

Εξάρτηση των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία και εύρεση πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας

Dependence of Forbush decreases on magnetic rigidity and determination of primary Cosmic Rays

Authors: Konstantina Vasilopoulou¹, Paraskevas Ntavos²

¹ Division of Nuclear and Particle Physics, Department of Physics, National and Kapodistrian University of Athens, Athens GR-157 84, Greece
sph2200011@uoa.gr

² Division of Nuclear and Particle Physics, Department of Physics, National and Kapodistrian University of Athens, Athens GR-157 84, Greece
sph2200099@uoa.gr

Supervisor: Maria Gerontidou³

³ Division of Nuclear and Particle Physics, Department of Physics, National and Kapodistrian University of Athens, Athens GR-157 84, Greece
mgeront@phys.uoa.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποτελεί ομαδικό project στο πλαίσιο του Εργαστηρίου Κατεύθυνσης Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων και αντιστοιχεί στο 40% του τελικού βαθμού κάθε φοιτητή. Αντικείμενο της μελέτης είναι οι μειώσεις Forbush και η εξάρτησή τους από τη μαγνητική δυσκαμψία, ενώ παράλληλα επιχειρούμε την εκτίμηση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας μέσω ανάλυσης δεδομένων. Για τον σκοπό αυτό αξιοποιούμε τη μεθοδολογία των Wawrzynczak και Alania, σε συνδυασμό με τη συνάρτηση σύζευξης Clem–Dorman, ώστε να συσχετίσουμε μετρήσεις της δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας με χαρακτηριστικά της πρωτογενούς συνιστώσας. Ως πηγή δεδομένων χρησιμοποιούμε μετρήσεις μετρητών νετρονίων από τη βάση NMDB (<https://www.nmdb.eu/>). Εξετάζονται οι σταθμοί **OULU**, **ROME** και **SOPB**, οι οποίοι διαφέρουν ως προς τη γεωγραφική θέση, το υψόμετρο και τη χαρακτηριστική τιμή δυσκαμψίας, και αναλύονται τα χρονικά διαστήματα **18/10/2021–18/11/2021**, **09/03/2024–09/04/2024** και **25/05/2025–25/06/2025**. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των δεδομένων, καθώς και τα πλήρη διαγράμματα της ανάλυσης, είναι διαθέσιμα στο GitHub: github.com/paraskevasntavos/Forbush-rigidity-project.

Abstract

The present work constitutes a group project within the framework of the Nuclear Physics and Elementary Particle Physics Specialization Laboratory and accounts for 40% of each student's final grade. The subject of the study is Forbush decreases and their dependence on magnetic rigidity, while at the same time we attempt to estimate primary Cosmic Rays through data analysis. For this purpose, we employ the methodology of Wawrzynczak and Alania, in combination with the Clem–Dorman coupling function, so as to correlate measurements of secondary Cosmic Rays with characteristics of the primary component. As a data source, we use neutron monitor measurements from the NMDB database (<https://www.nmdb.eu/>). The stations **OLU**, **ROME**, and **SOPB** are examined, which differ in terms of geographical location, altitude, and the characteristic rigidity value, and the time intervals **18/10/2021–18/11/2021**, **09/03/2024–09/04/2024** and **25/05/2025–25/06/2025** are analyzed. The code used for the data analysis, as well as the complete plots of the analysis, are available on GitHub: github.com/paraskevasntavos/Forbush-rigidity-project.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή	2
2 Εξάρτηση μειώσεων Forbush από μαγνητική δυσκαμψία	3
2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο για τις μειώσεις Forbush	3
2.2 Περιγραφή της ανάλυσης δεδομένων και του κώδικα	4
2.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης δεδομένων και παρουσίαση διαγραμμάτων	5
2.4 Συμπεράσματα, σχολιασμός διαγραμμάτων και συγκρίσεις	13
3 Εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας	15
3.1 Συνάρτηση σύζευξης Clem–Dorman και ανάλυση δεδομένων	15
3.2 Μέθοδος Wawrzynczak–Alania και πρωτογενής Κοσμική Ακτινοβολία	17
3.3 Διαγράμματα πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας και σχολιασμός	18
3.4 Σύγκριση πρωτογενούς και δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας	22
4 Συζήτηση	27
Βιβλιογραφία και αναφορές	28

1 Εισαγωγή

Οι μειώσεις Forbush αποτελούν από τα πιο χαρακτηριστικά φαινόμενα βραχυχρόνιας μεταβολής της έντασης των γαλαξιακών Κοσμικών Ακτίνων που ανιχνεύονται. Παρατηρούνται ως απότομη πτώση της μετρούμενης ροής και ακολουθούνται από σταδιακή ανάκαμψη, καθώς το διαταραγμένο περιβάλλον στον ηλιακό άνεμο απομακρύνεται και το σύστημα επανέρχεται σε συνθήκες σχετικής ηρεμίας. Η φυσική ερμηνεία συνδέει το φαινόμενο με τη διέλευση διαπλανητικών δομών μεγάλης κλίμακας, όπως κρουστικά κύματα, συμπιεσμένες περιοχές και μαγνητικά νέφη που σχετίζονται με στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας. Οι δομές αυτές μεταβάλλονται το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο και, κατά συνέπεια, την αποτελεσματικότητα με την οποία τα φορτισμένα σωματίδια διαχέονται και διαδίδονται προς την περιοχή της Γης. Το αποτέλεσμα είναι μία προσωρινή θωράκιση έναντι μέρους του φάσματος των κοσμικών ακτίνων, η οποία αποτυπώνεται άμεσα στις επίγειες καταγραφές.

Κεντρική παράμετρος στην παρατήρηση των μειώσεων Forbush είναι η ενεργειακή εξάρτηση του φαινούμενου. Οι μετρητές νετρονίων δεν ανιχνεύουν απευθείας τα πρωτογενή σωματίδια, αλλά τη δευτερογενή καταγίδα που αυτά προκαλούν στην ατμόσφαιρα. Η απόκριση κάθε σταθμού εξαρτάται από το γεωμαγνητικό περιβάλλον και από το πώς αυτό φιλτράρει τα εισερχόμενα φορτισμένα σωματίδια, καθώς και από το υψόμετρο και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Έτσι, σταθμοί με διαφορετική γεωμαγνητική αποκοπή λειτουργούν ως φυσικά φασματόμετρα: αν το φαινόμενο είναι ισχυρότερα εκπεφρασμένο σε χαμηλότερες ενέργειες, τότε αναμένεται μεγαλύτερο πλάτος μείωσης σε σταθμούς που είναι ευαίσθητοι σε χαμηλότερες δυσκαμψίες, και μικρότερο πλάτος σε σταθμούς που βλέπουν κυρίως υψηλότερες ενέργειες. Η συστηματική σύγκριση πολλών σταθμών και πολλών γεγονότων επιτρέπει να αναδειχθεί αυτή η εξάρτηση και να συνδεθεί με τις επικρατούσες διαπλανητικές συνθήκες.

Στο παρόν έργο αξιοποιούνται χρονοσειρές από μετρητές νετρονίων της βάσης NMDB, επιλέγοντας σταθμούς με σαφώς διαφορετικά γεωμαγνητικά χαρακτηριστικά (**OULU**, **ROME**, **SOPB**), ώστε να διερευνηθεί πώς μεταβάλλεται το πλάτος μίας μείωσης Forbush ως συνάρτηση της αποκοπής. Η ανάλυση εφαρμόζεται σε τρία αντιπροσωπευτικά επεισόδια από διαφορετικές περιόδους, με σκοπό να ελεγχθεί τόσο η επαναληψιμότητα των συμπερασμάτων όσο και οι ιδιαιτερότητες κάθε γεγονότος. Η επεξεργασία περιλαμβάνει καθαρισμό των δεδομένων, επιλογή περιόδου αναφοράς (ήρεμης κατάστασης) για συνεπή κανονικοποίηση, και προσδιορισμό των βασικών χρονικών χαρακτηριστικών του γεγονότος, όπως η έναρξη, το ελάχιστο και η φάση ανάκαμψης. Με αυτόν τον τρόπο εξάγεται ένα συγκρίσιμο μέτρο του πλάτους της μείωσης για κάθε σταθμό και κάθε γεγονός μείωσης.

Πέρα από τη δευτερογενή μεταβολή που καταγράφουν οι μετρητές νετρονίων, ένα πρόσθετο ζητούμενο είναι η ποιοτική και ποσοτική προσέγγιση της υποκείμενης μεταβολής της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόζεται μεθοδολογία ανακατασκευής της πρωτογενούς μεταβολής από τις επίγειες μετρήσεις, βασισμένη σε καθιερωμένες προσεγγίσεις σύζευξης. Η σύγκριση της εκτιμώμενης πρωτογενούς μεταβολής με τη μετρούμενη δευτερογενή επιτρέπει να αξιολογηθεί κατά πόσο η παρατηρούμενη μορφολογία και το πλάτος του γεγονότος αντανακλούν κυρίως την ηλιοσφαιρική διαμόρφωση ή επηρεάζονται σημαντικά από τοπικούς/οργανολογικούς παράγοντες. Συνολικά, η εργασία στοχεύει να συνδέσει συνεκτικά την ενεργειακή εξάρτηση και την ανακατασκευή της πρωτογενούς συνιστώσας σε ένα ενιαίο πλαίσιο ανάλυσης των μειώσεων Forbush.

2 Εξάρτηση μειώσεων Forbush από μαγνητική δυσκαμψία

Στο παρόν κεφάλαιο μελετώνται οι μειώσεις Forbush ως προς τη μαγνητική δυσκαμψία, με δεδομένα μετρητών νετρονίων από τη βάση NMDB για τους σταθμούς OULU, ROME και SOPB. Δίνεται το βασικό φυσικό πλαίσιο του φαινομένου και τονίζεται ότι η δυσκαμψία R_C επηρεάζει τη διείσδυση των κοσμικών ακτίνων στο γήινο μαγνητικό πεδίο. Περιγράφεται συνοπτικά η επεξεργασία των χρονοσειρών (καθαρισμός, κανονικοποίηση ως προς ήρεμη περίοδο, προσδιορισμός έναρξης και ελαχίστου) και υπολογίζεται το πλάτος της μείωσης για κάθε γεγονός. Στη συνέχεια εξετάζεται ποσοτικά η σχέση πλάτους μειώσης με την μαγνητική δυσκαμψία, κάνοντας κατάλληλη προσαρμογή με συγκεκριμένο Νόμο δύναμης, ώστε να εκτιμηθεί η ενεργειακή εξάρτηση και να γίνει σύγκριση μεταξύ σταθμών. Εξετάζονται τα γεγονότα 18/10/2021–18/11/2021, 09/03/2024–09/04/2024 και 25/05/2025–25/06/2025.

2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο για τις μειώσεις Forbush

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τη μελέτη των μειώσεων Forbush και της σχέσης τους με τη μαγνητική δυσκαμψία των φορτισμένων σωματιδίων. Η κατανόηση των φυσικών μηχανισμών πίσω από το φαινόμενο είναι κρίσιμη, καθώς παρέχει τα θεμέλια για την ερμηνεία των παρατηρήσεων και την ποσοτική ανάλυση των δεδομένων.

Μία **μείωση Forbush** χαρακτηρίζεται από απότομη πτώση της έντασης της γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας, συνήθως μεγαλύτερη του 2%, σε χρονικό διάστημα από μερικές ώρες έως δύο ημέρες, με σταδιακή επάνοδο σε 7–10 ημέρες. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον Forbush και ακολούθως μελετήθηκε από τους Hess και Demmelmaier. Οι μειώσεις αυτές προκαλούνται από την εκτροπή φορτισμένων σωματιδίων της Κοσμικής Ακτινοβολίας από τα μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία που μεταφέρει ο ηλιακός άνεμος και λειτουργούν ως ασπίδα για τη Γη. Πρόκειται για ηλιοσφαιρικό φαινόμενο που σχετίζεται με μεταβολές της πυκνότητας και της ανισοτροπίας των γαλαξιακών ακτίνων.

Συχνά παρατηρούνται 2–3 ημέρες μετά από ηλιακές εκλάμψεις τύπου II ή IV, ενώ ισχυρές εκλάμψεις μπορεί να προκαλέσουν επίγειες επαυξήσεις της έντασης της Κοσμικής Ακτινοβολίας (GLE), που συνήθως συνοδεύονται από μεγάλες μειώσεις Forbush. Επιπλέον, βασικό ρόλο στην εμφάνιση μειώσεων Forbush παίζουν στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας (CMEs), ρεύματα ηλιακού ανέμου υψηλής ταχύτητας, διαπλανητικά κρουστικά κύματα και μαγνητικά νέφη. Η κατανόηση αυτών των φαινομένων επιτρέπει την ποσοτική σύνδεση των μετρήσεων της δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας με τα φυσικά αίτια των μειώσεων.

Η **μαγνητική δυσκαμψία** συνδέεται άμεσα με την ένταση και τη μορφή των μειώσεων Forbush. Εκφράζει την αντίσταση ενός φορτισμένου σωματιδίου στην εκτροπή από μαγνητικά πεδία και ορίζεται ως:

$$R_C = \frac{pc}{Ze}, \quad (2.1)$$

όπου p η ορμή του σωματιδίου, c η ταχύτητα του φωτός, Z ο αριθμός φορτίου και e το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο. Η μαγνητική δυσκαμψία καθορίζει ποια σωματίδια φτάνουν στην ατμόσφαιρα σε δεδομένο γεωγραφικό πλάτος, επηρεάζοντας έτσι την παρατηρούμενη ένταση της Κοσμικής Ακτινοβολίας.

Για τη συστηματική ανάλυση των μειώσεων, χρησιμοποιείται η **κανονικοποιημένη ένταση** της δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας:

$$J_i^k = \frac{N_k - N_0}{N_0}, \quad (2.2)$$

όπου N_k η μετρούμενη ένταση για τον i -οστό σταθμό σε χρονικό σημείο k και N_0 η μέση τιμή της έντασης κατά την ήρεμη περίοδο πριν την έναρξη της μείωσης. Η χρήση της κανονικοποίησης επιτρέπει τη συγκρίσιμη εκτίμηση της χρονικής μεταβολής και του βάθους των μειώσεων μεταξύ διαφορετικών σταθμών και γεγονότων.

Η συστηματική παρατήρηση μειώσεων Forbush σε σταθμούς με διαφορετική γεωγραφική θέση και μαγνητική δυσκαμψία επιτρέπει την ποσοτική διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της δομής του ηλιακού ανέμου, των μαγνητικών διαταραχών και των παρατηρούμενων φαινομένων στη Γη.

2.2 Περιγραφή της ανάλυσης δεδομένων και του κώδικα

Η μελέτη της εξάρτησης των μειώσεων Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία απαιτεί την επιλογή σταθμών με διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη και τιμές μαγνητικής δυσκαμψίας. Για το σκοπό αυτό επιλέχθηκαν τρεις αντιπροσωπευτικοί σταθμοί νετρονίων: **OULU** στον Βόρειο Πόλο ($R_C = 0.81$ GV, $h = 0.015$ km), **ROME** κοντά στον Ισημερινό ($R_C = 6.27$ GV, $h = 0$ km) και **SOPB** στον Νότιο Πόλο ($R_C = 0.10$ GV, $h = 2.82$ km), όπου R_C η μαγνητική δυσκαμψία και h το υψόμετρο κάθε σταθμού, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του κάθε σταθμού που δίνει το site της βάσης δεδομένων. Η επιλογή αυτή καθιστά δυνατή την εκτίμηση της επίδρασης της γεωγραφικής θέσης και της μαγνητικής δυσκαμψίας στις παρατηρούμενες μειώσεις.

