

Υποστήριξη του δικτύου μόνιμων σταθμών GNSS
του Ελληνικού Κτηματολογίου
Επεξεργασία δεδομένων - Ανάλυση χρονοσειρών θέσης

Μαρία Τσακίρη, Ζάνθος Παπανικολάου, Δημήτριος Αναστασίου

Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου

Σχολή Αγρονόμων και Τροπογράφων Μηχανικών - Μηχανικών Γεωπληροφορικής
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο



<http://dionysos.survey.ntua.gr/>

danastasiou@mail.ntua.gr



Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων



Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων

Η καθημερινή επεξεργασία (παρακολούθηση) μόνιμων δικτύων γίνεται για μία σειρά από λόγους, όπως:

- Εφαρμογές που σχετίζονται με το "διάστημα" (π.χ. προσδιορισμός τροχιών).
- Εφαρμογές που σχετίζονται με την τεχνική ή/και το μέσο διάδοσης (π.χ. ατμοσφαιρικές μελέτες).
- Εφαρμογές που σχετίζονται με το επίγειο τμήμα, π.χ.
 - Ποιοτική μελέτη δικτύου/σταθμών
 - Εκτίμηση συν/νων
 - Προσδιορισμός κίνησης του στερεού φλοιού στην περιοχή (σύνθετη κίνηση που επηρεάζει τη διαχρονική εκτίμηση συν/νων)



Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων

Καθημερινή επεξεργασία μόνιμων δικτύων εκτελείται σε ένα μεγάλο αριθμό ινστιτούτων/φορέων ανά τον κόσμο, για διάφορες εφαρμογές και με διαφορετικές απαιτήσεις ακρίβειας.

Το ΚΔΔ έχει εδώ και χρόνια αναπτύξει την υποδομή για τέτοιου είδους επεξεργασία, ακολουθώντας και υιοθετώντας αυστήρά κριτήρια ποιότητας και ακρίβειας. Η συντήρηση μιας τέτοιας υποδομής, απαιτεί συνεχή έλεγχο και αναβάθμιση (μοντέλα, πρότυπα, κτλ).

Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων και της ποιότητας των επιλύσεων, ελέγχεται μέσω της συμμετοχής του ΚΔΔ στην EUREF (ενεργή συμβολή στο EUREF Densification).

Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων

Απαιτήσεις Επιλύσεων Ακριβείας

Για την επεξεργασία του μόνιμου δικτύου HEPOS, το ΚΔΔ ακολουθεί την ακριβέστερη διαδικασία ανάλυσης· αυτή απαιτεί:

- τη χρήση των λεγόμενων “final” προϊόντων,
- τη χρήση τεράστιου όγκου πληροφορίας,
- τη δημιουργία “βάσεων” και διαφορών (κυρίως διπλών διαφορών),
- την επίλυση των ακέραιων ασαφειών φάσης, για κάθε σύστημα,
- την εκτίμηση μιας σειράς παραμέτρων (π.χ. ατμοσφαιρικές παράμετροι),
- τη χρήση σύγχρονων, “δυναμικών” συστημάτων αναφοράς (ITRF/IGb)

Σημαντικότερο εξαγώμενο: συν/νες θέσης (για κάθε ημέρα παρατήρησης) και μέτρα ακριβειας/ποιότητας.

Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων

Περιπλοκότητα

Ο τεράστιος όγκος δεδομένων/μετα-δεδομένων/προϊόντων/εξαγώμενων για κάθε ημέρα επεξεργασίας, απαιτεί περίπλοκους μηχανισμούς διαχείρισης. Π.χ. για κάθε ημέρα παρατήρησης, θα πρέπει να απαντηθούν τα παρακάτω:

- διαθεσιμότητα μιας σειράς προϊόντων· ανάκτηση, αρχειοθέτηση, προεπεξεργασία, ...
- διαθεσιμότητα δεδομένων και μετα-δεδομένων δικτύου· π.χ. τύπος οργάνων, αλλαγές οργάνων, ...
- a-priori συν/νες σε ένα δυναμικό σύστημα επιλογής
- μέτρα ακρίβειας/ποιότητας επεξεργασίας (συνολικά και για κάθε βήμα)· αποδοχή ή απόρριψη εκτιμήσεων, επανάληψη, ...
- διαχείρηση αρχείων εξόδου, αρχειοθέτηση, ...

Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων

Αυτοματοποίηση

Για να εκτελεί μία πλατφόρμα επεξεργασίας όλα τα παραπάνω αποδοτικά και με συνέπεια/συνέχεια, απαιτείται αυτοματοποίηση.

