



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΛΜΕΠΑ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Τ.Ε.



Πανεπιστημιακό Ερευνητικό Κέντρο  
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

*Επαγόμενη σεισμικότητα οφειλόμενη στην εξόρυξη υδρογονανθράκων:  
Στατιστική προσέγγιση στην περίπτωση της Οκλαχόμα (ΗΠΑ)*



**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Καλαϊτζής Κωνσταντίνος*

**Χανιά, Μάρτιος 2022**



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΛΜΕΠΑ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Τ.Ε.



*Επαγόμενη σεισμικότητα οφειλόμενη στην εξόρυξη υδρογονανθράκων:  
Στατιστική προσέγγιση στην περίπτωση της Οκλαχόμα (ΗΠΑ).*

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Καλαϊτζής Κωνσταντίνος*

**Επιβλέπων :** *Δρ. Βασίλειος Σάλτας*  
*Αναπληρωτής Καθηγητής*

**Επιτροπή Αξιολόγησης :** Βασίλειος Σάλτας, Αναπλ. Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ  
Ιωάννης Μακρής, Καθηγητής ΕΛΜΕΠΑ  
Φίλιππος Βαλλιανάτος, Καθηγητής ΕΚΠΑ

**Ημερομηνία Παρουσίασης :**

**Αύξων Αριθμός Πτυχιακής Εργασίας :**

## **Ευχαριστίες**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Φυσικής Εσωτερικού της Γης και Γεωκαταστροφών του ΠΕΚ ΕΛΜΕΠΑ, στα Χανιά κατά το χρονικό διάστημα Ιούνιος 2021 – Γενάρης 2022.

Ολοκληρώνοντας την πτυχιακή μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή καθηγητή Βασίλειο Σάλτα για την ανάθεση του πολύ ενδιαφέροντος θέματος, αλλά και για την σπουδαία καθοδήγηση του καθώς και την πολύτιμη βοήθεια και συνεργασία που είχαμε καθ' όλη την διάρκεια της πτυχιακής εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον Δρ. Δημήτρη Γιαννόπουλο, σεισμολόγο, για τις επισημάνσεις του σε θέματα επιστημονικής ορολογίας, αλλά και το Ινστιτούτο Φυσικής Εσωτερικού της Γης και Γεωκαταστροφών που με φιλοξένησε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την οικονομική και ψυχολογική βοήθεια για τα 5 χρόνια που φοίτησα στο ίδρυμα, όπως και τους φίλους και φίλες μου για την καθημερινή τους συμπαράσταση, την κατανόηση και την θετική τους σκέψη.

Μάρτιος 2022

Καλαϊτζής Κωνσταντίνος

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία περιλαμβάνει την βιβλιογραφική ανασκόπηση του φαινομένου της επαγόμενης σεισμικότητας που οφείλεται στις διαδικασίες εξόρυξης υδρογονανθράκων με την έκχυση ρευστών. Μέσα στην βιβλιογραφική μελέτη, συμπεριλαμβάνονται κάποιες βασικές έννοιες, όπως η επαγόμενη σεισμικότητα, η υδραυλική ρωγμάτωση και η διοχέτευση ρευστού υψηλής πίεσης, με σκοπό την κατανόηση του αντικειμένου και της μεθόδου. Γίνεται αναλυτική αναφορά στην περίπτωση της επαγόμενης σεισμικότητας λόγω χρήσης υδραυλικής ρωγμάτωσης στην πολιτεία της Οκλαχόμα των ΗΠΑ. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε ανάλυση με τη χρήση της μη-εκτατικής στατιστικής φυσικής (NESP) της καταγεγραμμένης σεισμικότητας που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια στον ευρύτερο χώρο της Οκλαχόμα (ΗΠΑ). Η παράμετρος  $q$  της συνάρτησης Tsallis φαίνεται ότι συσχετίζεται με την αυξομείωση της σεισμικότητας στο χρονικό διάστημα 2009-2021 που πραγματοποιήθηκε η ανάλυση.

## **Induced seismicity due to hydrocarbon extraction: A statistical approach in the case of Oklahoma (USA)**

### **Abstract**

The present work includes a literature review of the phenomenon of induced seismicity due to the processes of hydrocarbon extraction caused by the injection of fluids. In the literature study, some basic concepts are included, such as induced seismicity, hydraulic cracking and high pressure fluid flow, in order to understand the object and the related methods. There is a detailed report on the case of induced seismicity due to the use of hydraulic fracture in the state of Oklahoma, USA. In addition, a non-extensive statistical physics (NESP) analysis of the recorded seismicity observed in recent years in the Oklahoma area (USA) was performed. The parameter  $q$  of the Tsallis function seems to be related to the fluctuation of seismicity in the period 2009-2021 when the analysis was performed.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	4
Abstract.....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο .....</b>	<b>8</b>
Εισαγωγή.....	8
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο .....</b>	<b>10</b>
Επαγόμενη σεισμικότητα οφειλόμενη στην εξόρυξη υδρογονανθράκων με την έγχυση ρευστών (Υδραυλική ρηγμάτωση) .....	10
2.1 Επαγόμενη σεισμικότητα .....	10
2.1.1 Ορισμός επαγόμενης σεισμικότητας.....	10
2.1.2 Ποσοστά και οι τύποι ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που προκαλούν επαγόμενη σεισμικότητα.....	11
2.1.3 Επαγομένη σεισμικότητα σε διεθνές επίπεδο. ....	13
2.1.4 Επαγομένη σεισμικότητα στον Ελλαδικό χώρο .....	15
2.2 Υδραυλική ρηγμάτωση (Hydraulic fracturing) .....	18
2.2.1 Ορισμός Υδραυλικής ρωγμάτωσης .....	18
2.2.2 Διαδικασία υδραυλικής ρωγμάτωσης.....	19
2.2.3 Διάτρητο όπλο (Perforating gun).....	24
2.2.4 Απόρριψη λυμάτων ρευστού πίσω στο φλοιό της γης.....	26
2.3 Σύστημα φωτεινού σηματοδότη ως μέθοδος άμεσου μετριάσμου για την επαγόμενη σεισμικότητα. ....	28
2.3.1 Σύστημα φωτεινού σηματοδότη .....	28
2.3.2 Συστήματα φωτεινού σηματοδότη σε όλο το κόσμο .....	30
2.4 Πρόσφατες διεθνείς έρευνες επιστημόνων για την επαγομένη σεισμικότητα που οφείλεται στην εξόρυξη υδρογονανθράκων μέσω στην υδραυλικής ρηγμάτωσης. ....	31
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο .....</b>	<b>36</b>
Επαγόμενη σεισμικότητα οφειλόμενη στην υδραυλική ρηγμάτωση στην Οκλαχόμα των ΗΠΑ .....	36
3.1 Επαγόμενη σεισμικότητα στην Οκλαχόμα των ΗΠΑ .....	36

3.1.1 Κοινωνικά χαρακτηριστικά της πολιτεία Οκλαχόμα και η ενεργειακή της κατάσταση.....	36
3.1.2 Υδραυλική ρηγμάτωση στην Οκλαχόμα .....	37
3.2 Επιπτώσεις στην κοινωνία της Οκλαχόμα.....	43
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> .....</b>	<b>47</b>
Ανάλυση με τη χρήση της μη-εκτατικής στατιστικής φυσικής της καταγεγραμμένης σεισμικότητας που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια στον ευρύτερο χώρο της Οκλαχόμα (ΗΠΑ).....	47
4.1 Βασικές αρχές της Εντροπίας του Τσάλλη: Μια Στατιστική Μηχανική Προσέγγιση Εργαστηριακής Σεισμολογίας.....	47
4.2 Ανάλυση της σεισμικότητας με τη χρήση της NESP .....	52
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>60</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>61</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## Εισαγωγή

Οι σεισμοί που αποδίδονται σε ανθρώπινες δραστηριότητες ονομάζονται επαγόμενοι σεισμοί. Τα τελευταία χρόνια, τα επαγόμενα σεισμικά γεγονότα που σχετίζονται με έργα ενεργειακής ανάπτυξης έχουν τραβήξει την προσοχή της επιστημονικής κοινότητας. Αν και ένα πολύ μικρό ποσοστό των δραστηριοτήτων έγχυσης ρευστών και εξόρυξης υδρογονανθράκων σε εκατοντάδες χιλιάδες τοποθεσίες ενεργειακής ανάπτυξης, έχουν προκαλέσει σεισμικότητα, σε κάποιες περιπτώσεις οι δονήσεις είναι αρκετά αισθητές. Το τελευταίο έχει παρατηρηθεί σε περιπτώσεις δραστηριοτήτων έγχυσης ρευστών, σχετιζόμενων με την παραγωγή σχιστολιθικού αερίου, αλλά και σε άλλες περιπτώσεις με την παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας. Το πεδίο εφαρμογής του φαινομένου της επαγόμενης σεισμικότητας, έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου σε συμβατικούς πόρους, καθώς και την ταυτόχρονη δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (CCS).

Η επαγόμενη σεισμικότητα που εξετάζουμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία σχετίζεται με την υδραυλική ρωγμάτωση (hydraulic fracturing ή fracking) που παρουσιάζεται με την έγχυση ή άντληση ρευστού στην παραγωγή σχιστολιθικού αερίου. Προκαλείται στις περισσότερες περιπτώσεις από αλλαγή της πίεσης των πόρων ή αλλαγή του πεδίου των τάσεων στο υπέδαφος δημιουργώντας έτσι ρήγματα. Ο παράγοντας που φαίνεται να έχει την πιο άμεση συνέπεια όσον αφορά την επαγόμενη σεισμικότητα είναι η ισορροπία του ρευστού (συνολική ισορροπία ρευστού που εισάγεται ή αφαιρείται από το υπέδαφος), αν και πρόσθετοι παράγοντες μπορεί να επηρεάσουν τον τρόπο με τον οποίο τα ρευστά επηρεάζουν το υπέδαφος.

Τα έργα ενεργειακής τεχνολογίας που έχουν σχεδιαστεί για να διατηρούν μια ισορροπία μεταξύ της ποσότητας ρευστού που εγχέεται και αποσύρεται, όπως τα περισσότερα έργα ανάπτυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, φαίνεται να παράγουν λιγότερα σεισμικά γεγονότα από έργα που δεν διατηρούν αυτή την ισορροπία. Η υδραυλική ρωγμάτωση σε γεώτρηση για την παραγωγή σχιστολιθικού αερίου η οποία περιλαμβάνει έγχυση ρευστών υπό υψηλή πίεση ώστε να δημιουργηθούν ρήγματα στο σχιστολιθικό πέτρωμα και έτσι να απελευθερώσει το αέριο στην γεώτρηση, έχει



επιβεβαιωθεί ως η αιτία για μικρά αισθητά σεισμικά γεγονότα σε διάφορες τοποθεσίες παραγωγής ανά τον κόσμο.

Πριν από την έγχυση ρευστού, το ρήγμα κλείνει υπό την πίεση της κανονικής τάσης και στις δύο πλευρές. Με τη συνεχή έγχυση ρευστού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής, οι πόροι και οι ρωγμές στο ρήγμα πληρώνονται σταδιακά με ρευστό. Όταν η πίεση των πόρων αυξάνεται σε μια συγκεκριμένη τιμή, το ρήγμα ολισθαίνει επειδή η πραγματική κανονική τάση και στις δύο πλευρές είναι μικρότερη από την τάση διάτμησης και προκαλείται σεισμός.

Η παρούσα εργασία δομείται ως εξής:

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση του φαινομένου της επαγομένης σεισμικότητας, οφειλόμενη στην εξόρυξη υδρογονανθράκων, με την μέθοδο της υδραυλικής ρωγμάτωσης (fracking), δηλαδή την έγχυση ρευστού υψηλής πίεσης σε διαπερατά πετρώματα ώστε να γίνει η παραγωγή τους σχιστολιθικού αερίου.

Στο κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στοιχείων που αφορούν συγκεκριμένα στην περίπτωση πρόκλησης επαγομένης σεισμικότητας στην Οκλαχόμα των ΗΠΑ – μια περιοχή με την υψηλότερη επαγομένη σεισμικότητα στις ΗΠΑ, αλλά και παγκοσμίως.

Στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται ανάλυση της καταγεγραμμένης σεισμικότητας που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια στον ευρύτερο χώρο της Οκλαχόμα (ΗΠΑ), με χρήση της μη-εκτατικής στατιστικής φυσικής (non-extensive statistical physics, NESP).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

## Επαγόμενη σεισμικότητα οφειλόμενη στην εξόρυξη υδρογονανθράκων με την έγχυση ρευστών (Υδραυλική ρωγμάτωση)

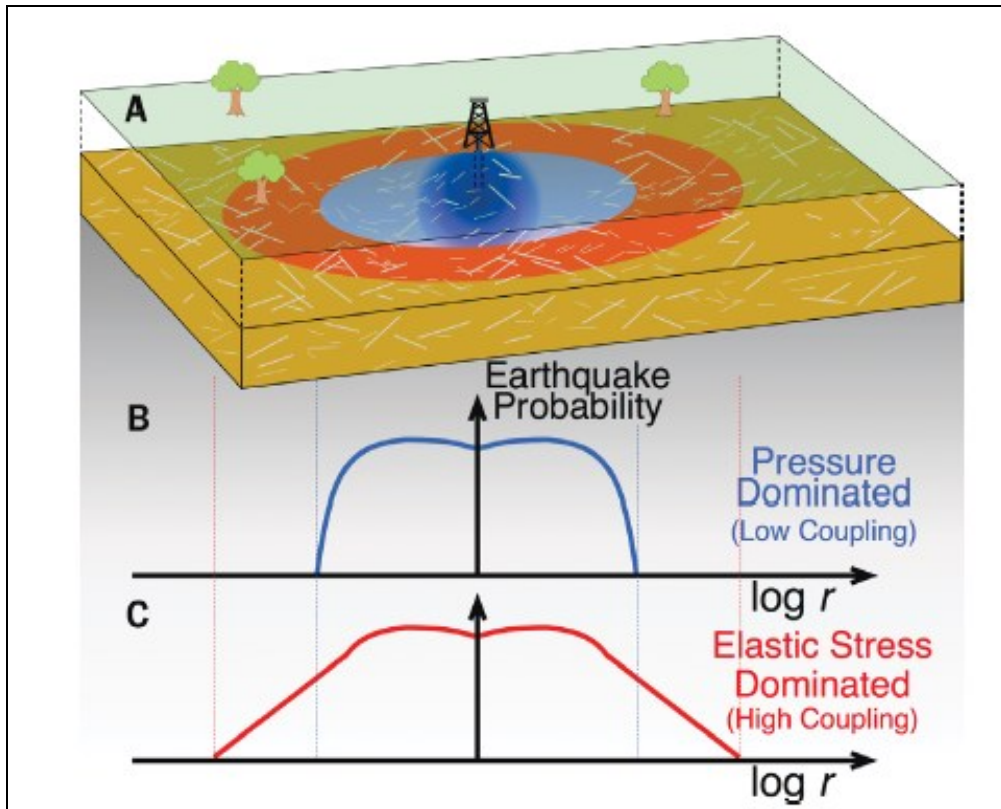
### 2.1 Επαγόμενη σεισμικότητα

#### 2.1.1 Ορισμός επαγόμενης σεισμικότητας

Επαγόμενη (ή εξ επαγωγής) σεισμικότητα (Induced Seismicity) είναι το φαινόμενο πρόκλησης μικρών συνήθως σεισμών από ανθρώπινες δραστηριότητες που μπορεί να μεταβάλουν το πεδίο τάσεων (stress) και παραμόρφωσης (strain) του γήινου φλοιού. Το φαινόμενο αυτό έχει λάβει πολύ μεγάλες διαστάσεις στα ΜΜΕ τα τελευταία χρόνια (Yu et al. 2021) λόγω της αυξημένης χρήσης της μεθοδολογίας εξόρυξης σχιστολιθικού αερίου και πετρελαίου (shale fracking). Οι πιο συχνές περιπτώσεις πρόκλησης επαγόμενης σεισμικότητας παρατηρούνται σε τεχνητές λίμνες, μεταλλευτικές δραστηριότητες, άντληση σχιστολιθικού πετρελαίου / αερίου, άντληση νερού, γεωθερμική ενέργεια (HDR), υδραυλική διάρρηξη σε περιοχές παραγωγής πετρελαίου (Τσελέντης, 2018).

Οι επαγόμενοι σεισμοί, λόγω του τυπικά μικρότερου μεγέθους τους ( $M < 3$ ) έχουν λιγότερη ενέργεια από τους μεγάλους τεκτονικούς σεισμούς. Αν και η ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται είναι συνήθως μικρότερη από τους φυσικούς σεισμούς, οι επαγόμενοι σεισμοί μπορεί ακόμα να είναι καταστροφικοί (Council, 2013).

Ο Goebel και ο Brodsky υποθέτουν ότι επειδή τα ιζηματογενή πετρώματα έχουν υψηλό πορώδες και τα ιζηματογενή σωματίδια δεν είναι καλά συνδεδεμένα με το βράχο, επιτρέπουν την πίεση των πόρων να μεταδοθεί στο γύρω βράχο καλύτερα από ότι για το κρυσταλλικό βράχο (Jason R. Patton, 2018).



**Εικόνα 1** Η χωρική έκταση για την επαγόμενη σεισμικότητα σε σχέση με τον τύπο του πετρώματος (Α) Η μέγιστη έκταση των επαγόμενων σεισμών σε σχέση με το κρυσταλλικό πέτρωμα (μπλε έλλειψη) και το ιζηματογενές πέτρωμα (κόκκινη έλλειψη). Το υποθετικό δίκτυο ρήγματος εμφανίζεται ως γκριζες γραμμές. (Β) Η πιθανότητα σεισμού (μπλε, κατακόρυφος άξονας) σε σχέση με την απόσταση από το πηγάδι για κρυσταλλικές πετρώδεις περιοχές. (Γ) Η πιθανότητα σεισμού (κόκκινος, κατακόρυφος άξονας) σε σχέση με την απόσταση από την γεώτρηση για κρυσταλλικές πετρώδεις περιοχές.

### 2.1.2 Ποσοστά και οι τύποι ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που προκαλούν επαγόμενη σεισμικότητα.

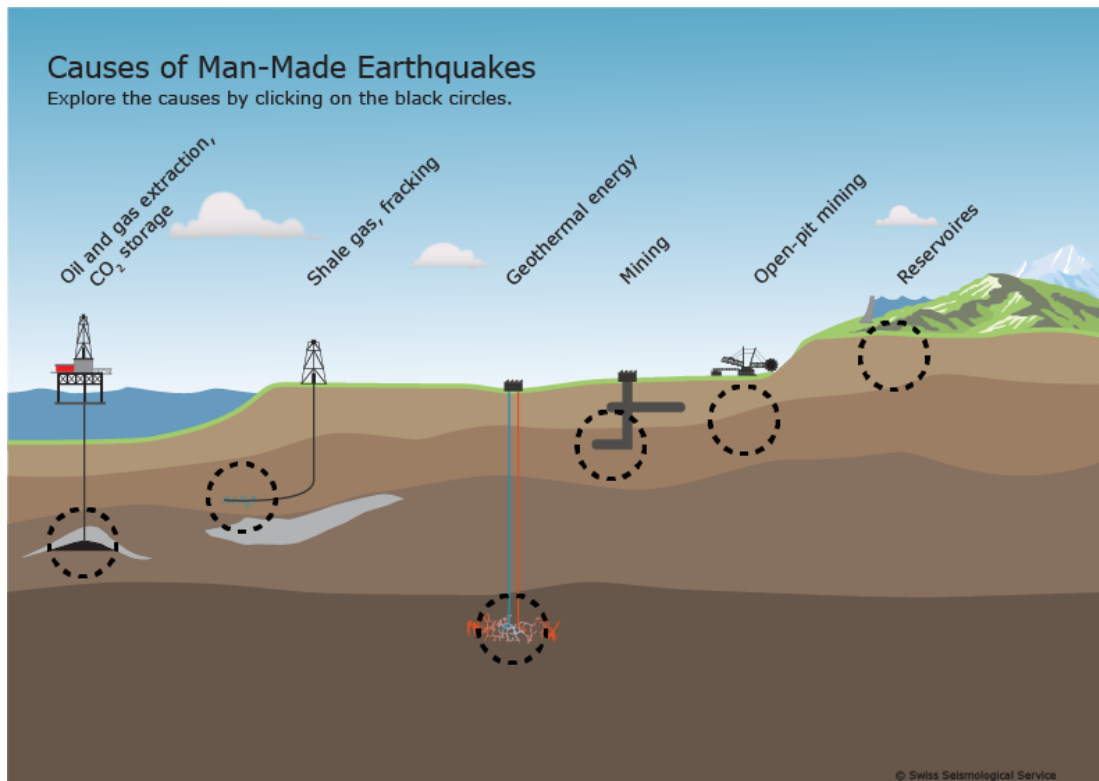
Η HiQuake είναι μια βάση σεισμικών δεδομένων που προκαλούνται από δραστηριότητες του ανθρώπου, σε έργα ενεργειακής ανάπτυξης. Είναι η μεγαλύτερη και πιο ενημερωμένη βάση δεδομένων σεισμικών δραστηριοτήτων που πιθανόν έχουν προκληθεί ή ενεργοποιηθεί από ανθρώπινη δραστηριότητα.

Με βάση τα δεδομένα της HiQuake, 1231 έργα στα οποία παρατηρείται επαγόμενη σεισμικότητα εξελίσσονται παγκοσμίως αυτή την περίοδο, με τελευταία ενημέρωση των δεδομένων της στις 28 Μαΐου 2021 (HiQuake, 2021).

Τα ποσοστά των διάφορων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων που προκαλούν την επαγόμενη σεισμικότητα, δίνονται στον παρακάτω Πίνακα. Η σχηματική αναπαράστασή τους φαίνεται στην Εικόνα 2.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.** Τύποι ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και ποσοστά επαγόμενης σεισμικότητας (*HiQuake, 2021*).

Τύπος δραστηριότητας	Ποσοστό (%)
Υδραυλική ρωγμάτωση (fracking)	34
Εξόρυξη μεταλλευμάτων (mining)	25
Φράγματα (Water reservoir impoundment)	15
Συμβατικό πετρέλαιο και φυσικό αέριο (Conventional Oil and Gas)	11
Γεωθερμική ενέργεια (Geothermal energy)	6
Απόβλητα ρευστών (Waste Fluid disposal)	4
Πυρηνικές εκρήξεις (Nuclear explosions)	2
Ερευνητικά προγράμματα (Research experiments)	1
Μη συμβατό πετρέλαιο και φυσικό αέριο / Απόβλητα ρευστού (Unspecified oil and gas/waste fluid proposal)	1
Γεώτρηση νερού (Groundwater extraction)	0.6
Διεισδυτικές βόμβες βάθους (Deep penetrating bombs)	0.3
Κατασκευαστικές ζώνες (Construction)	0.2
Δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα (Carbon capture and storage, CCS)	0.2
Ανθρακωρυχείο μεθανίου Coal bed methane CBM	0.1
Χημικές Εκρήξεις (Chemical explosions)	0.1



**Εικόνα 2** Αίτια ανθρωπογενούς επαγομένης σεισμικότητας. Από αριστερά προς τα δεξιά: α) άντληση πετρελαίου και φυσικού αερίου με αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα, β) παραγωγή σχιστολιθικού αερίου υδραυλική ρωγμάτωση, γ) γεωθερμική ενέργεια, δ) εξόρυξη μεταλλευμάτων, επιφανειακή εξόρυξη μεταλλευμάτων και ε) κατακράτηση νερού δεξαμενής (φράγμα) σε τεχνητή λίμνη. (Swiss Seismological Service)

### 2.1.3 Επαγόμενη σεισμικότητα σε διεθνές επίπεδο.

Οι πρώτες παρατηρήσεις του φαινομένου της επαγόμενης σεισμικότητας χρονολογούνται στις αρχές του εικοστού αιώνα και συσχετίζονται με τις εργασίες εξόρυξης άνθρακα. Ωστόσο, μετά το 2009 με την απότομη αύξηση της σεισμικότητας που σχετίζεται με τις επιχειρήσεις διάθεσης λυμάτων στις ΗΠΑ, το θέμα άρχισε να λαμβάνει ιδιαίτερη προσοχή από το κοινό. Σε γενικές γραμμές, κάθε βιομηχανική δραστηριότητα που μεταβάλλει την κατάσταση πίεσης εντός του φλοιού της Γης μπορεί να προκαλέσει σεισμούς. Οι πιο συνηθισμένες λειτουργίες που σχετίζονται με την επαγόμενη σεισμικότητα κυρίως σε Ευρώπη, Ασία και ΗΠΑ εκτός από την απόρριψη λυμάτων, είναι η υπόγεια εξόρυξη, η κατακράτηση δεξαμενών νερού, η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου (από συμβατικούς και μη συμβατικούς

πόρους), η εκμετάλλευση γεωθερμικής ενέργειας και η αποθήκευση φυσικού αερίου. Αυτές οι βιομηχανικές δραστηριότητες μπορούν να αλλάξουν το πεδίο των τάσεων στην επιφάνεια με μεταβολές της πίεσης των πόρων (*Council, 2013*). Ακολουθεί αναφορά μεγάλων επαγομένων σεισμικών γεγονότων που έλαβαν χώρα ανά τον κόσμο.