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τη βάση **NMDB** και περιλαμβάνουν χρονοσειρές έντασης δευτερογενών Κοσμικής Ακτινοβολίας σε μηνιαία διαστήματα, κατά τα οποία παρατηρήθηκαν σημαντικές μειώσεις Forbush. Η πρώτη επεξεργασία των χρονοσειρών περιλαμβάνει τον καθαρισμό των στηλών, τη μετατροπή των χρονικών πεδίων σε αντικείμενα ημερομηνίας-ώρας και την αριθμητική επεξεργασία των μετρήσεων έντασης, εξασφαλίζοντας συνεπή και έγκυρα δεδομένα για ανάλυση. Η οπτικοποίηση των δεδομένων ξεκινά με τη δημιουργία διαγραμμάτων της απόλυτης έντασης συναρτήσει του χρόνου για κάθε σταθμό, τα οποία παρέχουν συνολική εικόνα της χρονικής μεταβολής της Κοσμικής Ακτινοβολίας κατά την περίοδο μελέτης. Επιπλέον, για κάθε μεμονωμένο γεγονός Forbush προσδιορίζεται το σημείο έναρξης της απότομης πτώσης και η στιγμή της ελάχιστης έντασης μέσω εξομαλυμένων κυλιόμενων μέσων όρων και υπολογισμού της χρονικής κλίσης της έντασης.

Για την ποσοτική σύγκριση των μειώσεων μεταξύ διαφορετικών σταθμών, η ένταση κανονικοποιείται σε σχέση με τη μέση τιμή του ηλιοσφαιρικού υποβάθρου πριν την έναρξη κάθε γεγονότος. Η κανονικοποιημένη ένταση ορίστηκε παραπάνω από τη σχέση (2.2). Η κανονικοποίηση αυτή επιτρέπει την άμεση σύγκριση της χρονικής εξέλιξης και του βάθους των μειώσεων Forbush μεταξύ σταθμών με διαφορετική γεωγραφική θέση, υψόμετρο και μαγνητική δυσκαμψία. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφεται η επίδραση της απόλυτης τιμής της έντασης και αναδεικνύεται η σχετική μεταβολή που προκαλείται από τα ηλιοσφαιρικά φαινόμενα. Οι κανονικοποιημένες χρονοσειρές χρησιμοποιούνται τόσο για την ποιοτική σύγκριση της μορφής των μειώσεων, όσο και για την εξαγωγή ποσοτικών μεγεθών.

Για κάθε γεγονός μειώσης Forbush και για κάθε σταθμό προσδιορίζεται η ελάχιστη τιμή της έντασης N_{\min} κατά τη διάρκεια της μείωσης, καθώς και η μέση τιμή N_0 της έντασης σε ήρεμη χρονική περιοχή πριν από το onset. Από τις ποσότητες αυτές υπολογίζεται το πλάτος της μείωσης Forbush που ορίζεται ως:

$$\Delta N = N_0 - N_{\min} , \quad (2.3)$$

το οποίο αποτελεί άμεσο μέτρο της έντασης της διαμόρφωσης της γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας από τις ηλιοσφαιρικές διαταραχές. Το μέγεθος αυτό εξάγεται συστηματικά για όλους τους σταθμούς και για όλα τα εξεταζόμενα χρονικά διαστήματα.

Η εξάρτηση του πλάτους ΔN από τη μαγνητική δυσκαμψία R_C διερευνάται περαιτέρω μέσω προσαρμογής σε Νόμο δύναμης. Η επιλογή ενός τέτοιου μοντέλου βασίζεται στη φυσική προσδοκία ότι τα σωματίδια χαμηλότερης μαγνητικής δυσκαμψίας (και συνεπώς χαμηλότερης ενέργειας) επηρεάζονται ισχυρότερα από τις μαγνητικές δομές που συνοδεύουν τις στεμματικές εκτοξεύσεις μάζας και τα διαπλανητικά κρουστικά κύματα. Η θεωρητική συνάρτηση προσαρμογής, γνωστή και ως Νόμος δύναμης, γράφεται ως:

$$f(R_C) = A R_C^{-\gamma} , \quad (2.4)$$

όπου A είναι ένας συντελεστής κανονικοποίησης και γ ο ενεργειακός εκθέτης που περιγράφει τον βαθμό εξάρτησης του πλάτους της μείωσης από τη μαγνητική δυσκαμψία.

Για κάθε μεμονωμένο γεγονός Forbush, τα πειραματικά σημεία ($R_C, \Delta N$) που αντιστοιχούν στους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB** προσαρμόζονται στη συνάρτηση αυτή μέσω μη γραμμικής ελαχιστοποίησης ελαχίστων τετραγώνων. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την εξαγωγή των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων A και γ , καθώς και την ποσοτική σύγκριση της ενεργειακής εξάρτησης μεταξύ διαφορετικών μειώσεων. Η χρήση λογαριθμικής κλίμακας στους άξονες διευκολύνει τον έλεγχο της καταλληλότητας του Νόμου δύναμης και την οπτική αξιολόγηση της ποιότητας της προσαρμογής. Η ανάλυση αυτή συνδέει άμεσα τα αποτελέσματα της χρονικής επεξεργασίας των δεδομένων των μετρητών νετρονίων με ένα απλό, αλλά φυσικά εύλογο μοντέλο εξάρτησης από τη μαγνητική δυσκαμψία. Οι τιμές του εκθέτη γ που προκύπτουν παρέχουν ποσοτική πληροφορία για το πόσο εντονότερες είναι οι μειώσεις Forbush σε σταθμούς χαμηλής μαγνητικής δυσκαμψίας σε σχέση με σταθμούς υψηλότερης δυσκαμψίας, ενισχύοντας τη φυσική ερμηνεία των παρατηρούμενων διαφορών μεταξύ των σταθμών.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο μέσω γραφικών παραστάσεων για κάθε σταθμό και κάθε γεγονός Forbush, επιτρέποντας τη συγκριτική μελέτη της χρονικής εξέλιξης και του πλάτους των μειώσεων.

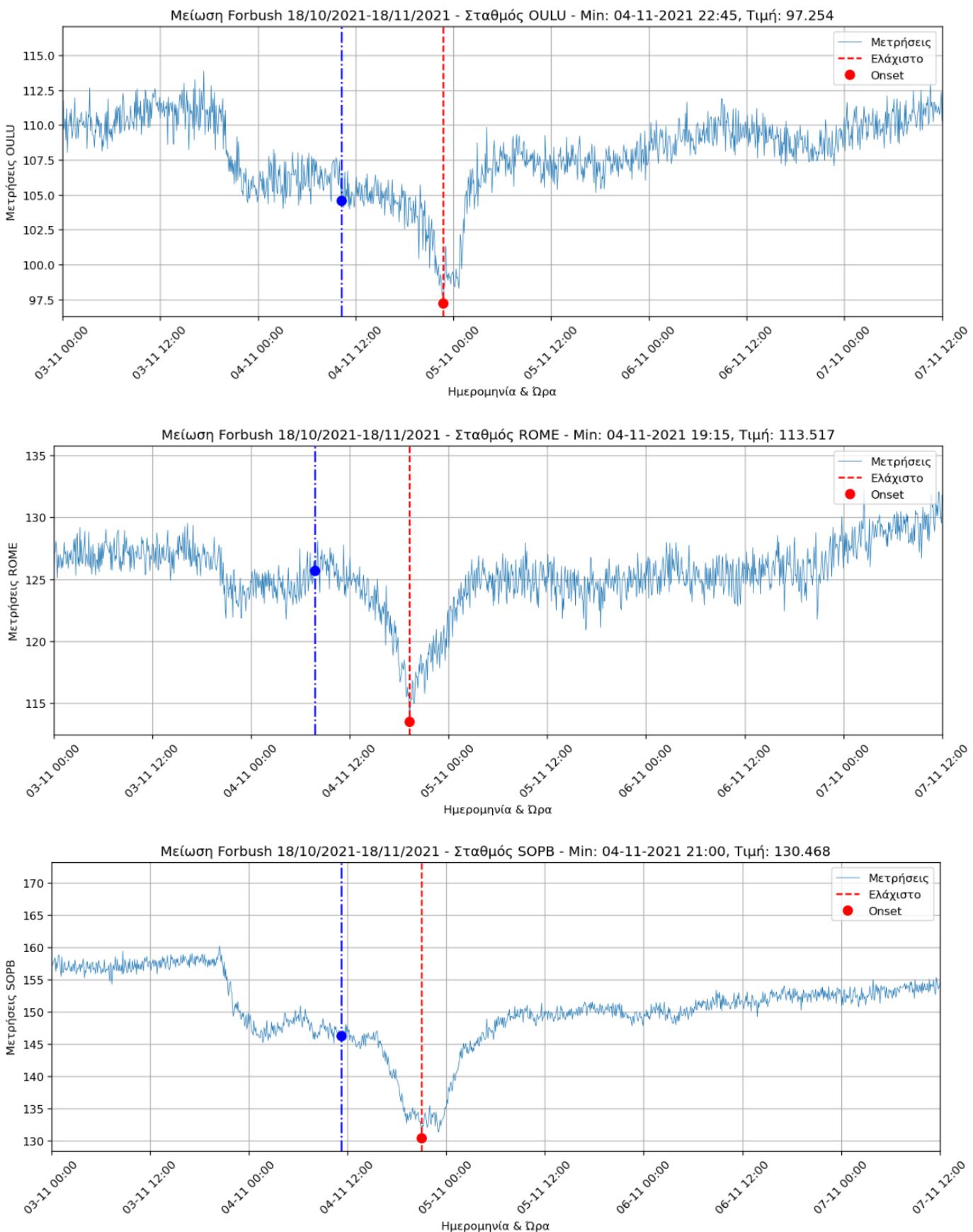
2.3 Αποτελέσματα της ανάλυσης δεδομένων και παρουσίαση διαγραμμάτων

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν από την ανάλυση των δεδομένων για κάθε γεγονός Forbush και για όλους τους εξεταζόμενους σταθμούς. Η παρουσίαση οργανώνεται σύμφωνα με τα βασικά στάδια της ανάλυσης, ξεκινώντας από τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών χρονικών στιγμών της μείωσης, συνεχίζοντας με την κανονικοποιημένη χρονική εξέλιξη της έντασης και καταλήγοντας στην ποσοτική διερεύνηση της εξάρτησης του πλάτους της μείωσης από τη μαγνητική δυσκαμψία.

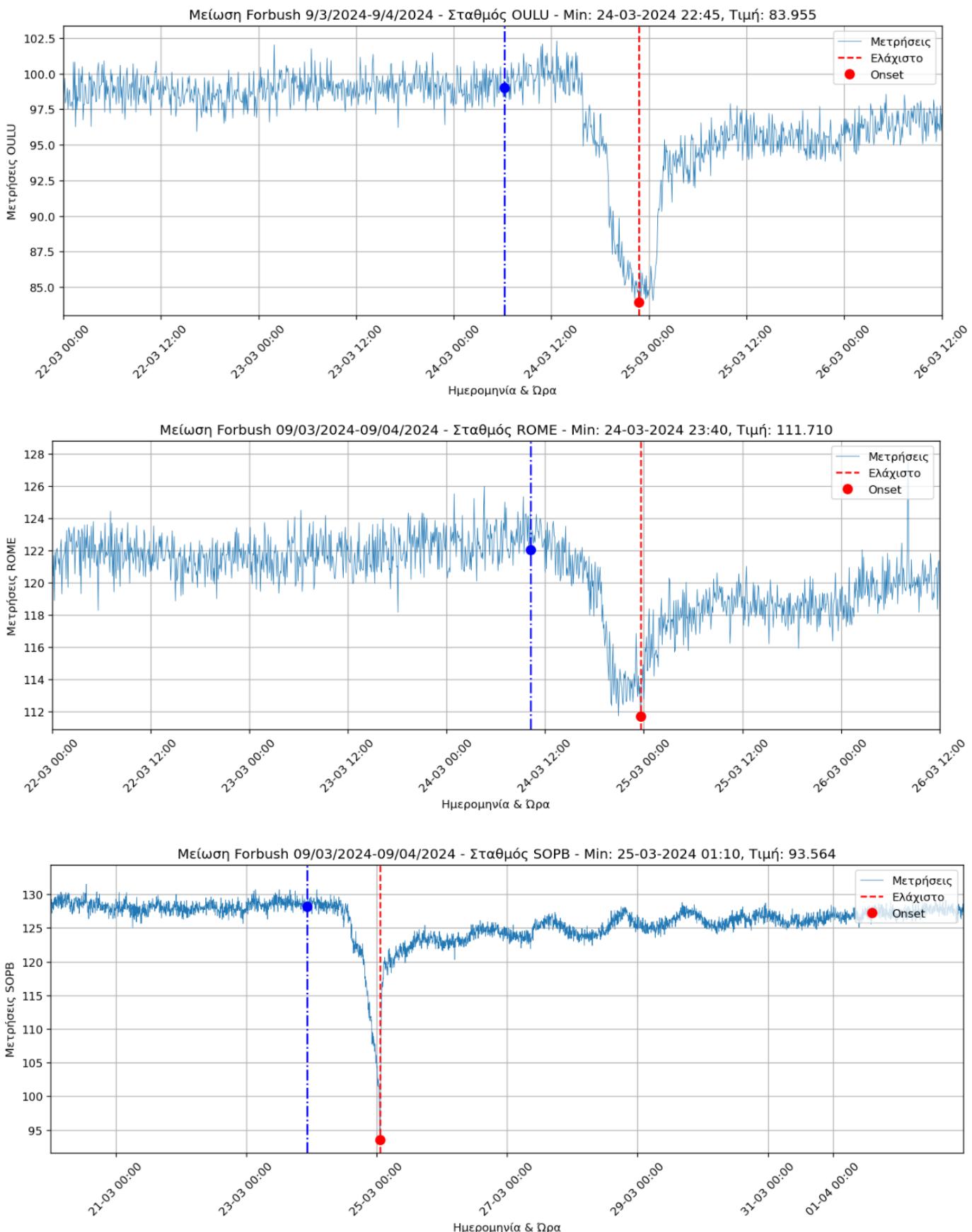
Αρχικά παρουσιάζονται εστιασμένα διαγράμματα της απόλυτης έντασης συναρτήσει του χρόνου για κάθε σταθμό, στα οποία επισημαίνονται το onset της μείωσης και η χρονική στιγμή της ελάχιστης έντασης. Τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιούνται για τον ακριβή προσδιορισμό των ποσοτικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν κάθε γεγονός Forbush και αποτελούν τη βάση για τη σύγκριση μεταξύ σταθμών.

Για λόγους σαφήνειας και πληρότητας, πάνω στα διαγράμματα αναγράφονται η ακριβής ημερομηνία και ώρα του ελαχίστου, καθώς και η αντίστοιχη τιμή της έντασης, όπως αυτές προκύπτουν από την ανάλυση των χρονοσειρών. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται άμεση η σύγκριση τόσο της χρονικής στιγμής, όσο και του μεγέθους της μέγιστης μείωσης μεταξύ σταθμών με διαφορετική γεωγραφική θέση και μαγνητική δυσκαμψία. Τα διαγράμματα αυτά για κάθε σταθμό (**OULU**, **ROME** και **SOPB**) για τα χρονικά διαστήματα **18/10/2021–18/11/2021**, **09/03/2024–09/04/2024** και **25/05/2025–25/06/2025**, όπου με κατακόρυφες γραμμές σημειώνονται το onset της μείωσης και η χρονική στιγμή της ελάχιστης έντασης, όπως προκύπτουν από την ανάλυση των εξομαλυμένων χρονοσειρών, παρουσιάζονται στα διαγραμμάτα [2.1](#), [2.2](#) και [2.3](#).