Η πλατφόρμα που ανέπτυξε το ΚΔΔ, βασίζεται στα παρακάτω κύρια στοιχεία:

- βάση δεδομένων (σταθμοί, μετα-δεδομένα, αποθετήρια/πρωτόκολα επικοινωνίας, καταγραφή αρχείων εξόδου, ...)
- βιλβιοθήκη λογισμικού για την ανάκτηση, προ-επεξεργασία και προετοιμασία, μεταφορά, κτλ αρχείων εισόδου· ενδεικτικά, χρειάζεται αρκετά λεπτά για κάθε ημέρα επεξεργασίας
- βιβλιοθηκη λογισμικού για την “καθοδήγηση” του κυρίως μέρους της ανάλυσης· έλεγχος κάθε βήματος, επανάλληψη βημάτων, θέσπιση κριτηρίων, ...
- αυτόματη διάδραση με τον χρήστη (π.χ. ενημέρωση με ηλ. ταχυδρομείο), αναφορά σφαλμάτων και εκτενή αρχεία “log”.

Προφανώς, όλα τα παραπάνω πρέπει να λειτουργούν “συνεργατικά”.

Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων

Τεχνικά Θέματα Επεξεργασίας (1/2)

Μετά την ανάκτηση, προ-επεξεργασία και καταγραφή της απαραίτητης πληροφορίας, τα δεδομένα αναλύονται με χρήση του λογισμικού Bernese GNSS Software v5.2.

- Συμμετοχή στην επεξεργασία σταθμών IGS (για την υλοποίηση Σ.Α.),
- Συμμετοχή στην επεξεργασία σταθμών EUREF (για πύκνωση και ποιοτικό έλεγχο),
- Δημιουργία βάσεων με κύριο κριτήριο την ελάχιστη απόσταση (σημαντική μείωση μιας σειράς σφλιμάτων/επιδράσεων),
- Επεξεργασία παρατηρήσεων GPS και GLONASS (δοκιμαστικά μόνο Galileo),
- Επίλυση ακέραιων ασαφειών φάσης (ανά σύστημα),
- Εκτίμηση συν/νων στο ITRF2014 και αρχείων επίλυσης (SINEX) που επιτρέπουν την "μετέπειτα" συνόρθωση ή αλλαγή πλαισίου αναφοράς

Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων

Τεχνικά Θέματα Επεξεργασίας (2/2)

- Bernese-related options



Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων

Δεδομένα HEPOS

Το δίκτυο μόνιμων σταθμών GNSS HEPOS, αποτελείται από 98 σταθμούς και καλύπτει όλη την έκταση της χώρας. Η εγκατάσταση του δικτύου έγινε το 2007 και έκτοτε λειτουργεί συνεχώς, παρέχοντας δεδομένα ή/και προϊόντα τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και για μεταγενέστερη επεξεργασία (post-processing).

- 2021 (παράδοση στο ΚΔΔ τον Μάιο του 2022),
- 2015 (παράδοση στο ΚΔΔ τον Νοέμβριο του 2022),
- 2022 και 2011 (παράδοση στο ΚΔΔ τον Μάρτιο του 2023),

Παρακολούθηση Μόνιμων Δικτύων

Δεδομένα HEPOS



Εκτίμηση συντεταγμένων - Αρχεία αποτελεσμάτων

- Αποθήκευση όλων των λύσεων σε ένα αρχείο ανά σταθμό.
- Χρήση διαφορετικών εγγραφών για κάθε νέα λύση.

