

# ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ & ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

## ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ COPRNICUS, ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΕΒΡΟΥ (2014-2015)

Πτυχιακή εργασία

του Αστέριου Παπαστέργιου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017



# ΣΧΟΛΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ & ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

## Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

## ΠΑΡΧΑΡΙΔΗΣ ΙΣΑΑΚ (Επιβλέπων), ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ, ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΚΑΤΣΑΦΑΔΟΣ ΠΕΤΡΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ, ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΚΑΡΥΜΠΑΛΗΣ ΕΥΘΥΜΙΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ, ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

- 1) Είμαι ο κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.
- 2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλω να ευχαριστήσω πρώτα τον καθηγητή μου Δρ. Παρχαρίδη Ισαάκ, που πίστεψε στις ικανότητές μου, με εμπιστεύτηκε, εντάσσοντάς με στην ερευνητική του ομάδα και με καθοδήγησε στον κόσμο της γεωπληροφορικής. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Dr Marco Chini με τον οποίο συνεργάστηκα στο Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) και του οφείλω μεγάλο μέρος της επιστημονικής μου κατάρτισης. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μιχάλη Φουμέλη για την μεγάλη του συμβολή στις γνώσεις μου και στις έρευνές μου, καθώς και τους Κωνσταντίνο Χουβαρδά Προϊστάμενο της Διεύθυνσης Πολιτικής Προστασίας της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας – Θράκης και Παπαποστόλου Χρήστο του Τμήματος Πολιτικής Προστασίας Π.Ε. Έβρου για τη βοήθειά τους.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδελφή μου για την αμέριστη στήριξη που μου πρόσφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

## Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
Περίληψη	7
Abstract	8
Εισαγωγή	9
2. Φυσικές καταστροφές – Πλημμύρες	10
2.1 Γενικά για τις πλημμύρες	10
2.1.1 Ορισμός	10
2.1.2 Ταξινόμηση πλημμυρών	10
2.2 Μέγεθος και συχνότητα πλημμυρών – Υδρογράφημα	12
2.3 Πλημμύρες και αστικοποίηση (floods and urbanization)	13
2.4 Αμυντική θωράκιση απέναντι στις πλημμύρες – Δομικές και μη παρεμβάσεις	14
2.5 Επικινδυνότητα της πλημμύρας (Flood Hazard)	17
2.6 Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου (Flood Risk Estimation)	17
2.7 Ωφέλειες και ζημιές από τις πλημμύρες	19
2.8 Το πλημμυρικό φαινόμενο στην Ελλάδα	23
3. Η περιοχή του Έβρου	26
3.1 Η λεκάνη απορροής του ποταμού και οι βασικοί παραπόταμοι	26
3.2 Το υδατικό διαμέρισμα Θράκης	27
3.3 Το Δέλτα του ποταμού Έβρου	28
3.4 Οι πλημμύρες στον ποταμό Έβρο	30
3.5 Η γεωγραφία της λεκάνης απορροής στον ελληνικό χώρο	31
3.6 Τα αντιπλημμυρικά και διευθέτησης ροής έργα στην περιοχή του Έβρου	33

4. Ενεργά (ραντάρ) δορυφορικά συστήματα παρατήρησης της γης (eo)	
4.1 Η τεχνολογία των RADAR (SAR)	
4.1.1 Η Τηλεπισκόπηση	
4.1.2 Βασική λειτουργία των RADAR	
4.2 Το πρόγραμμα Copernicus	40
4.2.1 Γενικά για το πρόγραμμα	40
4.2.2 Οι δορυφόροι του προγράμματος Copernicus	
4.2.3 Οι δορυφόροι και αποστολές συμβολής του Copernicus	
4.3 Ο δορυφόρος Sentinel -1	45
4.3.1 Τι είναι ο Sentinel -1	45
4.3.2 Η αποστολή του Sentinel -1	46
4.3.3 Η τροχιά του Sentinel -1	46
4.3.4 Η περιγραφή του δορυφόρου	
4.4 Δορυφορική απεικόνιση της πλημμύρας του 2006 στον Έβρο	50
5. Δεδομένα - Μεθοδολογία	52
5.1 Δεδομένα	
5.2 Μεθοδολογία	54
6. Επεξεργασία - Αποτελέσματα	56
6.1 Επεξεργασία	56
6.2 Αποτελέσματα/Συζήτηση	
7. Βιβλιογραφία	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1	70

## Περίληψη

Τα SAR δεδομένα παρατήρησης της Γης μπορούν να προσφέρουν χάρτες πλημμυρικής έκτασης και πληροφοριών υψηλής ποιότητας για την καλύτερη εκτίμηση του κινδύνου πλημμύρας και κατά συνέπεια για το σχεδιασμό, καθώς και για την υποστήριξη των πολιτικών αρχών υπέρ της προστασίας σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Το πεδίο εφαρμογής της παρούσας μελέτης αφορά στη δημιουργία χαρτών πλημμυρικής έκτασης από μια σειρά εικόνων SAR της λεκάνης του Έβρου, που αντιπροσωπεύει μια διασυνοριακή κοίτη πλημμυρών. Η μελέτη χρησιμοποιεί χρονολογικές σειρές εικόνων SAR του Copernicus δορυφορικού συστήματος Sentinel-1 που καλύπτει την περίοδο Οκτωβρίου 2014 - Μαΐου 2015.

Η μεθοδολογία προσπαθεί να προσδιορίσει την πλημμύρα που συμβαίνει σε τρεις κύριες κατηγορίες κάλυψης γης, όπως είναι οι αστικές περιοχές, γυμνά ή μειωμένης βλάστησης εδάφη και περιοχές με βλάστηση, εκμεταλλευόμενη την εναλλασσόμενη πόλωση από τα SAR κανάλια backscattering, και τη συνάφεια συμβολομετρίας για τον καλύτερο χαρακτηρισμό του τοπίου. Χρησιμοποιώντας εναλλασσόμενη πόλωση, τα SAR δεδομένα παρέχουν καλύτερη κατανόηση και ερμηνεία της ανίχνευσης πλημμύρας λόγω του διαφορετικού τρόπου που αντιδρά η κάλυψη γης σε διαφορετικές πολώσεις. Έτσι, με την εφαρμογή της εκτίμησης της συμβολομετρικής συνάφειας μπορούμε να επιτύχουμε καλύτερη καταγραφή και γνώση των πλημμυρισμένων περιοχών, στη πάροδο του χρόνου, στη συγκεκριμένη περιοχή.

Λέξεις κλειδιά: Χάρτης καταγραφής πλημμυρών, SAR, Υδρολογία

## Abstract

SAR earth observation data can provide high quality flood maps and information to better assess the flood risk accordingly planning as well as to support civil protection authorities during emergency phase. The scope of this paper is to create flood extent maps from a series of SAR scenes of the Evros basin which represents a transboundary floodplain. The study uses time series SAR images of Sentnel-1 ESA's Copernicus satellite system covering the period October 2014 to May 2015.

The methodology tries to identify the flood that occurs in three main land cover classes, such as urban areas, bare or poorly vegetated soil and vegetated areas, taking advantage of co- and cross-polarized SAR backscattering channels, and the InSAR coherence to better characterize the landscape. Dual-pol SAR data provides the opportunity to have a better understanding and interpretation of flood detection due to the way different land cover reacts to different polarizations. Thus, with the implementation of InSAR coherence estimation we may achieve a better record and knowledge of the flooded areas, over time, in the specific region.

Key words: Flood mapping, SAR, Evros, Hydrology.

## Εισαγωγή

Στο διάστημα από το 2001 έως το 2011, οι πλημμύρες αποτελούσαν τον πιο κοινό τύπο φυσικών καταστροφών σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ ήταν υπεύθυνες για σχεδόν το ήμισυ των ανθρώπινων απωλειών λόγω φυσικών καταστροφών και για οικονομικές απώλειες που έφτασαν τα 185 δισεκατομμύρια δολάρια (EM-DAT, 2011). Οι πλημμύρες αναμένεται να αυξηθούν σε συχνότητα και ένταση λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας και των ακραίων φαινομένων καθίζησης. Επιπλέον, η αύξηση της αστικοποίησης έχει σαν αποτέλεσμα να εκτίθενται σε κίνδυνο πλημμυράς όλο και περισσότεροι άνθρωποι (Katarzyna, Lyle, & Shilu, 2012).

Θεωρείται ότι οι πλημμύρες θα αυξήσουν τη θνησιμότητα και την παγκόσμια επιβάρυνση διάφορων νοσημάτων ενώ ταυτόχρονα θα ευνοήσουν κοινωνικές και οικονομικές διαταραχές, και θα ασκούν συνεχείς πιέσεις στις υπηρεσίες υγείας, ιδιαίτερα σε χώρες με χαμηλούς πόρους. Οι συνέπειες των πλημμυρών στους πληθυσμούς εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση, ποικίλους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες, καθώς και από τη βασική ευπάθεια των πληθυσμών που πλήττονται (Du, FitzGerald, Clark, & Hou, 2010).

Τα δορυφορικά συστήματα SAR μπορούν να αποτελέσουν σημαντική πηγή πληροφοριών για την καταγραφή και παροχή χαρτών μεγάλης ακρίβειας για πλημμυρικές εκτάσεις. Επίσης, συμβάλλουν στην υποστήριξη των τοπικών αρχών Πολιτικής Προστασίας κατά τη διάρκεια μιας φάσης έκτακτης ανάγκης. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η δημιουργία χαρτών πλημμυρικής έκτασης από μια σειρά εικόνων Synthetic Aperture Radar (SAR) της λεκάνης του Έβρου, που αντιπροσωπεύει μια διασυνοριακή κοίτη πλημμυρών. Ο συχνός κύκλος επανεπισκεψιμότητας του SAR δορυφόρου Sentinel-1 Α΄ αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο συλλογής εικόνων, για τη μεγαλύτερη έκταση κατά μήκος του ποταμού Έβρου, με τα δεδομένα να ανανεώνονται ανά τρεις έως έξι ημέρες (από 2 έως 4 μέρες όταν μπει σε τροχιά ο Sentinel-1 B'). Η χαρτογράφηση του πλημμυρικού φαινομένου πραγματοποιείται την ίδια ημέρα. Συνεπώς, υπάρχει η δυνατότητα για μία συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή των πλημμυρικών εκτάσεων, καθ' όλη τη δειάρκεια του χρόνου. Στη συγκεκριμένη εργασία προτείνεται μια μέθοδος αναγνώρισης πλημμυρών, οι οποίες μπορούν να προκύψουν σε διαφορετικά ειδή κάλυψης γης, όπως σε αστικές περιοχές, σε γυμνή βλάστηση του εδάφους και σε περιοχές υψηλής βλάστησης. Τα αποτελέσματα εμφανίζουν μία συνολική χρονική καταγραφή και αποτύπωση της έκτασης των πλημμυρών που συνέβησαν κατά την περίοδο (Δεκέμβριος 2014-Μάιος 2015) και έλαβαν χώρα στην περιοχή του Ποταμού Έβρου. Ολοκληρώνοντας, η ακριβής αποτύπωση ενός πλημμυρικού φαινομένου μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό και αναντικατάστατο εργαλείο στην πρόληψη και αντιμετώπιση των καταστροφών τόσο στην περιοχή, όσο και στα περίγωρα.

## 2. Φυσικές καταστροφές – Πλημμύρες

### 2.1 Γενικά για τις πλημμύρες

#### 2.1.1 Ορισμός

Η «πλημμύρα» (flood) είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο ορίζεται ως η προσωρινή κάλυψη από νερό εδάφους το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν καλύπτεται από νερό. Αυτό περιλαμβάνει πλημμύρες από ποτάμια, ορεινούς χειμάρρους, εφήμερα ρέματα και πλημμύρες από τη θάλασσα σε παράκτιες περιοχές, δύναται δε να εξαιρεί πλημμύρες από συστήματα αποχέτευσης. Ο «κίνδυνος πλημμύρας» ορίζεται ως ο συνδυασμός της πιθανότητας να λάβει χώρα πλημμύρα και των δυνητικών αρνητικών συνεπειών για την ανθρώπινη υγεία, το περιβάλλον, την πολιτιστική κληρονομιά και τις οικονομικές δραστηριότητες, που συνδέονται με αυτήν την πλημμύρα (ΟΔΗΓΙΑ 2007/60/ΕΚ, 2007).

#### 2.1.2 Ταξινόμηση πλημμυρών

#### Ποτάμιες Πλημμύρες (River Floods)

Πλημμύρες σε ποτάμιες κοιλάδες συμβαίνουν κυρίως στις λεκάνες κατάκλυσης σαν αποτέλεσμα της υπερχείλισης των φυσικών ή τεχνητών οχθών. Μερικές φορές η πλημμύρα συμβαίνει σε υγρές συνθήκες όταν μια ήδη υπάρχουσα μάζα νερού υψώνεται πάνω από το επίπεδο του εδάφους.

Σε κλιματικές συνθήκες που ευνοούν το ξηρό έδαφος και φέρει γι αυτό το λόγο επιφανειακές ρωγμές, εκτεταμένες επίπεδες περιοχές μπορεί να πλημμυρίσουν από ξαφνικές νεροποντές. Αυτή η μορφή πλημμύρας αφορά κυρίως άνυδρες και ημι – άνυδρες περιοχές.

Επίσης τυπικό στοιχείο των άνυδρων και ημι – άνυδρων περιοχών είναι ότι δεν υπάρχουν συγκεκριμένα κανάλια αποστράγγισης κι έτσι η πλημμύρα αναπτύσσεται με τη μορφή σεντονιού καλύπτοντας μεγάλες εκτάσεις γης.

Σε αστικές περιοχές οι πλημμύρες είναι συχνά το αποτέλεσμα της υπερχείλισης καναλιών ή συγκέντρωσης νερού σε λίμνες εξαιτίας κακής λειτουργίας ή σχεδίασης του συστήματος συλλογής και απομάκρυνσης όμβριων υδάτων. Περισσότερες λεπτομέρειες περιλαμβάνονται στο Κεφάλαιο 6: «Πλημμύρες και αστικοποίηση».

Μία ακόματαξινόμηση των ποτάμιων πλημμυρών αναφέρεται σε αυτές που συμβαίνουν στα ανάντη κι αυτές που συμβαίνουν στα κατάντη. Οι πρώτες αφορούν μια μικρή περιοχή και οι δεύτερες επηρεάζουν τεράστιες εκτάσεις. Πάντως αν μια πλημμύρα ελεγχθεί στα ανάντη – μείωση ταχύτητας ροής με διαδοχικά φράγματα – οι συνέπειες στα κατάντη ελαχιστοποιούνται (ΠΑΠΠΑ, 2012).

#### Παράκτιες πλημμύρες (Coastal Floods)

Οι πλημμύρες σε χαμηλό υψόμετρο και σε παράκτιες περιοχές, συμπεριλαμβανομένου των εκβολών και των δέλτα ποταμών, προκαλούν την εισροή υφάλμυρου και αλμυρού νερού. Πλημμύρες των οποίων το νερό είναι υφάλμυρο (brackish water floods) συμβαίνουν όταν το νερό στις εκβολές των ποταμών αναμιγνύεται με το θαλασσινό και επιστρέφει πίσω στη στεριά σε συνθήκες πλημμυρίδας (μέγιστη στάθμη παλίρροιας).

Άμεσο πλημμύρισμα με θαλασσινό νερό (saline water floods) μπορεί να προκύψει όταν ιδιαίτερα μεγάλα κύματα (απόρροια ισχυρών ανέμων ή κύματα παλίρροιας λόγω τεκτονικών κινήσεων μεγάλης κλίμακας – τσουνάμι) κατευθύνονται σε σχετικά κλειστούς κόλπους.

#### Πλημμύρες από λιώσιμο χιονιού και πάγου σε ορεινές και πολικές περιοχές

Στην Ευρώπη παρατηρούνται στην οροσειρά των Άλπεων και γενικά σε οροσειρές ανά τον κόσμο, ενώ η διαφοροποίηση του πάχους των παγοκαλυμμάτων, λόγω μεταβολής του κλίματος προς το θερμότερο, έχει παγκόσμια επίδραση.

#### Πλημμύρες που οφείλονται σε καταστροφή ή κακή λειτουργία τεχνικών έργων

Στις πόλεις μπορεί να οφείλονται στο κακό σύστημα υπονόμων, ενώ στην ύπαιθρο οφείλονται σε αστοχία τεχνητών φραγμάτων ή αγωγών μεταφοράς ύδατος (FEMA, 2012; National Weather Service, 2003).

### 2.2 Μέγεθος και συχνότητα πλημμυρών – Υδρογράφημα

Όταν η πλημμύρα έχει τη μορφή ροής (ποτάμια) μπορεί να μετρηθεί το μέγεθός της. Σταθμοί καταγραφής κατά μήκος της ροής, μετρούν το ύψος του νερού και την ποσότητα του ύδατος που διέρχεται απ' αυτούς ανά μονάδα χρόνου. Έτσι κατασκευάζεται η καμπύλη εκφόρτισης (discharge in m<sup>3</sup>/s) – χρόνου (time in s). Η καμπύλη αυτή ονομάζεται υδρογράφημα και είναι χρήσιμη, γιατί πληροφορεί για ενδεχόμενη πλημμύρα, όταν ο κλάδος εκφόρτισης – χρόνου βαίνει συνεχώς ανοδικά πάνω από το συνηθισμένο όριο εκφόρτισης ή στάθμης (Σχήμα 2.1). Στην περίπτωση των παράκτιων πλημμυρών υπάρχουν σταθμοί καταγραφής της ανόδου της στάθμης της θάλασσας κατά μήκος της ακτογραμμής (Oregon State University, 2005).



Σχήμα 2.1: Καμπύλη υδρογραφήματος

## 2.3 Πλημμύρες και αστικοποίηση (floods and urbanization)

Στις πόλεις, η γήινη επιφάνεια, καλύπτεται από κτίσματα, πεζοδρόμια κατασκευασμένα από σκυρόδεμα και μάρμαρο (ή άλλο πέτρωμα μικρής περατότητας) καθώς και δρόμους κατασκευασμένους από άσφαλτο. Τα υλικά αυτά δεν επιτρέπουν την κατείσδυση του ύδατος στο υπέδαφος, αλλά ευνοούν τη συγκέντρωσή του στην επιφάνεια. Δηλαδή η επιφανειακή απορροή (surface run-off) γίνεται μέγιστη και η κατείσδυση (infiltration) ελάχιστη. Το γεγονός αυτό μαζί με τον κακό σχεδιασμό του συστήματος συλλογής και απομάκρυνσης των όμβριων υδάτων συνιστά βασική αιτία εμφάνισης καταστροφικών πλημμυρών στις πόλεις.

Άλλη αιτία εμφάνισης πλημμυρών είναι η επέμβαση στο υδρογραφικό δίκτυο που τυχαίνει να διασχίζει μια κατοικημένη περιοχή. Η επέμβαση μπορεί να λάβει διάφορες μορφές: από στένωση του πλάτους της κοίτης ενός ρέματος, αλλαγή της διεύθυνσης ροής του έως και πλήρες μπάζωμα αυτού.

Πολλές φορές πάνω στα μπαζωμένα εδάφη θεμελιώνονται κατασκευές. Αυτά τα εδάφη όμως όχι μόνο φράζουν τη δίοδο του νερού προς τη θάλασσα, αλλά είναι και τελείως επικίνδυνα σ' έναν σεισμό γιατί μεγεθύνουν τα καταστροφικά του αποτελέσματα.

Έχει δειχτεί ότι χαλαρά εδάφη σημαντικού πάχους, όπως μπάζα και αλλουβιακές αποθέσεις, αυξάνουν την επιτάχυνση που δέχεται κτίριο θεμελιωμένο πάνω σ' αυτά. Με άλλα λόγια κατασκευές θεμελιωμένες πάνω σε χαλαρούς αλλουβιακούς σχηματισμούς κινδυνεύουν τόσο από πλημμύρες όσο και από σεισμούς.

Επομένως η αστικοποίηση (urbanization) αυξάνει τον αριθμό εμφάνισης πλημμυρών και τις επιδράσεις αυτών στον άνθρωπο και τη ζωή του (ΜΑΡΑΓΚΟΥΔΑΚΗ & ΤΣΑΚΙΡΗΣ, 2005).

## 2.4 Αμυντική θωράκιση απέναντι στις πλημμύρες – Δομικές και μη παρεμβάσεις

#### 1. Δομικά μέτρα

Σε ότι αφορά τις ποτάμιες πλημμύρες οι περισσότερες επεμβάσεις σχετίζονται με τη λεγόμενη διαμόρφωση της κοίτης. Η αύξηση της διατομής και ο καθαρισμός του πυθμένα αποτελούν τις πιο συχνές και απλές επεμβάσεις. Στόχος είναι η ανεμπόδιστη ροή του νερού και η όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εκφόρτιση ανά μονάδα χρόνου. Επέμβαση γίνεται και στις όχθες ενός ρέματος. Ενισχύονται με τοιχία από πέτρα ή σκυρόδεμα για να προφυλαχθούν από τη διάβρωση και αυξάνεται το ύψος τους με αναχώματα ή φράχτες, ή σακιά γεμάτα άμμο, προκειμένου να μην ξεχειλίζει το νερό στις παράπλευρες περιοχές. Επίσης μικρά φράγματα κατά μήκος ρεμάτων, στα ανάντη, μειώνουν την ταχύτητα ροής και τη διαβρωτική δράση, αυξάνοντας την κατείσδυση και προλαμβάνοντας την εκδήλωση πλημμυρών στα κατάντη. Για τον ίδιο λόγο τέτοια φράγματα κατασκευάζονται και παι στα ανάντη κατασκευάζονται και μεγάλα φράγματα στα κατάντη. Αυτά προστατεύουν από τις πλημμύρες, γιατί ελέγχουν τη ροή του νερού και αποθηκεύουν τις κατά καιρούς, επί πλέον του κανονικού, υδάτινες μάζες. Οι τελευταίες μπορούν να οδηγηθούν σε περιοχές με ελλείψεις σε νερό ή να φυλαχτούν για την ξηρή καλοκαιρινή περίοδο. Παράλληλα η διαφορά ύψους πίσω και μπροστά αυτή σε ηλευτρική μειώνουν του νερού να οδηγηθούν σε κινητική και αυτή σε ηλεκτρική μέσω της κίνησης ενός στροβίλου (cfpa-e, 2012).

Σε ότι αφορά τις παράκτιες πλημμύρες κατασκευάζονται φράγματα από τεχνητά (σκυρόδεμα) ή και φυσικά υλικά (άμμος, χαλίκι και πέτρα) παράλληλα προς την ακτή για να αποτραπεί η είσοδος της θάλασσας προς τη ξηρά. Η πιο εντυπωσιακή περίπτωση παράκτιων φραγμάτων βρίσκεται στις κάτω χώρες και κυρίως στην Ολλανδία. Επίσης στη Βόρεια Ιταλία, στη λιμνοθάλασσα της Βενετίας, αναμένεται να εγκατασταθούν τεχνητά φράγματα στα σημεία επικοινωνίας της λιμνοθάλασσας με τη θάλασσα της Αδριατικής. Αυτά θα βρίσκονται βυθισμένα μέσα στο νερό και θα ανυψώνονται έξω από αυτό όταν υπάρχει άνοδος της θαλάσσιας στάθμης. Ο μηχανισμός είναι παρόμοιος μ' αυτόν των υποβρυχίων. Όταν τα φράγματα είναι βυθισμένα είναι γεμάτα στο εσωτερικό τους με θαλασσινό νερό. Για ν' ανυψωθούν ένα σύστημα διώχνει το νερό εισπιέζοντας στο εσωτερικό τους αέρα, οπότε γίνονται ελαφρύτερα (Γλυνού, 2014).

#### 2. Μη δομικά μέτρα

Οι υδρολόγοι μπορούν να εκτιμήσουν την πιθανότητα εκδήλωσης μιας πλημμύρας μέσα από τη σύνταξη χαρτών πλημμυρικού κινδύνου που δείχνουν τις επικίνδυνες περιοχές. Επίσης αυτοί οι χάρτες μπορούν να διαφωτίσουν τους χρήστες γης για την πιθανή ζημιά, να καταδείξουν ζώνες που απαιτούν ασφάλιση ιδιοκτησίας και να χρησιμοποιηθούν για να χωριστεί η γη σε ζώνες διαφορετικής χρήσης. Με βάση τους εν λόγω χάρτες οι κοινωνίες νομοθετούν αναφορικά με το είδος και το μέγεθος της μελλοντικής επέκτασης σε περιοχές υπολογίσιμου πλημμυρικού κινδύνου.

Στα μη δομικά μέτρα περιλαμβάνονται και τα σχέδια έκτακτης ανάγκης (emergency plans). Οι αρχές συντάσσουν σχέδια αντιμετώπισης έκτακτων αναγκών σε περίπτωση φυσικών καταστροφών όπως είναι και οι πλημμύρες. Τα σχέδια περιλαμβάνουν την καταγραφή: των υπεύθυνων υπηρεσιών / αρχών (Συντονίζουσα αρχή: Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας), των επιπέδων συναγερμού, των τρόπων εκκένωσης, των ομάδων διάσωσης και ανακούφισης των πληγέντων (Πυροσβεστική μεσώ της Ε. Μ. Α. Κ., τεχνικές υπηρεσίες τοπικής αυτοδιοίκησης, ΕΥΔΑΠ και κατάλληλα εκπαιδευμένων εθελοντών για τον απεγκλωβισμό και τη διάσωση, Εθνικό Κέντρο Άμεσης Βοήθειας για τη διακομιδή των πληγέντων στα νοσοκομεία), του απαιτούμενου εξοπλισμού (εργαλεία, κατάλληλος ρουχισμός και υπόδηση, ασύρματοι, γεννήτριες, οχήματα παντός εδάφους και πολλαπλών χρήσεων και ικανοτήτων). Επιπροσθέτως καταστρίζονται προγράμματα

Τα σχέδια έκτακτης ανάγκης πρέπει να επανεξετάζονται και να βελτιώνονται λαμβάνοντας υπόψη τα νέα δεδομένα (αλλαγή στο κλίμα, στις χρήσεις γης, επέκταση πόλεων, κλπ.) και να αποστέλλονται στους υπεύθυνους με παράλληλη ενημέρωση της κοινής γνώμης.

Ωστόσο η πρόληψη είναι καλύτερη από τη θεραπεία, οπότε ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στα συστήματα πρόγνωσης και προειδοποίησης ενδεχόμενης πλημμύρας.

Το σύστημα πρόγνωσης είναι ένα Ολοκληρωμένο Υδρολογικό Σύστημα Πρόγνωσης (Integrated Hydrological Forecasting System: I. H. F. S.) με τα εξής στοιχεία:

- (1) σύστημα ανάκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο
- (2) μετεωρολογικό και υδρολογικό μοντέλο πρόβλεψης
- (3) ανάλυση πρόγνωσης

#### (4) διάδοση προειδοποίησης

Τα δεδομένα μπορεί να είναι το ύψος κατακρημνισμάτων, ή η θερμοκρασία, ή η στάθμη των υδρορευμάτων, ή η εκφόρτιση αυτών. Ανάλογα με τη θέση και τους διαθέσιμους σένσορες είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά δεδομένα για μια συγκεκριμένη υδρο – μετεωρολογική μεταβλητή.

Τα παραδοσιακά συστήματα ανάκτησης δεδομένων βασίζονται σε συμβατικό εξοπλισμό τηλεμετρίας. Η σύνδεση μεταξύ των σταθμών καταγραφής και του κεντρικού σταθμού επεξεργασίας δεδομένων γίνεται μέσω τηλεφωνικών γραμμών, ασύρματου (ραδιόζευξη) και γεωστατικών δορυφόρων.