- ✓ 1952, Οκλαχόμα, αιτία υδραυλική ρηγμάτωση (Fracking). Τα αποτελέσματα μιας πολυετούς έρευνας σχετικά με τους προκληθέντες σεισμούς από τη Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) που δημοσιεύθηκε το 2015, έδειξε ότι οι περισσότεροι από τους σημαντικούς σεισμούς στην Οκλαχόμα, όπως ο σεισμός του 1952 (μεγέθους 5,7) El Reno μπορεί να έχουν προκληθεί από βαθιά έγχυση αποβλήτων νερού από τη βιομηχανία πετρελαίου. "Τα ποσοστά σεισμού έχουν πρόσφατα αυξηθεί σημαντικά σε πολλές περιοχές των Κεντρικών και Ανατολικών Ηνωμένων Πολιτειών (CEUS), ειδικά από το 2010, και επιστημονικές μελέτες έχουν συνδέσει την πλειονότητα αυτής της αυξημένης δραστηριότητας με την έγχυση λυμάτων σε πηγάδια απόρριψης." (*Hough, Susan E.; Page, Morgan, 2015*)
- ✓ 1967, 11 Δεκεμβρίου Κουναναγαρ, αιτία πλήρωση τεχνητών λιμνών με νερό σε φράγματα. Ο σεισμός του Κουναναγαρ του 1967 συνέβη κοντά στην πόλη Κουναναγαρ στην Μαχαράστρα της Ινδίας στις 11 Δεκεμβρίου. Το μέγεθος 6,6 προκάλεσε μέγιστη ένταση Mercalli VIII (Severe) κοντά στην τοποθεσία του φράγματος Κουνα, εγείροντας ερωτήματα σχετικά με την επαγόμενη σεισμικότητα, σκοτώνοντας τουλάχιστον 177 ζωές και τραυματίζοντας πάνω από 2.200. (*ISC, 2016*)
- ✓ 1971, 6 Νοεμβρίου στο νησί Amchita (Αλάσκα), αιτία υπόγεια πυρηνική δοκιμή. Παρουσιάστηκε στο νησί Amchitka στην Αλάσκα, από την Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών. Το πείραμα, μέρος της σειράς πυρηνικών δοκιμών Operation Grommet, δοκίμασε τον σχεδιασμό κεφαλής για τον αντίβαλλιστικό πύραυλο LIM-49 Spartan. Με εκρηκτική απόδοση περίπου 5 megatons ισοδύναμου TNT, η δοκιμή ήταν η μεγαλύτερη υπόγεια έκρηξη που πυροδοτήθηκε ποτέ. Με μέγεθος 7.1 mb. (*Goldblat, Jozef; Cox, David, eds. 1988*).
- ✓ 1973, στα βουνά Mayacamas, αιτία η γεωθερμική μονάδα παραγωγής ενέργειας. Μελέτες έχουν δείξει ότι η έγχυση νερού στο πεδίο Geysers προκαλεί σεισμούς μεγέθους από 0,5 έως 3,0, αν και ένας σεισμός μεγέθους 4,6 σημειώθηκε το 1973 και τέσσερα γεγονότα αυξήθηκαν μετά. (*esd1, 2017*)

- ✓ 2006 9 Οκτωβρίου στη Βόρεια Κορέα, αίτια υπόγεια πυρηνική δοκιμή με μέγεθος 4.3mb. (USGS, 2017)
- ✓ 2009 25 Μάιου στην Βόρεια Κορέα, αίτια υπόγεια πυρηνική δοκιμή με μέγεθος 4.7mb. (USGS, 2017)
- ✓ 2011 5 Νοεμβρίου στην Οκλαχόμα, αίτια φρεάτια έγχυσης με μέγεθος 5.8. (USGS, 2017)
- ✓ 2013 12 Νοέμβριου στην Βορειά Κορέα, αίτια υπόγεια πυρηνική δοκιμή με μέγεθος 5.1. (USGS, 2017)
- ✓ 2016 6 Ιανουαρίου στην Βόρεια Κορέα, αίτια υπόγεια πυρηνική δοκιμή με μέγεθος 5.1. (USGS, 2017)
- ✓ 2016 6 Σεπτεμβρίου στην Βόρεια Κορέα, αίτια υπόγεια πυρηνική δοκιμή με μέγεθος 5.3. (DW.COM, 2017)
- ✓ 2017 3 Σεπτέμβριου στην Βόρεια Κορέα, αίτια υπόγεια πυρηνική δοκιμή με μέγεθος 6.3. (BBC News, 2017)

#### **2.1.4 Επαγόμενη σεισμικότητα στον Ελλαδικό χώρο.**

Σύμφωνα με τον Τσελέντη (2018), στον Ελλαδικό χώρο φαινόμενα που σχετίζονται με την επαγόμενη σεισμικότητα συναντάμε από την πλήρωση τεχνητών λιμνών με νερό σε φράγματα. Τα τελευταία χρόνια στη Ελλάδα έχει παρατηρηθεί μερικές φορές έξαρση της σεισμικής δραστηριότητας σε περιοχές που βρίσκονται κοντά σε τεχνητές λίμνες. Κύριο χαρακτηριστικό των ακολουθιών αυτών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από σεισμούς σχετικά μικρών μεγεθών, είναι ο πολύ μεγάλος αριθμός σεισμών σε διάστημα λίγων ημερών. Είναι πιθανό η ιδιότυπη αυτή δραστηριότητα να συνδέεται με την ύπαρξη των τεχνητών λιμνών και να οφείλεται σε μεταβολές του ύψους της στάθμης του ύδατος.

Οι αναφορές που έχουμε για επαγόμενη σεισμικότητα είναι ελάχιστες και οριακά μηδενικές σε σχέση με κάποιες χώρες της Ευρώπης, της Ασίας και των ΗΠΑ. Οι περισσότεροι σεισμοί οφείλονται στις κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών, και κατά συνέπεια οι ζώνες έντονης σεισμικής δράσης ουσιαστικά ταυτίζονται με τις παρυφές των πλακών. Ο ελληνικός χώρος βρίσκεται στα όρια επαφής και σύγκλισης της Ευρασιατικής πλάκας με την Αφρικανική, γι' αυτό και είναι χώρος μεγάλης σεισμικότητας. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, η Ελλάδα από άποψη σεισμικότητας, κατέχει την πρώτη θέση στη Μεσόγειο και την Ευρώπη καθώς και την

έκτη θέση σε παγκόσμιο επίπεδο, μετά την Ιαπωνία, Νέες Εβρίδες, Περού, νησιά Σολομώντα και Χιλή.

Παρατηρήσεις που σχετίζονται με την επαγόμενη σεισμικότητα από την πλήρωση τεχνητών λιμνών με νερό, έχουν γίνει τόσο κατά το χρονικό διάστημα πλήρωσης της λίμνης (άμεση απόκριση) όσο και αρκετά χρόνια μετά την πλήρωση αυτήν (καθυστερημένη απόκριση).

Στην πρώτη κατηγορία ανήκει η λίμνη των Κρεμαστών στη δυτική Ελλάδα και η λίμνη του Μαραθώνα κοντά στη Αθήνα. Στην περίπτωση της λίμνης των Κρεμαστών ένας σεισμός με μέγεθος 6.2 διεγέρθηκε τον Φεβρουάριο του 1966 και η συχνότητα γένεσης των προσεισμών του συσχετίστηκε καθαρά με το ύψος της στάθμης του νερού στη λίμνη. Ενώ στην περίπτωση της Λίμνης του Μαραθώνα το έτος 1938 έγινε σεισμός μεγέθους 6.2.

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκει η τεχνητή λίμνη του Πολυφύτου, με την οποία συνδέεται ο ισχυρός σεισμός ( $M=6.6$ ) ο οποίος έπληξε την περιοχή της Κοζάνης-Γρεβενών στις 13 Μαΐου 1995.

Άλλες περιπτώσεις καταγεγραμμένων σεισμών είναι αυτός της Λίμνης Καστρακίου-Αχελώου το 1969 με σεισμό μεγέθους 4.7, της λίμνης Πουρναριού Άρτας-Αράχθου το 1981 με σεισμό μεγέθους 5.6 και της λίμνης Ασωμάτων Βέροιας το 1984 με σεισμό μεγέθους 5.4.

Από τη χωροχρονική κατανομή της σεισμικής ακολουθίας, προκύπτει ότι το βορειοανατολικότερο τμήμα της ζώνης διάρρηξης, το οποίο βρίσκεται κάτω από την λίμνη του Πολυφύτου, ήταν το λιγότερο ενεργό τμήμα ζώνης κατά τη διάρκεια της ακολουθίας. Με βάση το μοντέλο των «εμποδίων» συνάγεται ότι αυτό είναι το μόνο μεγάλο σχετικά τμήμα του ρήγματος στο οποίο απουσιάζουν σημαντικά «εμπόδια» και έτσι αυτό ολίσθησε σχετικά ομαλά στη διείδυση του ύδατος της λίμνης στη περιοχή του ρήγματος με αποτέλεσμα την ελάττωση της τριβής στο ρήγμα ως επακόλουθο της αύξησης της πίεσης των πόρων. Επιπλέον, η άποψη αυτή ενισχύεται και από το ότι σημαντική σεισμική δραστηριότητα παρατηρήθηκε στην περιοχή μόνο μετά την πλήρωση της λίμνης. Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι μερικές μέρες πριν την γένεση του ισχυρού σεισμού το 1995, παρατηρήθηκαν στην περιοχή επιφανειακές διαρρήξεις, ενδεικτικό του ότι έγινε ασεισμική κίνηση στη περιοχή. (Τσελέντης, 2018)





*Εικόνα 3 Η σεισμική ακολουθία ξεκίνησε μετά την πλήρωση της τεχνητής λίμνης του φράγματος των Κρεμαστών στον ποταμό Αχελώο. Μελέτη έδειξε ότι ο αριθμός των επαγόμενων σεισμών συσχετίζεται με την πλήρωση με νερό της τεχνητής λίμνης. Η σεισμική δραστηριότητα ήταν τόσο έντονη που έγινε αναφορά του φαινομένου στη διεθνή βιβλιογραφία. (Φωτογραφία: Γιάννης Γιαννακόπουλος)*

## 2.2 Υδραυλική Ρωγμάτωση (Hydraulic fracturing ή fracking)

### 2.2.1 Ορισμός Υδραυλικής ρωγμάτωσης

Η υδραυλική ρωγμάτωση, όπου ανεπίσημα αναφέρεται και ως fracking, είναι η μέθοδος παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου μέσω της διαδικασίας εισαγωγής νερού, άμμου και χημικών κάτω από υψηλή πίεση σε βραχώδη σχηματισμούς μέσω γεώτρησης (well). Αυτή η διαδικασία επιδιώκει να δημιουργήσει νέα ρήγματα στα πετρώματα καθώς και να αυξήσει το μέγεθος, να το επεκτείνει και να το συνδέσει με τα υπάρχοντα ρήγματα. Η υδραυλική ρωγμάτωση είναι τεχνική διέγερσης φρεατίων όπου συνήθως χρησιμοποιείται σε χαμηλής διαπερατότητας (permeability) πετρώματα όπως σφικτός ψαμμίτης (tight sandstone), σχιστόλιθος (shale) και κοιτάσματα άνθρακα (coal bed) για να αυξήσει την ροή του πετρελαίου και/ή του αερίου στην πετρελαιοπηγή (well) από βραχώδη σχηματισμούς. (Council, 2013)

Η γεώτρηση σε κάθετα φρεάτια/πετρελαιοπηγές χρησιμοποιείται για πάνω από πενήντα χρόνια για τη βελτίωση της παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου από συμβατικά κοιτάσματα. Ωστόσο, η τρέχουσα πρακτική της οριζόντιας γεώτρησης σε συνδυασμό με πολλαπλές εφαρμογές υδραυλικής ρωγμάτωσης σε μια μόνο γεώτρηση πρωτοστάτησε στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και συνέχισε να εξελίσσεται. Από τα τελευταία χρόνια του 20ού αιώνα, η χρήση αυτής της τεχνικής για την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου από προηγουμένως μη παραγωγικούς σχηματισμούς έχει αυξηθεί δραματικά, γεγονός που ώθησε την υδραυλική ρωγμάτωση και τις σχετικές διαδικασίες σε περιοχές όπου το πετρέλαιο και το αέριο δεν είχαν προηγουμένως παραχθεί. (Council, 2013)



*Εικόνα 4 Υδραυλική ρωγμάτωση παραγωγής σχιστολιθικού αερίου της IGas στο Misson, Nottinghamshire. (Φωτογραφία: Eric Walton)*

### **2.2.2 Διαδικασία υδραυλικής ρωγμάτωσης**

Μεγάλες αποθέσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου έχουν παγιδευτεί σε μεγάλο βάθος, ανάμεσα από την επιφάνεια της γης και τα πετρώματα του κοιτάσματος. Με τη βοήθεια σύγχρονων τεχνικών οριζόντιας γεώτρησης και της υδραυλικής ρωγμάτωσης πραγματοποιείται η εξόρυξη αυτών των αποθεμάτων σε όλη την βιομηχανία του κόσμου με σεβασμό και υπευθυνότητα προς το περιβάλλον. (*SM Energy Company, 2015*)

Μόλις ολοκληρωθούν οι έρευνες εντοπισμού της πηγής με το απόθεμα, μια τρύπα ανοίγεται στην επιφάνεια της γης. Το γεωτρύπανο τρυπάει βαθιά το έδαφος προς τα κάτω διαπερνώντας όλο το γλυκό νερό του υδροφορέα που συνήθως δεν είναι περισσότερο από 1000 πόδια κάτω από την επιφάνεια, δεδομένου ότι οι πλούσιες σε υδρογονάνθρακες δεξαμενές είναι συνήθως ένα μίλι πιο κάτω από την επιφάνεια. Ως περιβαλλοντική προφύλαξη, το πάνω μέρος της οπής της γεώτρησης τρυπάει με ένα σύστημα λάσπης με βάση το νερό, το οποίο προστατεύει τους υδροφορείς γλυκού νερού, ενώ επίσης ψύχει το κομμάτι της κοπής και ξεπλένει το κομμάτι από την λάσπη και την μεταφέρει στους τοίχους της οπής του πηγαδιού το οποίο βοηθάει στο να κρατάει ανέπαφη την γεώτρηση μέχρι την ολοκλήρωσή της. (*SM Energy Company, 2015*)

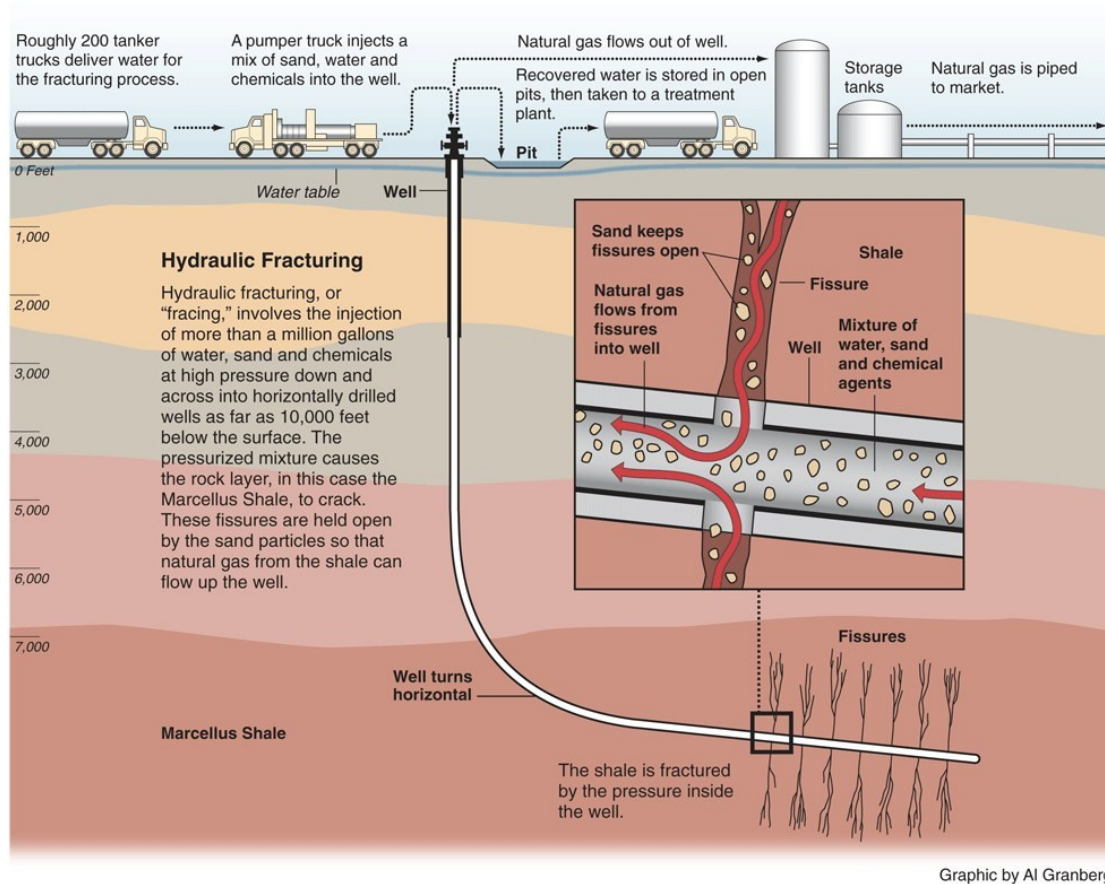
Μόλις περάσει η γεώτρηση όλους τους υδροφορείς γλυκού νερού, ένας σιδερένιος σωλήνας που ονομάζεται θήκη εισέρχεται μέσα στην γεώτρηση. Στην συνέχεια εισάγεται τσιμέντο μέσα στο περίβλημα της θήκης το οποίο αντλείται από το κάτω μέρος της και ωθείται προς τα πάνω. Αυτή η τεχνική με το τσιμέντο δημιουργεί φράγμα μεταξύ του περιβλήματος και των υδροφορέων γλυκού νερού. Στη συνέχεια η γεώτρηση συνεχίζεται προς τα κάτω από το άκρο της επιφάνειας του περιβλήματος μέχρι το σημείο έναρξης. Το σημείο έναρξης είναι το σημείο όπου η γεώτρηση τρυπάει με μια αυξανόμενη γωνία έως ότου η γεώτρηση γίνει οριζόντια μέσα στο εντοπισμένο φρεάτιο. Αυτή η οριζόντια γεώτρηση μπορεί να συνεχιστεί για 5000 έως 10000 πόδια. Μόλις επιτευχθεί η διείσδυση στο επιθυμητό βάθος, εισέρχεται οριζόντια ένα νέο προστατευτικό περίβλημα. Το περίβλημα στερεώνεται με τσιμέντο δημιουργώντας ένα πρόσθετο φράγμα σε ολόκληρο το μήκος του φρεατίου, αυτό προστατεύει τόσο το περιβάλλον όσο και το φρεάτιο. (*SM Energy Company, 2015*)

Όταν η γεώτρηση ολοκληρωθεί και το περίβλημα στερεωθεί με τσιμέντο στη θέση του, η εξέδρα γεώτρησης απελευθερώνεται και η προετοιμασία ξεκινά για το επόμενο βήμα. Στην συνέχεια γίνεται η τοποθέτηση μιας βαλβίδας στην επιφάνεια της γης όπου χρησιμοποιείται ένα μείγμα νερού και ζελέ για τον καθαρισμό της γεώτρησης μέσω της εξέδρα ολοκλήρωσης και της σωλήνωσης, ενώ στην συνέχεια γίνεται η προετοιμασία για το διάτρητο πιστόλι. (*SM Energy Company, 2015*)

Η διαδικασία της διάτρησης των πετρωμάτων γίνεται με την συσκευή των διάτρητων όπλων (*perforating gun*) όπου γίνεται χρήση αυτής της τεχνικής για τη διάτρηση των φρεατίων πετρελαίου και φυσικού αερίου κατά την προετοιμασία της εξόρυξης. Αυτό επιτρέπει στο εγκλωβισμένο πετρέλαιο ή φυσικό αέριο να ρέει στην γεώτρηση πιο εύκολα. Αυτό το αρχικό τμήμα διεγείρεται και στην συνέχεια απομονώνεται με μια ειδική διαμορφωμένη τάπα. Σε αυτό το σημείο η διάτρηση των πετρωμάτων με την χρήση των διάτρητων όπλων συνεχίζει και γίνεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο σε όλη την οριζόντια τομή της πετρελαιοπηγής που μπορεί να εκτείνεται για μίλια. (*SM Energy Company, 2015*)

Η υδραυλική ρωγμάτωση περιλαμβάνει την έγχυση μεγάλων όγκων ρευστού που αποτελείται από νερό, άμμο και χημικές ουσίες στα πετρώματα υπό υψηλή πίεση για τη δημιουργία ρωγμών μέσω των οποίων το αέριο μπορεί να διαπεράσει από τους σχηματισμούς των πετρωμάτων. Κατά την διαδικασία της έγχυσης του ρευστού





**Εικόνα 5** Το ρευστό ρωγμάτωσης είναι ένας συνδυασμός νερού, χημικών ουσιών και άμμου (ή άλλου τύπου προωθητικού) που εγχέονται σε πηγάδι αργού πετρελαίου ή φυσικού αερίου με σκοπό τη μείωση της πίεσης τριβής και την δημιουργία ρηγματώσεων. Κατά τη διάρκεια της υδραυλικής ρωγμάτωσης, το ρευστό εγχέεται με υψηλή ταχύτητα σε μια οπή για να ενισχύσει την απελευθέρωση πετρελαίου ή φυσικού αερίου που βρίσκεται κάτω από τη Γη, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα. Η χημική σύνθεση του ρευστού ρωγμάτωσης μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής που γίνεται η παραγωγή. Κατά μέσο όρο, το ρωγμάτωσης περιέχει μεταξύ 98% και 99,5% νερό και άμμο. Μεταξύ 0,5 και 2% του ρευστού αποτελείται από χημικά πρόσθετα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να σταματήσουν την ανάπτυξη μικροοργανισμών, να αποτρέψουν τη διάβρωση του περιβλήματος, να αυξήσουν τον ρυθμό με τον οποίο εγχέεται το υγρό και να μειώσουν την πίεση, μεταξύ άλλων χρήσεων. Το νερό χρησιμοποιείται εν μέρη για τη μεταφορά των χημικών ουσιών και της άμμου - τα δύο από τα οποία επιλέγονται για να διευκολύνουν την παραγωγή πετρελαίου ή φυσικού αερίου - από το πηγάδι μέχρι το κάτω μέρος του πηγαδιού για να αυξήσουν την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου. (Graphic by Al Granberg)

δημιουργούνται ρήγματα στα αποθέματα του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Η άμμος από το ρευστό παραμένει στα ρήγματα των πετρωμάτων και τα κρατά ανοιχτά. Στην υδραυλική ρωγμάτωση το ποσοστό των πρόσθετων υλικών στο νερό είναι 14,20% (συνήθως άμμος και ένα 0,78% χημικά (δες ακόλουθο Πίνακα)), το υπόλοιπο 85,02% είναι το νερό και οι συνδυασμοί όλων αυτών δημιουργούν το ρευστό. (SMEnergyCompany, 2015)

