



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρονικής και Υπολογιστών

## Τίτλος διπλωματικής

Ενσωμάτωση δεδομένων τηλεπισκόπησης διαφορετικών πηγών (GEDI LiDAR και HLS πολυφασματικών εικόνων) σε μοντέλα εκτίμησης της κατακόρυφης δομής δασών  
της  
Παναγιώτας Χήτα

**Επιβλέπων:** Αναστάσιος Ντελόπουλος  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

**Συνεπιβλέπων:** Λεωνίδας Αλαγιαλόγλου  
Υποψήφιος Διδάκτορας Α.Π.Θ.

## **Περίληψη**

Το ύψος της βλάστησης μιας περιοχής αποτελεί σημαντική ένδειξη για τη βιομάζα, τα αποθέματα άνθρακα και γενικότερα για τη βιοποικιλότητα των δασών. Η εκτίμηση του συμβάλλει στη βαθύτερη κατανόηση και διαχείριση των χερσαίων οικοσυστημάτων. Η παρούσα διπλωματική παρουσιάζει μια προσπάθεια αξιοποίησης ενός γεωχωρικού μοντέλου θεμελίωσης (geospatial foundation model), το Prithvi, που αναπτύχθηκε από τη NASA και την IBM, στο έργο της πρόβλεψης του χάρτη του ύψους της κόμης των δέντρων σε περιοχές της Ελβετίας. Τα οπικά θεμελιώδη μοντέλα προσφέρουν καινοτόμες προσεγγίσεις σε εργασίες παρατήρησης της Γης, αξιοποιώντας την ικανότητα τους να εξάγουν πληροφορίες από μεγάλους όγκους μη επισημασμένων δεδομένων, ενώ μπορούν να προσαρμοστούν σε συγκεκριμένες εφαρμογές με τη χρήση περιορισμένων επισημασμένων δεδομένων. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε σε αυτή την εργασία, απαιτούσε την ενσωμάτωση δορυφορικών δεδομένων με τη σύζευξη δύο τύπων δεδομένων, των πολυφασματικών εικόνων HLS, και των σημειακών LiDAR δεδομένων από το όργανο GEDI. Αναπτύχθηκαν δύο αρχιτεκτονικές αποκωδικοποιητών (decoder) και χρησιμοποιώντας τα προεκπαιδευμένα βάρη του κωδικοποιητή (encoder), πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα πρόβλεψης του ύψους της βλάστησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στο πρώτο πείραμα (AOI1), με τη χρήση δύο πολυφασματικών εικόνων σαν είσοδο, το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) ήταν 3.84 και η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) 6.81, ενώ στο δεύτερο πείραμα, με συνολικά τρία στιγμιότυπα HLS εικόνων της περιοχής, οι αντίστοιχες τιμές ήταν 5.13 MAE και 7.80 RMSE. Παρότι οι τιμές σφάλματος ήταν υψηλότερες στο δεύτερο πείραμα (AOI2), η βελτίωση του συνολικού συνόλου δεδομένων, σε συνδυασμό με τη χρήση διαφορετικής αρχιτεκτονικής, οδήγησε στη δημιουργία ενός πιο ακριβούς χάρτη ύψους δέντρων. Η ακρίβεια αυτή επιβεβαιώνεται τόσο από την αρχική οπική παρατήρηση όσο και από τη σύγκριση των μετρικών MAE και RMSE των δύο χαρτών με τα ground truth δεδομένα από αερομεταφερόμενο LiDAR όργανο.

## **Abstract**

The canopy height serves as a critical indicator of biomass, carbon stocks, and overall forest biodiversity. Accurate estimation of vegetation height contributes to a deeper understanding and management of terrestrial ecosystems. This thesis explores the application of a geospatial foundation model, Prithvi, developed by NASA and IBM, for the downstream task of the prediction of canopy height maps in regions of Switzerland. Visual foundation models present novel methodologies in Earth observation tasks, leveraging their ability to extract information from large volumes of unlabeled data, while also offering flexibility for adaptation to downstream tasks using limited labeled data and fine-tuning techniques. The methodology followed in this study involved the integration of satellite data by coupling two types of data: HLS multispectral imagery and point-based LiDAR data from the GEDI instrument. Two decoder architectures were developed, and by leveraging pre-trained encoder weights, two experiments were conducted to predict vegetation height. The results demonstrated that in the first experiment (AOI1), which utilized two multispectral images as input, the MAE was 3.84 and the RMSE was 6.81, while the second experiment (AOI2), which incorporated three temporal snapshots of HLS imagery from the region, yielded a MAE of 5.13 and a RMSE of 7.80. Despite the higher error values observed in the second experiment (AOI2), the overall improvement in the dataset, coupled with the implementation of a distinct architectural approach, resulted in the development of a more precise tree height map. These findings were confirmed through visual assessment and further validated by comparing the MAE and RMSE metrics with the ground truth data obtained from airborne LiDAR.

## **Ευχαριστίες**

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, και άρα κλείνοντας ένα σημαντικό κεφάλαιο στη ζωή μου, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Αναστάσιο Ντελόπουλο, για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα και συνεπιβλέποντα της διπλωματικής μου, κ. Λεωνίδα Αλαγιαλόγλου, για την αμέριστη υποστήριξη και τις πολύτιμες παρατηρήσεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να με καθοδηγήσει με τις γνώσεις και την εμπειρία του. Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω από τις ευχαριστίες τις φίλες μου, τον Μάριο και την οικογένεια μου, που στάθηκαν δίπλα μου και με στήριξαν σε κάθε βήμα της πορείας μου κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ενσωμάτωση δεδομένων τηλεπισκόπησης  
διαφορετικών πηγών (GEDI LiDAR και HLS  
πολυφασιματικών εικόνων) σε μοντέλα εκτίμησης  
της κατακόρυφης δομής δασών

Παναγιώτα Χήτα  
[panagiotac@ece.auth.gr](mailto:panagiotac@ece.auth.gr)

4 Δεκεμβρίου 2024

# Περιεχόμενα

<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>2</b>
1.1 Διατύπωση του προβλήματος . . . . .	2
1.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση . . . . .	3
1.3 Συμβολή παρούσας διπλωματικής . . . . .	5
1.4 Δομή εργασίας . . . . .	6
1.5 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν . . . . .	6
<b>2 Μεθοδολογίες και Υλικά</b>	<b>8</b>
2.1 Συλλογή Δεδομένων . . . . .	8
2.1.1 Επισκόπηση των δεδομένων GEDI . . . . .	8
2.1.2 Επισκόπηση των HLS δεδομένων . . . . .	13
2.2 Προεπεξεργασία δεδομένων . . . . .	15
2.2.1 Διαδικασίες προεπεξεργασίας δεδομένων του πρώτου χάρτη . . . . .	15
2.2.2 Διαδικασίες προεπεξεργασίας δεδομένων του δεύτερου χάρτη . . . . .	20
2.3 Δημιουργία συνόλων εκπαίδευσης, επικύρωσης και δοκιμής . . . . .	21
2.3.1 Διαχείριση των συνόλων δεδομένων . . . . .	21
2.4 Μοντέλο . . . . .	24
2.4.1 Αρχιτεκτονική των μοντέλων . . . . .	24
2.4.2 Διαδικασία εκπαίδευσης . . . . .	26
2.4.3 Μετρικές Αξιολόγησης . . . . .	28
<b>3 Αποτελέσματα-Αξιολόγηση μοντέλων</b>	<b>35</b>
3.1 Αξιολόγηση των μοντέλων με δεδομένα GEDI ως δεδομένα αναφοράς . . . . .	35
3.2 Αξιολόγηση των μοντέλων με Ground Truth δεδομένα από αερομεταφέρομενο αισθητήρα LiDAR . . . . .	38
<b>4 Συμπεράσματα</b>	<b>47</b>
4.1 Συμπεράσματα παρούσας διπλωματικής . . . . .	47
4.2 Μελλοντικό έργο . . . . .	48
<b>Α' ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b>	<b>50</b>
Α'.1 Χρονική συσχέτιση της ευαισθησίας των δεδομένων GEDI . . . . .	50
Α'.1.1 Περιοχή: πάρκο Odzala Kokoua - Ισημερινός . . . . .	51
Α'.1.2 Περιοχή: δασική έκταση στην Ελλάδα - Μεσόγειος . . . . .	55
<b>Β' Ακρωνύμια και συντομογραφίες</b>	<b>60</b>

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Διατύπωση του προβλήματος

Η κατανόηση της παγκόσμιας κατανομής του ύψους της βλάστησης αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση και τη διαχείριση των χερσαίων οικοσυστημάτων. Ειδικότερα, στη σύγχρονη εποχή, όπου με τη κλιμάκωση της κλιματικής αλλαγής, καθώς και με την αυξανόμενη ζήτηση φυσικών πόρων, η διατήρηση των δασικών εκτάσεων έχει αναδειχθεί σε παγκόσμια προτεραιότητα. Η χαρτογράφηση του ύψους της κόμης των δέντρων της Γης συνεισφέρει στην αποτίμηση της βιομάζας και του αποθέματος σε υπέργειο άνθρακα, δύο κρίσιμων παραγόντων για την υγεία των οικοσυστημάτων και την παρακολούθηση των επιπτώσεων της αποψίλωσης και της κλιματικής αλλαγής. Τα δάση διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη ρύθμιση του μικροκλίματος, παρέχοντας θερμορυθμιστικές υπηρεσίες που μειώνουν τις ακραίες θερμοκρασίες και προστατεύουν τη βιοποικιλότητα [1]. Επιπλέον, συμβάλλουν στην αποφυγή πλημμυρών, στη συγκράτηση των υδάτων της βροχής και στην παρεμπόδιση των κατολισθήσεων [2], [3]. Συνεπώς, η ύπαρξη ενός χάρτη υψηλής ανάλυσης για το ύψος της κόμης των δέντρων, αποτελεί έναν σημαντικό δείκτη της χλωρίδας ([4]) και μπορεί να συμβάλλει ουσιαστικά στη βελτίωση της διαχείρισης των δασικών εκτάσεων, την ενίσχυση της φυσικής προστασίας των οικοσυστημάτων και στη βαθύτερη κατανόηση τους. Αποτελεί εναν δείκτη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαχείριση κινδύνων, όπως των δασικών πυρκαγιών ([5]), και στην αποφυγή κινδύνου ηλεκτρικού βραχυκυκλώματος, που οφείλεται σε γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ([6]). Οι γραμμές μεταφοράς, οι οποίες εκτείνονται συνήθως σε μήκος δεκάδων χιλιομέτρων για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης από τους σταθμούς παραγωγής, καθιστούν δύσκολη την οπική επιθεώρηση τους. Λόγω του υψηλού κόστους της διαδικασίας επίβλεψης των γραμμών και των υψών των δέντρων της περιοχής, των αραιών χρόνων επίβλεψης και του υψηλού φόρτου εργασίας, που θα απαιτούσε μια τέτοια επιχείρηση, μία αποτελεσματική λύση θα αποτελούσε η χαρτογράφηση του ύψους της βλάστησης με τη βοήθεια τεχνικών τηλεπισκόπησης.

Επομένως, καθιστάται επείγουσα η ανάγκη για ακριβή δεδομένα, προκειμένου να εκτιμηθεί η κατάσταση των δασών. Παρά το γεγονός ότι οι αερομεταφερόμενοι αισθητήρες Light Detection and Ranging (LiDAR) προσφέρουν εξαιρετικά ακριβή δεδομένα, η κλίμακα χρήσης τους είναι περιορισμένη, λόγω του υψηλού κόστους τους [7]. Ενώ έχουν σημειωθεί σημαντικές επιτυχίες στη χαρτογράφηση τοπικών εκτάσεων με τη

χρήση αυτών των τεχνολογιών, απαιτούνται πιο προσιτές και εκτεταμένες λύσεις για τη χαρτογράφηση σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η αύξηση της δορυφορικής παρατήρησης τα τελευταία χρόνια, μέσω ποικίλων αποστολών, όπως αυτή του Global Ecosystem Dynamics Investigation, GEDI, και του δορυφόρου Sentinel-2, καθιστά το έργο της χαρτογράφησης του ύψους της βλάστησης του πλανήτη πιο προσιτό και ελκυστικό για την επιστημονική κοινότητα, ενώ ταυτόχρονα η ανοδική της πορεία αναδυκνείται την σημαντικότητα αυτού του έργου. Όσον αφορά την αποστολή GEDI, η οποία εκτοξέυθηκε στις 5 Δεκεμβρίου 2018 στον Διεθνή Διαστημικό σταθμό, παράγει υψηλής ανάλυσης παρατηρήσεις της τρισδιάστατης δομής της κόμης της βλάστησης της Γης, μέσω του οργάνου LiDAR. Η αποστολή, αρχικά προγραμματίστηκε να διαρκέσει δύο χρόνια, αλλά παρατάθηκε δύο φορές και συνεχίζει να συμβάλλει στον εμπλουτισμό των παρατηρησιακών στοιχείων της NASA, με την προσθήκη της τρισδιάστατης δομής, ανοίγοντας το δρόμο στην καλύτερη κατανόηση της δομής του πλανήτη μας. Τα δεδομένα που παράγονται χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συνόλων δεδομένων που αφορούν το ύψος των φυλλωμάτων, το κατακόρυφο προφίλ, τον δείκτη επιφάνειας φύλλων, την τοπογραφία, καθώς και τα πλέγματα της βιομάζας ([8]). Σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι μετρήσεις του οργάνου GEDI παρέχουν σημειακά δεδομένα, γεγονός που περιορίζει την ευρεία κάλυψη μιας περιοχής. Ωστόσο, η ενσωμάτωσή τους με εκτενή παγκόσμια οπτικά σύνολα δεδομένων, όπως αυτά των δορυφόρων Landsat και Sentinel-2, επιτρέπει τη χωροχρονική εξαγωγή πληροφοριών από το GEDI. Μέσω αυτής της προσέγγισης, καθίσταται δυνατή η συνεπής παρακολούθηση της δομής της βλάστησης, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα.

Συνεπώς, ο συνδυασμός δορυφορικών δεδομένων με αερομεταφερόμενες μετρήσεις μπορεί να αποτελέσει μια βιώσιμη λύση, για την ανάπτυξη μοντέλων που παρέχουν ακριβείς εκτιμήσεις των μορφολογικών χαρακτηριστικών της βλάστησης σε ευρεία κλίμακα. Τέτοια μοντέλα μπορούν να παράγουν σχετικά συνεπή δεδομένα για την κατανομή του ύψους της βλάστησης.

## 1.2 Βιβλιογραφική επισκόπηση

Προηγούμενες μελέτες επικεντρώθηκαν στη χρήση μοντέλων μηχανικής μάθησης, συνδυάζοντας δορυφορικά δεδομένα με σημειακά δεδομένα υψηλής ακρίβειας, για την πρόβλεψη του ύψους δασικής βλάστησης. Η μεθοδολογία χαρτογράφησης του δασικού ύψους, που αναπτύχθηκε από τους Potapov et al., 2021 [9], βασίζεται σε έναν αλγόριθμο δέντρου παλινδρόμησης (regression tree), όπου η εξαρτημένη μεταβλητή είναι η μετρική σχετικού ύψους RH95 από τα δεδομένα GEDI και οι ανεξάρτητες μεταβλητές προέρχονται από πολυφασματικά μετρικά του δορυφόρου Landsat. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε και επαληθεύθηκε με τα δεδομένα αναφοράς GEDI, επιτυγχάνοντας σφάλμα RMSE = 6.6 m, MAE = 4.45 m, και συντελεστή  $R^2$  = 0.62, καθώς και με δεδομένα αερομεταφερόμενου LiDAR, επιτυγχάνοντας αντίστοιχα RMSE = 9.07 m, MAE = 6.36 m και  $R^2$  = 0.61. Ωστόσο, παρατηρήθηκε υποεκτίμηση του ύψους σε πολύ χαμηλά και πολύ ψηλά δάση (< 7 m, > 30 m), ενώ ο διαχωρισμός σε "δασική" και "μη δασική" έκταση, βάσει συγκεκριμένων ορίων ύψους, βελτίωσε την ακρίβεια του χάρτη.

Η εφαρμογή συνελικτικών νευρωνικών δικτύων αποτελεί καθιερωμένη μεθοδολογία, λόγω της ικανότητάς τους να αξιοποιούν αποτελεσματικά τη χωρική πληροφορία [10].

Στη μελέτη των Lang, Schindler, και Wegner (2019) [11], αναπτύχθηκε ένα βαθύ συνελικτικό νευρωνικό δίκτυο CNN, βασισμένο στην αρχιτεκτονική Xception [12], για την παραγωγή χάρτη ύψους βλάστησης με ανάλυση 10 μέτρων, αξιοποιώντας δεδομένα από τον Sentinel-2 σε περιοχές της Ελβετίας και της Γκαμπόν. Το μοντέλο τους, που προβλέπει το ύψος ανά pixel, πέτυχε μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) 1.7 μέτρων στην Ελβετία και 4.3 μέτρων στη Γκαμπόν, με RMSE 3.4 μέτρα και 5.6 μέτρα αντίστοιχα. Επιπλέον, στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα αερομεταφερόμενου LiDAR για την εκπαίδευση του μοντέλου, ενισχύοντας την ακρίβεια των εκτιμήσεων. Παράλληλα, η έρευνα των Alagialoglou et al. (2021) [13] βασίζεται σε ένα μοντέλο τύπου κωδικοποιητή - αποκωδικοποιητή (encoder-decoder), που χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική SegNet με συνδέσεις παράκαμψης, για την εξαγωγή τιμών ύψους ανά εικονοστοιχείο από πολυφασματικά δεδομένα του Sentinel-2. Το μοντέλο κατάφερε να επιτύχει RMSE 3.15 μέτρα και MAE 2.29 μέτρα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ικανότητα μεταφοράς των μοντέλων σε διαφορετικές περιοχές και χρονικές περιόδους είναι μία σημαντική παράμετρος. Στη μελέτη των Alagialoglou et al. (2022) [14], η χρήση της αρχιτεκτονικής Μακράς Βραχύχρονης Mnήμης LSTM, επιτρέπει την εκμετάλλευση πολυχρονικών δεδομένων, προσφέροντας αξιόπιστες εκτιμήσεις ύψους με μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) 1.29 μέτρα σε περιοχή  $79 \text{ km}^2$ . Το μοντέλο που προτείνουν οι συγγραφείς, το οποίο είναι ένα δίκτυο τύπου ConvLSTM (Convolutional και LSTM) με περίπου 320,000 εκπαιδεύσιμες παραμέτρους, αποδείχθηκε ικανό να μεταφερθεί σε άλλη ευρωπαϊκή χώρα, επιτυγχάνοντας MAE 1.94 μέτρα με τη χρήση περιορισμένων δεδομένων εκπαίδευσης μόλις  $2 \text{ km}^2$  με τεχνικές fine-tuning. Επιπλέον, η μελέτη καλύπτει και ζητήματα όπως η ποσοτικοποίηση της αθεβαιότητας των αποτελεσμάτων, ενώ η ισοτονική παλινδρόμηση εφαρμόζεται για τη βαθμονόμηση της εμπιστοσύνης των προβλέψεων.

Μια άλλη σημαντική μελέτη, που συνδυάζει πολυφασματικές εικόνες μαζί με σημειακά δεδομένα LiDAR, όπως και στην παρούσα διπλωματική, είναι αυτή των Lang et al. (2023) [15]. Συγκεκριμένα, αναπτύσσουν μια προσέγγιση βαθιάς μάθησης για την παγκόσμια χαρτογράφηση του ύψους της κορυφής των δέντρων με υψηλή ανάλυση 10 μέτρων, χρησιμοποιώντας συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα εκπαιδευμένα σε πολυφασματικές εικόνες του Sentinel-2 και ύψη αναφοράς από το όργανο GEDI. Πέρα από την εκτίμηση ύψους της κορυφής των δέντρων, προσφέρουν και την ποσοτικοποίηση της αθεβαιότητας στις εκτιμήσεις. Το μοντέλο αυτό, που εκπαιδεύεται με σπάνια επιτήρηση, παράγει χάρτες ύψους με RMSE 6.0 μέτρα και MAE 4.0 μέτρα σε σύγκριση με τα δεδομένα αναφοράς LiDAR του GEDI.

Η πλειοψηφία των τεχνικών που έχουν εφαρμοστεί μέχρι σήμερα για την καταγραφή του ύψους της κόμης των δέντρων της Γης περιλαμβάνει τη δημιουργία και εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων. Οι παραπάνω μεθοδολογίες συχνά απαιτούν επιβλεψη τους εδάφους και γνώσεις για την τοπική εκάστοτε περιοχή, δηλαδή αποτελεί μία δοκιμασία η γενικευσή τους τόσο χρονικά όσο και τοπικά. Ωστόσο, με τη συνεχή αύξηση των συνόλων δεδομένων, η εκπαίδευση των μοντέλων έχει γίνει μια δαπανηρή διαδικασία. Ειδικότερα στο χώρο των γεωχωρικών δεδομένων, ο τεράστιος όγκος πληροφοριών, και συγκεκριμένα μη επισημασμένων δεδομένων, μπορεί να αποτελέσει τόσο εργαλείο στα χέρια της επιστημονικής κοινότητας, αλλά ταυτόχρονα και εμπόδιο στην έρευνα. Επιπλέον, στο χώρο της τηλεπισκόπησης της Γης συνήθως αναπτύσσονται μοντέλα στοχεύοντας σε μία συγκεκριμένα εργασία.

Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι η αξιοποίηση θεμελιωδών μοντέλων (Foundation Models), μέσω διαδικασίων fine tuning. Τα μοντέλα θεμελίωσης είναι προεκπαιδευμένα μοντέλα, που εκπαιδεύονται σε μεγάλα μη επισημασμένα σύνολα δεδομένων, μέσω τεχνικών αυτοεπίβλεψης, και στη συνέχεια βελτιστοποιούνται για διάφορες μεταγενέστερες εργασίες με τη βοήθεια μικρών επισημασμένων δεδομένων. Αυτή η μέθοδος βρήκε κυρίως εφαρμογή σε διαδικασίες επεξεργασία φυσικής γλώσσας [16]- [17], ακριβώς λόγω της φύσης των δεδομένων. Προσπάθειες πραγματοποιήθηκαν, από την πλευρά της NASA και της IBM, ώστε να αξιοποιηθούν αυτά τα μοντέλα και να βρουν εφαρμογή στο χώρο των γεωχωρικών δεδομένων με την ανάπτυξη ενός προεκπαιδευμένο μοντέλου, το Prithvi (Prithvi είναι το σανσκριτικό όνομα της Γης) [18]. Οι δύο οργανισμοί συνεργάστηκαν για τη δημιουργία ενός θεμελιώδους μοντέλου τεχνητής νοημοσύνης για την παρατήρηση της Γης, χρησιμοποιώντας μεγάλης κλίμακας δεδομένα από δορυφόρους και απομακρυσμένη ανίχνευση, περιλαμβάνοντας τα δεδομένα Harmonized Landsat and Sentinel-2 (HLS) [19].

Έχουν προταθεί μοντέλα θεμελίωσης (FM) για την τηλεπισκόπηση που παρουσιάζονται σε αυτές τις έρευνες [20, 21]. Ωστόσο, σε αντίθεση με το Prithvi, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν 6 κανάλια από τα HLS δεδομένα για την εκπαίδευση του, τα μοντέλα αυτά επικεντρώνονται σε εναέριες εικόνες, έχοντας ως κύριο στόχο την ανίχνευση αντικειμένων και για την εκπαίδευση τους περιορίζονται στις ορατές ζώνες (RGB). Η μελέτη [18] εξετάζει τη χρήση του θεμελιώδους μοντέλου Prithvi, σε διάφορες εφαρμογές. Μία από τις δοκιμασίες είναι η χαρτογράφηση των πλημμυρών, όπου εκπαιδεύτηκε με δεδομένα από εικόνες των δορυφόρων Sentinel-1 και Sentinel-2 και σε σύγκριση με μοντέλα, όπως το ViT (Vision Transformer) [22] και το Swin Transformer [23], το Prithvi έδειξε σαφή βελτίωση. Συγκεκριμένα, η επίδοση του στον δείκτη Intersection-over-Union (IoU) για την κατηγορία του νερού έφτασε το 82,99% μετά από 500 εποχές, υπερβαίνοντας την απόδοση των άλλων δύο μοντέλων, καθώς επίσης επιτάχυνε τη διαδικασία fine-tuning, επιτυγχάνοντας υψηλή απόδοση σε λιγότερο από τον μισό χρόνο σε σχέση με μοντέλα χωρίς προ-εκπαίδευση, αποδεικνύοντας την ικανότητά του να προσαρμόζεται γρήγορα σε νέες δοκιμασίες με λιγότερα δεδομένα.

### 1.3 Συμβολή παρούσας διπλωματικής

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζουμε έναν χάρτη ύψους της κόμης της βλάστησης σε χωρία μεγέθους  $50 \times 50$  pixels, με χωρική ανάλυση 30 μέτρων για το έτος 2019, καθώς και έναν χάρτη ύψους σε χωρία μεγέθους  $32 \times 32$  ίδιας χωρικής ανάλυσης για το έτος 2019, που αντιστοιχούν σε μία μεγαλύτερη περιοχή ενδιαφέροντος. Ο χάρτης αυτός αναπτύχθηκε μέσω της βελτιστοποίησης του μοντέλου Prithvi [24], το οποίο βασίζεται σε αρχιτεκτονική μετασχηματιστή (transformer). Διατηρήσαμε τον κωδικοποιητή (encoder), ενώ τροποποιήσαμε τον αποκωδικοποιητή (decoder), ώστε να εκτελεί το μεταγενέστερο έργο της πρόβλεψης του ύψους. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην ενσωμάτωση μετρικών ύψους που προκύπτουν από το GEDI, αξιοποιώντας τεχνικές σπάνιας εποπτείας (sparse supervision), σε συνδυασμό με τις πολυφασματικές εικόνες HLS. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν παρατηρήσεις του οργάνου GEDI από το Απρίλιο του 2019 έως και τον Δεκέμβριο 2019, ενώ τα οπικά δεδομένα προέκυψαν από το προίον S30 των εναρμονισμένων δεδομένων Landsat & Sentinel-2 (HLS Sentinel-2 MSI Surface Reflectance [25]). Το μοντέλο πέτυχε σε σύγκριση με τα δεδομένα αναφοράς GEDI, στο σύνολο δεδομένων δοκιμής, συνολικά MAE = 3.84 και RMSE = 6.81

στην πρώτη περίπτωση, ενώ στο δεύτερο χάρτη το σκορ που επιτεύχθηκε είναι  $MAE = 5.1$  και  $RMSE = 7.8$ .

## 1.4 Δομή εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αρχικά περιγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και οι διαδικασίες προεπεξεργασίας που εφαρμόστηκαν. Ειδικότερα, η προεπεξεργασία διακρίνεται σε δύο τμήματα, καθώς οι δύο χάρτες δημιουργήθηκαν με διαφορετικές τεχνικές προεπεξεργασίας δεδομένων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα τελικά σύνολα δεδομένων για τις δύο περιοχές μελέτης. Το δεύτερο κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση του μοντέλου και των δύο αρχιτεκτονικών που υιοθετήθηκαν για την παραγωγή των χαρτών, καθώς και των κοινών μετρικών αξιολόγησης. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων στο τρίτο κεφάλαιο, ενώ το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Τέλος, πριν από τη βιβλιογραφία, περιλαμβάνεται παράρτημα που διερευνά τη χρονική συσχέτιση μεταξύ της ευαισθησίας των δεδομένων GEDI και της αξιολόγησης της ποιότητας των λήψεων, λαμβάνοντας υπόψη την εποχή και την ώρα. Ο στόχος είναι η ανάπτυξη ενός φίλτρου για τις βολές του οργάνου GEDI, το οποίο θα βελτιστοποιήσει τα αποτελέσματα.

## 1.5 Εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Python και το περιβάλλον ανάπτυξης PyCharm. Η Python είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην ανάπτυξη και εφαρμογή νευρωνικών δικτύων, καθώς προσφέρει πλούσιες βιβλιοθήκες και εργαλεία, που διευκολύνουν την υλοποίηση σύνθετων αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Για την βέλτιση διαχείριση των βιβλιοθηκών και των εξαρτήσεων, δημιουργήθηκε ένα περιβάλλον Conda, καθώς συνιστά ένα αποτελεσματικό εργαλείο διαχείρισης πακέτων και περιβαλλόντων, διευκολύνοντας την εγκατάσταση, την ενημέρωση και το χειρισμό των πακέτων λογισμικού και των εξαρτήσεών τους. Επιπλέον, επιτρέπει τη δημιουργία απομονωμένων περιβαλλόντων, διασφαλίζοντας ότι οι απαιτούμενες βιβλιοθήκες είναι συμβατές μεταξύ τους.

