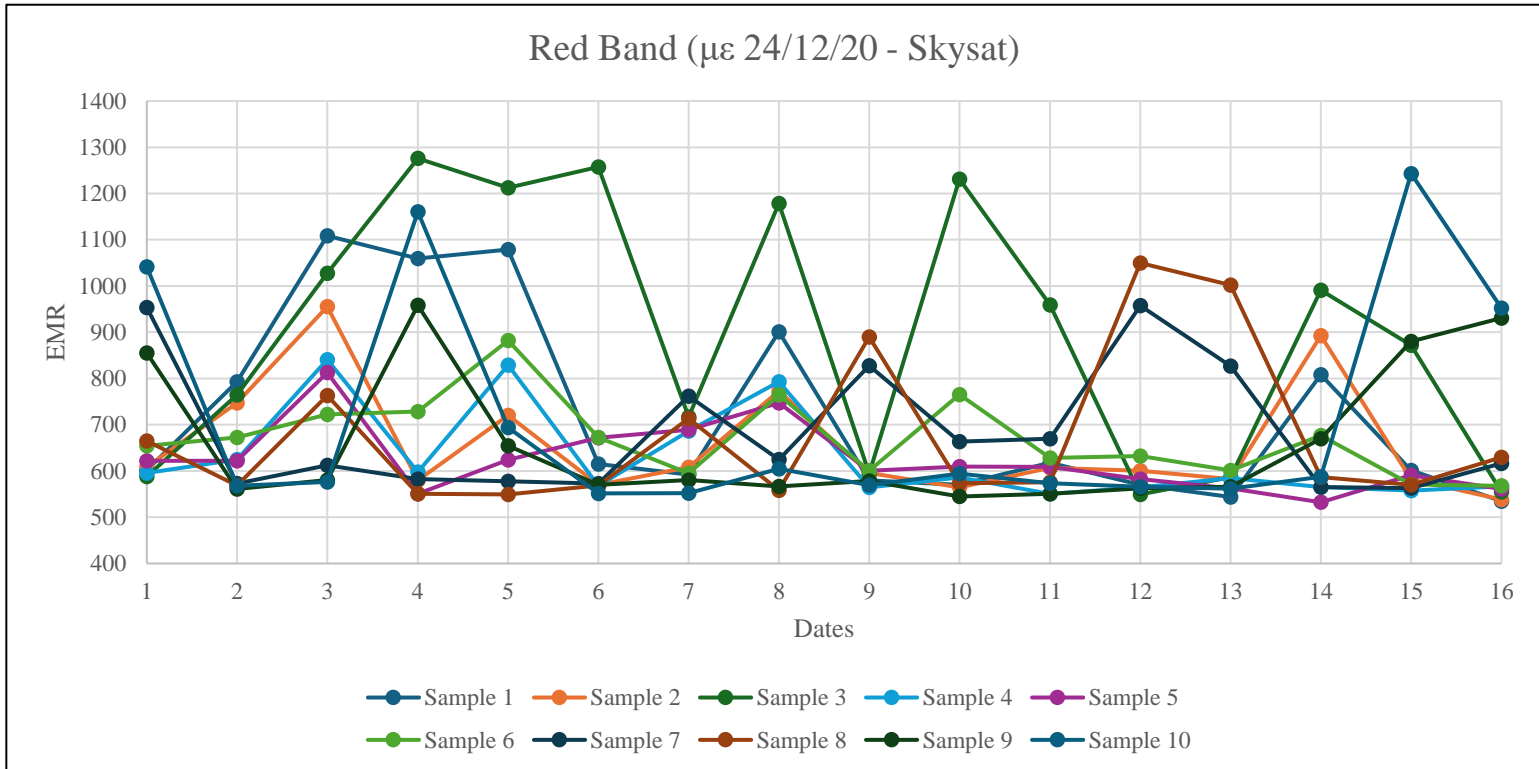
Σχολιασμός για το Πράσινο Κανάλι

Στο πράσινο κανάλι, όπως και στο μπλε, αναμένεται να υπάρχουν υψηλές τιμές ανακλαστικότητας στα καθαρά νερά. Σε αυτήν την περίπτωση, τα Διαγράμματα 4 και 5 δείχνουν ότι οι τιμές των δειγμάτων της χρονοσειράς κυμαίνονται από 700 έως 1400 nm, με εξαίρεση τα Δείγματα 9 και 10, όπου και οι χρονοσειρές ξεκινούν με τις χαμηλότερες τιμές. Ενώ τα Δείγματα 8 και 9 έχουν μερικές από τις χαμηλότερες τιμές σε όλη τη χρονοσειρά, το Δείγμα 6 εμφανίζει τακτικά υψηλές τιμές στο κέντρο της χρονοσειράς.

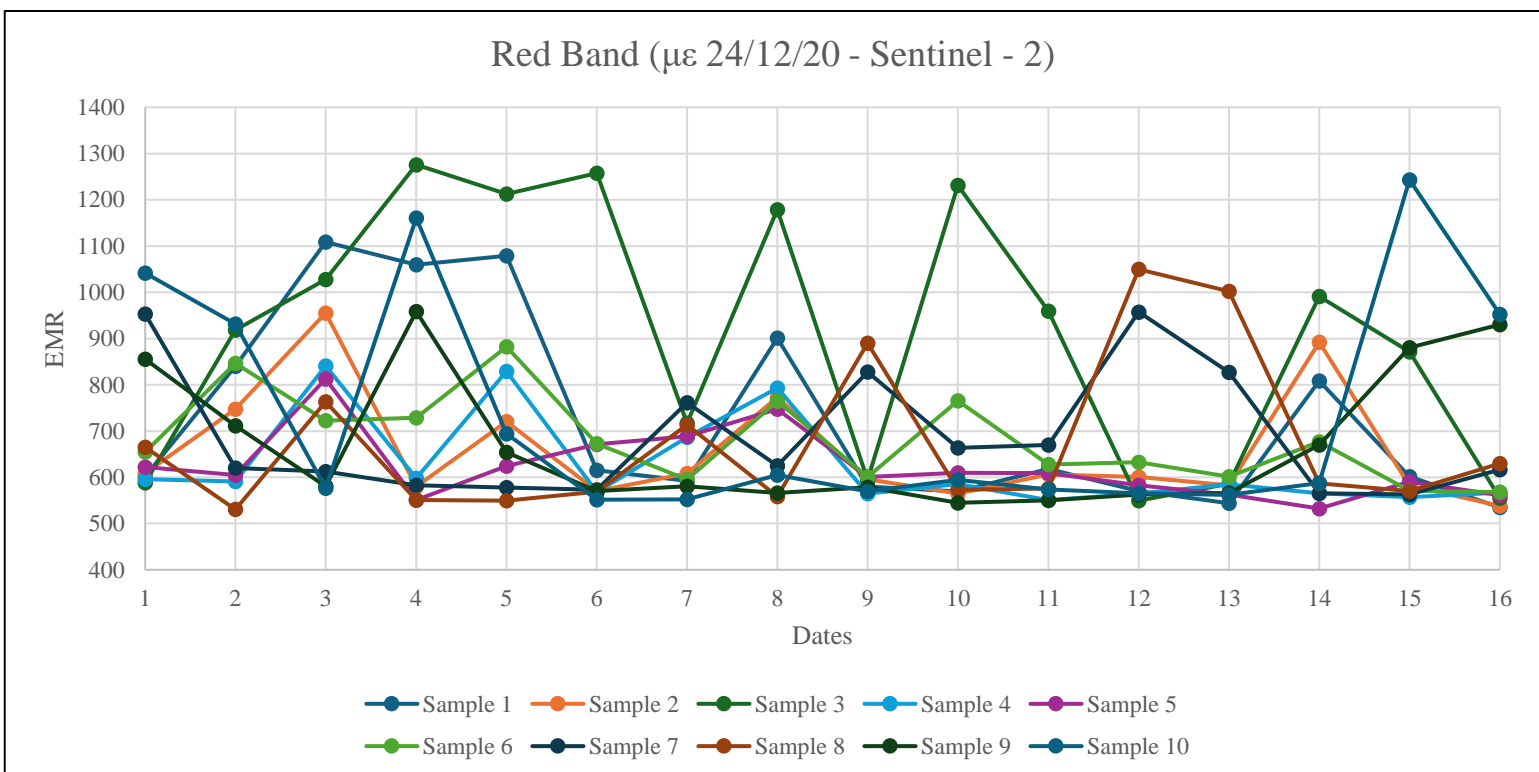
Οι δυο εικόνες στις 24 Δεκεμβρίου 2021 φαίνεται να έχουν παρόμοιες τιμές στα δείγματα τους. Ωστόσο στα Δείγματα 2, 4 και 9, η εικόνα Skysat έχει χαμηλότερες τιμές από την εικόνα Sentinel – 2, κάτι που δείχνει ότι υπάρχουν ελαφρές διακυμάνσεις που μπορεί να σχετίζονται με συγκεκριμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες εκείνη την ημέρα.

4.4.2.3 Κόκκινο Κανάλι (Red Band)

Διάγραμμα 3α: Δειγματοληψία στο Κόκκινο Κανάλι (1)



Διάγραμμα 3β: Δειγματοληψία στο Κόκκινο Κανάλι (2)



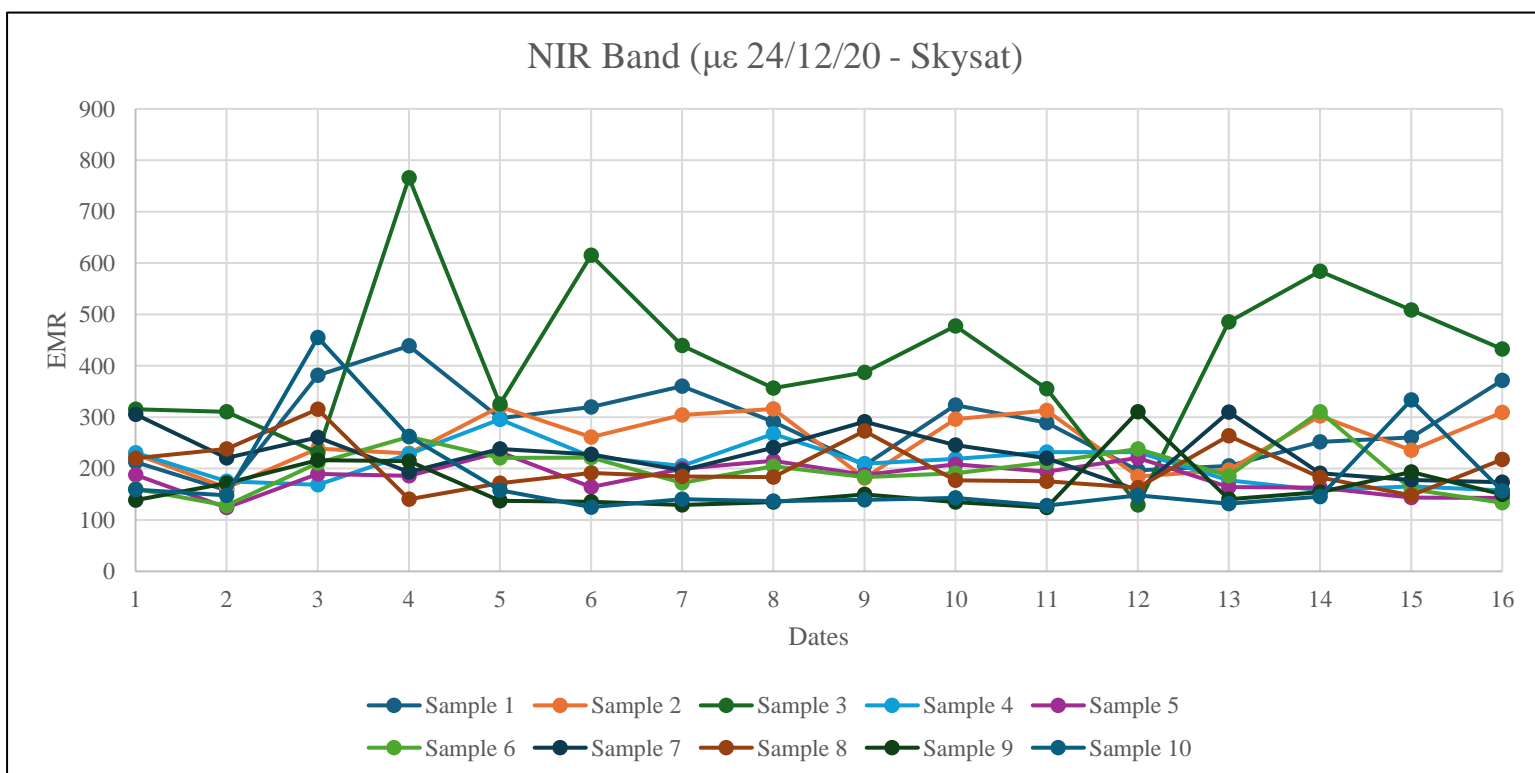
Σχολιασμός για το Κόκκινο Κανάλι

Τα διαγράμματα 6 και 7 στο κόκκινο κανάλι εμφανίζουν τιμές ανάκλασης κατά τη διάρκεια της χρονοσειράς, που εκτείνονται από 600 nm έως 1300 nm. Αναλυτικότερα, αυτό το κανάλι δείχνει κάποια αξιοσημείωτα "άλματα" στις τιμές του, σε αντίθεση με το μπλε και το πράσινο κανάλι όπου η πλειονότητα των ημερομηνιών και των δειγμάτων περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος. Το Δείγμα 3 είναι ιδιαίτερα σημαντικό, με τιμές περίπου στα 1250 nm από τις 28 Ιανουαρίου 2021 (Sentinel – 2) έως τις 18 Φεβρουαρίου 2021 (Skysat) και ξανά στις 23 Φεβρουαρίου 2021 (Skysat) και στις 4 Μαρτίου 2021 (Sentinel-2). Τα Δείγματα 1 και 10 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, αν και λιγότερο έντονη. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, τα δείγματα εμφανίζουν διαφορετικές διακυμάνσεις ανακλαστικότητας κατά τη διάρκεια της χρονοσειράς σε όλη την περιοχή έρευνας. Είναι αξιοσημείωτο, επομένως, ότι η πλειονότητα των επιπέδων ακτινοβολίας του τριμήνου βρίσκεται μεταξύ 600 και 900 nm.

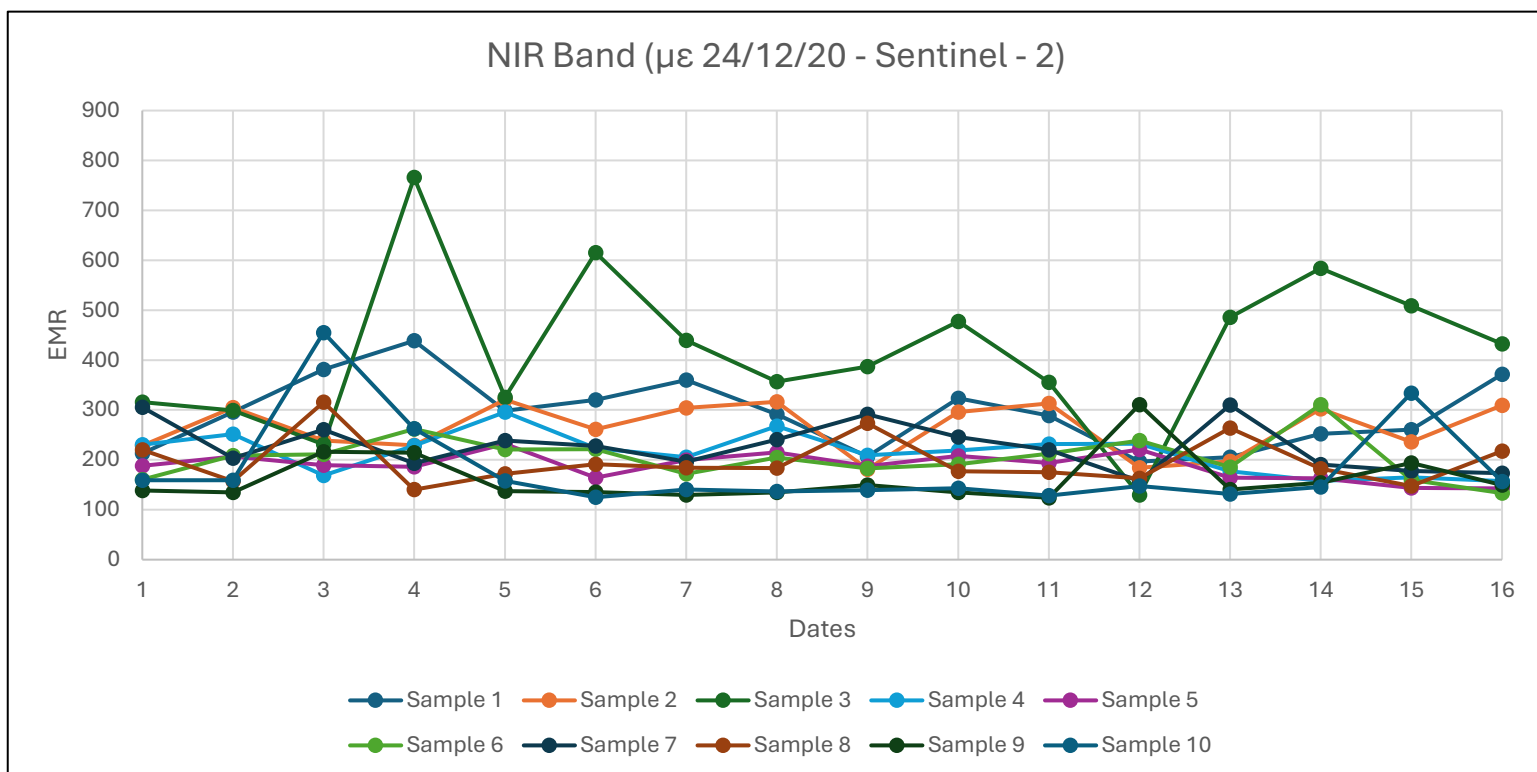
Τέλος, υπάρχουν διαφορές στις δύο απεικονίσεις που τραβήχτηκαν στις 24 Δεκεμβρίου 2020. Πιο συγκεκριμένα, οι διαφορές μεταξύ της εικόνας Sentinel – 2 (550 nm έως 950 nm) και της εικόνας Skysat (550 nm έως 800 nm) την ίδια ημέρα πιθανότατα προκαλούνται από το περιβάλλον.

4.4.2.4 Κανάλι στο Εγγύς Υπέρυθρο (NIR Band)

Διάγραμμα 4α: Δειγματοληψία στο Εγγύς Υπέρυθρο Κανάλι (1)



Διάγραμμα 4β: Δειγματοληψία στο Εγγύς Υπέρυθρο Κανάλι (2)



Σχολιασμός για το Κανάλι στο Εγγύς Υπέρυθρο

Είναι γνωστό ότι το νερό απορροφά την υπέρυθη ακτινοβολία στο εγγύς υπέρυθρο, που είναι περίπου 830 nm και ως αποτέλεσμα, τα δείγματα του καθαρού νερού έχουν χαμηλές τιμές ανάκλασης. Στην παρούσα περίπτωση, οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 150 και 300 nm κατά τη διάρκεια της χρονοσειράς, η οποία είναι μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη για το καθαρό νερό. Είναι ενδιαφέρον ότι το Δείγμα 3 δείχνει μια σημαντική απόκλιση από τις υπόλοιπες χρονοσειρές, με υψηλότερα επίπεδα ανάκλασης (500 nm έως 750 nm) ξεκινώντας από τις 28 Ιανουαρίου 2021 (Sentinel – 2). Σε σύγκριση με τα άλλα Κανάλια, το 4^ο Κανάλι εμφανίζει μια πιο εμφανή συγκέντρωση τιμών σε ένα σχετικά μικρό εύρος. Η μέτρια διασπορά του δείγματος και οι αμελητέες αποκλίσεις προς το τέλος της χρονοσειράς δείχνουν σταθερές ποιότητες νερού.

Σε σύγκριση με τα άλλα τρία κανάλια, το κανάλι αυτό, δείχνει μεγαλύτερη ομοιότητα μεταξύ των δύο απεικονίσεων που τραβήχτηκαν στις 24 Δεκεμβρίου 2020. Οι μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δειγμάτων δείχνουν τη σταθερότητα των μετρήσεων ανάκλασης κοντά στο υπέρυθρο στην περιοχή μελέτης και υποδηλώνουν ότι ο Skysat και ο Sentinel – 2 παράγουν αξιόπιστες μετρήσεις σε αυτό το φασματικό εύρος.

4.4.2.5 Γενικός Σχολιασμός των Καναλιών

Η εξέταση της ανάκλασης στα φασματικά κανάλια του μπλε, του πράσινου, του κόκκινου και του εγγύς υπέρυθρου, αποδίδει μια αρχική κατανόηση των οπτικών χαρακτηριστικών των υδάτινων περιβαλλόντων. Είναι σαφές από την αξιολόγηση των δεδομένων που συλλέχθηκαν με την πάροδο του χρόνου από διάφορα δείγματα ότι διάφοροι παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του ιζήματος, της παρουσίας φυκιών και άλλων συστατικών του νερού, μπορεί να έχουν επίδραση στην καθαρότητα και τη σύνθεση του νερού. Αναλυτικότερα, οι τιμές ανάκλασης στο μπλε και πράσινο κανάλι (που αντιπροσωπεύουν ισχυρή μεταφορά ενέργειας σε καθαρό νερό), ποικίλλουν κατά τη διάρκεια της χρονοσειράς. Αυτό δείχνει ότι η καθαρότητα του νερού αυξομειώνεται, είτε ως αποτέλεσμα των μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών παραγόντων είτε ως αποτέλεσμα της αλλαγής της ποιότητας του νερού. Πιο έντονα άλματα ανάκλασης εμφανίζονται στο κόκκινο κανάλι, το οποίο συνδέεται με την διαλυμένη οργανική ύλη και την χλωροφύλλη. Παραδόξως, υπάρχει ένα συνεχές εύρος τιμών ανάκλασης στο κανάλι κοντά στο υπέρυθρο, το οποίο γενικά απορροφάται από το νερό, με σημαντικές ανωμαλίες σε ορισμένα δείγματα.

Από την μια, τα επίπεδα ανάκλασης στο μπλε κανάλι κυμαίνονται από 550 έως 1100 nm, κάτι που υποδηλώνει ότι η διαύγεια του νερού είναι μέτρια. Στο μέσο της χρονικής περιόδου (από 28 Ιανουαρίου έως και 22 Φεβρουαρίου 2021), το Δείγμα 3, το οποίο βρίσκεται στην όχθη του ποταμού, παρουσιάζει υψηλότερες τιμές, υποδεικνύοντας τοπικές αλλαγές στη διαύγεια του νερού. Τα Δείγματα 7 και 8 που βρίσκονται στο κέντρο Περιοχής Μελέτης, έχουν τις χαμηλότερες τιμές μέχρι τις 4 Μαρτίου 2021, υποδηλώνοντας ότι το νερό σε αυτά τα δείγματα είναι συγκριτικά πιο καθαρό ή ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι διαφορετικές. Οι χαμηλότερες τιμές στην αρχή της χρονοσειράς υποδεικνύουν καθαρότερο νερό με την πάροδο του χρόνου στο πράσινο κανάλι, όπου οι τιμές κυμαίνονται από 700 έως 1400 nm. Ωστόσο, ενώ τα Δείγματα 8 και 9 παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές, υποδεικνύοντας την μεταβαλλόμενη ποιότητα του νερού, το Δείγμα 6 εμφανίζει υψηλές τιμές στο μέσο της χρονικής περιόδου, υποδηλώνοντας αλλοιωμένες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Από την άλλη, οι τιμές ανάκλασης του κόκκινου καναλιού, που παρουσιάζουν μεγάλα άλματα μεταξύ του 600 και του 1300 nm, υποδηλώνουν ότι τα στοιχεία του νερού αλλάζουν δυναμικά. Κατά τη διάρκεια της περιόδου 28 Ιανουαρίου έως και 4 Μαρτίου 2021, το Δείγμα 3 έχει υψηλές τιμές (περίπου 1250 nm), οι οποίες θα μπορούσαν να αποδοθούν σε υψηλότερα επίπεδα χλωροφύλλης ή διαλυμένης οργανικής ύλης, ενώ τα Δείγματα 1 και 10 δείχνουν υψηλές τιμές σε κάποιες χρονικές στιγμές. Οι χαμηλές τιμές ανάκλασης (μεταξύ 150 και 300 nm) στο εγγύς υπέρυθρο φάσμα είναι ενδεικτικές του καθαρού νερού, ενώ παράλληλα το Δείγμα 3 εμφανίζει μεγαλύτερες τιμές (500 – 750 nm) μετά τις 28 Ιανουαρίου 2021, οι οποίες θα μπορούσαν να είναι το αποτέλεσμα περισσότερων αιωρούμενων σωματιδίων.

Τέλος, κατά τη σύγκριση των απεικονίσεων SkySat με τις αντίστοιχες εικόνες Sentinel – 2 στις 24 Δεκεμβρίου 2021, αποκαλύπτεται ότι για ορισμένα δείγματα, οι εικόνες Skysat έχουν συχνά μεγαλύτερες τιμές στο μπλε κανάλι και χαμηλότερες τιμές στο πράσινο κανάλι, υποδηλώνοντας μέτριες διακυμάνσεις στην ευαισθησία του αισθητήρα. Το εγγύς υπέρυθρο κανάλι, δείχνει τη μεγαλύτερη ομοιότητα μεταξύ των απεικονίσεων SkySat και Sentinel – 2, ενώ το κόκκινο κανάλι παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές την ίδια ημέρα.

4.4.3 Τελική Επιλογή των Καταλληλότερων Φασματικών Δεικτών

4.4.3.1 Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Χλωροφύλλης – α: NDCI

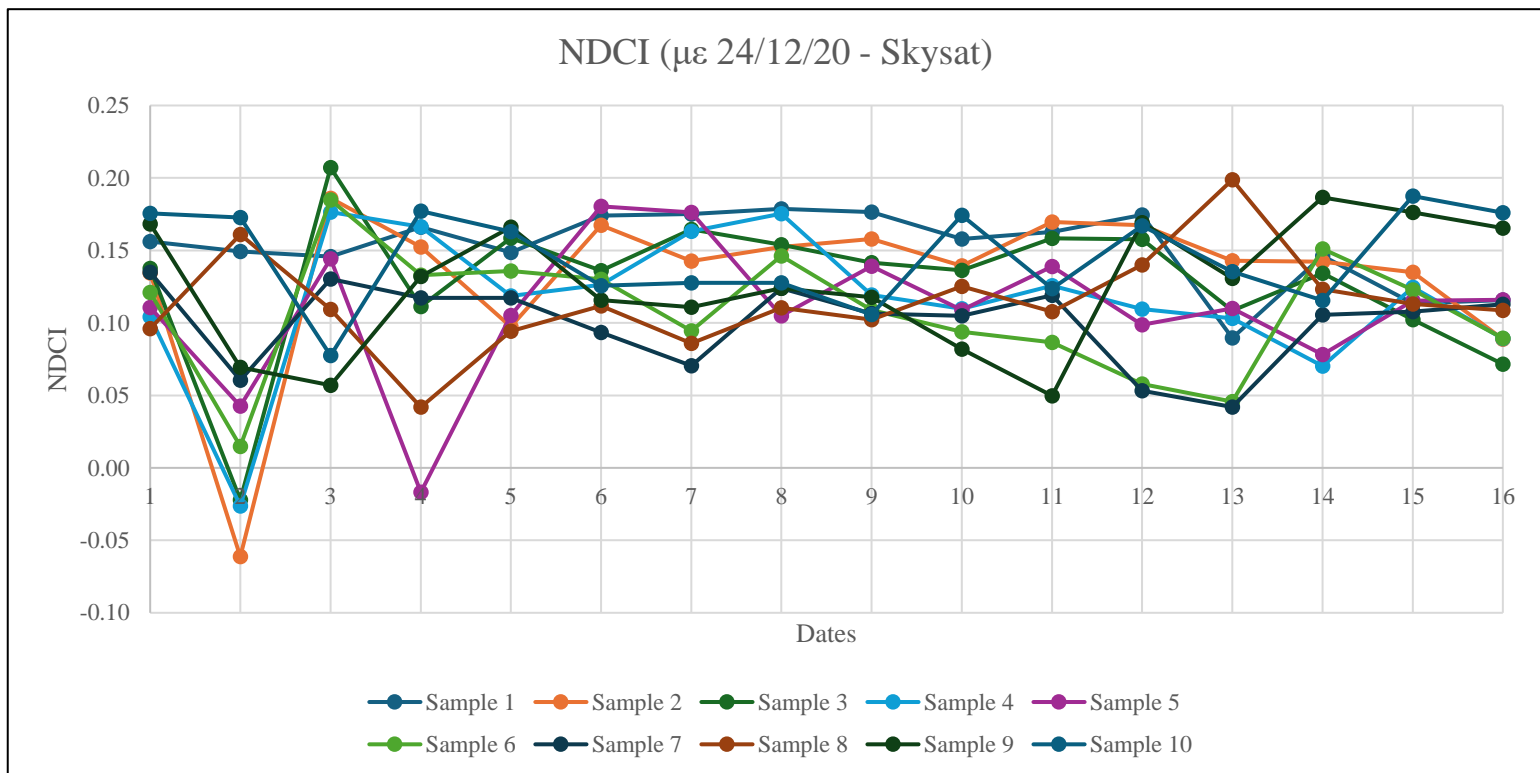
Ο πρώτος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε, ήταν της Κανονικοποιημένης Διαφοράς της Χλωροφύλλης – α, ο οποίος χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης χλωροφύλλης – α σε θολά παραγωγικά ύδατα εκβολών ποταμών και παράκτιων ποταμών.

$$\text{NDCI} = \frac{\text{Green-Blue}}{\text{Green+Blue}}$$

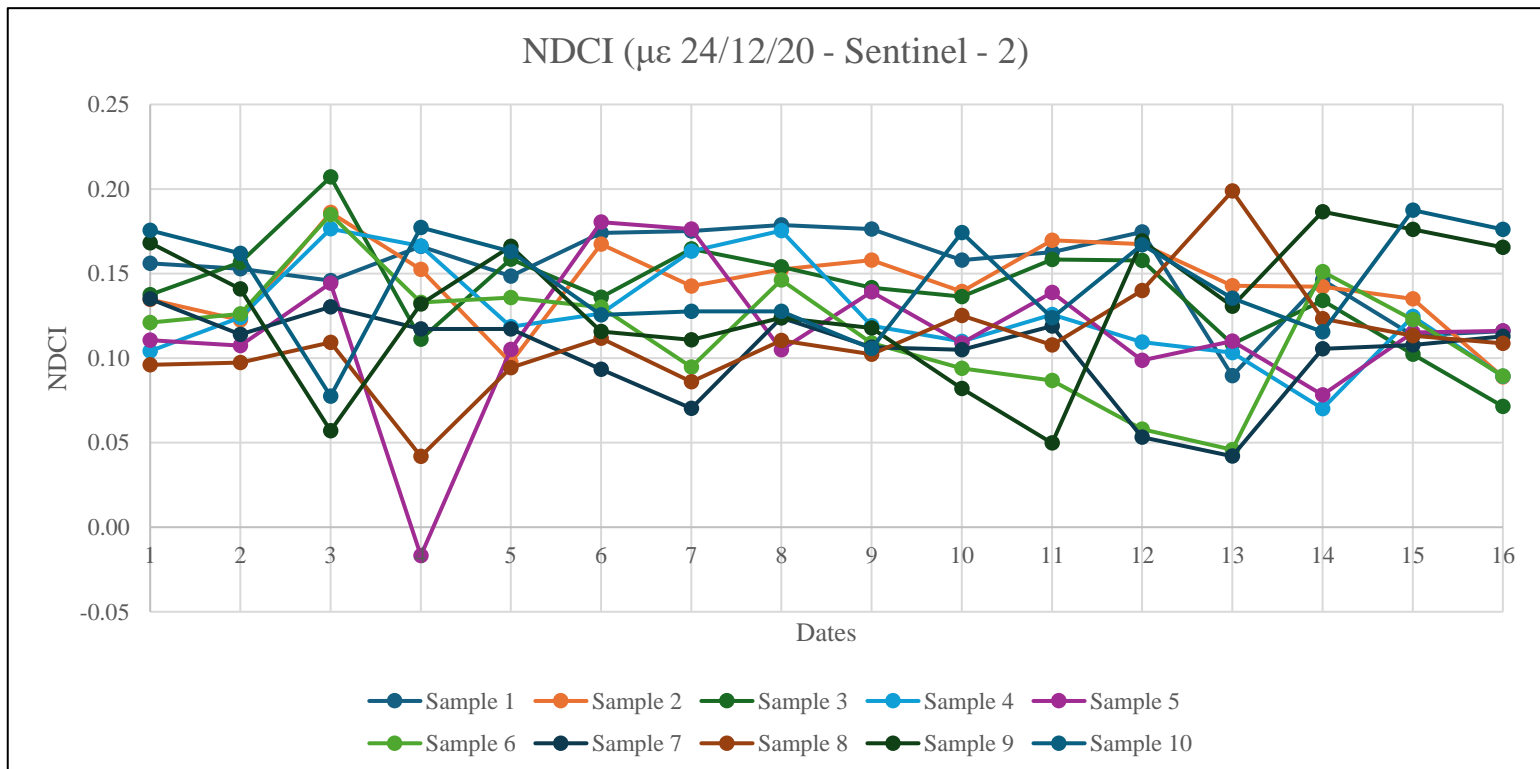
Οι τιμές του NDCI κυμαίνονται από -1 έως +1, με τις υψηλές θετικές τιμές να υποδεικνύουν σημάδι ευτροφισμού και κακή ποιότητα νερού, λόγω της μεγάλης συγκέντρωση χλωροφύλλης - A (δηλ. φυτοπλαγκτόν). Οι χαμηλές θετικές τιμές υποδεικνύουν παρουσία χλωροφύλλης - A, αλλά σε μικρότερες συγκεντρώσεις, κάτι που είναι χαρακτηριστικό **καθαρών ή λιγότερων παραγωγικών νερών**. Οι τιμές κοντά στο μηδέν, δηλώνουν ίση ανάκλιση σε μπλε και πράσινες μπάντες και υποδηλώνουν απουσία χλωροφύλλης A ή πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Συνήθως παρατηρείται σε καθαρά ή ανοιχτά νερά. Τέλος, οι αρνητικές τιμές δηλώνουν παρουσία ουσιών που απορροφούν φως στο πράσινο κανάλι (όχι στο μπλε) και συνδέονται με **μη υγιείς** συγκεντρώσεις φυτοπλαγκτόν σε ύδατα.

Διαγράμματα NDCI

Διάγραμμα 5α: Δειγματοληψία στο NDCI (1)



Διάγραμμα 5β: Δειγματοληψία στο NDCI (2)



Σχολιασμός Διαγραμμάτων NDCI

Σε γενικές γραμμές, όλα τα δείγματα στη πλειοψηφία των εικόνων έχουν χαμηλές θετικές τιμές, οι οποίες φτάνουν μέχρι το 0,2. Αυτό υποδεικνύει ότι στις συγκεκριμένες περιοχές υπάρχει παρουσία χλωροφύλλης - α, αλλά σε μικρές συγκεντρώσεις, κάτι που χαρακτηρίζει αυτές τις περιοχές σχετικά καθαρές. Εξαιρέση αποτελεί η Εικόνα 2: 24 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat όπου κάποια δείγματα έχουν είτε τιμές κοντά στο μηδέν, είτε πολύ χαμηλές αρνητικές τιμές. Σε γενικές γραμμές τα δείγματα δεν έχουν αρκετά υψηλές τιμές (είτε θετικές, είτε αρνητικές) για να θεωρηθεί η περιοχή ευτροφισμένη και κακής ποιότητας. Ακόμα, παρατηρείται σχεδόν σε όλες τις εικόνες ότι τα δείγματα βρίσκονται σε ένα πολύ συγκεκριμένο εύρος τιμών μεταξύ τους, κάτι που δείχνει ότι δεν υπάρχουν μεταβολές του NDCI στην έκταση της Περιοχής Μελέτης. Αυτό δεν ισχύει για την Εικόνα 2: 24 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat και την Εικόνα 4: 28 Ιανουαρίου 2021 - Sentinel 2, όπου και υπάρχει μεγαλύτερη διασπορά των δειγμάτων. Τέλος, η Εικόνα 2: 24 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat και η Εικόνα 2: 24 Δεκεμβρίου 2020 – Sentinel 2 δεν ταυτίζονται στις τιμές του NDCI, με την δεύτερη να έχει θετικές τιμές στα δείγματα της, ενώ η πρώτη έχει μεγαλύτερη διασπορά και στις αρνητικές τιμές του φάσματος.

4.4.3.2 Δείκτης Ιζημάτων: SI

Ο δεύτερος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε, ήταν ο Δείκτης Ιζημάτων, ο οποίος χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της συγκέντρωσης ιζημάτων σε υδάτινες περιοχές

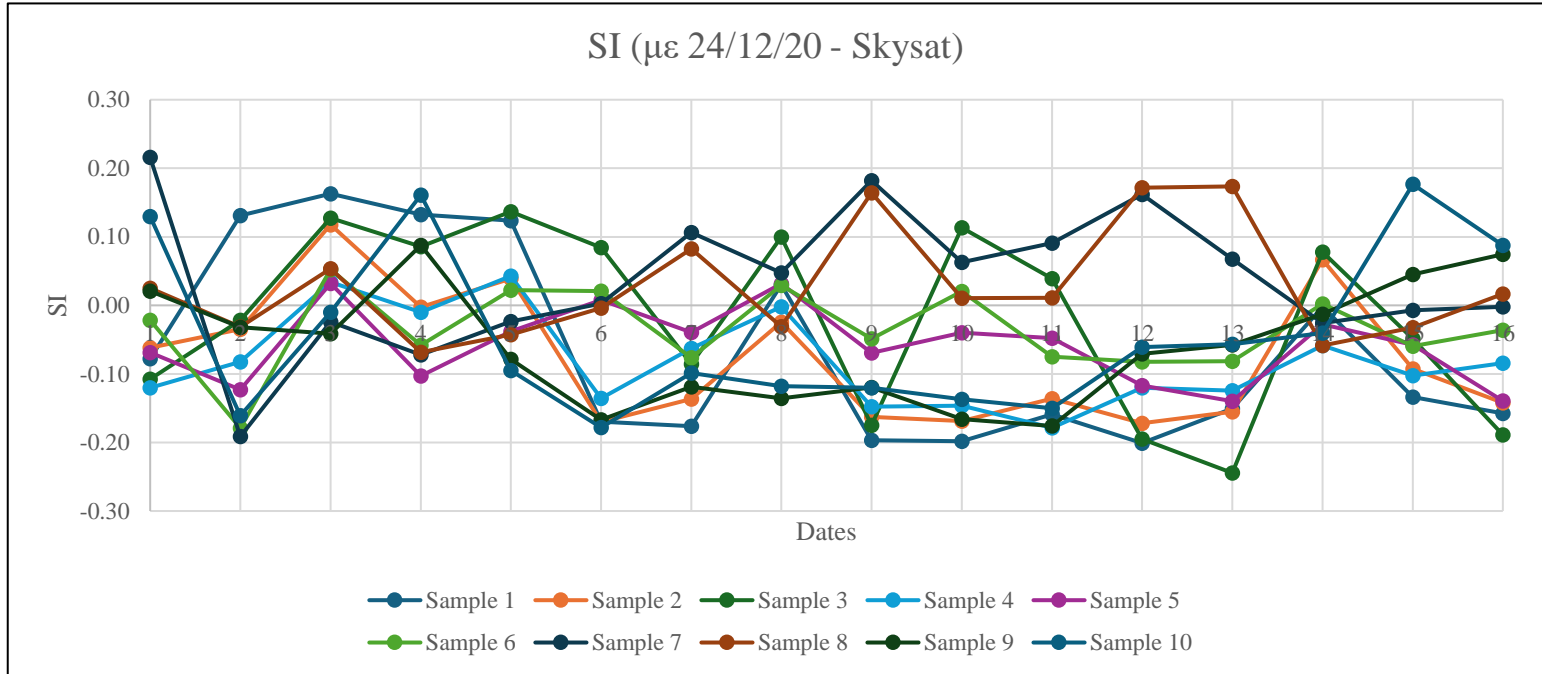
$$SI = \frac{\text{Red-Blue}}{\text{Red+Blue}}$$

Οι τιμές του SI κυμαίνονται από -1 έως +1, με τις υψηλές θετικές τιμές να υποδεικνύουν καθαρό νερό με χαμηλή θολότητα, δηλαδή πόσιμο νερό με λίγα ιζήματα και σχετικά διάφανο. Οι τιμές κοντά στο μηδέν, δηλώνουν μια ενδιάμεση θολότητα και υπάρχει πιθανότητα ιζημάτων, αλλά δεν κάνουν το νερό ούτε πολύ θολό ούτε πολύ καθαρό. Τέλος, οι αρνητικές τιμές δηλώνουν παρουσία ιζημάτων που κάνουν το νερό θολό και πιθανώς με λάσπη.

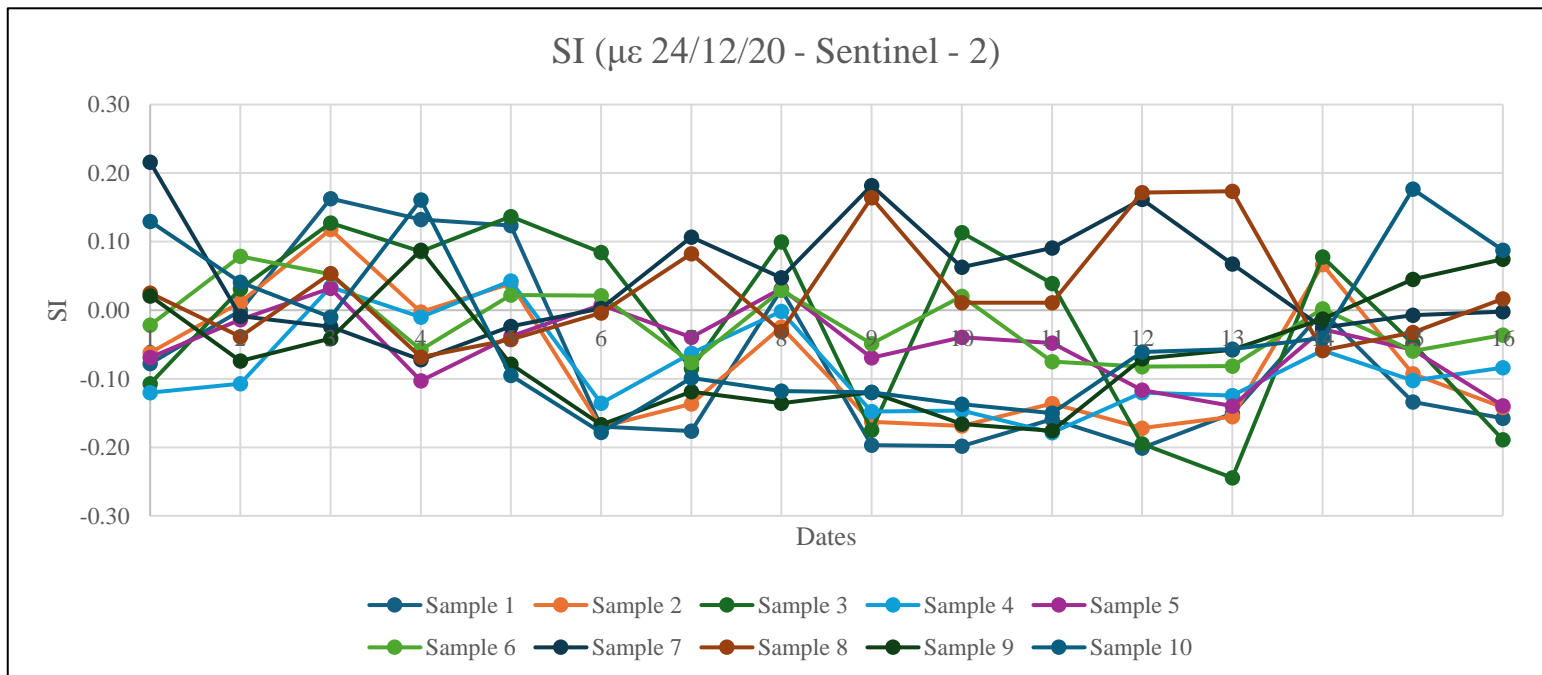
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, το Μπλε κανάλι είναι περισσότερο ευαίσθητο στα ύδατα, ενώ αντίθετα το Κόκκινο κανάλι είναι πιο ευαίσθητο στα ιζήματα μέσα στο νερό.

Διαγράμματα SI

Διάγραμμα 6α: Δειγματοληψία στο SI (1)



Διάγραμμα 6β: Δειγματοληψία στο SI (2)



Σχολιασμός Διαγραμμάτων SI

Σε αντίθεση με τον προηγούμενο δείκτη, εδώ παρατηρούμε μεγαλύτερες μεταβολές στις τιμές του SI στο βάθος της χρονοσειράς. Υπάρχουν τόσο θετικές τιμές, οι οποίες φτάνουν μέχρι και το 0.2, αλλά και αρκετές αρνητικές τιμές οι οποίες είναι κατά απόλυτη τιμή ίσες με τις αντίστοιχες μέγιστες θετικές. Εδώ παρατηρείται ότι υπάρχει μια αλλαγή στο ύφος του νερού, τόσο στο εύρος της Περιοχής Μελέτης, αλλά και στο πέρας του τριμήνου. Σημαντικό είναι να αναφερθεί η φύση των τιμών στην 14^η Εικόνα: 24 Μαρτίου 2021 – Skysat, όπου τα δείγματα συσσωρεύονται κοντά στο μηδέν, όπου είναι γνωστό ότι αυτό δηλώνει μια ενδιάμεση θολότητα και υπάρχει πιθανότητα ιζημάτων.

4.4.3.3 Άλλοι Φασματικοί Δείκτες

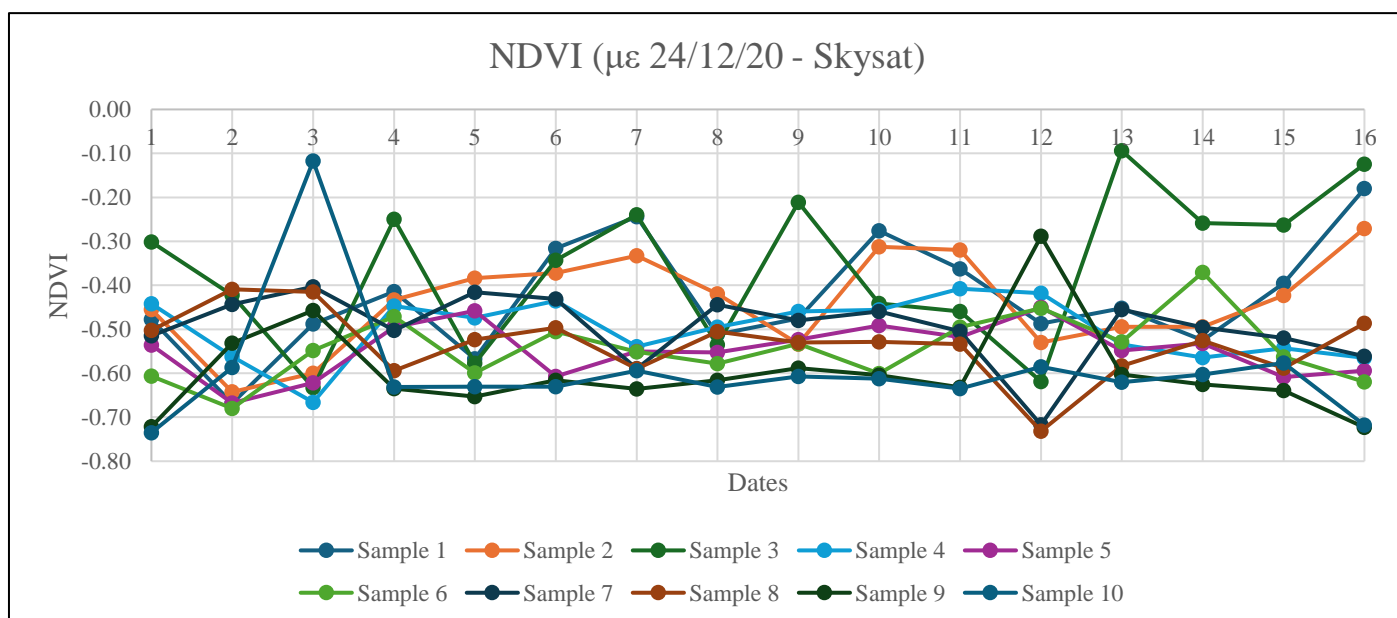
4.4.3.3.1 Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς: NDVI

Ο τρίτος δείκτης που χρησιμοποιήθηκε, ήταν της Κανονικοποιημένης Διαφοράς της Βλάστησης, ο οποίος αναδεικνύει την ένταση της βλάστησης στην επιφάνεια της γης:

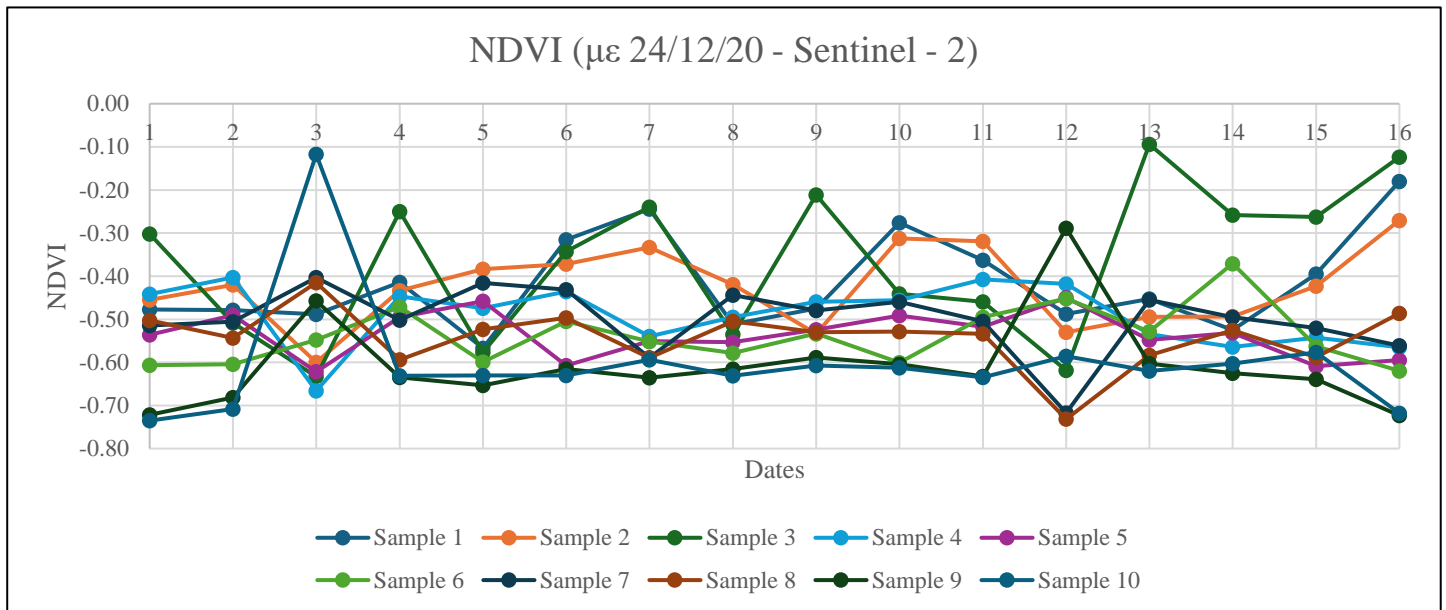
$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red}}$$

Ο NDVI έχει συνδεθεί με τον «δείκτη φυλλικής επιφάνειας», που χρησιμοποιείται σε μοντέλα ανάπτυξης καλλιεργειών πράσινης βιομάζας. Οι τιμές του NDVI κυμαίνονται από -1 έως +1, με την υγιή βλάστηση να έχει συνήθως τιμές μεταξύ 0,2 και 0,9, με τις υψηλότερες τιμές να υποδηλώνουν πυκνότερη και υγιέστερη βλάστηση. Τέλος, αναμένεται στα υδάτινα σώματα, οι τιμές να είναι είτε αρνητικές, είτε πολύ χαμηλές θετικές.