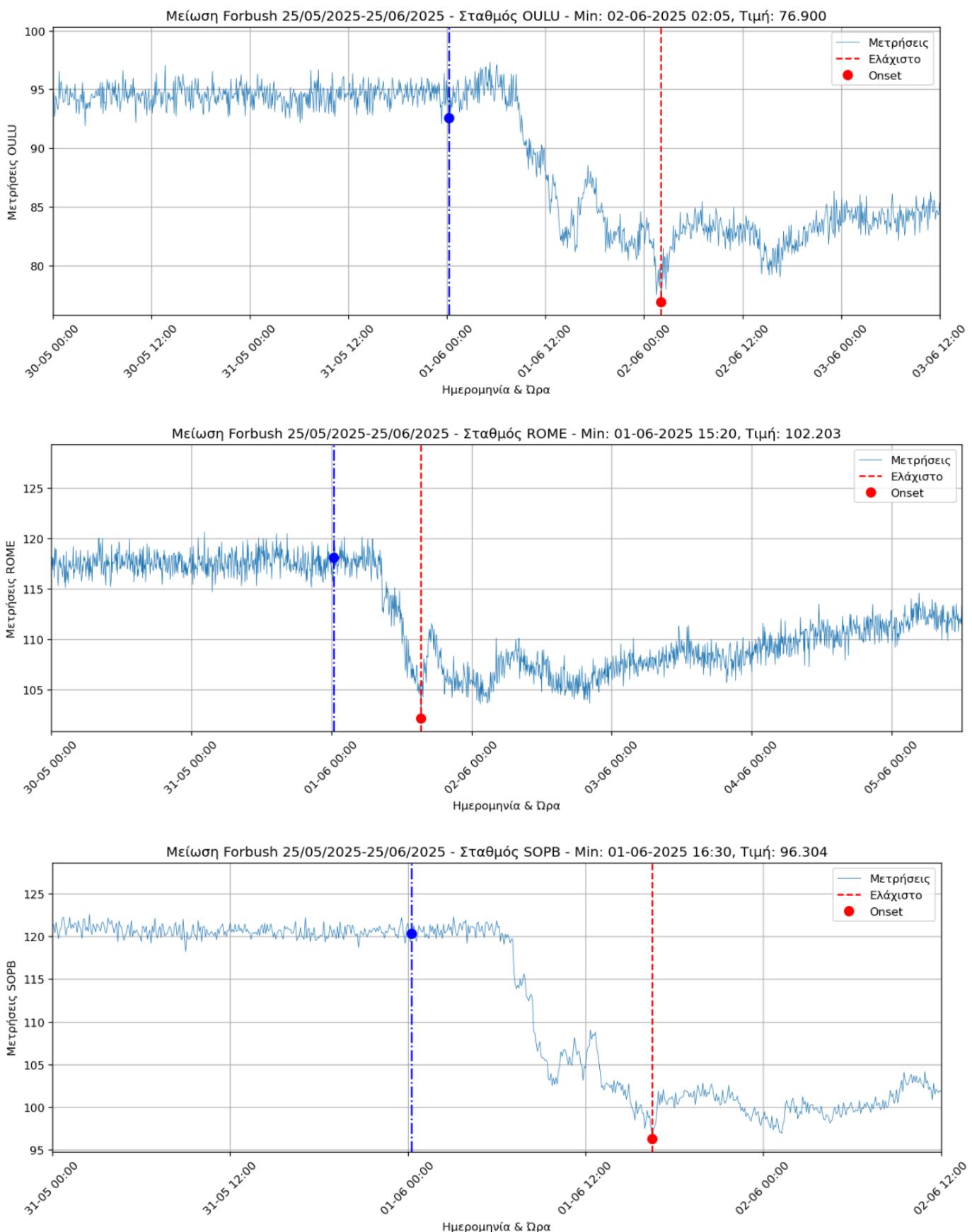
Μετά τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών χρονικών στιγμών, εξετάζεται η κανονικοποιημένη ένταση της Κοσμικής Ακτινοβολίας για κάθε σταθμό. Η κανονικοποίηση ως προς το ηλιοσφαιρικό υπόβαθρο επιτρέπει την άμεση σύγκριση της μορφής και του σχετικού βάθους της μείωσης μεταξύ σταθμών με διαφορετική μαγνητική δυσκαμψία και υψόμετρο. Στα διαγράμματα [2.4](#), [2.5](#) και [2.6](#) παρουσιάζονται ακολούθως τα διαγράμματα των κανονικοποιημένων εντάσεων της Κοσμικής Ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου για τα γεγονότα των **18/10/2021–18/11/2021**, **09/03/2024–09/04/2024** και **25/05/2025–25/06/2025** αντιστοίχως.



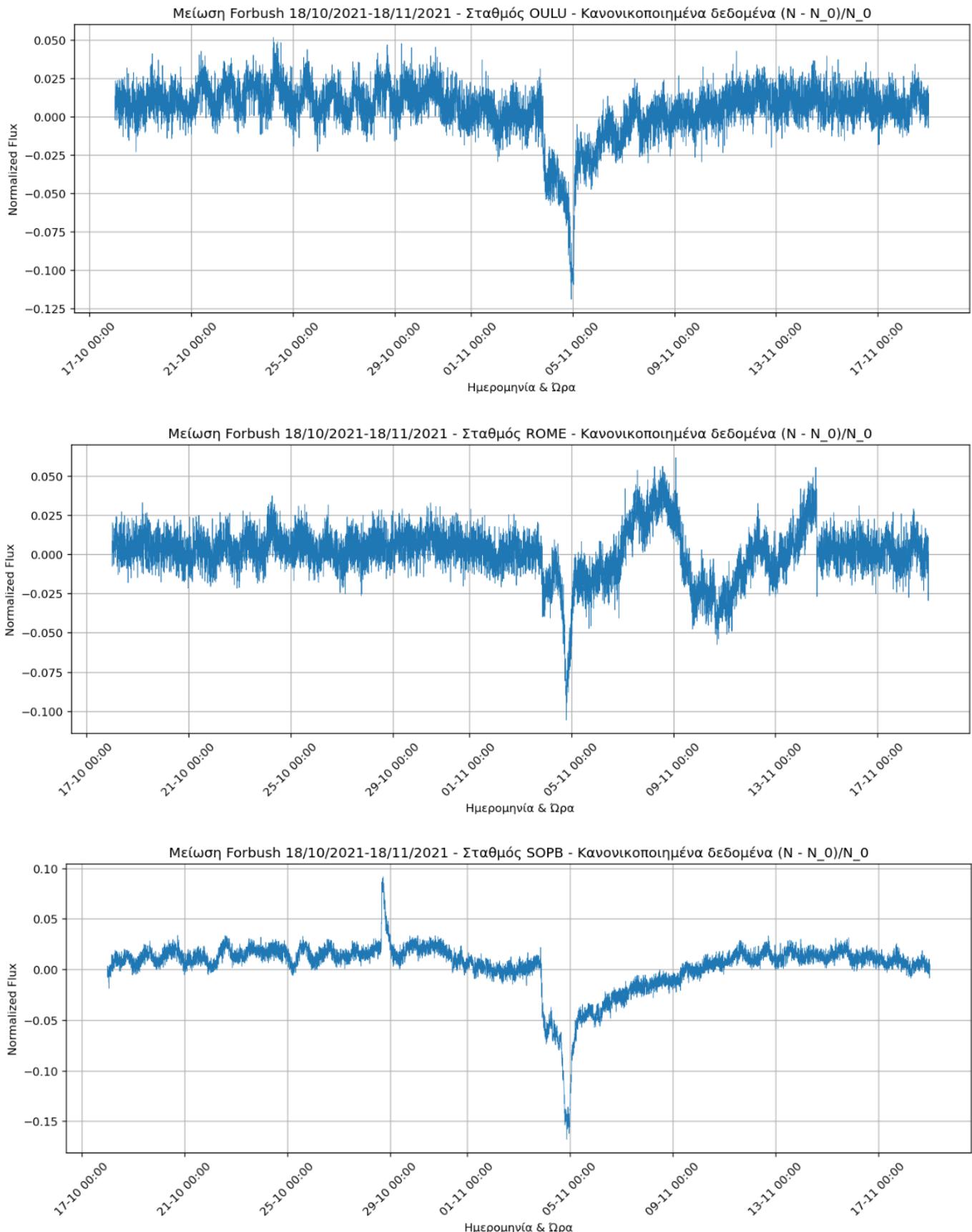
Διάγραμμα 2.1: Εστιασμένα διαγράμματα απόλυτης έντασης συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός μείωσης Forbush στο χρονικό διάστημα 18/10/2021–18/11/2021 για τους σταθμούς OULU, ROME και SOPB.



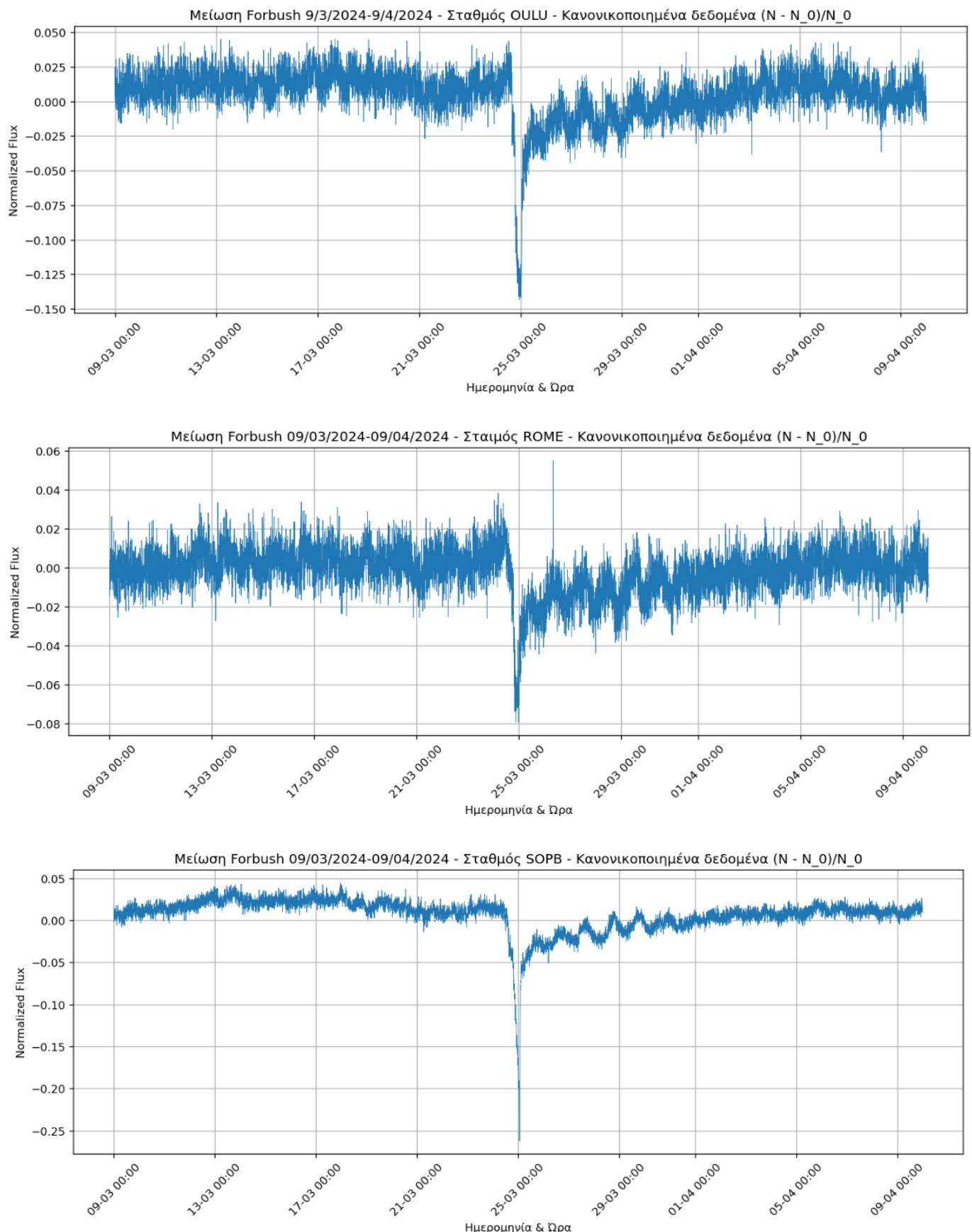
Διάγραμμα 2.2: Εστιασμένα διαγράμματα απόλυτης έντασης συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός μείωσης Forbush στο χρονικό διάστημα 09/03/2024–09/03/2024 για τους σταθμούς OULU, ROME και SOPB.



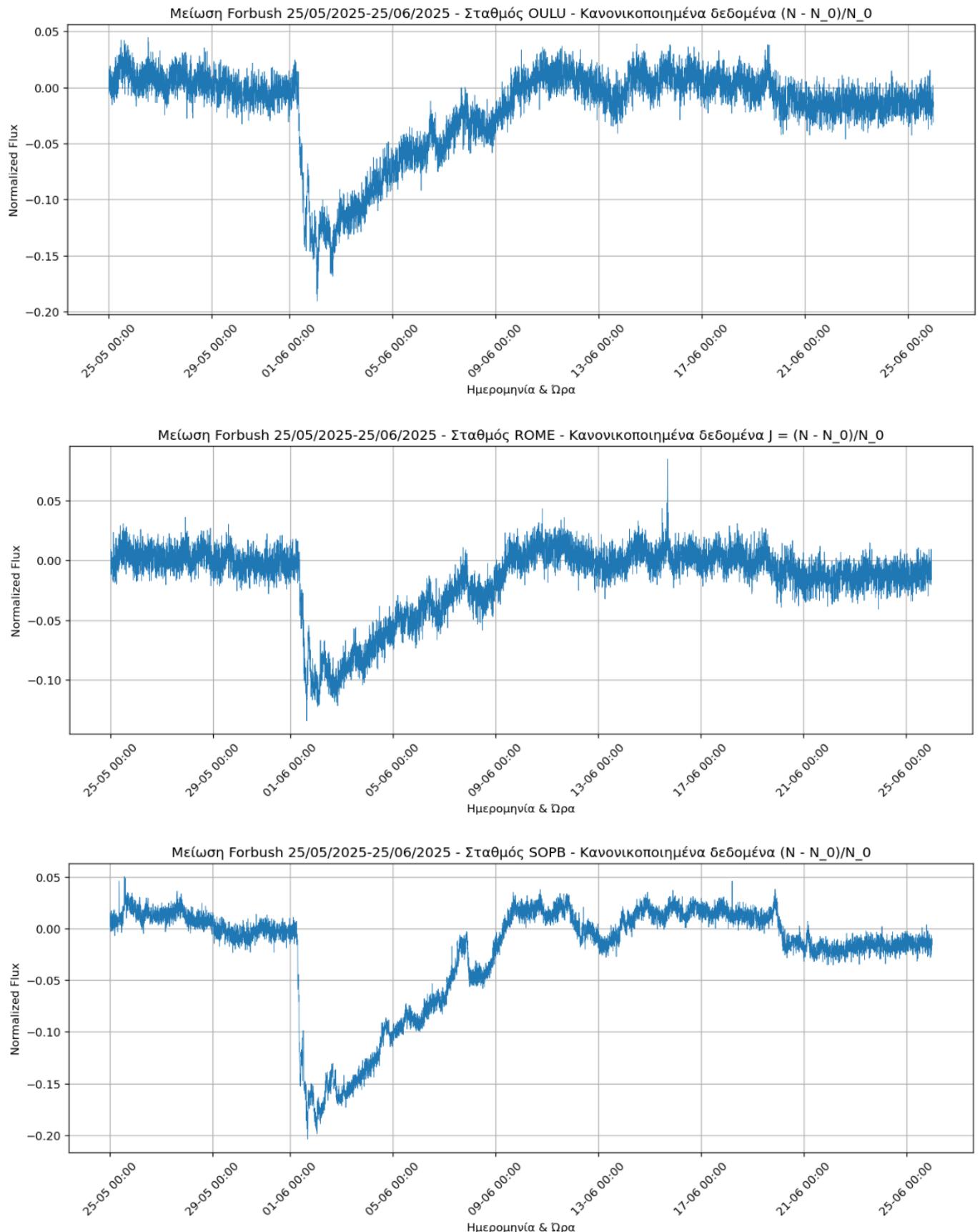
Διάγραμμα 2.3: Εστιασμένα διαγράμματα απόλυτης έντασης συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός μείωσης Forbush στο χρονικό διάστημα 25/05/2025–25/06/2025 για τους σταθμούς OULU, ROME και SOPB.