Τα κύρια εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόσβαση στα δεδομένα είναι τα εξής:

- η πλατφόρμα **Earthdata Search**, για την πρόσβαση στα δεδομένα GEDI,
- **Jupyter notebook**, για τη διευκόλυνση στην οπτικοποίηση των παραπάνω δεδομένων,
- το **QGIS**, ένα open source λογισμικό, που επιτρέπει την ανάλυση και οπτικοποίηση γεωχωρικών δεδομένων,
- **Sentinel Hub**, μια πλατφόρμα που παρέχει πρόσβαση σε δεδομένα δορυφορικών αποστολών, όπως αυτής του Sentinel-2 και των HLS δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική. Επιπλέον, προσφέρει σημαντικές δυνατότητες για την ανάλυση και την οπτικοποίηση δορυφορικών εικόνων,
- **Comet**, μια πλατφόρμα σχεδιασμένη για την παρακολούθηση πειραμάτων μηχανικής μάθησης, η οποία διευκολύνει την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, τη

σύγκρισή τους και την εξαγωγή μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο,

Τέλος, κατά την εκπαίδευση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα εργαλεία nvtop και htop για την παρακολούθηση της απόδοσης των υπολογιστικών πόρων.

Το nvtop παρακολουθεί την απόδοση των GPU σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας σημαντικές μετρήσεις, όπως η χρήση της GPU, της μνήμης και η θερμοκρασία. Η δυνατότητα παρακολούθησης πολλών GPU ταυτόχρονα το καθιστά ιδανικό για εργασίες μηχανικής μάθησης, διασφαλίζοντας τη βέλτιστη εκτέλεση των υπολογιστικών διαδικασιών. Από την άλλη, το htop αποτελεί ένα διαδραστικό εργαλείο παρακολούθησης διαδικασιών για συστήματα τύπου Unix και επιτρέπει την εύκολη παρακολούθηση της χρήσης CPU και της μνήμης, διευκολύνοντας τη διαχείριση και την παρακολούθηση του συστήματος, προσφέροντας αυξημένη αποδοτικότητα.

## Κεφάλαιο 2

# Μεθοδολογίες και Υλικά

### 2.1 Συλλογή Δεδομένων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα επιλεγμένα δεδομένα και οι διαδικασίες προεπεξεργασίας που εφαρμόστηκαν, με στόχο την κατάλληλη προετοιμασία τους για εισαγωγή στο νευρωνικό δίκτυο σε επόμενο στάδιο. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποίηθηκαν δύο τύποι δεδομένων: δεδομένα που παρήχθησαν από την αποστολή GEDI, χρησιμοποιώντας LiDAR αισθητήρες και τα εναρμονισμένα δεδομένα των δορυφόρων Landsat και Sentinel-2 (HLS) της NASA, που αποτελούν οπτικά σύνολα δεδομένων, πολυφασματικές εικόνες χωρικής ανάλυσης 30m, με στόχο ο συνδυασμός των δύο δορυφόρων να οδηγήσει στην δημιουργία ενός υψηλής ποιότητας συνόλου δεδομένων επιφανειακής ανάκλασης (SR). Εφόσον η αποστολή GEDI ακολουθεί δειγματοληπτικές μεθόδους με μια συγκεκριμένη συχνότητα, η χωρική ανάλυση του παραγόμενου χάρτη περιορίζεται στη διακριτή χωρική ανάλυση των παραγόμενων πλεγμάτων. Επομένως, ο συνδυασμός τους με δεδομένα συνεχούς χωρικής ανάλυσης, όπως αυτά της τηλεπισκόπησης (των πολυφασματικών εικόνων), συνεισφέρει στην υλοποίηση ενός πιο λεπτομερούς χάρτη, υψηλής χωρικής ανάλυσης.

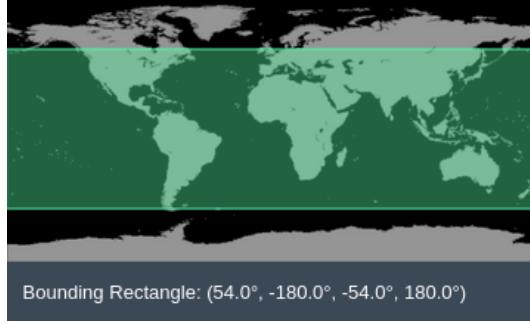
#### 2.1.1 Επισκόπηση των δεδομένων GEDI

##### Εισαγωγή στην αποστολή και στα δεδομένα GEDI

Στην παρούσα υποενότητα παρέχουμε μια επισκόπηση των παραγόμενων δεδομένων του GEDI.

Υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί αυτού του οργάνου, που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αρχικά, από το σχεδιασμό τους, τα δείγματα που συλλέγονται καλύπτουν αραιά την επιφάνεια της Γης, περιορίζοντας έτσι την χωρική ανάλυση των προϊόντων της αποστολής. Επιπλέον, η τροχιά του δορυφόρου περιορίζεται στις  $51,6^{\circ}$  Β και Ν [8], 2.1.

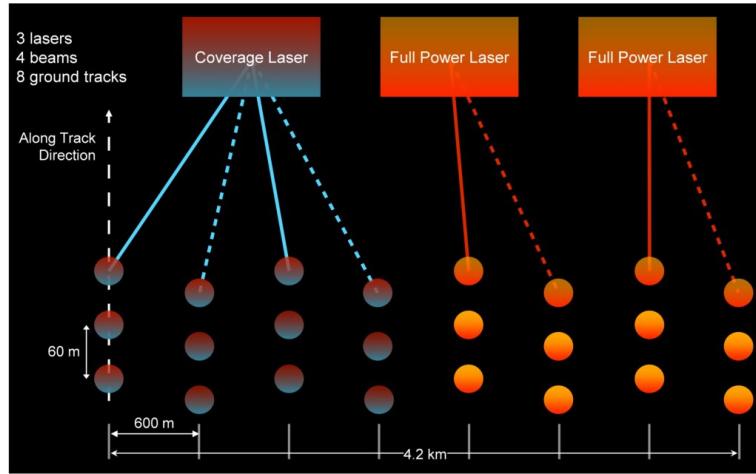
Όσον αφορά την **αρχή λειτουργίας** του οργάνου GEDI, διαθέτει 3 λέιζερ που παράγουν 8 παράλληλες τροχιές - διαδρομές παρατηρήσεων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Δύο από τα λειζερ λειτουργούν σε πλήρη ισχύ και το τρίτο διαχωρίζεται σε δύο δέσμες. Λόγω της λειτουργίας των Μονάδων Αποπροσανατολισμού Δέσμης (Beam Dithering Units - BDUs), οι οποίες μεταβάλλουν με γρήγορο ρυθμό την εκτροπή των εξερχόμενων ακτίνων



Σχήμα 2.1: Απεικόνιση των χωρικών ορίων του οργάνου.

κατά 1.5mrad, μετατοπίζοντάς τες κατά 600 μέτρα στο έδαφος, προκύπτουν τελικά 8 ίχνη-τροχιές: 4 ίχνη ισχύος και 4 ίχνη κάλυψης (ασθενείς δέσμες). Κάθε αποτύπωμα απέχει 60 m κατά μήκος της τροχιάς, με απόσταση περίπου 600 m μεταξύ των 8 τροχιών. Κάθε λέιζερ πυροδοτείται 242 φορές ανά δευτερόλεπτο και φωτίζει ένα σημείο με διάμετρο 25 μέτρα (αποτύπωμα) στην επιφάνεια, πάνω στο οποίο μετράται η τρισδιάστατη δομή. Πιο αναλυτικά, η διαδικασία λειτουργίας περιλαμβάνει τα εξής στάδια: Το φως ανακλάται από το έδαφος, τη βλάστηση και τα σύννεφα και έπειτα συλλέγεται από το τηλεσκόπιο του GEDI. Στη συνέχεια, οι ανιχνευτές του οργάνου μετατρέπουν τη φωτεινότητα του φωτός σε ηλεκτρική τάση, το οποίο και καταγράφεται ως συνάρτηση του χρόνου. Τέλος, ο χρόνος μετατρέπεται σε απόσταση πολλαπλασιάζοντας με την ταχύτητα του φωτός και με αυτόν τον τρόπο η καταγεγραμμένη τάση ως συνάρτηση της απόστασης αντιπροσωπεύει τη πλήρη κυματομορφή, όπως θα παρουσιαστεί στην συνέχεια.

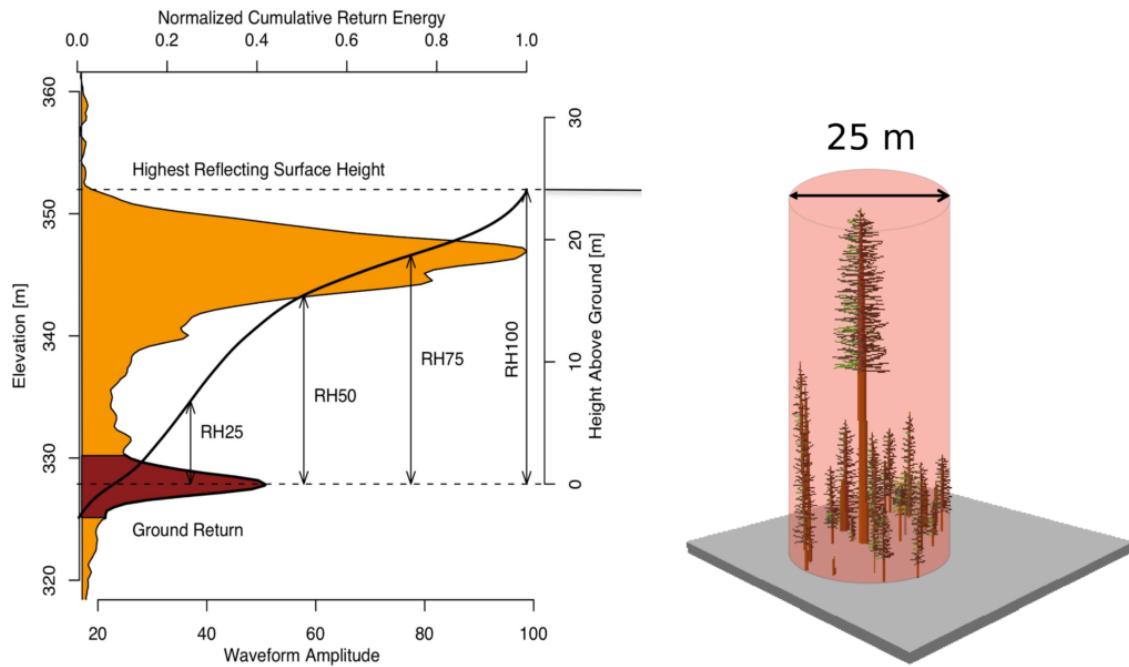
Το GEDI αναμένεται να παράγει περίπου 10 δισεκατομμύρια παρατηρήσεις χωρίς σύννεφα κατά τη διάρκεια της ονομαστικής διάρκειας της αποστολής του, η οποία διαρκεί 24 μήνες.



Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση των τριών λέιζερ του GEDI που διαχωρίζονται σε 8 παράλληλες τροχιές για τη συλλογή δεδομένων. Πηγή: [26]

Τα προϊόντα του GEDI διαχωρίζονται σε διάφορα επίπεδα ([27]). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν τα δεδομένα GEDI L2A version 2 ([28]), τα οποία περιέχουν μετρικές για το προφίλ και το ύψος της δασικής κόμης της Γης σε επίπεδο αποτυπώματος μιας βολής. Οι κυματομορφές, που έχουν προκύψει από τα GEDI01\_B δεδομένα, υποβάλ-

λονται σε επεξεργασία για τον προσδιορισμό του ύψους του εδάφους, του ύψους της κορυφής της κόμης και του σχετικού ύψους (μετρικές RH) στο σύνολο δεδομένων L2A. Η μεθοδολογία για τη δημιουργία των συνόλων δεδομένων του προϊόντος GEDI02\_A (Level 2A Geolocated Elevation and Height Metrics) είναι προσαρμοσμένη από τον αλγόριθμο Land, Vegetation, and Ice Sensor (LVIS). Το προϊόν παρέχεται σε μορφή HDF5 και έχει χωρική ανάλυση (μέσο αποτύπωμα) διαμέτρου 25 μέτρων. [Εικόνα 2.3]



Σχήμα 2.3: Στα αριστερά απεικονίζεται ένα δείγμα κυματομορφής από τα δεδομένα GEDI. Η ανοιχτόχρωμη περιοχή αναπαριστά την επιστρεφόμενη ενέργεια, ενώ η σκουρόχρωμη υποδηλώνει την επιστροφή από την υποκείμενη τοπογραφία. Η μαύρη γραμμή συνιστά την αθροιστική ενέργεια επιστροφής (κανονικοποίηση 0 για το έδαφος, 1 για την κορυφή της κόμης). Οι μετρήσεις σχετικού ύψους (RH) δίνουν το ύψος, στο οποίο επιτυγχάνεται ένα ορισμένο κβάντο επιστρεφόμενης ενέργειας σε σχέση με το έδαφος. Στα δεξιά παρουσιάζεται το αποτύπωμα μιας βολής που έχει διάμετρο 25 μέτρα. Πηγή: [8]

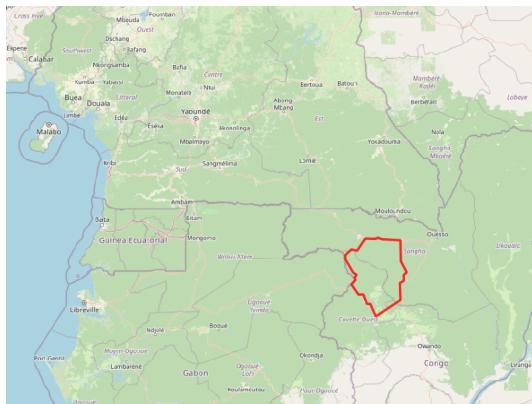
Τα δεδομένα περιέχουν 156 επίπεδα για κάθε μία από τις 8 δέσμες, όπως είναι το υψόμετρο του εδάφους, το ύψος της κορυφής της κόμης, καθώς και οι μετρικές της σχετικής ενέργειας επιστροφής. Το ύψος (canopy height), που θα χρησιμοποιηθεί στην εργασία, υπολογίζεται αφαιρώντας το υψόμετρο της υψηλότερης επιστροφής από το υψόμετρο του κέντρου της χαμηλότερης επιστροφής ("έδαφος") στην καταγεγραμμένη κυματομορφή.

### Πρόσθαση στα δεδομένα

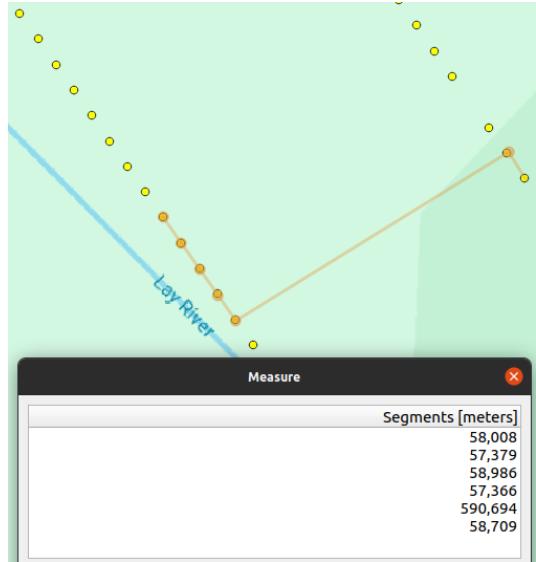
Στην διπλωματική εργασία, για την πρόσθαση στα δεδομένα GEDI χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Earthdata Search. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το προϊόν GEDI L2A Elevation and Height Metrics Data Global Footprint Level V002 και καθορίστηκε το χρονικό εύρος των δεδομένων προσδιορίζοντας τις αντίστοιχες ημερομηνίες, καθώς και η περιοχή ενδιαφέροντος, η οποία οριθετήθηκε με ακρίβεια μέσω αρχείων GeoJSON, τα οποία περιείχαν τα bounding boxes των περιοχών.

## Odzala-Kokoua εθνικό πάρκο

Με στόχο την βαθύτερη κατανόηση των δεδομένων GEDI, επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης το εθνικό πάρκο Odzala-Kokoua στη Δημοκρατία του Κονγκό. Αρχικά, τα όρια του πάρκου αποτυπώθηκαν σε μορφή geojson με τη βοήθεια του λογισμικού GQIS, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η οριοθέτησή τους, αναπαριστώντας περιοχή συνολικής έκτασης  $13,584 \text{ km}^2$ , όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2.4α'. Με την επιλογή μιας τροχιάς που διασχίζει το επιλεγμένο πάρκο και την εξαγωγή των βολών σε μορφή json αρχείων για αναπαράσταση στο GIS, επιβεβαιώθηκε ότι κάθε τροχιά περιλαμβάνει 8 δέσμες, καθώς επιβεβαιώθηκαν και οι μεταξύ τους αποστάσεις. [Εικόνα 2.4β', 2.4γ']



(α') Τα όρια του εθνικού πάρκου Odzala-Kokoua.



(β') Αποστάσεις μεταξύ των βολών του GEDI μίας δέσμης (60 μέτρα) και της κάθε δέσμης μεταξύ τους (600 μέτρα).



(γ') Αναπαράσταση των 8 συνολικά δεσμών μιας τροχιάς.

Σχήμα 2.4: Επισκόπηση του Εθνικού Πάρκου Odzala-Kokoua και της τροχιάς του GEDI.

Στη συνέχεια, θα αναλυθούν τα προϊόντα L2A [29]. Κάθε τροχιά περιλαμβάνει τις βολές που την απαρτίζουν. Για την ευκολότερη διαχείριση των αρχείων .h5, που αποκτήθηκαν μέσω της πλατφόρμας Earthdata Search, τα δεδομένα οργανώθηκαν σε pandas dataframes. Ενδεικτικά, μερικές από τις στήλες που σχετίζονται με την διπλωματική περιλαμβάνουν το χαρακτηριστικό αριθμό κάθε βολής, το γεωγραφικό πλάτος και μήκος, το υψόμετρο (m), το ύψος της κόμης των δασών της Γης(rh100), τη σημαία ποιότητας, τη σημαία υποθάθμισης και την ευαισθησία.

## Μετρικές σχετικού ύψους (rh metrics)

Οι μετρικές του σχετικού ύψους αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία για την κατανόηση της βλάστησης σε μια περιοχή, καθώς επιτρέπουν την ακριβή χαρτογράφηση του ύψους της. Επομένως, κατέχουν και σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της δομής της κατακόρυφης βλάστησης της Γης και χρησιμοποιούνται σε αρκετές ερευνητικές μελέτες. Το σχετικό ύψος αναφέρεται στο ύψος, στο οποίο επιτυγχάνεται ένα συγκεκριμένο ποσοστό της επιστρεφόμενης ενέργειας σε σχέση με το έδαφος. Η αριθμητική ένδειξη δίπλα από το rh σχετίζεται με το ποσοστό της επιστρεφόμενης ενέργειας, έτσι το rh100 υποδεικνύει το σχετικό ύψος στο οποίο έχει επιστραφεί το 100% της ενέργειας, ενώ το rh98 δηλώνει το σχετικό ύψος στο οποίο παρατηρείται επιστροφή 98%.

To rh100 προκύπτει ως εξής:

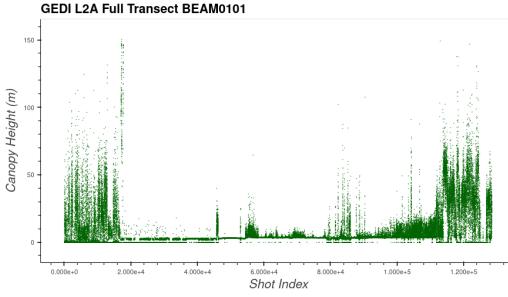
$$RH100 = elev\_highestreturn - elev\_lowestmode$$

, όπου ο όρος elev\_highestreturn αναφέρεται στο υψόμετρο της υψηλότερης ανιχνευθείσας επιστροφής, και αντίστοιχα η μεταβλητή elev\_lowestmode αφορά το υψόμετρο του κέντρου της χαμηλότερης κατανομής (μοδε), συνήθως αντιπροσωπεύοντας το χαμηλότερο σημείο ανάκλασης, δηλαδή την επιφάνεια του εδάφους. [30]

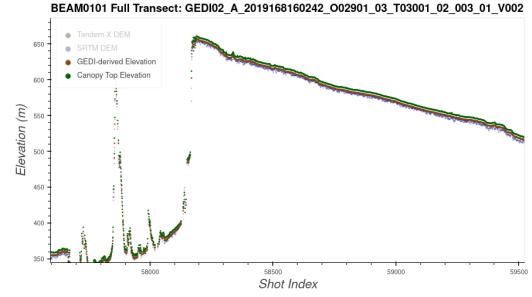
Οι μετρικές αυτές προορίζονται κυρίως για επιφάνειες βλάστησης, ενώ τα αποτελέσματα σε γυμνές ή υδάτινες επιφάνειες είναι επίσης έγκυρα, αλλά είναι πιθανόν να παρουσιάσουν κάποιες παρανοήσεις. Τέλος, οι χαμηλές τιμές RH (π.χ. RH10) συχνά έχουν αρνητικές τιμές, ιδιαίτερα σε συνθήκες χαμηλής κάλυψης, διότι ένα σχετικά υψηλό ποσοστό της ενέργειας της κυματομορφής προέρχεται από το έδαφος και βρίσκεται κάτω από το elev\_lowestmode. Για παράδειγμα, όταν η επιστροφή από το έδαφος περιέχει το 30% της ενέργειας, τότε οι τιμές RH1 έως RH15 ενδέχεται να είναι κάτω από 0, δεδομένου ότι το ήμισυ της ενέργειας από την επιστροφή του εδάφους βρίσκεται κάτω από το κέντρο της επιστροφής της, το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του μέσου υψομέτρου του εδάφους στο αποτύπωμα. Θεχωρίζοντας μία δέσμη του GEDI μπορούμε να παρατηρήσουμε όσα παρουσιάζονται στα διαγράμματα 2.5.

## Φίλτρα Ποιότητας

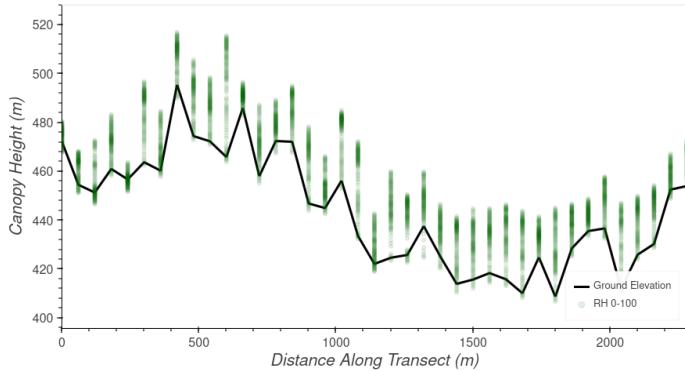
Η σημαία ποιότητας, η σημαία υποβάθμισης και η ευαισθησία αποτελούν παράγοντες που φανερώνουν την ποιότητα μιας βολής του οργάνου. Συγκεκριμένα, η σημαία ποιότητας αποτελεί μια κρίσιμη ένδειξη σχετικά με την αξιοπιστία των δεδομένων που παρέχονται από το σύστημα GEDI και αντιπροσωπεύει ένα άθροισμα πολλών επιμέρους παραμέτρων αξιολόγησης της ποιότητας. Κάθε βολή προσδιορίζεται από μία τιμή quality flag, η οποία είναι δυαδική, είτε 1, υποδεικνύοντας ποιοτικά δεδομένα, είτε 0, υποδηλώνοντας ότι τα δεδομένα αυτά έχουν χαμηλή ποιότητα. Η τιμή quality\_flag 1 υποδηλώνει ότι η βολή λέιζερ πληροί τα κριτήρια που βασίζονται στην ενέργεια, την ευαισθησία, το πλάτος, την ποιότητα παρακολούθησης επιφάνειας σε πραγματικό χρόνο. Γενικότερα, το σύνολο σημαίων παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες να φιλτράρουν τις βολές που χαρακτηρίζονται από κακή γεωεντοπιστική απόδοση, κακή ποιότητα σήμανσης ή που ενδέχεται να έχουν επηρεαστεί από περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η παρουσία νεφών.



(α') Αναπαράσταση του ύψους canopy height (RH100) συναρτήσει κάθε βολής που ανήκει στη επιλεγμένη δέσμη.



(β') Διάγραμμα του υψόμετρου του εδάφους σε σχέση με το συνολικό υψόμετρο της κορυφής του φυλλώματος των δέντρων ή άλλων φυτών συναρτήσει των βολών της δέσμης BEAM0101. Η διαφορά τους αποτελεί το ζητούμενο ύψος.



(γ') Αναπαράσταση του σχετικού ύψους όλου του φάσματος των τιμών επιστρεφόμενης ενέργειας (RH0-RH100) ανά βολή σε συνδυασμό με το υψόμετρο του εδάφους. Παρατηρούμε τις αρνητικές τιμές που ενδέχεται να έχουν οι χαμηλές τιμές σχετικού ύψους.

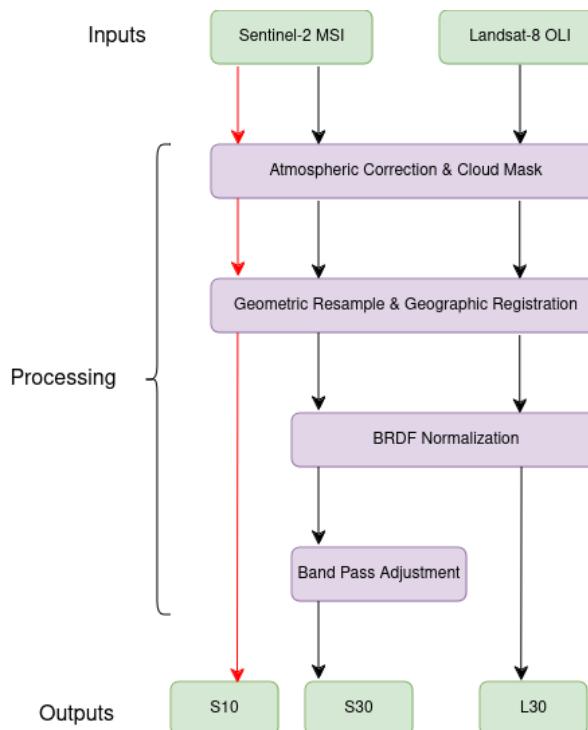
Σχήμα 2.5: Επισκόπηση των μετρικών για μία δέσμη BEAM0101.

### 2.1.2 Επισκόπηση των HLS δεδομένων

Το έργο αυτό, με την ονομασία Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS), αποτελεί μια πρωτοβουλία που στοχεύει στην παραγωγή ενός αρχείου επιφανειακής ανάκλασης από το Operational Land Imager (OLI) και το Multi-Spectral Instrument (MSI) των δορυφόρων τηλεπισκόπησης Landsat-8/9 και Sentinel-2A/B, αντίστοιχα. Τα προϊόντα είναι αποτέλεσμα ενός συνόλου αλγορίθμων και προσφέρουν σχεδόν παγκόσμια κάλυψη της Γης με εξαιρεση την περιοχή της Ανταρκτικής, ενώ η συχνότητα με την οποία παρέχονται παρατηρήσεις είναι μία φορά κάθε τρεις ημέρες στον ισημερινό, ποσοστό που αυξάνεται με την αύξηση του γεωγραφικού πλάτους. [19]

Παράγονται δύο κύρια προϊόντα, τα S30 και τα L30, που προέρχονται από τα δεδομένα L1C του Sentinel-2 και από τη συλλογή 2 Landsat Level-1 Precision and Terrain (L1PT) των δορυφόρων Landsat 8 & 9, αντίστοιχα [25,31]. Με την ενσωμάτωση των δύο τύπων δεδομένων, τόσο των L30, που προέρχονται από εικόνες με ανάλυση 30 μέτρων και χρονική επανάληψη 16 ημερών, όσο και των S30, με χωρική ανάλυση 10 - 20 μέτρων και 5 μέρες χρονική επανάληψη, επιτυγχάνεται η ενοποίηση τους σε μία κοινή συλλογή, με κάλυψη χρονική 3 ημερών και χωρική ανάλυση 30 μέτρων.

Τα δεδομένα είναι τοποθετημένα σε πλέγμα σύμφωνα με το στρατιωτικό σύστημα αναφοράς (MGRS), χρησιμοποιώντας μέγεθος εικονοστοιχείου 30 μέτρα. Ως αποτέλεσμα, τα προϊόντα S30 και L30 είναι φυσικά συν-καταχωρισμένα σε κοινά πλακίδια. Επιπλέον, τα προϊόντα S30 έχουν προσαρμοστεί, ώστε να αναπαράγουν τη φασματική απόκριση του Landsat 8, εξασφαλίζοντας ομοιογένεια στα κοινά φασματικά χαρακτηριστικά των μπάντων. Για τη δημιουργία τους εφαρμόστηκαν μια σειρά βημάτων, όπως παρουσιάζεται στο σχεδιάγραμμα 2.6. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος ατμοσφαιρικής διόρθωσης (LaSRC), καθώς και μία μάσκα για την κάλυψη των νεφών. Δεδομένου ότι η ακρίβεια καταγραφής εικόνων διακρίνεται σε δύο συνιστώσες: τη απόλυτη γεωδαιτική ακρίβεια, η οποία αναφέρεται στην καταχώρηση της εικόνας σε σχέση με το έδαφος αναφοράς και τη πολυχρονική ακρίβεια, που αφορά τη συν-καταγραφή πολλαπλών λήψεων στο χρόνο, στο πλαίσιο του έργου HLS, επιδιώκεται η διατήρηση της πολυχρονικής συνεγγραφής μεταξύ των εικόνων Sentinel-2 και Landsat 8 (< 15 m, 2σ) για τα προϊόντα ανάλυσης 30 m. Επόμενο βήμα είναι η ρύθμιση των γωνιών θέσης και φωτισμού (BRDF). Η εναρμόνιση απαιτεί, επίσης, προσαρμογή των μικρών διαφορών μεταξύ των ισοδύναμων φασματικών ζωνών των MSI και OLI. Οι φασματικές μπάντες του OLI χρησιμοποιούνται ως αναφορά, στις οποίες προσαρμόζονται συγκεκριμένες από τις φασματικές ζώνες των MSI. [32]



Σχήμα 2.6: Σχεδιάγραμμα επισκόπησης της διαδικασίας παραγωγής των προϊόντων S30, L30 (χωρική ανάλυση 30 μέτρων) & S10 (ανάλυση 10 μέτρων).

