

Η αξιοποίηση των παραγόμενων προϊόντων από την επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων μόνιμων σταθμών GNSS στην μελέτη του κλίματος

Χ. Πικριδής

*Εργαστήριο Γεωδαιτικών Μεθόδων και Δορυφορικών Εφαρμογών,
Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Τμήμα ΑΤΜ, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
cpik@topo.auth.gr*

Περίληψη: Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η αξιοποίηση των παραγόμενων προϊόντων από την επεξεργασία δεδομένων από δίκτυα μόνιμων σταθμών GNSS στην μελέτη των καιρικών αλλαγών και κατ' επέκταση του κλίματος. Το παραγόμενο προϊόν είναι η ζενίθια τροποσφαιρική υστέρηση (ZTD) η οποία επιδρά στα σήματα GNSS και αποτελεί εκτιμήσιμη παράμετρο μέσα από κατάλληλη επεξεργασία κατά τη διαδικασία της επίλυσης δικτύων μόνιμων σταθμών GNSS. Η συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιεί τα δεδομένα του μόνιμου σταθμού IOAN που βρίσκεται εγκατεστημένος στην πόλη των Ιωαννίνων, η οποία χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερες συνθήκες κλίματος. Οι μέσες ημερήσιες τιμές της ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης αναλύονται με τη βοήθεια της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης κατά βήματα συναρτήσει των επίγειων ατμοσφαιρικών μετρήσεων όπως είναι η θερμοκρασία, η πίεση, η σχετική υγρασία και το ύψος βροχής. Τα μετεωρολογικά δεδομένα εξήχθησαν από το μόνιμο μετεωρολογικό σταθμό παρατήρησης που βρίσκεται κοντά με τον μόνιμο σταθμό GNSS. Όλα τα προς επεξεργασία δεδομένα καλύπτουν διάρκεια δεκαοκτώ μηνών περιλαμβάνοντας καιρικές εναλλαγές. Τα αποτελέσματα από την όλη επεξεργασία έδειξαν ότι οι ατμοσφαιρικές παράμετροι που συνδέονται σημαντικά με την τροποσφαιρική υστέρηση είναι η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία διατυπώνοντας και την μαθηματική τους περιγραφή. Ως αποτέλεσμα, γίνεται φανερό ότι τα δεδομένα GNSS με τα αντίστοιχα προϊόντα από την επεξεργασία τους με κατάλληλο συνδυασμό και ανάλυση, μπορούν να συμβάλλουν στην μελέτη των καιρικών αλλαγών και σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα στην μελέτη και περιγραφή του κλίματος ενός τόπου.

Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη εργασία έχει ως στόχο την αξιοποίηση των δορυφορικών σημάτων που εκπέμπονται από τα Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Πλοήγησης (Global Navigation Satellite Systems) στην παρακολούθηση και κατά συνέπεια στη λεπτομερή χαρτογράφηση των παραμέτρων που επιδρούν στις κλιματικές αλλαγές ενός τόπου. Αυτό είναι εφικτό μέσα από την εκτίμηση της ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης-ZTD (και των συνιστωσών της) που υπάρχει στα λαμβανόμενα (από τους δέκτες) σήματα που εκπέμπουν οι δορυφόροι GNSS. Στον όρο

GNSS συμπεριλαμβάνονται όλα τα δορυφορικά συστήματα πλοήγησης, όπως το Αμερικανικό GPS, το Ρωσικό GLONASS αλλά και τα υπό ανάπτυξη, Ευρωπαϊκό GALILEO και Κινέζικο COMPASS/BEIDOU.

Η εφαρμογή της παρούσας μελέτης πραγματοποιείται στην πόλη των Ιωαννίνων. Η επιλογή της περιοχής των Ιωαννίνων οφείλεται σε διάφορες παραμέτρους. Αρχικά η τοποθεσία που βρίσκεται η πόλη των Ιωαννίνων χαρακτηρίζεται από έντονα καιρικά φαινόμενα, όπως μεγάλης διάρκειας βροχοπτώσεις και υψηλές τιμές υγρασίας (δηλαδή, παρουσιάζει ένα «ιδιαιτέρο» κλίμα). Δεύτερον, στην περιοχή υπάρχει εγκατεστημένος μόνιμος σταθμός καταγραφής δεδομένων GNSS με την ονομασία IOAN του οποίου τα δεδομένα είναι διαθέσιμα προς επεξεργασία.

Το διάστημα μελέτης ξεκινά από την 1 Ιουνίου του έτους 2011 μέχρι και το τέλος (31 Δεκεμβρίου) του 2012. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε (κατά κύριο λόγο) σύμφωνα με την πληρότητα των δεδομένων του μόνιμου σταθμού GNSS που βρίσκεται στα Ιωάννινα. Κατά συνέπεια γίνεται φανερό ότι η διάρκεια των δεδομένων GNSS καλύπτει (τουλάχιστον) την εναλλαγή των εποχών εντός του έτους. Παράλληλα για όλο το διάστημα μελέτης χρησιμοποιήθηκαν οι ατμοσφαιρικές μετρήσεις-δεδομένα που ελήφθησαν από τον διαδικτυακό μετεωρολογικό ιστότοπο Weather Underground, (<http://www.wunderground.com>). Αναφορικά με τον ιστότοπο Weather Underground, θεωρείται ένας από τους πιο αξιόπιστους και ακριβείς χώρους παροχής καιρικών πληροφοριών. Η ανάπτυξη του ξεκίνησε από το πανεπιστήμιο του Μίτσιγκαν των ΗΠΑ και σήμερα αποτελεί το μεγαλύτερο δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών με σχεδόν 19000 σταθμούς στις ΗΠΑ και περισσότερους από 13000 στα υπόλοιπα μέρη του κόσμου. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο μετεωρολογικός σταθμός βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από τον μόνιμο σταθμό GNSS.

Οι παράμετροι επίδρασης κλιματικής αλλαγής που εξετάζονται στη μελέτη είναι η ατμοσφαιρική θερμοκρασία, η πίεση καθώς και η σχετική υγρασία. Ενώ κατά περίπτωση εξετάζεται και το ύψος βροχής. Οι μετρούμενες μετεωρολογικές παράμετροι καθώς και τα σχετικά προϊόντα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων GNSS στην παρούσα μελέτη αναλύθηκαν με τη βοήθεια κατάλληλων μαθηματικών τεχνικών (γραμμική παλινδρόμηση) με γενικό σκοπό την παρακολούθηση των παραμέτρων που επιδρούν στις κλιματικές αλλαγές μέσω της αξιοποίησης δεδομένων από τους μόνιμους σταθμούς GNSS.