Διάγραμμα 2.4: Κανονικοποιημένη ένταση συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός μείωσης Forbush 18/10/2021-18/11/2021 για τους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB**. Η κανονικοποίηση επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση του σχετικού βάθους και της χρονικής εξέλιξης της μείωσης μεταξύ σταθμών.

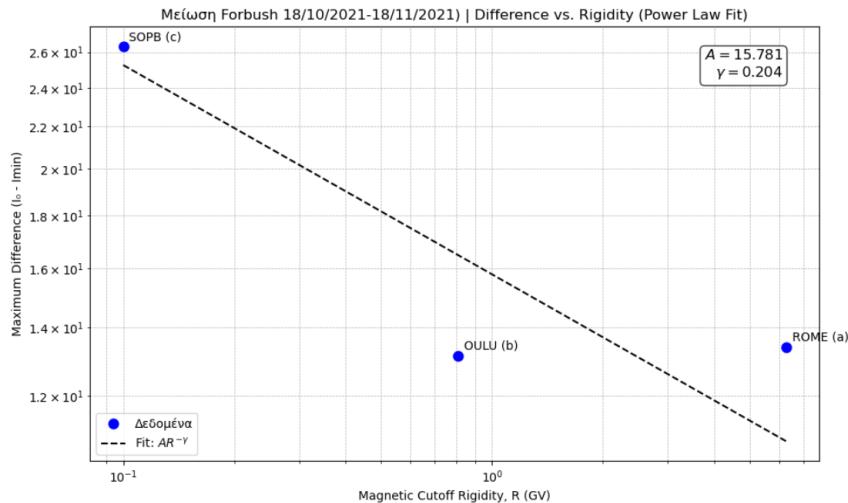


Διάγραμμα 2.5: Κανονικοποιημένη ένταση συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός Forbush της 9/03/2024-9/04/2024 για τους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB**. Η κανονικοποίηση επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση του σχετικού βάθους και της χρονικής εξέλιξης της μείωσης μεταξύ σταθμών.

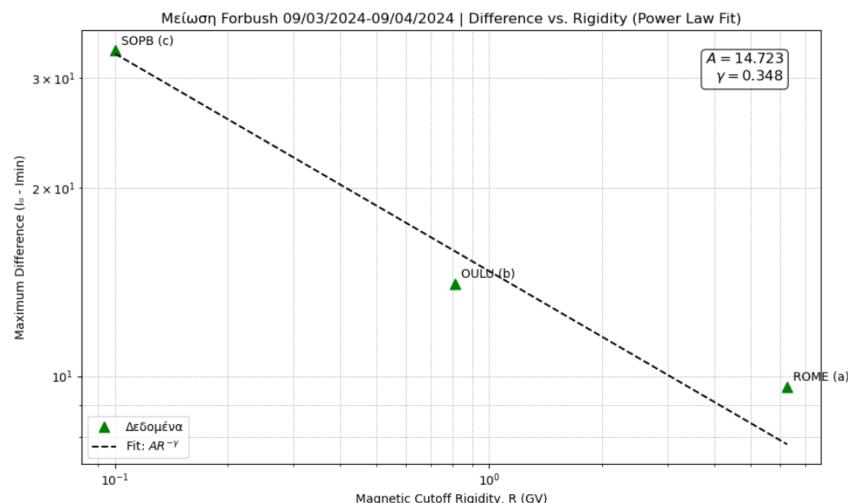


Διάγραμμα 2.6: Κανονικοποιημένη ένταση συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός μείωσης Forbush της 25/05/2025-25/06/2025 για τους σταθμούς OULU, ROME και SOPB. Η κανονικοποίηση επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση του σχετικού βάθους και της χρονικής εξέλιξης της μείωσης μεταξύ σταθμών.

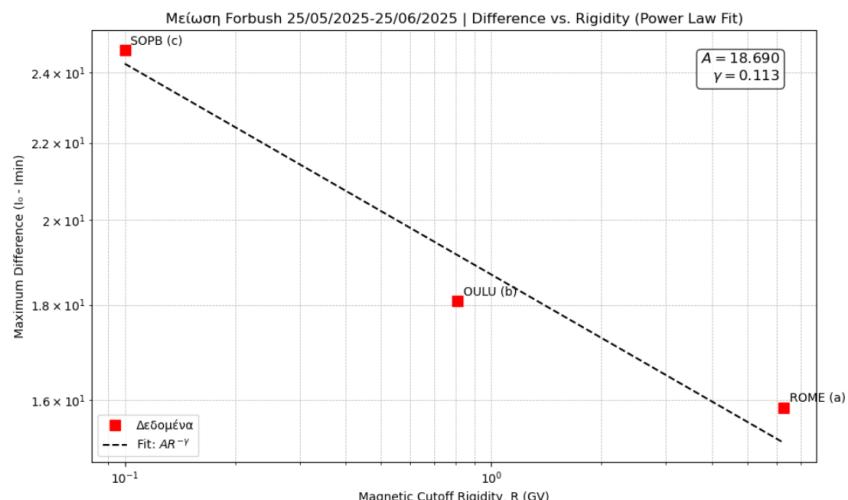
Τέλος, διερευνάται ποσοτικά η εξάρτηση του πλάτους της μείωσης Forbush από τη μαγνητική δυσκαμψία. Για κάθε γεγονός υπολογίζεται το πλάτος ΔN για τους τρεις σταθμούς και τα πειραματικά σημεία προσαρμόζονται στον Νόμο δύναμης της σχέσης (2.4). Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την εξαγωγή του εκθέτη γ, ο οποίος ποσοτικοποιεί τον βαθμό ενεργειακής εξάρτησης της μείωσης.



Διάγραμμα 2.7: Πλάτος μείωσης Forbush ΔN συναρτήσει της μαγνητικής δυσκαμψίας R_C για το γεγονός της 18/10/2021-18/1/2021. Η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην προσαρμογή του Νόμου δύναμης της σχέσης (2.4).



Διάγραμμα 2.8: Πλάτος μείωσης Forbush ΔN συναρτήσει της μαγνητικής δυσκαμψίας R_C για το γεγονός της 9/03/2024-9/04/2024. Η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην προσαρμογή του Νόμου δύναμης της σχέσης (2.4).



Διάγραμμα 2.9: Πλάτος μείωσης Forbush ΔN συναρτήσει της μαγνητικής δυσκαμψίας R_C για το γεγονός της 25/05/2025-25/06/2025. Η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην προσαρμογή του Νόμου δύναμης της σχέσης (2.4).

Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα 2.7, 2.8 και 2.9 προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα για τους ενεργειακούς εκθέτες:

**Παράμετροι Νόμου δύναμης για τα γεγονότα μείωσης
Forbush όπως προέκυψαν από την προσαρμογή:**

$$\gamma = 0.204 \quad (18/10/2021 - 18/11/2021)$$

$$\gamma = 0.348 \quad (09/03/2024 - 9/04/2024)$$

$$\gamma = 0.113 \quad (25/05/2025 - 25/06/2025)$$

2.4 Συμπεράσματα, σχολιασμός διαγραμμάτων και συγκρίσεις

Στο τελευταίο υποκεφάλαιο αυτού του κεφαλαίου συνοψίζονται και σχολιάζονται τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από τη ανάλυση δεοδημένων και τη γραφική ανάλυση των γεγονότων Forbush, που παρουσιάσαμε στα προηγούμενα δύο υποκεφάλαια, για τους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB** για τα χρονικά διαστήματα **18/10/2021–18/11/2021**, **09/03/2024–09/04/2024** και **25/05/2025–25/06/2025**.

Η σύγκριση των εστιασμένων διαγραμμάτων απόλυτης έντασης δείχνει ότι, για όλα τα εξεταζόμενα γεγονότα, η χρονική στιγμή του ελαχίστου εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα στους διαφορετικούς σταθμούς, με αποκλίσεις της τάξης των λίγων ωρών. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι οι μειώσεις Forbush καθορίζονται κυρίως από μεγάλης κλίμακας ηλιοσφαιρικές δομές, όπως διαπλανητικά κρουστικά κύματα και μαγνητικά νέφη, οι οποίες επηρεάζουν την Κοσμική Ακτινοβολία σε παγκόσμια κλίμακα.

Πιο συγκεκριμένα, για το γεγονός Forbush της **18/10/2021–18/11/2021**, το ελάχιστο της έντασης καταγράφεται στον σταθμό **OULU** στις **04/11/2021** και ώρα **22:45** με τιμή **97.254 counts**, στον σταθμό **ROME** στις **04/11/2021** και ώρα **19:15** με τιμή **113.517 counts**, ενώ στον σταθμό **SOPB** το ελάχιστο εμφανίζεται στις **04/11/2021** και ώρα **21:00** με τιμή **130.468 counts**. Τα αντίστοιχα ποσοστά μείωσης από τα κανονικοποιημένα διαγράμματα ανέρχονται σε **11.91%** για τον **OULU**, **10.56%** για τον **ROME** και **16.79%** για τον **SOPB**. Η συμπεριφορά αυτή είναι σύμφωνη με την αναμενόμενη εξάρτηση από τη μαγνητική δυσκαμψία, ενώ η τιμή της παραμέτρου $\gamma = 0.204$ υποδηλώνει μέτρια ενεργειακή εξάρτηση του πλάτους της μείωσης.

Στο γεγονός της **09/03/2024–09/04/2024**, τα ελάχιστα εμφανίζονται στον **OULU** στις **24/03/2024** και ώρα **22:45** με τιμή **83.955 counts**, στον **ROME** στις **24/03/2024** και ώρα **23:40** με τιμή **111.710 counts**, και στον **SOPB** στις **25/03/2024** και ώρα **01:10** με τιμή **93.564 counts**. Τα ποσοστά μείωσης είναι **14.93%** για τον **OULU**, **7.92%** για τον **ROME** και **26.19%** για τον **SOPB**. Η έντονη διαφοροποίηση μεταξύ πολικών και χαμηλότερου γεωγραφικού πλάτους σταθμών αντανακλάται και στην αυξημένη τιμή της παραμέτρου $\gamma = 0.348$, η οποία υποδεικνύει ισχυρή εξάρτηση από τη μαγνητική δυσκαμψία. Η ιδιαίτερα βαθιά μείωση στον **SOPB** ενδέχεται να σχετίζεται με τη γεωμετρία και τη χωρική δομή της υπεύθυνης διαπλανητικής διαταραχής.

Για το γεγονός Forbush της **25/05/2025–25.06/2025**, το ελάχιστο της έντασης παρατηρείται στον **OULU** στις **02/06/2025** και ώρα **02:05** με τιμή **76.900 counts**, στον **ROME** στις **01/06/2025** και ώρα **15:20** με τιμή **102.203 counts** και στον **SOPB** στις **01/06/2025** και ώρα **16:30** με τιμή **96.304 counts**. Τα ποσοστά μείωσης ανέρχονται σε **19.04%** για τον **OULU**, **13.43%** για τον **ROME** και **20.40%** για τον **SOPB**. Παρότι η γενική τάση παραμένει συμβατή με τη θεωρητική πρόβλεψη, η χαμηλότερη τιμή της παραμέτρου $\gamma = 0.113$ υποδηλώνει ασθενέστερη ενεργειακή εξάρτηση, γεγονός που πιθανώς συνδέεται με διαφορετικά χαρακτηριστικά της αντίστοιχης ηλιοσφαιρικής διαταραχής.

Παρά τη χρονική σύμπτωση των ελαχίστων, παρατηρούνται σαφείς διαφορές στο πλάτος της μείωσης μεταξύ των σταθμών. Οι σταθμοί χαμηλής μαγνητικής δυσκαμψίας **OULU** και **SOPB** εμφανίζουν συστηματικά βαθύτερες μειώσεις σε σύγκριση με τον σταθμό **ROME**, ο οποίος χαρακτηρίζεται από σημαντικά υψηλότερη τιμή μαγνητικής δυσκαμψίας. Η συμπεριφορά αυτή είναι συνεπής με τη φυσική εικόνα σύμ-

φωνα με την οποία τα σωματίδια χαμηλότερης ενέργειας επηρεάζονται εντονότερα από τις μεταβολές των διαπλανητικών μαγνητικών πεδίων.

Η ανάλυση των κανονικοποιημένων χρονοσειρών επιβεβαιώνει ότι, μετά την αφαίρεση της επίδρασης της απόλυτης έντασης, η μορφή της χρονικής εξέλιξης της μείωσης παρουσιάζει αξιοσημείωτη ομοιότητα μεταξύ των σταθμών. Η φάση της απότομης πτώσης και η επακόλουθη σταδιακή αποκατάσταση της έντασης ακολουθούν παρόμοια χρονικά πρότυπα, γεγονός που υποδεικνύει κοινό μηχανισμό διαμόρφωσης της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας από τις ηλιοσφαιρικές διαταραχές.

Οι διαφορές που παρατηρούνται στο σχετικό βάθος των κανονικοποιημένων μειώσεων συνδέονται άμεσα με τη μαγνητική δυσκαμψία αποκοπής των σταθμών. Η εξάρτηση αυτή γίνεται εμφανέστερη όταν εξετάζεται το πλάτος της μείωσης ΔN ως συνάρτηση της δυσκαμψίας, όπου τα πειραματικά σημεία ακολουθούν, εντός των αβεβαιοτήτων, τον Νόμο δύναμης της σχέσης (2.4). Οι τιμές του εκθέτη γ που προκύπτουν υποδηλώνουν εντονότερη διαμόρφωση της Κοσμικής Ακτινοβολίας σε χαμηλές μαγνητικές δυσκαμψίες, επιβεβαιώνοντας προηγούμενες πειραματικές και θεωρητικές μελέτες.

Συνολικά, τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι οι μειώσεις Forbush εμφανίζουν παγκόσμιο χαρακτήρα ως προς τη χρονική τους εξέλιξη, αλλά έντονη ενεργειακή εξάρτηση ως προς το πλάτος τους. Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις από την ιδανική μονοτονική συμπεριφορά υποδεικνύουν ότι, πέραν της μαγνητικής δυσκαμψίας, παράγοντες όπως η δομή των CMEs, η κατεύθυνση πρόσκρουσης και το τοπικό γεωμαγνητικό περιβάλλον διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των μειώσεων Forbush.

3 Εύρεση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας

Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόζουμε τη μέθοδο των Wawrzynczak και Alania, η οποία επιτρέπει τη συχέτιση της δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας που καταγράφεται από επίγειους μετρητές νετρονίων με την πρωτογενή Κοσμική Ακτινοβολία, μέσω κατάλληλων συναρτήσεων σύζευξης. Στόχος είναι, αξιοποιώντας τις αντίστοιχες συναρτήσεις σύζευξης που θα παρουσιάσουμε, να μεταφράσουμε τις μετρήσεις των μητρητών νετρονίων σε πληροφορία για τη μορφή και την ενεργειακή εξάρτηση της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας, ώστε να καταστεί δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών σταθμών και γεγονότων.