### Χωρική επισκόπηση των HLS

Σημαντική πληροφορία για την κατανόηση της κλίμακας των προϊόντων είναι ότι έχουν παραχθεί σε 91 περιοχές, που αντιστοιχούν σε συνολικά 1047 πλακίδια MGRS, καλύπτοντας έκταση 10,36 εκατομμύρια  $km^2$ . Οι τοποθεσίες περιλαμβάνουν τόσο μεγάλες περιοχές σαν τη Δυτική Ινδία, Νότια Αφρική, Γερμανία, όσο και μικρές περιοχές σαν το Βέλγιο, αλλά και μεμονωμένα πλακίδια MGRS. Αυτή η ποικιλία τοποθεσιών,

που περιλαμβάνει διαφορετικά κλιματολογικά και οικολογικά χαρακτηριστικά, συμβάλλει στη δημιουργία ενός αξιόπιστου συνόλου δεδομένων. Οι εικόνες HLS, έχουν διαστάσεις 3600 x 3600 εικονοστοιχείων, που αντιστοιχούν σε περιοχή έκτασης 109.8 x 109.8 τετραγωνικών χιλιομέτρων και υπερκαλύπτονται ελαφρώς. Τα δεδομένα αυτά παρέχουν 15 κανάλια, τα οποία κυμαίνονται από το ορατό έως το υπέρυθρο, για την εκπαίδευση του Prithvi χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα 6 κανάλια του δορυφόρου Landsat - HLSL30 (κανάλια: 2, 3, 4, 8A, 11 και 12). [18]

#### Χρονική επισκόπηση των HLS

Η χρονική κάλυψη έχει ως αφετηρία τον Απρίλιο του 2013 με την εκτόξευση του Landsat 8, ενώ τα προϊόντα Sentinel-2A/MSI αντίστοιχα, τον Οκτώβριο του 2015.

Το σύνολο δεδομένων v1.3 περιλαμβάνει 68.878 προϊόντα S10/S30 και 165.083 προϊόντα L30. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Ευρώπη είναι η καλύτερα αντιπροσωπευόμενη ήπειρος.

#### **Πρόσθαση στα δεδομένα HLS**

Η πρόσθαση στα δεδομένα στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους. Η πρώτη μέθοδος υλοποιήθηκε μέσω της πλατφόρμας Earthdata Search, επιλέγοντας τα επιθυμητά κανάλια της εικόνας, τη γεωγραφική περιοχή ενδιαφέροντος, το ποσοστό κάλυψης νεφών, καθώς και το χρονικό διάστημα λήψης των δεδομένων. Τα δεδομένα εξήχθησαν σε μορφή TIF, με κάθε μπάντα να αποθηκεύεται ξεχωριστά για περαιτέρω επεξεργασία. Η δεύτερη μέθοδος περιλάμβανε τη χρήση της πλατφόρμας Sentinel Hub, η οποία αναλύεται λεπτομερώς στην ενότητα 2.2.1.

## **2.2 Προεπεξεργασία δεδομένων**

Η συλλογή και η προεπεξεργασία δεδομένων αποτελούν θεμελιώδη παράγοντες για τη βέλτιστη απόδοση ενός νευρωνικού δικτύου. Ως εκ τούτου, διεξήχθη εις βάθος ανάλυση των δεδομένων τηλεπισκόπησης και των σημειακών δεδομένων λειζερ. Η χρονική διάσταση των δεδομένων είναι εξίσου κρίσιμη με τη χωρική τους οριοθέτηση, καθώς το ύψος των δέντρων υπόκειται σε συνεχείς μεταβολές, που οφείλονται σε φυσικές καταστροφές, όπως οι πυρκαγιές, ή σε ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, όπως η αποψίλωση. Συνεπώς, για να διασφαλιστεί η συμβατότητα και η συγκρισιμότητα των δύο τύπων δεδομένων, επιλέχθηκε ως κοινή χρονική αναφορά, το έτος 2019. Αρχικά, παρουσιάζονται τα δεδομένα που σχετίζονται με την πρώτη περιοχή μελέτης, από τα οποία προκύπτει ο πρώτος χάρτης. Στη συνέχεια, αναλύονται τα δεδομένα που αφορούν τη δεύτερη περιοχή μελέτης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του δεύτερου χάρτη.

### **2.2.1 Διαδικασίες προεπεξεργασίας δεδομένων του πρώτου χάρτη**

#### **Περιοχή Μελέτης - AOI1**

Όσον αφορά την περιοχή ενδιαφέροντος, μελετήθηκε μία περιοχή εντός της Ελβετίας. Στα πλαίσια της έρευνας, διεξήχθησαν επαναλαμβανόμενα πειράματα για την ακριβή

εκτίμηση της κατάλληλης έκτασης μελέτης. Εν τέλει, επιλέχθηκε η περιοχή ενδιαφέροντος, η οποία απεικονίζεται στην εικόνα 2.7 και καλύπτει συνολική επιφάνεια  $72.3 \text{ km}^2$ .



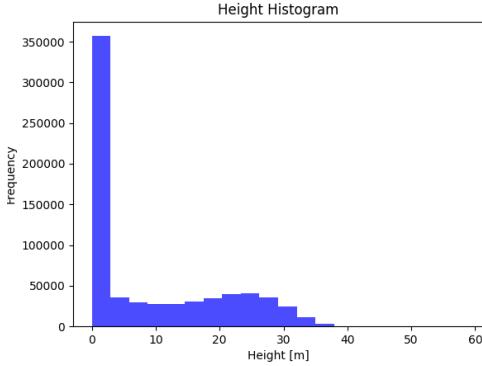
Σχήμα 2.7: Η οριοθετημένη περιοχή ενδιαφέροντος για την εκπαίδευση του νευρωνικού στην Ελβετία, συνολικής έκτασης περίπου  $72.3$  τετραγωνικών χιλιομέτρων.

Σύμφωνα με δεδομένα από αερομεταφερόμενο LiDAR όργανο, η περιοχή αυτή για το έτος 2019 χαρακτηρίζεται από μέσο ύψος βλάστησης  $9.14 \text{ m}$ , με το μέγιστο ύψος να αγγίζει τα  $58.31 \text{ m}$ . Στα διαγράμματα 2.8 παρουσιάζεται η κατανομή του ύψους των δέντρων στην περιοχή μελέτης. Η Ελβετία βρίσκεται σε εύκρατη κλιματική ζώνη. Οπότε δεν υπάρχουν εξαιρετικά κρύοι χειμώνες ή εξαιρετικά ζεστά καλοκαίρια. Η θερμοκρασία είναι μέτρια, αλλά ο καιρός και η αλλαγή του κλίματος στην Ελβετία μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές ανάλογα κυρίως με το υψόμετρο. [33]

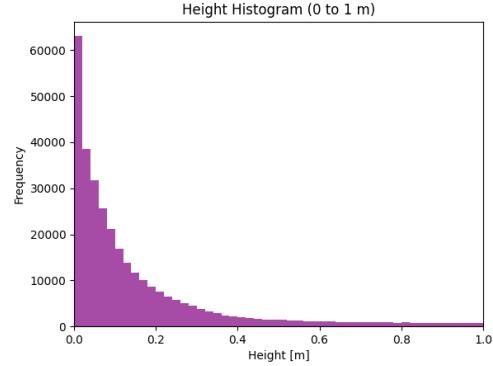
### Προεπεξεργασία των δεδομένων GEDI

Στα στάδια προεπεξεργασίας των δεδομένων της αποστολής GEDI, πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω διαδικασίες. Αρχικά, μέσω της πλατφόρμας Earthdata Search, ορίστηκαν τα χρονικά όρια για την αναζήτηση δεδομένων, θέτοντας ως αρχική ημερομηνία  $2019-01-01 00:00:00$  και ως τελική ημερομηνία  $2019-12-31 23:59:59$ . Στη συνέχεια, περιορίστηκε η χωρική έκταση της αναζήτησης, με την εισαγωγή του αρχείου GeoJSON που περιγράφει την περιοχή ενδιαφέροντος. Αφού αποκτήθηκαν τα αρχεία HDF5, το επόμενο βήμα περιλάμβανε τη συγχώνευση αυτών των αρχείων και την οργάνωσή τους σε ένα κοινό dataframe. Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε φίλτραρισμα των βολών, διατηρώντας μόνο εκείνες που είχαν σημαία ποιότητας (quality flag) ίση με ένα, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, αποφεύγοντας τυχόν αποπροσανατολισμούς, που θα μπορούσαν να προκληθούν από κακής ποιότητας δεδομένα.

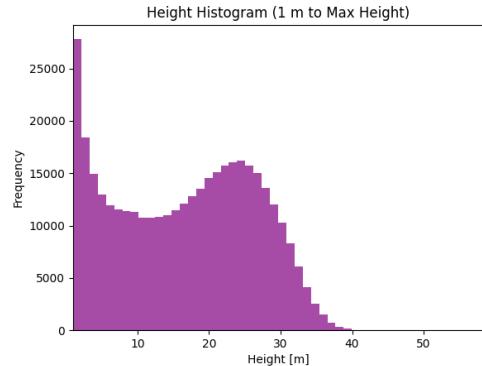
Αρχικά, το σύνολο των δεδομένων περιλάμβανε  $7,321$  βολές. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου ποιότητας, παρέμειναν  $867$  βολές υψηλής ποιότητας. Αυτό σημαίνει ότι το ποσοστό των βολών που απορρίφθηκαν λόγω κακής ποιότητας ανήλθε σε περίπου  $88.13\%$ . Οι βολές υψηλής ποιότητας απεικονίζονται στην Εικόνα 2.9. Παρά το γεγονός ότι θα μπορούσαν να εφαρμοστούν επιπλέον φίλτρα ποιότητας, όπως ο περιορισμός της δειγ-



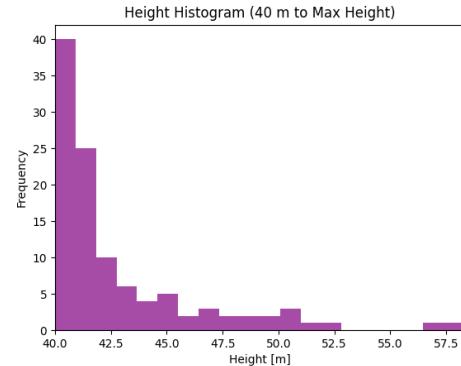
(α') Ιστόγραμμα της κατανομής των υψών της χλωρίδας στην περιοχή μελέτης.



(β') Επισκόπηση του ιστογράμματος για τιμές ύψους από 0 έως 1 μέτρο, όπου φαίνεται να ανήκει η πλειοψηφία της βλάστησης.



(γ') Επισκόπηση του ιστογράμματος για τιμές ύψους από 1 μέτρο έως το μέγιστο ύψος βλάστησης.



(δ') Επισκόπηση του ιστογράμματος για τιμές ύψους από 40 μέτρα έως το μέγιστο ύψος βλάστησης.

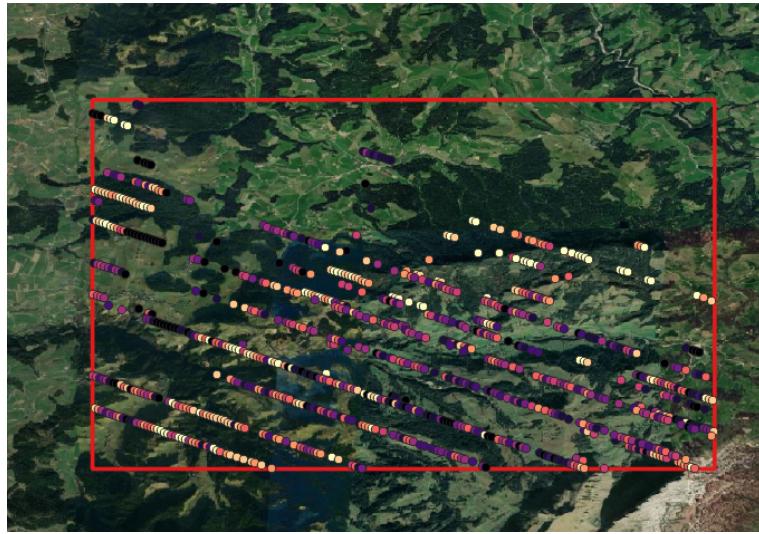
**Σχήμα 2.8:** Ιστογράμματα των τιμών του ύψους βλάστησης της περιοχής μελέτης για το έτος 2019, που προέκυψαν από αερομεταφερόμενο όργανο LiDAR.

ματοληψίας σε συγκεκριμένες εποχές ή ώρες της ημέρας, αυτό δεν επιλέχθηκε λόγω του ήδη περιορισμένου ποσοστού βολών υψηλής ποιότητας.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές ερευνητικές μελέτες προτιμάται η χρήση σχετικών υψών με μικρότερη επιστροφή ενέργειάς αντί της μετρικής rh100, όπως οι rh99 έως rh95 [34]. Για την αξιολογήση της επίδραση αυτών των αποκλίσεων, συγκρίναμε τις τρεις πρώτες τιμές του δείκτη σχετικού ύψους. Όπως αποδεικνύεται από το ιστόγραμμα 2.10, οι διαφορές θα μπορούσαν να θεωρηθούν αιμελητέες και δεν αναμένεται να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση του μοντέλου.

### Προεπεξεργασία των δεδομένων HLS

Στο χωρίο αυτό θα αναλυθεί η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων HLS. Για την απόκτηση των δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη Sentinel Hub API, η οποία επιτρέπει τη φόρτωση δεδομένων βάσει κριτηρίων, όπως το έτος και η περιοχή ενδιαφέροντος (AOI). Αρχικά μέσω ενός αιτήματος προς τον server για τη λήψη δεδομένων από τα S30 δεδομένα, καθορίστηκαν οι επιθυμητές ιδιότητες, δηλαδή η χρονική πε-



**Σχήμα 2.9:** Οι βολές υψηλής ποιότητας που διατηρήθηκαν μετά την εφαρμογή του φίλτρου αναπαρίστανται, όπου το χρώμα υποδηλώνει την ένταση του σχετικού ύψους (rh100). Οι τιμές του rh100 έχουν κατηγοριοποιηθεί σε 10 ομάδες, με μια διαβάθμιση χρωμάτων τύπου Magma, όπου οι χαμηλότερες τιμές (από 2,91 έως 4,266) απεικονίζονται με το πιο σκουρόχρωμο τμήμα της κλίμακας και αντιπροσωπεύουν τα χαμηλότερα ύψη. Αντίθετα, οι υψηλότερες τιμές (από 36,394 έως 87,65) αποδίδονται με το πιο ανοιχτό χρώμα, υποδεικνύοντας τα μεγαλύτερα ύψη. Παρατηρείται, ωστόσο, ότι υπάρχουν αρκετές περιοχές με έλλειψη παρουσίας βολών, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει την ακριβή εκτίμηση του ύψους.

ρίοδος, η περιοχή ενδιαφέροντος, η μορφή επιστροφής των δεδομένων σε εικόνα TIFF, καθώς και η εφαρμογή φίλτρου για την επιλογή πλακιδίου με τη χαμηλότερη νεφοκάλυψη, βελτιστοποιώντας έτσι την ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση. Να σημειωθεί ότι το μοντέλο Pritvhi είχε προ-εκπαιδευτεί με μόνο έξι κανάλια των HLS, ως εκ τούτου χρησιμοποιήθηκαν οι 6 μπάντες [2.1].

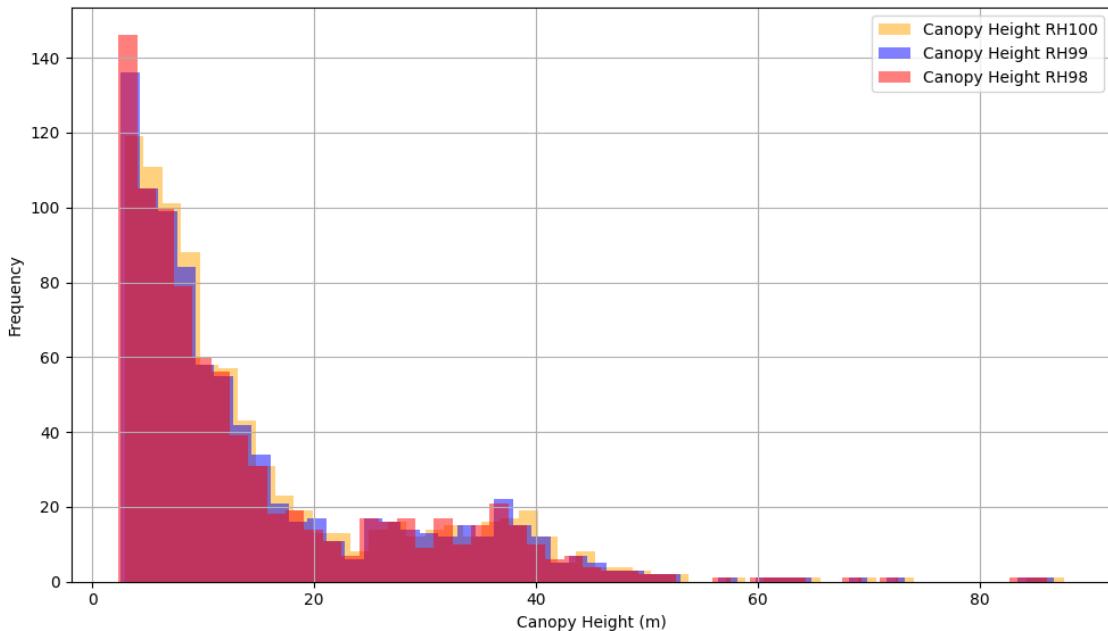
Παράμετρος	Περιγραφή
bbox	Οριοθέτηση της περιοχής ενδιαφέροντος σε μορφή bounding box.
constellation	Ορισμός του αστερισμού δεδομένων: HLS : SENTINEL – S30.
mosaickingOrder	Τάξη μωσαϊκού με βάση την ελάχιστη νεφοκάλυψη: leastCC.
size	Υψος, πλάτος: (512, 512).
timeRange	Χρονικό διάστημα για τη λήψη δεδομένων: Από 2019-01-01T00:00:00Z έως 2019-12-31T00:00:00Z.
bands	6 επιλεγμένα κανάλια: Blue, Green, Red, NIR Narrow, SWIR1, SWIR2.
format	Μορφή επιστροφής δεδομένων: εικόνα σε TIFF και μεταδεδομένα σε JSON.

Πίνακας 2.1: Παράμετροι για τη φόρτωση δεδομένων HLS μέσω του Sentinel Hub API.

Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν δύο εικόνες HLS με χαμηλή κάλυψη νεφών:

- **Εικόνα 1:**

- Όνομα αρχείου: hls\_HLS.S30.T32TMS.2019045T103129.v2.0\_2024-08-13\_1307.tif
- Κάλυψη νεφών: 6%



Σχήμα 2.10: Σύγκριση των μετρικών σχετικού ύψους με επιστροφές ενέργειας RH100, RH99, RH98.

- Ημερομηνία: 14 Φεβρουαρίου 2019, 10:37:59 UTC

- **Εικόνα 2:**

- Όνομα αρχείου: hls\_HLS.S30.T32TMS.2019052T102039.v2.0\_2024-08-13\_1302.tif
- Κάλυψη νεφών: 0%
- Ημερομηνία: 21 Φεβρουαρίου 2019, 10:28:02 UTC

Αυτές οι εικόνες επιλέχθηκαν λόγω της ελάχιστης νεφοκάλυψης τους, γεγονός που διασφαλίζει την ποιότητα των δεδομένων και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης 2.11

Σημειώνεται ότι, παρά την πολύ χαμηλή κάλυψη νεφών, το τελικό αποτέλεσμα ενδέχεται να μην είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ημερομηνίες επιλογής των εικόνων είναι πολύ κοντινές μεταξύ τους. Επιπλέον, καθώς η επιλογή έγινε κατά τη διάρκεια του χειμώνα, υπάρχει πιθανότητα η περιοχή να είναι καλυμμένη με χιόνι και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στη δεύτερη εικόνα 2.11δ' φαίνεται να υπάρχει μια ανωμαλία στα κανάλια σε ορισμένες περιοχές, αυτά τα στοιχεία θα μπορούσαν να περιπλέξουν την ανάλυσή μας. Ωστόσο, αυτή η κατάσταση μπορεί να λειτουργήσει ως πείραμα, για να αξιολογήσουμε την απόδοση του μοντέλου υπό αυτές τις συνθήκες.

Η τελική μορφή των δεδομένων που προορίζονται για την εκπαίδευση του μοντέλου απεικονίζεται στην Εικόνα 2.12.

## **2.2.2 Διαδικασίες προεπεξεργασίας δεδομένων του δεύτερου χάρτη**

### **Περιοχή Μελέτης - AOI2**

Η δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, *AOI2*, περιλαμβάνει τμήματα της *AOI1* και βρίσκεται επίσης εντός των γεωγραφικών ορίων της Ελβετίας. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.13, η περιοχή καλύπτει συνολική έκταση  $1306.08 \text{ km}^2$ . Η επιλογή της βασίστηκε στη μεγαλύτερη χωρική της κάλυψη, η οποία συμβάλλει στην αύξηση του όγκου των διαθέσιμων δεδομένων. Επιπλέον, η *AOI2* περιλαμβάνει υδάτινα σώματα, γεγονός που επιτρέπει την αξιολόγηση της ικανότητας του μοντέλου να χειρίζεται περιοχές με διαφορετικά γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, ενισχύοντας τη γενίκευση και την αξιοπιστία των προβλέψεων του.

### **Προεπεξεργασία των δεδομένων GEDI**

Αρχικά, όπως και στην περίπτωση της *AOI1*, μέσω της πλατφόρμας Earthdata Search, ορίστηκαν τα χρονικά όρια για την αναζήτηση δεδομένων, θέτοντας ως αρχική ημερομηνία 2019-01-01 00:00:00 και ως τελική ημερομηνία 2019-12-31 23:59:59, και ως περιοχή ενδιαφέροντος το αντίστοιχο GeoJSON αρχείο. Στη συγκεκριμένη περιοχή, η διαδικασία φιλτραρίσματος των βολών διαφοροποιήθηκε. Εκτός από τη χρήση της σημαίας ποιότητας (Quality Flag), διατηρώντας μόνο τις βολές με τιμή ίση με 1, εφαρμόστηκε επιπλέον ένα φίλτρο για τις υδάτινες περιοχές. Συγκεκριμένα, η παράμετρος *landsat\_water\_persistence*, η οποία υποδεικνύει την παρουσία μόνιμων υδάτινων σωμάτων (για τιμές μεγαλύτερες του 10), χρησιμοποιήθηκε για να εντοπιστούν οι σχετικές βολές. Σε περιπτώσεις όπου οι βολές αντιστοιχούσαν σε υδάτινες περιοχές, το ύψος του θόλου (Canopy Height) τέθηκε μηδενικό. Έτσι, οι βολές που πληρούσαν είτε το κριτήριο της ποιότητας σημαίας είτε το κριτήριο των υδάτινων περιοχών παραμένουν για περαιτέρω ανάλυση. Επιπρόσθετα, στην περιοχή *AOI2* χρησιμοποιήθηκε η μετρική σχετικού ύψους *rh95* αντί της *rh100*.

Αρχικά, το σύνολο των δεδομένων περιλάμβανε 121,297 βολές. Μετά την εφαρμογή του φίλτρου ποιότητας, παρέμειναν 45,772 βολές υψηλής ποιότητας. Αυτό σημαίνει ότι το ποσοστό των βολών που απορρίφθηκαν λόγω κακής ποιότητας ανήλθε σε περίπου 62.2%. Οι βολές υψηλής ποιότητας απεικονίζονται στην Εικόνα 2.14.

### **Προεπεξεργασία των δεδομένων HLS**

Για τη δεύτερη περιοχή *AOI2*, η διαδικασία απόκτησης των δεδομένων *HLS* διαφοροποιήθηκε. Χρησιμοποιώντας το εργαλείο Earthdata Search, αποκτήθηκαν τρεις εικόνες, με τα χρονικά όρια και την περιοχή ενδιαφέροντος να καθορίζονται αρχικά. Επιλέχθηκαν εικόνες με τη χαμηλότερη νεφοκάλυψη, προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα των δεδομένων. Επιπλέον, για τη διασφάλιση της σύγκρισης των συνόλων δεδομένων, οι εικόνες επελέγησαν να καλύπτουν διαφορετικά χρονικά διαστήματα, αποφεύγοντας, όσο ήταν εφικτό, τους χειμερινούς μήνες για να ελαχιστοποιήθούν τα προβλήματα που ενδέχεται να προκύψουν από τη συσσώρευση χιονιού στην επιφάνεια της Γης.

Για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκαν τρεις εικόνες *HLS* με διαστάσεις (Height, Width, Channels) = (912, 1601, 6).

- **Εικόνα 1:**

- Όνομα αρχείου: HLS.S30.T32TLS.2019180T103031.v2.0
- Κάλυψη νεφών: 1%
- Ημερομηνία: 29 Ιουνίου 2019, 10:38:09 UTC

• **Εικόνα 2:**

- Όνομα αρχείου: HLS.S30.T32TLS.2019255T103019.v2.0
- Κάλυψη νεφών: 2%
- Ημερομηνία: 12 Σεπτεμβρίου 2019, 10:38:04 UTC

• **Εικόνα 3:**

- Όνομα αρχείου: HLS.S30.T32TLS.2019230T103031.v2.0
- Κάλυψη νεφών: 6%
- Ημερομηνία: 18 Αυγούστου 2019, 10:38:07 UTC

Μετά την επιλογή των δεδομένων, είναι αναγκαία η προσαρμογή τους προκειμένου να τροφοδοτηθεί το προεκπαιδευμένο μοντέλο Prithvi. Το συγκεκριμένο μοντέλο δέχεται δεδομένα σε μορφή βίντεο, οργανωμένα ως (Batch, Channel, Temporal dimension, Height, Width). Ένα ακόμα βήμα που υποβάλλονται οι πολυφασματικές εικόνες είναι η κανονικοποίηση τους. Συγκεκριμένα, για κάθε κανάλι αφαιρείται ο μέσος όρος τους και διαιρείται με την τυπική απόκλισης. Τέλος, η κανονικοποιημένη εικόνα μετατρέπεται σε ταυτοτή και προσαρμόζεται η διάστασή της, έτσι ώστε να είναι έτοιμη προς χρήση στο μοντέλο μηχανικής μάθησης.

## **2.3 Δημιουργία συνόλων εκπαίδευσης, επικύρωσης και δοκιμής**

### **2.3.1 Διαχείριση των συνόλων δεδομένων**

Αναγκαίο ήταν η δημιουργία δομών που είναι υπεύθυνες για τη διαχείριση και την οργάνωση των συνόλων εκπαίδευσης, επικύρωσης και δοκιμής, επιτρέποντας την ομαλή έναρξη της διαδικασίας εκπαίδευσης του μοντέλου.

Η δημιουργία των τελικών συνόλων δεδομένων γίνεται με το συνδυασμό των δεδομένων GEDI, τα οποία παρέχουν πληροφορίες για το ύψος της βλάστησης σημειακά και αποτελούν τα δεδομένα αναφοράς του νευρωνικού (labels/target data), με τις δύο πολυφασματικές εικόνες HLS, οι οποίες λειτουργούν ως είσοδοι στο μοντέλο και αντιπροσωπεύουν την ίδια περιοχή ενδιαφέροντος, αλλά σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Για τη σύνδεση των μετρήσεων των δεδομένων GEDI με τις εικόνες HLS εφαρμόζεται γεωχωρική αντιστοίχιση. Συγκεκριμένα, ο στόχος είναι με βάση τις γεωγραφικές συντεταγμένες της κάθε βολής του GEDI να αντιστοιχιστούν οι τιμές σχετικού ύψους σε εικονοστοιχεία της εικόνας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η ανάλυση των εικόνων HLS είναι 30 μέτρα ανά pixel, ενώ το αποτύπωμα του GEDI είναι 25 μέτρα. Έτσι λοιπόν αποφασίστηκε ότι σε κάθε βολή, οι τιμές για το ύψος της βλάστησης αποδίδονται στο κεντρικό εικονοστοιχείο της αντίστοιχης περιοχής στην εικόνα HLS. Στις περιπτώσεις

όπου η βολή βρίσκεται εντός των ορίων της εικόνας HLS, η τιμή του GEDI εφαρμόζεται απευθείας, ενώ στις υπόλοιπες περιοχές, όπου δεν υπάρχουν μετρήσεις GEDI, η τιμή αντιστοιχεί σε NaN (μη διαθέσιμη τιμή).