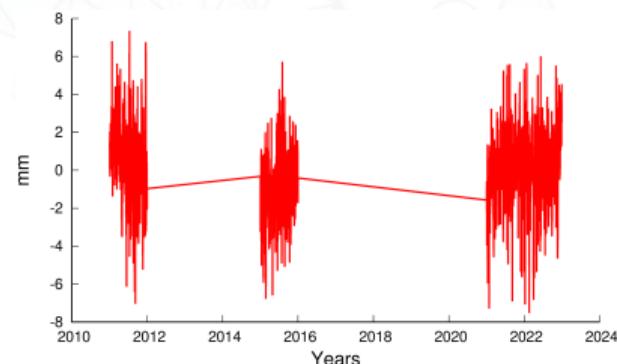
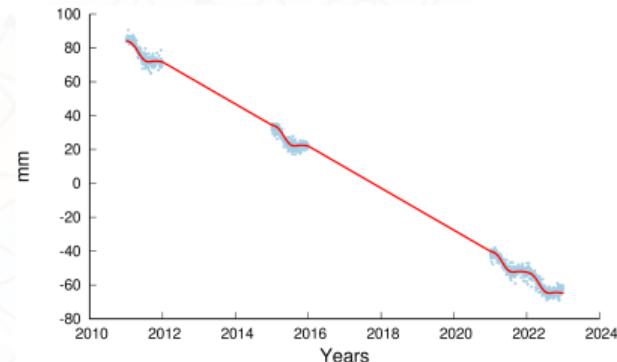
```
pdate otime X sX Y sY Z sZ lat slat lon slon alt salt pdate ptime com
2015-01-01 11:59:45 +4604061.21940 0.00323 +2030937.69593 0.00174 +3906256.57939 0.00275 +38.00756390 0.00117 +23.80317480 0.00101 +245.32058 0.00432 2022-11-02 15:20:55 ekxa21
2015-01-01 11:59:45 +4604061.21935 0.00323 +2030937.69590 0.00174 +3906256.57938 0.00275 +38.00756390 0.00117 +23.80317480 0.00101 +245.32053 0.00432 2022-11-02 12:36:35 ekxa21
2015-01-02 11:59:45 +4604061.21639 0.00291 +2030937.69774 0.00164 +3906256.57749 0.00246 +38.00756390 0.00111 +23.80317480 0.00097 +245.31782 0.00388 2022-11-02 18:29:56 ekxa21
2015-01-03 11:59:45 +4604061.21484 0.00345 +2030937.69472 0.00185 +3906256.57613 0.00294 +38.00756390 0.00121 +23.80317480 0.00106 +245.31490 0.00462 2022-11-08 11:49:50 ekxa21
2015-01-04 11:59:45 +4604061.21610 0.00328 +2030937.69555 0.00186 +3906256.57699 0.00277 +38.00756390 0.00123 +23.80317480 0.00108 +245.31660 0.00438 2022-11-08 14:52:23 ekxa21
2015-01-05 11:59:45 +4604061.22425 0.00320 +2030937.69966 0.00181 +3906256.58549 0.00271 +38.00756390 0.00121 +23.80317480 0.00106 +245.32902 0.00428 2022-11-08 15:27:25 ekxa21
2015-01-06 11:59:45 +4604061.22047 0.00323 +2030937.69837 0.00183 +3906256.58399 0.00273 +38.00756390 0.00122 +23.80317480 0.00106 +245.32496 0.00432 2022-11-08 16:02:39 ekxa21
2015-01-07 11:59:45 +4604061.22113 0.00316 +2030937.69775 0.00177 +3906256.58400 0.00267 +38.00756390 0.00119 +23.80317480 0.00103 +245.32525 0.00421 2022-11-08 16:37:38 ekxa21
2015-01-08 11:59:45 +4604061.21240 0.00294 +2030937.69462 0.00165 +3906256.57568 0.00248 +38.00756390 0.00111 +23.80317480 0.00096 +245.31284 0.00392 2022-11-08 17:12:59 ekxa21
2015-01-09 11:59:45 +4604061.20352 0.00304 +2030937.68840 0.00172 +3906256.56780 0.00257 +38.00756390 0.00116 +23.80317480 0.00101 +245.29960 0.00405 2022-11-10 14:33:18 ekxa21
2015-01-10 11:59:45 +4604061.22220 0.00303 +2030937.69619 0.00171 +3906256.58319 0.00258 +38.00756390 0.00116 +23.80317480 0.00100 +245.32508 0.00405 2022-11-10 15:26:10 ekxa21
2015-01-11 11:59:45 +4604061.21430 0.00311 +2030937.68896 0.00176 +3906256.57578 0.00264 +38.00756390 0.00119 +23.80317470 0.00104 +245.31246 0.00415 2022-11-10 16:03:35 ekxa21
2015-01-12 11:59:45 +4604061.20246 0.00368 +2030937.69336 0.00208 +3906256.57242 0.00312 +38.00756390 0.00138 +23.80317480 0.00122 +245.30326 0.00492 2022-11-10 16:40:57 ekxa21
2015-01-13 11:59:45 +4604061.21411 0.00330 +2030937.69620 0.00186 +3906256.57976 0.00280 +38.00756390 0.00125 +23.80317480 0.00109 +245.31708 0.00441 2022-11-10 17:16:38 ekxa21
2015-01-14 11:59:45 +4604061.21707 0.00302 +2030937.69609 0.00170 +3906256.58031 0.00256 +38.00756390 0.00115 +23.80317480 0.00100 +245.31951 0.00403 2022-11-10 19:16:35 ekxa21
2015-01-15 11:59:45 +4604061.21574 0.00309 +2030937.69362 0.00175 +3906256.57723 0.00263 +38.00756390 0.00118 +23.80317480 0.00102 +245.31588 0.00414 2022-11-10 19:52:14 ekxa21
2015-01-16 11:59:45 +4604061.22424 0.00301 +2030937.69813 0.00170 +3906256.58370 0.00255 +38.00756390 0.00115 +23.80317480 0.00101 +245.32743 0.00401 2022-11-10 20:28:00 ekxa21
2015-01-17 11:59:45 +4604061.21708 0.00294 +2030937.69483 0.00166 +3906256.57933 0.00250 +38.00756390 0.00113 +23.80317480 0.00098 +245.31852 0.00393 2022-11-10 21:04:07 ekxa21
```