Διάγραμμα 7α: Δειγματοληψία στο NDVI (1)



Διάγραμμα 7β: Δειγματοληψία στο NDVI (2)



Σχολιασμός Διαγραμμάτων NDVI

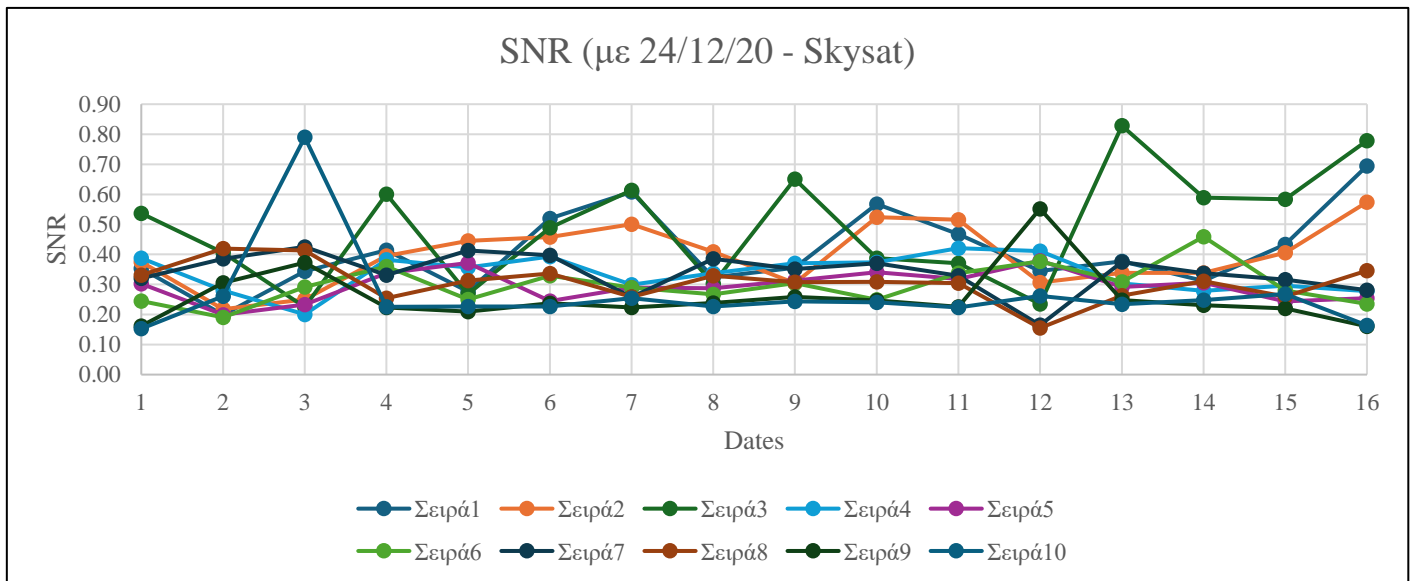
Όλα τα δείγματα, έχουν παρθεί από τα νερά του ποταμού, οπότε αναμένεται ότι οι τιμές του NDVI να είναι είτε αρνητικές, είτε μεταξύ 0 και 0,2. Αυτό επιβεβαιώνεται σε όλες τις εικόνες, μιας και όλα τα δείγματα σε όλη την χρονοσειρά έχουν τιμές κάτω του -0.1. Οι τιμές μεταξύ -1 και 0 που υπάρχουν σε όλες σχεδόν τις εικόνες και στα δείγματα τους, υποδεικνύουν νερό, νεκρά φυτά ή ανόργανα αντικείμενα.

4.4.3.3.2 Λόγος NIR/Red: SNR

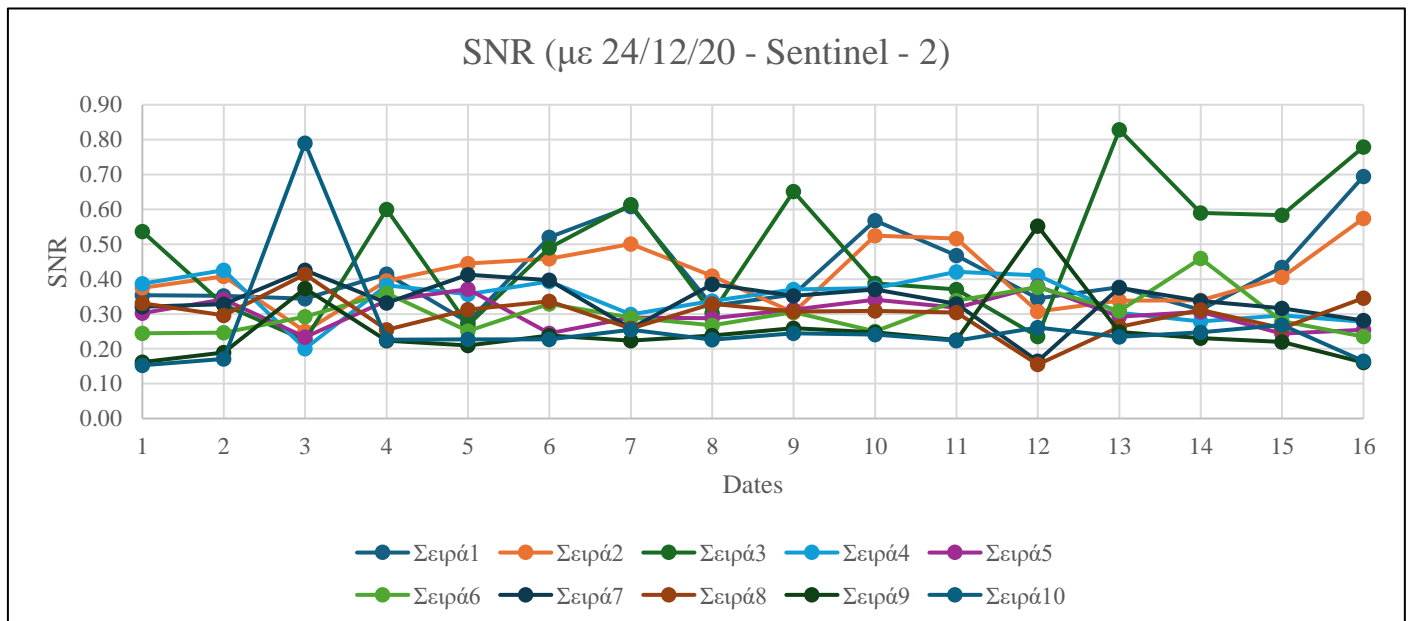
$$\text{SNR} = \frac{\text{NIR}}{\text{Red}}$$

Οι τιμές του λόγου που είναι μεγαλύτερες του 1 δηλώνουν υγιή και πυκνή παρουσία βλάστησης. Οι τιμές μεταξύ 0,5 και 1, υποδηλώνουν μέτρια βλάστηση, ενώ οι τιμές του SNR από 0 έως 0,5 υποδεικνύουν αραιή ή καταπονημένη βλάστηση ή επιφάνειες χωρίς βλάστηση. Τέλος, άμα το SNR είναι αρνητικό, τότε αυτό σημαίνει ότι είτε υπάρχει λάθος βαθμονόμησης της εικόνας, είτε ότι η περιοχή είναι υδάτινη με ισχυρή απορρόφηση στην κόκκινη ζώνη, είτε ότι το δείγμα πάρθηκε από εξειδικευμένη επιφάνεια με μοναδικές φασματικές ιδιότητες.

Διάγραμμα 6α: Δειγματοληψία στο SNR (1)



Διάγραμμα 6β: Δειγματοληψία στο SNR (2)



Σχολιασμός Διαγραμμάτων SNR

Αρχικά, παρατηρείται ότι καμία τιμή του λόγου δεν είναι ούτε αρνητική, ούτε μεγαλύτερη του +1, με όλες τις τιμές να περιορίζονται μεταξύ του 0,2 και του 0,6. Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή αποτελείται είτε από αραιή βλάστηση είτε από καθόλου βλάστηση. Ωστόσο, το Δείγμα 3 στην Εικόνα 3: 28 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat, στην Εικόνα 13: 17 Μαρτίου 2021 – Skysat και στην Εικόνα 16: 30 Μαρτίου 2021 – Skysat, έχει τιμές περίξ του 0,8, κάτι που υποδηλώνει μέτρια

βλάστηση. Και εδώ, παρατηρείται μια συσσώρευση των δειγμάτων, με τις τιμές τους να μην διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό, με την πλειοψηφία να περιορίζεται σε ένα διάστημα 0.2 μονάδων. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει σχετική ομοιομορφία στην περιοχή μελέτης, χωρίς έντονες εναλλαγές στην φύση του νερού. Η διαφορά στις δυο εικόνες στις 24 Δεκεμβρίου 2021 είναι σχεδόν ανεπαίσθητη.

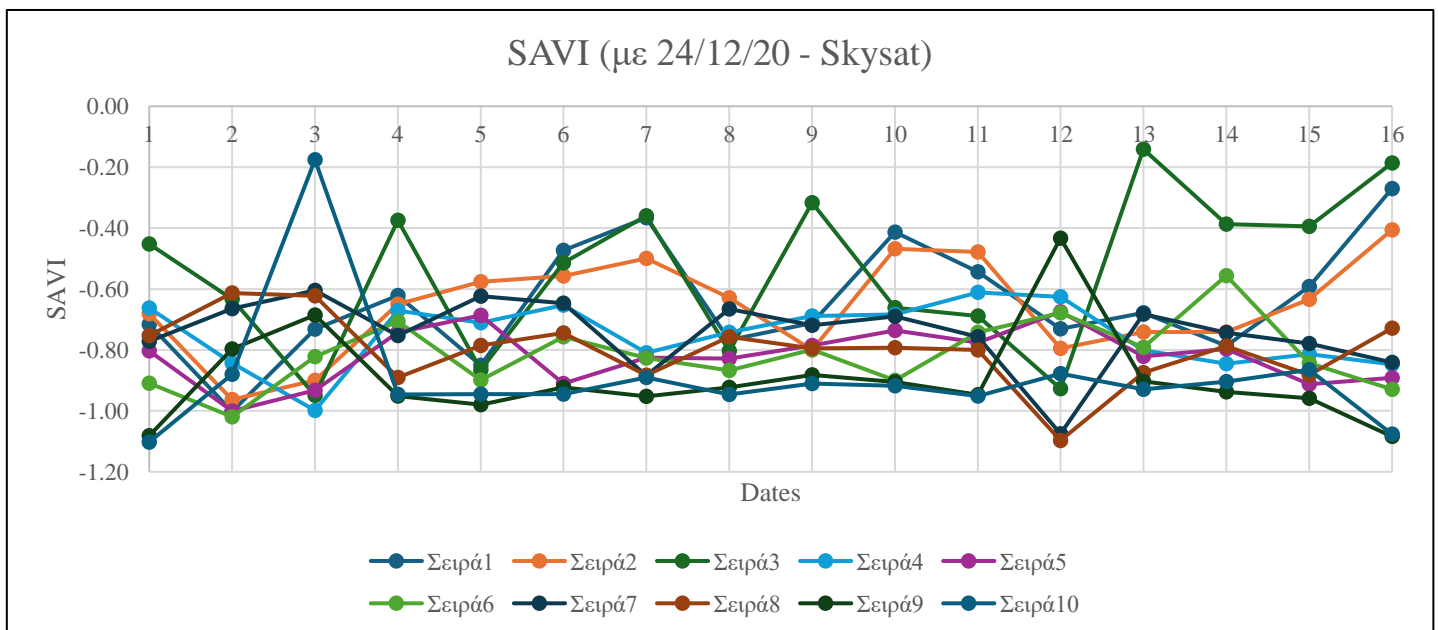
4.4.3.3 Δείκτης Εδαφικής Βλάστησης: SAVI

Ο δείκτης SAVI είναι παρόμοιος με τον NDVI, αλλά επιχειρεί να διορθώσει την επίδραση της φωτεινότητας του εδάφους στις τιμές του δείκτη βλάστησης. Χρησιμοποιεί έναν παράγοντα προσαρμογής φόντου θόλου, L, ο οποίος είναι συνάρτηση της πυκνότητας της βλάστησης και συχνά απαιτεί προηγούμενη γνώση των ποσοτήτων βλάστησης. Χρησιμοποιείται καλύτερα σε περιοχές με σχετικά αραιή βλάστηση όπου το έδαφος είναι ορατό μέσω του θόλου.

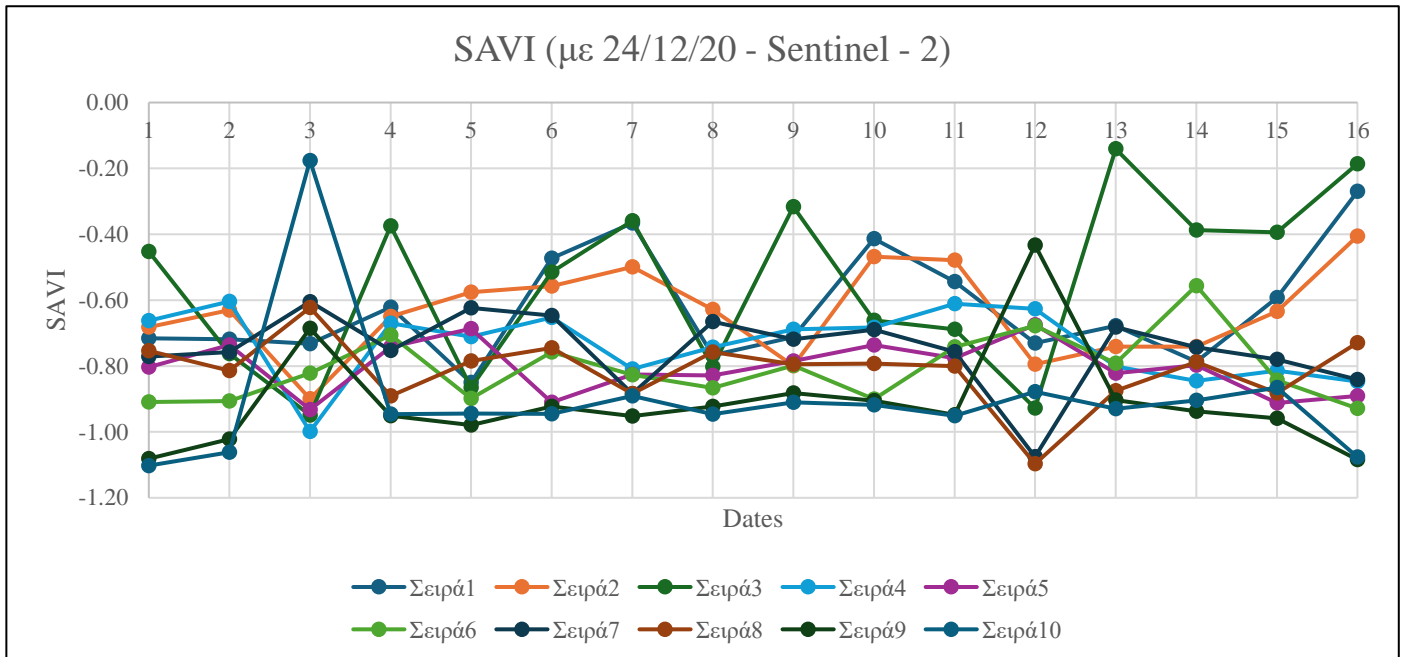
$$SAVI = 1.5 * \frac{NIR - Red}{NIR + Red + 0.5}$$

Οι υψηλές θετικές τιμές SAVI υποδηλώνουν υγιή βλάστηση, ενώ η χαμηλές ή αρνητικές τιμές μπορεί να υποδηλώνουν αραιή βλάστηση ή επιφάνειες χωρίς βλάστηση.

Διάγραμμα 7α: Δειγματοληψία στο SAVI (1)



Διάγραμμα 7β: Δειγματοληψία στο SAVI (2)



Σχολιασμός Διαγραμμάτων SAVI

Όπως είναι αναμενόμενο, όλες οι τιμές των δειγμάτων της χρονοσειράς έχουν αρνητικές τιμές, κάτι που υποδεικνύει ότι η περιοχή έχει αραιή ή καθόλου βλάστηση. Σε κάποιες περιπτώσεις όπως στο Δείγμα 10 στην Εικόνα 3: 28 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat και στο Δείγμα 3, στο Δείγμα 1 και στο Δείγμα 2 στην Εικόνα 13: 24 Μαρτίου 2021 – Skysat και στην Εικόνα 16: 30 Μαρτίου 2021 – Skysat, οι τιμές του SAVI είναι σχετικά κοντά στο μηδέν, αλλά ακόμα έχουν αρνητική τιμή (~ -0.2). Στον συγκεκριμένο δείκτη παρουσιάζονται μεγαλύτερες μεταβολές και μεγαλύτερη διασπορά των τιμών. Δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συγκεκριμένο συμπέρασμα για την φύση των νερών. Και εδώ η διαφορά στις δυο εικόνες στις 24 Δεκεμβρίου 2021 είναι σχεδόν ανεπαίσθητη.

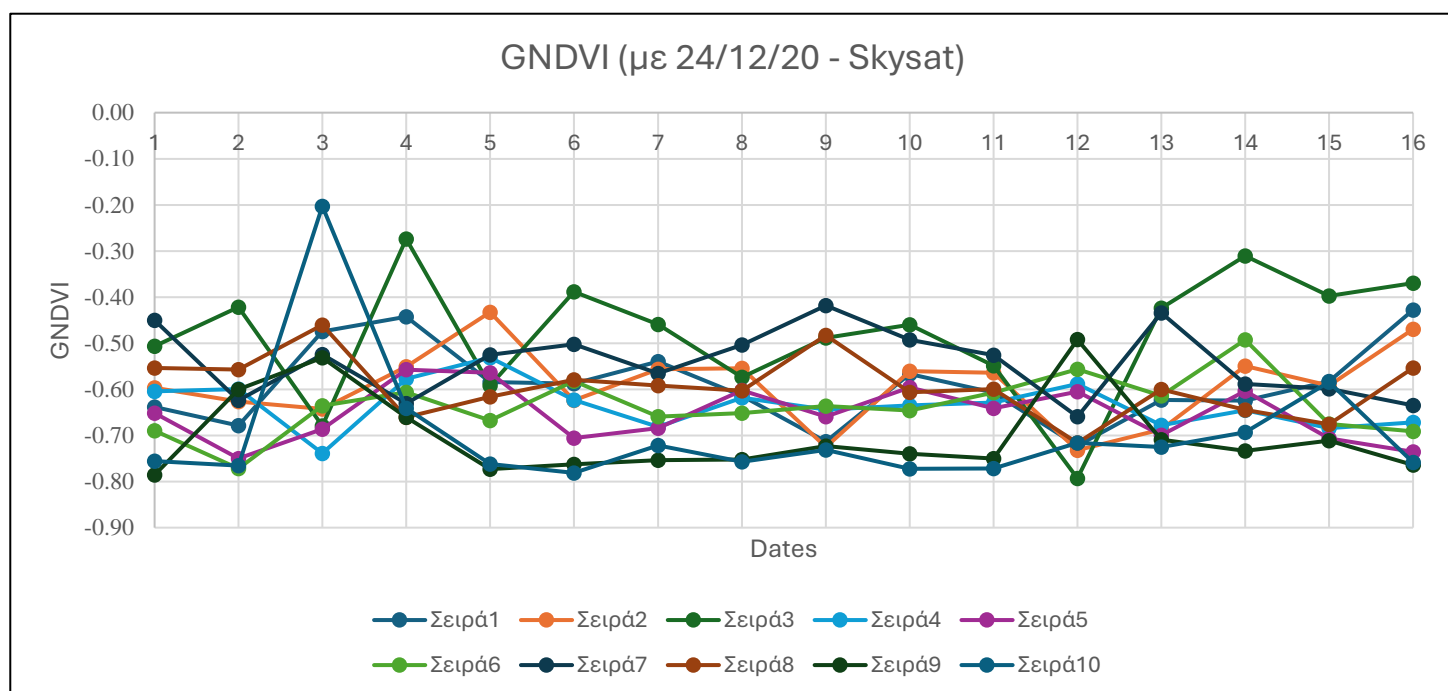
4.4.3.3.4 Πράσινη Κανονικοποιημένη Διαφορά Βλάστησης: GNDVI

Ο δείκτης είναι παρόμοιος με τον NDVI εκτός από το ότι μετρά το πράσινο φάσμα από 540 έως 570 nm αντί για το κόκκινο φάσμα. Αυτός ο δείκτης είναι πιο ευαίσθητος στη συγκέντρωση χλωροφύλλης από τον NDVI.

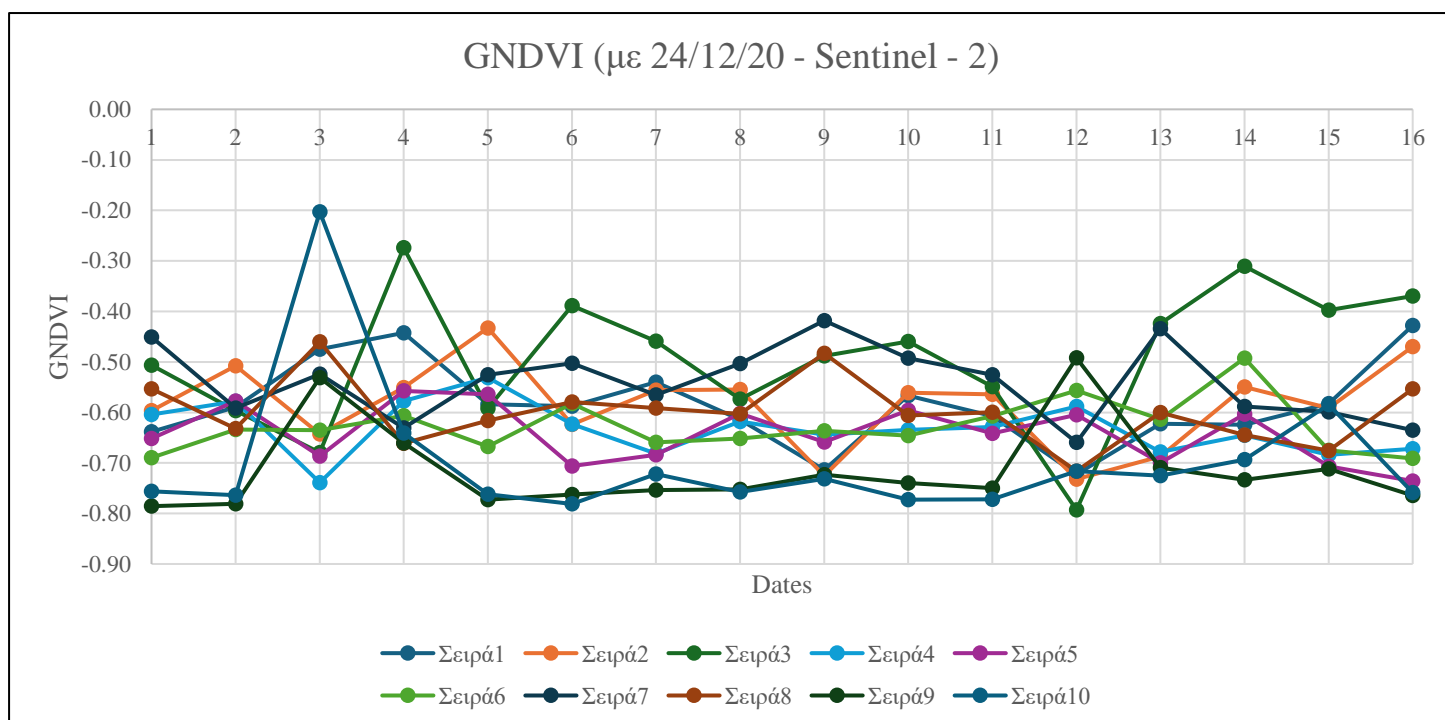
$$\text{GNDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Green}}{\text{NIR} + \text{Green}}$$

Οι τιμές GNDVI κυμαίνονται συνήθως από -1 έως 1 και αυτές οι τιμές παρέχουν πληροφορίες για την υγεία και το σφρίγος της βλάστησης. Οι υψηλές τιμές GNDVI, που πλησιάζουν το 1, υποδηλώνουν πυκνή και υγιή βλάστηση με υψηλή περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη. Αυτό υποδηλώνει έντονη ανάπτυξη των φυτών και καλή φωτοσυνθετική δραστηριότητα. Οι τιμές μεταξύ 0,5 έως 0,7 και υποδηλώνουν μέτρια υγεία της βλάστησης. Τα φυτά είναι πιθανότατα υγιή αλλά όχι τόσο πυκνά ή ζωηρά όσο εκείνα με τιμές πιο κοντά στο 1,0. Οι τιμές γύρω στο 0 υποδηλώνουν αραιή ή καταπονημένη βλάστηση, πιθανώς λόγω κακής υγείας, χαμηλής περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη ή λιγότερο πυκνής φυτικής κάλυψης. Οι αρνητικές τιμές GNDVI συνήθως υποδεικνύουν μη φυτικές επιφάνειες όπως νερό, γυμνό έδαφος ή αστικές περιοχές. Αυτές οι επιφάνειες αντανακλούν λιγότερο NIR σε σύγκριση με το πράσινο φως, οδηγώντας σε αρνητική τιμή δείκτη.

Διάγραμμα 9α: Δειγματοληψία στο GNDVI (1)



Διάγραμμα 9β: Δειγματοληψία στο GNDVI (2)



4.4.4 Τελικός Σχολιασμός και Επιλογή των Φασματικών Δεικτών

Αρκετά μπορούν να ειπωθούν για τα πρώτα αποτελέσματα που εξάχθηκαν για την κατάσταση του νερού στον Σπερχειό Ποταμό, από τα δείγματα των παραπάνω δεικτών. Αξίζει να υπενθυμιστεί ότι τα κανάλια που μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία δεικτών ήταν μόνο τέσσερα: του ορατού φωτός και του εγγύς υπέρυθρου. Βασικός στόχος είναι να βρεθούν οι κατάλληλοι δείκτες που είναι κατάλληλοι για υδάτινα σώματα και αναδεικνύουν τις μεταβολές που υπάρχουν, ανά τον χρόνο, σε αυτά.

Αρχικά, παρατηρείται ότι η διασπορά των δειγμάτων δεν είναι ίδια σε όλους τους δείκτες και σε όλες τις ημερομηνίες. Αλλού φαίνεται ότι ο ποταμός διατηρεί τα ίδια χαρακτηριστικά σε όλο το εύρος της Περιοχής Μελέτης, και αλλού φαίνεται ότι υπάρχουν μεταβολές. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι στα μέσα της χρονοσειράς (17/2/21 - 17/3/21) σχεδόν σε όλους του δείκτες παρατηρείται μικρότερη διασπορά των δειγμάτων, κάτι που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν έντονες μεταβολές στην κατάσταση των υδάτινων σωμάτων της περιοχής μελέτης, στην εκάστοτε ημερομηνία. Αντίθετα, στην αρχή της χρονοσειράς, παρατηρείται μια μικρότερη σταθερότητα στην κατάσταση των υδάτων, ειδικότερα στην 3η Εικόνα: 28 Δεκεμβρίου 2020 και στην 4η Εικόνα: 28 Ιανουαρίου 2021, όπου η διασπορά των δειγμάτων είναι πιο έντονη. Παρόμοια κατάσταση υπάρχει και στο τέλος της χρονοσειράς (24/3/21 - 30/3/21).

Δευτερεύοντος, παρατηρείται ότι οι δείκτες που έχουν ως βάση τον NDVI (NDVI, GNDVI, SAVI) δεν δείχνουν κάτι που δεν γνωρίζουμε ήδη, δηλαδή ότι η περιοχή μελέτης είναι υδάτινα σώματα. Οι συγκεκριμένοι δείκτες είναι καλύτεροι σε μη - υδάτινες περιοχές μελέτης, όπου και μπορεί να γίνει εξαγωγή συμπερασμάτων για την ποιότητα και την ποσότητα της βλάστησης. Είναι ενδιαφέρον, ωστόσο ότι στους συγκεκριμένους δείκτες παρατηρείται η μεγαλύτερη διασπορά των δειγμάτων, κάτι που σημαίνει ότι υπάρχουν μεταβολές στην κατάσταση των υδάτινων σωμάτων της περιοχής μελέτης.

Από την άλλη, ο NDCI και ο GNDVI είναι δείκτες που έχουν τον ίδιο στόχο: την εύρεση χλωροφύλλης. Η βασική τους διαφορά είναι ότι ο πρώτος χρησιμοποιεί το μπλε και το πράσινο κανάλι, ενώ ο δεύτερος χρησιμοποιεί το πράσινο και το εγγύς υπέρυθρο κανάλι. Αναλυτικότερα, ο GNDVI χρησιμοποιώντας το NIR Band ταξινομεί σχεδόν όλα τα GNDVI εικονοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ως αρνητικά, κάτι που είναι λογικό, μιας και η Περιοχή Μελέτης είναι υδάτινη περιοχή. Ωστόσο, κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα να μην εξάγονται σοβαρά αποτελέσματα για την κατάσταση του ίδιου του νερού. Από την άλλη ο NDCI χρησιμοποιεί το μπλε κανάλι που είναι καταλληλότερο για αναλύσεις στο νερό. Η διασπορά των δειγμάτων είναι πολύ μικρότερη (εκτός της Εικόνας 2: 24 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat), έως και ανύπαρκτη στην εκάστοτε ημερομηνία, κάτι που σημαίνει ότι οι μεταβολές στην περιοχή μελέτης σε κάθε ημερομηνία, είναι μετρίου μεγέθους.

Για όλους τους παραπάνω λόγους, η μελέτη θα συνεχιστεί χρησιμοποιώντας τους Δείκτες NDCI και SI, που θα αναδείξουν την ένταση της χλωροφύλλης - α και την συγκέντρωση των ιζημάτων, αντίστοιχα, στις υδάτινες περιοχές της Περιοχής Μελέτης.

4.5 Ελάττωση Διαστάσεων των Δεδομένων: Dimensionality Reduction

Για την μετατροπή των δεδομένων των δορυφορικών εικόνων σε χώρο χαμηλότερης διάστασης, χρειάζεται να γίνουν αρκετά βήματα για την επιτυχή εφαρμογή του t – SNE.

4.5.1 Προετοιμασία Δεδομένων

Το πρώτο στάδιο είναι η δημιουργία του πίνακα που έχεις τις αρχικές υψηλές διαστάσεις, κάτι που σημαίνει ότι κάθε εικονοστοιχείο που περιλαμβάνεται στην Περιοχή Μελέτης αντιμετωπίζεται ένα σημείο δεδομένων και κάθε απεικόνιση (ημερομηνία) ως διάσταση. Για να γίνει αυτό, είναι σημαντικό κάθε διάσταση (δηλαδή κάθε απεικόνιση) να έχει ίσο αριθμό διαστάσεων και ίδιο αριθμό εικονοστοιχείων.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, κάθε δορυφορική εικόνα αποτελείται από 600.562 εικονοστοιχεία και έχει διαστάσεις 7790 x 2467.

4.5.2 Εφαρμογή του t – SNE στα Δορυφορικά Δεδομένα

Για την επιτυχή εφαρμογή του t – SNE δημιουργήθηκε ο κατάλληλος κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού Python, ο οποίος θα επεξηγηθεί παρακάτω:

Αποτέλεσμα: Τα δεδομένα των δορυφορικών εικόνων υψηλής διάστασης ελαττώθηκαν σε έναν δισδιάστατο χώρο χρησιμοποιώντας την τεχνική t – SNE, καθιστώντας ευκολότερη την προβολή και την ανάλυση των χρονικών προτύπων στον Σπερχειό Ποταμό.

1^ο Βήμα: Προετοιμασία Δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε, κάθε δορυφορική εικόνα αντιπροσωπεύει ένα χρονικό σημείο της χρονοσειράς. Αυτές οι εικόνες διαβάστηκαν και στοιβάχτηκαν σε μια τρισδιάστατη διάταξη.

Τα άκρα εικονοστοιχεία εντοπίστηκαν και αφαιρέθηκαν, διασφαλίζοντας έτσι ότι η ανάλυση περιέχει μόνο σχετικά δεδομένα. Για να διασφαλιστεί ότι κάθε εικονοστοιχεία και κάθε εικόνα συνέβαλε εξίσου στο t – SNE, δημιουργήθηκε ο κατάλληλος πίνακας δεδομένων.

2^ο Βήμα: Παράμετροι

Παράμετρος	Σημασία	Τιμή	Σχόλια
n_components	Αριθμός Διαστάσεων	2	Οι διαστάσεις του ελαττωμένου χώρου θα είναι 2
Perplexity	Αριθμός πλησιέστερων γειτόνων	30	ΔΕΝ μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τον αριθμό των δειγμάτων, οπότε επιλέχθηκε η μεγαλύτερη δυνατή τιμή, καθώς τα μεγαλύτερα datasets απαιτούν μεγαλύτερο perplexity
max_iter	Μέγιστες επαναλήψεις	1000	
metric	Υπολογισμός απόστασης μεταξύ των instances σε έναν πίνακα	euclidean	
method	Αλγόριθμος Υπολογισμού	barnes_hut	

Σημαντικότεροι παράμετροι, όχι όλοι. Για περισσότερα [εδώ](#).

3^ο Βήμα: Οπτικοποίηση

Χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα διασποράς (scatter plot), παρουσιάστηκε η δισδιάστατη απεικόνιση. Η χρονική δυναμική της ποιότητας του νερού του Σπερχειού ποταμού αναλύθηκε χρησιμοποιώντας αυτό το γραφικό για να βοηθήσει στην εύρεση μοτίβων και συστάδων.

Κάποια βασικά σημεία του Κώδικα:

```
#Ορισμός των έγκυρων εικονοστοιχείων μιας εικόνας. Έγκυρα είναι τα  
εικονοστοιχεία με τιμή μεγαλύτερη από -9999
```

```
test = gdal.Open(Test_files[0])
```

```
X_size = test.RasterXSize
```

```
Y_size = test.RasterYSize
```

```
test_array = test.ReadAsArray()
```

```
test_array = test_array.astype(float)
```

```
test_array[test_array<=-9999] = np.nan
```

```
n_valid_pixels = np.sum(~np.isnan(test_array))
```

```
#Δημιουργία πίνακα με shape = (αριθμός εικόνων, διαστάσεις της  
εικόνας) και fill type = -9999
```

```
skysat_stack = np.full((number_images, Y_size, X_size), -9999, dtype =  
np.float32)
```

```
for skysat_index, Test_file in enumerate (Test_files):
```

```
    dataset = gdal.Open(Test_file)
```

```
    temp_skysat = dataset.GetRasterBand(1).ReadAsArray()
```

```
    temp_skysat = np.array(temp_skysat, dtype=np.float32)
```

```
    temp_skysat[temp_skysat <= -9999] = np.nan
```

```
    skysat_stack[skysat_index, :, :] = temp_skysat
```

```
#Συνολικός αριθμός έγκυρων εικονοστοιχείων σε κάθε εικόνα
```

```
skysat_pixels = skysat_stack[~np.isnan(skysat_stack)]
```

```
#Ανασχηματισμός του πίνακα σε 1-D
```

```
skysat_pixels_time = skysat_pixels.reshape(-1,number_images)
```

```
# Δημιουργία μιας κενής λίστας για να αποθηκευτεί ο αριθμός των  
έγκυρων pixel για κάθε εικόνα
```

```
valid_pixel_counts_per_image = []
```

```
max_valid_pixel_count = 610673
```

```
for file_path in Test_files:
```

```
    test = gdal.Open(file_path)
```

```
    test_array = test.ReadAsArray()
```

```
    test_array = test_array.astype(float)
```

```
    test_array[test_array <= -9999] = np.nan
```

```
    valid_pixel_count = np.sum(~np.isnan(test_array))
```

```
    valid_pixel_counts_per_image.append(valid_pixel_count)
```

```
valid_pixel_values_per_image.append(test_array[~np.isnan(test_array)])
```

```
max_valid_pixel_count = max(max_valid_pixel_count, valid_pixel_count)
```

```
padded_valid_pixel_values = [np.pad(arr, (0, max_valid_pixel_count -  
len(arr)), constant_values=np.nan) for arr in valid_pixel_values_per_image]
```

```
skysat_pixels_time = np.vstack(padded_valid_pixel_values).T
```

```
tsne = TSNE(random_state=0)
```

```
# Τοποθέτηση του πίνακα NDVI_pixels_time στον ενσωματωμένο χώρο  
των δυο διαστάσεων
```

```
tsne_results = tsne.fit_transform(skysat_pixels_time) # Τοποθέτηση του  
πίνακα NDVI_pixels_time στον ενσωματωμένο χώρο των δυο διαστάσεων
```

```
tsne_results = pd.DataFrame(tsne_results, columns=['tsne1', 'tsne2']) #  
Τοποθέτηση του προηγούμενου πίνακα σε ένα "δοχείο" που περιέχει τα  
directories των αντικειμένων
```

4.5.3 Αποτελέσματα Ελάττωσης των Διαστάσεων (t – SNE)

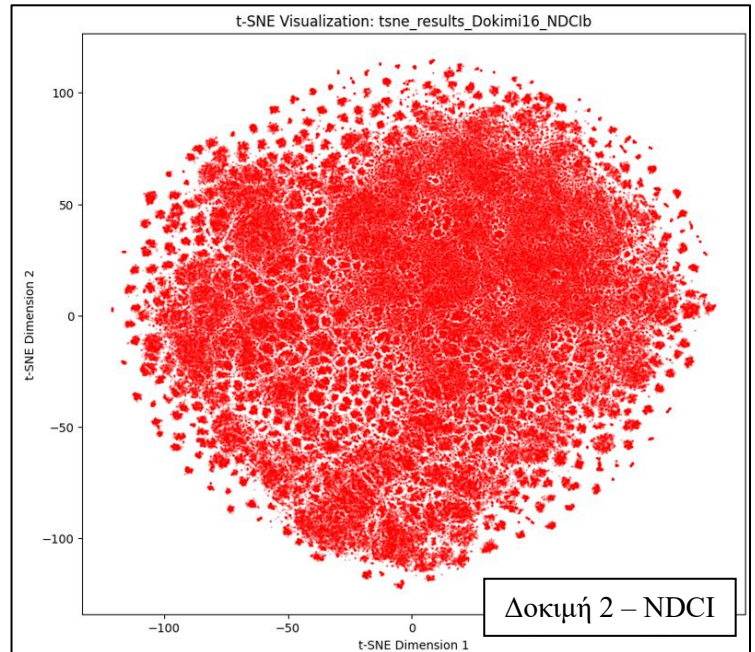
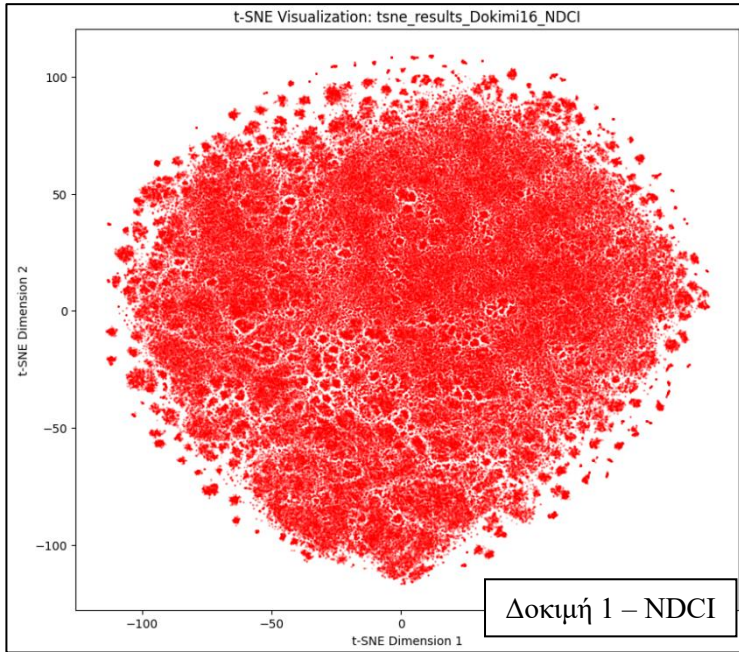
Στις αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο οι Δοκιμές που θα εφαρμοστούν θα είναι δυο:

- 1^η **Δοκιμή**: όλες οι ημερομηνίες στον Πίνακα 3 χρησιμοποιώντας την εικόνα SkySat στις 24 Δεκεμβρίου 2021 (σύνολο 16 εικόνες)
- 2^η **Δοκιμή**: όλες οι ημερομηνίες στον Πίνακα 3 χρησιμοποιώντας την εικόνα Sentinel στις 24 Δεκεμβρίου 2021 (σύνολο 16 εικόνες)

Συμπλέγματα = Ομοιότητες στις τιμές των Flattened Pixel σε όλη τη χρονοσειρά

4.5.3.1 T – SNE: NDCI

Διάγραμμα 10 και 11: Αποτελέσματα t – SNE στο NDCI

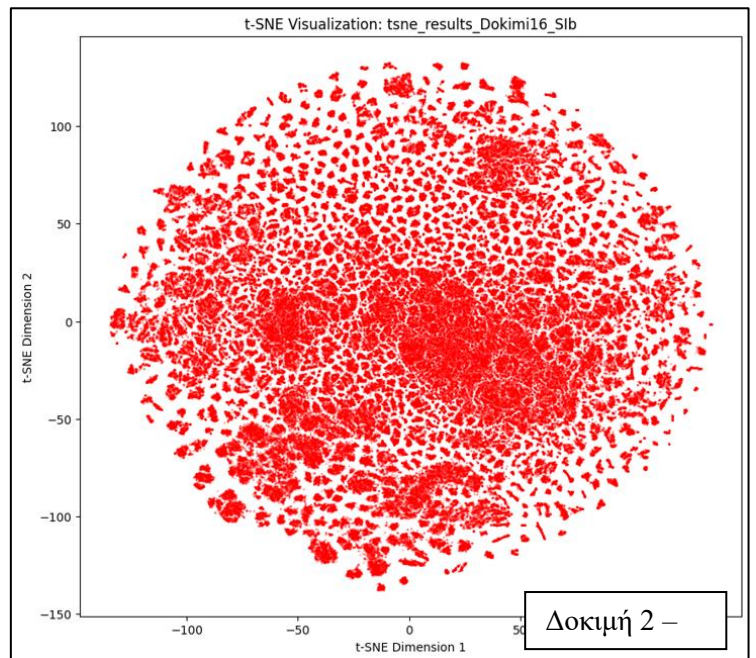
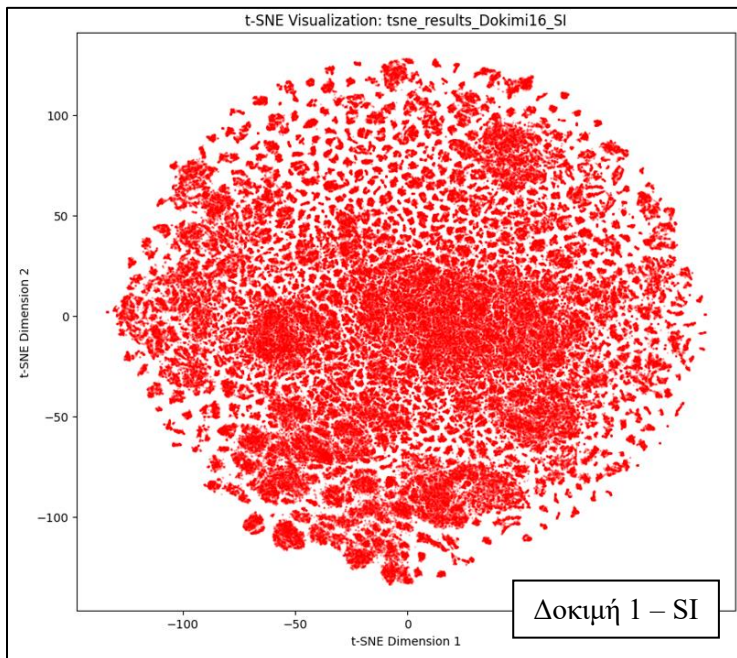


tsne_results_Dokimi16_NDCI	
DataFrame shape	(600562, 2)
Min value	tsne1 -113.999153 tsne2 -116.551781
Max value	tsne1 118.913849 tsne2 109.168884
Mean of standardized pixel values	2.3781435e-08
Standard deviation of standardized pixel values	1.0

tsne_results_Dokimi16_NDCIb	
DataFrame shape	(600562, 2)
Min value	tsne1 -120.958366 tsne2 -122.221413
Max value	tsne1 122.693794 tsne2 114.826256
Mean of standardized pixel values	6.301064e-09
Standard deviation of standardized pixel values	1.0

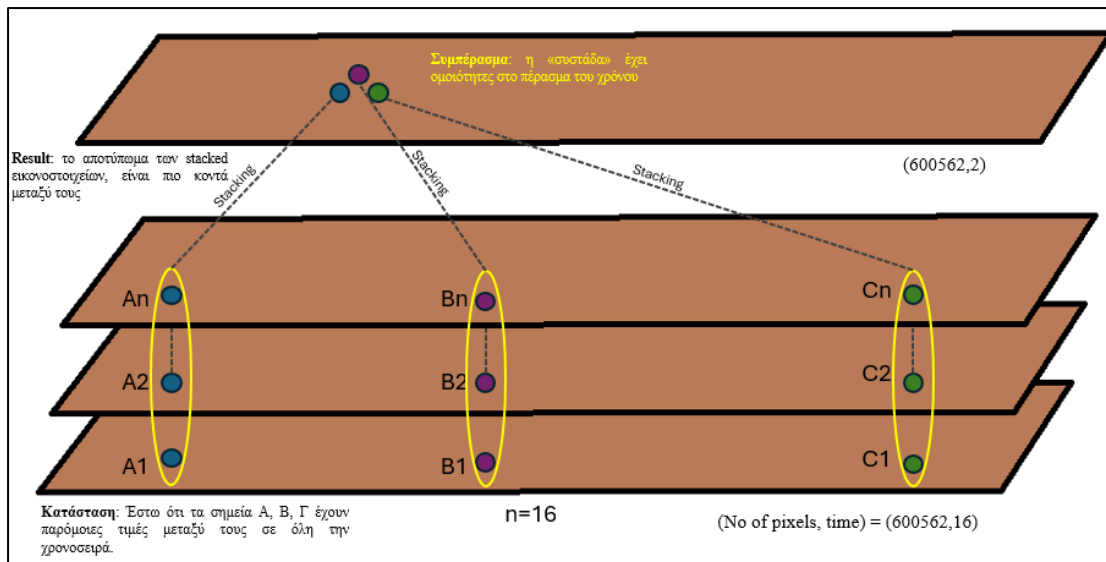
4.5.3.2 T – SNE: SI

Διάγραμμα 12 και 13: Αποτελέσματα t – SNE στο SI



tsne_results_Dokimi16_SI	
DataFrame shape	(600562, 2)
Min value	tsne1 -133.708496 tsne2 -133.767776
Max value	tsne1 132.394089 tsne2 127.955750
Mean of standardized pixel values	1.5600214e-08
Standard deviation of standardized pixel values	0.99999994

tsne_results_Dokimi16_SIb	
DataFrame shape	(600562, 2)
Min value	tsne1 -134.589584 tsne2 -137.713181
Max value	tsne1 136.178070 tsne2 132.589645
Mean of standardized pixel values	-5.554083e-08
Standard deviation of standardized pixel values	1.0



Εικόνα 83: Αναπαράσταση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων του Scatter Plot που δημιουργείται στο t-SNE

4.5.3.3 Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων του t – SNE

Οι Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν είναι πανομοιότυπες από όλες τις απόψεις, μιας και οι απεικονίσεις του t – SNE, τόσο του NDCI όσο και του SI δείχνουν ελάχιστες διαφορές. Η κύρια διάκριση μεταξύ των Δοκιμών 1 και 2 είναι ότι η Δοκιμή 1 εμφανίζεται πιο «πυκνή» από τη Δοκιμή 2. Αυτό δείχνει ότι η εικόνα Skysat από τις 24 Δεκεμβρίου 2020, που χρησιμοποιήθηκε στη Δοκιμή 1, βοηθά στη δημιουργία μεγαλύτερων και ίσως λιγότερο καθορισμένων συστάδων σε σύγκριση με την Sentinel – 2 εικόνα που χρησιμοποιείται στη Δοκιμή 2, όπου τα αποτελέσματα είναι πιο διακριτά. Αυτή η διαφορά είναι ιδιαίτερα εμφανής και στις απεικονίσεις του SI στο t – SNE μεταξύ της Δοκιμής 1 και της Δοκιμής 2. Τόσο στο NDCI όσο και στο SI, φαίνεται να έχει επιτύχει ο αλγόριθμος μείωσης διαστάσεων, μιας και έχει γίνει ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων τα οποία τείνουν να διατηρούν τον χαρακτήρα τους στο βάθος της χρονοσειράς. Παράλληλα έχουν δημιουργηθεί πολλά μικρότερα clusters, ιδιαίτερα στο SI, κάτι που δείχνει ότι ο συγκεκριμένος δείκτης φέρνει στην επιφάνεια μεγαλύτερες και πιο διακριτές μεταβολές της φύσης του νερού στο εύρος της Περιοχής Μελέτης.

Επί του παρόντος, είναι δύσκολο να καθοριστεί ποια Δοκιμή t-SNE είναι καταλληλότερη. Πρέπει να εφαρμοστεί ο κατάλληλος αλγόριθμος ομαδοποίησης για να κατηγοριοποιηθούν τα εικονοστοιχεία σε ουσιαστικά συμπλέγματα με καλά καθορισμένες παραμέτρους πριν εξαχθούν οριστικά συμπεράσματα.

4.6 1^η Προσέγγιση: Ομαδοποίηση Δεδομένων μέσω του HDBSCAN στα δεδομένα του t – SNE

Το HDBSCAN είναι το επόμενο βήμα που χρησιμοποιείται για την εύρεση συστάδων εντός των δεδομένων των δορυφορικών εικόνων μιας υψηλής διάστασης αφού αυτά έχουν μειωθεί σε χώρο χαμηλότερης διάστασης χρησιμοποιώντας το t – SNE. Αυτές οι συστάδες θα απεικονίζουν τις διατηρητέες ομοιότητες των εικονοστοιχείων στη χρονοσειρά.

Απόσπασμα του Κώδικα που εφαρμόζει το HDBSCAN πάνω στα αποτελέσματα του t – SNE:

```
# Αρχικοποίηση του hdbscan
clusterer = hdbscan.HDBSCAN(min_cluster_size=number, min_samples=20, alpha=0.7)

# Εφαρμογή hdbscan σε κάθε σύνολο
hdbscan_clustering_result = {}

# Δημιουργία λιστών για την αποθήκευση του αριθμού των ομάδων
num_clusters_list = []
num_pixels_per_cluster_list = []

# Plotάρισμα των ομαδοποιημένων δεδομένων
for file_name, scaled_features in scaled_features_dict.items():
    clusterer.fit(scaled_features)
    hdbscan_labels = clusterer.labels_
    num_clusters = len(set(hdbscan_labels)) - (1 if -1 in hdbscan_labels else 0) # Exclude noise cluster (-1)
    num_clusters_list.append(num_clusters)

    hdbscan_clustering_result[file_name] = pd.DataFrame(
        np.hstack((scaled_features, hdbscan_labels.reshape(-1, 1))),
        columns=[f'Feature_{i}' for i in range(scaled_features.shape[1])] + ['hdbscan_cluster']
    )

# Μετατροπή αρχείων σε tiff
output_filename =
f'{os.path.splitext(pickle_file_name)[0]}_clustered_result_minCS{clusterer.min_cluster_size}_minS{clusterer.min_samples}
_alpha{clusterer.alpha}.tif'
nparray_to_tiff(clusted_nparray, Test_file, output_folder, output_filename)

Required Libraries: glob, pickle, hdbscan, numpy, matplotlib.pyplot, seaborn as sns, os, osgeo, gdal, pandas, rasterio
```

!Προσοχή!

Το HDBSCAN καθορίζει τις τρεις κατηγορίες (δηλαδή τα όρια τους στην Περιοχή Μελέτης). **ΔΕΝ καθορίζει το είδος της κάθε Κατηγορίας και τι αντιπροσωπεύει.** Μέχρι να γίνει ο καθορισμός, οι συστάδες, τόσο στο NDCI όσο και στο SI, θα προσφωνούνται ως **Κατηγορία 1, 2 και 3.**

4.6.1 Αποτελέσματα στις 1^{ης} Προσέγγισης

Όπως είναι αναμενόμενο, ο ελάχιστος αριθμός των εικονοστοιχείων που ορίζουν μια συστάδα με την βοήθεια του HDBSCAN, βασίζεται άμεσα με τον τρόπο που έχει οπτικοποιηθεί το εκάστοτε t – SNE. Πιο συγκεκριμένα, η αποτελεσματικότητα της αναγνώρισης συμπλέγματος από το HDBSCAN μπορεί να εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο το t – SNE αντιπροσωπεύει τα δεδομένα. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να οριστεί η παράμετρος που ονομάζεται **min_cluster_size**, η οποία καθορίζει τον ελάχιστο αριθμό σημείων που σχηματίζουν ένα σύμπλεγμα. Αυτή η παράμετρος είναι κρίσιμη καθώς επηρεάζει την ευαισθησία του αλγορίθμου στον θόρυβο και την ικανότητά του να αναγνωρίζει ομάδες διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών.

Ο ελάχιστος αριθμός των εικονοστοιχείων μιας συστάδας (**min_cluster_size**), έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι τρεις ομάδες, ορίστηκε ως εξής:

Πίνακας 12: Ελάχιστο Μέγεθος των Ομάδων

Δείκτης	Δοκιμή 1	Δοκιμή 2
NDCI	10031	24635
SI	10000	30360

Αρχικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι είναι αδύνατο να αναλυθούν τα NDCI και SI σε διαφορετικές δοκιμές. Επομένως, **οι απεικονίσεις t – SNE που επιλέγονται ως οι καταλληλότερες πρέπει απαραίτητα να προέρχονται από την ίδια σειρά δοκιμών**. Συνεπώς, εάν το t – SNE ενός δείκτη (NDCI ή SI) κριθεί ακατάλληλο, το αντίστοιχο t – SNE του άλλου δείκτη θα απορριφθεί επίσης.

Όπως έχει αναφερθεί, η ομαδοποίηση θα γίνει σε τρεις κατηγορίες, έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη η σύγκριση και η καταγραφή των μετακινήσεων και των μοτίβων στην Περιοχή Μελέτης στο βάθος της χρονοσειράς. Η οπτικοποίηση του TSNE, τόσο στο NDCI όσο και στο SI θα περιλαμβάνει τέσσερις θεματικές:

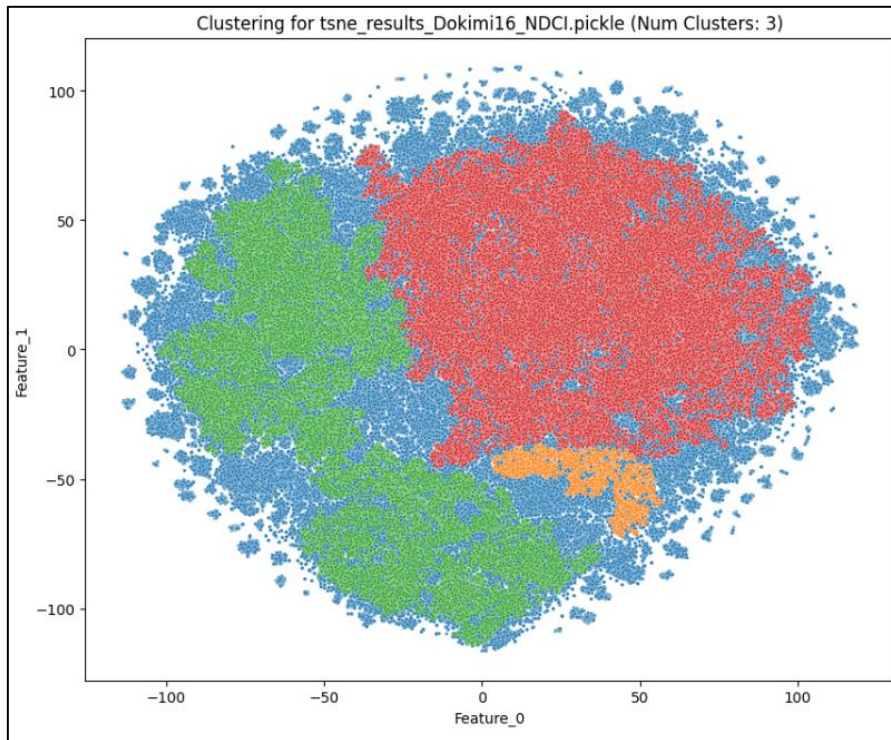
1. **Πορτοκαλί ~> 1^η Κατηγορία**
2. **Πράσινο ~> 2^η Κατηγορία**
3. **Κόκκινο ~> 3^η Κατηγορία**
4. **Μπλε ~> Θόρυβος**

Παρακάτω θα ακολουθήσει η οπτικοποίηση, ο σχολιασμός και η σύγκριση των TSNE μεταξύ των δυο δοκιμών που έλαβαν χώρα.