## ΑΟΙ1

Ο τελικός πίνακας που περιέχει τις τιμές του ύψους είναι κοινός για τις δύο εικόνες, εφόσον αντιπροσωπεύουν το ίδιο χωρίο. Η επιλογή των δύο διαφορετικών χρονικών στιγμιότυπων από τις εικόνες HLS εδράζεται στην ανάγκη ενίσχυσης της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Η χρήση μόνο μιας εικόνας που αντιπροσωπεύει τη γεωγραφική έκταση του ενδιαφέροντος αποδείχθηκε ανεπαρκής και γρήγορα οδήγησε σε φαινόμενο υπερπροσαρμογής (overfitting) του μοντέλου. Συνολικά, ο πίνακας εικονοστοιχείων με τις ετικέτες που αφορούν το ύψος της βλάστησης περιλαμβάνει 262,144 εικονοστοιχεία. Η διάσταση της εικόνας είναι 512 pixels τόσο σε πλάτος, όσο και σε ύψος. Το ποσοστό των εικονοστοιχείων που περιέχουν έγκυρες τιμές (δηλαδή τιμές που δεν είναι NaN) ανέρχεται στο 0.33%. Αυτό συμβαίνει διότι, μετά την εφαρμογή του φίλτρου ποιότητας, παρέμειναν μόλις 867 βολές GEDI για τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος.

Για τη δημιουργία των συνόλων δεδομένων, η εικόνα και ο πίνακας ετικετών εισάγονται στην κλάση, η οποία σχεδιάστηκε για να χωρίζει την εικόνα σε μικρότερα χωρία, γνωστά ως tiles. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το μέγεθος κάθε χωρίου καθορίστηκε σε 50x50 pixels, έπειτα από πολλές πειραματικές δοκιμές με διαφορετικά μεγέθη. Αν και εξετάστηκαν μεγαλύτερα χωρία, διαπιστώθηκε ότι το ύψος και πλάτος των 50 pixels προσφέρει την καλύτερη ισορροπία μεταξύ της διατήρησης της πληροφορίας και της επάρκειας δεδομένων. Επίσης, επιλέχθηκε η προσθήκη επικαλυπτόμενων περιοχών για την αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων δεδομένων. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ποσοστό επικάλυψης 50%.

Για να χωρίσουμε μία εικόνα διαστάσεων  $H \times W$  (ύψος επί πλάτος) σε πλακίδια μεγέθους  $t \times t$  με επικάλυψη  $\sigma$ , ακολουθούμε τη διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω.

1. Υπολογισμός βήματος εκκίνησης:

$$step\_size = t - o$$

2. Καθορισμός σειρών και στηλών εκκίνησης:

$$row\_starts = \{r \mid r = k \cdot step\_size, k = 0, 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{H}{step\_size} \right\rfloor\}$$

$$col\_starts = \{c \mid c = m \cdot step\_size, m = 0, 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{W}{step\_size} \right\rfloor\}$$

3. Δημιουργία πλέγματος πλακιδίων:

$$tiles = \{(r_i, c_j) \mid r_i \in row\_starts, c_j \in col\_starts\}$$

4. Εφαρμογή padding:

$$padding\_height = t - tile\_height$$

$$\begin{aligned} padding\_width &= t - tile\_width \\ padded &= F.pad(tile, (padding\_width, padding\_height)) \end{aligned}$$

Για κάθε πλακίδιο που είναι μικρότερο από  $t \times t$ , εφαρμόζεται padding, ώστε όλα τα πλακίδια να διατηρούν το ίδιο μέγεθος. Αυτό εξασφαλίζεται με την προσθήκη μηδενικών τιμών ή NaN, ανάλογα με το αν πρόκειται για πλακίδιο εικόνας ή ετικέτας. Αυτή η διαδικασία διασφαλίζει ότι όλα τα πλακίδια είναι ομοιόμορφα και έτοιμα για περαιτέρω επεξεργασία, ανεξάρτητα από το αν τα  $H$  και  $W$  είναι πολλαπλάσια του βήματος  $s$ .

Τα δεδομένα χωρίστηκαν σε τρία σύνολα, το 70% των δεδομένων διατέθηκε για την εκπαίδευση, το 10% για την επικύρωση και το 20% για τη δοκιμή, με μεγέθη 560, 80 και 160 αντίστοιχα.

Το μέγεθος παρτίδας αποτελεί σημαντική υπερπαράμετρο για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου, καθώς καθορίζει τον αριθμό των δειγμάτων που επεξεργάζονται σε κάθε βήμα κατά την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου, επιτρέπει την ανανέωση των βαρών βασισμένη σε ένα σύνολο δειγμάτων και έχει αντίκτυπο στην ακρίβεια και την υπολογιστική απόδοση της διαδικασίας εκπαίδευσης. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε, μετά από πειραματισμούς με διαφορετικά μεγέθη παρτίδων (8, 16 και 32), το μέγεθος των 16 ως το βέλτιστο:

$$batch\_size = 16$$

Όσον αφορά το σύνολο εκπαίδευσης, χρησιμοποιούμε shuffle=True για τυχαία ανακατανομή των δειγμάτων, ενώ για τα επικυρωτικά και δοκιμαστικά σύνολα θέτουμε shuffle=False.

Οι διαστάσεις των batches που προκύπτουν φαίνονται στον πίνακα 2.2 και η συνολική κατανομή των batches είναι: 35 για το εκπαιδευτικό σύνολο, 5 για το επικυρωτικό και 10 για το δοκιμαστικό.

Σύνολο	Διαστάσεις εικόνας εισόδου	Διαστάσεις δεδομένων ετικέτας
Εκπαίδευση	batch_x:[16, 6, 1, 50, 50]	batch_y: [16, 1, 50, 50]
Επικύρωση	batch_x: [16, 6, 1, 50, 50]	batch_y: [16, 1, 50, 50]
Δοκιμή	batch_x: [16, 6, 1, 50, 50]	batch_y: [16, 1, 50, 50]

Πίνακας 2.2: Διαστάσεις των batches για τα διαφορετικά σύνολα δεδομένων

Στις εικόνες 2.15 παρουσιάζονται δείγματα των εισερχόμενων χωρίων (tiles), καθώς και τα αντίστοιχα δεδομένα ετικέτας που προέρχονται από τις μετρήσεις του συστήματος GEDI. Σημειώνεται ότι σε ορισμένες περιπτώσεις οι εικόνες παρέχουν σημαντικές πληροφορίες, ενώ σε άλλες παρατηρείται απουσία βολών, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των προβλέψεων του μοντέλου.

## ΑΟΙ2

Η συνολική κατανομή των batches είναι: 276 για το εκπαιδευτικό σύνολο, 27 για το επικυρωτικό και 53 για το δοκιμαστικό.

Στις εικόνες 2.16 παρουσιάζονται δείγματα των εισερχόμενων χωρίων (tiles, καθώς και τα αντίστοιχα δεδομένα ετικέτας που προέρχονται από τις μετρήσεις του συστήματος GEDI.

<b>Σύνολο</b>	<b>Διαστάσεις εικόνας εισόδου</b>	<b>Διαστάσεις δεδομένων ετικέτας</b>
Εκπαίδευση	batch_x: [16, 6, 1, 32, 32]	batch_y: [16, 1, 32, 32]
Επικύρωση	batch_x: [16, 6, 1, 32, 32]	batch_y: [16, 1, 32, 32]
Δοκιμή	batch_x: [16, 6, 1, 32, 32]	batch_y: [16, 1, 32, 32]

Πίνακας 2.3: Διαστάσεις των batches για τα διαφορετικά σύνολα δεδομένων της δεύτερης περιοχής ενδιαφέροντος.

## 2.4 Μοντέλο

Το Prithvi χρησιμοποιεί έναν αυτοεποπτευόμενο κωδικοποιητή βασισμένο στην αρχιτεκτονική Vision Transformer (ViT), εφαρμόζοντας τη μέθοδο μάθησης Masked Auto-Encoder [35]. Το μοντέλο, αρχικά, έχει εκπαιδευτεί να ανακατασκευάζει τις εικόνες εισόδου, στις οποίες έχει εφαρμοστεί μάσκα, χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά της ασύμμετρης αρχιτεκτονικής κωδικοποιητής-αποκωδικοποιητή με κορμό ViT όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.17.

### 2.4.1 Αρχιτεκτονική των μοντέλων

Για να προσαρμοστεί το Prithvi σε εξειδικευμένες διεργασίες, χρησιμοποιήθηκαν τα προεκπαιδευμένα βάρη του κωδικοποιητή, ενώ τα βάρη του αποκωδικοποιητή εκπαιδεύτηκαν εκ νέου, ώστε να μάθει συγκεκριμένες εργασίες. Με τη διαδικασία αυτή, γνωστή ως fine-tuning, επιτρέπεται στο μοντέλο να εξειδικεύεται σε διαφορετικά tasks, διατηρώντας τις ήδη αποκτηθείσες γνώσεις του κωδικοποιητή. Η λογική της προσέγγισης fine-tuning παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.18.

#### ΑΟΙ1

Στην παρούσα διπλωματική, για την πρώτη περίπτωση χάρτη, επιλέχθηκε η διατήρηση των προεκπαιδευμένων βαρών του κωδικοποιητή, ενώ ο αποκωδικοποιητής αντικαταστάθηκε με ένα νέο head, εξειδικευμένο στη διαδικασία πρόβλεψης του ύψους της βλάστησης. Συγκεκριμένα, τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά (features) της εικόνας από τον κωδικοποιητή χρησιμοποιούνται ως είσοδος στον νέο αποκωδικοποιητή, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος για την εκτέλεση του συγκεκριμένου έργου πρόβλεψης. Ο κωδικοποιητής εξάγει χαρακτηριστικά από τις πολυφασματικές εικόνες, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ως είσοδος στον αποκωδικοποιητή (CanopyHeightHead), ο οποίος υλοποιεί μια σειρά από μπλοκ ανύψωσης (upsampling blocks) με τη χρήση συνελίξεων 2D (Conv2D), έτσι ώστε να επιτρέψει την ανακατασκευή των χαρακτηριστικών σε μεγαλύτερες κλίμακες, διατηρώντας τη χωρική πληροφορία.

Συνολικά, περιλαμβάνει τέσσερα επίπεδα ανύψωσης (upsampling layers). Κάθε επίπεδο ανύψωσης ακολουθείται από μια 2D συνελικτική στρώση με πυρήνα 3x3 και ως συνάρτηση ενεργοποίησης τη ReLU, ενισχύοντας τη δυνατότητα του μοντέλου να διαχειρίζεται μη γραμμικές σχέσεις και να μαθαίνει πολύπλοκα χαρακτηριστικά. Τέλος, η τελική στρώση Conv2d με πυρήνα 1x1 παράγει τις προβλέψεις ύψους βλάστησης, επιτρέποντας τη μετατροπή των λανθάνουσων αναπαραστάσεων σε ακριβείς εκτιμήσεις. Η αρχιτεκτονική του μοντέλου παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.19.

Η συνάρτηση απώλειας που εφαρμόζεται για την εκπαίδευση του μοντέλου είναι η μέση

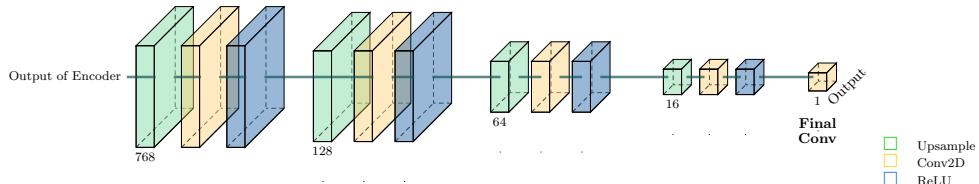
τετραγωνική απώλεια (MSE) μεταξύ των πραγματικών τιμών αναφοράς του GEDI και προβλεπόμενων τιμών 2.1. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα φιλτράρονται ώστε να αποκλειστούν οι περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει διαθέσιμη τιμή αναφοράς GEDI (τιμές NaN). Δημιουργείται μια μάσκα για να εντοπιστούν αυτές οι θέσεις, οι οποίες στη συνέχεια αφαιρούνται. Έτσι, παραμένουν μόνο τα στοιχεία με έγκυρες τιμές GEDI. Με βάση τα φιλτραρισμένα δεδομένα, υπολογίζεται η απώλεια για κάθε σημείο και επιστρέφεται η μέση τιμή των σφαλμάτων MSE.

$$Loss = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (2.1)$$

όπου:

- $N$  είναι ο αριθμός των δειγμάτων (ή εικονοστοιχείων).
- $\hat{Y}_i$  είναι η προβλεπόμενη τιμή ύψους της βλάστησης για το  $i$ -οστό δείγμα.
- $Y_i$  είναι η πραγματική τιμή (GEDI) ύψους της βλάστησης για το  $i$ -οστό δείγμα.

Αυτή η μέθοδος υπολογισμού του σφάλματος επιτρέπει στο μοντέλο να μάθει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εξαγόμενων χαρακτηριστικών και των πραγματικών τιμών ύψους, βελτιώνοντας την ικανότητά του να γενικεύει σε άγνωστα δεδομένα.



**Σχήμα 2.19:** Αρχιτεκτονική του αποκωδικοποιητή για το πρώτο πείραμα. Η έξοδος του encoder, άρα η είσοδος του decoder, είναι ένας χάρτης χαρακτηριστικών (feature map), που αποτελείται από τα flattened patches της αρχικής εικόνας. Κάθε patch της εικόνας χαρτογραφείται σε ένα embedding vector, το οποίο περιέχει πληροφορίες τόσο για το περιεχόμενο του ίδιου του patch, όσο και για τις σχέσεις του με τα υπόλοιπα patches χάρη στον μηχανισμό self-attention του transformer.

## ΑΟΙ2

Μια εναλλακτική προσέγγιση εφαρμόστηκε στην περίπτωση του δεύτερου χάρτη. Συγκεκριμένα, διατηρήθηκε σχεδόν όλος ο αποκωδικοποιητής, αλλά το τελευταίο στρώμα αφαιρέθηκε και αντικαταστάθηκε με ένα νέο head, το οποίο προορίζεται για την εκτίμηση της κατακόρυφης δομής της βλάστησης στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η διατήρηση και φόρτωση των περισσότερων από τα προεκπαιδευμένα βάρη αναμένεται να οδηγήσει σε βελτιωμένα αποτελέσματα.

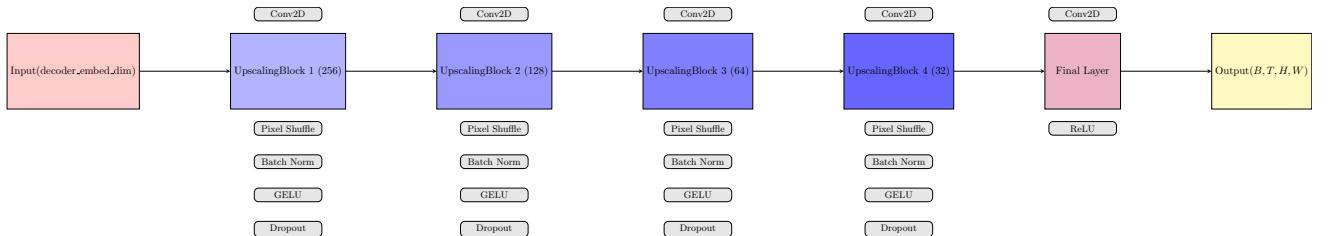
Η αρχιτεκτονική του νέου μοντέλου χρησιμοποιεί επίσης 4 επίπεδα ανύψωσης (upsampling blocks), κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από ένα στρώμα συνέλιξης Conv2D με πυρήνα 3x3 και κατάλληλο padding, ακολουθούμενο από την τεχνική PixelShuffle για την αύξηση της ανάλυσης των χαρακτηριστικών. Η βασική ιδέα πίσω από αυτήν είναι να αναδιοργανώσει τα κανάλια της εικόνας, αναδιατάσσοντας τα δεδομένα που υπάρχουν σε διαφορετικά κανάλια, επιτρέποντας την αύξηση της ανάλυσης της εικόνας

χωρίς να απαιτούνται πρόσθετες υπολογιστικά δαπανηρές διαδικασίες [36]. Για τη βελτίωση της εκπαίδευσης, κάθε μπλοκ περιλαμβάνει κανονικοποίηση batch normalization, ενώ ως συνάρτηση ενεργοποίησης χρησιμοποιείται η GELU (Gaussian Error Linear Unit), η οποία σε αρχιτεκτονικές transformer έχει βρει μεγάλη εφαρμογή [37]. Επιπλέον, εφαρμόζεται η τεχνική Dropout με ποσοστό απόρριψης 0.3 για την αποφυγή υπερπροσαρμογής του μοντέλου κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, ενισχύοντας την γενίκευση του.

Τα χαρακτηριστικά που παράγονται από αυτά τα μπλοκ περνούν μέσω ενός τελικού στρώματος συνέλιξης 1x1, το οποίο μειώνει τα κανάλια εξόδου σε μία μόνο τιμή, την εκτίμηση του ύψους της βλάστησης. Για την αρχικοποίηση των βαρών χρησιμοποιείται η μέθοδος Xavier, η οποία εξασφαλίζει μια καλή εκκίνηση για την εκπαίδευση, αποφεύγοντας το πρόβλημα της εξαφάνισης ή έκρηξης των γραμμικών κλιμάκων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκμάθησης. Τέλος, το τελικό στρώμα περνά από τη συνάρτηση ReLU (Rectified Linear Unit), προκειμένου να αποφευχθούν αρνητικές τιμές στο ύψος, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε λανθασμένες εκτιμήσεις του ύψους της βλάστησης.

Η συνάρτηση απώλειας που εφαρμόζεται για την εκπαίδευση του μοντέλου είναι η ίδια με της πρώτης περιοχής 2.1.

Η αρχιτεκτονική του μοντέλου παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.20.



Σχήμα 2.20: Αρχιτεκτονική του αποκωδικοποιητή για την δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος. Η είσοδος στο Canopy Height Head προέρχεται από την έξοδο του τελευταίου στρώματος του decoder, η οποία αποτελεί έναν χάρτη χαρακτηριστικών, όπου το μέγεθος των embedding vectors είναι 512. Η έξοδος του έχει διαστάσεις (B, 512, H/16, W/16), με κάθε patch της εικόνας να αντιστοιχεί σε ένα διάνυσμα χαρακτηριστικών διαστάσεων 512.

## 2.4.2 Διαδικασία εκπαίδευσης

### ΑΟΙ1

Για την εκπαίδευση του πρώτου χάρτη, χρησιμοποιήθηκε ρυθμός εκμάθησης (learning rate) 0.001, ενώ ως βελτιστοποιητής (optimizer) επιλέχθηκε ο AdamW. Αφού φορτώσαμε το προεκπαιδευμένα βάρη και τα παγώσαμε στη πλευρά του κωδικοποιητή, ενεργοποιούμε την εκπαίδευση μόνο για τις παραμέτρους του αποκωδικοποιητή, επιτρέποντας την ενημέρωσή τους κατά την εκπαίδευση. Έτσι, το μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί και να μάθει από τα δεδομένα εισόδου, εστιάζοντας αποκλειστικά στην εργασία πρόβλεψης ύψους βλάστησης. Ο αριθμός των εκπαιδευόμενων παραμέτρων είναι: 967,905 2.4.

Κατηγορία	Πλήθος
Total parameters	172.30 M
Trainable parameters	0.97 M
Frozen parameters	171.33 M

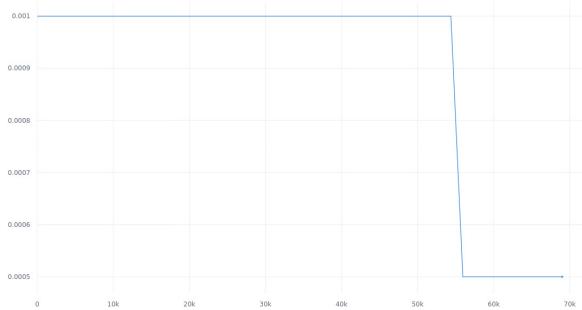
Πίνακας 2.4: Πλήθος παραμέτρων του πρώτου μοντέλου AOI1.

Ο αριθμός των εποχών που έτρεξε το μοντέλο είναι 1000 και η καλύτερη απόδοση κρίθηκε με βάση το MAE του συνόλου δεδομένων επικύρωσης. Η χρήση μνήμης της GPU, που αντιπροσωπεύει τη ποσότητα μνήμης που καταναλώνει η GPU κατά την εκτέλεση υπολογιστικών εργασιών, κυμαίνονταν στα 2.8 G κατα την εκπαίδευση. Οι καμπύλες εκπαίδευσης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα 2.21, όπου φανερώνεται η καθοδική τάση και στα δύο υποσύνολα δεδομένων.

## AOI2

Κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης, παγώσαμε τα βάρη του κωδικοποιητή (encoder) και των στρωμάτων του αποκωδικοποιητή (decoder) που διατηρήθηκαν στο μοντέλο, αφήνοντας τα σταθερά. Στη συνέχεια, πραγματοποιήσαμε fine-tuning μόνο στο νέο head που προστέθηκε στον αποκωδικοποιητή, ώστε να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της νέας εργασίας.

Για την εκπαίδευση του δεύτερου χάρτη, ο ρυθμός εκμάθησης (learning rate) αρχικοποιήθηκε στο 0.001, ενώ για τη βελτιστοποίηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ο AdamW με weight decay 1e-3, για τη μείωση του υπερπροσδιορισμού και τη βελτίωση της γενίκευσης. Επιπλέον, ο scheduler ReduceLROnPlateau παρακολούθησε τη μετρική validation mean absolute error (Val MAE), προσαρμόζοντας τον ρυθμό εκμάθησης όταν η συγκεκριμένη μετρική εμφάνιζε στασιμότητα για περισσότερες από 25 εποχές. Συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις που δεν σημειώθηκε βελτίωση, ο ρυθμός εκμάθησης μειωνόταν κατά συντελεστή 0.5, επιτρέποντας στο μοντέλο να συγκλίνει ομαλότερα σε χαμηλότερες τιμές της συνάρτησης κόστους. Η μεταβολή του learning rate παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.22.



Σχήμα 2.22: Η μεταβολή του learning rate κατά τη διάρκεια της δεύτερης εκπαίδευσης.

Ο αριθμός των εποχών που έτρεξε το μοντέλο είναι 250 και η καλύτερη απόδοση κρίθηκε με βάση το MAE του συνόλου δεδομένων επικύρωσης. Οι καμπύλες εκπαίδευσης παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα 2.23, όπου φανερώνεται η καθοδική τάση και στα δύο υποσύνολα δεδομένων.

Η νέα αρχιτεκτονική του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στο δεύτερο πείραμα αποτύπωνεται στον πίνακα 2.5. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το μοντέλο διαθέτει συνολικά 198,189,529 παραμέτρους, εκ των οποίων 1,277,145 είναι εκπαιδεύσιμες παράμετροι, ενώ οι μη εκπαιδεύσιμες παράμετροι ανέρχονται σε 196,912,384.

Κατηγορία	Πλήθος
Total parameters	198.19 M
Trainable parameters	1.28 M
Frozen parameters	196.91 M

Πίνακας 2.5: Πλήθος παραμέτρων του μοντέλου στο δεύτερο πείραμα

### 2.4.3 Μετρικές Αξιολόγησης

Σε αυτό το χωρίο, παρουσιάζονται οι τεχνικές αξιολόγησης των μοντέλων για να υπολογιστεί η απόδοση των προβλέψεών τους, όπως είναι:

- **Ρίζα Μέσης Τετραγωνικής Απόκλισης (Root Mean Square Error, RMSE):**

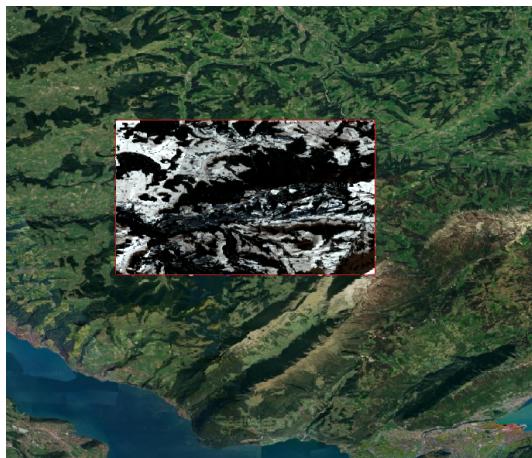
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.2)$$

- **Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error, MAE):**

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2.3)$$

- **Συντελεστής Προσδιορισμού (R-squared):**

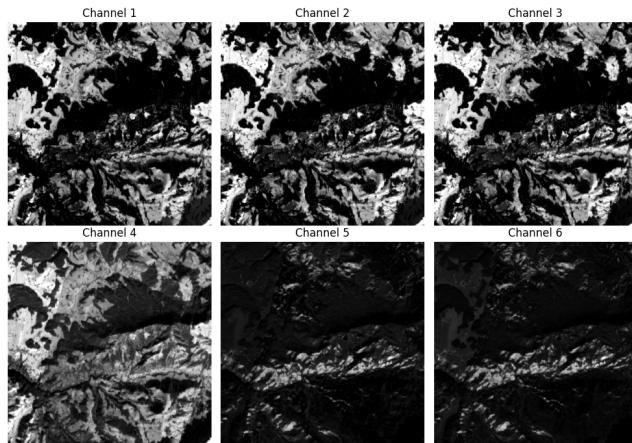
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.4)$$



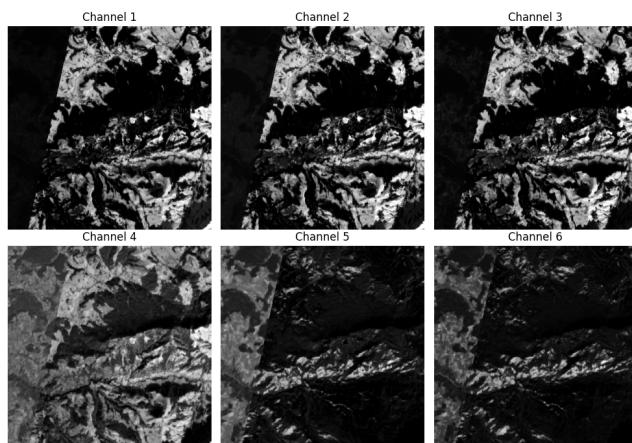
(α') Αναπαράσταση των τριών πρώτων καναλιών στο QGIS της πρώτης εικόνας HLS.S30.T32TMS.2019045T103129.



(β') Αναπαράσταση των τριών πρώτων καναλιών στο QGIS της δεύτερης εικόνας HLS.S30.T32TMS.2019052T102039.

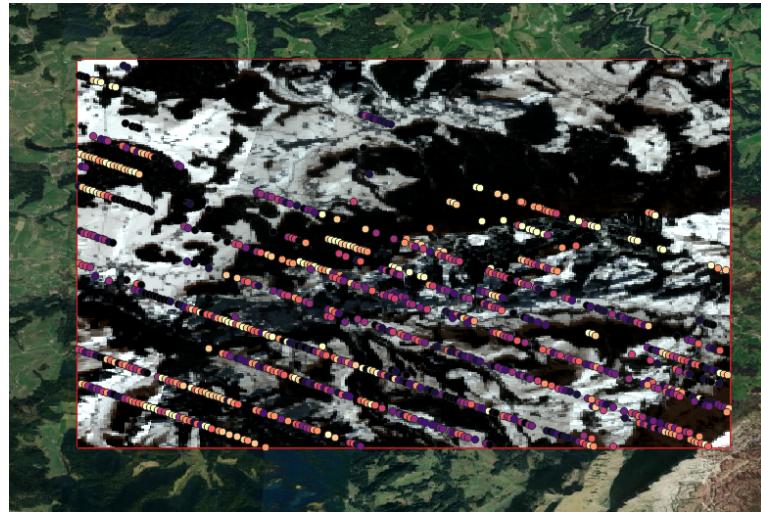


(γ') Παρουσιάζονται τα έξι κανάλια της πρώτης εικόνας HLS.

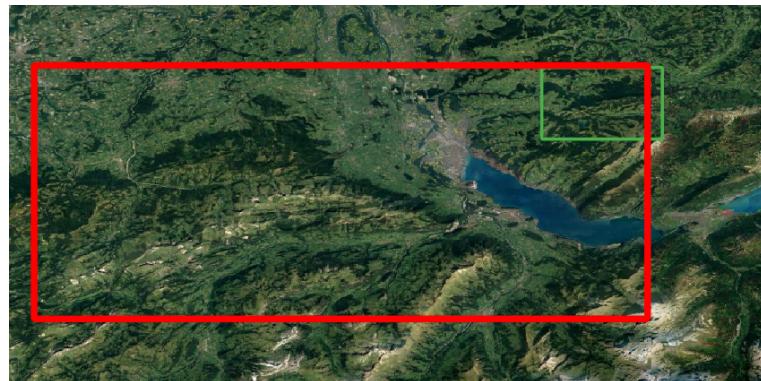


(δ') Παρουσιάζονται τα έξι κανάλια της δεύτερης εικόνας HLS.

