



Βασισμένη σε ΣΓΠ Μοντελοποίηση / Χαρτογράφηση της Επιδεκτικότητας σε Εκδήλωση Κατολίσθησης: Θεωρία και Πράξη (GIS-based Landslide Susceptibility Modeling / Mapping: Theory and Practice)



Εισηγητής: **Δρ. Χρήστος Πολυκρέτης**

PhD στη Γεωπληροφορική για Εκτίμηση Φυσικών Κινδύνων (Κατολίσθηση)

MSc στη Γεωπληροφορική

Γεωγράφος

1. Γενικά περί Κατολίσθησης
2. Ανάλυση κατολισθήσεων με αξιοποίηση Γεωπληροφορικής
3. Παραδείγματα – Μελέτες περίπτωσης
4. Συμπεράσματα



- Διάφορες προτάσεις από Terzaghi (1950), Zaruba and Menci (1969), Coates (1977)
- **Κατολίσθηση (landslide)** ορίζεται η μετακίνηση μιας μάζας προς τα κατόντη ενός πρανούς (Varnes, 1978; Cruden, 1991)



* Μόνο κατακόρυφη διεύθυνση...

Καθίζηση (subsidence)



Ταξινόμηση (τύπος)

4

- Με βάση τον τύπο μετακίνησης και το είδος του υλικού (Varnes, 1978)

Τύπος μετακίνησης		Τύπος μετατοπισμένου υλικού		
		Βραχώδες υπόβαθρο	Εδάφη	
	Πτώσεις	Πτώση βράχων	Πτώση κορημάτων	Πτώση γαιών
	Ανατροπές	Ανατροπή βράχων	Ανατροπή κορημάτων	Ανατροπή γαιών
Ολισθήσεις	Περιστροφικές	Ολίσθηση βράχων	Ολίσθηση κορημάτων	Ολίσθηση γαιών
	Μεταθετικές			
	Πλευρικές επεκτάσεις	Επέκταση βράχων	Επέκταση κορημάτων	Επέκταση γαιών
	Ροές	Ροή βράχων (ερπυσμός υποβάθρου)	Ροή κορημάτων (ερπυσμός εδάφους)	Ροή γαιών (ερπυσμός εδάφους)
	Σύνθετες	Συνδυασμός δύο ή περισσότερων κύριων τύπων μετακινήσεων		

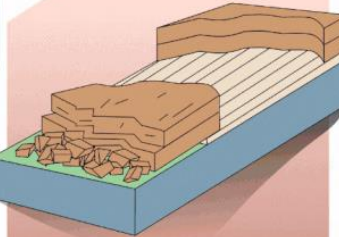
TYPES OF LANDSLIDES

1.

ROTATIONAL LANDSLIDE
Ground rotates and slides along a curved failure plane.



3.



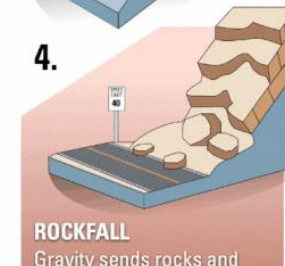
BLOCK SLIDE
A type of translational landslide made of mostly one block of surface material that moves downslope.

2.



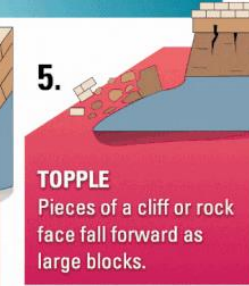
TRANSLATIONAL LANDSLIDE
Ground slides with little rotation along a flat plane parallel to the surface.

4.



ROCKFALL
Gravity sends rocks and other materials tumbling downslope.

5.



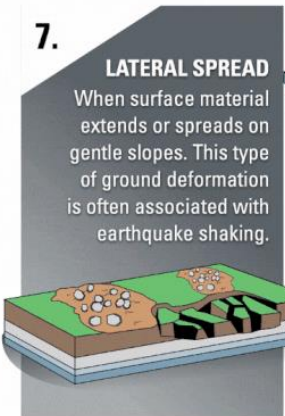
TOPPLE
Pieces of a cliff or rock face fall forward as large blocks.

6.



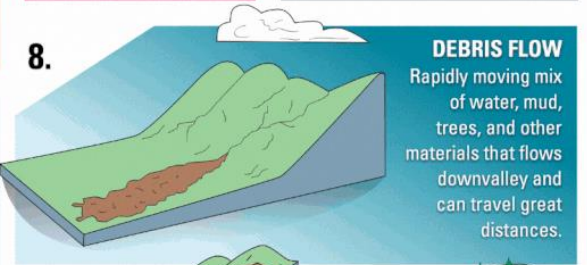
EARTHFLOW
Form on moderate slopes when fine-grained material liquefies and runs out in hourglass shape.

7.



LATERAL SPREAD
When surface material extends or spreads on gentle slopes. This type of ground deformation is often associated with earthquake shaking.

8.



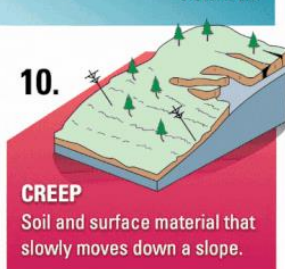
DEBRIS FLOW
Rapidly moving mix of water, mud, trees, and other materials that flows downvalley and can travel great distances.

9.



DEBRIS AVALANCHE
An extremely large and fast moving debris flow.

10.



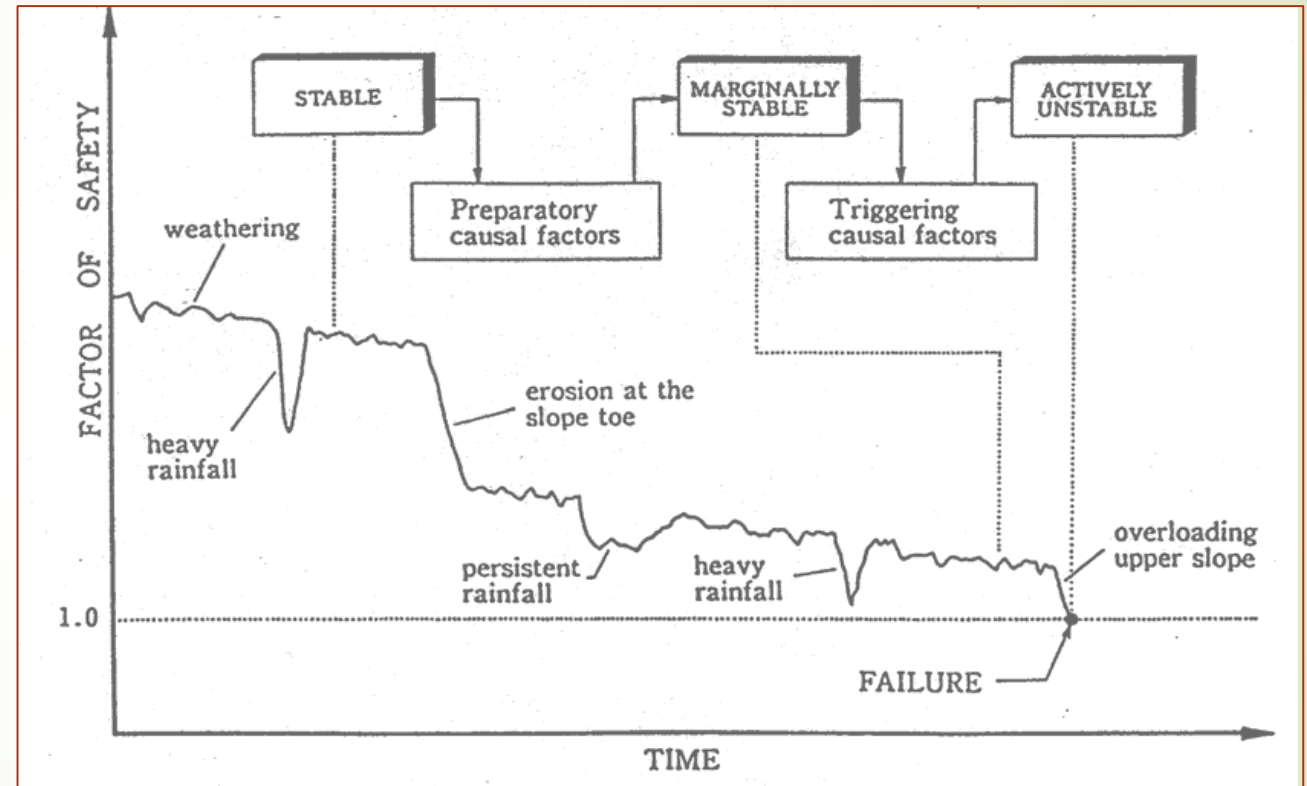
CREEP
Soil and surface material that slowly moves down a slope.

Ταξινόμηση (ταχύτητα)

5

Κατηγορία ταχύτητας μετακίνησης	Περιγραφή	Ταχύτητα (χιλ./δευτ.)	Τυπική ταχύτητα	Πιθανές επιπτώσεις
7	Εξαιρετικά γρήγορη	$>5 \times 10^3$	>5 μ./δευτ.	Καταστροφές κτιρίων λόγω πρόσκρουσης της μετατοπισμένης μάζας, πολλοί θάνατοι, απίθανη η ύπαρξη επιζώντων.
6	Πολύ γρήγορη	5×10^1	3 μ./λεπτό	Μερικοί θάνατοι, περιορισμένος χρόνος για ασφαλή φυγή όλων των κατοίκων.
5	Γρήγορη	5×10^{-1}	1,8 μ./ώρα	Δυνατή η ασφαλής φυγή των κατοίκων. Σπίτια, εγκαταστάσεις και δίκτυα υποδομής με μεγάλες βλάβες ή κατεστραμμένα.
4	Μέτρια	5×10^{-3}	13 μ./μήνα	Μερικές προσωρινές και ανθεκτικές εγκαταστάσεις είναι δυνατό να διατηρηθούν.
3	Αργή	5×10^{-5}	1,6 μ./χρόνο	Δυνατή η λήψη μέτρων προστασίας κατά την ενεργοποίηση. Μερικές φορές καλά σχεδιασμένες εγκαταστάσεις μπορεί να διατηρηθούν με κατάλληλη συντήρηση, αν δεν υπάρξει ξαφνική επιτάχυνση της μετακίνησης.
2	Πολύ αργή	5×10^{-7}	15 χιλ./χρόνο	Μερικές από τις μόνιμες κατασκευές παραμένουν ανέπαφες.
1	Εξαιρετικά αργή	$<5 \times 10^{-7}$	<15 χιλ./χρόνο	Η μετακίνηση προσδιορίζεται μόνο με μετρήσεις από ειδικά όργανα λόγω του μικρού μεγέθους της. Οι κατασκευές δεν υφίστανται βλάβες, όταν λαμβάνονται τα κατάλληλα μέτρα.

- Φυσικές και ανθρωπογενείς συνθήκες και διεργασίες
- Δύο κύριες ομάδες παραγόντων:
 - (α) Προδιαθετικοί παράγοντες (preparatory factors)
 - (β) Γενεσιουργοί παράγοντες (triggering factors)



(α) Στο φυσικό περιβάλλον:

- Αλλαγή μορφολογίας μέσω υποχώρησης / πλήρωσης εδαφικής επιφάνειας



Δημιουργία φράγματος, λίμνη Τσιβλού

(β) Στο δομημένο περιβάλλον:

- Ζημιές έως πλήρη καταστροφή σε ιδιοκτησίες, τεχνικά έργα, οδικό δίκτυο

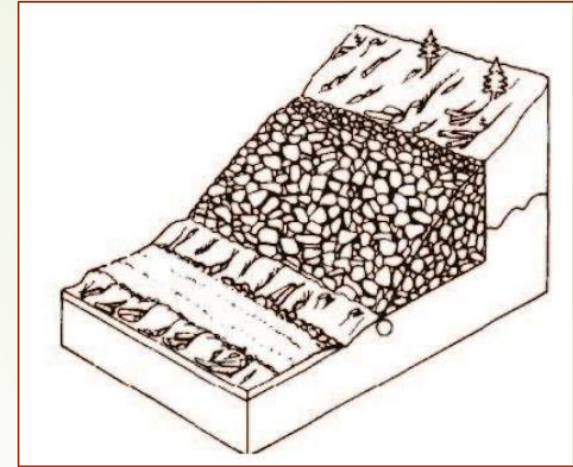


- Απώλεια ανθρώπινων ζωών

Number of deaths by disaster type: 2022



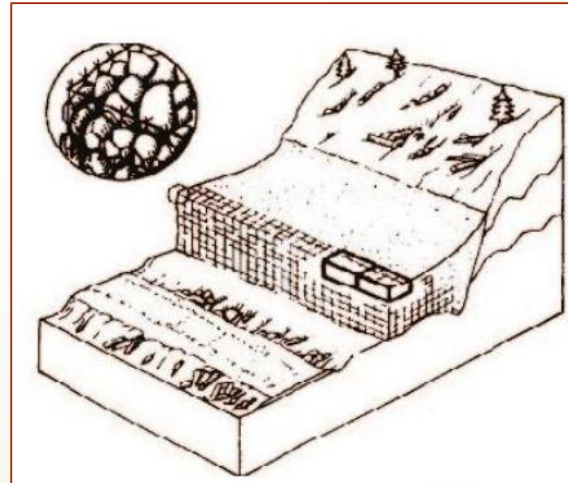
- (α) Τροποποίηση γεωμετρίας πρανών
- (β) Αποστράγγιση
- (γ) Κατασκευή δομών αντιστήριξης
- (δ) Εσωτερική ενίσχυση πρανών



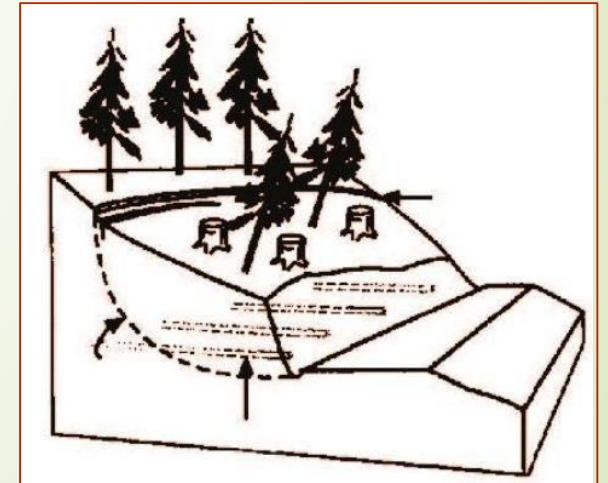
Προσθήκη υλικού (α)



Μπουλόνια βράχων (δ)



Τοίχοι με συρματοκιβώτια (γ)

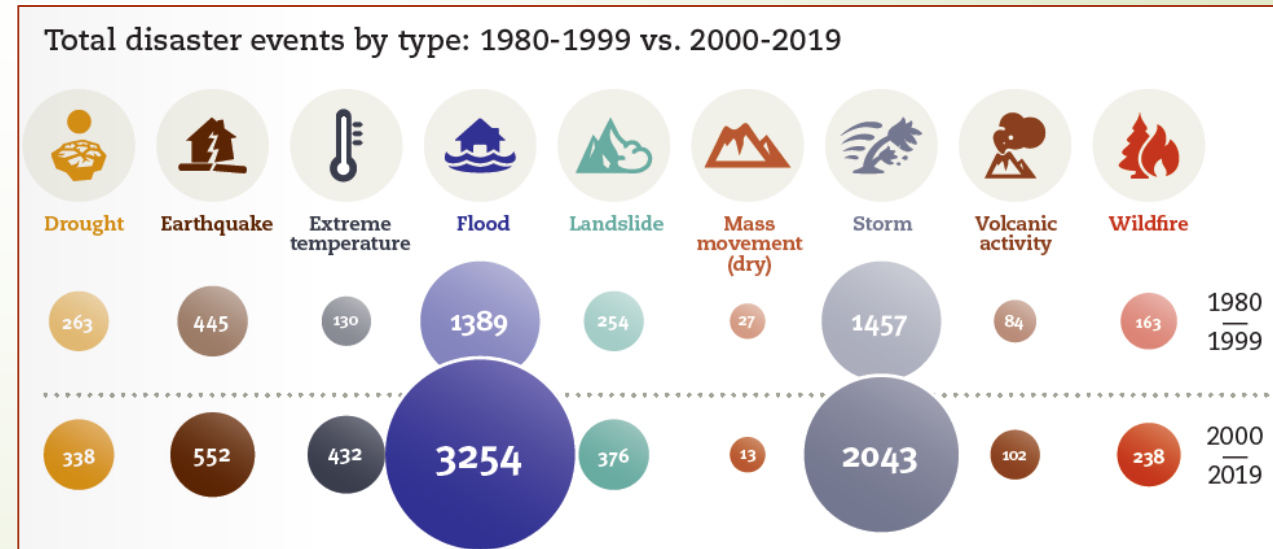


Σωλήνες αποστράγγισης (β)

Διαστάσεις εκδήλωσης (Παγκόσμια)

9

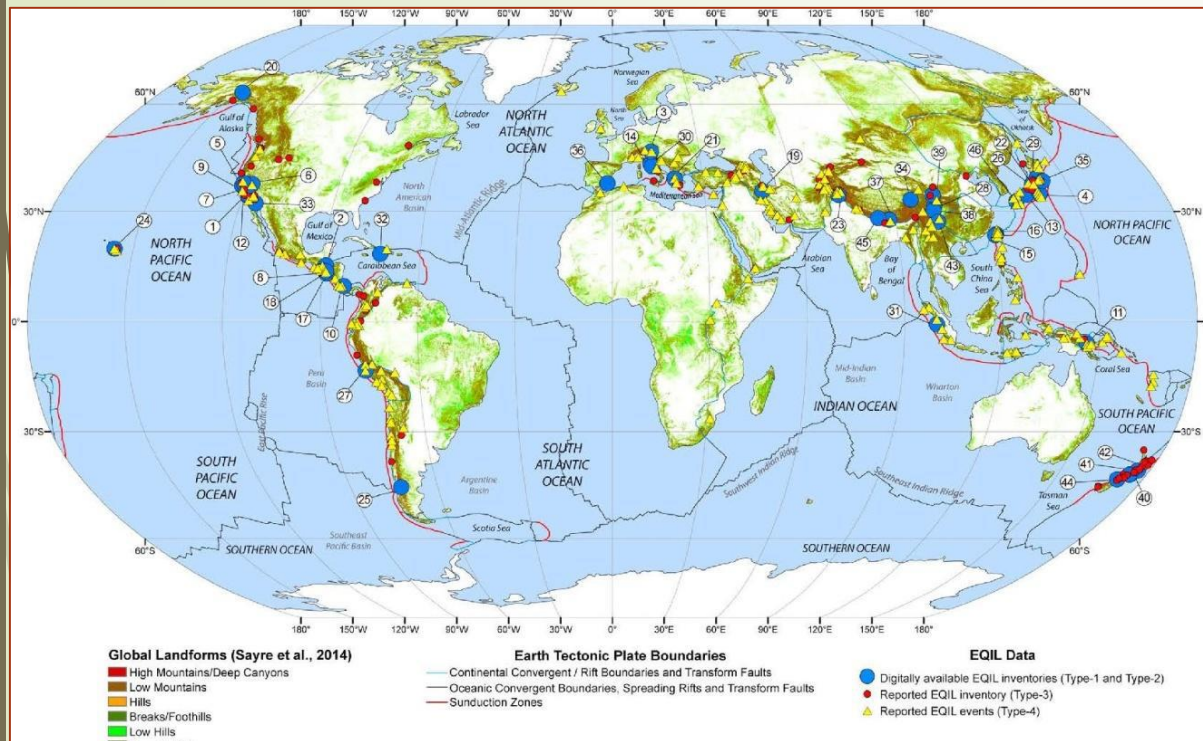
- Οι περισσότερες χώρες του κόσμου έχουν επηρεαστεί κατά κάποιο τρόπο από κατολισθήσεις.
- Παρατηρείται μια ιδιαίτερος ανοδική τάση του αριθμού των εκδηλωμένων κατολισθήσεων τα τελευταία χρόνια.
- Οι κυριότεροι παράγοντες είναι οι εξής:
 1. Η συνεχής χωρική διεύρυνση των οικιστικών δομών και δραστηριοτήτων.
 2. Οι έντονες μεταβολές στις κλιματικές συνθήκες και τη σεισμική δραστηριότητα των διαφόρων περιοχών του πλανήτη.