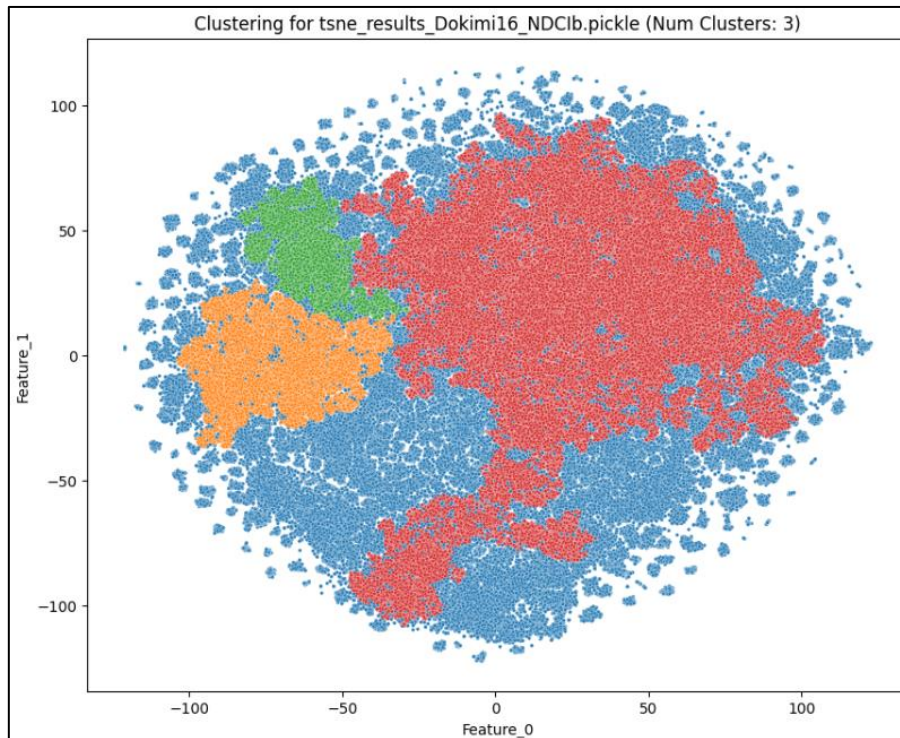
t-SNE & HDBSCAN: Αναγνώριση συμπλεγμάτων που αντιστοιχούν σε μοτίβα ή/και ομοιότητες σε όλη την χρονοσειρά. Παροχή πληροφοριών για τον τρόπο που εξελίσσονται τα εικονοστοιχεία με την πάροδο του χρόνου.

4.6.1.1 1^η Προσέγγιση Ομαδοποίησης: NDCI

Διάγραμμα 14α: Αποτέλεσμα του HDBSCAN στο NDCI (1)



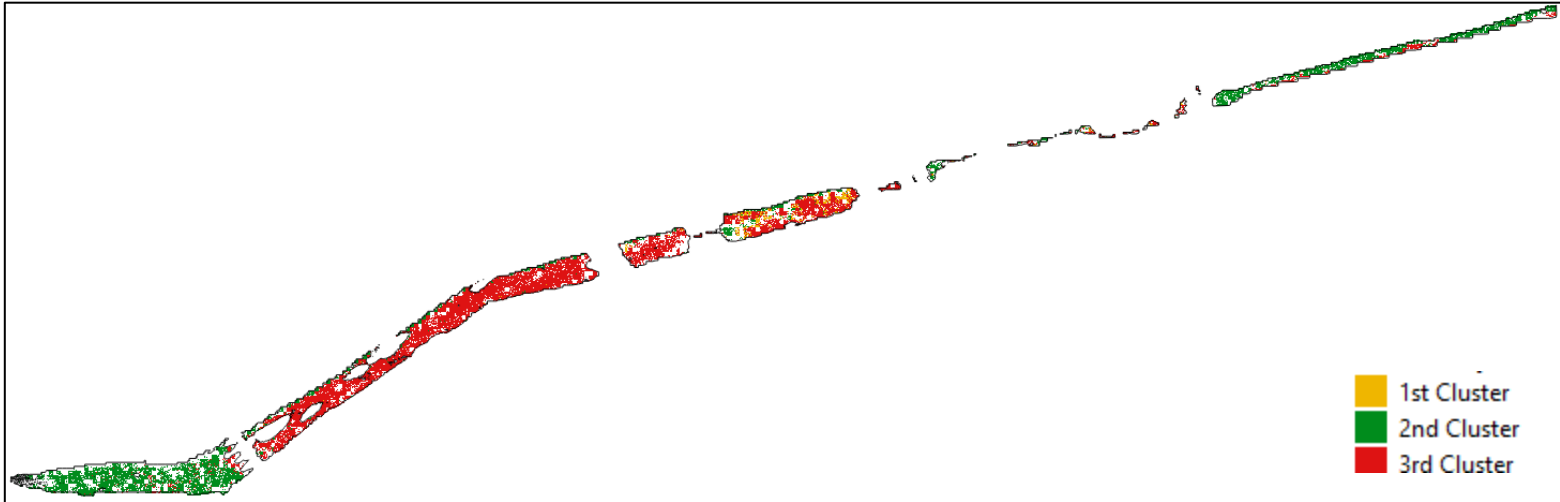
Διάγραμμα 14β: Αποτέλεσμα του HDBSCAN στο NDCI (2)



Υπόμνημα	
Κατηγορία 1	Πορτοκαλί
Κατηγορία 2	Πράσινο
Κατηγορία 3	Κόκκινο
Θόρυβος	Μπλε

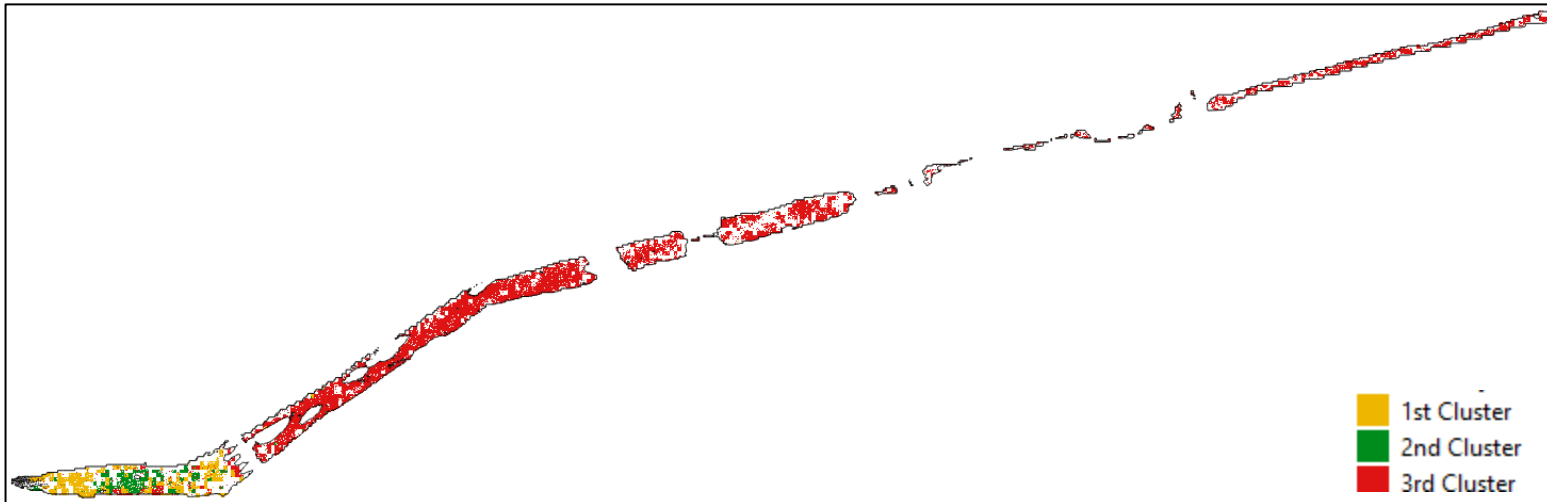
Οπτικοποίηση των Εικονοστοιχείων του NDCI

1^η Δοκιμή



Εικόνα 83: Οπτικοποίηση Εικονοστοιχείων της Ομαδοποίησης *hdbscan* για το NDCI (1^η Δοκιμή)

2^η Δοκιμή

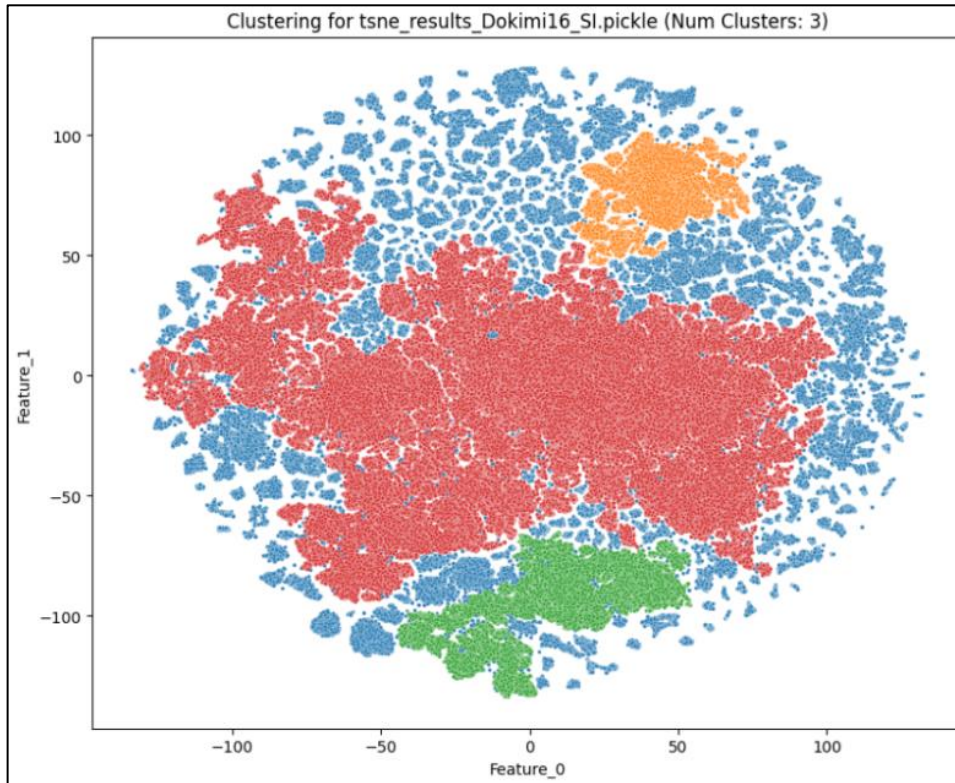


Εικόνα 84: Οπτικοποίηση Εικονοστοιχείων της Ομαδοποίησης *hdbscan* για το NDCI (2^η Δοκιμή)

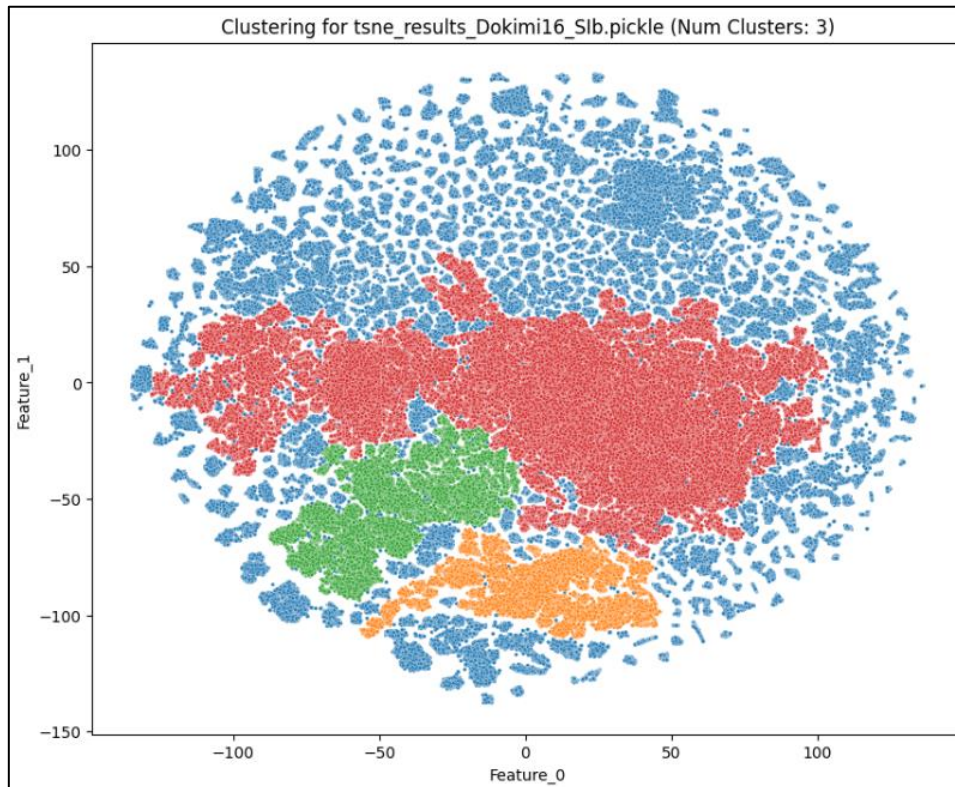
t-SNE & HDBSCAN: Αναγνώριση συμπλεγμάτων που αντιστοιχούν σε μοτίβα ή/και ομοιότητες σε όλη την χρονοσειρά. Παροχή πληροφοριών για τον τρόπο που εξελίσσονται τα εικονοστοιχεία με την πάροδο του χρόνου.

4.6.1.2 1^η Προσέγγιση Ομαδοποίησης: SI

Διάγραμμα 15α: Αποτέλεσμα του HDBSCAN στο SI (1)



Διάγραμμα 15β: Αποτέλεσμα του HDBSCAN στο SI (2)

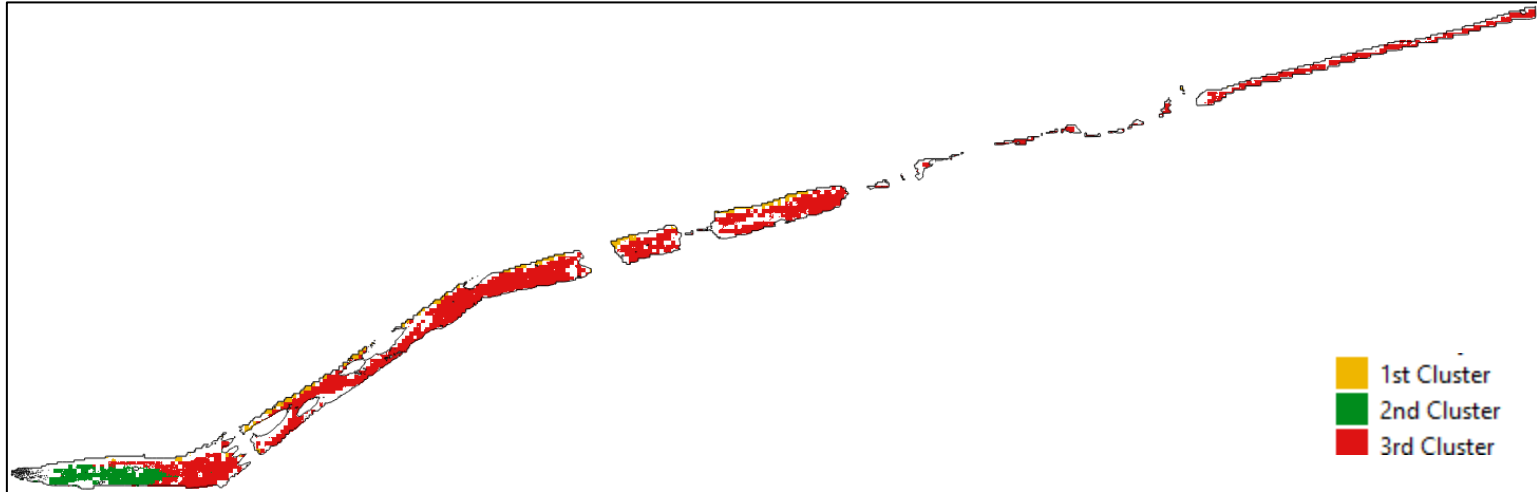


11

Υπόμνημα	
Κατηγορία 1	Πορτοκαλί
Κατηγορία 2	Πράσινο
Κατηγορία 3	Κόκκινο
Θόρυβος	Μπλε

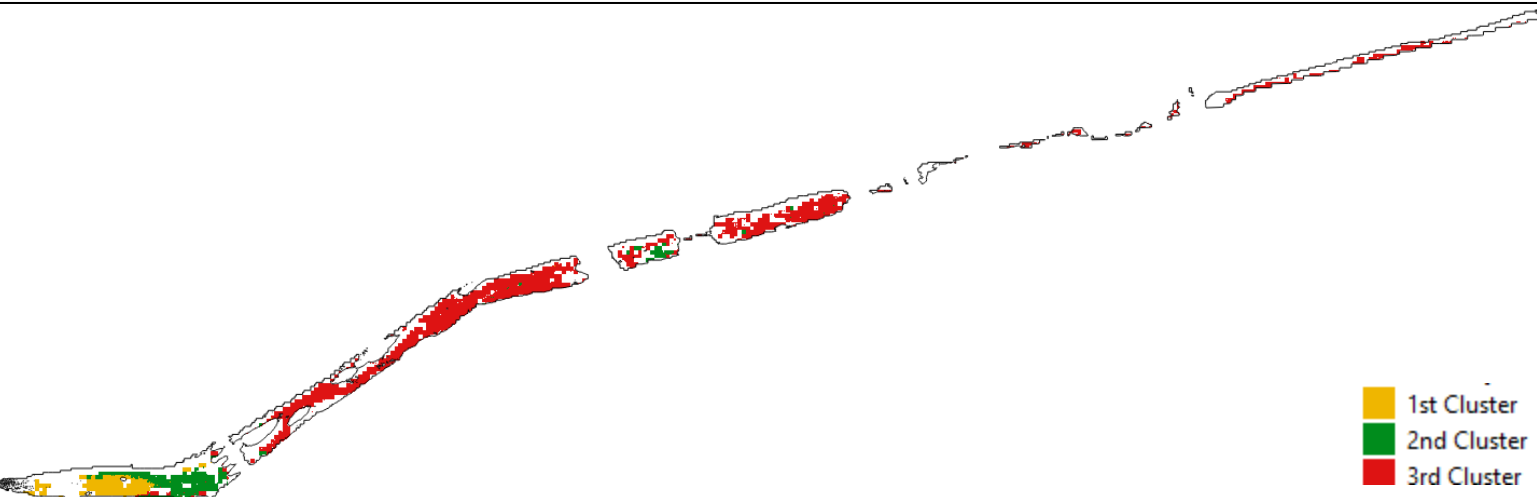
Οπτικοποίηση των Εικονοστοιχείων του SI

1^η Δοκιμή



Εικόνα 85: Οπτικοποίηση Εικονοστοιχείων της Ομαδοποίησης hdbscan για το SI (1^η Δοκιμή)

2^η Δοκιμή

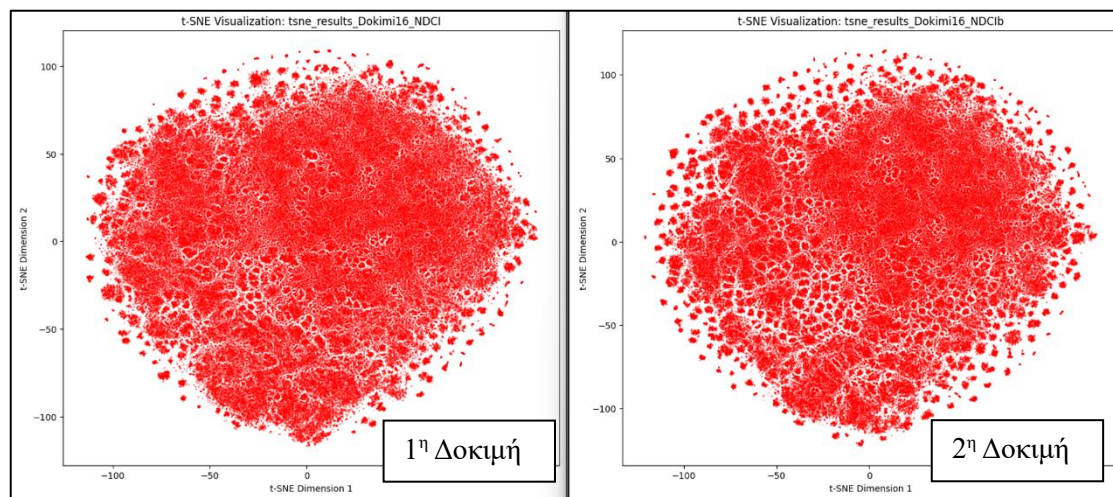


Εικόνα 86: Οπτικοποίηση Εικονοστοιχείων της Ομαδοποίησης hdbscan για το SI (2^η Δοκιμή)

4.6.2 Τελική Επιλογή στις Δοκιμές

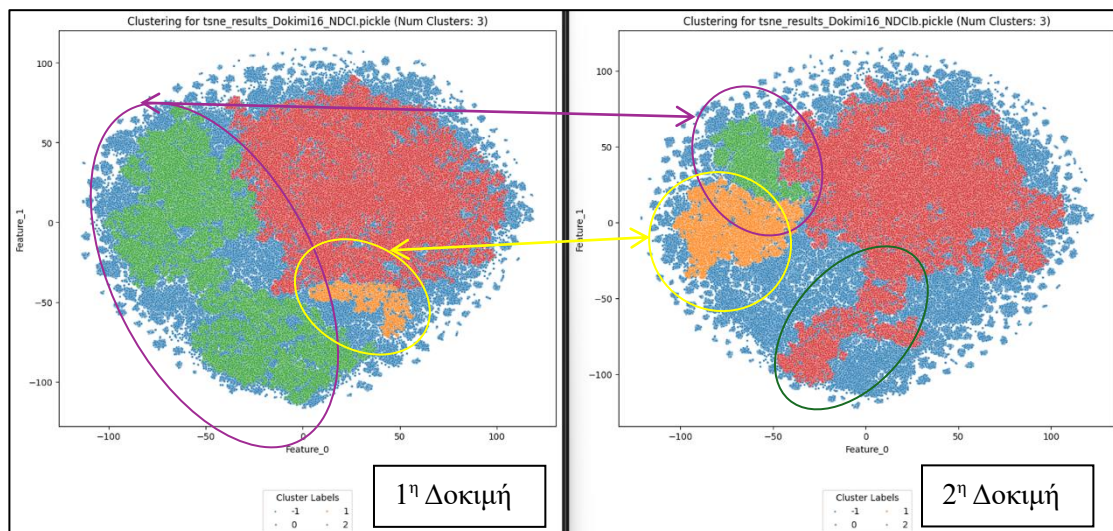
4.6.2.1 NDCI

Όπως φαίνεται καλύτερα στην παρακάτω εικόνα, από την μια πλευρά, η 1^η Δοκιμή, η οποία και περιλαμβάνει την αντίστοιχη εικόνα Skysat στις 24 Δεκεμβρίου 2020, φαίνεται πιο «πυκνή» και συμπαγής, με αποτέλεσμα τα πιθανά Clusters που είναι απαραίτητα στην συγκεκριμένη έρευνα, να μην είναι τόσο ευδιάκριτα. Από την άλλη πλευρά, η 2^η Δοκιμή, η οποία και περιλαμβάνει την αντίστοιχη εικόνα Sentinel – 2 στις 24 Δεκεμβρίου 2020 φαίνεται να έχει ένα πιο ευδιάκριτο και λιγότερο «πυκνό» αποτέλεσμα. Ωστόσο, έτσι αποκαλύπτονται περισσότερες μικρές συστάδες. Είναι πολύ πιθανό αυτά τα εικονοστοιχεία που κατηγοριοποιούνται σε μικρές συστάδες, να θεωρηθούν από το HDBSCAN ως «θόρυβος».



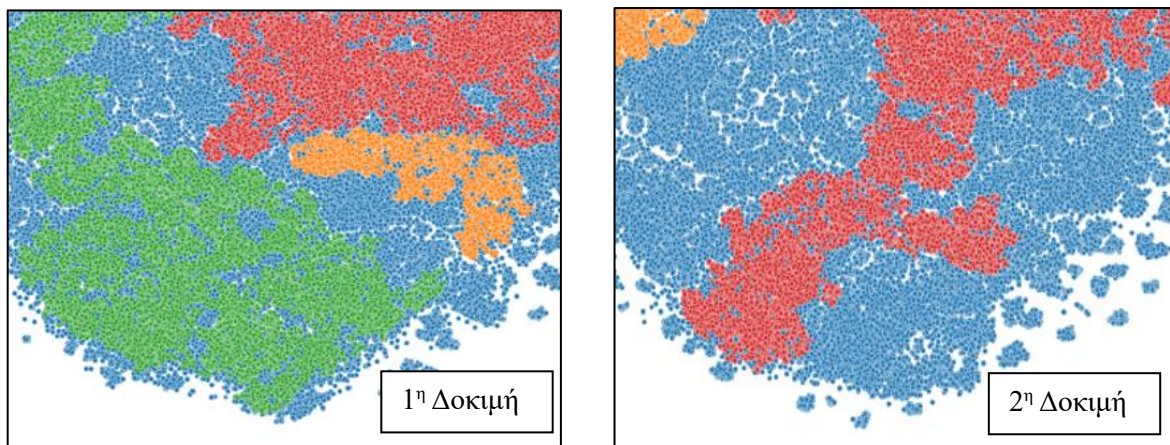
Εικόνα 87: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του t - SNE για το NDCI στις δυο Δοκιμές

Εφαρμόζοντας, λοιπόν, τον αλγόριθμο ομαδοποίησης, το αποτέλεσμα είναι το εξής:



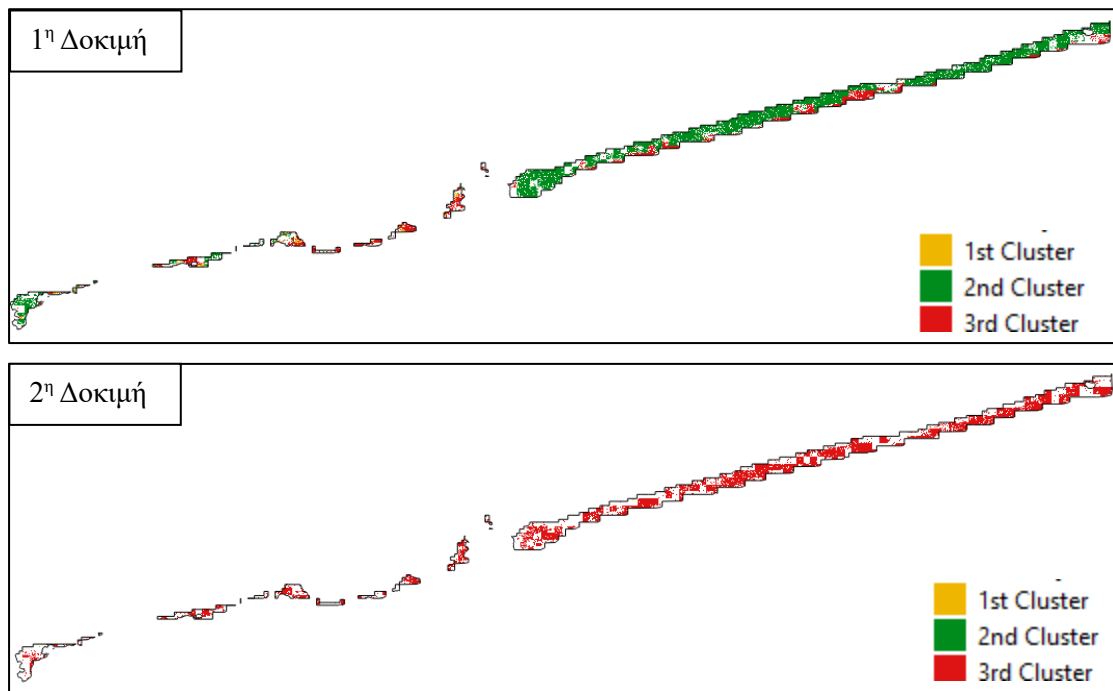
Εικόνα 88: Σύγκριση της δημιουργίας και της χωρικότητας των Ομάδων για το NDCI στις δυο Δοκιμές

Για αρχή, όσο αναφορά τον λεγόμενο «θόρυβο», ήταν αναμενόμενο η 2^η Δοκιμή να μην κατηγοριοποιήσει περισσότερα εικονοστοιχεία σε κάποια από τις τρεις κατηγορίες. Η ύπαρξη πολλών μικρών συστάδων, ενώ το ζητούμενο είναι η δημιουργία μόνο τριών συστάδων, προκαλεί τον αλγόριθμο να ταξινομήσει πολλά από αυτά τα εικονοστοιχεία ως «θόρυβο». Αυτό είναι διακριτό και στην τελική οπτικοποίηση του HDBSCAN, πια, ως tif αρχείο. Πιο συγκεκριμένα, στην 1^η Δοκιμή, πολλά εικονοστοιχεία που κατηγοριοποιήθηκαν στην 2^η Κατηγορία (Πράσινο), έχουν κατηγοριοποιηθεί στην 2^η Δοκιμή, είτε ως «θόρυβος», είτε ως 3^η Κατηγορία (Κόκκινο).



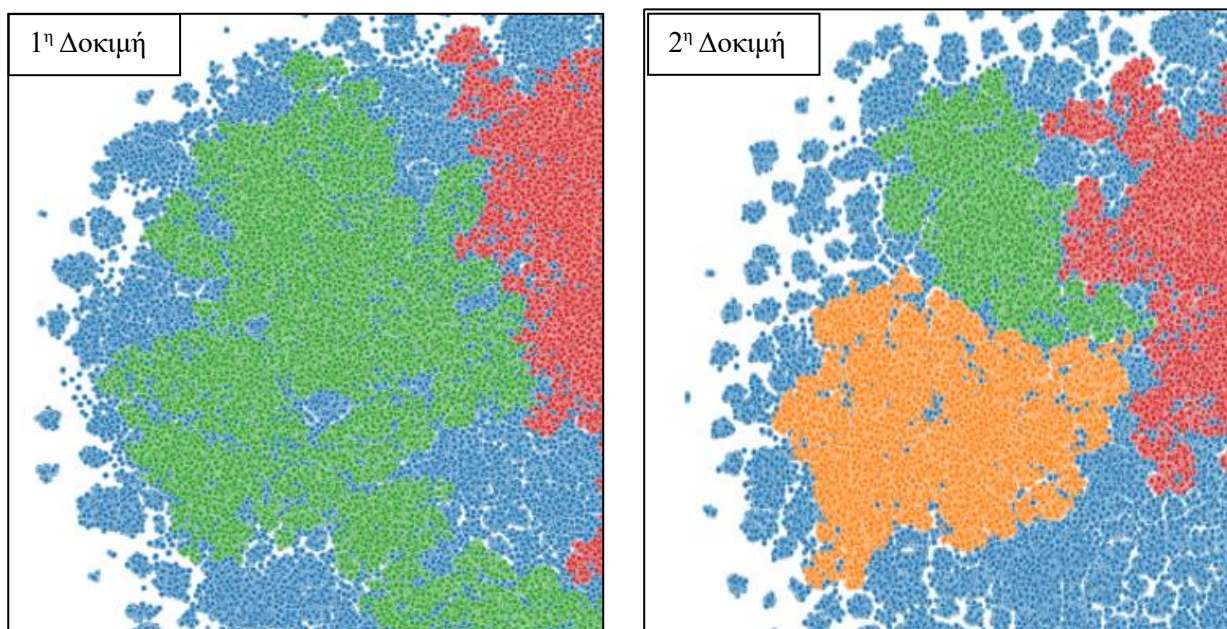
Εικόνα 89 - 90: Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο νότιο τμήμα του t -SNE για το NDCI

Η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται στην «ουρά» του ποταμού, στο βορειοανατολικό τμήμα του Σπερχειού.



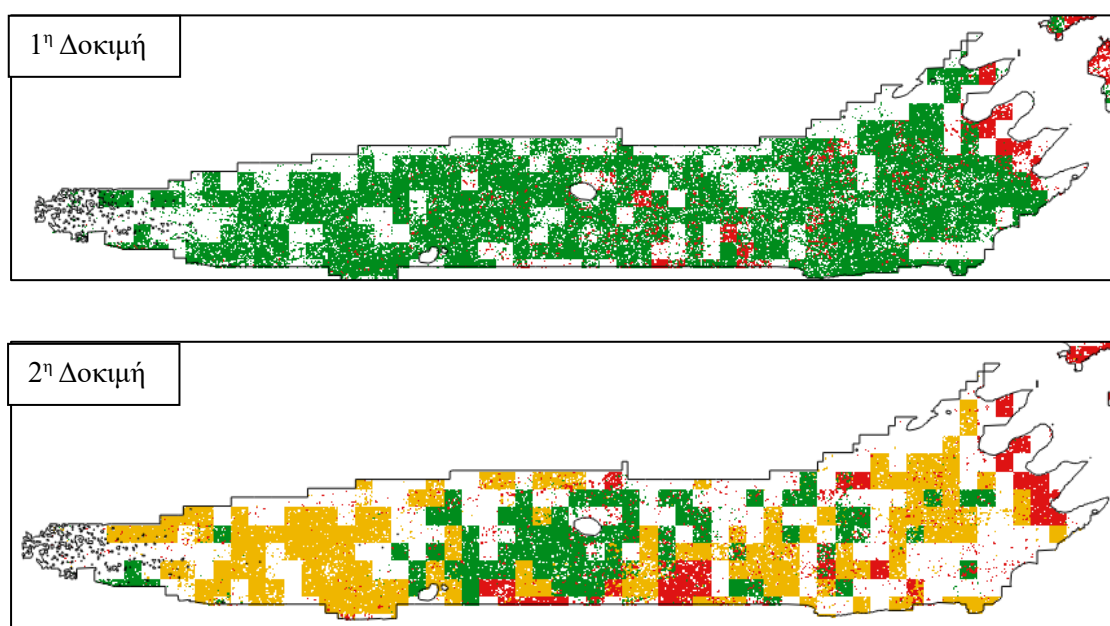
Εικόνα 91 - 92: Η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων στο βορειοανατολικό τμήμα του Ποταμού

Όσο αναφορά την 1^η Κατηγορία (Πορτοκαλί), η κατάσταση μεταξύ των δυο HDBSCAN είναι αρκετά διαφορετική. Στην 1^η Δοκιμή, έχουν ταξινομηθεί σε αυτή την κατηγορία πολύ λιγότερα εικονοστοιχεία απ' ό,τι στην 2^η. Αναλυτικότερα, φαίνεται ότι κάποια εικονοστοιχεία που βρίσκονται στην 1^η Δοκιμή στην 2^η Κατηγορία (Πράσινο), μεταφέρθηκαν και ταξινομήθηκαν στην 1^η Κατηγορία (Πορτοκαλί) στην 2^η Δοκιμή.



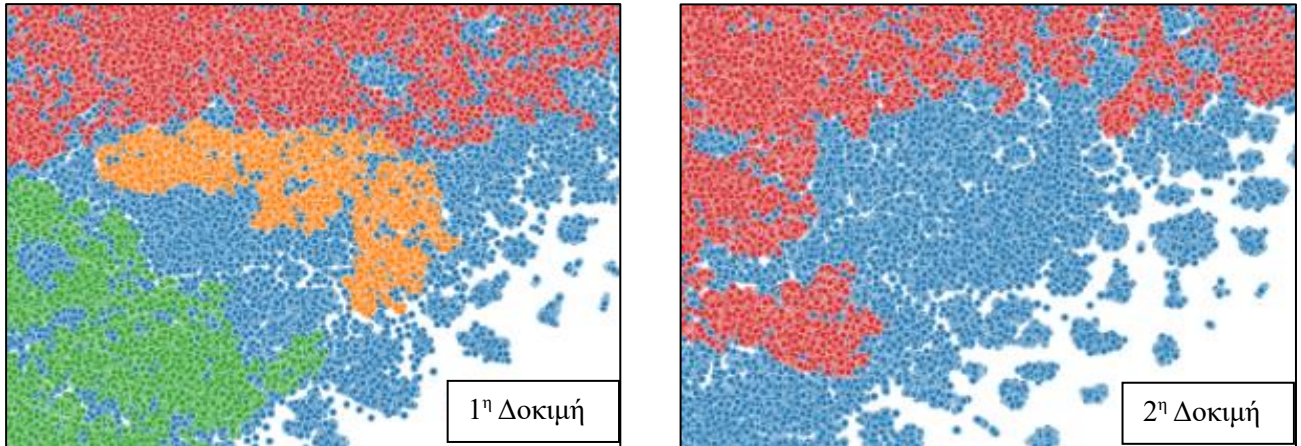
Εικόνα 93 - 94: Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο δυτικό τμήμα του t -SNE για το NDCI

Η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται στο κάτω μέρος του ποταμού, στο νοτιοδυτικό τμήμα του Σπερχειού.



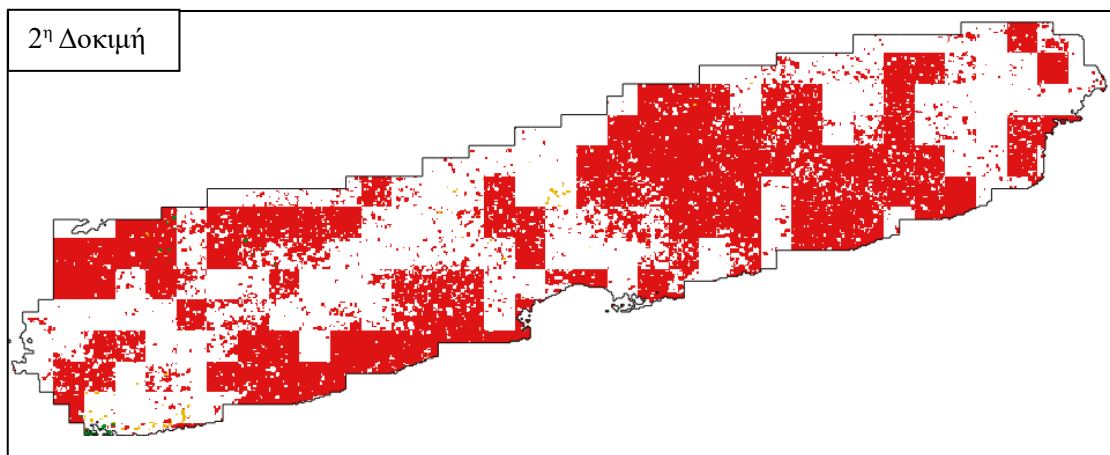
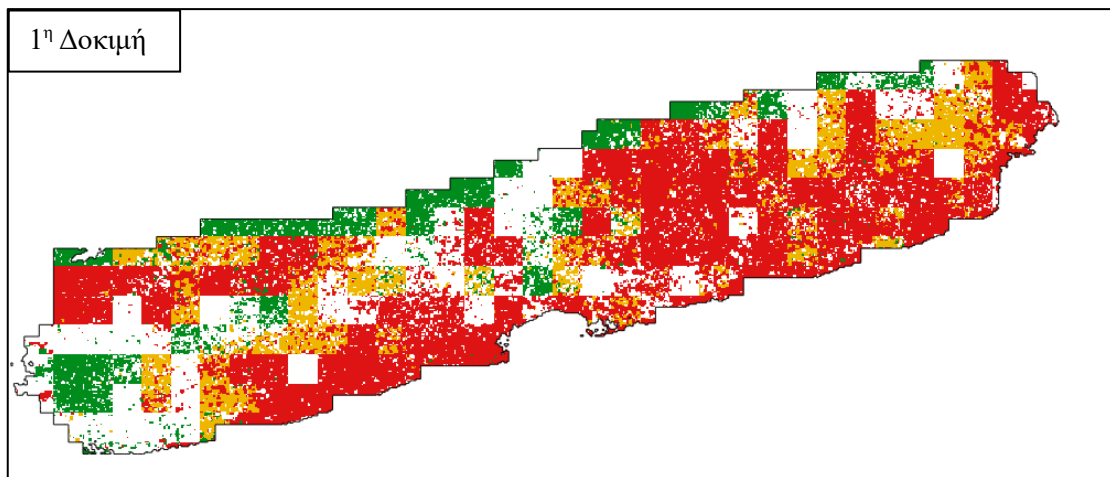
Εικόνα 95 - 96: Η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων στο νοτιοδυτικό τμήμα του Ποταμού

Επιπλέον, κάποια εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν στην 1^η Κατηγορία στην 1^η Δοκιμή, ταξινομήθηκαν ως «θόρυβος» στην 2^η.



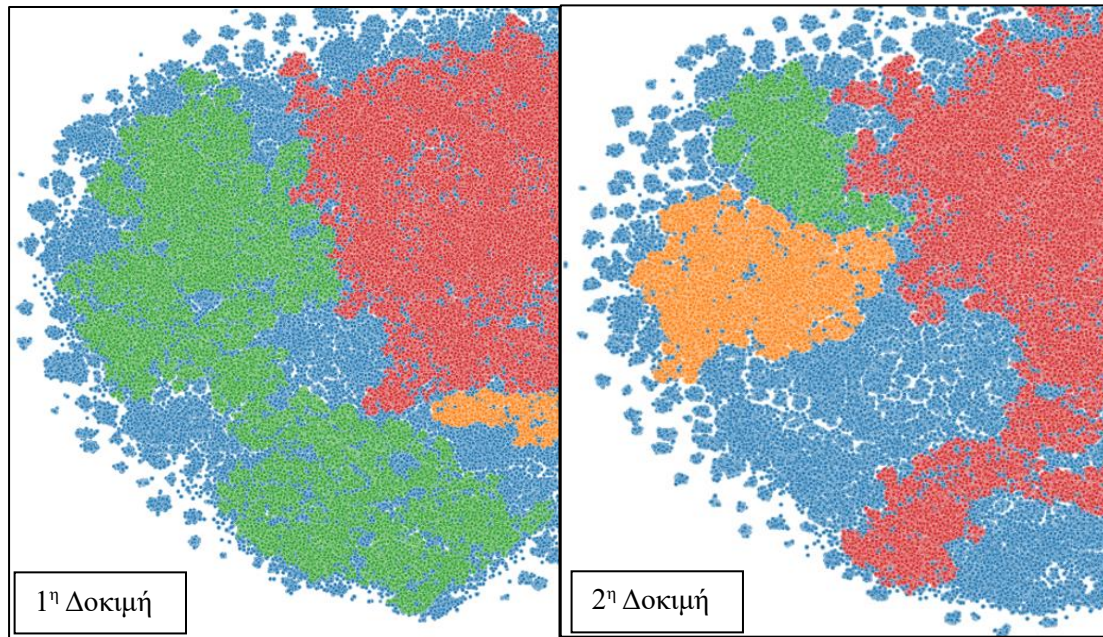
Εικόνα 97 - 98: Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο ανατολικό τμήμα του t - SNE για το NDCI

Η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται στο μεσαίο μέρος του ποταμού.



Εικόνα 99 - 100: Η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων στο κεντρικό τμήμα του Ποταμού

Συνεχίζοντας στην 2^η Κατηγορία (Πράσινο), η 1^η Δοκιμή ταξινομεί πολλά παραπάνω εικονοστοιχεία στις εκεί, σχεδόν στην ίδια ποσότητα με την 3^η Κατηγορία (Κόκκινο) που στις λαμβάνει μεγάλο μέρος των εικονοστοιχείων. Ενώ σχεδόν όλο το δυτικό μέρος του TSNE του NDVI στην 1^η Δοκιμή αποτελείτε από την 2^η Κατηγορία (και κάποιο «θόρυβο»), στην 2^η Δοκιμή υπάρχει όλη η 1^η Κατηγορία (Πορτοκαλί), ένα μέρος στις 3^η Κατηγορίας (Κόκκινο) και πολύς «θόρυβος».

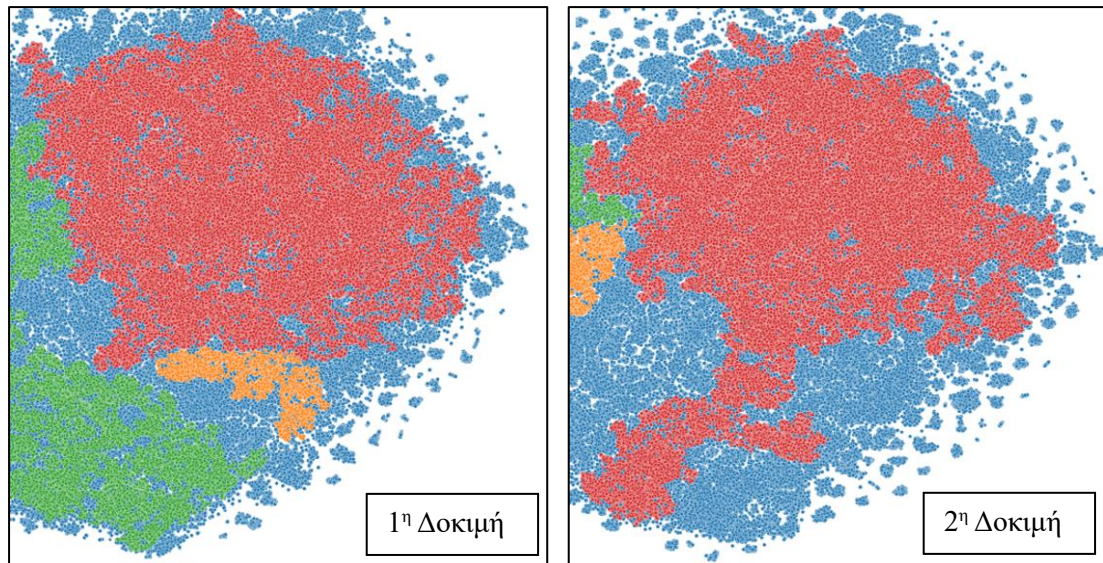


Εικόνα 101 - 102: Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο νοτιοδυτικό τμήμα του t -SNE για το NDVI

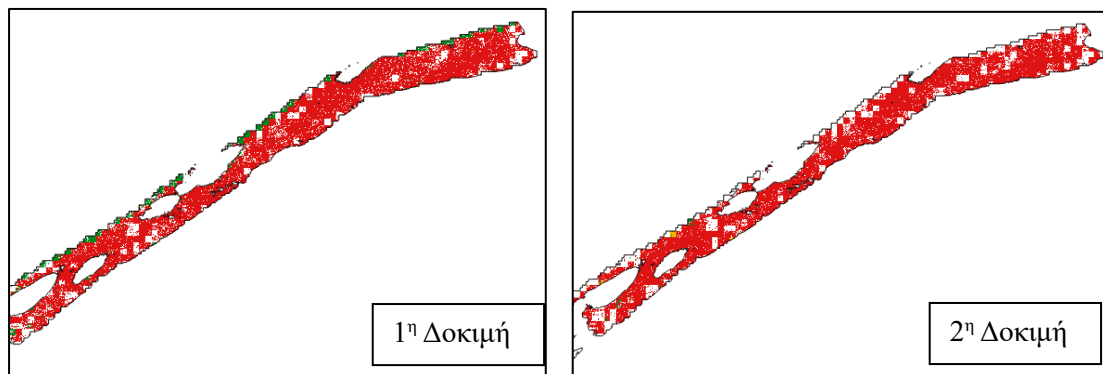
Όπως αναφέρθηκε και στην Εικόνα X, το συγκεκριμένο μέρος είναι το νοτιοδυτικό τμήμα του ποταμού, όπου η 1^η Δοκιμή το ταξινομεί στην 2^η Κατηγορία (Πράσινο), ενώ η 2^η Δοκιμή το ταξινομεί στην 1^η Κατηγορία (Πορτοκαλί), λίγο στην 3^η Κατηγορία (Κόκκινο) και φυσικά στον «θόρυβο».

Τέλος, στην 3^η Κατηγορία (Κόκκινο) τα πράγματα φαίνονται αρκετά απλά. Ένα μεγάλο μέρος και των δυο Δοκιμών ταξινομεί το ίδιο μέρος του TSNE στην συγκεκριμένη τάξη, με την διαφορά ότι η 2^η Δοκιμή επεκτείνει το εύρος της και στο νότιο κομμάτι του TSNE, το οποίο στην 1^η Δοκιμή ταξινομείται στη 2^η Κατηγορία (Πράσινο)

Το συγκεκριμένο τμήμα, φαίνεται να είναι το κύριο «σώμα» του ποταμού, δηλαδή η περιοχή που βρίσκεται στο κέντρο της Περιοχής Μελέτης. Στο συγκεκριμένο μέρος, αποτελείται κατά κύριο λόγο από εικονοστοιχεία της 3^η Κατηγορίας (Κόκκινο) και με κάποια εικονοστοιχεία της 2^η Κατηγορίας (Πράσινο) στην περίπτωση της 1^η Δοκιμής.



Εικόνα 103 - 104: Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο βορειοδυτικό τμήμα του t -SNE για το NDCI

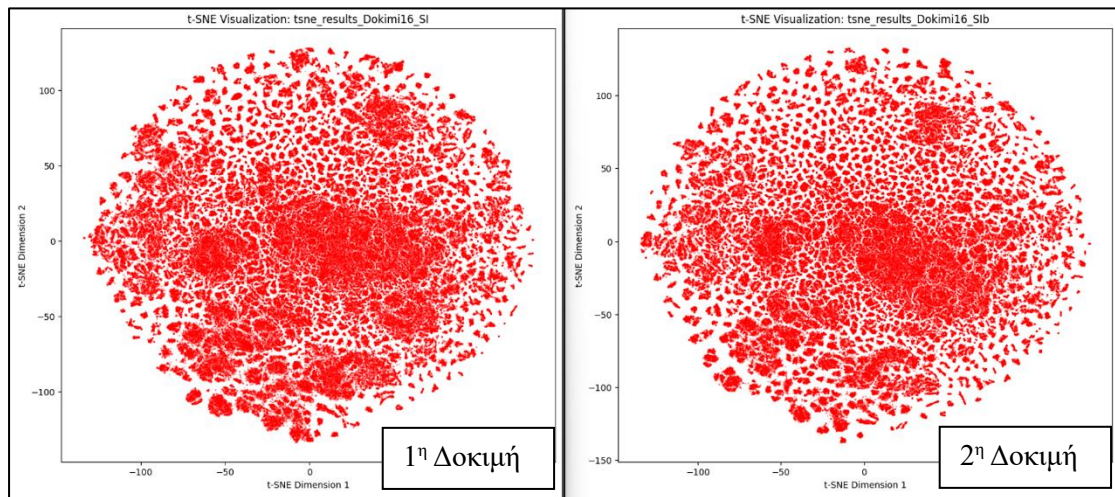


Εικόνα 105 - 106: Η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων στο κεντρικό τμήμα του Ποταμού

4.6.2.2 SI

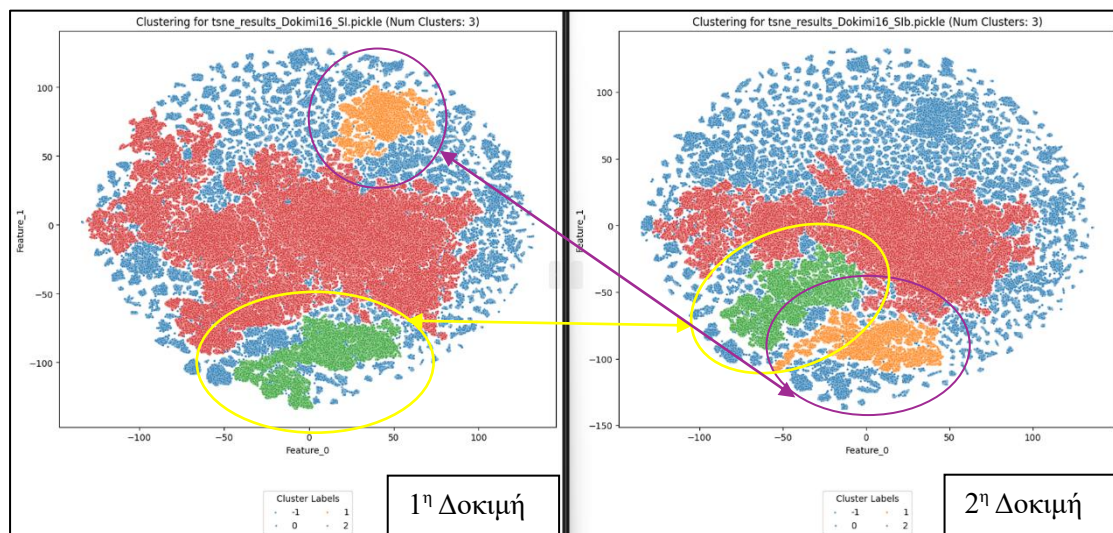
Όπως φαίνεται καλύτερα στην παρακάτω εικόνα, σε αντίθεση με το TSNE του NDCI, οι διαφορές δεν είναι τόσο αισθητές. Υπάρχει σχεδόν πανομοιότυπη οπτικοποίηση του TSNE, με την 2^η Δοκιμή, η οποία και περιλαμβάνει την αντίστοιχη εικόνα Sentinel – 2 στις 24 Δεκεμβρίου 2020 να είναι ελάχιστα πιο «αραιή» σε σχέση με την 1^η Δοκιμή η οποία και περιλαμβάνει την αντίστοιχη εικόνα Skysat στις 24 Δεκεμβρίου 2020, που σε κάποια σημεία εμφανίζεται πιο πυκνή. Και εδώ πέρα υπάρχει το πρόβλημα των πολλών, αλλά μικρών συστάδων, οι οποίες κατά πάσα πιθανότητα θα ταξινομηθούν ως «θόρυβος» και στις δυο Δοκιμές. Επιπλέον, φαίνεται ότι στο νότιο τμήμα του TSNE της 1^{ης} Δοκιμής να δημιουργείται μια συστάδα μεγαλύτερου μεγέθους, σε σχέση με αυτή της 2^{ης} Δοκιμής.