3.1 Συνάρτηση σύζευξης Clem–Dorman και ανάλυση δεδομένων

Όπως θα δούμε στη συνέχεια, η μέθοδος Wawrzynczak και Alania, απαιτεί τη χρήση μίας συνάρτησης σύζευξης, ώστε να συνδέσουμε την πρωτογενή Κοσμική Ακτινοβολία με τη δευτερογενή Κοσμική Ακτινοβολία που καταγράφουν οι επίγειοι μετρητές νετρονίων. Στην παρούσα εργασία υιοθετούμε τη συνάρτηση σύζευξης Clem–Dorman, η οποία έχει προκύψει από προσομοιώσεις Monte Carlo με το πακέτο FLUKA και περιγράφει τη μεταβολή του ρυθμού καταγραφών ενός μετρητή νετρονίων $N(R_C)$ ως προς τη μαγνητική δυσκαμψία R_C του σταθμού. Η Clem–Dorman ορίζεται ως:

$$W(R_C, h) \equiv -\frac{1}{N(0) R_C} \frac{dN}{dR_C} = a(h) [k(h) - 1] \exp\left[-a(h) R_C^{-k(h)+1}\right] R_C^{-k(h)}, \quad (3.1)$$

όπου R_C είναι η μαγνητική δυσκαμψία του σταθμού και h το υψόμετρο. Οι παράμετροι $a = a(h)$ και $k = k(h)$ εξαρτώνται από το υψόμετρο και συνδέονται με την ηλιακή δραστηριότητα και το φάσμα των πρωτογενών κοσμικών ακτίνων.

Η παραμετροποίηση Clem–Dorman μπορεί να εφαρμοστεί σε σταθμούς από πολικά έως μεσαία γεωγραφικά/μαγνητικά πλάτη. Συνεπώς, στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε τη $W(R_C, h)$ της σχέσης (3.1) για την ανακατασκευή της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας από τις μετρήσεις των σταθμών νετρονίων.

Αρχικά υπολογίζουμε τις ποσότητες $a(h)$ και $k(h)$ για τις περιπτώσεις μέγιστης ηλιακής δραστηριότητας (solar max) και ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας (solar min). Οι εκφράσεις που χρησιμοποιούνται είναι

$$\text{solar max: } \ln a(h) = 1.84 + 0.094 h - 0.09 e^{-11h}, \quad k(h) = 2.40 - 0.56 h + 0.24 e^{-8.8h}, \quad (3.2)$$

$$\text{solar min: } \ln a(h) = 1.93 + 0.15 h - 0.18 e^{-10h}, \quad k(h) = 2.32 - 0.49 h + 0.18 e^{-9.5h}. \quad (3.3)$$

Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για τους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB**, χρησιμοποιώντας ως είσοδο τις τιμές της δυσκαμψίας R_C και του υψομέτρου h για κάθε σταθμό, όπως ορίζονται στο πρόγραμμα. Με βάση τα παραπάνω, υλοποιούμε τον αντίστοιχο κώδικα και προκύπτουν τέσσερις πίνακες τιμών (για a και k σε solar max/min), οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα επόμενα βήματα της ανάλυσης. Οι πίνακες αυτοί μαζί με τον πίνακα που συγκτρώνει τα χαρακτηριστικά των σταθμών είναι οι εξής:

Σταθμός	R_C [GV]	h [km]
OULU	0.81	0.015
ROME	6.27	0
SOPB	0.10	2.82

Πίνακας 3.1: Οι μαγνητικές δυσκαμψίες R_C και τα υψόμετρα h των σταθμών που χρησιμοποιούμε (πηγή: <https://www.nmdb.eu>).

Φάση	$a = a(h)$	$k = k(h)$
solar max	5.84	2.602
solar min	5.91	2.469

Πίνακας 3.2: Παράμετροι $a = a(h)$ και $k = k(h)$ της συνάρτησης σύζευξης Clem–Dorman για τον σταθμό OULU.

Φάση	$a = a(h)$	$k = k(h)$
solar max	5.75	2.640
solar min	5.75	2.500

Πίνακας 3.3: Παράμετροι $a = a(h)$ και $k = k(h)$ της συνάρτησης σύζευξης Clem–Dorman για τον σταθμό ROME.

Φάση	$a = a(h)$	$k = k(h)$
solar max	8.21	0.821
solar min	10.52	0.938

Πίνακας 3.4: Παράμετροι $a = a(h)$ και $k = k(h)$ της συνάρτησης σύζευξης Clem–Dorman για τον σταθμό SOPB.

Για την επιλογή των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων $a = a(h)$ και $k = k(h)$ της συνάρτησης σύζευξης Clem–Dorman, λάβαμε υπόψη τη φάση του ηλιακού κύκλου κατά τα χρονικά διαστήματα που μελετάμε. Το διάστημα **18/10/2021–18/11/2021** αντιστοιχεί στην αρχική ανοδική φάση του ηλιακού κύκλου 25, σχετικά κοντά στο προηγούμενο ελάχιστο της ηλιακής δραστηριότητας, και επομένως προσεγγίζεται ως περίοδος **ελάχιστης ηλιακής δραστηριότητας**. Για το διάστημα αυτό χρησιμοποιούμε τις παραμέτρους $a = a(h)$ και $k = k(h)$ της περίπτωσης **solar min**. Αντίθετα, τα διαστήματα **09/03/2024–09/04/2024** και **25/05/2025–25/06/2025** βρίσκονται εντός της φάσης **μέγιστης δραστηριότητας** του ηλιακού κύκλου 25, οπότε για την ανάλυση των αντίστοιχων μειώσεων Forbush νιοθετούμε τις παραμέτρους $a = a(h)$ και $k = k(h)$ που αντιστοιχούν σε **solar max**. Τα παραπάνω συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

Σταθμός	Διάστημα	Φάση	a	k
OULU	18/10/2021–18/11/2021	solar min	5.91	2.469
OULU	09/03/2024–09/04/2024	solar max	5.84	2.602
OULU	25/05/2025–25/06/2025	solar max	5.84	2.602
ROME	18/10/2021–18/11/2021	solar min	5.75	2.50
ROME	09/03/2024–09/04/2024	solar max	5.75	2.64
ROME	25/05/2025–25/06/2025	solar max	5.75	2.64
SOPB	18/10/2021–18/11/2021	solar min	10.52	0.938
SOPB	09/03/2024–09/04/2024	solar max	8.21	0.821
SOPB	25/05/2025–25/06/2025	solar max	8.21	0.821

Πίνακας 3.5: Επιλογή των παραμέτρων σύζευξης $a = a(h)$ και $k = k(h)$ της Clem–Dorman για κάθε σταθμό και για τα τρία χρονικά διαστήματα μειώσεων Forbush.

Τώρα, χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.1), που αναφέραμε, θα υπολογίσουμε τη συνάρτηση σύζευξης Clem–Dorman $W(R_C, h)$ για κάθε σταθμό. Επομένως, κατασκευάζουμε τον αντίστοιχο κώδικα και παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα στον επόμενο πίνακα.

Σταθμός	R_C [GV]	h [km]	Διάστημα	Φύση	$a = a(h)$	$k = k(h)$	$W(R_C, h)$
OULU	0.81	0.01	18/10/2021–18/11/2021	solar min	5.91	2.47	4.62×10^{-3}
OULU	0.81	0.01	09/03/2024–09/04/2024	solar max	5.84	2.60	4.50×10^{-3}
OULU	0.81	0.01	25/05/2025–25/06/2025	solar max	5.84	2.60	4.50×10^{-3}
ROME	6.27	0.00	18/10/2021–18/11/2021	solar min	5.75	2.50	6.08×10^{-2}
ROME	6.27	0.00	09/03/2024–09/04/2024	solar max	5.75	2.64	5.58×10^{-2}
ROME	6.27	0.00	25/05/2025–25/06/2025	solar max	5.75	2.64	5.58×10^{-2}
SOPB	0.10	2.82	18/10/2021–18/11/2021	solar min	10.52	0.94	6.16×10^{-4}
SOPB	0.10	2.82	09/03/2024–09/04/2024	solar max	8.21	0.82	4.26×10^{-2}
SOPB	0.10	2.82	25/05/2025–25/06/2025	solar max	8.21	0.82	4.26×10^{-2}

Πίνακας 3.6: Τελικές τιμές των παραμέτρων σύζευξης a , k και της συνάρτησης σύζευξης $W(R_C, h)$ για κάθε σταθμό και για τα τρία χρονικά διαστήματα μειώσεων Forbush.

3.2 Μέθοδος Wawrzynczak–Alania και πρωτογενής Κοσμική Ακτινοβολία

Στο παρόν στάδιο εφαρμόζουμε τη μεθοδολογία των Wawrzynczak και Alania, η οποία επιτρέπει τη συσχέτιση της δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας που καταγράφεται από επίγειους μετρητές νετρονίων με την αντίστοιχη πρωτογενή συνιστώσα, μέσω κατάλληλων συναρτήσεων σύζευξης. Η βασική υπόθεση της προσέγγισης είναι ότι, κατά τη διάρκεια μίας μείωσης Forbush, η σχετική μεταβολή της έντασης της γαλαξιακής Κοσμικής Ακτινοβολίας ως συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας μπορεί να περιγραφεί από Νόμο δύναμης:

$$\frac{\delta D(R_C)}{D(R_C)} = \begin{cases} A \left(\frac{R_C}{R_0} \right)^{-\gamma}, & R_C \leq R_{\max}, \\ 0, & R_C > R_{\max}, \end{cases} \quad (3.4)$$

όπου $\delta D(R_C)/D(R_C)$ είναι η σχετική μεταβολή στην ένταση της Κοσμικής Ακτινοβολίας, R_C η μαγνητική δυσκαμψία, γ ο ενεργειακός εκθέτης, ενώ $R_0 = 1$ GV και $R_{\max} = 200$ GV η τιμή δυσκαμψίας πάνω από την οποία η μείωση δεν καταγράφεται.

Η σχέση (3.4) συνδέεται με τις μετρήσεις των μετρητών νετρονίων μέσω της συνάρτησης σύζευξης $W_i(R_C, h_i)$ του προηγούμενου εδαφίου, ως εξής:

$$J_i^k = \int_{R_{C_i}}^{R_{\max}} \left(\frac{\delta D(R_C)}{D(R_C)} \right)_k W_i(R_C, h_i) dR_C, \quad (3.5)$$

όπου J_i^k είναι το παρατηρούμενο μέγεθος για τον i -οστό σταθμό και το k -οστό γεγονός, R_{C_i} η δυσκαμψία αποκοπής του σταθμού, και h_i το υψόμετρο (σε km).

Αντικαθιστώντας τη μορφή (3.4) στη (3.5), προκύπτει η έκφραση για το πλάτος της πρωτογενούς συνιστώσας (στο πλαίσιο του Νόμου δύναμης) για τον σταθμό i και το γεγονός k :

$$A_i^k = \frac{J_i^k}{\int_{R_{C_i}}^{R_{\max}} \left(\frac{R_C}{R_0} \right)^{-\gamma_k} W_i(R_C, h_i) dR_C}. \quad (3.6)$$

Στην πράξη, για κάθε γεγονός Forbush υπολογίζουμε αριθμητικά τον παρονομαστή της (3.6) για κάθε σταθμό (με τις κατάλληλες παραμέτρους της W_i) και, χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές J_i^k , εξάγουμε τις τιμές A_i^k , που είναι η πρωτογενής Κοσμική Ακτινοβολία. Με αυτά τα δεδομένα στο επόμενο εδάφιο παρουσιάζουμε τα διαγράμματα της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας.

3.3 Διαγράμματα πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας και σχολιασμός

Σε αυτό το εδάφιο θα παρουσιάσουμε τα διαγράμματα της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας που υπολογίσαμε και κατασκευάσαμε με τη μέθοδο Wawrzynczak-Alania, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση σύζευξης Clem–Dorman. Τα διαγράμματα αυτά: Διάγραμμα 3.1, Διάγραμμα 3.2 και Διάγραμμα 3.3 τα παρουσιάζουμε στην επόμενη σελίδα.

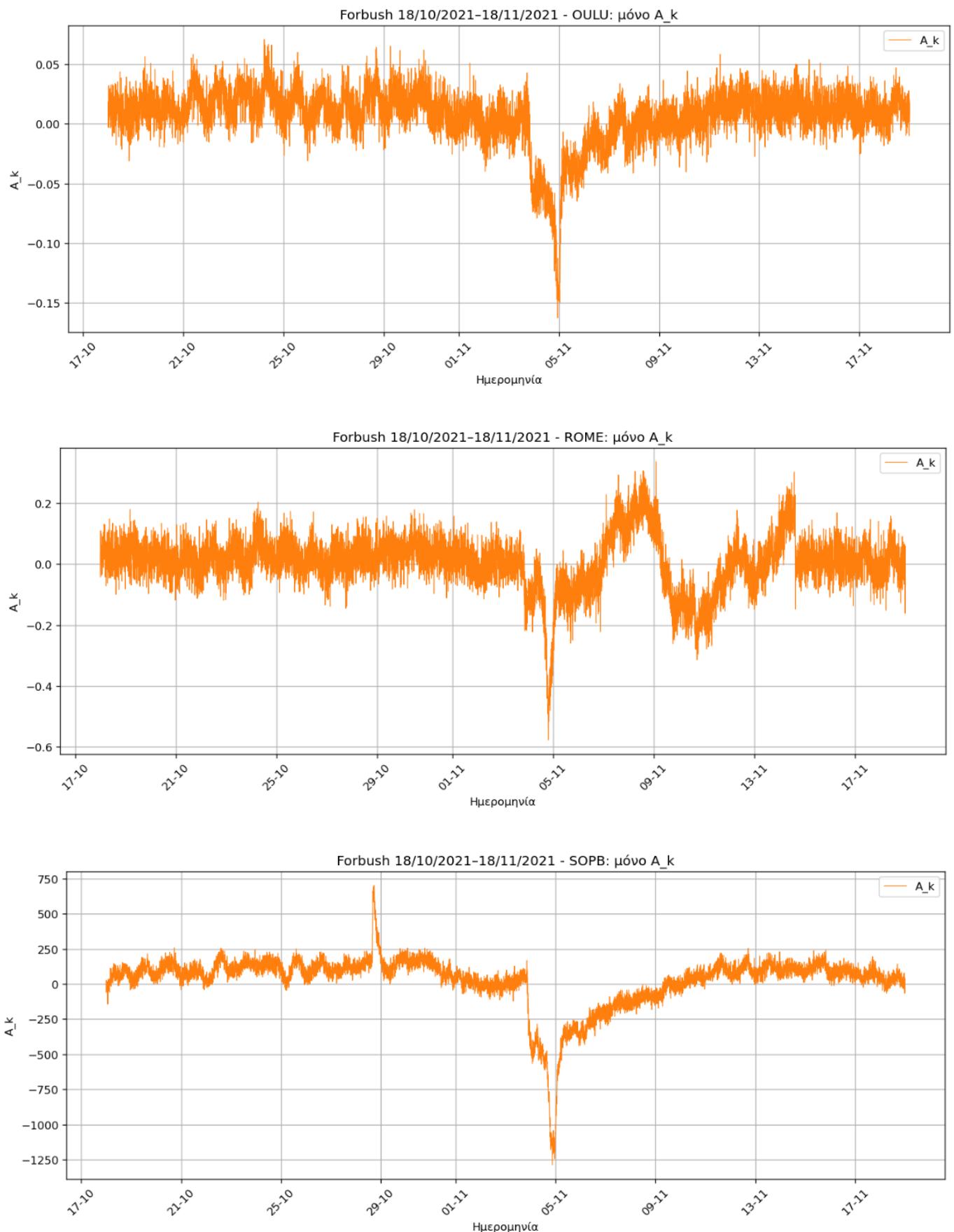
Στα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται οι χρονοσειρές της πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας A_k για τους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB**, όπως προκύπτει από τη μέθοδο των Wawrzynczak–Alania σε συνδυασμό με τη συνάρτηση σύζευξης Clem–Dorman. Υπενθυμίζουμε ότι το A_k προκύπτει μέσω των σχέσεων (3.4)–(3.6) και ποσοτικοποιεί (για κάθε χρονική στιγμή k) το πλάτος της μεταβολής της πρωτογενούς έντασης ως συνάρτηση της μαγνητικής δυσκαμψίας. Η χαρακτηριστική υπογραφή μίας μείωσης Forbush αποτυπώνεται ως απότομη αρνητική εκτροπή του A_k και στη συνέχεια ως σταδιακή αποκατάσταση προς τις προ-γεγονότος τιμές.

