



Project funded by  
EUROPEAN UNION



# Γεωτεχνική ενότητα στο **REDAS**

- **Κατολισθητικός Κίνδυνος**
  - **Ρευστοποίηση**

Νικόλαος Κλήμης<sup>1</sup>,

Κ. Παπαθεοδώρου<sup>2</sup>, Σ. Βαλκανιώτης<sup>1</sup>, Ελ. Πεταλά<sup>1</sup>, Γ. Παπαθανασίου<sup>3</sup>, Ι. Γκιουγκής<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης (Δ.Π.Θ.)

<sup>2</sup> Τμήμα Μηχανικών Τοπογραφίας και Γεωπληροφορικής, Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος (ΔΙ.ΠΑ.Ε.)

<sup>3</sup> Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ.)

Common borders. Common solutions.

Σε περίπτωση εκδήλωσης ενός ισχυρού σεισμού μέρος των βλαβών σχετίζεται με τις εδαφικές αστοχίες

Επικεντρωνόμαστε σε δύο από αυτές (σε περιφερειακή κλίμακα):

- Κατολισθήσεις
- Ρευστοποίηση

Η γεωτεχνική ενότητα αποτελεί μέρος του συστήματος REDA και έχει δοκιμαστεί σε πιλοτικές περιοχές όπου σημειώθηκαν φαινόμενα κατολισθήσεων και ρευστοποίησης λόγω σεισμού.

Common borders. Common solutions.

Στο παρόν έργο **2 διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις για LHA** έχουν επιλεγεί:

- Η 1<sup>η</sup> ανήκει στις **μεθόδους φυσικής βάσης**,
- Η 2<sup>η</sup> ανήκει στις **μεθόδους στατιστικής βάσης**

### **Μειονεκτήματα και Πλεονεκτήματα:**

- Οι **Στατιστικές Μέθοδοι** είναι προσανατολισμένες σε περιφερειακή κλίμακα όπου η χωρική μεταβλητότητα των γεωλογικών σχηματισμών και των μηχανικών παραμέτρων είναι σημαντική και ο τύπος κατολίσθησης σχετικά πολύπλοκος
- Οι **Μέθοδοι Φυσικής Βάσης** είναι πιο προσανατολισμένες στον Μηχανικό και συμβάλουν καλύτερα σε έργα Μηχανικών και λήψης αποφάσεων, υπό τον όρο ότι οι γεωλογικές και γεωμορφολογικές συνθήκες είναι αρκετά ομοιογενείς και οι τύποι των κατολισθήσεων είναι σχετικά απλοί, ακόμα και αν οι βάσεις δεδομένων (inventories) είναι μη ολοκληρωμένες ή ανύπαρκτες.

**Common borders. Common solutions.**

Οι **Nowicki et al. (2014)** ανέπτυξαν ένα εμπειρικό μοντέλο εκτίμησης πιθανότητας κατολίσθησης, συνδυάζοντας την εκτίμηση της εδαφικής κίνησης με παράγοντες επιδεκτικότητας σε κατολίσθηση, π.χ. κλίση, επιφανειακή γεωλογία και κλιματικές παραμέτρους.

Οι **Jessee et al. (2018)** πρότειναν ένα αναθεωρημένο μοντέλο σχετικά με την εκτίμηση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο των συν-σεισμικών κατολισθήσεων, καταλήγοντας στο παρακάτω μοντέλο βέλτιστης προσαρμογής

$$t = \text{Logit}(P) = a + b \times \ln(\text{PGV}) + c \times \text{Slope} + d \times \text{Lithology} + e \times \text{Land Cover} + f \times \text{CTI} + g \times \ln(\text{PGV}) \times \text{Slope},$$

Οι τιμές των παραμέτρων: **a, b, c, d, e, f and g** επιλύονται με παλινδρόμηση (regression)

Η **πιθανότητα εμφάνισης κατολίσθησης P(t)** μπορεί να υπολογιστεί με την παρακάτω εξίσωση:

$$P(t) = 1 / (1 + \exp(-t))$$

Common borders. Common solutions.

**Σενάριο:**

Ο σεισμός Mw 6.4 της 17<sup>ης</sup> Νοεμβρίου

2015 στη Λευκάδα

Βασισμένο στο αναθεωρημένο στατιστικό μοντέλο από *Jessee et al. (2018)*:

- Κορυφαία Εδαφική Ταχύτητα (PGV)
- CTI (εδαφική υγρασία)
- Λιθολογία
- Κάλυψη Γης
- Μορφολογική κλίση (DEM)



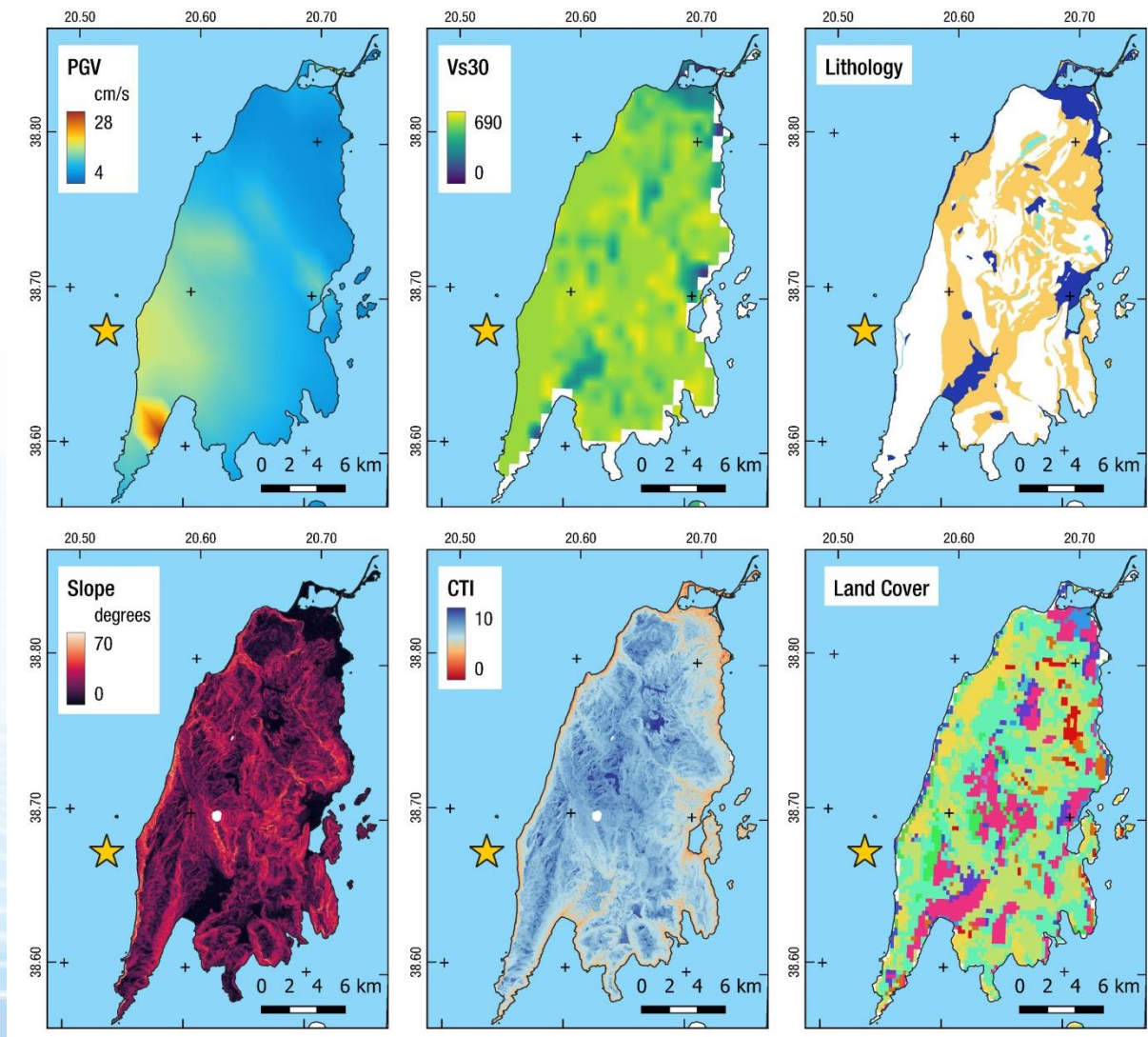
Papathanassiou et al. 2017

Common borders. Common solutions.

Σενάριο: Λευκάδα 2015

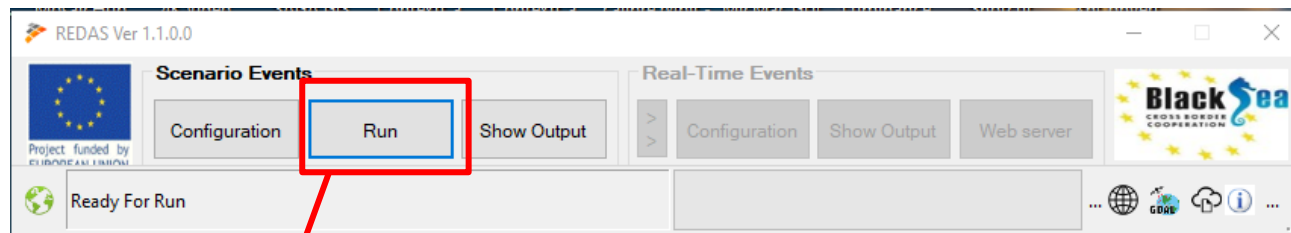
Επίπεδα πληροφορίας για το στατιστικό μοντέλο κατολισθήσεων (Jessee et al. 2018)

- Κορυφαία Εδαφική Ταχύτητα (PGV)
- Vs30
- CTI (εδαφική υγρασία)
- Λιθολογία
- Κάλυψη Γης
- Μορφολογική κλίση (DEM)



Common borders. Common solutions.