Είναι πολύ πιθανό, αντίστοιχα με την ομοιότητα των TSNE, η διαφορές στα δυο HDBSCAN να είναι και αυτές πολύ μικρότερες σε σχέση με το HDBSCAN του TSNE του NDCI.



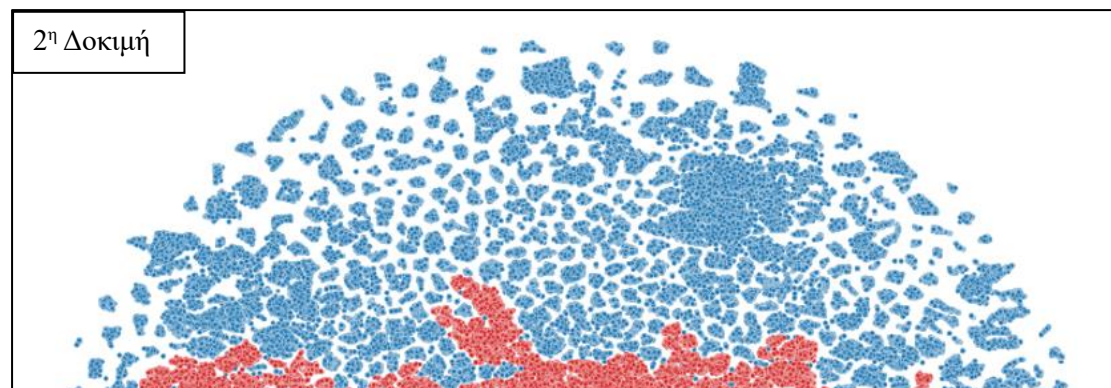
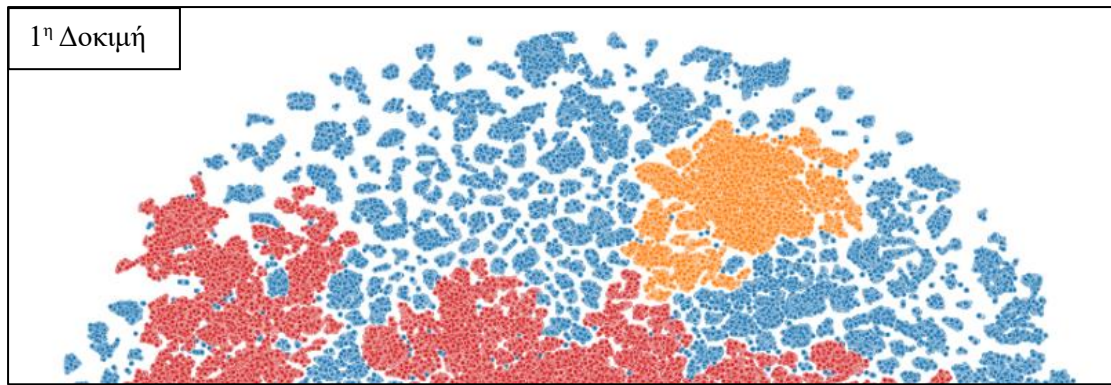
Εικόνα 107 - 108: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του t -SNE για το SI στις δυο Δοκιμές

Εφαρμόζοντας, λοιπόν, τον αλγόριθμο ομαδοποίησης, το αποτέλεσμα είναι το εξής:



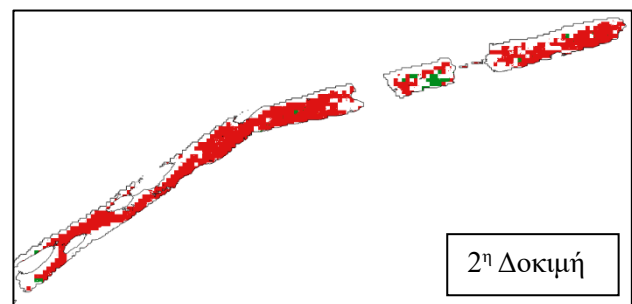
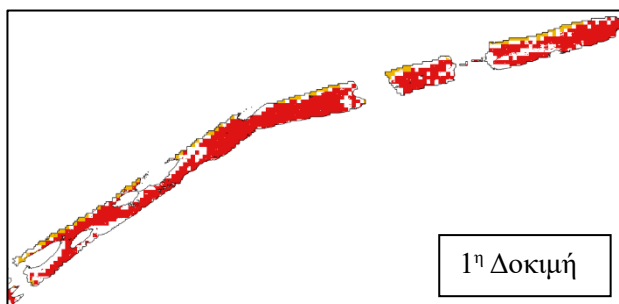
Εικόνα 109 - 110: Μετακινήσεις και χωροθέτηση των συστάδων για το SI στις δυο Δοκιμές

Για αρχή, όσο αναφορά τον λεγόμενο «θόρυβο», ήταν αναμενόμενο η 2^η Δοκιμή να μην κατηγοριοποιήσει περισσότερα εικονοστοιχεία σε κάποια από τις τρεις κατηγορίες. Και εδώ, όπως και με το αντίστοιχο HDBSCAN του TSNE του NDCI, η ύπαρξη πολλών μικρών συστάδων, ενώ το ζητούμενο είναι η δημιουργία μόνο τριών συστάδων, προκαλεί τον αλγόριθμο να ταξινομήσει πολλά από αυτά τα εικονοστοιχεία ως «θόρυβος». Πιο συγκεκριμένα, στην 1^η Δοκιμή, κάποια εικονοστοιχεία που κατηγοριοποιήθηκαν στην 2^η Κατηγορία (Πορτοκαλί) και στην 3^η Κατηγορία (Κόκκινο), έχουν κατηγοριοποιηθεί στην 2^η Δοκιμή, ως «θόρυβος».



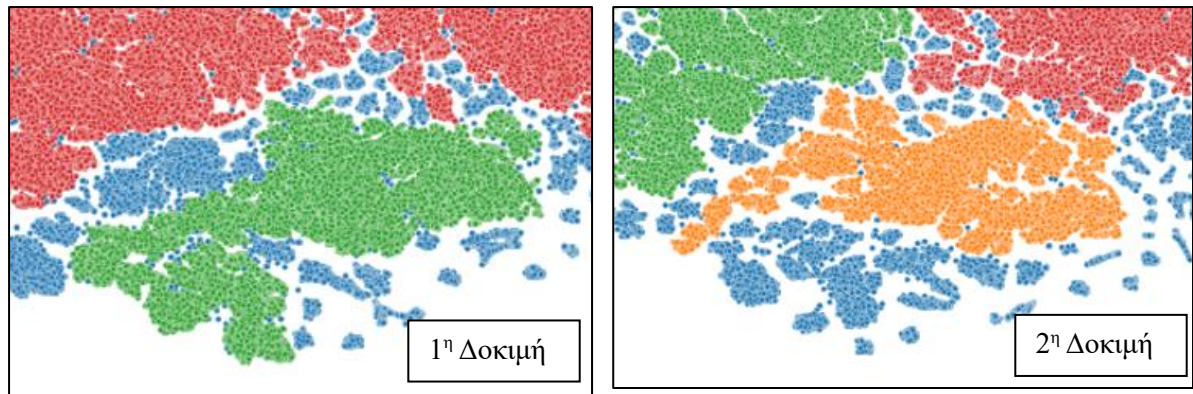
Εικόνα 111 - 112: Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο βόρειο τμήμα του t - SNE για το SI

Η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται στις παρυφές του ποταμού στο κύριο «σώμα».



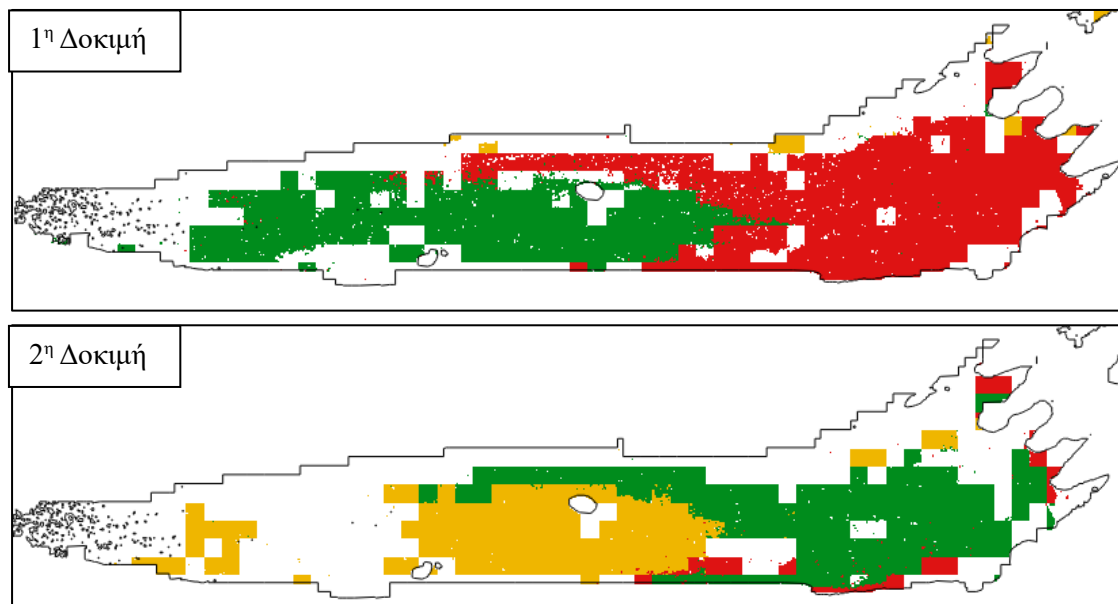
Εικόνα 113 - 114: Διαφορές στην Οπτικοποίηση των εικονοστοιχείο στο κεντρικό σώμα του ποταμού για το SI στις δυο Δοκιμές

Για την 1^η Κατηγορία (Πορτοκαλί) αναφέρθηκε ήδη ότι βρίσκεται το μέρος όπου και ταξινομείται στην 1^η Δοκιμή. Όσο αναφορά την 2^η Δοκιμή, φαίνεται ότι έχει καταλάβει ένα μέρος του νότιου τμήμα του TSNE, το οποίο ταξινομείται στην αντίστοιχη 2^η Κατηγορία (Πράσινο) στην 1^η Δοκιμή.



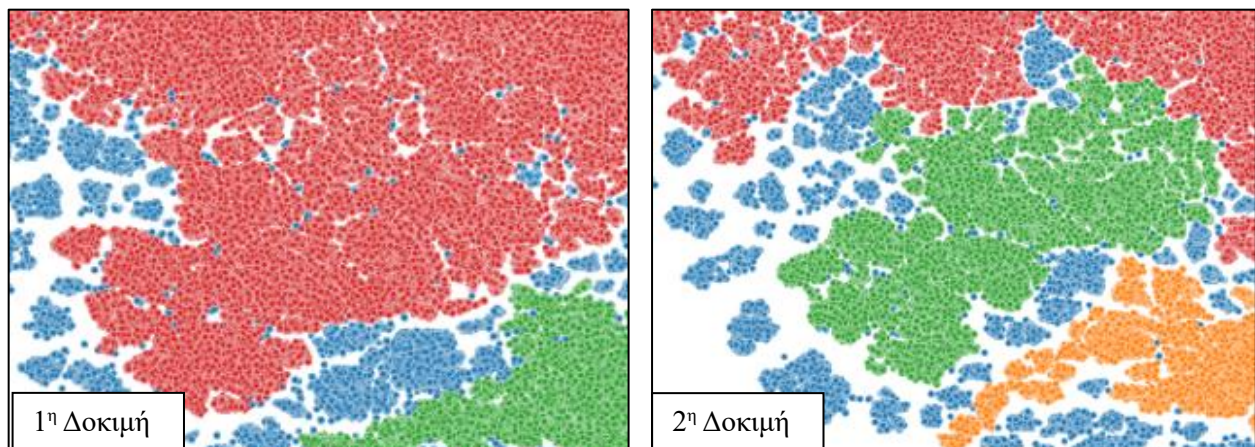
Εικόνα 115 - 116: Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο νότιο τμήμα του $t - SNE$ για το SI

Η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται στην «μύτη» στις περιοχής μελέτης, δηλαδή στο νοτιοδυτικό τμήμα του ποταμού.



Εικόνα 117 - 118: Διαφορές στην Οπτικοποίηση των εικονοστοιχείο στο νοτιοδυτικό σώμα του ποταμού για το SI στις δυο Δοκιμές

Όσο αναφορά την 2^η Κατηγορία (Πράσινο), και εδώ υπάρχουν μεταβολές στην ταξινόμηση των δυο Δοκιμών. Αναλυτικότερα, στην 2^η Δοκιμή, η αντίστοιχη 2^η Κατηγορία, έχει ταξινομηθεί στην 3^η Κατηγορία (Κόκκινο) στην 1^η Δοκιμή.



Εικόνα 119 - 120: Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο νότιοδυτικό τμήμα του $t - SNE$ για το SI

Η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται στην «μύτη» της περιοχής μελέτης, δηλαδή στο νοτιοδυτικό τμήμα του ποταμού και απεικονίζεται στις Εικόνες 116 και 117.

Τέλος, η 3^η Κατηγορία (Κόκκινο) φαίνεται να καταλαμβάνει και αυτή το μεγαλύτερο μέρος του TSNE και κατ' επέκταση της Περιοχής Μελέτης. Η διαφορά μεταξύ των δυο δοκιμών είναι ότι η 1^η Δοκιμή ταξινομεί περισσότερα εικονοστοιχεία σε αυτή την τάξη, ενώ η 2^η Δοκιμή τα ταξινομεί, είτε στην 2^η Κατηγορία (Πράσινο), είτε ως θόρυβο.

Η συγκεκριμένη περιοχή βρίσκεται κατά κύριο λόγο στο «σώμα» του ποταμού, ενώ η εναλλαγή 3^{ης} Κατηγορίας (Κόκκινο) και 2^{ης} Κατηγορίας (Πράσινο) μεταξύ 1^{ης} και 2^{ης} Δοκιμής, φαίνεται στις Εικόνες 112 και 113.

Εν κατακλείδι, η μόνη διαφορά μεταξύ των συνόλων δεδομένων των Δοκιμών 1 και 2 είναι ότι η Δοκιμή 1 περιλαμβάνει την εικόνα Skysat από τις 24 Μαρτίου 2021, καθιστώντας το t-SNE πιο "συμπαγές", ενώ τη Δοκιμή 2 χρησιμοποιεί την Sentinel-2 εικόνα (από την ίδια ημερομηνία), με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα λιγότερο συμπαγές t-SNE.

Η ταξινόμηση ενός σημαντικού αριθμού εικονοστοιχείων ως «θόρυβος» στην 2^η Δοκιμή, δεν βοηθάει τόσο στην εξαγωγή της έρευνας. Εφόσον, δίνεται μέσω της 1^{ης} Δοκιμής μια μεγαλύτερη ταξινόμηση των υπάρχοντων εικονοστοιχείων στις τρεις κατηγορίες, θα επιλεχθεί ως η Δοκιμή που θα συνεχιστεί η επεξεργασία και η ανάλυση.

Επομένως, το dataset που θα ερευνηθεί περαιτέρω είναι:

Πίνακας 13: Τελική Χρονοσειρά

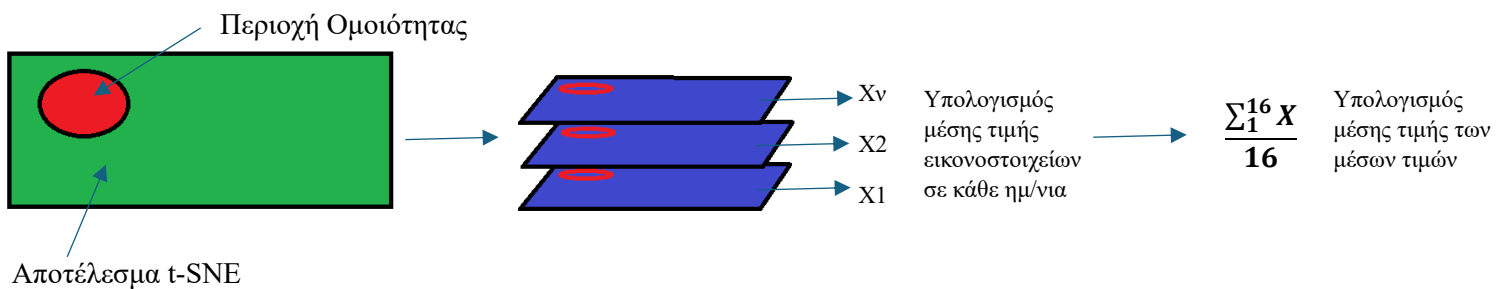
Ημερομηνία	Αισθητήρας
23 Δεκεμβρίου 2020	SkySat
24 Δεκεμβρίου 2020	SkySat
28 Δεκεμβρίου 2020	SkySat
28 Ιανουαρίου 2021	Sentinel 2
12 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2
17 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2
18 Φεβρουαρίου 2021	SkySat
22 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2
23 Φεβρουαρίου 2021	SkySat
27 Φεβρουαρίου 2021	Sentinel 2
04 Μαρτίου 2021	Sentinel 2
13 Μαρτίου 2021	SkySat
17 Μαρτίου 2021	SkySat
24 Μαρτίου 2021	SkySat
29 Μαρτίου 2021	Sentinel 2
30 Μαρτίου 2021	SkySat

4.6.3 Μεθοδολογία και Τελική Ομαδοποίηση του t – SNE

Είναι πολύ σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι το TSNE χρησιμοποιεί ένα σετ δεδομένων το οποίο περιλαμβάνει δεκαέξι εικόνες με πάνω από 600.000 εικονοστοιχεία η κάθε μια. Πρέπει να γίνει αντιληπτό, λοιπόν, ότι η ομαδοποίηση του HDBSCAN πάνω στο TSNE γίνεται συνολικά «πάνω» σε ένα 2 – D μέγεθος, στο οποίο κάθε σημείο που απεικονίζεται στο Scatterplot του t- SNE εκπροσωπεί ένα flattened datapoint του εκάστοτε σημείου σε κάθε μια από τις ημερομηνίες (βλ. Εικόνα 82). Έχοντας αυτό κατά νου, ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Στο αρχικό t – SNE που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.6.1, δημιουργήθηκαν τα τρία πολύγωνα των ορίων τριών κατηγοριών ομοιότητας που προέκυψαν. Πάνω σε αυτά τα πολύγωνα, έγινε εξαγωγή των εικονοστοιχείων στις κάθε συστάδας για κάθε μια από τις δεκαέξι εικόνες και στην συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος (mean value) στις.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, το αποτέλεσμα αυτού του μέσου όρου προκύπτει από τα εικονοστοιχεία όλων των δεκαέξι εικόνων της χρονοσειράς που βρίσκονται στην εκάστοτε περιοχή της κατηγορίας. Αυτό σημαίνει ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση η εξαγωγή του μέσου όρου των εικονοστοιχείων μεμονωμένα σε κάθε μια ημερομηνία, δεν αρκεί. Γι' αυτό τον λόγο, σε δεύτερη φάση, υπολογίστηκε και ο μέσος όρος όλων των ημερομηνιών σε κάθε κατηγορία που δημιούργησε το HDBSCAN. Με βάση αυτόν τον αριθμό, ορίστηκε και ο τρόπος που θα οπτικοποιηθεί και η συστάδα. Με λίγα λόγια, τα όρια των τριών πολυγώνων που καθορίζουν τις κατηγορίες, είναι κοινά σε όλες τις εικόνες.



Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω, παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.2 (Διάγραμμα 20 και 21)

4.7 2^η Προσέγγιση: Ομαδοποίηση Δεδομένων μέσω του HDBSCAN σε κάθε εικόνα

Σε αντίθεση με το Κεφάλαιο 4.6, εδώ θα γίνει επεξεργασία σε κάθε μια από τις δεκαέξι εικόνες. Σε αντίθεση με το TSNE όπου και χρησιμοποιείται ένα συγκεκριμένο dataset που περιλαμβάνει τις εικόνες, εδώ η επεξεργασία και η ομαδοποίηση του HDBSCAN έγινε πάνω σε κάθε εικόνα ξεχωριστά.

Απόσπασμα του Κώδικα που χρησιμοποιήθηκε:

```
# Καθορισμός του ορίου για τα έγκυρα pixel
threshold = -9999

def read_tiff(file_path): dataset = gdal.Open(file_path) X_size =
dataset.RasterXSize Y_size = dataset.RasterYSize array =
dataset.ReadAsArray().astype(float) return X_size, Y_size, array

# Σταθερές
MIN_CLUSTER_SIZE = number
MIN_SAMPLES = 20
ALPHA = 0.7
COLORMAP = LinearSegmentedColormap.from_list('custom', ['#FFFFFF',
'FF0000', '#00FF00', '#0000FF'], N=256)
THRESHOLD = -9999

# Αλγόριθμος Ομαδοποίησης
def perform_clustering(data_scaled, min_cluster_size=MIN_CLUSTER_SIZE,
min_samples=MIN_SAMPLES, alpha=ALPHA):
clusterer = hdbscan.HDBSCAN(min_cluster_size=min_cluster_size,
min_samples=min_samples, alpha=alpha)
labels = clusterer.fit_predict(data_scaled)
return labels

# Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων με ετικέτες συμπλέγματος
def visualize_results_integer_labels(original_array, labeled_array, title,
save_path=None):
fig, ax = plt.subplots(1, 2, figsize=(15, 7))

# Πλοτάρισμα
im_original = ax[0].imshow(original_array, cmap='viridis') # Use a continuous
colormap for the original image
ax[0].set_title(f'Original Image: {title}')
fig.colorbar(im_original, ax=ax[0], orientation='vertical', fraction=0.046,
pad=0.04)

# Αποθήκευση ως Tiff
def save_clustered_image(output_path, X_size, Y_size, dataset, labeled_array):
driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')
output_dataset = driver.Create(output_path, X_size, Y_size, 1,
gdal.GDT_Float32)
output_dataset.SetGeoTransform(dataset.GetGeoTransform())
output_dataset.SetProjection(dataset.GetProjection())
output_dataset.GetRasterBand(1).WriteArray(labeled_array)
output_dataset = None
print(f'Clustered image saved as {output_path}')

# Πλοτάρισμα Υπομνήματος
def plot_cluster_table(cluster_labels):
unique_labels, counts = np.unique(cluster_labels, return_counts=True)

# Αποθήκευση ως Tiff
def save_clustered_image(output_folder, tif_file, X_size, Y_size, dataset, labeled_array,
hdbscan_params)
min_cluster_size, min_samples, alpha = hdbscan_params

os.makedirs(output_folder, exist_ok=True)

output_filename =
f'clustered_image_{tif_file}_minCS{min_cluster_size}_minS{min_samples}_alpha{alpha}'

output_path = os.path.join(output_folder, output_filename + ".tif")

driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')
output_dataset = driver.Create(output_path, X_size, Y_size, 1, gdal.GDT_Float32)
output_dataset.SetGeoTransform(dataset.GetGeoTransform())
output_dataset.SetProjection(dataset.GetProjection())
output_dataset.GetRasterBand(1).WriteArray(labeled_array)
output_dataset = None

for tif_file in tif_files:
X_size, Y_size, test_array = read_tiff(os.path.join(tif_folder, tif_file))

# Μετατροπή πίνακα σε float και ορισμός μη έγκυρων εικονοστοιχείων σε Nan
test_array[test_array <= threshold] = np.nan

data_scaled =
StandardScaler().fit_transform(test_array[~np.isnan(test_array)].reshape(-1, 1))

# Εφαρμογή hdbscan
labels = perform_clustering(data_scaled)

# Εφαρμογή ετικετών σε κάθε εικονοστοιχείο
labeled_pixel_values = np.full_like(test_array, fill_value=np.nan)
labeled_pixel_values[~np.isnan(test_array)] = labels

print(f'Labeled Pixel Values for {tif_file}:\n{np.array2string(labeled_pixel_values,
precision=2, separator=',')}")

visualize_results_integer_labels(test_array, labeled_pixel_values, tif_file)
```

!Προσοχή!

Το HDBSCAN καθορίζει τις τρεις κατηγορίες (δηλαδή τα όρια τους στην Περιοχή Μελέτης). ΔΕΝ καθορίζει το είδος της κάθε Κατηγορίας και τι αντιπροσωπεύει. Μέχρι να γίνει ο καθορισμός, οι συστάδες, τόσο στο NDCI όσο και στο SI, θα προσφωνούνται ως **Κατηγορία 1, 2 και 3**.

HDBSCAN on Individual: Προσδιορισμός συμπλεγμάτων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι σχέσεις ή τα μοτίβα που εκτείνονται σε χρονικά σημεία. Παραβλέπονται συσχετισμοί που εμφανίζονται με την πάροδο του χρόνου.

4.7.1 Individual Clustering: NDCI

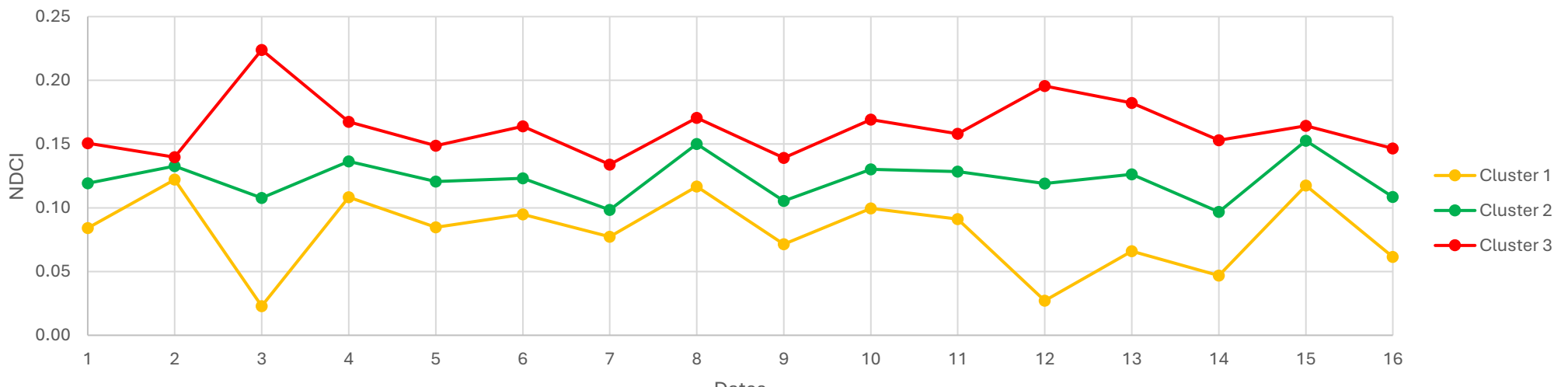
4.7.1.1 1^ο Βήμα: Υπολογισμός των Μέσων Όρων κάθε συστάδας: NDCI

Στο πρώτο στάδιο και αφού ο αλγόριθμος του HDBSCAN εφαρμοστεί σε κάθε εικόνα, θα γίνει εξαγωγή των εικονοστοιχείων της κάθε συστάδας για κάθε μια από τις δεκαέξι εικόνες και στην συνέχεια θα υπολογιστεί ο μέσος όρος (mean value) τους. Σε αντίθεση με το t – SNE, όπου και τα όρια των τριών πολυγώνων που καθορίζουν τις κατηγορίες, είναι κοινά σε όλες τις εικόνες, εδώ τα όρια των τριών πολυγώνων που καθορίζουν τις κατηγορίες είναι **διαφορετικά** σε κάθε εικόνα και προκύπτουν από το HDBSCAN που εφαρμόζεται πάνω σε κάθε μια από αυτή.

Πίνακας 14: Μέσοι Όροι κάθε συστάδας σε κάθε ημ/νια για το NDCI

Cluster	23 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat	24 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat	28 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat	28 Ιανουαρίου 2021 – Sentine 12	12 Φεβρουαρίου 2021 – Sentine 12	17 Φεβρουαρίου 2021 – Sentine 12	18 Φεβρουαρίου 2021 – Skysat	22 Φεβρουαρίου 2021 – Sentine 12	23 Φεβρουαρίου 2021 – Skysat	27 Φεβρουαρίου 2021 – Sentine 12	04 Μαρτίου 2021 – Sentine 12	13 Μαρτίου 2021 – Skysat	17 Μαρτίου 2021 – Skysat	24 Μαρτίου 2021 – Skysat	29 Μαρτίου 2021 – Sentine 12	30 Μαρτίου 2021 – Skysat	Mean Value
1	0.0841	0.1221	0.0229	0.1084	0.0848	0.0949	0.0772	0.1166	0.0714	0.0996	0.0911	0.0272	0.0659	0.0469	0.1174	0.0615	0.0808
2	0.1193	0.1327	0.1078	0.1364	0.1207	0.1231	0.0985	0.1502	0.1054	0.1302	0.1284	0.1191	0.1262	0.0968	0.1526	0.1085	0.1222
3	0.1507	0.1398	0.2239	0.1675	0.1487	0.1638	0.1340	0.1706	0.1392	0.1693	0.1581	0.1955	0.1824	0.1530	0.1643	0.1466	0.1630

Διάγραμμα 16: Μέσος Όρος της κάθε συστάδας για κάθε ημ/νια του NDCI



Σύμφωνα με τον Πίνακα 14 και το Διάγραμμα 15 που δημιουργείται από αυτόν, φαίνεται ότι οι τιμές των μέσων όρων κάθε μια από τις εικόνες NDCI ακολουθούν μια παρόμοια πορεία, πέρα από μερικές εξαιρέσεις. Αναλυτικότερα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι, λίγο πολύ, και οι τρεις γραμμές που οπτικοποιούν κάθε μια από τις τρεις κατηγορίες, έχουν σχεδόν ίδια μορφολογία, άσχετα που υφίστανται σε διαφορετικό εύρος τιμών. Πιο συγκεκριμένα, από την Εικόνα 4: 28 Ιανουαρίου 2021 - Sentinel 2, έως και την Εικόνα 11: 04 Μαρτίου 2021 - Sentinel 2 οι ευθείες των διαγραμμάτων ακολουθούν τις ίδιες αυξομειώσεις, με την Πορτοκαλί γραμμή να βρίσκεται στις κατώτερες τιμές, ούσα η Κατηγορία που εκφράζει τον χαμηλότερο μέσο όρων των εικονοστοιχείων, ενώ ακολουθούν η 2η Κατηγορία - Πράσινο (μεσαίες τιμές) και 3η Κατηγορία - Κόκκινο (υψηλότερες τιμές). Εκτός αυτού του χρονικού διαστήματος, οι διαφορές είναι μεγαλύτερες. Τα πιο έντονα παραδείγματα είναι δυο; στην Εικόνα 3: 28 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat, όπου η 1η Κατηγορία - Πορτοκαλί και η 3η Κατηγορία - Κόκκινο, έχουν αντιδιαμετρική καμπή (1η Κατηγορία: 0.0229, 3η Κατηγορία: 0.2239), αλλά και στην Εικόνα 12: 13 Μαρτίου 2021 - Skysat όπου και εκεί υπάρχει μια αντίστοιχη, αλλά μικρότερης έντασης, διαφοροποίηση (1η Κατηγορία: 0.0272, 3η Κατηγορία: 0.1955).

Σε γενικές γραμμές, οι προσωρινές τιμές της 1ης Κατηγορίας - Πορτοκαλί, κυμαίνονται μεταξύ (0.0229, 0.1221), της 2ης Κατηγορίας - Πράσινο από (0.1526, 0.1526) και της 3ης Κατηγορίας - Κόκκινο από (0.1340, 0.2239). Παρατηρείται, λοιπόν, ότι το εύρος τιμών της 2ης Κατηγορίας είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τις υπόλοιπες δυο Κατηγορίες. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι όλες οι τιμές είναι θετικές, χωρίς καμία εμφάνιση αρνητικών τιμών NDCI σε καμία από τις εικόνες.

Συμπερασματικά, αυτό που μπορεί να ειπωθεί είναι ότι σύμφωνα με το διάγραμμα για το NDCI, είναι ότι οι τιμές της 1ης, της 2ης, αλλά και της 3ης Κατηγορίας, οι οποίες αντικατοπτρίζουν τον χαμηλότερο, τον μεσαίο και τον υψηλότερο μέσο όρο του NDCI αντίστοιχα, έχουν κατά κοινή ομολογία μια μεγαλύτερη συσχέτιση στη μορφολογία τους, ακολουθώντας μιας παρόμοια πορεία στις αυξομειώσεις των τιμών στη πλειοψηφία της χρονοσειράς.

4.7.1.2 2ο Βήμα: Τελικός Καθορισμός του είδους των Κατηγοριών: NDCI

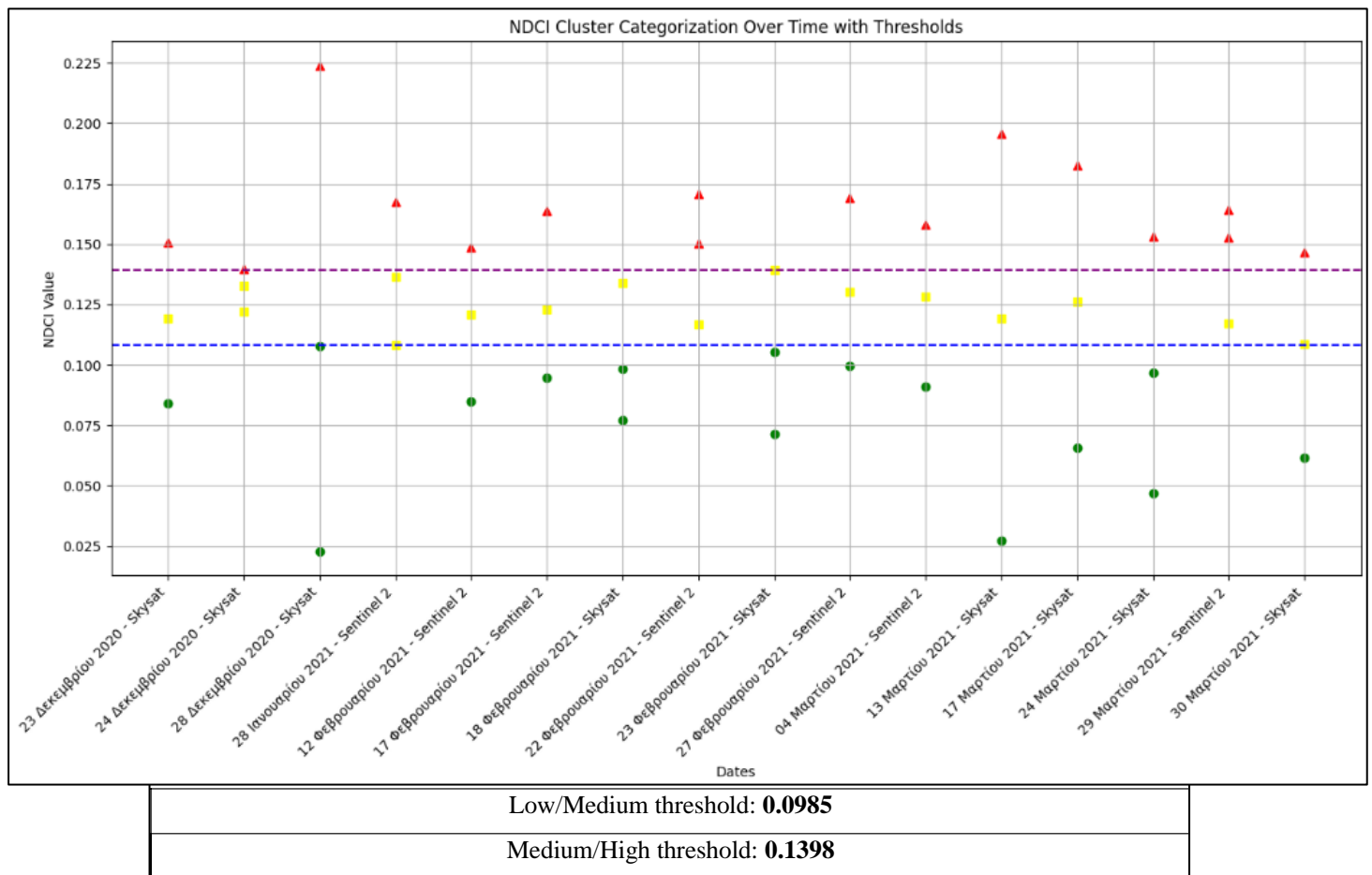
Στο δεύτερο στάδιο, θα γίνει μια προσπάθεια απεικόνισης του κάθε συμπλέγματος, χωρίζοντας τις τιμές του NDCI σε τρεις ομάδες: (1) Low, (2) Medium, (3) High.

Για την επίτευξη αυτής του αποτελέσματος δημιουργήθηκε κώδικας Python, στο οποίον εισχωρήθηκαν τα δεδομένα από τον Πίνακα 14, ενώ στη συνέχεια, έπρεπε να υπολογιστούν τα κατώφλια που θα χώριζαν τις τιμές σε τρεις ομάδες:

- Οι τιμές κάτω από το 1/3 του ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως «Low». (≤ 0.0990)
- Οι τιμές μεταξύ του 1/3^{ου} και του 2/3^{ου} ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως «Medium». ($0.0990 < \text{τιμή} \leq 0.1390$).
- Οι τιμές πάνω από το 2/3 του ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως High. (> 0.1390).

Με τα κατώφλια καθορισμένα, δημιουργήθηκε μια συνάρτηση για την κατηγοριοποίηση κάθε τιμής με βάση αυτά τα όρια. Αυτή η συνάρτηση εφαρμόστηκε στο DataFrame για τη δημιουργία ενός νέου DataFrame όπου κάθε τιμή αντικαταστάθηκε από την αντίστοιχη κατηγορία του ('Low', 'Medium', 'High').

Διάγραμμα 17: Τελικός Καθορισμός των συστάδων με κατώφλια (NDCI)



Αναλυτικότερα, ο τελικός χαρακτηρισμός των συστάδων κυμάνθηκε ως έχει:

Πίνακας 15: Τελική Κατηγοριοποίηση των συστάδων (NDCI)

	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
23 Δεκεμβρίου 2020	Low	Medium	High
24 Δεκεμβρίου 2020	Medium	Medium	High
28 Δεκεμβρίου 2020	Low	Low	High
28 Ιανουαρίου 2021	Medium	Medium	High
12 Φεβρουαρίου 2021	Low	Medium	High
17 Φεβρουαρίου 2021	Low	Medium	High
18 Φεβρουαρίου 2021	Low	Low	Medium
22 Φεβρουαρίου 2021	Medium	High	High
23 Φεβρουαρίου 2021	Low	Low	Medium
27 Φεβρουαρίου 2021	Low	Medium	High
4 Μαρτίου 2021	Low	Medium	High
13 Μαρτίου 2021	Low	Medium	High
17 Μαρτίου 2021	Low	Medium	High
24 Μαρτίου 2021	Low	Low	Medium
29 Μαρτίου 2021	Medium	High	High
30 Μαρτίου 2021	Low	Medium	High

Το αποτέλεσμα της τελικής οπτικοποίησης παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.2.2

HDBSCAN on Individual: Προσδιορισμός συμπλεγμάτων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι σχέσεις ή τα μοτίβα που εκτείνονται σε χρονικά σημεία. Παραβλέπονται συσχετισμοί που εμφανίζονται με την πάροδο του χρόνου.

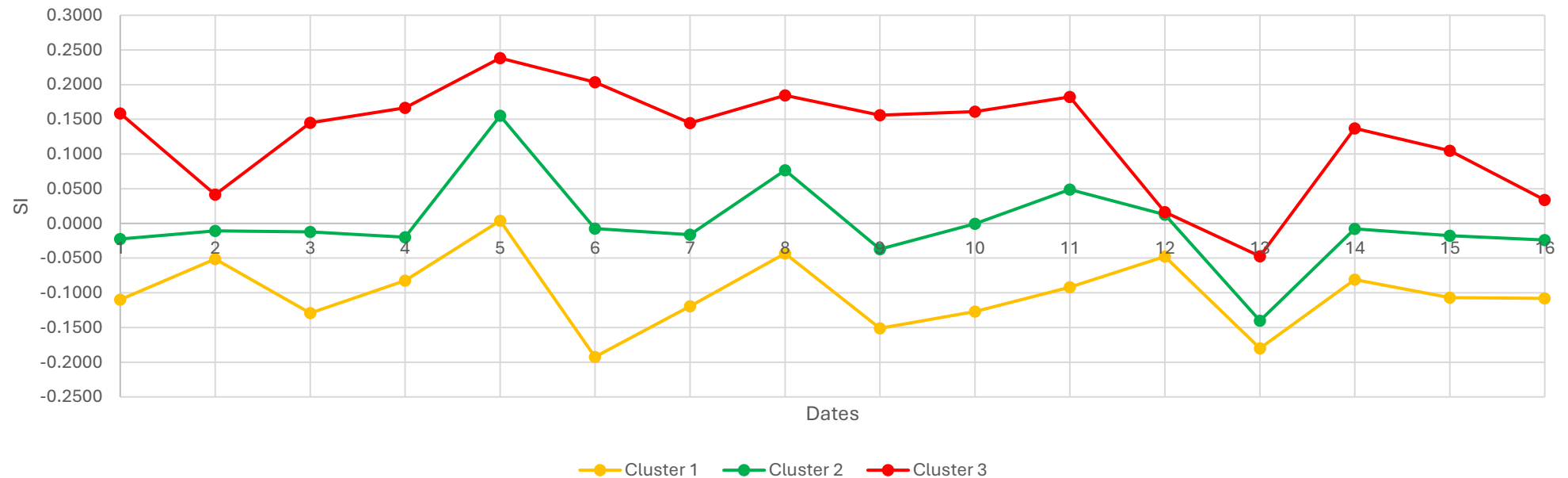
4.7.2 Individual Clustering: SI

4.7.2.1 1^ο Βήμα: Υπολογισμός των Μέσων Όρων κάθε συστάδας: SI

Πίνακας 16: Μέσοι Όροι κάθε συστάδας σε κάθε ημ/νια για το SI

Cluster	23 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat	24 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat	28 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat	28 Ιανουαρίου 2021 – Sentinel 2	12 Φεβρουαρίου 2021 – Sentinel 2	17 Φεβρουαρίου 2021 – Sentinel 2	18 Φεβρουαρίου 2021 – Skysat	22 Φεβρουαρίου 2021 – Sentinel 2	23 Φεβρουαρίου 2021 – Skysat	27 Φεβρουαρίου 2021 – Sentinel 2	04 Μαρτίου 2021 – Sentinel 2	13 Μαρτίου 2021 – Skysat	17 Μαρτίου 2021 – Skysat	24 Μαρτίου 2021 – Skysat	29 Μαρτίου 2021 – Sentinel 2	30 Μαρτίου 2021 – Skysat	Mean Value
1	-0.1100	-0.0514	-0.1293	-0.0823	0.0040	-0.1923	-0.1193	-0.0433	-0.1512	-0.1270	-0.0920	-0.0478	-0.1801	-0.0810	-0.1070	-0.1079	-0.1011
2	-0.0223	-0.0106	-0.0121	-0.0198	0.1551	-0.0073	-0.0160	0.0766	-0.0371	-0.0005	0.0490	0.0127	-0.1402	-0.0077	-0.0177	-0.0240	-0.0014
3	0.1586	0.0416	0.1451	0.1666	0.2383	0.2035	0.1446	0.1844	0.1561	0.1610	0.1824	0.0164	-0.0473	0.1372	0.1047	0.0339	0.1267

Διάγραμμα 18: Μέσος Όρος της κάθε συστάδας για κάθε ημ/νια του SI



Σε αντίθεση με το αντίστοιχο Διάγραμμα του NDCI, σύμφωνα με τον Πίνακα 16 και το Διάγραμμα 17 που δημιουργείται από αυτόν, φαίνεται ότι οι τιμές των μέσων όρων κάθε μια από τις εικόνες SI δεν ακολουθούν κάποιο μοτίβο. Αναλυτικότερα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι, λίγο πολύ, και οι τρεις γραμμές που οπτικοποιούν κάθε μια από τις τρεις κατηγορίες, έχουν διαφορετική μορφολογία, όπως υφίστανται στη περίπτωση του NDCI όπου και υπήρχε κάποια συσχέτιση. Από την μια, φαίνεται ότι η 1η Κατηγορία - Πορτοκαλί, που απεικονίζει τις χαμηλότερες τιμές, αποτελείται μόνο από αρνητικές τιμές, οι οποίες αυξομειώνονται σε όλη την χρονοσειρά. Εξάρσεις παρουσιάζονται στην 5η Εικόνα: 12 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2 (0.0040), στην 8η Εικόνα: 22 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2 (-0.0433) και στην 12η Εικόνα: 13 Μαρτίου 2021 - Skysat (-0.0478), ενώ οι σημαντική πτώση υπάρχει στην 6η Εικόνα: 17 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2 (-0.1923) και στην 13η Εικόνα: 17 Μαρτίου 2021 - Skysat (-0.1801). Από την άλλη, φαίνεται ότι η 3η Κατηγορία - Κόκκινο, αποτελείται μόνο από θετικές τιμές [εκτός στην 13η Εικόνα: 17 Μαρτίου 2021 - Skysat (-0.0473)], οι οποίες έχουν επίσης αυξομειώσεις, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Πιο συγκεκριμένα, την χρονική περίοδο από την 3η Εικόνα: 28 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat έως και την 11η Εικόνα: 04 Μαρτίου 2021 - Sentinel 2, οι τιμές του SI είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Αντίθετη συμπεριφορά λαμβάνει χώρα στο τέλος της χρονοσειράς, όπου υφίσταται μια σημαντική πτώση, η οποία στην 13η Εικόνα: 17 Μαρτίου 2021 - Skysat φτάνει και σε αρνητικές τιμές (-0.0473). Σχετικά χαμηλές τιμές υπάρχουν και στην 2η Εικόνα: 24 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat (0.0416) και στην 12η Εικόνα: 13 Μαρτίου 2021 - Skysat (0.0164). Τέλος, ακόμα μικρότερες πολώσεις φαίνονται στην 2η Κατηγορία - Πράσινο, που απεικονίζει τις μεσαίες τιμές, οι οποίες βρίσκονται σταθερά σε τιμές πολύ κοντά στο μηδέν. Θετικές εξάρσεις υφίστανται στην 5η Εικόνα: 12 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2 (0.1551) και στην 8η Εικόνα: 22 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2 (0.0766), ενώ αρνητικές εξάρσεις υφίστανται στην 13η Εικόνα: 17 Μαρτίου 2021 - Skysat (-0.1402).

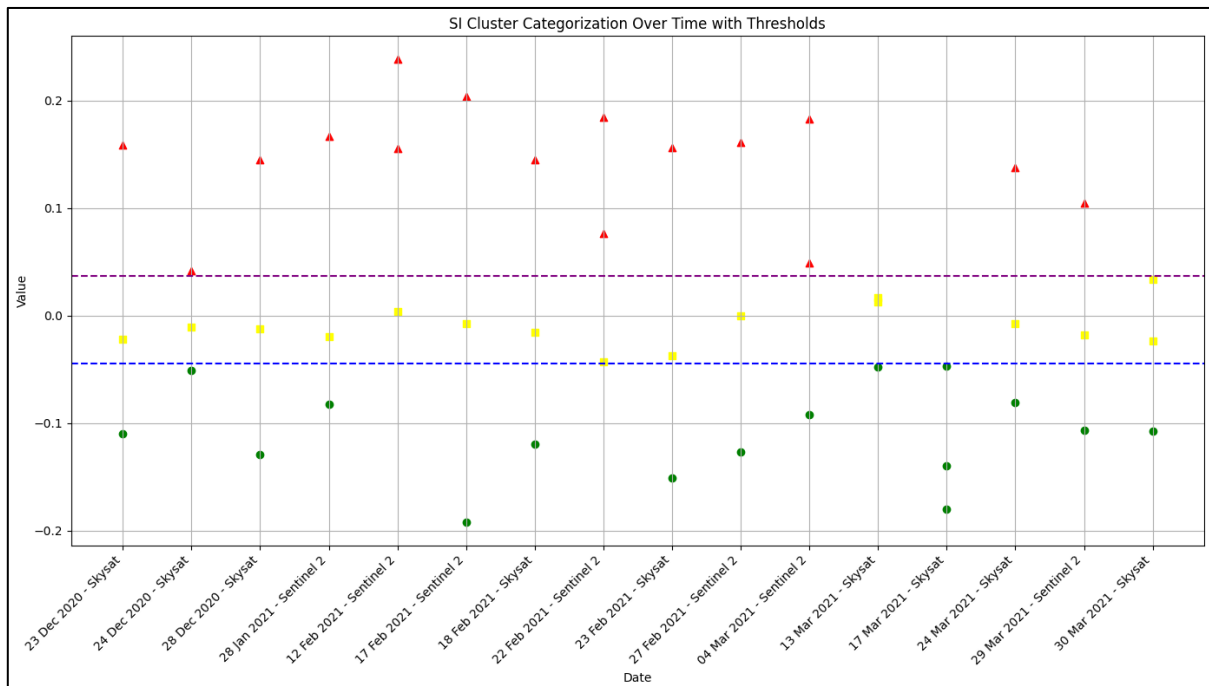
Συμπερασματικά, αυτό που μπορεί να ειπωθεί είναι ότι σύμφωνα με το διάγραμμα για το SI, είναι ότι οι τιμές της 1ης, της 2ης, αλλά και της 3ης Κατηγορίας, οι οποίες αντικατοπτρίζουν τον χαμηλότερο, τον μεσαίο και τον υψηλότερο μέσο όρο του SI αντίστοιχα, έχουν κατά κοινή ομολογία μια μικρότερη συσχέτιση στη μορφολογία τους. Ωστόσο, φαίνεται ότι οι "εξάρσεις" που υφίστανται και στις τρεις Κατηγορίες, λαμβάνουν σε συγκεκριμένες ημερομηνίες, οι οποίες φαίνονται στην 5η, στην 8η και στην 13η Εικόνα.

4.7.2.2 2^ο Βήμα: Τελικός Καθορισμός του είδους Κατηγοριών: SI

- Οι τιμές κάτω από το 1/3 του ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως «Low». (≤ -0.0227)
- Οι τιμές μεταξύ του 1/3^{ου} και του 2/3^{ου} ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως «Medium». ($-0.0227 < \text{τιμή} \leq 0.0416$).
- Οι τιμές πάνω από το 2/3 του ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως High. (> 0.10416).

Με τα κατώφλια καθορισμένα, δημιουργήθηκε μια συνάρτηση για την κατηγοριοποίηση κάθε τιμής με βάση αυτά τα όρια. Αυτή η συνάρτηση εφαρμόστηκε στο DataFrame για τη δημιουργία του νέου DataFrame όπου κάθε τιμή αντικαταστάθηκε από την αντίστοιχη κατηγορία του ('Low', 'Medium', 'High').