1. Βασικές έννοιες από την μετεωρολογία

Στη συνέχεια και για λόγους πληρότητας δίνονται μέσω σύντομης περιγραφής οι ορισμοί των αντίστοιχων ατμοσφαιρικών παραμέτρων. Ως Θερμοκρασία ατμόσφαιρας ονομάζεται η [θερμοκρασία](#) την οποία έχει ο [ατμοσφαιρικός](#) αέρας πάνω από μια περιοχή. Η πρόγνωση του [καιρού](#) σε μια περιοχή βασίζεται κυρίως στη γνώση της εκάστοτε [ατμοσφαιρικής πίεσης](#) και της θερμοκρασίας της ατμόσφαι-

ρας της υπό μελέτη περιοχής και των γειτονικών της εκτάσεων. Η ελάχιστη Θερμοκρασία λαμβάνεται μισή ώρα μετά από την ανατολή του ήλιου και η μέγιστη δυο ώρες αφού ο ήλιος περάσει το μεσημβρινό επίπεδο του τόπου παρατήρησης.

Ως ατμοσφαιρική πίεση ή αλλιώς και «Βαρομετρική πίεση» ονομάζεται η [πίεση](#) που ασκεί η [ατμόσφαιρα](#), με το βάρος της, στην επιφάνεια της [Γης](#). Στην επιφάνεια της Γης η ατμοσφαιρική πίεση ισούται, κατά μέσον όρο με το βάρος στήλης ύδατος ύψους 11 (m) περίπου, ή με το βάρος στήλης [υδραργύρου](#) ύψους 760 (mm). Στη ατμοσφαιρική πίεση η βαρομετρική τάση ονομάζεται η τιμή της μεταβολής της ατμοσφαιρικής πίεσης εντός τριών ωρών προ εκάστης καθορισμένης ώρας παρατήρησης. Η κατανομή των βαρομετρικών πιέσεων και οι βαρομετρικές τάσεις αποτελούν σπουδαιότατα στοιχεία στις μεταβολές του [καιρού](#).

Ως υγρασία ονομάζεται το ποσό των υδρατμών-δηλαδή, το νερό που βρίσκεται σε αέρια κατάσταση-, που υπάρχει στην ατμόσφαιρα. Όταν η θερμοκρασία μιας αέρι-ας μάζας πέσει κάτω από το σημείο δρόσου, τότε οι υδρατμοί που περιέχονται σε αυτήν συμπυκνώνονται. Ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες, όσοι υδρατμοί περάσουν από την αέρια φάση στην υγρή, θα μετασχηματιστούν σε σταγονίδια - υδροσταγόνες- και όσοι περάσουν στην στερεά κατάσταση, θα μετασχηματιστούν σε παγοκρυστάλλους. Στις επιδράσεις των σημάτων GNSS η παράμετρος που χρησιμοποιείται είναι η σχετική υγρασία. Σχετική Υγρασία είναι η μάζα των υδρατμών που υπάρχει στη μονάδα όγκου του αέρα προς την μάζα του κορεσμένου αέρα και εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό.

Βροχή-ύψος βροχής: Είναι το [υερό](#) που πέφτει από την [ατμόσφαιρα](#), όταν διαλύεται ένα [σύννεφο](#). Σε όλη την ατμόσφαιρα υπάρχουν πάντα πολλοί υδρατμοί, που, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, άλλοτε απορροφούνται - αποξηραίνονται (όταν η ατμόσφαιρα είναι πολύ ζεστή, όπως το καλοκαίρι) κι άλλοτε μετατρέπονται σε σύννεφα και πολλές φορές σε βροχή. Ένα σύννεφο αποτελείται από πλήθος μικρές σταγόνες νερού που, όταν ο καιρός είναι ψυχρός κι αυτές γίνουν περισσότερες, τότε αρχίζουν να πέφτουν, σιγά - σιγά, προς τα κάτω. Κατά την πτώση τους μπορεί να απορροφηθούν στα κατώτερα στρώματα (τα πιο ζεστά) της ατμόσφαιρας, μπορεί όμως και να γίνουν μεγαλύτερες (όταν ενώνονται με άλλα σταγονίδια) και τότε φτάνουν μέχρι τη γη με τη μορφή της βροχής. Η συχνότητα της βροχής εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και το κλίμα που επικρατεί σε μια περιοχή. Το ύψος της βροχής μετριέται από ειδικά όργανα που ονομάζονται "βροχόμετρα". Το βροχόμετρο αποτελεί ένα από τα επίγεια [μετεωρολογικά όργανα](#) (που υπάρχουν στους μετεωρολογικούς σταθμούς) για την μέτρηση του [ύψους της βροχής](#).

2. Οι επιδράσεις της τροπόσφαιρας στα σήματα GNSS

Τα τμήματα της ατμόσφαιρας τα οποία επηρεάζουν ουσιαστικά και κατά διαφορετικό τρόπο τη διαδρομή του δορυφορικού (ηλεκτρομαγνητικού) σήματος, με απο-

τέλεσμα χρονικές καθυστερήσεις λόγω της μείωσης της ταχύτητας διάδοσης και της καμπυλότητας της τροχιάς από την αλλαγή της κατεύθυνσης σε σχέση με την ευθύγραμμη διαδρομή στο κενό με ταχύτητα ($c = 299792458.0$ m/s), είναι η τροπόσφαιρα ($H < 50$ km) και η ιονόσφαιρα ($50 < H < 1000$ km). Η τροποσφαιρική καθυστέρηση εξαρτάται από τη **θερμοκρασία**, την **πίεση** και την **υγρασία** ή όπως λέγεται από τον ξηρό παράγοντα (επίδραση της τάξης του 90% και εύκολα μοντελοποιήσιμο) και από τον υγρό παράγοντα (επίδραση της τάξης του 10% και δύσκολα μοντελοποιήσιμο). Είναι επίσης συνάρτηση της απόστασης που διανύει το σήμα στην τροπόσφαιρα, της ζενίθιας γωνίας του δορυφόρου (αυξάνει από το ζενίθ προς τον ορίζοντα ή όσο μεγαλώνει η ζενίθια γωνία) και του υψομέτρου του δέκτη (μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου του δέκτη). Πιο συγκεκριμένα, η πορεία που ακολουθεί ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα που εκπέμπεται από δορυφόρους GNSS, όπως αυτοί του συστήματος GPS, κατά την διέλευση του μέσα από την τροπόσφαιρα υφίσταται διάθλαση με αποτέλεσμα την εκτροπή από την ευθύγραμμη πορεία του και την καθυστέρησή του η οποία υπολογίζεται ως:

$$\Delta L = \int_s n ds - G \quad (1)$$

ή προσθαφαιρώντας το μήκος της καμπύλης διαδρομής S

$$\Delta L = \int_s [n - 1] ds + [S - G] \quad (2)$$

όπου n ο δείκτης διάθλασης κατά μήκος της πραγματικής τροχιάς S του ραδιοκύματος, G η ευθεία διαδρομή μέσα στην ατμόσφαιρα.