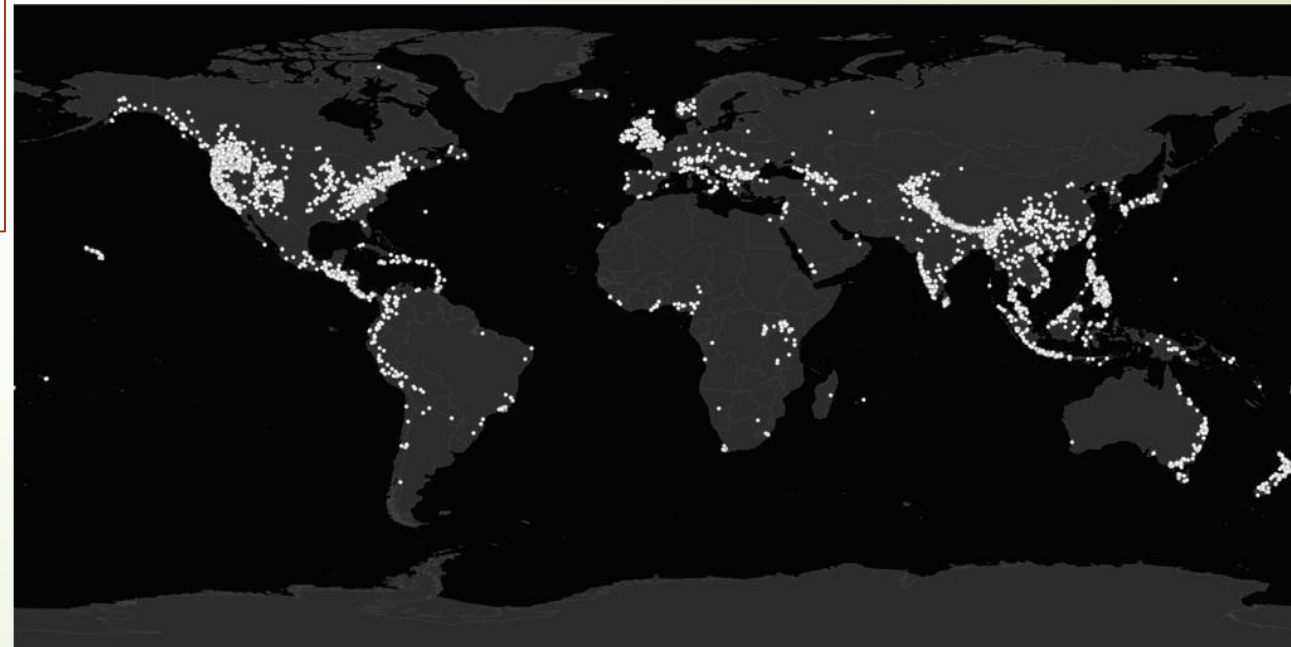
(CRED, 2020)

Διαστάσεις εκδήλωσης (Παγκόσμια)

10



Παγκόσμια κατανομή κατολισθήσεων λόγω σεισμού, 1968-2008



Παγκόσμια κατανομή κατολισθήσεων λόγω βροχοπτώσης, 2007-2017

Διαστάσεις εκδήλωσης (Παγκόσμια)

11

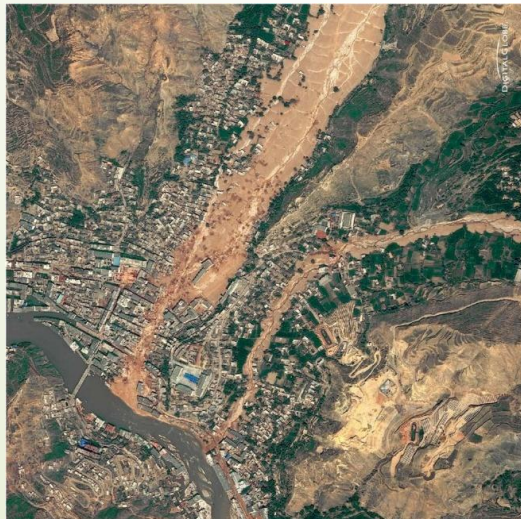
- Ενδεικτικά παραδείγματα



Φιλιππίνες, 2006 (>1100 θάνατοι)



Κίνα, 2008 (~20000 θάνατοι)



Κίνα, 2010 (>1400 θάνατοι)



Σιέρα Λεόνε, 2017 (>450 θάνατοι)

- Στην Ελλάδα, οι κατολισθήσεις παρουσιάζουν υψηλή συχνότητα με αποτέλεσμα το φαινόμενο να καθίσταται ως ένας από τους πιο σημαντικούς φυσικούς κινδύνους σε εθνικό επίπεδο.
- Οι κατολισθήσεις που εκδηλώνονται συνιστούν το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ:
 1. Της έντονης τεκτονικής παραμόρφωσης των γεωλογικών σχηματισμών.
 2. Των έντονων μετεωρολογικών διαφοροποιήσεων μεταξύ τμημάτων του Ελληνικού χώρου και της συχνής εκδήλωσης ακραίων βροχοπτώσεων.
 3. Των ανθρώπινων παρεμβάσεων οι οποίες συχνά γίνονται αλόγιστα, χωρίς μελέτη και προγραμματισμό.



Διαστάσεις εκδήλωσης (Ελληνική)

13

- Ενδεικτικά παραδείγματα



Τσιβλός, 1913 (4 θάνατοι)



Μικρό Χωριό, 1963 (13 θάνατοι)



Παναγοπούλα, 1971



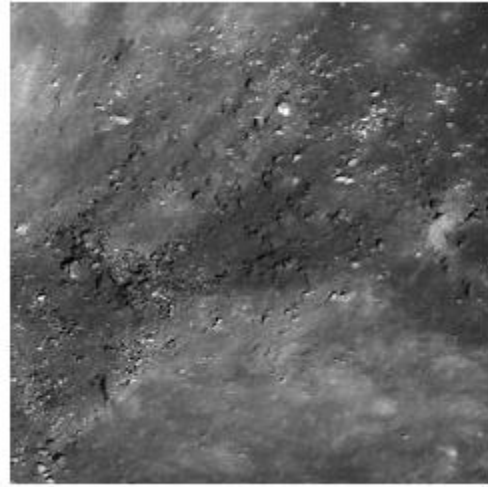
Λευκάδα (παραλία Εγκρεμνών), 2015

- Από τις αρχές της δεκαετίας του 2000, οι καταγραφές και λήψεις εικόνων σχετικά με την εκδήλωση κατολισθήσεων και σε άλλα πλανητικά σώματα του Ηλιακού μας Συστήματος όλο και πληθαίνουν.
- Η απόκτηση αυτών των καταγραφών έχει καταστεί δυνατή μέσω των διάφορων, κατά καιρούς, διαστημικών αποστολών (NASA, ESA).
- Η εκδήλωση τους αποδίδεται κυρίως:
 1. Στα κύματα κραδασμών που προκαλούνται από τις εκρήξεις αστεροειδών/μετεωριτών στο εσωτερικό της ατμόσφαιρας των πλανητικών σωμάτων.
 2. Στα παραγόμενα θραύσματα τα οποία καταλήγουν να προσκρούουν στο έδαφος τους (αποτέλεσμα η εμφάνιση κρατήρων).

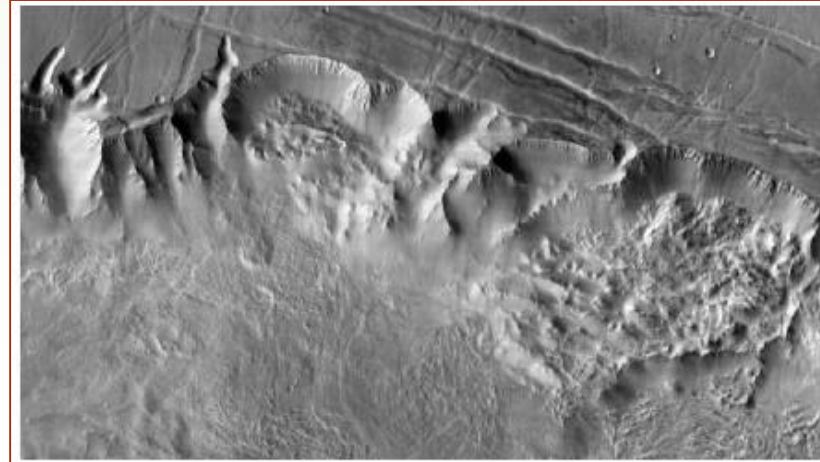
Διαστάσεις εκδήλωσης (Διαπλανητική!)

15

- Ενδεικτικά παραδείγματα



Σελήνη (Λήψη: 05/2011)



Άρης (Λήψη: 07/2010)



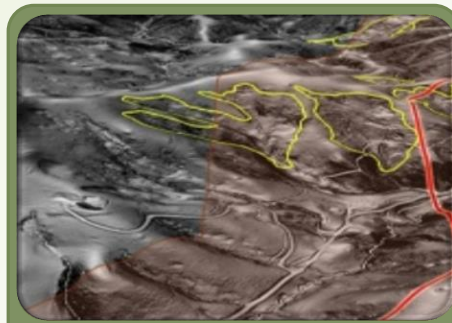
Ιαπετός Κρόνου (Λήψη: 01/2005)



Δήμητρα (Λήψη: 04/2017)

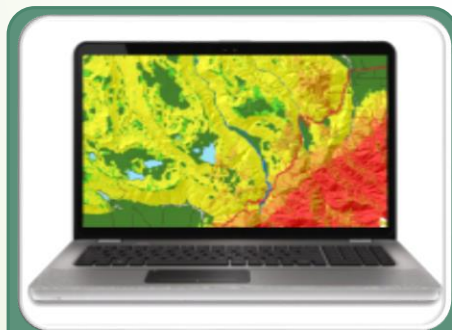
1. Γενικά περί Κατολίσθησης
2. Ανάλυση κατολισθήσεων με αξιοποίηση Γεωπληροφορικής
3. Παραδείγματα – Μελέτες περίπτωσης
4. Συμπεράσματα





Αναγνώριση /
Παρακολούθηση
κατολισθήσεων

1



Εκτίμηση και
Χαρτογράφηση
διαφόρων πτυχών

2

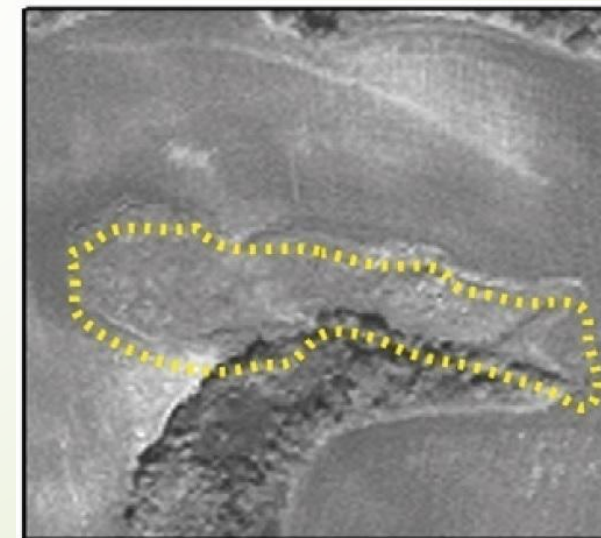


Αξιολόγηση
(Επικύρωση)
παραγώγων

3

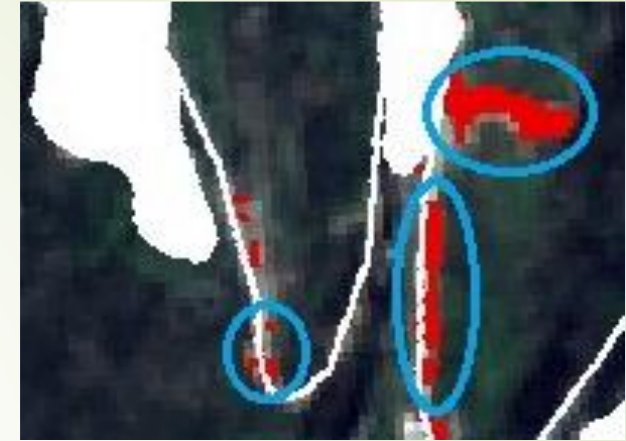
- Αφορά διαστημικές, εναέριες και επίγειες τεχνικές Τηλεπισκόπησης για:
 1. **Αναγνώριση (landslide recognition)**, δηλαδή τον χωρικό εντοπισμό και οριοθέτηση παρελθοντικών, ή μετά από γεγονός, κατολισθήσεων σε μια περιοχή.
 2. **Παρακολούθηση** της δραστηριότητας υφιστάμενων κατολισθήσεων σε μια περιοχή (**landslide monitoring**).
- Κύριες τεχνικές είναι οι εξής:
 - ☐ Δορυφορική Τηλεπισκόπηση
 - ☐ Τεχνικές σάρωσης με λέιζερ (laser scanning)
 - ☐ Αεροφωτογράφιση
 - ☐ Εργασία πεδίου

- Αυξημένη διαθεσιμότητα σήμερα δορυφορικών εικόνων υψηλής ή πολύ υψηλής ανάλυσης.
- Συχνή ενημέρωση πληροφοριών λόγω των επαναληπτικών παρατηρήσεων.
- Αρκετά οικονομικός τρόπος απόκτησης πληροφοριών, ιδανικά για μελέτες μικρής χωρικής κλίμακας (μεγάλες περιοχές).
- Περιλαμβάνει:
 1. Ερμηνεία δορυφορικών εικόνων (Landsat, Sentinel-2, κλπ).



Πανχρωματική εικόνα
IKONOS

2. Τεχνικές επεξεργασίας οπτικών εικόνων (pixel / object-based).



3. Τεχνικές επεξεργασίας εικόνων ραντάρ (SAR).

- Διαδεδομένη η συμβολομετρία (*InSAR*), με το παραγόμενο συμβολογράφημα (*interferogram*) να παρουσιάζει τη μετατόπιση της επιφάνειας του εδάφους.



- Ερμηνεία απεικονίσεων τοπογραφίας (μετρήσεις ύψους σε πολλαπλά σημεία στην επιφάνεια μιας περιοχής) πολύ υψηλής ανάλυσης και αυτόματες (ή ημι-αυτόματες) τεχνικές επεξεργασίας τους.



Αναγνώριση διαφορετικών φάσεων κατολίσθησης σε ψηφιακή αναπαράσταση LiDAR (Highland and Bobrowsky, 2008)

- Ερμηνεία διαδοχικών στερεοσκοπικών αεροφωτογραφικών επικαλύψεων (πρόσφατες και παλαιότερες αεροφωτογραφίες).



Εντοπισμός διαφορετικών φάσεων κατολίσθησης σε αεροφωτογραφία, Καλιφόρνια, ΗΠΑ (Λήψη: 2005)

- Αναγνώριση μεμονωμένων κατολισθήσεων στο πεδίο, συνήθως ύστερα από συγκεκριμένο γεγονός ενεργοποίησης (π.χ. σεισμό, έντονη βροχόπτωση)
- Σημαντική η συμβολή της τεχνολογίας GPS.
- Επικύρωση δεδομένων που έχουν προκύψει από άλλες μη-επίγειες τεχνικές.

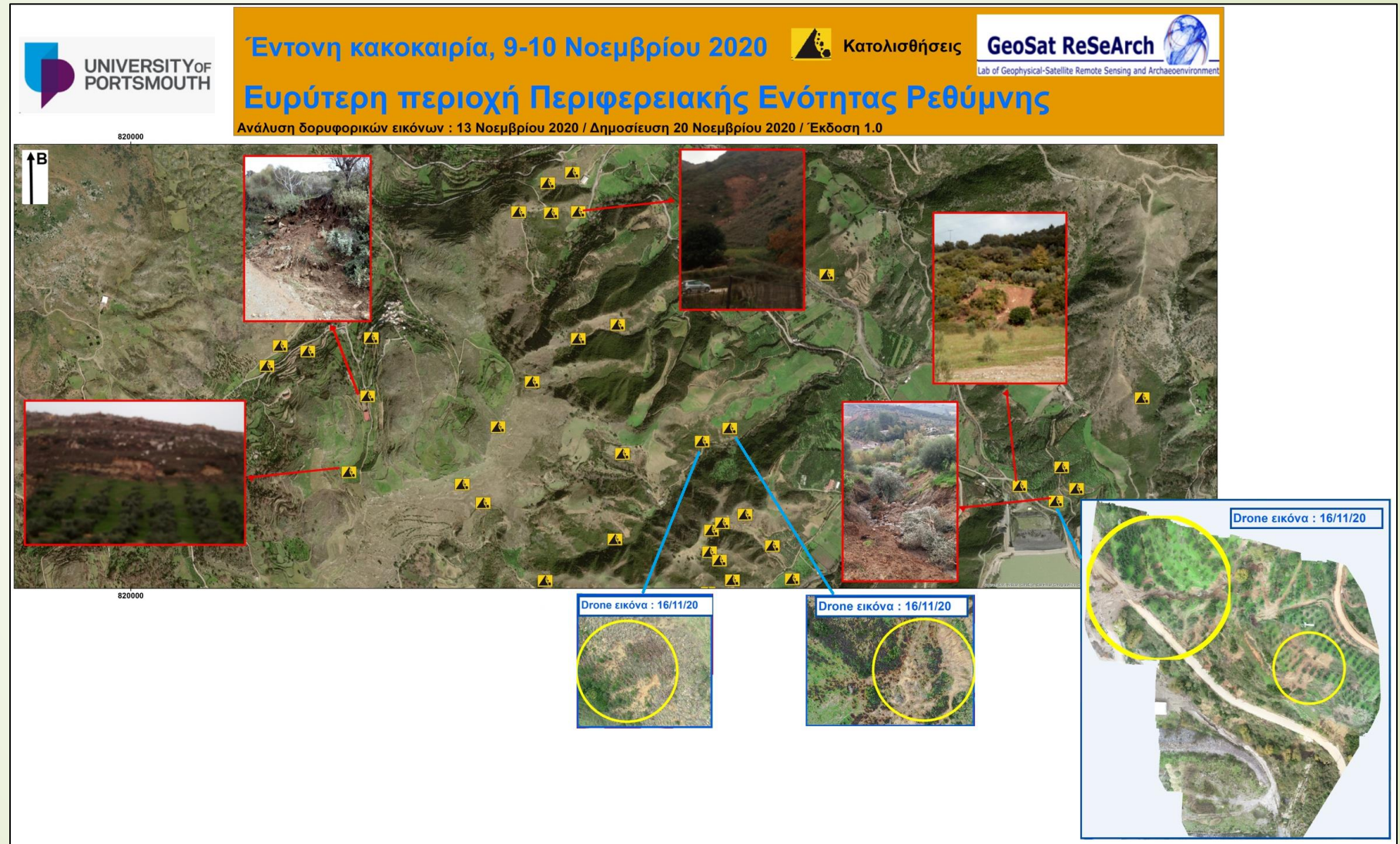


Φωτογραφία από
Google Street View



Φωτογραφίες
κατολίσθησης στο
Ρέθυμνο, επί τόπου
(αριστερά) και από
Drone (δεξιά) (Λήψεις:
16/11/2020)

Αναγνώριση κατολισθήσεων
μέσω του συνδυασμού
τηλεπισκόπησης και
εργασιών πεδίου σε τμήμα
του Νομού Ρεθύμνης



- **Επιδεκτικότητα σε κατολίσθηση (landslide susceptibility, S)**

Χωρική (πού;) εκτίμηση πιθανότητας εκδήλωσης κατολίσθησης στο μέλλον.

- **Κίνδυνος σε κατολίσθηση (landslide hazard, H)**

Χωρική και χρονική (πού, εντός μια χρονικής περιόδου;) εκτίμηση πιθανότητας εκδήλωσης κατολίσθησης συγκεκριμένων χαρακτηριστικών (τύπου, μεγέθους, όγκου, κλπ) στο μέλλον.

- **Τρωτότητα σε κατολίσθηση (landslide vulnerability, V)**

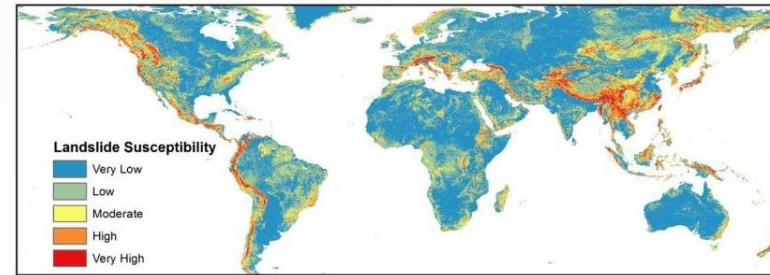
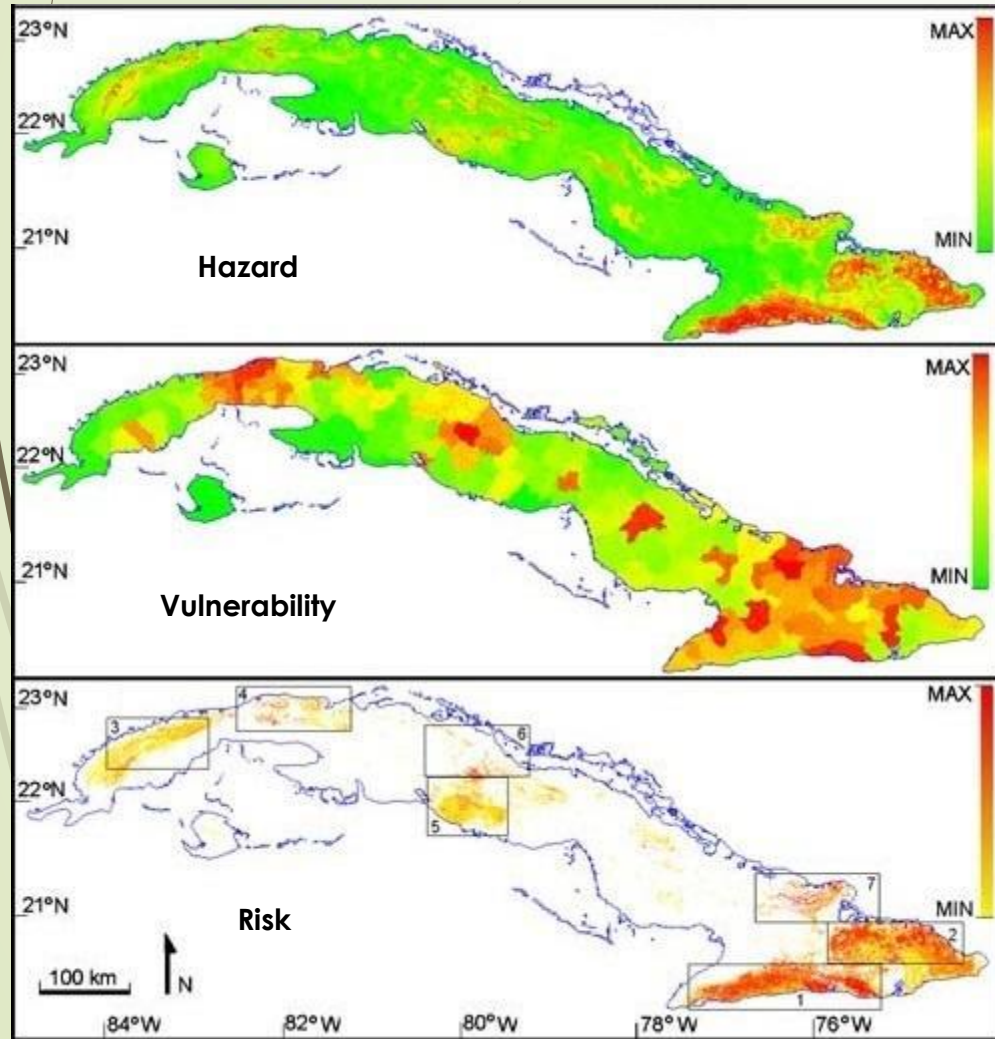
Εκτίμηση πιθανότητας απώλειας/ ζημιάς «στοιχείων σε επικινδυνότητα» (*elements at risk, E*), όπως κτίρια, ανθρώπινες ζωές, κλπ, λόγω της εκδήλωσης κατολίσθησης.