Η περίπτωση της χρησιμοποίησης των υψών κατακρημνισμάτων ως δεδομένων εισόδου είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα καθώς αυτά τα δεδομένα μπορεί να προέρχονται από διάφορες πηγές. Μια πηγή είναι το δίκτυο των βροχομετρικών σταθμών ή το ραντάρ καιρού ή οι μετεωρολογικοί δορυφόροι. Προφανώς οι δυο τελευταίες πηγές είναι και οι πλέον σύγχρονες. Μάλιστα το ραντάρ καιρού μπορεί να δώσει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και αυτό το επιτυγχάνει χάρη στη μεγάλη διακριτική του ικανότητα (διαστηματική ανάλυση: 1x1 Km, ακτίνα κάλυψης 200 Km) και στις δυνατότητες τηλεανίχνευσης (remote sensing). Η μεγάλη διαστηματική ανάλυση βοηθά στη λεπτομερειακή πρόγνωση πλημμύρας και άρα προειδοποίησης του πληθυσμού για ενδεχόμενο κίνδυνο. Επίσης η τηλεανίχνευση επιτρέπει τη λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Άρα το ραντάρ καιού και οι σχετικοί δορυφόροι είναι αξιόπιστα.

Υπάρχουν όμως και αδυναμίες. Η συλλεγόμενη πληροφορία συχνά χρειάζεται διόρθωση. Γι αυτό το λόγο ελέγχεται η ακρίβειά της με την αντιπαράθεση και των δεδομένων που δίνουν οι βροχομετρικοί σταθμοί. Πιο συγκεκριμένα γίνεται συνδυασμός των χαρτών ραντάρ με τα δεδομένα των βροχομετρικών σταθμών για να διορθωθούν τα δεδομένα του ραντάρ. Αυτή η μέθοδος είναι η πιο κοινή, αλλά δεν είναι και άριστη μια και υπάρχουν θεμελιώδεις διαφορές στα χαρακτηριστικά δειγματοληψίας μεταξύ ραντάρ και βροχομετρικού σταθμού.

Ένα ολοκληρωμένο μετεωρολογικό – υδρολογικό σύστημα πραγματικού χρόνου χαρακτηρίζεται από την ικανότητά του να μετατρέπει την πρόγνωση βροχόπτωσης σε υδρολογικό μοντέλο. Όταν το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε μια βροχόπτωση και την επακόλουθη πλημμύρα είναι μικρό (6 ώρες ή και λιγότερο – ξαφνικές πλημμύρες / flash floods) έχει σημασία αυτή η μετατροπή των δεδομένων εισόδου (κατακρημνίσματα) σε επιφανειακή απορροή (πλημμύρα) να πραγματοποιείται άμεσα. Διαφορετικά είναι αδύνατη η έγκαιρη προειδοποίηση του πληθυσμού.

Λεπτομέρειες αναφορικά με τα υδρολογικά μοντέλα υπάρχουν στο Κεφάλαιο 9.

Αφότου η πρόγνωση είναι διαθέσιμη, ένα τοπικής εμβέλειας σύστημα προειδοποίησης είναι μεγάλης αξίας, εάν γνωρίζουμε τι μέτρα πρέπει να ληφθούν για να σωθούν ζωές και περιουσίες (cfpa-e, 2012) (ΠΑΠΠΑ, 2012).

## 2.5 Επικινδυνότητα της πλημμύρας (Flood Hazard)

Το πόσο καταστροφική ή μη είναι μια πλημμύρα εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες ( Nelson, 2015):

Τη χρήση της λεκάνης κατάκλυσης.

Το μέγεθος (βάθος και ταχύτητα ύδατος) και τη συχνότητα της πλημμύρας.

Το ρυθμό ανύψωσης και τη διάρκεια της πλημμύρας.

Την εποχή.

Το βάρος και τον όγκο των ιζημάτων που αποτίθενται.

Την αποτελεσματικότητα της πρόβλεψης, της προειδοποίησης και των συστημάτων έκτακτης ανάγκης.

## 2.6 Εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου (Flood Risk Estimation)

Η εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου απαιτεί τη χρήση ενός υδρολογικού μοντέλου προσομοίωσης. Αυτό το μοντέλο, πρακτικά υπολογίζει τη βροχόπτωση και την απορροή (Rainfall – Runoff Models). Το νερό της απορροής ή μέρος αυτής (αν δεχτούμε ότι ένα πολύ μικρό τμήμα υφίσταται εξάτμιση έως ότου ξεσπάσει μια πλημμύρα) είναι και το νερό μιας πιθανής πλημμύρας.

Τα υδρολογικά μοντέλα προσομοιώνουν τα υδρορεύματα κάτω από πραγματικές ή προτεινόμενες μελλοντικές συνθήκες. Έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα ποικίλων στρατηγικών αντιμετώπισης των πλημμυρών.

Σε αρκετές χώρες γίνεται στατιστική ανάλυση των τιμών των κατακρημνισμάτων παλαιότερων ετών. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν διαγράμματα έντασης – διάρκειας ή έντασης – συχνότητας, που είναι εκτιμήτριες της κατανομής της έντασης της βροχόπτωσης για διάφορα χρονικά διαστήματα. Επιπλέον

χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις εντάσεις καταιγίδων προσομοίωσης ή σαν δεδομένα εισόδου σ' ένα υδρολογικό μοντέλο προσομοίωσης ( PISTRIKA & TSAKIRIS, 2010).

Η υπόθεση ότι η καταιγίδα και η προκύπτουσα πλημμύρα έχουν άμεση σχέση είναι κρίσιμη στη μέθοδο προσομοίωσης καταιγίδας. Αυτό υπονοεί ότι η μέση ένταση βροχόπτωσης είναι ο κύριος παράγοντας μιας πλημμύρας. Σ' απλές περιπτώσεις αυτή είναι μια λογική υπόθεση. Ωστόσο σε πιο πολύπλοκες περιπτώσεις κι άλλοι παράγοντες συνεισφέρουν σημαντικά στην πιθανότητα εκδήλωσης πλημμύρας. Για παράδειγμα η σοβαρότητα μιας πλημμύρας που προκύπτει από μια δεδομένη καταιγίδα τυπικά εξαρτάται και από τις αρχικές συνθήκες εδαφικής υγρασίας. Στην περίπτωση προσομοιώσεων που εμπεριέχουν ταμιευτήρες νερού (π. χ. λίμνες) η επίδραση μιας πλημμύρας θα εξαρτάται από τα αρχικά επίπεδα στάθμης στους ταμιευτήρες αυτούς.

Μια εναλλακτική προσέγγιση που έχει χρησιμοποιηθεί μερικές φορές στην εκτίμηση του πλημμυρικού κινδύνου, βασίζεται στη συνεχή προσομοίωση. Σε αντίθεση με την προαναφερθείσα μέθοδο, που προσομοιώνει το υδρογράφημα μιας πλημμύρας για μια συγκεκριμένη καταιγίδα, τα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης μπορούν να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά μιας πλημμύρας, ακόμη και κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερα ιστορικά αρχεία δεδομένων ύψους βροχοπτώσεων σαν δεδομένα εισόδου σ' ένα υδρολογικό μοντέλο συνεχούς προσομοίωσης. Η μέθοδος της συνεχούς προσομοίωσης αναγκάζει τον προγραμματιστή να υπολογίσει όλους τους σημαντικούς παράγοντες που αγνοούνται στη μέθοδο προσομοίωσης καταιγίδας.

Τα υδρολογικά μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης δημιουργήθηκαν, ειδικά, για να παριστούν τη χρονική μεταβολή της εδαφικής υγρασίας κατά τη διάρκεια και ανάμεσα σε καταιγίδες. Αυτά τα μοντέλα επιτρέπουν τον υπολογισμό της χωρικής και χρονικής μεταβολής της βροχόπτωσης. Το πόσο ακριβής είναι ο υπολογισμός αυτός εξαρτάται από τα διαθέσιμα δεδομένα και τη χωρική ή χρονική πυκνότητα αυτών. Παρόλα αυτά υπάρχει ένα σοβαρό μειονέκτημα της συνεχούς προσομοίωσης το οποίο έγκειται στη διαθεσιμότητα ωριαίων δεδομένων βροχόπτωσης (Environmental agency Asiantaeth yr Amgylchedd, 2012).

## 2.7 Ωφέλειες και ζημιές από τις πλημμύρες

### 1. Ωφέλειες

Οι αναμενόμενες, συνηθισμένες, πλημμύρες φέρνουν κέρδος στις κοινωνίες που επηρεάζουν. Η τοπική οικονομία και οικολογία συνδέονται άμεσα με την ομαλή μεταβολή της πλημμύρας κατά τη διάρκεια του έτους.

Τα οφέλη από τις πλημμύρες είναι περισσότερα απ' ό,τι αυτά που τυχόν προσφέρουν οι άλλες φυσικές καταστροφές. Οι πλημμύρες σε πεδινές εκτάσεις (floodplains) ισοπεδώνουν τη γη και προσφέρουν σημαντικές ποσότητες νερού για εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφόρου και ύδρευση οικισμών.

Κατά την αρχαιότητα τεράστιες πλημμύρες από τους ποταμούς του Ευφράτη και του Τίγρη (Μεσοποταμία) στήριξαν την ανάπτυξη σπουδαίων πολιτισμών. Μάλιστα κατόρθωσαν να δαμάσουν τις πλημμύρες προς όφελός τους. Φράγματα εμπόδιζαν την κίνηση του νερού προς κατοικημένες περιοχές και μείωναν την ταχύτητα ροής του νερού. Μ' αυτό τον τρόπο αύξαναν το χρόνο παραμονής του νερού στην ίδια θέση. Το επακόλουθο ήταν η αύξηση της κατείσδυσης (infiltration) και η μείωση της επιφανειακής απορροής (surface run – off). Επίσης το εν διαλύσει ίζημα που μεταφέρει το νερό της πλημμύρας καθιζάνει, λόγω ελάττωσης της ταχύτητας ροής, εμπλουτίζοντας το έδαφος σε ουσίες πολύτιμες για την ανάπτυξη των φυτών. Η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ανέβαινε. Περισσότερο νερό ήταν διαθέσιμο για άντληση με σκοπό την ύδρευση οικισμών και την άρδευση καλλιεργειών.

Αντίστοιχη κατάσταση επικρατεί και στην Αίγυπτο εκατέρωθεν του ποταμού Νείλου, όπου η γονιμότητα των εδαφών και η παρουσία υπόγειου υδροφόρου αποδίδεται στις πλημμύρες. Μάλιστα για τον εξηλεκτρισμό της χώρας και την εξάλειψη των κινδύνων της ξηρασίας, που επικρατούσε μεταξύ των διαδοχικών πλημμυρών του Νείλου, κατασκευάστηκε το περίφημο φράγμα του Ασσουάν. Έτσι το νερό που αποθηκεύεται πίσω από το φράγμα χρησιμοποιείται σε περιόδους ξηρασίας και παράλληλα σε περιόδους πλημμύρας ελέγχεται η ποσότητα του διαθέσιμου νερού στον ποταμό.

Ακόμη και σήμερα σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Κίνα εκμεταλλεύονται το πλημμύρισμα πεδινών εκτάσεων στον τομέα της γεωργίας (βλέπε τις φυτείες ρυζιού). Αξίζει να αναφέρουμε την περίπτωση των ουάντι στη Βορειοδυτική Αφρική (Μαρόκο και Αλγερία). Πρόκειται για χείμαρρους με ξηρές κοίτες. Αυτοί κατεβάζουν από τα όρη του Άτλαντα μεγάλες ποσότητες νερού μετά από ξαφνικές καταιγίδες που συμβαίνουν στα ανάντη. Εκατοντάδες μέτρα ή και μερικά χιλιόμετρα μακρύτερα από τη θέση εξόδου των ουάντι στην έρημο της Σαχάρα έχουν κατασκευαστεί φράγματα τοξωτής κάτοψης για να εγκλωβίσουν το νερό, που κατεβάζουν τα ουάντι κάθε δεκαετία ή στην καλύτερη περίπτωση κάθε πενταετία / τριετία. Το νερό

αναγκάζεται μέσω του τεχνητού φράγματος να συγκεντρωθεί και να κατεισδύσει και όχι να κινηθεί επιφανειακά και να εκτεθεί σε συνθήκες ευνοϊκές για εξάτμιση (υψηλές θερμοκρασίες). Το νερό στις περιοχές αυτές είναι πολύτιμο και δεν πρέπει να χαθεί ούτε σταγόνα. Ενώ αλλού ούτε θέλουν να σκέπτονται το ενδεχόμενο μιας πλημμύρας στην εν λόγω περιοχή την περιμένουν, γιατί χωρίς αυτήν κινδυνεύει η επιβίωσή τους, στο ήδη αντίξοο περιβάλλον της ερήμου.

Οι ποτάμιες πλημμύρες κατεβάζουν τεράστιες ποσότητες ιλύος στις εκβολές και σχηματίζουν μεγάλα δελταϊκά οικοσυστήματα, όπως αυτά του ποταμού Νείλου (Αίγυπτος) ή του Γιανγκ Τσε (Κίνα). Τα δέλτα αυτών των ποταμών είναι από τις πιο γόνιμες, γεωργικές περιοχές στον κόσμο. Παράλληλα η οικολογική τους σημασία είναι ανυπολόγιστη μια και είναι υγρότοποι για πολλά είδη. Όταν η ποσότητα του μεταφερόμενου ιζήματος είναι πάνω από ένα όριο αποτελεί βασικό δομικό υλικό νησίδων κατά μήκος της ακτογραμμής. Οι νησίδες αυτές προστατεύουν τη στεριά από τη θαλάσσια διάβρωση και τις ακραίες καιρικές συνθήκες (τροπικές καταιγίδες, τυφώνες).

Πέρα από τη γεωργία, οι πλημμύρες βοηθούν θετικά και άλλες οικονομικές δραστηριότητες όπως την αλιεία, την ποτάμια συγκοινωνία και τη βιομηχανική παραγωγή. Συχνά οι πλημμυρισμένες πεδιάδες δρουν σαν διάδρομοι επικοινωνίας και μεταφοράς αγαθών. Στις Φιλιππίνες μεταφέρονται τεράστιες ποσότητες ξυλείας (μπαμπού) από τις δασικές περιοχές, στα ανάντη, προς τις αγορές, στα κατάντη, εύκολα και οικονομικά.

Οι πλημμύρες συνδέονται με υγρότοπους (wetlands). Οι υγρότοποι αποτελούν σπουδαίους χώρους για πολλά υδρόβια είδη (ερπετά, αμφίβια και πτηνά). Προσφέρουν τροφή και κατοικία και είναι τόποι ξεκούρασης και αναπαραγωγής. Επίσης είναι τοποθεσίες υψηλής αισθητικής και οικολογικής αξίας και εάν έχουμε μια ήπια τουριστική αξιοποίηση αυτών βοηθάμε την επαφή του ανθρώπου με τη φύση (αθλητισμός, παρατήρηση, οικοτουρισμός) και την τόνωση της τοπικής οικονομίας.

#### Άμεσες και πρωτεύουσες, απτές και μη ζημιές

Οι άμεσες ζημιές από τις πλημμύρες σχετίζονται με τις καταστροφές της ιδιοκτησίας και της περιουσίας. Εξαιτίας των επενδύσεων υψηλού επιπέδου σε περιοχές επίφοβες για πλημμύρες, οι ζημιές τείνουν να είναι οι υψηλότερες σε απόλυτες τιμές.

Σε αστικές περιοχές η καταστροφή κατοικιών και δημόσιων κτηρίων (σχολεία, νοσοκομεία κλπ) ανεβάζει το κόστος σε εκατομμύρια δολάρια. Η ανεξέλεγκτη ανάπτυξη των πόλεων σε ακατάλληλα εδάφη και η μεγάλη κτιριακή πυκνότητα, σε συνδυασμό με την απουσία ελεύθερων χώρων και τον κακό πολεοδομικό σχεδιασμό επιδεινώνουν το πρόβλημα. Τα παραπάνω αφορούν, κυρίως, τις αναπτυσσόμενες χώρες. Για παράδειγμα αναφέρεται η περίπτωση της πρωτεύουσας του Σουδάν, Χαρτούμ: Το 1988 η πόλη του Χαρτούμ υπέφερε από καταιγίδες, που είχαν σαν αποτέλεσμα, να πέσει σε μια μέρα ποσότητα βροχής ελαφρώς περισσότερη απ' όση πέφτει, κατά μέσο όρο, όλο το χρόνο. 200.000 κατοικίες καταστράφηκαν, γύρω στα 2.000.000 κάτοικοι έμειναν άστεγοι και πάνω από το 80% των σχολείων του Χαρτούμ υπέστησαν ζημιές ή καταστράφηκαν. Βέβαια τα κτήρια στις αναπτυσσόμενες χώρες είναι ιδιαίτερα επιρρεπή στις πλημμύρες, γιατί τα στάνταρτ σχεδιασμού και κατασκευής είναι χαμηλά. Αυτό μπορεί να το διαπιστώσει κανείς, συγκρίνοντας τις βλάβες σε άψυχο και έμψυχο υλικό από πλημμύρες ίδιας δυναμικότητας σε αναπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες.

Στην ύπαιθρο οι ζημιές μπορεί να είναι στον ίδιο βαθμό υψηλές, ιδιαίτερα, όταν καταστρέφονται σοδειές, αποθέματα ζωοτροφών και λιπασμάτων, γεωργικά συστήματα άρδευσης, τοίχοι και φράχτες. Φυσικά η σπουδαιότερη ζημιά για τους γεωργούς και μάλιστα για τους κτηνοτρόφους είναι η απώλεια των ζώων τους. Τα ζώα είναι η μοναδική πηγή εισοδήματος γι αυτούς και πολλές φορές συντηρούν ακόμη και την ίδια τους την οικογένεια. Γι αυτό ένα οργανωμένο κράτος σπεύδει να αποζημιώσει τους πληγέντες γεωργούς και κτηνοτρόφους αφού ουσιαστικά η πλημμύρα πλήττει τον πρωτογενή τομέα της οικονομίας. Ο τελευταίος με τη σειρά του σε χώρες όπως η Ελλάδα, χωρίς εκτεταμένη βαριά βιομηχανία, συνδέεται με το δευτερογενή τομέα (βιομηχανίες μεταποίησης αγροτικών προϊόντων). Με άλλα λόγια παρατηρούμε ότι μια πλημμύρα μπορεί να πλήξει την οικονομία μιας ολόκληρης χώρας.

Για την αποφυγή των παραπάνω, συνίσταται η κατασκευή, εύκολα, προσβάσιμων καταφυγίων για την προφύλαξη των ζώων αλλά και της σοδειάς σε περίπτωση πλημμύρας. Από την άλλη μεριά στις αναπτυσσόμενες αγροτικές χώρες, όπως είναι η Ινδία, το Μπαγκλαντές και το Βιετνάμ (Ασία) οι μουσώνες (εποχικοί άνεμοι από τον Ινδικό ωκεανό προς την ηπειρωτική Ασία που μεταφέρουν τεράστιες ποσότητες υγρασίας) δίνουν αυξημένες ποσότητες κατακρημνισμάτων. Αυτά προκαλούν ποτάμιες πλημμύρες. Σ' αυτές τις περιπτώσεις τα κράτη αδυνατούν ν' αποζημιώσουν έστω και μερικώς τους πληγέντες οπότε η υλική και οικονομική βοήθεια από διεθνείς οργανισμούς και πλούσια κράτη είναι απαραίτητη.

Οι ζημιές στη γεωργία εξαρτώνται από την εποχή της πλημμύρας, τον τύπο και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται μια καλλιέργεια. Η χρονική σχέση μεταξύ πλημμύρας και συγκομιδής της σοδειάς είναι κρίσιμη όσον αφορά το μέγεθος της ζημιάς. Η καλλιέργεια υφίσταται τη μέγιστη ζημιά όταν η πλημμύρα συμβαίνει λίγο πριν τη συγκομιδή ή κατά τη διάρκειά της. Άλλοι κριτικοί παράγοντες είναι το ύψος του νερού σε σχέση με τον προς συγκομιδή καρπό, ο χρόνος κάλυψης μιας καλλιέργειας από το νερό και η ορμή του νερού προς

τους κορμούς των φυτών. Το γρασίδι αντέχει έως τρεις βδομάδες κάτω από το νερό, ενώ η πατάτα λιγότερο από 24 ώρες. Η μεγάλη ορμή του νερού μπορεί ν' αποκόψει τα φυτά από τις ρίζες τους.

Άλλες άμεσες και πρωτεύουσες ζημιές, αλλά λιγότερο απτές, είναι οι θάνατοι ανθρώπων από τις πλημμύρες κυρίως λόγω πνιγμού ή λόγω θανάσιμου τραυματισμού. Σήμερα οι περισσότεροι θάνατοι συμβαίνουν στις αναπτυσσόμενες χώρες. Εκεί ο συνδυασμός πολύπλοκων και τεράστιων ποτάμιων συστημάτων, ακραίων καιρικών συνθηκών, απουσίας κρατικής μέριμνας λόγω έλλειψης χρημάτων ή αδιαφορίας και ανεπαρκούς ενημέρωσης της κοινής γνώμης είναι η βασική αιτία τραγωδιών. Αναφέρεται χαρακτηριστικά ότι στην Κίνα ο Κίτρινος ποταμός, πιθανότατα, έχει σκοτώσει περισσότερα άτομα απ' ότι όλες οι άλλες φυσικές καταστροφές πάνω στη γη. Το Μπαγκλαντές, το Βιετνάμ και οι Φιλιππίνες είναι μερικές ακόμη ασιατικές χώρες που πλήττονται συχνά από φονικές πλημμύρες. Φονικές πλημμύρες έχουμε και στα κράτη της Λατινικής και Κεντρικής Αμερικής για τους ίδιους λόγους.

Στα πλούσια κράτη οι περισσότεροι θάνατοι οφείλονται σε πνιγμό από ξαφνική πλημμύρα (flash flood) ή πλημμύρα λόγω καταστροφής φράγματος. Αυτές οι μορφές πλημμύρας δεν δίνουν τη δυνατότητα έγκαιρης εκκένωσης κατοικημένων περιοχών οπότε οι απώλειες είναι, ως ένα βαθμό, «δικαιολογημένες». Επίσης δεν έχουμε θανάτους από δευτερεύουσες επιπτώσεις των πλημμυρών όπως είναι η μόλυνση των υδάτων και η καταστροφή της σοδειάς.

### 3. Άμεσες και δευτερεύουσες, απτές και μη ζημιές

Αυτές σχετίζονται με την αποκατάσταση των άμεσων ζημιών. Έτσι το κόστος της ανοικοδόμησης της ιδιοκτησίας μπορεί να είναι ασυνήθιστα υψηλό μετά από μια πλημμύρα, εξαιτίας της έλλειψης εργατών και οικοδομικών υλικών.

Οι θάνατοι από ελονοσία ή χολέρα, γιατί η πλημμύρα μόλυνε τα αποθέματα πόσιμου νερού ή από λοιμό γιατί, καταστράφηκε η σοδειά, εντάσσονται στις άμεσες δευτερεύουσες και μη απτές απώλειες.

#### 4. Εμμεσες και πρωτεύουσες, απτές και μη ζημιές

Στην πρώτη κατηγορία είναι η δυσλειτουργία που επέρχεται στις μεταφορές, στο εμπόριο και στη βιομηχανική παραγωγή λόγω μιας πλημμύρας, ιδίως σε αστικό περιβάλλον

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι ψυχολογικές συνέπειες μιας πλημμύρας στους επιζώντες. Μακροπρόθεσμα το αίσθημα του φόβου τους υποχρεώνει ν' αλλάξουν συνήθειες και τρόπο ζωής κι αυτό μπορεί να επιδράσει αρνητικά στην ανάπτυξη ενός τόπου ακόμη και να οδηγήσει στην ερήμωσή του.

#### 5. Εμμεσες και δευτερεύουσες, απτές και μη ζημιές

Στην πρώτη κατηγορία εντάσσεται η μείωση της οποιασδήποτε μορφής ενέργειας, που καταναλώνει μια κοινωνία, εξαιτίας της μείωσης των δραστηριοτήτων της λόγω μιας πλημμύρας.

Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσεται η έλλειψη εμπιστοσύνης του κόσμου να εγκατασταθεί ή να συνεχίσει να διαμένει σε μια περιοχή που υπέστη την καταστροφική μανία μιας πλημμύρας. (Shohomich county, Washington, 2011) (SOFFAR, 2011) (Annand, 2008).

## 2.8 Το πλημμυρικό φαινόμενο στην Ελλάδα

#### 1. Γενικά

Η πλημμύρα από φυσικά αίτια είτε παρουσιάζει βραδεία εξέλιξη είτε ανήκει στην κατηγορία της ξαφνικής πλημμύρας, που είναι και το πιο συνηθισμένο φαινόμενο στην Ελλάδα. Στον Ελληνικό χώρο οι πλημμύρες οφείλονται σε καταρρακτώδεις βροχές, που συνοδεύουν τη διέλευση υφέσεων.

Ανέκαθεν συνέβαιναν πλημμύρες στον ελληνικό χώρο. Ιστορικά κείμενα και αρχαίοι μύθοι μας πληροφορούν για σημαντικές καταστροφές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η καταστροφή του Μινωικού πολιτισμού από τσουνάμι που έπληξε τις βόρειες ακτές της Κρήτης, απόρροια της έκρηξης του ηφαιστείου της Θήρας γύρω στο 1500 π.Χ. . Επίσης ο μύθος της Ατλαντίδας που, τελευταία, συνδέεται με την προαναφερθείσα ηφαιστειακή έκρηξη. Ποτάμιες πλημμύρες συνέβαιναν σε πεδινές εκτάσεις που διαρρέονται από μεγάλους ποταμούς.

Τα τελευταία χρόνια η κατασκευή φραγμάτων, κατά μήκος των σημαντικότερων ποταμών της χώρας (π.χ. Αλιάκμονας, Νέστος κλπ.), έχει σαν αποτέλεσμα την αποθήκευση της πλεονάζουσας ποσότητας ύδατος, για την άρδευση των καλλιεργειών, την ύδρευση των πόλεων και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι σε συνδυασμό με τη μείωση των κατακρημνισμάτων και τη μεταβολή του κλίματος προς το ξηρότερο τα μεγάλα ποτάμια συστήματα δεν αποτελούν σημαντικό κίνδυνο. Αντίθετα οι χείμαρροι που προσλαμβάνουν το νερό των ξαφνικών νεροποντών σε συνδυασμό με τον μεγάλο αριθμό τους και το μπάζωμα αυτών από τον άνθρωπο είναι επικίνδυνοι. Αν προστεθεί και η αποψίλωση των ορεινών όγκων από τις πυρκαγιές κατανοεί κανείς γιατί οι πλημμύρες τα τελευταία χρόνια πλήττουν όλο και περισσότερο αστικές περιοχές.

Υπάρχουν βέβαια και οι σπάνιες, για τον ελληνικό χώρο, περιπτώσεις των, μικρής κλίμακας, τσουνάμι (Πανούσης, 2015).

Πάντως όπως φαίνεται στο κείμενο που ακολουθεί οι πρόσφατες πλημμύρες συνδέονται με την άναρχη, χωρίς προγραμματισμό, ανάπτυξη της χώρας μας.