Για το λόγο ότι ο δείκτης διάθλασης διαφέρει πολύ λίγο από τη μονάδα χρησιμοποιείται αντί αυτού η διαθλαστικότητα N όπου $N = 10^6(n - 1)$. Χρησιμοποιώντας λοιπόν, την διαθλαστικότητα αντί του δείκτη διάθλασης η σχέση (2) γράφεται ως:

$$\Delta L = 10^{-6} \int_s N ds + [S - G] \quad (3)$$

Για τη διαθλαστικότητα της ατμόσφαιρας κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες σχέσεις όπως:

$$N = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{e}{T} \right) Z_w^{-1} + k_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1} \quad (4)$$

όπου k_1 , k_2 και k_3 σταθερές παράμετροι και Z_d^{-1} , Z_w^{-1} είναι οι αντίστροφες παράμετροι συμπίεστικότητας για τον ξηρό και υγρό παράγοντα αντίστοιχα και P_d η μερική πίεση του ξηρού αέρα.

Μία πιο εύχρηστη μορφή για την διαθλαστικότητα αναπτύχθηκε από ομάδα ερευνητών, όπου με βάση τη σχέση (4), συμπεριλαμβάνεται και η πυκνότητα ρ των αερίων

$$N = k_1 R_d \rho + k_2 \left(\frac{e}{T} \right) Z_w^{-1} + k_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1} \quad (5)$$

Με βάση λοιπόν, τη σχέση 5 για την διαθλαστικότητα της ατμόσφαιρας το ολοκλήρωμα για την τροποσφαιρική υστέρηση κατά τη διαδρομή ενός κύματος μέσα από αυτήν καταλήγει στη μορφή:

$$\Delta L = 10^{-6} \int_s N_h ds + 10^{-6} \int_s N_w ds + [S - G] \quad (6)$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το πρώτο ολοκλήρωμα της σχέσης (6) αφορά την εξάρτηση της υστέρησης από την ολική πυκνότητα και όχι από το λόγο «υγρής/ξηρής» ατμόσφαιρας και καλείται υδροστατική υστέρηση και το δεύτερο ολοκλήρωμα εξαρτάται μόνο από την ποσότητα των υδρατμών κατά την πορεία του σήματος και καλείται υγρή υστέρηση, τέλος ο παράγοντας [S-G] εκφράζει το γεωμετρικό σφάλμα το οποίο είναι η διαφορά μεταξύ του γεωμετρικού μήκους της καμπύλης διαδρομής S και της ευθείας G. Ενσωματώνοντας το γεωμετρικό σφάλμα στην υδροστατική υστέρηση η σχέση (6) συνοπτικά γράφεται ως:

$$\Delta L = \Delta L_h + \Delta L_w \quad (7)$$

Με τη χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων, όπως π.χ. τα μοντέλα, Saastamoinen, Hopfield, και με παραμέτρους τη θερμοκρασία, πίεση και υγρασία, υπολογίζεται περίπου το 90% του τροποσφαιρικού σφάλματος. Το υπόλοιπο 10% οφείλεται κυρίως στον υγρό παράγοντα.

Υπάρχουν δύο μέθοδοι μαθηματικής περιγραφής του τροποσφαιρικού σφάλματος:

- Χρησιμοποιώντας μόνο μετεωρολογικές μετρήσεις εδάφους (πίεση, θερμοκρασία, υγρασία) ή μετρήσεις ραδιομέτρων για τη μέτρηση της υγρασίας με υψηλή ακρίβεια. Με τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι δυνατή η δημιουργία τοπικών μοντέλων χωρίς τη χρήση παρατηρήσεων GPS.
- Με τη χρήση μετρήσεων GPS και προσδιορισμό τροποσφαιρικών παραμέτρων (μοντέλα τροπόσφαιρας) κατά τη διαδικασία της συνόρθωσης των παρατηρήσεων GPS.

2.1 Συναρτήσεις απεικόνισης για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής επίδρασης στα σήματα GNSS.

Η τροποσφαιρική επίδραση ενός σήματος υπολογίζεται από τα διάφορα (προτεινόμενα) μοντέλα αρχικά ως ίση με αυτή που προέρχεται από δορυφόρους εκπομπής που βρίσκονται στο ζενίθ του σημείου παρατήρησης και στη συνέχεια ανάγεται στην αντίστοιχη ζενίθια γωνία. Για διευθύνσεις όχι πολύ μεγαλύτερες από το ζενίθ η επίδραση/καθυστέρηση συνήθως υπολογίζεται ως το γινόμενο της ζενίθιας καθυστέρησης με το αντίστροφο του ημίτονου της γωνίας ύψους του δορυφόρου δηλαδή,

$$\Delta L = \frac{1}{\sin(\nu)} \Delta L^z \quad (8)$$

Η σχέση αυτή συνήθως καταλήγει σε αυξανόμενο σφάλμα όσο μειώνεται η γωνία ύψους του δορυφόρου. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί και έναν από τους κύριους λόγους για το ότι οι μετρήσεις GPS πραγματοποιούνται με γωνία αποκοπής των δορυφορικών σημάτων ίση με 15^0 .

Με την πάροδο των χρόνων προτάθηκαν από πολλούς ερευνητές διάφορες σχέσεις διαχωρίζοντας τον υγρό από ξηρό παράγοντα και επιτυγχάνοντας τον υπολογισμό της καθυστέρησης για γωνίες ύψους των δορυφόρων μέχρι και 2^0 . Για αυτό και αρκετοί ερευνητές αναφέρουν το διαχωρισμό της τροπόσφαιρας σε υγρό και υδροστατικό παράγοντα. Μία επίσης γνωστή συνάρτηση απεικόνισης είναι αυτή που προτάθηκε από τον ερευνητή A. Niell το 1996, η οποία αποτελεί μια βελτιωμένη παραλλαγή της συνάρτησης του Herring προσθέτοντας έναν διορθωτικό όρο για το υψόμετρο. Η συγκεκριμένη συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Η σχέση θεωρεί ότι η εξάρτηση του υψομέτρου συνδέεται άμεσα με το γεωγραφικό πλάτος και ύψος (από τη στάθμη της θάλασσας) του σημείου παρατήρησης καθώς και με την ημέρα του έτους, καταλήγοντας στην μορφή:

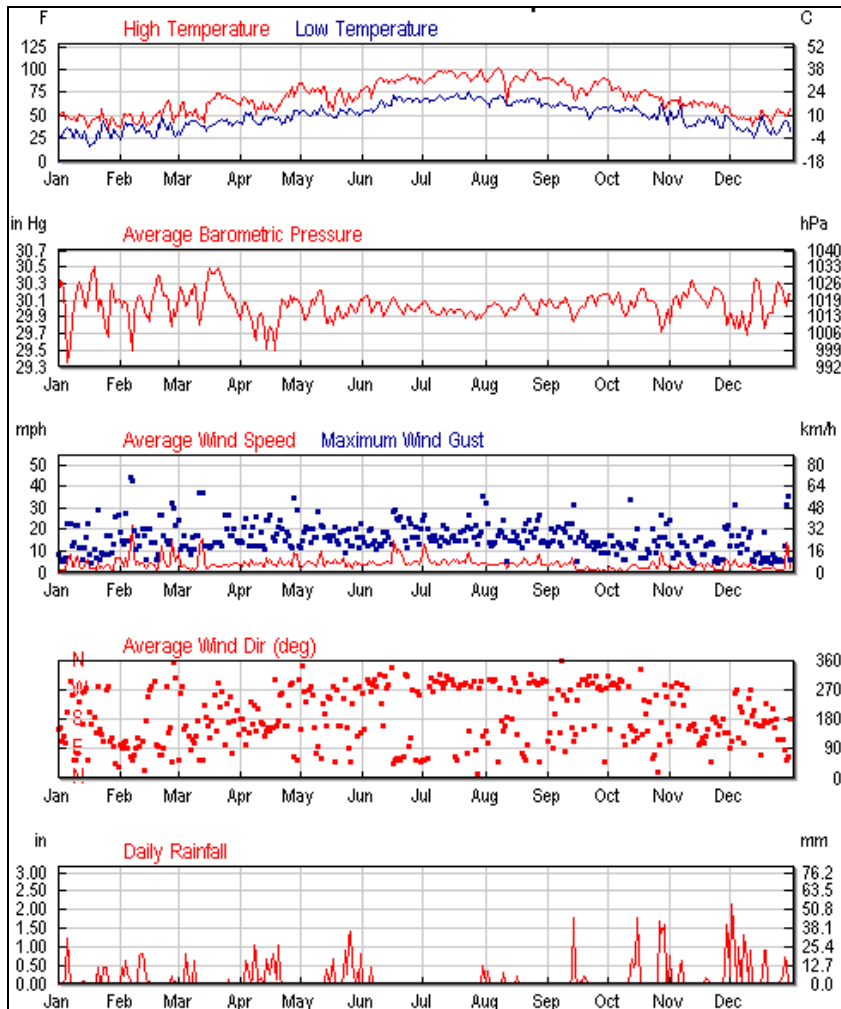
$$m(\nu) = \frac{1 + \frac{a_h}{1 + \frac{b_h}{1 + c_h}}}{\sin(\nu) + \frac{a_h}{\sin(\nu) + \frac{b_h}{\sin(\nu) + c_h}}} + \Delta m(\nu) \quad (9)$$

όπου, $a_h(\phi_i, t) = a_{avg}(\phi_i) - a_{amp}(\phi_i) \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right)$. Με a_{avg} και a_{amp} να δίνονται από πίνακες για γεωγραφικά πλάτη $\phi_i = 15^0, 30^0, 45^0, 60^0$ και 75^0 , t η ημέρα του έτους (DOY-Day of year) και T_0 είναι τιμή ίση με 28 για το Βόρειο και 211 για το Νότιο ημισφαίριο,

$$\Delta m(\nu) = \left(\frac{1}{\sin(\nu)} - \frac{1 + \frac{a_H}{1 + \frac{b_H}{1 + c_H}}}{\sin(\nu) + \frac{a_H}{\sin(\nu) + \frac{b_H}{\sin(\nu) + c_H}}} \right) x H$$

όπου H το ορθομετρικό υψόμετρο σε Km και $a_H = 2.53 \times 10^{-5}$, $b_H = 5.49 \times 10^{-3}$, $c_H = 1.14 \times 10^{-3}$.

Ενδεικτικά, στα ακόλουθα διαγράμματα απεικονίζεται η ετήσια συνολική εικόνα των βασικών ατμοσφαιρικών παραμέτρων για την πόλη των Ιωαννίνων.

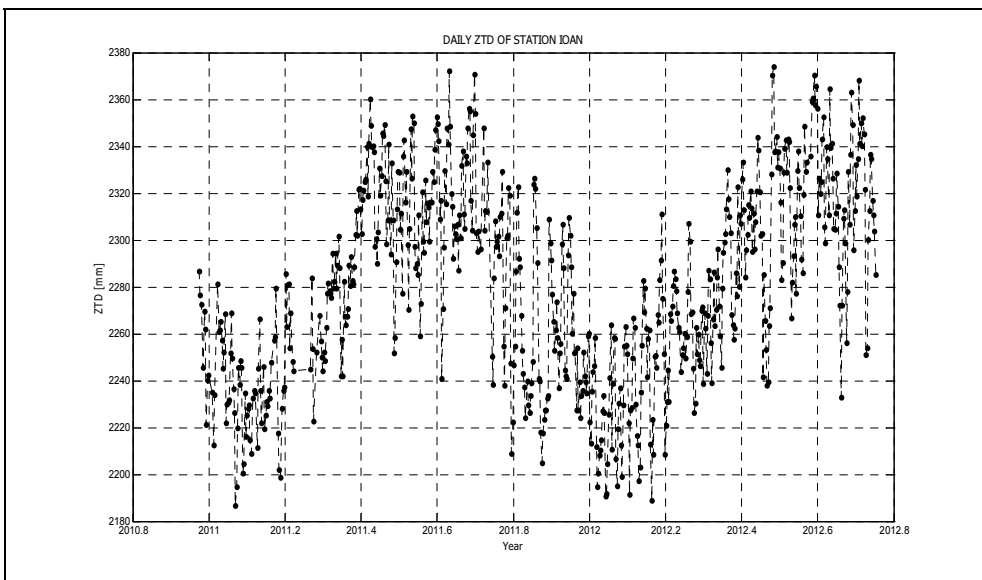


Μέσες ημερήσιες τιμές θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου όπως και ύψους βροχής έτσι όπως παρέχονται από τον διαδικτυακό ιστότοπο *Weather Underground* για το σταθμό των Ιωαννίνων κατά το έτος 2012.

