

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων



## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Συγκέντρωση παραμέτρων αντοχής διακοσμητικών λίθων από βάσεις δεδομένων και στατιστική επεξεργασία τους»

---

### Της φοιτήτριας

Σοφίας Αχίνα, ΑΜ:2013020066

### Τριμελής εξεταστική επιτροπή:

Γ. Ξηρουδάκης, επίκουρος καθηγητής (επιβλέπων)

Ε. Βαρουχάκης, επίκουρος καθηγητής

Π. Λιόλιος, ΕΔΙΠ

Χανιά,

Μάρτιος, 2025

### **Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:**

Δηλώνω ρητά ότι, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Η έγκριση της παρούσας διπλωματικής εργασίας από το Πολυτεχνείο Κρήτης, δεν σημαίνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Νόμος 5343/1932, άρθρο 202)

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κύριο Ξηρουδάκη, για όλη την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου έδωσε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Η στήριξή του από το πρώτο βήμα, στο να βρούμε το θέμα, μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας, ήταν πολύτιμη και με βοήθησε να ξεπεράσω πολλές δυσκολίες.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για όλη την υποστήριξη, την αγάπη και την ενθάρρυνση τους. Χωρίς αυτούς, δεν θα τα είχα καταφέρει να ολοκληρώσω τις σπουδές μου και να φτάσω ως εδώ.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη συλλογή και στατιστική ανάλυση μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων διακοσμητικών λίθων, με ιδιαίτερη έμφαση σε μάρμαρα, γρανίτες, ασβεστόλιθους και ψαμμίτες. Ο κύριος στόχος ήταν να αναλυθούν οι βασικές παράμετροι αντοχής, όπως το ειδικό βάρος, το πορώδες, η αντοχή σε θλίψη και η αντοχή σε κάμψη, για κάθε ομάδα πετρωμάτων, προσδιορίζοντας τις κατανομές που τους ταιριάζουν. Για την επίτευξη του στόχου, συγκεντρώθηκαν δεδομένα από αξιόπιστες βάσεις δεδομένων και πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία μέσω του λογισμικού MATLAB, με τη βοήθεια της δοκιμής κατανομής KStest (Kolmogorov-Smirnov test). Μέσω αυτής της μεθόδου, προσδιορίστηκε η κατανομή που αντιστοιχεί σε κάθε ιδιότητα, και υπολογίστηκε το ποσοστό καταλληλότητας της κάθε κατανομής. Επιπλέον, δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα ιστογράμματα στο Excel για κάθε ιδιότητα, σύμφωνα με την κατανομή που προέκυψε από το έλεγχο.

Ένα επιπλέον στάδιο της εργασίας περιλάμβανε τη διεξαγωγή ανάλυσης συσχέτισης μεταξύ της αντοχής στη θλίψη (UCS) και άλλων φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων (όπως το ειδικό βάρος, το πορώδες και η αντοχή σε κάμψη), προκειμένου να εξεταστεί η αλληλεπίδραση αυτών των παραμέτρων για διαφορετικά πετρώματα, όπως το οποίο επέτρεψε τον υπολογισμό των συντελεστών συσχέτισης Pearson, Spearman και Kendall μέσω του λογισμικού CougarStats, παρέχοντας έτσι μια πληρέστερη εικόνα της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για την κατηγοριοποίηση και την αξιολόγηση των διακοσμητικών πετρωμάτων συνεισφέροντας στη βελτιστοποίηση της επιλογής τους για διάφορες κατασκευαστικές και διακοσμητικές εφαρμογές.

Η εργασία αυτή συνεισφέρει στη βαθύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων των διακοσμητικών πετρωμάτων, παρέχοντας εργαλεία για την καλύτερη εκτίμηση της συμπεριφοράς τους σε διάφορες κατασκευαστικές και διακοσμητικές εφαρμογές, καθώς και για την επιλογή των καταλληλότερων υλικών ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε έργου.

**Λέξεις κλειδιά:** Διακοσμητικά πετρώματα, φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, στατιστικοί έλεγχοι.

## **Abstract**

The present thesis focuses on the collection and statistical analysis of mechanical and physical properties of decorative stones, with particular emphasis on marbles, granites, limestones and sandstones. The main objective was to analyze the main strength parameters, such as specific gravity, porosity, compressive strength and flexural strength, for each group of rocks, identifying the distributions that fit them. To achieve the objective, data collected from reliable databases and statistical processing was carried out using MATLAB software, with the help of the KStest (Kolmogorov-Smirnov test) distribution test. Through this method, the distribution corresponding to each property was determined and the percentage of fit of each distribution was calculated. In addition, the corresponding histograms were generated in Excel for each property according to the distribution obtained from the test.

A further stage of the work involved conducting a correlation analysis between compressive strength (UCS) and other physical and mechanical properties (such as specific gravity, porosity and flexural strength) in order to examine the interaction of these parameters for different rocks, which allowed the calculation of Pearson, Spearman and Kendall correlation coefficients through the CougarStats software, thus providing a more complete picture of the relationship between the variables. The results of the analyses provide useful information for the categorization and evaluation of decorative stones, contributing to the optimization of their selection for various construction and decorative applications.

This work contributes to a deeper understanding of the properties of decorative stones, providing tools for a better assessment of their behaviour in different construction and decorative applications, as well as for the selection of the most suitable materials according to the requirements of each project.

**Keywords:** Decorative rocks, physical and mechanical properties, statistical tests.

## Περιεχόμενα

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα: .....	ii
Ευχαριστίες .....	iii
Περίληψη .....	iv
Abstract .....	v
<b>Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1 Αντικείμενο και επιστημονικό υπόβαθρο .....	1
1.2 Στόχος της εργασίας .....	1
1.3 Διακοσμητικοί Λίθοι.....	1
1.4 Δομή της εργασίας.....	2
<b>Κεφάλαιο 2. Οι διακοσμητικοί λίθοι στην Ελλάδα .....</b>	<b>4</b>
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Οι κυριότεροι Ελληνικοί διακοσμητικοί λίθοι.....	4
2.2.1 Ασβεστολιθικά Μάρμαρα .....	6
2.2.2 Δολομιτικά Μάρμαρα .....	7
2.2.3 Γρανίτες .....	9
2.2.4 Ψαμμίτες .....	10
2.3 Το Πεντελικό μάρμαρο .....	11
2.4 Η τεχνολογία εξόρυξης.....	12
2.5 Οι κυριότερες χώρες εξαγωγών.....	14
2.6 Γνωστά κτίρια και μνημεία με την χρήση Ελληνικών διακοσμητικών λίθων .....	16
2.7 Η αξία των διακοσμητικών λίθων .....	16
<b>Κεφάλαιο 3. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες διακοσμητικών λίθων.....</b>	<b>17</b>
3.1 Φυσικές ιδιότητες πετρωμάτων.....	17
3.1.1 Φαινόμενη πυκνότητα.....	17
3.1.2 Ειδικό βάρος .....	18
3.1.3 Πορώδες .....	18
3.1.4 Διαπερατότητα – Συντελεστής υδαταπορρόφησης .....	18
3.2 Μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων.....	18
3.2.1 Αντοχή σε θλίψη .....	19
3.2.2 Αντοχή σε κάμψη .....	20

3.2.3	Θραυστική στιβαρότητα .....	21
3.3	Οπτικές ιδιότητες – Λευκότητα.....	22
<b>Κεφάλαιο 4.</b>	<b>Στατιστική επεξεργασία - συσχέτιση ιδιοτήτων .....</b>	<b>23</b>
4.1	Βάσεις δεδομένων RMDB (Rock Mechanics Database) και STREMA-DB (Decorative Stones).....	23
4.1.1	STREMA-DB (Decorative Stones) .....	23
4.1.2	RMDB (Rock Mechanics DataBase).....	24
4.2	Πρότυπες κατανομές.....	25
4.2.1	Κανονική κατανομή (Κατανομή Gauss ή Normal Distribution) .....	25
4.2.2	Λογαριθμοκανονική κατανομή (Log-normal Distribution).....	25
4.2.3	Κατανομή Weibull (Weibull Distribution).....	26
4.3	Στατιστικοί έλεγχοι κατανομών .....	27
4.4	Παρουσίαση ιστογραμμάτων πετρωμάτων και ανάλυση αυτών.....	30
4.4.1	Μάρμαρα .....	30
4.4.2	Γρανίτες .....	34
4.4.3	Ασβεστόλιθοι.....	38
4.4.4	Ψαμμίτες .....	43
4.5	Εκτίμηση αντοχής από άλλες ιδιότητες (correlations) και σχολιασμός .....	47
4.5.1	Συσχέτιση UCS με ειδικό βάρος ( $\gamma$ ) .....	48
4.5.2	Συσχέτιση UCS με πορώδες ( $n$ ).....	49
4.5.3	Συσχέτιση UCS με αντοχή σε κάμψη ( $T$ ).....	50
4.6	Λογισμικό πρόγραμμα CougarStats .....	51
4.6.1	Αποτελέσματα συσχετίσεων κατάταξης διακοσμητικών λίθων .....	52
<b>Κεφάλαιο 5.</b>	<b>Συμπεράσματα – Προτάσεις.....</b>	<b>54</b>
	Βιβλιογραφία .....	56
1.	Αγγλική .....	56
2.	Ελληνική .....	56
3.	Πηγές Διαδικτύου .....	57
	Παράρτημα Α: Δεδομένα φυσικομηχανικών ιδιοτήτων πετρωμάτων.....	58
	Παράρτημα Β: Παρουσίαση κώδικα Kolmogorov-Smirnov και Monte Carlo στη Matlab.....	69

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

### 1.1 Αντικείμενο και επιστημονικό υπόβαθρο

Η Ελλάδα είναι μια χώρα πλούσια σε αποθέματα διακοσμητικών λίθων. Ως διακοσμητικοί λίθοι, χαρακτηρίζονται όλα τα φυσικά πετρώματα, τα οποία εξορύσσονται από λατομεία. Τα κυριότερα λατομεία που διακρίνονται στη χώρα μας είναι: Διονύσου Πεντέλης ([Εικόνα 1.1](#)), Δράμας, Καβάλας-Θάσου, Κοζάνης-Βέροιας, Ιωαννίνων, Βόλου, Νάξου, Πάρου, καθώς και σε άλλες περιοχές ([Orykta, 20/1/2025](#)). Η ονομασία «μάρμαρα» είναι κυρίως εμπορική, αφού υπάρχει μεγάλη ποικιλία λίθων, τα οποία υπόκεινται σε κοπή και λείανση. Αυτά τα πετρώματα μπορεί να είναι οι δολομίτες, ασβεστόλιθοι, γρανίτες, σερπεντινίτες κ.α.



Εικόνα 1.1: Λατομείο Διονύσου-Πεντέλης ([Orykta, 20/1/2025](#)).

### 1.2 Στόχος της εργασίας

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην ομαδοποίηση, τον προσδιορισμό, τη σύγκριση και τη στατιστική επεξεργασία των φυσικών λίθων τόσο γύρω από τα χαρακτηριστικά τους όσο και γύρω από τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η συγκέντρωση διαφόρων διακοσμητικών πετρωμάτων έγινε μέσα από βάσεις δεδομένων, οι οποίες βοήθησαν στην εύρεση πειραμάτων καταπονήσεων διάφορων πετρωμάτων. Σημαντικό είναι να γνωρίζουμε ότι τα διακοσμητικά πετρώματα ποικίλουν, καθώς διαφέρουν μεταξύ τους στα χρώματα, την υφή και την σύσταση των ορυκτών από τα οποία τα αποτελούν.

### 1.3 Διακοσμητικοί Λίθοι

Ως διακοσμητικοί λίθοι χαρακτηρίζονται οι λίθοι που προέρχονται από φυσικά πετρώματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως δομικά στοιχεία είτε ως διακοσμητικά πετρώματα. Για να συμβεί αυτό θα πρέπει τα φυσικά αυτά πετρώματα να υποστούν κάποιου είδους κατεργασία. Ανάλογα με την κατεργασία που θα υποστούν διακρίνονται οι εξής κατηγορίες : α) Αργοί λίθοι,

είναι οι λίθοι που εξορύσσονται από λατομεία και δεν υπόκεινται σε κάποια επεξεργασία όταν τοποθετούνται ή ελάχιστα μια μικρή για την καλύτερη ευστάθειά τους **β)** Λαξευτοί λίθοι, όπου και αυτοί εξορύσσονται από λατομεία και υπόκεινται πλήρη επεξεργασία στην επιφάνεια και στο σχήμα τους πριν την τοποθέτηση και **γ)** Ογκόλιθοι, όπου είναι φυσικοί λίθοι και είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν στην δόμηση εξαιτίας του μεγέθους τους. Τέλος, η προέλευση των φυσικών λίθων χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες: **α)** Εκρηξιγενή πετρώματα **β)** Ιζηματογενή πετρώματα και **γ)** Μεταμορφωμένα πετρώματα, ο διαχωρισμός αυτός συμβαίνει σύμφωνα με την γεωλογική προέλευση τους (Βέντεχορστ, 2017). Στην *Εικόνα 1.2* απεικονίζεται ο κύκλος των πετρωμάτων (Rock Cycle), δηλαδή η φυσική διαδικασία μετασχηματισμού των πετρωμάτων στη Γη.



Εικόνα 1.2: Κύκλος σχηματισμού πετρωμάτων (Depositphotos, 7/3/2025).

#### 1.4 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια, με στόχο την πλήρη παρουσίαση του θέματος: «Συγκέντρωση παραμέτρων αντοχής διακοσμητικών λίθων από βάσεις δεδομένων και στατιστική επεξεργασία τους». Συγκεκριμένα :

- Κεφάλαιο 1: Περιλαμβάνει την εισαγωγή στο θέμα, όπου περιγράφει τον στόχο της εργασίας, το αντικείμενο και μια μικρή αναφορά στους διακοσμητικούς λίθους.
- Κεφάλαιο 2: Γίνεται αναφορά στους κυριότερους διακοσμητικούς λίθους της Ελλάδας και λίγα λόγια για τους διακοσμητικούς λίθους.

- Κεφάλαιο 3: Είναι το κεφάλαιο στο οποίο αναφέρονται οι σπουδαιότερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων.
- Κεφάλαιο 4: Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης και γίνεται και ο αντίστοιχος σχολιασμός διαγραμμάτων και αποτελεσμάτων.
- Κεφάλαιο 5: Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αφού είναι και το τελευταίο, παρουσιάζονται τα τελικά συμπεράσματα γύρω από την ανάλυση που έγινε στην παρούσα εργασία.

## Κεφάλαιο 2. Οι διακοσμητικοί λίθοι στην Ελλάδα

### 2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που θα ακολουθήσει αναφερόμαστε γύρω από τους Ελληνικούς διακοσμητικούς λίθους που υπάρχουν στην χώρα μας, γίνεται ανάλυση αυτών γύρω από την δια γένεση τους, τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και τις χρήσεις τους. Επίσης, παρουσιάζονται τα έργα που έχουν δημιουργηθεί στην Ελλάδα βασιζόμενα στους Ελληνικούς διακοσμητικούς λίθους, την τεχνολογία εξόρυξης, τη διαδικασία δηλαδή που ακολουθείται για την εκμετάλλευση αυτών και τέλος γνωστοποιείται η αξία των διακοσμητικών λίθων σήμερα, όπως και για το ποιες είναι οι κυριότερες χώρες που εξάγουν διακοσμητικά πετρώματα.