Για το γεγονός **18/10/2021–18/11/2021** (Διάγραμμα 3.1), η χρονική στιγμή του ελαχίστου εμφανίζεται πρακτικά ταυτόχρονα και στους τρεις σταθμούς (αρχές Νοεμβρίου), συμβατή με την ταυτόχρονη καταγραφή της μείωσης στη δευτερογενή ένταση. Ο σταθμός **OULU** παρουσιάζει καθαρή, σχετικά ομαλή πτώση και ανάκαμψη, ενώ ο **ROME** εμφανίζει εντονότερες ταλαντώσεις μετά το ελάχιστο (με μεταβαλλόμενα πρόσημα), ένδειξη πιο «θορυβώδους» ανακατασκευής στο A_k λόγω της διαδικασίας ολοκλήρωσης/διαίρεσης στη σχέση (3.6). Για τον **SOPB** οι αριθμητικές τιμές του A_k είναι σημαντικά ενισχυμένες (με πολύ μεγάλο εύρος), γεγονός που αποδίδεται κυρίως στη διαφορετική παραμετροποίηση της σύζευξης για το συγκεκριμένο R_C και h (και άρα σε διαφορετική κλίμακα του παρονομαστή στη (3.6)). Παρά την κλιμάκωση, η χρονική μορφή (απότομη πτώση–σταδιακή ανάκαμψη) παραμένει πλήρως συμβατή με την αναμενόμενη εξέλιξη Forbush.

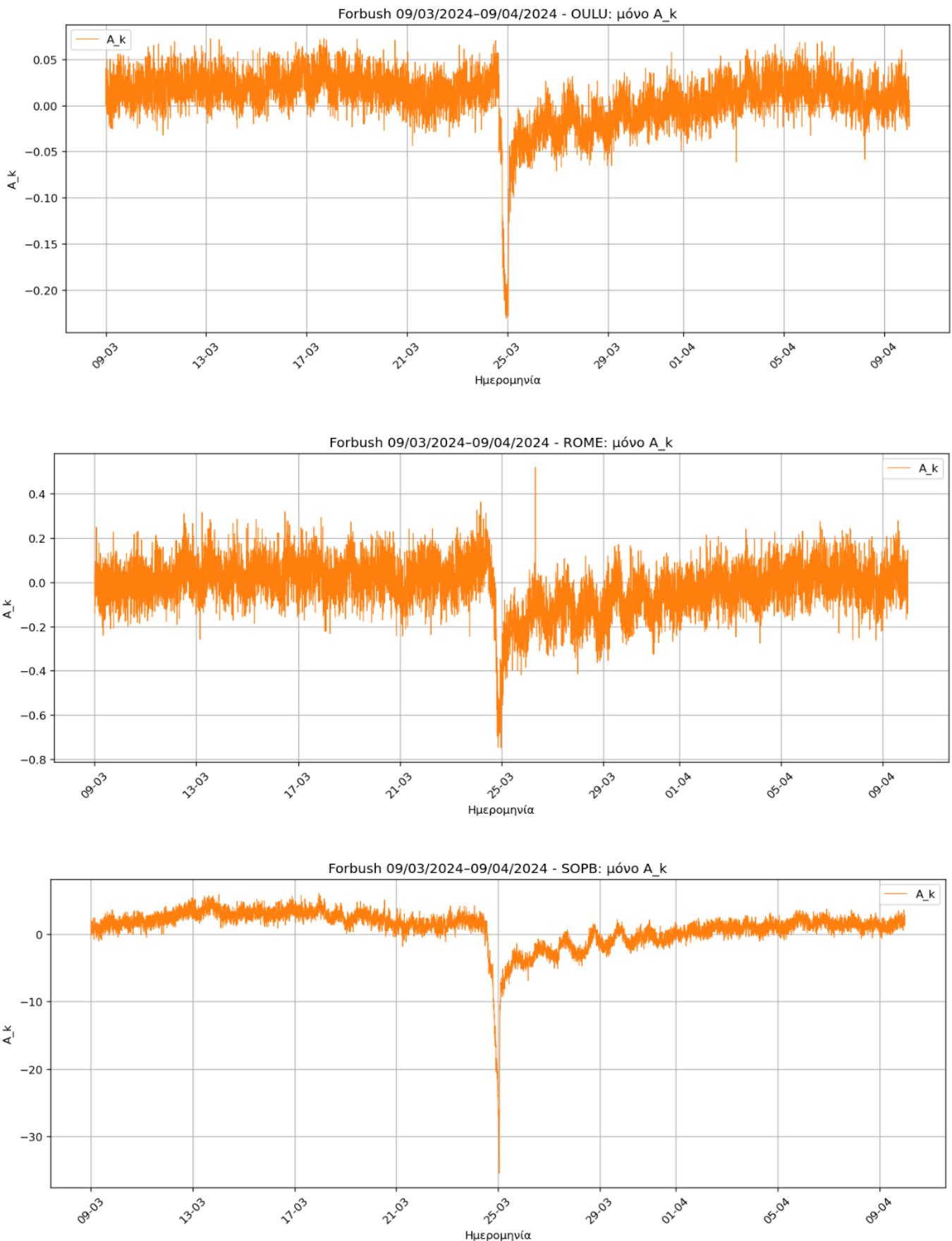
Για το γεγονός **09/03/2024–09/04/2024** (Διάγραμμα 3.2), η ισχυρή πτώση του A_k εντοπίζεται συγκεντρωμένα γύρω από τα τέλη Μαρτίου, σε συμφωνία με τον χρόνο ελαχίστου της δευτερογενούς έντασης. Η πτώση είναι πιο «αιχμηρή» στον **SOPB**, ενώ στον **OULU** η ανάκαμψη είναι πιο ομαλή. Στον **ROME** παρατηρούνται επιπλέον απότομες αιχμές/διακυμάνσεις κοντά στην περίοδο του ελαχίστου, που μπορούν να ερμηνευθούν ως αυξημένη ευαισθησία του A_k σε τοπικές διακυμάνσεις του J_i^k , όταν εφαρμόζεται η ανακατασκευή της (3.6).

Για το γεγονός **25/05/2025–25/06/2025** (Διάγραμμα 3.3), η κύρια πτώση του A_k εμφανίζεται στις αρχές Ιουνίου και ακολουθείται από παρατεταμένη, σταδιακή ανάκαμψη, ιδιαίτερα εμφανή στον **OULU** και στον **ROME**. Ο **SOPB** εμφανίζει και εδώ βαθύτερη αρνητική εκτροπή και ισχυρότερη μεταβλητότητα, κάτι που είναι αναμενόμενο για σταθμό πολύ χαμηλής μαγνητικής δυσκαμψίας (εντονότερη ευαισθησία της κοσμικής ακτινοβολίας σε διαπλανητικές διαταραχές χαμηλότερων ενεργειών).

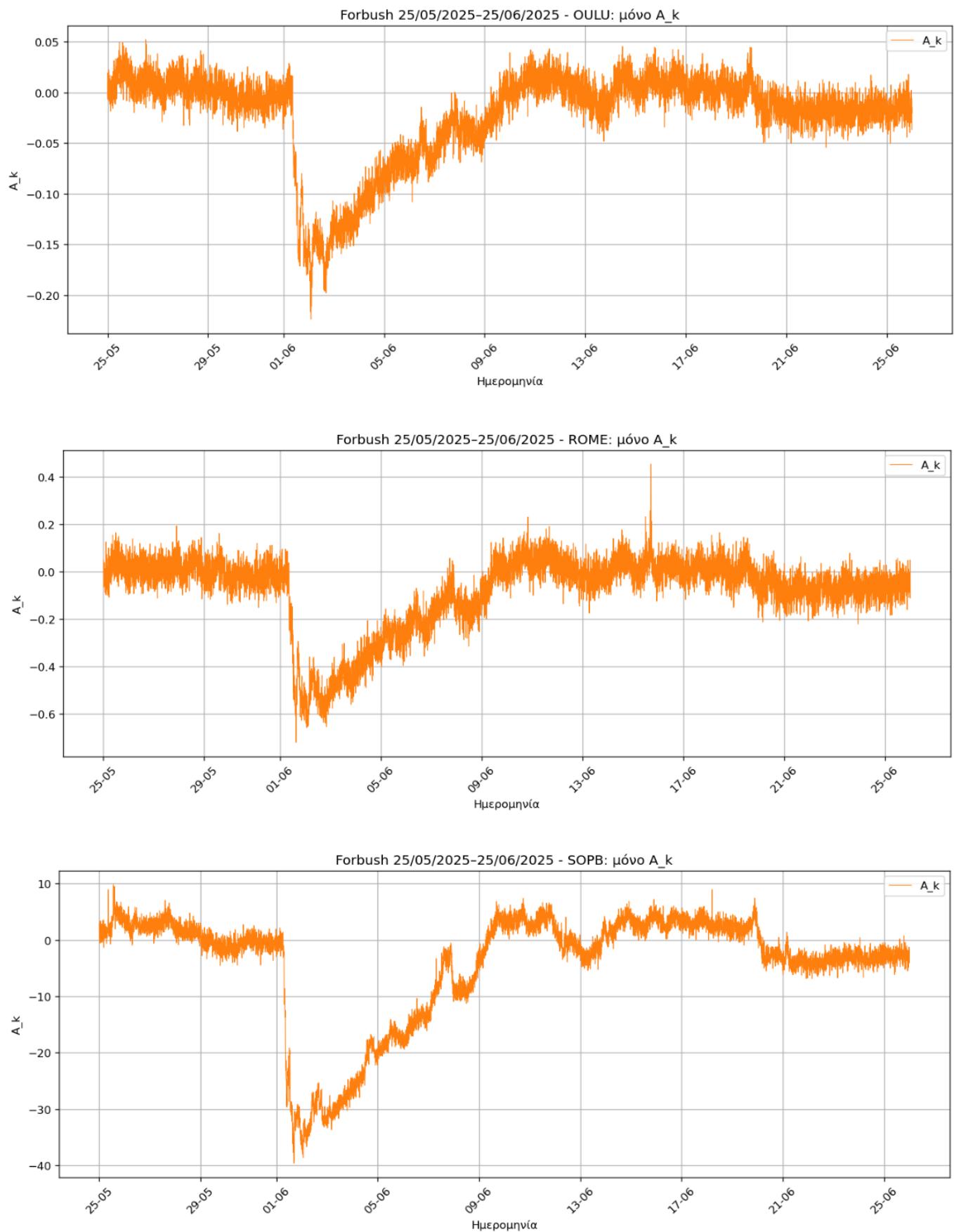
Συνολικά, τα Διαγράμματα 3.1–3.3 επιβεβαιώνουν ότι η ανακατασκευασμένη πρωτογενής μεταβολή A_k διατηρεί τον παγκόσμιο χαρακτήρα των μειώσεων (χρονική σύμπτωση των ελαχίστων), ενώ οι διαφορές στο εύρος/«θόρυβο» μεταξύ σταθμών αντανακλούν τόσο τη διαφορετική μαγνητική δυσκαμψία, όσο και την κλιμάκωση που εισάγει η σύζευξη Clem–Dorman στη σχέση (3.6).



Διάγραμμα 3.1: Διαγράμματα πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός Forbush 18/10/2021–18/11/2021, για τους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB**.



Διάγραμμα 3.2: Διαγράμματα πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός Forbush **09/03/2024–09/04/2024**, για τους σταθμούς **OULU, ROME** και **SOPB**.



Διάγραμμα 3.3: Διαγράμματα πρωτογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός Forbush 25/05/2025–25/06/2025, για τους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB**.

3.4 Σύγκριση πρωτογενούς και δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας

Τώρα, θα παραθέσουμε τα κοινά διαγράμματα πρωτογενούς και δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας και θα τα συγκρίνουμε αναζητώντας ομοιότητες και διαφορές. Σημειώνουμε ότι στα κοινά διαγράμματα χρησιμοποιείται **διπλός άξονας** (διαφορετική κλίμακα για πρωτογενή και δευτερογενή), ώστε να αναδειχθεί καθαρά ότι οι δύο χρονοσειρές έχουν το **ίδιο χρονικό προφίλ** και να καταστεί δυνατή η σύγκριση ως προς (i) τον **συγχρονισμό** των χαρακτηριστικών χρονικών στιγμών και (ii) το **σχετικό βάθος** της μείωσης και πιθανές χρονικές αποκλίσεις.

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση των κοινών διαγραμμάτων $A_k - J_k$ (πορτοκαλί: A_k , μπλε: J_k) για τους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB**, καθώς και για τα τρία γεγονότα μειώσεων Forbush **18/10/2021–18/11/2021**, **09/03/2024–09/04/2024** και **25/05/2025–25/06/2025**. Ο διπλός άξονας δεν στοχεύει στη σύγκριση απόλυτων τιμών ή μονάδων, αλλά στη σύγκριση της χρονικής μορφής (*onset–minimum–recovery*), του συγχρονισμού και της σχετικής εξέλιξης μεταξύ της ανακατασκευασμένης πρωτογενούς μεταβολής (μέσω A_k , με τη μεθοδολογία Wawrzynczak–Alania) και της παρατηρούμενης δευτερογενούς Κοσμικής Ακτινοβολίας (μέσω J_k).

Πριν την αντιπαραβολή των κοινών διαγραμμάτων, τονίζεται ότι ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών χρονικών στιγμών πραγματοποιείται πάνω στις **εξομαλυμένες** χρονοσειρές, όπου σημειώνονται τόσο το *onset* όσο και η χρονική στιγμή της ελάχιστης έντασης. Παράλληλα, η κανονικοποίηση ως προς το ηλιοσφαιρικό υπόβαθρο επιτρέπει την απευθείας σύγκριση της μορφής και του σχετικού βάθους της μείωσης μεταξύ σταθμών με διαφορετική μαγνητική δυσκαμψία και υψόμετρο.

(i) Γεγονός 18/10/2021–18/11/2021. Για το γεγονός αυτό, το ελάχιστο της δευτερογενούς έντασης καταγράφεται: (i) στον **OULU** στις **04/11/2021 22:45** με τιμή **97.254 counts** και ποσοστό μείωσης **11.91%**, (ii) στον **ROME** στις **04/11/2021 19:15** με τιμή **113.517 counts** και ποσοστό μείωσης **10.56%**, και (iii) στον **SOPB** στις **04/11/2021 21:00** με τιμή **130.468 counts** και ποσοστό μείωσης **16.79%**. Το γεγονός αυτό χαρακτηρίζεται από ενεργειακό εκθέτη $\gamma = 0.204$, δηλαδή ήπια έως μέτρια εξάρτηση του πλάτους από τη μαγνητική δυσκαμψία. Η ιεράρχηση των βάθων (**SOPB > OULU > ROME**) προκύπτει φυσικά από τη γεωμαγνητική επιλογή ενεργειών: ο **SOPB** (πολύ μικρό R_C) είναι περισσότερο ευαίσθητος σε χαμηλότερες ενέργειες, οι οποίες είναι και πιο ευάλωτες στις διαταραχές του διαπλανητικού μαγνητικού πεδίου.