3. Επεξεργασία παρατηρήσεων GNSS. Εκτίμηση ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης

Η εκτίμηση της τροποσφαιρικής υστέρησης που μελετάται προέρχεται από εκτιμήσεις χρονικού διαστήματος δέκα εννέα μηνών, από τον Ιούνιο 2011 μέχρι και το Δεκέμβριο 2012 και με χρονικό βήμα ανά μία ώρα. Δηλαδή, προέκυψαν εικοσιτέσσερις τιμές της τροποσφαιρικής υστέρησης για κάθε μία ημέρα και συνολικά 13800 για όλο το χρονικό διάστημα της μελέτης. Αξίζει να αναφερθεί ότι η ακρίβεια προσδιορισμού της υστέρησης είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών.

Το πρώτο στάδιο της όλης επεξεργασίας ξεκινά με την εκτίμηση της ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης με βήμα μίας ώρας για το σταθμό GNSS IOAN που βρίσκεται στο κέντρο της πόλης. Πολύ κοντά στον οποίο βρίσκεται ο μετεωρολογικός σταθμός (Wunderground). Για τον προσδιορισμό της απόλυτης τιμής της Τροποσφαιρικής υστέρησης χρησιμοποιήθηκαν και τέσσερις σταθμοί του δικτύου της IGNS (πρώην IGS βλ: <http://igsb.jpl.nasa.gov/>) εγκατεστημένοι στις χώρες Ιταλία Αυστρία και Κύπρος. Όλοι οι χρησιμοποιημένοι δέκτες καταγράφουν μετρήσεις στις δύο φέρουσες συχνότητες και από τα δύο συστήματα (GPS+GLONASS) και με ρυθμό ίσο με 30 sec. Στόχος της συγκεκριμένης επιλογής ύστερα και από εκτεταμένη βιβλιογραφική αναζήτηση, αποτέλεσε η εκτίμηση απόλυτων τιμών για την ζενίθια τροποσφαιρική υστέρηση (ZTD) η οποία είναι δυνατόν να προκύψει όταν το (μέσο) μήκος των βάσεων μεταξύ των σταθμών είναι μεγαλύτερο των 500 Km. Οι μεγάλες βάσεις μειώνουν δραματικά τη συσχέτιση των τροποσφαιρικών παραμέτρων που υπάρχει στις αντίστοιχα μικρές μήκους. Κατά συνέπεια και στην περίπτωση του υπό επεξεργασία δικτύου σχεδόν όλες οι βάσεις είναι μεγαλύτερες των 500 Km. Η επεξεργασία των μετρήσεων (επίλυση βάσεων, συνόρθωση δικτύου και ποιοτικοί έλεγχοι) πραγματοποιήθηκε με το ερευνητικού χαρακτήρα λογισμικό Bernese v5.2 του Αστρονομικού Ινστιτούτου του Πανεπιστημίου της Βέρνης που θεωρείται ένα από τα καλύτερα (ανάμεσα σε δύο – τρία) λογισμικά σε διεθνές επίπεδο. Οι παράμετροι επεξεργασίας ορίστηκαν στη χρήση εφημερίδων ακριβείας, με γωνία αποκοπής των δορυφορικών σημάτων ίση με 10^0 και χρήση του μοντέλου απόλυτης βαθμονόμησης των κεραιών (IGS_08.atx) που διατίθεται από την υπη-



Σχήμα 1. Εκτίμηση ημερήσιας Ζενίθιας Τροποσφαιρικής υστέρησης για τον μόνιμο σταθμό GNSS IOAN.

ρεσία IGS. Για την επίλυση των αρχικών ασαφειών φάσης χρησιμοποιήθηκε η στρατηγική QIF, ενώ για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής υστέρησης χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Saastamoinen σε συνδυασμό με τη συνάρτηση απεικόνισης του Niell (που αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα). Το ποσοστό επίλυσης των ασαφειών φάσης σε όλες τις περιπτώσεις ήταν μεγαλύτερο του 98%. Στο τελικό στάδιο της επίλυσης εξήχθησαν οι εκτιμήσεις της ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης και με τυπικές αποκλίσεις που δεν ξεπερνούσαν τα 3-4 mm. Στο σχήμα 1 απεικονίζονται οι μέσες ημερήσιες τιμές εκτίμησης της ζενίθιας υστέρησης (σε mm) για το μόνιμο σταθμό IOAN.

4. Η χρήση των μοντέλων παλινδρόμησης στην μελέτη των κλιματικών παραμέτρων

Οι κλιματικές αλλαγές λόγω του σταθερά αυξανόμενου προβλήματος του θερμοκηπίου, ποσοτικοποιούνται σήμερα με τη χρήση διαφόρων μαθηματικών μοντέλων που ποικίλουν από άποψη πολυπλοκότητας. Η ποικιλία αυτή που υπάρχει στα διάφορα μοντέλα, οφείλεται κυρίως στις εκάστοτε υποθέσεις, παραδοχές και απλοποιήσεις που γίνονται κάθε φορά στην προσπάθεια να μελετηθεί μια παράμετρος από το ευρύ φάσμα των κλιματικών αλλαγών. Εξάλλου η τεράστια πολυπλοκότητα του κλιματικού συστήματος καθιστά σχεδόν ανέφικτη την ακριβή προσομοίωσή του χωρίς την υιοθέτηση κάποιων απλών παραδοχών. Στη παρούσα εργασία για την σύνδεση των εκτιμήσεων της τροποσφαιρικής υστέρησης που εξάγεται από την επεξεργασία δεδομένων GNSS, με τις (επίγειες) μετεωρολογικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε (ως αρχή) η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης. Το πρόβλημα παλινδρόμησης βασίζεται στην προσπάθεια πρόβλεψης της συμπεριφοράς μιας μεταβλητής (εξαρτημένης), βασισμένη σε μια άλλη (ανεξάρτητη). Όταν αυτή η πρόβλεψη γίνεται σε δύο μόνο τυχαίες μεταβλητές τότε αναφερόμαστε στην απλή παλινδρόμηση, ενώ όταν η πρόβλεψη για την εξαρτημένη μεταβλητή βασίζεται σε περισσότερες από μία μεταβλητές τότε θα ονομάζεται πολλαπλή παλινδρόμηση.

Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε ο προσδιορισμός των παραμέτρων της γραμμικής εξίσωσης που προσαρμόζεται βέλτιστα στις εκτιμήσεις της ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τις αντίστοιχες μετρήσεις θερμοκρασίας, πίεσης, σχετικής υγρασίας αλλά και του ύψους βροχής (κατά περίπτωση). Ο προσδιορισμός πραγματοποιήθηκε για το σταθμό IOAN και για όλο το χρονικό διάστημα μελέτης (Ιούνιος 2011 έως Δεκέμβριος 2012).