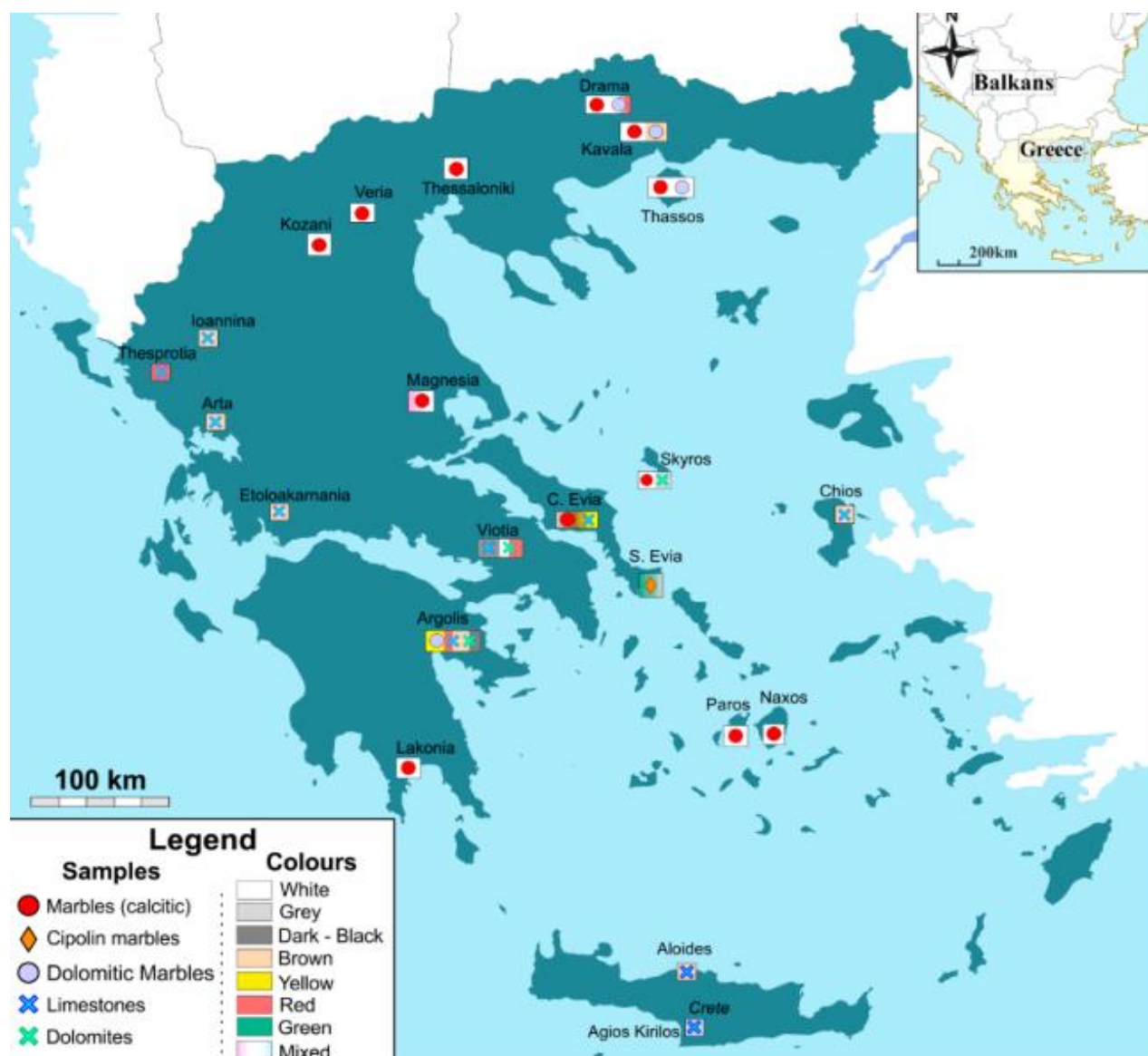
### 2.2 Οι κυριότεροι Ελληνικοί διακοσμητικοί λίθοι

Η παραγωγή φυσικών διακοσμητικών λίθων στην Ελλάδα είναι ένας σημαντικός βιομηχανικός κλάδος που συμβάλλει σημαντικά στην οικονομία της. Η Ελλάδα κατατάσσεται στους 10 κορυφαίους παραγωγούς φυσικής πέτρας στον κόσμο τόσο σε μέγεθος παραγωγής όσο και σε εξαγωγές. Θεωρείται ένας από τους κορυφαίους παραγωγούς ανθρακικού μαρμάρου στον κόσμο. Η επιλογή ενός πετρώματος για χρήση ως δομικό υλικό εξαρτάται τόσο από τα αισθητικά του χαρακτηριστικά όσο και από τις φυσικές και μηχανικές του ιδιότητες. Η ελληνική ανθρακική πέτρα διακρίνεται για την εξαιρετική ποιότητά της, την ποικιλία των τύπων της και τη φήμη της σε διακοσμητικές και γλυπτικές εφαρμογές. Η μεγάλη γκάμα των χρωματικών τους επιλογών και οι φυσικομηχανικές τους ιδιότητες συνδέονται στενά με τη συνάθροιση των ορυκτών τους, τη χημική τους σύσταση, τις πετρογραφικές τους ιδιότητες και τις δομικές αστοχίες, όπου με τη σειρά τους εξαρτώνται από τη μεταμορφωτική τους ποιότητα και σε ορισμένες υδροθερμικές διεργασίες που μπορεί να επηρέασαν. Οι κυριότεροι Ελληνικοί διακοσμητικοί λίθοι είναι ασβεστολιθικά μάρμαρα που βρίσκονται στις περιοχές Δυτικής Μακεδονίας (Κοζάνη), Ανατολικής Μακεδονίας (Καβάλας, Δράμας, και Θεσσαλονίκης), Κεντρικής Ελλάδας (Μαγνησία, Εύβοια), Βόρειο Αιγαίο (νήσος Θάσος), Νότιο Αιγαίο (νησιά Νάξος και Πάρος), μάρμαρο Cipollino όπου τα εντοπίζουμε στις περιοχές της Ηπείρου (Άρτα, Θεσπρωτία) και Στερεάς Ελλάδας (Μαγνησία, Εύβοια), δολομιτικά μάρμαρα στην Ανατολική Μακεδονία (Καβάλα, Δράμα), την Πελοπόννησο (Αργολίδα) και το Βόρειο Αιγαίο (νησί της Θάσου), ασβεστόλιθοι βρίσκονται στις περιοχές Ηπείρου (Ιωάννινα), της Στερεάς Ελλάδας (Βοιωτία, Αιτωλοακαρνανία, Εύβοια), Πελοπόννησος (Αργολίδα), Βόρειο Αιγαίο (νήσος Χίος) και οι δολομίτες συναντώνται στο Νότιο Αιγαίο (νησιά Κρήτης), ενώ στην Στερεά Ελλάδα (Βοιωτία), την Πελοπόννησο (Αργολίδα) και το Βόρειο Αιγαίο (νήσος Σκύρος) εντοπίζονται άλλοι τύποι αυτών των πετρωμάτων (Badouna et al, 2020) . Στην *Εικόνα 2.1* παρουσιάζεται ένας γενικός χάρτης της Ελλάδας που δείχνει τις περιοχές όπου εντοπίζονται σημαντικοί διακοσμητικοί λίθοι. Ο χάρτης αυτός παρέχει μια πρώτη γενική εικόνα της γεωγραφικής κατανομής των λίθων. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας δημιουργήθηκε ο χάρτης της *Εικόνα 2.2*, μέσω της πλατφόρμας Google Maps, στον οποίο αποτυπώνονται οι περιοχές στις οποίες βρέθηκαν δεδομένα αντοχής τα οποία αποτυπώθηκαν με την χρήση χρωματικής κωδικοποίησης

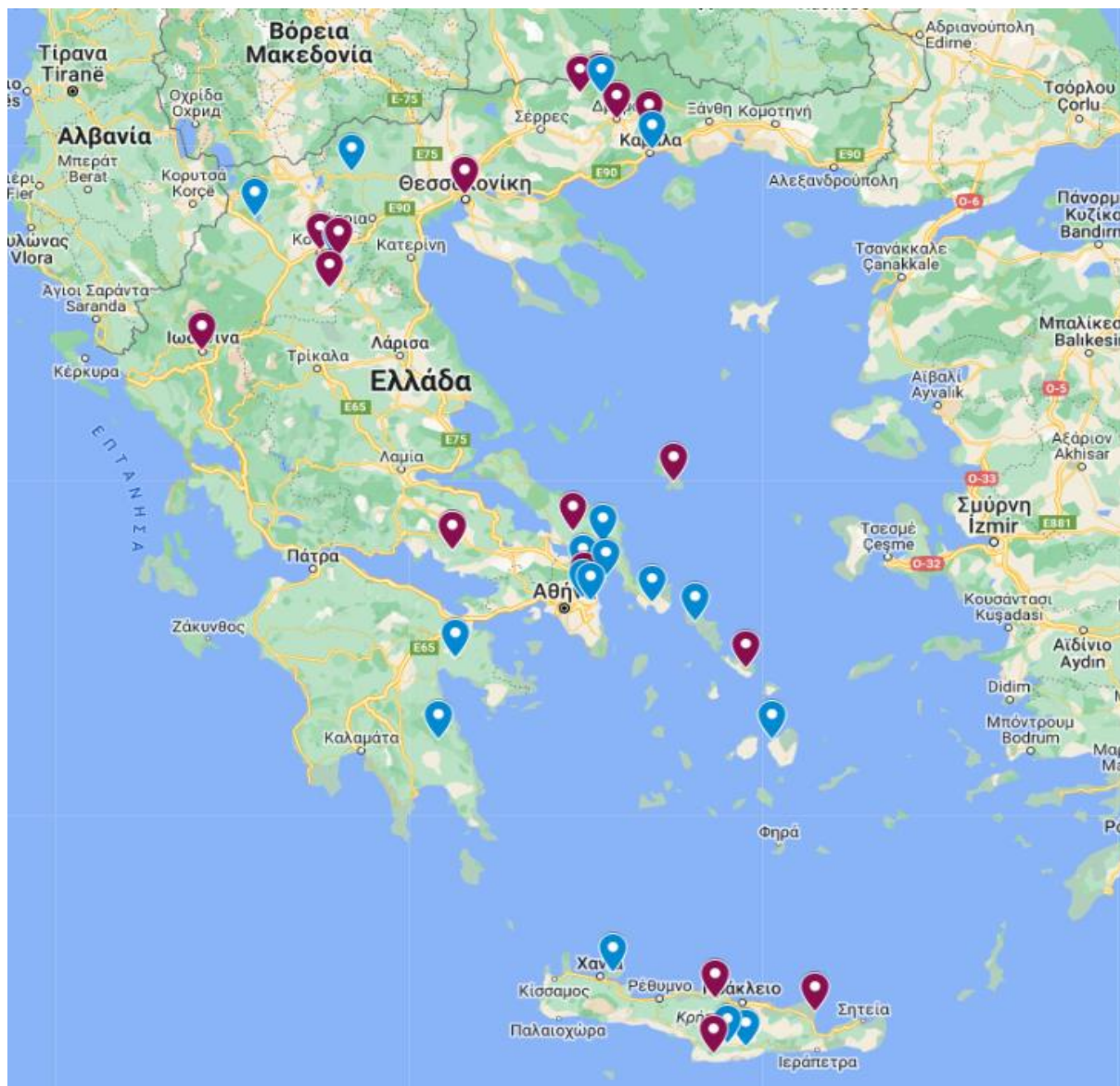
βασισμένη στην αντοχή σε θλίψη των διακοσμητικών λίθων. Συγκεκριμένα, οι περιοχές κατηγοριοποιούνται σε:

- Περιοχές με πετρώματα που εμφανίζουν αντοχή σε θλίψη κάτω από 100 MPa, επισημαίνονται με γαλάζιο χρώμα.
- Περιοχές με πετρώματα που εμφανίζουν αντοχή σε θλίψη μεγαλύτερη ή ίση με 100 MPa, επισημαίνονται με μωβ χρώμα .

Αυτός ο χάρτης δημιουργήθηκε για την βαθύτερη κατανόηση και την σαφή εικόνα των δεδομένων που αναλύονται παρακάτω και με την χρωματική αυτή κωδικοποίηση για να είναι πιο σαφής η γεωγραφική κατανομή των διακοσμητικών λίθων στον Ελλαδικό χώρο.



Εικόνα 2.1: Χάρτης της Ελλάδας με τις τοποθεσίες των διακοσμητικών λίθων (Badouna et al, 2020).



Εικόνα 2.2: Χάρτης κατανομής διακοσμητικών λίθων στην Ελλάδα με βάση την αντοχή σε θλίψη.

### 2.2.1 Ασβεστολιθικά Μάρμαρα

Ο ασβεστόλιθος και το μάρμαρο είναι δύο διαφορετικά πετρώματα τα οποία πολύ συχνά είναι δύσκολο να τα αναγνωρίσεις. Η βασικότερη και κύρια διαφορά μεταξύ τους είναι ότι ο ασβεστόλιθος ανήκει στα ιζηματογενή πετρώματα ενώ το μάρμαρο στα μεταμορφωμένα. Είναι ένα πορώδες και διαλυτό στο νερό πέτρωμα αποτελούμενος κυρίως από το ορυκτό ασβεστίτη, το πυρίτιο, την άργιλο, λάσπη και άμμο και δημιουργείται όταν η λάσπη, τα κοχύλια και η άμμος εναποτίθενται σε ωκεανούς και λίμνες και εξελίσσονται σε ιζηματογενή πετρώματα. Οι περισσότεροι ασβεστόλιθοι είναι γκρι, αλλά έχουν βρεθεί όλα τα χρώματα του ασβεστόλιθου από λευκό έως μαύρο. Ο ασβεστόλιθος έχει πολλές χρήσεις όπως ότι είναι πρώτη ύλη για το τσιμέντο, κονίαμα και ασβέστη, χρησιμοποιείται στην κατασκευή καλλυντικών, φαρμάκων, γυαλιού, χαρτιού, πλαστικού, πλακιδίων και οδοντόκρεμας. Έχει χρήση ως οικοδομικό υλικό,

έργα τέχνης, έλεγχος ρύπανσης, εξουδετερωτής εδάφους, πηγή ασβεστίου και επεξεργασίας νερού.

Το μάρμαρο από την άλλη πλευρά είναι ένα πέτρωμα το οποίο σχηματίστηκε όταν ο ασβεστόλιθος ανακρυσταλλώνεται σε μάρμαρο, δηλαδή όταν ασβεστόλιθος θερμαίνεται και συμπιέζεται προκαλείται η ανακρυστάλλωση των κόκκων του. Το μάρμαρο λοιπόν είναι ένα μεταμορφωμένο πέτρωμα του ασβεστόλιθου που χρησιμοποιείται συνήθως ως διακοσμητικό και οικοδομικό υλικό. Είναι μια πέτρα πιο σκληρή από τον ασβεστόλιθο, η οποία μπορεί να βρεθεί σε διάφορους χρωματισμούς και με ιδιαίτερα σχέδια φλεβών, και αυτό είναι που δίνει στο μάρμαρο την κομψή του εμφάνιση (Emelda, M., 2018). Το φάσμα των διαθέσιμων χρωμάτων του μαρμάρου ποικίλει εξαιτίας των ορυκτών ακαθαρσιών στον ασβεστόλιθο. Στον *Πίνακα 2.1* παρουσιάζονται οι αποχρώσεις των ασβεστολιθικών μαρμάρων ανά περιοχή.