Σενάριο: Λευκάδα  
2015



**Run Event:**

C:\REDAS\EarthquakeData\20151117071007\_Lefkas.xml

id	20151117071007
netid	EU
network	
lat	38.67
lon	20.53
mag	6.4
depth	5
mech	Unkown
year	2015
month	11
day	17
hour	7
minute	10
second	7
time	2001-01-01T01:01:01Z
timezone	GMT
locstring	GREECE
created	1896384767
Fault_Name	FaultName
Fault_Strike	-1
Fault_Dip	90

Refresh Map

Cancel Start

Common borders. Common solutions.

## Στατιστικό μοντέλο πιθανότητας κατολισθήσεων (Jessee et al. 2018)

Προτεινόμενοι επιπρόσθετοι περιορισμοί και όρια:

- Μορφολογική κλίση > 5 degrees

Χωρική ανάλυση:

- Η υψηλή ανάλυση (e.g. 0.00025 deg) προσφέρει καλύτερη χωρική ανάλυση και εκμεταλλεύεται τα διαθέσιμα Ψηφιακά Υψομετρικά Μοντέλα υψηλής ανάλυσης

Common borders. Common solutions.



Στατιστικό μοντέλο πιθανότητας κατολισθήσεων (Jessee et al. 2018)

REDAS Ver 1.1.0.0 - Scenario Output

20151117071007

- 20151117071007\_1
- 20151117071007\_2
- 20151117071007\_3
- 20151117071007\_4
- 20151117071007\_5
- 20151117071007\_6
  - 20151117071007\_FaultEpi\_shp
  - 20151117071007\_FaultLine\_shp
  - 20151117071007\_Hazard\_Gnd\_shp
  - 20151117071007\_InitiScopeLandslide.shp
  - 20151117071007\_StatisticsLandslide.shp
  - 20151117071007\_EventInfo.xml
  - 20151117071007\_EventInput.xml

P(x)

Map Plot      Table Data

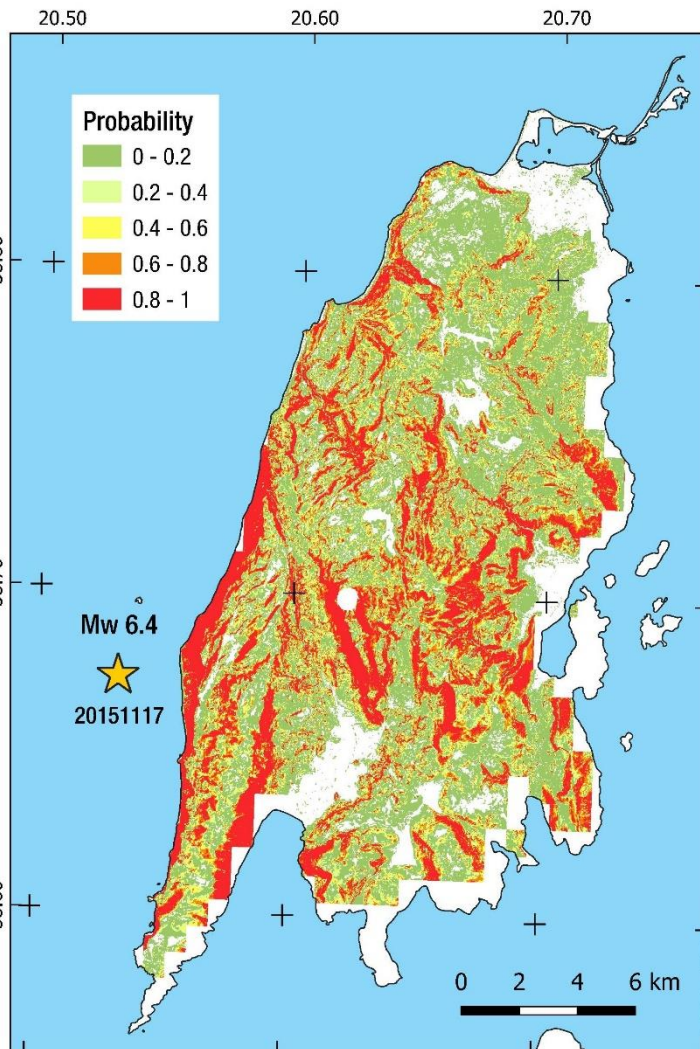
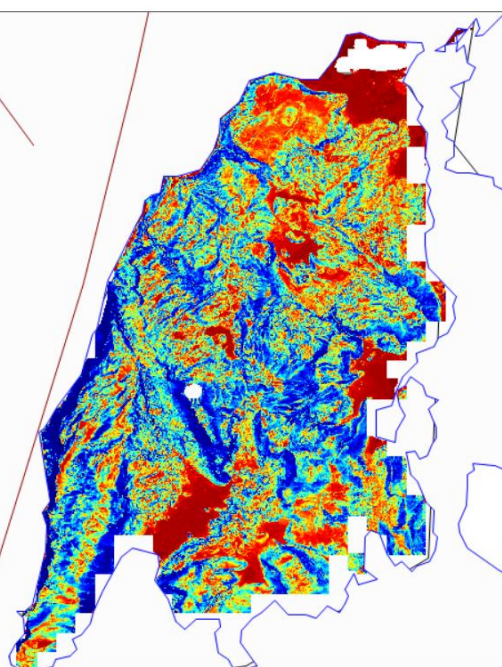
JET

World Map       Fault Map

20.4487      38.7829

Shape File Data Plotting is Finished [453017]

$P(t)$

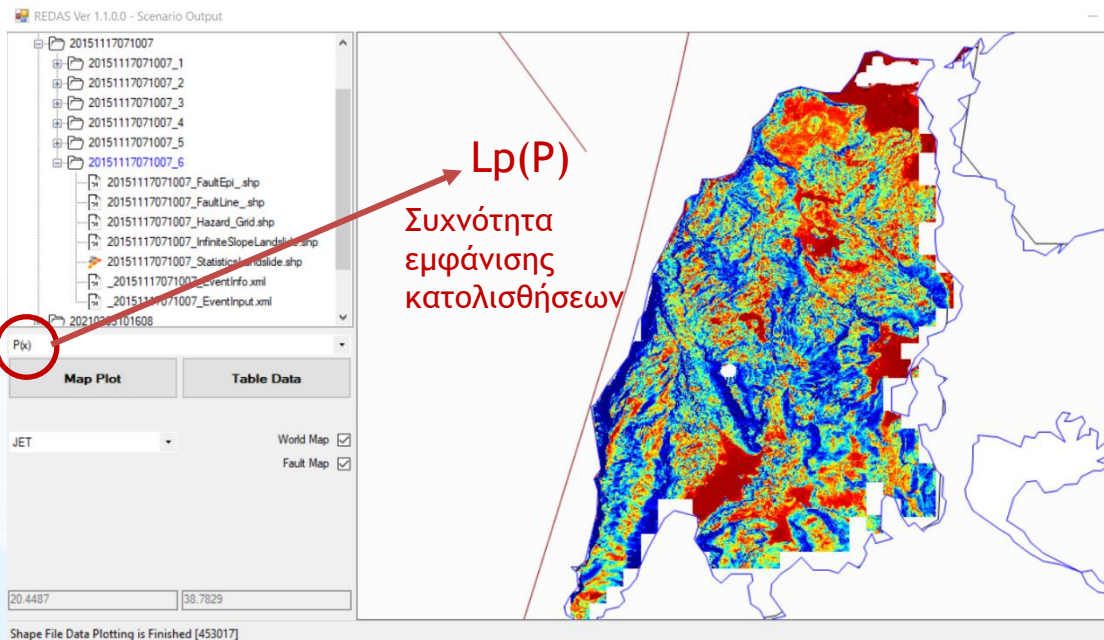


Αποτελέσματα REDAS

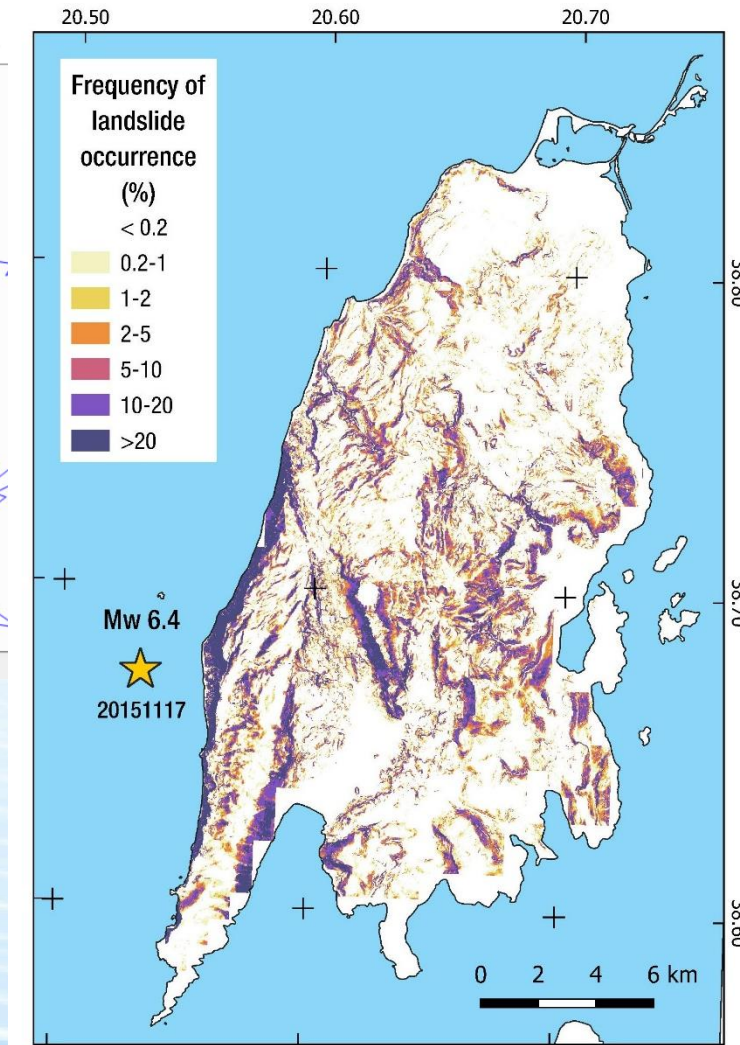
QGIS

Common borders. Common solutions.