Ανάλυση χρονοσειρών θέσης

Πρόγραμμα - παράμετροι

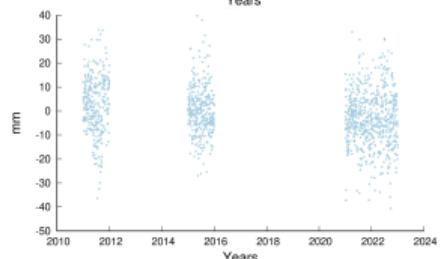
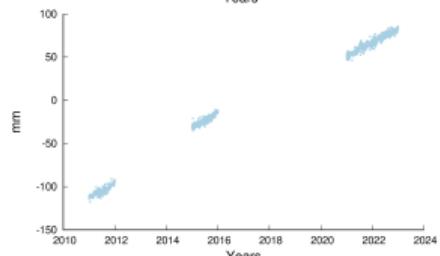
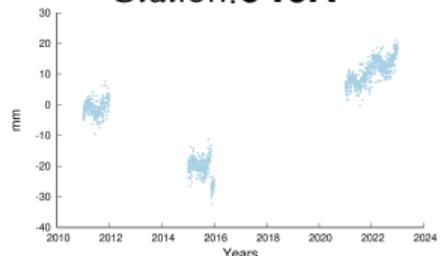
Ανάλυση χρονοσειρών θέσης με το λογισμικό πακέτο Hector (**Bos 2012**)

- Τεκτονικές ταχύτητες (γραμμικό μοντέλο)
- offsets/jumps: κυρίως λόγο επίδρασης σεισμών καθώς δεν υπάρχουν αλλαγές στον εξοπλισμό.
- Αρμονικά σήματα
- Αλλαγές ταχυτήτων (πχ. Σαντορίνη)
- Μετα-σεισμική παραμόρφωση

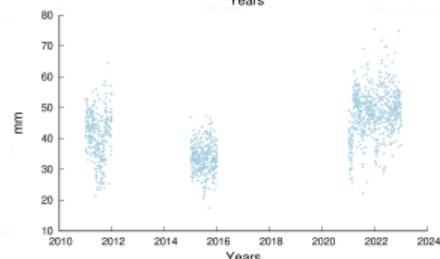
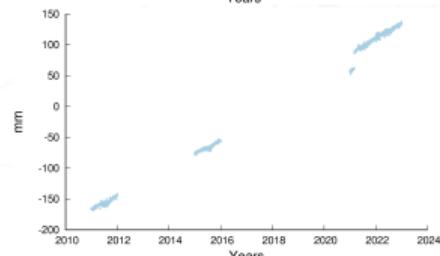
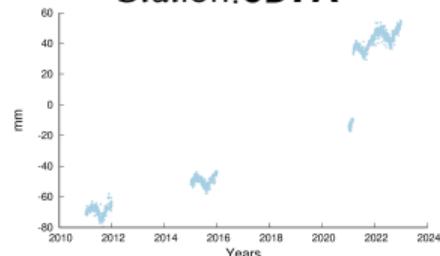


Προσδιορισμός ασυνεχειών - offsets

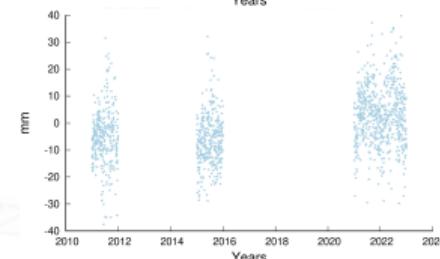
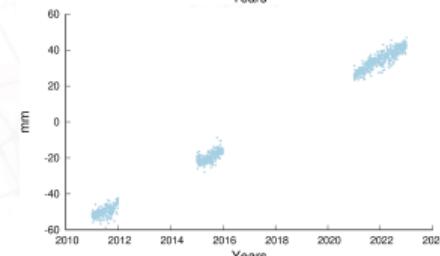
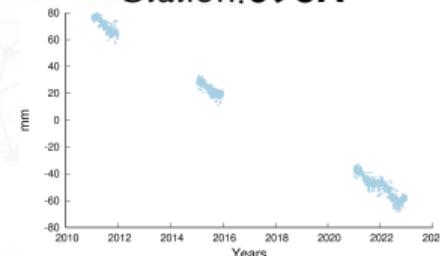
Station: 040A