*Πίνακας 2.1: Τύποι και προέλευση Ελληνικών μαρμάρων (Ανανίας Τσιραμπίδης, 2015).*

Τύποι και προέλευση ελληνικών μαρμάρων	
Ασβεστόλιθοι-Μάρμαρα (με >98% ασβεστίτη)	
Τύπος/Χρώμα	Περιοχή
Λευκά	Κεχροκάμπου-Βουνοχωρίου Καβάλας, Κουμαριάς-Καστανιάς Ημαθίας, Βενέτου Μαγνησίας, Πεντέλης-Διονύσου Αττικής, Νάξου-Πάρου-Ικαρίας
Ημίλευκα	Δύσβατου-Ελαφοχωρίου-Στενωπού-Φιλίππων Καβάλας, Ξηροπόταμου-Μοναστηριακού Δράμας, Τρανόβαλτου Κοζάνης, Αλμυροπόταμου Εύβοιας, Μιχούς Λέσβου
Τεφρόλευκα	Χαλκερού Καβάλας, Θάσου, Πανοράματος Δράμας, Ζάστενης-Αργαλαστής Μαγνησίας, Κοκκιναρά Αττικής, Πάρωννα Αρκαδίας, Λάρδου Ρόδου
Μπέζ	Ιωαννίνων, Δόμβραιναις-Μαρτίνου Βοιωτίας, Κιβωτού Γρεβενών, Καλυθίων Ρόδου
Ροδόχρωμα	Γέρμα Καστοριάς, Άρτας, Κλινόβου Τρικάλων
Τεφρόμαυρα	Ιππείου Λέσβου
Μαύρα	Πάρωννα Αρκαδίας, Αγίας Ρεθύμνης

### 2.2.2 Δολομιτικά Μάρμαρα

Ο δολομίτης είναι ένα πέτρωμα που περιέχει μέχρι 10% ασβεστίτη, και έχει τουλάχιστον 90% δολομίτη. Με βάση το ποσοστό δολομίτη που περιέχει τα ανθρακικά πετρώματα μπορούν να διακριθούν στις εξής κατηγορίες: **α)** Ασβεστόλιθος με 0-10% δολομίτη, **β)** Δολομιτικός ασβεστόλιθος με 10-50% δολομίτη, **γ)** Ασβεστιτικός δολομίτης με 50-90% δολομίτη και **δ)** Δολομίτη με 90-100% δολομίτη. Σήμερα υπάρχουν 4 θέσεις δολομιτών σε όλο τον κόσμο. Οι

μεγάλες εκτάσεις δολομιτών που εμφανίζονται, προκύπτουν από την αντικατάσταση των ασβεστολίθων από δολομίτη, αυτή η διαδικασία ονομάζεται δολομιτώση. Είναι πέτρωμα που ανήκει στα ιζηματογενή πετρώματα και χρησιμοποιείται σαν πρώτη ύλη στην κεραμική, στην οικοδομική, οδοποιία, στην παραγωγή λιπασμάτων στην υαλουργία κ.α.

Μπορούμε να μιλήσουμε εξολοκλήρου για δολομιτικά μάρμαρα στην περίπτωση που η περιεκτικότητα του μαρμάρου σε δολομίτη είναι πολύ υψηλή. Τα δολομιτικά μάρμαρα είναι πιο εύθραυστα και ευάλωτα από τα ασβεστολιθικά, με αποτέλεσμα να φθείρονται γρηγορότερα, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι είναι οικονομικότερα από τα ασβεστολιθικά. Η χρήση των δολομιτικών μαρμάρων είναι συνήθως γύρω από επενδύσεις κτιρίων.

Τα μάρμαρα διακρίνονται ανάλογα τη σύστασή τους σε ασβεστίτη ή δολομίτη στις εξής κατηγορίες:

- Χονδοκοκκώδη, όταν οι κρύσταλλοι έχουν μέγεθος  $d = (2-6) \text{ mm}$ .
- Μεσοκοκκώδη, όταν η διάμετρος των κόκκων είναι  $d = (0.5-2) \text{ mm}$ .
- Λεπτοκοκκώδη, όταν η διάμετρος των κόκκων είναι  $d = (0.01-0.5) \text{ mm}$

όσο πιο λεπτοκοκκώδη, τόσο πιο ανθεκτικά (Χρηστίδης, 2012).

Η διαφορά ανάμεσα στα ασβεστολιθικά και δολομιτικά μάρμαρα είναι ότι τα πρώτα περιέχουν το ορυκτό ασβεστίτη  $\text{CaCO}_3$ , και το δεύτερο περιέχει το ορυκτό δολομίτη  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ . Το κριτήριο το οποίο καθορίζει την επιλογή του ενός από τα δύο είναι η χρήση και η εφαρμογή για την οποία θέλεις να το χρησιμοποιήσεις όπως για παράδειγμα δαπεδόστρωση, επένδυση πρόσοψης κτηρίου κλπ. και τις εκάστοτε απαιτούμενες φυσικομηχανικές και διακοσμητικές ιδιότητες. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι αποχρώσεις των δολομιτικών μαρμάρων ανά περιοχή.

Πίνακας 2.2: Τύποι και προέλευση Ελληνικών δολομιτικών μαρμάρων (Ανανίας Τσιραμπίδης, 2015).

Τύποι και προέλευση ελληνικών μαρμάρων	
Δολομίτες (% ορυκτό δολομίτης)	
Τύπος/Χρώμα	Περιοχή
Λευκοί	Θάσου (92%), Γρανίτη (100%) - Βόλακα (100%) - Πηγών Δράμας (92%)
Ημίλευκος	Ελικώνα Βοιωτίας (87%)
Τεφρόλευκος	Νικήσιανης Καβάλας (87%)
Τεφρός	Μούνδρου Ρεθύμνης (90%)
Τεφρόμαυρος	Δαμάστας Ηρακλείου (62%)
Ερυθρός	Αγίου Βασιλείου Ρεθύμνης (80%)

Στην [Εικόνα 2.3](#) παρουσιάζονται οπτικά μερικά δείγματα από τα Ελληνικά μάρμαρα.



Εικόνα 2.3: Δείγματα Ελληνικών Μαρμάρων ([Orykta](#), 20/1/2025).

### 2.2.3 Γρανίτες

Ο γρανίτης είναι ένα πέτρωμα το οποίο διακρίνεται από τρία πράγματα. Το πρώτο είναι ότι αποτελείται από μεγάλους κόκκους ορυκτών που ενώνονται δυνατά μεταξύ τους, και είναι τόσο μεγάλοι οι κόκκοι του ώστε να διακρίνεται με το ανθρώπινο μάτι. Το δεύτερο είναι ότι ο γρανίτης περιέχει ορυκτά όπως ο χαλαζίας και ο άστριος, όπου αυτά τα δύο ορυκτά δίνουν στον γρανίτη ένα χρώμα ροζ έως λευκό. Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει και η συμβολή βοηθητικών ορυκτών όπως ο μαύρος βιοτίτης μαρμαρυγίας και ο μαύρος αμφίβολος. Και το τρίτο είναι ότι ανήκει στα εκρηξιγενή πετρώματα, και η τυχαία διάταξη των κόκκων του μας δείχνει ότι είναι ένα πλουτώνιο πέτρωμα. Τα ορυκτά από τα οποία σχηματίζεται είναι και αυτά που το χαρακτηρίζουν. Ο χαλαζίας είναι το ορυκτό που καθορίζει την σκληρότητα του, ο άστριος το χρώμα του και ο μαρμαρυγίας τον βαθμό εξαλλοίωσης του. Οι ενδείξεις που μας δείχνουν την κακή ποιότητα του γρανίτη είναι στην περίπτωση που ο άστριος είναι εξαλλοιωμένος, δηλαδή δεν έχει καθαρό, αλλά θαμπό χρώμα, υπερβολική ποσότητα μαρμαρυγία, μεγάλοι κόκκοι, πορώδης ιστός και περιεκτικότητα σιδηροπυρίτη. Την εξαλλοίωση του γρανίτη την αντιλαμβανόμαστε από κηλίδες και φλέβες χρώματος σκουριάς που εμφανίζονται στο πέτρωμα ([ThoughtCo](#), 20/2/2025). Οι ενδείξεις της καλής του ποιότητας είναι όταν αποτελείται από ομοιόμορφους μικρούς και μεσαίους κόκκους.

Ο γρανίτης είναι ένα πέτρωμα που έχει τις εξής ιδιότητες :

- είναι σκληρός
- συμπαγής
- βαρύς
- ανθεκτικός στις καιρικές συνθήκες
- δύσκολος στην κατεργασία

Παρακάτω στην *Εικόνα 2.4* παρουσιάζονται κάποια από τα δείγματα γρανιτών παγκοσμίως, και περιγράφονται σύντομα τα χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 2.4: Δείγματα Γρανιτών παγκοσμίως (*Hellenic Granite*, 24/2/2025).

## 2.2.4 Ψαμμίτες

Ο ψαμμίτης είναι πέτρωμα που ανήκει στα ιζηματογενή πετρώματα. Διακρίνονται πέντε είδη ψαμμιτών που συνήθως ξεχωρίζουν από το χρώμα τους. Αυτοί είναι :

- **Χαλικοψαμμίτες**, το χρώμα του είναι λευκό ως καστανότεφρο, είναι σκληρός, πολύ ανθεκτικός στις καιρικές συνθήκες, αλλά όχι ανθεκτικός στη φωτιά.

- **Αργιλικόι ψαμμίτες**, το χρώμα τους ανοιχτόχρωμο, με διάφορους χρωματισμούς. Είναι μικρής αντοχής και είναι ανθεκτικοί στις καιρικές συνθήκες. Δημιουργείται μια αργιλική οσμή όταν υγρανθούν.
- **Ασβεστολιθικοί και δολομιτικοί ψαμμίτες**, το χρώμα τους κιτρινωπό έως τεφροπράσινο. Είναι πολύ μαλακοί και καθόλου ανθεκτικοί στη φωτιά. Αποσθλώνονται σε βιομηχανικό περιβάλλον, αλλά και στη θάλασσα.
- **Μαργαϊκοί ψαμμίτες**, τα χαρακτηριστικά τους είναι παρόμοια με αυτά των αργιλικών και ασβεστολιθικών-δολομιτών ψαμμιτών. Συνήθως είναι κατώτερης ποιότητας.
- **Σιδηρούχοι ψαμμίτες**, το χρώμα τους κίτρινο, καστανό ή και κόκκινο. Είναι μεγάλης αντοχής και ανθεκτικοί στις καιρικές συνθήκες.
- **Πράσινοι ψαμμίτες**, το χρώμα τους πράσινο και προέρχεται από το ορυκτό γλαυκονίτη. Συχνά εμφανίζουν κηλίδες εξαιτίας από των καιρικών συνθηκών από τις οποίες προσβάλλονται.

Το χαρακτηριστικό που τους ξεχωρίζει είναι ότι αποτελούνται κυρίως από χαλαζιακούς κόκκους που ενώνονται μεταξύ τους με ορυκτή κόλλα, όπου αυτό είναι που προσδιορίζει και το χρώμα τους.

Η καλή ποιότητα των ψαμμιτών διακρίνεται από την ομοιόμορφη παρουσία των κόκκων και από την εμφάνιση μικρού αριθμού άλλων ορυκτών εκτός του χαλαζία, και από την πυριτική κόλλα.

Η ένδειξη της κακής τους ποιότητας προέρχεται από τον τυχόν μεγάλο αριθμό κόκκων αστρίων και μαρμαρυγιών, από την ορυκτή κόλλα ασβεστολιθικής, αργιλικής και μαργαϊκής χωρίς την παρουσία πυριτίου. Και τέλος μπορεί να υπάρχουν εγκλείσματα αργίλου ή σιδήρου ή σιδηροπυριτίου (Bέντεχορστ, P, 2017).

### 2.3 Το Πεντελικό μάρμαρο

Από αρχαιοτάτων χρόνων, το μάρμαρο υπήρξε ένα διαρκώς παρόν υλικό στην Ελλάδα, ένας ζωντανός και λαμπερός λίθος που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στην προϊστορική γλυπτική κατά την Ύστερη Νεολιθική εποχή (5300-4500 π.Χ.), αλλά έγινε πιο εμφανές στην τρίτη χιλιετία π.Χ., κατά την Πρώιμη Χαλκοκρατική Εποχή. Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά και εμβληματικά προϊόντα του προϊστορικού κυκλαδικού πολιτισμού ήταν τα λευκά μαρμάρινα ειδώλια γυναικών, πιθανότατα θεών της γονιμότητας, τα οποία εμφανίστηκαν ιδιαίτερα στην ακμή της Πρωτοκυκλαδικής II περιόδου (2800-2300 π.Χ.). Αυτά τα ειδώλια, με τα χέρια τους σταυρωμένα και τα κεφάλια ελαφρώς γερμένα προς τα πίσω, αιχμαλώτιζαν την προσοχή με την απλή φυσική ομορφιά τους. Η σχεδόν διαφανής ποιότητα του μαρμάρου που χρησιμοποιούνταν για τα ειδώλια τράβηξε το ενδιαφέρον των θεατών από την αρχαιότητα, αν και, όπως αποδεικνύεται σήμερα, η λευκή πέτρα συχνά ενισχυόταν με έντονα χρώματα, τα οποία οι γλύπτες πρόσθεταν στο τελικό στάδιο του έργου τους. Σύγχρονες εργαστηριακές αναλύσεις έχουν εντοπίσει ίχνη χρώματος σε μαρμάρινα ειδώλια, αγγεία και ακόμα και οστέινα εργαλεία, αποδεικνύοντας την χρήση χρωμάτων από τους προϊστορικούς τεχνίτες.

Η πρώτη χρήση του πεντελικού μαρμάρου στην Ακρόπολη χρονολογείται στον Παλαιότερο Παρθενώνα, που κατασκευάστηκε αμέσως μετά τη νίκη των Ελλήνων στον Μαραθώνα (490 π.Χ.). Ο ναός της Αθηνάς παρέμενε ημιτελής όταν οι Πέρσες κατέλαβαν την Αθήνα το 480 π.Χ. και κατέστρεψαν την Ακρόπολη. Με την εκκίνηση του οικοδομικού προγράμματος του Περικλή τη δεκαετία του 440 π.Χ., το πεντελικό μάρμαρο χρησιμοποιήθηκε ως το κύριο υλικό για την κατασκευή των νέων κτιρίων στην Ακρόπολη, καθώς και για τα κτίρια που την περιέβαλλαν, αλλά και για τα γλυπτά αναθήματα που το στόλιζαν. Η γλυπτική με πεντελικό μάρμαρο ξεκίνησε γύρω στο 570 π.Χ. ([Greece Is. 27/2/2025](#)).