Στατιστικό μοντέλο πιθανότητας κατολισθήσεων (Jessee et al. 2018)



$L_p(P)$   
Συχνότητα εμφάνισης κατολισθήσεων



Αποτελέσματα REDAS

QGIS

Common borders. Common solutions.

Αποτελέσματα στατιστικού μοντέλου κατολισθήσεων

$$P(t) = 1 / (1 + \exp(-t))$$

$$L_p(P) = e^{(a + b \times P + c \times P^2 + d \times P^3)},$$

$$a = -7.592$$

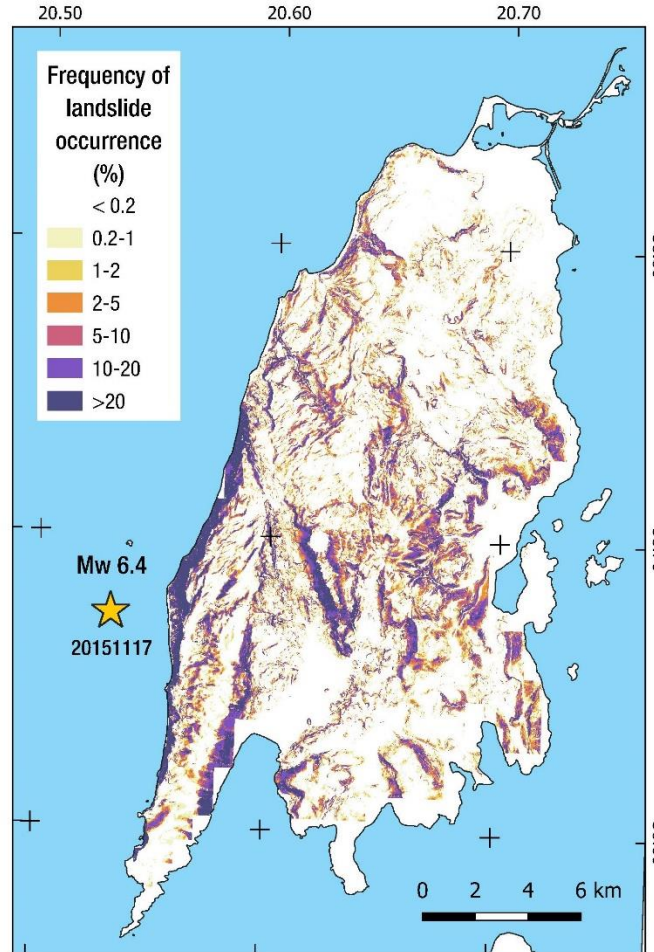
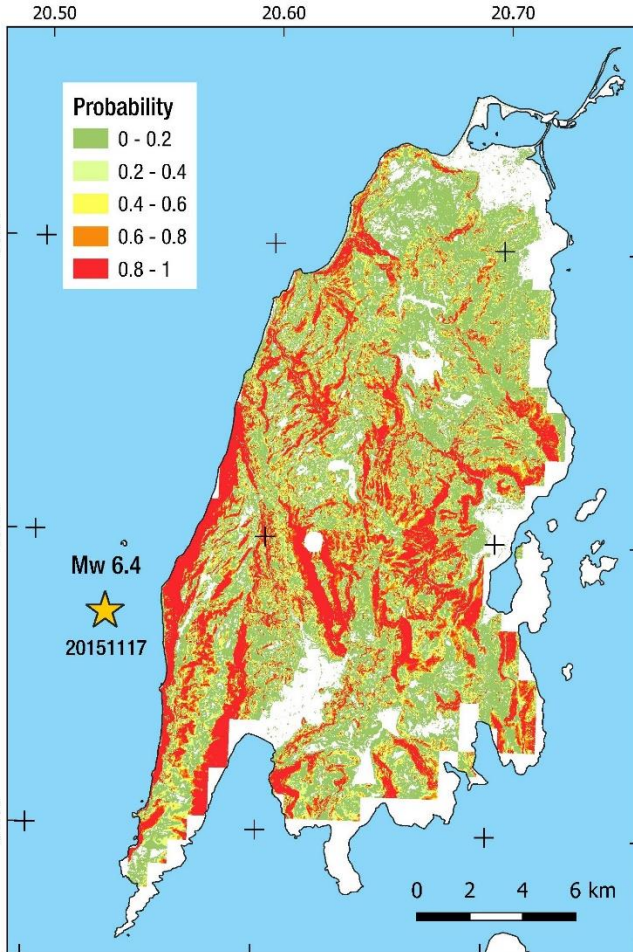
$$b = 5.237$$

$$c = -3.042$$

$$d = 4.035$$

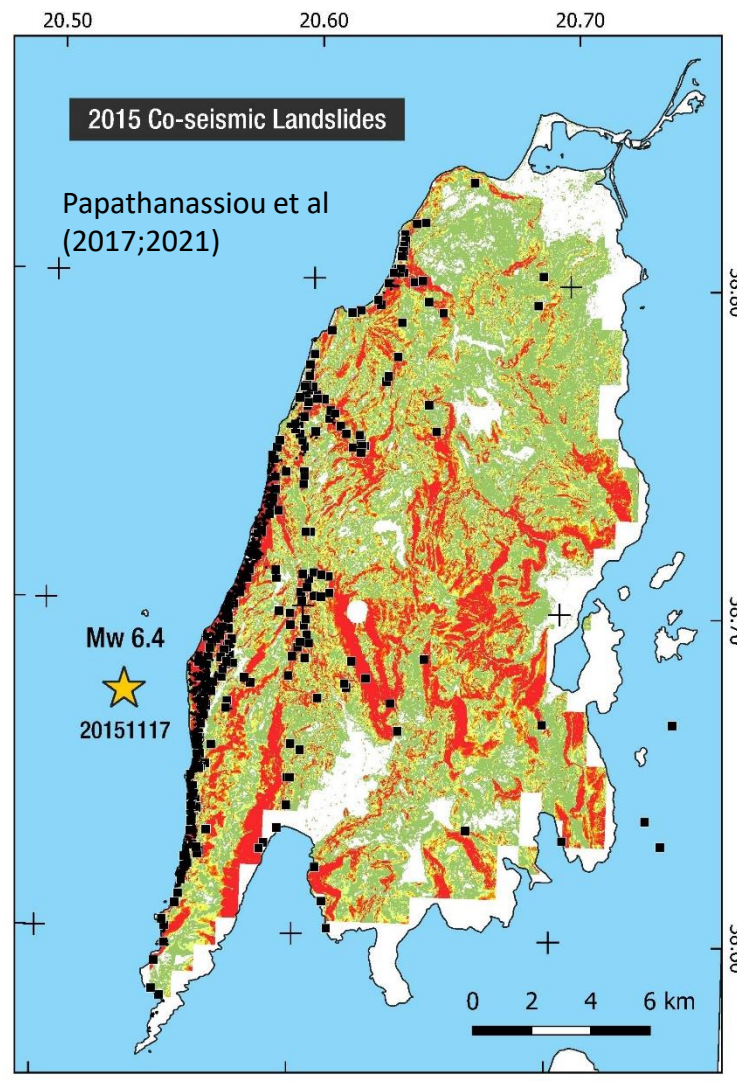
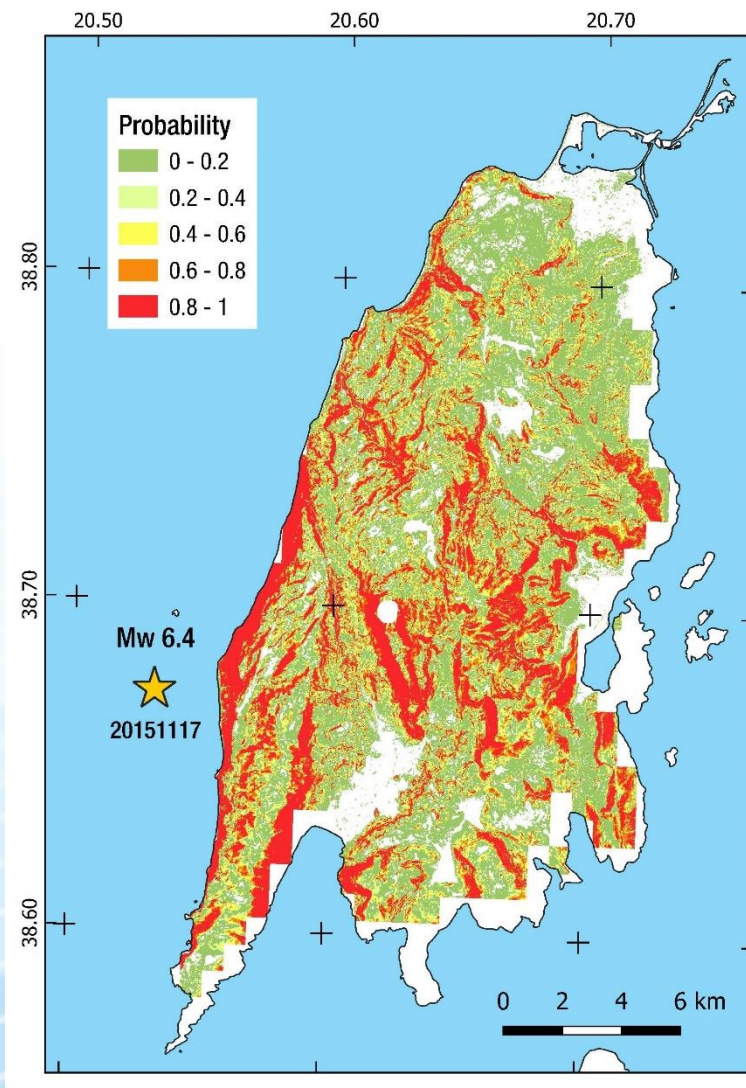
Η εξίσωση διορθώνει την προβλεπόμενη πιθανότητα.

Αντιπροσωπεύει τη συχνότητα εμφάνισης της κατολίσθησης δηλ. το τμήμα κάθε κελιού στο οποίο αναμένεται κατολίσθησης (κάλυψη περιοχής).