**Πίνακας 2** Χημικά που χρησιμοποιούνται ως προσθετό υλικό στο νερό για την δημιουργία του ρευστού (FracFocus)

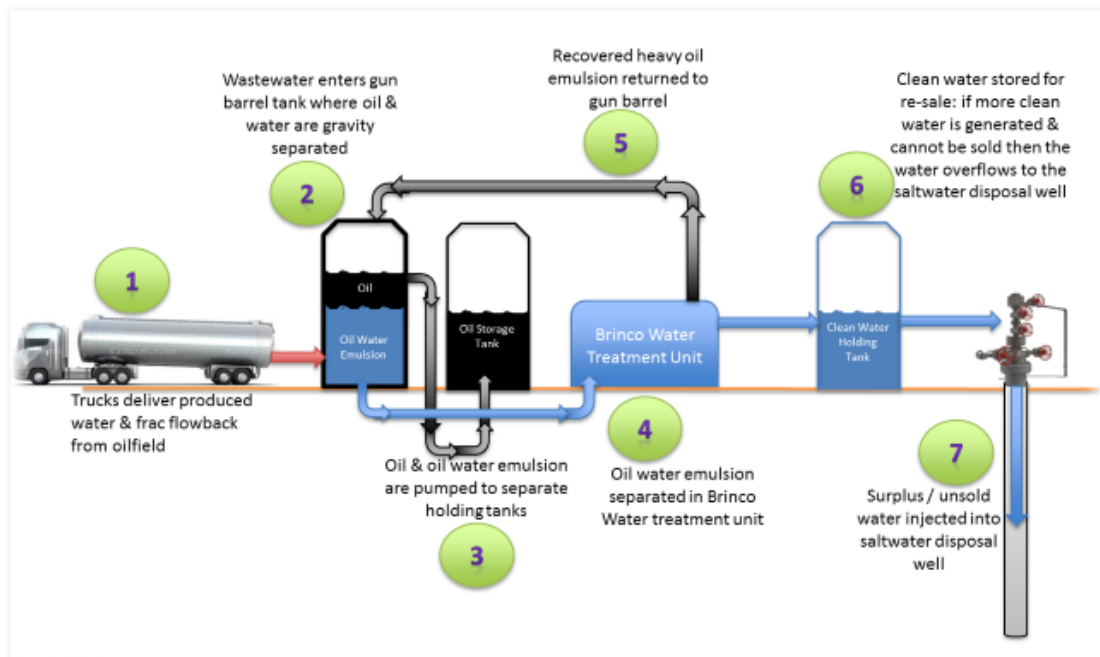
Υδατοδιαλυτός ανιονικός πολυσακχαρίτης (Gellant)	0.5%
Οξύ (Acid)	0.07%
Αναστολέας διάβρωσης (Corrosion Inhibitor)	0.05%
Μειωτής τριβής (Friction Reducer)	0.05%
Ελεγκτής αργίλου (Clay Control)	0.034%
Διασταυρούμενος σύνδεσμος (Crosslinker)	0.032%
Αναστολέας κλίμακας (Scale Inhibitor)	0.023%
Θραύστης (Breaker)	0.02%
Ελεγκτής σιδήρου (Iron Control)	0.004%
Βιοκτόνο (Biocide)	0.001%

Όταν η διέγερση ολοκληρωθεί οι απομονωμένες τάπες ανοίγουν και η παραγωγή ξεκινάει. Αρχικά ρέει νερό και στην συνέχεια πετρέλαιο ή φυσικό αέριο προς την επιφάνεια μέσα από την οριζόντια στήλη της γεώτρησης. (SMEnergyCompany, 2015)

Κατά την διάρκεια της αρχικής παραγωγής από την πετρελαιοπηγή περίπου το 55% από το ρευστό της ρωγμάτωσης ανακτάται ενώ το 45% παραμένει στα ρήγματα. Αυτό το ρευστό ανακυκλώνεται για να επαναχρησιμοποιηθεί σε άλλη υδραυλική ρωγμάτωση ή καταστρέφεται με ασφαλή τρόπο σύμφωνα με την νομοθεσία. Ευτυχώς, μεγάλο μέρος του νερού ροής μπορεί να ανακυκλωθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί από τη βιομηχανία. Ωστόσο, εξακολουθεί να απαιτείται λύση διάθεσης, δεδομένων των μεγάλων όγκων ρευστού που εμπλέκονται. Μια επιλογή είναι από το νερό ροής. Δυστυχώς, οι τυποποιημένες δημοτικές μονάδες επεξεργασίας νερού δεν είναι εξοπλισμένες για να χειριστούν αυτό το επίπεδο

επεξεργασίας αποβλήτων. Μια εναλλακτική λύση είναι η έγχυση τα λυμάτων πίσω στον φλοιό της Γης. Τα λύματα είναι ένα υποπροϊόν που προκύπτει κατά την εξαγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου. Το παραγόμενο νερό είναι ένα είδος υφάλμυρου και αλατούχου νερού από υπόγειους σχηματισμό που φέρονται στην επιφάνεια. (*SMEnergyCompany, 2015*)

Το FracFocus είναι το εθνικό μητρώο χημικών για την τεχνική της υδραυλικής ρωγμάτωσης. Διευθύνεται από το Συμβούλιο Προστασίας των Υπογείων Νερών και τη Διακρατική Επιτροπή Συμπύκνωσης Πετρελαίου και Φυσικού Αερίου - δύο οργανώσεις των οποίων τα μέλη είναι κρατικοί κυβερνητικοί αξιωματούχοι. Οι αποστολές και των δύο οργανισμών επικεντρώνονται στη διατήρηση και την προστασία του περιβάλλοντος (*FracFocus*). Αυτός ο ιστότοπος δημιουργήθηκε για να παρέχει στο ευρύ κοινό πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικά με χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται στην υδραυλική ρωγμάτωση. Για την παροχή μιας ολοκληρωμένης εικόνας αυτών των πληροφοριών και του τρόπου με τον οποίο αντιστοιχούν σε σχετικούς παράγοντες, ο ιστότοπος παρέχει επίσης αντικειμενικές πληροφορίες σχετικά με την υδραυλική ρωγμάτωση, τους σκοπούς που εξυπηρετούν αυτές οι χημικές ουσίες και τα μέτρα που λαμβάνουν μεμονωμένες εταιρείες και ρυθμιστικοί φορείς για την προστασία των υπόγειων υδάτων. Ο πρωταρχικός σκοπός αυτής της ιστοσελίδας είναι να παρέχει πραγματικές πληροφορίες σχετικά με τη χρήση υδραυλικής ρωγμάτωσης. Δεν υποστηρίζει ή είναι εναντίον της χρήσης υδραυλικής ρωγμάτωσης ως τεχνολογίας, ούτε παρέχει επιστημονική ανάλυση των κινδύνων που σχετίζονται με αυτήν. Αν και το FracFocus δεν προορίζεται να αντικαταστήσει κανένα σύστημα πληροφοριών κρατικής κυβέρνησης, χρησιμοποιείται από διάφορες πολιτείες ως μέσο επίσημης αποκάλυψης χημικών. (*FracFocus*)



**Εικόνα 6** Διαδικασία έγχυσης λυμάτων πίσω στο φλοιό της γης. Το φορτηγό παραδίδει ένα παραγόμενο μείγμα νερού/πετρελαίου από την περιοχή του φρεατίου παραγωγής. Το μείγμα νερού/πετρελαίου εισέρχεται σε μια ειδική δεξαμενή (που ονομάζεται δεξαμενή βαρελιού όπλου) όπου το πετρέλαιο και το νερό διαχωρίζονται από τη βαρύτητα. Το νερό μεταφέρεται σε μια δεξαμενή νερού και στην συνέχεια το διαχωρισμένο πετρέλαιο αποθηκεύεται. Η ανάκτηση αργού πετρελαίου από το βαρέλι όπλου αποστέλλεται στην συνέχεια σε ξεχωριστή δεξαμενή. Αυτό το πετρέλαιο πωλείται στην αγορά. Το υπολειπόμενο νερό που είναι καθαρό από πετρέλαιο αλλά εξακολουθεί να είναι αλμυρό εγχέεται πίσω στη γη μέσω μιας γεώτρησης (<https://kleanwater.com/enhanced-saltwater-disposal-well-operations/>).

### 2.2.3 Διάτρητο όπλο (Perforating gun)

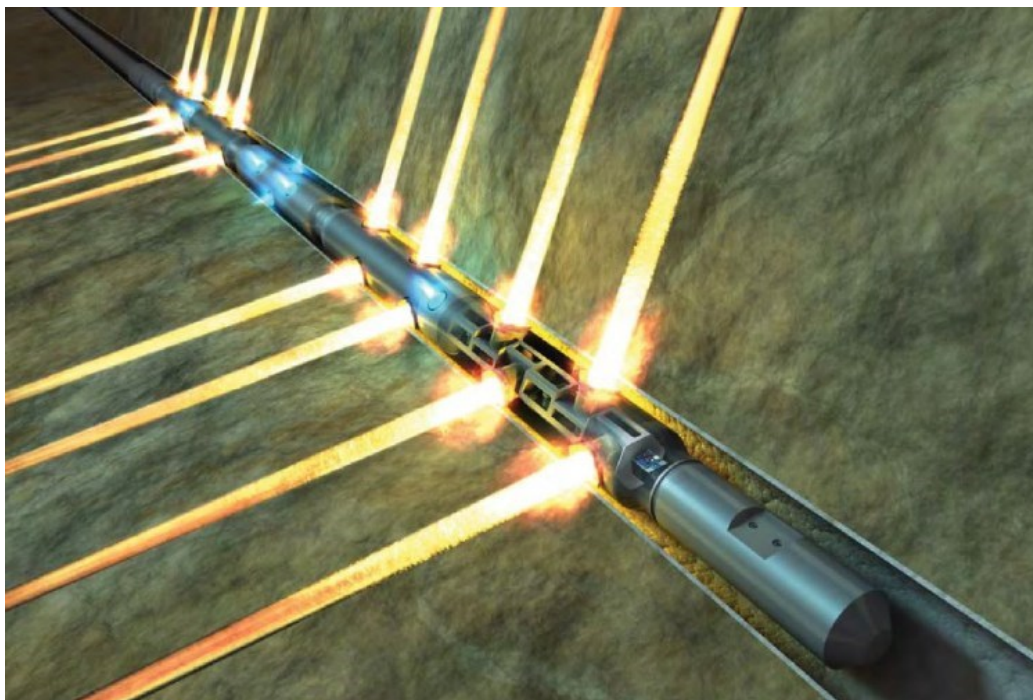
Είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη διάτρηση των φρεατίων πετρελαίου και φυσικού αερίου κατά την προετοιμασία της παραγωγής. Περιέχουν διάφορα σχήματα εκρηκτικών φορτίων, διατίθενται σε διάφορα μεγέθη και διαμορφώσεις. Η διάμετρος του χρησιμοποιούμενου πιστολιού προσδιορίζεται τυπικά από την παρουσία περιορισμών των φρεατίων που επιβάλλονται από τον επιφανειακό εξοπλισμό. (David A. Simpson P.E., 2017)

Τα διάτρητα όπλα συνήθως έχουν διάφορα σχήματα, αλλά υπάρχουν μερικά διάτρητα όπλα για εξειδικευμένες εφαρμογές. Υπάρχουν πολλών ειδών πιστόλια



σχήματος φορτίου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και εμπίπτουν σε περίπου τρεις κατηγορίες:

- Ανακτήσιμο κοίλο πιστόλι - το φορτίο ασφαρίζεται σε ένα χαλύβδινο σωλήνα που σφραγίζεται έναντι υδροστατικής πίεσης. Όταν φυσά το φορτίο, ο σωλήνας μπορεί να διογκωθεί και μερικές φορές να κολλήσει στο πηγάδι και πρέπει να αλεσθεί. Αυτό είναι σπάνιο και αυτά τα όπλα αφήνουν ελάχιστα συντρίμια στο πηγάδι.
- Μη ανακτήσιμο (αναλώσιμο) όπλο - αποτελούμενο από μεμονωμένες σφραγισμένες θήκες, καθεμία από τις οποίες περιέχει χρέωση. Οι σφραγισμένες θήκες είναι κατασκευασμένες από εύθραυστο υλικό όπως αλουμίνιο, κεραμικό ή χυτοσίδηρο. Η θήκη φουσκώνει σε μικρά κομμάτια που παραμένουν στο πηγάδι.
- Ημι-αναλώσιμο πιστόλι - οι σφραγισμένες θήκες ασφαρίζονται σε ανακτήσιμο σύρμα μεταφοράς ή μεταλλική ράβδο. Αυτή η διαμόρφωση μειώνει τα συντρίμια που αφήνονται στο πηγάδι και αυξάνει την τραχύτητα του όπλου. *(David A. Simpson P.E., 2017)*



**Εικόνα 7** Η διάτρηση είναι μια ειδική λειτουργία που δημιουργεί μια αποτελεσματική διαδρομή επικοινωνίας μεταξύ ενός πηγαδιού και μιας δεξαμενής δημιουργώντας σήραγγες. Οι αποτελεσματικές διαδρομές επιτρέπουν τη ροή ρευστού δεξαμενής στο πηγάδι με ελάχιστη απώλεια πίεσης. *(Perforation, Courtesy of Schlumberger)*

#### 2.2.4 Απόρριψη λυμάτων ρευστού πίσω στο φλοιό της γης

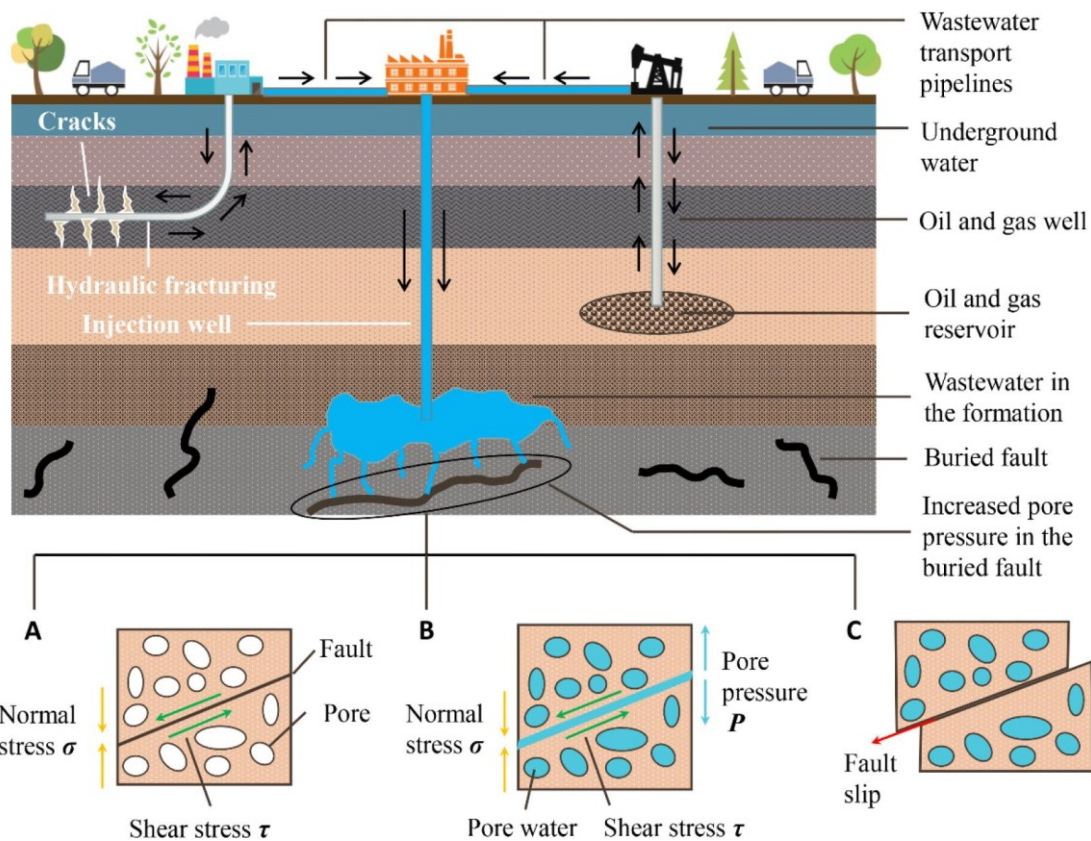
Η απόρριψη λυμάτων κατηγορίας II και η υδραυλική ρωγμάτωση συνήθως περιλαμβάνουν έγχυση ρευστού υπό υψηλή πίεση σε πορώδεις και διαπερατούς σχηματισμούς σχιστολιθικών πετρωμάτων. Η πλειονότητα των φρεατίων απόρριψης στις ΗΠΑ δεν αποτελούν κίνδυνο επαγομένης σεισμικότητας, αλλά κάτω από ορισμένες γεωλογικές συνθήκες ένα περιορισμένος αριθμός φρεατίων έγχυσης έχουν αποδειχθεί ότι είναι υπεύθυνοι για την επαγομένη σεισμικότητα με αισθητά επίπεδα δονήσεων στο έδαφος. (*A Resource of Technical and Regulatory Considerations Associated with Fluid Injection, 2021*)

Ένας σεισμός που συμβαίνει σε ένα ιδανικά προσανατολισμένο και σοβαρά διαταραγμένο ρήγμα μετά την έγχυση ρευστού θεωρείται ως σεισμός που προκαλείται επειδή μια σχετικά μικρή ποσότητα διαταράξεων των ρηγμάτων ή αλλαγής της πίεσης πόρων προκάλεσε την απελευθέρωση τάσεων. Οι τάσεις συσσωρεύονται στον φλοιό της Γης μέσω φυσικών τεκτονικών διεργασιών και μπορεί να αποθηκευτούν για χιλιετίες πριν απελευθερωθούν σε μια σεισμική ακολουθία. (*A Resource of Technical and Regulatory Considerations Associated with Fluid Injection, 2021*)

Ο κύριος φυσικός μηχανισμός που είναι υπεύθυνος για την ενεργοποίηση της σεισμικής δραστηριότητας που προκαλείται από έγχυση ρευστού είναι η αυξημένη πίεση πόρων στην επιφάνεια του ρήγματος, η οποία μειώνει την αποτελεσματική κανονική τάση, ξεμπλοκάροντας αποτελεσματικά το ρήγμα και επιτρέποντας την έναρξη ολίσθησης. Η ολίσθηση ενεργοποιείται όταν η καταπόνηση που δρα κατά μήκος του ρήγματος υπερβαίνει την αντίσταση τριβής ολίσθησης. Η κοινή ιδέα ότι τα εγχυμένα ρευστά προκαλούν σεισμούς λιπαίνοντας υπόγεια ρήγματα δεν είναι απολύτως ακριβής επειδή τα ρευστά δεν μειώνουν το συντελεστή τριβής. Αντίθετα, τα εγχυμένα ρευστά (ή τα εξαγόμενα ρευστά) προκαλούν σεισμούς αλλάζοντας τις συνθήκες πίεσης εντός των ρηγμάτων, φέρνοντας αυτές τις τάσεις σε μια κατάσταση στην οποία ισοδυναμούν ή υπερβαίνουν τις ανθεκτικές τάσεις, προωθώντας έτσι την ολίσθηση στο ρήγμα. (*A Resource of Technical and Regulatory Considerations Associated with Fluid Injection, 2021*)

Οι παράγοντες που μπορεί να αυξήσουν την πιθανότητα πρόκλησης ενός σεισμικού γεγονότος περιλαμβάνουν το μέγεθος και τη χωρική έκταση της διατάραξης του ρήγματος ή την μεταβολή της πίεσης πόρων, η οποία συνδέεται

άμεσα με την ισορροπία του ρευστού που εγχέεται και αποσύρεται, την παρουσία κρίσιμων ρηγμάτων που είναι καλά προσανατολισμένα για κατάρρευση (ρήγματα ανησυχίας), την κατάσταση επιτόπιας τάσης, και οποιαδήποτε υδραυλική σύνδεση μεταξύ της ζώνης έγχυσης και του σοβαρά τονισμένου ρήγματος. (*A Resource of Technical and Regulatory Considerations Associated with Fluid Injection, 2021*)



**Εικόνα 8** Ολόκληρη η διαδικασία της ολίσθησης ρήγματος που προκαλείται από έγχυση ρευστού στη βιομηχανική παραγωγή. (Α) Πριν από την έγχυση ρευστού, το ρήγμα κλείνει υπό την πίεση της κανονικής τάσης και στις δύο πλευρές. (Β) Με τη συνεχή έγχυση ρευστού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής, οι πόροι και οι ρωγμές στο ρήγμα πληρώνονται σταδιακά με ρευστό. (Γ) Όταν η πίεση των πόρων αυξάνεται σε μια συγκεκριμένη τιμή, το ρήγμα ολισθαίνει επειδή η πραγματική κανονική τάση και στις δύο πλευρές είναι μικρότερη από την τάση διάτμησης τότε, προκαλείται σεισμός. (He M, Li Q and Li X, 2020)

Ως επί το πλείστον, οι επαγόμενοι σεισμοί που προκαλούνται από έγχυση ρευστού, ιδιαίτερα εκείνοι που είναι μεγαλύτεροι από το M 1.0, ανακουφίζουν τις τεκτονικές τάσεις που συσσωρεύονται κατά μήκος προϋπαρχόντων ρηγμάτων, αλλά η

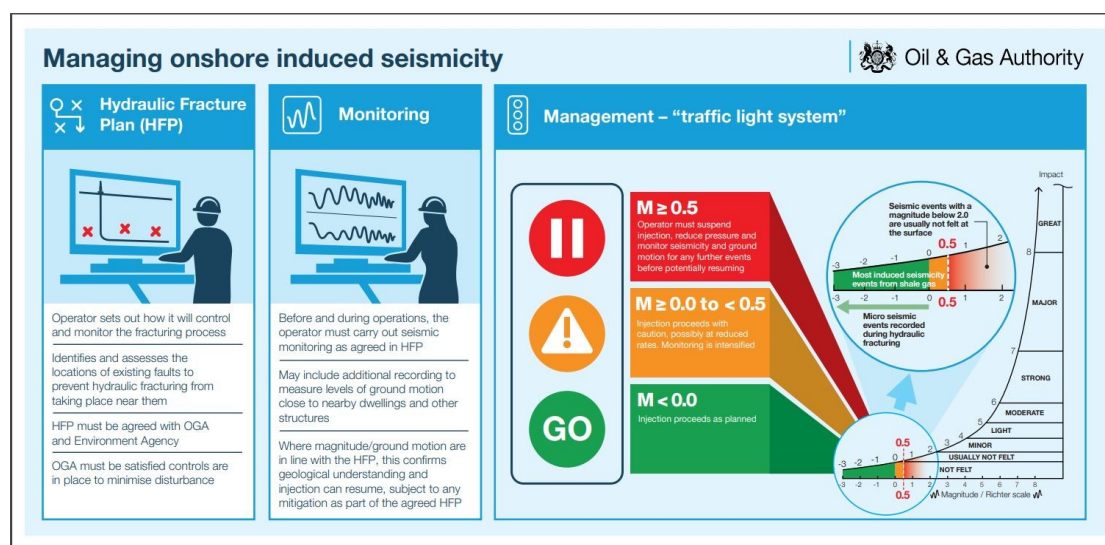
εμφάνισή τους επιταχύνθηκε από έναν μηχανισμό ενεργοποίησης όπως η αύξηση της πίεσης πόρων λόγω της έγχυσης. Με άλλα λόγια, οι φυσικοί τεκτονικοί σεισμοί μπορεί να έχουν συμβεί και σε μια περιοχή με επαγόμενη σεισμικότητα, αν και όχι απαραίτητα με τον ίδιο ακριβώς τρόπο ή χρονικό πλαίσιο. Αυτό το τελευταίο σημείο είναι κάπως αμφιλεγόμενο και δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί πόσο χρόνο θα χρειαζόταν για να εκτονωθούν φυσικά οι τεκτονικές τάσεις ελλείψει μηχανισμού ενεργοποίησης, επειδή η επανεργοποίηση των ρηγμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις επί τόπου συνθήκες πίεσης και από το πόσο κοντά στην κατάρρευση ήταν αρχικά τα αιτιολογικά ρήγματα. (*A Resource of Technical and Regulatory Considerations Associated with Fluid Injection, 2021*)

### **2.3 Σύστημα φωτεινού σηματοδότη ως μέθοδος άμεσου μετριασμού για την επαγόμενη σεισμικότητα.**

#### **2.3.1 Σύστημα φωτεινού σηματοδότη**

Για τον μετριασμό των πιθανών συνεπειών της επαγόμενης σεισμικής δραστηριότητας, η εκτίμηση της επικινδυνότητας είναι απαραίτητη. Ένα σύστημα φωτεινών σηματοδοτών (TLS), που αναφέρεται επίσης ως πρωτόκολλο φωτεινών σηματοδοτών κυκλοφορίας (TLP), είναι ένα βαθμονομημένο σύστημα ελέγχου που χρησιμοποιείται ως μέθοδος άμεσου μετριασμού για την επαγόμενη σεισμικότητα. Τα πλεονεκτήματά της συνίστανται στην παροχή συνεχούς και σε πραγματικό χρόνο παρακολούθησης και διαχείρισης της επίγειας δόνησης της επαγόμενης σεισμικής για συγκεκριμένες τοποθεσίες. Η TLS εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το 2005 σε ένα ενισχυμένο γεωθερμικό εργοστάσιο στην Κεντρική Αμερική. Για τις εργασίες πετρελαίου και φυσικού αερίου, η πιο ευρέως εφαρμοζόμενη τροποποιείται από το σύστημα που χρησιμοποιείται στο Ηνωμένο Βασίλειο. Κανονικά υπάρχουν δύο τύποι TLS - ο πρώτος ορίζει διαφορετικά όρια, συνήθως τοπικά μεγέθη σεισμού (ML) ή κίνηση εδάφους (PGV) από το μικρότερο στο μεγαλύτερο. Εάν η προκαλούμενη σεισμική κατάσταση φθάσει στα μικρότερα όρια, οι τροποποιήσεις των πράξεων θα πρέπει να εφαρμοστούν από τους ίδιους τους φορείς εκμετάλλευσης και οι ρυθμιστικές αρχές θα πρέπει να ενημερώνονται. Εάν η προκαλούμενη σεισμικότητα φτάσει στα μεγαλύτερα όρια, οι λειτουργίες θα πρέπει να τερματιστούν αμέσως. Ο δεύτερος τύπος συστήματος φωτεινών σηματοδοτών ορίζει μόνο ένα όριο. Εάν

επιτευχθεί αυτό το όριο, οι λειτουργίες διακόπτονται. Αυτό ονομάζεται επίσης "σύστημα διακοπής φωτός". Τα κατώτατα όρια για το σύστημα φωτεινών σηματοδοτών ποικίλλουν μεταξύ και εντός των χωρών, ανάλογα με την περιοχή. Ωστόσο, η εκτίμηση κινδύνου και η ανοχή στην επαγόμενη σεισμικότητα είναι υποκειμενική και διαμορφώνεται από διάφορους παράγοντες όπως η πολιτική, η οικονομία και η κατανόηση από το κοινό. (Walters, Randi Jean; Zoback, Mark D.; Baker, Jack W.; Beroza, Gregory C., 2015)



**Εικόνα 9** Διαχείριση της επαγόμενης σεισμικότητας στην επιφάνεια της Γης (OGA Infographic. Source: gov.uk)

Σύμφωνα με την Εικόνα 9, η διαχείριση της επαγόμενης σεισμικότητας, περιλαμβάνει:

Σχέδιο Υδραυλικής ρωγμάτωσης HFP (Hydraulic Fracture Plane):

- Ο χειριστής καθορίζει πώς θα ελέγχει και θα παρακολουθεί τη διαδικασία υδραυλικής ρωγμάτωσης.
- Εντοπίζει και αξιολογεί τη θέση υπαρχόντων ρηγμάτων για να αποτρέψει την υδραυλική στερέωση κοντά τους.
- Το HFP πρέπει να συμφωνηθεί με την OGA και τον οργανισμό Περιβάλλοντος.
- Το OGA πρέπει να είναι ικανοποιημένο ότι οι έλεγχοι είναι σε θέση να ελαχιστοποιήσουν τις διαταραχές.
- 

Παρακολούθηση (Monitoring)



- Πριν και κατά τη διάρκεια των εργασιών, ο χειριστής πρέπει να πραγματοποιεί σεισμική παρακολούθηση όπως συμφωνήθηκε στο HFP.
- Μπορεί να περιλαμβάνει επιπλέον εγγραφή για τη μέτρηση των επιπέδων κίνησης του εδάφους κοντά σε κοντινά σπίτια και άλλες κατασκευές.
- Όπου η κίνηση μεγέθους / εδάφους ευθυγραμμίζεται με το HFP, αυτό επιβεβαιώνει ότι η γεωλογική υποβάθμιση και η έγχυση μπορεί να συνεχιστεί, υπό την επιφύλαξη τυχόν μετριασμού ως μέρος του συμφωνημένου HFP.