Στο κοινό διάγραμμα του γεγονότος αυτού παρατηρείται ότι η πτώση του J_k συνοδεύεται από αντίστοιχη πτώση του A_k , ενώ η ανάκαμψη εμφανίζεται σταδιακά και στις δύο καμπύλες. Αυτή η μορφολογική συμφωνία αποτελεί ισχυρό έλεγχο συνέπειας: η διαδικασία ανακατασκευής της πρωτογενούς συνιστώσας (μέσω σύζευξης και προσαρμογής) αποδίδει την ίδια βασική χρονική δομή της διαταραχής που παρατηρείται στη δευτερογενή μέτρηση. Παρ' όλα αυτά, στην πρωτογενή παράμετρο A_k η εικόνα διαφοροποιείται ποιοτικά ανά σταθμό: για τον **ROME** εμφανίζονται εντονότερες διακυμάνσεις μετά το ελάχιστο, ενώ για τον **SOPB** το A_k προκύπτει σημαντικά ενισχυμένο ως προς την κλίμακα. Η συμπεριφορά αυτή ερμηνεύεται σε μεγάλο βαθμό από τη διαφορετική παραμετροποίηση της σύζευξης μέσω (R_C, h) : για **SOPB** στο *solar min* προκύπτει πολύ μικρή τιμή σύζευξης $W(R_C, h) = 6.16 \times 10^{-4}$, δηλαδή κατά τάξεις μεγέθους μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές των **ΟULU** και **ROME**. Αυτό οδηγεί σε μεγεθυνμένη κλίμακα στο ανακατασκευασμένο A_k , χωρίς να αναιρεί τη χρονική συμφωνία της πτώσης και της ανάκαμψης.

(ii) Γεγονός 09/03/2024–09/04/2024. Για το γεγονός αυτό, το ελάχιστο της δευτερογενούς έντασης καταγράφεται: (i) στον **OULU** στις **24/03/2024 22:45** με τιμή **83.955 counts** και ποσοστό μείωσης **14.93%**, (ii) στον **ROME** στις **24/03/2024 23:40** με τιμή **89.097 counts** και ποσοστό μείωσης **7.92%**, και (iii) στον **SOPB** στις **25/03/2024 01:10** με τιμή **79.868 counts** και ποσοστό μείωσης **26.19%**. Εδώ ο εκθέτης $\gamma = 0.348$ είναι ο μεγαλύτερος από τα τρία γεγονότα, συνεπώς η ενεργειακή εξάρτηση του πλάτους είναι εντονότερη. Αυτό εξηγεί άμεσα γιατί ο **ROME** (υψηλό R_C) εμφανίζει τη μικρότερη μείωση (7.92%), ενώ ο **SOPB** τη βαθύτερη (26.19%) και ο **ΟULU** ενδιάμεση αλλά σαφώς σημαντική (14.93%). Η συγκεκριμένη ενίσχυση της διάκρισης μεταξύ υψηλών και χαμηλών R_C αποτελεί την αναμενόμενη υπογραφή ενός γεγονότος, όπου η διαταραχή καταστέλλει πιο αποτελεσματικά τα χαμηλότερης δυσκαμψίας σωματίδια.

Στο κοινό διάγραμμα του γεγονότος αυτού η συμφωνία A_k-J_k παραμένει ισχυρή: η κύρια πτώση και το ελάχιστο εμφανίζονται σε πρακτικά σύμφωνο χρονικό πλαίσιο, ενώ η ανάκαμψη εκτείνεται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από την πτώση. Μικρές αποκλίσεις ως προς την ομαλότητα ή μικρές χρονικές μετατοπίσεις σε τμήματα της ανάκαμψης είναι αναμενόμενες, διότι το J_k αποτελεί αποτέλεσμα ατμοσφαιρικής παραγωγής/μεταφοράς δευτερογενών και ανίχνευσης, ενώ το A_k αντιστοιχεί σε αναγωγή της πρωτογενούς μεταβολής μέσω σύζευξης και μοντελοποίησης.

(iii) Γεγονός 25/05/2025–25/06/2025. Για το γεγονός αυτό, το ελάχιστο της δευτερογενούς έντασης καταγράφεται: (i) στον **OULU** στις **02/06/2025 02:05** με τιμή **72.814 counts** και ποσοστό μείωσης **19.04%**, (ii) στον **ROME** στις **01/06/2025 15:20** με τιμή **86.760 counts** και ποσοστό μείωσης **13.43%**, και (iii) στον **SOPB** στις **01/06/2025 16:30** με τιμή **75.377 counts** και ποσοστό μείωσης **20.40%**. Ο εκθέτης $\gamma = 0.113$ είναι ο μικρότερος, άρα η εξάρτηση από τη δυσκαμψία είναι ασθενέστερη σε σχέση με τα άλλα δύο γεγονότα. Αυτό αντανακλάται στην πολύ κοντινή συμπεριφορά των **OULU** και **SOPB** (19.04% και 20.40% αντίστοιχα), ενώ ο **ROME** εξακολουθεί να εμφανίζει μικρότερο βάθος (13.43%), όπως αναμένεται λόγω υψηλού R_C .

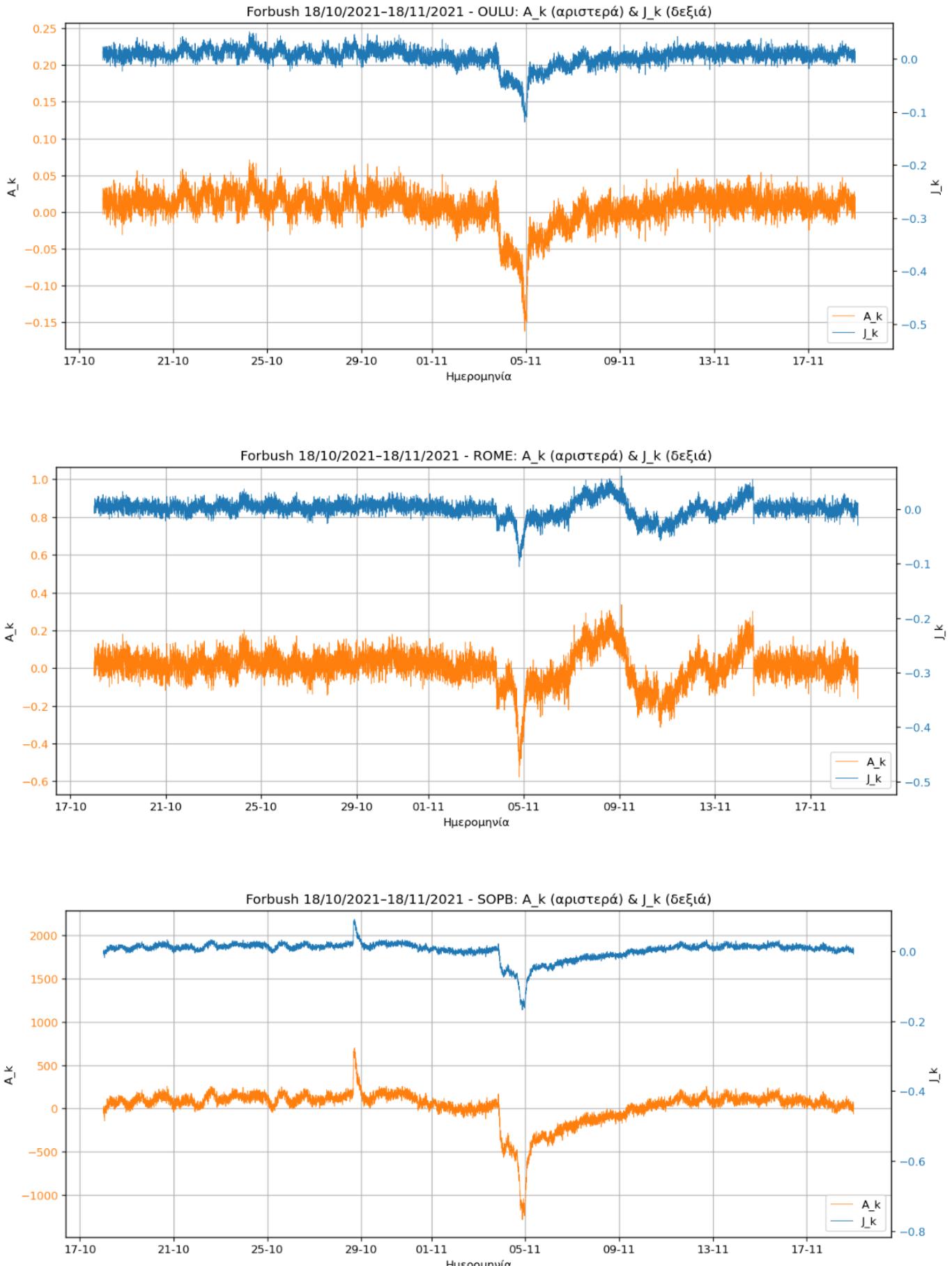
Στην πρωτογενή ανακατασκευή για το γεγονός αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή της σύζευξης $W(R_C, h)$ του **SOPB** στο *solar max* (4.26×10^{-2}) είναι πλέον συγκρίσιμη ως προς την τάξη μεγέθους με τις αντίστοιχες τιμές των άλλων σταθμών, σε αντίθεση με το *solar min* του 2021. Έτσι, στο κοινό διάγραμμα του 2025 η κλίμακα του A_k για **SOPB** δεν εμφανίζει την ακραία ενίσχυση που παρατηρείται στο γεγονός του 2021, γεγονός που επιτρέπει πιο ισορροπημένη ποιοτική σύγκριση των δύο καμπυλών.

Συνολικά, από τα κοινά διαγράμματα προκύπτει ότι η δομή *onset–minimum–recovery* είναι κοινή και στα δύο μεγέθη, άρα τα A_k και J_k καταγράφουν την ίδια ηλιοφυσική διεργασία, με διαφορετικό φίλτρο (μοντελοποίηση έναντι ατμόσφαιρας και ανιχνευτή). Η ιεράρχηση βάθους **SOPB > OULU > ROME** εμφανίζεται σταθερά στη δευτερογενή ένταση και συμβαδίζει με την προσδοκία της εξάρτησης από τη μαγνητική δυσκαμψία. Επιπλέον, η μεταβολή του εκθέτη γ ανά γεγονός (0.204, 0.348, 0.113) παρέχει έναν φυσικό τρόπο κατανόησης για το πόσο έντονα διαφοροποιούνται οι σταθμοί: όταν γ είναι μεγαλύτερο (γεγονός 2024), η διάκριση υψηλού–χαμηλού R_C γίνεται πιο έντονη, ενώ όταν γ είναι μικρό (γεγονός 2025), οι διαφορές συμπιέζονται.

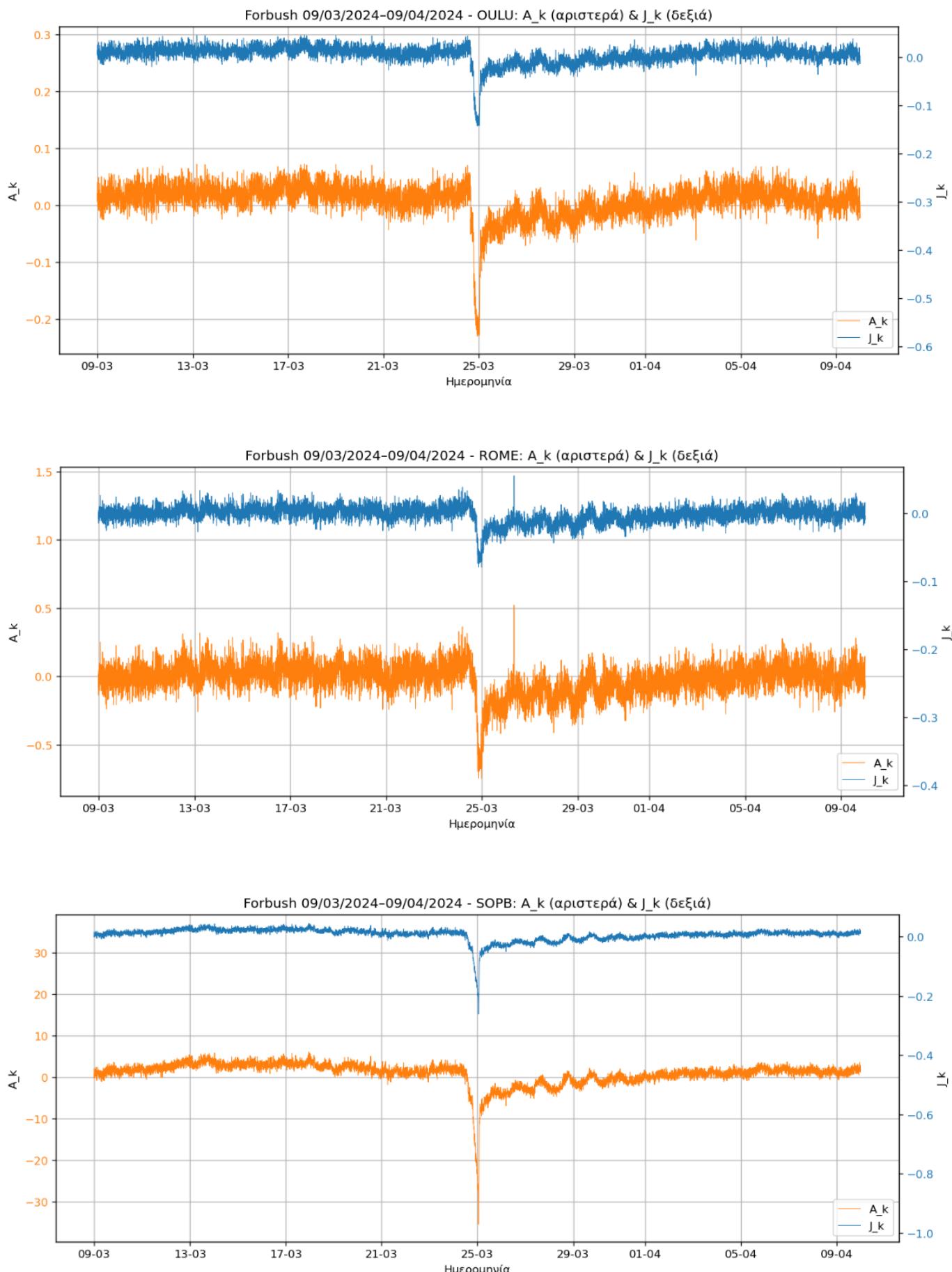
Τέλος, πρέπει να τονιστεί ότι η σύγκριση βάθους μεταξύ A_k και J_k **δεν** γίνεται με βάση απόλυτες μονάδες (αφού τα μεγέθη έχουν διαφορετική κλίμακα), αλλά με βάση (α) τον συγχρονισμό των χαρακτηριστικών χρονικών στιγμών και (β) τη μορφολογική συνέπεια της πτώσης και της ανάκαμψης. Στο πλαίσιο αυτό, αποκλίσεις όπως αυξημένος θόρυβος στον **ROME** ή ενίσχυση της κλίμακας στον **SOPB** ερμηνεύονται ως αναμενόμενες συνέπειες της αλυσίδας σύζευξης μέσω $W(R_C, h)$ και όχι ως αποτυχία της φυσικής συσχέτισης.

Τα κοινά διαγράμματα A_k-J_k αναδεικνύουν σταθερά την τυπική χρονική υπογραφή των μειώσεων Forbush, ενώ οι χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές *onset* και *minimum* προσδιορίζονται από την ανάλυση των εξομαλυμένων χρονοσειρών και αποτυπώνονται στα σχετικά διαγράμματα. Η ιεράρχηση μορφολογική συμφωνία μεταξύ των δύο μεγεθών, σε συνδυασμό με την αναμενόμενη ιεράρχηση των ποσοστών μείωσης στη δευτερογενή ένταση (**2021: 16.79% > 11.91% > 10.56%, 2024: 26.19% > 14.93% > 7.92%, 2025: 20.40% > 19.04% > 13.43%**), επιβεβαιώνει ότι η ανακατασκευή της πρωτογενούς συνιστώσας είναι χρονικά συνεπής και φυσικά ερμηνεύσιμη. Παράλληλα, η παρατήρηση ότι η πτώση είναι συστηματικά πιο απότομη από την ανάκαμψη συνάδει με τον μηχανισμό των Forbush decreases, ενώ η διαφοροποίηση μεταξύ γεγονότων αποτυπώνεται και μέσω του εκθέτη γ : μεγαλύτερες τιμές γ οδηγούν σε εντονότερη εξάρτηση από τη δυσκαμψία και άρα σε μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ σταθμών, ενώ μικρότερες τιμές γ μειώνουν το χάσμα.