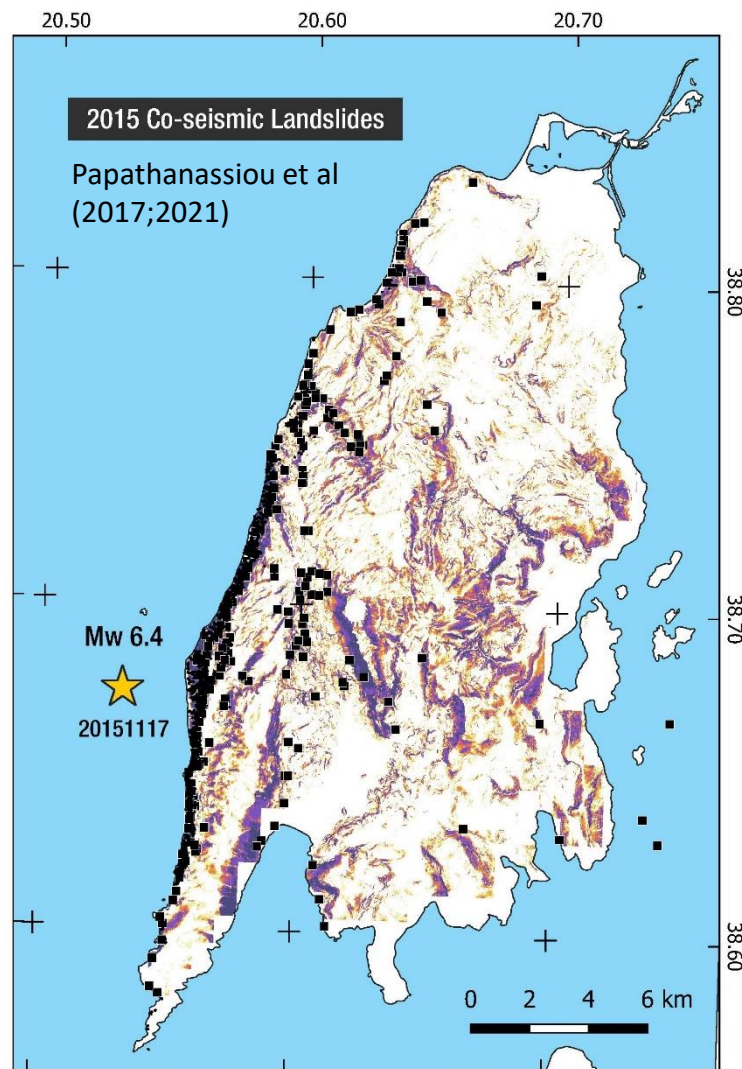
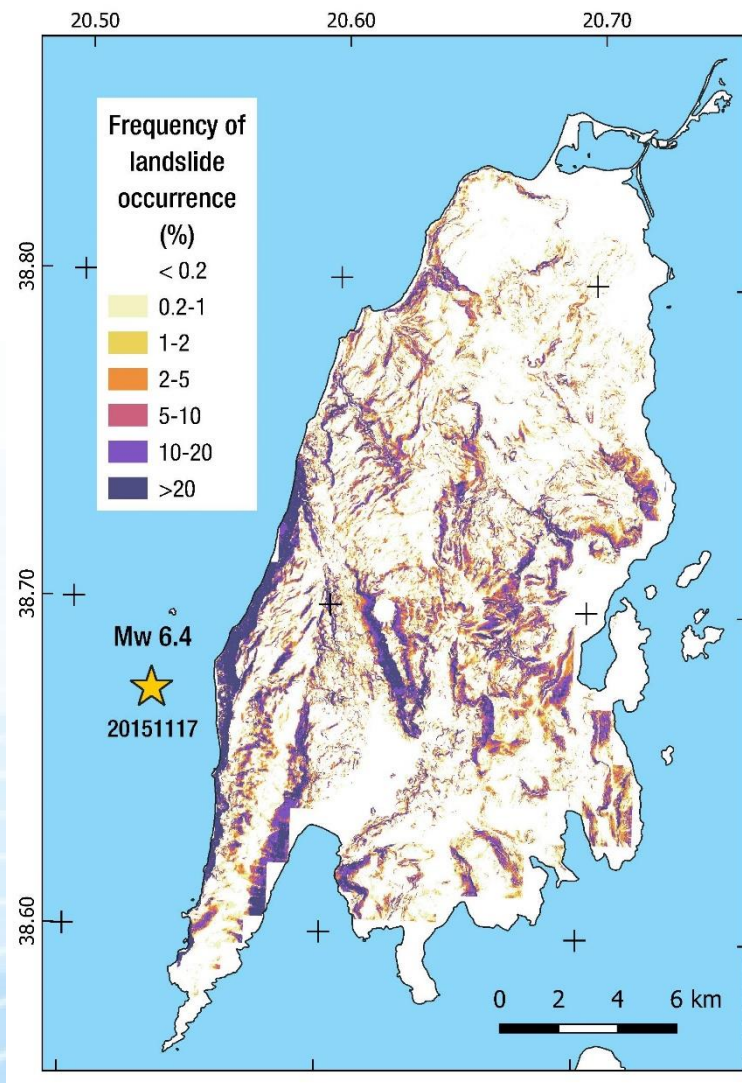
Common borders. Common solutions.

Αποτελέσματα στατιστικού μοντέλου κατολισθήσεων - Καταγραμμένες κατολισθήσεις



Common borders. Common solutions.

Αποτελέσματα στατιστικού μοντέλου κατολισθήσεων - Καταγραμμένες κατολισθήσεις



Common borders. Common solutions.

Οι μέθοδοι φυσικής βάσης για την εκτίμηση του κατολισθητικού κινδύνου βασίζονται στην προσομοίωση της διαδικασίας αστοχίας του πρανούς και το αποτέλεσμα είναι οι τιμές  $F_s$ .

Η χρήση του **μοντέλου απειρομήκους πρανούς** είναι κατάλληλη για **ρηχές κατολισθήσεις που οφείλονται σε σεισμό**. Η εξίσωση είναι:

$$F = \frac{c' + (z\gamma\cos^2\beta - z\rho\alpha\cos\beta\sin\beta - \gamma_w z_w\cos^2\beta)\tan\phi'}{z\gamma\sin\beta\cos\beta + z\rho\alpha\cos^2\beta}$$

$\phi'$ : ενεργός γωνία τριβής γεωυλικού ( $^\circ$ )

$c'$ : ενεργός συνοχή γεωυλικού (kPa),

$\beta$ : γωνία πρανούς (Deg),

$\rho$ : πυκνότητα ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

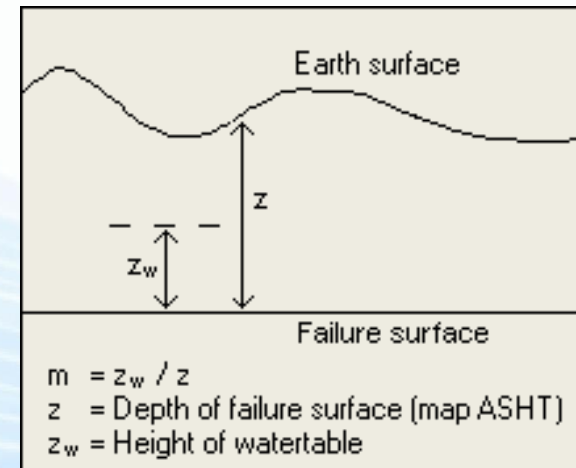
$\gamma$ : ειδικό βάρος ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ),

$\gamma_w$ : ειδικό βάρος νερού ( $\text{kN}/\text{m}^3$ ),

**$a$ : σεισμική επιτάχυνση ( $\text{m}/\text{s}^2$ )**

**$z$ : πάχος της πλάκας αστοχίας (m)**

**$m = z_w/z$  % κορεσμού σε νερό της πλάκας αστοχίας**

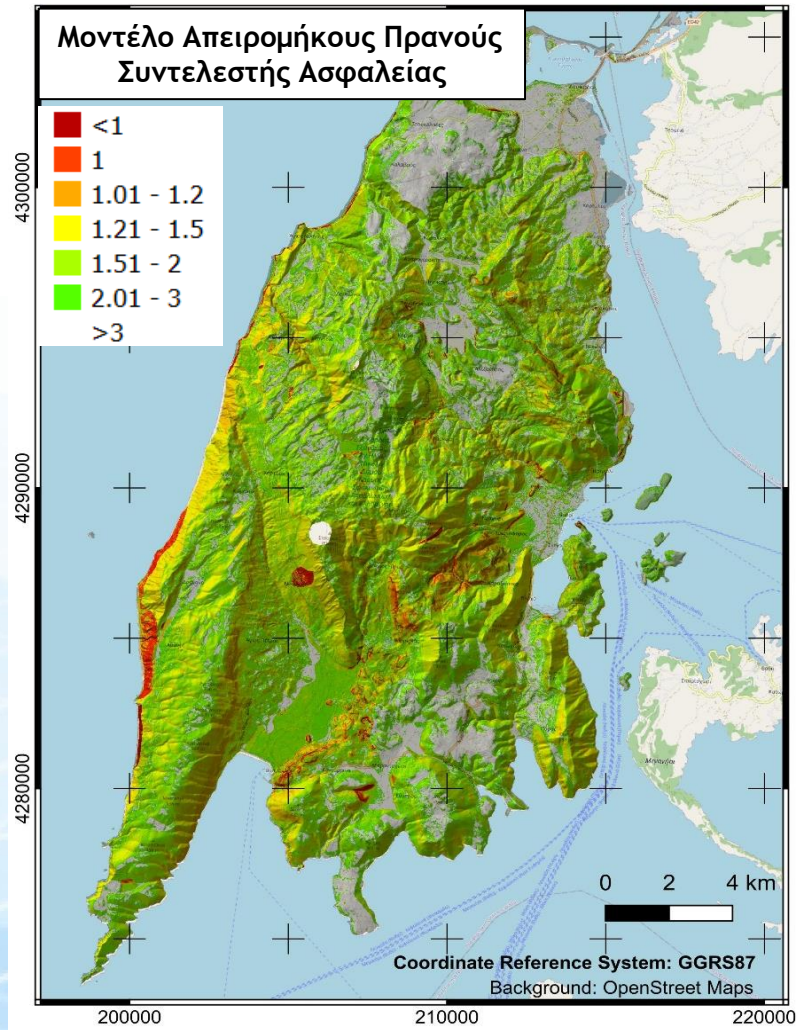


Common borders. Common solutions.