Σύστημα διαχείρισης φωτεινού σηματοδότη σε σχέση με το μετρούμενο σεισμικό μέγεθος

- $M \geq 0.5$ : Ο χειριστής πρέπει να αναστείλει την έγχυση, για να μειώσει την πίεση και να παρακολουθήσει τη σεισμικότητα και την κίνηση του εδάφους για τυχόν περαιτέρω γεγονότα που ενδέχεται να συνεχιστούν.
- $M \geq 0.0$  έως  $< 0.5$ : Η έγχυση προχωρά με προσοχή, πιθανώς με μειωμένους ρυθμούς. Η παρακολούθηση εντείνεται.
- $M < 0.0$ : Η έγχυση προχωρά όπως σχεδιάστηκε.

### 2.3.2 Συστήματα φωτεινού σηματοδότη σε όλο το κόσμο

*Πίνακας 3 Συστήματα φωτεινού σηματοδότη σε όλο το κόσμο (Kao, Hong, 2019)*

Χώρα	Τοποθεσία	Λειτουργία
Ελβετία	Βασίλεια	Βελτιωμένο γεωθερμικό σύστημα
Ηνωμένο Βασίλειο	Σε όλη την επικράτεια	Υδραυλική ρωγμάτωση σχιστολιθικού αερίου/ πετρελαίου
ΗΠΑ	Κολοράντο	Διάθεση λυμάτων/ Υδραυλική ρωγμάτωση
ΗΠΑ	Οκλαχόμα	Διάθεση λυμάτων/ Υδραυλική ρωγμάτωση
ΗΠΑ	Οχάιο	Διάθεση λυμάτων/ Υδραυλική ρωγμάτωση
Καναδάς	Fox Creek Area, Αλμπέρτα	Υδραυλική ρωγμάτωση
Καναδάς	Red Deer Area, Αλμπέρτα	Υδραυλική ρωγμάτωση
Καναδάς	Βρετανική Κολούμπια	Υδραυλική ρωγμάτωση

## 2.4 Πρόσφατες διεθνείς έρευνες επιστημόνων για την επαγομένη σεισμικότητα που οφείλεται στην εξόρυξη υδρογονανθράκων μέσω της υδραυλικής ρωγμάτωσης.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες των *Robert J. Skoumal, Rosamiel Ries, Michael R. Brudzinski, Andrew J. Barbour, και Brian S. Currie, (2018)* η διάθεση λυμάτων είναι γενικά αποδεκτή ως η κύρια αιτία του αυξημένου ποσοστού της σεισμικότητας στην Οκλαχόμα κατά την τελευταία δεκαετία, αλλά καμία ανάλυση σε εθνικό επίπεδο δεν έχει διερευνήσει τη συμβολή της υδραυλικής ρωγμάτωσης (HF) στην παρατηρούμενη σεισμικότητα ή τον σεισμικό κίνδυνο. Χρησιμοποιώντας έναν ενισχυμένο κατάλογο σεισμικότητας που δημιουργήθηκε με αντιστοίχιση προτύπων πολλαπλών σταθμών από το 2010 έως το 2016 και όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες υδραυλικής ρωγμάτωσης, εντοπίστηκαν 274 γεωτρήσεις HF που συσχετίζονται χωροχρονικά με την έκρηξη της σεισμικότητας. Η πλειοψηφία των περιπτώσεων σεισμικότητας που προκαλούνται από HF εμφανίστηκαν στο SCOOP (Sooner Trend (oil field), Anadarko (basin), Canadian and Kingfisher (counties))/ STACK (South Central Oklahoma Oil Province), αλλά εντοπίστηκαν επίσης εξέχουσες περιπτώσεις στη λεκάνη Arkoma και μερικές πιο περίπλοκες πιθανές περιπτώσεις κατά μήκος της άκρης της πλατφόρμας Anadarko. Για περιπτώσεις HF όπου έχουμε πρόσβαση σε παραμέτρους έγχυσης, η μοντελοποίηση υποδηλώνει ότι οι πορο-ελαστικές πιέσεις είναι πιθανώς υπεύθυνες για τη σεισμικότητα, αλλά δεν μπόρεσαν να αποκλείσουν τις άμεσες επιπτώσεις της πίεσης των πόρων ως παράγοντα που συμβάλλει σε αυτή. Σε όλες τις 16 περιοχές που εντοπίστηκαν, ποσοστό  $\geq 75\%$  της σεισμικής κατάστασης συσχετίστηκε με τα αναφερόμενα πηγάδια HF. Σε ορισμένες περιοχές, ποσοστό  $>95\%$  της σεισμικής κατάστασης συσχετίζεται με πηγάδια HF και  $>50\%$  των φρεατίων HF που συσχετίζονται με τη σεισμικότητα. Συνολικά, βρέθηκαν  $\sim 700$  σεισμοί που προκλήθηκαν από HF με  $M \geq 2.0$ , συμπεριλαμβανομένων 12 γεγονότων με  $M$  3.0-3.5. Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν κρατικούς κανονισμούς που εφαρμόστηκαν το 2018 και απαιτούν από τους φορείς εκμετάλλευσης στο SCOOP/STACK να αναλάβουν δράση εάν ένας σεισμός μεγέθους  $M > 2$  θα μπορούσε να έχει σημαντικό αντίκτυπο στις μελλοντικές λειτουργίες.

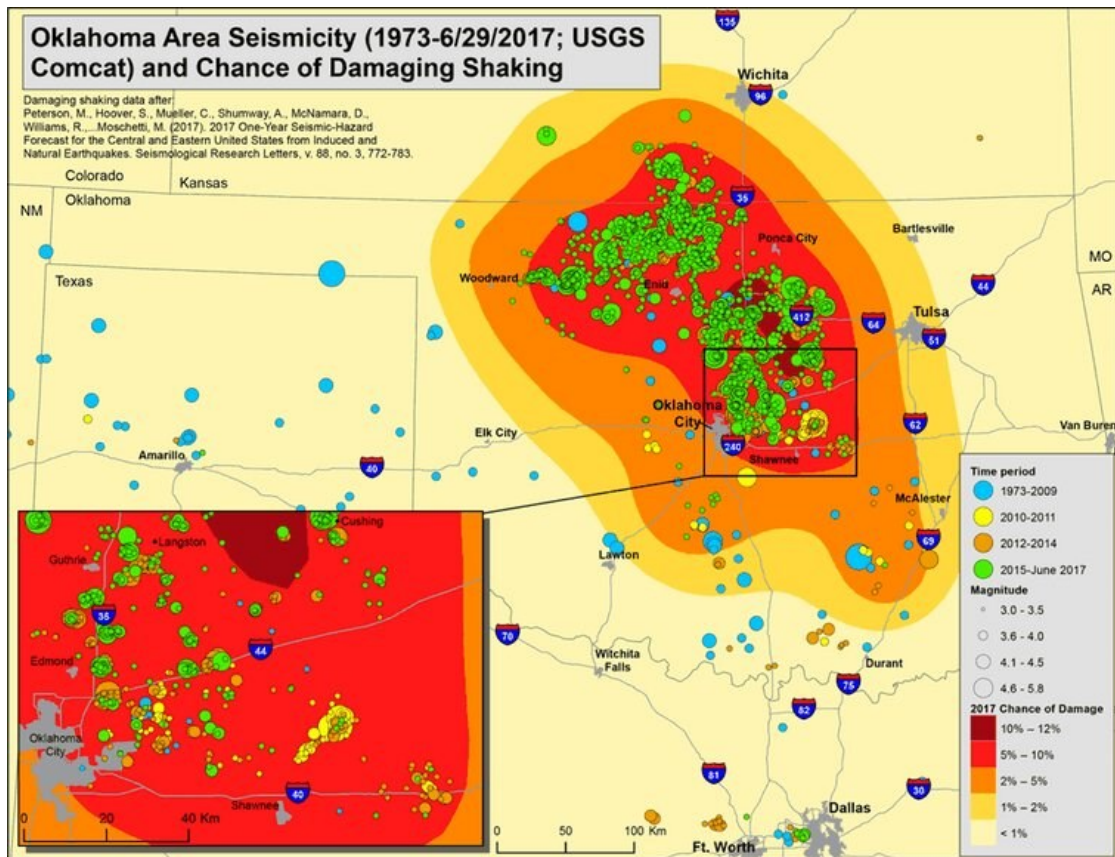
Σύμφωνα με πρόσφατη έρευνα των *David Dempsey and Jeremy Riffault, (2019)* όταν η επαγομένη σεισμικότητα που προκαλείται από έγχυση θέτει σε κίνδυνο τις κοινότητες, είναι σκόπιμο να μειωθεί το ποσοστό έγχυσης ή να σταματήσουν οι

λειτουργίες. Αυτό ισχύει τόσο για μεμονωμένα πηγάδια όσο και για συμπλέγματα φρεατίων, όπως αυτά εντός της περιοχής ενδιαφέροντος για την ενεργοποίηση της σεισμικότητας στη Δυτική Οκλαχόμα, όπου το 2016 επιβλήθηκε εντολή μείωσης του όγκου κατά 40% από την κρατική ρυθμιστική αρχή. Ποσοτικοποιήθηκε πώς η επαγόμενη σεισμικότητα ανταποκρίνεται σε μια μείωση της έγχυσης. Εισήχθησαν μοντέλα διάχυσης πίεσης σε εξιδανικευμένες γεωμετρίες σε συνδυασμό με σταθερή κατάσταση υπό πίεση και μοντέλα σεισμικής ενεργοποίησης. Διαπιστώθηκε ότι η καθυστέρηση στην έναρξη της σεισμικής δραστηριότητας και στη συνέχεια στη συμπεριφορά μετά την επαγωγή – αποσύνθεση, μερικές φορές ηρεμεί, και η ανάκτηση του ποσοστού σεισμικής δραστηριότητας εξαρτάται από την κρίσιμη πίεση ενεργοποίησης και από τις παραμέτρους διάχυσης. Προσάρμοσαν το μοντέλο τους για να αναπαράξουν το χρονοδιάγραμμα της έναρξης, της αιχμής και του πρόσφατου ρυθμού μείωσης της σεισμικής κατάστασης που προκλήθηκε από την έγχυση λυμάτων στη Δυτική Οκλαχόμα. Η ανάλυσή τους υποδηλώνει ότι η διάχυση στο σχηματισμό Arbuckle είναι υψηλή (μεταξύ 44 και 277 m<sup>2</sup>/s). Η κρίσιμη πίεση ενεργοποίησης συνάγεται ότι είναι μεταξύ 0,021 και 0,077 MPa, και η υπερπίεση υγρών σε βάθος 4,5 χιλιομέτρων εκτιμάται ότι έχει αυξηθεί έως και 0,190 MPa. Οι συγγραφείς προσομοίωσαν τη μελλοντική σεισμικότητα μέχρι το 2025 για τρία πιθανά σενάρια. Ο καθορισμός του ποσοστού έγχυσης του 2018, μικρότερος από το όριο που επιβλήθηκε από την κρατική ρυθμιστική αρχή, οδηγεί σε μεγάλη πιθανότητα περαιτέρω σεισμών μεγέθους,  $M \geq 5$ . Αυτό υποδηλώνει ότι η εντολή μείωσης του όγκου στη Δυτική Οκλαχόμα είναι, επί του παρόντος, ανεπαρκής.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες των *Globe and Mail*, (2018) τρία χρόνια αφότου ξεκίνησε η υδραυλική ρωγμάτωση για φυσικό αέριο γύρω από την κεντρική κοινότητα Αλμπέρτα του Fox Creek, ο αριθμός των σεισμών στην περιοχή άρχισε ξαφνικά να αυξάνεται, συνηγορώντας στη σχέση αιτίας-αποτελέσματος μεταξύ fracking και σεισμών. Ένας σεισμός μεγέθους 4,8 που έπληξε την πόλη τον Ιανουάριο του 2016, οδήγησε στο κλείσιμο ενός κοντινού πηγαδιού φυσικού αερίου.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες του *Foulger*, (2019) στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 10) παρατίθεται η επαγόμενη σεισμικότητα με βάση την χρονική περίοδο από το 1973-2009 (μπλε κύκλοι), από το 2010-2011 (κίτρινοι κύκλοι), από το 2012-2014 (πορτοκάλι κύκλοι) και από το 2015 έως τον Ιούνιο του 2017 (πράσινοι κύκλοι). Το μέγεθος των σεισμών είναι ανάλογο με την διάμετρο των κύκλων.





**Εικόνα 10** Κίνδυνος ζημιάς σε ακίνητα από εκατοντάδες σεισμούς πάνω από το μέγεθος 3 σε μια μεγάλη περιοχή της Οκλαχόμα. (Credit: US Geological Survey/Wikimedia Commons).

Παρατίθεται επίσης και η χωρική κατανομή του ποσοστού της πιθανής ύπαρξης ζημιών/καταστροφών με την αντίστοιχη χρωματική κλίμακα.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (*Globe And Mail*, 2016), τα έγγραφα τα οποία αποκτήθηκαν μέσω της νομοθεσίας περί ελευθερίας της πληροφόρησης, δείχνουν ότι οι αξιωματούχοι της BC Hydro ανησυχούν εδώ και αρκετά χρόνια ότι το φράξιμο πολύ κοντά στο φράγμα Peace Canyon στη βόρεια Βρετανική Κολομβία μπορεί να προκαλέσει την αστοχία του φράγματος και υπάρχουν άμεσες και μελλοντικές δυνατότητες κινδύνους για τη δεξαμενή, το φράγμα και την υποδομή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της BC Hydro ως αποτέλεσμα ενός κοντινού έργου μεθανίου με άνθρακα. Επιπλέον, οι σεισμοί που προκαλούνται από ανθρώπινη δραστηριότητα μπορεί να είναι μεγαλύτεροι από τα αρχικά κριτήρια σχεδιασμού του φράγματος.

Σύμφωνα με μελέτη του 2014 (*HAILEY BRANSON-POTTS*, 2014) η Oklahoma είχε μέσο όρο 30 ετών από δύο σεισμούς μεγέθους 3,0 ή υψηλότερους

ετησίως, αλλά τα τελευταία πέντε χρόνια, καταγράφηκαν χιλιάδες σεισμοί - μια άνευ προηγουμένου αύξηση που την έχει καταστήσει τη δεύτερη πιο σεισμικά ενεργή περιοχή στις ηπειρωτικές Ηνωμένες Πολιτείες, πίσω από την Καλιφόρνια. Οι επιστήμονες δεν έχουν παρατηρήσει ποτέ ένα τόσο δραματικό σμήνος σεισμών, με πιο πιθανή αιτία της πρόσφατης αύξησης να αποτελεί τα υπόγεια φρεάτια εγχύσεων που διανοίχθηκαν από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου με περίπου το 80% της πολιτείας να βρίσκεται σε απόσταση 9 μιλίων, σύμφωνα με τη γεωλογική έρευνα της Οκλαχόμα.

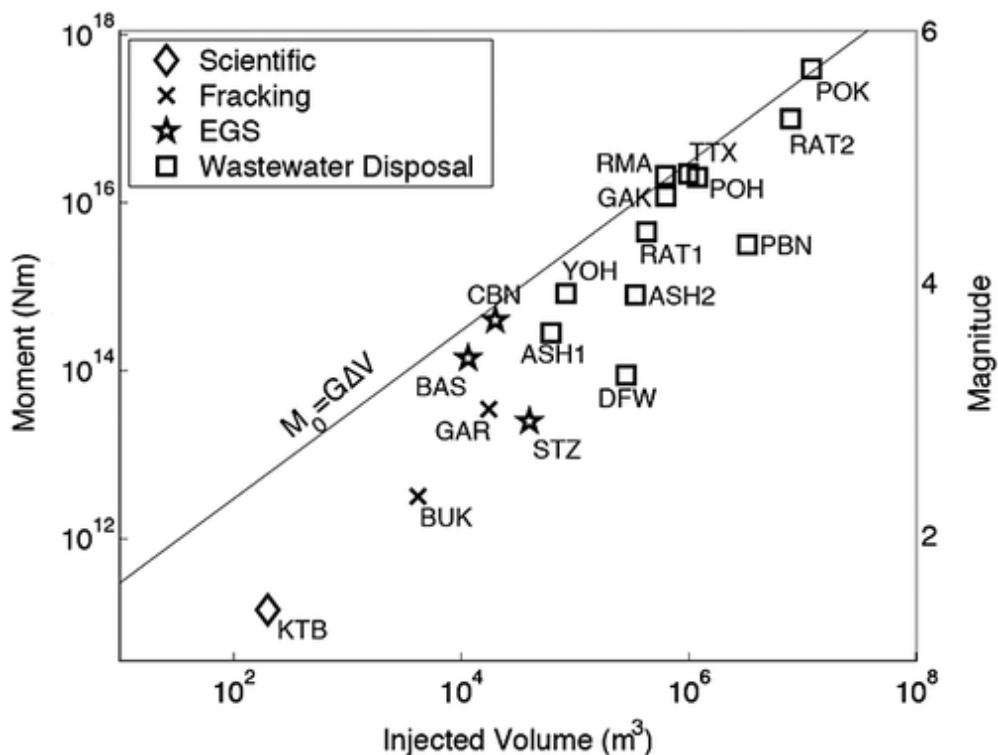
Σύμφωνα με παλαιότερη έρευνα (Denver Post, November 2016) δεκάδες κτίρια υπέστησαν «σημαντική ζημιά» μετά από σεισμό μεγέθους 5,0, ο οποίος ήταν ο τρίτος στην Οκλαχόμα τη χρονιά εκείνη με μέγεθος 5,0 ή μεγαλύτερο, που χτύπησε το Κουσίνγκ, την Οκλαχόμα, έναν από τους βασικούς κόμβους πετρελαίου στον κόσμο, με τον διευθυντή της πόλης Cushing να λέει ότι 40 έως 50 κτίρια υπέστησαν ζημιές. Η πολιτεία ωστόσο είχε χιλιάδες σεισμούς τα τελευταία χρόνια, με σχεδόν όλους να εντοπίζονται στην υπόγεια έγχυση αποβλήτων με τον κύριο σεισμό να βρίσκεται στο κέντρο, 1 μίλι δυτικά του Cushing και περίπου 25 μίλια νότια από όπου ένας σεισμός μεγέθους 4,3 προκάλεσε το κλείσιμο αρκετών πηγαδιών το διάστημα εκείνο.

Σύμφωνα με προηγούμενες έρευνες (PBS, September 2018) διαπιστώθηκε ότι η διάσπαση των φρεατίων έγχυσης αποβλήτων μπορεί να προκαλέσει σεισμούς έως και 10 χιλιόμετρα (6 μίλια) μακριά και σε αντίθεση με την επικρατούσα άποψη, η έγχυση υγρών σε ιζηματογενή πετρώματα παρά το σκληρότερο υποκείμενο βράχο, συχνά δημιουργεί μεγαλύτερους και πιο απομακρυσμένους σεισμούς.

Μια μελέτη του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια (Guardian, July 2013) διαπιστώνει ότι η άντληση νερού υπόγεια - για παράδειγμα σε σχιστόλιθο - μπορεί να οδηγήσει σε επικίνδυνους σεισμούς ακόμη και σε περιοχές που δεν είναι επιρρεπείς σε δονήσεις, αποδυναμώνοντας προϋπάρχοντα υπόγεια ρήγματα και καθιστώντας τα ευάλωτα σε πυροδοτήσεις σεισμών χιλιάδες μίλια μακριά.

Το παρακάτω σχήμα (A. McGarr, 2014) δείχνει τη μέγιστη σεισμική ροπή ως συνάρτηση του συνολικού όγκου του υγρού που εγχύθηκε μέχρι το χρόνο του μεγαλύτερου επαγόμενου σεισμού. Για τα περισσότερα από τα ιστορικά περιπτώσεων που παρουσιάζονται εδώ, η έγχυση είναι είτε κάτω από ένα φρεάτιο είτε κάτω από αρκετά φρεάτια το ένα κοντά στο άλλο και έτσι η σχέση μεταξύ της δραστηριότητας έγχυσης και των σεισμών που προκύπτουν είναι συνήθως απλή. Ωστόσο, για πολλά

από τα ιστορικά των περιπτώσεων, τα φρεάτια έγχυσης σε διαφορετικές τοποθεσίες στην επίκεντρο περιοχή μιας σεισμικής ακολουθίας μπορεί να συνέβαλαν στις αυξήσεις της πίεσης των πόρων που ευθύνονται για τους σεισμούς. Αυτές οι περιπτώσεις είναι πιο δύσκολες λόγω αβεβαιοτήτων σχετικά με τις υδρολογικές συνθήκες που ενδέχεται να επηρεάσουν τις αλλαγές πίεσης των πόρων στις ζώνες του ρήγματος. Σε αυτήν τη μελέτη, ένα σημαντικό κριτήριο για να αποφασιστεί εάν μία συγκεκριμένη γεώτρηση έπαιξε ρόλο στην πρόκληση της σεισμικής ακολουθίας ήταν η χωρική σχέση των θέσεων του σεισμού με το πηγάδι (π.χ., Hsieh and Bredehoeft, 1981). Δηλαδή, ένα φρεάτιο θεωρείται ότι συνέβαλε στην αύξηση της πίεσης των πόρων που προκάλεσε την ακολουθία, εάν οι θέσεις μερικών από τους σεισμούς υποδεικνύουν πιθανή σχέση με την έγχυση υγρού.