4.1 Η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων

Για την εφαρμογή της μεθόδου προσδιορισμού των βέλτιστων παραμέτρων της εξίσωσης επιλέχθηκε η μέθοδος των εξισώσεων παρατήρησης με τη χρήση ελαχί-

στων τετραγώνων. Αναφέροντας συνοπτικά τη μέθοδο προσδιορισμού θα έχουμε ότι:

Οι σχετικές εξισώσεις που αποτελούν και το μαθηματικό μοντέλο των εξισώσεων παρατηρήσεων θα είναι,

$$y_1^a = f(x_1^a, x_2^a, \dots, x_m^a), \dots, y_n^a = f(x_1^a, x_2^a, \dots, x_m^a)$$

όπου X_m οι άγνωστες παράμετροι.

Ξεκινώντας από το μοντέλο $\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{v}$, όπου \mathbf{b} ο πίνακας των ανηγμένων παρατηρήσεων,

\mathbf{A} ο πίνακας σχεδιασμού με στοιχεία αριθμούς όπως προκύπτουν από

$$\frac{\partial y^a}{\partial x^a} = (x^0),$$

\mathbf{X} ο πίνακας των διορθώσεων των προσεγγιστικών τιμών των αγνώστων παραμέτρων,

\mathbf{v} ο πίνακας των εκτιμήσεων των σφαλμάτων (residuals).

Σύμφωνα με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, επιλέγεται σαν λύση των εξισώσεων παρατηρήσεων $\hat{\mathbf{x}}$, $\hat{\mathbf{v}}$, εκείνη που ικανοποιεί το κριτήριο (έχει την ελάχιστη μεταβλητότητα)

$\varphi = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \text{minimum}$, με \mathbf{P} τον πίνακα βάρους. Η ελαχιστοποιούμενη ποσότητα φ

είναι συνάρτηση των σφαλμάτων \mathbf{v} τα οποία με τη σειρά τους είναι συνάρτηση των αγνώστων \mathbf{x} , λόγω του ότι $\mathbf{v} = \mathbf{b} - \mathbf{A}\mathbf{x}$. Η λύση προέρχεται μέσα από τις κανονικές εξισώσεις όπου ισχύει

$$\text{ότι (σε μορφή πινάκων), } \mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad \mathbf{u} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b} \quad \text{και τελικά } \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{b}.$$

Η περίπτωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης ξεκινά με το μοντέλο:

$$y_i = \alpha + \beta x_i + v_i.$$

Οι αντίστοιχοι πίνακες \mathbf{A} , $\hat{\mathbf{x}}$, \mathbf{b} θα ισούται με:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}.$$

Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο της συνόρθωσης σχηματίζονται οι κανονικές εξισώσεις και θα έχουμε ότι:

$$\sum_{i=1}^n y_i = n \cdot \alpha + \beta \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = \alpha \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) + \beta \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)$$

Για την αποφυγή κυρίως αριθμητικών λαθών κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου (πχ. λάθη στρογγύλευσης) χρησιμοποιείται η τεχνική της αναγωγής στο μέσο όρο. Εισάγεται δηλαδή η παράμετρος

$$x \rightarrow \tilde{x} := x - \bar{x} \quad \text{όπου} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

επομένως γράφοντας ως,

$$\tilde{\alpha} = \alpha + \beta \bar{x}$$

τότε έχουμε ότι

$$y_i = \tilde{\alpha} + \tilde{\beta} x_i \quad \text{όπου} \quad \sum_{i=1}^n \tilde{x}_i = \left(\sum_{i=1}^n x_i - n\bar{x} \right) = \sum_{i=1}^n x_i - n\bar{x} = n\bar{x} - n\bar{x} = 0$$

Κατά συνέπεια οι εκτιμήσιμες παράμετροι θα δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις,

$$\hat{\tilde{\alpha}} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \text{και} \quad \hat{\tilde{\beta}} = \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i y_i}{\sum_{i=1}^n \tilde{x}_i^2}$$

και η τελική εκτίμηση των παραμέτρων της ευθείας θα δίνεται από τις σχέσεις,

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{και} \quad \hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x}.$$

Στην περίπτωση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, ο πίνακας σχεδιασμού **A** θα περιέχει και τις αντίστοιχες στήλες για τις επιπλέον ανεξάρτητες μεταβλητές καταλήγοντας στη εξίσωση:

$$y_i = \alpha + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_n x_{in} + v_i.$$

Για τον προσδιορισμό της τελικής σχέσης μεταξύ των μεταβλητών της ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης (ZTD) χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τις μετρήσεις θερμοκρασίας, πίεσης, σχετικής υγρασίας αλλά και του ύψους βροχής χρησιμοποιήθηκε η πολλαπλή παλινδρόμηση κατά βήματα (Stepwise regression) όπου γίνεται εισαγωγή και εξαγωγή κάθε μεταβλητής με σειρά που καθορίζεται από μαθηματικά κριτήρια. Η τελική μορφή της εξίσωσης που προέκυψε δίνεται στη συνέχεια:

$$ZTD = 2.163 + 0.005 * T_{emp} + 0.001 * RH_{umidity}$$

Από την παραπάνω σχέση, προκύπτει ότι οι πιο σημαντικοί παράμετροι-μεταβλητές είναι η θερμοκρασία (T) και η σχετική υγρασία (RH). Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα (τελικά) αποτελέσματα όπως προέκυψαν και από τη χρήση του στατιστικού λογισμικού SPSS v.20 δίνοντας και κάποια βασικά σχόλια στα αποτελέσματα.

Model Summary

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics	
					R Square Change	F Change
1	.786 ^b	.618	.617	.02618	.067	98.992

Από τα στοιχεία του πίνακα (**Model Summary**) φαίνεται ο συντελεστής συσχέτισης R (0.786 = Pearson value) που δείχνει πόσο ισχυρή είναι η συσχέτιση της εξαρτημένης μεταβλητής με τις (τελικά) ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως και ο συντελεστής 'R Square' ο οποίος αναφέρει ότι το μοντέλο εξηγεί το 61.8% της μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής.

Στο πίνακα (**ANOVA**) που ακολουθεί γίνεται ο έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης H_0 έναντι της εναλλακτικής H_1 , δηλαδή ελέγχουμε εάν το τρέχον μοντέλο διαφέρει από το 'σταθερό' μοντέλο $y_i = \alpha_0 + v_i$.