Διάγραμμα 19: Τελικός Καθορισμός των συστάδων με κατώφλια (SI)



Low/Medium threshold: **-0.0227**

Medium/High threshold: **0.0416**

Πίνακας 16: Τελική Κατηγοριοποίηση των συστάδων (SI)

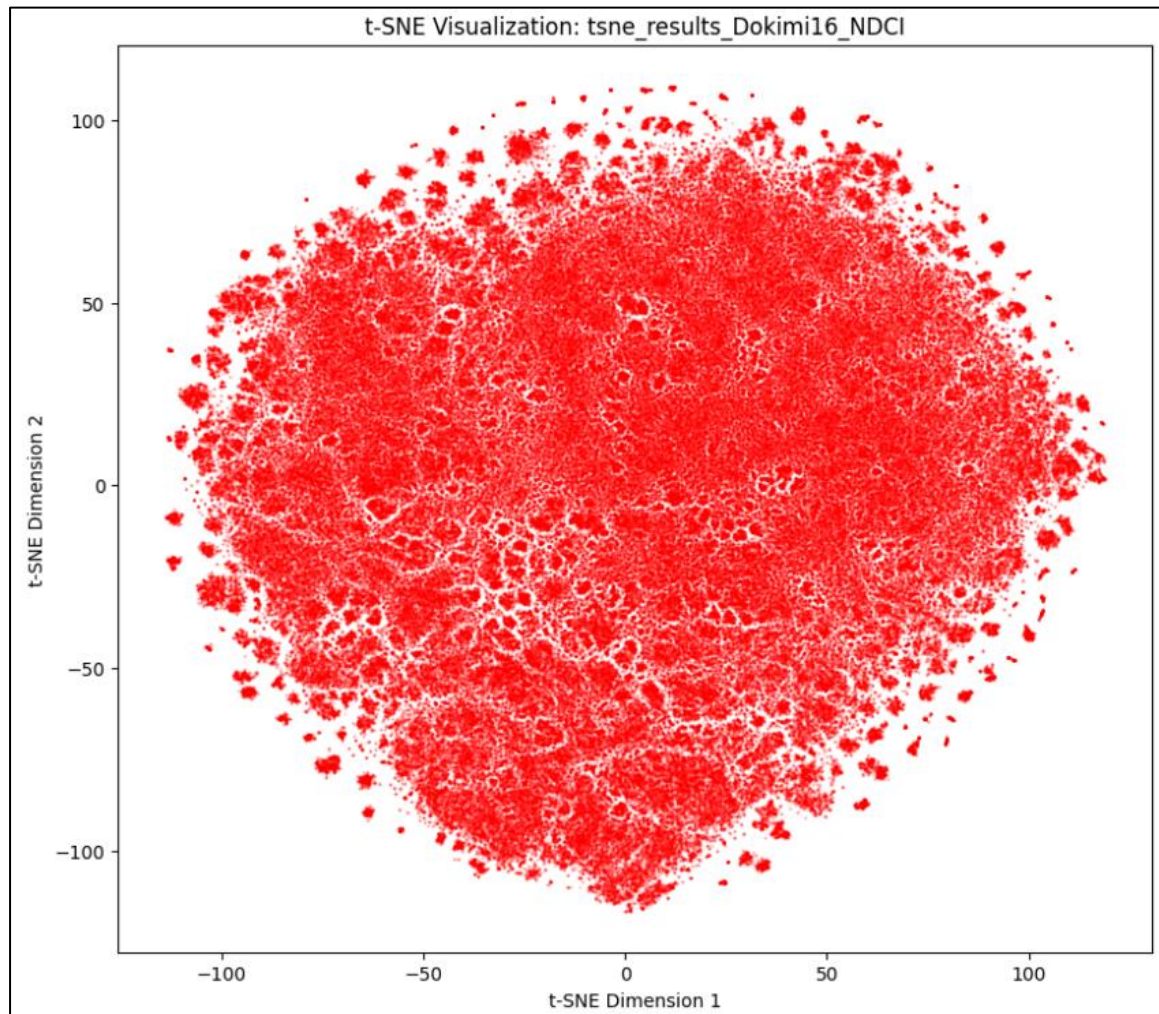
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
23 Δεκεμβρίου 2020	Low	Medium	High
24 Δεκεμβρίου 2020	Low	Medium	High
28 Δεκεμβρίου 2020	Low	Medium	High
28 Ιανουαρίου 2021	Low	Medium	High
12 Φεβρουαρίου 2021	Medium	High	High
17 Φεβρουαρίου 2021	Low	Medium	High
18 Φεβρουαρίου 2021	Low	Medium	High
22 Φεβρουαρίου 2021	Medium	High	High
23 Φεβρουαρίου 2021	Low	Medium	High
27 Φεβρουαρίου 2021	Low	Medium	High
4 Μαρτίου 2021	Low	High	High
13 Μαρτίου 2021	Low	Medium	Medium
17 Μαρτίου 2021	Low	Low	Low
24 Μαρτίου 2021	Low	Medium	High
29 Μαρτίου 2021	Low	Medium	High
30 Μαρτίου 2021	Low	Medium	Medium

Το αποτέλεσμα της τελικής οπτικοποίησης παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.2.3

Κεφάλαιο 5: Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα

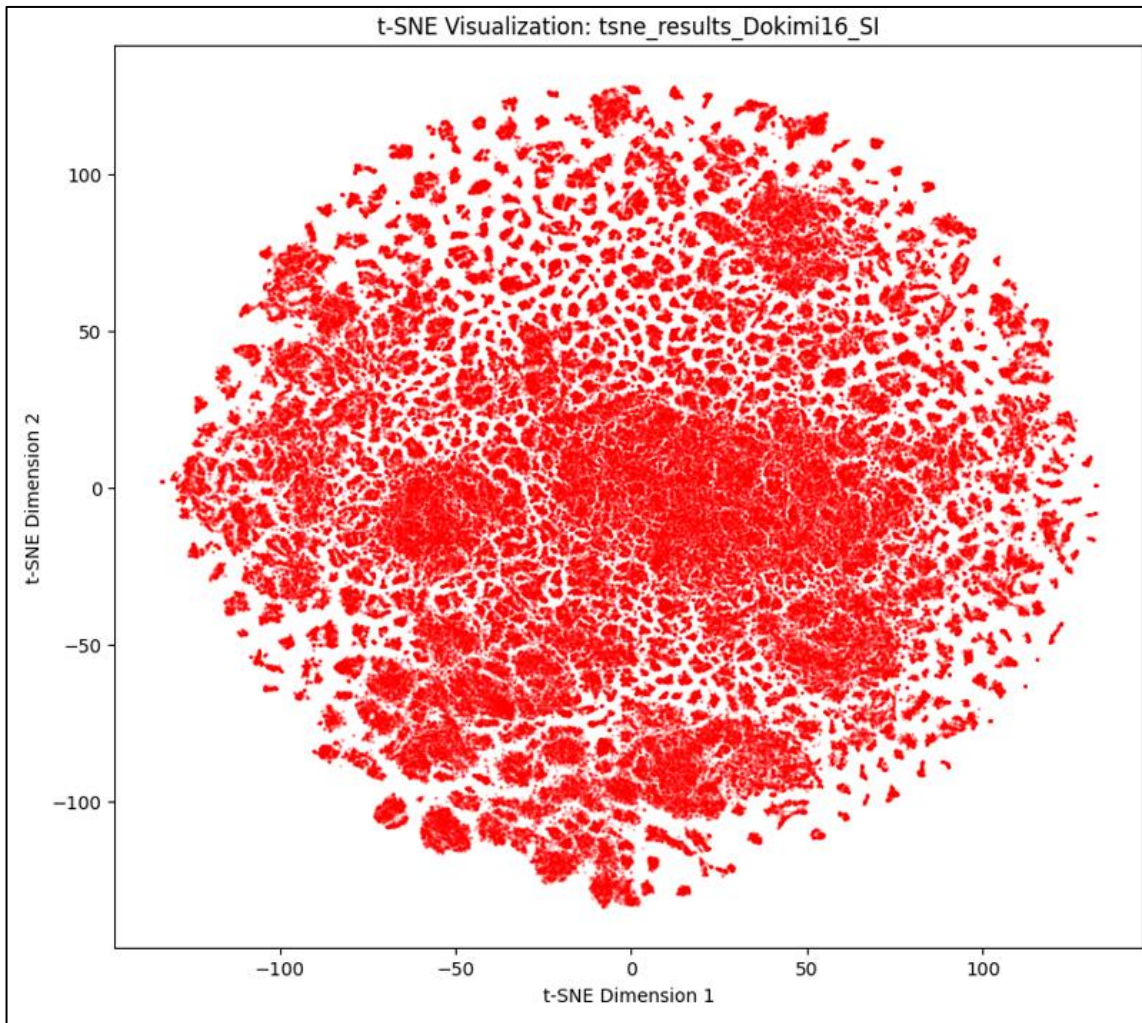
5.1 Οπτικοποίηση του t – SNE στις Τελική Χρονοσειράς

NDCI



Εικόνα 121: Οπτικοποίηση του T - SNE του NDCI

tsne_results_Dokimi16_NDCI	
DataFrame shape	(600562, 2)
Min value	tsne1 -113.999153 tsne2 -116.551781
Max value	tsne1 118.913849 tsne2 109.168884
Mean of standardized pixel values	2.3781435e-08
Standard deviation of standardized pixel values	1.0



Εικόνα 122: Οπτικοποίηση του T - SNE του SI

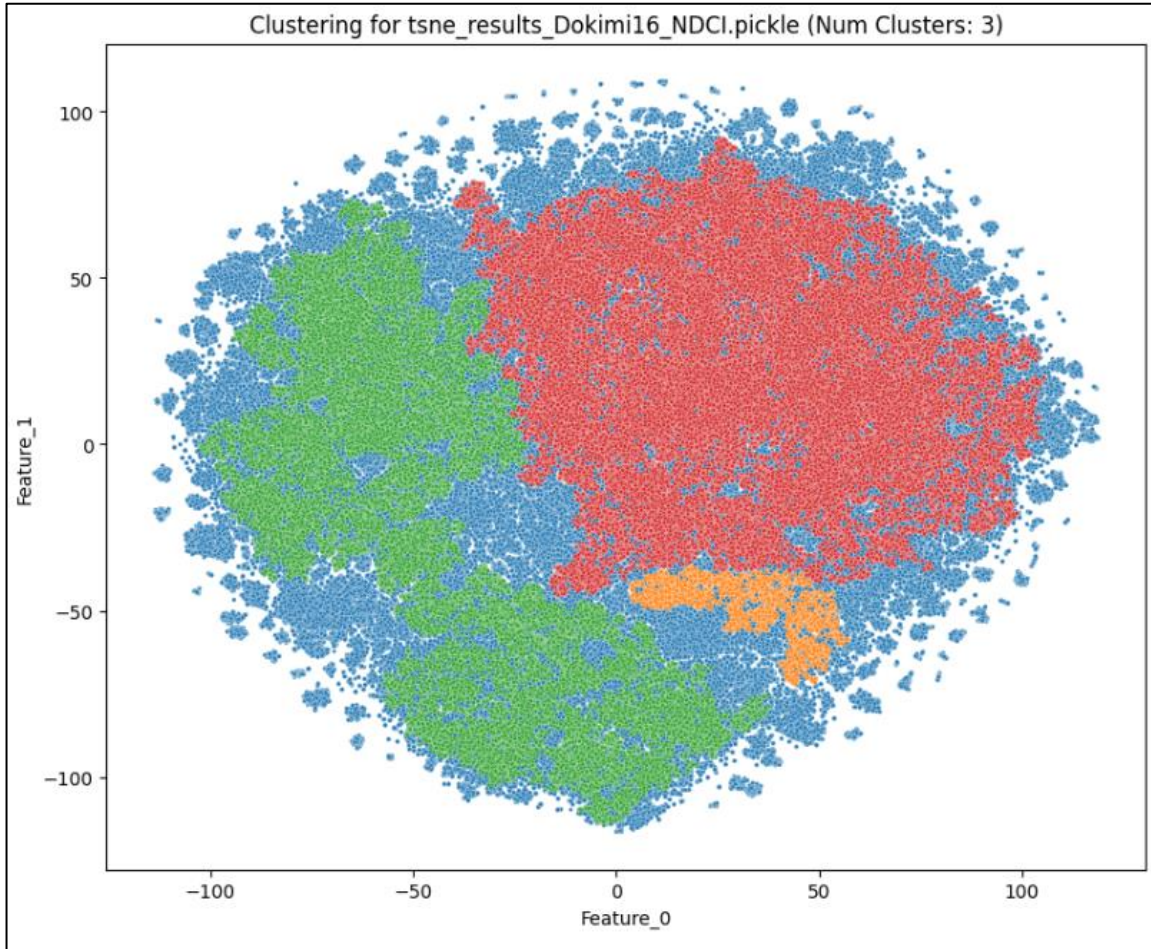
tsne_results_Dokimi16_SI	
DataFrame shape	(600562, 2)
Min value	tsne1 -133.708496 tsne2 -133.767776
Max value	tsne1 132.394089 tsne2 127.955750
Mean of standardized pixel values	1.5600214e-08
Standard deviation of standardized pixel values	0.99999994

t-SNE & HDBSCAN: Αναγνώριση συμπλεγμάτων που αντιστοιχούν σε μοτίβα ή/και ομοιότητες της ποσότητας της χλωροφύλλης – α σε όλη την χρονοσειρά. Παροχή πληροφοριών για τον τρόπο που εξελίσσονται τα συμπλέγματα χλωροφύλλης – α με την πάροδο

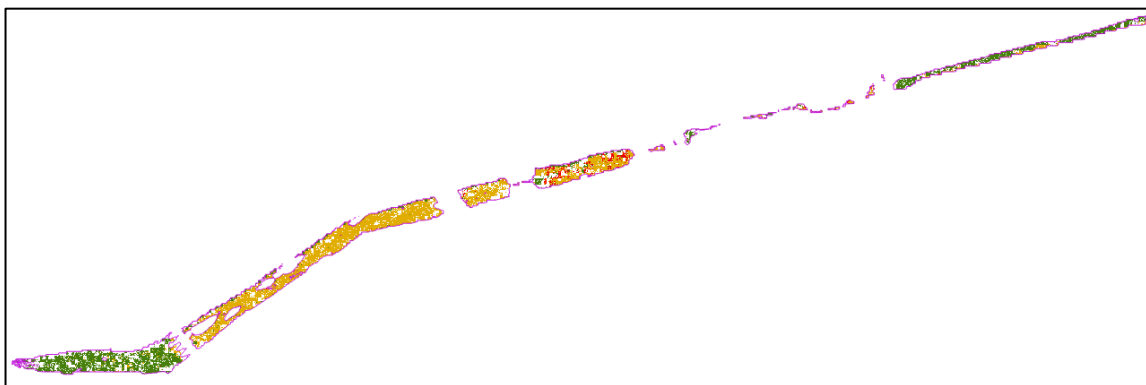
5.2 Αποτελέσματα Ομαδοποίησης

5.2.1 1^η Προσέγγιση: t – SNE & HDBSCAN

NDCI



Εικόνα 123: Οπτικοποίηση του HDBSCAN στο T - SNE του NDCI



Εικόνα 124: Οπτικοποίηση των εικονοστοιχείων του HDBSCAN στο T - SNE του NDCI

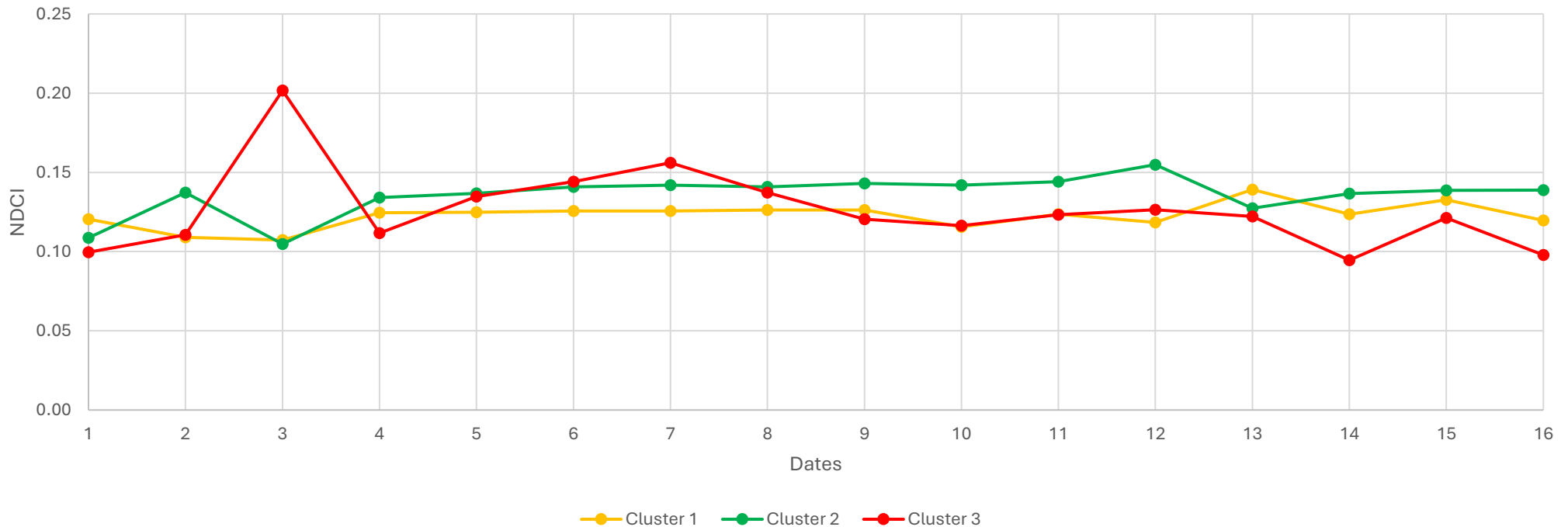
Η μη συσχέτιση των χρωμάτων μεταξύ του t – SNE και των εικονοστοιχείων στην Περιοχή Μελέτης επεξηγείται στο Κεφάλαιο 4.6.3

Υπόμνημα	
Κατηγορία 1	Πορτοκαλί
Κατηγορία 2	Πράσινο
Κατηγορία 3	Κόκκινο
Θόρυβος	Μπλε

Πίνακας 17: Μέσος Όρος του t – SNE της κάθε συστάδας για κάθε ημ/νια του NDCI

23 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat	24 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat	28 Δεκεμβρίου 2020 – Skysat	28 Ιανουαρίου 2021 – Sentinel 2	12 Φεβρουαρίου 2021 – Sentinel 2	17 Φεβρουαρίου 2021 – Sentinel 2	18 Φεβρουαρίου 2021 – Skysat	22 Φεβρουαρίου 2021 – Sentinel 2	23 Φεβρουαρίου 2021 – Skysat	27 Φεβρουαρίου 2021 – Sentinel 2	04 Μαρτίου 2021 – Sentinel 2	13 Μαρτίου 2021 – Skysat	17 Μαρτίου 2021 – Skysat	24 Μαρτίου 2021 – Skysat	29 Μαρτίου 2021 – Sentinel 2	30 Μαρτίου 2021 – Skysat	Mean Value
0.1205	0.1090	0.1073	0.1245	0.1248	0.1257	0.1256	0.1262	0.1263	0.1156	0.1236	0.1184	0.1391	0.1237	0.1327	0.1197	0.0057
0.1087	0.1373	0.1048	0.1341	0.1368	0.1409	0.1419	0.1408	0.1430	0.1419	0.1442	0.1549	0.1273	0.1366	0.1387	0.1388	0.0085
0.0996	0.1105	0.2017	0.1116	0.1347	0.1441	0.1560	0.1372	0.1205	0.1163	0.1233	0.1264	0.1222	0.0946	0.1213	0.0979	0.0179

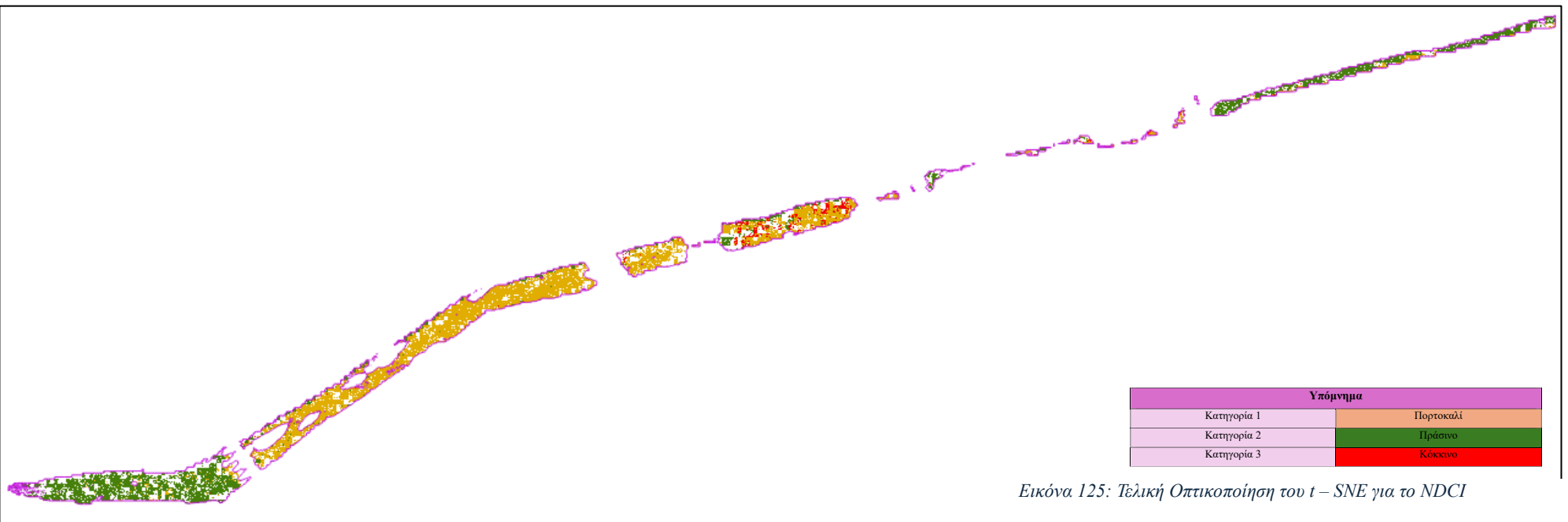
Διάγραμμα 20: Μέσος Όρος του t – SNE της κάθε συστάδας για κάθε ημ/νια του NDCI



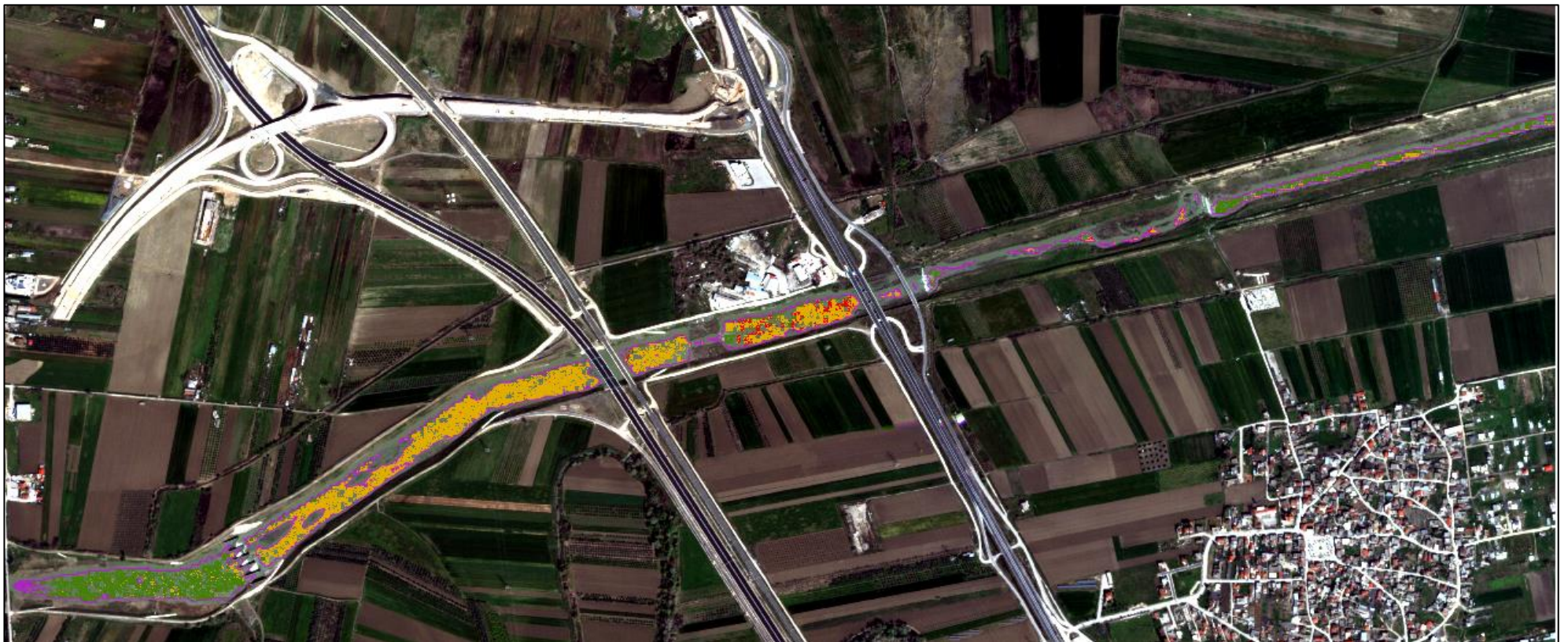
Στο $t-SNE$, ο ορισμός των κατηγοριών ως Πρώτη (χαμηλές τιμές), Δεύτερη (Μεσαίες Τιμές) και Τρίτη (Υψηλές Τιμές), γίνεται με βάση τον **μέσο όρο της συνολικής χρονοσειράς και τα νούμερα κάτω από κάθε ημερομηνία** ορίζουν τον μέσο όρο της κατηγορίας που δημιουργήθηκε μέσω του HDBSCAN. Επειδή το $t-SNE$ «κουβαλάει» κάτω από τις τιμές του όλο το dataset, η μετακίνηση και ο ορισμός των τριών Κατηγοριών πρέπει να γίνει οριζόντια για όλη την χρονοσειρά. Για παράδειγμα, η 1^η Κατηγορία στην συγκεκριμένη περίπτωση, περιλαμβάνει την συστάδα που ο μέσος όρος των μέσων όρων της κάθε ημερομηνίας είναι ο μικρότερος (0.057). Αυτό, ωστόσο, δε σημαίνει απαραίτητα ότι όλες οι ημερομηνίες ξεχωριστά έχουν στην 1^η Κατηγορία τις μικρότερες τιμές. Για παράδειγμα, στην 1^η Εικόνα (23 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat) η πρώτη συστάδα (0.1205) έχει τον μεγαλύτερο μέσο όρο, ενώ στην 4^η Εικόνα (28 Ιανουαρίου 2021 - Sentinel 2), έχει τον δεύτερο μεγαλύτερο μέσο όρο. Ωστόσο ο μέσος όρος όλων των μέσων όρων της 1^{ης} Κατηγορίας, είναι ο μικρότερος (0.0057) και μιας και το $t-SNE$ αφορά συνολικά το dataset, το αποτέλεσμα είναι το παραπάνω. Η ίδια λογική ακολουθείται και στις επόμενες δυο κατηγορίες.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 15, όλες οι τιμές του μέσου όρου του NDCI σε κάθε μια Κατηγορία, είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, η 1η Κατηγορία (Πορτοκαλί - Χαμηλές Τιμές) και η 2η Κατηγορία (Πράσινο - Μεσαίες Τιμές) διατηρούν μια σταθερότητα σε όλη την χρονοσειρά, με λίγες μεταβολές. Στην αρχή της χρονοσειράς, η 1η Κατηγορία ξεκινάει με μέση τιμή ίση με 0.1205, στην συνέχεια φτάνει στα κατώτερα της όρια (0.10 και 0.1073), ενώ έπειτα, διατηρεί μια σταθερή τιμή (~0.1250) μέχρι και την 9η Εικόνα (23 Φεβρουαρίου 2021 - Skysat). Από εκεί και έπειτα, λαμβάνει χώρα μια αύξηση στον μέσο όρο στην 13η εικόνα (0.1391, 17 Μαρτίου 2021 - Skysat), ενώ στο τέλος της χρονοσειράς ο μέσος όρος του NDCI καταλήγει στα επίπεδα που είχε στα μέσα της χρονοσειράς. Παρόμοια κατάσταση υπάρχει και στην 2η Κατηγορία, όπου και μεν ξεκινάει με μια τιμή μικρότερη της 1ης (0.1087), τόσο στην 1η Εικόνα (23 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat), όσο και στην 3η (28 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat), αλλά στη συνέχεια ο μέσος όρος του NDCI σε αυτή την Κατηγορία καταλήγει να έχει μια σχετικά σταθερή τιμή (~0.14) μέχρι και την 11η Εικόνα (04 Μαρτίου 2021 - Sentinel 2). Έπειτα, η τιμή του NDCI φτάνει στο υψηλότερο όριο της (0.1549, 13 Μαρτίου 2021 - Skysat), ενώ στο τέλος της χρονοσειράς ο μέσος όρος του NDCI καταλήγει στα επίπεδα που είχε στα μέσα της χρονοσειράς. Τέλος, μια λιγότερο σταθερή και ομοιόμορφη κατάσταση φαίνεται να υπάρχει στην 3η κατηγορία. Αναλυτικότερα, παρατηρείται μια εκτόξευση της μέσης τιμής του NDCI στην 3η Εικόνα (0.2017, 28 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat), η οποία απ' ό,τι φαίνεται είναι και ο λόγος που το συγκεκριμένο dataset έχει συνολικά τον μεγαλύτερο μέσο όρο (0.0179), μιας και όπως φαίνεται στο διάγραμμα, οι τιμές των μέσων όρων του NDCI δεν φαίνεται να είναι συνολικά μεγαλύτερες από τις δυο άλλες κατηγορίες, πέρα από την προαναφερθείσα περίπτωση και την 6η με την 7η Εικόνα (0.1560, 18 Φεβρουαρίου 2021 - Skysat). Στην υπόλοιπη χρονοσειρά, οι τιμές του NDCI έχουν τόσο τις χαμηλότερες τιμές (1η Εικόνα, 4η Εικόνα, 9η Εικόνα και 13η - 16η Εικόνα), είτε τις μεσαίες τιμές (2η Εικόνα, 5η Εικόνα, 8η Εικόνα και 10η - 12η Εικόνα).

Συμπερασματικά, αυτό που μπορεί να ειπωθεί είναι ότι σύμφωνα με το διάγραμμα του TSNE για το NDCI, είναι ότι οι τιμές της 1ης και της 2ης Κατηγορίας, οι οποίες αντικατοπτρίζουν τον χαμηλότερο και τον μεσαίο μέσο όρο του NDCI αντίστοιχα, διατηρούν μια σταθερότητα στις τιμές τους, χωρίς πολλές μεταβολές, πέρα από τέσσερα πέντε σημεία. Αντ' αυτού, η 3η Κατηγορία με τον μεγαλύτερο μέσο όρο του NDCI δεν χαρακτηρίζεται από την ίδια σταθερότητα, με τιμές οι οποίες δεν ταυτίζονται με την φύση της Κατηγορίας αυτής.



Εικόνα 125: Τελική Οπτικοποίηση του $t-SNE$ για το NDCI



Μετά την κατάλληλη οπτικοποίηση η οποία προέκυψε από τα στατιστικά τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 14, προκύπτει η κατηγοριοποίηση που παρουσιάζεται στην Εικόνα 120. Όπως είναι αναμενόμενο, η χρωματική παλέτα είναι συγκεκριμένη: Με πορτοκαλί χρώμα είναι τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν (μέσω του TSNE και του HDBSCAN) στην 1η Κατηγορία, δηλαδή στην ομάδα με τον μικρότερο μέσο όρο του NDCI. Αντίστοιχα, με πράσινο χρώμα είναι τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν με τον ίδιο τρόπο στην 2η Κατηγορία, δηλαδή στην ομάδα με τον μεσαίο μέσο όρο του NDCI και τέλος με κόκκινο χρώμα είναι τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν στην 3η Κατηγορία, δηλαδή στην ομάδα με τον μεγαλύτερο μέσο όρο του NDCI.

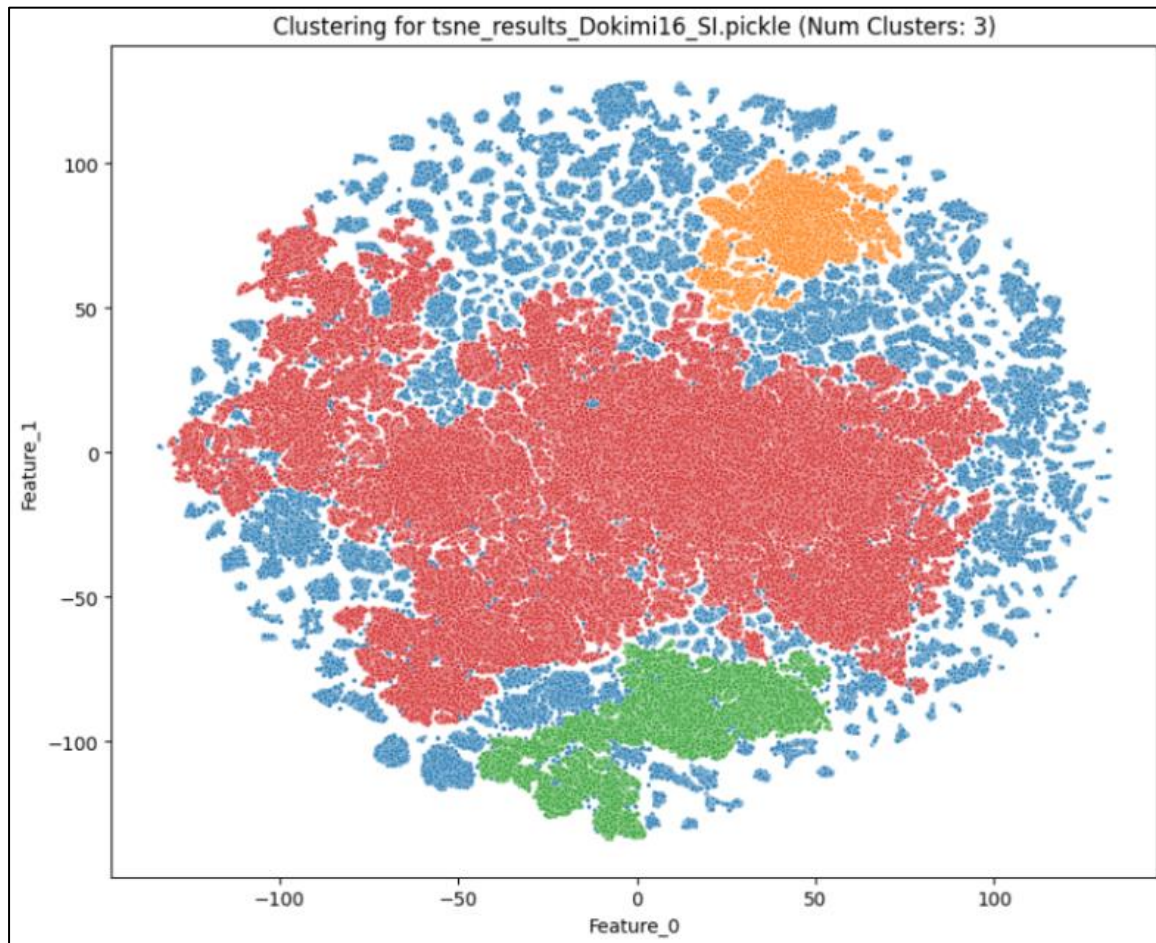
Σύμφωνα με την οπτικοποίηση, η 1η Κατηγορία - Πορτοκαλί, με τα εικονοστοιχεία με τον μικρότερο μέσο όρο τιμών NDCI σύμφωνα πάντα με το t – SNE, κατακλύζουν το μεσαίο και κεντρικό σώμα της Περιοχής Μελέτης, και σε δευτερεύοντα βαθμό, κάποιες περιοχές στο νοτιοδυτικό τμήμα και στο βορειοανατολικό τμήμα. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η συγκέντρωση χλωροφύλλης, σε σχέση με τις άλλες δυο κατηγορίες, είναι μικρής έντασης σε αυτές τις περιοχές.

Συνεχίζοντας, παρατηρείται ότι στην 2η Κατηγορία - Πράσινο κατηγοριοποιήθηκαν τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται στην αρχή και στο τέλος της Περιοχής Μελέτης. Τόσο το νοτιοδυτικό τμήμα του ποταμού, όσο και το βορειοανατολικό, έχει στην συντριπτική του πλειοψηφία εικονοστοιχεία που ανήκουν στην 2η Κατηγορία, κάτι που σημαίνει ότι σύμφωνα με το TSNE, οι τιμές του NDCI τους είναι μεσαίου μεγέθους. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα εικονοστοιχεία στις παρυφές του ποταμού στο "κύριο σώμα", έχουν ταξινομηθεί και αυτά στην 2η Κατηγορία. Κατ' επέκταση αυτό σημαίνει ότι η συγκέντρωση χλωροφύλλης, σε σχέση πάντα με τις άλλες δυο κατηγορίες, είναι μεσαία έντασης σε αυτά τα σημεία που προαναφέρθηκαν.

Τέλος, η 3η Κατηγορία - Κόκκινο έχει την μικρότερη έκταση στην Περιοχή Μελέτης. Αναλυτικότερα, σύμφωνα με την οπτικοποίηση, κόκκινο εικονοστοιχεία υπάρχουν μόνο σε μια πολύ συγκεκριμένη περιοχή του ποταμού, η οποία μάλιστα κατακλύζεται τόσο με εικονοστοιχεία της 1ης, όσο και με εικονοστοιχεία της 2ης Κατηγορίας. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η συγκέντρωση χλωροφύλλης, σε σχέση με τις άλλες δυο κατηγορίες, είναι μεγαλύτερης έντασης σε αυτή την περιοχή των κόκκινων εικονοστοιχείων.

t-SNE & HDBSCAN: Αναγνώριση συμπλεγμάτων που αντιστοιχούν σε μοτίβα ή/και ομοιότητες της ποσότητας της ιζημάτων σε όλη την χρονοσειρά. Παροχή πληροφοριών για τον τρόπο που εξελίσσονται τα συμπλέγματα ιζημάτων με την πάροδο του

SI



Εικόνα 126: Οπτικοποίηση του HDBSCAN στο T - SNE του SI



Εικόνα 127: Οπτικοποίηση των εικονοστοιχείων του HDBSCAN στο T - SNE του SI

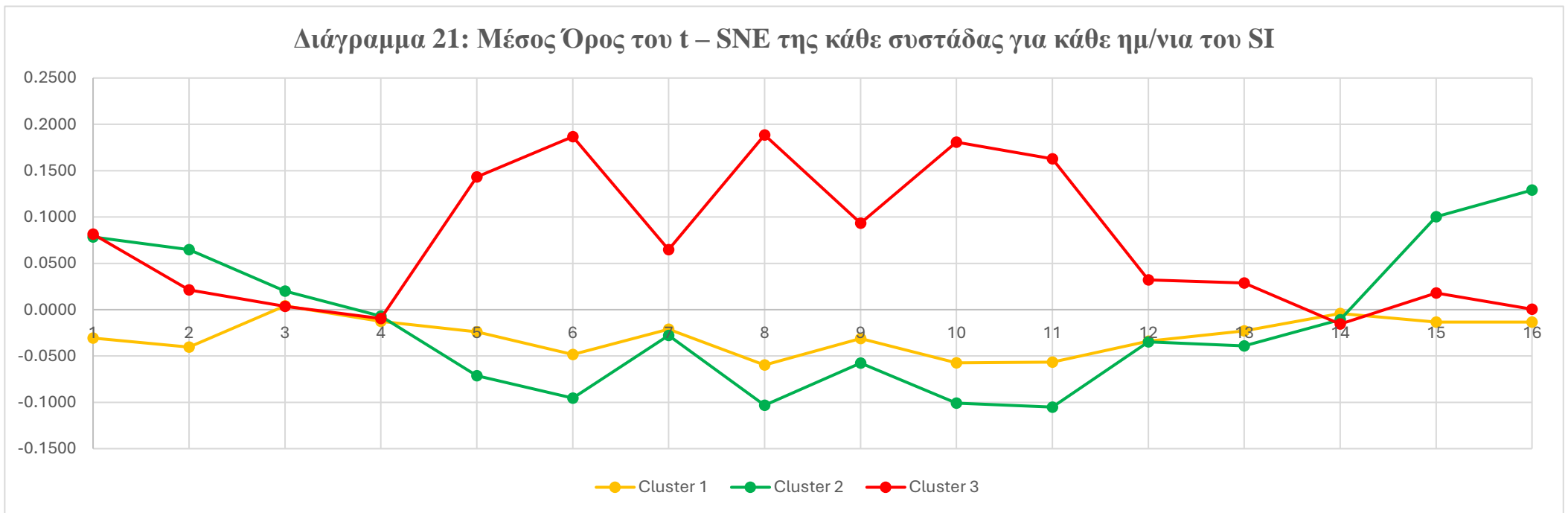
Η μη συσχέτιση των χρωμάτων μεταξύ του t - SNE και των εικονοστοιχείων στην Περιοχή Μελέτης επεξηγείται στο Κεφάλαιο 4.6.3

Υπόμνημα	
Κατηγορία 1	Πορτοκαλί
Κατηγορία 2	Πράσινο
Κατηγορία 3	Κόκκινο
Θόρυβος	Μπλε

Πίνακας 18 Μέσος Όρος του t – SNE της κάθε συστάδας για κάθε ημ/να του SI

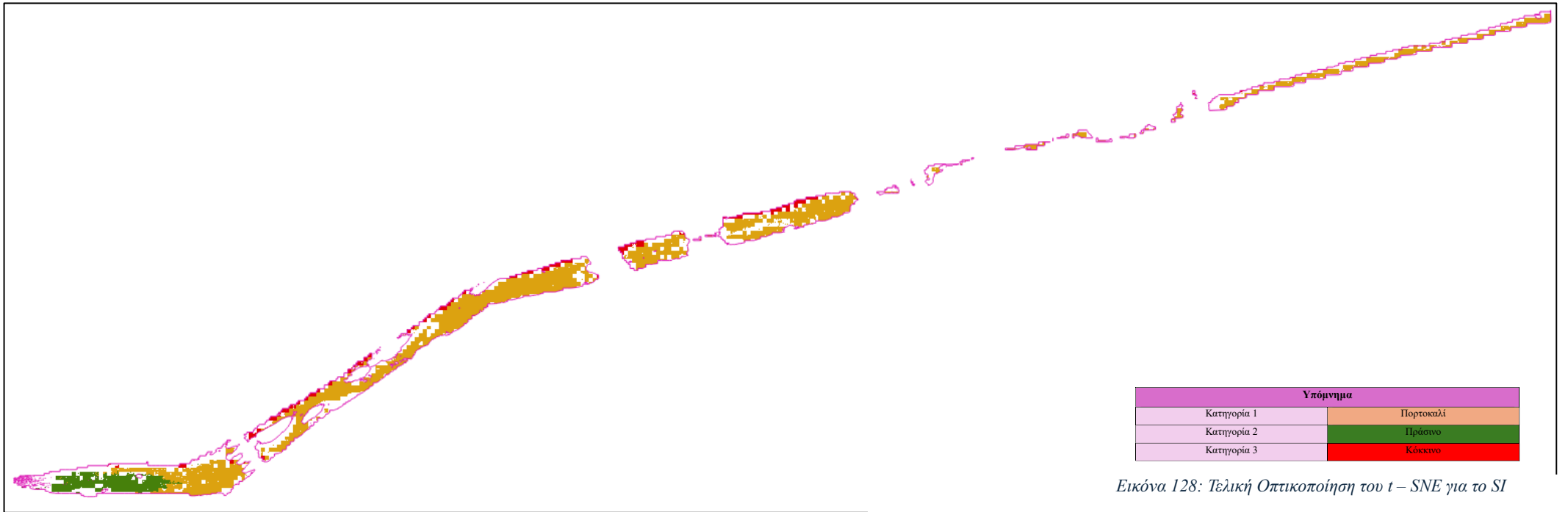
Cluster	23 Δεκεμ βρίου 2020 – Skysat	24 Δεκεμ βρίου 2020 – Skysat	28 Δεκεμ βρίου 2020 – Skysat	28 Ιανουα ρίου 2021 – Sentin el 2	12 Φεβρο ναρίου 2021 – Sentin el 2	17 Φεβρο ναρίου 2021 – Sentin el 2	18 Φεβρο ναρίου 2021 – Skysat	22 Φεβρο ναρίου 2021 – Sentin el 2	23 Φεβρο ναρίου 2021 – Skysat	27 Φεβρο ναρίου 2021 – Sentin el 2	04 Μαρτί ου 2021 – Sentin el 2	13 Μαρτί ου 2021 – Skysat	17 Μαρτί ου 2021 – Skysat	24 Μαρτί ου 2021 – Skysat	29 Μαρτί ου 2021 – Sentin el 2	30 Μαρτί ου 2021 – Skysat	Mean Value
1	-0.0305	-0.0404	0.0041	-0.0127	-0.0240	-0.0485	-0.0212	-0.0597	-0.0312	-0.0574	-0.0567	-0.0339	-0.0229	-0.0042	-0.0135	-0.0133	-0.0302
2	0.0785	0.0649	0.0199	-0.0070	-0.0712	-0.0955	-0.0278	-0.1032	-0.0576	-0.1009	-0.1051	-0.0347	-0.0391	-0.0109	0.1004	0.1290	-0.0260
3	0.0815	0.0213	0.0037	-0.0096	0.1431	0.1867	0.0649	0.1885	0.0934	0.1807	0.1628	0.0320	0.0289	-0.0156	0.0180	0.0005	0.0787

Διάγραμμα 21: Μέσος Όρος του t – SNE της κάθε συστάδας για κάθε ημ/να του SI

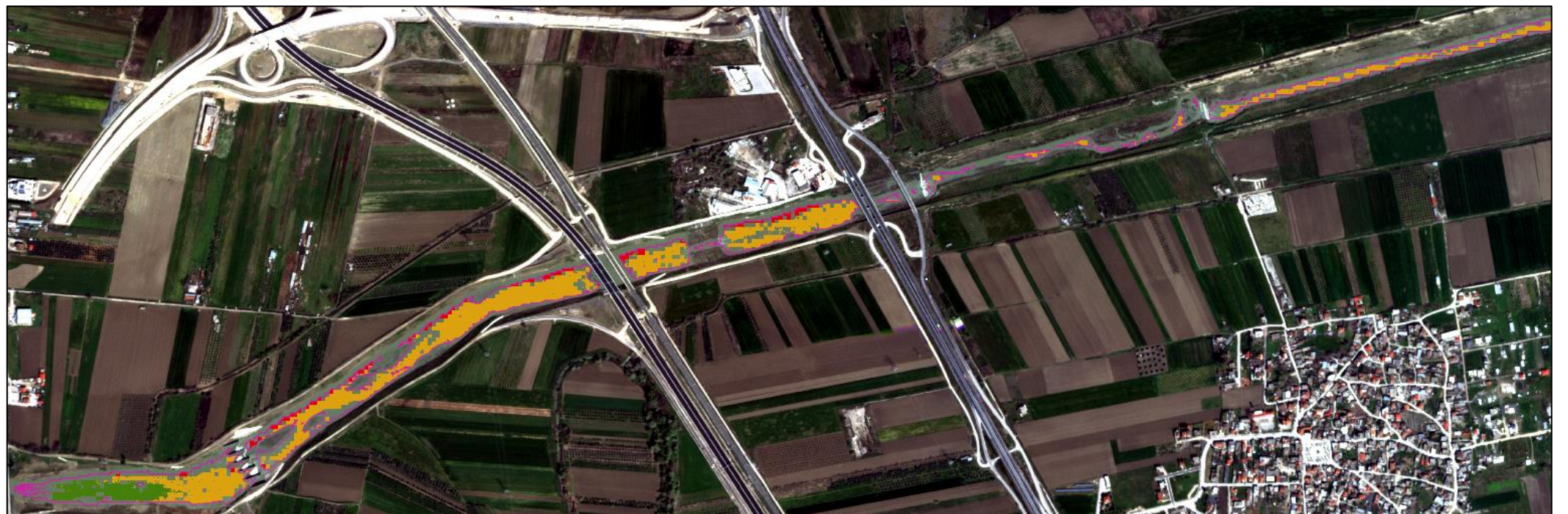


Σύμφωνα με το Διάγραμμα 16, και σε αντίθεση με το αντίστοιχο Διάγραμμα που αφορούσε το NDCI, οι τιμές του μέσου όρου του NDCI σε κάθε μια Κατηγορία δεν ακολουθούν μια παρόμοια πορεία. Αρχικά, μεταξύ 4ης Εικόνας (28 Ιανουαρίου 2021 - Sentinel 2) και 14ης Εικόνας (24 Μαρτίου 2021 - Skysat), θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η 1η Κατηγορία (Πορτοκαλί - Χαμηλές Τιμές) και η 2η Κατηγορία (Πράσινο - Μεσαίες Τιμές) ακολουθούν μια αντίστοιχη πορεία, με την διαφορά ότι φαίνεται οι τιμές των μέσων όρων σε εκείνο το χρονικό διάστημα να είναι ανεστραμμένης σημασίας. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται ότι οι τιμές της 1ης Κατηγορίας να είναι μεγαλύτερες απ' ότι της 2ης, κατά $\sim|0.05|$. Επιπλέον, την συγκεκριμένη χρονική περίοδο, οι τιμές των μέσων όρων της 3ης Κατηγορίας (Κόκκινο - Μεσαίες Τιμές) έχουν αρκετά υψηλότερες τιμές. Αναλυτικότερα στην 6η Εικόνα (17 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2), στην 8η Εικόνα (22 Φεβρουαρίου 2021 - Sentinel 2) και στην 10η - 11η Εικόνα (04 Μαρτίου 2021 - Sentinel 2), οι τιμές αγγίζουν τα υψηλότερα όρια (~ 0.18), ενώ στις ενδιάμεσες χρονικές στιγμές, οι τιμές βρίσκονται κοντά στο 0.07. Το χρονικό διάστημα μεταξύ 1ης Εικόνας (23 Δεκεμβρίου 2020 - Skysat) και 4ης Εικόνας, η 2η και η 3η Κατηγορία, έχουν θετικές κοντινές τιμές (~ 0.07), ενώ αντίθετα η 1η Κατηγορία έχει αρνητικές τιμές. Παρόμοια κατάσταση υφίσταται και μετά την 14η εικόνα, με την διαφορά ότι οι τιμές της 2ης και της 3ης Κατηγορίας δεν είναι τόσο κοντά μεταξύ τους. Τέλος, αξιοσημείωτο είναι ότι στην 4η και στην 14η Εικόνα, οι μέσοι όροι των τιμών του SI εξαιτίας του TSNE, παρουσιάζουν μια ταύτιση. Αναλυτικότερα, φαίνεται ότι και οι τρεις κατηγορίες σε αυτές τις δυο ημερομηνίες, έχουν τιμές σχεδόν μηδενικές (4η Εικόνα: -0.0127, -0.0070, -0.0096 και 14η Εικόνα: -0.0042, -0.0109, -0.0156).

Συμπερασματικά, αυτό που μπορεί να ειπωθεί είναι ότι σύμφωνα με το διάγραμμα του TSNE για το SI, είναι ότι οι τιμές της 1ης και της 2ης Κατηγορίας, οι οποίες αντικατοπτρίζουν τον χαμηλότερο και τον μεσαίο μέσο όρο του SI αντίστοιχα, έχουν κατά κοινή ομολογία μια μεγαλύτερη συσχέτιση στο μέγεθος τους, ακολουθώντας μιας παρόμοια πορεία στη πλειοψηφία της χρονοσειράς. Αντ' αυτού, η 3η Κατηγορία με τον μεγαλύτερο μέσο όρο του SI δεν χαρακτηρίζεται ούτε από την ίδια συσχέτιση, ούτε από το ίδιο μέγεθος τιμών. Οι τιμές της δεν βρίσκονται τόσο κοντά στο μηδέν, όπως συνέβαινε στη 1η και στην 2η Κατηγορία, και οι αυξομειώσεις είναι μεγαλύτερης έντασης. Οι τιμές αυτές είχαν ως αποτέλεσμα να χαρακτηριστεί όλο το dataset ως η Κατηγορία με τον μεγαλύτερο μέσο όρο.



Εικόνα 128: Τελική Οπτικοποίηση του $t-SNE$ για το SI



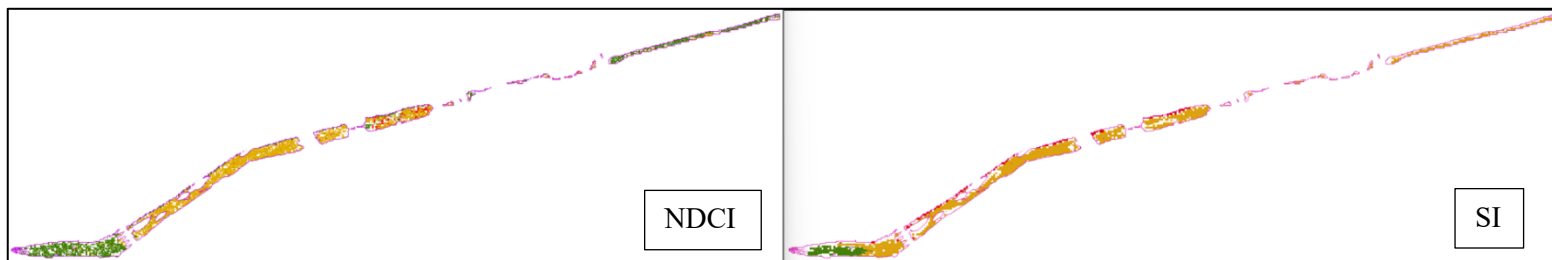
Μετά την κατάλληλη οπτικοποίηση η οποία προέκυψε από τα στατιστικά τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 15, προκύπτει η κατηγοριοποίηση που παρουσιάζεται στην Εικόνα 121. Όπως είναι αναμενόμενο, η χρωματική παλέτα είναι η ίδια με την προηγούμενη; Με πορτοκαλί χρώμα είναι τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν (μέσω του TSNE και του HDBSCAN) στην 1η Κατηγορία, δηλαδή στην ομάδα με τον μικρότερο μέσο όρο του SI. Αντίστοιχα, με πράσινο χρώμα είναι τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν με τον ίδιο τρόπο στην 2η Κατηγορία, δηλαδή στην ομάδα με τον μεσαίο μέσο όρο του SI και τέλος με κόκκινο χρώμα είναι τα εικονοστοιχεία που ταξινομήθηκαν στην 3η Κατηγορία, δηλαδή στην ομάδα με τον μεγαλύτερο μέσο όρο του SI.

Σύμφωνα με την οπτικοποίηση, η 1η Κατηγορία - Πορτοκαλί, με τα εικονοστοιχεία με τον μικρότερο μέσο όρο τιμών SI σύμφωνα πάντα με το TSNE, κατακλύζουν ένα μεγαλύτερο μέρος της Περιοχής Μελέτης, συγκριτικά με αυτό του NDCI. Αναλυτικότερα, το μεσαίο και κεντρικό σώμα της Περιοχής Μελέτης, το βορειοανατολικό μέρος, και σε δευτερεύοντα βαθμό, ένα μεγάλο μέρος του νοτιοδυτικού τμήματος, χαρακτηρίζεται από την μεγάλη παρουσία εικονοστοιχείων που έχουν ταξινομηθεί στην 1η Κατηγορία - Πορτοκαλί. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η συγκέντρωση ιζημάτων, σε σχέση με τις άλλες δυο κατηγορίες, είναι μικρότερης έντασης σε όλες αυτές τις περιοχές.