**Εικόνα 11** Μέγιστη σεισμική ροπή και μέγεθος σεισμού ως συνάρτηση του συνολικού όγκου του εγχεόμενου υγρού, από την έναρξη της έγχυσης έως την ώρα του μεγαλύτερου προκληθέντος σεισμού. Η εξίσωση κατά μήκος της συμπαγούς γραμμής συσχετίζει την ανώμαλη σεισμική ροπή με το προϊόν του συντελεστή ακαμψίας και του συνολικού όγκου του εγχεόμενου υγρού.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## Επαγόμενη σεισμικότητα οφειλόμενη στην υδραυλική ρωγμάτωση στην Οκλαχόμα των ΗΠΑ

### 3.1 Επαγόμενη σεισμικότητα στην Οκλαχόμα των ΗΠΑ

#### 3.1.1 Κοινωνικά χαρακτηριστικά της πολιτείας Οκλαχόμα και η ενεργειακή της κατάσταση

Η Οκλαχόμα (Oklahoma) είναι πολιτεία που βρίσκεται στα νότια-κεντρικά των ΗΠΑ. Με εκτιμώμενο πληθυσμό 3.990.440 κατοίκων και έκταση 181.037 τετ. χλμ, η Οκλαχόμα είναι η 28<sup>η</sup> πιο πολυπληθής και η 20<sup>η</sup> σε έκταση πολιτεία. Η Οκλαχόμα ήταν η 46<sup>η</sup> πολιτεία που εισήλθε στην ένωση των ΗΠΑ. Όντας μεγάλος παραγωγός φυσικού αερίου, πετρελαίου και αγροτικών προϊόντων, η Οκλαχόμα βασίζεται στην πολιτική αεροπορία, την ενέργεια, τις τηλεπικοινωνίες και την βιοτεχνολογία. Διαθέτει μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες οικονομίες στη χώρα, και κατατάσσεται ανάμεσα στις κορυφαίες πολιτείες όσον αφορά την αύξηση του κατά κεφαλήν εισοδήματος και την αύξηση του ακαθάριστου εθνικού προϊόντος.

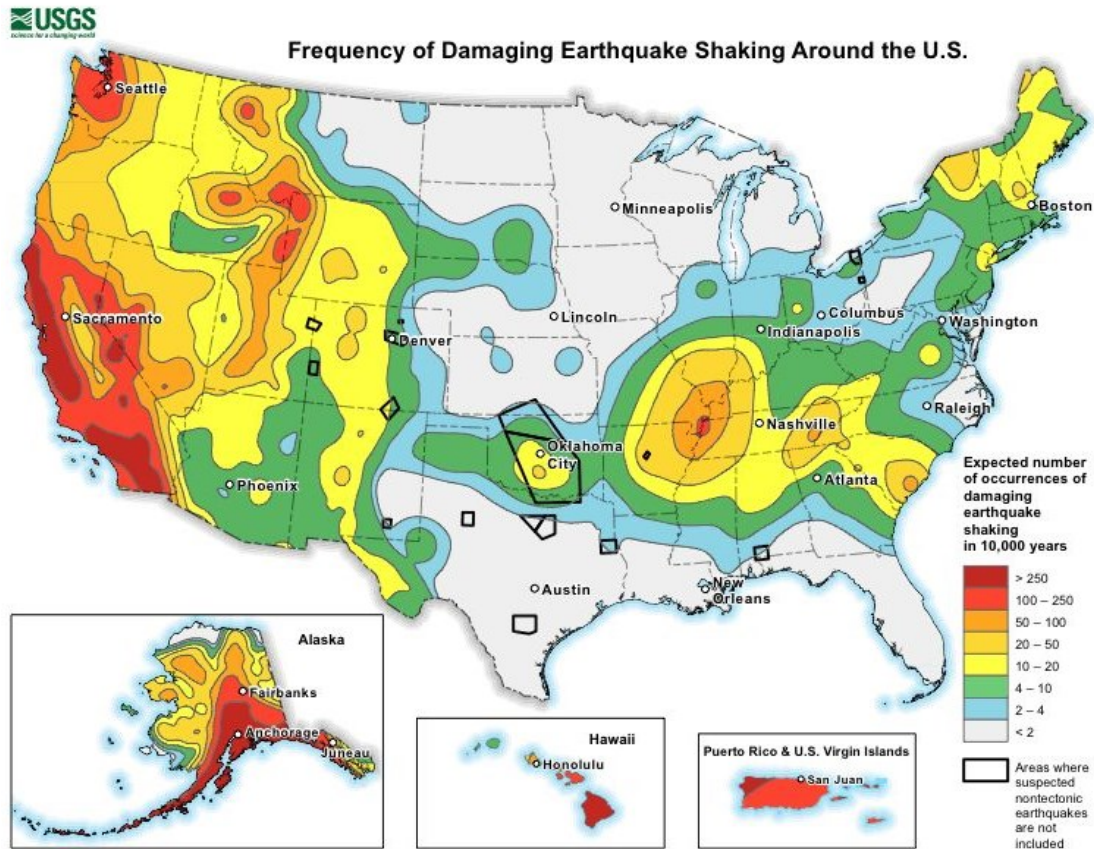
Η Οκλαχόμα είναι ο τρίτος μεγαλύτερος παραγωγός φυσικού αερίου της χώρας, ο πέμπτος μεγαλύτερος παραγωγός πετρελαίου, και έχει τον δεύτερο μεγαλύτερο αριθμό ενεργών πετρελαιοπηγών, ενώ είναι πέμπτη σε αποθέματα πετρελαίου. Ενώ η πολιτεία ήταν όγδοη στην απόδοση εγκατεστημένων συστημάτων αιολικής ενέργειας το 2011, είναι σε χαμηλή θέση ανάμεσα στις πολιτείες σε ότι αφορά στην χρήση ανανεώσιμης ενέργειας, με το 94% του ηλεκτρισμού να παράγεται από μη ανανεώσιμες πηγές το 2009, συμπεριλαμβανομένου 25% από τον άνθρακα και 46% από φυσικό αέριο. Βρισκόμενη στην 13<sup>η</sup> θέση για την κατά κεφαλήν συνολική ενεργειακή κατανάλωση το 2009, το ενεργειακό κόστος της Οκλαχόμα ήταν το 8<sup>ο</sup> χαμηλότερο στη χώρα. Συνολικά, η βιομηχανία πετρελαϊκής ενέργειας συνεισφέρει 35 δισεκατομμύρια δολάρια στο ΑΕΠ της Οκλαχόμα, και οι υπάλληλοι εταιρειών σχετικών με το πετρέλαιο κερδίζουν κατά μέσον όρο το διπλάσιο από το τυπικό ετήσιο εισόδημα της πολιτείας. Το 2009, η πολιτεία είχε 83.700 εμπορικές πετρελαιοπηγές που απέφεραν 65,374 εκατομμύρια βαρέλια (10.393.600 m<sup>3</sup>) αργού πετρελαίου. Ποσοστό 8,5% της προμήθειας φυσικού αερίου της χώρας προέρχεται

από την Οκλαχόμα, με παραγωγή 1,673 τρισεκατομμυρίων κυβικών ποδιών (47,4 km<sup>3</sup>) το 2009. Σύμφωνα με το Forbes Magazine, η Devon Energy Corporation με έδρα την Οκλαχόμα Σίτι, η Chesapeake Energy Corporation, και η SandRidge Energy Corporation είναι οι μεγαλύτερες ιδιωτικές εταιρείες στη χώρα, σχετικές με το πετρέλαιο, και όλες οι εταιρείες της Οκλαχόμα που ανήκουν στη λίστα Fortune 500 σχετίζονται με την ενέργεια. Η ONEOK της Τάλσα και η Williams Companies είναι η μεγαλύτερη και η δεύτερη μεγαλύτερη εταιρεία αντίστοιχα, κατατασσόμενες επίσης ως δεύτερη και τρίτη μεγαλύτερη εταιρεία στη χώρα στον τομέα της ενέργειας, σύμφωνα με το Fortune Magazine. Το περιοδικό επίσης τοποθέτησε την Devon Energy ως δεύτερη μεγαλύτερη εταιρεία στην βιομηχανία εξόρυξης και παραγωγής αργού πετρελαίου στη χώρα, ενώ η Chesapeake Energy κατατάσσεται 7<sup>η</sup> αντίστοιχα σε αυτό τον τομέα και η Oklahoma Gas & Electric κατατάσσεται 25<sup>η</sup> μεγαλύτερη εταιρεία κοινής ωφέλειας αερίου και ηλεκτρισμού.

### **3.1.2 Υδραυλική ρωγμάτωση στην Οκλαχόμα**

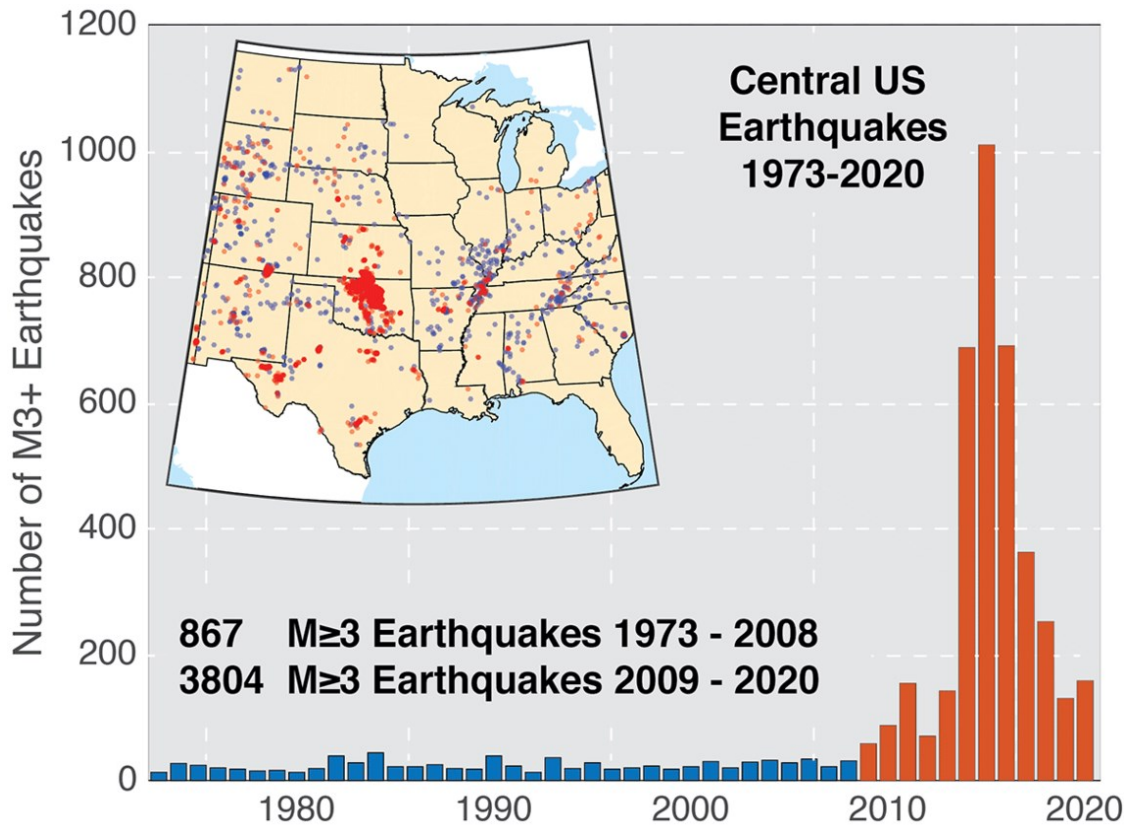
Ο αριθμός των σεισμών στις κεντρικές πολιτείες των ΗΠΑ αυξήθηκε δραματικά την τελευταία δεκαετία (Εικόνες 12-15). Μεταξύ των ετών 1973–2008, υπήρξαν κατά μέσο όρο 25 σεισμοί μεγέθους  $\geq 3$  στις κεντρικές και ανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες. Από το 2009, τουλάχιστον 58 σεισμοί αυτού του μεγέθους έχουν εμφανιστεί κάθε χρόνο και τουλάχιστον 100 σεισμοί αυτού του μεγέθους κάθε χρόνο από το 2013. Ο ρυθμός κορυφώθηκε το 2015 με 1010 σεισμούς  $M > 3$ . Από το 2015, το ποσοστό των σεισμών έχει μειωθεί. Το 2019, 130 σεισμοί  $M > 3$  εμφανίστηκαν στην ίδια περιοχή. Ωστόσο, το ποσοστό αυτό είναι πολύ υψηλότερο από το μέσο όρο των 25 σεισμών ετησίως. Οι περισσότεροι από αυτούς τους σεισμούς βρίσκονται στην κλίμακα μεγέθους 3–4 - αρκετά μεγάλοι για να γίνουν αισθητοί από πολλούς ανθρώπους - αλλά αρκετά μικροί για να προκαλέσουν ζημιές. Οι ζημιές προκλήθηκαν από μερικά από τα μεγαλύτερα γεγονότα, συμπεριλαμβανομένων των σεισμών  $M=5.8$  (Pawnee) και  $M=5.0$  (Cushing Oklahoma) που σημειώθηκαν το 2016. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η περίπτωση της Οκλαχόμα στις ΗΠΑ, όπου παρατηρείται μεγάλη αύξηση της σεισμικότητας στην περιοχή άντλησης. Η αύξηση της σεισμικότητας είναι φανερή τα τελευταία χρόνια που εντατικοποιήθηκε η παραγωγή σχιστολιθικού αερίου. Μέχρι στιγμής υπάρχουν περίπου 7000 παραγωγικές γεωτρήσεις στην περιοχή. Για

παράδειγμα, ο ρυθμός σεισμών με μεγέθη  $M \geq 4$  αυξήθηκε από ένα σεισμό ανά δεκαετία πριν από το 2009, σε 24 σεισμούς μόνο το 2014, δηλαδή αύξηση  $\sim 200\%$ .



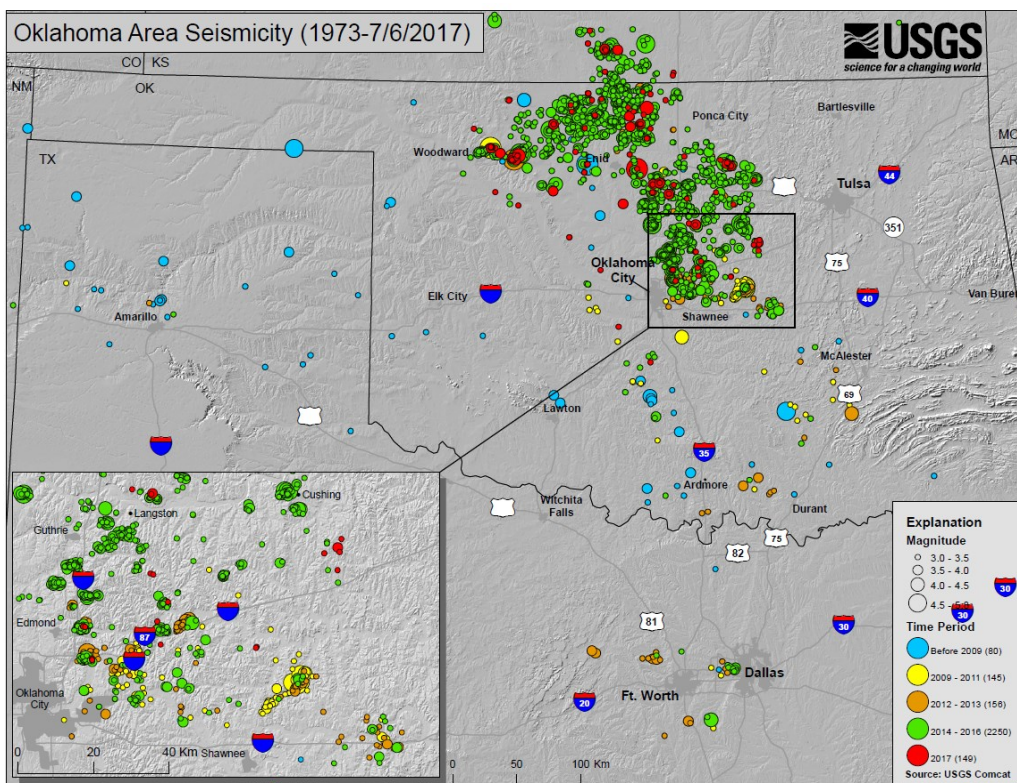
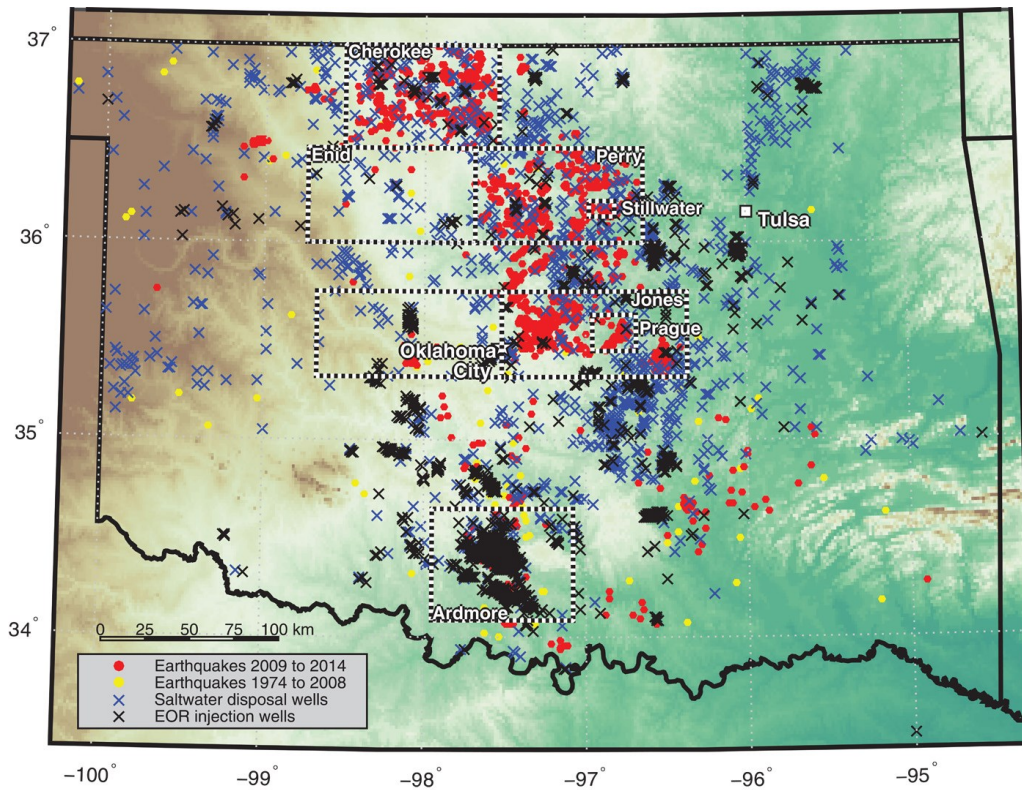
**Εικόνα 12** Απεικόνιση της συχνότητας όπου οι επιστήμονες αναμένουν καταστροφικό σεισμό στην ευρύτερη περιοχή των ΗΠΑ (Δημόσια ερευνά USGS.) Οι περιοχές με το ίδιο χρώμα στον χάρτη πρέπει να αναμένουν παρόμοιο αριθμό περιστατικών καταστροφικών σεισμών. Ωστόσο, το επίπεδο ζημιών που προκλήθηκε από την μετακίνηση του εδάφους που σχετίζεται με κάθε σεισμό μπορεί να είναι πολύ διαφορετικό. Για παράδειγμα, ένας μικρότερος σεισμός που προκαλεί κάποια ζημιά σε μια μικρότερη περιοχή και ένας μεγαλύτερος σεισμός που προκαλεί εκτεταμένες ζημιές, και οι δύο υπολογίζονται ως περιστατικά καταστροφικού σεισμού.





**Εικόνα 13** Ετήσιος αριθμός σεισμών με μέγεθος 3,0 ή μεγαλύτερο στις κεντρικές και ανατολικές Ηνωμένες Πολιτείες, για την περίοδο 1973-2020. Ο ρυθμός των περίπου 25 σεισμών ετησίως, αυξήθηκε απότομα από το 2009 και μετά.

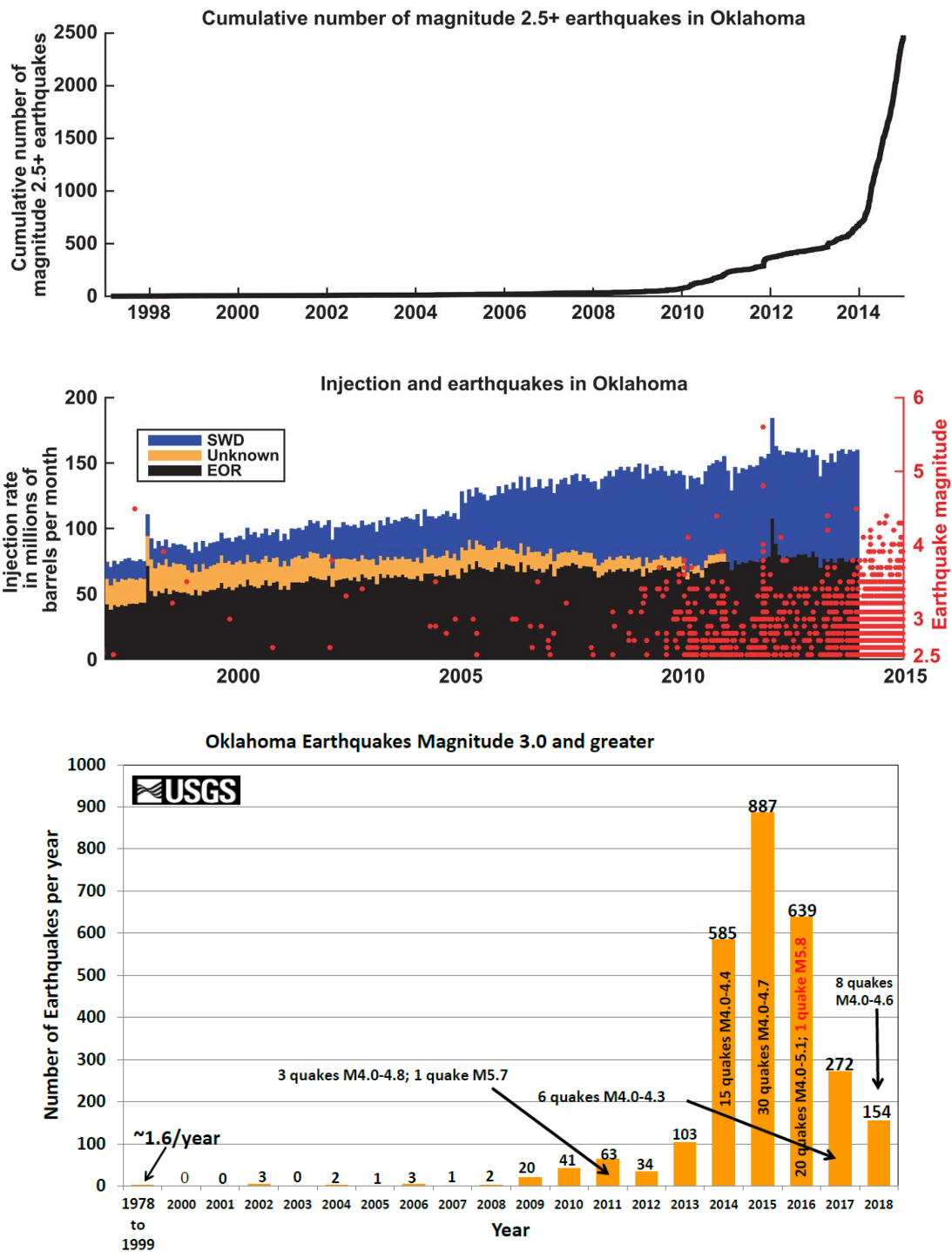
Στην πολιτεία της Οκλαχόμα που έχει τους περισσότερους σεισμούς στις ΗΠΑ, μόνο το 1-2% προέρχονται από την διαδικασία της υδραυλικής ρηγμάτωσης. Οι περισσότεροι σεισμοί προέρχονται από την έγχυση αποβλήτων πίσω στο υπέδαφος. Γεωτρήσεις πετρελαίου και αερίου στην Οκλαχόμα εξάγουν μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού – απομεινάρια αρχαίων ωκεανών. Η αυξημένη δραστηριότητα γεώτρησης σε υπόγεια υδατικά στρώματα με προηγμένες τεχνολογίες εξόρυξης έχει συμβάλει στην τεράστιων ποσοτήτων νερού τα τελευταία χρόνια. Τα αλμυρά απόνερα διοχετεύονται πίσω στο έδαφος κάτω από τους υδροφορείς γλυκού νερού. Το μεγαλύτερο μέρος εγχέεται στην ζώνη του Άρμπακλ, η οποία είναι μια ζώνη περίπου 2.100 μ. κάτω από το έδαφος, όπου αυτό το υπόστρωμα ασβεστόλιθου και δολομίτη απορρόφα τα απόνερα, που δεν περιέχει πετρέλαιο η αέριο. Η τριβή συνήθως κρατάει ενωμένες τις πλευρές ενός ρήγματος. Όμως η πίεση του νερού μειώνει την τριβή του ρήγματος, κάνοντάς το να γλιστρήσει και να απελευθερώσει ενέργεια ως σεισμική δόνηση.