Σχήμα 2.1 Υδατικά Διαμερίσματα Χώρας (Οδηγία 2007/60/ΕΚ)



Σχήμα 2.2 Λεκάνες Απορροής και Υδατικά Διαμερίσματα Χώρας

## 3. Η περιοχή του Έβρου

#### 3.1 Η λεκάνη απορροής του ποταμού και οι βασικοί παραπόταμοι

Ο Έβρος είναι ένας ποταμός που εκτείνεται σε τρεις χώρες. Την Ελλάδα, την Τουρκία και την Βουλγαρία. Η λεκάνη απορροής του βρίσκεται και στις τρείς αυτές χώρες, γεγονός που δείχνει το μέγεθος αλλά και την σημαντικότητα του ποταμού. Βέβαια το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής βρίσκεται στην Βουλγαρία καθώς εκεί βρίσκονται 334 ταμιευτήρες, λογικό αν σκεφτεί κανείς ότι στην ουσία η αρχή του ποταμού έχει συνδεθεί με την Βουλγαρία, ενώ στην Τουρκία βρίσκονται 139 ταμιευτήρες. Στην Ελλάδα ο ποταμός έχει μόλις 8 ταμιευτήρες, κάτι που είναι φυσικό, διότι στην Ελλάδα βρίσκεται το τελευταίο κομμάτι του. Στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 3.1) φαίνονται η πορεία του ποταμού από την Βουλγαρία έως το Αιγαίο πέλαγος καθώς και οι ταμιευτήρες σε Βουλγαρία, Τουρκία και Ελλάδα (ΥΠΕΚΑ, 2007).



**Σχήμα 3.1** Οι κουκίδες που παρουσιάζονται στην Ελλάδα, την Βουλγαρία και την Τουρκία είναι οι φυσικοί ταμιευτήρες του ποταμού Έβρου.

Η ονομασία Έβρος είναι η ελληνική ονομασία του ποταμού, καθώς η τούρκικη ονομασία του είναι Meric και η βουλγάρικη είναι Maritza. Επίσης, στην Ελλάδα ο Έβρος είναι συνυφασμένος με τα χερσαία σύνορα

Ελλάδας - Τουρκίας και η περιοχή αυτήν της Βόρειας Θράκης ονομάζεται τριεθνές διότι εκεί συναντώνται τα σύνορα τριών κρατών.

Ο Έβρος διαθέτει τρείς βασικούς παραποτάμους (Πισπιρίγκος, 2008):

1. Τον Tundzha ο οποίος εκτείνεται στην Βουλγαρία και την Τουρκία και συναντά τον ποταμό Έβρο στην Τουρκία κοντά στην περιοχή Edirne.

2. Τον Ergene ο οποίος εκτείνεται ολόκληρος κατά μήκος της Τουρκίας και συναντά τον ποταμό Έβρο κοντά στην πόλη Ipsala.

3. Ο Άρδας ο οποίος εκτείνεται κατά μήκος της Βουλγαρίας και της Ελλάδα με το μεγαλύτερο μέρος του να βρίσκεται στην Βουλγαρία. Συμβάλει στον ποταμό Έβρο κοντά στο χωριό Καστανιές λίγο νότια της Αδριανούπολης.

## 3.2 Το υδατικό διαμέρισμα Θράκης

Το συγκεκριμένο υδατικό διαμέρισμα είναι το δωδέκατο της Ελλάδας, σε αριθμό, εκτείνεται σε μια περιοχή 11.243 Km<sup>2</sup>. Στην συγκεκριμένη μέτρηση υπάρχουν και 564 Km<sup>2</sup> τα οποία ανήκουν στην Σαμοθράκη και στην Θάσο. Το συγκεκριμένο διαμέρισμα ορίζεται βόρεια από τη γραμμή των συνόρων Ελλάδας - Βουλγαρίας και τον υδροκρίτη των λεκανών Νέστου - Οχυρού, ανατολικά από την γραμμή των συνόρων Ελλάδας - Ελλάδας - Τουρκίας μέχρι τον Κόλπο Αίνου, δυτικά από τον υδροκρίτη των παραλιακών ρεμάτων Χρυσούπολης μέχρι τον Κόλπο της Καβάλας.

Το Υ.Δ. Θράκης αποτελείται από πέντε (5) λεκάνες απορροής, Νέστου (GR07) με έκταση 2975,5 km<sup>2</sup>, Ρέματος Ξάνθης – Ξηρορέματος (GR08) με έκταση 1663,6 km<sup>2</sup>, Ρεμάτων Κομοτηνής – Λουτρού Έβρου (GR09) με έκταση 1958,4 km<sup>2</sup>, Έβρου (GR10) με έκταση 4080,9 km<sup>2</sup> και Θάσου – Σαμοθράκης (GR42) με έκταση 564,3 km<sup>2</sup> (ΥΠΕΚΑ, 2016). Στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 3.2) παρουσιάζεται το υδατικό διαμέρισμα Θράκης:



Σχήμα 3.2 Υδατικό Διαμέρισμα Θράκης

Πηγή: http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=rxCshJ9tYHw%3d&tabid=252&language=el-GR

## 3.3 Το Δέλτα του ποταμού Έβρου

Στο Δέλτα του ποταμού Έβρου υπάρχει μια μικρή διαφορά από την επιφάνεια της θάλασσας, όσον αφορά το υψόμετρο, κάτι που κάνει την ροή του ποταμού πιο αργή με αποτέλεσμα η περιοχή εκείνη να έχει ιδιαίτερα εύφορα χωράφια. Στην περιοχή του Λουτρού που βρίσκεται νοτιοδυτικά του δέλτα, κατά την περίοδο των βροχοπτώσεων, εισρέουν και από εκεί γλυκά νερά γεγονός που κάνει τα χωράφια ακόμα πιο αποδοτικά. Βέβαια, η υψομετρική διαφορά βοηθά τον ποταμό για αρκετούς χειμερινούς μήνες να πλημμυρίζει, κάτι που έχει ως συνέπεια να δημιουργούνται πολλές μικρές νησίδες (Καραβιού, Ξηράδι) και λιμνοθαλασσών (Λακί, Μονόλιμνη) και να υπάρχει πλήθος βιοτόπων. Γενικά η όλη περιοχή του Δέλτα του ποταμού Έβρου έχει

έκταση 200.000 στρέμματα όχι όμως όλα σε ελληνικό έδαφος. Τα περισσότερα από αυτά όμως, 150.000, βρίσκονται στην Ελλάδα.

Στην περιοχή έχουν γίνει πολλά αρδευτικά έργα και γενικά η ανθρώπινη δραστηριότητα είναι αρκετά υψηλή γεγονός που θέτει σε κίνδυνο τις φυσικές ισορροπίες καθότι υπάρχουν και οι φυσικές αποξηράνσεις. Ο υγρότοπος μπορεί να λειτουργήσει σαν φίλτρο για τον καθαρισμό του νερού από την ρύπανση αλλά μπορεί να εμποδίσει και το αλμυρό νερό να έρθει προς την ξηρά, επίσης μπορεί να επηρεάσει θετικά και το κλίμα της περιοχής. Έχει ιδιαίτερα θετικά οικονομικά αποτελέσματα καθότι βοηθά τον άνθρωπο να αναπτύξει την αλιεία, την γεωργία και την κτηνοτροφία. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται αυτήν την στιγμή είναι η κάθοδος της στάθμης των υπόγειων και επιφανειακών νερών λόγω όλων των αντιπλημμυρικών έργων (διοχέτευσαν μεγάλη ποσότητα γλυκού νερού στην θάλασσα). Επιπρόσθετα και η κατασκευή αποστραγγιστών και αρδευτικών καναλιών επηρέασε αρνητικά (ΥΠΕΚΑ, 2013).

Στην παρακάτω φωτογραφία (Σχήμα 3.3) φαίνεται το Δέλτα του ποταμού Έβρου από το Google maps:



Σχήμα 3.3 Δέλτα ποταμού Έβρου

Πηγή:

## 3.4 Οι πλημμύρες στον ποταμό Έβρο

Τα τελευταία χρόνια τρεις είναι οι μεγάλες πλημμύρες που επηρέασαν την ζωή των ανθρώπων της Θράκης. Η πρώτη ήταν το 1997, η δεύτερη το 1998 και η τρίτη το 2003. Οι τρείς αυτές πλημμύρες γέμισαν με νερό αμέτρητα στρέμματα καλλιεργειών, δρόμων ενώ κατέστρεψαν πολλά μηχανήματα και πολλές εγκαταστάσεις κτηνοτρόφων. Επηρεάστηκαν μέχρι και οι συγκοινωνίες καθώς τα τρένα δεν μπορούσαν να περάσουν γιατί η σιδηροδρομική γραμμή είχε καλυφθεί από νερό. Μια μεγάλη πλημμύρα έγινε και το 2015 η οποία είχε και αυτήν καταστροφικές συνέπειες. Η παρακάτω φωτογραφία (Σχήμα 3.4) είναι από το χωριό Λαγυνά (Pathfinder, 2015):



Σχήμα 3.4 Χωριό Λαγυνά

Πηγή: http://www.pathfinder.gr/news/4174204/fwtografies-apo-to-plhmmyrismeno-hwrio-lagyna-ston-ebro/

Σύμφωνα με τον Μπεζιργιαννίδη (2007) βασικότερες αιτίες που δημιουργούνται αυτές οι πλημμύρες θεωρούνται οι παρακάτω:

1. Η αλλαγή του κλίματος η οποία συντέλεσε στην αύξηση των πλημυρών καθώς τα μετεωρολογικά φαινόμενα γίνονται όλο και πιο ισχυρά.

2. Τα τελευταία χρόνια (δεκαετίες) στην κοίτη του Έβρου έχουν γίνει αρκετά αρδευτικά έργα, τα οποία ναι μεν πρόσφεραν στον τοπικό πληθυσμό αρκετές περιοχές που είναι καλλιεργήσιμες, όμως αυτά τα έργα έγιναν χωρίς σοβαρή μελέτη με αποτέλεσμα να μειωθεί η κοίτη των πλημμυρών. Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι μειώθηκε και η απαραίτητη για τον ποταμό έκταση εκτόνωσης με επακόλουθο τις μεγαλύτερες πλημμύρες.

3. Ένας τρίτος και ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας είναι οι πυρκαγιές και το κόψιμο των δασών για λόγους υλοτομίας. Όλη αυτήν η καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος οδηγεί αρκετά φερτά προς τον ποταμό τα οποία στέκονται στην κοίτη και σχηματίζουν προσχώσεις και νησίδες. Όλο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειωθεί η κοίτη του ποταμού κάνοντάς τον πιο επικίνδυνο για πλημμύρες.

Γενικώς το πρόβλημα του ποταμού ξεκινά από το στένεμα της κοίτης. Όλη αυτή η διαδικασία μείωσε το πλάτος του από τα 1500 μέτρα στα 150 - 200 μέτρα και αυτό δεν έγινε μόνο στην ελληνική πλευρά αλλά και στην τούρκικη. Σε συνδυασμό με τις φερτές ύλες που ήρθαν από τον Ερυθροπόταμο, τον Άρδα και τον Εργίνη αλλά και με τα αναχώματα που έγιναν για να μην πλημμυρίζουν οι καλλιέργειες, η κατάσταση του ποταμού επιδεινώθηκε.

Το μεγάλο πρόβλημα για να επιδιορθωθεί η όλη κατάσταση στον ποταμό Έβρο είναι ότι ο ίδιος εκτείνεται σε 3 χώρες και αυτές θα πρέπει να συνεργαστούν μεταξύ τους. Στις αρχές του 1970 υπήρξε μια προσπάθεια συνεργασίας Ελλάδας - Βουλγαρίας για να γίνουν κάποια αναχώματα στην κεντρική κοίτη όμως η Βουλγάρικη πλευρά τότε αντιμετώπιζε αρκετά οικονομικά προβλήματα και δεν μπορούσε να δώσει προτεραιότητα στο συγκεκριμένο θέμα. Στα σύνορα Ελλάδας - Τουρκίας η πραγματικότητα διαφέρει αισθητά. Αν και έχουν γίνει κατά το παρελθόν προσπάθειες οι σχέσεις των δύο χωρών δεν ήταν ποτέ οι καλύτερες με αποτέλεσμα τα έργα στον ποταμό Έβρο να μην υλοποιούνται.

## 3.5 Η γεωγραφία της λεκάνης απορροής στον ελληνικό χώρο

Την λεκάνη απορροής του ποταμού Έβρου την έχουν διαμορφώσει τριτογενή τεκτονικά βυθίσματα που σχηματίστηκαν από τα περιθωριακά ρήγματα της μάζας της Ροδόπης. Υπάρχουν δύο βασικές λεκάνες στον ελληνικό χώρο, αυτή της Αλεξανδρούπολης και αυτή της Ορεστιάδας. Αυτή της Αλεξανδρούπολης είναι στην ουσία το νότιο τμήμα του Έβρου στην Ελλάδα και η λεκάνη της Ορεστιάδας είναι στην ουσία το βόρειο τμήμα, περιλαμβάνοντας όμως και τις λεκάνες του Ερυθροπόταμου και του Άρδα (ΥΠΕΚΑ, 2013). Στο παρακάτω Σχήμα 3.5 φαίνεται η μορφολογία του τριτογενούς βυθίσματος Ορεστιάδας.



Σχήμα 3.5 Μορφολογία του τριτογενούς βυθίσματος Ορεστιάδας

Πηγή: http://www.minagric.gr/ardeftika/files/results/hydro/1.%20HYDRO\_EVROU.pdf

Όπως αναφέρει το Υπουργείο Αγροτικής ανάπτυξης σε συνεργασία με το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης:

«Από γεωμορφολογικής πλευράς πρόκειται για ένα ανομοιόμορφο τοπογραφικό ανάγλυφο που άλλοτε είναι αδρό, άλλοτε πιο έντονο και άλλοτε αρκετά ήπιο. Χαρακτηρίζεται από ένα ορεινό τμήμα, το οποίο για το μεν βύθισμα της Αλεξανδρούπολης αναπτύσσεται προς τα βόρεια και βορειοδυτικά, ενώ για το βύθισμα της Ορεστιάδας προς τα δυτικά. Σε όλη την περιοχή κυριαρχεί ένα λοφώδες έως ημιλοφώδες τμήμα, το οποίο αναπτύσσεται νοτιότερα της ορεινής ζώνης, στο βύθισμα της Αλεξανδρούπολης, καταλαμβάνοντας μεγάλη έκταση και σχεδόν σε όλο το βύθισμα της Ορεστιάδας, το οποίο διακόπτεται κατά θέσεις από τα πεδινά τμήματα των ποταμών Άρδα, Ερυθροποτάμου και του μικρότερου χειμάρρου του Νεοχωρίου. Το πεδινό – ημιλοφώδες τμήμα της Ορεστιάδας, όπως ονομάζεται από την Διαχειριστική Μελέτη της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας Θράκης, έχει έκταση 835,08 km2, μέγιστο μήκος 57 km, μέγιστο πλάτος 27 km. Το πεδινό τμήμα στο βύθισμα της Αλεξανδρούπολης ταυτίζεται με το Δέλτα του ποταμού Έβρου και με μια ζώνη μικρού πλάτους κατά μήκος αυτού ανάντη, από το Διδυμότειχο μέχρι το Πέπλο. Το τμήμα αυτό σύμφωνα με τα Διαχειριστικά Σχέδια του ΥΠΕΚΑ, χωρίζεται σε δύο επιμέρους τμήματα, στο τμήμα Διδυμοτείχου – Σουφλίου, το οποίο όμως περιλαμβάνει και την δυτική έκταση της λεκάνης του Έβρου και έχει έκταση 224,65 km2, μέγιστο μήκος 33 km, μέγιστο πλάτος 15 km» (Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων, 2013).

## 3.6 Τα αντιπλημμυρικά και διευθέτησης ροής έργα στην περιοχή του Έβρου

Το 1971 έως και το 1974 έγιναν τα πρώτα έργα στην περιοχή των συνόρων Ελλάδας - Βουλγαρίας. Ήταν έργα τα οποία μπορούσαν να διευθετήσουν την κοίτης του ποταμού αλλά ταυτόχρονα έγιναν και έργα ευθυγράμμισης. Αυτό που έγινε ήταν να δημιουργηθούν κύρια αναχώματα που είχαν το ίδιο ύψος και στις δύο πλευρές όπως επίσης έγινε και κάποια ανταλλαγή εδαφών η οποία αποσκοπούσε στην ευθυγράμμιση του ποταμού. Ο ποταμός σε εκείνη την περιοχή αποτελεί το σύνορο μεταξύ των δύο χωρών όπως φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία (Σχήμα 3.6) η οποία είναι πάνω από το χωριό Δίκαια.



**Σχήμα 3.6** Χωριό Δίκαια Πηγή: Google maps

Το 2012 ήταν η μοναδική φορά που στην συγκεκριμένη περιοχή δημιουργήθηκε φαινόμενο πλημμύρας και στην οποία είχε πληγεί το χωριό Ορμένιο και φυσικά αρκετές γεωργικές εκτάσεις. Βέβαια, η πλημμύρα αυτή προήλθε λόγω της θραύσης ενός φράγματος στην Βουλγαρία, ονόματος Ιvanovo και όχι σε κάποιο φυσικό φαινόμενο ή σε ελλιπή αντιπλημμυρική προστασία. Στην περιοχή υπάρχουν αρκετές νησίδες από φερτά υλικά. Την περίοδο 1978 - 1984 οι τοπικές υπηρεσίες μέτρησαν πάνω από 1.000.000 m3, ποσότητα αρκετή για να μειωθεί η υδραυλική διατομή του Έβρου (ΥΠΕΚΑ, 2013).

Στα ελληνοτουρκικά σύνορα η κατάσταση είναι εντελώς διαφορετική. Στο σημείο υπάρχουν οι απορροές των Άρδα, Τούντζα, Ερυθροπόταμου και Εργίνη οπότε ο κίνδυνος πλημμύρας είναι σαφώς μεγαλύτερος, οπότε και τα αντιπλημμυρικά έργα είναι περισσότερα. Μετά το τέλος του Α΄ Παγκοσμίου πολέμου και την καταστροφική πλημμύρα του 1940 οι δύο πλευρές συμφώνησαν να κάνουν από κοινού αντιπλημμυρικά έργα. Όπως αναφέρθηκε όμως η συνεργασία των δύο χωρών δεν ήταν ποτέ η καλύτερη, με αποτέλεσμα πολλές φορές που κάποια αναχώματα καταστρέφονταν από πλημμύρες, τα έργα επανόρθωσης να είναι ανομοιόμορφα από τις δύο πλευρές.

Στην μελέτη Harza, που έγινε με βάση την πλημμύρα του 1940 εκτιμήθηκε ότι η μέγιστη παροχή στις εκβολές θα έφτανε έως τα 10.000 m3/s. Με βάση αυτήν την μελέτη τα αναχώματα που δημιουργήθηκαν ήταν:

- 1. Στο τμήμα ανάντη της συμβολής του Άρδα
- 2. Στο τμήμα κατάντη συμβολής Άρδα και ανάντη συμβολής Τούντζα
- 3. Στο τμήμα κατάντη συμβολής Τούντζ και ανάντη συμβολής Ερυθροπόταμου
- 4. Στο τμήμα κατάντη συμβολής Ερυθροπόταμου και ανάντη συμβολή Εργίνη
- 5. Στο τμήμα κατάντη συμβολή Εργίνη και μέχρι εκβολές Έβρου.

Για τις πλημμύρες που θα υπερέβαιναν τα αναχώματα τότε υπήρχαν τμήματα ρήξεως όπου θα έδιναν μια ασφαλή διέξοδο σε αυτήν, με σκοπό την προστασία των κύριων αναχωμάτων. Η κατασκευή των έργων της μελέτης Harza ολοκληρώθηκε το 1963.

Σε πολλές περιοχές όμως κατασκευάστηκαν και υπερβλητά αναχώματα τα οποία είχαν ως σκοπό την προστασία των παρόχθιων περιοχών από τις υψηλές παροχές του χειμώνα. Τα υπερβλητά αναχώματα είναι ένα αρκετά σημαντικό έργο καθώς σήμερα, μετά από διαρκείς βελτιώσεις, έχουν φτάσει όλα τα 3 μέτρα ύψος και υφίστανται σε όλες τις παρέβριες εκτάσεις. Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται όλα τα υπερβλητά αναχώματα της ελληνικής πλευράς:

A/A	Α Θέση υπερβλητού αναχώματος		Έκταση που προστατεύει (στρ.)	
1	Ανάχωμα Πετάλου – Πέπλου	10,5	7.000	
2	Ανάχωμα Κήπων - Πέπλου — Πόρου	12,5	9.000	
3	Ανάχωμα Γεμιστής	3,5	3.000	
4	Ανάχωμα Τυχερού	8,5	8.000	
5	Ανάχωμα Λυκόφης – Λαγυνών	10,0	9.000	
6	Ανάχωμα Κορνοφωλιάς	4,5	3.000	
7	Ανάχωμα Σουφλίου	6,5	6.000	
8	Ανάχωμα Μάνδρας	2,0	1.000	
9	Ανάχωμα Αμορίου – Λαβάρων	14,5	13.500	
10	Ανάχωμα Νέων Ψαθάδων	2,5	2.000	
11	Ανάχωμα Διδυμότειχου - Πραγγίου – Πετράδων	12,0	10.000	
12	Ανάχωμα Πυθίου – Ριγίου	20,0	17.000	
13	Ανάχωμα Πυθίου - Θουρίου - Ορεστιάδας - Βύσσας	12,5	12.000	
	ΣΥΝΟΛΟ	119,5	100.500	

#### Πίνακας 3.1 Υπέρβλητα αναχώματα Έβρου

#### Πηγή : http://floods.ypeka.gr/images/yd12-thraki/P1\_PA\_GR10\_V2.pdf

Στις περιοχές Αινήσου Δέλτα και Πτάλου - Πέπλου έχουν γίνει δύο ευθυγραμίσεις της κοίτης του ποταμού. Επίσης και στις Φέρρες έχει γίνει μια ευθυγράμμιση από την πλευρά της Τουρκίας. Ήταν να γίνει ακόμα μία ευθυγράμμιση στην περιοχή Γεμιστής - Τυχερού αλλά λόγω των κακών σχέσεων των δύο χωρών δεν έγινε ποτέ. Επίσης υπήρξαν και αποστραγγιστικά έργα. Μετά το πέρας των έργων της μελέτης Harza, οι χείμαρροι Καλαιτζής, Διαβολόρεμα και Αρδανίου αποκόπηκαν από τον ποταμό με αποτέλεσμα να κατασκευαστούν δύο συλλεκτήρες (τάφροι) ο Δυτικός Βραχίονας και Σαραντάμετρος. Επίσης, δημιουργήθηκαν στις Φέρρες και τα αποχετευτικά αντλιοστάσια. Σε αυτές τις αποστραγγιστικές τάφρους όπως επίσης και στην ευθυγράμμιση του Αινήσιου Δέλτα έχουν κατασκευαστεί χαμηλοί αναβαθμοί που έχουν ως σκοπό λειτουργείας την αποκοπή της διείσδυσης θαλασσινού νερού.

Σημαντικά αντιπλημμυρικά έργα είναι και τα 8 φράγματα που έχουν κατασκευαστεί στον ελληνικό χώρο. Υπάρχουν και άλλα φράγματα που είναι υπό μελέτη όπως το Μανθεία ή το φράγμα Δερείου και αναμένεται έγκριση τους. Αναλυτικά τα φράγματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2:

Ονομασία	Θέση	Ωφέλιμος όγκος (MCM)	Συνολικός όγκος (MCM)	Ύψος (m)	Χρήση
Άρδα <del>–</del> Θεραπείου	Άρδας, Ελληνοβουλγαρικά σύνορα, νότια Μηλέας και Κυπρίνου	4,0	4,0		Άρδευση
Αρδάνιο <del>-</del> Καβησσός	Μέγα ρέμα, βόρεια Φερών, Αρδανίου και Καβησσού		1,4	17	Άρδευση
Αισύμης <del>–</del> Λουτρού <sup>(1)</sup>	Ρ. Λουτρού, νοτιοανατολικά Αισύμης		13,5	44	Ύδρευση
Καλύβας - Κομαρών	Ρ. Καλύβα, βόρεια Κυπρίνου, νότια Κομαρών		8,5	38	Άρδευση
Λύρας	Μαυρόρεμα, βορειοανατολικά Λύρας και Λαγυνών	1,42	1,5	20	Άρδευση
Προβατώνα	Ρ. Ξέφωτο, βόρεια Λευκίμης, Προβατώνα και Τυχερού	0,78	0,87	16	Άρδευση
Τυχερό Ι	Στα δυτικά όρια οικισμού Τυχερού		≈ 0,50		Αναψυχή
Τυχερό ΙΙ	Στα δυτικά όρια οικισμού Τυχερού		≈ 0,30		Αναψυχή

#### Πίνακας 3.2 Φράγματα Έβρου

Πηγή : http://floods.ypeka.gr/images/yd12-thraki/P1\_PA\_GR10\_V2.pdf
Υπάρχουν και μερικά ακόμα έργα που υποβοηθούν τα βασικά αντιπλημμυρικά έργα. Κάποια από αυτά είναι ο σιδηρόδρομος Αλεξανδρούπολης - Ορεστιάδας, η Εγνατία οδός και μια τάφρος που κατασκευάζει ο στρατός την οποία εξετάζει να εντάξει στο πλαίσιο της αντιπλημμυρικής προστασίας των περιοχών που διέρχεται (ΥΠΕΚΑ, 2007).

## 4. Ενεργά (ραντάρ) δορυφορικά συστήματα παρατήρησης της γης (eo)

Τον Ιανουάριο του 2015, ο ποταμός Shire στο Μαλάουι και ο ποταμός Ζαμβέζης στην Μοζαμβίκη ήταν υπό αυστηρό έλεγχο. Μετά από εβδομάδες καταρρακτωδών βροχών τα δύο αυτά ποτάμια ξεχείλισαν εκτοπίζοντας 390.000 ανθρώπους από την περιοχή που ζούσαν. Στο νότιο Μαλάουι 220.000 στρέμματα γεωργικής γης μετατράπηκαν σε λίμνη κόβοντας δρόμους, ταλαιπωρώντας χιλιάδες ανθρώπους. Η πλημμύρα ήταν καταστροφική για την χώρα και έτσι η κυβέρνηση την κήρυξε σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης. Μέσα σε 72 ώρες το Παγκόσμιο Επισιτιστικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών ήταν στο έδαφος διανέμοντας τρόφιμα στους κατοίκους. Η γρήγορη αντίδρασή τους υποστηρίχθηκε από έγκαιρες προειδοποιήσεις του WFP's Emergency Preparedness & Support Division στην Ρώμη, όπου η μετεωρολόγος Emily Niebuhr και οι συνεργάτες της είχαν την δυνατότητα να ελέγχουν για πλημμυρικά φαινόμενα στην περιοχή με δορυφόρους και δεδομένα της NASA.