Η τεράστια ποσότητα πεντελικού μαρμάρου που απαιτείται για την κατασκευή του Περικλειαικού Παρθενώνα κόβει την ανάσα. Παρά το γεγονός ότι τα θεμέλια του Παρθενώνα είναι από ασβεστόλιθο, ολόκληρη η αρχική κατασκευή του ναού ήταν από μάρμαρο, συμπεριλαμβανομένου και του βαθμιδωτού κρηπιδώματος (της βάσης). Η κατασκευή αποτελείται από 108 εξωτερικές και εσωτερικές κολώνες, 444 φατνώματα οροφής, 92 γλυπτές μετόπες, τη ιωνική ζωφόρο μήκους 160 μέτρων, τους τοίχους του σηκού, τα αετώματα, τα γείσα, τα επιστύλια και τα δοκάρια, τα γλυπτά και τα ακρωτήρια στην οροφή, καθώς και 9.000 μαρμάρινα κεραμίδια. Οι τρέχουσες εργασίες αποκατάστασης στον Παρθενώνα χρησιμοποιούν επίσης μάρμαρο από το όρος Πεντέλη, σχεδόν ταυτόσημο με το αρχικό υλικό, το οποίο εξάγεται από περιοχή πίσω από την κορυφή του βουνού, όπου διακρίνονται ακόμη καθαρά οι αρχαίες ουλές από τα λατομεία ([Greece Is. 27/2/2025](#)).

Κατά τη διάρκεια της ρωμαϊκής κυριαρχίας στην Ελλάδα, παρατηρήθηκε αναβίωση της χρήσης του πεντελικού μαρμάρου, καθώς ο Ιούλιος Καίσαρας και ο Οκταβιανός (Αύγουστος) το χρησιμοποίησαν στην Αθήνα για την κατασκευή της "αρχαϊκής" πύλης της νέας Ρωμαϊκής Αγοράς τον 1ο αιώνα π.Χ. Τον 2ο αιώνα μ.Χ., ολοκληρώθηκε ο τεράστιος Ναός του Ολυμπίου Διός και ανεγέρθηκε μια κομψή πύλη της πόλης από τον φιλέλληνα αυτοκράτορα Αδριανό, ενώ το Παναθηναϊκό Στάδιο (Καλλιμάρμαρο) επιστρώθηκε εξ ολοκλήρου από τον Ηρώδη Αττικό – έργο που σύμφωνα με τον Πausanias είχε σχεδόν εξαντλήσει το Πεντελικό μάρμαρο, οι Ρωμαίοι, ωστόσο, δεν περιορίστηκαν στη χρήση μόνο λευκού μαρμάρου. Στην αρχή της αυτοκρατορίας τους, ανακαλύπτοντας την πλούσια ποικιλία πολύχρωμων μαρμάρων που μπορούσαν να προμηθευτούν από την ανατολική Μεσόγειο, άρχισαν να εισάγουν πράσινο και κόκκινο μάρμαρο από την Πελοπόννησο, γκρι μάρμαρο από την Εύβοια και μαύρο μάρμαρο από τη Χίο. Επιπλέον, πράσινο μάρμαρο προερχόταν από τη Σκύρο και την Τήνο, ενώ η Θάσος παρείχε ένα εξαιρετικής ποιότητας λευκό μάρμαρο που ήταν ικανό να ανταγωνιστεί το Πεντελικό ([Greece Is. 27/2/2025](#)).

## **2.4 Η τεχνολογία εξόρυξης**

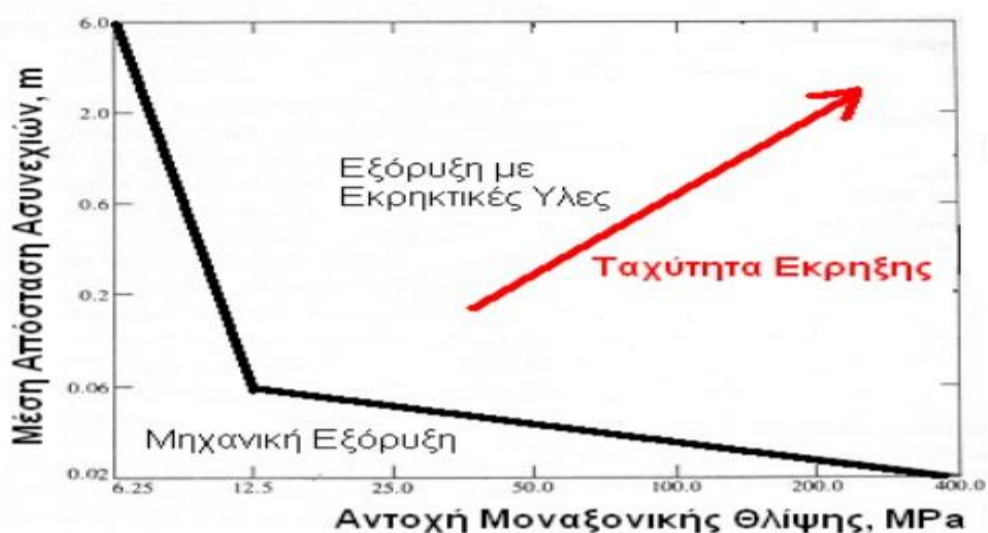
Η τεχνολογία εξόρυξης αποτελείται από ένα σύνολο βημάτων που στοχεύουν στην απομάκρυνση των πετρωμάτων από τη φυσική τους θέση. Το σημείο στο οποίο εκτελείται η εξόρυξη καλείται μέτωπο. Τα μέτωπα χωρίζονται σε υπόγεια και υπαίθρια, όπου η γεωμετρία και οι διαστάσεις τους εξαρτώνται από τον ρυθμό εξόρυξης, την μέθοδο και τα μηχανήματα που χρησιμοποιούνται. Αφού ολοκληρωθεί το πρώτο στάδιο της εξόρυξης, ακολουθεί η διαδικασία

φόρτωσης, μεταφοράς και απόθεσης του πετρώματος, ώστε να συνεχιστούν οι εργασίες εξόρυξης του πετρώματος στο μέτωπο.

Η εξόρυξη στοχεύει στην οικονομική αξία του πετρώματος, καθώς είναι ένα υλικό εμπορίας όπως αυτό είναι ή μετά από κατεργασία. Ο όγκος του πετρώματος που εξορύσσεται σε αυτή την περίπτωση ονομάζεται κοίτασμα και για την εκμετάλλευση του ακολουθείται όλη η διαδικασία της εξόρυξης. Άλλος ένας λόγος εξόρυξης είναι η δημιουργία κενού χώρου για έργα που αφορούν την οδοποιία, τις τομές πρανών και τη δημιουργία σηράγγων. Σε αυτή την περίπτωση το πέτρωμα δεν έχει κάποια οικονομική αξία και απορρίπτεται.

Οι μέθοδοι εξόρυξης είναι είτε με εκρηκτικές ύλες είτε με μηχανικά μέσα. Με τις εκρηκτικές ύλες η ενέργεια που δημιουργείται για την απομάκρυνση του πετρώματος από τη φυσική του θέση είναι χημική και προέρχεται από την εκρηκτική ύλη, η οποία μεταβάλλεται σε μηχανική και με την μορφή κρουστικού κύματος και αερίων μεγάλης πίεσης ασκούν τάσεις στην μάζα του πετρώματος. Πιο αναλυτικά η μέθοδος των εκρηκτικών υλών ακολουθείται από μια σειρά διαδικασιών που αποτελείται από την διάτρηση των διατρημάτων, την γόμωσή τους με μέσα έναυσης, έναυσματική γόμωση ή γόμωση πυθμένα και κυρίως γόμωση, την τοποθέτηση της επιγόμωσης, την συνδεσμολογία των μέσων έναυσης και την πυροδότηση. Οι παραπάνω διαδικασίες απαιτούν μεγάλη προσοχή και σχολαστικότητα στην εκτέλεση τους ([Παναγιώτου Γ.Ν, 2025](#)).

Με την χρήση των μηχανικών μέσων χρησιμοποιούνται μηχανήματα, τα οποία ασκούν μια μορφή τάσης στην επιφάνεια του πετρώματος, και αφού ξεπεραστούν οι μηχανικές αντοχές του πετρώματος προκαλεί τον τεμαχισμό και την απομάκρυνσή τους από την φυσική θέση τους. Στην [Εικόνα 2.5](#) παρουσιάζεται η σχέση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με τη μέση απόσταση των ασυνεχιών. Παρατηρούμε ότι τα πετρώματα με χαμηλότερη αντοχή προτιμάται η εξόρυξη με μηχανικά μέσα.



Εικόνα 2.5: Διάγραμμα εξόρυξης πετρωμάτων με ΕΥ/Μηχανικά μέσα ([Παναγιώτου Γ.Ν, 2025](#)).

Η επιλογή για τον τρόπο εξόρυξης των πετρωμάτων εξαρτάται κυρίως από τεχνικούς και οικονομικούς παραμέτρους. Οι δύο και πιο σημαντικοί είναι η αντοχή ενός άρρηκτου πετρώματος σε μονοαξονική θλίψη και η απόσταση των ασυνεχειών εντός της μάζας του πετρώματος. Το παραπάνω διάγραμμα μας δείχνει ότι με τα μηχανικά μέσα το πέτρωμα θα πρέπει να έχει μικρή αντοχή στην μονοαξονική θλίψη και αραιές ασυνέχειες ή μεγάλη αντοχή σε θλίψη και πυκνές ασυνέχειες στη μάζα του πετρώματος. Σχετικά με την χρήση των ΕΥ τα πετρώματα που ανατινάσσονται και παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε θλίψη και αραιές ασυνέχειες, η ΕΥ που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί απαιτεί να έχει μεγαλύτερη ταχύτητα έκρηξης. Γενικά η επιλογή της εξόρυξης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και συνήθως είναι μια σύνθετη απόφαση. Ο πιο κοινός «εργοταξιακός» νόμος είναι ότι τα «μαλακά» πετρώματα εξορύσσονται με μηχανικά μέσα και τα πιο «σκληρά» με ΕΥ.

Τα διακοσμητικά πετρώματα ακολουθούν δύο κύρια στάδια προκειμένου να εξορυχθούν, το πρώτο είναι η οριοθέτηση του χώρου εκμετάλλευσης, ο τόπος δηλαδή όπου θα γίνει η προσπέλαση και η εκκίνηση της εξόρυξης και το δεύτερο στάδιο είναι η κοπή των μαρμάρων από τη φυσική τους θέση. Πιο αναλυτικά, με τη χρήση διατρημάτων τα οποία τοποθετούνται οριζόντια και κατακόρυφα εισέρχεται το αδαμαντοφόρο σύρμα και γίνεται η κοπή, γνωστή ως συρματοκοπή. Η συρματοκοπή κινείται πάνω σε ράγες με κατεύθυνση προς τα πίσω, ταλαντώνοντας το αδαμαντοφόρο σύρμα. Με αυτό τον τρόπο απομακρύνεται το πέτρωμα από τη φυσική του θέση και έπειτα ακολουθείται η αποκόλληση, η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση εσκαφέα. Τα ογκομάρμαρα που προορίζονται για εμπορική χρήση διαχωρίζονται από τα στείρα υλικά τα οποία είτε χρησιμοποιούνται για αποκατάσταση του χώρου είτε χρησιμοποιούνται ως παραπροϊόν. Τέλος, το εξορυσσόμενο πέτρωμα φορτώνεται σε φορτηγά πλατφόρμες, με σκοπό τη μεταφορά τους σε εργοστάσια επεξεργασίας και σημεία εμπορίου.

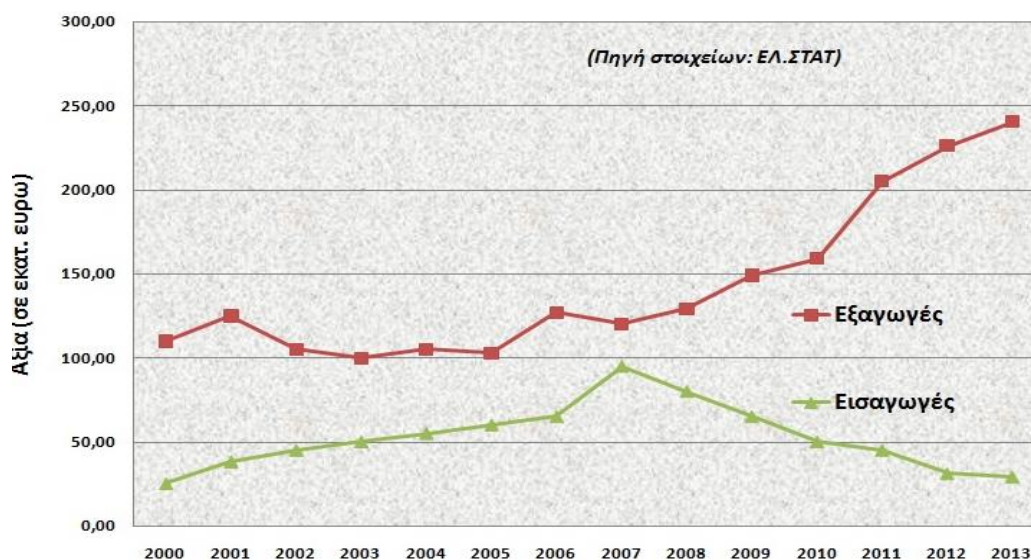
## **2.5 Οι κυριότερες χώρες εξαγωγών**

Οι κυριότερες χώρες εξαγωγών παγκοσμίως που εκφράζουν το 50% παραγωγής μαρμάρων και διακοσμητικών λίθων είναι αρχικά η Ιταλία που κατέχει την πρωτιά στην παραγωγή μαρμάρου με ποσοστό 20% σε όλο τον κόσμο, στη συνέχεια είναι η Κίνα με 16%, η Ινδία με 10% και η Ισπανία με 6%. Το υπόλοιπο 50% εκπροσωπείται από τις υπόλοιπες χώρες παραγωγής διακοσμητικών πετρωμάτων. Συγκεκριμένα στην Ελλάδα το απόθεμα μαρμάρων είναι μεγάλο, με μεγάλη ποικιλία όσο αναφορά τους χρωματισμούς, αλλά με κυρίαρχο ρόλο στα λευκά μάρμαρα τα οποία κατατάσσονται ως τα καλύτερα διεθνώς. Ο τομέας των Ελληνικών διακοσμητικών πετρωμάτων και μαρμάρων συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην εθνική οικονομία και διακατέχει ισχυρή θέση στην παγκόσμια παραγωγή, παρά τις δύσκολες συνθήκες που επικρατούν σχετικά με τον ανταγωνισμό και τους φραγμούς γύρω από τα περιβαλλοντικά θέματα. Στην [Εικόνα 2.6](#) βλέπουμε τις εισαγωγές και τις εξαγωγές των διακοσμητικών λίθων στην Ελλάδα από το 2000 έως το 2013.