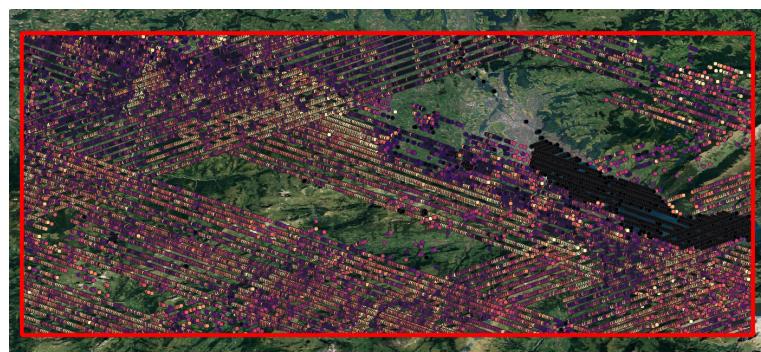
**Σχήμα 2.11:** Επισκόπηση των δύο πολυφασματικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου.



Σχήμα 2.12: Αναπαράσταση των συνολικών δεδομένων GEDI και HLS μετά την προεπεξεργασία.



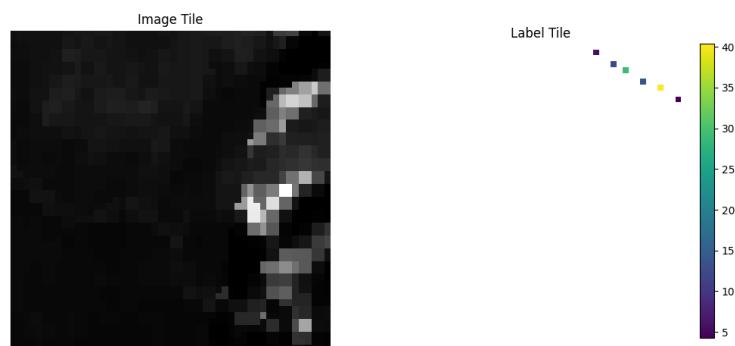
Σχήμα 2.13: Η οριοθετημένη περιοχή ενδιαφέροντος AOI2 (με κόκκινο περίγραμμα) και της AOI1 (με πράσινο περίγραμμα).



Σχήμα 2.14: Οι βολές υψηλής ποιότητας που διατηρήθηκαν μετά την εφαρμογή του φίλτρου αναπαρίστανται, όπου το χρώμα υποδηλώνει την ένταση του σχετικού ύψους ( $r_{h95}$ ). Οι τιμές του  $r_{h95}$  έχουν κατηγοριοποιηθεί σε 20 ομάδες, με μια διαβάθμιση χρωμάτων τύπου Magma, όπου οι χαμηλότερες τιμές (από 0) απεικονίζονται με το πιο σκουρόχρωμο τμήμα της κλίμακας και αντιπροσωπεύουν τα χαμηλότερα ύψη. Αντίθετα, οι υψηλότερες τιμές (μέγιστη τιμή 97.67) αποδίδονται με το πιο ανοιχτό χρώμα, υποδεικνύοντας τα μεγαλύτερα ύψη.

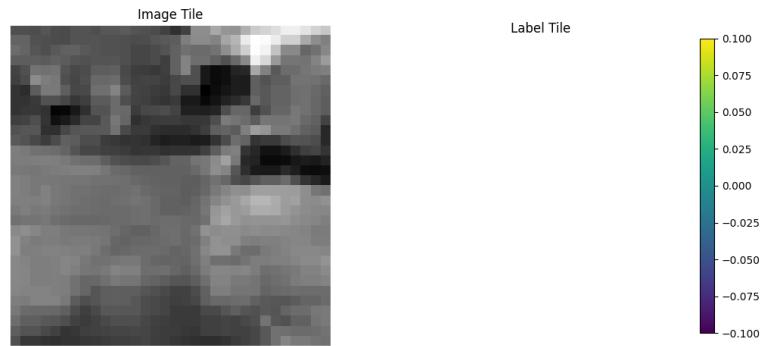


(α') Χωρίο χωρίς δεδομένα ετικέτας

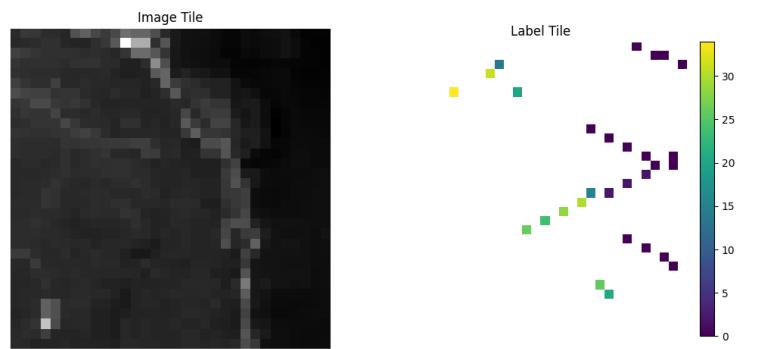


(β) Χωρίο με δεδομένα GEDI

**Σχήμα 2.15:** Τυχαία επιλεγμένα δύο χωρία που θα εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο.

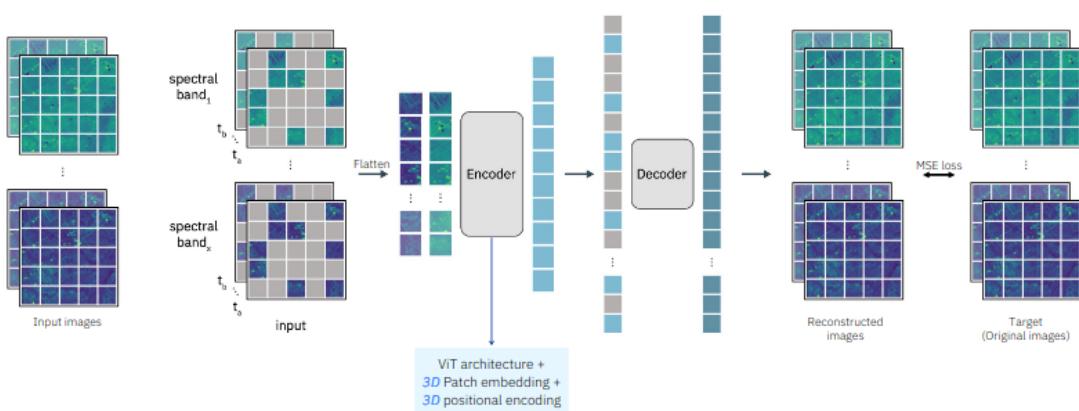


(α) Χωρίο χωρίς δεδομένα ετικέτας



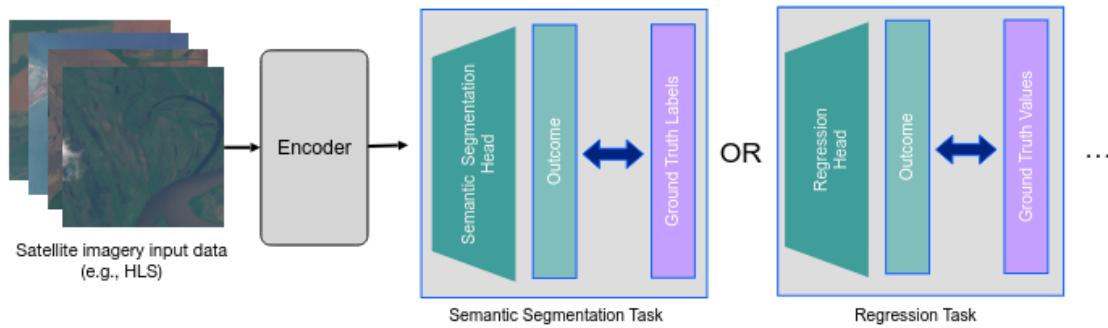
(β') Χωρίο με δεδομένα GEDI

**Σχήμα 2.16:** Τυχαία επιλεγμένα δύο χωρία που θα εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο για την δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος - AOI2.

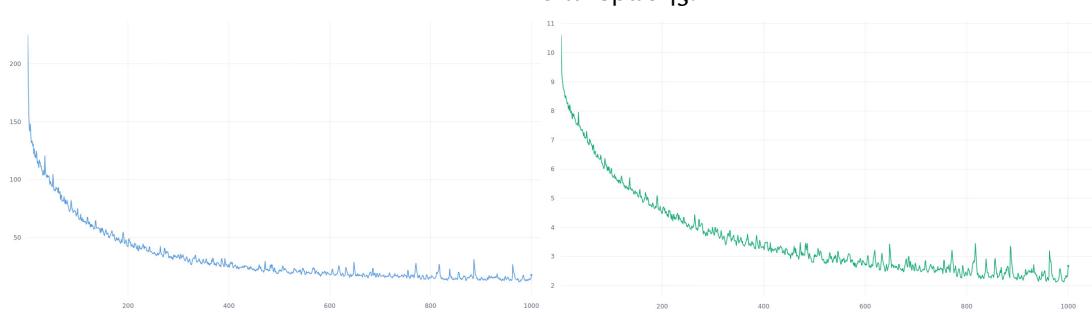
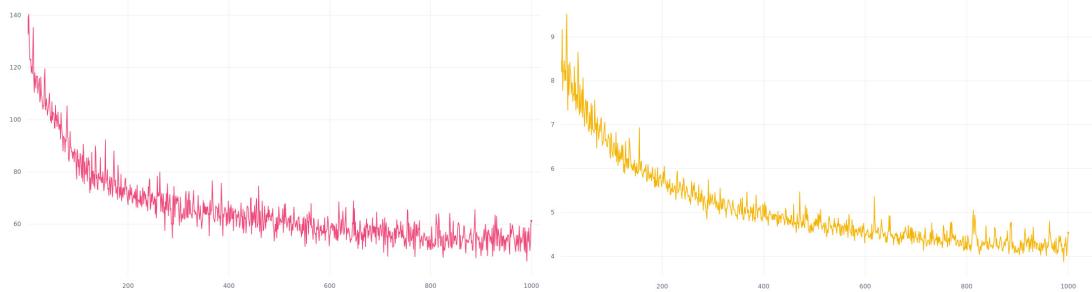


**Σχήμα 2.17:** Η λειτουργία του μοντέλου βασίζεται στον διαχωρισμό της εισόδου σε μη επικαλυπτόμενα πλακίδια (patches) ίδιου μεγέθους, όπου ένα τυχαίο υποσύνολο αυτών καλύπτεται. Ο κωδικοποιητής επεξεργάζεται μόνο τα μη μασκαρισμένα πλακίδια, δημιουργώντας τη λανθάνουσα αναπαράστασή τους, ενώ ο αποκωδικοποιητής χρησιμοποιεί αυτές τις αναπαραστάσεις, σε συνδυασμό με τα μασκαρισμένα πλακίδια, για την ανακατασκευή της πλήρους εικόνας. Πηγή: [18]

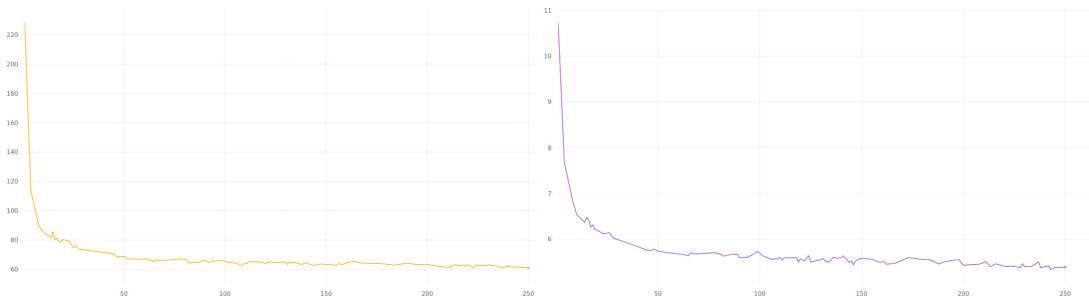
## 2. Prithvi Fine-Tuning



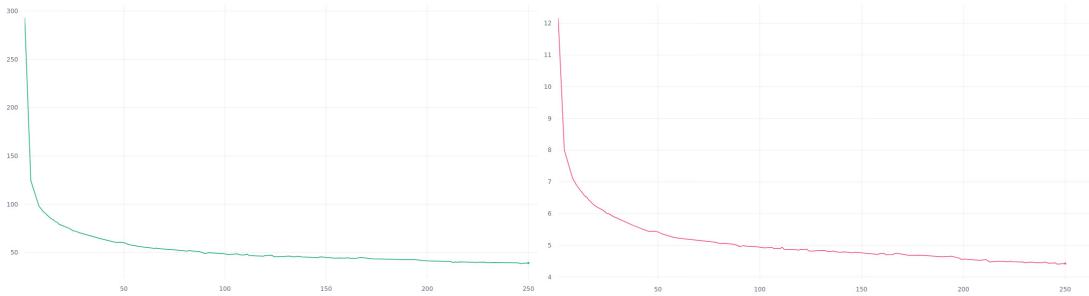
Σχήμα 2.18: Διαδικασία εφαρμογής fine tuning στο θεμελιώδες μοντέλο για διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με την εργασία Πηγή: [18].



Σχήμα 2.21: Επισκόπηση της διαδικασίας εκπαίδευσης του μοντέλου Prithvi με τα προεκπαιδευμένα βάρη στην εργασία της πρόβλεψης του ύψους βλάστησης για το πρώτο πείραμα.



(α) Η απώλεια στα δεδομένα επικύρωσης. (β) Το απόλυτο μέσο σφάλμα στα δεδομένα επικύρωσης.



(γ) Η απώλεια στα δεδομένα εκπαίδευσης. (δ) Το απόλυτο μέσο σφάλμα στα δεδομένα εκπαίδευσης.

**Σχήμα 2.23:** Επισκόπηση της διαδικασίας εκπαίδευσης του μοντέλου Prithvi με τα προεκπαιδευμένα βάρη στην εργασία της πρόθλεψης του ύψους βλάστησης για την δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος.

# Κεφάλαιο 3

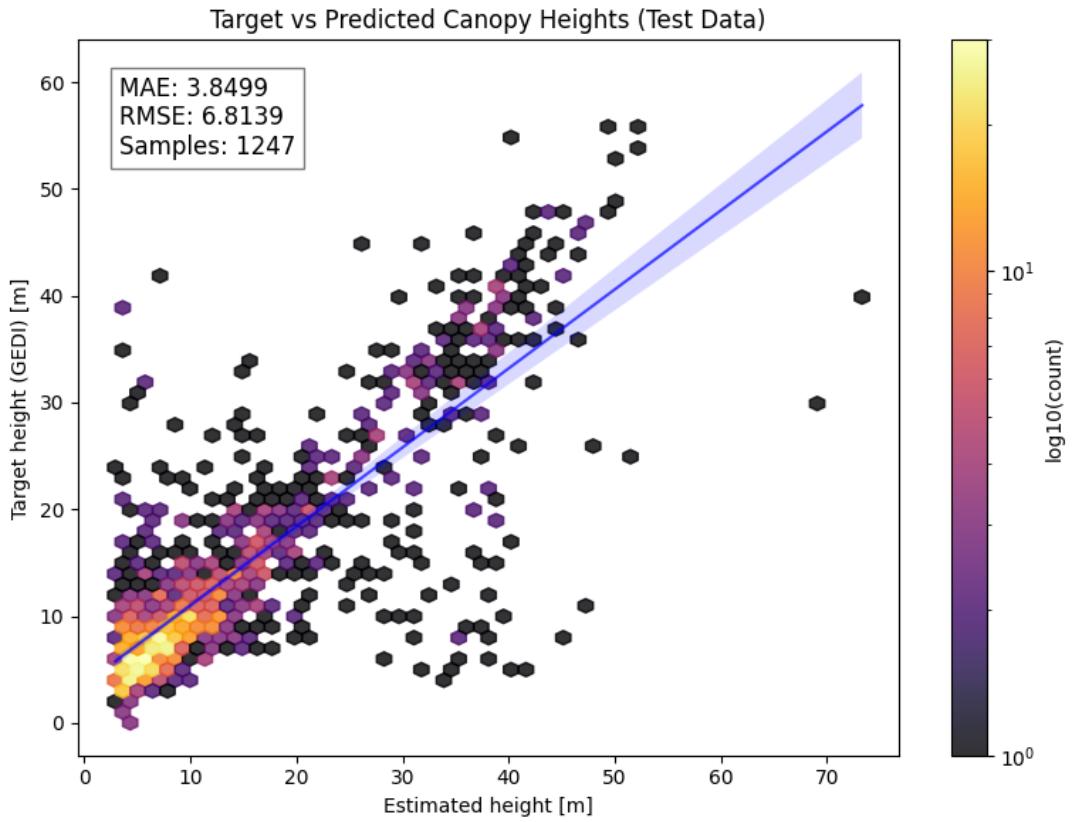
## Αποτελέσματα-Αξιολόγηση μοντέλων

### 3.1 Αξιολόγηση των μοντέλων με δεδομένα GEDI ως δεδομένα αναφοράς

Όλες οι μετρικές εφαρμόστηκαν στα δεδομένα δοκιμής. Η συνάρτηση απώλειας του μοντέλου που υπολογίζεται μέσω του **μέσου τετραγωνικού σφάλματος** (Mean Square Error, MSELoss) μεταξύ των προβλέψεων και των πραγματικών τιμών είναι σχετικά υψηλή, **48.19**, υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο χρειάζεται βελτίωση για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος. Η **MAE** με τιμή **3.84** δείχνει τη μέση απόλυτη απόκλιση των προβλέψεων από τις πραγματικές τιμές, δίνοντας μια πιο άμεση εκτίμηση του σφάλματος, σε σχέση με την πραγματικότητα [Εξίσωση 2.3]. Ενώ το **RMSE**, που τονίζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις (outliers, έχει τιμή **6.81** [Εξίσωση 2.2]. Τέλος, ο συντελεστής  $R^2$ , ο οποίος παρέχει ένα μέτρο για το πόσο καλά το μοντέλο εξηγεί τη διακύμανση των εξαρτημένων μεταβλητών σε σχέση με τις ανεξάρτητες, έχει τιμή **0.657** [Εξίσωση 2.4] (Εικόνα 3.1). Οι παραπάνω τιμές αφορούν το πρώτο πείραμα στην AOI1, ενώ στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του δεύτερου πειράματος AOI2 συγκριτικά με αυτά του AOI1.

Για να αξιολογηθεί η ακρίβεια του μοντέλου στην πρόβλεψη των υψών της βλάστησης, συγκρίθηκαν οι προβλεπόμενες τιμές με τα δεδομένα αναφοράς από την αποστολή GEDI. Η ανάλυση του ιστογράμματος 3.2 της κατανομής των υψών δείχνει σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των πραγματικών δεδομένων, ιδιαίτερα στα χαμηλά ύψη. Συγκεκριμένα, το μοντέλο εμφανίζει αδυναμία στην πρόβλεψη υψών κάτω των 10 μέτρων, καθώς η κατανομή των πραγματικών τιμών (ground truth) είναι σημαντικά πιο πυκνή σε αυτήν την περιοχή, σε σύγκριση με την κατανομή των προβλεπόμενων τιμών. Αυτή η απόκλιση υποδεικνύει ότι το μοντέλο δεν μπορεί να αναπαραστήσει με ακρίβεια τη βλάστηση σε μικρά ύψη, κάτι που πιθανόν επηρεάζει την συνολική του απόδοση.

Στο παρακάτω διάγραμμα 3.4, παρουσιάζονται τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου, δηλαδή οι προβλεπόμενες τιμές ύψους, σε σύγκριση με τα δεδομένα αναφοράς (ground truth). Η ανάλυση αυτής της σύγκρισης προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του μοντέλου στην πρόβλεψη των υψών.



Σχήμα 3.1: Διαγράμματα διασποράς του προβλεπόμενου ύψους της δασικής κόμης της Γης στην πρώτη περιοχή ενδιαφέροντος (AOI1) έναντι των παρατηρούμενων τιμών του GEDI.

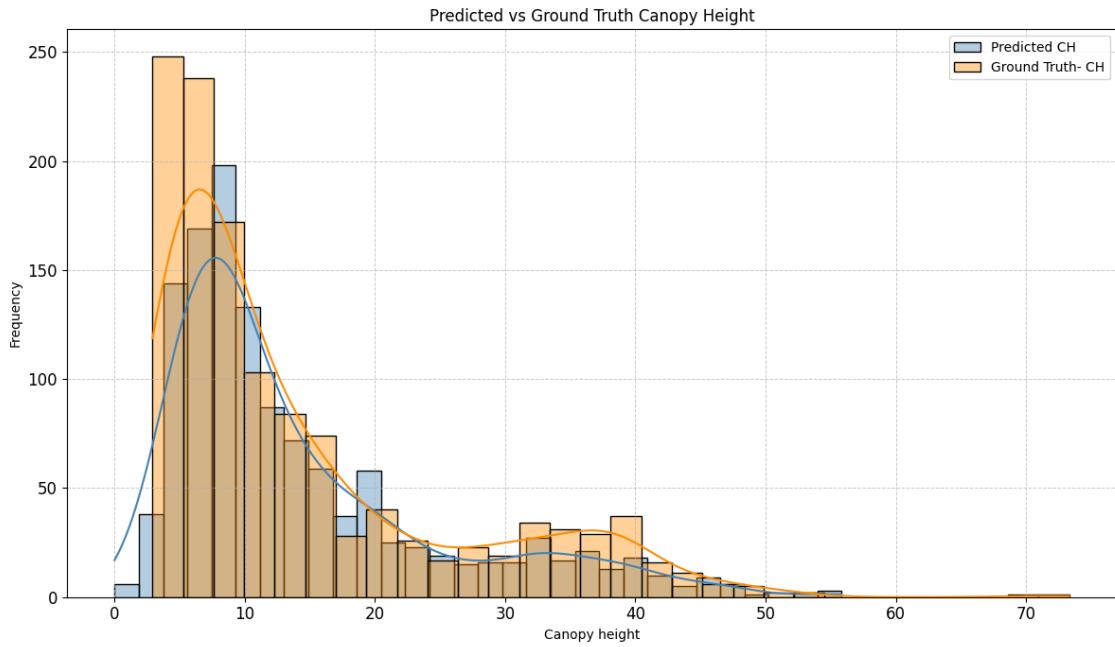
Παρά το γεγονός ότι η εκπαίδευση του μοντέλου AOI1 φαίνεται να προχώρησε με επιτυχία, επιτυγχάνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα στο Test MAE (Μέσο Απόλυτο Σφάλμα των συνόλων δοκιμής), το μοντέλο δεν κατάφερε να προβλέψει με ακρίβεια το ύψος της περιοχής. Αντιθέτως, φαίνεται ότι είναι πιο ακριβές στην πρόβλεψη των Gedi Shots. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να αποδοθεί σε αρκετούς παράγοντες μερικοί από τους οποίους αναφέρθηκαν και παραπάνω στη παρούσα διπλωματική. Για την καλύτερη αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, οι περιοχές ενδιαφέροντος εξετάστηκαν εκ νέου, λαμβάνοντας υπόψη και άλλες παραμέτρους που ενδέχεται να βελτιώσουν την απόδοση του μοντέλου. Τα νέα αποτελέσματα της AOI2 είναι τα εξής 3.1

Μετρική	ΑΟΙ1	ΑΟΙ2
Test Loss	48.19	61.31
Test MAE	3.84	5.13
Test RMSE	6.81	7.80
Test R-squared	0.657	0.62

Πίνακας 3.1: Σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου για τα πειράματα AOI1 και AOI2.

Κατα την εκπαίδευση, παρουσιάζονται στο πίνακα οι βέλτιστες τιμές για κάθε περιοχή ενδιαφέροντος 3.2:

Επιπλέον, στη νέα ανάλυση του ιστογράμματος 3.5 και του διαγράμματος διασποράς



Σχήμα 3.2: Ιστόγραμμα κατανομής προβλεπόμενων και πραγματικών υψών βλάστησης από τα δεδομένα GEDI. Ο άξονας x δείχνει το ύψος σε μέτρα, ενώ ο άξονας y τη συχνότητα εμφάνισης της κάθε τιμής σχετικού ύψους. Εφαρμόστηκε μια μάσκα, ώστε να συγκριθούν οι τιμές των δεδομένων GEDI και των δεδομένων εξόδου στις ίδιες θέσεις Συγκεκριμένα, στον πίνακα grid που έχουμε δημιουργήσει, στις θέσεις αυτές καταγράφονται οι αντίστοιχες τιμές GEDI, ενώ στις υπόλοιπες θέσεις έχει αποδοθεί η τιμή NaN, υποδεικνύοντας την απουσία δεδομένων. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η μάσκα για να εντοπιστούν και να απορριφθούν οι εγγραφές με τιμές NaN, ώστε η σύγκριση να περιοριστεί μόνο στα έγκυρα σημεία δεδομένων.

Μετρική	ΑΟΙ1	ΑΟΙ2
Βέλτιστο Val MAE	3.87	5.33
Ελάχιστο Val Loss	45.71	61.00

Πίνακας 3.2: Σύνοψη των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων (ΑΟΙ1 - ΑΟΙ2) για το Validation MAE και το Validation Loss.

3.6 των πραγματικών τιμών GEDI (label data) σε σύγκριση με τις τιμές εξόδου του μοντέλου (predicted data) παρατηρείται μια αδυναμία του μοντέλου να προβλέψει με ακρίβεια τις ακραίες τιμές του ύψους. Αυτό υποδεικνύει ότι το μοντέλο παρουσιάζει δυσκολία στην καταγραφή των εξαιρετικά χαμηλών ή υψηλών τιμών, οι οποίες φαίνεται να αποτυπώνονται με μεγαλύτερο σφάλμα.

Τέλος, παρατίθεται η τελική εκτίμηση των τιμών του ύψους βλάστησης, συγκρίνοντας τις προβλεπόμενες τιμές με τα πραγματικά δεδομένα label για την περιοχή ΑΟΙ2. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη συγχώνευση των επιμέρους πλακιδίων διαστάσεων 32x32 για την παραγωγή του τελικού χάρτη ύψους βλάστησης. Ο τελικός χάρτης παρατίθεται σε μορφή TIFF, με μέγιστη τιμή **56.97** μέτρα και ελάχιστη τιμή **0** μέτρα 3.8, 3.7.

Στην Εικόνα 3.10, εμφανίζονται οι συγκρίσεις μεταξύ των προβλεπόμενων τιμών, των πραγματικών τιμών ύψους label και της εικόνας HLS για τη συγκεκριμένη περιοχή ΑΟΙ2.

Τέλος, το μοντέλο δοκιμάστηκε με την εισαγωγή των εικόνων από το πρώτο πείραμα για την περιοχή AOI1 καθώς και των αντίστοιχων δεδομένων label, προκειμένου να παραχθεί ο χάρτης ύψους βλάστησης για την περιοχή AOI1. Στην παρακάτω Εικόνα 3.12 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εκτίμησης του ύψους βλάστησης από το μοντέλο, ενώ στην Εικόνα 3.11 παρατίθενται τα δεδομένα ground truth για την εν λόγω περιοχή, τα οποία προέρχονται από αερομεταφερόμενο LiDAR.

### 3.2 Αξιολόγηση των μοντέλων με Ground Truth δεδομένα από αερομεταφερόμενο αισθητήρα LiDAR

Συγκρίνοντας τον πρώτο χάρτη CHM1 της πρώτης περιοχής ενδιαφέροντος (AOI1) με τα ground truth δεδομένα από airborne LiDAR αισθητήρα, αφού οι χάρτες επεξεργάστηκαν ώστε να έχουν την ίδια ανάλυση (30 μέτρων) και τα ίδια δείγματα, και επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία για τη δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος (CHM2), επιβεβαιώθηκε η αρχική οπτική παρατήρηση. Συγκεκριμένα, η δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος (AOI2) αποτυπώνει καλύτερα την πραγματικότητα, συγκριτικά με την πρώτη, καθώς ο χάρτης CHM2 παρουσιάζει σαφώς καλύτερες μετρικές από τον CHM1.