Οι πλημμύρες αποτελούν μια από τις πιο καταστροφικές και δαπανηρές φυσικές καταστροφές. Σύμφωνα με στοιχεία των Ηνωμένων Εθνών, οι πλημμύρες, κάθε χρόνο προκαλούν καταστροφές αξίας 13,7 δισεκατομμυρίων δολαρίων ενώ επηρεάζουν 96.900.000 ανθρώπους σε όλο τον κόσμο. Θα πλημμυρίσουν ή θα καταστρέψουν κατοικίες, θα μολύνουν πόσιμο νερό και θα εξαφανίσουν καλλιεργήσιμες εκτάσεις, ενώ σε αναπτυσσόμενες χώρες μπορούν μεταδώσουν ακόμα και ασθένειες. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, με περιορισμένες υποδομές, ο εντοπισμός των πλημμυρών μπορεί να βοηθήσει του ιθύνοντες και να ενισχύσει την προσπάθειά τους για την πρόληψη πολλών καταστροφών. Αλλά δεν είναι πάντα εύκολο να προβλεφθούν οι βροχοπτώσεις, που συνήθως προκαλούν τις πλημμύρες, για αυτό το Παγκόσμιο Επισιτιστικό Πρόγραμμα μετατρέπεται σε πρόγραμμα με βάση τα στοιχεία δορυφόρων που έχουν τα κατάλληλα εργαλεία για να βοηθήσουν και να αξιολογήσουν τις συνθήκες της κάθε Χώρας. Τα δεδομένα από μετεωρολογικούς δορυφόρους μπορούν να είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την πρόβλεψη των πλημμυρών, όμως για να γίνει η σωστή αξιοποίηση αυτών των εργαλείων θα πρέπει να ενταχθούν σε προγράμματα όπως στο Σύστημα Παρακολούθησης παγκόσμιων κατακλυσμών από το Πανεπιστήμιο του Μέριλαντ (NASA, 2015).

## 4.1 Η τεχνολογία των RADAR (SAR)

Πολυάριθμες μελέτες από το παρελθόν έδειξαν ότι τα συστήματα SAR είναι τα κατάλληλα εργαλεία για την χαρτογράφηση των πλημμυρών, χάρη στην υψηλή ευαισθησία στο νερό και την ικανότητά τους να παρέχουν δεδομένα και την ημέρα και το βράδυ, ανεξάρτητα από την συννεφιά που επικρατεί. Σήμερα, οι πιο κοινές προσεγγίσεις που κάνουν χρήση της παρατήρησης της γης για την χαρτογράφηση των πλημμυρών βασίζονται σε δεδομένα από SAR. Έτσι, τα δεδομένα των SAR διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο για τους οργανισμούς που διαχειρίζονται τον κίνδυνο των πλημμυρών. Αν και τα τελευταία χρόνια πολλές πρόοδοι έχουν γίνει για την χαρτογράφηση των πλημμυρών σε πραγματικό χρόνο αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί με την παρούσα τεχνολογία διότι σε σύνθετα περιβάλλοντα όπως είναι περιοχές με βλάστηση ή αστικές περιοχές τα δεδομένα των ραντάρ είναι αρκετά ασαφή ( Chini, et al., 2016).

## 4.1.1 Η Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη της λήψης πληροφοριών σχετικά με αντικείμενα ή περιοχές από απόσταση, συνήθως από αεροσκάφη ή δορυφόρους. Απομακρυσμένοι αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα από την ανίχνευση της ενέργειας που ανακλάται από τη Γη. Αυτοί οι αισθητήρες είναι που τοποθετούνται σε ένα αεροσκάφος ή σε έναν δορυφόρο.

Οι απομακρυσμένοι αισθητήρες μπορεί να είναι είτε παθητικοί ή ενεργητικοί. Οι παθητικοί ανταποκρίνονται σε εξωτερικά ερεθίσματα, καταγράφουν την φυσική ενέργεια που ανακλά ή εκπέμπει η επιφάνεια της Γης. Η πιο κοινή πηγή ακτινοβολίας που ανιχνεύεται από τους παθητικούς αισθητήρες είναι το φως του ήλιου. Σε αντίθεση με τους παθητικούς, οι ενεργητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν εξωτερικά ερεθίσματα για να συλλέξουν δεδομένα σχετικά με τη Γη. Για παράδειγμα, ένα λέιζερ πορείας τηλεπισκόπησης προβάλει ένα λέιζερ πάνω στην επιφάνεια της Γης και μετρά τον χρόνο που χρειάζεται για αντανακλαστεί πίσω στον αισθητήρα.

Η τηλεπισκόπηση έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε διάφορους τομείς όπως είναι οι παράκτιες εφαρμογές που γίνεται παρακολούθηση αλλαγών ακτογραμμών, μεταφορά ιζημάτων κλπ. Επίσης, εφαρμόζεται και στην ωκεανογράφηση όπου γίνεται παρακολούθηση των ωκεάνιων ρευμάτων, μέτρηση της θερμοκρασίας και το

ύψος των Ωκεανών κλπ. Ένα ακόμα παράδειγμα εφαρμογής της είναι στη διαχείριση φυσικών πόρων όπως παρακολούθηση της χρήσης της γης και του χάρτη των υγροτόπων και βιοτόπων κλπ. και φυσικά στην αξιολόγηση της επικινδυνότητας φυσικών καταστροφών όπως είναι οι τυφώνες, οι σεισμοί και οι πλημμύρες (National Ocean Service of USA, 2016).

#### 4.1.2 Βασική λειτουργία των RADAR

Τα Synthetic Aperture Radar (SAR) είναι ένα εναέριο ή διαστημικό σύστημα ραντάρ πλευρικής τηλεσκόπισης, το οποίο χρησιμοποιεί τον διάδρομο πτήσης του για να εξομοιώσει μια τεράστια κεραία ή διάφραγμα σε ηλεκτρονική μορφή, κάτι που δίνει ως αποτέλεσμα υψηλής ποιότητας εικόνες τηλεσκόπησης. Ο τρόπος λειτουργίας του γίνεται με χρονικούς κύκλους. Κατά την πάροδο ενός χρονικού κύκλου συμπληρώνονται τα δεδομένα που έχει συλλέξει και αποθηκεύονται ηλεκτρονικά. Για την επεξεργασία του σήματος χρησιμοποιούνται το μέγεθος και η φάση των λαμβανόμενων σημάτων κατά τη διάρκεια διαδοχικών παλμών από τα στοιχεία ενός συνθετικού διαφράγματος. Μετά από ένα δεδομένα αριθμό κύκλων, τα αποθηκευμένα δεδομένα ανασυνδυάζονται (λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο Doppler που υπάρχει στον πομπό με στόχο την γεωμετρία σε κάθε επιτυχημένο κύκλο) για να δημιουργήσουν μια εικόνα υψηλής ανάλυσης του εδάφους.

Τα SAR λειτουργούν παρόμοια με τις κεραίες που έχουν συγχρονισμένες συστοιχίες αλλά αντίθετα με αυτές, που διαθέτουν ένα αριθμό παράλληλων στοιχείων, χρησιμοποιούν μια κεραία η οποία λειτουργεί με χρονικά διαστήματα. Οι διαφορετικές γεωμετρικές θέσεις των στοιχείων της κεραίας είναι αποτέλεσμα της κινούμενης πλατφόρμας. Ο επεξεργαστής των SAR επιστρέφει σήματα (πλάτος και φάση) για χρονικό διάστημα T από την θέση A έως D. Επίσης, είναι δυνατό να αποκωδικοποιήσει το σήμα που θα ληφθεί από μια κεραία μήκους n \* T όπου n είναι η ταχύτητα της πλατφόρμας. Καθώς η γραμμή των αλλαγών κατεύθυνσης όρασης κατά μήκος της τροχιάς του ραντάρ αλλάζει ένα συνθετικό διάφραγμα παράγεται, αν γίνει σωστή επεξεργασία του σήματος, που έχει ως αποτέλεσμα την επιμήκυνση της κεραίας. Όταν κάποιος στόχος εισέρχεται στην ακτίνα του ραντάρ, τότε το σήμα που γυρίζει στο ραντάρ πάλλεται και αρχίζουν να καταγράφονται οι αλλαγές. Καθώς η πλατφόρμα συνεχίζει να κινείται προς τα εμπρός, όλοι οι απόηχοι από τον στόχο για κάθε παλμό καταγράφονται, για το χρονικό διάστημα που ο στόχος θα παραμείνει στην ακτίνα του ραντάρ. Το σημείο που ο στόχος φεύγει από την ακτίνα του ραντάρ καθορίζει το μήκος της κεραίας που προσομοιώνεται. Το συντεθέν επεκταμένο εύρος ακτίνας, συνδυάζεται με τον αυξημένο χρόνο που παραμένει το αντικείμενο στον στόχο (λόγω της προηγούμενης επέκτασης του εύρους ακτίνας) καθώς αυξάνεται η απόσταση ραντάρ - αντικειμένου για να ισορροπήσουν το ένα με το άλλο έτσι ώστε η ανάλυση να παραμείνει σταθερή σε ολόκληρη την λωρίδα.

Η επιτεύξιμη ανάλυση αζιμούθιου ενός SAR είναι περίπου ίση με το μισό του μήκους μιας πραγματικής κεραίας και δεν εξαρτάται από το ύψος της πλατφόρμας. Ένα SAR θα πρέπει να είναι σταθερό, να έχει έναν πλήρη συνεκτικό πομπό και ένα ισχυρό επεξεργαστή καθώς και να υπάρχει η ακριβής γνώση της πορείας πτήσης και της ταχύτητας της πλατφόρμας. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τεχνικές οι σχεδιαστές των ραντάρ είναι σε θέση να επιτύχουν αποτελέσματα που θα απαιτούσαν κεραίες μήκους 10 μέτρων. Τα SAR χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά σε διαστημικές αποστολές που χρησιμοποιούνται στην τοπογραφία, μετεωρολογία κλπ. αλλά εκεί χρησιμοποιείται ο όρος ανεστραμμένο SAR διότι χρησιμοποιείται η κίνηση του στόχου και όχι του πομπού για να δημιουργηθεί το συνθετικό διάφραγμα (Wolff, 2013).

## 4.2 Το πρόγραμμα Copernicus

#### 4.2.1 Γενικά για το πρόγραμμα

Το σύστημα Copernicus είναι το πιο φιλόδοξο μέχρι σήμερα μη στρατιωτικό πρόγραμμα γεωσκόπησης. Είναι στην ουσία ένα ευρωπαϊκό σύστημα για την παρακολούθηση της Γης. Το πρόγραμμα αποτελείται από ένα σύνολο συστημάτων που συλλέγουν δεδομένα από πολλαπλές πηγές όπως είναι:

- Δορυφόροι παρατήρησης της γης

και in situ αισθητήρες όπως:

- επίγειους σταθμούς
- εναέριους αισθητήρες
- αισθητήρες θαλάσσης

Όλα αυτά τα δεδομένα επεξεργάζονται έτσι ώστε να παρέχονται στους χρήστες ενημερωμένες (up-to-date) πληροφορίες μέσω μιας σειράς υπηρεσιών που σχετίζονται με θέματα περιβάλλοντος και ασφάλειας.

Οι υπηρεσίες του προγράμματος αντιστοιχούν σε έξι θεματικούς τομείς:

1. τη γη

- 2. τη θάλασσα
- 3. την ατμόσφαιρα
- 4. την αλλαγή του κλίματος
- 5. τη διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης

6. την ασφάλεια

Το πρόγραμμα υποστηρίζει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών που συμπεριλαμβάνουν την προστασία του περιβάλλοντος, τη διαχείριση των αστικών περιοχών, τον περιφερειακό και τοπικό σχεδιασμό, τη γεωργία, τη δασοκομία, την αλιεία, την υγεία, τις μεταφορές, την κλιματική αλλαγή, τη βιώσιμη ανάπτυξη, την προστασία των πολιτών και του τουρισμού.

Οι κύριοι χρήστες των υπηρεσιών του Copernicus είναι δημόσιες αρχές και νομοθέτες που χρειάζονται τις πληροφορίες για την ανάπτυξη της περιβαλλοντικής νομοθεσίας και των πολιτικών θεμάτων ή να λάβουν κρίσιμες αποφάσεις σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, όπως μια φυσική καταστροφή ή μια ανθρωπιστική κρίση. Με βάση τις υπηρεσίες και τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω των αποστολών, πολλές υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας μπορούν να προσαρμοστούν στις συγκεκριμένες δημόσιες ή εμπορικές ανάγκες με σκοπό να δημιουργηθούν νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες. Στην πραγματικότητα πολλές οικονομικές μελέτες έχουν ήδη δείξει ένα τεράστιο δυναμικό για τη δημιουργία θέσεων εργασίας, την καινοτομία και την ανάπτυξη (copernicus.eu, 2016).

Τα δεδομένα και οι υπηρεσίες του προγράμματος Copernicus είναι διαθέσιμα σε πλήρη, ανοικτή και χωρίς χρέωση βάση δεδομένων για τους χρήστες, συμπεριλαμβανομένων των θεσμικών οργάνων της ΕΕ, τις αρχές των κρατών μελών, του ιδιωτικού τομέα για την ανάπτυξη των εμπορικών εφαρμογών και υπηρεσιών, των διεθνών εταιρειών, της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας και των ενδιαφερόμενων πολιτών (European Commision, 2015).

### 4.2.2 Οι δορυφόροι του προγράμματος Copernicus

Η παροχή των υπηρεσιών του προγράμματος Copernicus βασίζεται στην επεξεργασία των περιβαλλοντικών δεδομένων που συλλέγονται από δορυφόρους παρατήρησης και από in situ αισθητήρες. Οι δορυφόροι παρατήρησης της Γης οι οποίοι παρέχουν τα δεδομένα που αξιοποιούνται από τις υπηρεσίες χωρίστηκαν σε δύο ομάδες αποστολών:

1. Τους Sentinels, που αναπτύσσονται επί του παρόντος για τις ειδικές ανάγκες του προγράμματος. Αυτοί είναι οι Sentinel -1, -2, - 3, -5P και -6 που είναι δορυφόροι αποστολών.

2. Τους Sentinel - 4 και -5 που είναι δορυφόροι ελέγχου του καιρού και ανήκουν στον οργανισμό EUMETSAT, ο οποίος παρέχει στήριξη στις υπηρεσίες του Copernicus και είναι αρμόδιος για την παρακολούθηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, της ατμόσφαιρας και της κλιματικής αλλαγής.

Επίσης υπάρχους οι συμβάλλουσες αποστολές που είναι εθνικές ή ανήκουν σε ευρωπαϊκούς και διεθνείς οργανισμούς και παρέχουν μια πληθώρα δεδομένων για τις υπηρεσίες του προγράμματος.

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Διαστήματος (ESA) είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη του διαστημικού προγράμματος και λειτουργεί τους δορυφόρους Sentinel -1 (Σχήμα 4.3) και Sentinel -2. Ο ESA επίσης, είναι υπεύθυνος για την αποστολή παρακολούθησης της Γης του Sentinel -3 και θα αναλάβει την λειτουργία του Sentinel - 5P. Ο EUMETSAT είναι υπεύθυνος για την αποστολή παρακολούθησης της βάλασσας και την λειτουργία των Sentinel -3 και την παράδοση των δεδομένων από τους Sentinel -4, -5 και -6.

Οι ESA και EUMETSAT είναι συντονισμένοι οργανισμοί και έχουν αναλάβει την επεξεργασία δεδομένων που παραλαμβάνουν από περισσότερους από 30 δορυφόρους από τις αποστολές συμβολής. Το παζλ του προγράμματος Copernicus συμπληρώνεται από ένα τμήμα εδάφους του οποίου ο ρόλος είναι να παρέχει πρόσβαση στα δεδομένα των Sentinel και των συμβαλλουσών αποστολών. Το συγκεκριμένο τμήμα έχει εξαπλωθεί γεωγραφικά και στηρίζεται στην υπάρχουσα υποδομή και περιλαμβάνει το τμήμα ελέγχου αποστολών το οποίο λειτουργεί τους Sentinels και έχει τις εγκαταστάσεις για να χειριστεί τα δεδομένα που λαμβάνονται από αυτούς. Επίσης, είναι το τμήμα που ελέγχει τις υπηρεσίες του προγράμματος Copernicus και παρέχει τα δεδομένα των συμόντα του στο κοινό (copernicus.eu, 2016).



**Σχήμα 4.3:** Ο δορυφόρος Sentinel -1

Πηγή: http://www.copernicus.eu/sites/default/files/Pictures\_Sentinels/Sentinel1\_Small.jpg

## 4.2.3 Οι δορυφόροι και αποστολές συμβολής του Copernicus

Οι δορυφόροι που παρέχουν το μεγαλύτερο σύνολο των παρατηρήσεων για το πρόγραμμα Copernicus αποτελούνται από έξι διαφορετικές οικογένειες:

Την Sentinel -1 που παρέχει δεδομένα παντός καιρού, μέρα και νύχτα. Παρέχει εικόνες ραντάρ για την ξηρά αλλά και τους ωκεανούς. Επίσης, τους δίδυμους δορυφόρους Sentinel -1A και -1B που ξεκίνησαν την λειτουργία τους στις 3 Απριλίου 2014 και στις 25 Απριλίου 2016 αντίστοιχα.

Την οικογένεια Sentinel -2 (Σχήμα 4.4) που παρέχει υψηλής ανάλυσης, οπτικών εικόνων για τις υπηρεσίες εδάφους. Παρέχει, για παράδειγμα, εικόνες της βλάστησης, του εδάφους και των υδάτων, τις εσωτερικές πλωτές μεταφορές και εικόνες των παράκτιων περιοχών. Επίσης, παρέχει πληροφορίες για τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης. Ο πρώτος δορυφόρος Sentinel -2 ξεκίνησε στις 22 Ιουνίου 2015 με τον Sentinel -2B να έχει προγραμματιστεί για την εκτόξευση για τα μέσα του 2016.



Σχήμα 4.4: Ο δορυφόρος Sentinel -2

Πηγή: http://www.copernicus.eu/sites/default/files/Pictures\_Sentinels/Sentinel2\_Small.jpg

Η οικογένεια του Sentinel -3 (Σχήμα 4.5) παρέχει οπτικά δεδομένα ραντάρ και υψομετρία υψηλής ακρίβειας για την ξηρά και για την θάλασσα. Μετρά μεταβλητές όπως η τοπογραφία της επιφάνειας της θάλασσας, η θαλάσσια και χερσαία θερμοκρασία επιφανειών, το χρώμα των ωκεανών και το χρώμα της γης με ακρίβεια. Ο πρώτος δορυφόρος Sentinel -3 ξεκίνησε στις 16 Φεβρουαρίου 2016 με τον Sentinel -3B να είναι προγραμματισμένος για εκτόξευση το 2017.



Σχήμα 4.5: Ο δορυφόρος Sentinel -3

 $\Pi\eta\gamma\dot{\eta}: \ http://www.copernicus.eu/sites/default/files/Pictures_Sentinels/Sentinel3_1_Small.jpg$ 

Οι υπόλοιπες οικογένειες δορυφόρων είναι προγραμματισμένες για το μέλλον. Η Sentinel -4 θα παράσχει ατμοσφαιρικά δεδομένα και θα ξεκινήσει γύρω στο 2019. Η Sentinel -5 θα είναι επίσης αφιερωμένη στην ατμοσφαιρική παρακολούθηση και θα ξεκινήσει περίπου στο 2020. Ο Sentinel -6 θα παρέχει δεδομένα υψομετρίας υψηλής ακρίβειας και είναι προορισμένος για εκτόξευση το 2020 (copernicus.eu, 2016).

Όσον αφορά στις αποστολές συμβολής, υπάρχουν περίπου 30 υφιστάμενες ή προβλεπόμενες οι οποίες ανήκουν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Ραντάρ Συνθετικού Διαφράγματος (SAR)
- Οπτικοί αισθητήρες
- Συστήματα υψομετρίας
- Ραδιόμετρα
- Φασματόμετρα

Ακόμα και όταν όλοι οι Sentinel θα είναι λειτουργικοί οι αποστολές συμβολής θα είναι απαραίτητες, παρέχοντας συμπληρωματικά στοιχεία για να εξασφαλιστεί το ικανοποιητικό φάσμα της παρατήρησης.

## 4.3 Ο δορυφόρος Sentinel -1

#### 4.3.1 Ti είναι ο Sentinel -1

Ο Sentinel -1Α είναι ο πρώτος δορυφόρος που ξεκίνησε στις 3 Απριλίου 2014 σε έναν πύραυλο Soyuz από το Ευρωπαϊκό Spaceport που βρίσκεται στην γαλλική Γουιάνα με στόχο την παρατήρηση της ξηράς και της θάλασσας, την χαρτογράφηση των φυσικών καταστροφών, τις παρατηρήσεις του θαλάσσιου πάγου και την ανίχνευση πλοίων. Είναι ένα δορυφορικό ραντάρ απεικόνισης που παραδίδει εικόνες μέρα και νύχτα κάτω από όλες τις καιρικές συνθήκες. Είναι ο πρώτος δορυφόρος σε ένα νέο στόλο της ΕΕ που προορίζεται για γεωσκόπηση και θα μπορούσε να θεωρηθεί ως το επιτυχημένο αποτέλεσμα της στενής συνεργασίας μεταξύ της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας, της βιομηχανίας, των παρόχων υπηρεσιών και των χρηστών δεδομένων. Σχεδιασμένος από μια κοινοπραξία περίπου 60 εταιρειών με επικεφαλής την Thales Alenia Space και Airbus Defence and Space, ο Sentinel -1, εστιάζει στην αξιοπιστία,

στη λειτουργική σταθερότητα, στην παγκόσμια κάλυψη και στη γρήγορη παράδοση των δεδομένων. Η παγκόσμια παρατήρηση της Γης μπορεί να αλλάξει το πως ο άνθρωπος διαχειρίζεται το περιβάλλον, να κατανοήσει και να αντιμετωπίσει την κλιματική αλλαγή και να διαφυλάξει την καθημερινή ζωή προσφέροντας δεδομένα (εικόνες) και ένα σύνολο βασικών υπηρεσιών πληροφόρησης για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης καταστροφών (European Commision, 2015).

### 4.3.2 Η αποστολή του Sentinel -1

Η αποστολή του Sentinel -1 έχει σχεδιαστεί ως ένας σχηματισμός δύο πολικής τροχιάς δορυφόρων. Του Sentinel -1A (2014) και του Sentinel -1B που ξεκίνησε στις 22 Απριλίου 2016. Η αποστολή παρέχει μια ανεξάρτητη επιχειρησιακή ικανότητα για συνεχή χαρτογράφηση της Γης με ραντάρ και έχει σχεδιαστεί να παρέχει επίκαιρη κάλυψη όσον αφορά τις υπηρεσίες της. Η αποστολή του βασίζεται σε μια σειρά από αυστηρές απαιτήσεις όπως είναι η ακρίβεια της τροχιάς, της στάσης του δορυφόρου και η ακρίβεια του χρονοδιαγράμματος όσον αφορά την μεταφορά των δεδομένων. Ο σχηματισμός καλύπτει ολόκληρο το χερσαίο μέρος της Γης μια φορά την εβδομάδα, τις παράκτιες ζώνες της Ευρώπης και τις θαλάσσιες διαδρομές σε καθημερινή βάση ενώ έχει συνεχή κάλυψη σε ανοιχτούς ωκεανούς. Επίσης, ο κάθε δορυφόρος αναμένεται να μεταδώσει δεδομένα γεωσκόπησης για τουλάχιστον 7 χρόνια ενώ διαθέτει καύσιμα επί του σκάφους για 12 χρόνια (European Commision, 2015).

## 4.3.3 Η τροχιά του Sentinel -1

Ο Sentinel -1 είναι σε μία εγγύς-πολική, συγχρονισμένη με τον ήλιο τροχιά που έχει κύκλο επανάληψης 12 ημερών και 175 τροχιές ανά κύκλο για έναν δορυφόρο. Τόσο ο Sentinel -1Α όσο και -1Β μοιράζονται την ίδια τροχιά με τροχιακή διαφορά 180 μοίρες. Όταν και οι δύο δορυφόροι τέθηκαν σε λειτουργία ο κύκλος επανάληψης ήταν 6 ημέρες, άρα μπορεί πλέον να στέλνει δεδομένα κάθε 6 ημέρες και όχι 12 όπως πριν την εκτόξευση του δεύτερου δορυφόρου.

Ειδικότερα για την συμβολομετρία απαιτείται αυστηρός έλεγχος τροχιάς. Ο δορυφορικός εντοπισμός θέσης κατά μήκος της τροχιάς πρέπει να είναι ακριβής με σημειακό και χρονικό συγχρονισμό μεταξύ των συμβολομετρικών ζευγών. Η τροχιά ελέγχου θέσης του Sentinel -1 ορίζεται χρησιμοποιώντας ένα σταθερό νοητό σωλήνα, κυκλικά της γης ακτίνας 50 μέτρων και φυσικά πάνω στην επιχειρησιακή πορεία του δορυφόρου (Σχήμα 4.5). Ο δορυφόρος διατηρείται μέσα σε αυτόν τον σωλήνα για τις περισσότερες λειτουργίες του (ESA, 2016).





## 4.3.4 Η περιγραφή του δορυφόρου

Το διαστημικό σκάφος είναι τριών αξόνων, σταθερού δορυφόρου, που χαρακτηρίζεται από ηλιακούς, αστρικούς, γυροσκοπικούς και μαγνητικούς αισθητήρες πεδίου, ένα σύνολο τεσσάρων τροχών αντίδρασης αφιερωμένων στον έλεγχο της τροχιάς και της στάσης. Επίσης διαθέτει τρεις ράβδους ροής ως ενεργοποιητές για να μπορεί να ελέγχει την διεύθυνση συστήματος σε κάθε άξονα. Ο δορυφόρος είναι εξοπλισμένος με δύο φωτοβολταϊκά πάνελ σε συστοιχία, ικανά να παράγουν 5900 W (στο τέλος της ζωής) για να αποθηκευτούν σε μια μπαταρία. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά είναι φανερά στο Σχήμα 4.6.

Ο δορυφόρος βασίζεται στην PRIMA (Piattaforma Italiana Multi Applicativa), με βάση την εμπειρία που αποκτήθηκε από τα από την RADARSAT-2 και COSMO-Skymed, τα οποία χρησιμοποιούν το ίδιο λεωφορείο. Το λεωφορείο παρέχει εξαιρετικά ακριβή γνώση κατάδειξης (καλύτερη από 0.004 ° C) σε κάθε άξονα, υψηλή ακρίβεια κατάδειξης (περίπου 0,01 ° σε κάθε άξονα) και προσδιορισμό της τροχιάς σε πραγματικό χρόνο μαζί με ένα ειδικό σύστημα πρόωσης για ακριβή έλεγχο τροχιάς. Η δορυφορική πλατφόρμα παρέχει δυνατότητες για τη διαχείριση των συστημάτων στάσης και ελέγχων τροχιάς, διαχείρισης

δεδομένων, πρόωσης, δύναμης, θερμικού ελέγχου, την διαστημική αυτονομία, την ταυτοποίηση και αυτόματη επιδιόρθωσης βλάβης αλλά και την επικοινωνία με το έδαφος. Η συνολική μάζα του δορυφόρου κατά την έναρξη της λειτουργίας του ήταν περίπου 2300 Kg (ESA, 2016).