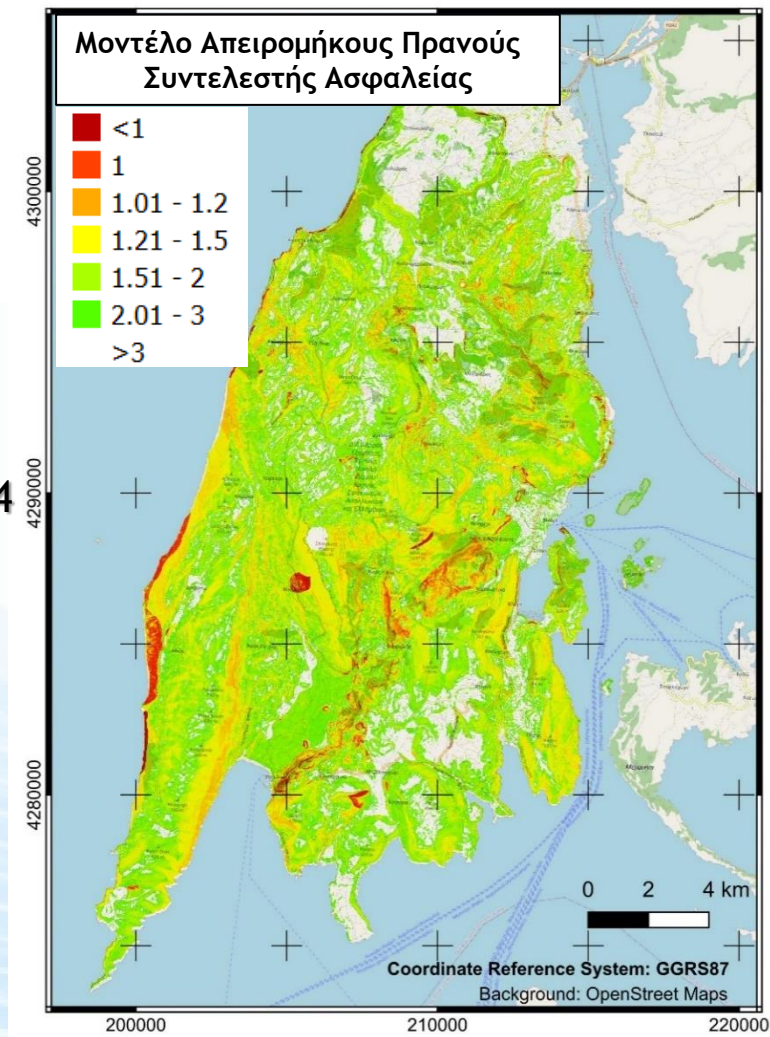
Υγρές συνθήκες

Πάχος ολισθαίνουσας μάζας: 1m

Ξηρές Συνθήκες

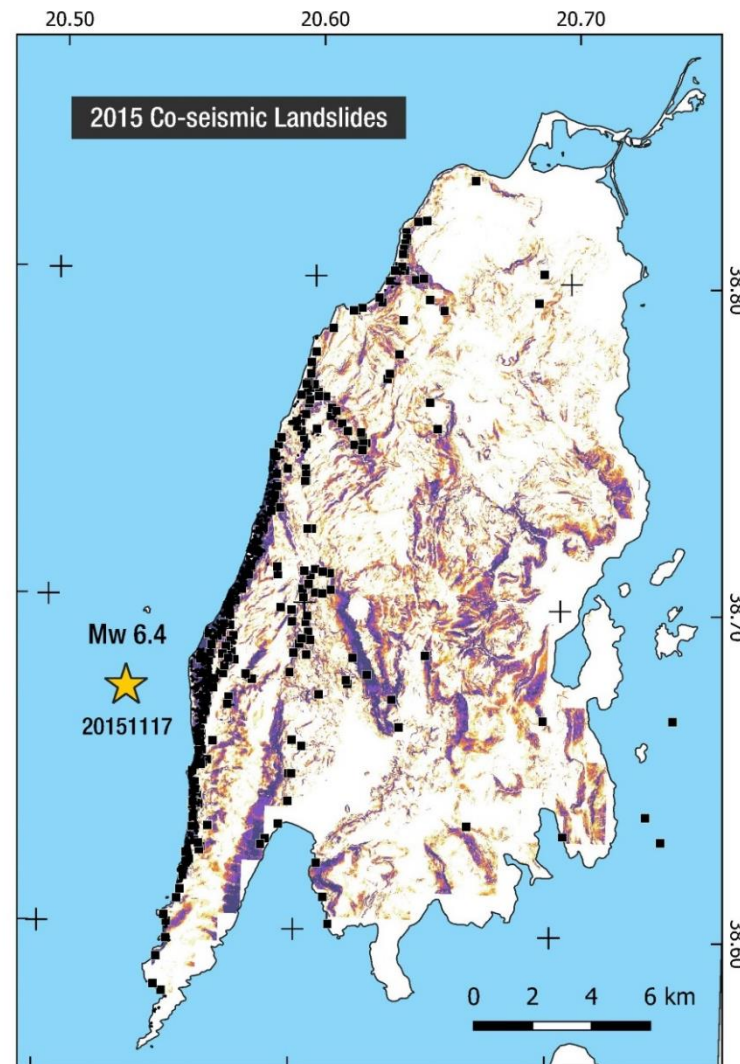
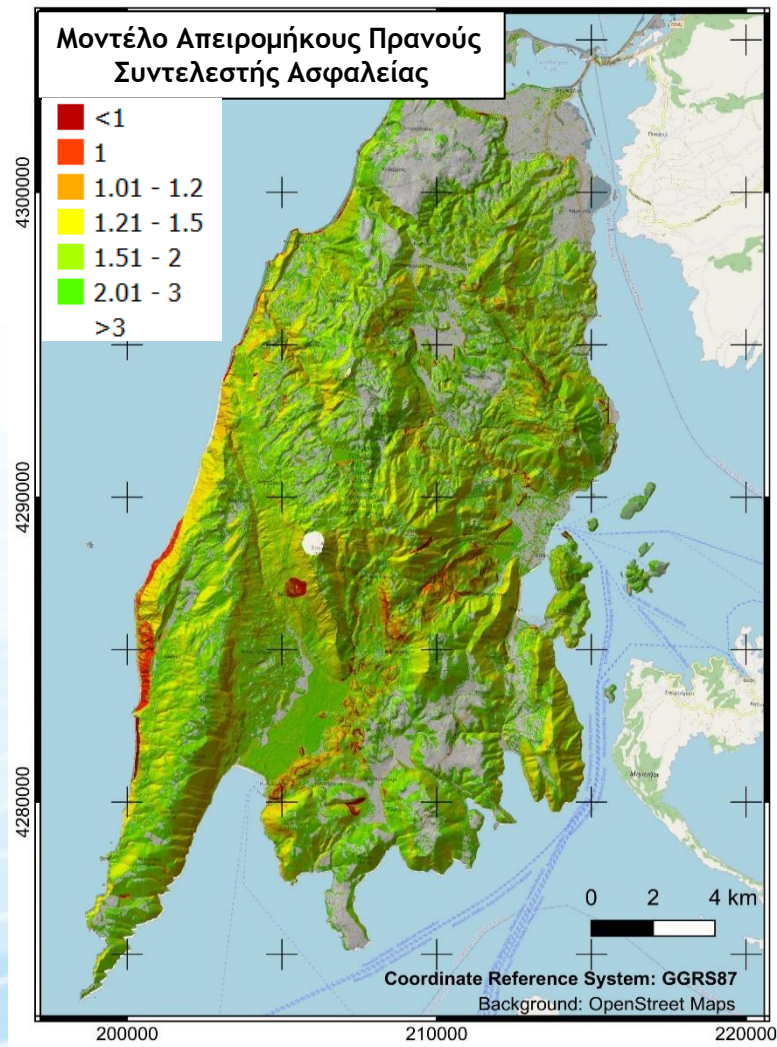


17-11-2015  
Λευκάδα  
(Ελλάδα) Mw 6.4



Common borders. Common solutions.