Station: 057A

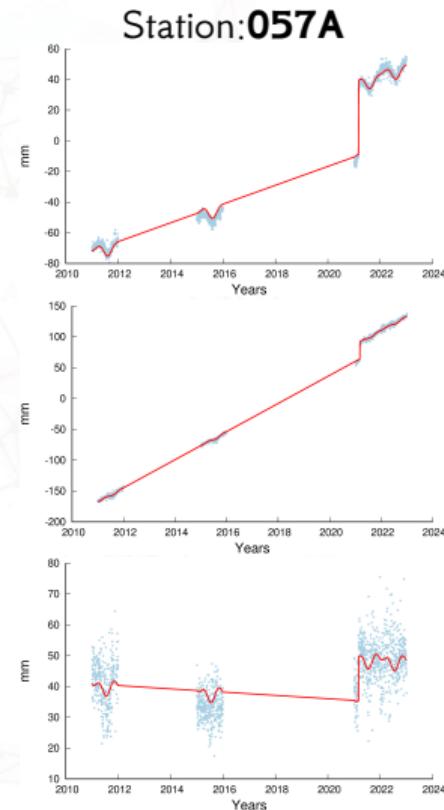
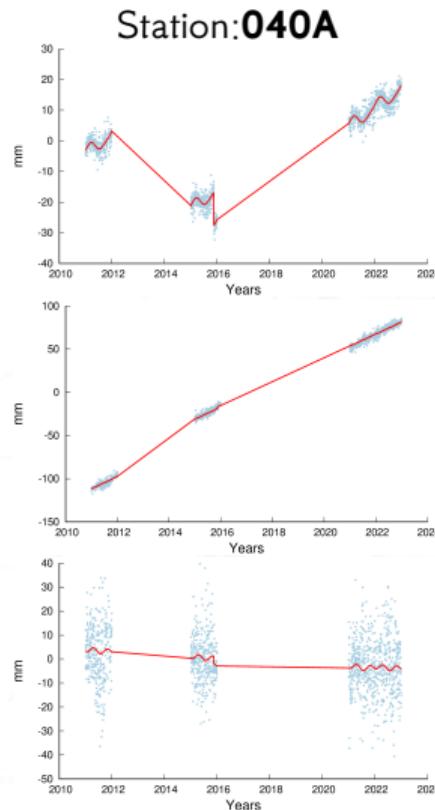


Station: 098A



Συσχετισμός ασυνεχειών με σεισμούς

date	Δn	Δe	Δu
	(mm)		
Station: 040A			
26.01.2014	-43.1	25.2	2.2
17.11.2015	-10.8	1.7	3.1
Station: 057A			
03.03.2021	47.9	27.6	14.0



Αρμονική ανάλυση

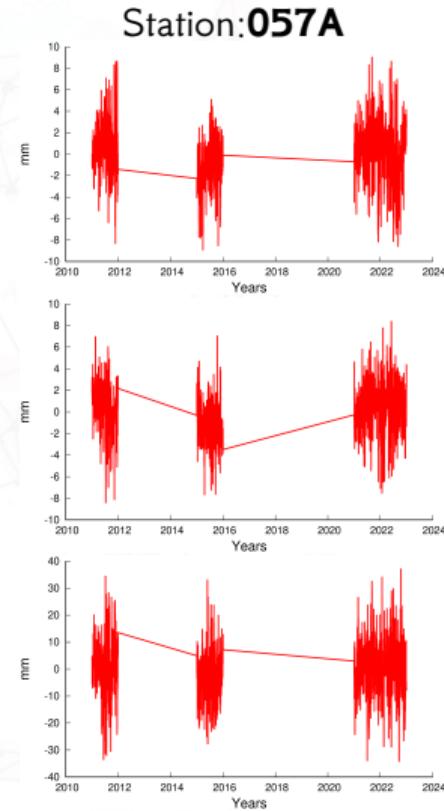
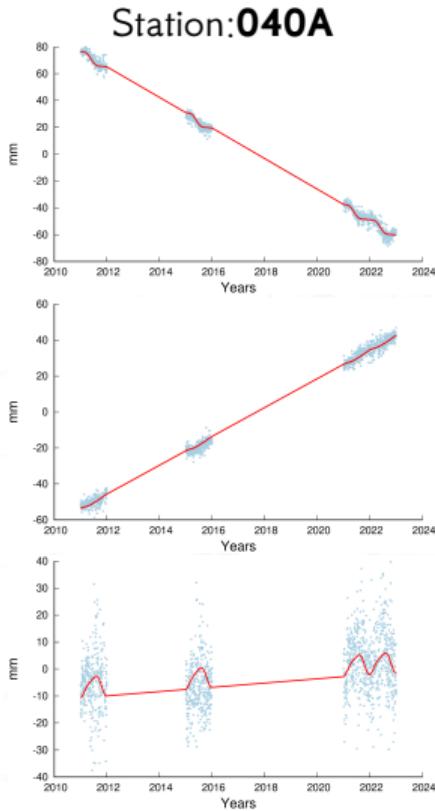
$$\sum_{i=0}^{n_F} s_i \sin(\omega_i t) + c_i \cos(\omega_i t)$$