Πηγή: https://sentinels.copernicus.eu/image/image\_gallery?uuid=08fbcb73-881e-4cff-a330-eb526a8c06f1&groupId=247904&t=1359606594070

Στην παρακάτω φωτογραφία (Σχήμα 4.7) παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του δορυφόρου Sentinel -1A (ESA, 2015):

European polar orbiting radar observatory providing continuity of SAR data for operational applications. These applications include: > monitoring sea ice zones and the arctic environment > surveillance of marine environment	<ul> <li>&gt; monitoring land surface motion risks</li> <li>&gt; mapping of land surfaces; forest, water and soil, agriculture</li> <li>&gt; mapping in support of humanitarian aid in crisis situations</li> </ul>		
MISSION PROFILE			
<ul> <li>&gt; Sentinel-1A launch date: 2014</li> <li>&gt; Sentinel-1B launch date: 2015</li> <li>&gt; Sentinel-1A launcher: Soyuz from CSG (Kourou)</li> <li>&gt; 7 years lifetime (consumables for 12 years)</li> <li>&gt; Sun-synchronous orbit at 693 km altitude</li> <li>&gt; Inclination: 98.18°</li> </ul>	<ul> <li>&gt; Mean LST: 18:00h at ascending node</li> <li>&gt; 12-day repeat cycle at Equator with 1 satellite</li> <li>&gt; 175 orbit/cycle</li> <li>&gt; 96h operative autonomy</li> <li>&gt; Max eclipse duration: 19 minutes</li> </ul>		
<ul> <li>&gt; 3 axis stabilized, yaw/pitch/roll steering (zero Doppler)</li> <li>&gt; 0.01° attitude accuracy (each axis)</li> <li>&gt; Right looking flight attitude</li> <li>&gt; 10 m orbit knowledge (each axis, 3σ) using GPS</li> <li>&gt; Spacecraft availability: 0.998</li> <li>&gt; Launch mass: 2300 kg (incl. 130 kg fuel)</li> <li>&gt; Solar array power: 5900 W (End-of-Life)</li> </ul>	<ul> <li>&gt; Battery capacity: 324 Ah</li> <li>&gt; Science data storage capability: 1410 Gbit (End-of-life)</li> <li>&gt; Communication links: X-Band data downlink and Optical data link through EDRS for Payload Data at 520 Mbps; S-Band 64 kbps uplink and 128 kbps/2Mbps downlink for TM/TC</li> </ul>		
ATELLITE PAYLOAD			
C-Band SAR > Centre frequency: 5.405 GHz > Polarisation: VV+VH,HH+HV > Incidence angle: 20° - 45° > Radiometric accuracy: 1 dB (3 $\sigma$ ) > NESZ: -22 dB > DTAR: -22 dB > PTAR: -25 dB	Four nominal operational modes designed for inter-operability with other systems: > Strip Map Mode with 80 km swath and 5x5 m (range x azimuth) spatial resolution > Interferometric Wide-Swath Mode with 250 km swath, 5x20 m (range x azimuth) spatial resolution and burst synchronisation for interferometry > Extra-Wide-Swath Mode with 400 km swath and 20x40 m (range x azimuth) spatial resolution > Wave Mode with 5x5 m (range x azimuth) spatial resolution leap-frog sampled images of 20x20 km at 100 km along the orbit, with alternating 23° and 36.5° incidence angles.		

**Σχήμα 4.7** Χαρακτηριστικά του δορυφόρου Sentinel -1A Πηγή: http://esamultimedia.esa.int/docs/S1-Data\_Sheet.pdf

# 4.4 Δορυφορική απεικόνιση της πλημμύρας του 2006 στον Έβρο

Η βροχή και το χιόνι που έλιωσε συνδυάστηκαν για να ωθήσουν τον ποταμό Έβρο να υπερχειλίσει τις τράπεζές του τον Μάρτιο του 2006. Ο ποταμός, που αποτελεί το σύνορο ανάμεσα στην Τουρκία και την Ελλάδα είναι υπενδεδυμένος με εύφορες γεωργικές εκτάσεις, πολλές από τις οποίες είχαν κατακλυστεί από τις πλημμύρες. Αν η πλημμύρα που έγινε εκείνη την άνοιξη ήταν κατά μήκος του ποταμού ήταν η χειρότερη των τελευταίων 15 χρόνων, ανέφερε το Reuters. Οι πλημμύρες είχαν υποχωρήσει κάπως, όταν ο Μέτριας Ανάλυσης δορυφόρος Terra της NASA εξέδωσε την παρακάτω φωτογραφία του Έβρου (Σχήμα 4.1) στις 20 Μαρτίου αλλά είναι ακόμα εμφανής σε σύγκριση με τις 3 Μαρτίου (Σχήμα 4.2). Ένας από τους λόγους για την πλημμύρα, εμφανής και στις φωτογραφία έχει εξαφανιστεί. Σύμφωνα με δημοσιεύματα, η πλημμύρα ξεκίνησε με έντονες βροχοπτώσεις στα μέσα Μαρτίου και τα χιόνια που έλιωσαν προστέθηκαν στην άνοδο των υδάτων του ποταμού Έβρου και των παραπόταμών του, ιδιαίτερα του ποταμού Άρδα στη Βουλγαρία. Αρκετές τεχνητές λίμνες κατά μήκος του Αρδα ξεχείλισαν και έτσι περισσότερα από 75.000 στρέμματα γης πλημμύρισαν. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο στρατός κλήθυκε να βοηθήσει στην εκκένωση των πλημμυρισμένων πόλεων (NASA, 2007).



March 20, 2006

Σχήμα 4.1: Ο Έβρος στις 20 Μαρτίου 2006



Σχήμα 4.2 Ο Έβρος στις 3 Μαρτίου 2006

# 5. Δεδομένα - Μεθοδολογία

Στο ακόλουθο κεφάλαιο θα αναλυθούν τα δεδόμενα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη, όπως επίσης και η μεθοδολογία για την παραγωγή των πλημμυρικών αποτυπώσεων.

# 5.1 Δεδομένα

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα SLC (Single Look Complex) του δορυφόρου Sentinel-1 Α.



Σχήμα 5.1: Έκταση εικόνας Ραντάρ Sentinel-1 Α που καλύπτει την περιοχή (Sentinel-1 HUB)

# Πίνακας 5.1

Δεδομένα του δορυφόρου Sentinel-1 A

Acquisition Date	Frame	Path	Polarization	Beam mode		SAR looking
					Frequency	geometry
13/10/2014	455	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
25/10/2014	455	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
6/11/2014	455	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
18/11/2014	455	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
30/11/2014	455	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
12/12/2014	455	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
24/12/2014	455	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
5/1/2015	455	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
17/1/2015	455	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
29/1/2015	454	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
10/2/2015	454	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
22/2/2015	454	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
6/3/2015	456	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
18/3/2015	456	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
30/3/2015	456	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
11/4/2015	456	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending

5/5/2015	456	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
17/5/2015	456	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
29/5/2015	457	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
10/6/2015	457	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
16/7/2015	457	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
28/7/2015	457	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending
9/8/2015	457	109	VV+VH	IW	C-Band	Descending

Τα δεδομένα (Πίνακας 5.1), στην αρχική τους μορφή ήταν SLC (Single Look Complex) απεικονίσεις, καθοδικής τροχιάς και co- και cross- polarized. Το μεγάλο πλάτος λήψης των δεδομένων, 250 km, μας έδωσε τη δυνατότητα μελέτης μίας τόσο μεγάλης περιοχής με τη χρήση ενός δεδομένου Sentinel-1 A ανά ημερομηνία. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν τροχιακά δεδομένα Sentinel precise orbits με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας της τροχιάς του δορυφόρου.

## 5.2 Μεθοδολογία

Επί του παρόντος, ο πιο κοινός τρόπος δημιουργίας πλημμυρικών χαρτών από ΕΟ (Τηλεπισκοπικά) δεδομένα είναι βασισμένος στις SAR εικόνες. Το SAR χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική ευαισθησία στην παρουσία νερού καθώς έχει και την δυνατότητα να παρέχει δεδομένα ανεξαρτήτως νεφοκάλυψης, μέρα και νύχτα. Αρκετές παλαιότερες μελέτες απέδειξαν ότι τα συστήματα SAR είναι κατάλληλα εργαλεία για τη χαρτογράφηση πλημμυρικών φαινομένων, με αποτέλεσμα την καθιέρωση της χρήσης των SAR δεδομένων στις επιχειρησιακές υπηρεσίες για τη διαχείριση των πλημμυρών. Για τη δημιουργία μίας έγκαιρης και αποτελεσματικής διαχείρισης των πλημμυρών, αρκετοί αλγόριθμοι, οι οποίοι έχουν δημοσιευτεί στην βιβλιογραφία, είναι διαθέσιμοι για την παραγωγή NRT (Near Real Time) πλημμυρικών χαρτών (Chini et al. 2013; Pulvirenti et al., 2011, Chini et al., Under Review). Πάρα την πρόοδο αυτή στην ανάπτυξη των διαδικασιών παραγωγής NRT πλημμυρικών χαρτών, η ανίχνευση των πλημμυρών στη βλάστηση και στις

αστικές περιοχές αποτελεί ακόμη ένα κρίσιμο ζήτημα (Chini et al., 2012; Pulvirenti et al., 2013; Pulvirenti et al., 2016). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι υπογραφές ραντάρ τέτοιου είδους στόχων είναι συχνά ασαφής. Μάλιστα, υφίσταται ξεκάθαρα η ανάγκη για τη χρήση των ενισχυμένων ικανοτήτων παρατήρησης του Sentinel-1 προκειμένου να βρεθούν καλύτεροι μέθοδοι για την ανίχνευση του νερού από τις πλημμύρες στη βλάστηση και στις αστικές περιοχές. Πράγματι, η λειτουργία διπλής πολικότητας, η μεσαία χωρική ανάλυση (20m), το μεγάλο πλάτος τροχιάς (250 km), ο συχνός κύκλος επανάληψης και ο στενός σωλήνας τροχιάς (μικρό Perpendicular baseline στη περίπτωση των συμβολομετρικών λήψεων) είναι χαρακτηριστικά τα οποία καθιστούν ταχεία την ανάπτυξη νέων αυτόματων αλγορίθμων καταγραφής πλημμυρικών φαινομένων, σε πιο σύνθετο περιβάλλον κάλυψης γης.

Στην παρούσα εργασία, η υψηλή ευαισθησία της συμβολλομετρικής συνάφειας να εντοπίζει μικρές αλλαγές, έχει αξιοποιηθεί έτσι ώστε να ανιχνεύεται η παρουσία νερού σε αστικές ζώνες. Επιπλέον, βοηθάει στη μείωση της πιθανότητας σφαλμάτων που προκαλούνται από τις επιδράσεις της υγρασίας του εδάφους στη βάση του εδάφους καθώς και στην απορρόφηση πληροφοριών σχετικά με την κάλυψη γης, αντικαθιστώντας με αυτή την άποψη την χρήση χαρακτηριστικών οπτικών δεδομένων, όπως το Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Αντί αυτού, τα πολυσσυμετρικά χαρακτηριστικά του Sentinel-1 έχουν χρησιμοποιηθεί για την εντόπιση πλημμυρών σε περιοχές με βλάστηση, δεδομένου ότι οι cross- και copolarized οπισθοσκεδάσεις συμπεριφέρονται διαφορετικά στην περίπτωση της διπλής αναπήδησης μεταξύ των κάθετων δομών και του νερού στην επιφάνεια. Οι προαναφερθείσες επιδράσεις έχουν ληφθεί υπ' όψιν, γρησιμοποιώντας μια προσέγγιση ανίγνευσης αλλαγής, όπου οι αλλαγές της οπισθοσκέδασης σε διαφορετικές πολικότητες co- και -cross και η συμβολλομετρική συνοχή, με εκτίμηση στη ξηρή κατάσταση, έχουν οδηγήσει στην ανίχνευση πλημμυρισμένων pixels σε μια στατιστική βάση δεδομένων. Η υπό μελέτη περίπτωση πλημμυρικού φαινομένου είναι η περιοχή του ποταμού Έβρου, του δεύτερου μεγαλύτερου ποταμού στην ανατολική Ευρώπη, μετά τον Δούναβη, πού ρέει δια μέσω της Βουλγαρίας, της Ελλάδος και της Τουρκίας, απορρέοντας στο βόρειο Αιγαίο.

## 6. Επεξεργασία - Αποτελέσματα

# 6.1 Επεξεργασία

Κατά τον Οκτώβρη του 2014 και του Αυγούστου του 2015 έχουν συλλεχθεί περισσότερες από 20 διπλής πολικότητας Sentinel-1 εικόνες (VV/VH), δίνοντας τη δυνατότητα να παρακολουθείται διεξοδικά η εξέλιξη του πλημμυρικού φαινομένου. Οι πλημμύρες είναι εμφανείς, σε όλες σχεδόν τις εικόνες, εκτός από δύο, οι οποίες έχουν αποκτηθεί στις 13 και στις 25 Οκτωβρίου, 2014.

Τα διαθέσιμα SAR δεδομένα αρχικά δέχτηκαν Coregistration, ως πρώτο βήμα στην επεξεργασία τους. Στη συνέχεια ακολούθησε ραδιομετρική διόρθωση και γεωαναφέρθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό ESA-SNAP Toolbox ώστε να αποκομισθεί ο συντελεστής οπισθοσκέδασης (σ0). Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το SRTM 3sec DEM (Farret et al.). Συνεχίζοντας, τα δεδομένα δέχτηκαν multilook, 5 looks στο εύρος και 1 στο αζιμούθιο. Επιλέχτηκε μέγεθος pixel 20x20 m2 για τα ραδιομετρικά διορθωμένα Sentinel-1 δεδομένα. Η συμβολλομετρική συνάφεια, έχει επίσης αποκομισθεί από το λογισμικό ESA-SNAP Toolbox χρησιμοποιώντας κινούμενο παράθυρο μεγέθους 7x7 pixels.

Με την παρούσα προσέγγιση επιχειρείται να εντοπιστούν οι πλημμυρισμένες εκτάσεις κυρίως σε τρία είδη κάλυψης γης, στις αστικές περιοχές, στις περιοχές με γυμνό έδαφος ή με μικρή βλάστηση και στις περιοχές με έντονη βλάστηση, εκμεταλλευόμενο τα co- και cross- polarized SAR κανάλια οπισθοσκέδασης και τη συμβολλομετρική συνάφεια με σκοπό τον καλύτερο χαρακτηρισμό του πεδίου.

Σε μία SAR εικόνα, το amplitude και η φάση της περιοχής που οπισθοσκεδάζεται εξαρτάται από τη φυσική (γεωμετρία, τραχύτητα) και τις ηλεκτρικές (διηλεκτρική σταθερά) ιδιότητες του στόχου. Η παρουσία νερού από πλημμύρες αλλάζει αυτές τις ιδιότητες, επειδή η τραχύτητα του εδάφους τείνει να λειαίνεται και το πραγματικό μέρος της διηλεκτρικής σταθεράς γίνεται σημαντικά μεγαλύτερο από αυτό του στεγνού και του υγρού εδάφους. Τοιουτοτρόπως, η επιφανειακή αντανάκλαση αυξάνεται.

Σε γυμνό έδαφος, η μειωμένη τραχύτητα επιτρέπει την μείωση της οπισθοσκέδασης και αυτή η συμπεριφορά είναι όμοια στο co- και στο -cross πολωμένο κανάλι. Έτσι προσδιορίζεται η εξέγερση της πλημμύρας λαμβάνοντας υπ' όψιν αποκλειστικά την ένταση της οπισθοσκέδασης.

Σε αστικές περιοχές, το φαινόμενο της διπλής αναπήδησης είναι συνήθως εμφανές στις SAR εικόνες με μία πολύ φωτεινή γραμμή που εμφανίζεται στην πλευρά τού τοίχου που καταγράφεται από το ραντάρ

(Franceshetti et al., 2002). Αξίζει να τονισθεί ότι τα μονοπάτια της διπλής αναπήδησης έχουν το ίδιο μήκος με το εύρος της τομής μεταξύ του εδάφους και του μπροστινού τοίχου του κτηρίου.

Σε αυτή την περίπτωση, ακόμα και αν το κτήριο περιβάλλεται από λείες επιφάνειες ασφάλτου, έτσι ώστε η αλλαγή στην τραχύτητα του εδάφους μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, η αύξηση της αντανακλαστικότητας, που οφείλεται στην αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς, συνεπάγει μία σημαντική αύξηση του φαινομένου της διπλής αναπήδησης. Όσον αφορά τη γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης της πτήσης και της ευθυγράμμισης του δρόμου, η αύξηση είναι μεγάλη για τις μικρές γωνίες, ενώ για μεγαλύτερες γωνίες μειώνεται.

Κατά συνέπεια, ακόμα και στην ιδανική κατάσταση ενός απομονωμένου κτηρίου που περιβάλλεται από μια ομογενή εδαφική επιφάνεια, η αύξηση της διπλής αναπήδησης (double bounce), λόγω της παρουσίας νερού, δεν είναι πολύ μεγάλη, αν τα κτήρια δεν είναι παράλληλα στη κατεύθυνση της πτήσης του δορυφόρου. Η αύξηση αυτή μπορεί να εντοπισθεί ελάχιστα χρησιμοποιώντας μόνο την έκταση της οπισθοσκέδασης με την συμβολλομετρική συνάφεια, η οποία είναι βασική στη μέτρηση του βαθμού συσχέτισης μεταξύ δύο εικόνων ραντάρ. Έτσι, ορίζεται ως η κανονικοποιημένη συσχέτιση ανάμεσα στις εικόνες και σχετίζεται με τη μεταβολή της χωρικής διάταξης των σκεδαστών μέσα σε ένα εικονοστοιχείο της SAR εικόνας (Chini et al., 2015) και ως εκ τούτου σε γεωμετρικές μεταβολές στην εικόνα. Ένα συμβολλομετρικό ζευγάρι δύναται να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας δύο εικόνες που λαμβάνονται πριν και μετά την πλημμύρα. Αναμένεται ότι οι πλημμυρισμένες περιοχές εμφανίζουν χαμηλή συνάφεια, τυπικό χαρακτηριστικό είναι συνήθως πολύ υψηλό, ανεξάρτητα από την χρονική διαφορά της λήψης.

Σχετικά με τις περιοχές με βλάστηση, οι οποίες αποτελούν ένα πιο σύνθετο περιβάλλον, συνήθως χαρακτηρίζονται από χαμηλή συνοχή λόγω των αλλαγών στην ανάπτυξη των φυτών. Στη συνέχεια η συνάφεια μπορεί να βοηθήσει στο να διακριθούν αυξήσεις της οπισθοσκέδασης, που οφείλεται στην παρουσία νερού κάτω από τη βλάστηση, στο φαινόμενο διπλής αναπήδησης, όπου η συνάφεια είναι σημαντικά χαμηλότερη. Επιπρόσθετα, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την διπλή πολικότητα των Sentinel-1 Α΄ δεδομένων. Πράγματι, η οπισθοσκέδαση του cross-polarized είναι πιο αισθητή σε σκέδαση όγκου, ενώ η οπισθοσκέδαση από co-polarized εμφανίζει αυτό το χαρακτηριστικό στο φαινόμενο της διπλής αναπήδησης. Μάλιστα, σε περιοχές με βλάστηση θα πρέπει να ανιχνεύουμε αισθητή αύξηση στην οπισθοσκέδαση στην VV πόλωση και όχι στη VH πόλωση (Hess et al., 1990).

57

# 6.2 Αποτελέσματα/Συζήτηση

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην εισαγωγή, η περιοχή που εξετάστηκε είναι ο ποταμός Έβρος, ο οποίος ρέει δια μήκους της Βουλγαρίας, της Ελλάδος και της Τουρκίας απορρέοντας στο βόρειο τμήμα του Αιγαίου. Το συνολικό μήκος του ποταμού είναι περίπου 515 km από τα οποία τα 218 ρέουν κατά μήκους των συνόρων Ελλάδας-Τουρκίας και τα υπόλοιπα στη Βουλγαρία. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Έβρου (52.900 km2) είναι μία από τις πιο εντατικά καλλιεργούμενες εκτάσεις στα Βαλκάνια με υψηλή κοινωνικοοικονομική και περιβαλλοντική σημασία, καθώς το Δέλτα του ποταμού Έβρου είναι προστατευόμενο σύμφωνα με τη Συνθήκη Ramsar. Παρόλο που τα τελευταία πενήντα χρόνια έχουν κατασκευαστεί σημαντικά υδραυλικά έργα, αρκετά σοβαρά πλημμυρικά φαινόμενα προκλήθηκαν μέσα στο 2004, 2005, 2006, 2009 και κατά τη διάρκεια της περσινής χρονιάς, προκαλώντας σοβαρές ζημιές στη γεωργία, στις μεταφορές και στα δίκτυα παροχής νερού. Συγκεκριμένα, κατά τον Οκτώβρη του 2014 και του Αυγούστου του 2015 έχουν συλλεχθεί περισσότερες από 20 διπλής πολικότητας Sentinel-1 εικόνες (VV/VH), δίνοντας τη δυνατότητα να παρακολουθείται διεξοδικά η εξέλιξη του πλημμυρικό φαινομένου. Οι πλημμύριος είναι εμφανείς, σε όλες σχεδόν τις εικόνες, εκτός από δύο, οι οποίες έχουν αποκτηθεί στις 13 και στις 25 Οκτωβρίου, 2014.





Σχήμα 6.1: RGB συνδυασμοί: Αφορούν την ένταση της εικόνας της 25 Οκτωβρίου 2014 (R), την ένταση της εικόνας της 3 Μαρτίου 2015 (G και B), VV (αριστερά) και VH (δεξιά) πόλωση. Οι κόκκινες περιοχές της εικόνας αντιπροσωπεύουν το γυμνό έδαφος οι οποίες είναι πλημμυρισμένες και στις δύο πολώσεις στη δεύτερη ημερομηνία. Οι γαλάζιες περιοχές αντιπροσωπεύουν τις πλημμυρισμένες περιοχές με βλάστηση. Η αύξηση της οπισθοσκέδασης είναι αρκετά εμφανής στην VV πόλωση (αριστερά). Στο κάτω πάνελ μια λεπτομέρεια του άνω δείχνεται και στις δύο πολώσεις, VV (αριστερά) και VH (δεξιά).

Στο Σχήμα 6.1 δίνεται ένα παράδειγμα ανίχνευσης πλημμύρας σε γυμνό έδαφος και σε έδαφος με βλάστηση, όπως για παράδειγμα τα έλη. Ειδικότερα, τονίζεται το πλεονέκτημα της χρήσης των διπλά πολωμένων δεδομένων (VV/VH). Αξίζει να σημειωθεί πως σε περιοχές με γυμνό έδαφος η μείωση της οπισθοσκέδασης παρουσιάστηκε και στις δύο πολικότητες(κόκκινες περιοχές), καθώς στις περιοχές με βλάστηση η αύξηση είναι διακριτή μόνο στην VV πόλωση (γαλάζιες περιοχές).











Σχήμα 6.2: RGB συνδυασμοί. Αριστερά: Η συνάφεια μεταξύ της προ-πλημμυρισμένης εικόνας (25 Οκτωβρίου, 2014) και της εικόνας μετά το πλημμυρικό γεγονός (6 Νοεμβρίου, 2015) (R), η ένταση VV της προ-πλημμυρισμένης (G) και η ένταση VV της εικόνας μετά το πλημμυρικό γεγονός (B). Οι πράσινες και οι μπλε περιοχές αντιπροσωπεύουν εκεί όπου η πλημμύρα έγινε σε γυμνό έδαφος και στις περιοχές με βλάστηση, αντίστοιχα. Δεξιά: Η συνάφεια μεταξύ των προ-πλημμυρισμένων εικ(13 Οκτωβρίου, 2014- 25 Οκτωβρίου, 2014), η συνάφεια μεταξύ των εικόνων κατά τη διάρκεια και μετά από το διάστημα του πλημμυρικού γεγονότος (25 Οκτωβρίου, 2014-6 Νοεμβρίου, 2014) (G και B). Οι κόκκινες περιοχές αντιπροσωπεύουν περιοχές όπου η συνάφεια ήταν υψηλή στον χάρτη απεικόνισης της συνάφειας πριν το πλημμυρικό γεγονός, και οι γαλάζιες περιοχές εκείνες όπου η συνάφεια ήταν υψηλότερη στον χάρτη απεικόνισης της συνάφειας κατά τη διάρκεια και μετά από το πλημμυρικό γεγονός.

Στο Σχήμα 6.2 δίνεται ένα παράδειγμα του ρόλου που παρουσιάζει η συμβολλομετρική συνάφεια στην ανίχνευση των πλημμυρών σε αστικές περιοχές και στις περιοχές με βλάστηση. Υπάρχουν δύο διαφορετικές αναπαραστάσεις σύνθεση χρωμάτων RGB:

Αριστερά: η συμβολλομετρική συνάφεια ανάμεσα στην προ-πλημμυρισμένη εικόνα (25 Οκτωβρίου 2014) και στην εικόνα μετά το πλημμυρικό γεγονός (6 Νοεμβρίου 2014) (R), η ένταση της οπισθοσκέδασης VV της προ-πλημμυρισμένης εικόνας (G) και η ένταση της οπισθοσκέδασης VV μετά το πλημμυρικό γεγονός (B). Οι λευκές περιοχές αντιπροσωπεύουν τις αμετάβλητες περιοχές, ενώ οι πράσινες και οι μπλε εκτάσεις την πλημμύρα που έγινε στις γυμνές περιοχές και στις περιοχές με βλάστηση αντίστοιχα.

Δεξιά: η συμβολλομετρική συνάφεια ανάμεσα στις προ-πλημμυρισμένες εικόνες (13 Οκτωβρίου 2014, 25 Οκτωβρίου 2014) (R), και η συμβολλομετρική συνάφεια ανάμεσα στις εικόνες και μετά το πλημμυρικό γεγονός (25 Οκτωβρίου 2014-6 Νοεμβρίου, 2014) (G και B). Οι κόκκινες περιοχές αντιπροσωπεύουν υψηλή

συνάφεια στον προ-πλημμυρισμένο χάρτη και οι γαλάζιες περιοχές αντιπροσωπεύουν υψηλή συνάφεια στο χάρτη μετά το πλημμυρικό γεγονός.

Επιπλέον, στο Σχήμα 6.2 εμφανίζονται παραδείγματα γυμνού εδάφους (άνω πάνελ), περιοχές με βλάστηση (κεντρικό πάνελ) και αστικές περιοχές (κάτω πίνακας).

Στην κατηγορία του γυμνού εδάφους, η πλημμύρα απεικονίζεται με πράσινο (αριστερά, χαμηλή συνάφεια και υψηλότερη οπισθοσκέδαση στη προ-πλημμυρισμένη εικόνα). Επίσης, η προ-πλημμυρισμένη συνάφεια είναι υψηλότερη (δεξιά).

Στις περιοχές με βλάστηση η πλημμύρα επισημαίνεται με μπλε χρώμα (αριστερά, χαμηλή συνάφεια και υψηλότερη οπισθοσκέδαση στην εικόνα μετά από το γεγονός), ενώ στην περίπτωση της προπλημμυρισμένης, η συνάφεια είναι επίσης χαμηλή (δεξιά, σκοτεινές περιοχές).

Ακολουθώντας, διαφαίνονται οι αστικές περιοχές, που ευτυχώς δεν επηρεάστηκαν από το πλημμυρικό γεγονός. Είναι αρκετά φωτεινές (αριστερά, υψηλή συνάφεια και υψηλή ένταση και στις δύο εικόνες). Επίσης υψηλή συνάφεια εκδηλώνεται τόσο στις προ-πλημμυρισμένες εικόνες όσο και στις εικόνες μετά από το πλημμυρικό γεγονός (δεξιά).

Τελικά αποτέλεσματα της εργασίας μπορούν να παρατηρηθούν στα Σχήματα 6.3, 6.4.











**Σχήμα 6.3:** Χάρτης συχνότητας των πλημμυρών VV αριστερά, χάρτης συχνότητας των πλημμυρών VH δεξιά κατά το διάστημα Οκτώβρης 2014 - Αύγουστος 2015.







Σχήμα 6.4: Τελική αποτύπωση πλημμυρικής έκτασης, μεταξύ της προ-πλημμυρισμένης εικόνας (25 Οκτωβρίου, 2014) και της εικόνας μετά το πλημμυρικό γεγονός (6 Νοεμβρίου, 2015), με τη χρήση του αλγορίθμου, βασισμένο στην συμβολομετρική συνάφεια, την VV πολικότητα και τη VH πολικότητα.