- **Επικινδυνότητα σε κατολίσθηση (landslide risk, R)**

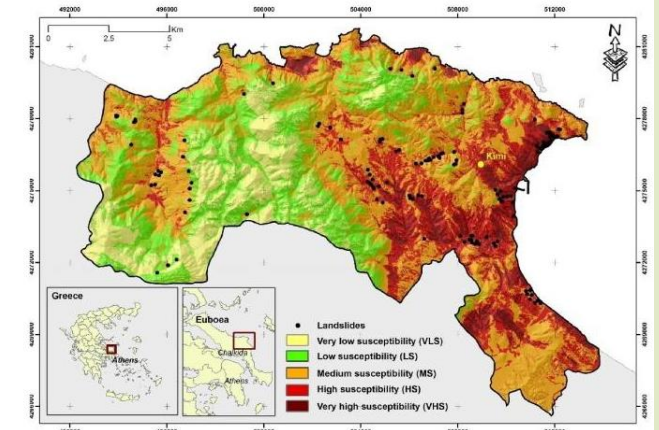
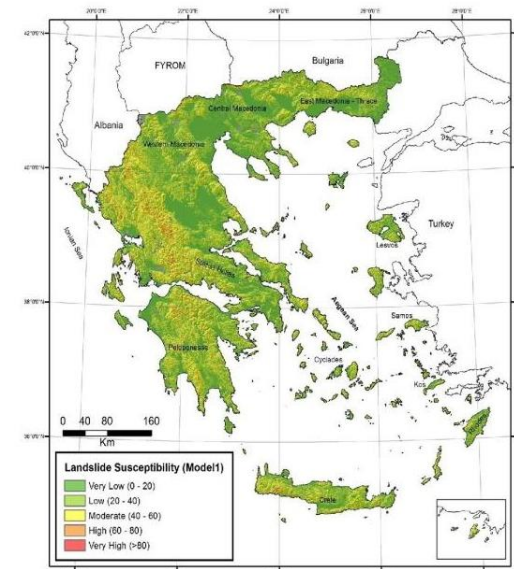
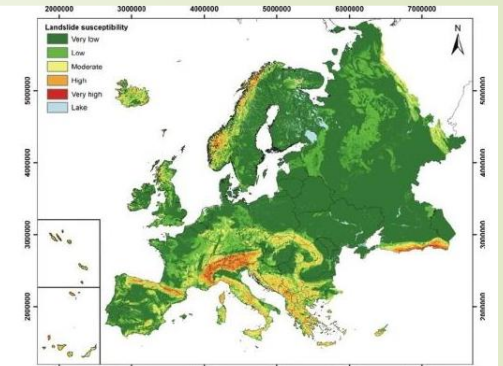
$$R = (H * V) * (E)$$

Εκτίμηση και Χαρτογράφηση πτυχών του φαινομένου

26



Susceptibility



- **Τρόπος**

Εφαρμογή **εξειδικευμένων προσεγγίσεων μοντελοποίησης** για τη διαίρεση σε ζώνες (ζωνοποίηση) μιας περιοχής ως προς τον εκτιμώμενο βαθμό επιδεκτικότητας.

- **Παραδοχές**

- (α) Περιοχές με κατολισθήσεις στο παρελθόν είναι πιθανό να υποστούν κατολισθήσεις και στο μέλλον.
- (β) Περιοχές με παρόμοιες συνθήκες με τις περιοχές που έχουν υποστεί κατολισθήσεις στο παρελθόν είναι πιθανό να υποστούν κατολισθήσεις στο μέλλον.

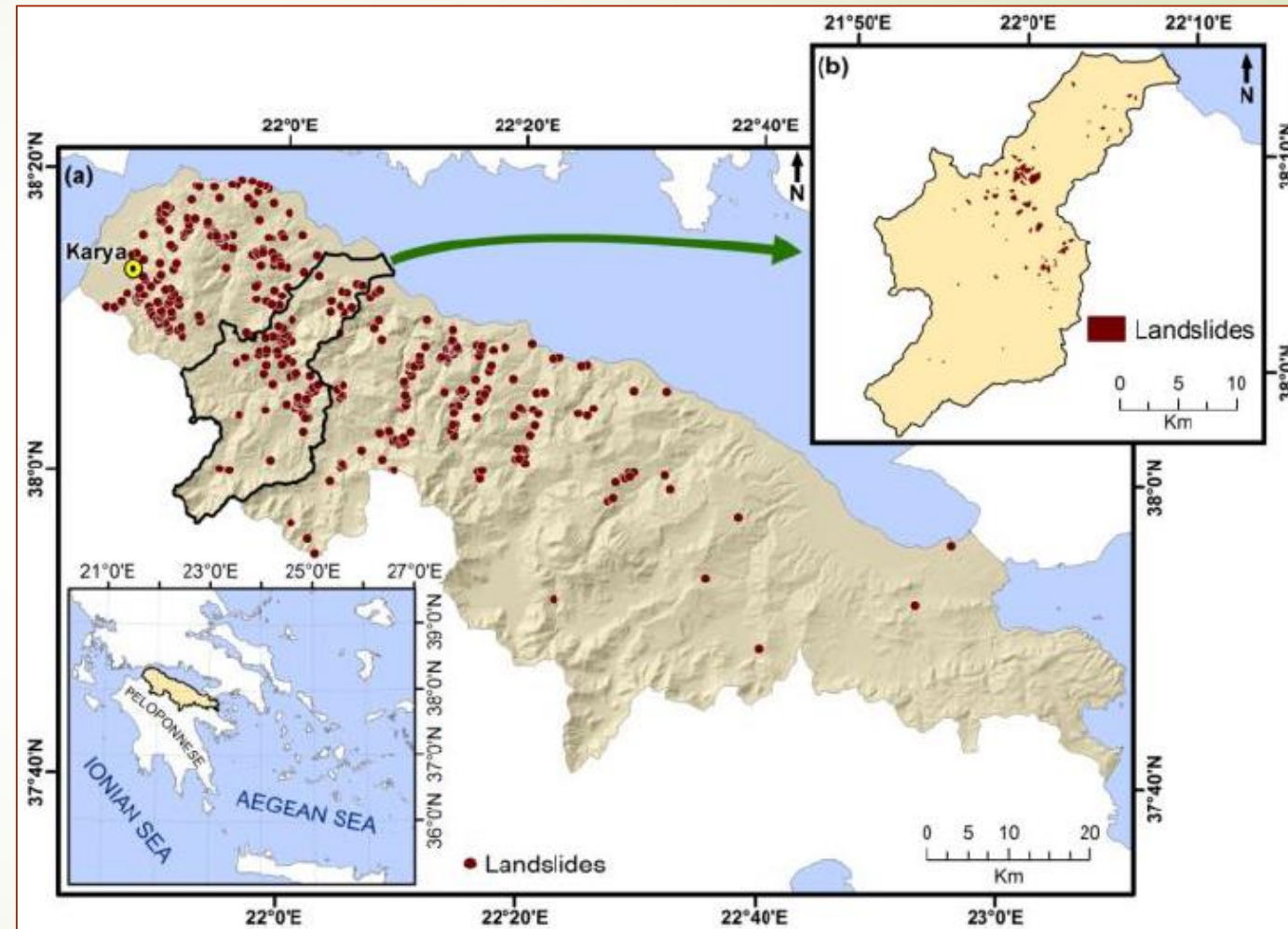
1) Δεδομένα καταγραφής κατολισθήσεων

- Προκύπτουν από τεχνικές αναγνώρισης των παρελθοντικών κατολισθήσεων σε μια περιοχή.

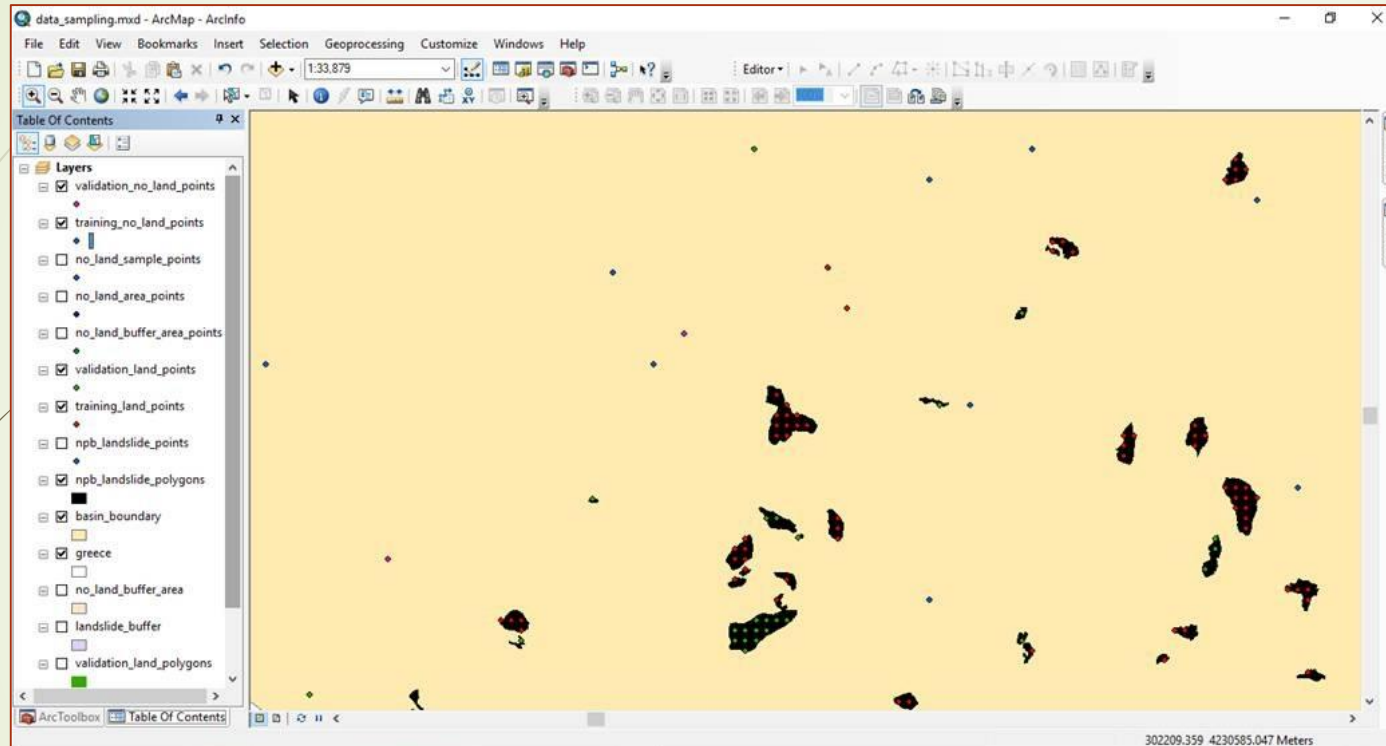
2) Δεδομένα παραγόντων υποβάθρου

- Οποιοσδήποτε παράγοντας που συνδέεται άμεσα ή έμμεσα με το φαινόμενο.
- Θα πρέπει να ικανοποιεί κάποιες βασικές προϋποθέσεις:
 - ✓ Να μπορεί να εκφραστεί σε κάποια κλίμακα μέτρησης (συνεχής ή διακριτή).
 - ✓ Να έχει χωρική μεταβλητότητα.
 - ✓ Να ορίζεται σ' όλη την έκταση της εξεταζόμενης περιοχής.

- Χάρτης καταγραφής κατολισθήσεων (landslide inventory map) ως παράγωγο:
 - ✓ Μικρής κλίμακας (για μεγάλες περιοχές): μόνο οι θέσεις των κατολισθήσεων ως σημειακές οντότητες.
 - ✓ Μεγάλης κλίμακας (για μικρότερες περιοχές): οι εκτάσεις των κατολισθήσεων ως πολυγωνικές οντότητες.



- Δειγματοληψία κατολισθητικών δεδομένων



76
πολύγωνα



80% γεγονότων (σύνολο
εκπαίδευσης)



61 πολύγωνα



(Χωρική ανάλυση ή cell size: 20 μ.)

5.140 σημεία

20% γεγονότων (σύνολο
επικύρωσης)



15 πολύγωνα

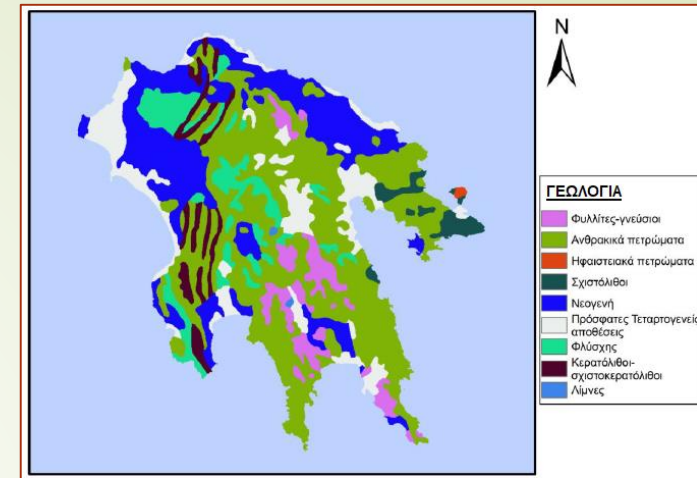
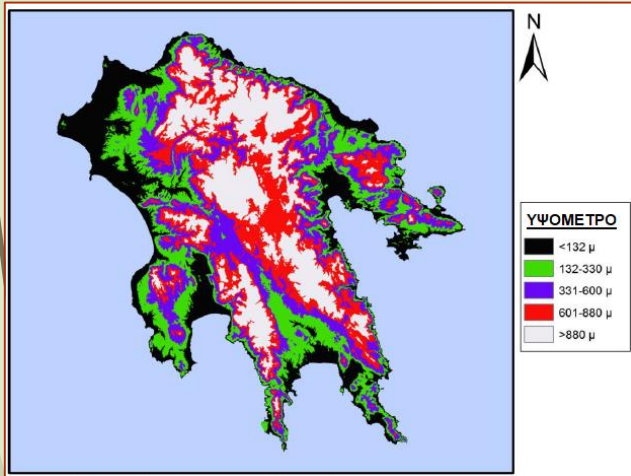


446 σημεία

Αντίστοιχος αριθμός σημείων μη-
κατολίσθησης για τα δύο σύνολα

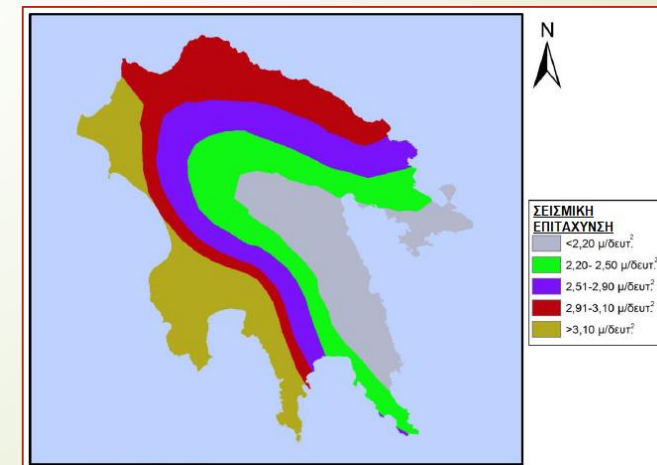
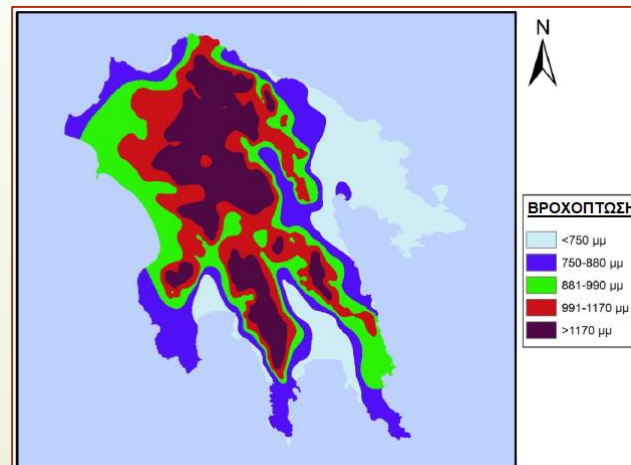
(α) Προδιαθετικοί παράγοντες (preparatory factors)

- Τοπογραφικοί (υψόμετρο, κλίση, κλπ)
- Γεωλογικοί (σχηματισμοί, εγγύτητα σε ρήγματα)
- Υδρολογικοί (εγγύτητα σε ρέματα, SPI, κλπ)
- Ανθρωπογενείς (χρήσεις γης, εγγύτητα σε δρόμους, κλπ)



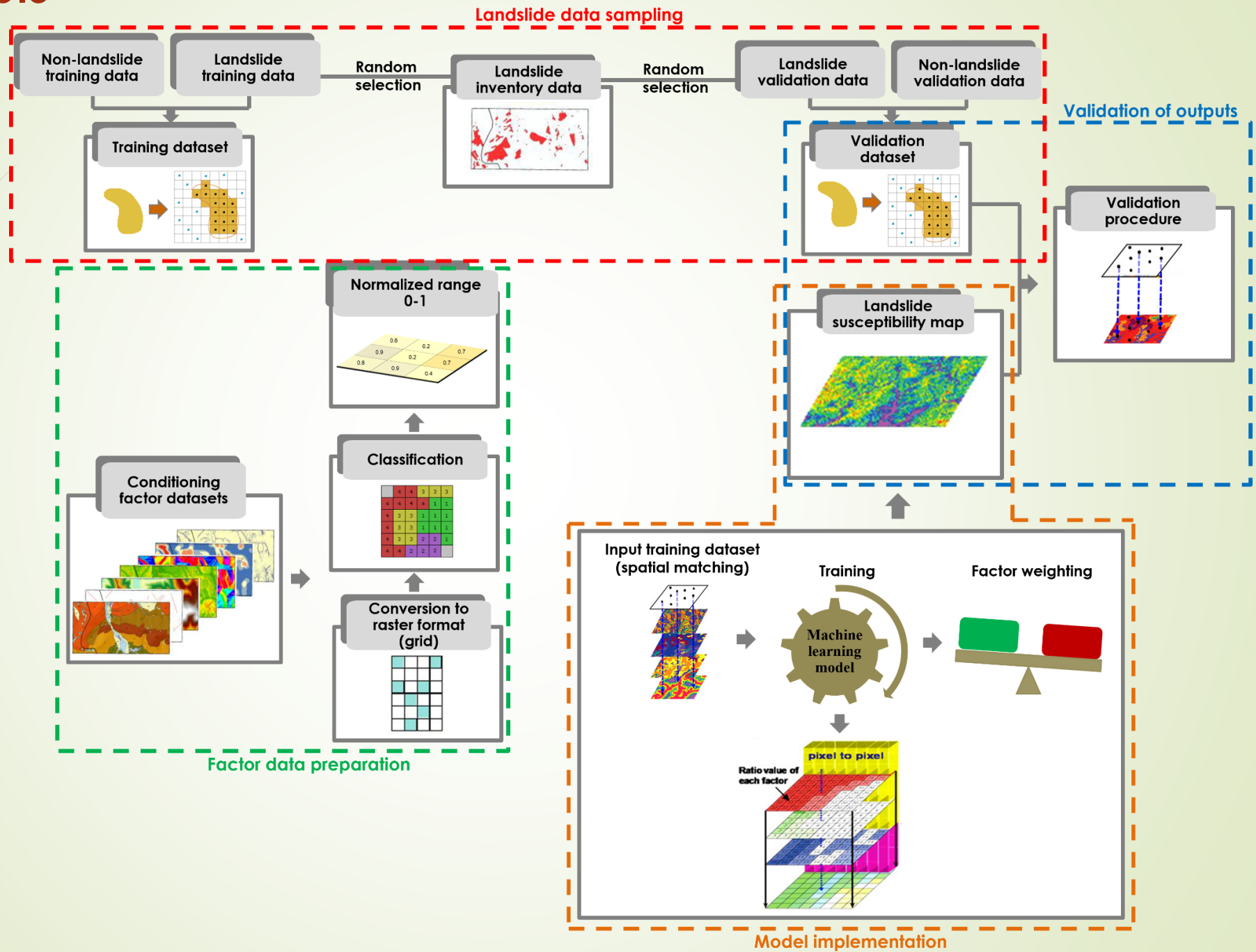
(β) Γενεσιουργοί παράγοντες (triggering factors)

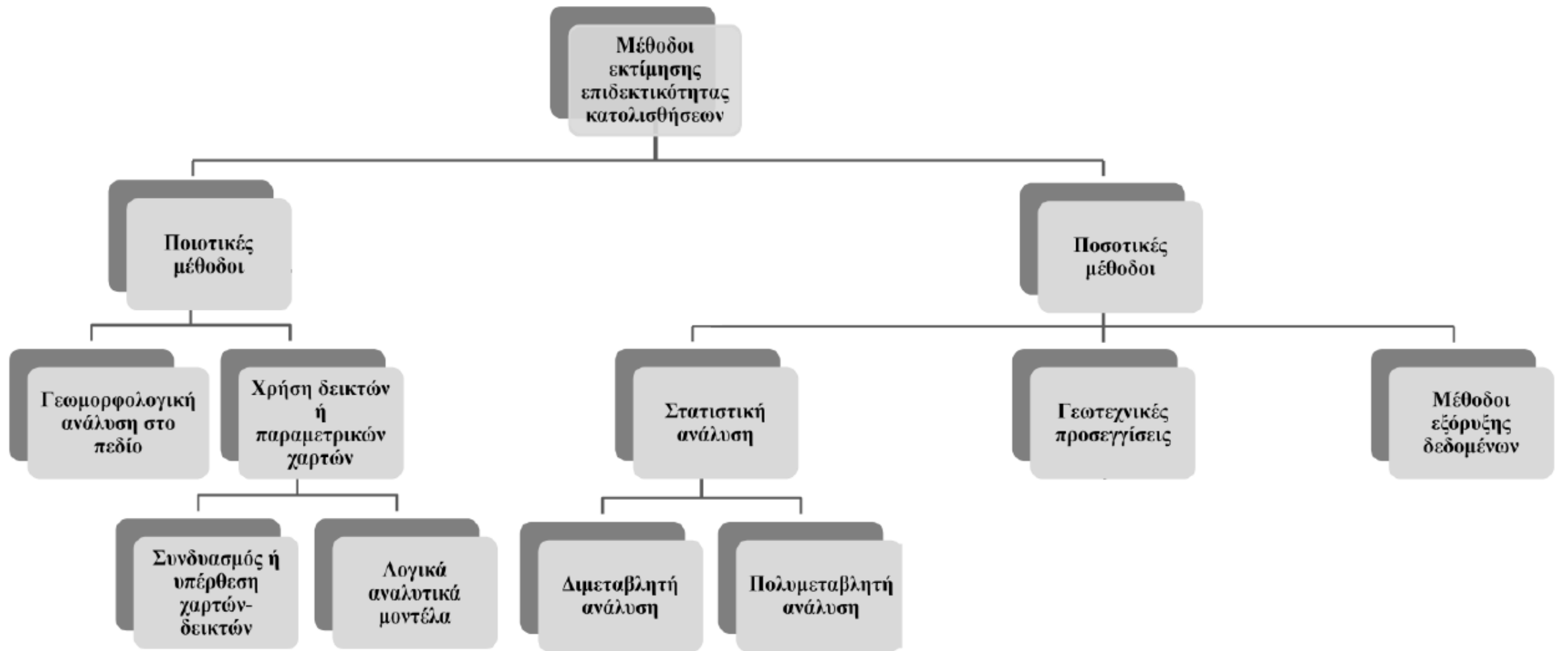
Σχετίζονται με γεγονότα που επιδρούν άμεσα στην ευστάθεια των πρανών, όπως βροχοπτώσεις και σεισμοί.