Παράδειγμα αποτελεσμάτων:

trend: $-11.398 \pm 0.086 \text{ mm/year}$

cos yearly : $1.428 \pm 0.255 \text{ mm}$
 sin yearly : $1.804 \pm 0.280 \text{ mm}$
 Amp yearly : $2.316 \pm 0.266 \text{ mm}$
 Pha yearly : 51.629 degrees

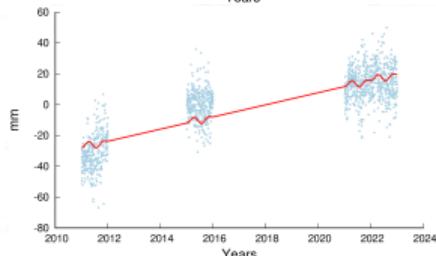
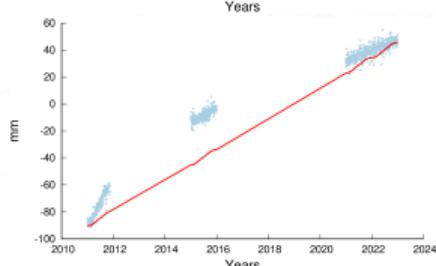
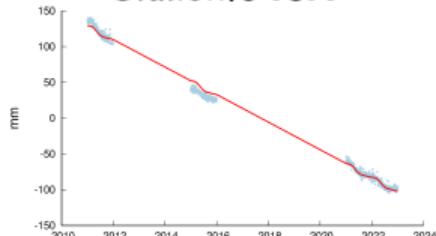
cos hyearly : $-0.418 \pm 0.206 \text{ mm}$
 sin hyearly : $-0.128 \pm 0.217 \text{ mm}$
 Amp hyearly : $0.493 \pm 0.195 \text{ mm}$
 Pha hyearly : -162.958 degrees



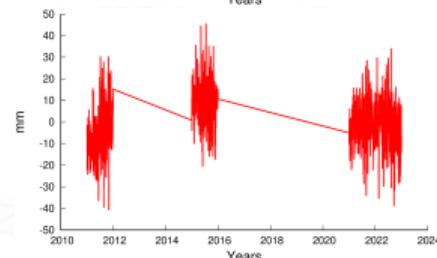
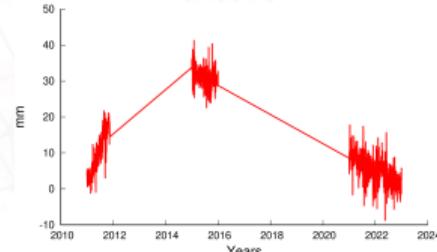
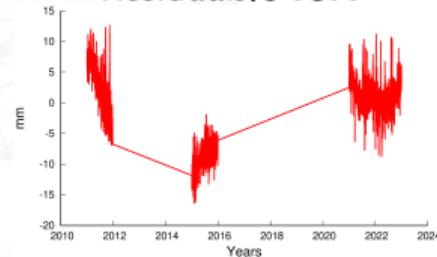
Ειδικές περιπτώσεις - Σαντορίνη

Εκτίμηση αλλαγή ταχυτήτων
στον σταθμό της Σαντορίνης:

Station: **048A**



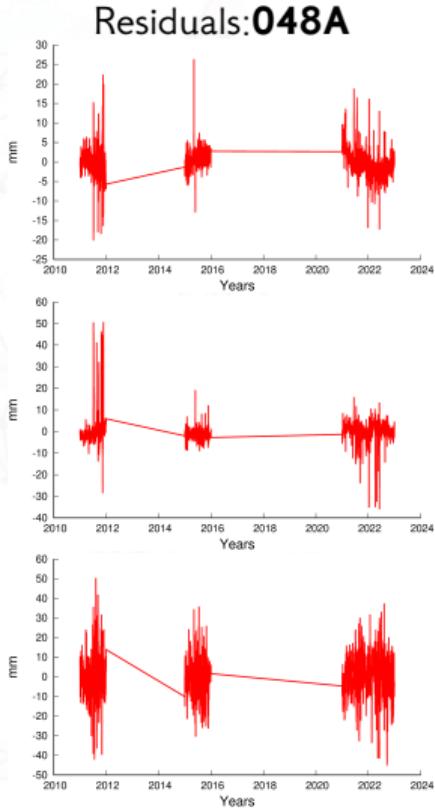
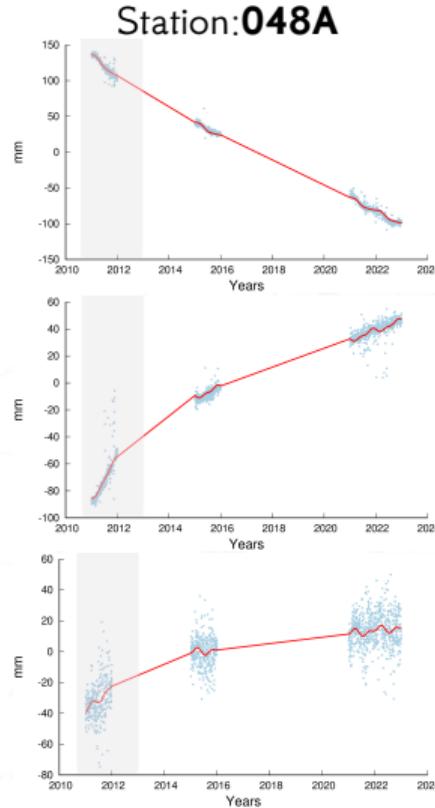
Residuals: **048A**



Ειδικές περιπτώσεις - Σαντορίνη

Εκτίμηση αλλαγή ταχυτήτων στον σταθμό της Σαντορίνης:

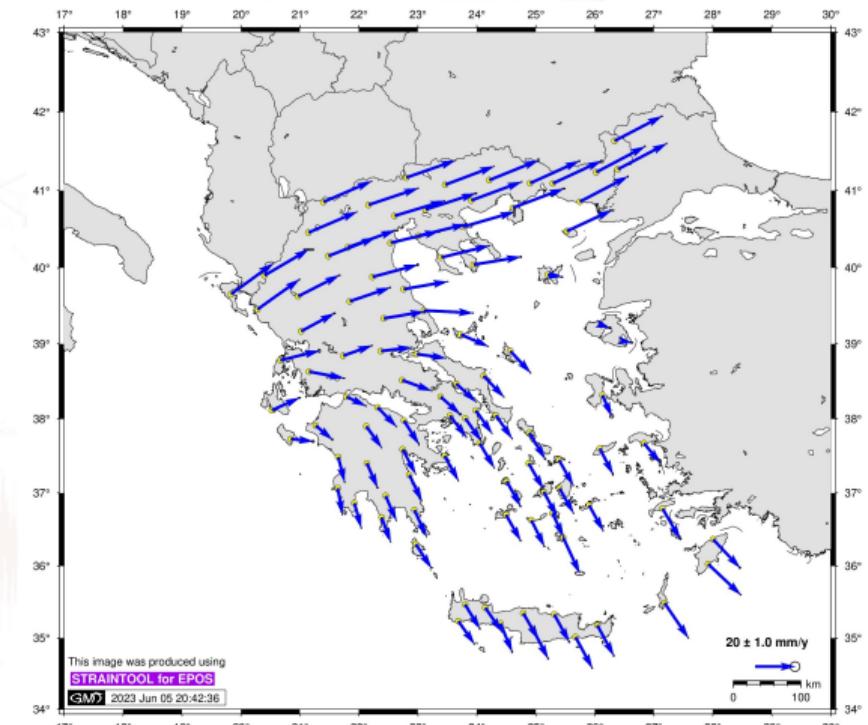
comp	< ~2013	> ~ 2013
	(mm/yr)	
north	-30.1	-17.5
east	31.3	7.0
up	17.2	2.1