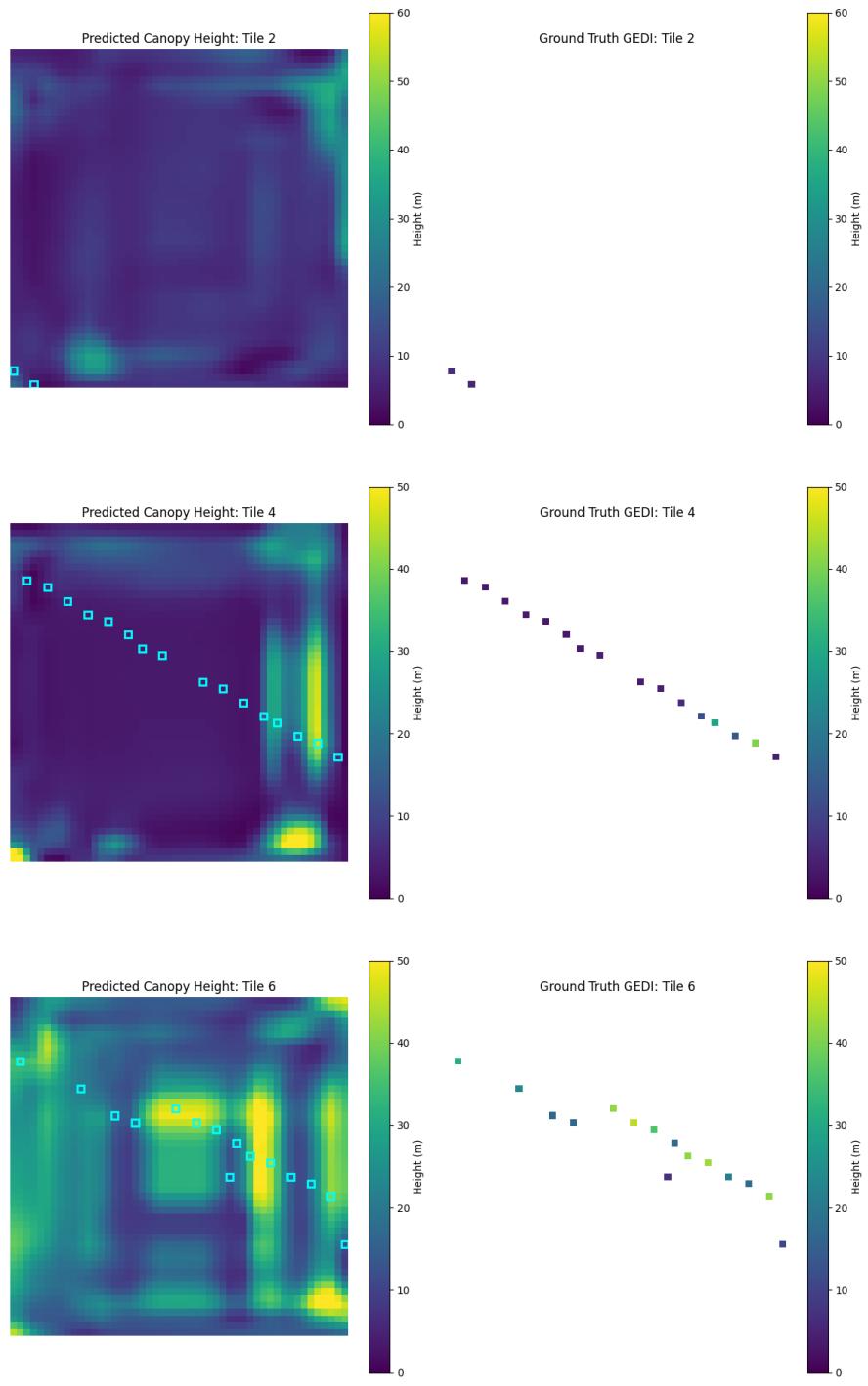
Οι μετρικές που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση ήταν το Mean Absolute Error (MAE) (2.3) και το Root Mean Square Error (RMSE) (2.2). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

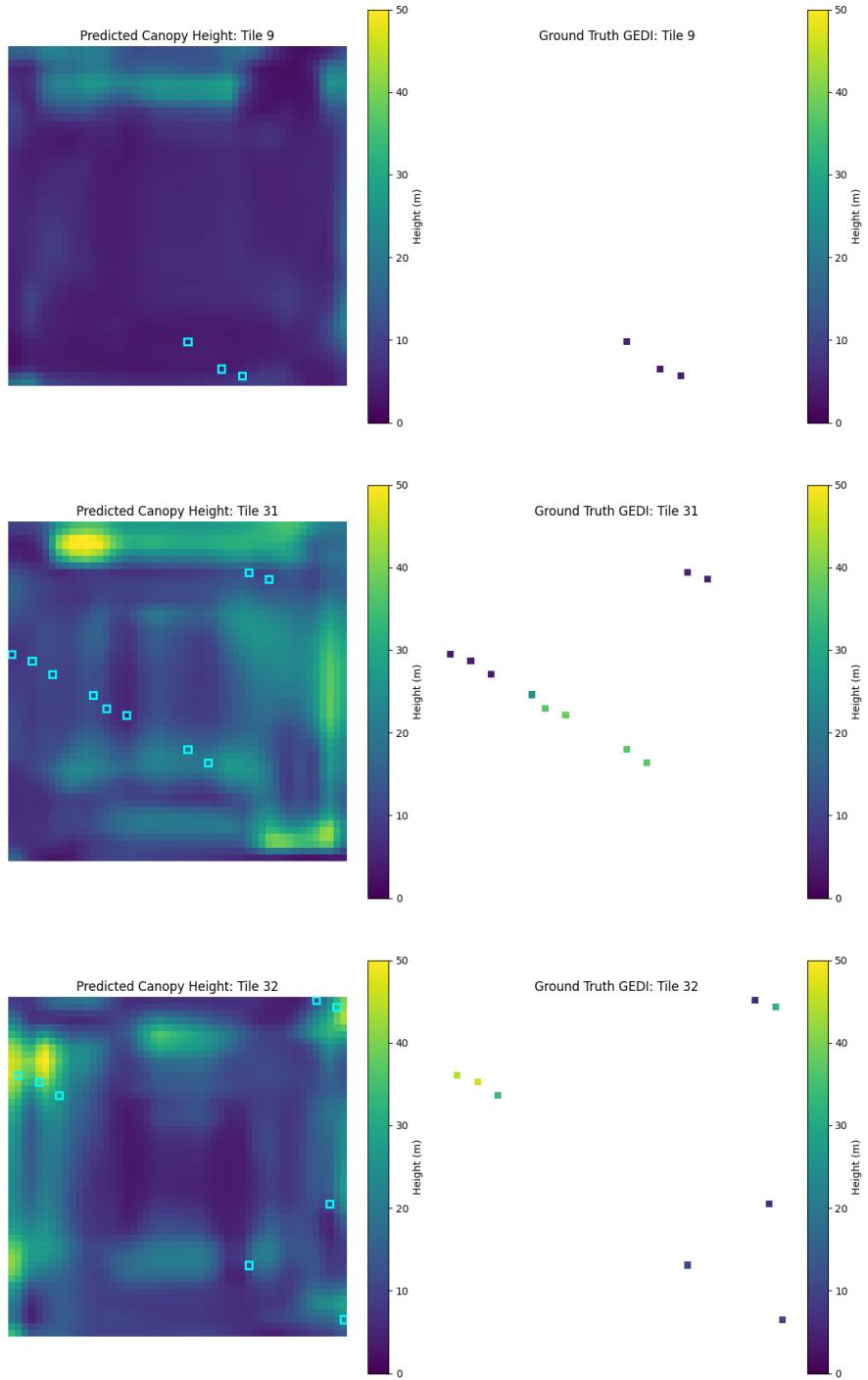
Σύμφωνα με τις μετρήσεις, παρατηρείται ότι ο χάρτης CHM1 εμφανίζει υψηλότερες τιμές MAE και RMSE, υποδεικνύοντας χαμηλότερη ακρίβεια σε σύγκριση με τον CHM2, ο οποίος εμφανίζει σαφώς χαμηλότερες τιμές σφάλματος, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία του. Για περαιτέρω ανάλυση, έγινε διαχωρισμός των δεδομένων ύψους σε τρεις κατηγορίες:

- Χαμηλή βλάστηση (0-10 μέτρα):** Και οι δύο χάρτες παρουσιάζουν χαμηλή ικανότητα πρόβλεψης, όπως αντικατοπτρίζεται στις υψηλές τιμές σφάλματος.
- Μεσαία βλάστηση (10-30 μέτρα):** Σε αυτήν την κατηγορία, και τα δύο μοντέλα εμφανίζουν την καλύτερη απόδοσή τους.
- Υψηλή βλάστηση (άνω των 30 μέτρων):** Οι προβλέψεις παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση από τα αληθή δεδομένα. Ως εκ τούτου, αναδεικνύεται η ανάγκη περαιτέρω βελτίωσης, ιδίως στις ακραίες τιμές βλάστησης, όπου και τα δύο μοντέλα εμφανίζουν αυξημένες αποκλίσεις.

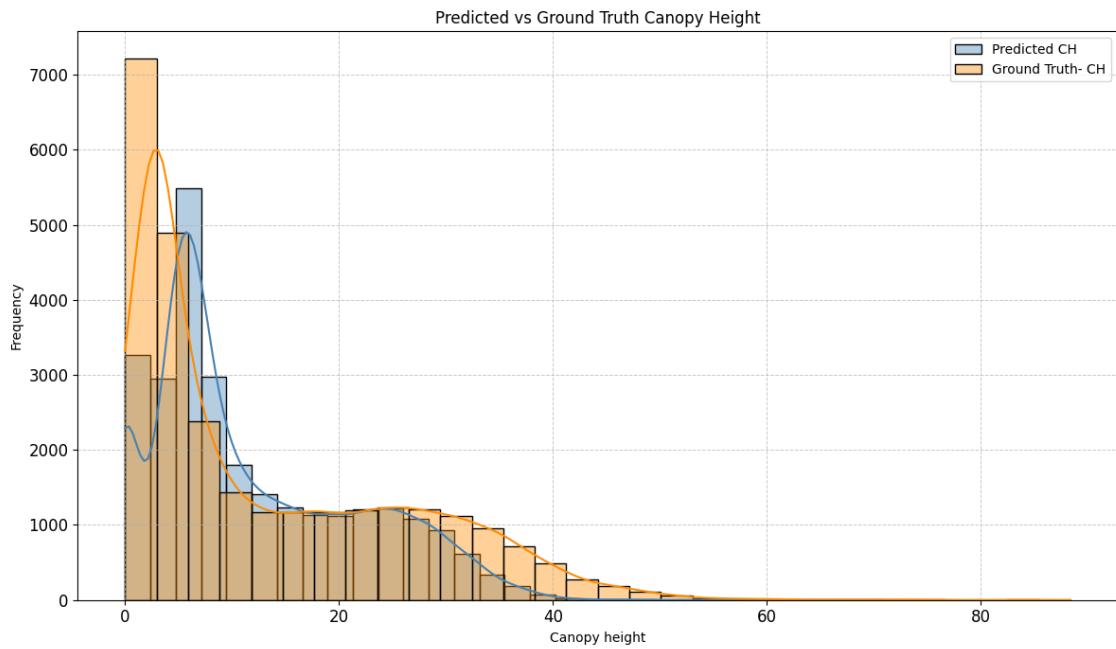
<b>CHM1 Metrics (Compared to Ground Truth)</b>		
<b>Condition</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>
Full Dataset	12.6457	15.3205
$0m < \text{Data} < 10m$	15.0568	17.5664
$10m < \text{Data} < 30m$	8.2670	10.0249
$30m < \text{Data} < \text{max value} = 47m$	11.4341	14.0802
<b>CHM2 Metrics (Compared to Ground Truth)</b>		
<b>Condition</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>
Full Dataset	8.4232	10.7183
$0m < \text{Data} < 10m$	8.8799	11.3943
$10m < \text{Data} < 30m$	7.2498	8.9201
$30m < \text{Data} < \text{max value} = 47m$	10.7603	12.9740

Πίνακας 3.3: Σύγκριση των δύο χαρτών, CHM1 της πρώτης περιοχής ενδιαφέροντος και CHM2 της δεύτερης περιοχής, με Ground Truth δεδομένα από αερομεταφερόμενο LiDAR.

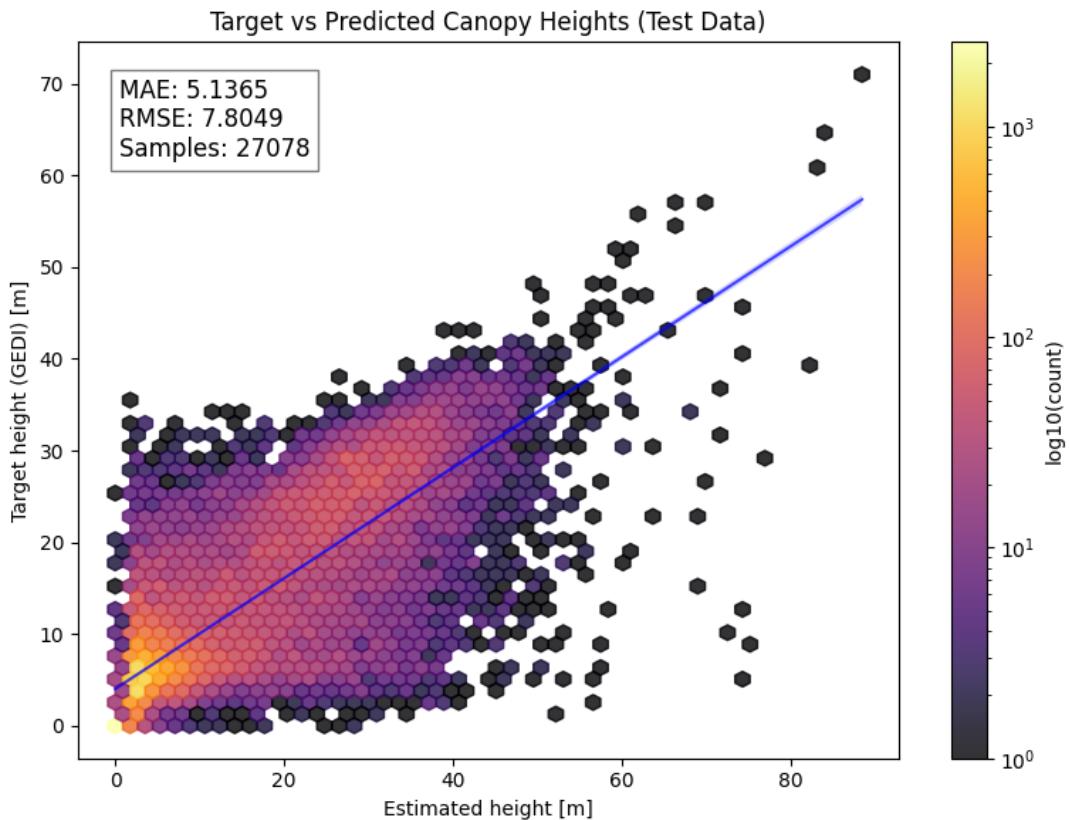




**Σχήμα 3.4:** Σύγκριση των προβλεπόμενων τιμών (αριστερά) με τις πραγματικές τιμές GEDI (δεξιά), για το πρώτο πείραμα. Οι προβλεπόμενες τιμές έχουν γίνει highlight με περίγραμμα για να διακρίνονται εύκολα οι τιμές των GEDI βολών, που αποτελούν τα label των δεδομένων μας.



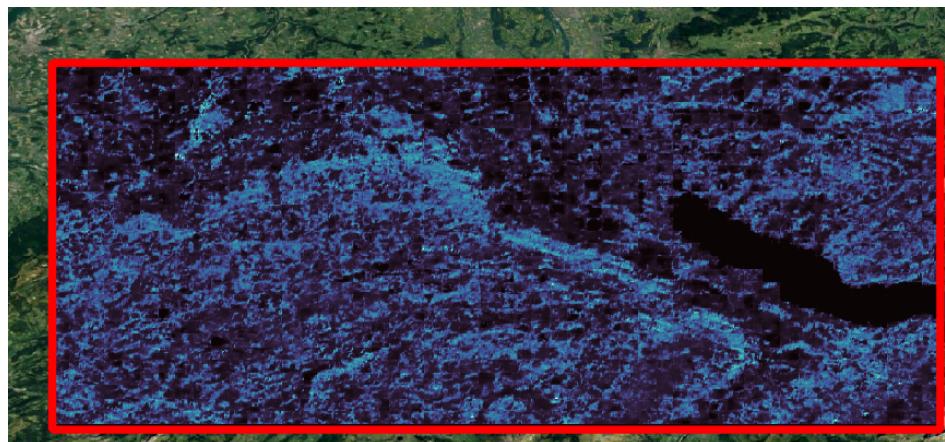
Σχήμα 3.5: Ιστόγραμμα κατανομής προβλεπόμενων και πραγματικών υψών βλάστησης από τα δεδομένα GEDI για το δεύτερο πείραμα. Ο άξονας x δείχνει το ύψος σε μέτρα, ενώ ο άξονας y τη συχνότητα εμφάνισης της κάθε τιμής σχετικού ύψους. Εφαρμόστηκε μάσκα, ώστε να συγκριθούν οι τιμές των δεδομένων GEDI και των δεδομένων εξόδου στις ίδιες θέσεις.



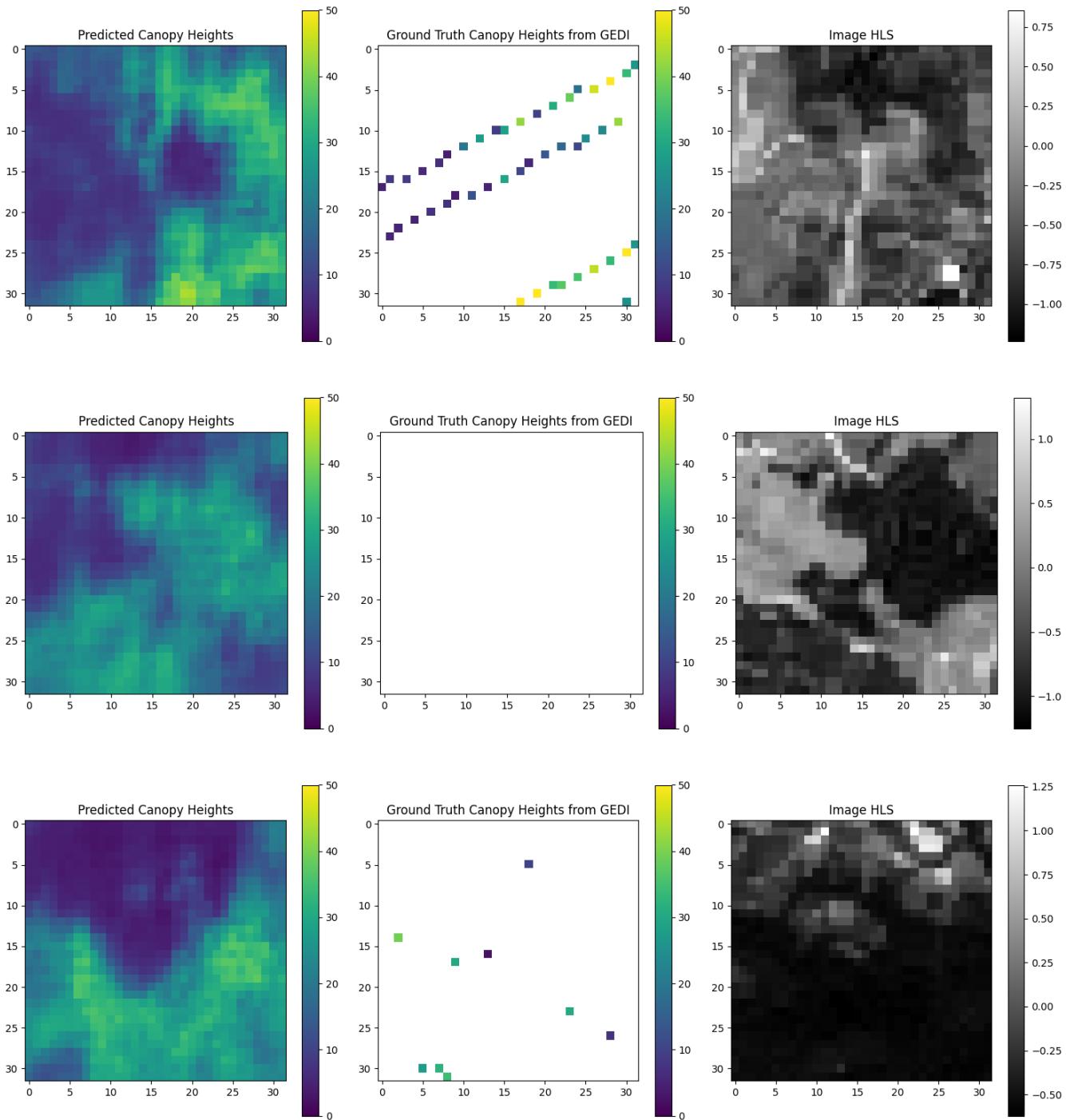
Σχήμα 3.6: Διαγράμματα διασποράς του προβλεπόμενου ύψους της βλάστησης έναντι των παρατηρούμενων τιμών του GEDI για το δεύτερο πείραμα.

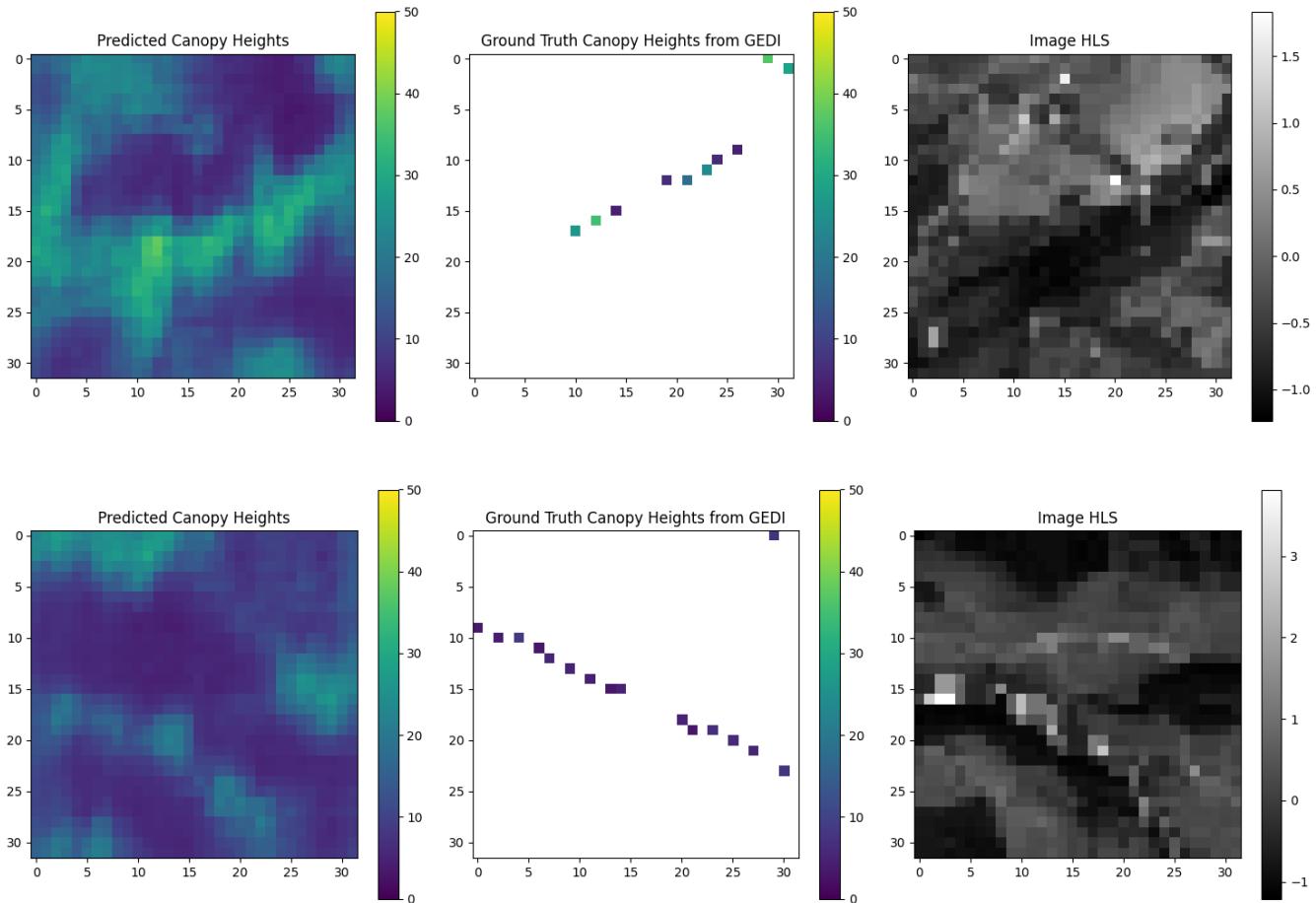


Σχήμα 3.7: Η περιοχή ενδιαφέροντος AOI2.

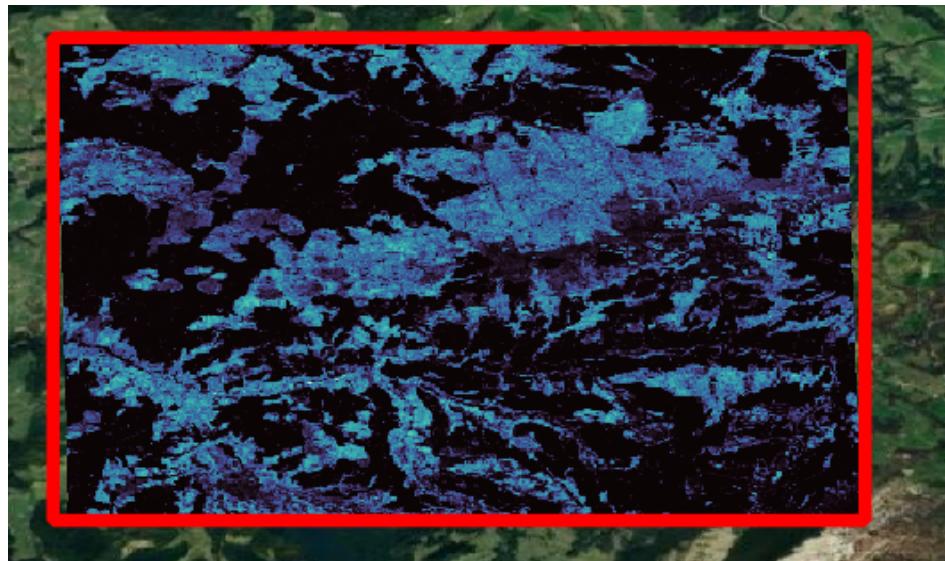


Σχήμα 3.8: Εικόνα του χάρτη ύψους βλάστησης της AOI2.

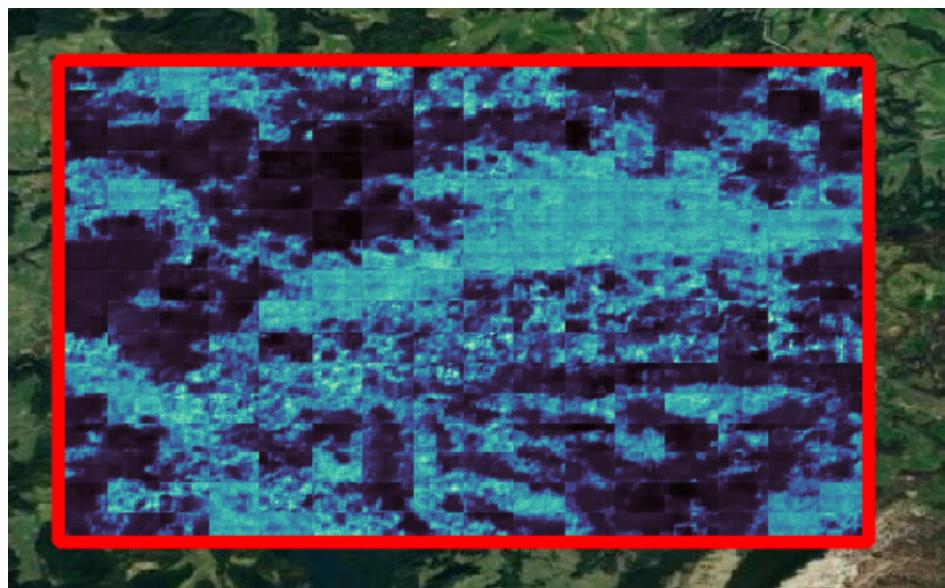




Σχήμα 3.10: Σύγκριση των προβλεπόμενων τιμών (αριστερά) με τις πραγματικές τιμές GEDI (μέση) και με τις HLS εικόνες (αριστερά) για το δεύτερο πείραμα.



Σχήμα 3.11: Η εικόνα με τα ground truth δεδομένα ύψους της ΑΟΙ1 από airborne LiDAR (μέγιστη τιμή 39.54 μέτρα και ελάχιστη 0 μέτρα).



Σχήμα 3.12: Εικόνα του χάρτη ύψους βλάστησης της ΑΟΙ1 (μέγιστη τιμή 42.44 μέτρα και ελάχιστη 0 μέτρα).

# Κεφάλαιο 4

## Συμπεράσματα

### 4.1 Συμπεράσματα παρούσας διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναπτύχθηκε μια αρχιτεκτονική αποκωδικοποιητή για το θεμελιώδες μοντέλο ViT-base transformer, το Privthi, αξιοποιώντας τα προεκπαιδευμένα βάρη του κωδικοποιητή του, με στόχο την πρόβλεψη του ύψους της κόμης σε περιοχές της Ελβετίας. Η προσέγγιση αυτή συνδυάζει πολυφασματικές εικόνες HLS και σημειακά δεδομένα LiDAR από το όργανο GEDI. Το συγκεκριμένο μοντέλο κάνει χρήση πολυφασματικών εικόνων κατά την προεκπαίδευση, αντί των συμβατικών RGB εικόνων, έτσι είναι πολύ πιθανόν να ενισχύει την την αποτελεσματικότητα του μοντέλου, καθώς αποτυπώνουν λεπτομερέστερα τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας της Γης.