Υγρές συνθήκες Πάχος ολισθαίνουσας μάζας: 1m Στατιστικό μοντέλο και παρατηρημένες κατολισθήσεις

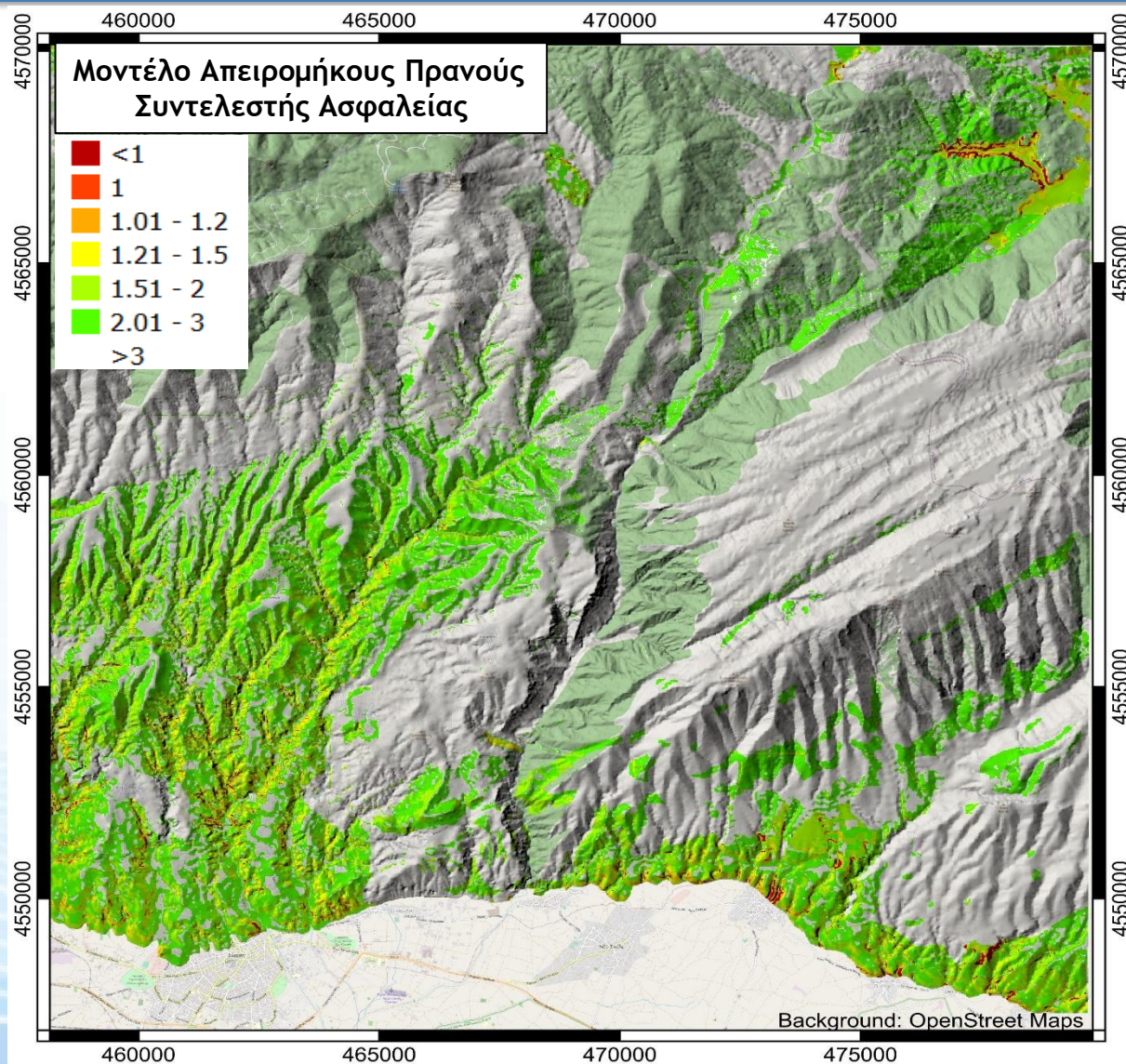


Common borders. Common solutions.



Εκτίμηση στην ορεινή περιοχή, βόρεια των Σερρών

Πάχος ολισθαίνουσας μάζας: μεταβλητό βάσει της μορφολογικής κλίσης και της λιθολογίας (0-2m)



Common borders. Common solutions.

## Πιθανότητα ρευστοποίησης βάσει της μεθοδολογίας των Zhu et al (2017)

### Πιθανότητα ρευστοποίησης

$$P(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

#### Παράκτια περιοχή (dc < 20km)

$$x = 12.345 + 0.301 \times \ln(PGV) - 2.615 \times \ln(V_{S30}) + 5.556 \times 10^{-4} \times Precip - 0.0287 \times \sqrt{dc} + 0.0666 \times dr - 0.0369 \times (\sqrt{dc} \times dr)$$

#### Μη παράκτια περιοχή (dc > 20km)

$$x = 8.801 + 0.334 \times \ln(PGV) - 1.918 \times \ln(V_{S30}) + 5.408 \times 10^{-4} \times Precip - 0.2054 \times dw - 0.0333 \times wtd$$

Όπου:

PGV (cm/s): Κορυφαία εδαφική ταχύτητα

VS<sub>30</sub> (m/s): Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων σε βάθος 30m

Precip (mm): Βροχόπτωση (μέση ετήσια)

dc (km): Απόσταση από την κοντινότερη ακτή

dr (km): Απόσταση από τον κοντινότερο ποταμό

dw (km): Απόσταση από το κοντινότερο υδατικό σύστημα

wtd (m): Βάθος υδάτινου ορίζοντα

### Χωρική κάλυψη ρευστοποίησης

$$L(P) = \frac{a}{(1 + be^{-cP})^2}$$

Όπου

Παράμετροι	Παράκτια	Μη Παράκτια
a	42,08	49,15
b	62,59	42,4
c	11,43	9,165

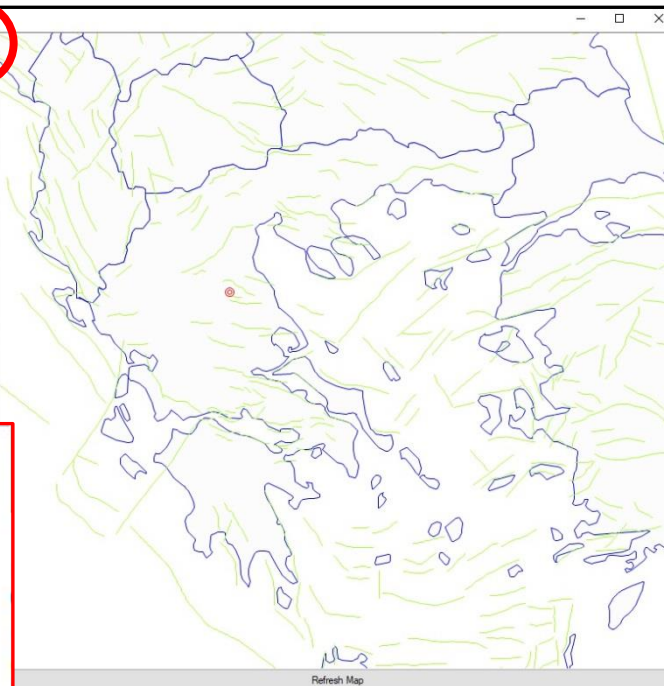
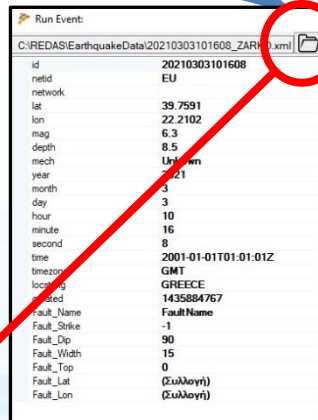
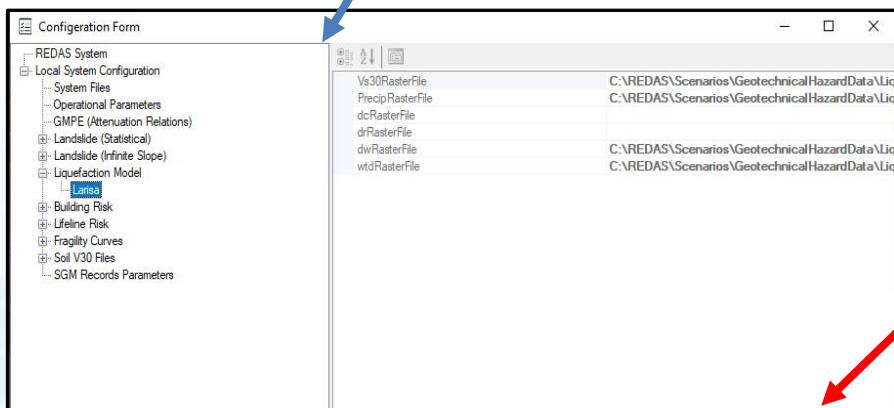
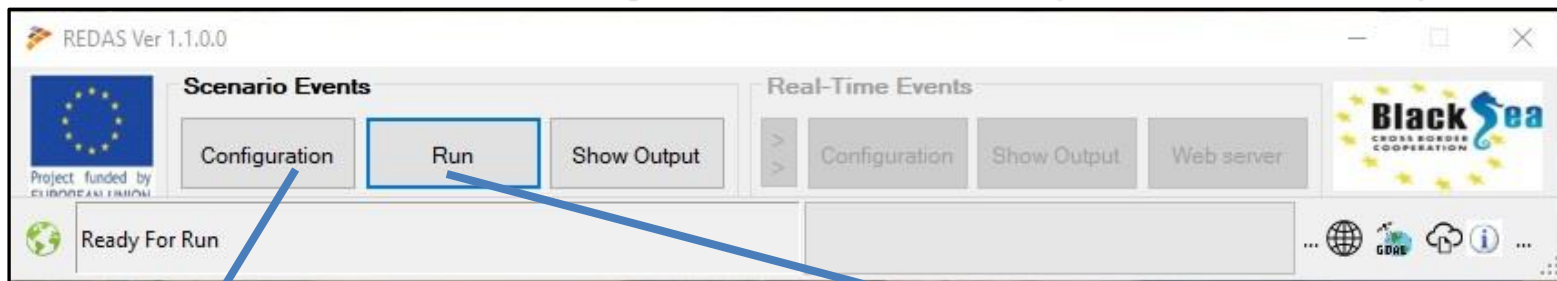
$$PGV_{used} = PGV_{(shake\ map)} \times SF$$

$$SF = \frac{1}{1 + \exp(-2|M - 6|)}$$

για M (μέγεθος σεισμού) χρησιμοποιείται το Mw

Common borders. Common solutions.