ANOVA

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.622	2	.311	453.781	.000 ^c
	Residual	.384	561	.001		
	Total	1.006	563			

Από τον δείκτη F- test (Sig. < 0,001) ο οποίος προέκυψε από κλάσμα $F = \frac{MS_{Regression}}{0.384/561} = 453.781$ συμπεραίνουμε ότι το μοντέλο συνεισφέρει σημα-

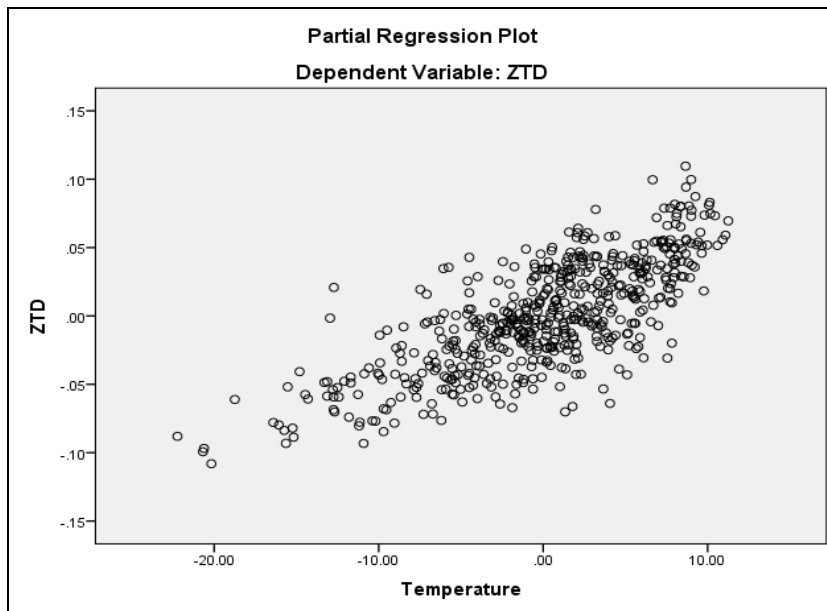
ντικά στην πρόβλεψη της τιμής της ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης, επομένως γίνεται αποδεκτή η μηδενική υπόθεση H_0 . Διευκρινίζεται ότι η ποσότητα Mean Square Residual ισούται με 0.384/561 όπου 561 οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος (= αριθμός δεδομένων - αριθμό συντελεστών παλινδρόμησης) και για λόγους στρογγύλευσης εμφανίζεται η τιμή 0.001.

Τέλος στον πίνακα (**Correlations**) που ακολουθεί δίνονται οι τιμές συσχέτισης (τιμές δείκτη Pearson) μεταξύ όλων των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εφαρμογή (σταθμός GNSS IOAN).

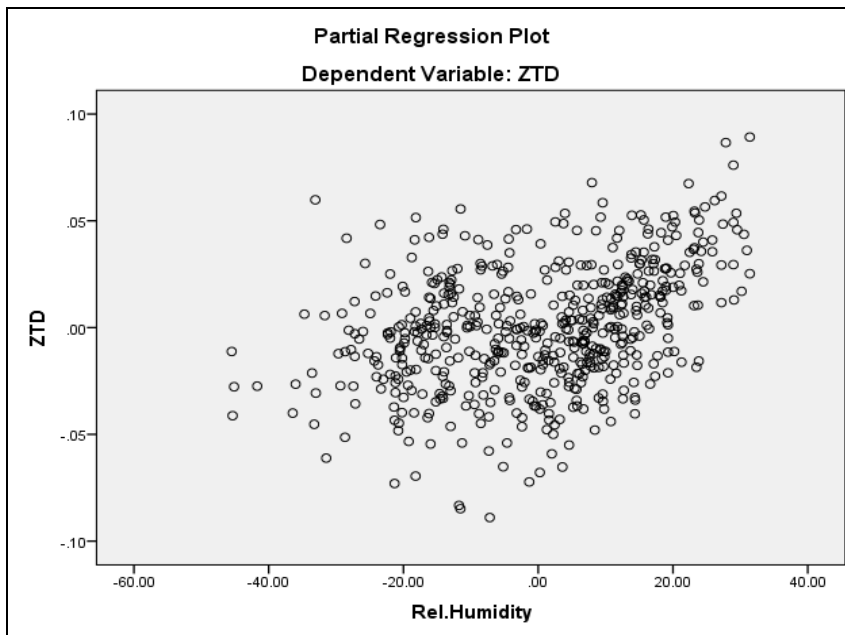
Correlations

		ZTD	Temperature	Rel. Humidity	Pressure	Precipitation
Pearson Correlation	ZTD	1.000	.742	-.336	-.119	-.007
	Temperature	.742	1.000	-.702	-.250	-.204
	Rel.Humidity	-.336	-.702	1.000	.252	.426
	Pressure	-.119	-.250	.252	1.000	-.146
	Precipitation	-.007	-.204	.426	-.146	1.000

Από τις σχετικές φαίνεται η θετική συσχέτιση ($R=0.742$) της τροποσφαιρικής υστέρησης με την θερμοκρασία αλλά και η αρνητική συσχέτιση ($R=-0.336$) που προέκυψε με την σχετική υγρασία. Τέλος μη σημαντικές τιμές έδωσαν στην συγκεκριμένη περίπτωση τόσο η ατμοσφαιρική πίεση (pressure) όσο και το ύψος βροχής (precipitation). Στα σχήματα 2 και 3 απεικονίζεται (μέσα από τη διαδικασία παλινδρόμησης) η ζενίθια τροποσφαιρική υστέρηση συναρτήσει των τιμών θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αντίστοιχα.



Σχήμα 2. Τιμές Ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης συναρτήσει τιμών θερμοκρασίας για το σταθμό GNSS IOAN.



Σχήμα 3. Τιμές Ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης συναρτήσει τιμών σχετικής υγρασίας για το σταθμό GNSS IOAN.

Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τις δυνατότητες αξιοποίησης των παρατηρήσεων GNSS και συγκεκριμένα την εκτίμηση της τροποσφαιρικής υστέρησης που εισέρχεται στο εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό σήμα για χρήση σε μετεωρολογικές-κλιματικές μελέτες.