Στα πειράματα που διεξήχθησαν, παρατηρήθηκαν ενδιαφέροντα ευρήματα. Στην πρώτη περίπτωση, αν και το σφάλμα (RMSE, MAE) ήταν χαμηλότερο, η συνολική προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου να αποτυπώνει το ύψος της κόμης μιας περιοχής ήταν περιορισμένη. Το αποτέλεσμα φάνηκε να εστιάζει κυρίως στην ακριβή πρόβλεψη των GEDI shots, χωρίς όμως να αποδίδει ικανοποιητικά τον ευρύτερο χάρτη της περιοχής. Αυτή η αστοχία ενδέχεται να οφείλεται σε συγκεκριμένους περιορισμούς των δεδομένων, όπως η χιονοκάλυψη που παρατηρήθηκε κατά τους χειμερινούς μήνες συλλογής των πολυφασματικών εικόνων, η ύπαρξη επικάλυψης (overlap) μεταξύ των δεδομένων εκπαίδευσης και δοκιμής, οδηγώντας πιθανόν σε data leakage. Αντίθετα, στο δεύτερο πείραμα, παρατηρήθηκε ότι, παρά το γεγονός πως οι τιμές του MAE και του RMSE ήταν υψηλότερες, ο τελικός χάρτης που παρήχθη αντανακλά και σκιαγραφεί ικανοποιητικά την περιοχή ενδιαφέροντος. Για την αποφυγή προβλημάτων που παρατηρήθηκαν στο πρώτο πείραμα, εφαρμόστηκαν βελτιώσεις, όπως η εξάλειψη της επικάλυψης μεταξύ των περιοχών εκπαίδευσης και δοκιμής και η συλλογή πολυφασματικών εικόνων από διαφορετικές χρονικές περιόδους, αποφεύγοντας τη χρήση δεδομένων από χειμερινούς μήνες. Επιπλέον, ενσωματώθηκαν υδάτινες περιοχές στο σύνολο δεδομένων για να ενισχυθεί η ικανότητα του μοντέλου να διαχειρίζεται και αυτές τις κατηγορίες δεδομένων. Έτσι, τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι το μοντέλο μπορεί να αποδίδει σε πιο γενικευμένες συνθήκες, αν και η ακρίβεια σε επίπεδο σημειακών δεδομένων παραμένει ένα ζήτημα που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Τα παραπάνω ευρήματα αναδεικνύουν τη δυναμική της πολυφασματικής ανάλυσης και της αξιοποίησης προεκπαίδευμένων μοντέλων σε συνδυασμό με δεδομένα LiDAR, ενώ παράλληλα υπογραμμίζουν τη σημασία της ποιότητας και της προετοιμασίας του συνόλου δεδομένων για την ακρίβεια

και την αξιοπιστία των προβλέψεων. Επιπλέον, το δεύτερο μοντέλο αξιολογήθηκε στην αρχική περιοχή ενδιαφέροντος, και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο παραγόμενος χάρτης αντανακλά με ικανοποιητική ακρίβεια τα ground truth δεδομένα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ένα τμήμα αυτής της περιοχής περιλαμβανόταν στα δεδομένα εκπαίδευσης, ενώ άλλο τμήμα δεν είχε προηγουμένως παρουσιαστεί στο μοντέλο. Αυτή η θετική απόδοση δείχνει ότι το μοντέλο μπορεί να γενικεύει αποτελεσματικά και να παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα ακόμη και σε δεδομένα που δεν είχε ξαναδεί κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης.

Μια ακόμη κρίσιμη παρατήρηση αφορά τη χρήση της συνάρτησης ενεργοποίησης GELU στη διαδικασία εκπαίδευσης του μοντέλου, η οποία αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική έναντι της ReLU. Η GELU επιλύει το πρόβλημα του vanishing gradient και εισάγει μια μη μονοτονική συμπεριφορά, επιτρέποντας στο μοντέλο να συλλάβει πιο περίπλοκα μοτίβα. Συνεπώς, η χρήση αυτής της συνάρτησης ενεργοποίησης συνέβαλε στη βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου και επιβεβαίωσε τη συνεισφορά της στην αρχιτεκτονική των transformer. Επιπλέον, ένας σημαντικός παράγοντας που ενδέχεται να συνέβαλε στην απόδοση του μοντέλου είναι η στρατηγική που ακολουθήθηκε στη δεύτερη αρχιτεκτονική, όπου διατηρήθηκαν τα υπάρχοντα στρώματα του αποκαδικοποιητή, εκτός από το τελευταίο στρώμα, το οποίο αφαιρέθηκε για την ενσωμάτωση του προσαρμοσμένου head για την πρόβλεψη του ύψους. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε τη φόρτωση και τη διατήρηση περισσότερων από τις προεκπαίδευμένες παραμέτρους, ενισχύοντας έτσι την απόδοση του μοντέλου.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι ένα ελαφρύ μοντέλο, με σημαντικά λιγότερες παραμέτρους σε σχέση με το θεμελιώδες μοντέλο, μπορεί να επιτύχει ικανοποιητική απόδοση σε downstream tasks, χρησιμοποιώντας περιορισμένο όγκο επισημασμένων δεδομένων. Παρά τις ενθαρρυντικές επιδόσεις, το Privthi παρουσιάζει ορισμένες αδυναμίες, καθώς αποδίδει καλύτερα σε διεργασίες που σχετίζονται άμεσα με την αρχική του εκπαίδευση, όπως το classification, ενώ η απόδοσή του σε segmentation tasks παραμένει περιορισμένη, όπως αναφέρεται στη μελέτη των Sosa et al. [38]. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι αρκετές αρχιτεκτονικές νευρωνικών δικτύων πέρα των transformer αποφέρουν εξίσου ή και ακόμα καλύτερα αποτελέσματα, όπως το μοντέλο των Alagialoglou et al. (2022) [14] με αρχιτεκτονική LSTM, το οποίο εμφανίζει καλύτερη απόδοση στην πρόβλεψη ύψους δέντρων, καταγράφοντας μέσο απόλυτο σφάλμα 1.29 μέτρα σε μια ευρωπαϊκή περιοχή δοκιμών  $79 \text{ km}^2$ .

## 4.2 Μελλοντικό έργο

Παρά τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα, υπάρχουν σημαντικά περιθώρια βελτίωσης του μοντέλου, ειδικά όσον αφορά την ικανότητά του να προβλέπει τις ακραίες τιμές ύψους, δηλαδή πολύ χαμηλή ή πολύ υψηλή βλάστηση. Επιπλέον, παρατηρούνται artifacts στις ακμές των χωρίων, τα οποία ενδέχεται να διορθωθούν μέσω της χρήσης μεγαλύτερων χωρίων αντί για 32x32, προκειμένου το μοντέλο να λάβει μια πιο γενική εικόνα της χωρικής πληροφορίας. Εναλλακτικά, μπορεί να εξεταστεί η εφαρμογή άλλων τεχνικών για τη μείωση αυτών των προβλημάτων. Επιπλέον, προτείνεται η διεξαγωγή δοκιμών σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές με ποικίλα χαρακτηριστικά και σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, προκειμένου να αξιολογηθεί η γενίκευση του μοντέλου και η ικανότητά του να ανταποκρίνεται σε διαφορετικές συνθήκες. Μια ενδιαφέρουσα κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα θα ήταν η εκπαίδευση του μοντέλου από την αρχή,

χωρίς την αξιοποίηση των προεκπαιδευμένων βαρών. Αυτό θα επέτρεπε την αποτίμηση της πραγματικής συνεισφοράς των προεκπαιδευμένων παραμέτρων και τη διερεύνηση του βαθμού στον οποίο αυτές βελτιώνουν την απόδοση του μοντέλου.

Για τη μελλοντική βελτίωση του μοντέλου, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στις αστικές περιοχές, όπου το μοντέλο δυσκολεύεται να αποδώσει με ακρίβεια τον χάρτη ύψους των δέντρων, εξαιτίας της αυξημένης πληροφορίας και του θορύβου. Αυτές οι δυσκολίες περιορίζουν την απόδοση των προβλέψεων, και η ενσωμάτωση δεδομένων ground truth από αερομεταφερόμενους αισθητήρες LiDAR στο pipeline της εκπαίδευσης, θα μπορούσε να ενισχύσει σημαντικά την ακρίβεια του μοντέλου, βελτιώνοντας την ποιότητα των εκτιμήσεων.

Επιπλέον, η εισαγωγή ενός δείκτη τύπου δασών (forest type indicator), που έχει ήδη δοκιμαστεί σε άλλες μελέτες, όπως αυτή των Xi et al. (2022) [34], θα μπορούσε να αποδώσει καλύτερα αποτελέσματα, καθώς η διάκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων δασών αναμένεται να ενισχύσει την απόδοση του μοντέλου, σε σύγκριση με την ομαδοποίηση όλων σε μία ενιαία κατηγορία. Ομοίως, ένας τέτοιος δείκτης θα μπορούσε να εφαρμοστεί και στις αστικές περιοχές για καλύτερη διάκριση μεταξύ των διάφορων τύπων βλάστησης, ενισχύοντας την ποιότητα των προβλέψεων.

Τέλος, μια πιθανή μελλοντική κατεύθυνση περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός παγκόσμιου συνόλου δεδομένων, το οποίο θα παρέχει πληροφορίες για το ύψος της βλάστησης σε παγκόσμια κλίμακα. Παράλληλα, η αναβάθμιση του υφιστάμενου συνόλου δεδομένων μέσω της εφαρμογής διαφοροποιημένων φίλτρων ποιότητας στα GEDI shots, όπως ο διαχωρισμός μεταξύ power και coverage beams ή/και δεδομένων ημέρας και νύχτας, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει επαρκής όγκος δεδομένων, θα μπορούσε να προσφέρει πιο αξιόπιστες εισόδους για την εκπαίδευση και τη δοκιμή του μοντέλου. Μια εκτενέστερη ανάλυση της χρονικής συσχέτισης της ευαισθησίας των δεδομένων GEDI με βάση την ώρα (ημέρα/νύχτα) και την εποχή, παρουσιάζεται στο Παράτημα Α'. Η αξιοποίηση της πλήρους γκάμας προϊόντων που προσφέρει το όργανο GEDI ανοίγει νέες προοπτικές για τη μελέτη της βλάστησης και του ύψους των δασικών εκτάσεων της Γης. Πέρα από το σχετικό ύψος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, δείκτες όπως ο Foliage Height Diversity Index (FHD), ο Plant Area Index (PAI) και ο Leaf Area Index (LAI), καθώς και οι εκτιμήσεις υπέργειας βιομάζας (Aboveground Biomass Density, AGBD), προσφέρουν τη δυνατότητα για πιο ολοκληρωμένες αναλύσεις.

Συνοψίζοντας, τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα της παρούσας μελέτης θέτουν τις βάσεις για περαιτέρω έρευνα και εξέλιξη στον τομέα της πρόβλεψης ύψους βλάστησης, με έμφαση στη συνεχή βελτίωση της ακρίβειας και την αξιοποίηση προεκπαιδευμένων μοντέλων στον τομέα των γεωχωρικών δεδομένων.

# **Παράρτημα Α'**

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

### **Α'.1 Χρονική συσχέτιση της ευαισθησίας των δεδομένων GEDI**

Για την αξιολόγηση των δεδομένων του gedi χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες μετρικές, που σχετίζονται με την δασική πυκνότητα της περιοχής, τις καιρικές συνθήκες και άλλες παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα, στα L2A προϊόντα τα οποία μελετούνται σε αυτή την διπλωματική συμπεριλαμβάνονται το quality\_flag και η ευαισθησία (sensitivity), ώστε να αξιολογηθεί η κάθε βολή ως χρήσιμη για να χρησιμοποιηθεί ή ως κακής ποιότητας, ώστε να απορριφθεί. Το συγκεκριμένο μετρικό χρησιμοποιείται κυρίως ως μια γενική οδηγία χρήσης και δεν περιορίζεται στις καιρικές συνθήκες ως κριτήριο αξιολόγησης. Τα σύνολα δεδομένων L2A και L2B quality\_flag χρησιμοποιούν ένα όριο ευαισθησίας 0.9 πάνω από την ξηρά (0.5 πάνω από τον ωκεανό), αλλά υπό ορισμένες συνθήκες, (π.χ. πυκνά δάση), η χρήση υψηλότερου ορίου μπορεί να αποβεί πιο αποτελεσματική [28].

#### Ευαισθησία

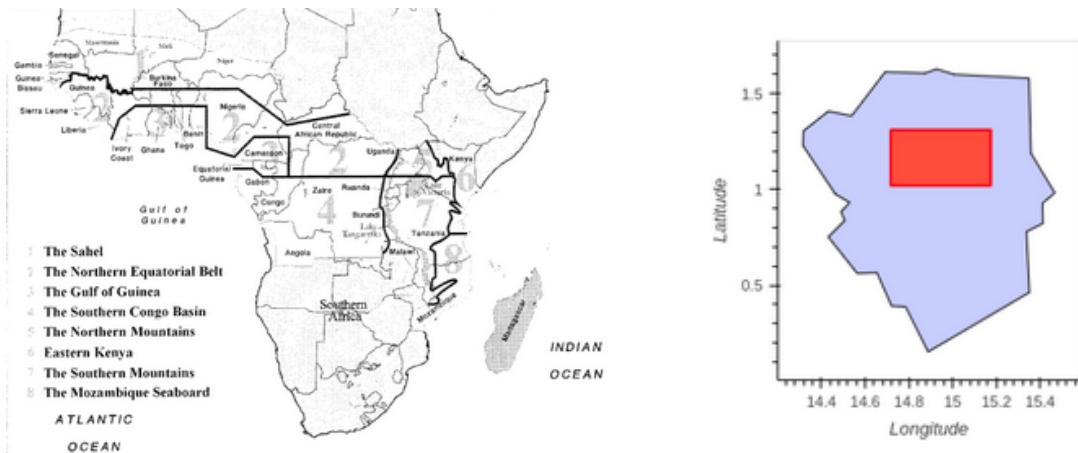
Για αυτό το λόγο θα αναλυθεί περαιτέρω η ευαισθησία της κάθε βολής, η οποία υπολογίζεται μέσω προσομοίωσης της ελάχιστης ανιχνεύσιμης ενέργειας παλμού επιστροφής εδάφους για τον συγκεκριμένο αλγόριθμο ανίχνευσης που έχει επιλεχθεί. Άρα η ευαισθησία προκύπτει από το εμβαδόν αυτής της επιστροφής διαιρεμένο με το εμβαδόν της συνολικής κυματομορφής επιστροφής και παρέχει πληροφορίες για το σχετικό ελάχιστο ποσοστό της επιστροφής που πρέπει να υπάρχει στην επίγεια επιστροφή για να ανιχνευθεί. Λόγω της εκτενούς διακύμανσης των ατμοσφαιρικών συνθηκών, οι οποίες κυμαίνονται από απόλυτα καθαρές έως πλήρως συννεφιασμένες, καθώς και όλα τα ενδιάμεσα επίπεδα, η επιστροφή σημάτων του GEDI παρουσιάζει σημαντικές ποιοτικές διαφοροποιήσεις, όσον αφορά την ισχύ του. Εξίσου σημαντική είναι και η εξάρτηση της ικανότητας διείσδυσης θόλων από την ισχύ του επιστρεφόμενου σήματος. Οπότε, για τον εντοπισμό κυματομορφών που ενδέχεται να μην έχει ανιχνευθεί το πραγματικό επίπεδο εδάφους, είτε λόγω ασθενών σημάτων επιστροφής, είτε/και κάλυψης υψηλής πυκνότητας βλάστηση, υπολογίζεται η ευαισθησία, μια μετρική απόδοσης ανίχνευσης σήματος για την ικανότητα ανίχνευσης εδάφους για κάθε κυματομορφή.

Παρατηρήθηκε ότι η ποιότητα των μετρήσεων βελτιώνεται υπό συνθήκες χαμηλής συννεφιάς, μια παρατήρηση που συσχετίζεται με την εποχή. Επιπλέον, η απουσία ηλια-

κής ακτινοβολίας διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο, αφού αποτρέπει τη δημιουργία θορύβου στο μέσο μέτρησης. Συνεπώς, στη συνέχεια, θα προσπαθήσουμε να επιβεβαιώσουμε την παρατήρηση αυτή.

### A'.1.1 Περιοχή: πάρκο Odzala Kokoua - Ισημερινός

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε η επιλογή ενός bounding box, μιας περιοχής ενδιαφέροντος, εντός των γεωγραφικών ορίων του πάρκου Odzala-Kokoua [39], με συνολική έκταση  $1639.87 \text{ km}^2$  A'.1. Κατά τη μελέτη των κλιμάτων στις περιοχές της Ισημερινής, παρατηρούμε ότι το πάρκο ανήκει στην περιοχή 3 "Κόλπος της Γουινέας", όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα A'.1a', [40].



Σχήμα A.1: Γεωγραφική απεικόνιση της περιοχής μελέτης.

#### Εποχές

Σε αυτή την ζώνη κυριαρχούν δύο εποχές: η ξηρή περίοδος, εκτείνεται από τον Νοέμβριο έως τον Φεβρουάριο, και η υγρή περίοδος, η οποία ξεκινά τον Μάρτιο και διαρκεί έως τον Ιούνιο. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, παρατηρείται ξηρός αέρας με μικρή πιθανότητα βροχοπτώσεων, ενώ οι νεφώσεις βρίσκονται στα ετήσια χαμηλότερα επίπεδα. Αυτές οι συνθήκες αναμένεται να συμβάλουν στην παραγωγή βολών υψηλής ποιότητας. Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, παρατηρείται αύξηση της νεφωσης, με ταυτόχρονη ενίσχυση των απογευματινών βροχών και καταιγιδών. Επιπλέον, τον Ιούνιο οι καταιγίδες μειώνονται αισθητά σε ένταση, δίνοντας τη θέση τους σε ελαφρές αλλά επίμονες βροχές μουσώνων που διαρκούν έως και 12 ώρες. Αυτοί οι παράγοντες πιθανότατα θα συνεισφέρουν στη δημιουργία δυσμενών συνθηκών για την ποιότητα των βολών [40].

#### Ανατολή και δύση ήλιου

Στη συνέχεια, εξετάσαμε την ανατολή και τη δύση του ηλίου, με σκοπό να διαπιστώσουμε εάν η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει δυσμενώς το όργανο μέτρησης. Στον μεσημβρινό Ισημερινό, ο ήλιος ανατέλλει περίπου στις 6:00 π.μ. WAT και δύει περίπου στις 6:00 μ.μ. WAT, τόσο κατά τους καλοκαιρινούς όσο και τους χειμερινούς μήνες, ενώ στο UTC σύστημα αντίστοιχα οι ώρες θα είναι 5:00 π.μ. μέχρι 5:00 μ.μ.

## Υγρή και ξηρή περίοδος

Τα δεδομένα από κάθε τροχιά του GEDI κατηγοριοποιήθηκαν βάσει των προαναφερθέντων κριτηρίων, δηλαδή υγρής ή ξηρής περιόδου και ημέρας ή νύχτας, ανάλογα με την χρονική στιγμή που πέρασε ο δορυφόρος από την περιοχή αυτή.

Εποχή και Ώρα	Αριθμός τροχών	Μέγεθος (σειρές x στήλες)
Ξηρή Περίοδος - Ημέρα	7	23339 × 16
Ξηρή Περίοδος - Νύχτα	6	15564 × 16
Υγρή Περίοδος - Ημέρα	14	59782 × 16
Υγρή Περίοδος - Νύχτα	8	38473 × 16

Πίνακας Α'.1: Πληροφορίες για τον αριθμό των Granules και το μέγεθος των δεδομένων ανά εποχή και ώρα της ημέρας.

Μετά την εφαρμογή του φίλτρου ποιότητας (quality flag), αφαιρέθηκαν από το data-frame οι γραμμές στις οποίες η στήλη Quality Filter Flag(QFF) είχε τιμή μηδέν, και ύστερα εφαρμόστηκε ένα νέο φίλτρο Ευαισθησίας  $> 0.95$ . Επιπλέον, τα δεδομένα επεξεργάστηκαν και χωρίς την εφαρμογή του quality flag filter, επιλέγοντας τις γραμμές όπου η ευαισθησία ήταν μεγαλύτερη από 0.65 και μικρότερη από 1.

	Υγρή Περίοδος - Νύχτα	Υγρή Περίοδος - Μέρα	Ξηρή Περίοδος - Νύχτα	Ξηρή Περίοδος - Μέρα
Φίλτρο ευαισθησίας $> 0.65$	7.16	15.36	21.93	20.15
QFF και φίλτρο ευαισθησίας $> 0.95$	12.44	30.66	11.71	33.36
Κακής ποιότητας βολές (QFF)	38.65	72.66	64.29	80.47

Πίνακας Α'.2: Ανάλυση των μετρήσεων ευαισθησίας και ποιότητας βολών ανά εποχή και ώρα της ημέρας.

Εφαρμόστηκε στην πρώτη γραμμή αποκλειστικά το φίλτρο της ευαισθησίας, δηλαδή οι τιμές ευαισθησίας να κυμαίνονται μεταξύ 0.65 και 1, εξαλείφοντας τυχόν εκτροπές που μπορεί να οφείλονται σε παράγοντες όπως θόρυβος. Έτσι, μετρήθηκε το ποσοστό των δεδομένων που κόπηκαν από το φίλτρο και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο πίνακα Α'.2. Αντίστοιχα στην δεύτερη γραμμή, εφαρμόστηκε το φίλτρο σημαίας ποιότητας QFF, ενώ στο τρίτο παρουσιάζεται το ποσοστό των βολών υψηλής ποιότητας που απορρίφθηκαν, βασιζόμενο μόνο στο quality flag.

Παρατηρούμε ότι, κατόπιν της εφαρμογής του φίλτρου σημαίας ποιότητας, η βέλτιστη απόδοση παρατηρείται κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου κατά τις νυχτερινές ώρες, όπως αναμενόταν, και χαμηλότερης ποιότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας στην υγρή περίοδο. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι αντίστοιχα καλά αποτελέσματα παρουσιάζονται για την υγρή περίοδο κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Δείκτης Συσχέτισης Spearman (Day/Night vs Sensitivity):

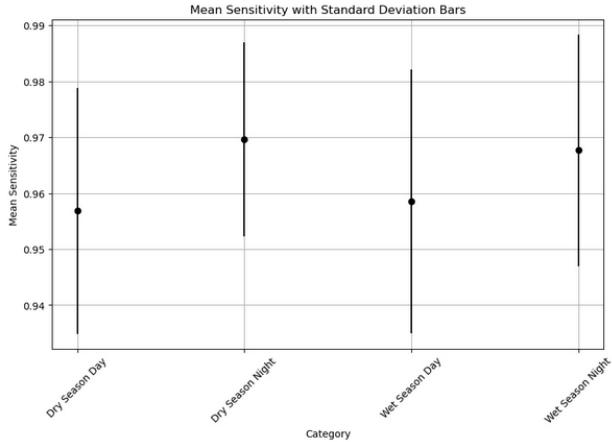
$$\text{Spearman Correlation Coefficient} : 0.27$$

Η θετική συσχέτιση ερμηνεύεται ως την τάση της ευαισθησία να αυξάνεται κατά τη μετάβαση από την ημέρα στη νύχτα.

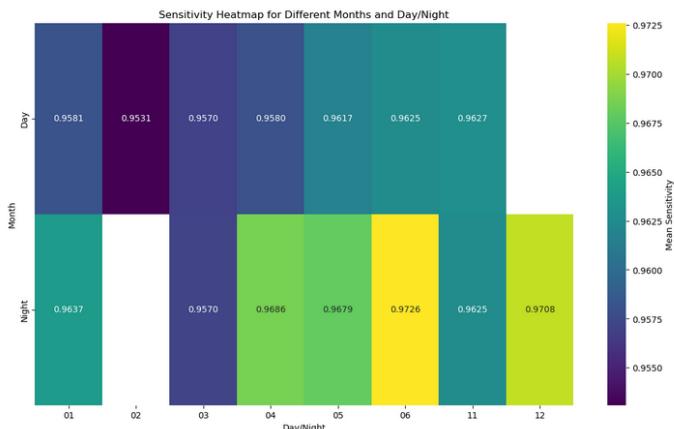
## Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων

Εφαρμογή φίλτρου σημαίας ποιότητας και Ευαισθησίας  $> 0.95$

Αρχικά, θα εξετάσουμε το σενάριο όπου εφαρμόστηκε στα δεδομένα φίλτρο ποιότητας (QFF). Από τα παρακάτω διαγράμματα Α'.2 γίνεται εμφανές ότι κατά τη διάρκεια της ημέρας παρατηρούμε χαμηλότερες τιμές ευαισθησίας, που υποδηλώνουν χαμηλότερη ποιότητα βολών, ενώ το βράδυ παρατηρούμε μια βελτίωση των τιμών αυτών.



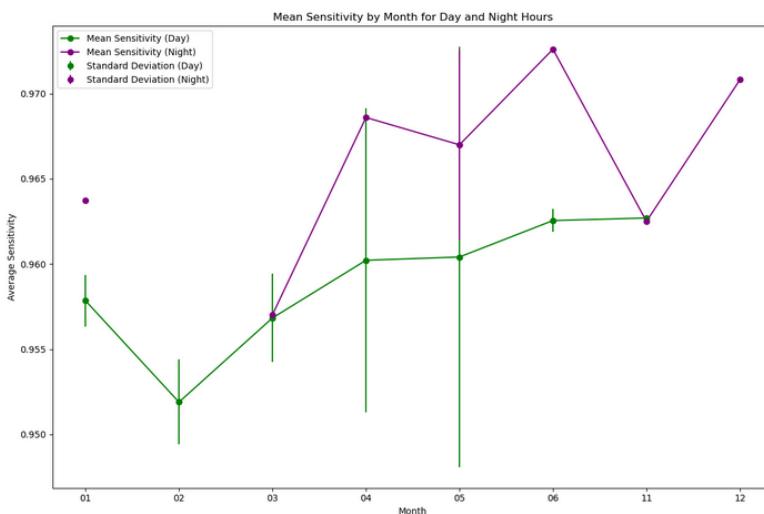
(α) Απεικόνιση μέσων τιμών ευαισθησίας για κάθε περίοδο και η τυπική τους απόκλιση.



(β) Θερμικός χάρτης ευαισθησίας ανά μήνα και κατά διάκριση ημέρας και νύχτας.

**Σχήμα Α'.2:** Στατιστικά για την περίπτωση της εφαρμογής του φίλτρου ευαισθησίας και του QFF.

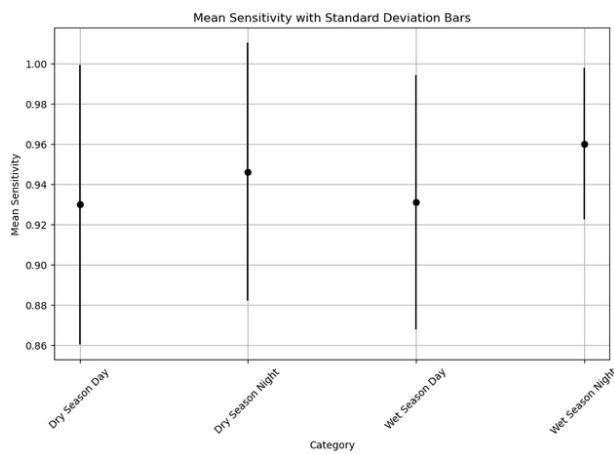
Αναλύοντας τις μηνιαίες παρατηρήσεις μεταξύ ημέρας και νύχτας, παρουσιάζουμε το ακόλουθο διάγραμμα Α'.3 μέσων τιμών ευαισθησίας, συνοδευόμενο από τις τυπικές αποκλίσεις, για κάθε μήνα. Είναι εμφανές ότι κατά κύριο λόγο οι νυχτερινές ώρες εμφανίζουν καλύτερη απόδοση σε σχέση με τις ώρες ημέρας.



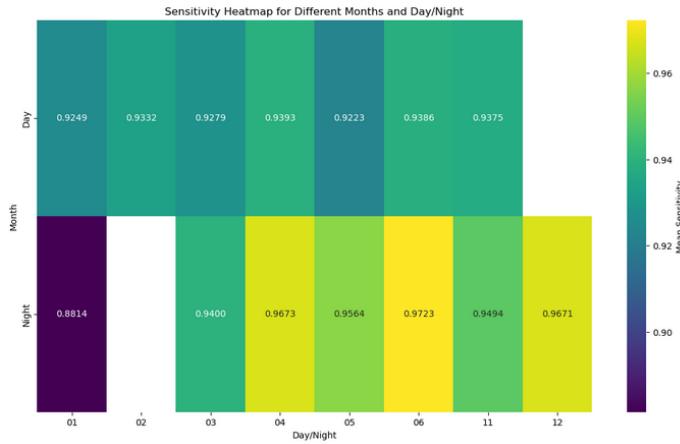
Σχήμα Α'.3: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις μηνιαία.