Συνεχίζοντας, παρατηρείται ότι στην 2η Κατηγορία - Πράσινο κατηγοριοποιήθηκαν τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται στο πιο δυτικό κομμάτι της "μύτης" του Σπερχειού Ποταμού. Δεν παρατηρείται παρουσία της συγκεκριμένης κατηγορίας σε κανένα άλλο μέρος της Περιοχής Μελέτης. Κατ' επέκταση αυτό σημαίνει ότι η συγκέντρωση ιζημάτων, σε σχέση πάντα με τις άλλες δυο κατηγορίες, είναι μεσαία έντασης σε αυτό το σημείο που προαναφέρθηκε.

Τέλος, η 3η Κατηγορία - Κόκκινο έχει την ακόμα μικρότερη έκταση στην Περιοχή Μελέτης. Αναλυτικότερα, σύμφωνα με την οπτικοποίηση, κόκκινο εικονοστοιχεία υπάρχουν μόνο στις παρυφές του ποταμού στο κεντρικό σώμα του Ποταμού. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι η συγκέντρωση ιζημάτων, σε σχέση με τις άλλες δυο κατηγορίες, είναι μεγαλύτερης έντασης σε αυτή την περιοχή των κόκκινων εικονοστοιχείων.

Σύγκριση NDCI – SI



Εικόνα 129 – 130: Σύγκριση Τελικών Οπτικοποιήσεων του $t-SNE$ για το NDCI και SI

Πίνακας 19: Συγκριτική Ερμηνεία των Δεικτών για κάθε Κατηγορία

Δείκτης	Κατηγορίες		
	1η	2η	3η
NDCI	χαμηλότερη συγκέντρωση χλωροφύλλης	μεσαία συγκέντρωση χλωροφύλλης	υψηλότερη συγκέντρωση χλωροφύλλης
SI	χαμηλότερη συγκέντρωση ιζημάτων	μεσαία συγκέντρωση ιζημάτων	υψηλότερη συγκέντρωση ιζημάτων
Ερμηνεία	Πιο καθαρά νερά	Μεσαίου επιπέδου καθαρότητα	Λιγότερο καθαρά νερά

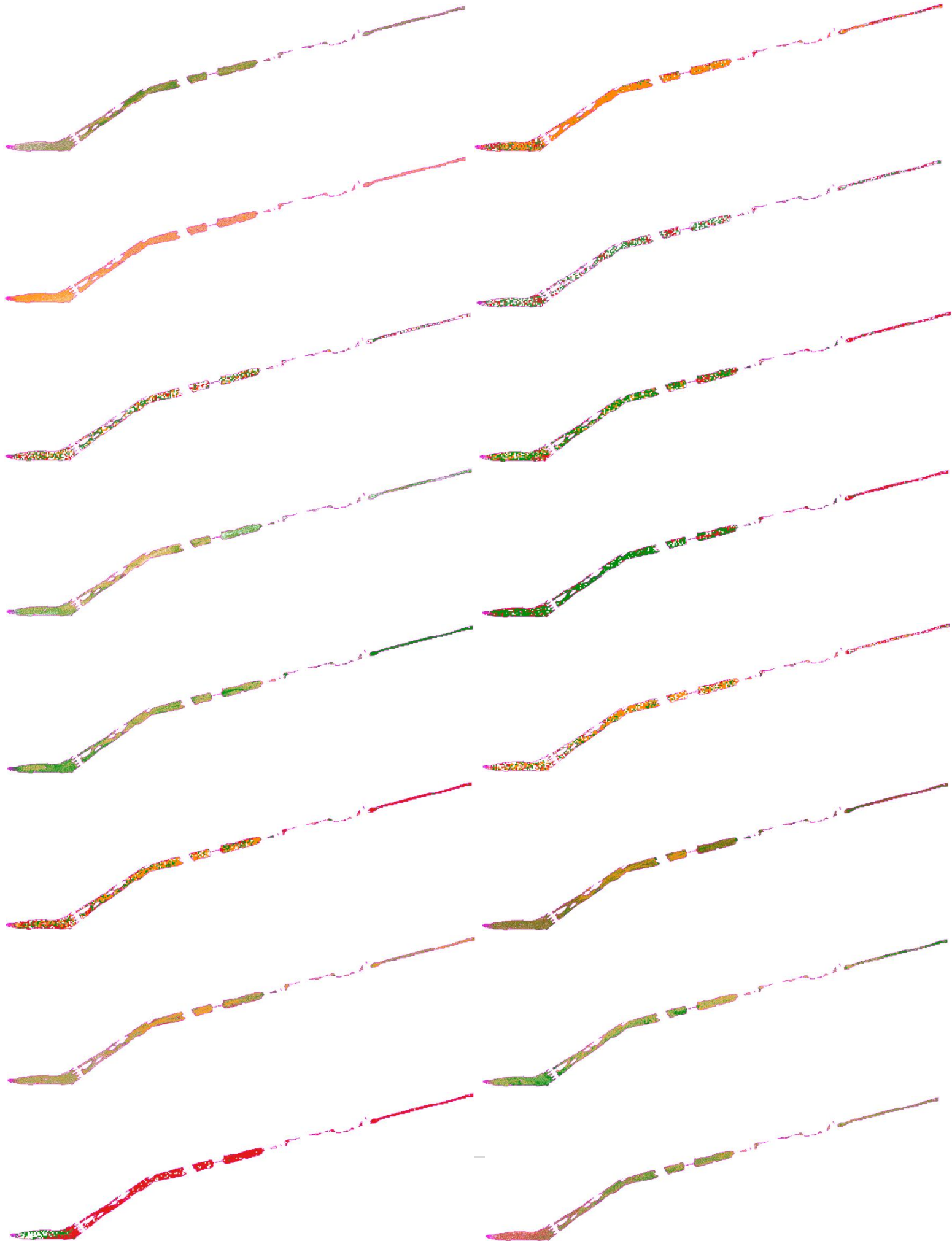
Βλέποντας τις δυο ομαδοποιήσεις που είχαν ως βάση το dataset του TSNE, παρατηρείται ότι έχουν αρκετές ομοιότητες.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 19, όπου και περιγράφονται τα συμπεράσματα του είδους των τιμών, τόσο του NDCI όσο και του SI, παρατηρείται ότι το κύριο μέρος της Περιοχής Μελέτης, κατηγοριοποιείται και στις δυο ομαδοποιήσεις, στην 1η Κατηγορία. Αυτό σημαίνει ότι τα νερά σε εκείνες τις περιοχές έχουν την χαμηλότερη συγκέντρωση χλωροφύλλης και ιζημάτων. Επιπλέον, στο νοτιοδυτικό τμήμα, φαίνεται να αυξάνεται η ένταση της παρουσίας αυτών των δυο μεγεθών, ενώ στις παρυφές του μεσαίου τμήματος, υπάρχει μεσαίας έντασης συγκέντρωση χλωροφύλλης και υψηλής έντασης συγκέντρωση ιζημάτων. Τέλος, στο βορειοανατολικό τμήμα του ποταμού, φαίνεται η συγκέντρωση χλωροφύλλης να είναι συγκριτικά μεγαλύτερης έντασης, απ' ό,τι είναι στην περίπτωση των ιζημάτων, όπου και είναι η μικρότερη.

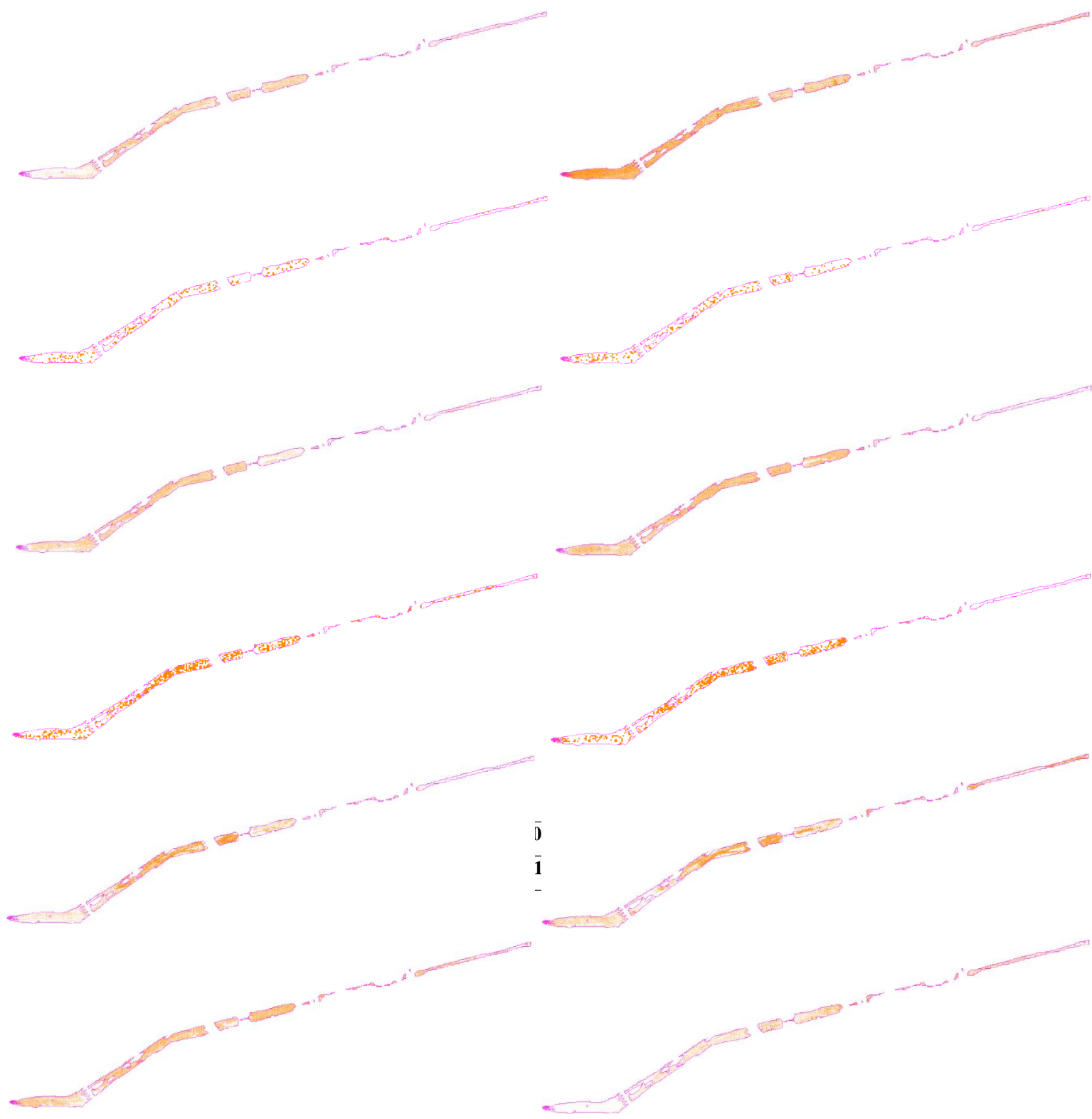
5.2.2 2^η Προσέγγιση: HDBSCAN στις Individual Images: NDCI

Συνολική Ομαδοποίηση για το NDCI

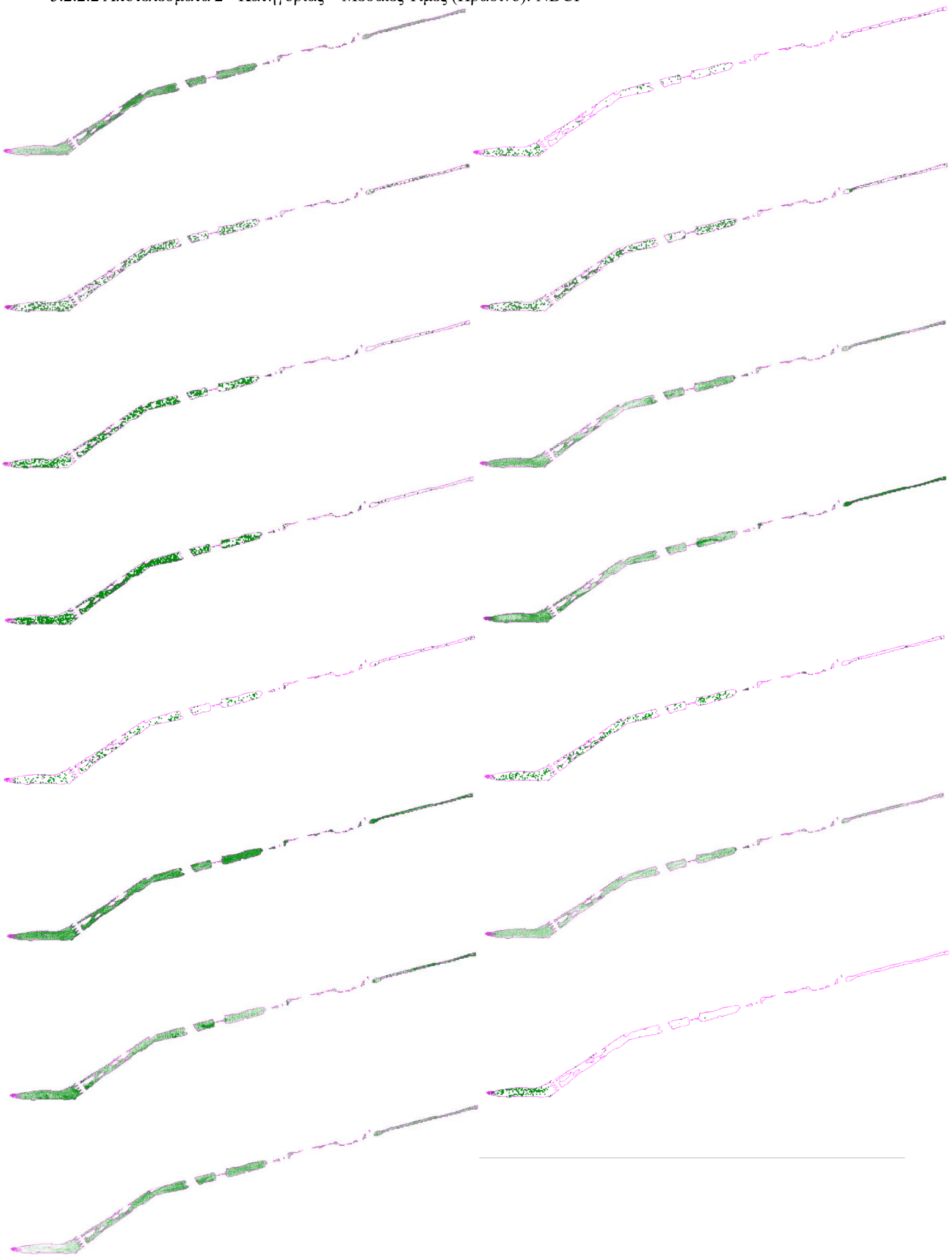
HDBSCAN on Individual: Προσδιορισμός συμπλεγμάτων της χλωροφύλλης – α χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι σχέσεις ή τα μοτίβα που εκτείνονται σε χρονικά σημεία. Παραβλέπονται συσχετισμοί που εμφανίζονται με την πάροδο του χρόνου.



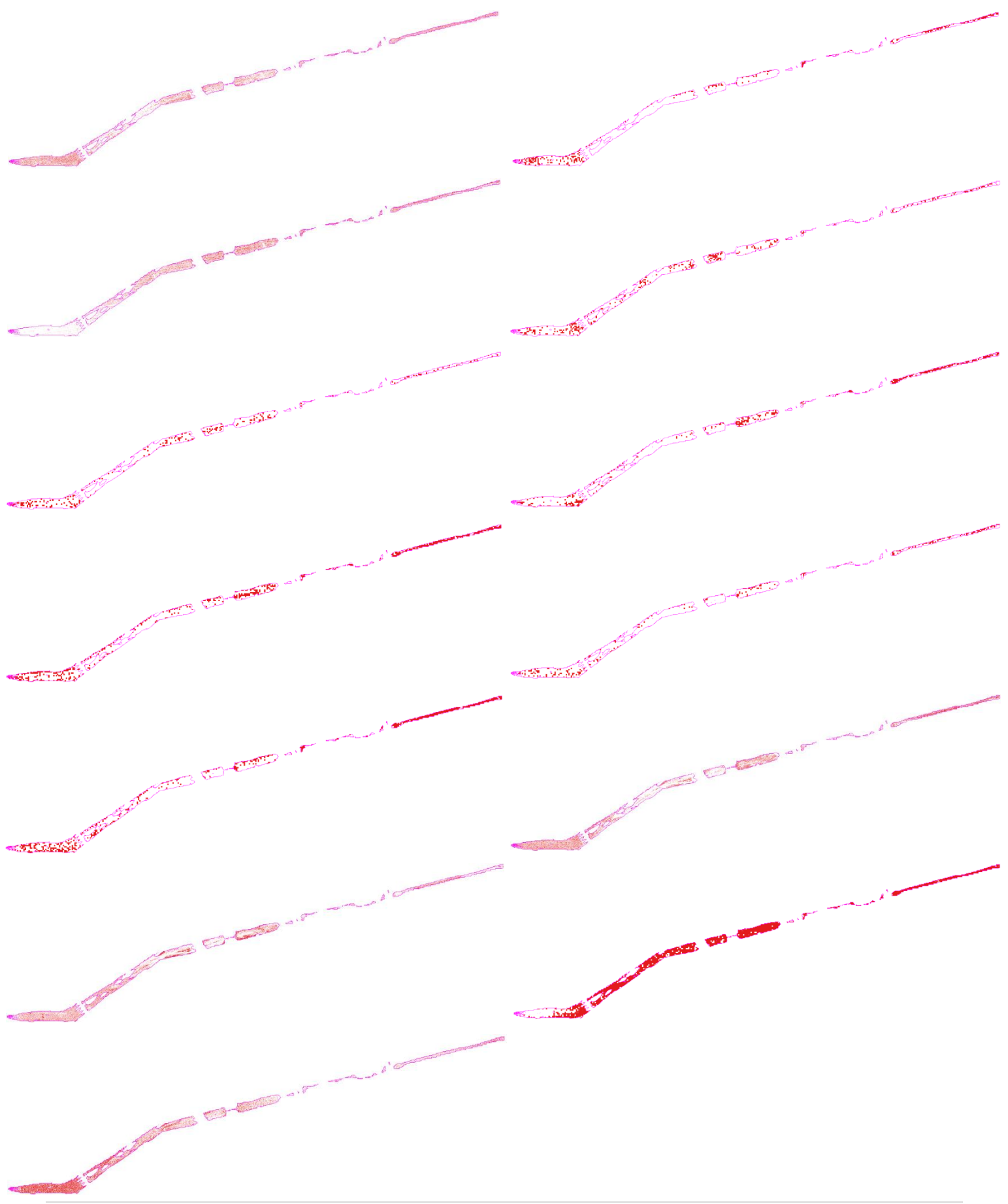
5.2.2.1 Αποτελέσματα 1^{ης} Κατηγορίας – Χαμηλότερες Τιμές (Πορτοκαλί): NDCI



5.2.2.2 Αποτελέσματα 2^{ης} Κατηγορίας – Μεσαίες Τιμές (Πράσινο): NDCI



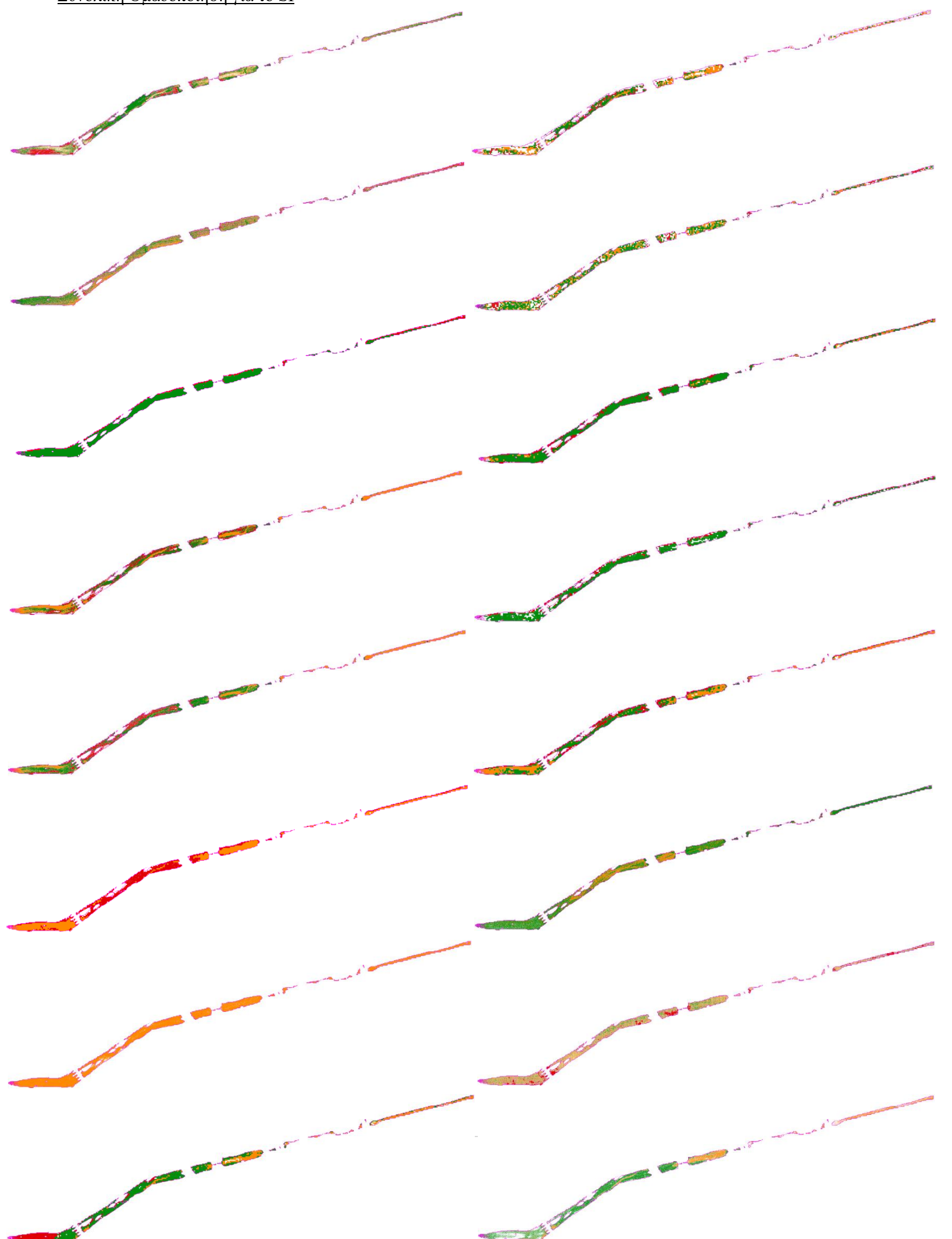
5.2.2.1.3 Αποτελέσματα 3^{ης} Κατηγορίας – Υψηλότερες Τιμές (Κόκκινο): NDCI



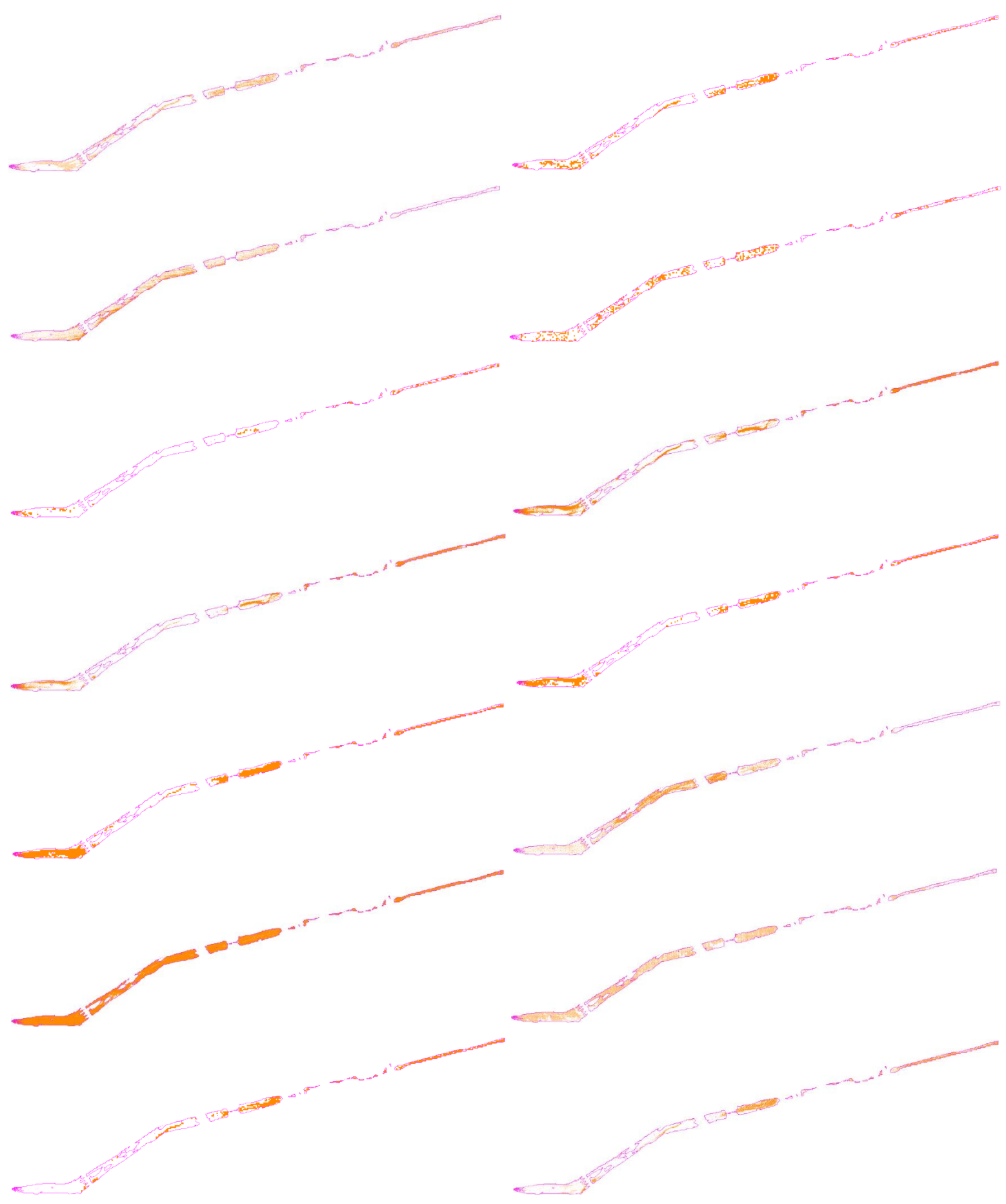
HDBSCAN on Individual: Προσδιορισμός συμπλεγμάτων των ιζημάτων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι σχέσεις ή τα μοτίβα που εκτείνονται σε χρονικά σημεία. Παραβλέπονται συσχετισμοί που εμφανίζονται με την πάροδο του χρόνου.

5.2.3 2^η Προσέγγιση: HDBSCAN στις Individual Images: SI

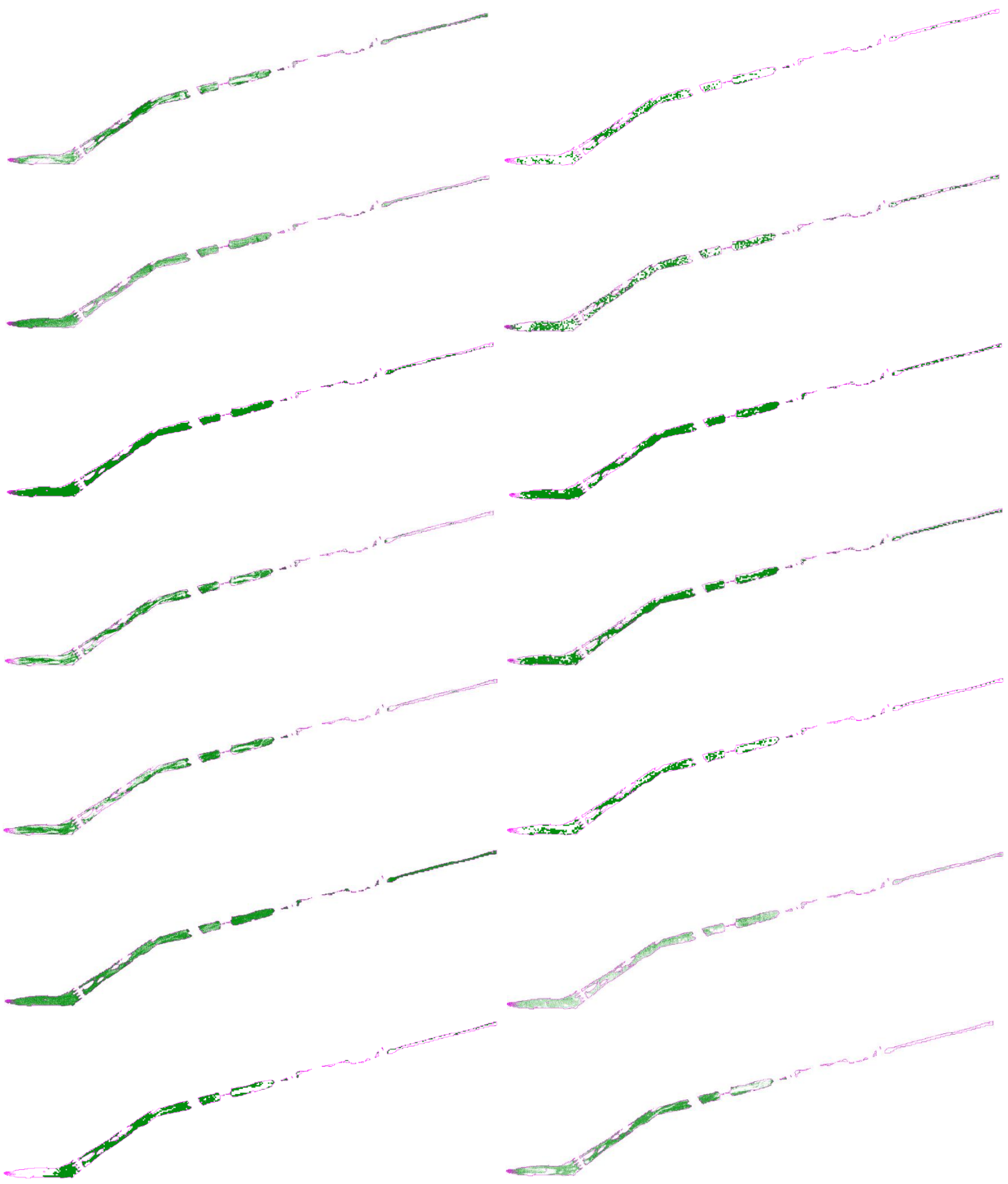
Συνολική Ομαδοποίηση για το SI



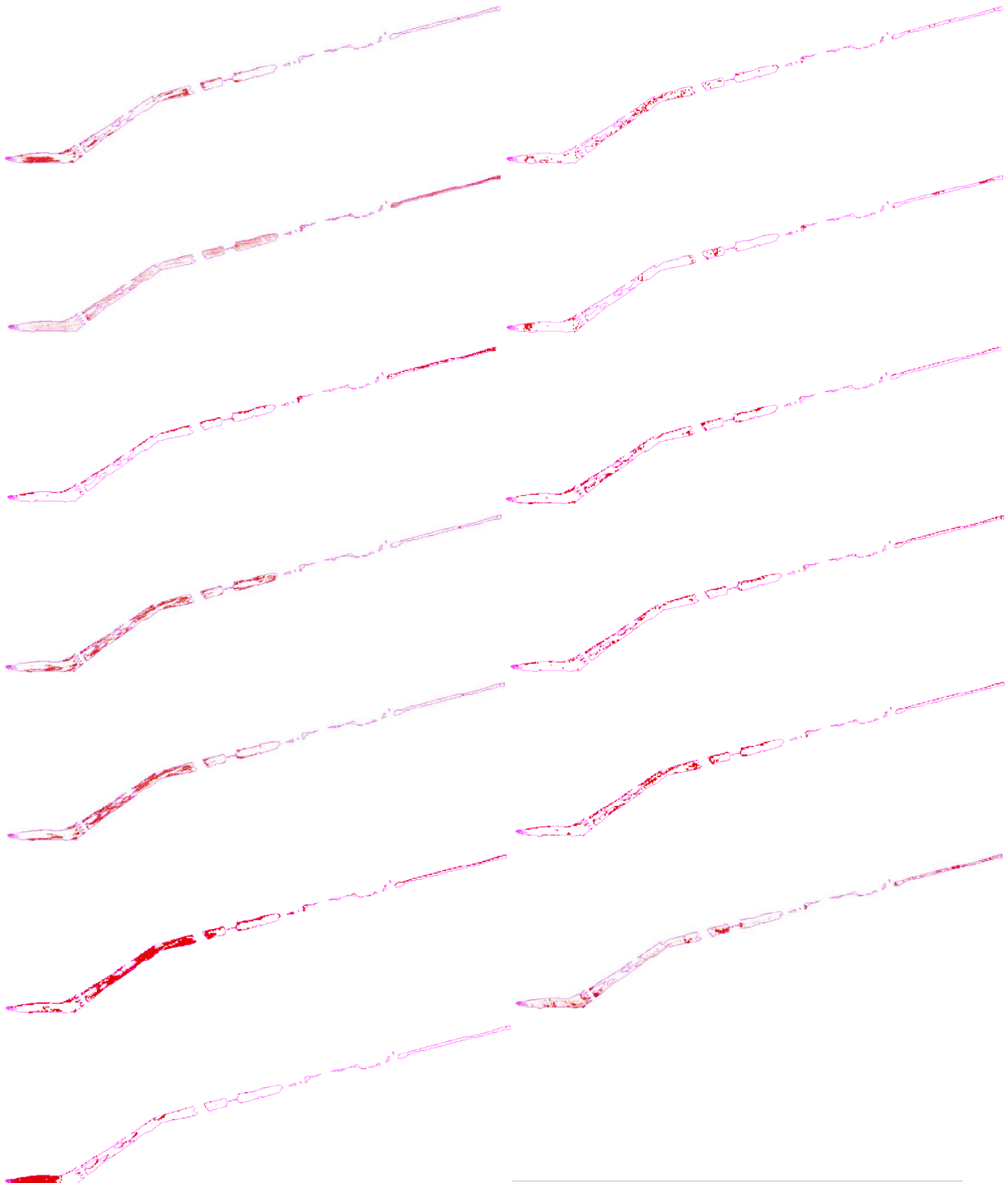
5.2.3.1 Αποτελέσματα 1^{ης} Κατηγορίας – Χαμηλότερες Τιμές (Πορτοκαλί): SI



5.2.3.2 Αποτελέσματα 2^{ης} Κατηγορίας – Μεσαίες Τιμές (Πράσινο): SI



5.2.3.3 Αποτελέσματα 3^{ης} Κατηγορίας – Υψηλότερες Τιμές (Κόκκινο): SI



5.3 Χλωροφύλλη – α

Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 4.6, δημιουργήθηκαν τρεις ομάδες από τα δεδομένα NDCI έτσι ώστε να αναλυθεί καλύτερα η κατανομή και τα επίπεδα συγκέντρωσης της χλωροφύλλης-α στο νερό.

t-SNE & HDBSCAN: Αναγνώριση συμπλεγμάτων που αντιστοιχούν σε μοτίβα ή/και ομοιότητες της ποσότητας της χλωροφύλλης – α σε όλη την χρονοσειρά. Παροχή πληροφοριών για τον τρόπο που εξελίσσονται τα συμπλέγματα χλωροφύλλης – α με την πάροδο του χρόνου.

5.3.1 1^η Προσέγγιση: Αποτελέσματα Ομαδοποίησης: t – SNE

Πίνακας 19: Περιοχές Συγκέντρωσης Χλωροφύλλης – α (1^η Προσέγγιση)

Κατηγορία	Περιγραφή
1^η Κατηγορία Ομοιοτήτων: Χαμηλότερες Τιμές	<ul style="list-style-type: none">• Εμφανίζεται κυρίως στο κεντρικό σώμα του ποταμού..• Έχει τη μεγαλύτερη παρουσία μεταξύ των τριών κατηγοριών
2^η Κατηγορία Ομοιοτήτων: Μεσαίες Τιμές	<ul style="list-style-type: none">• Παρουσιάζεται στη «μύτη», την «ουρά» και στις παράκτιες περιοχές του ποταμού.• Έχει τη δεύτερη μεγαλύτερη παρουσία
3^η Κατηγορία Ομοιοτήτων: Υψηλότερες Τιμές	<ul style="list-style-type: none">• Διάσπαρτα σε ελάχιστες περιοχές στο κύριο σώμα του ποταμού.• Σχεδόν ανύπαρκτη κατηγορία

Σύμφωνα με την Εικόνα 126, η **1η Κατηγορία**, η οποία αντιπροσωπεύει τις χαμηλότερες τιμές, είναι η πιο διαδεδομένη από τις τρεις κατηγορίες και βρίσκεται κυρίως στο κέντρο του ποταμού, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης για τις τιμές του NDCI. Η **2η Κατηγορία**, που υποδηλώνει τις μεσαίες τιμές, βρίσκεται στις εκβολές, την ουρά και τις παράκτιες περιοχές του ποταμού και είναι η δεύτερη πιο διαδεδομένη. Η ύπαρξη της **3ης Κατηγορίας**, που αντιπροσωπεύει τις μεγαλύτερες τιμές, είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη και είναι διάσπαρτη σε κάποια μέρη του κυρίου σώματος του ποταμού. Εν κατακλείδι, σύμφωνα με το t – SNE, το «σώμα» του πυρήνα του Σπερχειού Ποταμού έχει τις χαμηλότερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α, αλλά οι εκβολές του, η «ουρά» και τα παράκτια τμήματα του έχουν μέτριες συγκεντρώσεις. Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις είναι ασυνήθιστες και συγκεντρωμένες σε ένα πολύ μικρό κεντρικό σημείο της Περιοχής Μελέτης.

5.3.2 2^η Προσέγγιση: Αποτελέσματα Ομαδοποίησης: Individual Images

5.3.2.1 Αποτελέσματα 1^{ης} Κατηγορίας – Χαμηλότερες Τιμές (Πορτοκαλί): NDCI

- Οι τιμές κάτω από το 1/3 του ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως «**Low**». (≤ 0.0990)

Οι περιοχές χαμηλότερης συγκέντρωσης NDCI ($\leq 0,0990$) σχετίζονται με μικρά επίπεδα χλωροφύλλης – α, υποδεικνύοντας έτσι καθαρότερες συνθήκες νερού και ίσως μικρότερη επίδραση εισροής ουσιών που ενθαρρύνουν την ανάπτυξη φυκιών. Δεδομένου ότι η χαμηλότερη καταγεγραμμένη τιμή είναι 0.0229, τα νερά που παρουσιάζουν τέτοιες τιμές είναι πιθανώς λιγότερο ευτροφικά και πιο διαφανή.

Κινήσεις

Πίνακας 20: Περιγραφή Κινήσεων των χαμηλότερων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης – α

Ημερομηνία	Κατάσταση 1 ^{ης} Κατηγορίας NDCI
23 Δεκεμβρίου 2020	Αραιές συγκεντρώσεις εμφανίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα του ποταμού
28 Δεκεμβρίου 2020	Παρατηρούνται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις, που εκτείνονται στο νοτιοδυτικό τμήμα και την «ουρά» του ποταμού
12 Φεβρουαρίου 2021	Μικρές συγκεντρώσεις κατανέμονται σε όλο ποταμό
17 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση των μικρών συγκεντρώσεων
18 Φεβρουαρίου 2021	Αραιές συγκεντρώσεις εμφανίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα του ποταμού
23 Φεβρουαρίου 2021	Ελαφρώς πιο έντονες συγκεντρώσεις, στις στις περιοχές
27 Φεβρουαρίου 2021	Οι συγκεντρώσεις μειώνονται και περιορίζονται στο κεντρικό τμήμα του ποταμού
4 Μαρτίου 2021	Οι συγκεντρώσεις διατηρούνται
13 Μαρτίου 2021	Οι συγκεντρώσεις περιορίζονται στο κεντρικό τμήμα του ποταμού
17 Μαρτίου 2021	Οι συγκεντρώσεις μετακινούνται με πιο έντονη παρουσία στη «μύτη» και στην «ουρά» του ποταμού
24 Μαρτίου 2021	Αυξημένη συγκέντρωση και παρουσία στο κύριο σώμα, τη μύτη και την ουρά
30 Μαρτίου 2021	Μείωση στις παρουσίες στις, με στις συγκεντρώσεις να είναι περιορισμένες στο κύριο σώμα.

Μετακινήσεις και Σχόλια

Οι διακυμάνσεις στην ποιότητα του νερού κατά μήκος του Σπερχειού Ποταμού κατά την Περίοδο Μελέτης χαρακτηρίζονται από τις κινήσεις και τα πρότυπα των εμφανώς χαμηλών τιμών του NDCI, που υποδηλώνουν χαμηλότερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α. Αναλυτικότερα, αραιές συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν κυρίως στο μεσαίο τμήμα του ποταμού στις 23 Δεκεμβρίου του 2020, υποδηλώνοντας την παρουσία καθαρού νερού με μικρή δραστηριότητα φυτοπλαγκτού. Αυτές οι χαμηλές συγκεντρώσεις εξαπλώθηκαν στα νοτιοδυτικά και την «ουρά» του ποταμού έως τις 28 Δεκεμβρίου του 2020, υποδεικνύοντας μια μικρή βελτίωση στη διαύγεια του νερού.

Στις 12 Φεβρουαρίου 2021, μικρές ποσότητες χαμηλών τιμών του NDCI διασκορπίστηκαν σε όλο τον ποταμό, διατηρώντας ένα διάσπαρτο μοτίβο. Στις 17 Φεβρουαρίου του 2021, αυτή η κατανομή παρέμεινε αμετάβλητη, ενώ στις 23 Φεβρουαρίου του 2021, οι χαμηλές ποσότητες έγιναν ελαφρώς ισχυρότερες, υποδηλώνοντας ότι η ποιότητα του νερού μπορεί να βελτιώθηκε προσωρινά. Ωστόσο, οι χαμηλές συγκεντρώσεις του NDCI μειώθηκαν στις 27 Φεβρουαρίου του 2021 και περιορίστηκαν μόνο στη μέση του ποταμού. Στις 4 Μαρτίου του 2021, αυτή η κατάσταση παρέμεινε με συγκρίσιμες διανομές, ενώ οι συγκεντρώσεις εξακολουθούσαν να βρίσκονται μόνο στο μεσαίο τμήμα του ποταμού στις 13 Μαρτίου 2021.

Μέχρι τις 17 Μαρτίου του 2021, οι συγκεντρώσεις των χαμηλότερων τιμών έγιναν πιο έντονες και αισθητές στη «μύτη» και την «ουρά» του ποταμού. Ακόμα, οι χαμηλές συγκεντρώσεις του NDCI άρχισαν να αυξάνονται στις 24 Μαρτίου του 2021 και εξαπλώθηκαν σε όλο το κύριο σώμα, τη μύτη και την ουρά του ποταμού. Παρόλα αυτά, το μοτίβο δεν ήταν μακροχρόνιο, καθώς στις 30 Μαρτίου του 2021, οι συγκεντρώσεις των χαμηλότερων τιμών του NDCI είχαν επιστρέψει κυρίως στο κύριο σώμα του ποταμού.

5.3.2.2 Αποτελέσματα 2^{ης} Κατηγορίας – Μεσαίες Τιμές (Πράσινο): NDCI

- Οι τιμές μεταξύ του 1/3^{ου} και του 2/3^{ου} ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως «Medium».
(0.0990 < τιμή ≤ 0.1390).

Τοποθεσίες με μεσαίες συγκεντρώσεις NDCI (0,0990 < τιμή ≤ 0,1390) έχουν μέτριες ποσότητες χλωροφύλλης – α, υποδηλώνοντας μια ισορροπημένη παρουσία φυκιών. Αυτό το εύρος τιμών υποδηλώνει κανονικές οικολογικές συνθήκες, με νερά που δεν είναι **ούτε υπερβολικά καθαρά ούτε πολύ ευτροφικά.**

Κινήσεις

Πίνακας 21: Περιγραφή Κινήσεων των μεσαίων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α

Ημερομηνία	Κατάσταση 2 ^{ης} Κατηγορίας NDCI
23 Δεκεμβρίου 2020	Διαδεδομένες συγκεντρώσεις σε ολόκληρο τον ποταμό, ιδιαίτερα στο κεντρικό τμήμα και την ουρά
24 Δεκεμβρίου 2020	Ορισμένες συγκεντρώσεις εμφανίζονται μόνο στις εκβολές και στις παράκτιες περιοχές του κεντρικού τμήματος του ποταμού
28 Δεκεμβρίου 2020	Σημαντική αύξηση στις παρουσίες στις 2 ^{ης} Κατηγορίας σε όλο τον ποταμό
28 Ιανουαρίου 2021	Παρόμοια ευρεία κατανομή των μεσαίων τιμών του NDCI που σε όλο τον ποταμό
12 Φεβρουαρίου 2021	Σημαντική αύξηση στη συγκέντρωση των μεσαίων τιμών του NDCI στο κεντρικό τμήμα και στις εκβολές του ποταμού
17 Φεβρουαρίου 2021	Παρόμοια κατανομή, με επέκταση και στην ουρά του ποταμού
18 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση στις ευρείας παρουσίας, ιδίως στην περιοχή στις ουράς
22 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση στις ευρείας παρουσίας, ιδίως στην περιοχή στις ουράς
23 Φεβρουαρίου 2021	Σημαντική μείωση των μεσαίων τιμών NDCI, με μικρές μόνο συγκεντρώσεις που παρατηρούνται στο κεντρικό σώμα και στην άκρη του ποταμού
27 Φεβρουαρίου 2021	Ελαφρά αύξηση στις μεσαίες τιμές του NDCI σε όλο τον ποταμό
4 Μαρτίου 2021	Μέσες τιμές NDCI παρατηρούνται όλο τον ποταμό, με ευρεία παρουσία
13 Μαρτίου 2021	Μείωση των συγκεντρώσεων σε όλο τον ποταμό
17 Μαρτίου 2021	Οι μεσαίες τιμές του NDCI μειώνονται αλλά εξακολουθούν να υπάρχουν σε όλο τον ποταμό
24 Μαρτίου 2021	Παρουσία μεσαίων τιμών NDCI σε ολόκληρο τον ποταμό.
29 Μαρτίου 2021	Συγκεντρώσεις παρατηρούνται πλέον μόνο στο πιο νοτιοδυτικό τμήμα του ποταμού
30 Μαρτίου 2021	Η κίνηση μετατοπίζεται στις τα ανατολικά, με στις μεσαίες τιμές του NDCI να παρατηρούνται στο κεντρικό σώμα και στην ουρά του ποταμού

Μετακινήσεις και Σχόλια

Ξεκινώντας από την αρχή της χρονοσειράς, στις 23 Δεκεμβρίου 2020, οι μεσαίες τιμές του NDCI του ποταμού βρέθηκαν κυρίως στην ουρά και στα κεντρικά του τμήματα, υποδεικνύοντας μια μετρίως ενεργή και ισορροπημένη κοινότητα φυτοπλαγκτού. Αυτές οι τιμές ελαττώθηκαν στις 24 Δεκεμβρίου 2020, αφήνοντας μόνο λίγες συγκεντρώσεις κοντά στις εκβολές και κατά μήκος της ακτής, υποδηλώνοντας μια παροδική αλλαγή στην κατανομή του φυτοπλαγκτού και κατ' επέκταση της ποιότητας του νερού. Ακόμα, στις 28 Δεκεμβρίου του 2020, παρατηρήθηκαν συγκεντρώσεις μεσαίων τιμών NDCI κατά μήκος του ποταμού, υποδεικνύοντας μια πιθανή ανάκαμψη των επιπέδων της χλωροφύλλης – α.

Συνεχίζοντας, το κεντρικό τμήμα και το νοτιοδυτικό τμήμα του ποταμού παρουσίασαν σημαντική αύξηση στη παρουσία της 2^{ης} Κατηγορίας του NDCI στις 12 Φεβρουαρίου 2021 και στις 17 Φεβρουαρίου του 2021 είχε επεκταθεί και στην ουρά. Από τις 18 Φεβρουαρίου, έως και τις 22 Φεβρουαρίου του 2021, αυτό το μοτίβο παρέμεινε με έντονη παρουσία, ειδικά στην ουρά. Ωστόσο στις 23 Φεβρουαρίου του 2021, είχε σημειωθεί σημαντική πτώση, με το άκρο και το κεντρικό σώμα του ποταμού να δείχνουν μεσαία επίπεδα του NDCI.

Η μεσαία παρουσία του NDCI αυξήθηκε ελαφρώς ξεκινώντας από τις 27 Φεβρουαρίου του 2021, ενώ στις 4 Μαρτίου του 2021, ήταν ακόμα παρούσα κατά μήκος του ποταμού. Για άλλη μια φορά, στις 13 Μαρτίου του 2021, βρέθηκαν μεσαίες τιμές NDCI σε όλο τον ποταμό, ενώ στις 17 Μαρτίου του 2021, ήταν ελαφρώς χαμηλότερο, χωρίς να εξαφανίζεται τελείως. Οι μεσαίες τιμές του NDCI εμφανίστηκαν κατά μήκος του ποταμού στις 24 Μαρτίου του 2021, αλλά μέχρι και τις 29 Μαρτίου 2021, είχαν εμφανιστεί μόνο στα νοτιοδυτικά. Η 2^η Κατηγορία του NDCI κινήθηκε ανατολικά στις 30 Μαρτίου 2021, με τις μεσαίες συγκεντρώσεις του NDCI να εμφανίζονται στην ουρά και στο κέντρο του ποταμού.

5.3.2.3 Αποτελέσματα 3^{ης} Κατηγορίας – Υψηλότερες Τιμές (Κόκκινο): NDCI

- Οι τιμές πάνω από το 2/3 του ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως High. (> **0.1390**).

Οι τοποθεσίες της υψηλότερης συγκέντρωσης (> 0,1390) υποδεικνύουν σημαντικότερη παρουσία χλωροφύλλης – α, υποδηλώνοντας πιθανώς **άνθηση των φυκιών** και υποδεικνύοντας περιοχές που μπορεί να λαμβάνουν πολλά θρεπτικά συστατικά, υψηλότερες θερμοκρασίες ή άλλους παράγοντες που υποστηρίζουν την ανάπτυξη των φυκιών. Η κατηγορία έχει ως μέγιστη τιμή την 0.2239.

Κινήσεις

Πίνακας 22: Περιγραφή Κινήσεων των υψηλότερων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης – α

Ημερομηνία	Κατάσταση 3 ^{ης} Κατηγορίας NDCI
23 Δεκεμβρίου 2020	Αραιές συγκεντρώσεις στο κεντρικό τμήμα του ποταμού, στην «ουρά» και στη «μύτη»
24 Δεκεμβρίου 2020	Μείωση στις παρουσίες, με συγκεντρώσεις που παρατηρούνται μόνο στις παράκτιες περιοχές και στα άκρα
28 Δεκεμβρίου 2020	Μικρές συγκεντρώσεις εμφανίζονται στο κεντρικό τμήμα και στην ουρά του ποταμού
28 Ιανουαρίου 2021	Μειωμένες συγκεντρώσεις σε όλο τον ποταμό
12 Φεβρουαρίου 2021	Παρόμοια κατάσταση με την 28 ^η Ιανουαρίου 2021, με μειωμένες συγκεντρώσεις αλλά καταναμημένες σε όλο τον ποταμό
17 Φεβρουαρίου 2021	Συγκεντρώσεις που είναι αισθητές στις παράκτιες περιοχές και στην περιοχή στις «ουράς»
22 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση κατάστασης
23 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση κατάστασης
27 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση κατάστασης, με σταθερή κατανομή στις παράκτιες περιοχές και στην «ουρά»
4 Μαρτίου 2021	Αυξημένη παρουσία σημειώνεται τόσο στη «μύτη» όσο και στο κεντρικό τμήμα του ποταμού
13 Μαρτίου 2021	Διατήρηση κατάστασης
17 Μαρτίου 2021	Σημαντική αύξηση των συγκεντρώσεων παρατηρείται στο μεγαλύτερο μέρος του ποταμού, εκτός από το πιο νοτιοδυτικό τμήμα
29 Μαρτίου 2021	Οι συγκεντρώσεις μετακινούνται κυρίως στο νοτιοδυτικό τμήμα του ποταμού.

Μετακινήσεις και Σχόλια

Στις 23 Δεκεμβρίου 2020, η μύτη, η ουρά και τα κεντρικά τμήματα του ποταμού ήταν οι κύριες τοποθεσίες των υψηλών τιμών των συγκεντρώσεων του NDCI. Μέχρι τις 24 Δεκεμβρίου του 2020, οι συγκεντρώσεις περιορίστηκαν στο άκρο και στις παράκτιες περιοχές, υποδεικνύοντας μια αισθητή μείωση της παρουσίας της 3^η Κατηγορίας. Ωστόσο, στις 28 Δεκεμβρίου του 2020, οι συγκεντρώσεις άρχισαν να επανεμφανίζονται στη μέση και την ουρά του ποταμού, γεγονός που προκάλεσε μια μέτρια αλλαγή στην τάση της σύστασης του νερού.

Αν και οι συγκεντρώσεις είχαν μειωθεί έως και τις 28 Ιανουαρίου του 2021, εξακολουθούσαν να είναι διασκορπισμένες σε όλο τον ποταμό. Μέχρι τις 12 Φεβρουαρίου του 2021, αυτή η τάση μειωμένων αλλά οι διάσπαρτες συγκεντρώσεις παρέμεναν σταθερές. Στις 17 Φεβρουαρίου του 2021, οι συγκεντρώσεις άρχισαν να μετακινούνται στην περιοχή της ουράς του ποταμού και στις παράκτιες περιοχές. Συνεχίζοντας, από τις 22 Φεβρουαρίου έως και την 23 Φεβρουαρίου του 2021, η κατανομή παρέμεινε σταθερή στις ίδιες περιοχές, όπως αυτή και στις 17 Φεβρουαρίου του 2021. Η κατανομή του μοτίβου παρέμεινε και στις 27 Φεβρουαρίου 2021, και μετατοπίστηκε επίσης τόσο στην ουρά αλλά και στις παράκτιες περιοχές.