Στις επόμενες σελίδες παραθέτουμε τα κοινά διαγράμματα, όπου αποτυπώνονται οπτικά τα παραπάνω συμπεράσματα (μορφή *onset–minimum–recovery*, συγχρονισμός A_k-J_k , και η ιεράρχηση των βάθων ανά σταθμό).

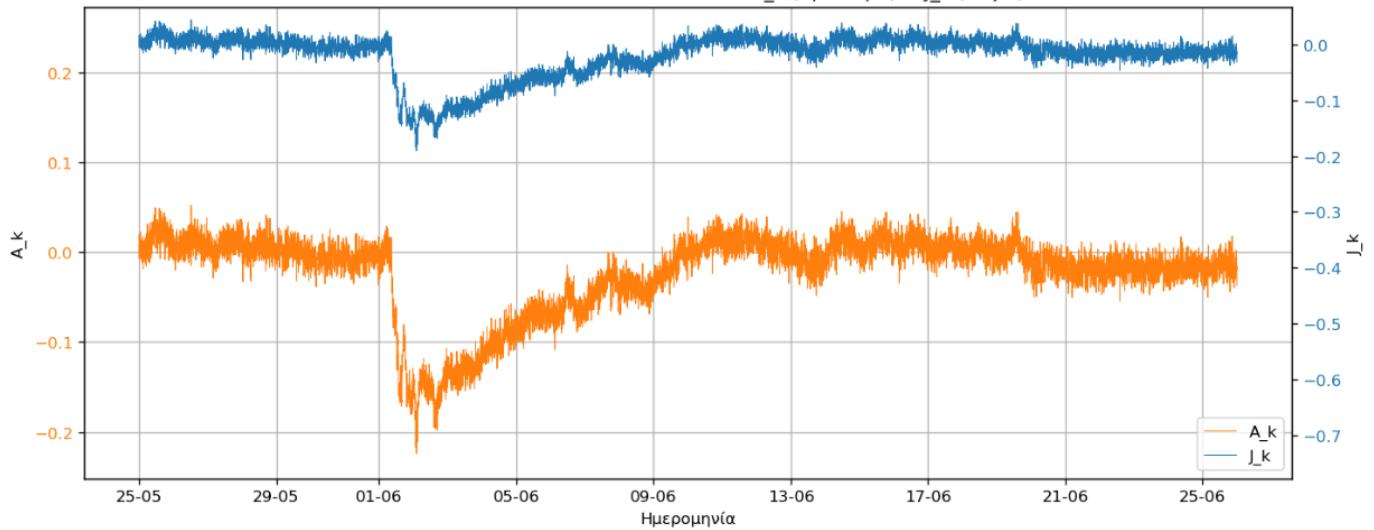


Διάγραμμα 3.4: Κοινά διαγράμματα A_k (αριστερός άξονας) και J_k (δεξιός άξονας) συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός Forbush **18/10/2021–18/11/2021**, για τους σταθμούς **OULU**, **ROME** και **SOPB**.

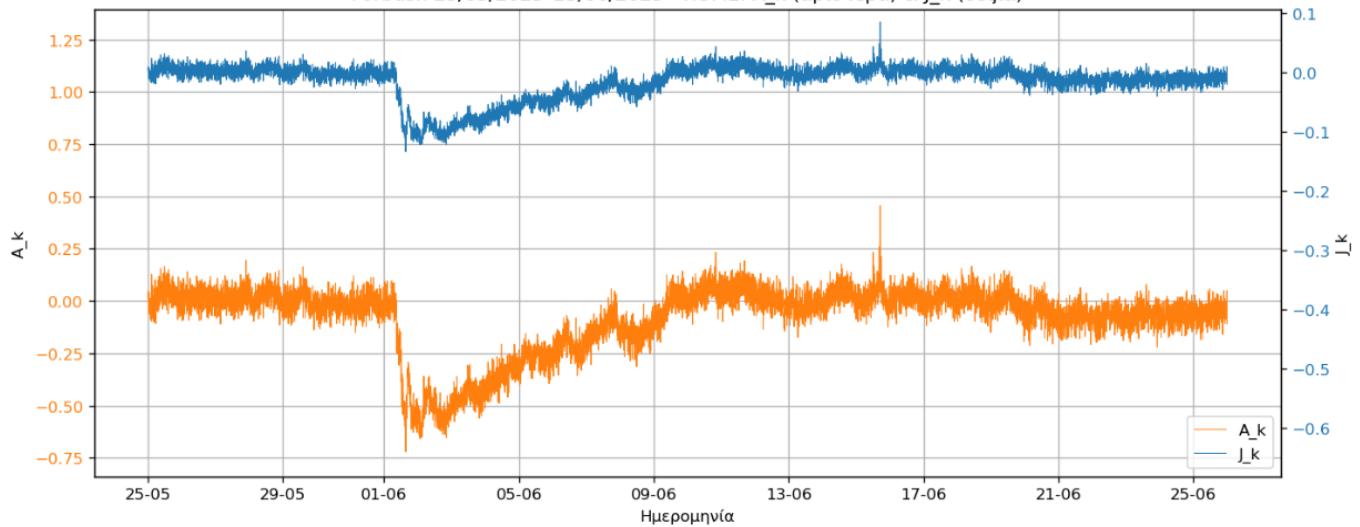


Διάγραμμα 3.5: Κοινά διαγράμματα A_k (αριστερός άξονας) και J_k (δεξιός άξονας) συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός Forbush 09/03/2024–09/04/2024, για τους σταθμούς OULU, ROME και SOPB.

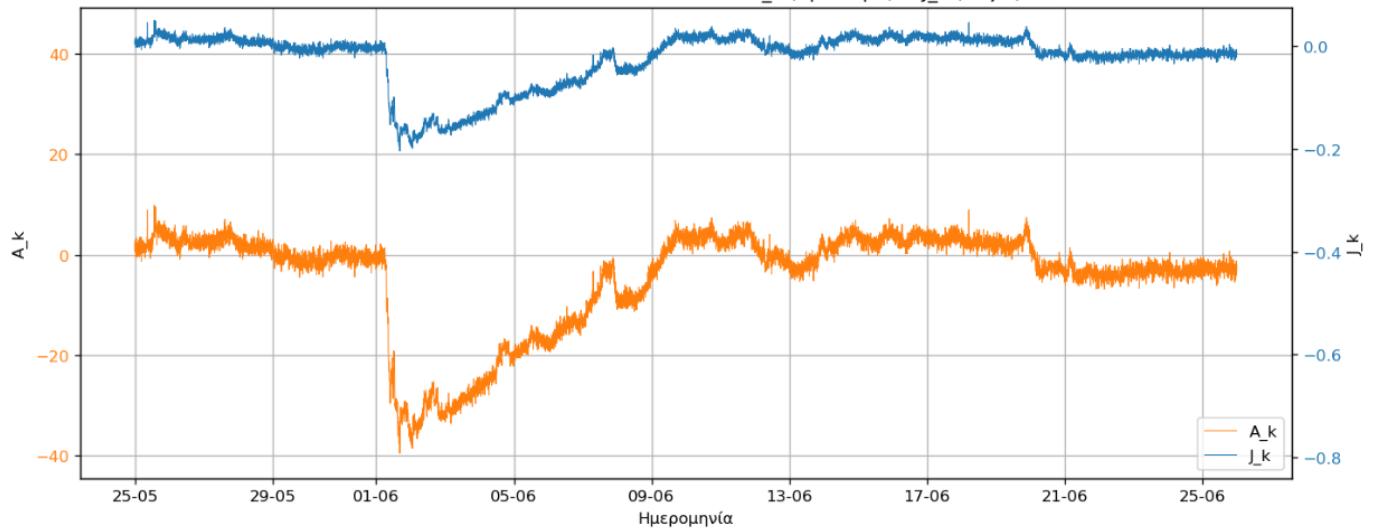
Forbush 25/05/2025–25/06/2025 - OULU: A_k (αριστερά) & J_k (δεξιά)



Forbush 25/05/2025–25/06/2025 - ROME: A_k (αριστερά) & J_k (δεξιά)



Forbush 25/05/2025–25/06/2025 - SOPB: A_k (αριστερά) & J_k (δεξιά)



Διάγραμμα 3.6: Κοινά διαγράμματα A_k (αριστερός άξονας) και J_k (δεξιός άξονας) συναρτήσει του χρόνου για το γεγονός Forbush 25/05/2025–25/06/2025, για τους σταθμούς OULU, ROME και SOPB.

4 Συζήτηση

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αναδεικνύουν καθαρά ότι οι μειώσεις Forbush δεν εμφανίζονται με τον ίδιο τρόπο σε όλους τους σταθμούς, αλλά μεταβάλλονται συστηματικά με τα γεωμαγνητικά χαρακτηριστικά τους. Σε όλες τις περιπτώσεις, οι σταθμοί που είναι ευαίσθητοι σε χαμηλότερες δυσκαμψίες παρουσιάζουν εντονότερη πτώση της έντασης σε σύγκριση με σταθμούς που αντιστοιχούν σε υψηλότερες δυσκαμψίες.

Παρά τη γενική αυτή τάση, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις από γεγονός σε γεγονός ως προς τη μορφολογία, την απότομη ή πιο ομαλή έναρξη, και τη διάρκεια της ανάκαμψης. Αυτό υποδηλώνει ότι, πέρα από την τυπική ενεργειακή εξάρτηση, ο ειδικός χαρακτήρας της διαπλανητικής δομής παίζει καθοριστικό ρόλο. Για παράδειγμα, γεγονότα με πιο απότομη πτώση είναι ενδεικτικά ισχυρής μεταβατικής διαταραχής (όπως συμπίεση ή κρουστικό μέτωπο), ενώ γεγονότα με παρατεταμένη ανάκαμψη υποδεικνύουν ότι η Γη παραμένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσα σε διαταραχγμένη περιοχή, όπου η διάχυση των κοσμικών ακτίνων παραμένει μειωμένη. Η σύγκριση μεταξύ των σταθμών βοηθά στο να διαχωριστεί η κοινή ηλιοσφαιρική συνιστώσα του φαινομένου από επιδράσεις που σχετίζονται με την αποκοπή, την ατμόσφαιρα ή το ύψος του σταθμού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντιπαραβολή της δευτερογενούς μεταβολής των μετρήσεων με την ανακατασκευή της πρωτογενούς μεταβολής. Σε γενικές γραμμές, η χρονική εξέλιξη των δύο περιγραφών είναι συνεπής: οι κύριες φάσεις του γεγονότος (πτώση, ελάχιστο, ανάκαμψη) εμφανίζονται σε αντίστοιχες χρονικές θέσεις, κάτι που ενισχύει την αξιοπιστία της ανακατασκευής ως εργαλείου ερμηνείας. Ωστόσο, παρατηρούνται και αναμενόμενες διαφορές στο πλάτος και στη λεπτομέρεια των καμπυλών. Η δευτερογενής συνιστώσα επηρεάζεται από τοπικούς παράγοντες (ατμοσφαιρικές μεταβολές, στατιστικός θόρυβος, λειτουργικές ιδιαιτερότητες του σταθμού), ενώ η πρωτογενής ανακατασκευή εξαρτάται από τις παραδοχές του μοντέλου απόκρισης και από το κατά πόσο η πραγματική διαμόρφωση μπορεί να προσεγγιστεί από μία απλοποιημένη περιγραφή. Το γεγονός ότι, παρά τις διαφορές αυτές, η συνολική δυναμική των γεγονότων διατηρείται και στις δύο προσεγγίσεις, υποστηρίζει ότι ο κύριος οδηγός των παρατηρούμενων μεταβολών είναι πράγματι η ηλιοσφαιρική διαταραχή.

Σε επίπεδο αβεβαιοτήτων, δύο σημεία είναι κρίσιμα. Πρώτον, η επιλογή της ήρεμης περιόδου αναφοράς και οι παράμετροι εξομάλυνσης μπορούν να μεταβάλουν ελαφρά το εκτιμώμενο πλάτος, ειδικά όταν η χρονοσειρά περιέχει προϋπάρχουσες διακυμάνσεις ή μικρές ασυνέχειες. Δεύτερον, η σύγκριση μεταξύ σταθμών μπορεί να επηρεαστεί από ατμοσφαιρικές διορθώσεις και από διαφορές στην ποιότητα/πληρότητα των δεδομένων, γεγονός που απαιτεί προσεκτικό έλεγχο πριν εξαχθούν αυστηρά συμπεράσματα για μικρές αποκλίσεις. Παρ' όλα αυτά, η επαναλαμβανόμενη εμφάνιση της ίδιας ενεργειακής τάσης σε διαφορετικά γεγονότα και σταθμούς αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι το βασικό συμπέρασμα είναι σταθερό.

Συνοψίζοντας, η εργασία καταδεικνύει ότι η ενεργειακή εξάρτηση των μειώσεων Forbush αποτυπώνεται με σαφήνεια στη σύγκριση σταθμών διαφορετικής μαγνητικής δυσκαμψίας και ότι η ανακατασκευή της πρωτογενούς μεταβολής, αν και μοντελοεξαρτώμενη, παρέχει συνεκτική και φυσικά εύλογη εικόνα για το πώς η ηλιοσφαιρική διαταραχή μεταφράζεται στις επίγειες μετρήσεις. Η συνδυαστική χρήση πολλών σταθμών και η παράλληλη εξέταση πρωτογενούς–δευτερογενούς συνιστώσας αποτελεί ένα χρήσιμο πλαίσιο για πιο λεπτομερή μελλοντική διερεύνηση, ιδιαίτερα αν ενσωματωθούν επιπλέον γεγονότα και ανεξάρτητες πληροφορίες για τις διαπλανητικές συνθήκες κάθε επεισοδίου μείωσης.

Βιβλιογραφία και αναφορές

- [1] Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, *Κοσμική Ακτινοβολία*, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2009.
- [2] M. Papailiou, H. Mavromichalaki, A. Belov, E. Eroshenko, V. Yanke, *The Asymptotic Longitudinal Cosmic Ray Intensity Distribution as a Precursor of Forbush Decreases*, Solar Physics **280**, 641–650 (2012). ([doi:10.1007/s11207-012-9945-4](https://doi.org/10.1007/s11207-012-9945-4))
- [3] A. Wawrzynczak, M. V. Alania, *Modeling and data analysis of a Forbush decrease*, Advances in Space Research **45**(5), 622–631 (2010). ([doi:10.1016/j.asr.2009.09.005](https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.09.005))
- [4] A. L. Mishev, I. G. Usoskin, G. A. Kovaltsov, *Neutron monitor yield function: New improved computations*, Journal of Geophysical Research: Space Physics **118**, 2783–2793 (2013). ([doi:10.1002/jgra.50325](https://doi.org/10.1002/jgra.50325))
- [5] M. Livada, H. Mavromichalaki, *Spectral Analysis of Forbush Decreases Using a New Yield Function*, Solar Physics **295**, 115 (2020). ([doi:10.1007/s11207-020-01679-z](https://doi.org/10.1007/s11207-020-01679-z))
- [6] L. Xaplanteris, M. Livada, H. Mavromichalaki, L. Dorman, *A new approximate coupling function: The case of Forbush decreases*, New Astronomy **82**, 101453 (2021). ([doi:10.1016/j.newast.2020.101453](https://doi.org/10.1016/j.newast.2020.101453))
- [7] Neutron Monitor Data Base (NMDB), διαθέσιμο στο <https://www.nmdb.eu/>.