Τύπος	Παράγοντας		Αρχικά δεδομένα		Πηγή δεδομένων		Αρχική μορφή
			Περιφερειακή κλίμακα	Λεπτομερέστερη κλίμακα	Περιφερειακή κλίμακα	Λεπτομερέστερη κλίμακα	
Τοπογραφία	Υψόμετρο		SRTM σύνολο δεδομένων (30 μ)	Διανυσματικά επίπεδα 5 μ. ισοϋψών καμπυλών και τριγωνομετρικών σημείων	USGS, http://earthexplorer.usgs.gov/	OKXE	Ψηφιδωτή (ΨΜΥ)
	Γωνία κλίσης Διεύθυνση κλίσης Καμπυλότητα	Γενική Κάθετη Οριζόντια	–	–	Από SRTM ΨΜΥ	Από βασισμένο στα επίπεδα ΨΜΥ	Ψηφιδωτή
Γεωλογία	Γεωλογία		Γενικευμένοι γεωλογικοί σχηματισμοί	Λεπτομερείς γεωλογικοί σχηματισμοί	Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας, 1:50.000 (IGME)		Διανυσματική (πολύγωνα)
	Απόσταση από τεκτονικά στοιχεία		Ρήγματα, εφίπτευσες, επωθήσεις				Διανυσματική (γραμμές)
Υδρολογία	Απόσταση από υδρογραφικό δίκτυο		Υδρογραφικό δίκτυο		Χάρτης Γενικής Χρήσεως Ελλάδας, 1:250.000 (ΓΥΣ)	Χάρτης Γενικής Χρήσεως Ελλάδας, 1:50.000 (ΓΥΣ)	Διανυσματική (γραμμές)
	Πυκνότητα ρεμάτων						
	Τοπογραφικός δείκτης υγρασίας (TWI)		Συσσωρευση ροής		Υδρολογική ανάλυση (SAGA GIS)		Ψηφιδωτή
	Δείκτης χειμαρρικής ισχύος (SPI)						
Ανθρώπινη παρέμβαση	Κάλυψη γης		Γενικευμένες κατηγορίες	Λεπτομερείς κατηγορίες	CORINE 2012	ILOTS 2016	Διανυσματική (πολύγωνα)
	Απόσταση από οδικό δίκτυο		Κύριο οδικό δίκτυο	Λεπτομερές οδικό δίκτυο	OpenStreetMap		Διανυσματική (γραμμές)
Βλάστηση	Δείκτης βλάστησης (NDVI)		Δορυφορικές εικόνες (30 μ., Φεβ. 2016)	Δορυφορικές εικόνες (10 μ., Απρ. 2017)	Landsat-8	Sentinel-2	Ψηφιδωτή

- Η επιλογή τους βασίζεται κυρίως:
 - ✓ Στα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης
 - ✓ Στην κλίμακα ανάλυσης
 - ✓ Στη διαθεσιμότητα των δεδομένων





- Βασίζονται στις **απόψεις ατόμων με εμπειρία και γνώσεις (experts)** στο φαινόμενο και στην εξεταζόμενη περιοχή.
- **ΔΕΝ** απαιτούν χρήση κατολισθητικών δεδομένων.
- Συνοδεύονται από έναν **υψηλό βαθμό υποκειμενικότητας**.
- Περιλαμβάνουν:
 - ❑ **Γεωμορφολογική ανάλυση στο πεδίο:** η παραδοσιακή, απλή προσέγγιση της άμεσης εκτίμησης στο πεδίο από τον ερευνητή (π.χ. γεωλόγο).
 - ❑ **Λογικά αναλυτικά μοντέλα:** μοντέλα ιεράρχησης και ποσοτικοποίησης της διαδικασίας σκέψης του ατόμου – η **AHP** το πιο γνωστό.

- Μοντέλο ιεράρχησης και ποσοτικοποίησης της διαδικασίας σκέψης του ατόμου.
- Η εφαρμογή περιλαμβάνει:
 1. Δημιουργία πίνακα με **ανά ζεύγη συγκρίσεις** παραγόντων/κατηγοριών.
 2. Υπολογισμός **συντελεστών βαρύτητας**.
 3. Υπολογισμός **συνολικής τιμής επιδεκτικότητας** κατολισθήσεων από:

$$LS = \sum_{i=1}^n fw_i \times w_{i,j}$$

fw_i = συντελεστής βαρύτητας του παράγοντα i

$w_{i,j}$ = συντελεστής βαρύτητας για την κατηγορία j του παράγοντα i

n = αριθμός παραγόντων

Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytical Hierarchy Process – AHP)

37

2 → Based on their contribution in landslide occurrence, define the importance between the conditioning factors in the following pair-wise comparisons:

Help: (a) If the first factor is extremely important over the second one, rate one star.
(b) If the second factor is extremely important over the first one, rate nine stars.
(c) Five stars indicate an equal importance between the two factors.

a. Slope angle

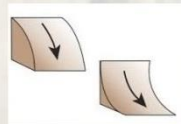
Elevation*



0 of 60 answered

Create your own typeform

5 → Select the level of contribution in landslide occurrence for the following categories of **profile curvature** factor:



a. Concave:*

1	2	3	4	5
---	---	---	---	---

Very low

Moderate

Very high

0 of 60 answered

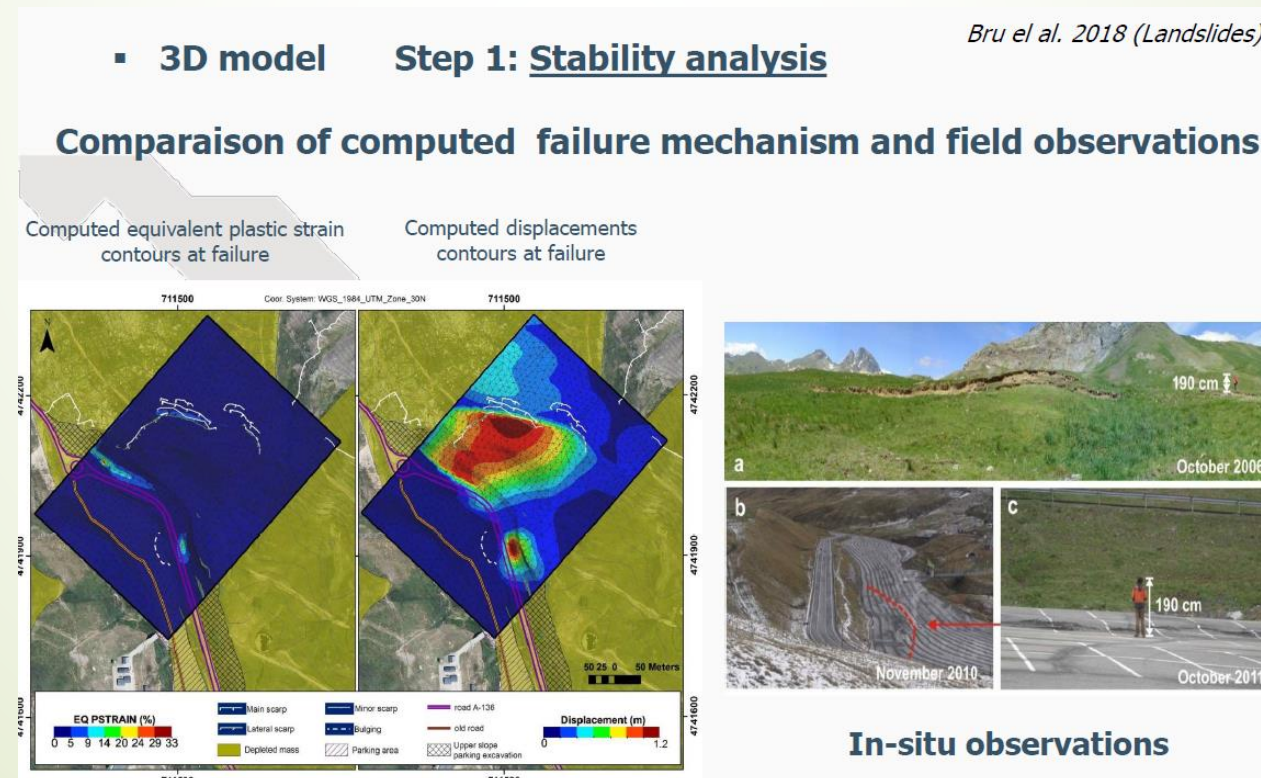
Create your own typeform

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
[1] Υψόμετρο		1						
[2] Γωνία κλίσης		8	1					
[3] Καμπυλότητα παράλληλα στη διεύθυνση της κλίσης		3	1/7	1				
[4] Απόσταση από οδικό δίκτυο		4	1/5	2	1			
[5] Πυκνότητα ρεμάτων		4	1/5	2	1/2	1		
[6] Βλάστηση (NDVI)		3	1/7	1/2	1/3	1/2	1	
[7] Γεωλογία		7	2	5	3	4	6	1

Παράγοντας	Κατηγορία παράγοντα	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
Υψόμετρο (μ.)	[1] <276	1						
	[2] 276-600	2	1					
	[3] 601-943	4	2	1				
	[4] 944-1.332	6	4	2	1			
	[5] >1.332	8	6	4	2	1		
Γωνία κλίσης (°)	[1] <7	1						
	[2] 7-15	2	1					
	[3] 16-22	4	3	1				
	[4] 23-32	6	5	3	1			
	[5] >32	8	7	5	3	1		

- Βασίζονται στην **«ποσοτικοποίηση»** της σχέσης μεταξύ της εκδήλωσης (ή μη) παρελθοντικών κατολισθήσεων και των συμβαλλόμενων παραγόντων.
- Συνοδεύονται από έναν **υψηλό βαθμό αντικειμενικότητας**.
- Περιλαμβάνουν:
 - ❑ Γεωτεχνικές προσεγγίσεις
 - ❑ Στατιστικές προσεγγίσεις
 - ❑ Προσεγγίσεις μηχανικής μάθησης (machine learning)

- Βασίζονται στις αρχές της μηχανικής που διέπουν την ευστάθεια των πρανών.
- Απαιτούν λεπτομερή δεδομένα για τις γεωτεχνικές και υδρο-γεωλογικές παραμέτρους του πρανού (π.χ. η διατμητική αντοχή, το πάχος και το βάρος των μονάδων εδάφους, την πίεση των πόρων του νερού, κ.ά.).
- Χρήση ειδικών μοντέλων ανάλυσης ευστάθειας πρανών που στόχο έχουν τον υπολογισμό ενός συντελεστή ασφαλείας (safety factor, F):



- Στατιστικός προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ της εκδήλωσης (ή μη) κατολισθήσεων και των διαφόρων παραγόντων.

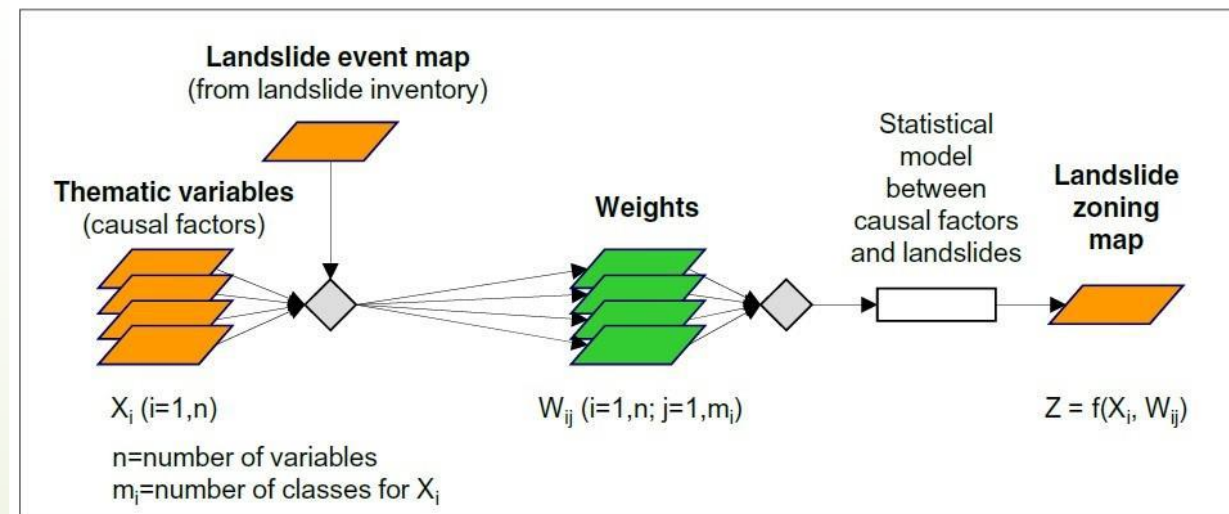
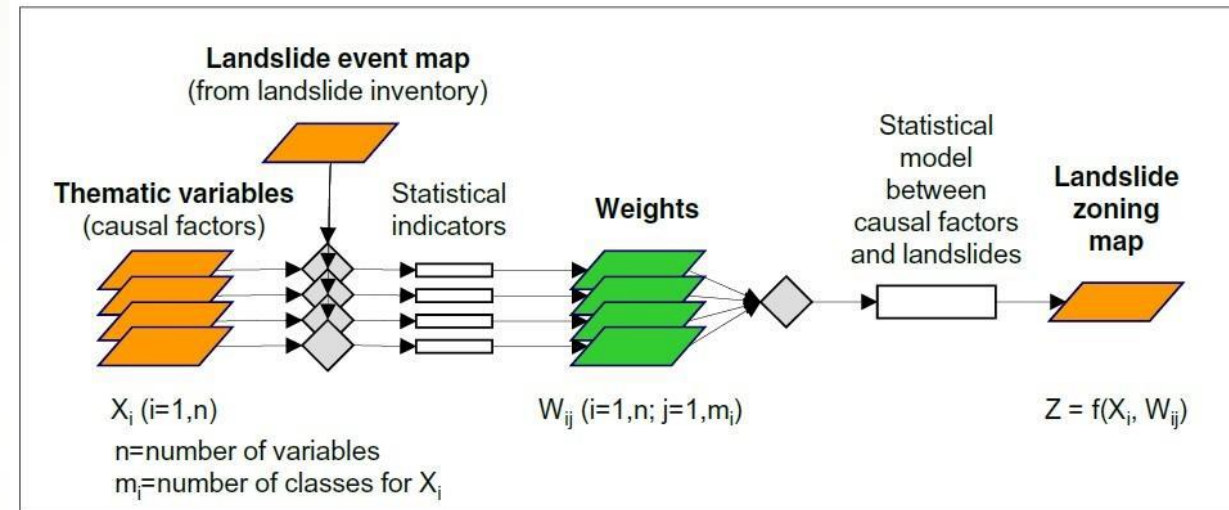
- Διακρίνονται σε:

□ Διμεταβλητές (bivariate):

συσχετισμός δεδομένων κατολισθήσεων με κάθε έναν παράγοντα ξεχωριστά, για υπολογισμό κατηγορικών συντελεστών βαρύτητας.

□ Πολυμεταβλητές (multivariate):

συσχετισμός παρουσίας ή απουσίας κατολίσθησης με συνδυασμούς των παραγόντων, για υπολογισμό παραγοντικών συντελεστών βαρύτητας.



- Υπολογίζονται για κάθε κατηγορία ενός παράγοντα από τη συσχέτιση της με την πυκνότητα κατολισθήσεων:

$$FR = \frac{\frac{N_{pix}(S_{i,j})}{\sum N_{pix}(S_{i,j})}}{\frac{N_{pix}(N_{i,j})}{\sum N_{pix}(N_{i,j})}}$$

$$LSI_{i,j} = \ln \left[\frac{\frac{N_{pix}(S_{i,j})}{N_{pix}(N_{i,j})}}{\frac{\sum N_{pix}(S_{i,j})}{\sum N_{pix}(N_{i,j})}} \right]$$

$N_{pix}(S_{i,j})$ = πλήθος ψηφίδων κατολίσθησης στην κατηγορία j του παράγοντα i

$N_{pix}(N_{i,j})$ = συνολικό πλήθος ψηφίδων στην ίδια κατηγορία

- Υπολογισμός συνολικής τιμής επιδεκτικότητας από:

$$LS = \sum_{i=1}^n FR_{i,j}$$

$$LS = \sum_{i=1}^n LSI_{i,j}$$

- Βασίζεται στην πιθανότητα μια κατολίσθηση να συμβεί υπό την **παρουσία** ή την **απουσία** μιας «ένδειξης» (παράγοντα):

$$W^+ = \ln \frac{P\{B|L\}}{P\{B|\bar{L}\}} = \ln \left(\frac{\frac{A_1}{A_1 + A_2}}{\frac{A_3}{A_3 + A_4}} \right)$$

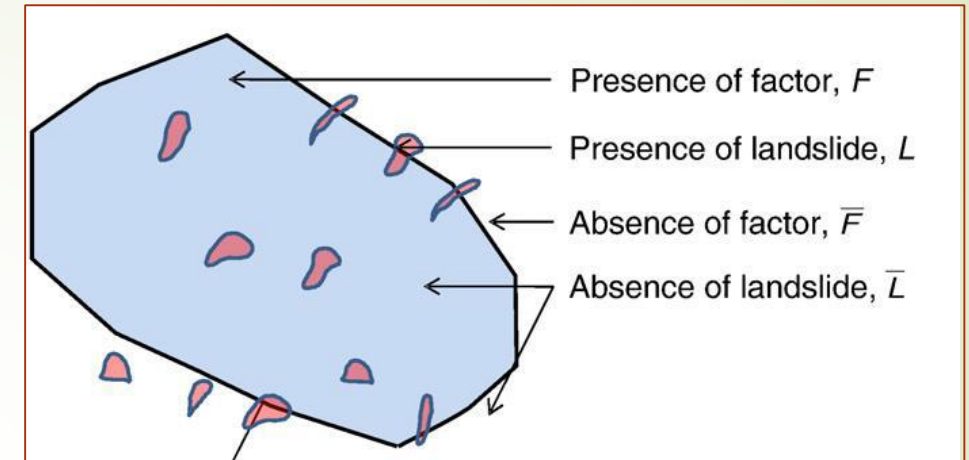
$$W^- = \ln \frac{P\{\bar{B}|L\}}{P\{\bar{B}|\bar{L}\}} = \ln \left(\frac{\frac{A_2}{A_1 + A_2}}{\frac{A_4}{A_3 + A_4}} \right)$$

A_1 = πλήθος ψηφίδων κατολίσθησης σε μια κατηγορία

A_2 = πλήθος ψηφίδων κατολίσθησης στις υπόλοιπες κατηγορίες

A_3 = πλήθος ψηφίδων μη-κατολίσθησης σε μια κατηγορία

A_4 = πλήθος ψηφίδων μη-κατολίσθησης στις υπόλοιπες κατηγορίες



- Η συσχέτιση μεταξύ μιας κατηγορίας και της εκδήλωσης του φαινομένου εκφράζεται με την **αντίθεση (contrast)**:

$$C = W^+ - W^-$$

- Υπολογισμός συνολικής τιμής επιδεκτικότητας για ανεξάρτητους παράγοντες από:

$$LS = \sum_{i=1}^n C_{i,j}$$

- Υπολογισμός **πιθανότητας κατολίσθησης P** από τη σχέση μεταξύ της **απουσίας ή παρουσίας κατολίσθησης (εξαρτημένη μεταβλητή)** και των **παραγόντων (ανεξάρτητες μεταβλητές)**:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

n = αριθμός ανεξάρτητων μεταβλητών

x_i ($i = 1, 2, \dots, n$) = ανεξάρτητες μεταβλητές

b_0 = σταθερά

b_i ($i = 1, 2, \dots, n$) = συντελεστές (coefficients)

- Διάγνωση πολυσυγγραμμικότητας** για τον έλεγχο συσχέτισης μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών: υπολογισμός στατιστικών μέτρων **ανοχής (TOL>0.2)** και **συντελεστή πληθωριστικής διακύμανσης (VIF<10)**.