Προσδιορισμός πεδίου ταχυτήτων - IGb14

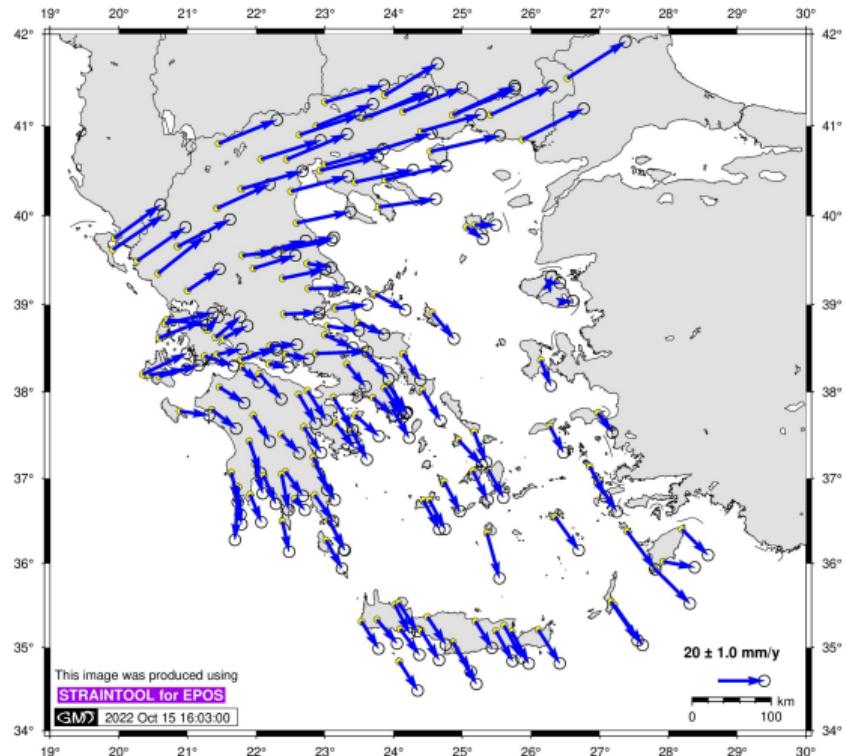
Η ταχύτητες κυμαίνονται ανά συνιστώσα:

comp	min	max
	(mm/yr)	
north	-17.9	15.5
east	2.4	26.0
up	-5.5	4.7

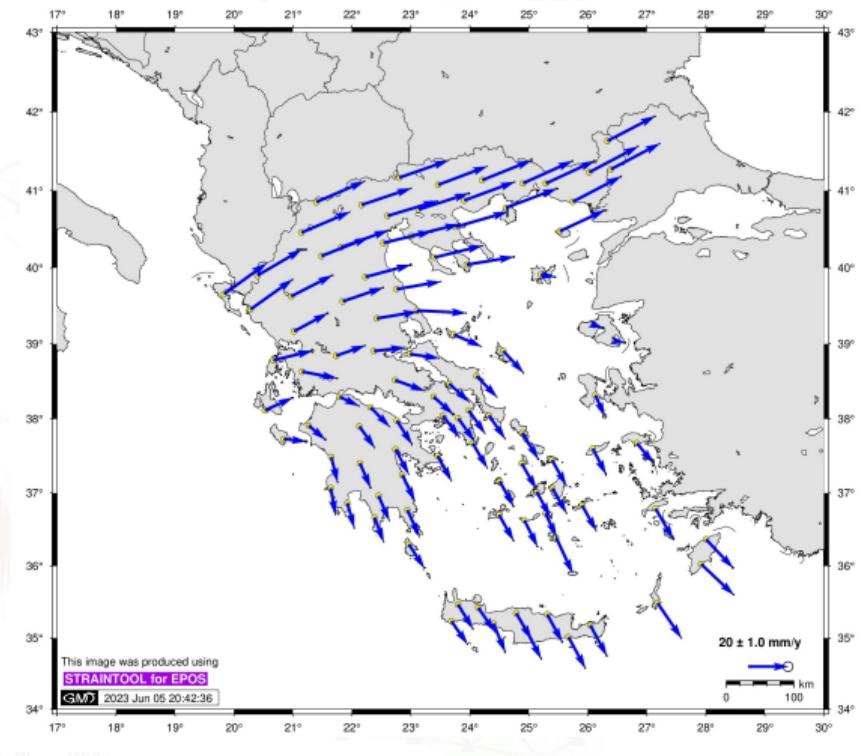


Σύγκριση πεδίου ταχυτήτων

DSO_GRC_2021



DSO_HPS_2022



Αντί επιλόγου ...

- Ο ποιοτικός έλεγχος των δεδομένων του δικτύου δείχνει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για επιστημονικούς σκοπούς πέραν των συνήθη τοπογραφικών εργασιών.
- Από την διαχρονική ανάλυση των δεδομένων είναι εμφανής η επίδραση της γεωδυναμικής συμπεριφοράς στους σταθμούς του δικτύου.
- Η υλοποίηση και συντήρηση ενός σύγχρονου Συστήματος Αναφοράς στην Ελλάδα είναι αρκετά περίπλοκη διαδικασία.
- Το ΚΔΔ διαθέτει μια αναβαθμισμένη πλατφόρμα ανάλυσης δεδομένων GNSS η οποία μπορεί να υποδεχθεί και τα δεδομένα του δικτύου HEPOS εφόσον είναι διαθέσιμα.



Ευχαριστούμε για την προσοχή σας!

References |