Εν κατακλείδι, οι τεχνικές της Τηλεπισκόπησης παρέχουν έναν ασφαλή και οικονομικό τρόπο χαρτογράφησης και παρακολούθησης των πλημμυρών, καθώς και των συνεπειών τους. Η χρήση των προϊόντων που εξάγονται μέσα από την προαναφερθείσα διαδικασία, σε συνδυασμό με επίγεια δεδομένα, βελτιώνουν τις δυνατότητες πρόληψης και αντιμετώπισης των πλημμυρικών φαινομένων από τις υπεύθυνες Πολιτικές Αρχές Διαχείρισης Κινδύνου. Όσον αφορά την εν λόγω έρευνα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν θεωρούνται μείζονος σημασίας, καταγράφοντας με μεγάλη ακρίβεια την έκταση της πλημμύρας. Μελλοντικός στόχος αυτής της έρευνας είναι η ενσωμάτωση, η ανάλυση και ο συνδυασμός διαφορετικών τηλεπισκοπικών δεδομένων (SAR και Πολυφασματικά) με σκοπό την επακριβή καταγραφή της έκτασης των πλημμύρων σε οποιαδήποτε χρήση γης. Τα παραπάνω αφορούν όχι μόνο την πρόληψη καταστροφών μέσω έργων από τους αρμόδιους φορείς, αλλά και την μετέπειτα αντιμετώπιση των πλημμυρικών φαινομένων, που υφίσταται η υπό μελέτη περιοχή.

# 7. Βιβλιογραφία

#### Ελληνική Βιβλιογραφία

- Γλυνού, Μ. (2014). Η πλημμύρα του 1953 στη Βόρεια θάλασσα και οι αλλαγές που επέφερε στην αντιπλημμυρική προστασία Αγγλίας και Ολλανδίας.
- Μαραγκουδάκη, Ρ., & Τσακίρης, Γ. (2005). Επίδραση της Αστικοποίησης στα Χαρακτηριστικά της Πλημμύρας. Ανάκτηση από http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=7605
- Μπεζιργιαννίδης, Α. (2007). Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα κατά μήκος του ποταμού Έβρου.
- Οδηγία 2007/60/ΕΚ. (2007). Οδηγία 2007/60/εκ του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου και του συμβουλίου. Ανάκτηση από http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=celex%3A32007L0060
- Πανούσης, Κ. (2015). Καταγραφή & ποιοτική ανάλυση των πλημμυρικών φαινομένων στο λεκανοπέδιο της Αττικής την περίοδο 1980 – 2014.
- Παππά, Μ. (2012). Καταγραφή πλημμυρών και εκτίμηση πλημμυρικής επιδεκτικότητας με τη βοήθεια της τηλεπισκόπησης και των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών(γσπ-gis). Ένα παράδειγμα απο τη ΒΑ. Χαλκιδική. Διπλωματική εργασία ΑΠΘ.
- Πισπιρίγκος, Π. (2008). Μελέτη ολοκληρωμένης διαχείρισης διασυνοριακών ποταμών: η περίπτωση του Εβρου. Διπλωματική εργασία ΕΜΠ.
- ΥΠΕΚΑ. (2007). Ειδική γραμματεία υδάτων / σχέδιο διαχείρισης κινδύνων πλημμύρας λεκάνης απορροής π. Εβρου εφαρμογή της οδηγίας 2007/60/εκ. Ανάκτηση από http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=252

ΥΠΕΚΑ. (2013). Ελεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπόγειων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας - Θράκης και Θεσσαλίας - αποτελέσματα λεκάνης Έβρου. Ανάκτηση
από https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahU
KEwjv2JKG0qnNAhVECiwKHU4KBiQQFggjMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.minagric.gr%2Far
deftika%2Ffiles%2Fresults%2Fgeol%2F2.RESULTS\_EVROU.pdf&usg=AFQjCNGGCPR7Z22MV2
sIUFE6pUsUIrMB5g&s

ΥΠΕΚΑ. (2013). Σχέδιο διαχείρισης κινδυνών πλημμύρας λεκάνης απορροής Έβρου-Στάδιο Ι. Ανάκτηση από http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=252

- ΥΠΕΚΑ. (2016). Συνοπτική Περιγραφή του Υδατικού Διαμερίσματος Θράκης. Ανάκτηση από http://wfd.ypeka.gr/index.php?option=com\_content&task=view&id=17&Itemid=12
- Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης και Τροφίμων. (2013). Έλεγχος χημικής ποιότητας αρδευτικών υδάτων (επιφανειακών και υπογείων) σε κλίμακα λεκανών απορροής ποταμών Μακεδονίας - Θράκης και Θεσσαλίας.Αποτελέσματα ευρύτερης λεκάνης Έβρου-υδρογεωλογικά στοιχεία. Ανάκτηση από http://www.minagric.gr/ardeftika/index.php/el/

#### Ξένη Βιβλιογραφία

- Annand, J. (2008). Evaluating the environmental losses and benefits from flooding. Ανάκτηση από http://mams.rmit.edu.au/kse6lzj09fet.pdf
- cfpa-e. (2012). *Protection against floods*. Ανάκτηση από http://www.cfpa-e.eu/wpcontent/uploads/files/guidelines/CFPA\_E\_Guideline\_No\_1\_2012\_N.pdf
- Chini, M., Papastergios, A., Pulvirenti, L., Pierdicca, N., Matgen, P., & Parcharidis, I. (2016). *Sar coherence and polarimetric information for improving flood mapping*. Conference paper presented at IGARSS.
- Chini, M., Albano, M., Saroli, M., Pulvirenti, L., Moro, M., Bignami, C., . . . Stramondo, S. (2015). Coseismic liquefaction phenomenon analysis by COSMO-SkyMed: 2012 Emilia (Italy) earthquake. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 65-78.
- Chini, M., Piscini, A., Cinti, F., Amici, S., Nappi, R., & De Martini, P. (2013). The 2011 Tohoku-Oki (Japan) tsunami inundation and liquefaction investigated by optical, thermal and SAR data. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 10(2), 347-351
- copernicus.eu. (2016). Copernicus in brief. Ανάκτηση από http://www.copernicus.eu/main/copernicusbrief
- copernicus.eu. (2016). *Earth Observation Satelites*. Ανάκτηση από http://www.copernicus.eu/main/satellites
- Du, W., FitzGerald, G., Clark, M., & Hou, X. (2010). Health impacts of floods. *Prehosital and Disaster Medicine*, 25(3), 265-272.

- EM-DAT. (2011). *EM-DAT Disaster Profiles. 2011*. The OFDA/CRED International Disaster Database. Ανάκτηση από http://www.emdat.be/database
- Enviromental agency. (2012). *Flood estimation guidelines*. Gov UK. Ανάκτηση από http://persona.uk.com/A21Ton/Core\_dox/H/H13.pdf
- ESA. (2015). ESA'S radar observatory mission for Copernicus operational services. Ανάκτηση από http://esamultimedia.esa.int/docs/S1-Data\_Sheet.pdf
- ESA. (2016). Orbit. Ανάκτηση από https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/satellite-description/orbit
- EuropeanCommision.(2015).Sentinel-1.Ανάκτησηαπόhttp://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus\_Factsheets/Sentinel-1\_fiche.pdf
- FEMA. (2012). *FEMA Training: Types of Flood and Floodplains*. Ανάκτηση από https://www.fema.gov/pdf/floodplain/nfip\_sg\_unit\_1.pdf
- Franceschetti, G., Iodice, A., & Riccio, D. (2002). Στο A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 40(8), 1787–1801.
- Hess, L., Melack, J., & Simonett, D. (1990). Radar detection of flooding beneath the forest canopy: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1313–1325.
- Hostache, C., Giustarini, R., & Matgen, P. (2010). A Hierarchical Split-Based Approach (HSBA) for automatically mapping flooded areas using SAR images of variable size and resolution. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- Katarzyna, A., Lyle, T., & Shilu, T. (2012). Floods and human health: A systematic revie. *Environment International*, 47, 37-47. Ανάκτηση από http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2012.06.003
- NASA. (2007). NASA images courtesy the MODIS Rapid Response Team at NASA GSFC. Ανάκτηση από http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=6397
- NASA. (2015). Satellite-Based Flood Monitoring Central to Relief Agencies' Disaster Response. Ανάκτηση από http://www.nasa.gov/feature/goddard/satellite-based-flood-monitoring-central-to-relief-agencies-disaster-response

- National Ocean Service of USA. (2016). What is remote sensing? Ανάκτηση από http://oceanservice.noaa.gov/facts/remotesensing.html
- National Weather Service. (2003). *Tropical cyclonns and flooding*. Ανάκτηση από http://www.srh.weather.gov/floods/
- Nelson, S. (2015). *Flooding Hazards, Prediction & Human Intervention*. Ανάκτηση από http://www.tulane.edu/~sanelson/Natural\_Disasters/floodhaz.htm
- Oregon State University. (2005). Analysis Techniques: Flood Frequency Analysis. Ανάκτηση από http://streamflow.engr.oregonstate.edu/analysis/floodfreq/
- Pathfinder. (2015). Φωτογραφίες από το πλημμυρισμένο χωριό Λαγυνά στον Έβρο. Ανάκτηση από http://www.pathfinder.gr/news/4174204/fwtografies-apo-to-plhmmyrismeno-hwrio-lagyna-ston-ebro/
- Pistrika, A., & Tsakiris, G. (2010). Flood Risk Assessment: A Methodological Framework. *European Water Resources Association, Chania, Crete, Greece, 14–16 June.* Ανάκτηση από http://www.ntua.gr/hazard/publications/EWRA\_2007.Pistrika.pdf
- Pulvirenti, L., Chini, M., Pierdicca, N., & Boni, G. (2016). Use of SAR data for detecting floodwater in urban and suburban areas: the role of the interferometric coherence. *IEEE Transactions on Geoscience* and Remote Sensing, 54(3), 1532 - 1544. doi. 10.1109/TGRS.2015.2482001
- Pulvirenti, L., Chini, M., & Pierdicca. N. (2012). Analysis and interpretation of the COSMO-SkyMed observations of the 2011 Japan Tsunami. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 9(3), 467– 471.
- Pulvirenti, L., Pierdicca, N., Chini, M., & Guerriero, L. (2013). Monitoring flood evolution in vegetated areas using COSMO-SkyMed data: The Tuscany 2009 case study. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(4), 1807–1816.
- Pulvirenti, L., Pierdicca, N., Chini, M., & Guerriero, L. (2011). An algorithm for operational flood mapping from synthetic aperture radar (SAR) data based on the fuzzy logic. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 529–540.
- Shohomich county, Washington. (2011). *About Flooding & Floodplains: Benefits and Hazards*. Ανάκτηση από http://snohomishcountywa.gov/955/About-Flooding-Floodplains-Benefits-and-

- Soffar, H. (2011). *The Flood advantages and disadvantages*. Ανάκτηση από http://www.online-sciences.com/the-environment/the-flood-advantages-and-disadvantages/
- Wolff,C.(2013).SyntheticApertureRadar.Ανάκτησηαπόhttp://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab07.en.html

# **ПАРАРТНМА 1**

Δημοσιεύσεις και παρουσιάσεις σε διεθνή συνέδρια στις οποίες έχω λάβει μέρος κατά τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας:

**1.** Ganas, A., Elias, P., Bozionelos, G., Papathanassiou, G., Avallone, **A., Papastergios**, A., Valkaniotis, S., Parcharidis, I., Briole, P. (2016). Coseismic deformation, field observations and seismic fault of the 17 November 2015 M = 6.5, Lefkada Island, Greece earthquake. *Tectonophysics*, 687, 210–222. http://dx.doi.org/10.1016/j. tecto.2016.08.012



Contents lists available at ScienceDirect

Tectonophysics



# Coseismic deformation, field observations and seismic fault of the 17 November 2015 M = 6.5, Lefkada Island, Greece earthquake



# Athanassios Ganas <sup>a</sup>\*, Panagiotis Elias <sup>b</sup>, George Bozionelos <sup>c</sup>, George Papathanassiou <sup>d</sup>, Antonio Avallone <sup>e</sup>,

Asterios Papastergios <sup>f</sup>, Sotirios Valkaniotis <sup>g</sup>, Issaak Parcharidis <sup>f</sup>, Pierre Briole <sup>h</sup>

<sup>a</sup> National Observatory of Athens, Institute of Geodynamics, Lofos Nymfon, Thission, 11810 Athens, Greece

<sup>b</sup> National Observatory of Athens, Institute of Astronomy, Astrophysics, Space Applications and Remote Sensing, Vas. Pavlou & I. Metaxa, GR-15 236 Penteli, Greece

° National and Kapodistrian University of Athens, Faculty of Geology and Geoenvironment, University Campus - Zografou, Athens GR 157 84, Greece

<sup>d</sup> Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, GR-541 24 Thessaloniki, Greece

° Istituto Nazionale di Geofisica e VulcanologiaINGV, Via di Vigna Murata, 605 00143, Roma, Italy

<sup>f</sup> Harokopeio University of Athens, Dep. of Geography, El. Venizelou Ave, 70, GR 176 76, Kallithea, Greece

<sup>g</sup> Koronidos Str., 42131, Trikala, Greece

<sup>h</sup> Ecole Normale Supérieure, PSL research University, Laboratoire de Géologie - UMR CNRS 8538, Paris, France

# article

# in fo

Article history:

Received 1 February 2016

Received in revised form 6 August 2016

Accepted 11 August 2016

Available online 13 August 2016

*Keywords:* Lefkada deformation GPS

strike-slip InSAR seismic gap

## abstract

On November 17, 2015 07:10:07 UTC a strong, shallow Mw6.5 earthquake, occurred on the island of Lefkada along a strikeslip fault with right-lateral sense of slip. The event triggered widespread environmental effects at the south and western part of the island while, the intensity and severity of these earthquake-induced defor- mations is substantially decreased towards the eastern part of the island. Relocation of seismicity and inversion of geophysical (GPS, InSAR) data indicate that the seismic fault runs parallel to the west coast of Lefkada, along the Aegean - Apulia plate boundary. The fault plane strikes N20 $\pm$  5°E and dips to east with an angle of about 70 $\pm$  5°. Coseismic deformation was measured in the order of tens of centimeters of horizontal motion by continuous GPS stations of NOANET (the NOA GPS network) and by InSAR (Sentinel 1 A image pairs). A coseismic uniform-slip model was produced from inversion of InSAR data and permanent GPS stations. The earthquake measured Mw = 6.5 using both the geodetic moment produced by the slip model, as well as the PGD relation of Melgar et al. (2015, GRL). In the field we observed no significant vertical motion of the shoreline or surface expression of faulting, this is consistent with the predictions of the model. The interferograms show a large decorrelation area that extends almost along all the western coast of Lefkada. This area correlates well with the mapped land- slides. The 2003-2015 pattern of seismicity in the Ionian Sea region indicates the existence of a 15-km seismic gap offshore NW Cephalonia. 1. Tectonic setting

The Lefkada region (Ionian Sea, Greece; Fig. 1) is considered among the most active tectonic areas in Europe and one of the most active zones in the eastern Mediterranean region. It has been repeatedly sub-jected to strong ground shaking due to the proximity of the island to the 140-km long CTF (Cephalonia Transform Fault; Fig. 1; <u>Scordilis et al., 1985;</u> Louvari et al., 1999; <u>Sachpazi et al., 2000; Kokinou et al., 2006</u>). On November 17, 2015, 07:10 GMT (09:10 local time) Lefkada

http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.012

0040-1951/© 2016 Elsevier B.V. All rights reserved.

was struck by a strong, shallow earthquake (NOA magnitudes  $M_L6.0$ -Mw 6.4 respectively; hypocentral depth 11 km; Ganas et al., 2016; Sokos et al., 2016). Published Moment Tensor solutions of this earthquake suggest that it occurred on a near-vertical strike-slip fault running along Lefkada's western coast, with dextral sense of motion in response to ambient ENE-WSW horizontal tectonic strain in the central Ionian Sea (Ganas et al., 2013). This geographic location suggests the earthquake ruptured a coastal fault, in contrast to the 2014 events that occurred on dextral strike-slip faults on shore Cephalonia (<u>Valkaniotis et al., 2014; Boncori et al., 2015; Ganas et al., 2015; Sakkas and Lagios, 2015; Fig.1)</u>.

Previous to the November 17, 2015 event the most recent significant earthquake, with magnitude of Mw 6.2, occurred on August 14, 2003 offshore the northwestern coast of Lefkada Island (Fig. 1). It caused severe damages around the whole island (<u>Papadopoulos et al., 2003;</u> Karakostas et al., 2004; Papathanassiou et al., 2005; Papadimitriou

<sup>\*</sup> Corresponding author.

*E-mail addresses*: aganas@noa.gr (A. Ganas), pelias@noa.gr (P. Elias), georgebozionelos@gmail.com (G. Bozionelos), gpapatha@geo.auth.gr

<sup>(</sup>G. Papathanassiou), antonio.avallone@ingv.it (A. Avallone), gs21131@hua.gr (A. Papastergios), valkaniotis@yahoo.com (S. Valkaniotis), parchar@hua.gr (I. Parcharidis), briole@ens.fr (P. Briole).


Fig. 1. The 17th November 2015 M6.5 Lefkada earthquake (yellow star) and aftershock epicentres recorded by National Observatory of Athens (NOA) until Dec. 30, 2015. Dextral faults along the Cephalonia-Lefkada Transform boundary are shown as black lines. Yellow triangles are permanent GPS stations operated by NOA and CNRS. Blue triangles are seismic stations. Inset shows a regional map of central and north Ionian Sea with GPS stations shown as yellow triangles.

et al., 2006). <u>Papadopoulos et al. (2003) and Pavlides et al. (2004)</u> assumed the source of the 2003 event to be the Lefkada segment of the CTF divided into two smaller segments separated at the geographic latitude of Sesoula Islet - westward of Lefkada (Fig. 1), striking at NNE-SSW to NE-SW and behaving rather independently in terms of seismic

reactivation. In the 12-yr period between the two earthquakes Lefkada was subjected to N-S shortening of 2-3 mm/yr as measured by Ganas et al. (2013) using the NOA GPS station velocity difference (SPAN, PONT; Fig. 1). This shortening strain was interpreted as crustal response

to locking of the offshore south Lefkada segment. The northern limit of the Lefkada segment of CTF may be determined by a thrust event that occurred on November 4, 1973 with M = 5.8 (Baker et al., 1997), offshore the northwest coast of Lefkada island.

In terms of surface geology, Lefkada is comprised of sedimentary rocks (mainly carbonates) that belong to the so-called external Hellenides (<u>Jacobshagen, 1979</u>). In particular, the boundary between two different geological zones – Ionian and Paxos, runs through this region and outcrops onshore central Lefkada Island, forming the



Fig. 2. Graph showing static offsets of NOA GPS station PONT (South Lefkada). Black continuous lines on each time series show the time window in which the average position (and the relative standard deviation) before and after the event have been computed. The dashed line shows the earthquake time occurrence. X-axis is time (s), Y-axis is displacement (cm).

noteworthy Ionian Thrust (dipping northeast). The main part of the island consists of a carbonate sequence of the Ionian zone, while the SW part of the island consists of the limestone of the Paxos geological zone (Bornovas, 1964). Detailed field observations on South Lefkada (Cushing, 1985; Lekkas et al., 2001; Rondovanni et al., 2012), showed several active neotectonic faults striking N-Sand NE-SW. Most importantamong these is the Athanifault (or Athani-Draganofault), it strikes NNE-SSW and is very well expressed in the region's geomorphology (also easily spotted on satellite images and aerial photos). However, field work by Pavlides et al. (2004), did not show the existence of any major, on-shore strikes lip fault that could be held responsible for events N M = 6.0. This finding was confirmed by Ganas et al. (2016) who reported no tectonic surface breaks following the Nov. 17, 2015 event. In this study we present a seismic source model from the inversion of geodetic (GPS and InSAR) data. We will also analyze the aftershock sequence in great detail and discuss the ground deformation in the source region and associated geo-environmental impacts. Our evaluation of the 2003-2015 rupture pattern of large earthquakes in the Ionian Sea region indicates the existence of a 15-km seismic gap offshore NW Cephalonia.

#### 2. Methods and Results

In the following we summarize the results of the source fault inversion, aftershock relocations and mapping of environmental effects. In each subsection we will discuss the methods and summarize the observational results.

#### 2.1. Satellite Geodesy Data and fault model

The National Observatory of Athens during the last 10 years has established several permanent GPS stations in central and western Greece in order to monitor the tectonic motion (Ganas et al., 2008, 2011,2013,2015). In western Greece there are six stations that operate since early2006 - mid2007 (VLSM, RLSO, PONT, SPAN, KASI, KIPO; see www.gein.noa.gr/gps.html for network map and site logs). This paper presents results from data provided by the stations closest to the 2015 seismic source; two (2) permanent GPS stations are onshore Lefkada (SPAN and PONT; Fig. 1) and one station in Cephalonia (VLSM). The available GPS data were analyzed by using Precise Point Positioning strategy (Zumberge et al., 1997) by means of the GIPSY/OASIS II software (ver. 6.3) developed by Jet Propulsion Laboratory (http://gipsyoasis.jpl.nasa.gov, Bertiger et al., 2010). The phase and code data have been reduced by using JPL final fiducial satellite orbits and clocks, apply-ingabsolute antenna calibration, a random walk troposphere estima- tion and the FES2004 tidal coefficients for the ocean loading modeling. The 1-s data were analyzed in kinematic mode, thus providing a posi- tion every epoch of measurements in a 800-s time interval spanning the earthquake occurrence. Further details about the analysis in kine- matic mode can be found in Avallone et al. (2012). Starting from the 1-ssampled position time series, the static offsets have been obtained computing the average position and the relative standard deviation in a 200-s-time window before and after the earthquake (Fig. 2). An inter- val of 400 s spanning the event origin time was ignored in order to avoid that the static offsets determination is affected by any possible coseismic dynamic displacements. It was found that both Lefkada stations moved to the south (35 cm for PONT; 6 cm for SPAN) and to the west (21 cm for PONT; 7 cm for SPAN). A small subsidence (4.5 cm) was measured at PONT. The static offsets are resumed in Table 1.

Regarding InSAR processing we used Sentinel 1 A satellite data (C-band; one fringe corresponds to half wavelength or 28 mm). S1 A is part of the Copernicus mission in constellation with Sentinel 1B, launched on 3 April 2014 is designed to operate in four modes, Strip Map (SM), Interferometric Wide (IW) swath, Extra Wide (EW), and Wave (WV) with IW to be the standard image mode product following the novel Terrain Observation with Progressive Scans (TOPS) acquisition mode. With the TOPSAR technique, in addition to steering the beam in range as in ScanSAR, the beam is steered from backward to forward in the azimuth direction for each burst, avoiding scalloping and resulting in homogeneous image quality throughout the swath. Each original TOPSAR image is of composed three sub- swaths (IW1, IW2, IW3), with each sub-swath consisting of a series of bursts, which totally can provide a large coverage of 250 km with pixel resolutions of 5 m and 20 m along the range and azimuth direc- tions respectively (single look; Berger et al., 2012; Schubert et al., 2015). In this study for interferometric processing, both ascending track 175 and descending track 80 Sentinel-1 A IW swath mode SLC im- ages covering the pre- and post- Lefkada 2015 seismic event period were downloaded from ESA's Sentinel Hub site. Based on the relative rich data set of images, due to the high temporal resolution of Sentinel 1 A, a number of ascending and descending pre- co- and post-seismic interferograms have been created. Each interferogram provides an estimation of the relative motion of the earth surface in the direction viewing of the satellite (LOS) which direction is different for ascending and descending tracks (Fig. 3a, b). Interferograms with different imag- ing geometry can provide more information about surface deformation and a more reliable co-seismic slip model (Wright et al., 2004).

SAR data processing was performed using ESA's SNAP software. After selecting the appropriate sub-swaths (SW1 for the ascending and SW2 for the descending) containing Lefkada and surrounding area and applying the restituted orbit files the co-registration step was

Table 1

 $Mean co-seismic offsets of the GPS sites (A), for each component (n, e, v), and relative 2-sigma uncertainties (\sigma) calculated before (b) and after (a) the main shock (see text). Number of samples (N) used in each average and acquisition sampling rates (S), as well as site coordinates (Lat, Long) are also shown. Station info can be seen at www.gein.noa.gr/gps.html. Station location is shown in Fig. 1.$ 

SITE	Lat (°)	Long (°)	A <sub>n</sub> (cm)	o <sup>b</sup> <sub>n</sub> (cm)	o <sup>a</sup> <sub>n</sub> (cm)	A <sub>e</sub> (cm)	o <sup>b</sup> <sub>e</sub> (cm)	o <sup>a</sup> <sub>e</sub> (cm)	A <sub>v</sub> (cm)	ov (cm)	o <sup>a</sup> <sub>v</sub> (cm)	$N^b$	N <sup>a</sup>	S (Hz)
KASI	38.75	19.94	-0.1	0.8	0.6	0.0	0.6	0.5	1.1	1.3	1.7	201	201	1
PONT	38.62	20.59	-34.9	1.5	1.2	-20.7	1.0	1.3	-4.5	2.6	3.1	201	201	1
SPAN	38.78	20.67	-5.8	1.0	0.6	-7.3	0.4	0.5	1.0	3.6	3.0	201	201	1
VLSM	38.18	20.59	-0.7	1.0	1.6	0.0	0.7	0.9	-0.2	1.9	3.2	201	201	1



Fig. 3. Sentinel 1 A wrapped interferogram ascending orbit (a) descending orbit (b) and co-seismic fault models (c, d), respectively. Arrows show predicted (green) and observed (red) displacements of permanent GPS stations. The inferred source for the mainshock is shown by the white rectangle (surface projection) and the additional oblique-slip patch near the NE end. Aftershock epicentres recorded by NOA until Dec. 30, 2015 are marked with white circles according to their magnitude. Black lines indicate the samples of the observed fringes (used in the inversion). Beachball indicate focal mechanism of the earthquake (GCMT solution; http://www.globalcmt.org/). Figure prepared by use of GMT software (Wessel et al., 2013).

carried out in order the pixel of the slave images to be moved to align with pixels of the master at a sub-pixel accuracy. Then a shift by a small amount in azimuth and range direction was performed on the

slave bands. Then, the orbit state vectors of the SAR product are updated because the orbit state vectors provided in the metadata of the product are generally not very accurate. They be refined with the precise orbit

files which are available days-to-weeks after the generation of the product (https://qc.sentinel1.eo.esa.int/; last accessed 15 June 2016). The orbit file provides accurate satellite position and velocity information. Based on this information, the orbital contribution was estimated and subtracted from the complex interferograms and the coherence images were created. The interferograms then were flattened by removing the topographic phase based on a reference DEM (~ 90 m) extracted from SRTM. In order to increase the noise to signal ratio (i) a power spectrum filter (Goldstein and Werner, 1998) was applied to reduce the effects of phase noise (ii) multilooking operation was applied using a factor of 4:1 (azimuth: range) in order to reduce the standard deviation of the noise level and obtain approximately square pixel. The comparison of the processed interferograms show that the fringe pattern deformation appears to all co-seismic interferograms, and at the same time do not appear on pre- and post-seismic interferograms. That means that it is related to co-seismic deformation and not related to atmospheric induced phase as appear to both ascending and descend- ing interferometric pairs.

Finally, two interferograms were selected in ascending and descending geometry of acquisition characterized by low spatial and temporal geometrical baselines. Details of the two interferometric pairs used in this study are reported in Table 2.