**Εικόνα 14** (πάνω) Οι κίτρινοι κύκλοι αντιστοιχούν σε σεισμούς που έλαβαν χώρα από το 1974-2008. Οι κόκκινοι κύκλοι αντιστοιχούν σε σεισμούς που έλαβαν χώρα από το 2009-2014. Οι μπλε σταυροί αντιστοιχούν σε πηγάρδια διάθεσης αλμυρού νερού. Οι μαύροι σταυροί αντιστοιχούν σε πηγάρδια έγχυσης. (κάτω) Χωρική κατανομή των σεισμών στην ευρύτερη περιοχή.



Όπως φαίνεται ο συνολικός μηνιαίος όγκος έγχυσης στην πολιτεία της Οκλαχόμα διπλασιάστηκε σταδιακά από περίπου 80 εκατομμύρια βαρέλια/μήνα το 1997, σε περίπου 160 εκατομμύρια βαρέλια/μήνα το 2013, με σχεδόν όλη αυτή την αύξηση να προέρχεται από SWD και όχι EOR. Το μεγαλύτερο μέρος του SWD στο κέντρο της Οκλαχόμα εμφανίζεται στο Arbuckle Group που βρίσκεται κοντά στο κρυσταλλικό υπόγειο. Ορισμένες καταχωρίσεις στη βάση δεδομένων UIC είχαν εμφανή σφάλματα, είτε στα μηνιαία ποσοστά έγχυσης είτε στις τοποθεσίες των φρεατίων. Για παράδειγμα, ορισμένα πηγάδια εμφανίστηκαν πολλές φορές στη βάση δεδομένων. Σε άλλες περιπτώσεις, είτε οι θέσεις των πηγαδιών δεν αναφέρθηκαν είτε το γεωγραφικό πλάτος ή/και το γεωγραφικό μήκος τοποθετούσαν τα πηγάδια έξω από την Οκλαχόμα. Ευτυχώς, ο αθροιστικός όγκος της έγχυσης που σχετίζεται με αυτά τα φρεάτια είναι μόνο περίπου το 1% της έγχυσης σε όλη την χώρα τα τελευταία χρόνια. Οι υπερβολικά μεγάλοι μηνιαίοι όγκοι έγχυσης στη βάση δεδομένων διορθώθηκαν διορθώνοντας προφανή τυπογραφικά λάθη ή λαμβάνοντας τη μέση τιμή των πέντε παρακείμενων μηνών δεδομένων. Λιγότεροι από 100 μηνιαίοι όγκοι έγχυσης (από πάνω από 1,5 εκατομμύρια) διορθώθηκαν με αυτόν τον τρόπο. Γενικά, τα πιο πρόσφατα δεδομένα έγχυσης είναι πιο αξιόπιστα από τα παλαιότερα δεδομένα.



**Εικόνα 15** (πάνω) Αθροιστικός αριθμός σεισμών  $M \geq 2.5$  στην Οκλαχόμα από το 1997. (μέση) Ο αριστερός άξονας δείχνει το συνολικό συνδρασμένο ρυθμό έγχυσης όλων των φρεατίων UIC στην Οκλαχόμα ανά τύπο. Ο δεξιά άξονας δείχνει όλους τους σεισμούς στην πολιτεία κατά μέγεθος προς το χρόνο. Τα δεδομένα σεισμού έχουν ολοκληρωθεί έως το 2014. Τα δεδομένα έγχυσης είναι διαθέσιμα μόνο έως το 2013. (κάτω) Ετήσια συχνότητα εμφάνισης σεισμικών γεγονότων για την περίοδο 1978 – 2018.

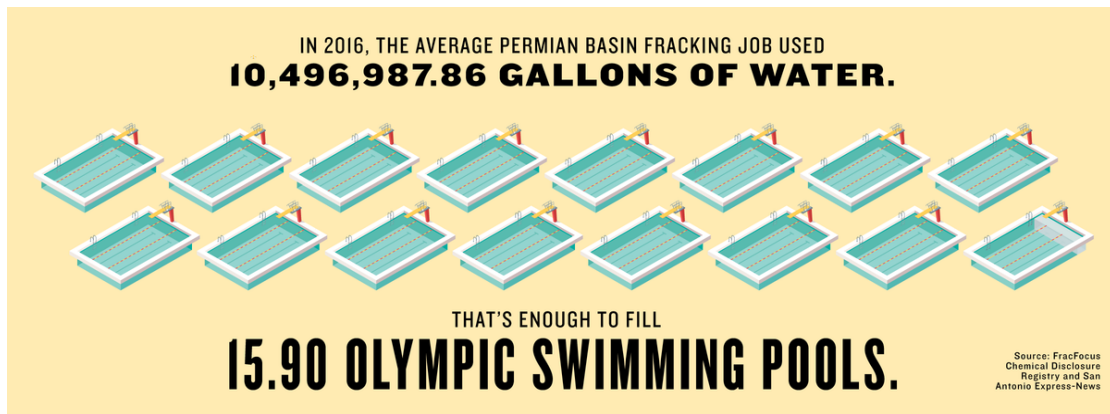
### 3.2 Επιπτώσεις στην κοινωνία της Οκλαχόμα

Οι σεισμικές δονήσεις στην Οκλαχόμα την τελευταία δεκαετία έχουν αυξηθεί δραματικά. Αυτό οφείλεται στην εξόρυξη υδρογονανθράκων μέσω της μεθόδου της υδραυλικής ρωγμάτωσης, μια μέθοδο η οποία έχει διαχρονικά δυναμικό χαρακτήρα στην συγκεκριμένη πολιτεία των ΗΠΑ. Τα έργα ενεργειακής ανάπτυξης βοηθούν στην δημιουργία θέσεων εργασίας αλλά και στην αύξηση των μισθών. Σε πολιτείες όπου οι υδρογονάνθρακες εξάγονται μέσω της υδραυλικής ρωγμάτωσης, υπάρχει αύξηση των μέσων εισοδημάτων κατά 10 έως 20 τοις εκατό.

Όπως αναφέρουν οι κάτοικοι της Οκλαχόμα, οι επαναλαμβανόμενοι σεισμοί έχουν μπει στην καθημερινότητα της ζωή τους. Αυτός όμως δεν σημαίνει ότι δεν τους προκαλούν φόβο ή νευρική υπερδιέγερση και πανικό. Ένα δυναμικό φαινόμενο όπου ακόμα και οι επιπτώσεις είναι πιο ορατές, πιο εκτεταμένες και έχουν προκαλέσει τραυματισμούς και θανάτους ανθρώπων, ενώ συνεπάγονται και τεράστιες οικονομικές ζημιές. Οι άμεσες βλάβες οφείλονται στη διέλευση των σεισμικών κυμάτων από το έδαφος στα θεμέλια, στους τοίχους και στη στέγη των κτιρίων.



**Εικόνα 16** Καταστροφή σε κτίρια στο Κιουίνγκ της Οκλαχόμα από τον σεισμό μεγέθους 5,0 στις 6 Νοεμβρίου 2016. Τα μη ενισχυμένα κτίρια και οι προσόψεις από τούβλα και πέτρινες τοιχοποιίες είναι ευάλωτα σε έντονες δονήσεις. Φωτογραφία από: Dolan Paris, USGS



*Εικόνα 17 Το 2016, χρησιμοποιήθηκαν για την διαδικασία της υδραυλικής ρωγμάτωσης 10,496,987.86 γαλόνια νερού τα οποία είναι αρκετά για να γεμίσουν 15.90 ολυμπιακές πισίνες. Η φωτογραφία αντιστοιχεί σε έρευνα της FracFocus.*

Ένα άλλο ζήτημα είναι η παροχή του νερού για οικιακή χρήση η οποία επηρεάζεται άμεσα με την διαδικασία της υδραυλικής ρωγμάτωσης και συγκεκριμένα με την σύσταση του ρευστού σε νερό. Κατά μέσο όρο, το ρευστό αποτελείται από 8 εκατομμύρια λίτρα νερού που ισοδυναμεί με την καθημερινή κατανάλωση 65000 ατόμων.

Επίσης υπαρκτός είναι ο κίνδυνος ρύπανσης των πηγών ύδρευσης λόγω των λυμάτων του ρευστού που εγχέονται πίσω στην γη μετά το πέρας της παραγωγής. Η διαδικασία της υδραυλικής ρωγμάτωσης όχι μόνο καταναλώνει μεγάλες ποσότητες γλυκού νερού, αλλά επιπλέον το νερό στη συνέχεια ρυπαίνεται και είναι πολύ τοξικό λόγω του ότι τα λύματα δεν χάνουν τις ιδιότητές τους. Τα χημικά που χρησιμοποιούνται στην υδραυλική ρωγμάτωση διαβαθμίζονται από το επικίνδυνο έως το ακραίο τοξικό και καρκινογόνο, όπως για παράδειγμα η βενζόλη και το μεθανικό οξύ.

Επιπλέον έχει παρατηρηθεί από τους κάτοικους ένα απρόβλεπτο φαινόμενο που συμβαίνει στις οικιακές παροχές νερού. Δηλαδή την ασυνήθιστη ρύπανση σε υψηλές συγκεντρώσεις μεθανίου στους υδροφορείς με αποτέλεσμα, όταν το νερό έρχεται σε επαφή με την φωτιά σε δοκιμές που έχουν γίνει να παρατηρούνται φλόγες (Εικόνα 18).



*Εικόνα 18* Κάτοικος της κομητείας Μπράντφορντ της Πενσυλβανίας, είναι σε θέση να αναφλέξει το νερό που βγαίνει από τη βρύση της κουζίνας του, λόγω του μεθανίου που έχει διαρρεύσει στη γεώτρησή της. Πολλά σπίτια σε αγροτικές περιοχές βασίζονται σε ιδιωτικές γεωτρήσεις για πόσιμο νερό. (© Les Stone Greenpeace)

Ένα άλλο σοβαρό πρόβλημα που απειλεί την υγεία των κατοίκων της Οκλαχόμα αποτελεί η συμβολή της διαδικασίας στην ατμοσφαιρική ρύπανση από την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, συμπεριλαμβανομένων των δραστηριοτήτων υδραυλικής ρωγμάτωσης. Η καύση (μια ελεγχόμενη φλόγα που χρησιμοποιείται για σκοπούς δοκιμών, ασφάλειας και διαχείρισης αποβλήτων), εξαερισμός (η άμεση απελευθέρωση αερίου στην ατμόσφαιρα), διαρροή, καύση και απελευθέρωση ρύπων καθ' όλη την παραγωγή, επεξεργασία, μετάδοση και διανομή πετρελαίου και το φυσικό αέριο είναι σημαντικές πηγές ατμοσφαιρικής ρύπανσης.

Το φυσικό αέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο, ένα ισχυρό αέριο θερμοκηπίου που παγιδεύει περισσότερο από 80 φορές περισσότερη θερμότητα από το διοξείδιο του άνθρακα. Ο τομέας πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι η μεγαλύτερη εγχώρια βιομηχανική πηγή ρύπανσης από μεθάνιο. Όταν το αέριο εκτοξεύεται, εξαερίζεται ή τυχαία διαρρεύσει, επιταχύνει τις δαπανηρές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην υγεία. Λειτουργίες πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπως η υδραυλική ρωγμάτωση, απελευθερώνουν επίσης πολλές τοξικούς ρυπαντές: βενζόλιο, τολουόλιο, αιθυλοβενζόλιο και ξυλόλιο, μικρά σωματίδια (PM2.5) υδρόθειο, σκόνη διοξειδίου του πυριτίου και οξείδια του αζώτου, καθώς και πτητικές οργανικές ενώσεις, οι οποίες παράγουν αιθαλομίχλη όταν συνδυάζονται.

Ένα ευρύ φάσμα επιπτώσεων στην υγεία σχετίζεται με την έκθεση σε αυτούς τους ατμοσφαιρικούς ρύπους, συμπεριλαμβανομένων ήπιων έως σοβαρών αναπνευστικών και νευρολογικών προβλημάτων, καρδιαγγειακών βλαβών, ενδοκρινικής διαταραχής, γενετικών ανωμαλιών, καρκίνου και πρόωρης θνησιμότητας. Εν τω μεταξύ, οι εργαζόμενοι της βιομηχανίας αντιμετωπίζουν ακόμη μεγαλύτερους κινδύνους από την επιτόπια έκθεση σε τοξικές χημικές ουσίες και άλλα αερομεταφερόμενα υλικά, συμπεριλαμβανομένης της πυριτίας (silica) (το κύριο συστατικό της άμμου στην υδραυλική ρωγμάτωση), τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε πνευμονική νόσο και καρκίνο όταν εισπνέονται.



***Εικόνα 19** Η παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου επιβαρύνει τους κατοίκους που εκτίθενται τακτικά σε ανθυγιεινά επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σύμφωνα με έκθεση που εκδόθηκε από περιβαλλοντική ομάδα. (BLOOMBERG NEWS/LANDOV)*



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

**Ανάλυση με τη χρήση της μη-εκτατικής στατιστικής φυσικής της καταγεγραμμένης σεισμικότητας που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια στον ευρύτερο χώρο της Οκλαχόμα (ΗΠΑ).**

## 4.1 Βασικές αρχές της Εντροπίας του Tsallis: Μια Στατιστική Προσέγγιση Εργαστηριακής Σεισμολογίας

Σύμφωνα με την μη-εκτατική στατιστική φυσική (Non-Extensive Statistical Physics, NESP) που πρότεινε ο Tsallis (1988), η γενικευμένη εντροπία,  $S_q$  (εντροπία Tsallis) ενός συστήματος ως προς την κατανομή των πιθανοτήτων  $p$  για τη διακριτή περίπτωση ορίζεται ως:

$$S_q = k_B \frac{1 - \sum_{i=1}^W p_i^q}{q - 1}, \quad q \in R \text{ and } \sum_{i=1}^W p_i = 1 \quad (1)$$

όπου  $k_B$  είναι η σταθερά του Boltzmann και το άθροισμα αναφέρεται στο σύνολο των πιθανοτήτων  $p_i$  των πιθανών καταστάσεων του συστήματος, με συνολικό αριθμό  $W$ . Ο εντροπικός δείκτης,  $q$  αντιπροσωπεύει ένα μέτρο της μη εκτατικότητας του συστήματος. Για  $q \rightarrow 1$ , η εντροπία Tsallis συγγλίνει στην εντροπία Boltzmann-Gibbs (BG) της κλασικής στατιστικής φυσικής.

Για ένα σύστημα που αποτελείται από δύο στατιστικά ανεξάρτητα υποσυστήματα A και B, η εντροπία Tsallis,  $S_q$  παραβιάζει την ιδιότητα προσθετικότητας που υπακούει στην εντροπία BG, σύμφωνα με την παρακάτω έκφραση:

$$S_q(A, B) = S_q(A) + S_q(B) + \frac{1 - q}{k_B} S_q(A) S_q(B) \quad (2)$$

Ο τελευταίος όρος στη δεξιά πλευρά της εξίσωσης (2) αντικατοπτρίζει τη μη προσθετικότητα λόγω των αλληλεπιδράσεων μεγάλης εμβέλειας στο υπό εξέταση φυσικό σύστημα. Διαφορετικές τιμές του δείκτη  $q$ , αντιστοιχούν στην  $q > 1$ ,  $q = 1$  and  $q < 1$  υπο-προσθετικότητα, την προσθετικότητα και την υπερ-προσθετικότητα, αντίστοιχα.



Στην περίπτωση συνεχούς μεταβλητής  $X$  με κατανομή πιθανότητας  $p(X)$ , η εξίσωση (1) τροποποιείται στην:

$$S_q = k_B \frac{1 - \int_0^{\infty} p^q(X) dX}{q - 1} \quad (3)$$

Η μεταβλητή  $X$  θα μπορούσε να είναι μια θεμελιώδης σεισμική παράμετρος όπως η σεισμική ροπή, ο χρόνος μεταξύ των σεισμικών γεγονότων ή η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών γεγονότων, όπως σεισμοί ή μικρό-ρωγμές που σχηματίζονται μέσα σε ένα πέτρωμα υπό μηχανική τάση.

Η κατανομή  $p(X)$  που βελτιστοποιεί την εντροπία Tsallis,  $S_q$  υπόκειται στον φυσικό περιορισμό, δηλαδή στη συνθήκη κανονικοποίησης,

$$\int_0^{\infty} p(X) dX = 1 \quad (4)$$

και την συνθήκη σχετικά με τη γενικευμένη τιμή πιθανότητας  $X_q$  ( $q$ -τιμή) η οποία ορίζεται ως:

$$X_q = \langle X_q \rangle = \int_0^{\infty} X P_q(X) dX = 1 \quad (5)$$

όπου  $P_q(X)$  είναι η πιθανότητα συνοδείας που δίνεται από την ακόλουθη έκφραση (Tsallis, 2009):

$$P_q(X) = \frac{p^q(X)}{\int_0^{\infty} p^q(X) dX} \quad (6)$$

Μέσω πολλαπλασιαστών Lagrange, παίρνουμε τελικά τη φυσική πιθανότητα:

$$p(X) = \frac{[1 - (1 - q)\beta_q X]^{1/(1-q)}}{Z_q} \quad (7)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ο αριθμητής αντιπροσωπεύει την  $q$ -εκθετική συνάρτηση,  $\exp_q(-\beta_q X)$  η οποία ορίζεται ως:

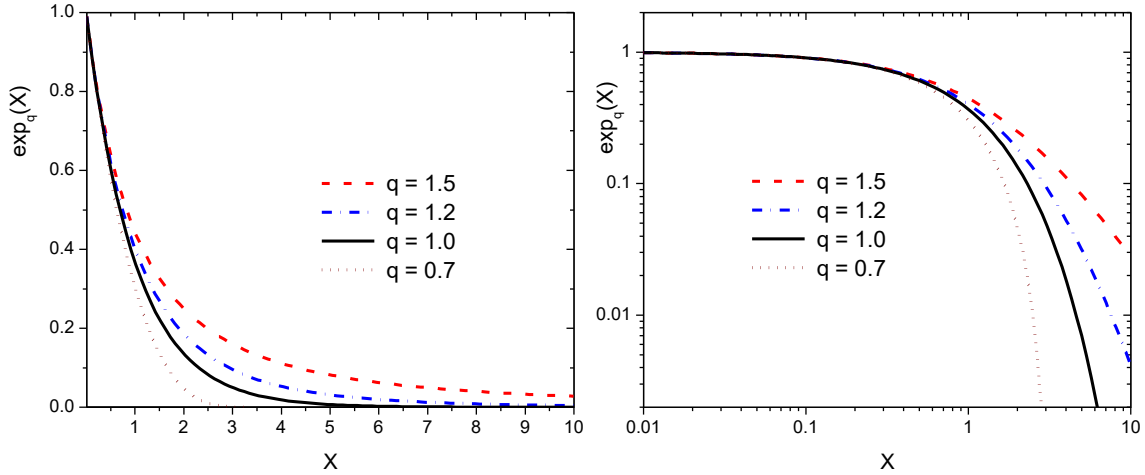
$$\exp_q(X) = \begin{cases} [1 + (1 - q)X]^{1/(1-q)} & \text{for } 1 + (1 - q)X \geq 0 \\ 0 & \text{for } 1 + (1 - q)X < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Ο παρονομαστής στην εξίσωση (7) είναι η συνάρτηση  $Z_q$

$$Z_q = \int_0^{X_{max}} \exp_q(-\beta_q X) dX \quad (9)$$

όπου ο όρος  $\beta_q$  σχετίζεται με τον πολλαπλασιαστή Lagrange  $\beta^*$  ως εξής:

$$\beta_q = \frac{\beta^*}{c_q + (1-q)\beta X_q} \text{ and } c_q = \int_0^{X_{max}} p^q(X) dX$$



**Εικόνα 20** Η  $q$ -εκθετική συνάρτηση για διάφορες τιμές  $q$ , σε γραμμικές και λογαριθμικές κλίμακες.

Η  $q$ -εκθετική συνάρτηση (εξίσωση 8) για διαφορετικές τιμές του  $q$  απεικονίζεται στην Εικ. 20 σε κλίμακες lin-lin και log-log. Για  $q = 1$ , η κατανομή συγγλίνει στην τυπική εκθετική κατανομή. Για  $q > 1$ , έχει ασυμπτωτική κλίση,  $-1/(q - 1)$  ενώ, για, έχει  $q < 1$  κάθετη ασύμπτωτη στο  $x = 1/(1 - q)$ .

Η προηγούμενη τυπική αναπαράσταση της μη εκτατικής στατιστικής φυσικής μπορεί να γενικευτεί περαιτέρω εξετάζοντας την κατανομή των δεικτών  $q$  αντί για μία ενιαία τιμή  $q$ , όπως προτάθηκε από τον Tsallis (1999) και τους Tsekouras και Tsallis (2005). Σε αυτήν την περίπτωση, εισάγεται μια γενικευμένη διαφορική εξίσωση για να περιγράψει τη μεταπήδηση σε έναν άλλο τύπο συμπεριφοράς που παρατηρείται σε μεγαλύτερες τιμές της μεταβλητής  $X$ , ως εξής:

$$\frac{dp}{dX} = -\beta_r p^r - (\beta_q - \beta_r) p^q \quad (10)$$

Στις ακραίες περιπτώσεις για  $r = 0$  ή  $r = q$ , η εξίσωση (10) μετατρέπεται στη μη γραμμική διαφορική εξίσωση,  $dp/dX = -\beta_q p^q$  της οποίας η λύση είναι η

γενικευμένη πιθανότητα  $p(X)$  που δίνεται από την εξίσωση (7). Για  $1 \leq r < q$ , η γενική λύση της εξίσωσης (10) δίνεται ως εξής:

$$X = \int_p^1 \frac{dx}{\beta_r x^r + (\beta_q - \beta_r)x^q} = \frac{1}{\beta_r} \int_p^1 dx \left[ \frac{1}{x^r} - \frac{\left(\frac{\beta_q}{\beta_r} - 1\right) x^{q-2r}}{1 + \left(\frac{\beta_q}{\beta_r} - 1\right) x^{q-r}} \right]$$

που τελικά οδηγεί σε:

$$X = \frac{1}{\beta_r} \left\{ \frac{p^{1-r} - 1}{r - 1} - \frac{\frac{\beta_q}{\beta_r} - 1}{1 + q - 2r} \left[ H\left(1; q - 2r; q - r; \frac{\beta_q}{\beta_r} - 1\right) - H\left(p; q - 2r; q - r; \frac{\beta_q}{\beta_r} - 1\right) \right] \right\} \quad (11)$$

όπου

$$H(\xi; a; b; c) = \xi^{1+a} F\left(\frac{1+a}{b}, 1; \frac{1+a+b}{c}; -\xi^b c\right)$$

και  $F$  είναι η υπεργεωμετρική συνάρτηση.