Ακόμα, στις 4 Μαρτίου του 2021, υψηλότερες τιμές του NDCI παρατηρήθηκαν στο νοτιοδυτικό και στο μεσαίο τμήμα του ποταμού, υποδηλώνοντας διασπορά αυξημένων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης – α. Η κατανομή παρέμεινε ίδια μέχρι και τις 13 Μαρτίου 2021, αλλά μέχρι στις 17 Μαρτίου του 2021, οι συγκεντρώσεις αυξήθηκαν σημαντικά σε όλο τον ποταμό, με εξαίρεση το πιο νοτιοδυτικό τμήμα. Τελικά, στις 29 Μαρτίου 2021, οι συγκεντρώσεις μετατοπίστηκαν κυρίως στα νοτιοδυτικά του ποταμού, δείχνοντας αλλαγή στις περιοχές με υψηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α.

5.4 Ιζήματα

Όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφάλαιο 4.6, δημιουργήθηκαν τρεις ομάδες από τα δεδομένα του SI έτσι ώστε να αναλυθεί καλύτερα η κατανομή και τα επίπεδα συγκέντρωσης των ιζημάτων στο νερό.

5.4.1 1^η Προσέγγιση: Αποτελέσματα Συγκέντρωσης: t – SNE

Πίνακας 23: Περιοχές Συγκέντρωσης Ιζημάτων (1^η Προσέγγιση)

Κατηγορία	Περιγραφή
1^η Κατηγορία Ομοιοτήτων: Χαμηλότερες Τιμές	Η μεγαλύτερη κατανομή στις 1 ^{ης} Κατηγορίας, η οποία έχει στις χαμηλότερες τιμές, βρίσκεται στην «ουρά» και το κεντρικό σώμα του ποταμού. Αυτές οι χαμηλότερες τιμές του SI δείχνουν μέρη με λιγότερα ιζήματα και συγκριτικά μη διαταραγμένες συνθήκες επειδή υποδεικνύουν καθαρό νερό με χαμηλή θολότητα
2^η Κατηγορία Ομοιοτήτων: Μεσαίες Τιμές	Η άκρη στις «μύτης» είναι κυρίως εκεί που βρίσκεται η 2 ^η Κατηγορία. Αυτές οι περιοχές δείχνουν ένα ενδιάμεσο επίπεδο θολότητας, υποδεικνύοντας ισορροπημένες συνθήκες που δεν έχουν πολύ λάσπη ή πολύ καθαρό νερό
3^η Κατηγορία Ομοιοτήτων: Υψηλότερες Τιμές	Οι βόρειες παράκτιες περιοχές φιλοξενούν την 3 ^η Κατηγορία, η οποία έχει στις μεγαλύτερες τιμές. Αυτό υποδηλώνει ότι υπάρχουν μέρη με αυξημένη καθίζηση καθώς παρουσιάζει υψηλή θολότητα και παρουσία λάσπης

Σύμφωνα με το t – SNE, οι κύριες περιοχές για την **1^η Κατηγορία**, που αντιπροσωπεύει τις χαμηλότερες τιμές, είναι το κεντρικό σώμα του ποταμού και η «ουρά» του, οι οποίες παρουσιάζουν την υψηλότερη συγκέντρωση. Αυτό υποδηλώνει μέρη με χαμηλότερη καθίζηση καθώς παρουσιάζουν μικρή θολότητα και μικρή παρουσία λάσπης. Στην άκρη της «μύτης» βρίσκεται κυρίως η **2η Κατηγορία**, η οποία έχει τις μεσαίες τιμές. Αυτοί οι αριθμοί δείχνουν ένα ενδιάμεσο επίπεδο θολότητας, υποδεικνύοντας ισορροπημένες συνθήκες που δεν έχουν

πολλή λάσπη ή πολύ καθαρό νερό. Οι βόρειες παράκτιες περιοχές φιλοξενούν την **3^η Κατηγορία**, η οποία αντιπροσωπεύει και τις μεγαλύτερες τιμές. Αυτές οι υψηλές τιμές του SI δείχνουν μέρη με περισσότερα ιζήματα και συγκριτικά διαταραγμένες συνθήκες επειδή δείχνουν λιγότερο καθαρό νερό με υψηλή θολότητα.

5.4.2 2^η Προσέγγιση: Αποτελέσματα Συγκέντρωσης: Individual Images

5.4.2.1 Αποτελέσματα 1^{ης} Κατηγορίας – Χαμηλότερες Τιμές (Πορτοκαλί): SI

- Οι τιμές κάτω από το 1/3 του ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως «Low». (≤ -0.0227)

Ως "χαμηλές" τιμές του SI ορίστηκαν ως εκείνες που ήταν μικρότερες από -0,0227. Αυτές οι χαμηλές τιμές SI δείχνουν συγκριτικά **καθαρό νερό με λιγότερα ιζήματα και θολότητα**, γεγονός που μπορεί να συνεπάγεται βελτιωμένη διαύγεια του. Το -0,1923 ήταν το χαμηλότερο ποσοστό SI που έχει καταγραφεί.

Κινήσεις

Πίνακας 24: Περιγραφή Κινήσεων των χαμηλότερων συγκεντρώσεων ιζημάτων

Ημερομηνία	Κατάσταση 1^{ης} Κατηγορίας SI
23 Δεκεμβρίου 2020	Αραιή παρουσία στο κεντρικό μέρος και στην «ουρά»
24 Δεκεμβρίου 2020	Αυξημένη παρουσία στο κέντρο και την «ουρά»
28 Δεκεμβρίου 2020	Έντονη παρουσία στις νότιες παραθαλάσσιες περιοχές του κεντρικού τμήματος
28 Ιανουαρίου 2021	Μέτρια παρουσία στο κεντρικό μέρος
17 Φεβρουαρίου 2021	Η παρουσία περιορίζεται στην «ουρά»
18 Φεβρουαρίου 2021	Έντονη παρουσία στην «ουρά», τη «μύτη» και διάσπαρτα στο κέντρο.
23 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση κατάστασης
27 Φεβρουαρίου 2021	Αυξημένη παρουσία στη μύτη και την ουρά
4 Μαρτίου 2021	Περαιτέρω αύξηση στη μύτη και την ουρά
13 Μαρτίου 2021	Η συγκέντρωση μετατοπίζεται στο κέντρο
17 Μαρτίου 2021	Διατήρηση κατάστασης
24 Μαρτίου 2021	Μειωμένη παρουσία
29 Μαρτίου 2021	Ελαφριά παρουσία μόνο στο κέντρο και βορειότερα του
30 Μαρτίου 2021	Διατήρηση κατάσταση, με ελαφριά μείωση

Μετακινήσεις και Σχόλια

Αρχικά, στις 23 Δεκεμβρίου του 2020, παρατηρήθηκε μόνο μια μικρή ποσότητα στις 1^{ης} Κατηγορίας του SI, κυρίως στο κεντρικό σώμα και στην ουρά του ποταμού. Στις 24 Δεκεμβρίου του 2020, αυτό το μοτίβο έγινε πιο έντονο, με τις περιοχές του κέντρου και της ουράς να προσελκύουν μεγαλύτερη παρουσία, ενώ υψηλότερα επίπεδα στις 1^{ης} Κατηγορίας φάνηκαν στις 28 Δεκεμβρίου 2020, ειδικά στα νότια παράκτια τμήματα του κεντρικού σώματος του ποταμού.

Οι χαμηλότερες τιμές του SI για τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο του 2021 αποκάλυψαν μέτρια έως ισχυρή παρουσία σε πολλές τοποθεσίες. Πιο συγκεκριμένα, μέχρι τις 17 Φεβρουαρίου του 2021, οι χαμηλότερες τιμές SI ήταν συγκεντρωμένες κυρίως στην ουρά του ποταμού, αλλά στις 28 Ιανουαρίου 2021, εμφανίστηκε μια μέτρια παρουσία στο κύριο ρεύμα. Αντ' αυτού, στις 18 Φεβρουαρίου 2021, η παρουσία έγινε πολύ πιο διαδεδομένη, καλύπτοντας την ουρά, τη μύτη και τα τμήματα του κέντρου. Ακόμα, στις 23 Φεβρουαρίου του 2021, παρατηρήθηκε παρόμοια παρουσία και μέχρι τις 27 Φεβρουαρίου 2021, το μοτίβο είχε ενισχυθεί περαιτέρω, με μεγαλύτερη παρουσία της 1^{ης} Κατηγορίας να φαίνεται στις περιοχές της μύτης και της ουράς. Αυτό το μοτίβο κράτησε μέχρι και τις 4 Μαρτίου 2021

Συνεχίζοντας, στις 13 Μαρτίου του 2021, υπήρξε μια σημαντική κίνηση στις τιμές του SI, πιθανώς λόγω των μεταβαλλόμενων μοτίβων εναπόθεσης λάσπης ή των ρευμάτων νερού. Οι χαμηλότερες τιμές του SI ήταν παρούσες σε όλη την περιοχή έως και τις 17 Μαρτίου 2021.

Σε σύγκριση με προηγούμενες ημερομηνίες, υπήρξε μείωση της παρουσίας στις 1^{ης} Κατηγορίας του SI στα τέλη Μαρτίου, και ειδικότερα στις 24 Μαρτίου 2021, υποδηλώνοντας πιθανή πτώση στα επίπεδα καθίζησης. Τέλος, στις 29 Μαρτίου 2021, η παρουσία εμφανίστηκε μόνο στο κέντρο και πιο βόρεια του ποταμού, ενώ στις 30 Μαρτίου 2021, η κατάσταση διατηρήθηκε.

5.4.2.2 Αποτελέσματα 2^{ης} Κατηγορίας – Μεσαίες Τιμές (Πράσινο): SI

- Οι τιμές μεταξύ του 1/3^{ου} και του 2/3^{ου} ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως «Medium». **(-0.0227 < τιμή ≤ 0.0416).**

Ως "Medium" ορίζεται οι τιμές του SI μεταξύ -0,0227 και 0,0416. Αυτό το εύρος υποδηλώνει ενδιάμεσα επίπεδα θολότητας και καθίζησης. Το ίζημα μπορεί να επηρεάσει κάπως τη διαύγεια του νερού αλλά όχι σε σημείο που να μειώνει αισθητά την ορατότητα ή την ποιότητα του νερού.

Κινήσεις

Πίνακας 25: Περιγραφή Κινήσεων των μεσαίων συγκεντρώσεων ιζημάτων

Ημερομηνία	Κατάσταση 2^{ης} Κατηγορίας SI
23 Δεκεμβρίου 2020	Παρουσία σε ολόκληρη την περιοχή του ποταμού
24 Δεκεμβρίου 2020	Μείωση στις παρουσίες, με έντονη παρουσία να παρατηρείται κυρίως στο κέντρο του ποταμού
28 Δεκεμβρίου 2020	Εξάπλωση την παρουσίας σε ολόκληρη την περιοχή του ποταμού
28 Ιανουαρίου 2021	Ελαφρά μείωση στις παρουσίες κατά μήκος του ποταμού
12 Φεβρουαρίου 2021	Οι μεσαίες τιμές του SI αυξάνονται ξανά, παρουσιάζοντας μια πιο διαδεδομένη παρουσία
17 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση κατάστασης
18 Φεβρουαρίου 2021	Ελαφριά μείωση
22 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση κατάστασης
23 Φεβρουαρίου 2021	Ελαφριά μείωση στις παρουσίες των μεσαίων τιμών του SI
27 Φεβρουαρίου 2021	Διατήρηση κατάστασης
13 Μαρτίου 2021	Αύξηση στις παρουσίες των μεσαίων τιμών του SI σε ολόκληρη την περιοχή του ποταμού
17 Μαρτίου 2021	Η συγκέντρωση μετατοπίζεται στο κέντρο
24 Μαρτίου 2021	Απότομη πτώση στις μεσαίες τιμές του SI σε ολόκληρη την περιοχή του ποταμού
29 Μαρτίου 2021	Παρουσία μόνο στο κεντρικό κομμάτι του ποταμού
30 Μαρτίου 2021	Διατήρηση κατάστασης

Μετακινήσεις και Σχόλια

Οι συγκεντρώσεις των μεσαίων τιμών του δείκτη ιζημάτων (SI) του Σπερχειού έδειξαν ασταθείς τάσεις από τον Δεκέμβριο του 2020 έως τον Μάρτιο του 2021. Αναλυτικότερα, στις 23 Δεκεμβρίου του 2020, οι μεσαίες τιμές του SI κατανεμήθηκαν αρχικά ομοιόμορφα σε όλη τη περιοχή του ποταμού, υποδεικνύοντας μέτριο βαθμό καθίζησης παντού. Στις 24 Δεκεμβρίου του 2020, ωστόσο, υπήρξε μια αισθητή ελάττωση της παρουσίας, οι οποία περιορίστηκε κυρίως στη μέση του ποταμού. Ακόμα, στις 28 Δεκεμβρίου 2020 σημειώθηκε μια άνοδος στην παρουσία των μεσαίων τιμών του SI, οι οποίες διασκορπίστηκαν σε όλο το μήκος του ποταμού, ενώ ένα μήνα μετά, στις 28 Ιανουαρίου του 2021, παρατηρήθηκε μια μικρή μείωση στην παρουσία των μεσαίων τιμών του SI κατά μήκος του ποταμού.

Οι μεσαίες τιμές του SI άρχισαν να αυξάνονται ξανά από τα μέσα Φεβρουαρίου 2021, και πιο συγκεκριμένα στις 12 και στις 17 Φεβρουαρίου, υποδηλώνοντας μια ευρύτερη διασπορά. Ακόμα, στις 18 και 22 Φεβρουαρίου του 2021, αυτό το μοτίβο συνεχίστηκε, παρά τη μικρή πτώση στην παρουσία της 2^{ης} Κατηγορίας του SI τις προηγούμενες ημέρες. Μια άλλη μικρή μείωση στην παρουσία των μεσαίων τιμών του SI παρατηρήθηκε προς τα τέλη Φεβρουαρίου, και συγκεκριμένα στις 23 και 27 Φεβρουαρίου 2021.

Τον Μάρτιο, και συγκεκριμένα, στις 13 Μαρτίου 2021, οι μέσες μετρήσεις του SI αυξήθηκαν σημαντικά κατά μήκος του ποταμού, υποδηλώνοντας μια σύντομη αύξηση της καθίζησης. Ωστόσο, μέχρι τις 24 Μαρτίου 2021, οι μεσαίες τιμές SI σε όλο τον ποταμό είχαν μειωθεί απότομα, υποδεικνύοντας πτώση στα επίπεδα καθίζησης. Μόνο το κύριο κομμάτι του ποταμού είχε μεσαίες τιμές του SI στις 29 και 30 Μαρτίου του 2021, υποδεικνύοντας περιορισμένα μοτίβα διασποράς ιζημάτων.

5.4.2.3 Αποτελέσματα 3^{ης} Κατηγορίας – Υψηλότερες Τιμές (Κόκκινο): SI

- Οι τιμές πάνω από το 2/3 του ποσοστού κατηγοριοποιήθηκαν ως High. (> **0.10416**).

Οι τιμές SI που ήταν άνω του 0.10416 ταξινομήθηκαν ως "Υψηλές"., ενώ στην έρευνα, η υψηλότερη τιμή του SI που βρέθηκε ήταν 0.2383. Τα αυξημένα επίπεδα καθίζησης και η αυξημένη θολότητα υποδεικνύονται από αυτές τις υψηλότερες τιμές SI, οι οποίες πιθανώς προκαλούνται από μεγαλύτερα φορτία ιζημάτων στο νερό.

Κινήσεις

Πίνακας 26: Περιγραφή Κινήσεων των υψηλότερων συγκεντρώσεων ιζημάτων

Ημερομηνία	Κατάσταση 3 ^{ης} Κατηγορίας SI
23 Δεκεμβρίου 2020	Διάσπαρτες συγκεντρώσεις στο κεντρικό τμήμα και στο άκρο
24 Δεκεμβρίου 2020	Οι συγκεντρώσεις περιορίζονται στο κεντρικό τμήμα
28 Δεκεμβρίου 2020	Παρατηρήθηκε παρουσία σε παράκτιες περιοχές και στην ουρά
28 Ιανουαρίου 2021	Ελαφριά παρουσία σε διάσπαρτες περιοχές κατά μήκος στις μύτες και στις ουρές
12 Φεβρουαρίου 2021	Συγκεντρώσεις σε παράκτιες περιοχές
17 Φεβρουαρίου 2021	Αυξημένες συγκεντρώσεις σε παράκτιες περιοχές και στην ουρά
18 Φεβρουαρίου 2021	Η παρουσία επεκτάθηκε και στο κεντρικό κομμάτι
22 Φεβρουαρίου 2021	Η συγκέντρωση επικεντρώθηκε μόνο στις παράκτιες περιοχές και στην ουρά
23 Φεβρουαρίου 2021	Παρατηρήθηκε συγκέντρωση τόσο στο κεντρικό τμήμα όσο και στην ουρά
27 Φεβρουαρίου 2021	Παρόμοιο μοτίβο συγκέντρωσης
04 Μαρτίου 2021	Μεγαλύτερη παρουσία σημειώθηκε στο κέντρο και στην ουρά
24 Μαρτίου 2021	Διάσπαρτες συγκεντρώσεις γύρω από τη μύτη και την ουρά
29 Μαρτίου 2021	Συγκέντρωση παρατηρείται κυρίως στο νοτιοδυτικό τμήμα

Μετακινήσεις και Σχόλια

Οι διακυμάνσεις στις υψηλότερες τιμές του SI στον Σπερχειό Ποταμό με την πάροδο του χρόνου αντικατοπτρίζουν τα μεγαλύτερα επίπεδα ιζήματος. Αναλυτικότερα, από τις 23 Δεκεμβρίου του 2020, καταγράφηκαν διάσπαρτες συγκεντρώσεις στη μεσαία περιοχή και στο άκρο του ποταμού, έως και τις 24 Δεκεμβρίου 2020, όταν οι συγκεντρώσεις περιορίστηκαν στην κεντρική περιοχή. Αυτές οι συγκεντρώσεις επεκτάθηκαν στην ουρά και στις παράκτιες περιοχές στις 28 Δεκεμβρίου 2020, υποδεικνύοντας τοπική εισροή ιζημάτων. Ακόμα, υπήρξε μικρή παρουσία σε μερικά σημεία γύρω από τη μύτη και την ουρά μέχρι τις 28 Ιανουαρίου του 2021, υποδηλώνοντας ότι τα μοτίβα καθίζησης μπορεί να είχαν διακυμάνσεις.

Μέχρι και τις 17 Φεβρουαρίου 2021, οι συγκεντρώσεις είχαν αυξηθεί σημαντικά στην ουρά και στις παράκτιες περιοχές, ενώ στις 18 Φεβρουαρίου 2021, είχε παρατηρηθεί μια ακόμη πιο έντονη παρουσία στο κεντρικό κανάλι. Μέχρι τις 22 Φεβρουαρίου του 2021, η 3^η Κατηγορία του SI είχε επιστρέψει στην ουρά και στις παράκτιες περιοχές, ενώ στις 23 Φεβρουαρίου του 2021, οι συγκεντρώσεις εξακολουθούσαν να υπάρχουν στην περιοχή της ουράς και του κέντρου, υποδηλώνοντας ότι η πρόσληψη ιζήματος συνεχιζόταν.

Συνεχίζοντας, οι συγκεντρώσεις άλλαξαν κατά τον μήνα Μάρτιο και έγιναν πιο έντονες στο κέντρο και την ουρά στις 4 Μαρτίου 2021, ενώ διασκορπίστηκαν γύρω από τη μύτη και την ουρά στις 24 Μαρτίου 2021. Τέλος, οι συγκεντρώσεις παρατηρήθηκαν κυρίως στα νοτιοδυτικά στις 29 Μαρτίου 2021, επισημαίνοντας περιφερειακά πρότυπα ιζηματοποίησης και πιθανές πηγές που επηρεάζουν το φορτίο ιζήματος του ποταμού.

5.5 Σύγκριση Προσεγγίσεων

Διαφορές στην έννοια των αποτελεσμάτων ανάλογα την Προσέγγιση

Αρχικά, η εκτέλεση του t – SNE και του HDBSCAN σε ένα σύνολο δεδομένων του νερού για μια χρονοσειρά προσφέρει διαφορετικές προοπτικές σε σύγκριση με την εφαρμογή του HDBSCAN ξεχωριστά σε κάθε εικόνα. Από την μια πλευρά, το t – SNE όταν εφαρμόζεται σε ένα σύνολο δεδομένων, βοηθά στην αποκάλυψη μοτίβων σε πολλαπλά χρονικά σημεία σε μια ενοποιημένη οπτική αναπαράσταση, μιας και οι μειωμένες διαστάσεις του, διατηρούν την τοπική δομή, διευκολύνοντας τη διάκριση ομοιοτήτων και συστάδων. Αναλυτικότερα, το t-SNE προ επεξεργάζεται τα δεδομένα σε ένα χώρο χαμηλότερης διάστασης όπου το HDBSCAN μπορεί στη συνέχεια να αναγνωρίσει τα συμπλέγματα που μπορεί να αντιστοιχούν σε χρονικά μοτίβα ή ομοιότητες σε ολόκληρη τη χρονοσειρά. Αυτή η προσέγγιση παρέχει πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσονται τα συμπλέγματα με την πάροδο του χρόνου και στις αλληλεπιδράσεις στις σε όλο το σύνολο δεδομένων.

Το HDBSCAN, από την άλλη πλευρά, είναι ένας αλγόριθμος ομαδοποίησης που προσδιορίζει συστάδες σε δεδομένα υψηλών διαστάσεων με βάση την πυκνότητα. Όταν εφαρμόζεται ανεξάρτητα σε κάθε εικόνα μιας χρονικής σειράς, το HDBSCAN προσδιορίζει συμπλέγματα σε κάθε στιγμιότυπο χωρίς να λαμβάνει υπόψη σχέσεις ή μοτίβα που εκτείνονται σε χρονικά σημεία. Εστιάζει αποκλειστικά σε τοπικές δομές εντός μεμονωμένων συνόλων δεδομένων. Αναλυτικότερα, η εφαρμογή του HDBSCAN ξεχωριστά σε κάθε εικόνα αντιμετωπίζει κάθε χρονικό σημείο ως ανεξάρτητα δεδομένα, παραβλέποντας μοτίβα ή συσχετισμούς που εμφανίζονται με την πάροδο του χρόνου. Αν και αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για την αναγνώριση συστάδων σε μεμονωμένα στιγμιότυπα, δεν καταγράφει τη χρονική δυναμική ή τις σχέσεις μεταξύ των συστάδων σε διαφορετικά χρονικά σημεία.

Πίνακας 27: Συσχέτιση των δυο Προσεγγίσεων (NDCI)

Κατηγορίες	1 ^η Προσέγγιση: t – SNE (Χρονικές Ομοιότητες: Στατικό)	2 ^η Προσέγγιση: Individual Images (Στιγμαίειες Ομοιότητες: Δυναμικό)
1^η Κατηγορία: Χαμηλότερες Τιμές	Το κεντρικό τμήμα του ποταμού φιλοξενεί αυτή την ομάδα, η οποία είναι η πιο διαδεδομένη. Οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης είναι συνήθως χαμηλότερες σε αυτό το τμήμα, υποδηλώνοντας καθαρότερο νερό και μειωμένη δραστηριότητα φυκιών.	Στην αρχή της χρονοσειράς, παρατηρήθηκαν διάσπαρτες εμφανίσεις στη μέση του ποταμού, ενώ μέχρι το τέλος Δεκεμβρίου, αυτές οι συγκεντρώσεις επεκτάθηκαν στην ουρά του ποταμού και νοτιοδυτικά. Τον Φεβρουάριο, παρατηρήθηκε ένα διάσπαρτο μοτίβο, ενώ μέχρι τα μέσα του Μαρτίου, οι συγκεντρώσεις στην ουρά και τη μύτη έγιναν πιο εμφανείς. Στα τέλη Μαρτίου, οι συγκεντρώσεις αυξήθηκαν στην ουρά, τη μύτη και το κύριο σώμα του ποταμού, αλλά σύντομα επέστρεψαν κυρίως στο κύριο σώμα.
2^η Κατηγορία: Μεσαίες Τιμές	Αυτή είναι η δεύτερη πιο διαδεδομένη ομάδα, με συγκεντρώσεις που παρατηρούνται στις εκβολές, την ουρά και στις παράκτιες περιοχές του ποταμού. Αυτό υποδηλώνει ότι οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α σε αυτές στις περιοχές είναι πιθανώς μέτριες, λόγω στις μέτριας εισροής λιπασμάτων και στις δραστηριότητας του φυτοπλαγκτού.	Στην αρχή της χρονοσειράς, η παρουσία ήταν κυρίως στις περιοχές του κέντρου και στις ουράς του ποταμού ενώ στα τέλη του Δεκεμβρίου, μειώθηκε σε λίγες περιοχές κοντά στην ακτή και στις εκβολές. Τον Φεβρουάριο, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση στις παρουσίες, ιδιαίτερα στην ουρά του ποταμού. Τον Μάρτιο, η κατανομή ήταν ομοιόμορφη και κάπως αυξανόμενη καθ' όλη τη διάρκεια του μήνα, με συγκεντρώσεις στα νοτιοδυτικά προς το τέλος του μήνα.
3^η Κατηγορία: Υψηλότερες Τιμές	Αυτή η ομάδα είναι διασκορπισμένη σε όλο το κύριο σώμα του ποταμού και είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη. Ωστόσο, περιστασιακά παρατηρούνται μεμονωμένα επεισόδια ευτροφισμού, τα οποία υποδεικνύονται από ασυνήθιστα και περιορισμένα υψηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης-α.	Στην αρχή της χρονοσειράς, οι κεντρικές περιοχές, η ουρά και η μύτη του ποταμού εμφάνιζαν κάποιες συγκεντρώσεις, ενώ μέχρι τα τέλη του Δεκεμβρίου, η παρουσία μειώθηκε και άλλο, αλλά επανεμφανίστηκε στη μεσαία τμήμα και την ουρά του ποταμού στα τέλη Ιανουαρίου. Τον Φεβρουάριο, ενώ οι συγκεντρώσεις παρέμειναν σταθερές, διασκορπίστηκαν και σε άλλα μέρη. Τον Μάρτιο, σημειώθηκε αύξηση σε όλο το ποτάμι, ιδιαίτερα στο κέντρο, και μέχρι το τέλος του μήνα, οι συγκεντρώσεις είχαν μετακινηθεί στα νοτιοδυτικά.

Με βάση τον Πίνακα 28 και τη σύγκριση των δύο Προσεγγίσεων για το NDCI, παρατηρούνται διάφορες πληροφορίες για την κατηγοριοποίηση, τη χωρική κατανομή και τη χρονική δυναμική των τιμών.

Αρχικά, στην 1^η Κατηγορία, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλότερες τιμές χλωροφύλλης – α, παρατηρείται συγκέντρωση κυρίως στο κεντρικό τμήμα του ποταμού, υποδεικνύοντας καθαρό νερό και μειωμένη δραστηριότητα φυκιών. Κατά τη διάρκεια της χρονικής σειράς, παρατηρούνται εκτεταμένες συγκεντρώσεις προς την ουρά και νοτιοδυτικά κατά τον Δεκέμβριο και τον Φεβρουάριο, ενώ η κατανομή επανέρχεται κυρίως στο κύριο σώμα τον Μάρτιο.

Ακόμα, η 2^η Κατηγορία που εκπροσωπεί τις μεσαίες τιμές χλωροφύλλης – α, εντοπίζεται στις εκβολές, την ουρά και τις παράκτιες περιοχές. Αυτό υποδεικνύει μέτριες συγκεντρώσεις, με έντονη αύξηση στην ουρά του ποταμού τον Φεβρουάριο και ομοιόμορφη κατανομή κατά τον Μάρτιο, με εστίες προς τα νοτιοδυτικά.

Τέλος, η 3^η Κατηγορία είναι διασκορπισμένη σε όλο το κύριο σώμα του ποταμού και χαρακτηρίζεται από υψηλότερες τιμές χλωροφύλλης – α. Αν και σπάνια, παρουσιάζει αυξημένη παρουσία κατά τον Ιανουάριο και τον Μάρτιο, κυρίως στο κέντρο και νοτιοδυτικά του ποταμού.

Συγκρισιμότητα:

Πληροφορίες από τη χωρική κατανομή: Και οι δύο μέθοδοι εντοπίζουν συγκεκριμένες περιοχές όπου οι δυο προσεγγίσεις είναι πιο κοινές. Για παράδειγμα, εντοπίζουν και οι δύο ότι οι ποσότητες χλωροφύλλης – α είναι συνήθως χαμηλότερες στο κεντρικό τμήμα του ποταμού.

Χρονική δυναμική: Η ολοκληρωμένη παρουσίαση των μετακινήσεων της 2^{ης} Προσέγγισης προσφέρει περαιτέρω πληροφορίες για το πώς οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου, ενώ η προσέγγιση της 1^{ης} Προσέγγισης είναι πιο στατική. Και οι δύο υποδεικνύουν περιόδους κατά τις οποίες οι συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α σε ορισμένες περιοχές είναι υψηλότερες ή χαμηλότερες.

Ανάλυση: Στατική vs Δυναμική

Η 1^η Προσέγγιση χρησιμοποιεί την ομαδοποίηση για να παρέχει μια στατική, ευρεία ταξινόμηση του ποταμού σε περιοχές με χαμηλές, μεσαίες και υψηλές τιμές του NDCI. Παράλληλα, παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα των δεδομένων και η μείωση των δεδομένων υψηλών διαστάσεων επιτρέπει στο t-SNE την οπτικοποίηση των δεδομένων και διευκολύνει την αναγνώριση μοτίβων και συμπλεγμάτων.

Η 2^η Προσέγγιση προσφέρει λεπτομερείς πληροφορίες για μεμονωμένες ημερομηνίες και στις διακυμάνσεις στις τιμές του NDCI, επιτρέποντας την ακριβέστερη κατανόηση της χρονικής δυναμικής. Αυτή η προσέγγιση παρέχει μια πιο καθημερινή εξήγηση των ημερήσιων αλλαγών στις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α διαχρονικά, προσφέροντας μια δυναμική ανάλυση με συγκεκριμένες χρονικές διακυμάνσεις.

Πίνακας 28: Σύγκριση των δυο Προσεγγίσεων (SI)

Κατηγορίες	1 ^η Προσέγγιση: t – SNE (Χρονικές Ομοιότητες: Στατικό)	2 ^η Προσέγγιση: Individual Images (Στιγμαϊκές Ομοιότητες: Δυναμικό)
1^η Κατηγορία: Χαμηλότερες Τιμές	Βρέθηκε κυρίως στην ουρά και στο κεντρικό σώμα του ποταμού. Υποδεικνύει χαμηλή θολότητα και παρουσία ιζημάτων, υποδηλώνοντας περιοχές με χαμηλή απορροή ή καθίζηση.	Αρχικά, υπάρχει αραιή παρουσία στο κυρίως μέρος και στην ουρά, που αυξήθηκε έως στις 28 Δεκεμβρίου 2020. Μέτρια έως ισχυρή παρουσία κατά τη διάρκεια του Ιανουαρίου και του Φεβρουαρίου 2021, με συγκεντρώσεις κυρίως στην ουρά και στις παράκτιες περιοχές. Εκτεταμένη παρουσία έως τα μέσα Μαρτίου, υποδηλώνοντας χαμηλή θολότητα και καθίζηση. Μειωμένη παρουσία της τα τέλη Μαρτίου.
2^η Κατηγορία: Μεσαίες Τιμές	Βρίσκεται κυρίως στην άκρη της μύτης του ποταμού. Υποδεικνύει ενδιάμεση θολότητα, υποδηλώνοντας ισορροπημένες συνθήκες χωρίς υπερβολικό ίζημα ούτε πολύ καθαρό νερό.	Αρχικά, υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή σε όλη τη λεκάνη απορροής του ποταμού, η οποία μειώνεται στις 24 Δεκεμβρίου 2020. Αύξηση εκ νέου έως στις 28 Δεκεμβρίου 2020, με κυμαινόμενα επίπεδα έως τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο του 2021. Σταθερή παρουσία στα μέσα Φεβρουαρίου, μειώνεται ξανά στα τέλη Φεβρουαρίου. Σημαντική άνοδος στα μέσα Μαρτίου, ακολουθούμενη από μια απότομη πτώση στα τέλη Μαρτίου.
3^η Κατηγορία: Υψηλότερες Τιμές	Βρέθηκε στις βόρειες παράκτιες περιοχές. Υποδεικνύει λιγότερο καθαρά νερά με υψηλή θολότητα, υποδηλώνοντας περιοχές με περισσότερα ιζήματα και σχετικά διαταραγμένες συνθήκες.	Διάσπαρτες συγκεντρώσεις στην κεντρική περιοχή και στην κορυφή στην αρχή της χρονοσειράς. Μέχρι τα τέλη Δεκεμβρίου, επεκτάθηκε στην ουρά και στις παράκτιες περιοχές. Αυξημένη παρουσία έως τα μέσα Φεβρουαρίου, με επίκεντρο την ουρά και στις παράκτιες περιοχές. Συνεχίστηκε η παρουσία στην ουρά και στο κέντρο μέχρι τα τέλη Φεβρουαρίου. Οι συγκεντρώσεις εντάθηκαν τον Μάρτιο, με επίκεντρο τη νοτιοδυτική περιοχή έως το τέλος του μήνα.

Γενικός Σχολιασμός, Ομοιότητες και Διαφορές

Αρχικά όπως έχει αναφερθεί, και στις δύο Προσεγγίσεις, οι τιμές SI κατηγοριοποιούνται σε τρεις ομάδες: χαμηλή, μεσαία και υψηλή, καθώς η καθεμία αντιπροσωπεύει διαφορετικά επίπεδα θολότητας και παρουσίας ιζήματος στον ποταμό. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν αυτές τις κατηγορίες για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τα πρότυπα καθίζησης και τη διαύγεια του νερού.

Όπως αναφέρθηκε, οι προσεγγίσεις διαφέρουν στην εκτέλεσή τους. Η 1^η Προσέγγιση εστιάζει στη στατική χωρική κατανομή, κατηγοριοποιώντας στις τιμές SI με βάση σταθερές περιοχές εντός του ποταμού, όπως η ουρά, η μύτη και οι παράκτιες περιοχές. Αυτή η μέθοδος παρέχει μια ευρεία, γενικευμένη άποψη της κατανομής των ιζημάτων και της θολότητας, εντοπίζοντας μακροπρόθεσμα πρότυπα στην καθίζηση. Επιπλέον, η 1^η Προσέγγιση, που χρησιμοποιεί το t – SNE για να απεικονίσει τα συμπλέγματα των τιμών του SI, καθιστά ευκολότερη την απεικόνιση και την κατανόηση των χωρικών σχέσεων και των μοτίβων καθίζησης εντός του ποταμού. Με αυτόν τον τρόπο, ενισχύει την ερμηνεία του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές περιοχές σχετίζονται μεταξύ τους όσον αφορά τα επίπεδα ιζήματος και θολότητας.

Αντίθετα, η 2^η Προσέγγιση παρέχει μια δυναμική χρονική ανάλυση, δείχνοντας πώς οι τιμές του SI κυμαίνονται με την πάροδο του χρόνου και σε διαφορετικές περιοχές του ποταμού. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει μια πιο λεπτομερή άποψη, αντανakλώντας στις βραχυπρόθεσμες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και στις εποχιακές αλλαγές στα επίπεδα ιζημάτων και θολότητας. Επιπλέον, παρακολουθεί τις αλλαγές της τιμής του SI σε συγκεκριμένες ημερομηνίες, προσφέροντας ένα χρονοδιάγραμμα για το πώς εξελίσσονται τα πρότυπα καθίζησης, το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την κατανόηση των άμεσων επιπτώσεων περιβαλλοντικών παραγόντων.

Από την μια πλευρά, η 1^η Προσέγγιση, με τη χρήση του t-SNE, παρέχει μια σαφή απεικόνιση των προτύπων καθίζησης, τονίζοντας περιοχές με τα σταθερά επίπεδα ιζήματος και θολότητας. Από την άλλη πλευρά, η χρονική εστίαση της 2^{ης} Προσέγγισης επιτρέπει μια πιο λεπτομερή κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα επίπεδα ιζηματοποίησης κυμαίνονται με την πάροδο του χρόνου, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της δυναμικής των ιζημάτων του ποταμού και των παραγόντων που επηρεάζουν αυτές τις αλλαγές.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Περαιτέρω Σχολιασμοί

6.1 Περίληψη των Ερευνητικών Στόχων

Ο πρωταρχικός στόχος της μελέτης ήταν να ανιχνεύσει, να εντοπίσει και να τεκμηριώσει διακυμάνσεις στη σύνθεση των ουσιών εντός των υδάτινων περιοχών του Σπερχειού Ποταμού σε διάστημα τριών μηνών. Συγκεκριμένα, η έρευνα είχε ως στόχο να αναλύσει τις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α και των ιζημάτων ως δείκτες της ποιότητας του νερού, ενώ προσπάθησε να εντοπίσει χωρικά και χρονικά μοτίβα στα επίπεδα αυτών των δυο μεταβλητών, παρέχοντας πληροφορίες για τους περιβαλλοντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη διαύγεια του νερού και τη μεταφορά ιζημάτων στον ποταμό. Στόχος της μελέτης ήταν να συμβάλει στην ολοκληρωμένη κατανόηση της υγείας των οικοσυστημάτων και να υποστηρίξει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτων του Σπερχειού.

6.2 Ερμηνεία Αποτελεσμάτων

Η ανάλυση των χρονικών διακυμάνσεων στις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α και των ιζημάτων στον Σπερχειό Ποταμό παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη δυναμική της ποιότητας του νερού του. Αρχικά, χρησιμοποιώντας το t – SNE και το HDBSCAN για την ταξινόμηση, έγινε κατηγοριοποίηση των τριών ομάδων στον ποταμό με βάση τις τιμές του δείκτη χλωροφύλλης κανονικοποιημένης διαφοράς (NDCI) και τον Δείκτη Ιζημάτων (SI): (1) Χαμηλότερες Τιμές (Κατηγορία 1, Πορτοκαλί), (2) Μεσαίες Τιμές (Κατηγορία 2, Πράσινο) και (3) Υψηλότερες Τιμές (Κατηγορία 3, Κόκκινο).

NDCI

- **T – SNE & HDBSCAN: Ομοιότητες σε πολλαπλά χρονικά σημεία ~> Περιγραφή συγκεντρώσεων χλωροφύλλης – α που διατηρούνται σε όλη την χρονοσειρά**

Η 1^η **Κατηγορία**, που αντιπροσωπεύεται από τις χαμηλότερες τιμές του NDCI, εντοπίστηκε κυρίως στο μεσαίο και στο κεντρικό τμήμα του ποταμού, με μικρότερες εμφανίσεις τις νοτιοδυτικές και βορειοανατολικές περιοχές. Αυτές οι περιοχές συνήθως υποδεικνύουν συνθήκες καθαρού νερού με ελάχιστη δραστηριότητα φυτοπλαγκτού, υποδηλώνοντας χαμηλότερα επίπεδα θρεπτικών συστατικών ή περιβαλλοντικές συνθήκες λιγότερο ευνοϊκές για την ανάπτυξη φυτοπλαγκτού.

Η 2^η **Κατηγορία**, που χαρακτηρίζεται από τις μεσαίες τιμές του NDCI, εμφάνισε συγκεντρώσεις κυρίως στα άκρα της Περιοχής Μελέτης, ιδιαίτερα στα νοτιοδυτικά και στα βορειοανατολικά τμήματα του ποταμού. Επιπλέον, μεσαίες τιμές NDCI παρατηρήθηκαν και κατά μήκος του κύριου σώματος του ποταμού, υποδεικνύοντας μέτρια δραστηριότητα φυτοπλαγκτού. Αυτό το πρότυπο δείχνει τη μεταβλητή παρουσία των θρεπτικών ουσιών ή των περιβαλλοντικών συνθηκών που επηρεάζουν την παραγωγή χλωροφύλλης – α σε αυτές τις περιοχές.

Η 3^η **Κατηγορία**, που περιλαμβάνει υψηλότερες τιμές του NDCI, περιορίζεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή εντός του ποταμού. Αυτή η συνθήκη, που περιβάλλεται από περιοχές με χαμηλότερες τιμές NDCI, υποδηλώνει τοπικές συνθήκες που ευνοούν την υψηλή ανάπτυξη φυτοπλαγκτού, πιθανώς λόγω εισροής θρεπτικών ουσιών ή ειδικών περιβαλλοντικών παραγόντων που υποστηρίζουν την παραγωγή χλωροφύλλης – α.

- **HDBSCAN: Παράβλεψη μοτίβων με την πάροδο του χρόνου ~> Περιγραφή συστάδων χλωροφύλλης – α σε μεμονωμένα στιγμιότυπα**

Οι χρονικές διακυμάνσεις στις τιμές του NDCI κατά την Περίοδο Μελέτης αποκάλυψαν διακριτές εξάρσεις (peaks) και τάσεις. Αναλυτικότερα, σποραδικά παρατηρήθηκαν peaks στις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α, υποδεικνύοντας στιγμιαίες στιγμές αυξημένης εισροής θρεπτικών συστατικών ή ευνοϊκές συνθήκες ανάπτυξης του φυτοπλαγκτόν. Για παράδειγμα, μια σημαντική χρονική στιγμή σε υψηλές τιμές του NDCI ήταν στις 17 Μαρτίου 2021, η οποία έδειξε μια εκτεταμένη εμφάνιση φυτοπλαγκτού σε μεγάλο μέρος του ποταμού, εξαιρουμένου του νοτιοδυτικού τμήματος. Αντίθετα, τα κατώτατα όρια στις τιμές του NDCI αντιστοιχούσαν σε περιόδους χαμηλών συγκεντρώσεων χλωροφύλλης – α, χαρακτηρίζοντας το ως το καθαρότερο νερό με μειωμένη δραστηριότητα φυτοπλαγκτού. Αυτές οι περιοχές παρατηρήθηκαν σταθερά στα μεσαία τμήματα του ποταμού, ιδιαίτερα γύρω στις αρχές της χρονοσειράς (23 Δεκεμβρίου 2020), δείχνοντας συνθήκες με χαμηλότερη παρουσία θρεπτικών συστατικών ή λιγότερο ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη φυτοπλαγκτού.

Οι διακυμάνσεις στις συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α τόνισαν τη δυναμική φύση του οικοσυστήματος του ποταμού. Αναλυτικότερα, οι αρχικές χαμηλές συγκεντρώσεις τον Δεκέμβριο του 2020 υποδηλώνουν καλή διαύγεια του νερού, πιθανώς λόγω μειωμένων εισροών θρεπτικών συστατικών, ενώ οι επακόλουθες αυξήσεις στις μεσαίες τιμές του NDCI από τον Φεβρουάριο του 2021 και μετά, έδειξαν σταδιακή αύξηση στις δραστηριότητας της χλωροφύλλης – α, με αξιοσημείωτα peaks σε υψηλές τιμές του NDCI έως τα μέσα του Μαρτίου του 2021, υποδηλώνοντας μια σημαντική άνθηση φυτοπλαγκτού σε συγκεκριμένες περιοχές

του ποταμού. Μέχρι το τέλος του Μαρτίου του 2021, η κατανομή των τιμών του NDCI είχε αλλάξει ξανά, παρουσιάζοντας αλλαγές στην ύπαρξη των θρεπτικών ουσιών ή στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

SI

- **T – SNE & HDBSCAN: Ομοιότητες σε πολλαπλά χρονικά σημεία ~> Περιγραφή συγκεντρώσεων ιζημάτων που διατηρούνται σε όλη την χρονοσειρά**

Η **1^η Κατηγορία**, που χαρακτηρίζεται από τις χαμηλότερες τιμές του SI, κατανεμήθηκε στα μεσαία, κεντρικά και βορειοανατολικά τμήματα του ποταμού, δηλαδή στις περιοχές με τη χαμηλότερη ένταση καθίζησης σε σύγκριση με τις άλλες κατηγορίες.

Η **2^η Κατηγορία**, που αντιπροσωπεύεται από τις μεσαίες τιμές του SI, συγκεντρώθηκε κυρίως στο δυτικότερο τμήμα του ποταμού (μύτη). Αυτή η παρουσία υποδηλώνει μια μέτρια ένταση καθίζησης ειδικά σε αυτήν την περιοχή, διαφορετική από άλλα μέρη της περιοχής μελέτης όπου δεν παρατηρήθηκε καθόλου η 2^η Κατηγορία. Η παρουσία της υποδηλώνει περιοχές με μέτριους ρυθμούς καθίζησης που επηρεάζονται από τοπικές συνθήκες ή πηγές ιζήματος.

Η **3^η Κατηγορία**, που υποδηλώνεται με υψηλότερες τιμές του SI, είχε τη μικρότερη χωρική κάλυψη εντός της Περιοχής Μελέτης, με τα κόκκινα εικονοστοιχεία να περιορίζονται στις άκρες του ποταμού στο κεντρικό σώμα. Αυτή η εμφάνιση δείχνει τις περιοχές με την υψηλότερη ένταση καθίζησης σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες, που δυνητικά επηρεάζονται από συγκεντρωμένες εισροές ιζημάτων ή συγκεκριμένη υδρολογική δυναμική.

- **HDBSCAN: Παράβλεψη μοτίβων με την πάροδο του χρόνου ~> Περιγραφή συστάδων ιζημάτων σε μεμονωμένα στιγμιότυπα**


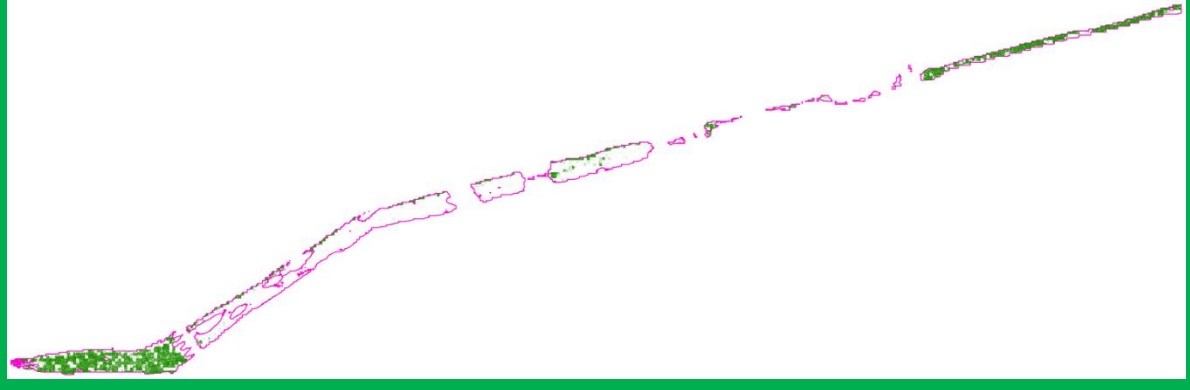
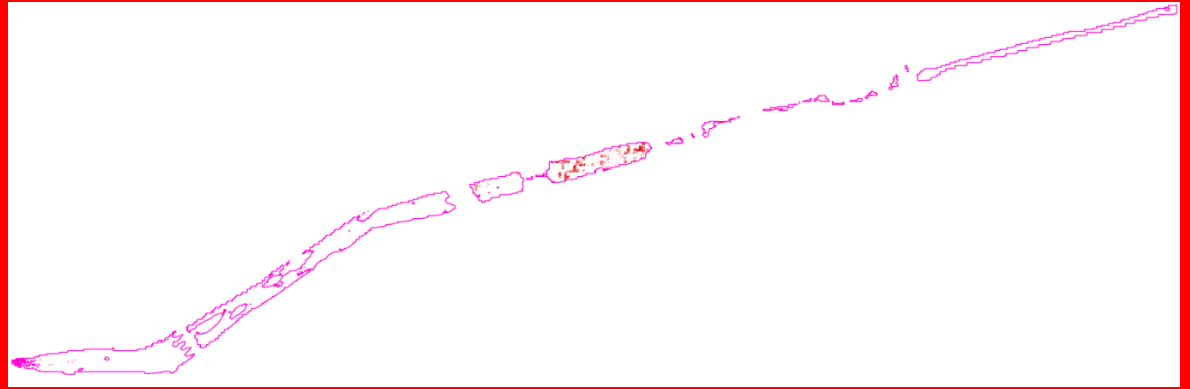
Οι χρονικές διακυμάνσεις στις τιμές του δείκτη ιζημάτων (SI) στον Σπερχειό Ποταμό από τον Δεκέμβριο του 2020 έως τον Μάρτιο του 2021 αποκάλυψαν κυμαινόμενα μοτίβα ενδεικτικά στις μεταβαλλόμενη δυναμική της ιζηματοποίησης. Αρχικά, η 1^η Κατηγορία του SI, που δείχνει τη χαμηλότερη ένταση καθίζησης, κυριαρχούσε στο κύριο σώμα και στην ουρά του ποταμού, με αξιοσημείωτες αυξήσεις που παρατηρήθηκαν στα τέλη του Δεκεμβρίου, ιδιαίτερα στα νότια παράκτια τμήματα. Τον Ιανουάριο και τον Φεβρουάριο του 2021, οι τιμές SI παρουσίασαν διακυμάνσεις, παρουσιάζοντας μέτρια έως ισχυρή παρουσία σε διάφορα τμήματα του Ποταμού, συμπεριλαμβανομένης της «ουράς» και των κεντρικών περιοχών, αντανακλώντας δυναμικές διαδικασίες μεταφοράς και εναπόθεσης ιζημάτων που επηρεάζονται

από περιβαλλοντικούς παράγοντες. Μέχρι τα μέσα του Φεβρουαρίου 2021, οι τιμές του SI παρουσίαζαν ευρύτερη κατανομή στη «μύτη», την ουρά και στις κεντρικές περιοχές, υποδηλώνοντας έντονες δραστηριότητες καθίζησης. Αυτή η τάση συνεχίζεται και τον Μάρτιο του 2021, χαρακτηριζόμενη από σημαντικές διακυμάνσεις στις τιμές του SI, πιθανώς λόγω των αλλαγών των μοτίβων των ιζημάτων ή των διακυμάνσεων στη δυναμική ροής του νερού. Η διατήρηση των τιμών SI της 1^{ης} Κατηγορίας μέχρι τα μέσα Μαρτίου δείχνει συνεχείς διεργασίες καθίζησης, ακολουθούμενη από μείωση στα τέλη του Μαρτίου, η οποία είναι ιδιαίτερα αισθητή στις 24 Μαρτίου, πιθανώς υποδηλώνοντας μειωμένη εισροή ιζημάτων ή αλλοιωμένες περιβαλλοντικές συνθήκες που επηρεάζουν τη δυναμική των ιζημάτων.

Επομένως, το συγκεντρωτικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από όλα τα παραπάνω είναι:

6.2.1 Χλωροφύλλη – α

Πίνακας 29: Στατικές Συγκεντρώσεις Χλωροφύλλη – α σε όλη την χρονοσειρά


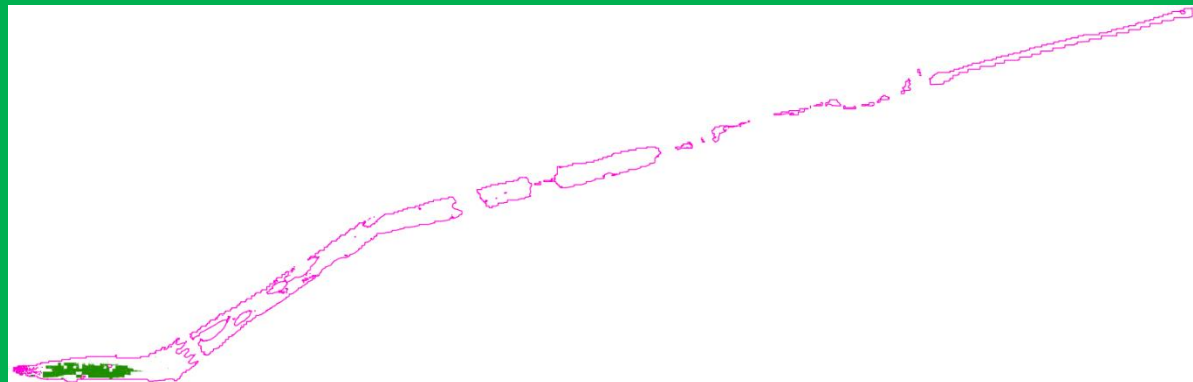
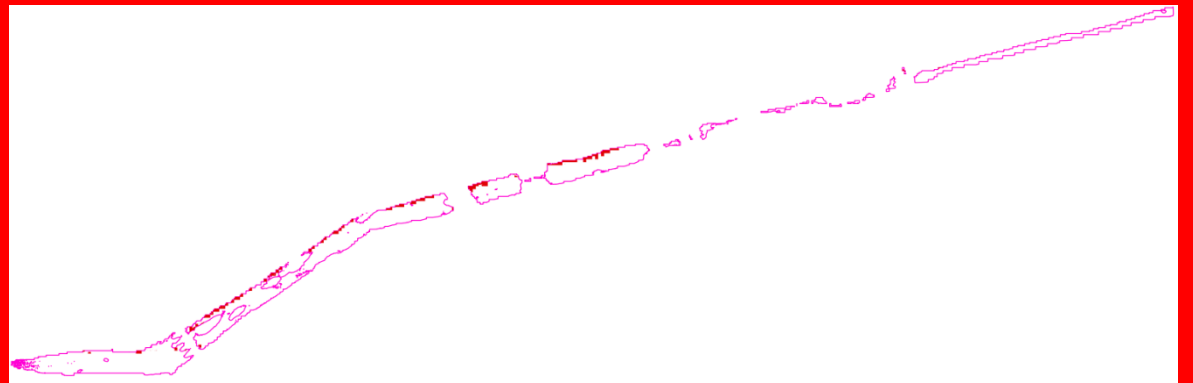
Περιοχές που διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους σε όλη την χρονοσειρά	Ερμηνεία
	Οι μικρότερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α. Τα πιο καθαρά νερά σε όλη την χρονοσειρά.
	Οι μεσαίες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α. Τα μετρίως καθαρά νερά σε όλη την χρονοσειρά.
	Οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις χλωροφύλλης – α. Τα λιγότερο καθαρά νερά σε όλη την χρονοσειρά.