#### Εφαρμογή φίλτρου ευαισθησίας ( $0.65 < \text{Ευαισθησία} < 1$ )

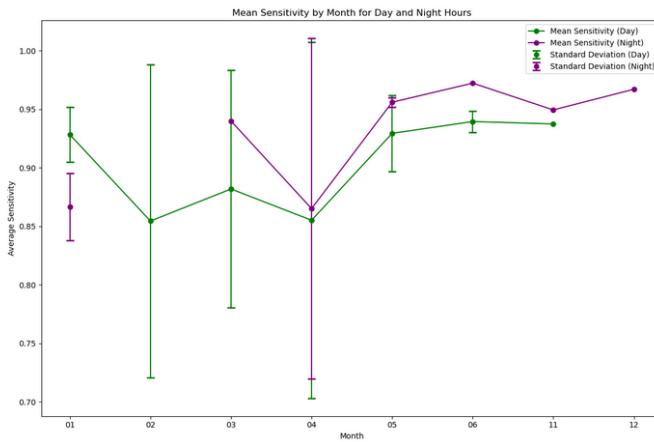
Αντίστοιχα, στην περίπτωση εφαρμογής φίλτρου ευαισθησίας που ορίστηκε παρατίθενται τα ακόλουθα διαγράμματα στατιστικής ανάλυσης για την περίπτωση εφαρμογής φίλτρου ευαισθησίας ( $0.65 < \text{Ευαισθησία} < 1$ ) Α'.4, Α'.5, Α'.6. Ο θερμικός χάρτης αποκαλύπτει ότι κατά τη διάρκεια των νυχτερινών ωρών, όταν δεν υπάρχει ηλιακή ακτινοβολία, παρατηρείται συνήθως βελτίωση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα Α'.4: Απεικόνιση μέσων τιμών ευαισθησίας για κάθε περίοδο και η τυπική τους απόκλιση.



Σχήμα Α'.5: Θερμικός χάρτης ευαισθησίας ανά μήνα και κατά διάκριση ημέρας και νύχτας.

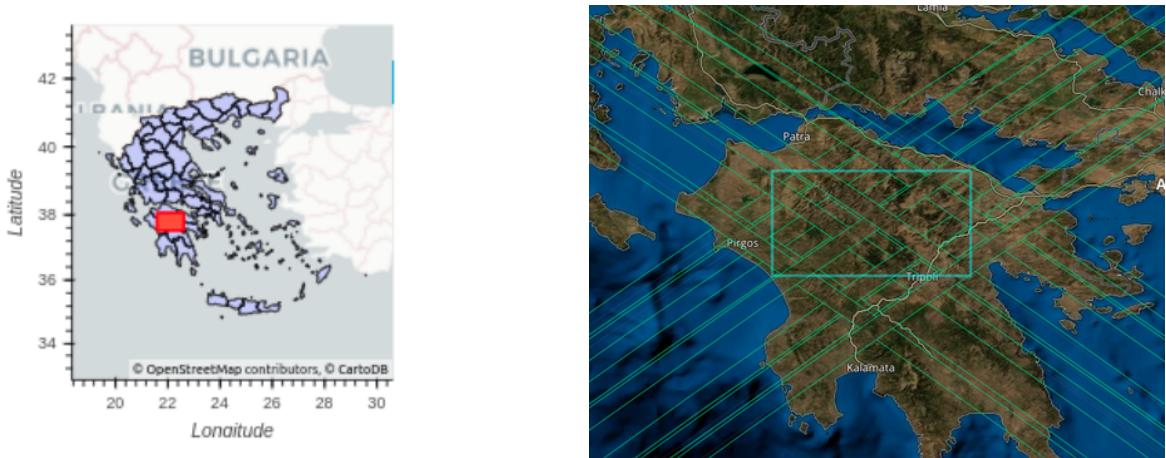


Σχήμα Α'.6: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις μηνιαία.

Φαίνεται ότι η απουσία ηλιακής ακτινοβολίας επιδρά περισσότερο στα αποτελέσματα σε σύγκριση με την υγρή περίοδο. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η παρουσία νεφών δεν είναι σταθερή κατά τις υγρές περιόδους, επομένως αυτό το κριτήριο είναι αμφίβολο.

### **Α'.1.2 Περιοχή: δασική έκταση στην Ελλάδα - Μεσόγειος**

Προκειμένου να επαληθευτούν οι παραπάνω εκτιμήσεις σχετικά με την εποχή και την ώρα της ημέρας, θα διενεργήσουμε μια παρόμοια ανάλυση, εφαρμόζοντας τα ίδια βήματα, αλλά αυτή τη φορά σε ένα κλίμα που είναι μεσογειακό. Οπότε επιλέχθη-κε μια δασική κυρίως έκταση στην Ελλάδα, όπως φαίνεται στην εικόνα Α'.7, έκτασης 5454.04 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Οι συντεταγμένες του bounding box είναι: βόρεια = 37.7963, δυτικά = 21.7485, ανατολικά = 22.3637, νότια = 37.5283.



Σχήμα A.7: Γεωγραφική απεικόνιση της περιοχής μελέτης.

### Καλοκαιρινοί και χειμερινοί μήνες

Στο μεσογειακό κλίμα γίνεται εύκολα διαχωρισμός σε 4 εποχές και σε μήνες με υψηλή πυκνότητα βροχοπτώσεων. Εδώ θα αναλυθούν οι βροχεροί μήνες -Οκτώβριος, Νοέμβριος, Δεκέμβριος και Ιανουάριος, και οι καλοκαιρινοί μήνες ως τη δεύτερη ομάδα - Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος. Τα αποτελέσματα που αναμένονται είναι να έχουμε βολές καλύτερης ποιότητας τις νυχτερινές καλοκαιρινές ώρες, ενώ χαμηλότερης ποιότητας τις μεσημεριανός ώρες των βροχερών μηνών, αλλά ίσως και τις αντίστοιχες καλοκαιρινές λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας.

	Σημ. Περίοδος - Νύχτα	Σημ. Περίοδος - Μέρα	Υγρ. Περίοδος - Νύχτα	Υγρ. Περίοδος - Μέρα
Φίλτρο ευαισθησίας > 0.65	0.35	2.71	8.84	3.89
QFF και φίλτρο ευαισθησίας > 0.95	18.65	23.07	25.94	20.39
Κακής ποιότητας βολές (QFF)	6.36	30.02	52.58	34.07

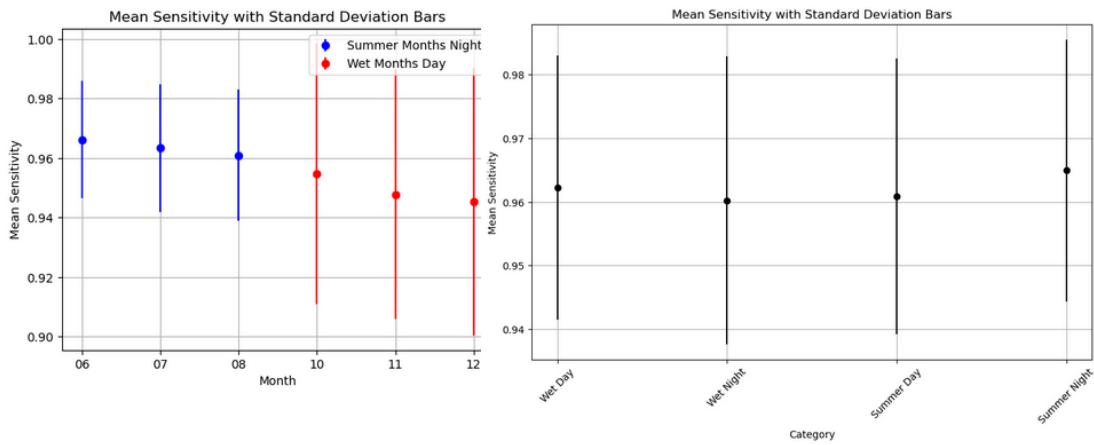
Πίνακας A'.3: Ανάλυση των μετρήσεων ευαισθησίας και ποιότητας βολών ανά εποχή και ώρα της ημέρας.

Όπως παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα A'.3, τα δεδομένα δείχνουν ότι οι βολές υψηλότερης ποιότητας παρατηρούνται κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας τους καλοκαιρινούς μήνες, με εμφανή διαφορά σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τρεις συνθήκες. Σε αντίθεση, παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα χαμηλότερης ποιότητας βολών στις υπόλοιπες περιπτώσεις, και κυρίως τους μήνες με υψηλή πιθανότητα βροχοπτώσεων.

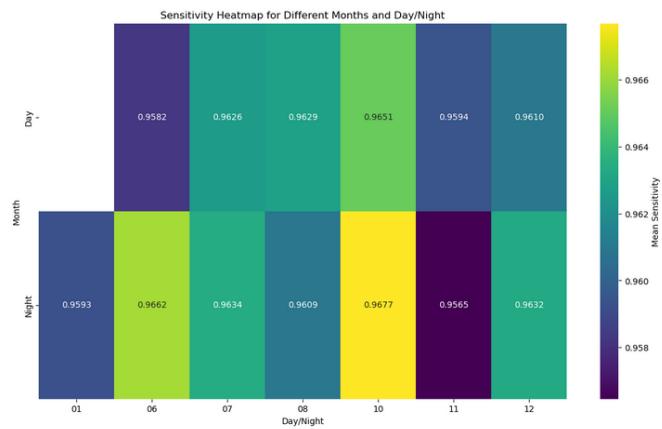
### Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων

#### Εφαρμογή φίλτρου σημαίας ποιότητας και Ευαισθησίας > 0.95

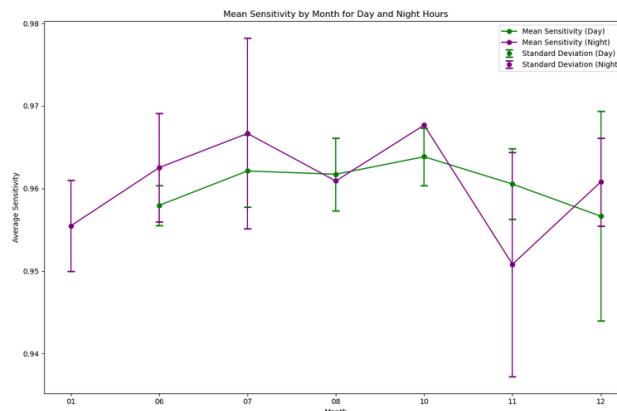
Παρατηρούμε και σε αυτή τη μελέτη, μέσω της στατιστικής ανάλυσης για την περίπτωση της εφαρμογής του φίλτρου ευαισθησίας και του QFF, ότι τα βέλτιστα αποτελέσματα προκύπτουν κυρίως κατά τη διάρκεια της νύχτας τις καλοκαιρινές μέρες. Επιπλέον, σύμφωνα με το θερμικό χάρτη δεν παρουσιάζεται σε όλους τους μήνες υπολογίσιμα σημαντική διαφορά ανάμεσα σε μέρα και νύχτα A'.10, A'.9, A'.8.



Σχήμα Α'.8: (αριστερά) Η μέση τιμή ευαισθησίας και η τυπική απόκλιση τους καλοκαιρινούς μήνες για νυχτερινές ώρες και τους βροχερούς μήνες τις πρωινές ώρες. (δεξιά) Η μέση τιμή και τυπική απόκλιση της ευαισθησίας ανά περίοδο.



Σχήμα Α'.9: Θερμικός χάρτης ευαισθησίας ανά μήνα και κατά διάκριση ημέρας και νύχτας.

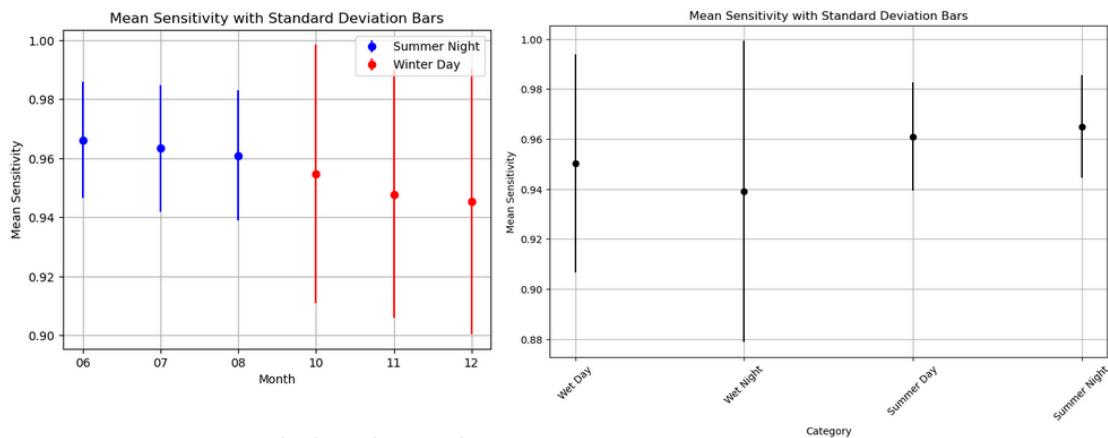


Σχήμα Α'.10: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις μηνιαία.

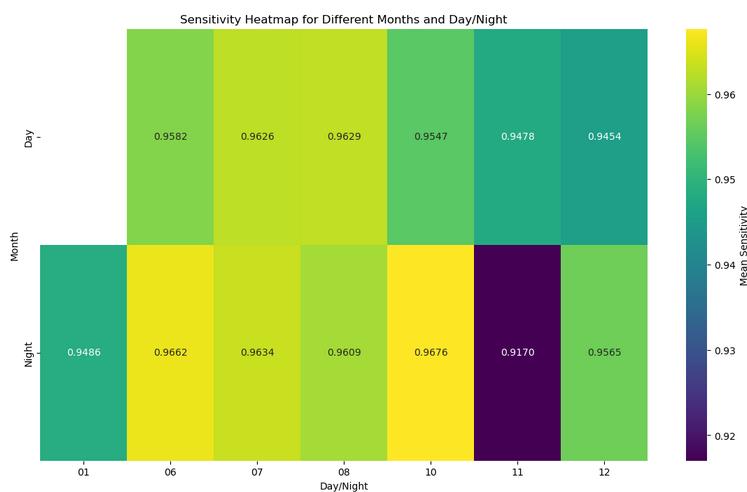
Μία ανάλυση των διαγραμμάτων Α'.10, Α'.9 υποδεικνύει ότι, ενώ παρατηρείται μια γενική τάση βελτίωσης των αποτελεσμάτων κατά τις νυχτερινές ώρες, δεν είναι δυνατόν να εξαχθούν απόλυτα συμπεράσματα. Παρά ταύτα, η συγκεκριμένη τάση παρουσιάζεται σε σημαντικό αριθμό περιπτώσεων, γεγονός που υποδεικνύει μια ενδεχόμενη συσχέτιση.

#### Εφαρμογή φίλτρου σημαίας ποιότητας και Ευαισθησίας > 0.95

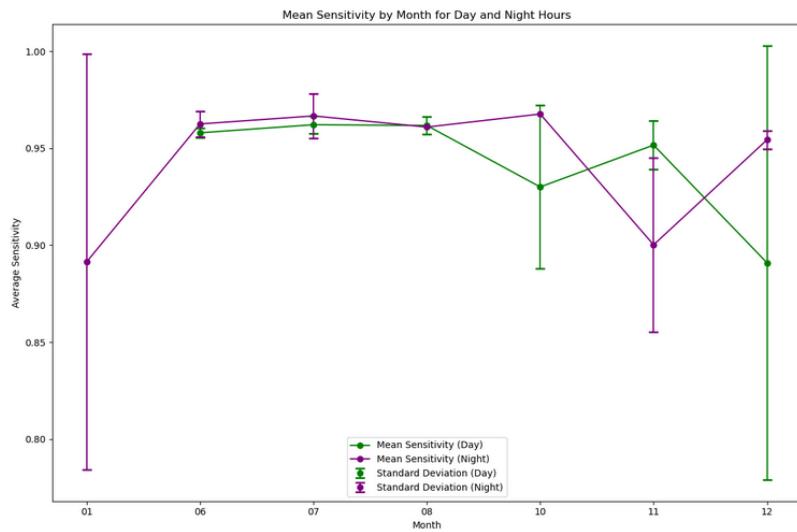
Τα παρακάτω γραφήματα Α'.12, Α'.11, Α'.13 παρουσιάζουν την περίπτωση, όπου η παράμετρος ευαισθησίας του φίλτρου είναι πιο ελαστική, λαμβάνοντας υπόψη μια χαμηλότερη ευαισθησία και, επομένως, μια μειωμένη ποιότητα των ενδείξεων των βολών.



Σχήμα Α'.11: (αριστερά) Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις μηνιαία για την ομάδα των καλοκαιρινών μηνών τη νύχτα και των υγρών μηνών την ημέρα. (δεξιά) Η μέση τιμή και τυπική απόκλιση της ευαισθησίας ανά περίοδο.



Σχήμα Α'.12: Θερμικός χάρτης ευαισθησίας ανά μήνα και κατά διάκριση ημέρας και νύχτας.



Σχήμα Α'.13: Μέσες τιμές και τυπικές αποκλίσεις μηνιαία.

# Παράτημα Β'

## Ακρωνύμια και συντομογραφίες

**GEDI** Global Ecosystem Dynamics Investigation

**HLS** Harmonized Landsat and Sentinel-2

**LiDAR** Light Detection and Ranging

**SR** Surface Reflectance

**RH** Relative Height

**CHM** Canopy height map

**LP DAAC** Land Processes Distributed Active Archive Center

**QGIS** Quantum Geographic Information System

**MGRS** Military Grid Reference System

**LaSRC** Land Surface Reflectance Code

**MSI** Multi-Spectral Instrument

**BRDF** Bidirectional Reflectance Distribution Function

**OLI** Operational Land Imager

**aoi** area of interest

**NASA** National Aeronautics and Space Administration

**MSI** MultiSpectral Instrument

**FM** Foundation Model

**CNN** Convolutional Neural Network

**LSTM** Long Short-Term Memory

**NASA** National Aeronautics and Space Administration

**ViT** Vision Transformer

**MAE** Masked AutoEncoder

**QFF** Quality Filter Flag

**GELU** Gaussian Error Linear Unit

**ReLU** Rectified Linear Unit

# Bibliography

- [1] P. De Frenne, F. Zellweger, F. Rodríguez-Sánchez, B. R. Scheffers, K. Hylander, M. Luoto, M. Vellend, K. Verheyen, and J. Lenoir, “Global buffering of temperatures under forest canopies,” *Nature Ecology & Evolution*, vol. 3, no. 5, pp. 744–749, 2019.
- [2] R. K. Dixon, A. Solomon, S. Brown, R. Houghton, M. Trexier, and J. Wisniewski, “Carbon pools and flux of global forest ecosystems,” *science*, vol. 263, no. 5144, pp. 185–190, 1994.
- [3] J. M. Cavender-Bares, E. Nelson, J. E. Meireles, J. R. Lasky, D. A. Miteva, D. J. Nowak, W. D. Pearse, M. R. Helmus, A. E. Zanne, W. F. Fagan *et al.*, “The hidden value of trees: Quantifying the ecosystem services of tree lineages and their major threats across the contiguous us,” *PLOS Sustainability and Transformation*, vol. 1, no. 4, p. e0000010, 2022.
- [4] A. K. Skidmore, N. C. Coops, E. Neinavaz, A. Ali, M. E. Schaepman, M. Paganini, W. D. Kissling, P. Vihervaara, R. Darvishzadeh, H. Feilhauer *et al.*, “Priority list of biodiversity metrics to observe from space,” *Nature ecology & evolution*, vol. 5, no. 7, pp. 896–906, 2021.
- [5] M. G. Gale, G. J. Cary, A. I. Van Dijk, and M. Yebra, “Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 255, p. 112282, 2021.
- [6] T. ElGharbawi, J. Susaki, K. Chureesampant, C. Arunplod, J. Thanyapraneedkul, P. Limlahapun, and A. Suliman, “Performance evaluation of convolution neural networks in canopy height estimation using sentinel 2 data, application to thailand,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 44, no. 5, pp. 1726–1748, 2023.
- [7] M. A. Lefsky, W. B. Cohen, G. G. Parker, and D. J. Harding, “Lidar remote sensing for ecosystem studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists,” *BioScience*, vol. 52, no. 1, pp. 19–30, 2002.
- [8] R. Dubayah, J. Blair, S. Goetz, L. Fatoyinbo, M. Hansen, S. Healey, M. Hofton, G. Hurt, J. Kellner, S. Luthcke *et al.*, “The global ecosystem dynamics investi-

- gation: high-resolution laser ranging of the earth's forests and topography, *sci. remote sens.*, 1, 100002, 2020.
- [9] P. Potapov, X. Li, A. Hernandez-Serna, A. Tyukavina, M. C. Hansen, A. Komareddy, A. Pickens, S. Turubanova, H. Tang, C. E. Silva *et al.*, “Mapping global forest canopy height through integration of gedi and landsat data,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 253, p. 112165, 2021.
  - [10] T. Kattenborn, J. Leitloff, F. Schiefer, and S. Hinz, “Review on convolutional neural networks (cnn) in vegetation remote sensing,” *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 173, pp. 24–49, 2021.
  - [11] N. Lang, K. Schindler, and J. D. Wegner, “Country-wide high-resolution vegetation height mapping with sentinel-2,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 233, p. 111347, 2019.
  - [12] F. Chollet, “Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2017, pp. 1251–1258.
  - [13] L. Alagialoglou, I. Manakos, M. Heurich, J. Červenka, and A. Delopoulos, “Canopy height estimation from spaceborne imagery using convolutional encoder-decoder,” in *MultiMedia Modeling: 27th International Conference, MMM 2021, Prague, Czech Republic, June 22–24, 2021, Proceedings, Part II 27*. Springer, 2021, pp. 307–317.
  - [14] ——, “A learnable model with calibrated uncertainty quantification for estimating canopy height from spaceborne sequential imagery,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1–13, 2022.
  - [15] N. Lang, W. Jetz, K. Schindler, and J. D. Wegner, “A high-resolution canopy height model of the earth,” *Nature Ecology & Evolution*, vol. 7, no. 11, pp. 1778–1789, 2023.
  - [16] H. Touvron, T. Lavril, G. Izacard, X. Martinet, M.-A. Lachaux, T. Lacroix, B. Rozière, N. Goyal, E. Hambro, F. Azhar *et al.*, “Llama: Open and efficient foundation language models,” *arXiv preprint arXiv:2302.13971*, 2023.
  - [17] J. Devlin, “Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding,” *arXiv preprint arXiv:1810.04805*, 2018.
  - [18] J. Jakubik, S. Roy, C. Phillips, P. Fraccaro, D. Godwin, B. Zadrozny, D. Szwarcman, C. Gomes, G. Nyirjesy, B. Edwards *et al.*, “Foundation models for generalist geospatial artificial intelligence, 2023,” *URL https://arxiv.org/abs/2310.18660*, 2023.
  - [19] NASA, “Hls overview,” <https://lpdaac.usgs.gov/data/get-started-data/collection-overview/missions/harmonized-landsat-sentinel-2-hls-overview/>, 2023.
  - [20] G.-S. Xia, X. Bai, J. Ding, Z. Zhu, S. Belongie, J. Luo, M. Datcu, M. Pelillo, and L. Zhang, “Dota: A large-scale dataset for object detection in aerial images,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2018, pp. 3974–3983.

- [21] X. Sun, P. Wang, W. Lu, Z. Zhu, X. Lu, Q. He, J. Li, X. Rong, Z. Yang, H. Chang *et al.*, “Ringmo: A remote sensing foundation model with masked image modeling,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 1–22, 2022.
- [22] A. Dosovitskiy, “An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale,” *arXiv preprint arXiv:2010.11929*, 2020.
- [23] Z. Liu, Y. Lin, Y. Cao, H. Hu, Y. Wei, Z. Zhang, S. Lin, and B. Guo, “Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows,” in *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 2021, pp. 10 012–10 022.
- [24] J. Jakubik, L. Chu, P. Fraccaro, C. Gomes, G. Nyirjesy, R. Bangalore, D. Lambhate, K. Das, D. Oliveira Borges, D. Kimura, N. Simumba, D. Szwarcman, M. Muszynski, K. Weldemariam, B. Zadrozny, R. Ganti, C. Costa, B. Edwards, C. Watson, K. Mukkavilli, H. Schmude, Johannes & Hamann, P. Robert, S. Roy, C. Phillips, K. Ankur, M. Ramasubramanian, I. Gurung, W. J. Leong, R. Avery, R. Ramachandran, M. Maskey, P. Olofossen, E. Fancher, T. Lee, K. Murphy, D. Duffy, M. Little, H. Alejomhammad, M. Cecil, S. Li, S. Khallaghi, D. Godwin, M. Ahmadi, F. Kordi, B. Saux, N. Pastick, P. Doucette, R. Fleckenstein, D. Luanga, A. Corvin, and E. Granger, “Prithvi-100M,” Aug. 2023.
- [25] J. Masek, J. Ju, J.-C. Roger, S. Skakun, E. Vermote, M. Claverie, J. Dungan, Z. Yin, B. Freitag, and C. Justice, “Hls sentinel-2 multi-spectral instrument surface reflectance daily global 30m v2.0,” 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5067/HLS/HLSS30.002>
- [26] M. Hofton, J. B. Blair, S. Story, and D. Yi, “Algorithm theoretical basis document (atbd),” Washington, DC, USA: NASA, 2020.
- [27] NASA LP DAAC, “Gedi product search,” [https://lpdaac.usgs.gov/product\\_search/?query=GEDI&collections=GEDI&view=cards&sort=title](https://lpdaac.usgs.gov/product_search/?query=GEDI&collections=GEDI&view=cards&sort=title).
- [28] N. L. DAAC, *GEDI Level 2 User Guide*, 2021. [Online]. Available: [https://lpdaac.usgs.gov/documents/998/GEDI02\\_UserGuide\\_V21.pdf](https://lpdaac.usgs.gov/documents/998/GEDI02_UserGuide_V21.pdf)
- [29] R. Dubayah, M. Hofton, J. Blair, J. Armston, H. Tang, and S. Luthcke, “Gedi l2a elevation and height metrics data global footprint level v002 [data set],” 2021. [Online]. Available: [https://doi.org/10.5067/GEDI/GEDI02\\_A.002](https://doi.org/10.5067/GEDI/GEDI02_A.002)
- [30] LP DAAC, “Gedi 12a data dictionary,” [https://lpdaac.usgs.gov/documents/586/gedi\\_12a\\_dictionary\\_P001\\_v1.html](https://lpdaac.usgs.gov/documents/586/gedi_12a_dictionary_P001_v1.html).
- [31] J. Masek, J. Ju, J.-C. Roger, S. Skakun, E. Vermote, M. Claverie, J. Dungan, Z. Yin, B. Freitag, and C. Justice, “Hls operational land imager surface reflectance and toa brightness daily global 30m v2.0,” 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5067/HLS/HLSS30.002>
- [32] M. Claverie, J. Ju, J. G. Masek, J. L. Dungan, E. F. Vermote, J.-C. Roger, S. V. Skakun, and C. Justice, “The harmonized landsat and sentinel-2 surface reflectance data set,” *Remote sensing of environment*, vol. 219, pp. 145–161, 2018.

- [33] World Bank, “Climate knowledge portal - switzerland.” [Online]. Available: <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/switzerland>
- [34] Z. Xi, H. Xu, Y. Xing, W. Gong, G. Chen, and S. Yang, “Forest canopy height mapping by synergizing icesat-2, sentinel-1, sentinel-2 and topographic information based on machine learning methods,” *Remote Sensing*, vol. 14, no. 2, p. 364, 2022.
- [35] K. He, X. Chen, S. Xie, Y. Li, P. Dollár, and R. Girshick, “Masked autoencoders are scalable vision learners,” in *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, 2022, pp. 16 000–16 009.
- [36] W. Shi, J. Caballero, F. Huszár, J. Totz, A. P. Aitken, R. Bishop, D. Rueckert, and Z. Wang, “Real-time single image and video super-resolution using an efficient sub-pixel convolutional neural network,” in *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2016, pp. 1874–1883.
- [37] D. Hendrycks and K. Gimpel, “Gaussian error linear units (gelus),” *arXiv preprint arXiv:1606.08415*, 2016.
- [38] J. Sosa, M. Aloulou, D. Rukhovich, R. Sleimi, B. Changaival, A. Kacem, and D. Aouada, “How effective is pre-training of large masked autoencoders for downstream earth observation tasks?” *arXiv preprint arXiv:2409.18536*, 2024.
- [39] A. Parks, “Odzala-kokoua national park,” <https://www.africanparks.org/the-parks/odzala-kokoua>.
- [40] C. A. Donahue, K. M. Traxler, K. Walters, J. Louer, M. T. Gilford, M. Edwards, J. Harding, R. Bonam, and S. Straw, “Equatorial africa: A climatological study,” USAFETAC/TN-95/001, United States Air Force Environmental Technical . . . , Tech. Rep., 1995.