- **Τοπικό** μοντέλο το οποίο παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη **χωρική μεταβολή (τοπική παράμετρος)** του συντελεστή βαρύτητας των καθολικών μοντέλων.
- Ενσωματώνει **χωρικές συντεταγμένες** στο συμβατικό πλαίσιο παλινδρόμησης:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \beta_1(u_i, v_i)x_{i1} + \beta_2(u_i, v_i)x_{i2} + \dots + \beta_n(u_i, v_i)x_{in} + \varepsilon_i$$

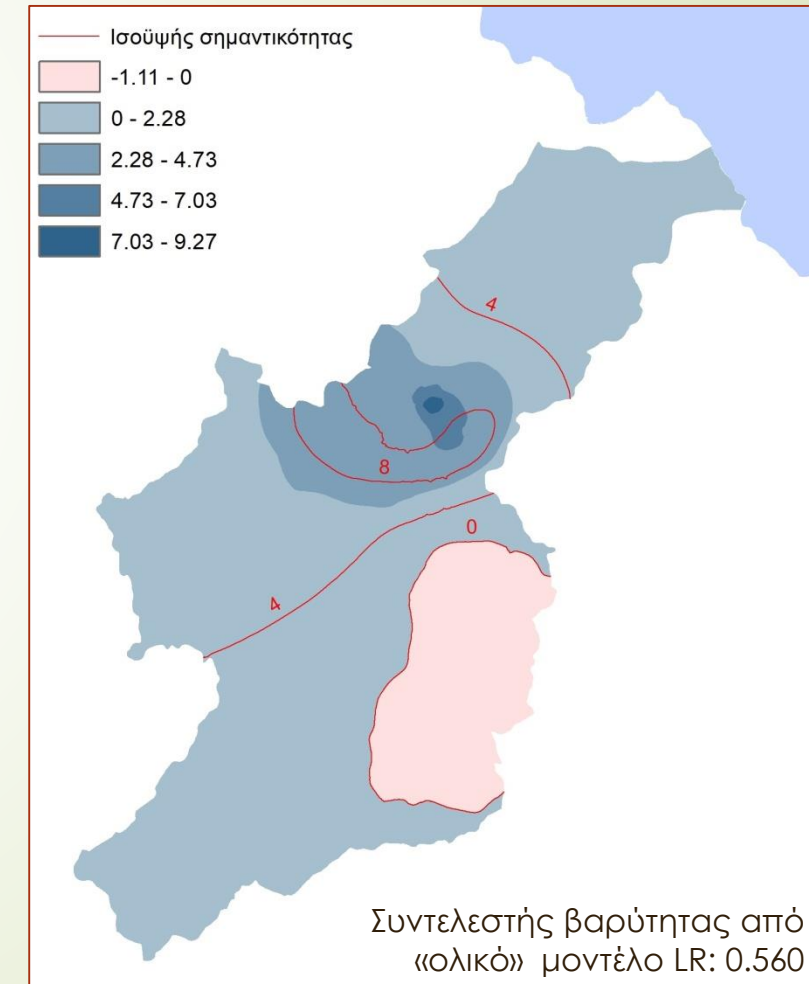
(u_i, v_i) = συντεταγμένες θέσης i στο χώρο

β_0 = τιμή της σταθεράς στη θέση i

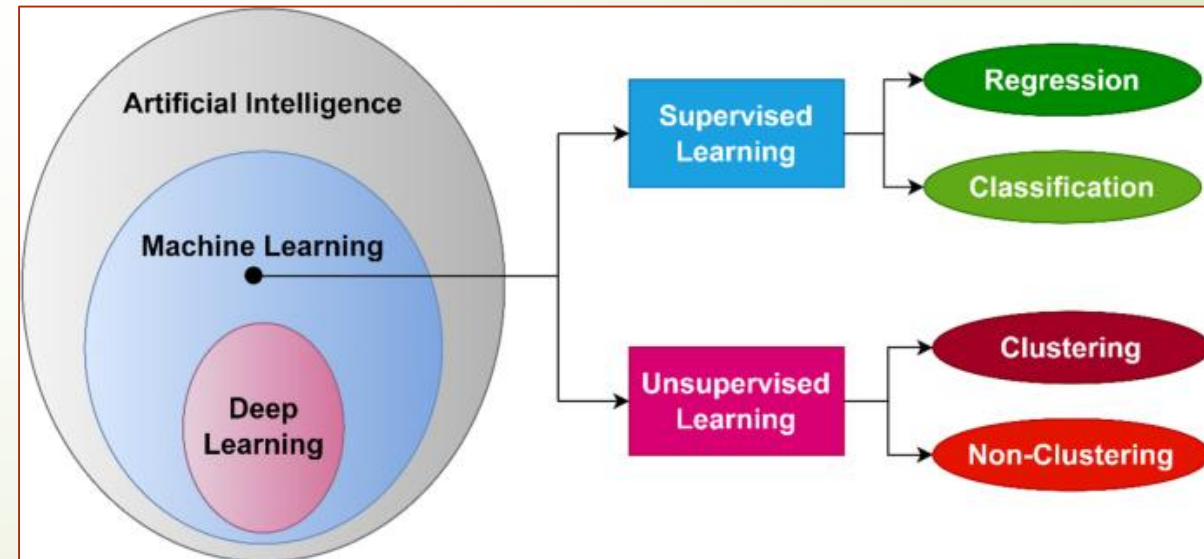
$\beta_1 \dots \beta_n$ = τοπικές παράμετροι στη θέση i

$x_{i1} \dots x_{in}$ = τιμές ανεξάρτητων μεταβλητών στη θέση i

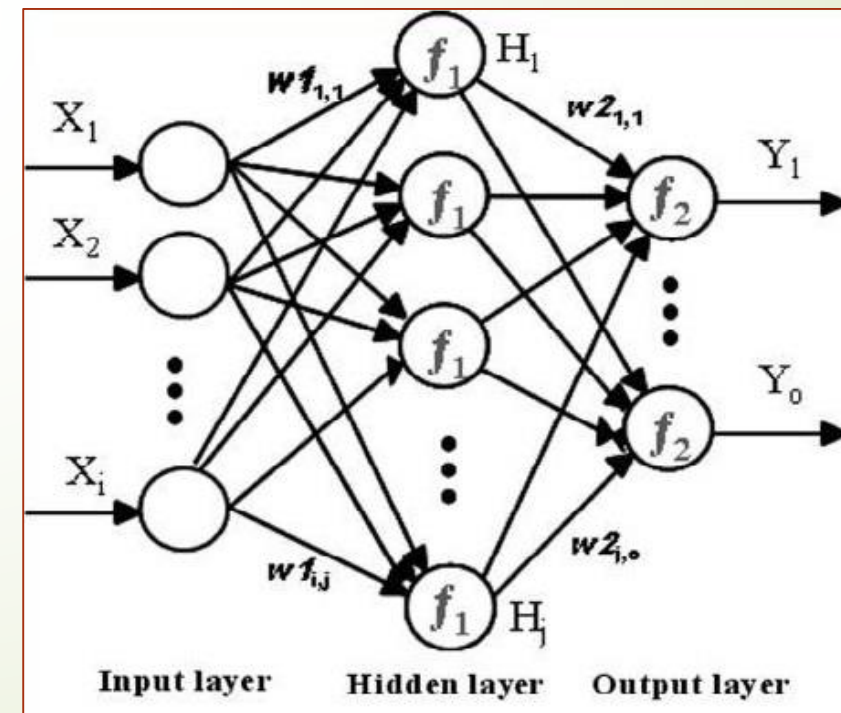
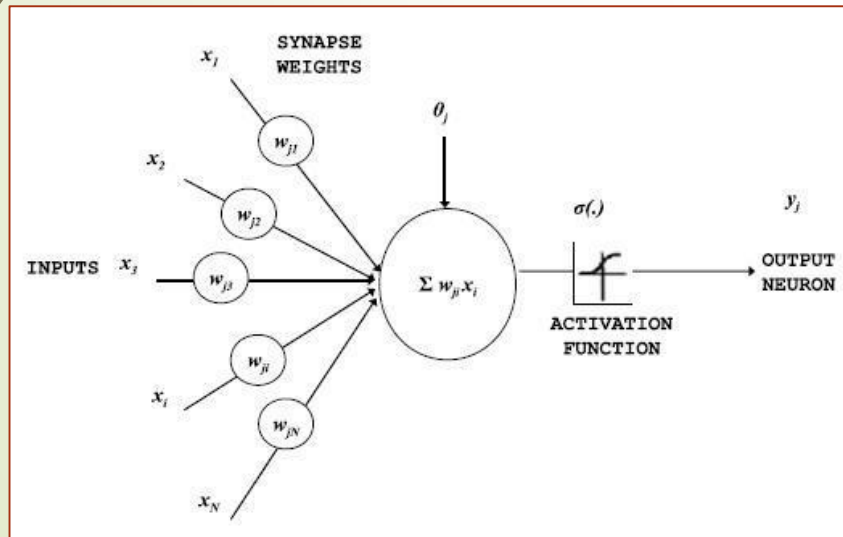
ε = όρος σφάλματος



- Βασίζονται στον συνεχώς αναπτυσσόμενο τομέα της **Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence – AI)**.
- Παρέχουν μια αυτοματοποιημένη, παρόμοια με την ανθρώπινη, διαδικασία εκμάθησης κανόνων και εξόρυξης πληροφοριών μέσω προηγμένων αλγορίθμων.
- Βασική επιδίωξη η αναγνώριση / αντιστοίχιση μοτίβων (patterns) για την επίλυση προβλημάτων μη-γραμμικών σχέσεων.



- Λειτουργία τεχνητού νευρώνα:
 - Τα σήματα εισέρχονται στο σώμα ως «σταθμισμένες» εισροές.
 - Το σώμα αθροίζει τις «σταθμισμένες» εισροές.
 - Εάν το άθροισμα υπερβαίνει το κατώφλι, ο νευρώνας ενεργοποιείται και παράγει μια εκροή (μέσω μιας συνάρτησης ενεργοποίησης).
 - Μεταδίδει την εκροή στους παρακείμενους σ' αυτόν νευρώνες.



- **Συνδυασμό/ενοποίηση** δύο (ή περισσότερων) μεμονωμένων προσεγγίσεων μοντελοποίησης.

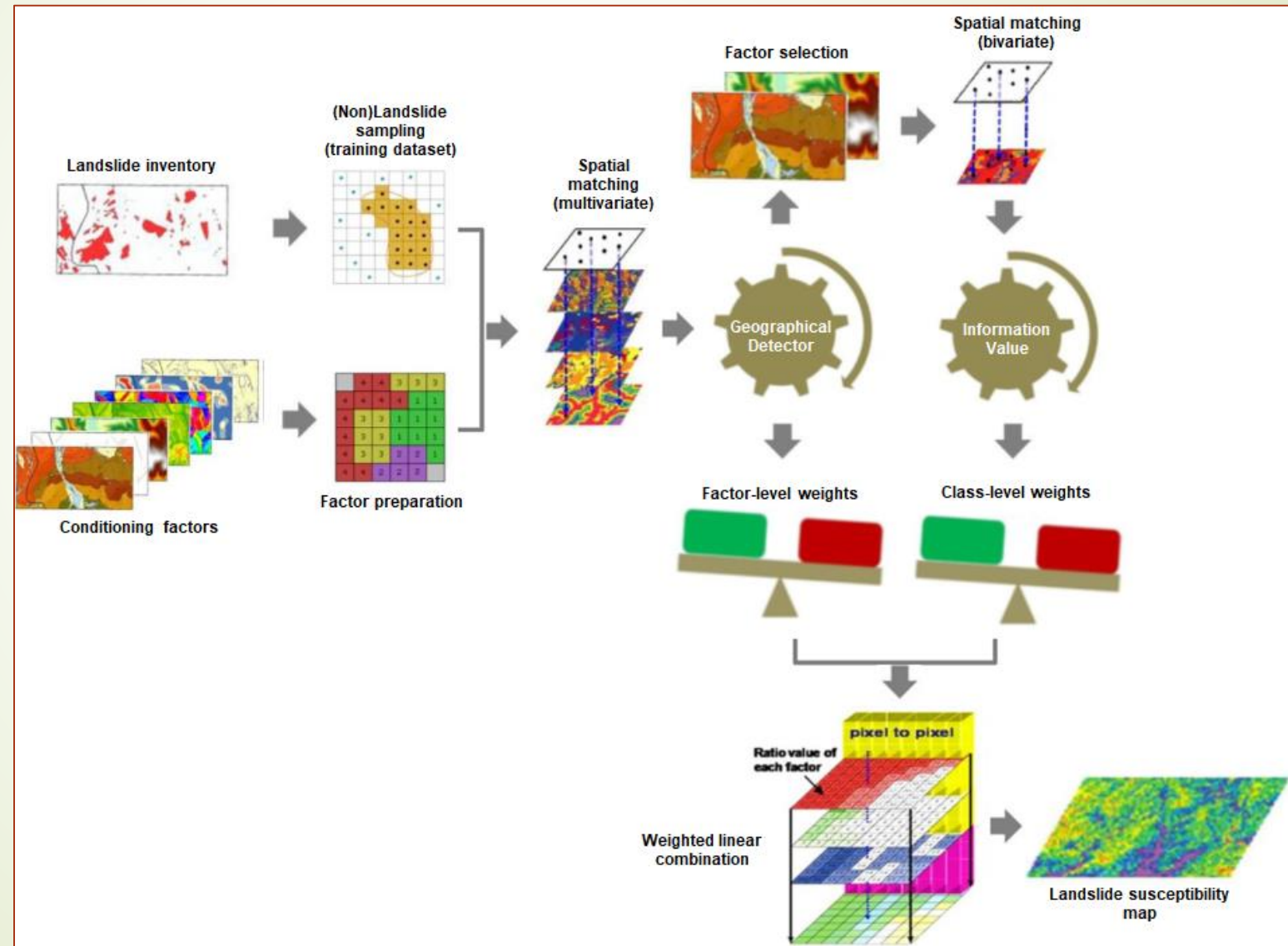
- Παραδείγματα:

1. TFNW/LSI

Layers (Factors)	Categories (Classes)	Landslide Density	LSI	(Experts), STAT Fuzzy Value	LSI/TFNW Weight
Elevation	<234 m	0.36	0.17	(L, VL, L), H	0.25
	234–524 m	0.27	0.11	(L, L, M), M	0.22
	525–851 m	0.22	–0.03	(H, M, M), M	0.28
	>851 m	0.15	–0.43	(M, H, H), L	0.24
Slope angle	<5°	0.31	–0.16	(VL, VL, L), L	0.09
	5°–10°	0.30	0.19	(L, L, L), H	0.21
	11°–15°	0.22	0.23	(M, M, M), H	0.25
	16°–20°	0.12	0.08	(H, H, H), M	0.25
	>20°	0.05	–0.77	(VH, VH, VH), VL	0.21
Slope aspect	North	0.31	0.31	(H, H, M), H	0.31
	East	0.21	–0.15	(M, M, M), M	0.23
	South	0.16	–0.47	(M, M, M), L	0.18
	West	0.32	0.16	(H, H, H), M	0.28

LSI: Landslide Susceptibility Index, LSI/TFNW: The integration method, VL: Very Low, L: Low, M: Moderate, H: High, VH: Very High.

2. GeoDIV



Προσαρμοστικό Σύστημα Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – ANFIS)

50

- Μοντέλο ενοποίησης **TNΔ** και **ασαφούς λογικής**.
- Με βάση την αρχιτεκτονική και την λειτουργικότητα των TNΔ, αναπτύσσει **ασαφείς κανόνες**:

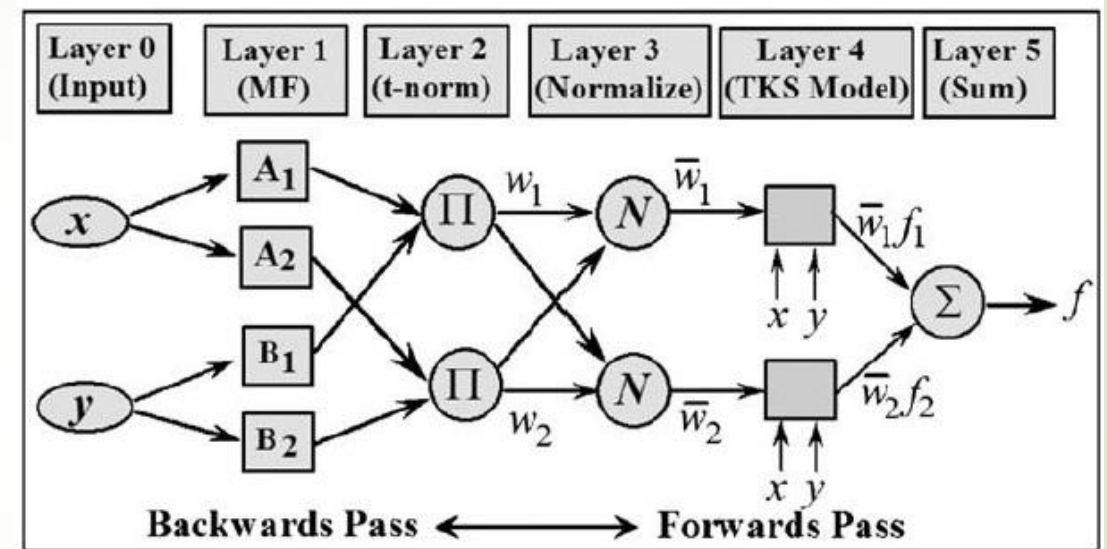
«**εάν** (X είναι LX) **ΚΑΙ** (Y είναι LY) **ΚΑΙ** ... **ΚΑΙ** (Z είναι LZ), **τότε** (U είναι LU)»

X, Y, Z = δεδομένα εισόδου

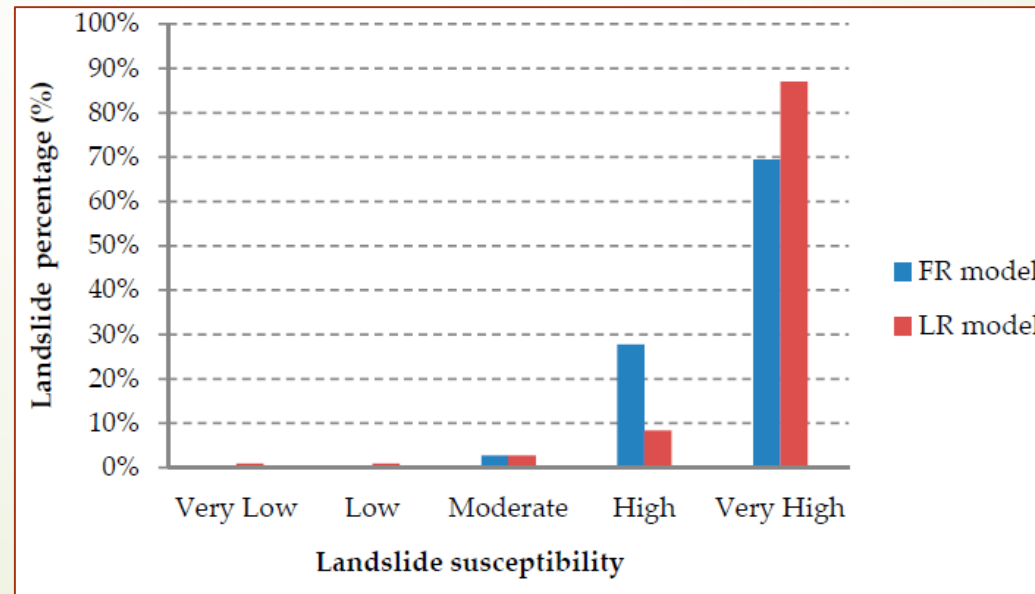
LX, LY, LZ = ασαφή σύνολα των δεδομένων

U = έξοδος

LU = ασαφές σύνολο της εξόδου



- Μέσω της διαδικασίας της **επικύρωσης (validation)** για την κατάδειξη ακρίβειας και ικανότητας πρόβλεψης του μοντέλου.
- Χρήση **«ανεξάρτητου»** συνόλου δεδομένων, από το διαχωρισμό των κατολισθήσεων σε **(υπο)σύνολο εκπαίδευσης** και **(υπο)σύνολο επικύρωσης**.
- Από απλή υπέρθεση του συνόλου επικύρωσης με ζώνες επιδεκτικότητας, **έως...**