The interferograms are of good quality and contain the phase difference produced by the main event. Although the two interferograms are similar, they are not identical due to the different acquisition geometry (Fig. 3). Areas characterized as low coherence, the noisy areas in the images, can be attributed to temporal decorrelation mainly due to the vegetation land cover areas that exist on the island and abundance of coseismic landsliding. Relatively low magnitude aftershocks happened in the period covered partially by the descending pair; they did not af-fect the deformation signal as it has not been recorded meaningfully in any post-seismic interferometric pair. The deformation field, visual- ized by a number of fringes forming partially a lobe in the ascending and descending mode, occurs in the southwestern part of the island where the main event epicenter is located. A second minor lobe of fringes is observed only in the descending interferogram right next and just north of the main lobe fringes. The maximum value of deforma- tion in the line-of-sight (LOS) reached, is 36 cm towards the satellite both in descending and ascending interferograms while the minor lobe in the descending image display a maximum displacement of 20 cm, along the LOS, away from the satellite. The deformation occurred in the area between the two islands could not be measured, being off- shore, but it can be estimated after the modelling.

Moreover, in the northern part of Cephalonia Island a deformation signal due to earthquake exists in both interferograms. Specifically, the pattern of the fringes corresponds to approximately 12 and 16 cm displacement (LOS) towards the satellite for the ascending and descending viewing geometry, respectively. The fringes in this area play an important role for constraining the south edge of the fault as we will examine in the next section.

The probable influence from the stratified tropospheric noise has been examined by inspecting their contribution on the interferograms using a range of linear correlations of the phase and the altitude (see supplementary text S1). The small change of the location of the detected fringes doesn't affect considerably the modelling. Moreover, the line of sight displacement of the GPS stations has been used as tie values to assess the "zero" for the fringes that fed the inversion of the modelling procedure, this methodology warrants that the fringes

Table 2

Details of the two S1 A interferometric pairs used for this study.

Parameters of the 17/11/2015 seismic fault determined	d from inversion of geodetic data.
---	------------------------------------

Seismic Fault Parameter	Value
Fault length (km)	23
Fault width (km)	10
Fault Dip angle (degrees)	71
Azimuth (clockwise from North - degrees)	18
Fault Slip - right lateral (m)	1.2
Centre of upper edge of the fault (UTM East, North) Top of the fault (m)	458,200, 4,272,500 150

represent, at best, the real motions detrended from the common mode of the tropospheric delays. Only local effects could remain but, from our different trials, we have seen that they do not affect the modeling. This is basically because the shape of the fringes is totally de-correlated from the shape of the topography. Based on these investigations we conclude that for further modelling there is no significant effect of the uncorrected troposphericdelay.

We modelled the co-seismic displacements at the NOA GPS stations VLSM (Cephalonia), PONT and SPAN (Lefkada; Fig. 1) together with LOS displacements from SAR interferometry (Sentinel 1 A image pairs; Fig. 3). This model (Fig. 3c, d) makes the assumption of a rectangular fault plane with uniform slip buried within an elastic half-space (Okada, 1985) with a rigidity of 30 GPa and we used an inversion algorithm with minimization of a quadratic norm (Briole et al., 1986, 2015). A simple fault model fits well the GPS and the wide InSAR fringes (see Table 3 for model parameters), but it leaves several fringes not modelled around the north end of the fault. To fit relatively well those local

Satellite	Track	Master	Slave	Perpendicular	Incident
				baseline (m)	Angle (°)
Sentinel-1 A	175 A 80 D	5/11/2015 11/11/2015	17/11/2015 23/11/2015	-25.8 66.2	33.8 39.3

fringes, it is possible to introduce locally an additional component of reverse slip on a small patch located at intermediate depth (between 1 and 6 km depth; see Table 4 for its parameters; Fig. 3c and d show the location at the NE of the fault). This small patch does not reach the surface. We tested different kinematic hypotheses for this patch (ranging from pure strike-slip to pure reverse). The oblique-slip hypothesis is the one that fits well the data, and also visually the fringes pattern. We show the preferred fault model residuals in Fig. 4 (in the descending mode, Fig. 3d) with a mean residual of 20.1 mm, i.e. close to two thirds of a fringe.

The moment estimated from the InSAR-GPS modelling is almost the same for all the tested fault models, 0.93  $\pm~0.03 \times 10^{19}$  N-m, a value 1-2 times higher than the seismic moment provided by seismology (e.g. 0.44 × 10<sup>19</sup> N-m for NOA, 0.46 × 10<sup>19</sup> N-m in <u>Sokos et al., 2016;</u>  $0.67 \times 10^{19}$  N-m for USGS,  $1.18 \times 10^{19}$  N-m for SCARdec-IPGP). We note that there is a relatively large variability (a factor of 2 in general) of the estimated seismic moment from seismological data, and therefore one should not focus the modelling effort too much on trying to comply with a given value of the moment. The location of the main fault patch is very well constrained by all the geodetic data. The synthetic models of strike slip earthquakes, nearly-breaking the surface, demonstrate very clearly that the fault ends at the centre of the lobes (Fig. 3c, d) located at the extremity of the model (it is the well-known butterfly pattern that you see for example in the case of Bam earthquake; Talebian et al., 2004; Stramondo et al., 2005). Northern limit of the fault is at  $38.69^\circ \pm 0.01^\circ$ , southern limit of the fault is  $38.49^\circ \pm 0.01^\circ$ . Therefore, the fault length is well constrained at  $23.5 \pm 2$  km. In addition, this

Table 4

Parameters of the additional fault patch determined from inversion of geodetic data.

Additional Fault patch Parameter	Value
Fault length (km)	6
Fault width (km)	5
Fault Dip angle (degrees)	71
Azimuth (clockwise from North - degrees)	18
Fault Slip - right lateral (m) - reverse (m)	0.6-0.6
Centre of upper edge of the fault (UTM East, North)	461,000, 4,280,000
Top of the fault (m)	1000



2.3. Fieldobservations

Few days after the occurrence of the mainshock, a field survey took place (Nov 19-22, 2015) in order to map the earthquake-induced failures. The majority of earthquake-related phenomena were rock falls, landslides, cracks on the road network and small-scale size liquefaction. There was no surface rupture due to the earthquake. A concise map is shown in Fig. 7 and a list of main observations (in form of KMZ file) is included in the supplement. All the observations were recorded using a hand-held GPS (L1 frequency) with estimated position accuracy between 4 and 10 m, depending on the time of day and weather conditions. In particular, the area that was widely affected by these phenom- ena is the one delineated by the villages of Komilio, Dragano and Athani on the east and to the west by the coastal zone from Porto Katsiki to Ag.

Nikitas (Fig. 7). This zone is characterized as very likely to produce slope

Fig. 4. Graph showing comparison of picked points (blue dots) along the InSAR fringes (descending mode) vs. the modeled displacements (purple squares). Residuals of the fit is shown in yellow triangles (mean residual 20.1 mm).

was a very shallow event, which is a consequence of the high value of the GPS offset at PONT (Fig. 2; further confirmed by the large number of fringes). The moment magnitude predicted by our slip model is 6.5, consistent with estimates using the PGD (peak ground displacement) relation of <u>Melgar et al. (2015</u>). The fault is very close to the west shore of Lefkada.

#### 2.2. Seismic data and aftershock relocations

We relocated nine hundred and sixty (960) aftershocks from the NOA on-line catalogue for the period November 17-December 30, 2015, applying the nonlinear location algorithm NonLinLoc (Lomax et al., 2000; Fig. 5). This algorithm follows the probabilistic formulation of nonlinear inverse problems by Tarantola and Valette (1982) giving a complete probabilistic solution expressed in terms of a posterior density function (PDF). To approximate the likelihood function, Equal Differen- tial Time (EDT) is selected that is much more robust in the presence of outliers,.Oct.-TreeImportancesamplingalgorithmapproachwas used to compute the PDF (Lomax and Curtis, 2001). Several velocity models are tested in order to obtain the best possible accuracy. In order to assess the hypocentral location determination results, histograms with the dif- ference between maximum likelihood and expectation locations, the RMS error, the spatial errors, and the maximum half-axis (LEN3) of the 68% confidence ellipsoid are created and evaluated (see Fig. 6a to f, for histogram plots). Moreover, the form of density scatterplots is taken into account. As an additional procedure, the travel-time residuals are examined separately for each station as a function of the epicentral distance. Finally, cross sections are drawn and the spatial distribution of the foci is "imaged" and compared with the possible activated fault structures. The best

results (Fig. 5) were derived using the Vp/Vs model of Haslinger et al. (1999) removing the arrivals of stations with greater distance than 120 Km. The events with azimuthal gap b 180°, horizontal location errors b 2  $\,$ km and depth error b 2 km are depicted on Fig. 5. From the aftershock spatial distribution, it is evident that there is a general NE-SW arrangement of foci with two main clusters: one in central Lefkada (northern cluster) with shallower hypocenters, ranging between 5 and 10 km and one in the offshore area between Lefkada - Cephalonia (southern cluster) with the focal depths ranging between 8 and 15 km and divided in sub-clusters. The main clusters are formed towards both ends of the rupture (see cross-section bb'; Fig. 5) and around the high-slip areas as it is commonly observed in large, strike-slip earthquakes (e.g. Tatar et al., 2005; Woessner et al., 2006; Wei et al., 2011; Ganas et al., 2014). In addition, the cluster of af- tershocks near Fiskardo (N. Cephalonia) seems to extend away from the main trend almost orthogonally; this is a typical feature of triggered seismicity in strike-slip ruptures (e.g. King et al., 1994) because of static stress transfer.

failures due to the combination of geomorphological parameters (high elevation and steep slope) with the highly fracture rock mass due to tec- tonic activity (Papathanassiou et al., 2005, 2013). In particular, we found that the slope failures are directly associated with pre-existing tectonic discontinuities and steep slopes within heavily fractured sedimentary rocks e.g. limestones. Moreover, at the most heavily damaged area at the coastal zone of Egremnoi and Gialos, the material moved down- wards along pre-existing tectonic discontinuities e.g. fault planes. The wrapped interferogram (Fig. 3a) shows a large decorrelation area that extends almost along all the western coast of Lefkada. This observation correlates well with the mapped landslides (see light green dots in Fig. 7 for landslide occurrence). Generation of liquefaction-induced ground failures was mainly concentrated along the coastal zone between the villages of Vassiliki and Ponti. In particular, spots of small-scale liquefac- tion features e.g. sand craters and a ground crack through which grey fine-grained material was ejected were reported. In addition, the 2015 earthquake induced severe damages to the waterfront area of Vassiliki and particularly to the recently constructed pier and quay. Regarding the eastern part of the island, the earthquake triggered only sparse and small size rock falls on very prone to slope failures sites e.g. road cuts while at the northern part of the island, where the city of Lefkada is located, no geoenvironmental effects were mapped. The documenta- tion of the earthquake-induced environmental effects was realized using the Earthquake Geo Survey App. (for Android OS) and the obser- vations are available as KMZ file.

#### 3. Discussion

#### 3.1. InSAR pattern and Landslides along the Dragano fault

We can use the information on ground motion from the wrapped interferograms (Fig. 3) to investigate the nonrandom location of loss of phase coherence in relation to imaging geometry (layover or foreshortening), surface geology and geomorphology in south Lefkada. First, we observe that the combination of high slopes in south Lefkada with the incident angles of Sentinel 1 A (Table 2) results in foreshortening (in ascending mode; see Fig. 3a) and shadowing (in de- scending mode; see Fig. 3b) of west facing slopes, respectively. Second, in the field we have observed that the dominant geoenvironmental effects triggered by the 2015 Lefkada earthquake were related to slope failures (Fig. 7), so it is possible that co-seismic landsliding had some ef- fect in loss of coherence. A third factor could be that phase coherence was lost because of strike-slip motion along the Dragano-Athani fault (Cushing, 1985; Fig. 8). Another scenario is that the Dragano - Athani fault (Fig. 8; long white line with arrows) ruptured in dextral strike- slip motion without surface breaks so that the InSAR fringes are reversed across the fault.

Our field mapping showed a) that there was no surface rupture along the Dragano fault or anywhere along the Dragano-Athani valley (Fig. 8, inset) b) that rock falls and landslides were widespread on the western part of the island, on both natural and cut slopes (Fig. 7)





Fig. 5. Map (top) showing the relocated seismicity in terms of both depth and magnitude distribution bottom) Cross sections along dip aa', the east-dipping fault appears consistent with the alignment of the hypocenters at depths 5-12 km bb') along strike shows an activated rupture zone of nearly 50 km long: The main event and the largest aftershock are marked withstars.



Fig. 6. Histograms showing statistics of relocation: a) vertical error (km) b) horizontal error (km) c) solution rms error (s) d) depth distribution of events (km) e) distance (km) between maximum likelihood and expectation locations and f) maximum half-axis (len3) of the 68% confidence ellipsoid.

# Legend



Fig. 7. Spatial distribution of earthquake-induced failures triggered by the November 17, 2015 event and indicative photos of failures taken on 19–22 November 2015. A) & I) rock falls and rock slides along the road network Tsoukalades – Agios Nikitas, B) Landslide along the road network Dragano – Agios Petros, C) Asphalt cracks at the entrance of village Dragano, D) rock falls at Porto Katsiki beach, E) sand crater west of Vassiliki, FandG) structural damages at the waterfront area of Vassiliki, H) planar slides at Marantochori village.

c) the most densely concentration of these type of earthquake-induced ground deformations was located on the coastal zone from Porto Katsiki to Komilio (Fig. 7) and are accompanied by small and large-size rock

falls, rock mass slides and shallow landslides. It should be pointed out that this zone has been classified as very susceptible to slope failures by <u>Papathanassiou et al. (2013</u>). Moreover, our InSAR processing was

A. Ganas et al. / Tectonophysics 687 (2016) 210-222



Fig. 8. Close-up of the Dragano-Athani area in SWLefkada showing S1A wrapped interferogram (ascending orbit) over high-resolution topography. Thin, white lines are faults with arrows indicating relative sense of movement. Red, thick line indicates the boundary where loss of coherence has occurred; this boundary is 400-m to the west of Dragano fault, a dextral strike- slip fault mapped by Cushing (1985). Inset at lower right shows a shaded relief model of the same area together with drainage (blue lines) and co-seismic landslides (green dots).

able to map uninterrupted, co-seismic deformation (InSAR fringes) across the Dragano-Athani fault. To emphasize this point we overlay the wrapped S1 A interferogram together with mapped faults from Cushing (1985) on a high-resolution 5-m DEM of the Dragano-Athani valley (Fig. 8). It is evident that the fringe geometry is systematically destroyed about 400 m west of the Dragano fault's trace and along the line of N-S co-seismic landslides mapped by us (Fig. 8, inset). We suggest that the loss of coherence west of the red line in Fig. 8, is due to the combined effect of: a) disturbance of land stability and b) steep topography (with the west-facing cliffs along the coast) with impact on the generation of the interferogram. We therefore suggest that the InSAR image provides no evidence of tectonic motion along the Dragano Fault or (in general) of surface faulting inside the Dragano valley.

#### 3.2. Seismic gap offshore Assos – Fiskardo (NW Cephalonia)

One important implication of the 2015 earthquake occurrence is its positioning within the NNE-SSW Cephalonia-Lefkada plate boundary. From space geodesy (Fig. 3) we can propose a well-constrained rupture extent of about 23-km along the plate boundary, with a dip-direction to the east. However, the August 2003 event's location and rupture extent is still debated (i.e. one or two fault sources; see literature review in Saltogianni and Stiros, 2015). According to Greek seismic catalogues

(incl. Global CMT database; http://www.globalcmt.org/) the November 2015 Lefkada event is located between the August 2003 (north Lefkada) and the January-February 2014 Cephalonia events (Figs. 1, 9). In addi- tion, the previousstrong events affecting Lefkada according to literature

were the two 1948 events with comparable magnitudes M = 6.4-6.5 (22 April 1948; 30 June 1948; Fokaefs and Papadopoulos, 2004; Papathanassiou et al., 2005). However, it is difficult to constrain spatial-ly the extent (or dip-direction) of the 1948 ruptures (also their gap or overlap with the 21st century events) due to lack of geological and other geophysical data, although it seems reasonable to assign both 1948 events to the activation of the Lefkada segment of CTF (Louvari et al., 1999). Despite the uncertainties, the 1948 macroseismic data favor a repetition of the 2003/2015 pattern (with a delay of 12 years regarding the south segment). The recognition of this seismic pattern along the Lefkada segment of CTF is an important feature, that will be discussed elsewhere.

Regarding the offshore area to the southwest of Cephalonia (Fig. 9), CTF is accumulating elastic strain since January 17, 1983 (Mw = 6.8, Global CMT solution; epicentre from NOA http://www.gein.noa.gr/en/ seismicity/earthquake-catalogs) with an average slip rate of 2  $\pm$ 

0.5 cm/yr (Serpelloni et al., 2005; Vernant et al., 2014; Pérouse et al., 2016). Considering typical fault dimensions for 1983-type of strikeslip events (roughly 30 km by 10 km; length - width) and applying the Mo-Mw formula of Hanks and Kanamori (1979), the amount of accumulated strain along CTF since 1983 can be released by a seismic event of M6.4  $\pm$  0.1, at any time (assuming uniform loading since penultimate event and no creep). This segment of CTF is highlighted in violet (Fig. 9) using information on its geometry from Scordilis et al. (1985) and Kassaras et al. (2016). We have no reliable data to assess the seismic potential of CTF offshore western Cephalonia (i.e. west and north of GPS station KIPO in Fig. 9), i.e. if it comprises one or two segments and how



Fig. 9. Relief map of central Ionian Sea showing rupture extent of the 1983, 2003, 2014 and 2015 shallow earthquakes. All earthquakes ruptured dextral strike slip faults with magnitudes ranging from 5.9 b M b 6.9. Activated faults dip to the east, except for the 3 Feb. 2014 fault that dips to the west (Boncori et al., 2015). A seismic gap (rectangle highlighted in yellow) is evident in the offshore area to the west of GPS stations FISK & ASSO (NW Cephalonia). Inset map shows map extent of 2003 events (green dots) and 2015 events (blue dots). Yellow stars are earthquake epicentres. Black triangles are permanent GPS stations.

historical seismicity is distributed (due to large epicentral errors related to historical events).

In this paper we present evidence for a 15-km long seismic gap that is left unbroken along the Cephalonia segment of CTF. The evidence is mainly based on seismological and geodetic (GPS, InSAR data). First, on the 2003 Lefkada event it is suggested that the east-dipping, dextral seismic fault runs along the northwestern coast of Lefkada (cyan rectangle in Fig. 9; its aftershocks complexity is discussed by <u>Karakostas and Papadimitriou, 2010</u>). Regarding the 2003 seismicity pattern <u>Papadopoulos et al. (2003)</u>, <u>Karakostas et al. (2004)</u> and Papadimitriou et al. (2006) consider the southern cluster of seismicity (located close to the north-western coast of Cephalonia Island; Fig. 9 inset, with dark green dots) rather representing a triggered seismicity on the Cephalonia segment of CTF, due to stress increase from the main shock, than typical aftershock activity due to asperity rupture. Second, our results on the 2015 event indicate rupture of the south Lefkada segment (Fig. 9, red rectangle). Third, the 2014 events onshore Cephalonia ruptured two dextral strike-slip faults (Valkaniotis et al., 2014; Boncori et al., 2015) with opposite dip-directions and located 7-10 km to the east of the Cephalonia segment of the CTF transform fault (Ganas et al., 2015). Fourth, it has to be noted at the northern end of the 2014 rupture an almost E-W structure was activated offshore south of ASSO, (Karastathis et al., 2015; Fig. 7a of that paper), also reactivated during late 2014-early 2015 (Karakostas et al., 2015), indicat-ing a kind of structural control on the segmentation of CTF. In conclusion, the 2003-2015 rupture history of the plate boundary

indicates the activation of fault segments to the north of the latitude of Assos - Fiskardo (Fig. 9) as well as to the south of it, but not inside the offshore area west of Fiskardo and Assos.

Therefore, our tectonic interpretation suggests the existence of a seismic gap offshore NW Cephalonia (Fig. 9) constraining better the suggestions of <u>Briole et al. (2015</u>). We cannot rule out the possibility that most of this segment has not broken yet because of the 2-5 km + uncertainty in past epicentre locations offshore western Cephalonia (for example, during the Ms. 5.8 event of 1992; <u>Tselentis et al., 1997</u>; and/or during the Mw 5.7 event of 25 March 2007, see <u>Papadopoulos et al., 2014</u>) and could be activated in the future. It is a 15-km long segment, therefore with the potential of M =6 or more.

We think that it is necessary to focus our attention at the northern Cephalonia (including the offshore area), and try to better understand what is its behaviour in terms of seismicity patterns and ground deformation, and consider and test various scenarios towards seismic hazard mitigation.

#### 4. Conclusions

Our conclusions are:

- a) On 17th November 2015 a shallow Mw = 6.5 event occurred along a strikeslip fault with right-lateral sense of slip. Relocation of seismic- ity (Fig. 5) and inversion of geodetic data (Fig. 3) suggests that the seismic fault runs parallel to the west coast of Lefkada, along the Aegean - Apulia plate boundary.
- b) We made a fault modelling that combines the ascending and de- scending Sentinel InSAR observations and the GPS displacements, as well. Mixing ascending and descending orbits provides a more robust solution. We find that we can model the local fringe near the northern end of the fault by putting a component of reverse slip on a small patch of the fault. The location of the main fault patch is very well constrained Northern limit of the fault  $38.69^\circ \pm 0.01^\circ$ , southern limit of the fault  $38.49^\circ \pm 0.01^\circ$ . Therefore, the fault length is well constrained at  $23.5 \pm 2$  km.
- c) The inversion of geodetic data suggests that the upper part of the fault is offshore very close to the coast, and at very shallow depth ( $0.5 \pm 0.5$  km), as constrained by the azimuth and amplitude of the ground motion at NOA GPS stations and InSAR observations. The fault plane strikes N20  $\pm$  5°E and dips to east with an angle of about 70  $\pm$  5°.
- d) Environmental effects include liquefaction, extensive rock falls and landslides. No surface ruptures were found in the field. Road cracks are interpreted as secondary phenomena of gravitational nature induced by ground shaking.
- e) We have not observed significant vertical motion of the shoreline and this is consistent with the predictions of the model.
- f) The 2003-2015 pattern of seismicity in the Ionian Sea region indi- cates the existence of a 15-km seismic gap offshore NW Cephalonia.

#### Acknowledgments

We are indebted to two anonymous reviewers and to the Editor Philippe Agard for constructive comments. We thank the NOA seismic analysis team for phase data. Sentinel 1 A images provided free by ESA's Sentinels Scientific data Hub. We thank the ESA Seismic Pilot Lead Philippe Bally and the GEO Supersite Coordinator Stefano Salvi, for activating satellite acquisition imagery. We are grateful to local residents Gerassimos Katopodis and Panagiotis Zogos and to Athanasia Tompolidi for their help in the field. We also thank Efthimios Lekkas, Iannis Koukouvelas, Efthimios Sokos, Yiannis Kassaras, Vassilis Karakostas, Dimitar Dimitrov, Ziri Zahradnik, Panagiotis Paschos, Alexandra Moshou, Panagiotis Argyrakis, Evangelos Mendonidis, Marios The 2003 aftershock locations were provided by Vassilis Karakostas. NOANETGPSdataisavailable from the NOAGSAC webservice http:// 194.177.194.238:8080/noanetgsac/ Fieldwork was funded by the GSRT project INDES-MUSA http://www.indes-musa.gr/ FP7 project RASOR http://www.rasor-project.eu/ and by CNRS-INSU. FISK & ASSO GPS re- ceivers were provided by CNRS-INSU. The establishment of NOANET in the Ionian Islands was funded by EU projects PREVIEW (FP6 contract 516,172) RASOR (FP7-SPACE-2013-1 contract 606,888) and by ESA

project TERRAFIRMA.

Map. KMZ file containing the Google map of the most important areas described in this article.

### Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found in the online version, at http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.012. These data include the Google map of the most important areas described in this article.

#### References

- Avallone, A., D'Anastasio, E., Serpelloni, E., Latorre, D., Cavaliere, A., D'Ambrosio, C., Del Mese, S., Massucci, A., Cecere, G., 2012. High-rate (1 to 20-Hz) GPS co-seismic dynam- ic displacements carried out during the 2012 Emilia seismic sequence. Ann. Geophys. 55 (4). http://dx.doi.org/10.4401/ag-6162.
- Baker, C., Hatzfeld, D., Lyon-Caen, H., Papadimitriou, E., Rigo, A., 1997. Earthquake mechanisms of the Adriatic Sea and Western Greece: implications for the oceanic subduction-continental collision transition. Geophys. J. Int. 131, 559–594.
- Berger, M., Moreno, J., Johannessen, J.A., Levelt, P.F., Hanssen, R.F., 2012. ESA's sentinel missions in support of earth system science. Remote Sens. Environ. 120, 84–90.
- Bertiger, W., et al., 2010. Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data.

#### J. Geod. 84 (5), 327-337.

Boncori, Merryman, J.P., Papoutsis, I., Pezzo, G., Tolomei, C., Atzori, S., Ganas, A., Karastathis, V., Salvi, S., Kontoes, C., Antonioli, A., 2015. The February 2014 Cephalonia Earthquake (Greece): 3D Deformation Field and Source Modeling from Multiple SAR Techniques. Seismol. Res. Lett. 86 (1), 124–137. http://dx.doi.org/10.1785/

#### 0220140126 (January/February 2015).

- Bornovas, J., 1964. Géologie de l'île de Lefkade. Geol. Geophys. Res. (Spec. Publ. Greek Geol. Surv.)10(1)(Athens).
- Briole, P., De Natale, G., Gaulon, R., Pingue, F., Scarpa, R., 1986. Inversion of geodetic data and seismicity associated with the Friuli earthquake sequence (1976-1977). Ann. Geophys. 4 (B4), 481-492.
- Briole, P., Elias, P., Parcharidis, I., Bignami, C., Benekos, G., Samsonov, S., Kyriakopoulos, C., Stramondo, S., Chamot-Rooke, N., Drakatou, M.L., Drakatos, G., 2015. The seismic se- quence of January-February 2014 at Cephalonia Island (Greece): constraints from SAR interferometry and GPS. Geophys. J. Int. http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggv353.
- Cushing, M., 1985. Evolution structurale de la marge nord ouest hellenique dans l'1 le de Levkaset ses environs (Grece nord occidentale). These 3me cycle. Univ.de Paris-Sud. Fokaefs, A., Papadopoulos, G.A., 2004. Historical earthquakes in the region of Lefkada Island, Ionian Sea estimation of magnitudes from epicentral intensities. Bull. Geol.

#### Soc. Greece 36, 1389-1395.

Ganas, A., Drakatos, G., Rontogianni, S., Tsimi, C., Petrou, P., Papanikolaou, M., Argyrakis, P., Boukouras, K., Melis, N., Stavrakakis, G., 2008. NOANET: the new permanent GPS network for Geodynamics in Greece. Geophys. Res. Abstr. 10 (EGU2008-A-04380).