Κατά την εφαρμογή της μη εκτατικής στατιστική φυσική (NESP) σε διάφορα συστήματα, το ερώτημα που τίθεται είναι ποια κατανομή θα συγκρίνουμε με την κατανομή του υπό εξέταση συστήματος. Εάν χρησιμοποιείται η κατανομή συνοδείας, αντί της φυσικής πιθανότητας  $p(X)$  που δίνεται στην εξίσωση (7), κατόπιν λαμβάνουμε την ακόλουθη αθροιστική κατανομή:

$$P_{cum}(> X) = \int_{X_{min}}^{\infty} P_q^{esc}(X) dX = \exp_q(-X/X_0) \quad (13)$$

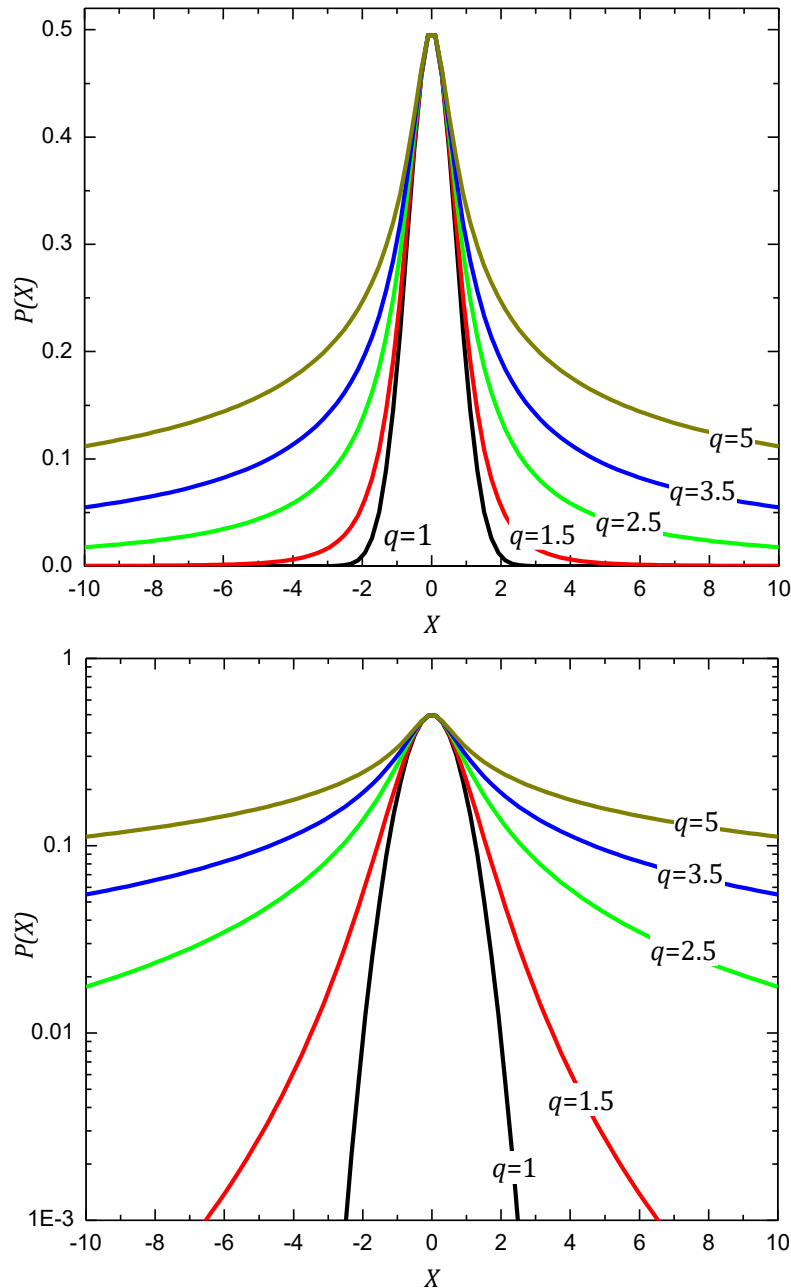
Εναλλακτικά, από την ενσωμάτωση της φυσικής πιθανότητας  $p(X)$ , η ακόλουθη αθροιστική πιθανότητα προκύπτει μετά από κατάλληλους μετασχηματισμούς (Michas et al., 2013):

$$P(> X) = \left[ 1 - (1 - q) \frac{X}{X_0} \right]^{\frac{2-q}{1-q}} \quad (14)$$

Μια γενικευμένη μορφή της γνωστής κατανομής Gaussian μπορεί να προκύψει με τη βελτιστοποίηση της εντροπίας Tsallis  $S_q$  για την μεταβλητή  $X^2$ . Έτσι λαμβάνουμε την ακόλουθη  $q$ -Gaussian κατανομή:

$$p(X) = p_0 \left[ 1 - (1 - q) \left( \frac{X}{X_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{1-q}} \quad (15)$$

Για  $q \rightarrow 1$ , η κανονική κατανομή Gaussian λαμβάνεται όταν για  $q > 1$ , οι σειρές για  $q$ -Gaussian ακολουθούν έναν νόμο δύναμης, ενισχύοντας την πιθανότητα των υψηλών τιμών του  $X$ .



**Εικόνα 21.** Η κατανομή  $q$ -Gaussian για τις διάφορες τιμές για  $q$ , σύμφωνα με την εξίσωση (13), σε γραμμικές και λογαριθμικές κλίμακες. Οι τιμές των  $p_0$  και  $X_0$  ορίζονται σε 0,5 και 1, αντίστοιχα. Η κατανομή για  $q=1$  είναι η γνωστή κατανομή Gaussian.

## 4.2 Ανάλυση της σεισμικότητας με τη χρήση της NESP

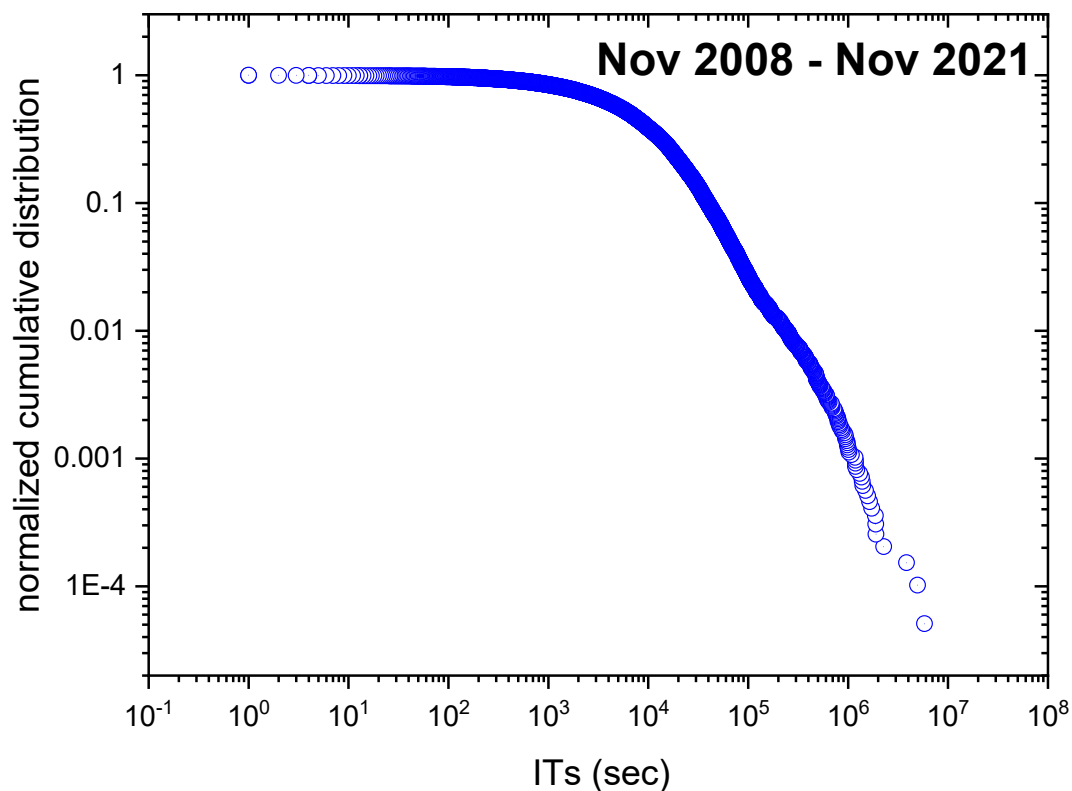
Τα δεδομένα της σεισμικής δραστηριότητας για την περιοχή της Οκλαχόμα αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων [https://ogsweb.ou.edu/eq\\_catalog/](https://ogsweb.ou.edu/eq_catalog/), με τη χρήση του εργαλείου “*Oklahoma Geological Survey Earthquake Catalog Download Tool*” (Walter et al., 2020). Τα δεδομένα σε μορφή .csv (comma separated values) εισήχθησαν στο EXCEL και από τους χρόνους γένεσης των σεισμών, υπολογίστηκαν τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των γεγονότων στη σεισμική ακολουθία (Interevent Times, ITs σε sec), για την περίοδο Νοέμβριος 2008 – Νοέμβριος 2021.

Συνολικά, περιλαμβάνονται 19.608 γεγονότα στο παραπάνω χρονικό διάστημα. Πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση των γεγονότων σε φθίνουσα χρονική σειρά των ITs και αντιστοίχιση σε κάθε τιμή IT, του πλήθους των γεγονότων με μεγαλύτερη τιμή. Η ακολουθία αυτών των τιμών στη συνέχεια κανονικοποιήθηκε, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η προσαρμογή των δεδομένων με τη συνάρτηση  $exp_q$  του Tsallis:

$$exp_q(x) = (1 - (1 - q)bx)^{\frac{1}{(1-q)}}$$

Όλα τα γραφήματα και οι προσαρμογές των δεδομένων υλοποιήθηκαν με το λογισμικό ανάλυσης OriginPro. Στην Εικόνα 22, απεικονίζεται η κανονικοποιημένη αθροιστική κατανομή για το σύνολο των γεγονότων στο προαναφερθέν χρονικό διάστημα. Είναι ενδιαφέρον ότι οι χρόνοι IT παρουσιάζουν εύρος τιμών μεταξύ  $10^0$  και  $10^7$  sec, καλύπτοντας δηλαδή 7 περίπου τάξεις μεγέθους. Για το πλήθος των σεισμικών γεγονότων που περιλαμβάνονται στο γράφημα και καλύπτουν περισσότερο από 4 τάξεις μεγέθους, είναι αξιοσημείωτη η ομοιομορφία της κατανομής τους, που σημειωτέον, απεικονίζεται σε λογαριθμική κλίμακα.

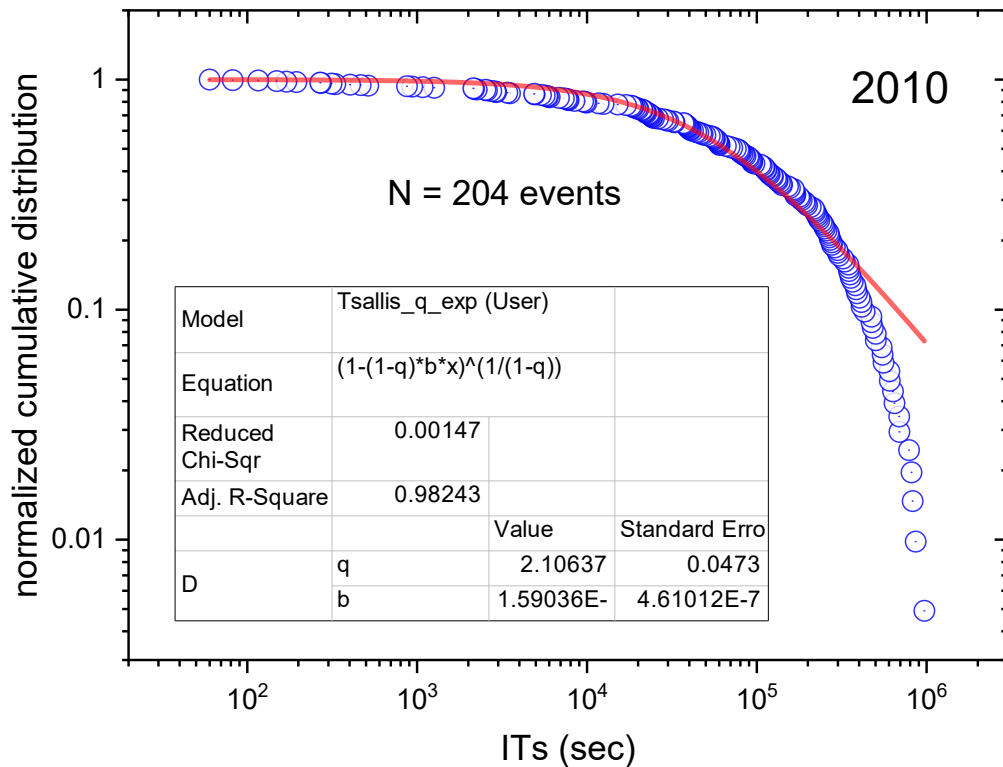
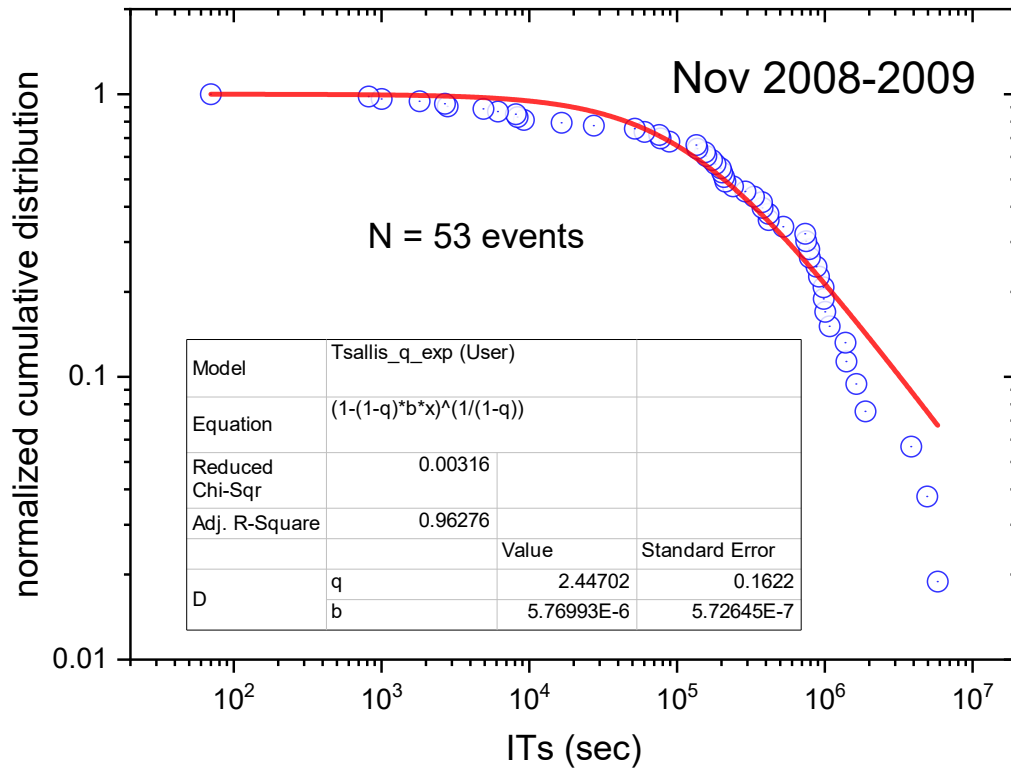
Οι κανονικοποιημένες αθροιστικές κατανομές που προέκυψαν για κάθε ένα έτος (2008 – 2021) και οι καμπύλες προσαρμογής τους σύμφωνα με την παραπάνω συνάρτηση, απεικονίζονται στην Εικόνα 23. Στο ένθετο κάθε γραφήματος περιέχονται οι παράμετροι προσαρμογής  $q$  και  $b$ , μαζί με τα σφάλματα υπολογισμού τους, καθώς επίσης και το πλήθος των γεγονότων που καταγράφηκαν σε αυτό το έτος. Παρατηρούμε ότι μεγάλη αύξηση των σεισμικών γεγονότων καταγράφεται από το 2014 και μετά.



**Εικόνα 22.** Η αθροιστική κανονικοποιημένη κατανομή του πλήθους των σεισμικών γεγονότων με διάφορες τιμές των *interevent times* (ITs) για την περίπτωση της Οκλαχόμα, κατά τη χρονική περίοδο Νοέμβριος 2008 – Νοέμβριος 2021.

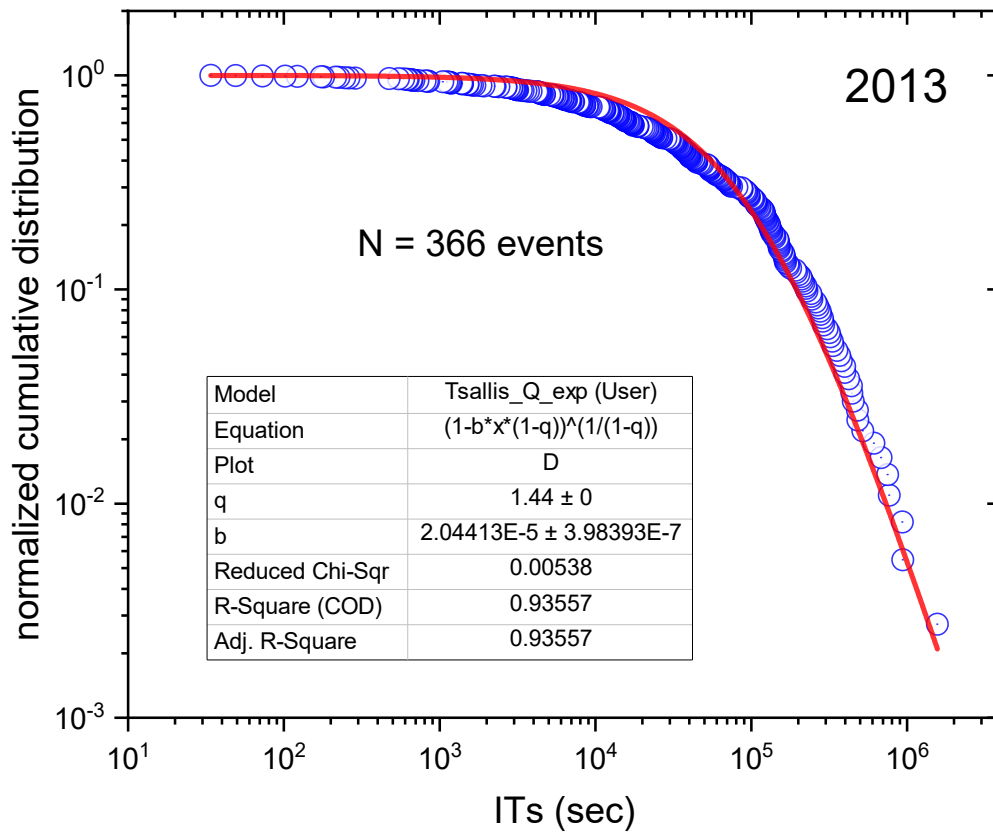
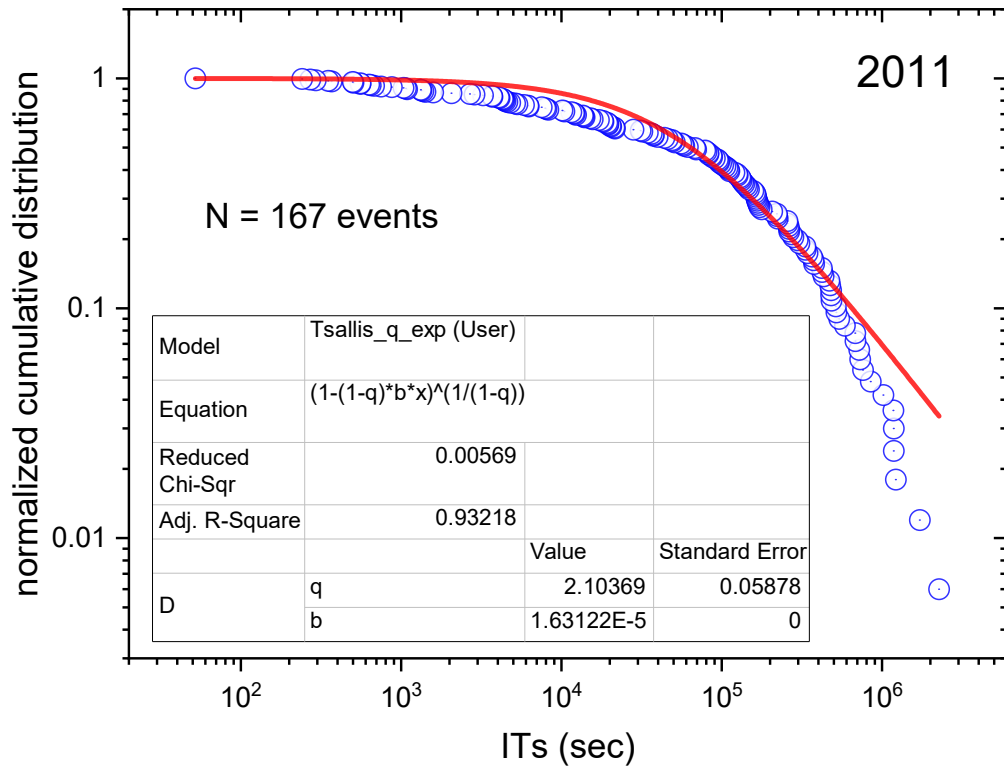
Αναφορικά με τις τιμές που λαμβάνει η παράμετρος  $q$  της κατανομής, παρατηρούνται αρχικά μεγάλες τιμές; 2.48 έως 2.04; κατά τα έτη 2009 – 2013, αντίστοιχα όπου τα σεισμικά γεγονότα που καταγράφονται είναι σχετικά λίγα. Η τιμή της παραμέτρου  $q$  για τα επόμενα έτη που ο αριθμός των γεγονότων αυξάνει σημαντικά, πέφτει σε τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 1.91 έως 1,38.

Παραπλήσιες τιμές της παραμέτρου  $q$  έχουν υπολογιστεί σε διάφορες περιπτώσεις ανάλυσης με NESP χρονοσειρών σεισμικών γεγονότων καθώς και ακουστικών εκπομπών κατά τη θλίψη πετρωμάτων (Saltas et al., 2018).

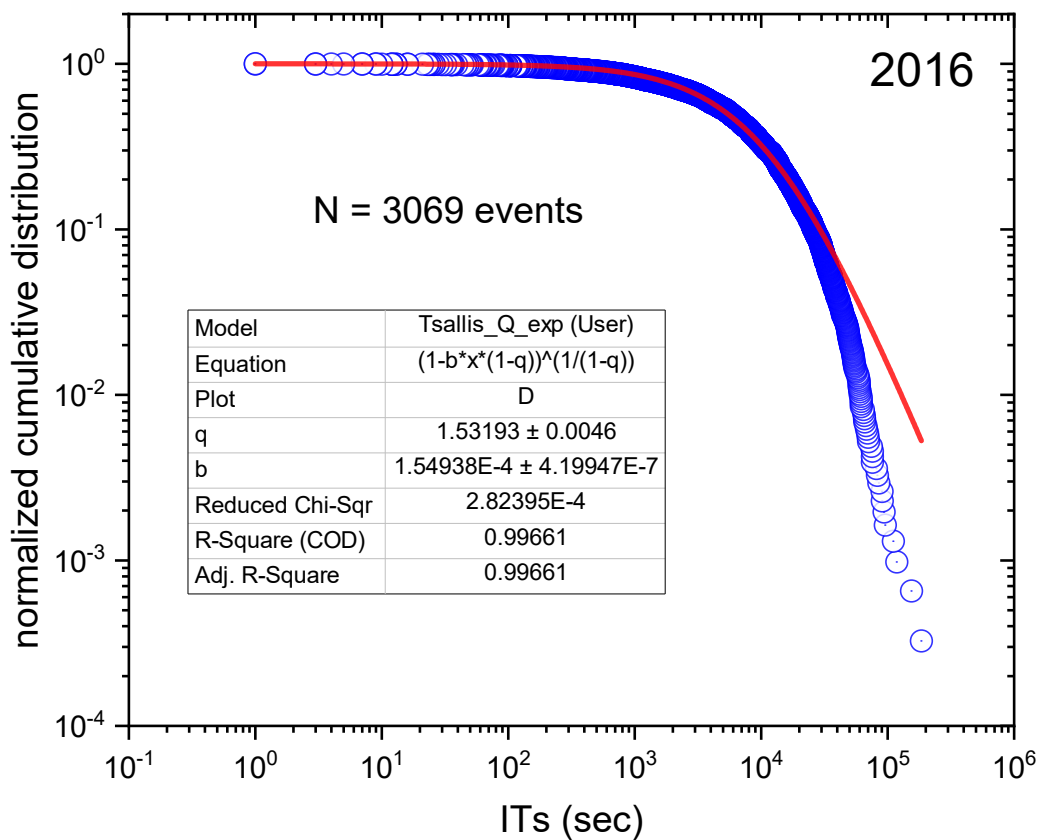
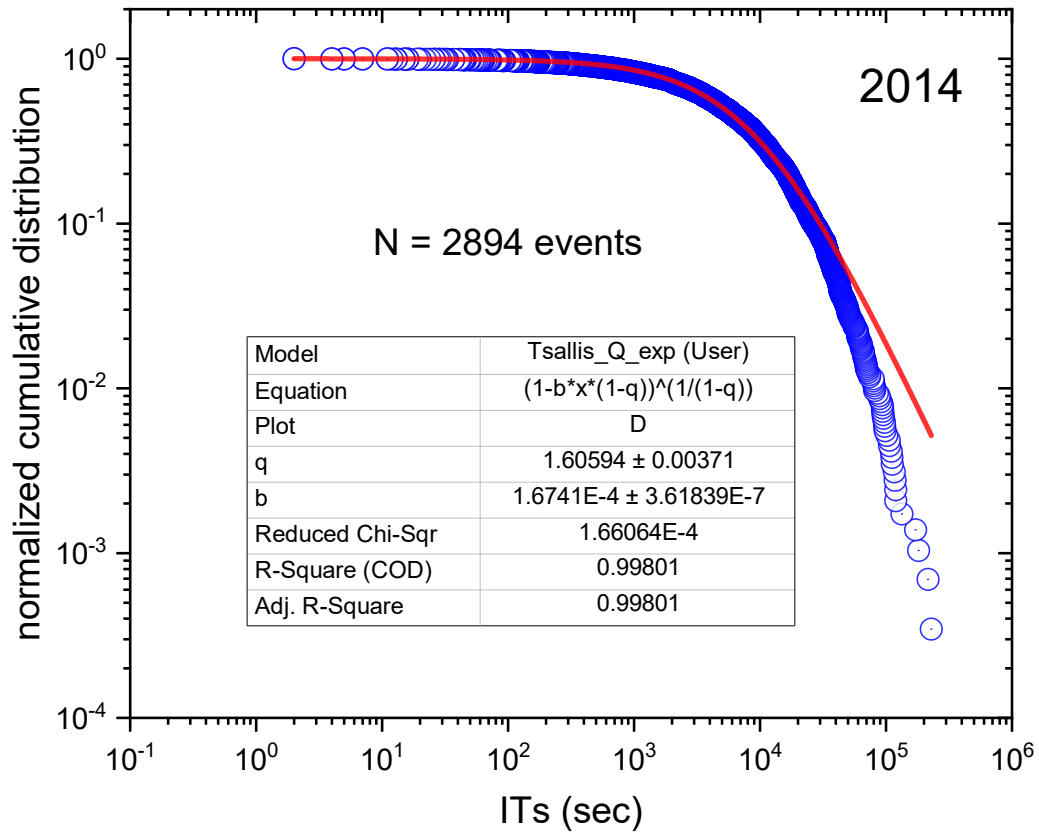


**Σχήμα 22.** Η αθροιστική κανονικοποιημένη κατανομή των σεισμικών γεγονότων με διαφορετικά *Inter-event Times (ITs)*, για χρονικά διαστήματα ενός έτους από το 2009, έως και το 2021.