- Ο λόγος του αριθμού των θετικών προβλέψεων προς το σύνολο των θετικών παρατηρήσεων ονομάζεται **ευαισθησία (sensitivity)**:

$$\text{Sensitivity} = n(TP) / [n(TP) + n(FN)]$$

- Ο λόγος του αριθμού των αρνητικών προβλέψεων προς το σύνολο των αρνητικών παρατηρήσεων ονομάζεται **ειδικότητα (specificity)**:

$$\text{Specificity} = n(TN) / [n(TN) + n(FP)]$$

TP = True Positive, δηλαδή κατολίσθηση σε ζώνη σημαντικής επιδεκτικότητας

FP = False Positive, δηλαδή κατολίσθηση σε ζώνη μη σημαντικής επιδεκτικότητας

TN = True Negative, δηλαδή μη κατολίσθηση σε ζώνη μη σημαντικής επιδεκτικότητας

FN = False Negative, δηλαδή μη κατολίσθηση σε ζώνη σημαντικής επιδεκτικότητας

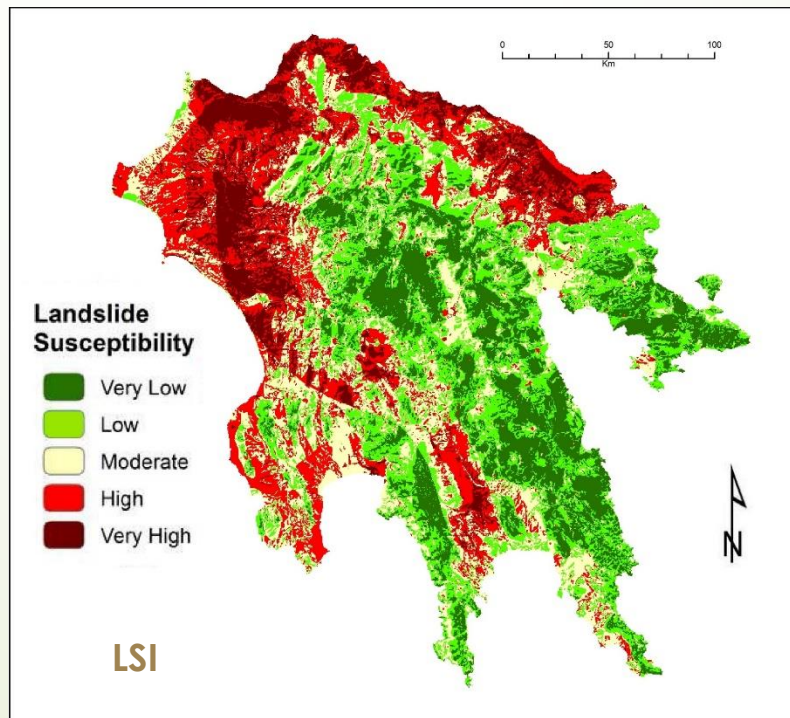
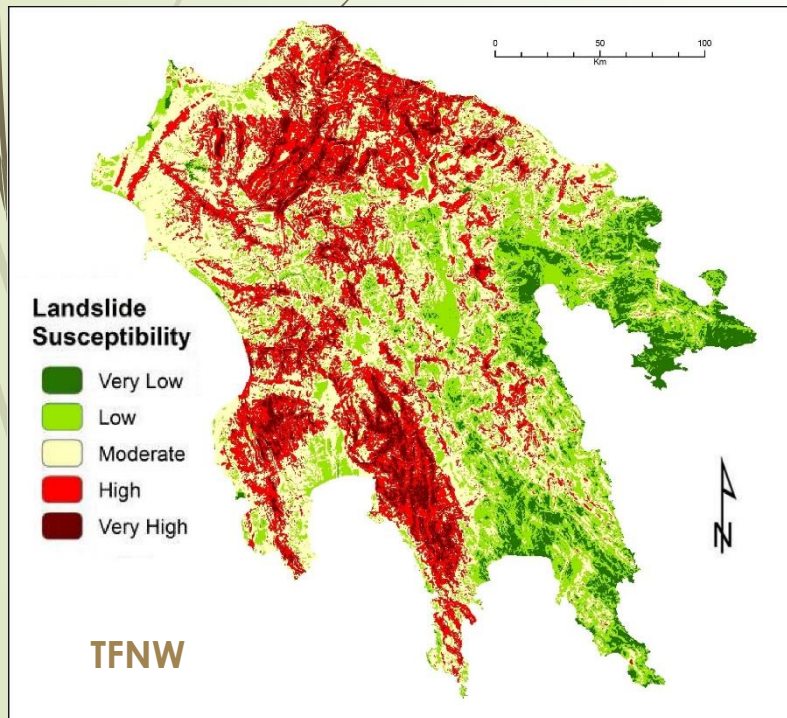
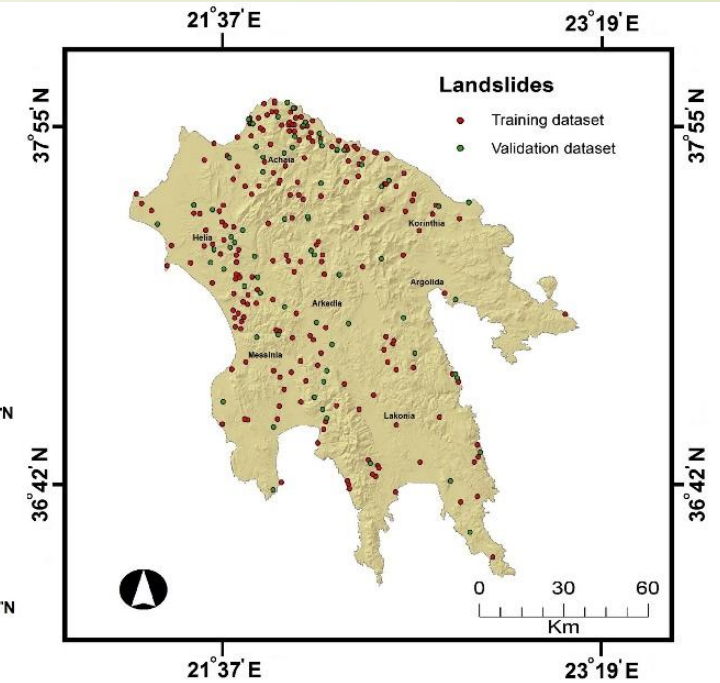
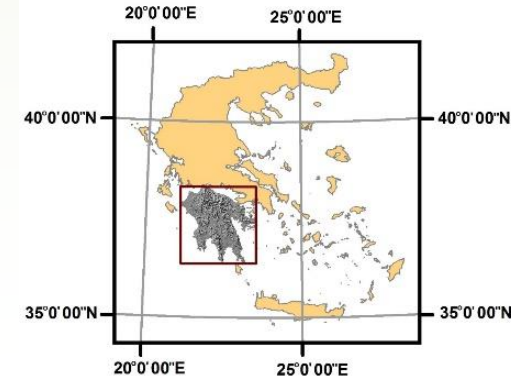
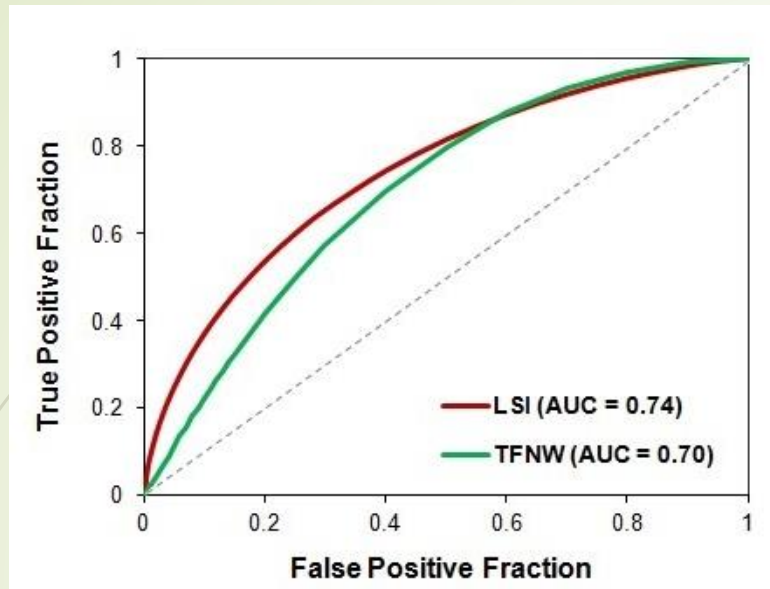
- **Διάγραμμα καμπύλης ROC: ευαισθησία** στον άξονα των **Y**, και **1-ειδικότητα** στον άξονα των **X** (υψηλή ευαισθησία για μεγάλο ποσοστό σωστών προβλέψεων, και υψηλή ειδικότητα για μικρό ποσοστό λανθασμένων προβλέψεων).
- Σημαντική η τιμή της **«περιοχής κάτω από την καμπύλη (area under curve – AUC)»** με εύρος **0,5-1**.

1. Γενικά περί Κατολίσθησης
2. Ανάλυση κατολισθήσεων με αξιοποίηση Γεωπληροφορικής
3. Παραδείγματα – Μελέτες περίπτωσης
4. Συμπεράσματα



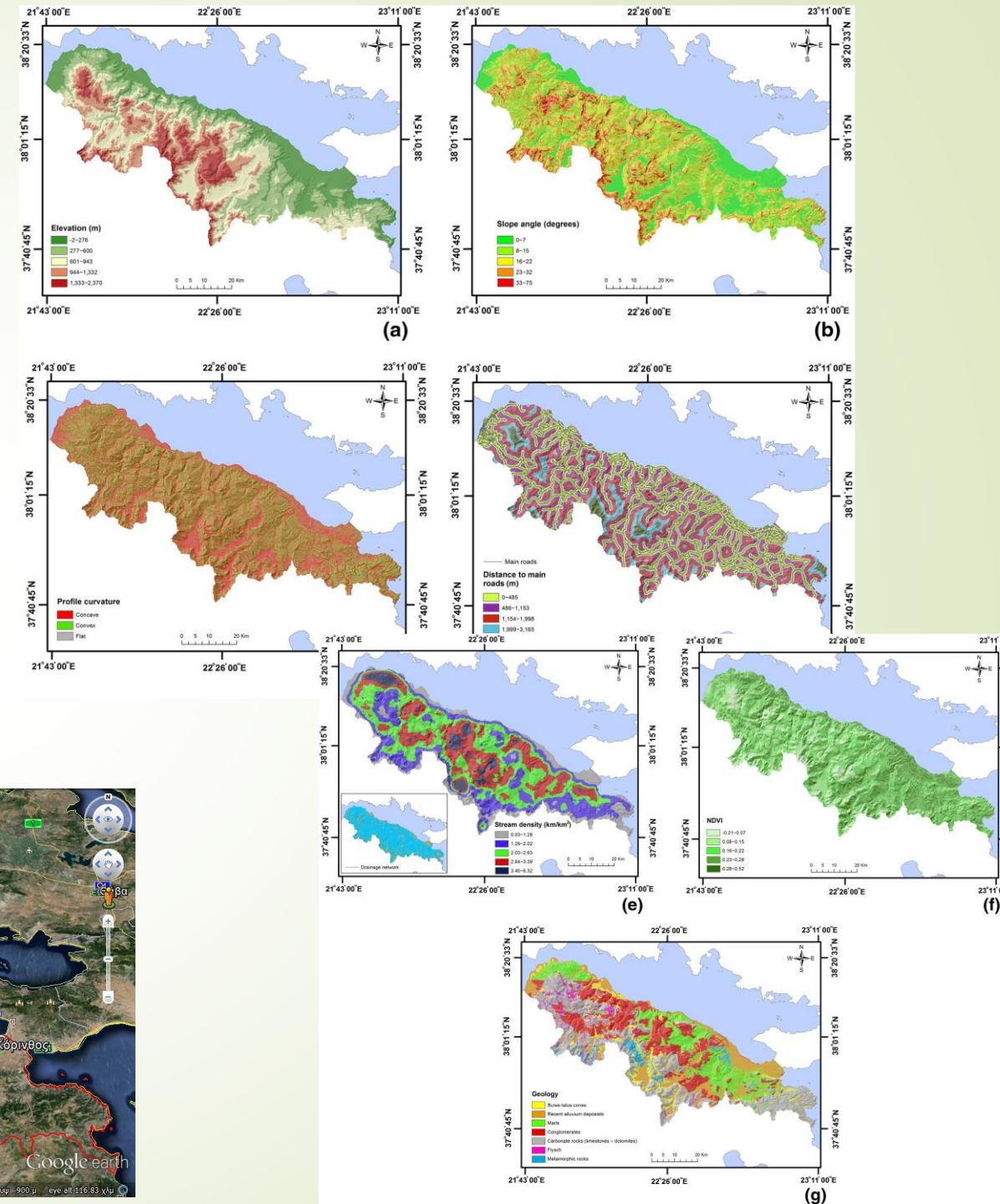
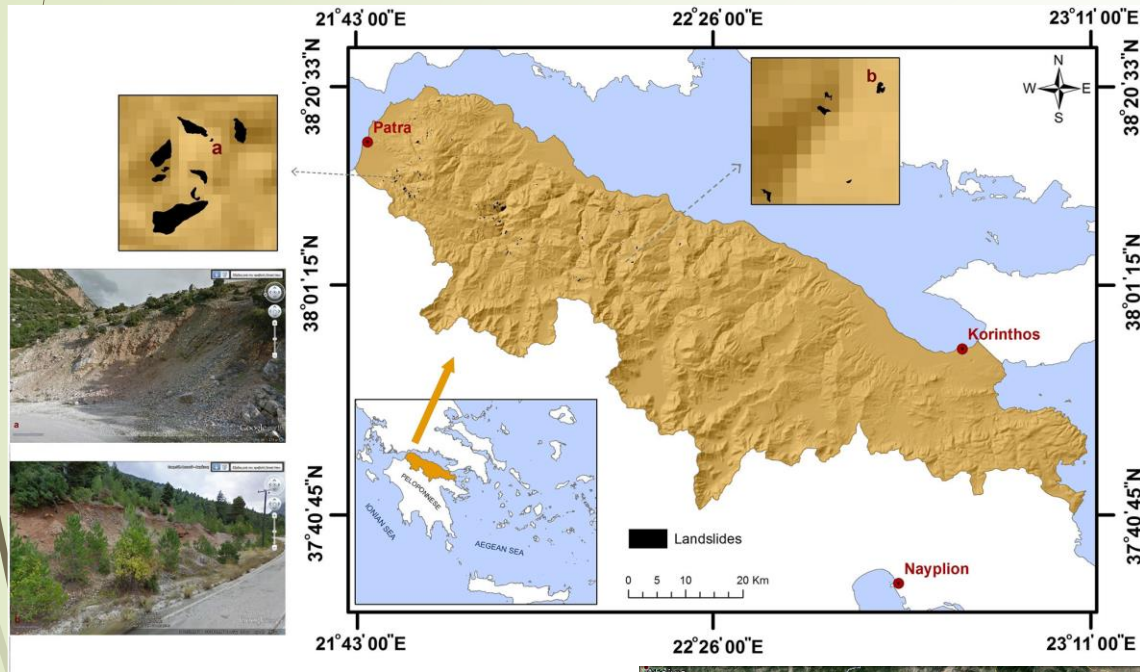
Παράδειγμα 1

54

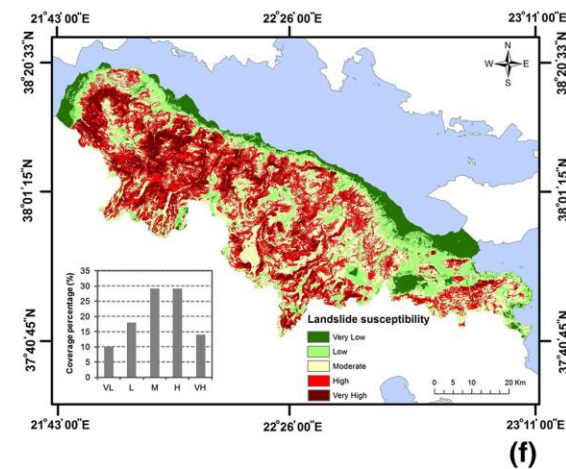
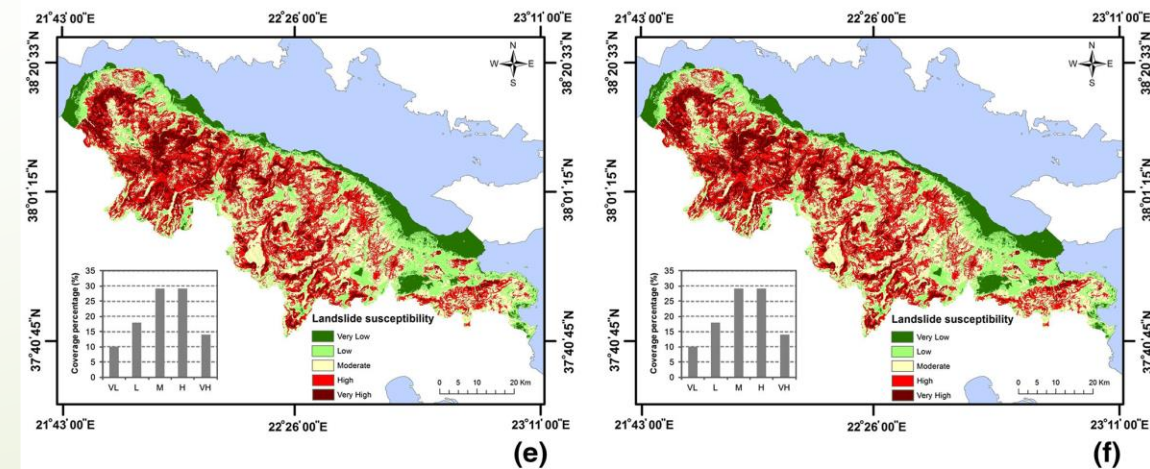
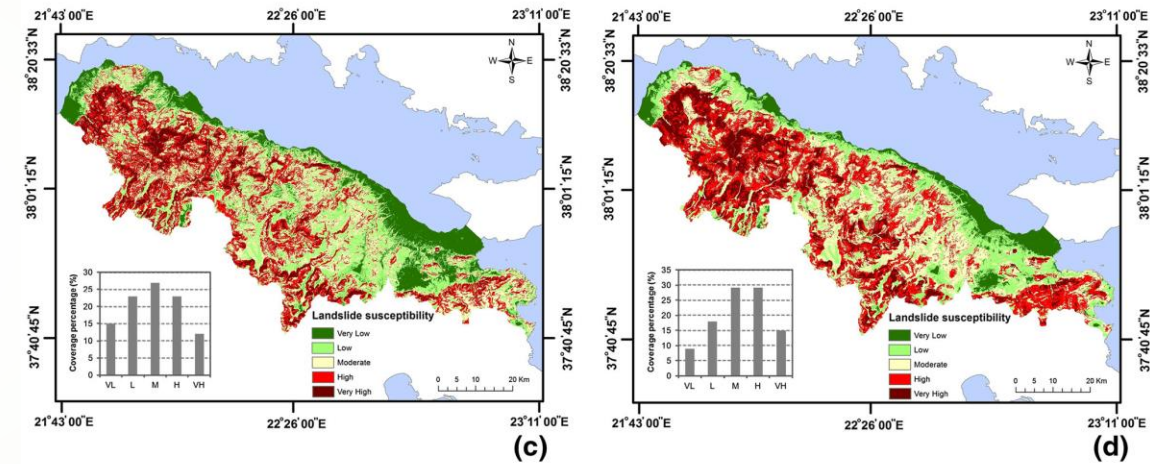
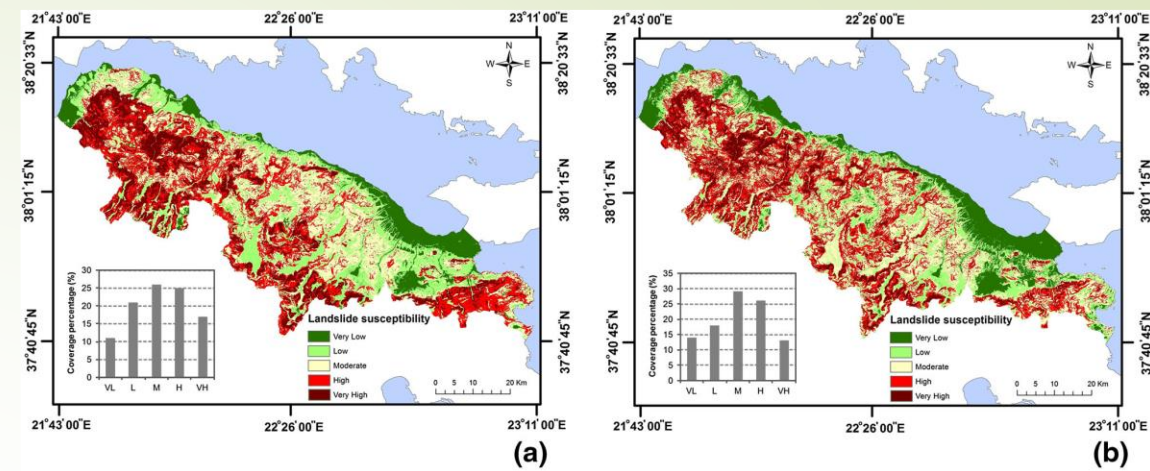
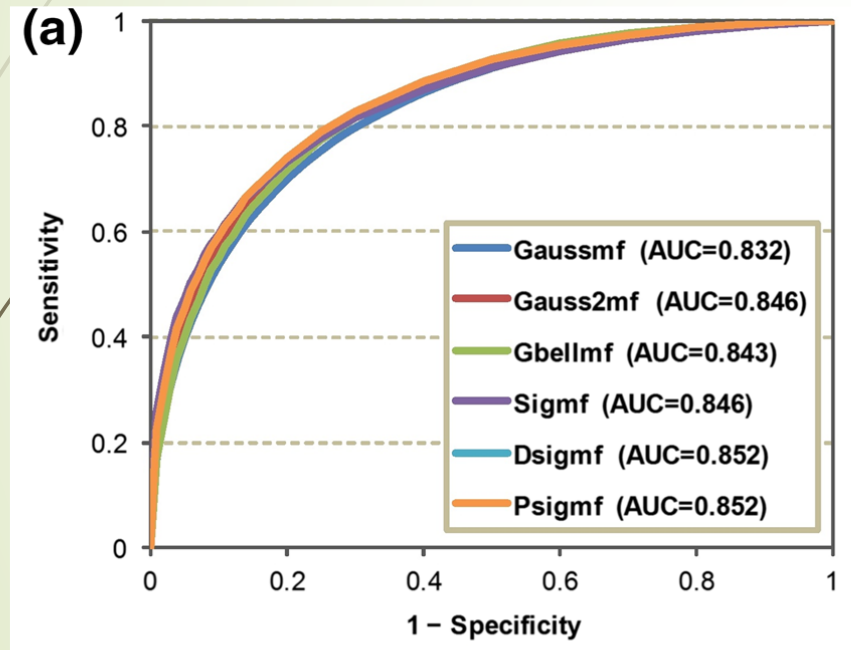