Πίνακας 30: Δυναμικές Συγκεντρώσεις Χλωροφύλλη – α σε κάθε ημερομηνία

Ημερομηνία	Μικρότερες Συγκεντρώσεις Chlorophyll a: Πιο καθαρά νερά (≤ 0.0990)	Μεσαίες Συγκεντρώσεις Chlorophyll a: Μετρίως καθαρά νερά $0.0990 < \text{τιμή} \leq 0.1390$	Μεγαλύτερες Συγκεντρώσεις Chlorophyll a: Λιγότερο Καθαρά νερά (> 0.1390)
23 Δεκεμβρίου 2020	Κεντρικό Τμήμα	Παντού	Παντού
24 Δεκεμβρίου 2020	-	ΝΔ	Παράκτιες Περιοχές ΚΤ
28 Δεκεμβρίου 2020	Παντού	-	Κεντρικό Τμήμα και ΒΑ
28 Ιανουαρίου 2021	-	Παντού	Έλλειψη
12 Φεβρουαρίου 2021	Παντού	Παντού	Έλλειψη
17 Φεβρουαρίου 2021	Παντού	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	Παράκτιες Περιοχές ΚΤ και ΒΑ
18 Φεβρουαρίου 2021	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	Παντού	-
22 Φεβρουαρίου 2021	-	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	Παράκτιες Περιοχές ΚΤ και ΒΑ
23 Φεβρουαρίου 2021	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	Παντού	Παράκτιες Περιοχές ΚΤ και ΒΑ
27 Φεβρουαρίου 2021	-	Έλλειψη	Παράκτιες Περιοχές ΚΤ και ΒΑ
4 Μαρτίου 2021	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ
13 Μαρτίου 2021	Κεντρικό Τμήμα	Παντού	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ
17 Μαρτίου 2021	ΝΔ και ΒΑ	Παντού	Κεντρικό Τμήμα και ΒΑ
24 Μαρτίου 2021	Παντού	Παντού	-
29 Μαρτίου 2021	-	ΝΔ	ΝΔ
30 Μαρτίου 2021	Κεντρικό Τμήμα και ΒΑ	Κεντρικό Τμήμα και ΒΑ	-

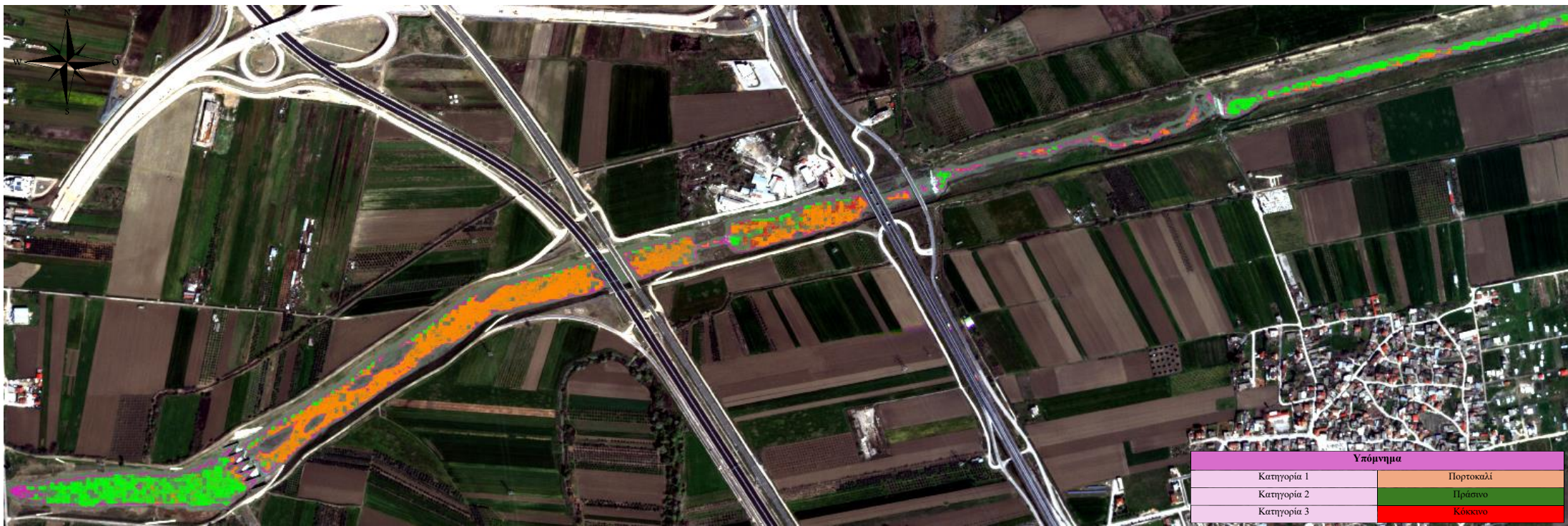
6.2.2 Ιζηµατα

Πίνακας 31: Στατικές Συγκεντρώσεις Ιζηµάτων σε όλη την χρονοσειρά

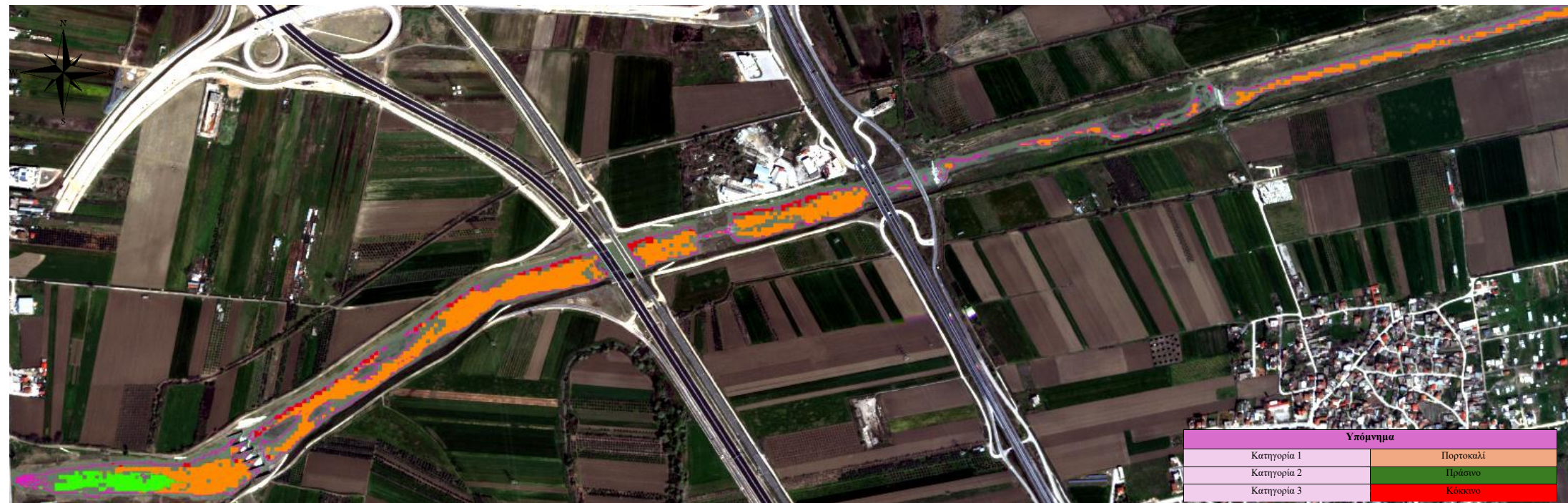
Περιοχές που διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους σε όλη την χρονοσειρά	Ερµηνεία
	Οι µικρότερες συγκεντρώσεις ιζηµάτων. Τα πιο καθαρά νερά σε όλη την χρονοσειρά.
	Οι µεσαίες συγκεντρώσεις ιζηµάτων. Τα µετρίως καθαρά νερά σε όλη την χρονοσειρά.
	Οι µεγαλύτερες συγκεντρώσεις ιζηµάτων. Τα λιγότερο καθαρά νερά σε όλη την χρονοσειρά.

Πίνακας 32: Δυναμικές Συγκεντρώσεις Ιζημάτων σε κάθε ημερομηνία

Ημερομηνία	Μικρότερες Συγκεντρώσεις Ιζημάτων: Πιο καθαρά νερά (≤ -0.0227)	Μεσαίες Συγκεντρώσεις Ιζημάτων: Μετρίως καθαρά νερά $0.0990 < \text{τιμή} \leq 0.1390$	Μεγαλύτερες Συγκεντρώσεις Ιζημάτων: Λιγότερο Καθαρά νερά (> 0.1390)
23 Δεκεμβρίου 2020	Κεντρικό Τμήμα και ΒΑ	Παντού	Κεντρικό Τμήμα, ΝΔ
24 Δεκεμβρίου 2020	Κεντρικό Τμήμα και ΒΑ	Κεντρικό Τμήμα	Κεντρικό Τμήμα
28 Δεκεμβρίου 2020	Παράκτιες Περιοχές ΚΤ	Παντού	Παράκτιες Περιοχές και ΒΑ
28 Ιανουαρίου 2021	Κεντρικό Τμήμα	Παντού	Έλλειψη
12 Φεβρουαρίου 2021	-	Παντού	Παράκτιες Περιοχές και ΒΑ
17 Φεβρουαρίου 2021	ΒΑ	Παντού	Παράκτιες Περιοχές και ΒΑ
18 Φεβρουαρίου 2021	ΝΔ και ΒΑ	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	Κεντρικό Τμήμα
22 Φεβρουαρίου 2021	-	Παντού	Κεντρικό Τμήμα, Παράκτιες Περιοχές και ΒΑ
23 Φεβρουαρίου 2021	ΝΔ και ΒΑ	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	Κεντρικό Τμήμα, Παράκτιες Περιοχές και ΒΑ
27 Φεβρουαρίου 2021	ΝΔ και ΒΑ	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	Κεντρικό Τμήμα, Παράκτιες Περιοχές και ΒΑ
4 Μαρτίου 2021	ΝΔ και ΒΑ	-	Κεντρικό Τμήμα, Παράκτιες Περιοχές και ΒΑ
13 Μαρτίου 2021	Κεντρικό Τμήμα	Παντού	-
17 Μαρτίου 2021	Παντού	Κεντρικό Τμήμα	-
24 Μαρτίου 2021	Παντού	Παντού	ΝΔ και ΒΑ
29 Μαρτίου 2021	Κεντρικό Τμήμα και ΒΑ	Κεντρικό Τμήμα	ΝΔ
30 Μαρτίου 2021	Κεντρικό Τμήμα και ΒΑ	Κεντρικό Τμήμα και ΝΔ	-



Εικόνα 141: Ομοιότητες στις συγκεντρώσεις Χλωροφύλλης - α στην χρονοσειρά



Εικόνα 132: Ομοιότητες στις συγκεντρώσεις Ιζημάτων στην χρονοσειρά

6.3 Σύγκριση Προσεγγίσεων

Ο συνδυασμός του t – SNE και του HDBSCAN της 1^{ης} Προσέγγισης ήταν επιτυχής στον εντοπισμό των συστάδων (ή των ομοιοτήτων) της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης – α και των ιζημάτων σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές του Σπερχειού, για όλη την χρονοσειρά.

Από την μια, το πλεονέκτημα της 1^{ης} Προσέγγισης είναι η ολοκληρωμένη εικόνα της ποιότητας του νερού και της καθίζησης σε όλη τη λεκάνη απορροής του ποταμού. Αναλυτικότερα, επιτρέπει την ανακάλυψη επαναλαμβανόμενων τάσεων και γεωγραφικών ομαδοποιήσεων που μπορεί να υποδεικνύουν εστίες ρύπανσης. Ωστόσο, η 1^η Προσέγγιση απαιτεί προσεκτική ρύθμιση παραμέτρων τόσο για το t-SNE, όσο και για το HDBSCAN (π.χ. ελάχιστο μέγεθος συμπλέγματος), το οποίο μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα και την ερμηνεία της ομαδοποίησης. Επιπλέον, η επεξεργασία μεγάλων συνόλων δεδομένων δορυφορικών εικόνων για το t-SNE και η επακόλουθη ομαδοποίηση με HDBSCAN απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους.

Από την άλλη, η ανάπτυξη του HDBSCAN στη 2^η Προσέγγιση είναι ανεξάρτητη σε κάθε δορυφορική εικόνα βελτιώνοντας έτσι την ευαισθησία στις αλλαγές στη συγκέντρωση της χλωροφύλλης - α και των ιζημάτων με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η μέθοδος μπορεί να καταγράψει με επιτυχία την εποχιακή δυναμική και τις βραχυπρόθεσμες αλλαγές στους δείκτες ποιότητας του νερού, εστιάζοντας σε συγκεκριμένα χρονικά σημεία. Ωστόσο, η εφαρμογή του HDBSCAN σε μεμονωμένες εικόνες μπορεί να καταστήσει δύσκολη τη διατήρηση της συνέπειας μεταξύ των συνόλων δεδομένων.

6.4 Προτερήματα και Αδυναμίες της Μεθοδολογίας

Προτερήματα

Η μελέτη χρησιμοποίησε μεθοδολογίες για την ανάλυση των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης – α και της καθίζησης στον Σπερχειό, συμβάλλοντας σε νέες γνώσεις που αφορούν την παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και τη περιβαλλοντική διαχείριση. Αρχικά, οι τεχνικές προ - επεξεργασίας εξασφάλισαν την καλύτερη δυνατή ποιότητα και αξιοπιστία των δεδομένων που προέρχονται από δορυφόρους (SkySat και Sentinel – 2) που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση. Αυτό περιλάμβανε τη Ραδιομετρική Αναγωγή, τη διόρθωση των Ατμοσφαιρικών επιδράσεων και την ευθυγράμμιση εικόνων στο χώρο για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και των ασυνεπειών στις μετρήσεις της χλωροφύλλης – α και των ιζημάτων. Μειώνοντας σύνθετα σύνολα δεδομένων σε πιο διαχειρίσιμες διαστάσεις, το t – SNE διευκόλυνε τον εντοπισμό διακριτών συστάδων και προτύπων στη δυναμική καθίζησης σε όλη τη λεκάνη απορροής του ποταμού, για όλη την χρονοσειρά. Αυτό επέτρεψε μια πιο διαισθητική

ερμηνεία των χωρικών σχέσεων και της μεταβλητότητας στις παραμέτρους της ποιότητας του νερού. Επιπλέον, το HDBSCAN επέτρεψε την ισχυρή ομαδοποίηση των τιμών του NDCI και του SI, κατηγοριοποιώντας τες σε σημαντικές ομάδες με βάση τη χωρική τους πυκνότητα. Σε αντίθεση με άλλους αλγόριθμους ομαδοποίησης, το HDBSCAN εντόπισε συστάδες διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών, που φιλοξενούν τόσο αραιές όσο και πυκνές κατανομές του NDCI και του SI σε διαφορετικά τμήματα ποταμών. Τέλος, η μελέτη ενσωμάτωσε τη χρονική ανάλυση για να εξετάσει τις ημερήσιες και τις εβδομαδιαίες διακυμάνσεις στα επίπεδα χλωροφύλλης – α, παρέχοντας πληροφορίες για τις βραχυπρόθεσμες περιβαλλοντικές αντιδράσεις και τις εποχιακές τάσεις.

Αδυναμίες

Παρά αυτά τα δυνατά σημεία, η ακρίβεια των μετρήσεων της χλωροφύλλης – α και των ιζημάτων επηρεάζεται από περιβαλλοντικές μεταβλητές, οι οποίες θα μπορούσαν να εισαγάγουν αβεβαιότητες στα δεδομένα που προέρχονται από δορυφόρους, επηρεάζοντας την αξιοπιστία των ευρημάτων. Ακόμα, το t – SNE υποθέτει ότι τα υποκείμενα δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν σε χώρο χαμηλότερης διάστασης διατηρώντας παράλληλα τις τοπικές σχέσεις. Ωστόσο, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων του t – SNE απαιτεί προσεκτική εξέταση των παραμέτρων και μπορεί να είναι ευαίσθητη στην επιλογή των μετρήσεων απόστασης ή των τιμών της αμηχανίας, επηρεάζοντας τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης. Παράλληλα, ενώ το HDBSCAN είναι αποτελεσματικό στον εντοπισμό συστάδων διαφορετικών πυκνοτήτων, η ερμηνεία της σημασίας κάθε συστάδας απαιτεί γνώση των τοπικών περιβαλλοντικών συνθηκών και των υδρολογικών διεργασιών. Εσφαλμένες ερμηνείες των αποτελεσμάτων της ομαδοποίησης θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα σχετικά με τα πρότυπα καθίζησης και τη δυναμική της ποιότητας του νερού.

Επιπρόσθετα, δεν υπάρχουν καθόλου δείγματα από τον ποταμό, επομένως τίποτα από όσα έχουν ειπωθεί από την έρευνα δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί. Η έλλειψη επιτόπιων δειγμάτων συνεπάγεται ότι τα δεδομένα που βασίζονται αποκλειστικά σε δορυφορικές παρατηρήσεις δεν μπορούν να επικυρωθούν με πραγματικές μετρήσεις πεδίου, κάτι που θέτει υπό αμφισβήτηση την ακρίβεια των ευρημάτων. Ως αποτέλεσμα, δεν μπορεί να δημιουργηθεί Πίνακας Σφαλμάτων (error matrix), δηλαδή ένας πίνακας που να καταδεικνύει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των προβλέψεων του μοντέλου σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα. Χωρίς αυτό το κρίσιμο εργαλείο επικύρωσης, τα αποτελέσματα της μελέτης δεν μπορούν να θεωρηθούν τελειώς αξιόπιστα, καθώς δεν υπάρχει μέτρο για να αξιολογηθεί η ακρίβεια των δορυφορικών εκτιμήσεων σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες στον ποταμό.

6.5 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Στο μέλλον, καλό θα ήταν να γίνει διερεύνηση στις βέλτιστες ρυθμίσεις των παραμέτρων για το $t - SNE$, όπως για παράδειγμα η προσαρμογή της αμηχανίας και του ρυθμού εκμάθησης, για τη βελτίωση της απεικόνισης πολύπλοκων χωρικών σχέσεων. Η ακριβής ρύθμιση αυτών των παραμέτρων μπορεί να βελτιώσει τη σαφήνεια και την ερμηνευτικότητα του $t - SNE$, διευκολύνοντας την ακριβέστερη ομαδοποίηση και την αναγνώριση προτύπων. Ακόμα, η διερεύνηση εναλλακτικών αλγορίθμων ομαδοποίησης πέρα από το HDBSCAN θα μπορούσε να προσφέρει συμπληρωματικές πληροφορίες για τα μοτίβα καθίζησης. Αλγόριθμοι όπως το μοντέλο DBSCAN ή το Gaussian Mixture Models (GMMs) μπορούν να συλλάβουν διαφορετικές πτυχές της χωρικής πυκνότητας και της μεταβλητότητας, παρέχοντας ισχυρές συγκρίσεις και επικύρωση των αποτελεσμάτων ομαδοποίησης. Επιπλέον, η ενσωμάτωση τεχνικών μηχανικής μάθησης (machine learning), όπως μοντέλα εποπτευόμενης ταξινόμησης ή παλινδρόμησης, παράλληλα με τις προσεγγίσεις ομαδοποίησης μπορεί να βελτιώσουν τις προγνωστικές ικανότητες, ενώ οι μέθοδοι deep learning θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν πολυφασματικά δορυφορικά δεδομένα και περιβαλλοντικές μεταβλητές για να προβλέψουν τις συγκεντρώσεις με μεγαλύτερη ακρίβεια και χωρική ανάλυση. Αυτές οι τεχνικές μπορούν να συλλάβουν μη γραμμικές σχέσεις εντός των συνόλων των περιβαλλοντικών δεδομένων που προέρχονται από δορυφόρους.

Σημαντικό είναι να μην παραληφθούν και οι υδρολογικοί παράμετροι. Αναλυτικότερα, η συμπερίληψη μεταβλητών όπως οι ρυθμοί ροής των ποταμών, η θερμοκρασία του νερού και τα επίπεδα των θρεπτικών συστατικών μπορεί να εμπλουτίσουν την κατανόηση της δυναμικής της ποιότητας του νερού, καθώς αυτές οι μεταβλητές επηρεάζουν τις διαδικασίες παραγωγής και καθίζησης της χλωροφύλλης – α αλλά και των ιζημάτων. Επιπλέον, η μεγαλύτερη ενσωμάτωση των μετεωρολογικών δεδομένων, όπως τα πρότυπα βροχόπτωσης, η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία, μπορεί να βελτιώσει την κατανόηση των εποχιακών διακυμάνσεων στις συγκεντρώσεις, καθώς τα μακροπρόθεσμα μετεωρολογικά σύνολα δεδομένων μπορούν να προσδιορίσουν τις κλιματικές τάσεις που επηρεάζουν την υδρολογία των ποταμών και τον κύκλο των θρεπτικών συστατικών.

Τέλος, είναι αναγκαίο να συλλεχθούν και επιτόπια δείγματα από τον ποταμό. Έτσι, η συλλογή αυτών των δειγμάτων θα επιτρέψει τη δημιουργία ενός πίνακα σφαλμάτων (error matrix). Συνεπώς, είναι απαραίτητο να συλλεχθούν επιτόπια δείγματα από τον ποταμό ώστε να επικυρωθούν τα δορυφορικά δεδομένα και να διασφαλιστεί η ακρίβεια και αξιοπιστία των ευρημάτων της μελέτης.

6.5 Τελευταίες Σκέψεις και Παρατηρήσεις

Κατά την διάρκεια της μελέτης, αποκτήθηκαν πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ περιβαλλοντικών μεταβλητών και τις επιπτώσεις τους στη δυναμική του οικοσυστήματος. Η διαδικασία συλλογής, επεξεργασίας και ανάλυσης δεδομένων δορυφορικών εικόνων απαιτούσε προσοχή στη λεπτομέρεια, η οποία ήταν απόρροια προηγούμενων χρονοβόρων ερευνών, εκτός των ορίων της παρούσας μελέτης. Ως αποτέλεσμα, τα ευρήματα υπογράμμισαν τη σημασία της εξέτασης τόσο των χωρικών όσο και των χρονικών διαστάσεων στην παρακολούθηση της ποιότητας των υδάτων.

Παρά τις προκλήσεις όπως η διαθεσιμότητα δεδομένων και η πολυπλοκότητα της επεξεργασίας (t-SNE και HDBSCAN), η παρούσα εργασία υπογράμμισε τη σημασία της μεθοδολογίας, της συνεργασίας και της καινοτομίας για την προώθηση της περιβαλλοντικής έρευνας. Ενσωματώνοντας την τεχνολογία με την οικολογία, είναι δυνατό να προωθηθούν οικοσυστήματα που υποστηρίζουν τη βιοποικιλότητα, την ανθρώπινη ευημερία, αλλά και τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης. Οι γνώσεις και η μεθοδολογία που προκύπτουν από αυτήν την έρευνα τονίζουν τη σημασία της υιοθέτησης ολοκληρωμένων προσεγγίσεων που αξιοποιούν τις τεχνολογικές εξελίξεις για την αποτελεσματική παρακολούθηση και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος.

Βιβλιογραφία

- [1] [Bonnie Parr, “The Importance of Environmental Monitoring”, Abraham Lincoln Presidential Library and Museum](#)
- [2] [Economic Commission for Europe, “Environmental Monitoring and Reporting”, United Nations](#)
- [3] [“Satellite Images for Environmental Monitoring”, Satellite Imaging Corporation](#)
- [4] [Σοφία Παυλάκη, “Σπερχειός, ένα αρχαίο ποτάμι φορτωμένο ιστορία” \(2020\)](#)
- [5] [“About SkySat”, ESA](#)
- [6] [“Applications of Sentinel – 2”, ESA](#)
- [7] [Σοφία Πεγλιβανίδου, “ Ιζηματολογικά και φυσικογεωγραφικά μοντέλα ανάπτυξης ολοκαινικών δελταϊκών ακολουθιών στην κοιλάδα του Σπερχειού ποταμού” \(2012\)](#)
- [8] [“ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΧΗΜΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΡΔΕΥΤΙΚΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΕ ΚΛΙΜΑΚΑ ΔΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ” \(2020\), Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων](#)
- [9] [International Photography Hall of Fame and Museum](#)
- [10] [Michelle Cadoree Bradley, “Science Research Specialist, Science, Technology & Business Division” \(2019\)](#)
- [11] [Hohn R. Jensen, “Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος” \(2007\)](#)
- [12] [Kateryna Sergieieva, “Types Of Satellites: Different Orbits & Real-World Uses”](#)
- [13] [Mir Muhammad Nizamani, Qian Zhang, Ghulam Muhae ud Din, Muhammad Awais, “Application of GIS and Remote-Sensing Technology in Ecosystem Services and Biodiversity Conservation”, Deep Learning for Multimedia Processing Applications \(pp.284-321\) \(2023\)](#)
- [14] [What Is Satellite Remote Sensing and Its Applications?, \[www.satpalda.co\]\(http://www.satpalda.co\)](#)
- [15] [Rahul Awati, Geostationary Satellite, \[www.techtarget.com\]\(http://www.techtarget.com\)](#)
- [16] [NOAA WEATHER, \[www.noaa.gov\]\(http://www.noaa.gov\)](#)
- [17] [Polar Operational Environmental Satellites \(POES\) Overview, \[www.noaasis.noaa.gov\]\(http://www.noaasis.noaa.gov\)](#)
- [18] [POES: A Legacy of Earth Science Satellites, \[www.nasa.gov\]\(http://www.nasa.gov\)](#)
- [19] [SSO: Sun – Synchronous Orbit, \[www.spire.com\]\(http://www.spire.com\)](#)
- [20] [Microsatellites, \[www.gaussteam.com\]\(http://www.gaussteam.com\)](#)

- [21] [Technology CubeSats, www.esa.int](http://www.esa.int)
- [22] [Get to know SAR, www.nisar.jpl.nasa.gov](http://www.nisar.jpl.nasa.gov)
- [23] [Gerald K. Moore, “Satellite remote sensing of water turbidity”, Hydrological Sciences Journal \(2009\)](#)
- [24] [Dong Wang, Bo – Hui Tang, Zhitao Fu, Liang Huang, Menghua Li, Guokun Chen, Xuejun Pan, “Estimation of Chlorophyll-A Concentration with Remotely Sensed Data for the Nine Plateau Lakes in Yunnan Province”, Remote Sensing of Coastal Waters, Land Use/Cover, Lakes, Rivers and Watersheds II \(2022\)](#)
- [25] [M. Shafaie, H. Ghodosi, Kasra Mostofi, “RIVER SEDIMENT MONITORING USING REMOTE SENSING AND GIS”, The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL \(2015\)](#)
- [26] [Dr. Zhe Zue, Dr. Wenping Yuan, Dr. Chengbin Deng, Remote Sensing Time Series Analysis”, Journal of Remote Sensing, www.spj.science.org](#)
- [27] [Dr. Wei Yang, Dr. Xuehong Chen, Dr. Cong Wang, Dr. Ruyin Cao, “Time Series Analysis in Remote Sensing: Algorithm Development and Applications” \(2021\)](#)
- [28] [Zhe Zhu, “Change detection using landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications”, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 130 \(2017\)](#)
- [29] [Χ. Φειδίας, Τ. Μακρογιάννης, Ε. Μπόρα – Σέντα, “Trend analysis of air temperature time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955-2001”, Theoretical and Applied Climatology 79 \(2004\)](#)
- [30] [Jinling Quan, Wenfeng Zhan και Yunhao Chen, “Time series decomposition of remotely sensed land surface temperature and investigation of trends and seasonal variations in surface urban heat islands”, Journal of Geophysical Research Atmospheres 121 \(2016\)](#)
- [31] [Gordana Jakovljevic, Flor Álvarez-Taboada, Miro Govedarica, “Long-Term Monitoring of Inland Water Quality Parameters Using Landsat Time-Series and Back-Propagated ANN: Assessment and Usability in a Real-Case Scenario”, Remote Sensing and Artificial Intelligence in Inland Waters Monitoring \(2023\)](#)
- [32] [Esteban Roitberg, Veronica Barraza, Mercedes Salvia, Francisco Grings, “Remote Sensing Time Series Database for Deforestation Detection”, Simposio Argentino de Ciencia de Datos y Grandes Datos](#)
- [33] [Lilian Blanc, Valery Gond, Dinh Ho Tong Minh, “Remote Sensing and Measuring Deforestation”, Land Surface Remote Sensing \(2016\)](#)
- [34] [Mohammad Kazemi Garajeh, Behnam Salmani, Saeid Zare Naghadehi, Hamid Valipoori Goodarzi, Ahmad Khasraei, “An integrated approach of remote sensing and geospatial analysis for modeling and predicting the impacts of climate change on food security” \(2023\)](#)
- [35] [Tsitsi Bangira, Trylee Nyasha Matongera , Tafadzwanashe Mabhaudhi, Onesimo Mutanga, “Remote sensing-based water quality monitoring in African reservoirs, potential and limitations of sensors and algorithms: A systematic review”, Physics and Chemistry of the Earth V. 134](#)
- [36] [Mohammad Najafzadeh, Sajad Basirian, “Evaluation of River Water Quality Index Using Remote Sensing and Artificial Intelligence Models”, Ecological Remote Sensing \(2023\)](#)

- [37] [Sachidananda Mishra, Deepak R. Mishra, “Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters”.Remote Sensing of Environment V.117](#)
- [30]
- [39] [Thippa Reddy, Praveen Kumar Reddy, Kuruva Lakshmana, Rajesh Kaluri, Analysis of Dimensionality Reduction Techniques on Big Data](#)
- [40] [Laurens van der Maaten, Eric Posta, H. Jaap Van Den Herik, “Dimensionality Reduction: A Comparative Review”, Journal of Machine Learning Research 10 \(2007\)](#)
- [41] [Hao-Tian Zhang, Wen-Yong Guo, Wen-Ting Wang, “The dimensionality reductions of environmental variables have a significant effect on the performance of species distribution models”, Ecology and Evolution \(2023\)](#)
- [42] [Sumithra V.S., Subu Surendran, “A Review of Various Linear and Non-Linear Dimensionality Reduction Techniques”, International Journal of Computer Science and Information Technologies V. 06 \(2015\)](#)
- [43] [Laurens van der Maaten, Geoffrey Hinton, “Visualizing Data using t-SNE”, Journal of Machine Learning Research V. 09 \(2008\)](#)
- [44] [Ιωάννης Πρίμπας, Μιγάλης Καρύδης, “Assessment of clustering algorithms in discriminating eutrophic levels in coastal waters”, Global Nest Journal 10 \(2008\)](#)
- [45] [Meng Fang, Li Lyu, Ning Wang, Xiaolei Zhou, Yankun Hu, “Application of unsupervised clustering model based on graph embedding in water environment”, Scientific Reports \(2023\)](#)
- [46] [Leland McInnes, Steve Astels , John Healy, “hdbscan: Hierarchical density based clustering”, The Journal of Open Source Software 2 \(2017\)](#)
- [47] [Claudia Malzer, Marcus Baum, “A Hybrid Approach To Hierarchical Density-based Cluster Selection”](#)
- [48] [Mutlu Ozdogan, “Time Series Analysis of Remotely sensed data & accuracy assessment” \(2017\)](#)
- [49] [“Dimensionality Reduction”, www.wikipedia.org](#)
- [50] [“Introduction to Dimensionality Reduction” \(2023\), www.geeksforgeeks.org](#)
- [51] [“Dimensionality Reduction” \(2019\), www.teamraft.com](#)
- [52] [Jacob Murel Ph.D., Eda Kavlakoglu, “What is dimensionality reduction?” \(2024\)](#)
- [53] [“What Is Principal Component Analysis \(PCA\) and How It Is Used?” \(2020\), www.sartorius.com](#)
- [54] [“Linear Dimensionality Reduction Methods”, www.airplanet.com](#)
- [55] [“Multidimensional scaling”, www.wikipedio.org](#)
- [56] [Madison Meuler, Kaitlyn Casimo, “What is a UMAP?”, www.alleninstitute.org](#)
- [57] [“Intro to Autoencoders”, www.tensorflow.org](#)
- [58] [“KernelPCA”, www.scikit-learn.org](#)
- [59] [“Nonlinear Dimensionality Reduction”, www.wikipedia.org](#)

- [60] [“t – SNE Plot”, www.glucore.com](http://www.glucore.com)
- [61] [Abhishek Gupta, “PCA vs t – SNE” \(2020\), www.kaggle.com](http://www.kaggle.com)
- [62] [“Clustering in Machine Learning” \(2024\), www.geeksforgeeks.org](http://www.geeksforgeeks.org)
- [63] [Sauravkaushik8 Kaushik, “Clustering | Different Methods, and Applications” \(2024\), www.analyticsvidhya.com](http://www.analyticsvidhya.com)
- [64] [Kevin Babitz, “Introduction to k-Means Clustering with scikit-learn in Python” \(2023\), www.datacamp.com](http://www.datacamp.com)
- [65] [Preethi Thakur, “DBSCAN Algorithm — Density Based Spatial Clustering of Application with Noise” \(2022\), www.medium.com](http://www.medium.com)
- [66] [Neri Van Otte, “Hierarchical Clustering Comprehensive & Practical How To Guide In Python” \(2023\), www.spotintelligence.com](http://www.spotintelligence.com)
- [67] [Cory Maklin, “Gaussian Mixture Models Clustering Algorithm Explained” \(2019\), www.towardsdatascience.com](http://www.towardsdatascience.com)
- [68] [Sina Nazari, “Comparing The-State-of-The-Art Clustering Algorithms” \(2023\), www.medium.com](http://www.medium.com)
- [69] [Pepe Berba, “A gentle introduction to HDBSCAN and density-based clustering” \(2020\), www.pberba.github.io](http://www.pberba.github.io)
- [70] [Thomas A Dorfer, “Density-Based Clustering: DBSCAN vs. HDBSCAN” \(2022\), www.towardsdatascience.com](http://www.towardsdatascience.com)
- [71] [“How HDBSCAN Works”, www.hdbscan.readthedocs.io](http://www.hdbscan.readthedocs.io)
- [72] [Alok Pratap, “Exploring the Benefits of DBSCAN and HDBSCAN in Remote Sensing Technology”\(2023\), www.medium.com](http://www.medium.com)
- [73] [“Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise \(HDBSCAN\)” \(2024\), www.geeksforgeeks.com](http://www.geeksforgeeks.com)
- [74] [«Σπερχειός», www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [75] [“Remote Sensing Preprocessing”, Wageningen University](http://www.wageningenur.nl)
- [76] [“Preprocessing in Remote Sensing”](http://www.wageningenur.nl)
- [77] [GISGeography, “What is Atmospheric Correction in Remote Sensing?”, www.gisgeography.com](http://www.gisgeography.com)
- [78] [Robert A. Schowengerdt, “Radiometric Calibration”, Remote Sensing \(Third edition\), \(2007\)](http://www.scribd.com)
- [79] John R. Jensen, «Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος», Κεφάλαιο 2 (2007)
- [80] John R. Jensen, «Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος», Κεφάλαιο 12 (2007)
- [81] [“Normalized Difference Water Index \(NDWI\)”, www.eos.com](http://www.eos.com)
- [82] [Owolabi Abdulquawiyy Adisa, “Spectral Indices in Remote Sensing: Meaning and Applications”, www.spatialnode.net](http://www.spatialnode.net)

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1	"Δέλτα" Σπερχειού Ποταμού, Source: Panos Katsonis, LamiaNow (2020)
Εικόνα 2	SkySat Satellites, Source: ESA
Εικόνα 3	Copernicus Sentinel 2, Source: Copernicus Data Space Ecosystem
Εικόνα 4	Ορόσημα Τηλεπισκόπησης, Source: Τηλεπισκόπηση Περιβάλλοντος, Μια προοπτική για τα φυσικά δεδομένα: Κεφάλαιο 1, John R. Jensen
Εικόνα 5	Sputnik1 και Sputnik 2, source: NASA
Εικόνα 6	Ο SES-17 είναι ένας γεωστατικός δορυφόρος υψηλής απόδοσης που τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το 2022, Source: Techtarget.com, Mobile Computing
Εικόνα 7	Ο MetOp-A είναι ο πρώτος δορυφόρος της Ευρώπης σε πολική τροχιά, αφιερωμένος στη μετεωρολογία. Λειτουργώντας σε πολύ χαμηλότερο υψόμετρο από τους γεωστατικούς δορυφόρους, ο MetOp-A συμπληρώνει μετεωρολογικούς δορυφόρους της NOAA και άλλων οργανισμών, Source: NASA.gov
Εικόνα 8	Διαφορές Τροχιάς των Γεωσταθερών Δορυφόρων, των Δορυφόρων Χαμηλής Τροχιάς και τον Ήλιο - σύγχρονων Δορυφόρων, Source: India's Space Programme, Spacecraft, Launchers and Exploration
Εικόνα 9	Ανάπτυξη Μικροδορυφόρων, Source: Athanassios Staveris - Polykalas
Εικόνα 10	Η ισχυρή σκέδαση VV αντιστοιχεί σε τραχιά επιφανειακή σκέδαση (π.χ. γυμνό έδαφος, νερό), η ισχυρή σκέδαση HH υποδηλώνει την κυριαρχία της σκέδασης διπλής αναπήδησης (π.χ., βλάστηση, ανθρωπογενείς δομές) και οι χωρικές διακυμάνσεις στη διπλή πόλωση, Source: NASA SAR Handbook
Εικόνα 11	Μεταβλητές που μπορούν να επηρεάσουν την τηλεπισκόπηση των φυσικών χαρακτηριστικών ποιότητας του νερού, Source: Gerald K. Moore, Satellite Remote Sensing of Water Turbidity
Εικόνα 12	Ανάκτηση των συγκεντρώσεων χλωροφύλλης-α σε εννέα λίμνες οροπεδίων στις 22 και 24 Ιουνίου 2020, Source: Estimation of Chlorophyll-A Concentration with Remotely Sensed Data for the Nine Plateau Lakes in Yunnan Province
Εικόνα 13	Μωσαϊκά δασικής κάλυψης σε όλο τον κόσμο (σε σκούρο πράσινο) ανάλυσης 25 m από εικόνες ALOS-1/PALSAR. (α) 2007, (β) 2008, (γ) 2009, (δ) 2010, Source: Valery Gond, www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/palsar_fnf/data/index.htm)
Εικόνα 14	14: Αποτελέσματα της πρόβλεψης περιοχών που έχουν επηρεαστεί από παγετό χρησιμοποιώντας το μοντέλο CA-Markov για τα έτη 2030, 2040, 2050 και 2060, Source: An integrated approach of remote sensing and geospatial analysis for modeling and predicting the impacts of climate change on Food Security
Εικόνα 15	Προτεινόμενο μοντέλο βασισμένο σε τεχνικές μείωσης διαστάσεων PCA και LDA, Source: G. Thippa Reddy et al.: Analysis of Dimensionality Reduction Techniques on Big Data
Εικόνα 16	Ταξινόμηση τεχνικών μείωσης διαστάσεων, Source: Dimensionality Reduction: A Comparative Review, van der Maaten, Postma, Van Den Herik
Εικόνα 17	Οπτικοποίηση t - SNE και Isomap, Source: Visualizing Data using t-SNE, van der Maate, Hinton
Εικόνα 18	Η αρχιτεκτονική του αλγόριθμου, Source: Application of unsupervised clustering model based on graph embedding in water environment
Εικόνα 19	Συστάδες που δημιουργήθηκαν μέσω του HDBSCAN, Source: hdbscan: Hierarchical density based clustering, McInnes, Healy, Astels

Εικόνα 20	Components of Dimensionality Reduction, Source: geeksforgeeks.org
Εικόνα 21	Dimensionality Reduction, Source: teamraft.com
Εικόνα 22	Παράδειγμα PCA, Source: Sudheer Madala
Εικόνα 23	Παράδειγμα LDA, Source: Jacob Murel Ph.D., Eda Kavlakoglu
Εικόνα 24	Παράδειγμα UMAP, Source: alleninstitute.org
Εικόνα 25	Σύγκριση διαφόρων μεθόδων μείωσης διαστάσεων (α) PCA, (β) t - SNE, (γ) UMAP, (δ) LDA, Source: Dimensionality Reduction for Data Visualization: PCA vs TSNE vs UMAP vs LDA, www.towardsdatascience.com
Εικόνα 26	Παράδειγμα t - SNE, Source: qlucore.com
Εικόνα 27	tSNE vs. UMAP: Global Structure
Εικόνα 28	tSNE vs. UMAP: Global Structure
Εικόνα 29	Κυκλική ομαδοποίηση με βάση την απόσταση, Source: https://www.geeksforgeeks.org/clustering-in-machine-learning/
Εικόνα 30	Ομαδοποίηση k - means, Source: https://www.datacamp.com/tutorial/k-means-clustering-python
Εικόνα 31	Ομαδοποίηση DBSCAN, Source: https://medium.com/@tpreethi/dbscan-algorithm-density-based-spatial-clustering-of-application-with-noise-a826538dcb42
Εικόνα 32	Ιεραρχική Ομαδοποίηση, Source: https://spotintelligence.com/2023/09/12/hierarchical-clustering-comprehensive-practical-how-to-guide-in-python/
Εικόνα 33	Ομαδοποίηση με βάση την διανομή, Source: https://towardsdatascience.com/gaussian-mixture-models-d13a5e915c8e
Εικόνα 34	Comparing The-State-of-The-Art Clustering Algorithms, Source: https://medium.com/@sina.nazeri/comparing-the-state-of-the-art-clustering-algorithms-1e65a08157a1
Εικόνα 35	Σύγκριση k - means και HDBSCAN, Source: https://pberba.github.io/stats/2020/07/08/intro-hdbscan/
Εικόνα 36	Σύγκριση DBSCAN και HDBSCAN, Source: https://towardsdatascience.com/density-based-clustering-dbscan-vs-hdbscan-39e02af990c7
Εικόνα 37	Ευρύτερη Περιοχή Μελέτης σε Κλίμακα 1:50000, Source: Google Maps
Εικόνα 38	Αρχικές Εικόνες SkySat
Εικόνα 39	
Εικόνα 40	
Εικόνα 41	
Εικόνα 42	
Εικόνα 43	
Εικόνα 44	
Εικόνα 45	
Εικόνα 46	
Εικόνα 47	
Εικόνα 48	
Εικόνα 49	
Εικόνα 50	Παραδείγματα "ανωμαλιών" στην φασματική υπογραφή του νερού στην Εικόνα: 05 Ιανουαρίου 2021
Εικόνα 51	
Εικόνα 52	
Εικόνα 53	Αρχικές Εικόνες Sentinel - 2

Εικόνα 54	
Εικόνα 55	
Εικόνα 56	
Εικόνα 57	
Εικόνα 58	
Εικόνα 59	
Εικόνα 60	
Εικόνα 61	
Εικόνα 62	Σημεία που επιλέχθηκαν για το Τσιμέντο
Εικόνα 63	Εικόνα Αναφοράς, 29 Μαρτίου 2021
Εικόνα 64	
Εικόνα 65	
Εικόνα 66	
Εικόνα 67	
Εικόνα 68	
Εικόνα 69	
Εικόνα 70	
Εικόνα 71	
Εικόνα 72	
Εικόνα 73	
Εικόνα 74	
Εικόνα 75	
Εικόνα 76	
Εικόνα 77	
Εικόνα 78	
Εικόνα 79	
Εικόνα 80	Τελική Όρια Περιοχή Μελέτης πάνω στην Εικόνα: 23 Δεκεμβρίου 2020
Εικόνα 81	Τα δέκα δείγματα πάνω στα Κοινά Όρια της Περιοχής Μελέτης
Εικόνα 82	Φασματικές Υπογραφές, Source: ESA
Εικόνα 83	Οπτικοποίηση Εικονοστοιχείων της Ομαδοποίησης hdbscan για το NDCI (1 ^η Δοκιμή)
Εικόνα 84	Οπτικοποίηση Εικονοστοιχείων της Ομαδοποίησης hdbscan για το NDCI (2 ^η Δοκιμή)
Εικόνα 85	Οπτικοποίηση Εικονοστοιχείων της Ομαδοποίησης hdbscan για το SI (1 ^η Δοκιμή)
Εικόνα 86	Οπτικοποίηση Εικονοστοιχείων της Ομαδοποίησης hdbscan για το SI (2 ^η Δοκιμή)
Εικόνα 87	Σύγκριση των αποτελεσμάτων του t - SNE για το NDCI στις δυο Δοκιμές
Εικόνα 88	Σύγκριση της δημιουργίας και της χωρικότητας των Ομάδων για το NDCI στις δυο Δοκιμές
Εικόνα 89	Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο νότιο τμήμα του t -
Εικόνα 90	SNE για το NDCI
Εικόνα 91	
Εικόνα 92	Η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων στο βορειοανατολικό τμήμα του Ποταμού
Εικόνα 93	Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο δυτικό τμήμα του t -
Εικόνα 94	SNE για το NDCI
Εικόνα 95	
Εικόνα 96	Η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων στο νοτιοδυτικό τμήμα του Ποταμού

Εικόνα 97	Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο ανατολικό τμήμα του t
Εικόνα 98	- SNE για το NDCI
Εικόνα 99	Η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων στο κεντρικό τμήμα του Ποταμού
Εικόνα 100	
Εικόνα 101	Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο νοτιοδυτικό τμήμα του
Εικόνα 102	t - SNE για το NDCI
Εικόνα 103	Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο βορειοδυτικό τμήμα
Εικόνα 104	του t - SNE για το NDCI
Εικόνα 105	Η ταξινόμηση των εικονοστοιχείων στο κεντρικό τμήμα του Ποταμού
Εικόνα 106	
Εικόνα 107	Σύγκριση των αποτελεσμάτων του t - SNE για το SI στις δυο Δοκιμές
Εικόνα 108	
Εικόνα 109	Μετακινήσεις και χωροθέτηση των συστάδων για το SI στις δυο Δοκιμές
Εικόνα 110	
Εικόνα 111	Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο βόρειο τμήμα του t -
Εικόνα 112	SNE για το SI
Εικόνα 113	Διαφορές στην Οπτικοποίηση των εικονοστοιχείο στο κεντρικό σώμα του ποταμού για
Εικόνα 114	το SI στις δυο Δοκιμές
Εικόνα 115	Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο νότιο τμήμα του t -
Εικόνα 116	SNE για το SI
Εικόνα 117	Διαφορές στην Οπτικοποίηση των εικονοστοιχείο στο νοτιοδυτικό σώμα του ποταμού
Εικόνα 118	για το SI στις δυο Δοκιμές
Εικόνα 119	Διαφορές στην Ομαδοποίηση και στην παρουσία θορύβου στο νότιοδυτικό τμήμα του
Εικόνα 120	t - SNE για το SI
Εικόνα 121	Οπτικοποίηση του T - SNE του NDCI
Εικόνα 122	Οπτικοποίηση του T - SNE του SI
Εικόνα 123	Οπτικοποίηση του HDBSCAN στο T - SNE του NDCI
Εικόνα 124	Οπτικοποίηση των εικονοστοιχείων του HDBSCAN στο T - SNE του NDCI
Εικόνα 125	Τελική Οπτικοποίηση του t – SNE για το NDCI
Εικόνα 126	Οπτικοποίηση του HDBSCAN στο T - SNE του SI
Εικόνα 127	Οπτικοποίηση των εικονοστοιχείων του HDBSCAN στο T - SNE του SI
Εικόνα 128	Τελική Οπτικοποίηση του t – SNE για το SI
Εικόνα 129	Σύγκριση Τελικών Οπτικοποιήσεων του t – SNE για το NDCI και SI
Εικόνα 130	
Εικόνα 131	Ομοιότητες στις συγκεντρώσεις Χλωροφύλλης - a στην χρονοσειρά
Εικόνα 132	Ομοιότητες στις συγκεντρώσεις Ιζημάτων στην χρονοσειρά

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1	Χρονοσειρά των SkySat Εικόνων
Πίνακας 2	Χρονοσειρά των Sentinel - 2 Εικόνων
Πίνακας 3	Αρχική Χρονοσειρά
Πίνακας 4	Καιρικές Συνθήκες που επικρατούν στην Αρχική Χρονοσειρά
Πίνακας 5	Υδρατμοί και Θερμοκρασία Επιφάνειας (1)
Πίνακας 6	Υδρατμοί και Θερμοκρασία Επιφάνειας (2)
Πίνακας 7	Ζενίθια Γωνία και Αζιμούθιο SkySat Εικόνων
Πίνακας 8	Προτεινόμενα μήκη κύματος
Πίνακας 9	Τιμές Ορατότητας Σκινης
Πίνακας 10	Τιμές Καναλιών
Πίνακας 11	Κατώφλια NDWI
Πίνακας 12	Τιμές Καναλιών
Πίνακας 13	Τελική Χρονοσειρά
Πίνακας 14	Μέσοι Όροι κάθε συστάδας σε κάθε ημ/νια για το NDCI
Πίνακας 15	Τελική Κατηγοριοποίηση των συστάδων (NDCI)
Πίνακας 16	Μέσοι Όροι κάθε συστάδας σε κάθε ημ/νια για το SI
Πίνακας 17	Τελική Κατηγοριοποίηση των συστάδων (SI)
Πίνακας 18	Συγκριτική Ερμηνεία των Δεικτών για κάθε Κατηγορία
Πίνακας 19	Περιοχές Συγκέντρωσης Χλωροφύλλης - α (1η Προσέγγιση)
Πίνακας 20	Περιγραφή Κινήσεων των χαμηλότερων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης - α
Πίνακας 21	Περιγραφή Κινήσεων των μεσαίων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης - α
Πίνακας 22	Περιγραφή Κινήσεων των υψηλότερων συγκεντρώσεων χλωροφύλλης - α
Πίνακας 23	Περιοχές Συγκέντρωσης Ιζημάτων (1η Προσέγγιση)
Πίνακας 24	Περιγραφή Κινήσεων των χαμηλότερων συγκεντρώσεων ιζημάτων
Πίνακας 25	Περιγραφή Κινήσεων των μεσαίων συγκεντρώσεων ιζημάτων
Πίνακας 26	Περιγραφή Κινήσεων των υψηλότερων συγκεντρώσεων ιζημάτων
Πίνακας 27	Σύγκριση των δυο Προσεγγίσεων (NDCI)
Πίνακας 28	Σύγκριση των δυο Προσεγγίσεων (SI)
Πίνακας 29	Στατικές Συγκεντρώσεις Χλωροφύλλης - α σε όλη την χρονοσειρά
Πίνακας 30	Δυναμικές Συγκεντρώσεις Χλωροφύλλης - α σε κάθε ημερομηνία
Πίνακας 31	Στατικές Συγκεντρώσεις Ιζημάτων σε όλη την χρονοσειρά
Πίνακας 32	Δυναμικές Συγκεντρώσεις Ιζημάτων σε κάθε ημερομηνία

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1α	Δειγματοληψία στο Μπλε Κανάλι (1)
Διάγραμμα 1β	Δειγματοληψία στο Μπλε Κανάλι (2)
Διάγραμμα 2α	Δειγματοληψία στο Πράσινο Κανάλι (1)
Διάγραμμα 2β	Δειγματοληψία στο Πράσινο Κανάλι (2)
Διάγραμμα 3α	Δειγματοληψία στο Κόκκινο Κανάλι (1)
Διάγραμμα 3β	Δειγματοληψία στο Κόκκινο Κανάλι (2)
Διάγραμμα 4α	Δειγματοληψία στο Εγγύς Υπέρυθρο Κανάλι (1)
Διάγραμμα 4β	Δειγματοληψία στο Εγγύς Υπέρυθρο Κανάλι (2)
Διάγραμμα 5α	Δειγματοληψία στο NDCI (1)
Διάγραμμα 5β	Δειγματοληψία στο NDCI (2)
Διάγραμμα 6α	Δειγματοληψία στο SI (1)
Διάγραμμα 6β	Δειγματοληψία στο SI (2)
Διάγραμμα 7α	Δειγματοληψία στο NDVI (1)
Διάγραμμα 7β	Δειγματοληψία στο NDVI (2)
Διάγραμμα 8α	Δειγματοληψία στο SNR (1)
Διάγραμμα 8β	Δειγματοληψία στο SNR (2)
Διάγραμμα 9α	Δειγματοληψία στο GNDVI (1)
Διάγραμμα 9β	Δειγματοληψία στο GNDVI (2)
Διάγραμμα 10	Αποτελέσματα t – SNE στο NDCI
Διάγραμμα 11	
Διάγραμμα 12	Αποτελέσματα t – SNE στο SI
Διάγραμμα 13	
Διάγραμμα 14α	Αποτέλεσμα του HDBSCAN στο NDCI (1)
Διάγραμμα 14β	Αποτέλεσμα του HDBSCAN στο NDCI (2)
Διάγραμμα 15α	Αποτέλεσμα του HDBSCAN στο SI (1)
Διάγραμμα 15β	Αποτέλεσμα του HDBSCAN στο SI (2)
Διάγραμμα 16	Μέσος Όρος της κάθε συστάδας για κάθε ημ/νια του NDCI
Διάγραμμα 17	Τελικός Καθορισμός των συστάδων με κατώφλια (NDCI)
Διάγραμμα 18	Μέσος Όρος της κάθε συστάδας για κάθε ημ/νια του SI
Διάγραμμα 19	Τελικός Καθορισμός των συστάδων με κατώφλια (SI)
Διάγραμμα 20	Μέσος Όρος του t – SNE της κάθε συστάδας για κάθε ημ/νια του NDCI
Διάγραμμα 21	Μέσος Όρος του t – SNE της κάθε συστάδας για κάθε ημ/νια του SI
Διάγραμμα 22	Cluster 1 - Lowest Values (NDCI)
Διάγραμμα 23	Cluster 2 - Mid Values (NDCI)
Διάγραμμα 24	Cluster 3 - Highest Values (NDCI)
Διάγραμμα 25	Cluster 1 - Lowest Values (SI)
Διάγραμμα 26	Cluster 2 - Mid Values (SI)
Διάγραμμα 27	Cluster 3 - Highest Values (SI)