- Ganas, A., Chousianitis, K., Drakatos, G., Papanikolaou, M., Argyrakis, P., Kolligri, M., Petrou, P., Batsi, E., Tsimi, C., 2011. NOANET: High-rate GPS Network for Seismology and Geodynamics in Greece. Geophys. Res. Abstr. 13 (EGU2011-4840, 2011, EGU General Assembly 2011).
- Ganas, A., Marinou, A., Anastasiou, D., Paradissis, D., Papazissi, K., Tzavaras, P., Drakatos, G., 2013. GPSderived estimates of crustal deformation in the central and north Ionian Sea, Greece: 3-yr results from NOANET continuous network data. J. Geodyn. 67, 62–71.
- Ganas, A., Roumelioti, Z., Karastathis, V., Chousianitis, K., Moshou, A., Mouzakiotis, E., 2014. The Lemnos 8 January 2013 (Mw = 5.7) earthquake: fault slip, aftershock properties and static stress transfer modeling in the north Aegean Sea. J. Seismol. 18 (3), 433-455.
- Ganas, A., Cannavo, F., Konstantinos, C., Ioannis, K., George, D., 2015. Displacements re- corded on continuous GPS stations following the 2014 M6 Cephalonia (Greece) earthquakes: dynamic characteristics and kinematic implications. Acta Geodyn. Geomater. 12 (1 (177)), 5-27.
- Ganas, A., Melgar, D., Briole, P., Geng, J., Papathanassiou, G., Bozionelos, G., Avallone, A., Valkaniotis, S., Mendonidis, E., Argyrakis, P., Moshou, A., Elias, P., 2016. Coseismic deformation and slip model of the 17 November 2015 M = 6.5 earthquake, Lefkada Island, Greece. Geophys. Res. Abstr. 18 (EGU2016-12041, EGU General Assembly 2016).

Goldstein, R., Werner, C., 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications.

Geophys. Res. Lett. 25, 4035-4038.

Hanks, T.C., Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. J. Geophys. Res. 84 (B5), 2348-2350. http://dx.doi.org/10.1029/JB084iB05p02348.

- Haslinger, F., Kissling, E., Ansorge, J., Hatzfeld, D., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Makroploulos, K., Kahle, H.-G., Peter, Y., 1999. 3-D crystal structure from local earthquake tomography around the Gulf of Arta (Ionian region, NW Greece). Tectonophysics 304, 201–218.
- Jacobshagen, V., 1979. Structure and geotectonic evolution of the Hellenides. Proc. VI Colloq Aegean Region Athens 1977. IGMR, Athens, pp. 1355-1367.
- Karakostas, V., Papadimitriou, E., 2010. Fault complexity associated with the 14 August 2003 Mw6.2 Lefkada, Greece, aftershock sequence. Acta Geophys. 58 (5), 838-854.
- Karakostas, V., Papadimitriou, E., Papazachos, C., 2004. Properties of the 2003 Lefkada, Ionian islands, Greece, Earthquake seismic sequence and seismicity triggering. BSSA 94 (5), 1976–1981.
- Karakostas, V., Chouliaras, G., Papadimitriou, E., Drakatos, G., Mesimeri, M., 2015. The 2014 Kefalonia seismic sequence and continuous microseismicity monitoring. EGU Gen. Assem. Conf. Abstr. 17, 3875.
- Karastathis, V.K., Mouzakiotis, E., Ganas, A., Papadopoulos, G.A., 2015. High-precision relocation of seismic sequences above a dipping Moho: the case of the lanuary – February 2014 seismic sequence on Cephalonia island (Greece). Solid Earth 6, 173–184. http://dx.doi.org/10.5194/se-6-173-2015.
- Kassaras, I., Kapetanidis, V., Karakonstantis, A., 2016. On the spatial distribution of seis- micity and the 3D tectonic stress field in western Greece. Phys. Chem. Earth A/B/C http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2016.03.012 (ISSN 1474-7065).
- King, G.C.P., Stein, R.S., Lin, J., 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes.
  - Bull. Seismol. Soc. Am. 84 (3), 935-953.
- Kokinou, E., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Kamberis, E., Vallianatos, F., 2006. The Kefalonia transform zone (offshore western Greece) with special emphasis to its prolongation towards the Ionian abyssal plain. Mar. Geophys. Res. 27 (4), 241-252. http://dx.doi.org/10.1007/s11001-006-9005-2.
- Lekkas, E., Danamos, G., Lozios, S., 2001. Neotectonic structure and neotectonic evolution of Lefkada Island. Bull. Geol. Soc. Greece XXXIV (1), 157-163.
- Lomax, A., Curtis, A., 2001. Fast, probabilistic earthquake location in 3D models using Oct- Tree Importancesampling.Geophys.Res.Abstr.3.
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P., Thierry-Berge, C., 2000. Probabilistic earthquake location in 3D and layered models. In: Thurber, C.H., Rabinowitz, N. (Eds.), Advances in Seismic Event Location. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London, pp. 101–134.
- Louvari, E., Kiratzi, A.A., Papazachos, B.C., 1999. The CTF and its extension to western Lefkada Island. Tectonophysics 308, 223-236.
- Melgar, D., Crowell, B.W., Geng, J., Allen, R.M., Bock, Y., Riquelme, S., Hill, E.M., Protti, M., Ganas, A., 2015. Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement. Geophys. Res. Lett. 42. http://dx.doi.org/10. 1002/2015GL064278.
- Okada, Y., 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. Bull.

#### Seismol. Soc. Am. 75 (4), 1135-1154.

- Papadimitriou, P., Kaviris, G., Makropoulos, K., 2006. The Mw = 6.3 2003 Lefkada Earth- quake (Greece) and induced stress transfer changes. Tectonophysics 423, 73–82.
- Papadopoulos, G.A., Karastathis, V.K., Ganas, A., Pavlides, S., Fokaefs, A., Orfanogiannaki, K., 2003. The Lefkada, Ionian Sea (Greece), shock (Mw 6.2) of 14 August 2003: Evidence for the characteristic earthquake from seismicity and ground failures. Earth Planet. Space 55, 713–718.
- Papadopoulos, G.A., Karastathis, V.K., Koukouvelas, I., Sachpazi, M., Baskoutas, I., Chouliaras, G., Agalos, A., Daskalaki, E., Minadakis, G., Moschou, A., Mouzakiotis, E., Orfanogiannaki, A., Papageorgiou, A., Spanos, D., Triantafyllou, I., 2014. The Cephalonia, Ionian Sea (Greece), sequence of strong earthquakes of January- February 2014: a first report. Res. Geophys. 4, 19–30.
- Papathanassiou, G., Pavlides, S., Ganas, A., 2005. The 2003 Lefkada earthquake: Field observations and preliminary microzonation map based on liquefaction potential index for the town of Lefkada. Eng. Geol. 82 (1), 12–31.
- Papathanassiou, G., Valkaniotis, S., Ganas, A., Pavlides, S., 2013. GIS-based statistical analysis of the spatial distribution of earthquake-induced landslides in the island of Lefkada, Ionian Islands, Greece. Landslides 10 (6), 771-783.

Pavlides, S.B., Papadopoulos, G.A., Ganas, A., Papathanassiou, G., Karastathis, V., Keramydas, D., Fokaefs, A., 2004. The 14 August 2003 Lefkada (Ionian Sea) Earthquake. 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Thessaloniki, Greece, 14-20 April 2004, Reference T5-34.

Pérouse, E., Sébrier, M., Braucher, R., et al., 2016. Transition from collision to subduction in Western Greece: the Katouna-Stamna active fault system and regional kinematics. Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.) http://dx.doi.org/10.1007/s00531-016-1345-9.

Rondoyanni, T., Sakellariou, M., Baskoutas, J., Christodoulou, N., 2012. Evaluation of active faulting and earthquake secondary effects in Lefkada Island, Ionian Sea, Greece: an overview. Nat. Hazards 61, 843-860. http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-0080-6.

Sachpazi, M., et al., 2000. Western Hellenic subduction and Cephalonia Transform: local earthquakes and plate transport and strain. Tectonophysics 319, 301–319.

- Sakkas, V., Lagios, E., 2015. Fault modelling of the early-2014 ~ M6 Earthquakes in Cephalonia Island (W. Greece) based on GPS measurements. Tectonophysics 644-645, 184-196. http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.010.
- Saltogianni, V., Stiros, S., 2015. A two-fault model of the 2003 Leucas (Aegean Arc) earthquake based on topological inversion of GPS data. Bull. Seismol. Soc. Am. 105 (5), 2510-2520.

Schubert, A., Small, D., Miranda, N., Geudtner, D., Meier, E., 2015. Sentinel-1 A product geolocation accuracy: Commissioning phase results. Remote Sens. 7 (7), 9431–9449. Scordilis, E.M., Karakaisk, G.F., Karakostas, B.G., Panagiotopoulos, D.G., Comninakis, P.E., Papazachos, B.C., 1985. Evidence for <u>Transform Faulting in the Ionian Sea: the Cephalonia Island Earthquake Sequence of 1983. Pure</u> <u>Appl. Geophys. 123, 388–397.</u>

- Serpelloni, E., Anzidei, M., Baldi, P., Casula, G., Galvani, A., 2005. Crustal velocity and strain-rate fields in Italy and surrounding regions: new results from the analysis of permanent and nonpermanent GPS networks. Geophys. J. Int. 161 (3), 861–880. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246x-2005.02618.x.
- Sokos, E., Zahradník, J., Gallovič, F., Serpetsidaki, A., Plicka, V., Kiratzi, A., 2016. Asperity break after 12 years: The Mw6.4 2015 Lefkada (Greece) earthquake. Geophys. Res. Lett. 42. http://dx.doi.org/10.1002/2016GL069427.
- Stramondo, S., Moro, M., Tolomei, C., Cinti, F.R., Doumaz, F., 2005. InSAR surface displace- ment field and fault modelling for the 2003 Bam earthquake (southeastern Iran). J. Geodyn. 40 (2-3), 347-353.
- Talebian, M., et al., 2004. The 2003 Bam (Iran) earthquake: Rupture of a blind strike-slip fault. Geophys. Res. Lett. 31, L11611. http://dx.doi.org/10.1029/2004GL020058.

Tarantola, A., Valette, B., 1982. Inverse problems = Quest for information. J. Geophys. Res.

50, 159-170.

Tatar, M., Hatzfeld, D., Moradi, A.S., Paul, A., 2005. The 2003 December 26 Bam earthquake (Iran), Mw 6.6, aftershock sequence. Geophys. J. Int. 163, 90–105. http://dx.doi.org/ 10.1111/j.1365-246X.2005.02639.x.

Tselentis, G.-A., Melis, N.S., Sokos, E., Beltas, P., 1997. The winter 1991–1992 earthquake sequence at Cephalonia Island, Western Greece. Pure Appl. Geophys. 150 (1), 75-89. Valkanoits, S., Ganas, A., Papathanassiou, G., Papanikolaou, M., 2014. Field observations of geological effects triggered by the January-February 2014 Cephalonia (Ionian Sea,

Greece) earthquakes. Tectonophysics 630, 150-157.

- Vernant, P., Reilinger, R., McClusky, S., 2014. Geodetic evidence for low coupling on the Hellenic subduction plate interface. Earth Planet. Sci. Lett. 385 (C), 122–129. http:// dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2013.10.018.
- Wei, S., et al., 2011. 2011. Superficial simplicity of the 2010 El Mayor-Cucapah earthquake of Baja California in Mexico. Nat. Geosci. 4, 615-618. http://dx.doi.org/10.1038/ ngeo1213.
- Wessel, P., Smith, W.H.F., Scharroo, R., Luis, J.F., Wobbe, F., 2013. Generic Mapping Tools: Improved version released. EOS Trans. AGU 94, 409-410.
- Woessner, J., Schorlemmer, D., Wiemer, S., Mai, P.M., 2006. Spatial correlation of aftershock locations and on-fault main shock properties. J. Geophys. Res. 111, B08301. http://dx.doi.org/10.1029/2005JB003961.
- Wright, T.J., Parsons, B.E., Lu, Z., 2004. Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. Geophys. Res. Lett. 31 (1), 1–5, L01607. http://dx.doi.org/ 10.1029/2003GL018827.
- Zumberge, J.F., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M.M., Webb, F.H., 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. J. Geophys. Res. 102 (B3), 5005-5018.

 Chini, M., Papastergios, A., Pulvirenti, L., Parcharidis, I., Matgen, P., & Pierdicca, N. (2016). InSAR coherence and polarimetric information from Sentinel-1 to improve flood monitoring in vegetated and urban areas. Paper 1773, presented at *Living Planet Symposium*, http://lps16.esa.int/page\_session180.php#1773p

# SAR COHERENCE AND POLARIMETRIC INFORMATION FOR IMPROVING FLOOD MAPPING

Marco Chini1, Asterios Papastergios1,2, Luca Pulvirenti3, Nazzareno Pierdicca4, Patrick Matgen1, Issaak Parcharidis2

1Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), Environmental Research and Innovation
Department (ERIN), Luxembourg;
2Harokopio University, Greece;
3CIMA Research Foundation, Italy;
4Sapienza University of Rome, Italy.

### ABSTRACT

A spaceborne SAR can be an effective source of information to provide high quality flood maps and support civil protection authorities during an emergency phase. Here we propose a methodology for identifying flood that may occur in different land cover classes, such as urban areas, bare or poorly vegetated soil and vegetated areas. Such approach takes advantage of polarimetric SAR data and the InSAR coherence to better characterize the landscape. Indeed, the high Sentinel-1 repeat cycle (six days when the second satellite will be launched), and its systematic acquisition of dualpol SAR data, provide an unprecedented chance to develop automatic flood mapping algorithms in a complex environment.

The algorithm has been tested on two different Sentinel-1 datasets, one in Greece and the other one in United Kingdom, showing promising results.

Index Terms— SAR, Flood mapping, InSAR coherence, Polarimetry.

# **1. INTRODUCTION**

Numerous studies from the past demonstrated that SAR systems are suitable tools for flood mapping, thanks to high sensitivity to water and capability to provide data day and night, regardless of cloud cover. Nowadays, the most common approaches that make use of earth observation for flood mapping are based on SAR data. Thus, SAR data play a major role in operational services for flood risk management. For the purpose of timely and effective operational services, a number of algorithms published in the literature are available to produce near real time flood maps [1-3]. Although in the last years many progresses have been done in the development of near real time flood mapping procedures, the detection of inundation in a complex environment, such as vegetated and urban areas,

still deserves further studies [4-7], due to the fact that radar signatures of such targets are often ambiguous. The enhanced observational capabilities of C-band Sentinel-1 radar could be fruitfully used for a better detection of floodwater in vegetated and urban areas. Indeed the dual-pol acquisitions mode, the medium spatial resolution (20m) with a huge swath (250 Km width), the high repeat cycle (small temporal baseline) and relative narrow orbit tube (small perpendicular baseline in case of interferometric acquisitions) are all characteristics that make momentum for the development of new automatic flood mapping algorithms in more complex land cover environment.

In the present work, the high sensitivity of the interferometric coherence to small changes in the scene was exploited to detect the presence of water in urban areas, but also to reduce possible false alarms caused by soil moisture effects in case of bare soil and also to extract information about land cover, replacing in this respect optical data features, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Instead, the polarimetric characteristics of Sentinel-1 were used to detect flood in vegetated area, since the cross- and co-polarized channels behave differently in presence of double-bounce between vertical structures and the water surface beneath. All these effects were taken into account by a change detection approach where changes of the backscattering at different polarizations, i.e., co- and cross-pol, and the interferometric coherence driven the detection of flooded pixels in a statistical based framework.

### 2. METHODOLOGY

The approach identifies the flood that occurs in three main land cover classes, such as urban areas, bare or poorly vegetated soil and vegetated areas, taking advantage of coand cross-polarized SAR backscattering channels, and the InSAR coherence to better characterize the landscape.

In a SAR image, the amplitude and phase of the backscatter field depends on the physical (i.e., geometry,

roughness) and electrical (i.e., dielectric constant) properties of the target. The presence of floodwater changes these properties because the surface tends to become smoother and the real part of the dielectric constant becomes considerably larger than that of both dry and moist soils.

In bare soil conditions a decrease of roughness makes the backscattering decrease, an effect which is similar in both co- and cross-polarized channels. This allows one to identify the insurgence of flood taking into account just the backscattering intensity.

In urban areas, the double bounce effect is typically represented in SAR images by a very bright line that appears on the side of the wall that is illuminated by the radar [8]. It is worth mentioning that the double bounce paths have the same length as the range of the intersection between the ground and the front wall of the building. In this case, the increase of reflectivity due to the increase of the surface dielectric constant implies, in principle, a considerable increase of the double bounce effect. If we consider the angle between the flight direction and the street alignment, the increase is high for small angles, while it is reduced for higher angles. As a consequence, the increase of the double bounce due to the presence of floodwater is not very high if buildings are not parallel to the SAR flight direction. This increase can be hardly detected using only the backscatter intensity in a complex urban environment. Hence, the idea is to integrate intensity data with the InSAR coherence. It is defined as the normalized cross correlation between the images and it is related to the change in the spatial arrangement of the scatterers within a SAR image pixel [9], and thus to geometric changes in the scene. An interferometric pair can be built using two images taken before and after the flood. The coherence is a powerful feature to distinguish the presence of water in urban areas since it is usually very high, regardless the temporal baseline, whereas diminishes sensibly in case of a flood.

Concerning vegetated areas, they are usually characterized by low coherence due to changes in plant growing stage. In this case coherence can help distinguishing the increase of backscatter due to the presence of water beneath vegetation, which enhances the double-bounce phenomenon (depending on vegetation optical thickness), from the increase due to bare soil moisture variations, where coherence is considerably lower. In this case the coherence plays basically the role of replacing optical data to detect vegetation.

In vegetated areas, we also took advantage of the two polarizations available with Sentinel-1. Indeed the cross- polarized backscatter is more sensible to volume scattering, while is the co-polarized one the more sensible to the double bounce. As a matter of fact, in vegetated areas we detected a sensible backscatter increase in the VV polarization and much less in the VH one [10].

The algorithm has been applied to two different Sentinel-1 datasets, acquired in the Interferometric Wide

Swath mode. One is composed of a series of SAR scenes of the Evros basin (Greece), which represents a transboundary floodplain, where the flood event interested the period between October 2014 and May 2015. The second dataset concern the severe flood event that hit the United Kingdom on December 2015.

### **3. ACKNOWLEDGEMENTS**

Marco Chini and Patrick Matgen contribution was supported by the National Research Fund of Luxembourg (FNR) through the PAPARAZZI (C11/SR/1277979) and MOSQUITO (C15/SR/10380137) projects.

## **4.REFERENCES**

[1]P. Matgen, R. Hostache, G. Schumann, L. Pfister, L. Hoffmann, and H.H.G. Savenije, "Towards an automate d SAR- based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies," *Physics and Chemistry of the Earth*, 36, 241–252, 2011.

[2]L .Pulvirenti, N. Pierdicca, M. Chini, and L. Guerriero, "An algorithm for operational flood mapping from synthetic aperture radar (SAR) data based on the fuzzy logic," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 529–540, 2011.

[3]M. Chini, A. Piscini, F. R. Cinti, S. Amici, R. Nappi, and P. M. De Martini, "The 2011 Tohoku-Oki (Japan) tsunami in undation and liquefaction investigated by optical, thermal and SAR data,"

IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters, 10 (2), 347-351, 2013.

[4]M. Chini, L. Pulvirenti, and N. Pierdicca, "Ana lysis and interpretation of the COSMO-SkyMed observations of the 2011 Japan Tsunami," *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 9 (3), 467–471, 2012.

[5]L. Giustarini, R. Hostache, P. Matgen, G. J.-P. Schumann, P. D. Bates, and D. C. Mason, "A Change Detection Appr oach to Flood Mapping in Urban Areas Using TerraSAR-X," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51 (4), 2417-2430, 2013.

[6]L. Pulvirenti, N. Pierdicca, M. Chini, and L. Guerriero, "Monitoring flood evolution in vegetated areas usin g COSMO- SkyMed data: The Tuscany2009 case study," *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 6, (4), 1807–1816, 2013.

[7]L. Pulvirenti, M. Chini, N. Pierdicca, and G. Boni, "Use of SAR data for detecting floodwater in urban and suburban areas: the role of the interferometric coherence, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, doi. 10.1109/TGRS.2015.2482001., 2016.

[8]G. Franceschetti, A. Iodice, and D. Riccio, "A canonical problem in electromagnetic backscattering from buildings, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40 (8), 1787–1801, 2002.

[9]C. Yonezawa, and S. Takeuchi, "Decorrelation of SAR data by urban damagescaused by the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake," *Int. J. Remote Sens.*, 22, 1585–1600, 2001.

[10]L. L. Hess, J. M. Melack, and D. S. Simonett, "Radar detection of flooding beneath the forest canopy: A review," *Int. J. Remote Sens.*, 11, 1313–1325, 1990.

Parcharidis, I., Papastergios, A., Boutzouklis, C., & Benekos, G. (2016). HAZA-136
 Mapping by SAR interferometry using Sentinel 1 data of onshore surface deformation induced by offshore seismic events. Poster presented at *Living Planet Symposium*, http://lps16.esa.int/page\_session188.php#1785p

# **THEME: Hazards**

## **Presentation: Poster**

# Mapping by SAR interferometry using Sentinel 1 data of onshore surface deformation induced by offshore seismic events

Issaak Parcharidis<sup>1</sup>, Asteris Papastergios<sup>1</sup>, Christos Boutzouklis<sup>2</sup>, George Benekos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Harokopio University of Athens, Dep. of Geography, <u>parchar@hua.gr</u>; <u>asteriospapas@gmail.com</u>; <u>benekosgis@gmail.com</u>

<sup>2</sup> Lund University, Dep. of Physical Geography and Ecosystem Science, <u>chrisboun@hotmail.com</u>

### Abstract

Greece is located directly north of the boundary between the Eurasian and African plates. The Greek territory is characterized by tectonic deformation, showing a north south displacement. The Aegean and the Ionian region are the most seismically active parts of Europe characterized by a high number of seismic events, most of them located offshore. The seismicity of the Greek mainland and the related induced surface deformation has been in depth studied. Unlike in the case of offshore seismic events, onshore deformation induced has never been mapped except in cases of very strong events with serious consequences.

The aim of this study concerns the mapping of onshore co-seismic deformation provoked by offshore events. On the possibility of the occurrence of surface deformation, provoked by offshore events, two are the main parameters influencing (a) the characteristics of earthquake-induced deformation (b) the distance from the coast line. For implementing this aim we selected three seismic offshore events in three different areas, namely the following seismic event occurred (source NOA/GEIN)

- (i) on 16-4-2015 40 km to south-east of Crete Island with Mw=6.0, depth=36.8 km
- (ii) on 9-6-2015 in Eubea Gulf 70 km NNW from Athens with Mw 5.3 and depth= 23 km
- (iii) on 8-11-2014 3 km SSW of Kefalonia island with Mw=5.0, depth=18.4 km

The approach method is based on repeat-pass interferometry using a rich multitemporal dataset SENTINEL 1A SAR IW mode scenes covering the above three sites. Two factors had to face in the frame of the interferometric processing (a) to form suitable interferometric pairs in terms of temporal and spatial decorrelation and (b) to avoid the possible presence of atmospheric phase in the final product. The first issue is easily solve as a large archive of Sentinel 1 SAR images already stored in Sentinel hub tool. The second one precisely because of the rich archive multiple suitable pairs have been formed and therefore a significant number of interferograms have been created allowing by interpreting different pairs to recognize and exclude scenes that induced atmospheric phase in the final interferogram.

Investigation of onshore co-seismic deformation in terms of pattern and rate, as well expressed faults in onshore regime continue in sea depth, can be used to improve and infer the offshore earthquake generation process and can be also be utilized in seismic hazard assessment.

Keywords: Earthquakes/Tectonics, Geodynamics, SAR, Interferometry

Satellite and data used: Sentinel-1, other



Co-sesimic deformation map of the seismic event which occurred on 16-4-2015, Mw=6.0, depth=36.8 km, produced using ESA Sentinel toolbox s/w and Sentinel 1A scenes 24-3-2015 and 11-5-2015. The image is characterized by a strong contribution of atmospheric phase mainly related to the uplift areas.

4. Papastergios, A., Chini, M., & Parcharidis, I. (2016). Sentinel-1 Data to Map Flooded Areas: The Role of InSAR Coherence and Polarimetric Information. Paper presented at the EGE2016: 14th International Conference of the Geological Society of Greece, http://easychair.org/smart-program/EGE2016/2016-05 26.html#talk:24201

# EGE2016: 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE GEOLOGICAL SOCIETY OF GREECE

### **PROGRAM FOR THURSDAY, MAY 26TH**

### 09:45 Asterios Papastergios, Marco Chini and Parcharidis Issaak

# SENTINEL-1 DATA TO MAP FLOODED AREAS: THE ROLE OF INSAR COHERENCE AND POLARIMETRIC INFORMATION SPEAKER: <u>Asterios Papastergios</u>

ABSTRACT. SAR earth observation data can provide high quality flood maps and information to better assess the flood risk accordingly planning as well as to support civil protection authorities during emergency phase. The scope of this paper is to create flood extent maps from a series of SAR scenes of the Evros basin which represents a transboundary floodplain. The study uses time series SAR images of Sentnel-1 ESA's Copernicus satellite system covering the period October 2014 to May 2015. The methodology tries to identify the flood that occurs in three main land cover classes, such as urban areas, bare or poorly vegetated soil and vegetated areas, tak-ing advantage of co- and cross-polarized SAR backscattering channels, and the In-SAR coherence to better characterize the landscape. Dual-pol SAR data provides the opportunity to have a better understanding and interpretation of flood detection due to way different land cover react to different polarizations. Thus, with the implementation of In-SAR coherence estimation we may achieve a better record and knowledge of the flooded areas, over time, in the specific region.

# 5. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ COPERNICUS, ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΤΟΥ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΟΥ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΚΑΙ Η ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥΣ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΈΒΡΟΥ (2014-2015).

Συγγραφείς: Αστέριος Παπαστέργιος<sup>1</sup>, Ισσαάκ Παρχαρίδης<sup>2</sup>

- 1. Terra Spatium A.E.
- 2. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθήνας

### Εισαγωγή

Τα δορυφορικά συστήματα SAR μπορούν να αποτελέσουν σημαντική πηγή πληροφοριών για την καταγραφή και παροχή των πλημμυρικών εκτάσεων με μεγάλη ακρίβεια σε χάρτες. Επίσης, συμβάλλουν στην υποστήριξη των τοπικών αρχών πολιτικής προστασίας κατά τη διάρκεια μιας φάσης έκτακτης ανάγκης.

### Υλικό

Ο συχνός κύκλος επανεπισκεψιμότητας του Sentinel-1 Α μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε δεδομένα για όλο ή το μεγαλύτερο μέρος κατά μήκος του ποταμού Έβρου, από τρείς έως έξι ημέρες (από 2 εώς 4 μέρες όταν μπει σε τροχιά ο Sentinel-1 B). Η χαρτογράφηση του πλημμυρικού φαινομένου γίνεται την ίδια ημέρα.

### Σκοπός

Συνεπώς, έχουμε μία συνεχή παρακολούθηση και καταγραφή της έκτασης των πλημμυρών σε όλη τη διάρκεια του πλημμυρικού φαινομένου. Μια τόσο συχνή και ακριβή αποτύπωση ενός πλημμυρικού φαινομένου μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό και αναντικατάστατο εργαλείο στη πρόληψη και αντιμετώπιση των καταστροφών στην περιοχή και στα περίχωρα

### Μέθοδος

Εμείς προτείνουμε μια μέθοδο αναγνώρισης πλημμυρών οι οποίες μπορούν να προκύψουν σε διαφορετικά ειδή κάλυψης γης, όπως οι αστικές περιοχές, γυμνή βλάστηση του εδάφους και περιοχές υψηλής βλάστησης.

### Συμπέρασμα- Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα εμφανίζουν μία συνολική χρονική καταγραφή και αποτύπωση της έκτασης των πλημμυρών που προέκυψαν την περίοδο (Δεκέμβριος 2014- Μάιος 2015) στην περίπτωση του Ποταμού Εβρου.