Παράδειγμα 2

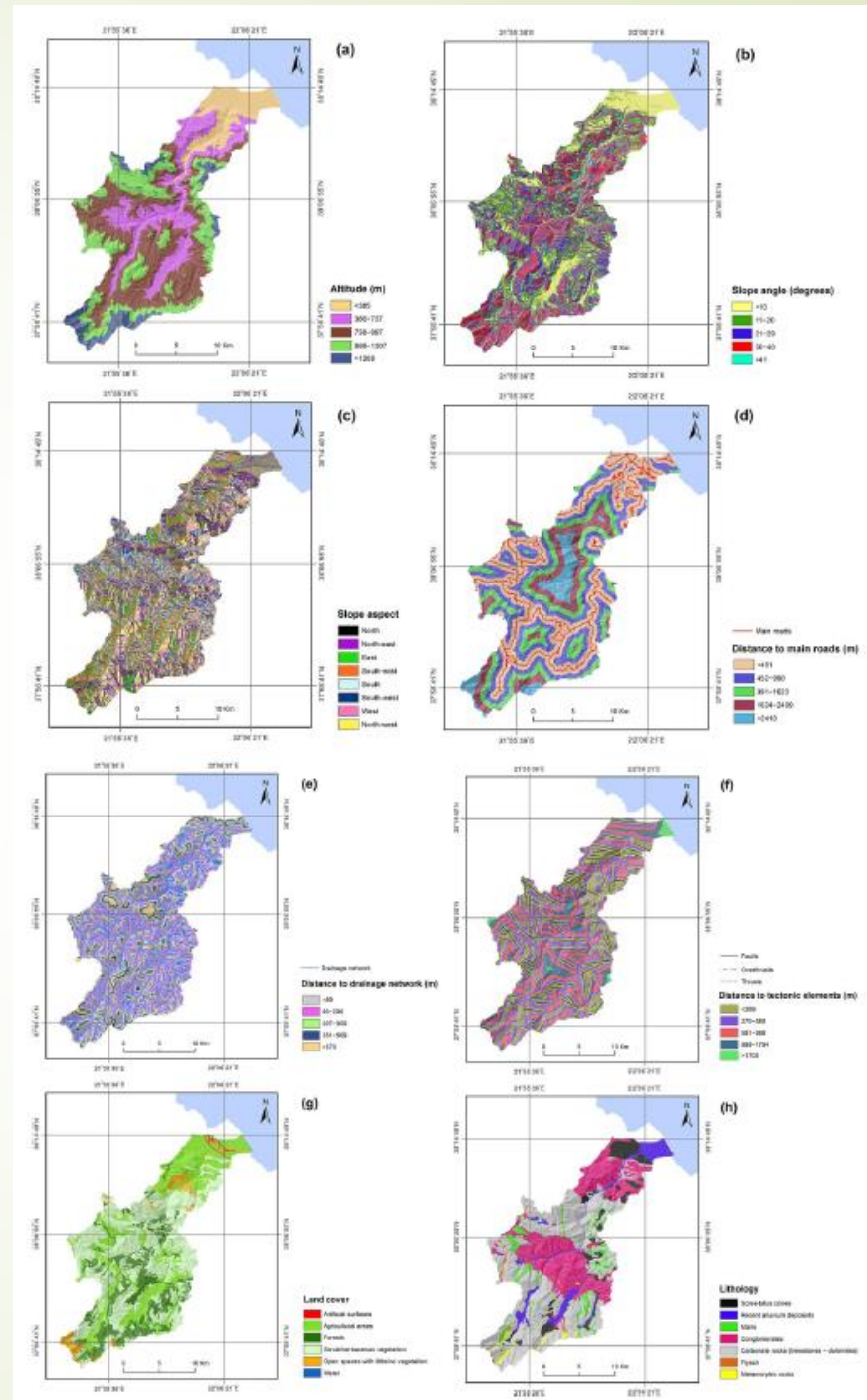
55

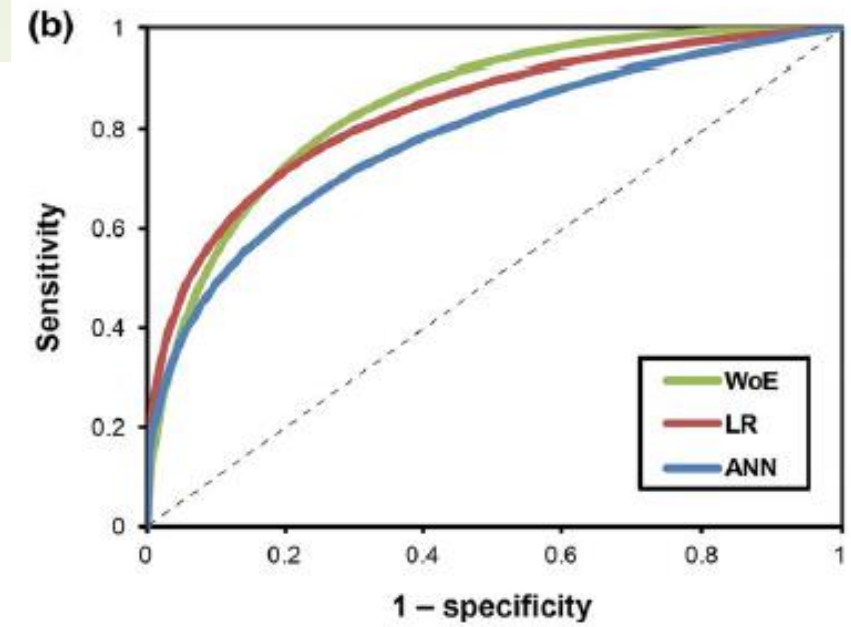
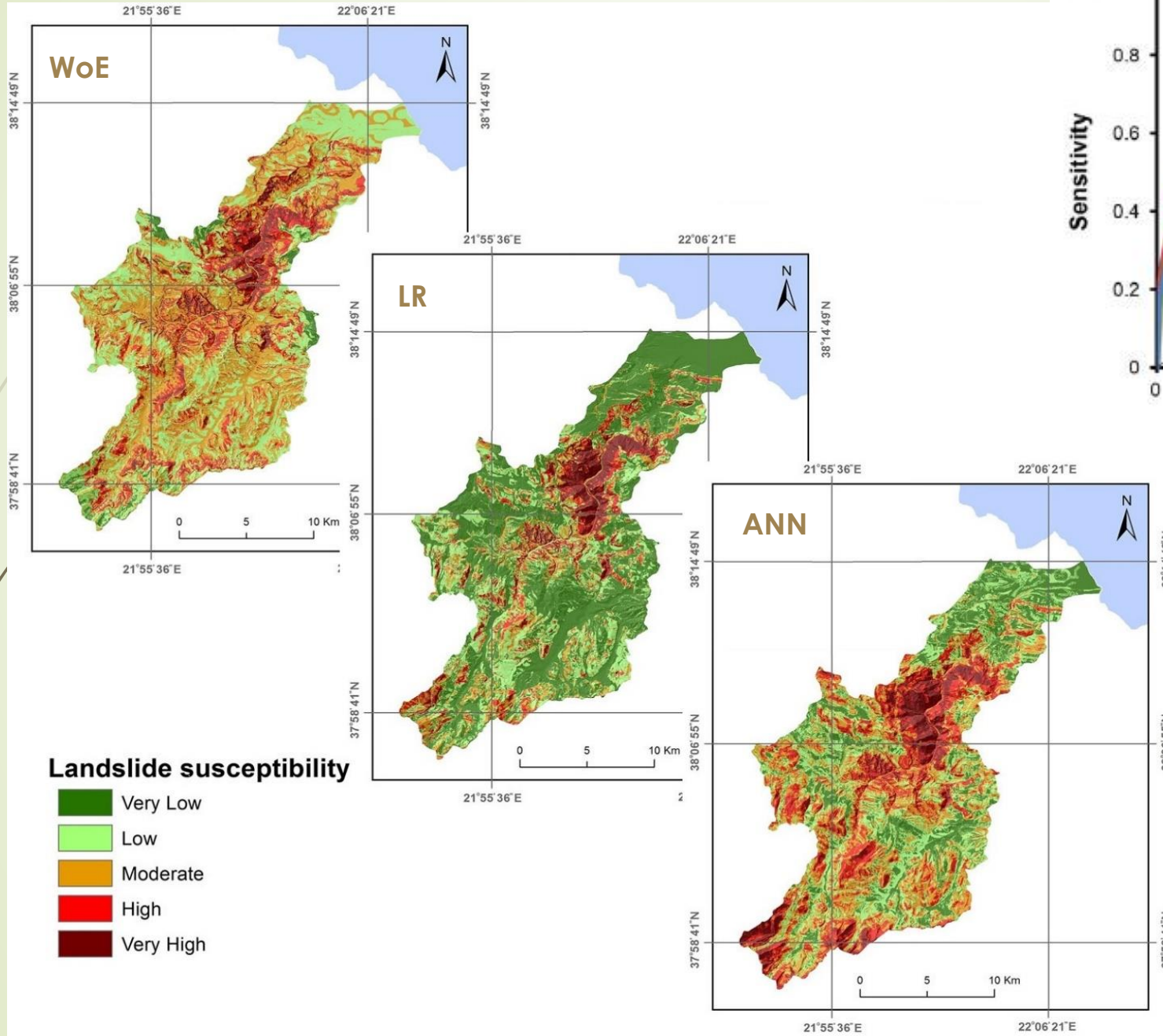


ANFIS



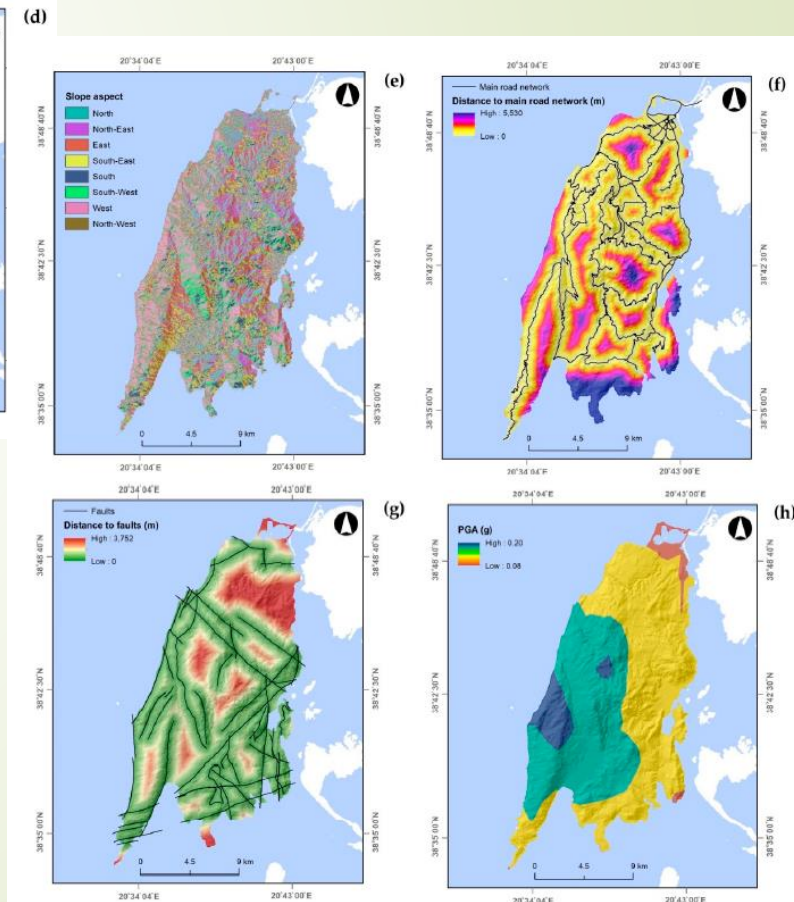
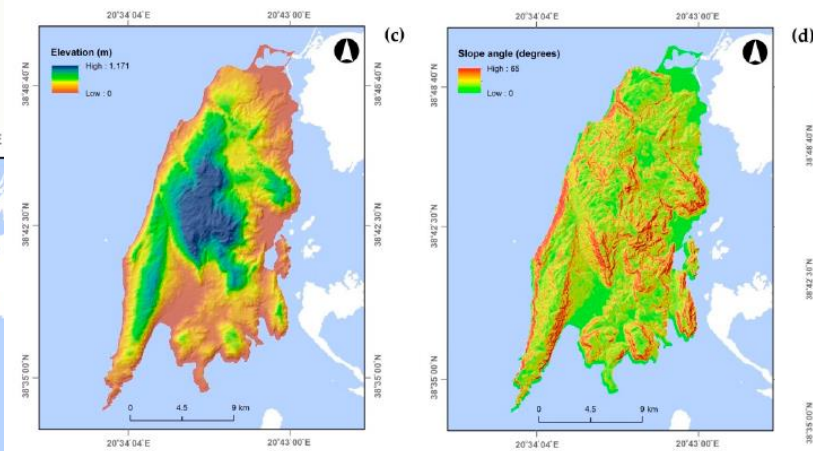
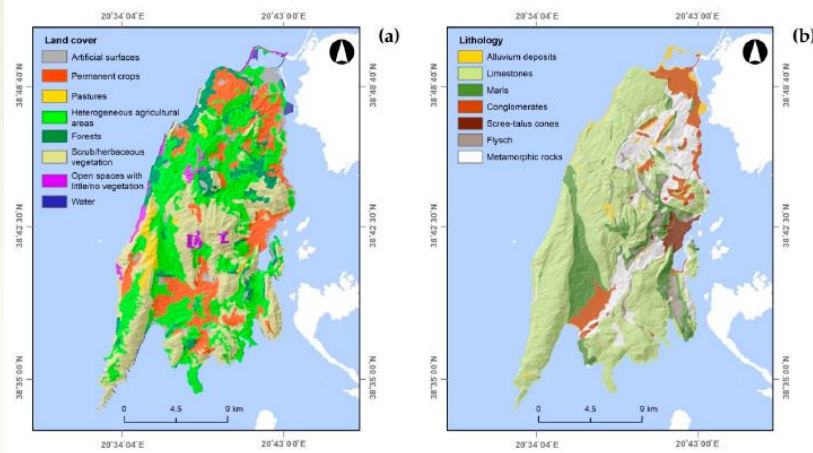
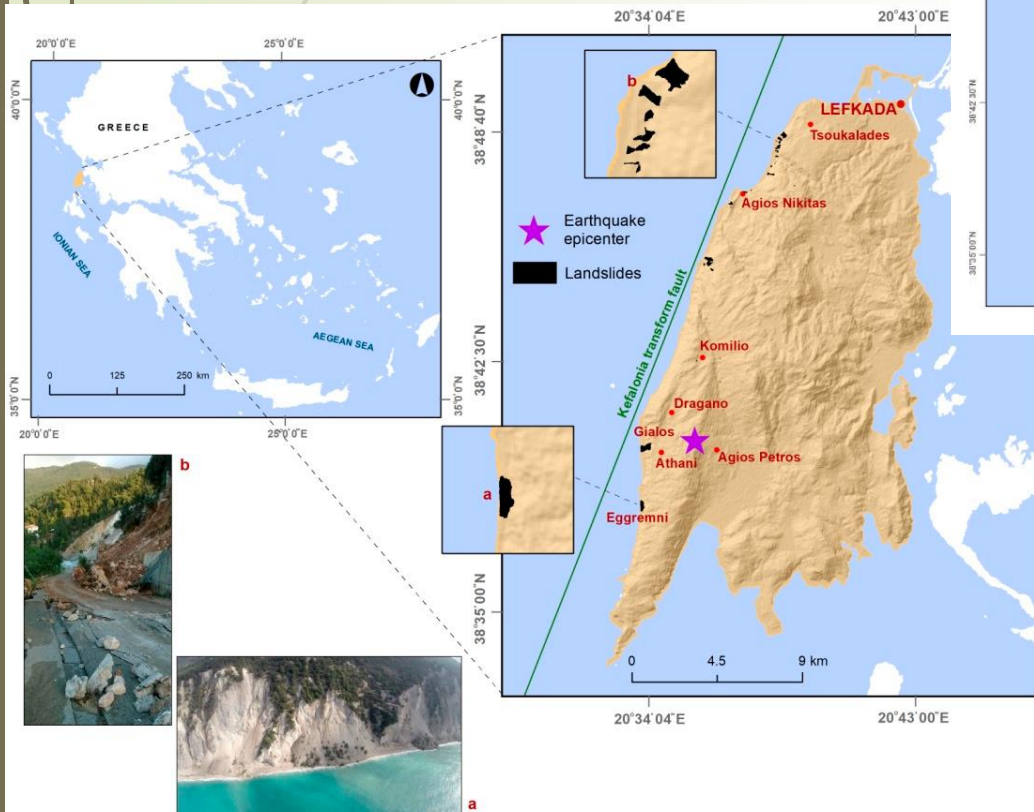
57





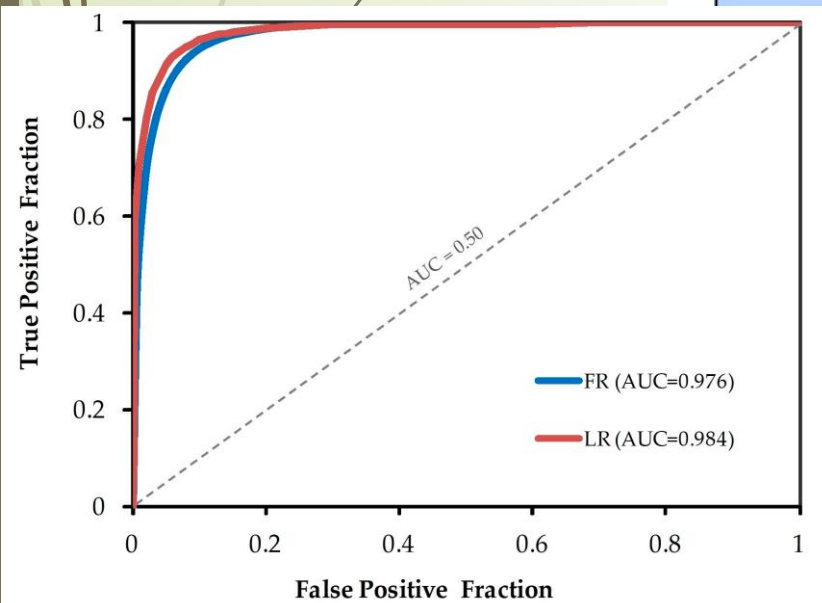
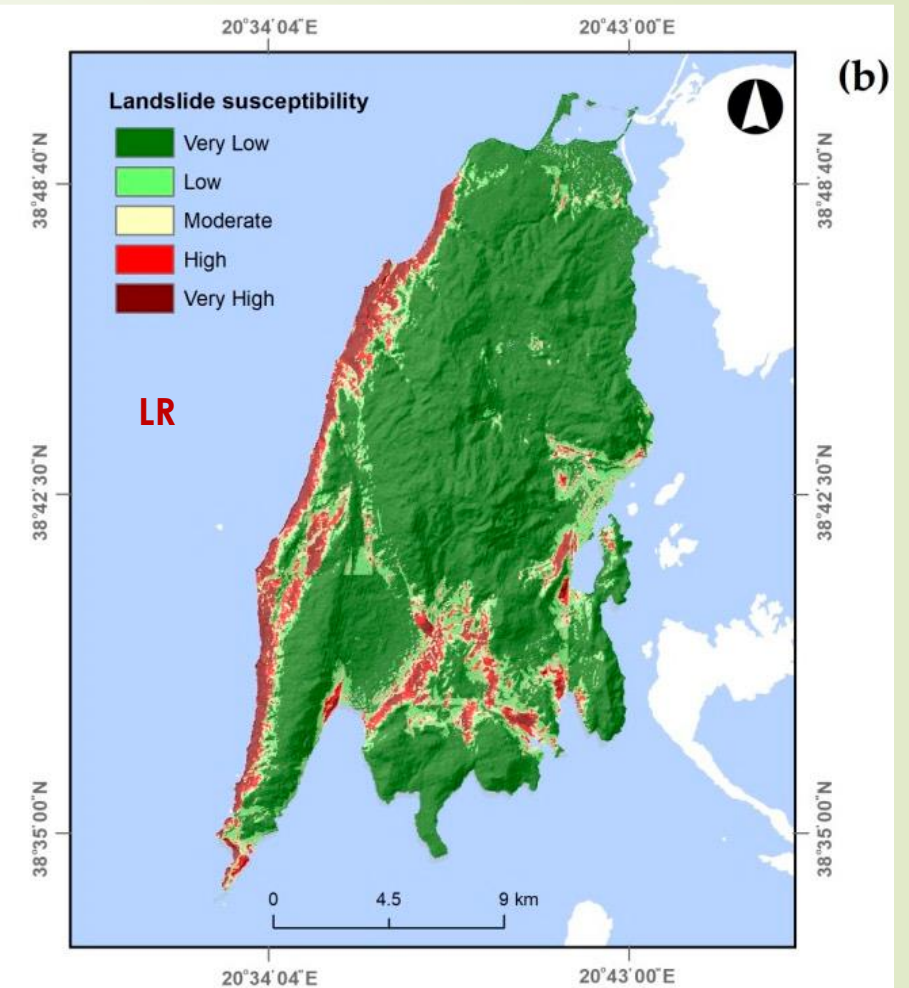
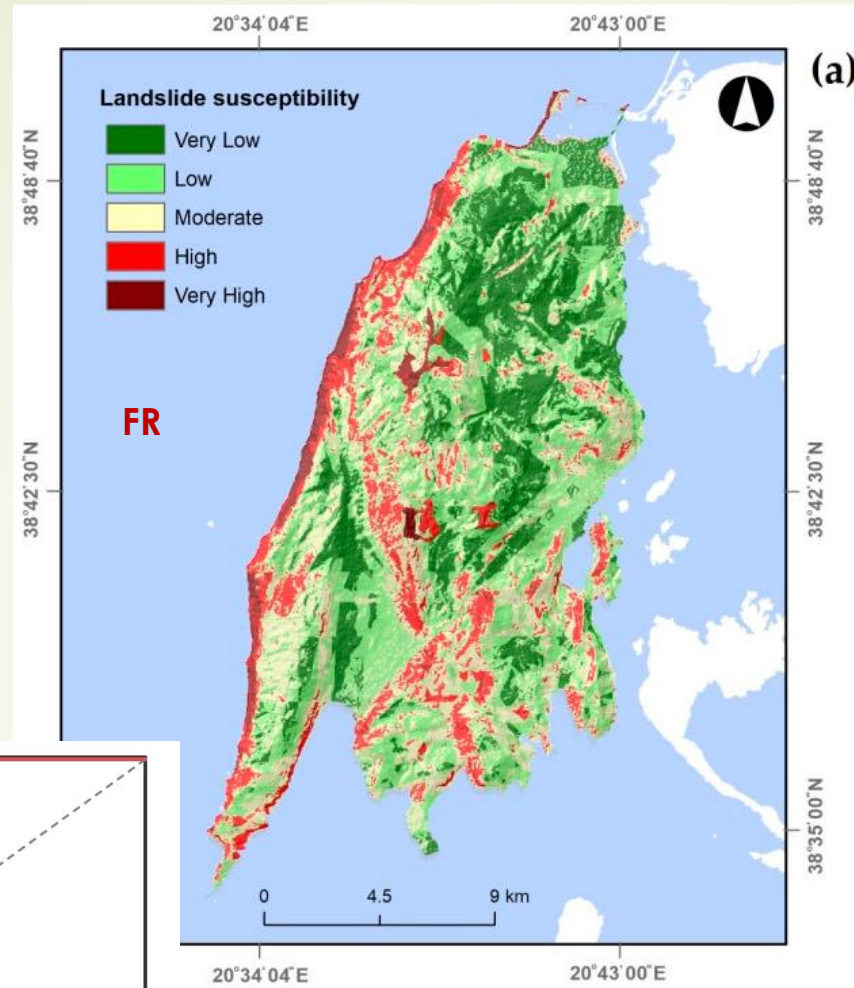
Παράδειγμα 4