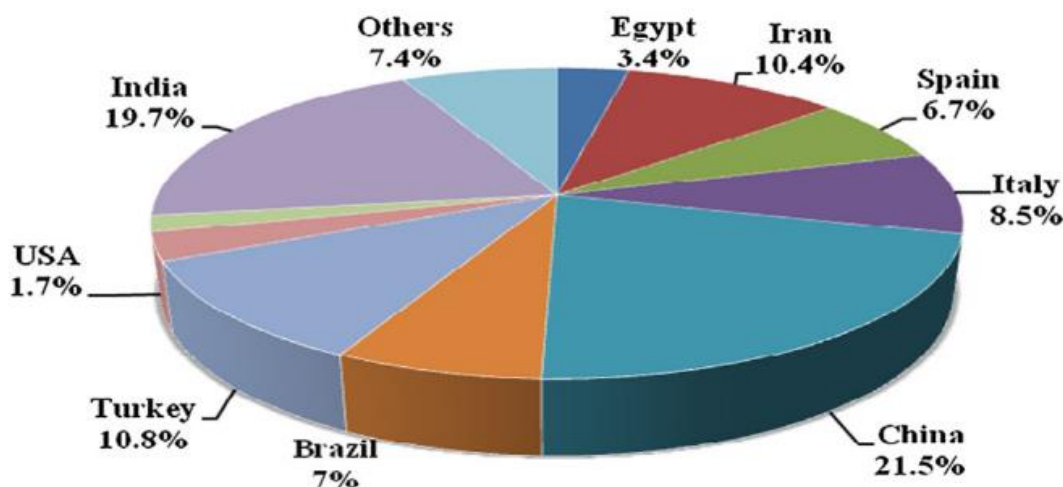
Η Ελλάδα το 2004 κατείχε την 11<sup>η</sup> θέση παραγωγής διακοσμητικών πετρωμάτων στον κόσμο, ανάμεσα σε μεγάλες χώρες όπως η Βραζιλία, η Ιταλία, η Τουρκία κ.α. Σημαντικό ρόλο για την κατάκτηση αυτής της θέσης είχε η ποιοτική αξία των Ελληνικών μαρμάρων (χρώματα,

μηχανικά χαρακτηριστικά), που είναι συγκριτικό πλεονέκτημα για τις εταιρίες που ασχολούνται με εξαγωγικές δραστηριότητες (Wahab, G. M. A. et all, 2019).

Η κατανάλωση φυσικών πόρων έχει αυξηθεί λόγω της αυξανόμενης ζήτησης για τις χρήσεις τους στην πρόσφατη διακόσμηση κτιρίων. Ο (Tilton, 2005) ανέφερε ότι το ανθρώπινο είδος έχει καταναλώσει περισσότερα αλουμίνιο, χαλκό, σίδηρο, χάλυβα, φωσφορικά πετρώματα, διαμάντια, θείο, άνθρακα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ακόμα και άμμο και χαλίκι τον περασμένο αιώνα από ό,τι σε όλους τους προηγούμενους αιώνες συνολικά. Ως αποτέλεσμα, σήμερα ο κόσμος παράγει και καταναλώνει σχεδόν όλα τα ορυκτά προϊόντα σε ιστορικά υψηλά ποσοστά κάθε χρόνο. Οι δέκα κορυφαίοι παραγωγοί λίθων λατομείων σύμφωνα με (Haggag, 2012) απεικονίζονται στην *Εικόνα 2.7*.



Εικόνα 2.6: Εισαγωγές και Εξαγωγές μαρμάρων και διακοσμητικών λίθων από το 2000-2013 (Oryktos Ploutos, 2015).



Εικόνα 2.7: Οι δέκα κορυφαίοι παραγωγοί λατομικών λίθων (Haggag, 2012).

## **2.6 Γνωστά κτίρια και μνημεία με την χρήση Ελληνικών διακοσμητικών λίθων**

Πολλά είναι τα κτίρια και τα μνημεία που έχουν κατασκευαστεί από Ελληνικούς διακοσμητικούς λίθους. Συγκεκριμένα το πεντελικό μάρμαρο υπάρχει σε μεγάλο ποσοστό στον Παρθενώνα, με θεμέλια ασβεστολιθικά, ήταν το κύριο υλικό κατασκευής των καινούργιων κτισμάτων της Ακρόπολης, ο ναός του Ήφαιστου στην Αθηναϊκή αγορά ήταν κτισμένος από πεντελικό μάρμαρο, η Στοά του Ατταλού στην αρχαία αγορά, το Παναθηναϊκό στάδιο (Καλλιμάρμαρο), το μέγαρο μουσικής, εθνική βιβλιοθήκη όπως και το Μνημείο του Λυσικράτη είναι κτισμένο από πεντελικό μάρμαρο. Το μάρμαρο της Πάρου υπάρχει σε έργα όπως στο Θησαυροφυλάκιο των Σιφνίων και τις προσόψεις του δεύτερου Ναού του Απόλλωνα και του Θησαυρού των Αθηναίων, χρησιμοποιήθηκε και σε πολλά έργα γλυπτικής τέχνης όπως ο Ερμής του Πραξιτέλους, η Αφροδίτη της Μήλου και η Νίκη της Σαμοθράκης. Το μάρμαρο της Νάξου εντοπίστηκε σε ένα άγαλμα «ο Κολοσσός του Απόλλωνα» μήκους 10,5 μέτρα. Με ασβεστόλιθο έχει κατασκευαστεί ο Ναός τους Δία στην Ολυμπία (Δήμου-Χωνιανάκη, E., 2020).

## **2.7 Η αξία των διακοσμητικών λίθων**

Μεγάλη αξία άρχισαν να έχουν οι διακοσμητικοί λίθοι από τον 7<sup>ο</sup> αιώνα π.Χ, καθώς ο λίθος ήταν το υλικό που μεταχειρίζονταν για την κατασκευή των κτιρίων. Από την Ομηρική εποχή η λέξη μάρμαρο είχε δώσει την εντύπωση ενός μεγάλου όγκου, χωρίς να έχει σημασία η σύσταση του. Κυρίως το μάρμαρο και ο ασβεστόλιθος ήταν το υλικό που συνέβαλε στην δόμηση και την διακόσμηση κτιρίων και ναών. Το μάρμαρο είναι ο λίθος ο οποίος έχει αξιόλογη και ξεχωριστή σημασία αφού είναι το πέτρωμα από το οποίο κατασκευάζονται τα περισσότερα ιστορικά αγάλματα, γλυπτά και μνημεία. Σήμερα όμως η αξία των διακοσμητικών πετρωμάτων είναι μεγαλύτερη, δεν περιορίζεται μόνο στην εμφάνιση που προσφέρουν στα κτίρια, αλλά καλύπτουν πλέον τεχνικές, οικολογικές και οικονομικές προϋποθέσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέγοντας φυσικά διακοσμητικά πετρώματα κατορθώνει κανείς την καλύτερη αναλογία τιμής και ποιότητας (Δήμου-Χωνιανάκη, E., 2020).

## Κεφάλαιο 3. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες διακοσμητικών λίθων

Οι ιδιότητες των διακοσμητικών λίθων χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Φυσικές ιδιότητες και
- Μηχανικές ιδιότητες

Οι φυσικές ιδιότητες παρουσιάζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που κατέχουν τα πετρώματα, και οι μηχανικές ιδιότητες μας δείχνουν την αντοχή των πετρωμάτων σε διάφορα είδη καταπονήσεων, αλλά και σε σταθερές όπως το μέτρο ελαστικότητας.

### 3.1 Φυσικές ιδιότητες πετρωμάτων

Οι πιο βασικές φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων είναι:

- Φαινόμενη πυκνότητα
- Πορώδες
- Ειδικό βάρος
- Φαινόμενο ειδικό βάρος
- Μοναδιαίο βάρος
- Υδαταπορρόφηση-Διαπερατότητα
- Ορυκτολογική σύνθεση και δομή

#### 3.1.1 Φαινόμενη πυκνότητα

Η φαινόμενη πυκνότητα έχει μονάδα μέτρησης τα  $\text{kg/m}^3$  και ο μαθηματικός τύπος είναι:

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.1)$$

όπου το  $m$  εκφράζει τη μάζα του πετρώματος και το  $V$  τον όγκο του.

Στα πετρώματα μετρούνται δύο όγκοι, ο ένας ονομάζεται φαινόμενος καθώς είναι ο όγκος του πετρώματος μαζί με τα κενά που έχει και ο δεύτερος είναι ο πραγματικός όπου υπολογίζετε ο όγκος του χωρίς τα κενά. Αυτό οφείλεται στο ότι όλα τα φυσικά διακοσμητικά πετρώματα εξαιτίας της προέλευσης τους περιέχουν κενά, κοιλότητες και οπές. Όλο αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κάθε πέτρωμα να αποτελείται από δύο φαινόμενες πυκνότητες. Με τον ίδιο τρόπο υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού άλλων δύο παραμέτρων, της πυκνότητας επί ξηρής βάσης ( $\text{kg/m}^3$ ) και της πυκνότητας επί κορεσμένης και επιφανειακά ξηρής βάσης ( $\text{kg/m}^3$ ). Η πρώτη παράμετρος είναι η παραλληλία της ξηρής μάζας ενός δείγματος αδρανούς προς τον όγκο που κατέχει στο νερό, συμπεριλαμβανομένων και των εσωτερικών στεγανών κενών και των προσβάσιμων από το νερό κενών και η δεύτερη περιγράφει την παραλληλία της συνολικής μάζας ενός δείγματος αδρανούς και της μάζας του νερού στα προσβάσιμα από το νερό κενά προς τον όγκο που κατέχει στο νερό συμπεριλαμβανομένων των εσωτερικών σφραγισμένων κενών και των προσβάσιμων από το νερό κενών αφού ευρίσκονται (Αγιουτάνης, Ζ., 2002).

### 3.1.2 Ειδικό βάρος

Το ειδικό βάρος (Specific gravity) είναι ένα αδιάστατο μέγεθος και δίνεται ως ο λόγος του βάρους μοναδιαίου όγκου του πετρώματος ως προς το βάρος του νερού όμοιου όγκου. Το ειδικό βάρος μας εξηγεί πόσο βαρύτερο ή ελαφρύτερο είναι το υλικό, από την όμοια ποσότητα νερού. Ο μαθηματικός τύπος του είναι:

$$\gamma = \frac{B}{V} \quad (3.2)$$

### 3.1.3 Πορώδες

Τα πετρώματα είναι υλικά τα οποία απαρτίζονται από στερεούς κόκκους αλλά και από κενά (πόρους) που σχηματίζονται ανάμεσα στους κόκκους και περιέχουν νερό ή/και αέρα. Το πορώδες (Porosity) εκφράζεται σε ποσοστό (%) και ο μαθηματικός τύπος είναι :

$$n = \frac{V_v}{V} (\%) \quad (3.3)$$

όπου το  $V_v$  εκφράζει το σύνολο των κενών που δεν έχουν στερεό υλικό και το  $V$  το συνολικό όγκο του πετρώματος.

### 3.1.4 Διαπερατότητα – Συντελεστής υδαταπορρόφησης

Διαπερατότητα είναι το γνώρισμα των πορωδών υλικών να διαπερνώνται από αέρια λόγω ανομοιότητας πίεσης. Ο πρωταρχικός νόμος που διέπει τον υπολογισμό της διαπερατότητας είναι ο νόμος του Darcy, σύμφωνα με τον οποίο ο ρυθμός ροής ενός ρευστού είναι απ' ευθείας αντίστοιχος της ανομοιότητας πίεσης που προκαλεί τη ροή. Η υδαταπορρόφηση είναι ο λόγος της μάζας ενός δοκιμίου κορεσμένου σε νερό προς ξηρό, μας παρουσιάζει την ποσότητα που απορροφάτε ανά εμβαδική μονάδα πετρώματος.

## 3.2 Μηχανικές ιδιότητες πετρωμάτων

Μια από τις σημαντικότερες μηχανικές παραμέτρους των πετρωμάτων είναι η αντοχή τους. Η αντοχή τους είναι αυτή που ορίζει το πόσο ικανά είναι τα πετρώματα να αντιστέκονται σε εξωγενείς παράγοντες, όπως είναι η τάση που τους ασκείται. Η μονάδα μέτρησης της τάσης είναι τα MPa.

Οι κατηγορίες καταπόνησης των πετρωμάτων είναι οι εξής:

- Αντοχή σε θλίψη
- Αντοχή σε εφελκυσμό
- Αντοχή σε κάμψη
- Αντοχή σε διάτμηση
- Αντοχή σε στρέψη
- Δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

- Αντίσταση σε τριβή
- Θραυστική στιβαρότητα
- Αντίσταση σε παγετό

### 3.2.1 Αντοχή σε θλίψη

Η αντοχή σε θλίψη είναι η μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει ένα πέτρωμα όταν υποβάλλεται σε συμπιεστική φόρτιση πριν αστοχήσει. Η μέτρηση αυτής της ιδιότητας γίνεται μέσω της δοκιμής θλίψης, κατά την οποία το δείγμα τοποθετείται μεταξύ δύο πλακών μιας υδραυλικής πρέσας και υπόκειται σε αυξανόμενο φορτίο μέχρι τη θραύση. Ο τύπος υπολογισμού είναι ο εξής:

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

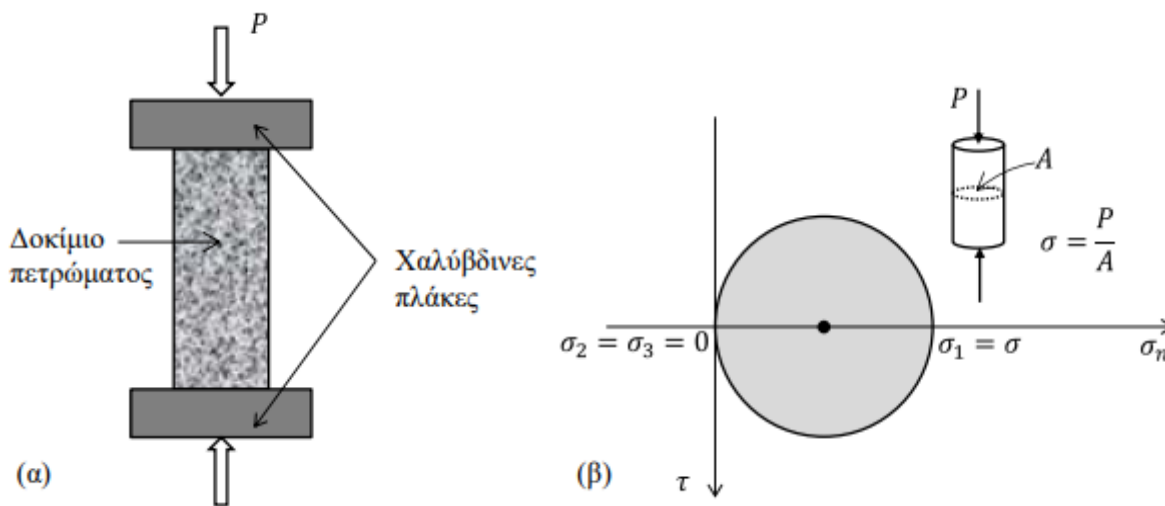
Όπου:

$\sigma_c$  η αντοχή σε θλίψη (MPa)

P το μέγιστο φορτίο θραύσης που εφαρμόζεται στο δείγμα (N),

A η επιφάνεια διατομής του δείγματος (m<sup>2</sup>).

Στην [Εικόνα 3.1](#) παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο εκτελείται η αντοχή σε θλίψη και ο κύκλος του Mohr της θεωρητικής εντατικής κατάστασης.



Εικόνα 3.1: α) Μονοαξονική θλίψη δοκιμίου β) κύκλος Mohr της θεωρητικής εντατικής κατάστασης του δοκιμίου (Νομικός, Π., 2015).