# REDAS - Μ6.3 Λάρισσα, Ελλάδα (03/03/2021)



```
<earthquake id="20210303101608" lat="39.75910" lon="22.21020"
mag="6.3" year="2021" month="03" day="03" hour="10"
minute="16" second="08" timezone="GMT" depth="8.5" network=""
locstring="GREECE" created="1435884767" />
```

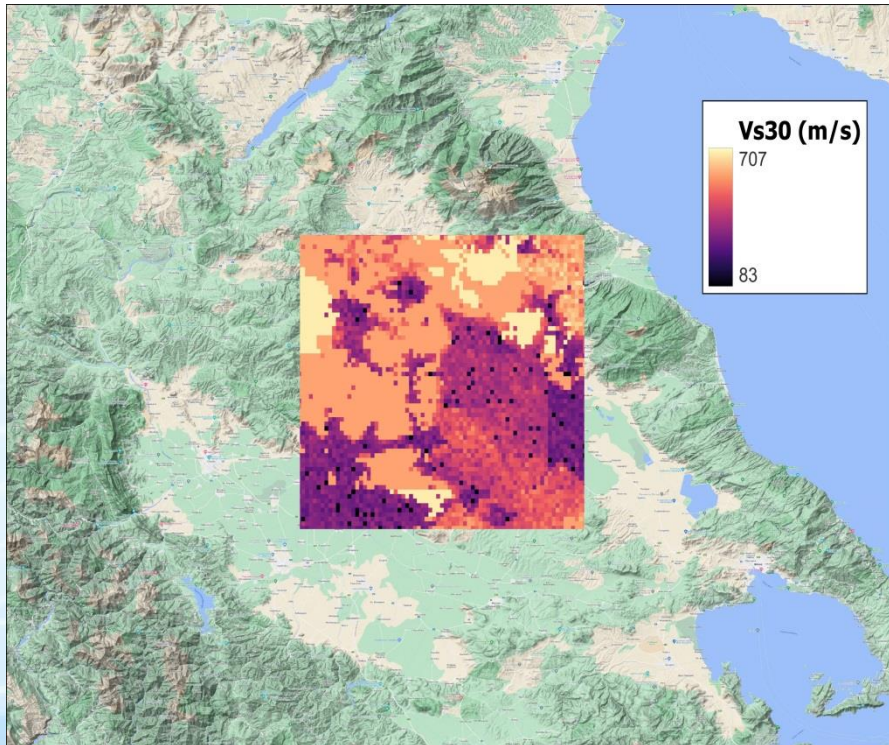
**από Shake Map**

Common borders. Common solutions.

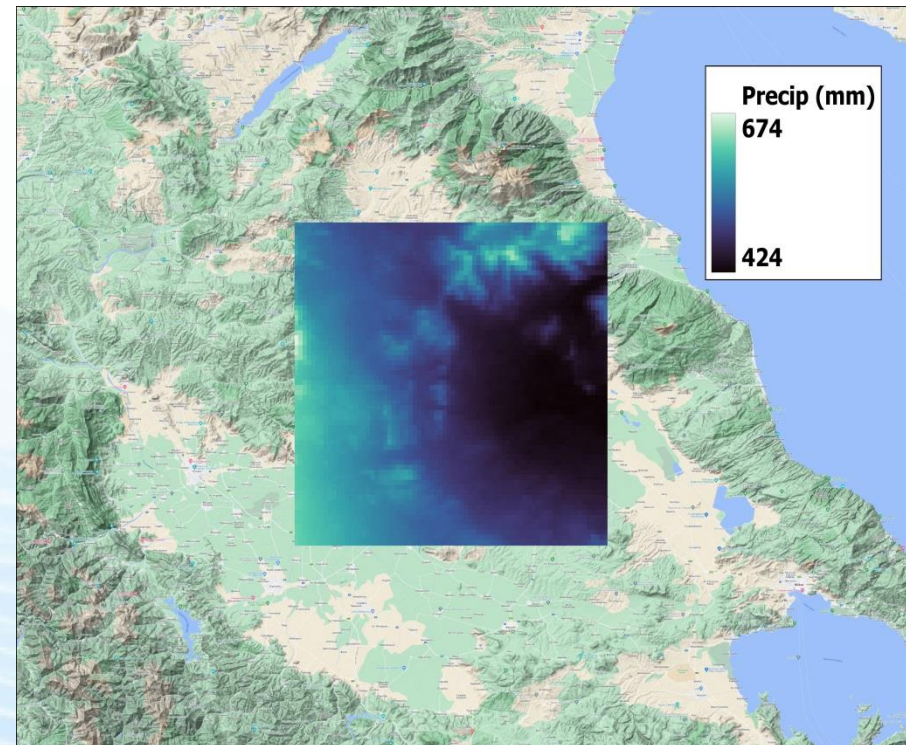
# REDAS - Μ6.3 Λάρισα, Ελλάδα (03/03/2021)

## Δεδομένα Εισαγωγής

$V_{s30}$  (m/s)



Βροχόπτωση (mm)



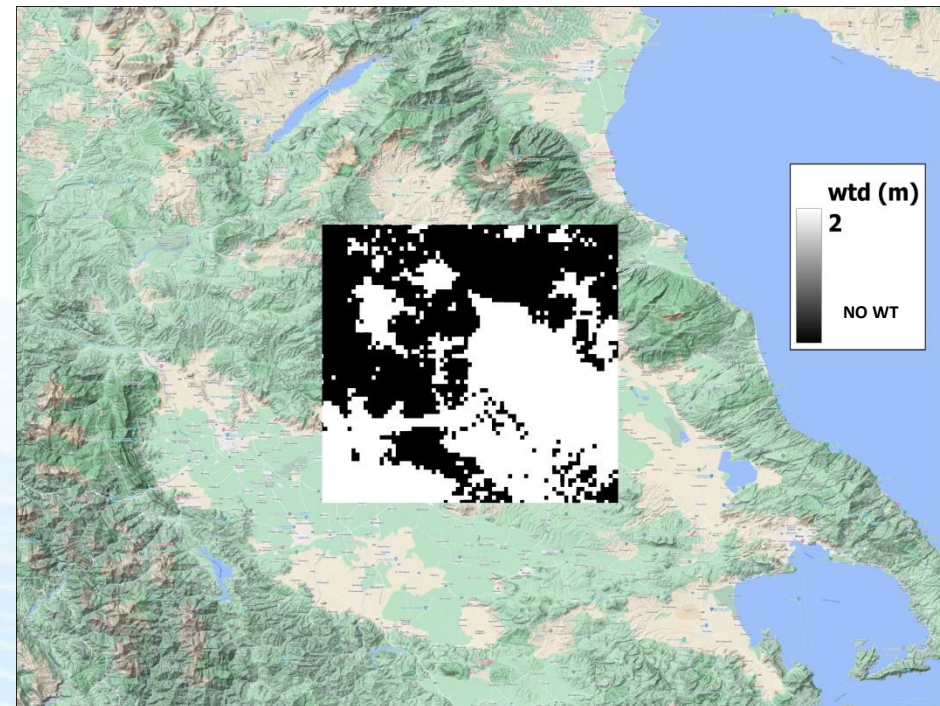
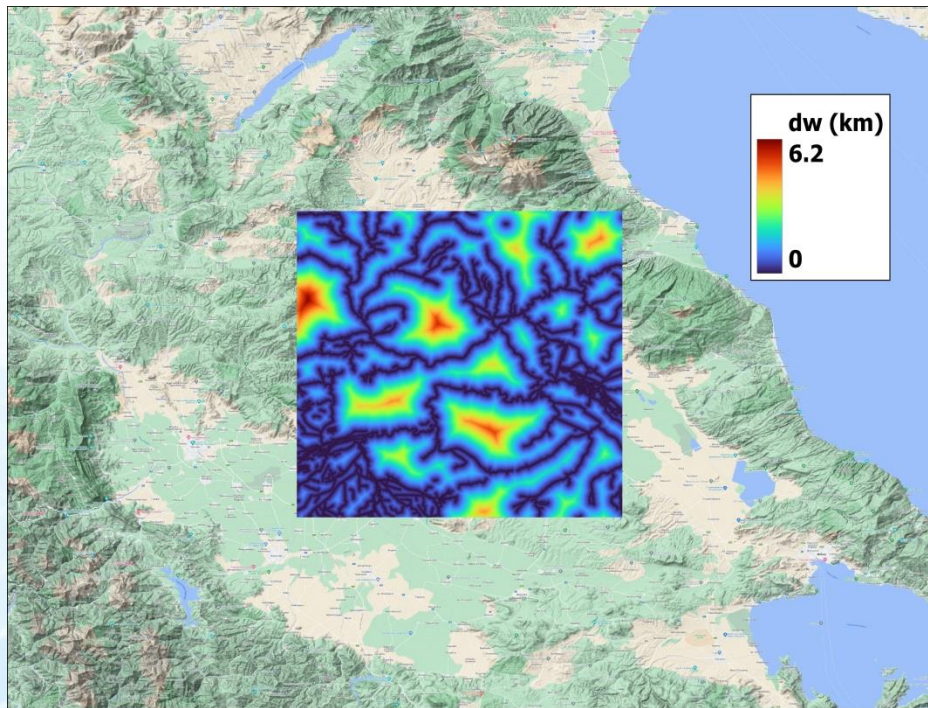
Common borders. Common solutions.