59



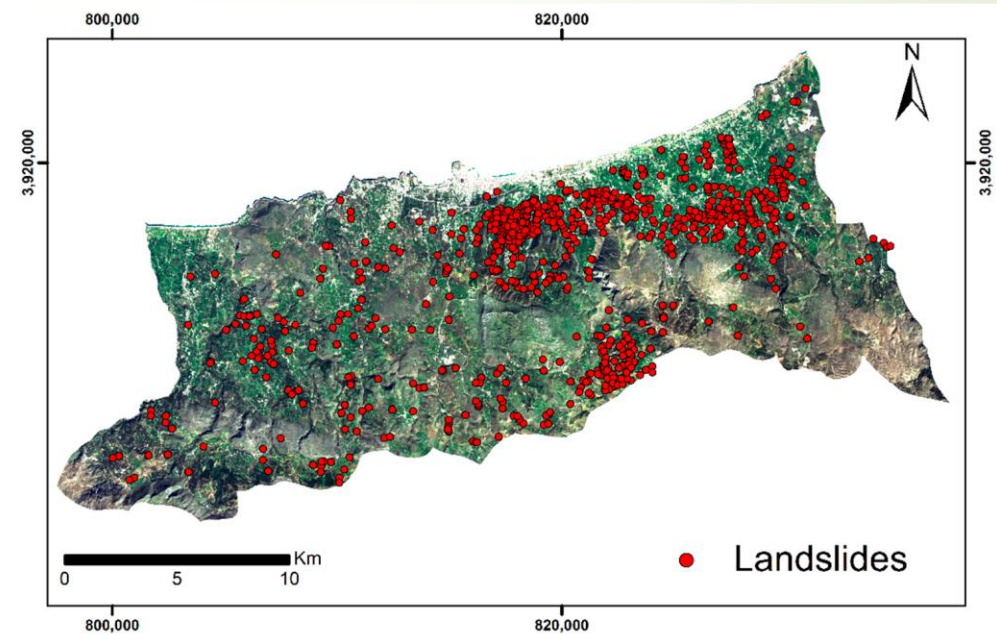
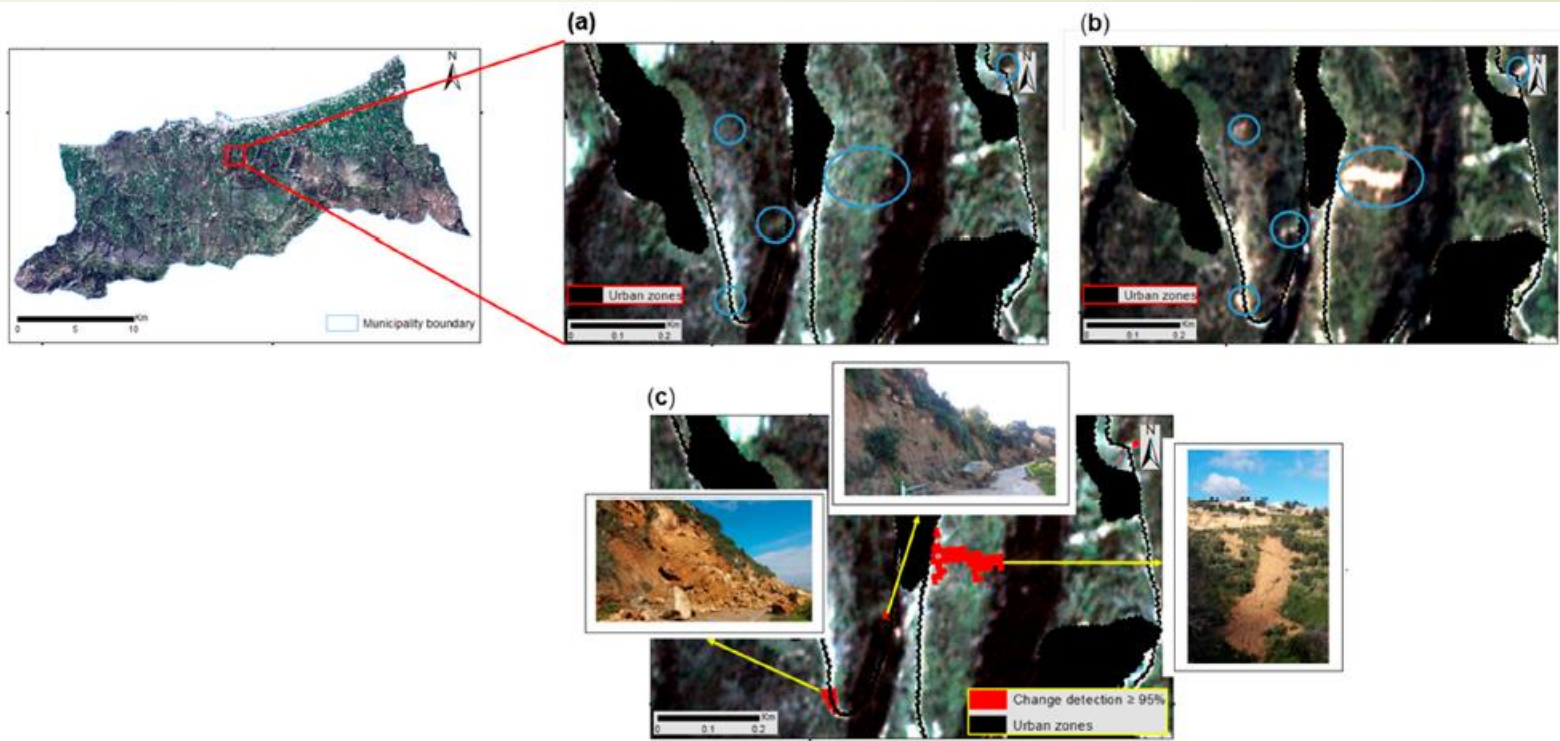
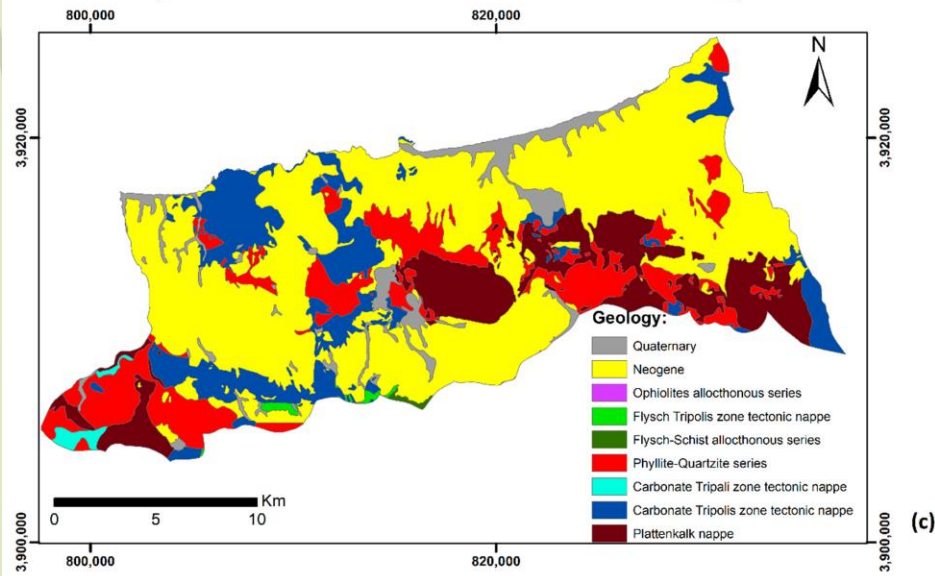
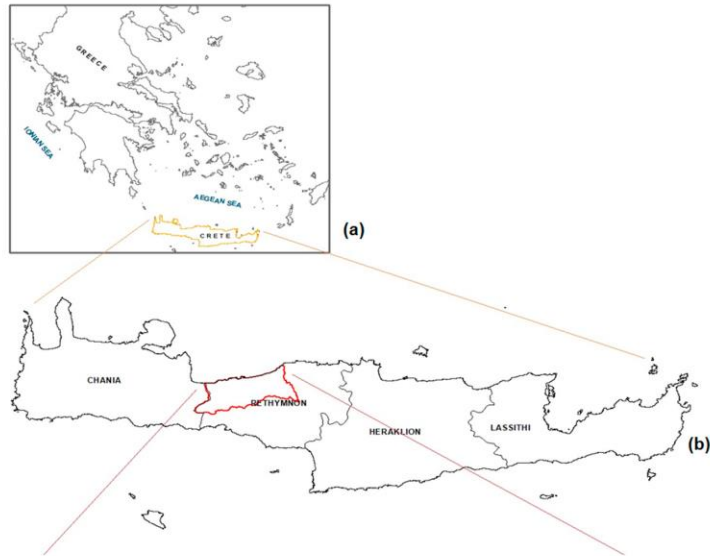
Παράδειγμα 4

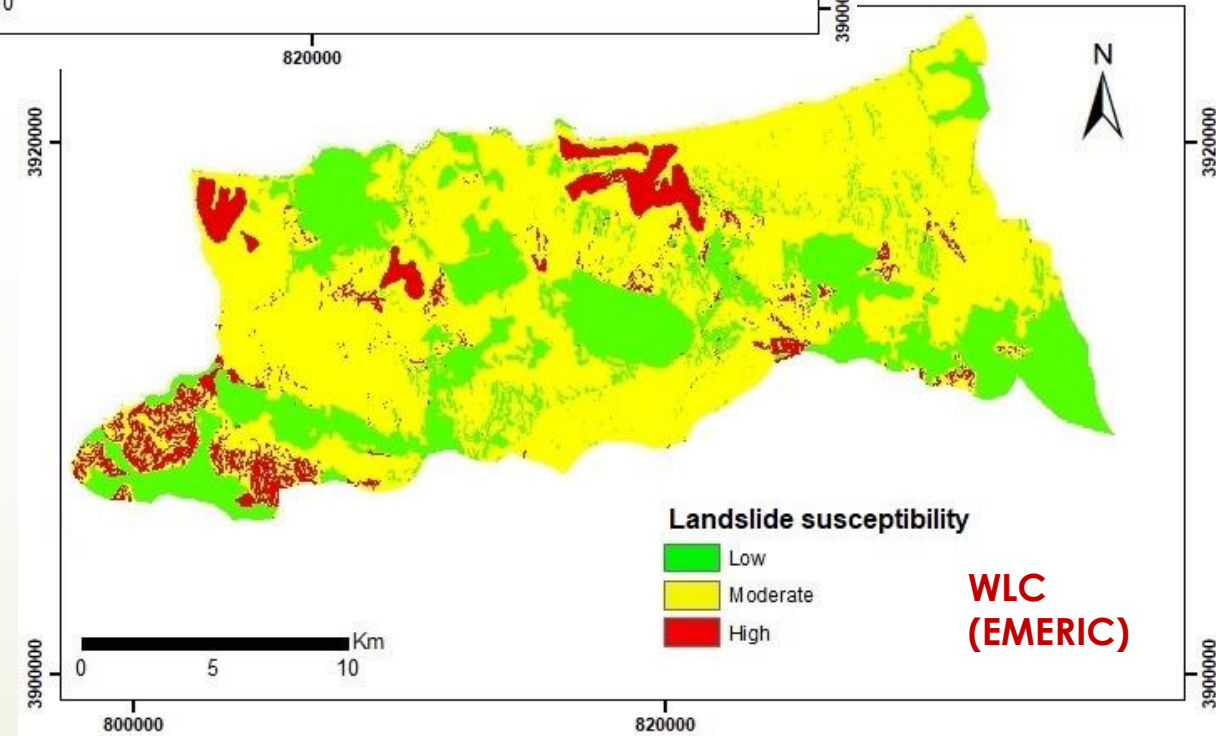
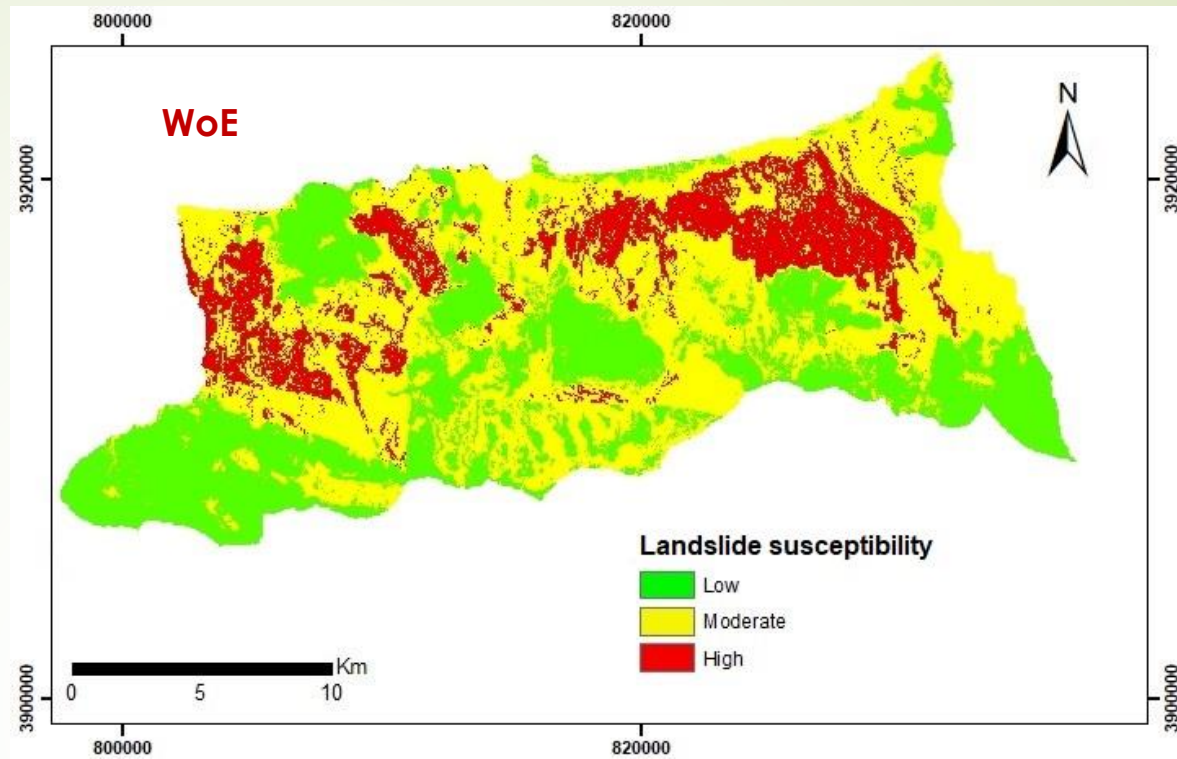
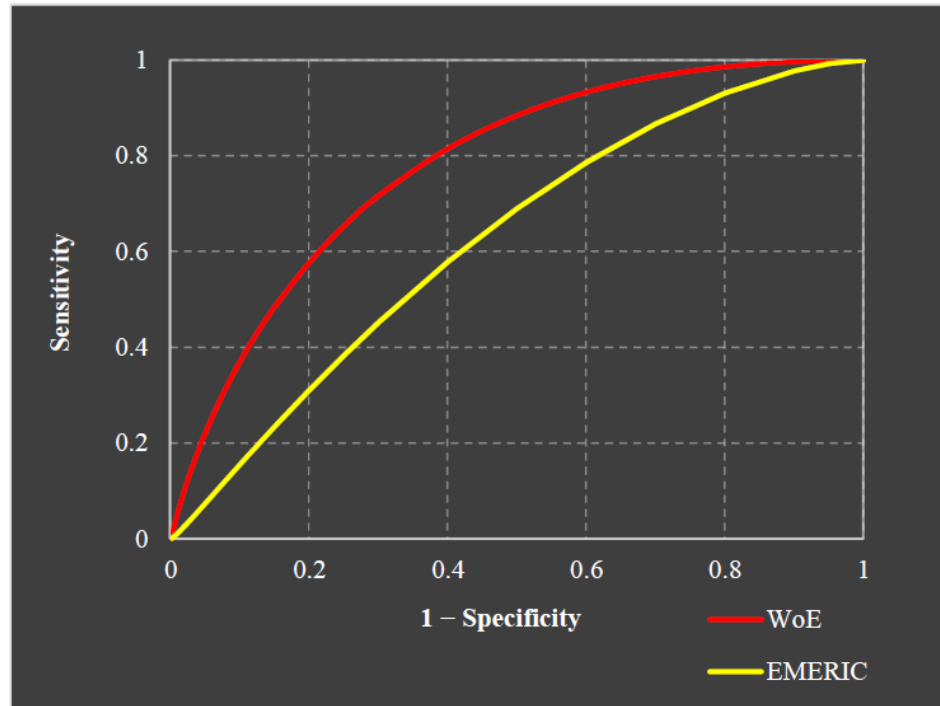
60



Παράδειγμα 5

61





1. Γενικά περί Κατολίσθησης
2. Ανάλυση κατολισθήσεων με αξιοποίηση Γεωπληροφορικής
3. Παραδείγματα – Μελέτες περίπτωσης
4. Συμπεράσματα



- ❖ Οι κατολισθήσεις είναι ένα σύνθετο και πολύπλευρο φαινόμενο του οποίου η εκδήλωση συνιστά αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης τόσο φυσικών όσο και ανθρωπογενών παραγόντων.
- ❖ Λόγω της αυξημένης συχνότητας εκδήλωσης και έντασης των επιπτώσεων τους, χρειάζεται συνεχή και συστηματική μελέτη με στόχο την πλήρη κατανόηση του φαινομένου.
- ❖ Δεδομένου ότι η πρόβλεψη του χρόνου εκδήλωσης μιας κατολίσθησης εξακολουθεί να αποτελεί «πρόκληση», το μεγαλύτερο μέρος της προσοχής έχει αποδωθεί στον χωρικό προσδιορισμό της.



- ❖ Σημαντική η συμβολή της προόδου στις τεχνολογίες της Γεωπληροφορικής και της διαθεσιμότητας πολύ υψηλής ανάλυσης (VHR) δεδομένων:
 - (α) Δορυφορικά δεδομένα για την αναγνώριση κατολισθήσεων, και συνεπώς την παραγωγή και ενημέρωση χαρτών καταγραφής.
 - (β) Γεω-χωρικά δεδομένα για την αναπαράσταση των παραγόντων στη μοντελοποίηση.
- ❖ Λόγω της αβεβαιότητας και των σφαλμάτων που εμπλέκονται στη μοντελοποίηση του φαινομένου, τα αποτελέσματα της πρέπει ν' αξιολογούνται.
- ❖ Η απόδοση του μοντέλου εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως ο αριθμός και ο τύπος των εξεταζόμενων παραγόντων, η κατηγοριοποίηση ή/και επαναταξινόμηση τους, η κατηγοριοποίηση των τελικών αποτελεσμάτων επιδεκτικότητας, κλπ.
- ❖ **Γενικά, δεν υπάρχει η «βέλτιστη» προσέγγιση μοντελοποίησης, αλλά η κατάλληλη προσέγγιση για την εκάστοτε μελέτη περίπτωσης.**





- Carrara, A.; Cardinali, M.; Detti, R.; Guzzetti, F.; Pasqui, V.; Reichenbach, P. (1991) GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 427–445
- Chalkias, C.; Ferentinou, M.; Polykretis, C. (2014) GIS-based landslide susceptibility mapping on the Peloponnese Peninsula, Greece. *Geosciences*, 4, 176–190
- Cruden, D.M. (1991) A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology (IAEG)*, 43(1), 27–29
- He, Y.; Beighley, R.E. (2008) GIS-based regional landslide susceptibility mapping: A case study in southern California. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 380–393
- Highland, L.M.; Bobrowsky, P. (2008) *The landslide handbook—A guide to understanding landslides*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Circular 1325, p. 129
- Parcharidis, I.; Lekkas, E.; Fomelis, M.; Segou, M., (2005) Implication of secondary geodynamic phenomena on co-seismic interferometric coherence. *Proceedings of FRINGE '05*, European Space Agency, Special Publication SP-610, p. 6
- Polykretis, C.; Ferentinou, M.; Chalkias, C. (2015) A comparative study of landslide susceptibility mapping using landslide susceptibility index and artificial neural networks in the Krios River and Krathis River catchments (northern Peloponnesus, Greece). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74, 27–45
- Sabatakakis, N.; Koukis, G.; Vassiliades, E.; Lainas, S. (2013) Landslide susceptibility zonation in Greece. *Natural Hazards*, 65(1), 523–543
- Scaioni, M.; Longoni, L.; Melillo, V.; Papini, M. (2014) Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives. *Remote Sensing*, 6(10), 9600–9652
- Van Westen, C.J.; Van Asch, T.W.J.; Soeters, R. (2006) Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167–184
- Van Westen, C.J.; Castellanos, E.; Kuriakose, S.L. (2008) Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102, 112–131
- Fawcett, T. (2006) An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, 27(8), 861–874
- Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z. (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102, 85–98

Σας ευχαριστώ!



Ερωτήσεις;



Τρόπος επικοινωνίας (e-mail):

chpolykretis@gmail.com