Στην περίπτωση που το δείγμα παρουσιάσει μικρή αντοχή σε θλίψη αυτό μπορεί να οφείλεται σε παράγοντες όπως την ορυκτολογική σύσταση, η υφή, η παρουσία μικρορωγμών και ο βαθμός κορεσμού του δείγματος σε νερό. Η αντοχή σε θλίψη των διακοσμητικών πετρωμάτων, δηλαδή η ικανότητά τους να αντέχουν σε συμπιεστικά φορτία χωρίς να θραυστούν, επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Αρχικά, η ορυκτολογική σύσταση του πετρώματος παίζει σημαντικό

ρόλο, καθώς διαφορετικά ορυκτά παρουσιάζουν ποικίλες μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, το πορώδες του πετρώματος επηρεάζει την αντοχή του, με τα υψηλότερα ποσοστά πορώδους να συνδέονται συνήθως με χαμηλότερη αντοχή σε θλίψη. Η φαινόμενη πυκνότητα σχετίζεται επίσης με την ανθεκτικότητα του πετρώματος, καθώς πετρώματα με μεγαλύτερη πυκνότητα τείνουν να είναι πιο ανθεκτικά. Τέλος, η παρουσία μικρορωγμών ή άλλων ατελειών μπορεί να μειώσει την αντοχή του πετρώματος σε θλίψη (Νομικός, Π., 2015).

### 3.2.2 Αντοχή σε κάμψη

Η αντοχή σε κάμψη περιγράφει την ικανότητα του πετρώματος να αντέχει εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται κατά την κάμψη. Η μέτρηση γίνεται μέσω της δοκιμής τριών σημείων ή τεσσάρων σημείων, όπου το δείγμα στηρίζεται σε δύο άκρα και ένα ή δύο φορτία ασκούνται στο κέντρο του αντίστοιχα, μέχρι την αστοχία. Ο τύπος υπολογισμού είναι ο ακόλουθος:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3.5)$$

Όπου:

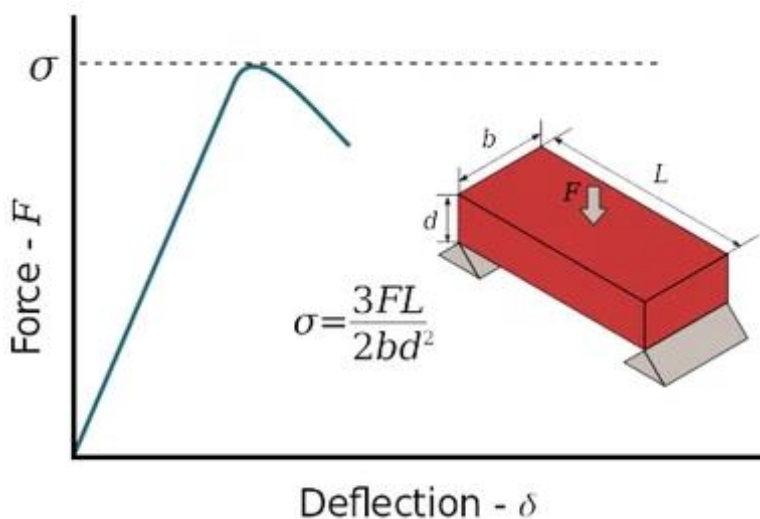
F είναι το μέγιστο φορτίο που εφαρμόζεται,

L είναι η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων (μήκος ανοίγματος),

b είναι το πλάτος του δείγματος,

d είναι το πάχος του δείγματος

Στην [Εικόνα 3.2](#) βλέπουμε την αντοχή σε κάμψη ενός δοκιμίου τριών σημείων.



Εικόνα 3.2: Δοκιμή αντοχής σε κάμψη τριών σημείων (HLC Metal Parts, 27/2/2025).

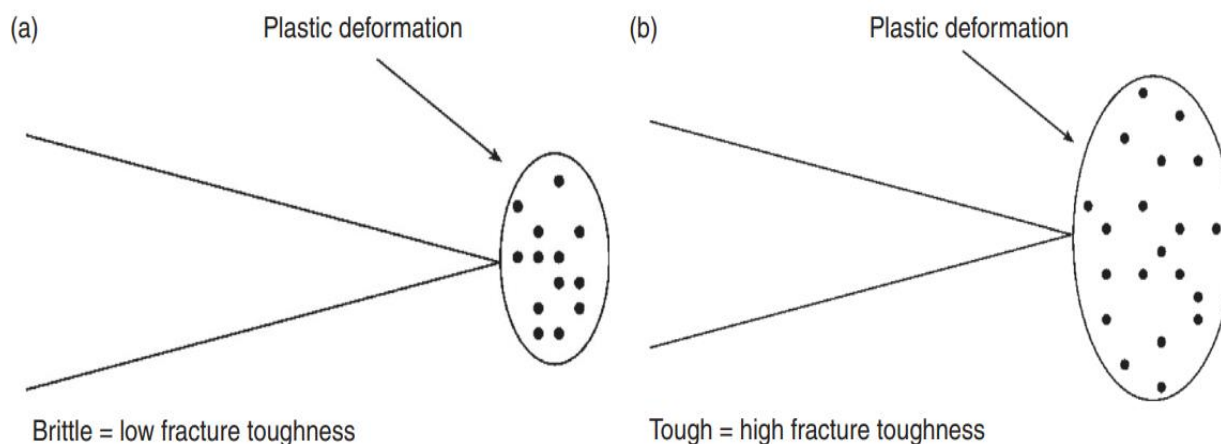
Η αντοχή σε κάμψη των διακοσμητικών πετρωμάτων επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες που σχετίζονται με τη φύση και τη δομή τους. Αρχικά, η ορυκτολογική σύσταση ενός πετρώματος παίζει καθοριστικό ρόλο. Για παράδειγμα, τα μάρμαρα με υψηλή περιεκτικότητα σε

ασβεστίτη παρουσιάζουν διαφορετική αντοχή σε κάμψη σε σύγκριση με αυτά που περιέχουν κυρίως δολομιτική σύσταση. Επιπλέον, το πορώδες και η φαινομενική πυκνότητα επηρεάζουν άμεσα την αντοχή του πετρώματος, καθώς τα πετρώματα με υψηλότερο πορώδες τείνουν να είναι πιο ευαίσθητα στη θραύση. Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων που απαρτίζουν το πέτρωμα. Τα λεπτόκοκκα πετρώματα έχουν συνήθως μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη σε σχέση με τα χονδρόκοκκα. Παράλληλα, η ανισοτροπία που δημιουργείται από τη δομή του πετρώματος, όπως οι στρώσεις ή οι προσανατολισμένοι κόκκοι, μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετική αντοχή ανάλογα με την κατεύθυνση της εφαρμοζόμενης δύναμης.

Τέλος, περιβαλλοντικοί παράγοντες, όπως η έκθεση σε παγετό, η χημική διάβρωση ή η φυσική καταπόνηση, μπορούν να μειώσουν σημαντικά την αντοχή των διακοσμητικών πετρωμάτων με την πάροδο του χρόνου. Συνεπώς, η επιλογή ενός διακοσμητικού πετρώματος για συγκεκριμένες εφαρμογές απαιτεί προσεκτική αξιολόγηση των παραπάνω παραγόντων, ώστε να διασφαλιστεί τόσο η ανθεκτικότητα όσο και η αισθητική του εμφάνιση (HLC Metal Parts, 27/2/2025).

### 3.2.3 Θραυστική στιβαρότητα

Η θραυστική στιβαρότητα υποδηλώνετε συνήθως με το σύμβολο  $K_{IC}$ , και μας δείχνει την ένταση της τάσης που παράγεται για την διάδοση ενός κατάγματος. Η αντοχή της θραύσης ποικίλει θετικά με την αύξηση του όγκου του υλικού όπου παραμορφώνεται πλαστικά ή με μικρορωγμές. Αυτό μας το δείχνει και η [Εικόνα 3.3](#), ο ρυθμός απελευθέρωσης της ενέργειας, η ένταση της πίεσης και επομένως η σκληρότητα του υλικού και η ανθεκτικότητα στη θραύση, σχετίζονται. Παρέχουν ωστόσο διαφορετικές μετρήσεις της αντοχής της θραύσης στο υλικό και έχουν διαφορετικές μονάδες μέτρησης.



Εικόνα 3.3: Η αντοχή στη θραύση ποικίλλει θετικά με την αύξηση του όγκου του υλικού στο άκρο της θραύσης που παραμορφώνεται πλαστικά ή αν και μικροσκάσιμο. (α) Εάν ο όγκος είναι μικρός, η σκληρότητα είναι χαμηλή και το υλικό εύθραυστο. (β) Εάν ο όγκος είναι μεγάλος, η σκληρότητα είναι υψηλή και το υλικό σκληρό (Agust Gudmundsson, 2011).

Ο μαθηματικός τύπος που μας δίνεται για τον υπολογισμό το τασικό πεδίο γύρω από μια αιχμηρή ρωγμή μεγέθους  $2a$  εντός του άπειρου μέσου υπο εφελκυστική φόρτιση  $\sigma$  δίδεται από:

$$KI = \sigma\sqrt{\pi a} \quad (3.6)$$

όπου το  $KI$  είναι ο συντελεστής έντασης της τάσης και η μονάδα μέτρησης είναι  $\text{MPa m}^{0.5}$ . Η κρίσιμη τιμή της παραμέτρου ονομάζεται θραυστική στιβαρότητα και καθορίζει αν θα διαδοθεί η ρωγμή. Οι τυπικές τιμές που δίνονται για την θραυστική στιβαρότητα,  $KIc$ , για τα περισσότερα δείγματα στερεών πετρωμάτων σε θερμοκρασία και πίεση δωματίου είναι  $0,5\text{--}3 \text{ MPa m}^{0.5}$ . Σπάνια τα δείγματα βράχου αποδίδουν σκληρότητα έως και  $5\text{--}20 \text{ MPa m}^{0.5}$ , ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, οι παραπάνω τιμές δεν αλλάζουν πολύ. Σε υψηλή πίεση  $60\text{--}100\text{MPa}$  ορισμένα δείγματα πετρωμάτων ασβεστόλιθου και ψαμμίτη έχουν σκληρότητα θραύσης περίπου  $5\text{MPa m}^{0.5}$  (*Atkinson and Meredith, 1987*).

### 3.3 Οπτικές ιδιότητες – Λευκότητα

Οι φυσικοί λίθοι αποτελούνται από μακροσκοπικά γνωρίσματα όπου συμβάλουν στον σχηματισμό τους και στο είδος των ορυκτών από τα οποία αποτελούνται. Αυτά τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά είναι το χρώμα, η υφή και ο ιστός. Σύμφωνα με τα παραπάνω δεδομένα μπορούμε να αναγνωρίσουμε τα πετρώματα μέσα από τρεις φάσεις.

- **Το είδος του πετρώματος**, αν ανήκει στα μεταμορφωμένα, ιζηματογενή πετρώματα κλπ Ένα μεταμορφωμένο πέτρωμα εμφανίζει κρυσταλλικό ιστό ή έχει κρυστάλλους στη μάζα του, ενώ ένα ιζηματογενές πέτρωμα είναι μια άμορφη μάζα και δεν περικλείεται από κρυστάλλους.
- **Επεξήγηση του ιστού και της υφής**. Ο ιστός ενός πετρώματος σχηματίζεται σύμφωνα με την κρυσταλλικότητά του, τη σύνδεση των ορυκτών του, το μέγεθος και το σχήμα του. Η θερμοκρασία, η πίεση και τα αέρια είναι παράγοντες που επηρεάζουν τον ιστό των πετρωμάτων. Η υφή είναι η ταξινόμηση των ορυκτών στην μάζα του πετρώματος.
- **Το χρώμα**, είναι από τα βασικότερα χαρακτηριστικά που μας βοηθούν να αναγνωρίσουμε τα πέτρωμα.

## Κεφάλαιο 4. Στατιστική επεξεργασία - συσχέτιση ιδιοτήτων

Σκοπός της εργασίας ήταν η συλλογή δεδομένων γύρω από τις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες διαφόρων διακοσμητικών λίθων από βάσεις δεδομένων και η στατιστική επεξεργασία τους. Οι βάσεις δεδομένων είναι συστήματα τα οποία διευκολύνουν τον χρήστη. Είναι μια ολοκληρωμένη συλλογή δεδομένων στην οποία έχει πρόσβαση και του δίνει τη δυνατότητα να τα χειρίζεται και να τα χρησιμοποιεί. Επίσης, μπορεί να αποθηκεύσει και να οργανώσει πληροφορίες ο ίδιος ο χρήστης μέσα σε μια βάση δεδομένων.

Οι βάσεις δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τρεις. Οι δύο από αυτές είναι η RMDB (Rock Mechanics Database) και η STREMA-DB (Decorative Stones). Η τρίτη βάση που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Stone-Contact (<https://www.stonecontact.com/>). Είναι μια βάση με μεγάλη ποικιλία σε πετρώματα παγκοσμίως και σε πολλά από αυτά δίνονται πληροφορίες που σχετίζονται με την απορροφητικότητα, το πορώδες, την αντοχή σε θλίψη, την αντοχή σε κάμψη και την πυκνότητα.

Η ανάλυση των βάσεων RMDB και STREMA-DB παρουσιάζονται αναλυτικά στο επόμενο υποκεφάλαιο.

### 4.1 Βάσεις δεδομένων RMDB (Rock Mechanics Database) και STREMA-DB (Decorative Stones)

Οι βάσεις αυτές δημιουργήθηκαν από το εργαστήριο Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αυτό που προσφέρει την μοναδικότητα στα δεδομένα των παραπάνω βάσεων και ο στόχος είναι ο γρήγορος εντοπισμός μιας εγγραφής σ' ένα πίνακα. Στη βάση RMDB και STREMA-DB αποθηκεύονται δεδομένα και πληροφορίες που σχετίζονται με τα πετρώματα, τα πειράματα και τα εργαστήρια. Μέσα σε αυτές τις βάσεις μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες γύρω από την αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε κάμψη, τριαξονική αντοχή κ.ο.κ για διάφορα πετρώματα από διάφορα ακαδημαϊκά εργαστήρια.

#### 4.1.1 STREMA-DB (Strength of Materials Database)

Η STREMA-DB η χρήση της βοηθά τους μηχανικούς να εξοικονομούν χρόνο, να αποφεύγουν την απώλεια πολύτιμων δεδομένων και να αξιοποιούν ήδη καταγεγραμμένες γνώσεις. Παράλληλα, διασφαλίζει την εγκυρότητα των δεδομένων, εγγυάται την ασφάλεια τους και επιτρέπει την ιχνηλάτησή τους στις αρχικές τους πηγές. Η βάση δεδομένων παρέχει επίσης τις απαραίτητες πληροφορίες για την αντοχή των υλικών σε όσους χρειάζονται όπως φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων όπως ειδικό βάρος, πυκνότητα, πορώδες και μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε θλίψη, αντοχή σε κάμψη κ.α. Επιπλέον, η STREMA-DB επιτρέπει την επιλογή των καταλληλότερων υλικών για συγκεκριμένες εφαρμογές, σύμφωνα με τις προδιαγραφές. Παράλληλα, παρέχει κριτήρια βαθμονόμησης της απόδοσης ή της αστοχίας διαφόρων εύθραυστων και όλκιμων υλικών, διευκολύνοντας τη μετέπειτα χρήση τους σε στατικές (μονότονες ή κυκλικές) και δυναμικές αναλύσεις αστοχίας, βλάβης ή θραύσης, με τη βοήθεια κατάλληλων αριθμητικών εργαλείων. Στην *Εικόνα 4.1* παρουσιάζεται ένα μέρος της βάσης το

οποίο μας δείχνει το έργο της που είναι οι διακοσμητικές πέτρες, καθώς και τις 183 καταχωρήσεις των υλικών που περιέχει. Επιλέγοντας ένα από αυτά εμφανίζονται και οι υπόλοιπες πληροφορίες για κάθε υλικό.