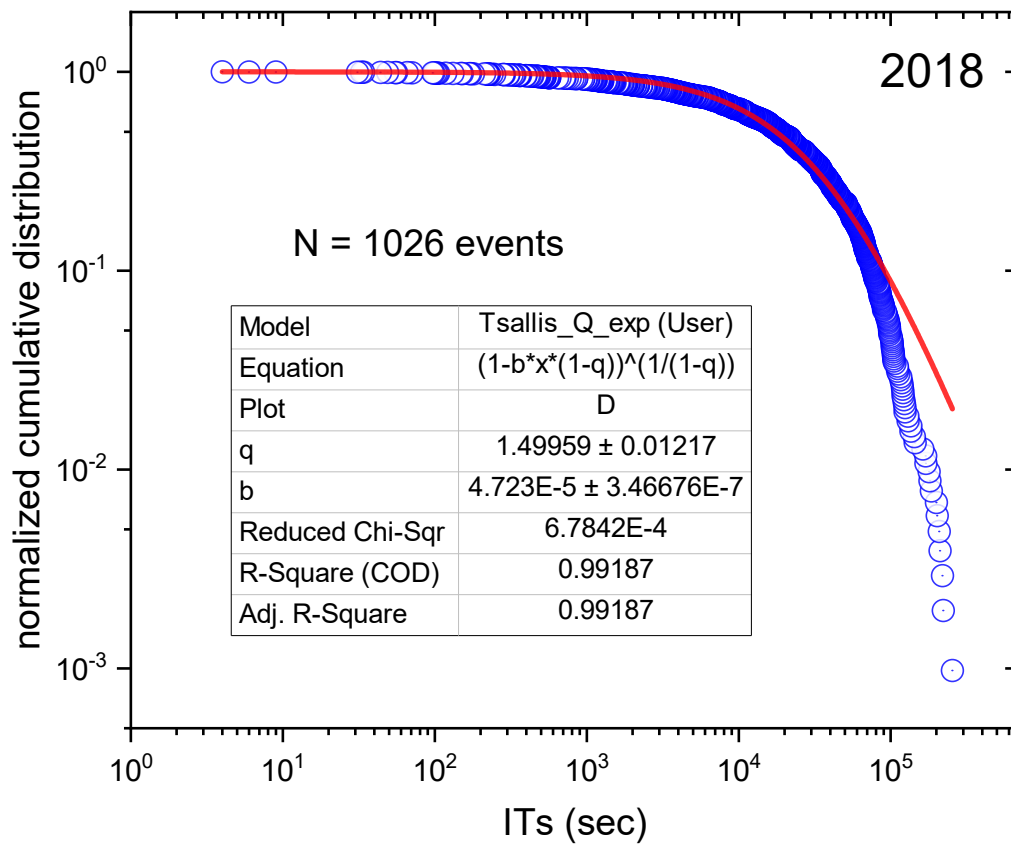
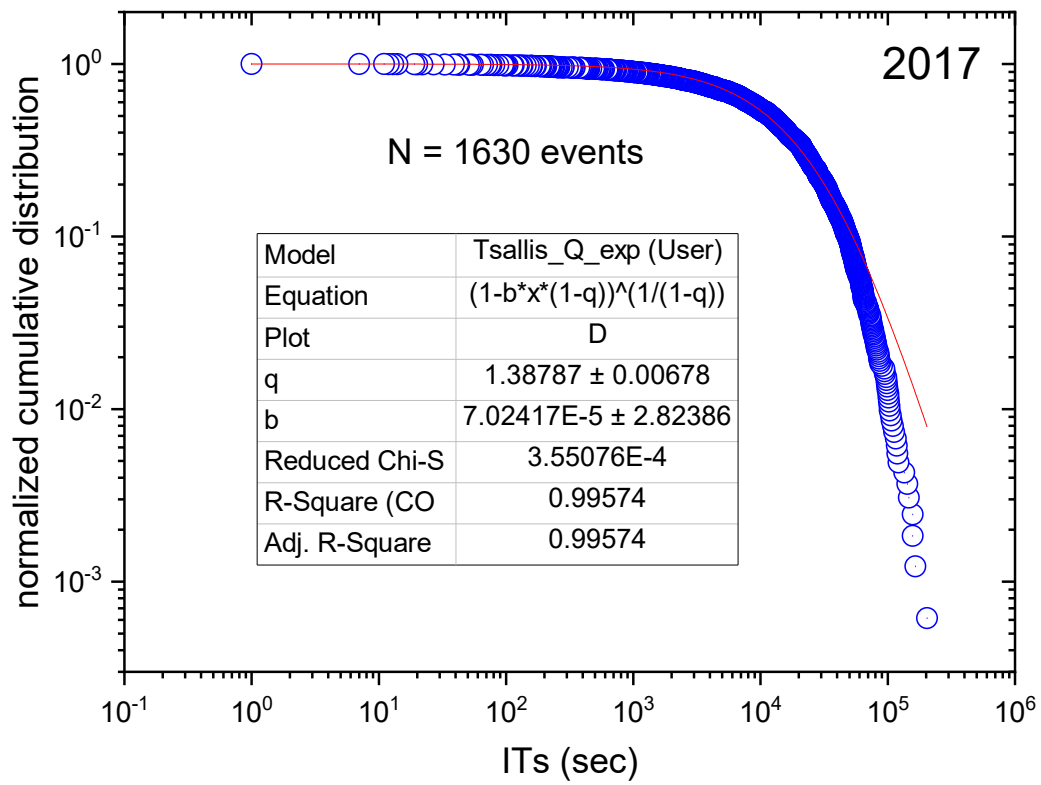




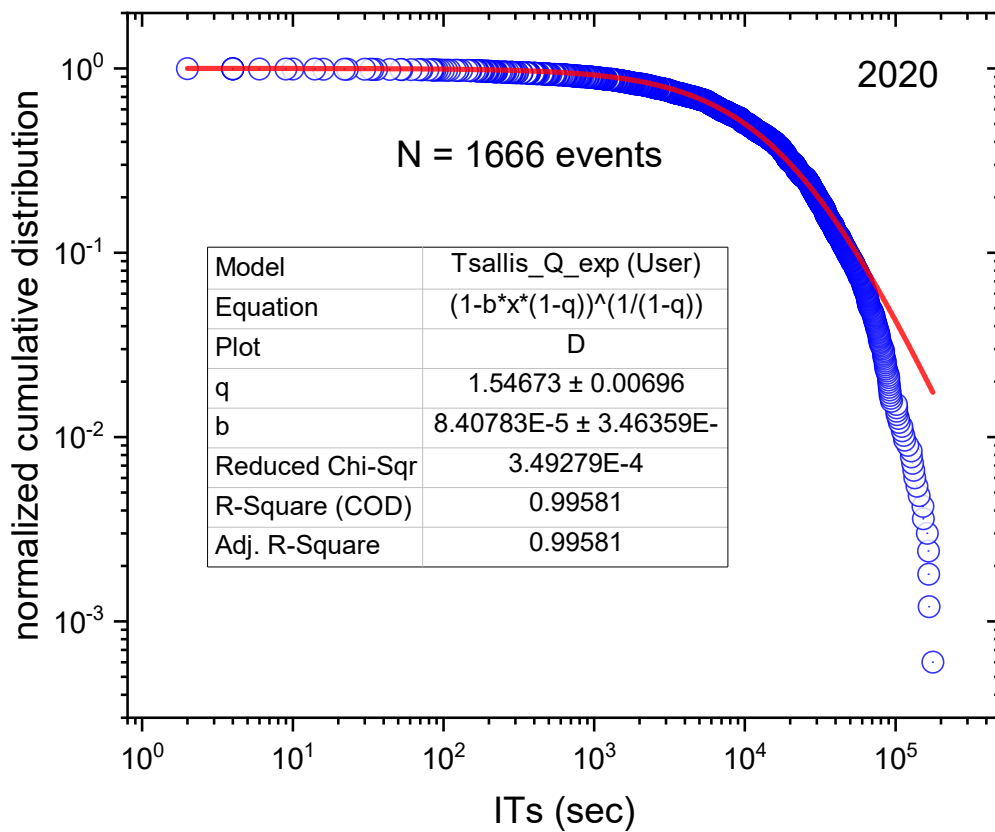
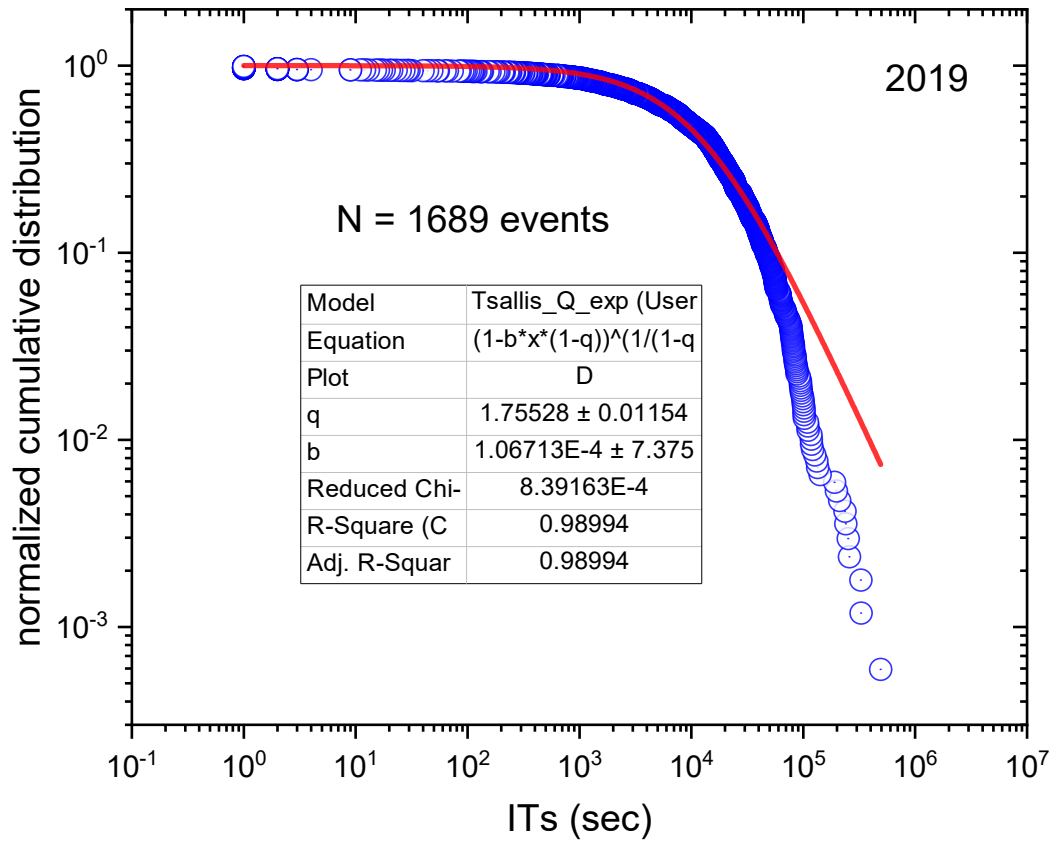
Σχήμα 23. συνέχεια ...



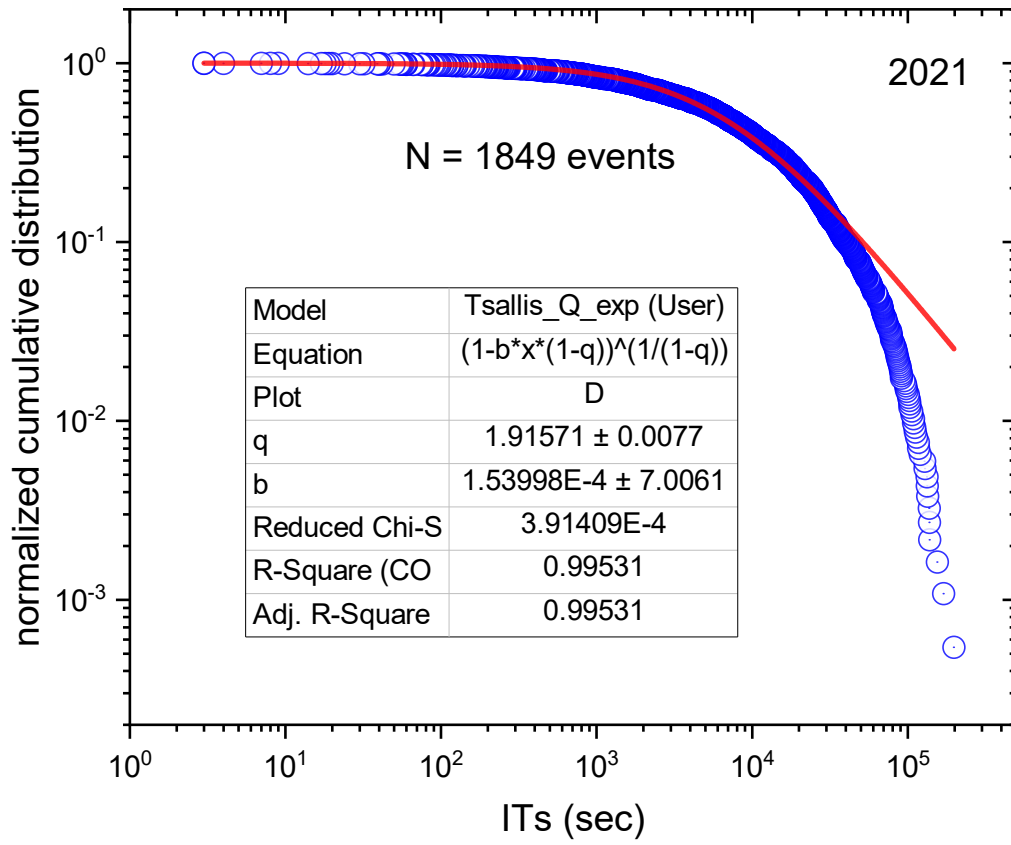
Σχήμα 24. συνέχεια ...



Σχήμα 25. συνέχεια ...



Σχήμα 26. συνέχεια ...



Σχήμα 27. συνέχεια ...

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάστηκε η βιβλιογραφική μελέτη του φαινομένου της επαγομένης σεισμικότητας και ειδικότερα της μεθόδου της υδραυλικής ρωγμάτωσης (fracking). Το πρώτο συμπέρασμα, που κατά βάση είναι κοινή παραδοχή της επιστημονικής κοινότητας και των νέων μελετών που αναφέρθηκαν, είναι ότι η υδραυλική ρωγμάτωση είναι μια έντονη αμφιλεγόμενη μέθοδος εξόρυξης υδρογονανθράκων.

Ιδιαίτερα στην Αμερική η μέθοδος της υδραυλικής ρωγμάτωσης χρησιμοποιείται ευρέως για την εξόρυξη αερίου και πετρελαίου, ωστόσο, οι αρχικές προειδοποιήσεις για τους κινδύνους της μεθόδου τώρα πλέον γίνονται αρκετά σοβαρές ενοχοποιώντας την μέθοδο για την αυξημένη σεισμική δραστηριότητα ιδιαίτερα στις νότιες Ηνωμένες Πολιτείες. Παρουσιάζεται αναλυτικά το παράδειγμα της πολιτείας της Οκλαχόμα των ΗΠΑ, η οποία έχει παρουσιάσει ασυνήθιστη σεισμικότητα λόγω της προαναφερθείσας δραστηριότητας.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε επίσης η ανάλυση με τη χρήση της μη-εκτατικής στατιστικής φυσικής (Non-Extensive Statistical Physics, NESP) της καταγεγραμμένης σεισμικότητας που έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια (2009 – 2021) στην περιοχή της Οκλαχόμα. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν με την NESP, οι κατανομές της αθροιστικής κατανομής των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών σεισμικών γεγονότων (Interevent Times, ITs). Παρατηρήθηκε μία μείωση της παραμέτρου  $q$  της συνάρτησης  $exp_q$  του Tsallis, με την αύξηση της σεισμικότητας μετά το 2014.

Στα πλαίσια της περαιτέρω μελέτης, θα παρουσίαζε επίσης ενδιαφέρον να εξεταστεί η μεταβολή της παραμέτρου  $q$  της συνάρτησης  $exp_q$  του Tsallis και άλλων σεισμικών παραμέτρων όπως το σεισμικό μέγεθος και οι χωρικές αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών χρονικά σεισμικών γεγονότων, όπως αυτές έχουν αναλυθεί σε άλλες περιπτώσεις.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- "Induced Seismicity - Home". esd1.lbl.gov. Retrieved 2017-09-04.
- "M 4.3 Nuclear Explosion - North Korea". earthquake.usgs.gov. 2014-04-27. Retrieved 2017-12-30.
- "M 4.7 Nuclear Explosion - North Korea". earthquake.usgs.gov. 2009-05-28. Retrieved 2017-12-30.
- "M 5.1 Nuclear Explosion - 24km ENE of Sungjibaegam, North Korea". earthquake.usgs.gov. Retrieved 2017-09-04.
- "Magnitudes for Oklahoma Earthquakes Shift Upward". www.usgs.gov. Retrieved 2017-09-04.
- "North Korea claims success in fifth nuclear test". BBC News. 2016-09-09. Retrieved 2017-09-04.
- (www.dw.com), Deutsche Welle. "North Korea claims successful hydrogen bomb test | News | DW | 03.09.2017". DW.COM. Retrieved 2017-09-04.
- BC Hydro officials worry about risks of earthquakes triggered by fracking, (2016, August 16). Αναρτήθηκε από <https://www.theglobeandmail.com/news/british-columbia/bc-hydro-officials-worry-about-risks-of-earthquakes-triggered-by-fracking/article31425804/>
- Dempsey, D., & Riffault, J. (2019). Response of induced seismicity to injection rate reduction: Models of delay, decay, quiescence, recovery, and Oklahoma. *Water Resources Research*, 55, 656–681. <https://doi.org/10.1029/2018WR023587>
- Fracking can cause earthquakes tens of kilometres away – new research (2019, May 8) retrieved 23 July 2021 from <https://phys.org/news/2019-05-fracking-earthquakes-tens-kilometres.html>
- Fracking fluids key to number of earthquakes near gas wells: study (2018, January 18). Αναρτήθηκε από <https://www.theglobeandmail.com/news/national/fracking-fluids-key-to-number-of-earthquakes-near-gas-wells-study/article37656253/>
- Goldblat, Jozef; Cox, David, eds. (1988). *Nuclear Weapon Tests: Prohibition or Limitation?*. SIPRI Monograph Series. Stockholm International Peace Research Institute. p. 80. ISBN 978-0198291206.



He M, Li Q and Li X (2020) Injection-Induced Seismic Risk Management Using Machine Learning Methodology – A Perspective Study. *Front. Earth Sci.* 8:227. doi: 10.3389/feart.2020.00227

Injecting wastewater underground can cause earthquakes up to 10 kilometers away. (2018, September 2). Ανακτήθηκε από <https://www.pbs.org/newshour/science/injecting-wastewater-underground-can-cause-earthquakes-up-to-10-kilometers-away>

Injecting wastewater underground can cause earthquakes up to 10 kilometers away (2018, September 2). Ανακτήθηκε από <https://www.pbs.org/newshour/science/injecting-wastewater-underground-can-cause-earthquakes-up-to-10-kilometers-away>

ISC (2016), ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2012), Version 3.0, International Seismological Centre.

Kao, Hong (2019-04-09). "A Review of Traffic Light Protocol for Induced Seismicity and Its Effectiveness in Canada"

McGarr, A. (2014), Maximum magnitude earthquakes induced by fluid injection, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 119,1008–1019, doi:10.1002/2013JB010597.

National Research Council 2013. Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/13355>.

Official: 40 to 50 buildings damaged in Oklahoma earthquake, (2016, November 7). Ανακτήθηκε από <https://www.denverpost.com/2016/11/07/oklahoma-earthquake/>

Pumping water underground could trigger major earthquake, say scientists, (2013, July 13). Ανακτήθηκε από <https://www.theguardian.com/science/2013/jul/11/fracking-water-injection-major-earthquakes>

Saltas V., Vallianatos F., Triantis D., Stavrakas I. (2018). Complexity in Laboratory Seismology: From Electrical and Acoustic Emissions to fracture, pp. 254-258, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813138-1.00009-2>

Skoumal, R. J., Ries, R., Brudzinski, M. R., Barbour, A. J., & Currie, B. S. (2018). Earthquakes induced by hydraulic fracturing are pervasive in Oklahoma. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 10,918–10,935. <https://doi.org/10.1029/2018JB016790>

The Human-Induced Earthquake Database (HiQuake), (2021 May 28). Ανακτήθηκε από <https://inducedearthquakes.org/>

Walter, J. I., P. Ogwari, A. Thiel, F. Ferrer, I. Woelfel, J. C. Chang, A. P. Darold, and A. A. Holland (2020), The Oklahoma Geological Survey Statewide Seismic Network, *Seismol. Res. Lett.*, 91 (2A): 611–621, doi:10.1785/0220190211.

Walters, Randi Jean; Zoback, Mark D.; Baker, Jack W.; Beroza, Gregory C. (2015-07-01). "Characterizing and Responding to Seismic Risk Associated with Earthquakes Potentially Triggered by Fluid Disposal and Hydraulic Fracturing". *Seismological Research Letters*. 86 (4): 1110–1118. doi:10.1785/0220150048. ISSN 0895-0695.

Well-Bore Construction (Drilling and Completions) David A. Simpson P.E., in *Practical Onshore Gas Field Engineering*, 2017.

Yu, H., Harrington, R.M., Kao, H. et al. Fluid-injection-induced earthquakes characterized by hybrid-frequency waveforms manifest the transition from aseismic to seismic slip. *Nat Commun* 12, 6862 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26961-x>.

Τσελέντης, Α. (Αθήνα 2018). Γενική Σεισμολογία Δεύτερος Τόμος. LIBERAL BOOKS. ISBN Β΄ Τόμου 978-618-5012-28-1.