## REDAS - Μ6.3 Λάρισα, Ελλάδα (03/03/2021)

Δεδομένα Εισαγωγής

Dw (km)

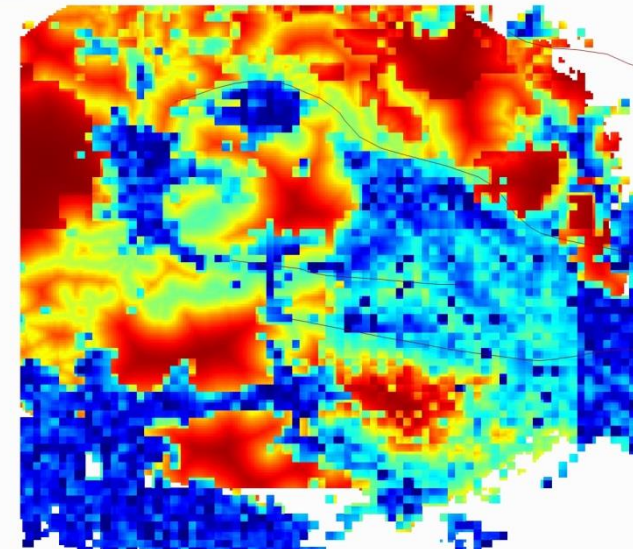
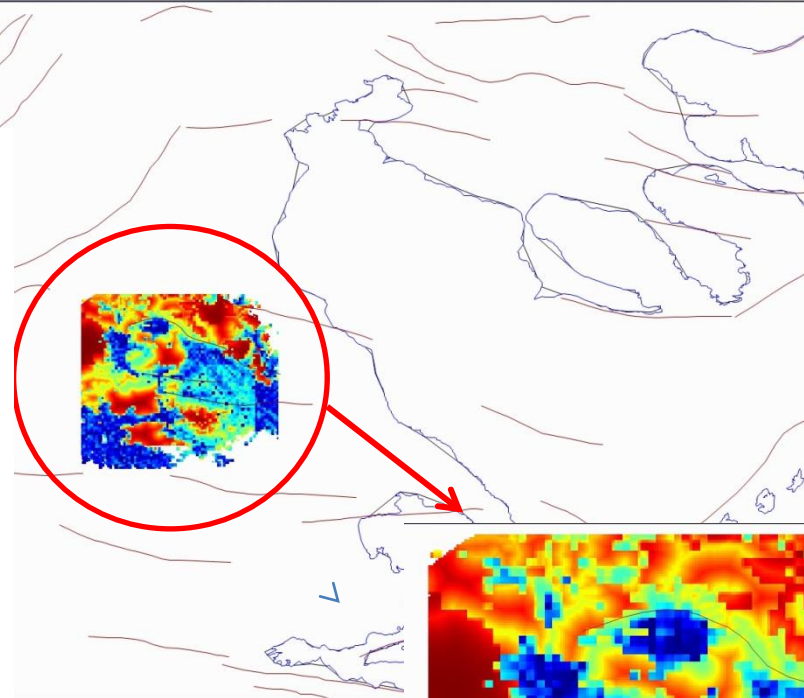
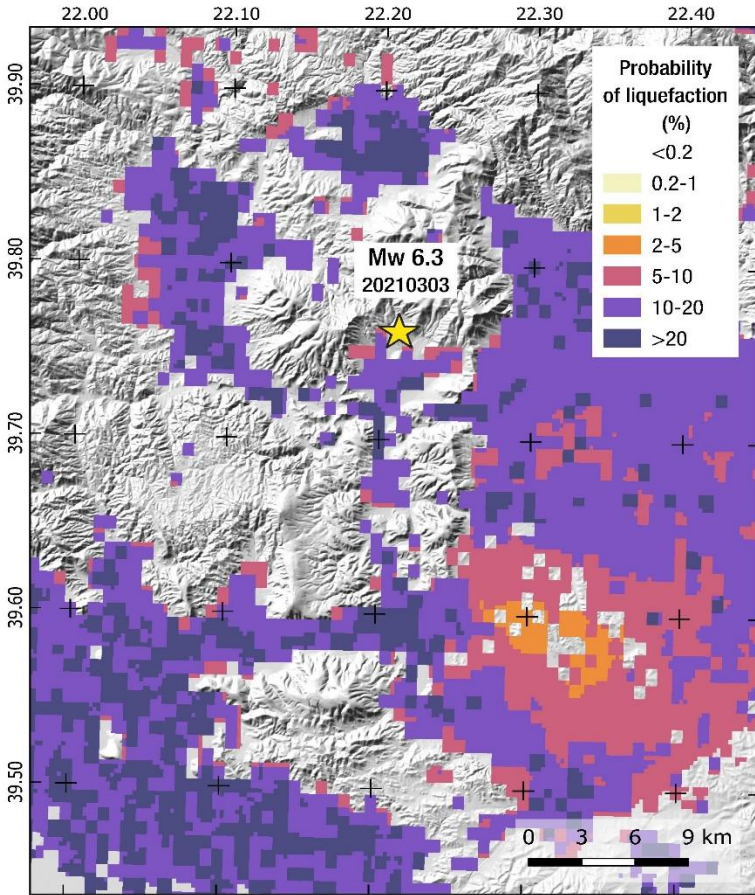
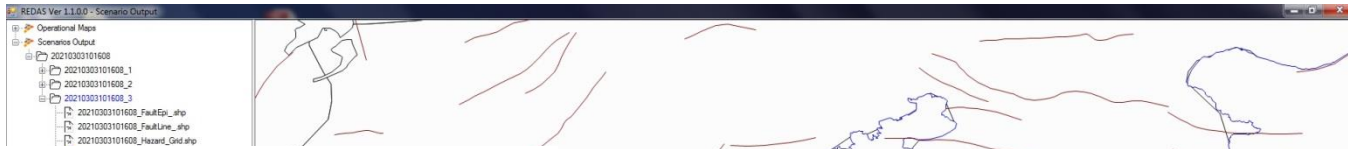
Wtd (m)



Common borders. Common solutions.

## Πιθανότητα Ρευστοποίησης - $P(x)$

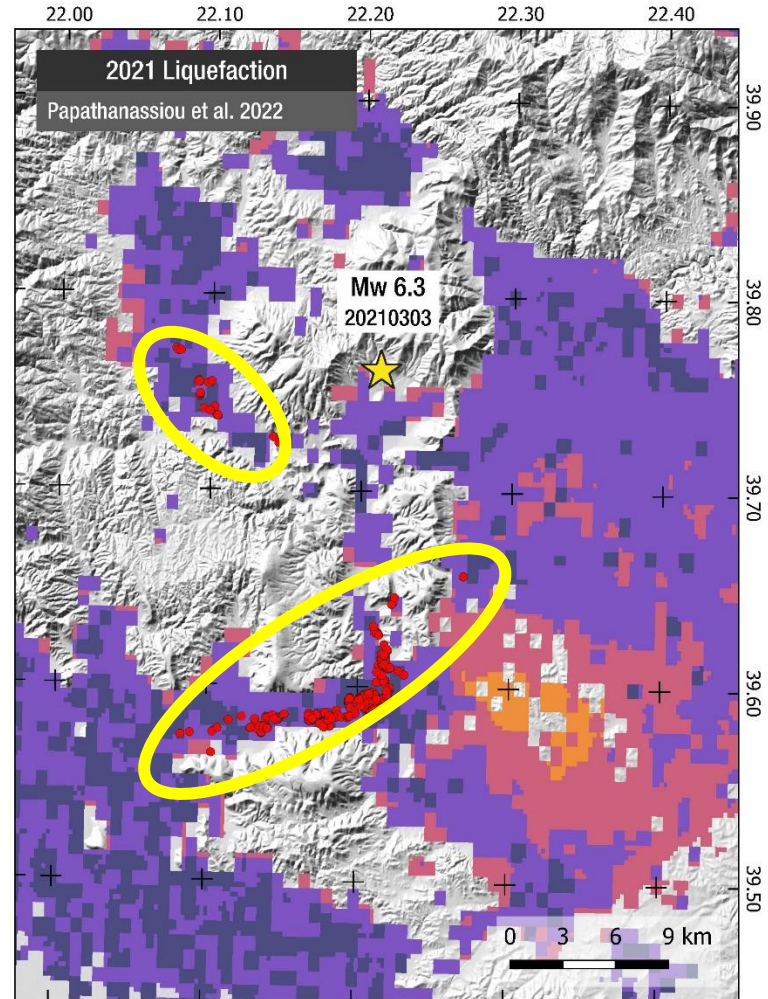
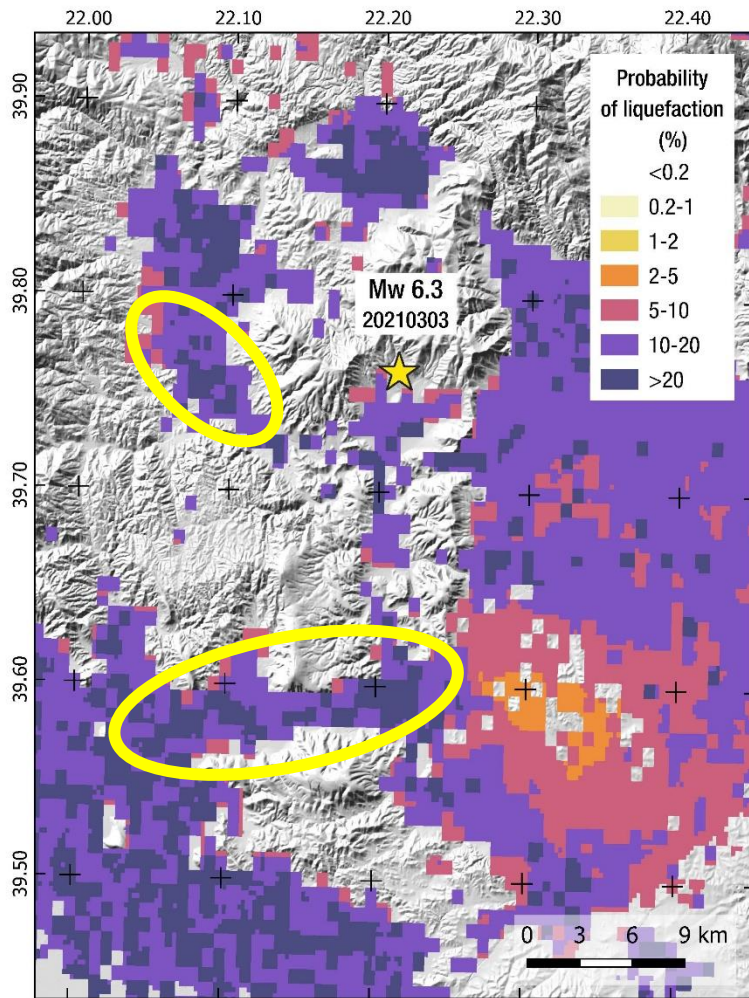
REDAS - M6.3 Λάρισα, Ελλάδα (03/03/2021)



Common borders. Common solutions.

Πιθανότητα Ρευστοποίησης- P(x)

REDAS - M6.3 Λάρισα, Ελλάδα (03/03/2021)



Common borders. Common solutions.



Project funded by  
EUROPEAN UNION



# ***REDACT***

Rapid Earthquake Damage Assessment ConsorTium



# Σας ευχαριστώ

<https://www.redact-project.eu/>

Ιούνιος 2023

Common borders. Common solutions.