## STREMA-DB: Strength of Materials Database

[Αρχική](#) » [Έργα](#) » Διακοσμητικές Πέτρες

### Έργο: Διακοσμητικές Πέτρες

Όνομα	Διακοσμητικές Πέτρες
Περιγραφή	
Δημιουργία χρόνου	27-06-2012 13:00:44
Δημιουργία χρήστη	Παντελής Λιόλιος
Ώρα ενημέρωσης	27-06-2012 13:00:44
Ενημέρωση χρήστη	Παντελής Λιόλιος

Λειτουργίες

[Αναζήτηση Υλικών](#)  
[Κατάλογος Έργων](#)

### Υλικά Έργου

Εμφάνιση 1-10 από 183 αποτελέσματα.

Όνομα	Τύπος	Ταξινόμηση
<a href="#">Ψαμμίτης Achaia Sandstone (Ψαμμίτης)</a>	αμμόπετρα	πέτρες
<a href="#">Μπεζ Serpeggiante Silvabella (Μπέζ)</a>	Δολομιτικό μάρμαρο (Δολομιτικό)	μάρμαρο
<a href="#">Helikonas – Zaltsa Semi White (Ελικώνα - Ζάλτσα Ημίλευκο)</a>	Δολομιτικό μάρμαρο (Δολομιτικό)	μάρμαρο
<a href="#">Ioannina Beige - Trani (Ιωαννίνων Μπεζ Τράνι)</a>	ασβεστόλιθος(Ένδο - Βιομηχανικός Ασβεστόλιθος)	πέτρες
<a href="#">Karystos Schists Green (Καρύστου Σχιστόπλακες Πράσινες)</a>	Σιπολινομάρμαρο	μάρμαρο
<a href="#">Pink Paramythia Slates (Παρσυμυθιάς Πλάκες)</a>	ασβεστόλιθος (Απολιθωματοφόρος μικριτικός ασβεστόλιθος)	πέτρες
<a href="#">Semi White Tranovaltos(Τρανόβαλτου Ημίλευκο)</a>	Ασβεστικό μάρμαρο	μάρμαρο
<a href="#">Syki Semi White (Συκής Ημίλευκο)</a>	Ασβεστικό μάρμαρο	μάρμαρο
<a href="#">Λευκό Blanco Cristal</a>		Γρανίτης
<a href="#">White Paonazetto Bianco (Λευκό)</a>		μάρμαρο

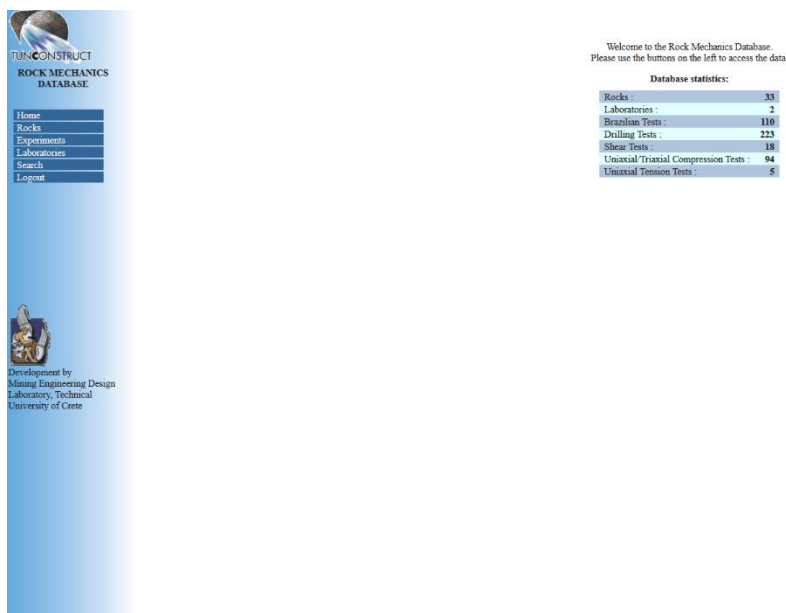
Μετάβαση στη σελίδα: [< Προηγούμενο](#) [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) [6](#) [7](#) [8](#) [9](#) [10](#) [Επόμενο >](#)

Πνευματικά δικαιώματα © 2025 από το [Mine Design Laboratory](#).  
Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Εικόνα 4.1:Κατάλογος πετρωμάτων στη βάση STREMA-DB (<http://minelab.mred.tuc.gr/stremadb/>)

#### 4.1.2 RMDB (Rock Mechanics DataBase)

Η RMDB είναι μια εξειδικευμένη βάση δεδομένων που συγκεντρώνει πληροφορίες για διακοσμητικούς λίθους όπως το μάρμαρο, γρανίτες, ασβεστόλιθους, ψαμμίτες αλλά περιλαμβάνει πληροφορίες και για άλλα ορυκτά όπως τον γύψο. Περιέχει πληροφορίες για τα πετρώματα που αφορούν φυσικές ιδιότητες όπως πυκνότητα, ειδικό βάρος, πορώδες αλλά και μηχανικές ιδιότητες όπως αντοχή σε θλίψη, Brazilian test κ.α. Στην [Εικόνα 4.2](#) παρουσιάζεται η πρώτη σελίδα κατά την είσοδο μας στη βάση RMDB στην οποία περιέχεται ένας πίνακας με τα στατιστικά τη βάσης, καθώς και ένα μενού πλοήγησης και αναζήτησης για την διευκόλυνση της χρήσης της.



Εικόνα 4.2: Βάση δεδομένων RMDb (<http://minelab.mred.tuc.gr/rmdb/>)

## 4.2 Πρότυπες κατανομές

### 4.2.1 Κανονική κατανομή (Κατανομή Gauss ή Normal Distribution)

Μία από τις πιο συνηθισμένες πρότυπες κατανομές είναι η κανονική κατανομή ή αλλιώς κατανομή Gauss, καθώς επινοήθηκε από τον ίδιο τον Gauss με σκοπό να περιγράψει δεδομένα τα οποία είναι συγκεντρωμένα γύρω από την μέση τιμή τους. Η συγκεκριμένη κατανομή είναι γνωστή αφού έχει σχήμα «καμπάνας» και ένας μεγάλος αριθμός τυχαίων μεταβλητών είναι συμμετρικά κατανομημένοι. Η κανονική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας δίνεται από την παρακάτω εξίσωση :

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4.1)$$

Με το  $\mu$  να είναι η μέση τιμή του πληθυσμού, το  $\sigma$  να είναι η τυπική απόκλιση,  $x$  μια τιμή της συνεχούς τυχαίας μεταβλητής και η  $\exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$  είναι μια εκθετική συνάρτηση (Goumas, S., 2015).

Στην *Εικόνα 4.3* βλέπουμε με την μπλέ γραμμή τη μορφή της γραφικής παράστασης μιας κανονικής κατανομής.

### 4.2.2 Λογαριθμοκανονική κατανομή (Log-normal Distribution)

Λογαριθμοκανονική κατανομή είναι όταν ο λογάριθμος μια μεταβλητής  $X$  ( $\ln X$ ) ακολουθεί την κανονική κατανομή. Συνήθως όταν υπάρχει μεγάλο εύρος τυχαίων θετικών μεταβλητών, τότε υπάρχει πιθανότητα να ακολουθεί την λογαριθμοκανονική κατανομή. Αυτή είναι και η βασική διαφορά ανάμεσα στην κανονική κατανομή και την λογαριθμοκανονική, ότι η κανονική κατανομή μπορεί να συμπεριλαμβάνει και αρνητικές μεταβλητές. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της συγκεκριμένης κατανομής είναι:

$$\varphi(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad (4.2)$$

Όπου:

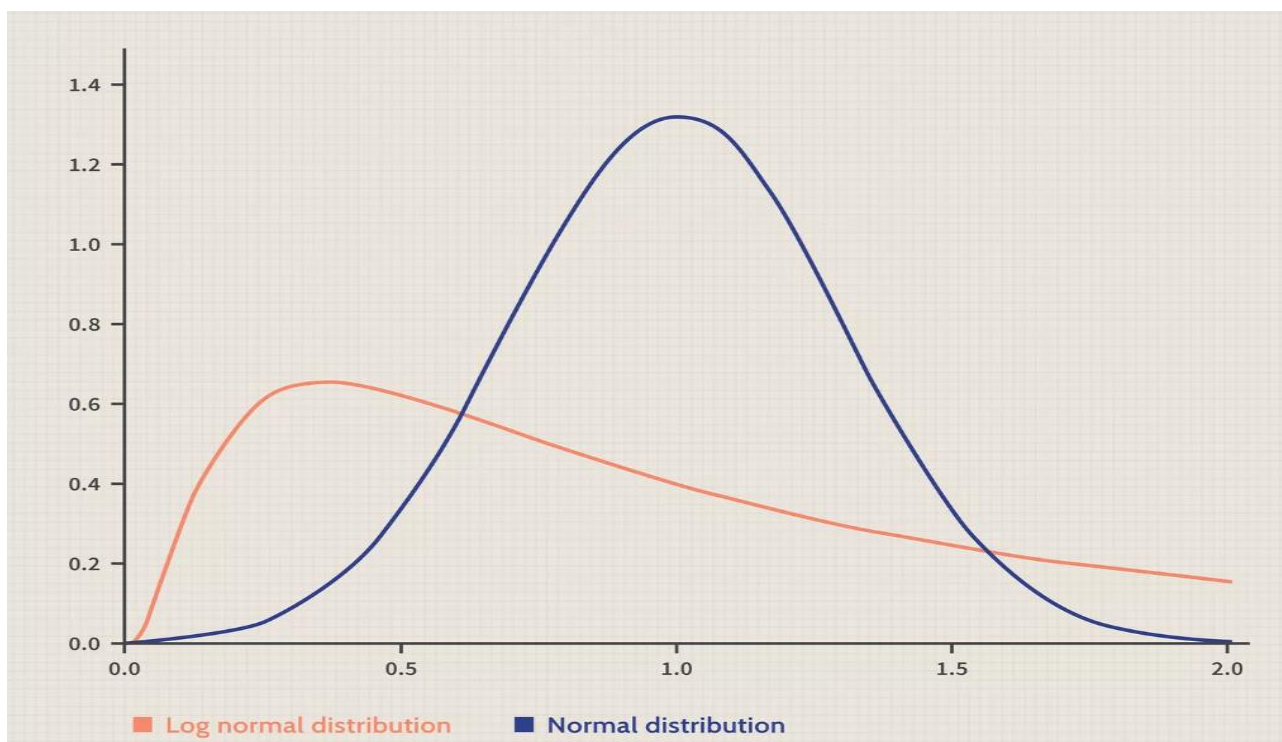
$x$  είναι η τυχαία μεταβλητή που πρέπει να είναι  $x > 0$

$\mu$  είναι η μέση τιμή της κανονικής κατανομής του λογαριθμικού της τυχαιάς μεταβλητής του  $x$

$\sigma$  είναι η τυπική απόκλιση και

$\exp\left[-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma_x^2}\right]$  είναι μια εκθετική συνάρτηση (Goumas, S., 2015).

και μια γραφική παράσταση της log-normal κατανομής έχει την παρακάτω μορφή της [Εικόνας 4.3](#) με την κόκκινη γραμμή :



Εικόνα 4.3: Γράφημα κανονικής & λογαριθμο-κανονικής κατανομής (Investopedia, 13/12/2024).

### 4.2.3 Κατανομή Weibull (Weibull Distribution)

Η Weibull κατανομή αναλύθηκε από ένα Σουηδό μαθηματικό, τον Waloddi Weibull όπου την ανέλυσε λεπτομερώς το 1939. Σκοπός της συγκεκριμένης κατανομής είναι να παρουσιάσει συνεχή δεδομένα, όπως κάνει και η κανονική κατανομή με την διαφορά ότι μπορεί να μοντελοποιήσει λοξά τα δεδομένα, είτε δεξιά είτε αριστερά. Αυτός είναι και ο λόγος που συνήθως χρησιμοποιείται η συγκεκριμένη κατανομή, ότι μπορεί και προσαρμόζεται σε διάφορες

συνθήκες. Στη βιβλιογραφία συχνά αναφέρεται ότι η κατανομή Weibull μοιάζει με την εκθετική κατανομή και την Rayleigh κατανομή. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της συγκεκριμένης κατανομής δύο παραμέτρων δίνεται από την εξίσωση :

$$\varphi(x) = \frac{\kappa}{\alpha} \cdot \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\kappa-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\kappa}} \quad (4.3)$$

Όπου:

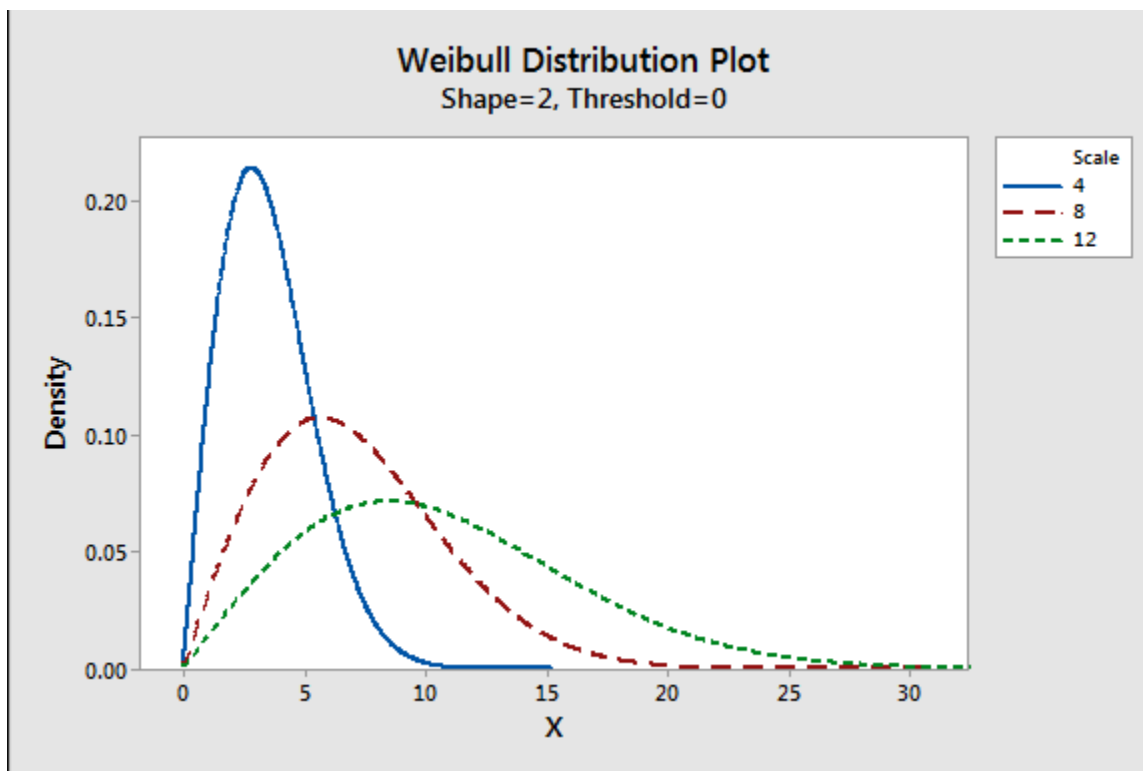
$\alpha$  είναι η παράμετρος κλίμακας με  $\alpha > 0$

$\kappa$  είναι η παράμετρος σχήματος με  $\kappa > 0$

$x$  είναι η τιμή μεταβλητής  $0 < x < \infty$  και

$e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\kappa}}$  είναι μια εκθετική συνάρτηση. (Goumas, S., 2015).