Στην περίπτωση της πόλης των Ιωαννίνων, με τη βοήθεια της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης, προέκυψε ότι οι εκτιμήσεις της ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης (για ένα διάστημα δεκαοκτώ μηνών) είναι συσχετισμένες με τις τιμές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας. Η μακροχρόνια παρακολούθηση της συσχέτισης μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην φυσική περιγραφή του κλίματος και των αλλαγών του που συμβαίνουν στην περιοχή μελέτης.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η χρήση παρατηρήσεων GNSS για τον υπολογισμό τροποσφαιρικών προϊόντων (περιεκτικότητα υδρατμών στην τροπόσφαιρα, εκτιμήσεις της υγρής συνιστώσας της ζενίθιας τροποσφαιρικής υστέρησης κ.α.) αποτελεί πλέον μια αναγνωρισμένη μέθοδο από την ερευνητική κοινότητα. Ήδη από το 2005 έχει ξεκινήσει μια πανευρωπαϊκή προσπάθεια για την παραγωγή αυτών των προϊόντων, τον έλεγχο τους και τη διάθεση τους για χρήση σε Αριθμητικά Μοντέλα Πρόγνωσης από τη μετεωρολογική κοινότητα. Σήμερα περισσότερα από 10 Κέ-

ντρα Ανάλυσης (Analysis Centers) χρονοσειρών παρατηρήσεων GNSS λειτουργούν στην Ευρώπη τα οποία υπολογίζουν και τροποσφαιρικά προϊόντα για περισσότερους από 1700 μόνιμους σταθμούς GNSS στο πλαίσιο του προγράμματος E-GVAP (<http://egvap.dmi.dk/>). Η παραγωγή και χρήση τέτοιων τροποσφαιρικών προϊόντων είναι διαδεδομένη στη Βορειοδυτική Ευρώπη, όχι όμως στον ίδιο βαθμό και στην Νοτιοανατολική. Δίκτυα μόνιμων σταθμών GNSS είναι πλέον εγκατεστημένα και λειτουργούν στη χώρα μας την τελευταία δεκαετία.

Για το λόγο αυτό σύντομα μέσω της δράσης του προγράμματος COST (http://www.cost.eu/domains_actions/essem/Actions/ES1206)

στο οποίο συμμετέχει ερευνητική ομάδα από το TATM/ΑΠΘ, θα λειτουργήσει αντίστοιχο ερευνητικό κέντρο (κτίριο TATM) όπου θα υπολογίζει τα αντίστοιχα τροποσφαιρικά προϊόντα για τον Ελλαδικό χώρο. Η αξιοποίηση των σχετικών προϊόντων, η περαιτέρω ανάλυσή τους και η συνεργασία με επιπλέον επιστημονικούς χώρους θα συμβάλει ακόμη περισσότερο στην ολοένα και αυξανόμενη συνεισφορά των δικτύων μόνιμων σταθμών GNSS στις Γεωεπιστήμες.

Βιβλιογραφία

- Bar-Sever Y.E., P.M. Kroger and J. A. Borjesson. 1998. *Estimating Horizontal Gradients of Tropospheric Path Delay with a single GPS Receiver*. Journal of Geophysical Research, 103, 5019-5035.
- Dach R, Hugentobler U, Fridez P, Meindl M. 2007. *Bernese GPS software version 5.0*. Astronomical Institute, University of Bern.
- Δερμάνης Α., Φωτίου Α., 1992. *Συνορθώσεις Παρατηρήσεων και Θεωρία Εκτίμησης*. 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Duan J., Bevis, M., Fang, P., Bock, Y., Chiswell, ST., Businger ST., 1996. *GPS Meteorology: Direct Estimation of the Absolute Value of Precipitable Water*. Journal of Applied Meteorology 35, 830-838.
- Emanuel K.A., Z'ivkovic'-Rothman M., 1999. *Development and Evaluation of a Convection Scheme for Use in Climate Models*. Journal of Atmospheric Sciences, 56, 1766-1782.
- Houssos EE, Lolis CJ, Gkikas A, Hatzianastassiou N, Bartzokas A., 2012. *On the atmospheric circulation characteristics associated with fog in Ioannina, North-Western Greece*. International Journal of Climatology, 32: 1847-1862.
- Καρλής Δ. 2005. *Πολυμεταβλητή Στατιστική Ανάλυση*, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλη, Αθήνα.
- Katsougiannopoulos S., C. Pikridas, D. Rossikopoulos, I. M. Ifadis, A. Fotiou 2006. *Tropospheric refraction estimation using various models, radiosonde measurements and permanent GPS data*. Proceedings of FIG XXIII Congress and XXIX General Assembly, Munich, Germany, 8-13 October.
- Κατσουγιαννόπουλος Σ., Πικριδάς Χ., 2008. *Προσδιορισμός συνάρτησης απεικόνισης για τον υπολογισμό της τροποσφαιρικής υστέρησης στα σήματα GPS με χρήση δεδομένων*

- ραδιοβόλισης. Εφαρμογή στον Ελλαδικό χώρο. Τεχνικά Χρονικά. Επιστημονική έκδοση ΤΕΕ, τεύχος 1, σελ. 9-20.
- Katsougiannopoulos S., and C. Pikridas 2009. *Prediction of zenith tropospheric delay by multi-layer perceptron*. Journal of Applied Geodesy vol. 3, pp. 223-229.
- Marija J. Norusis., 2005. *Οδηγός Ανάλυσης Δεδομένων με το SPSS 12.0*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα .
- Φλόκας Α., 1999. *Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας*. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ.480. ISBN: 9630-431-288-X.
- Φωτίου Α., Πικριδάς Χ., 2012. *GPS και Γεωδαιτικές Εφαρμογές*, 2^η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ.480. ISBN: 978-960-456-346-3.
- Πικριδάς Χ., 1999. *Η αξιοποίηση της σύγχρονης τεχνολογίας GPS και ο ποιοτικός έλεγχος των Γεωδαιτικών εργασιών*. Διδακτορική διατριβή, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ.
- Pikridas C., S. Katsougiannopoulos, N. Zinas 2014. *A comparative study of zenith tropospheric delay and precipitable water vapor estimates using scientific GPS processing software and web based automated PPP service*. Acta Geodaetica et Geophysica, vol.49, 2, Springer-Verlag. DOI: 10.1007/s40328-014-0047-7.
- Pikridas C., S. Katsougiannopoulos, S. Bitharis, M. Chatzinikos, N. Zinas, A. Kouroudi, I. Argyris 2014. *The contribution of permanent GPS station PW data on heavy local rainfall events in the Greek area*. Poster Presentation at General Assembly of EGU (European Geosciences Union), Vienna, Austria, 27 April – 2 May.
- Pikridas C., 2014. *Monitoring climate changes on small scale networks using ground based GPS and meteorological data*. Journal of Planetary Geodesy-Artificial Satellites, vol. 49, No.3. Walter De Gruyter.
- Sen A. and Srivastava M., 1990. *Regression Analysis. Theory Methods and Applications*. Springer-Verlag, N.Y.
- Schuler T., 2001. *On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation*, PhD thesis, Institute of Geodesy and Navigation University FAF Munich Germany.