και μια γραφική παράσταση της Weibull κατανομής δύο παραμέτρων παρουσιάζεται στην *Εικόνα 4.4*:



Εικόνα 4.4: Γράφημα Weibull Κατανομής (Statistics by Jim, 13/12/2024).

### 4.3 Στατιστικοί έλεγχοι κατανομών

Οι στατιστικοί μέθοδοι κατανομών χρησιμοποιούνται για να ελέγξουν την κανονικότητα των δεδομένων μας. Δύο είναι οι πιο δημοφιλείς μέθοδοι για τον έλεγχο αυτόν, ο Kolmogorov–Smirnov και ο Shapiro–Wilk. Και οι δύο είναι εξίσου αξιόπιστοι απλά έχουν διαφορές τις οποίες δεν μπορούμε να παραβλέψουμε, αφού είναι και οι παράμετροι οι οποίοι πρέπει να λάβουμε υπόψιν ώστε να χρησιμοποιήσουμε την κάθε μέθοδο.

Η μέθοδος του Shapiro–Wilk χρησιμοποιείται συνήθως σε περιπτώσεις όπου έχουμε μικρό αριθμό δείγματος ( $n < 50$  δείγματα), και με την μηδενική υπόθεση ότι το πλήθος των δεδομένων μας είναι κανονικά κατανομημένο. Αυτό το διασταυρώνει η στατιστική μεταβλητή  $p$ -value η οποία μας απορρίπτει την υπόθεση ότι δεν υπάρχει κανονική κατανομή στην περίπτωση που υπάρχει τιμή μεγαλύτερη από 0,05 ( $p\text{-value} > 0.05$ ), ενώ μια χαμηλότερη τιμή από 0,05 ( $p\text{-value} < 0.05$ ) υποδηλώνει ότι δεν είναι κανονικά κατανομημένα τα δεδομένα μας. Συνήθως αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται περισσότερο όταν θέλουμε να ελέγξουμε την κανονική κατανομή.

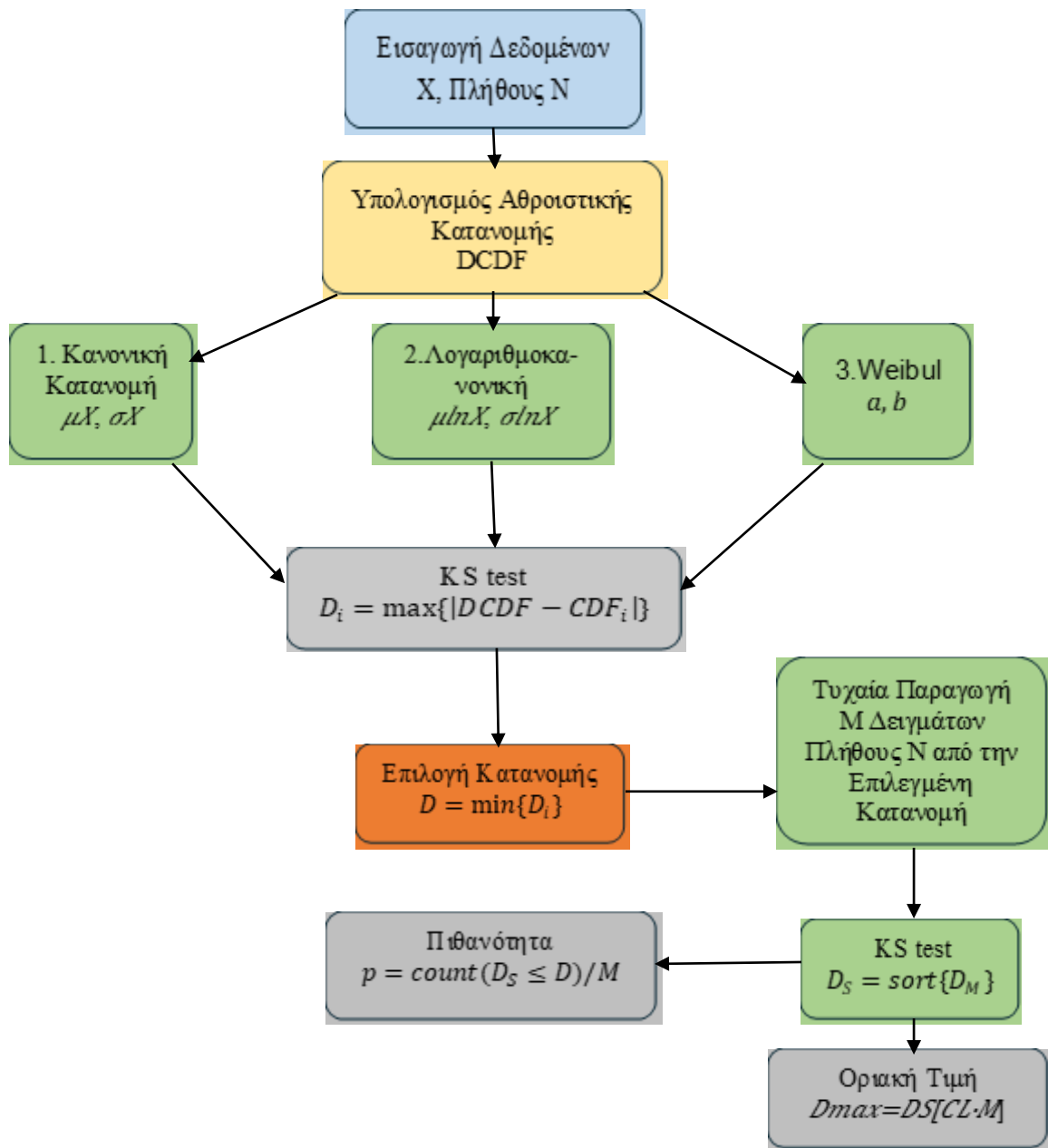
Αντίθετα, η μέθοδος του Kolmogorov–Smirnov χρησιμοποιείται για μεγάλο εύρος δεδομένων ( $n \geq 50$ ) και έχει την δυνατότητα να ελέγχει όχι μόνο αν τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή, αλλά και οποιαδήποτε άλλη κατανομή όπως Weibull, εκθετική κ.ο.κ. Και στην συγκεκριμένη μέθοδο χρησιμοποιείται η μηδενική υπόθεση, αλλά η μηδενική υπόθεση αφορά ότι τα δεδομένα γενικά ακολουθούν μια υποτιθέμενη κατανομή, χωρίς να επικεντρώνεται μόνο στην κανονική. Όμοια ισχύει η υπόθεση για την παράμετρο του  $p$ -value ([Stack Exchange, 10/2/2025](#)).

Στην παρούσα εργασία εφόσον υπάρχει μεγάλο πλήθος δεδομένων η μέθοδος που χρησιμοποιήσαμε για τον έλεγχο της κανονικότητας είναι του Kolmogorov–Smirnov μέσω του προγράμματος της Matlab. Με αυτό φαίνεται ότι τα δεδομένα μας δεν ακολουθούν μόνο την κανονική κατανομή αλλά και άλλες κατανομές όπως την λογαριθμοκανονική (log-normal) και την Weibull.

Χρησιμοποιώντας την Matlab παρατηρείται μια λεπτομερή στατιστική ανάλυση των μετρήσεων ειδικού βάρους, πορώδους, αντοχή σε θλίψη και αντοχή σε κάμψη. Στόχος μας ήταν να ελέγξουμε αν τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική ή κάποια άλλη κατανομή, κάτι που είναι κρίσιμο για την ανάλυση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόσαμε τον έλεγχο Kolmogorov-Smirnov (K-S Test) έναν από τους πιο αξιόπιστους στατιστικούς ελέγχους για την κανονικότητα των δεδομένων.

Στο Matlab η διαδικασία αυτή περιλάμβανε ([Εικόνα 4.5](#)) τη χρήση ενσωματωμένων συναρτήσεων για τον υπολογισμό της κατανομής των δεδομένων και την εκτέλεση του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov. Ο έλεγχος σύγκρινε την κατανομή των πειραματικών δεδομένων με μια θεωρητική κανονική κατανομή ή λογαριθμοκανονική, ώστε να διαπιστωθεί αν η απόκλιση είναι στατιστικά σημαντική. Η Matlab επίσης οπτικοποίησε αυτή τη διαδικασία με διαγράμματα που δείχνουν το αθροιστικό διάγραμμα κατανομής (CDF) των δεδομένων σε σύγκριση με τη θεωρητική κατανομή. Η γραφική απεικόνιση των αποκλίσεων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής επιβεβαίωσε τα αποτελέσματα του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov, προσφέροντας μας μια σαφή εικόνα για την στατιστική συμπεριφορά των μετρήσεων. Στο [παράρτημα Β](#) παρουσιάζονται οι πραγματικοί κώδικες που δημιουργήθηκαν στην Matlab σύμφωνα με τον έλεγχο του Kolmogorov-Smirnov και του Monte Carlo.

Παρακάτω δημιουργήσαμε ένα διάγραμμα ροής για την μεθοδολογία της Matlab η οποία ήταν σημαντική για την κατανόηση της φύσης των δεδομένων μας και την επιστημονική τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα ροής στατιστικών ελέγχων.

Η διαδικασία ξεκινά με την εισαγωγή των δεδομένων X, τα οποία αποτελούνται από N παρατηρήσεις. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η πειραματική αθροιστική κατανομή των δεδομένων.

Ακολουθεί ο προσδιορισμός των βέλτιστων παραμέτρων για τρεις διαφορετικές κατανομές: την κανονική, τη λογαριθμοκανονική και την Weibull. Έπειτα, υπολογίζεται η μέγιστη απόκλιση καθεμιάς από αυτές τις τρεις κατανομές σε σχέση με την πειραματική κατανομή.

Η κατανομή που παρουσιάζει το μικρότερο σφάλμα, βάσει του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov, επιλέγεται ως η πιο κατάλληλη για την περιγραφή των δεδομένων.

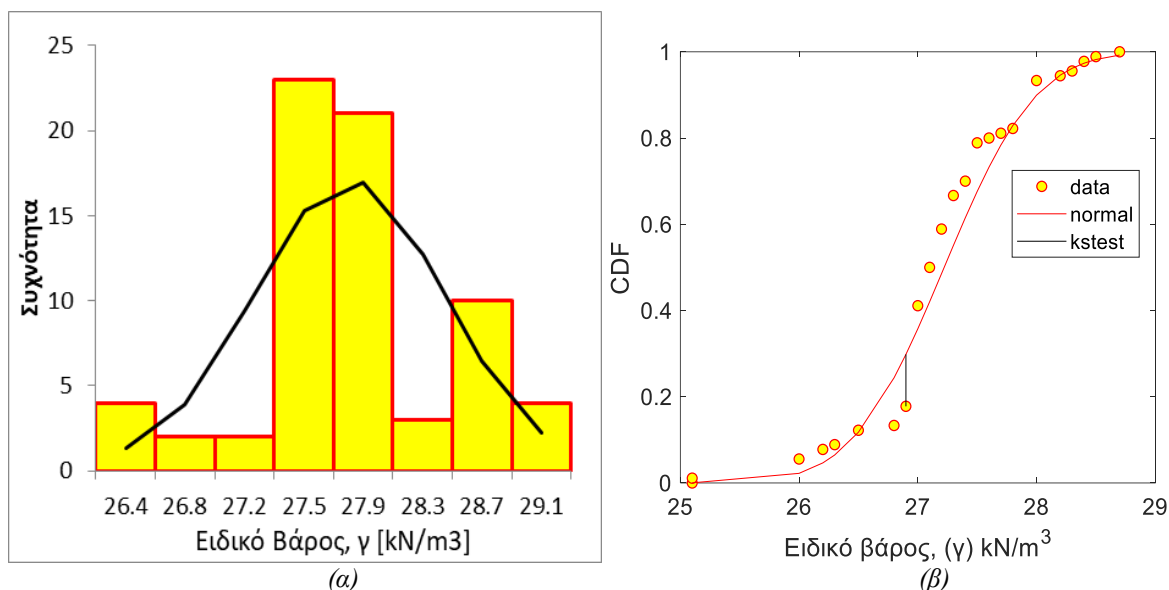
Έπειτα για τον υπολογισμό της οριακής τιμής του ελέγχου, χρησιμοποιείται η μέθοδος Monte Carlo. Παράγονται τυχαία  $M=1.000.000$  δείγματα μεγέθους  $N$  από την κατανομή που έχει επιλεγεί. Σε κάθε ένα από αυτά τα δείγματα πραγματοποιείται ο έλεγχος Kolmogorov-Smirnov, υπολογίζοντας την τιμή  $DM$ . Τα αποτελέσματα των ελέγχων ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά. Η οριακή τιμή  $D_{max}$  προκύπτει από την τιμή στην οποία το πλήθος των αποτελεσμάτων του ελέγχου βρίσκεται κάτω από το όριο εμπιστοσύνης  $CL=5\%$ . Η πιθανότητα  $P$  να είναι η επιλεγμένη κατανομή αυτή που περιγράφει τα δεδομένα καθορίζεται από το πλήθος των τιμών του ελέγχου που είναι μικρότερες από την τιμή  $D$ , η οποία έχει υπολογιστεί από τα δεδομένα. Τέλος, ο έλεγχος θεωρείται ότι αποτυγχάνει αν ισχύει  $D > D_{max}$  ή, αντίστοιχα, αν  $P < CL$ .

#### **4.4 Παρουσίαση ιστογραμμάτων πετρωμάτων και ανάλυση αυτών**

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε ιστογράμματα και τα αθροιστικά διαγράμματα διαφόρων διακοσμητικών πετρωμάτων όπως μάρμαρα, γρανίτες, ασβεστόλιθους και ψαμμίτες στα οποία απεικονίζεται η κατανομή των δεδομένων με σκοπό να κατανοηθούν καλύτερα κάποιες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους όπως το ειδικό βάρος, το πορώδες, η αντοχή σε θλίψη (UCS) και η αντοχή σε κάμψη (T). Στο [παράρτημα Α](#) παρουσιάζονται όλες οι παραπάνω ιδιότητες των διακοσμητικών λίθων που θα αναλυθούν και θα παρουσιαστούν στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.

##### **4.4.1 Μάρμαρα**

Ένας από τους πιο δημοφιλείς διακοσμητικούς λίθους είναι το μάρμαρο, για το οποίο συλλέχτηκαν κάποιες πειραματικές μετρήσεις διαφόρων μαρμάρων παγκοσμίως που μετρήθηκαν εργαστηριακά φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους. Στις [Εικόνες 4.6α-β](#) αναλύθηκε το ειδικό βάρος των μαρμάρων για να προσδιοριστεί ποια κατανομή το περιγράφει καλύτερα. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαγράμματα: το ιστόγραμμα, που δείχνει πόσο συχνά εμφανίζονται διάφορες τιμές του ειδικού βάρους, και το αθροιστικό διάγραμμα (CDF), το οποίο δείχνει το ποσοστό των δειγμάτων που έχουν ειδικό βάρος μικρότερο ή ίσο με κάθε τιμή.



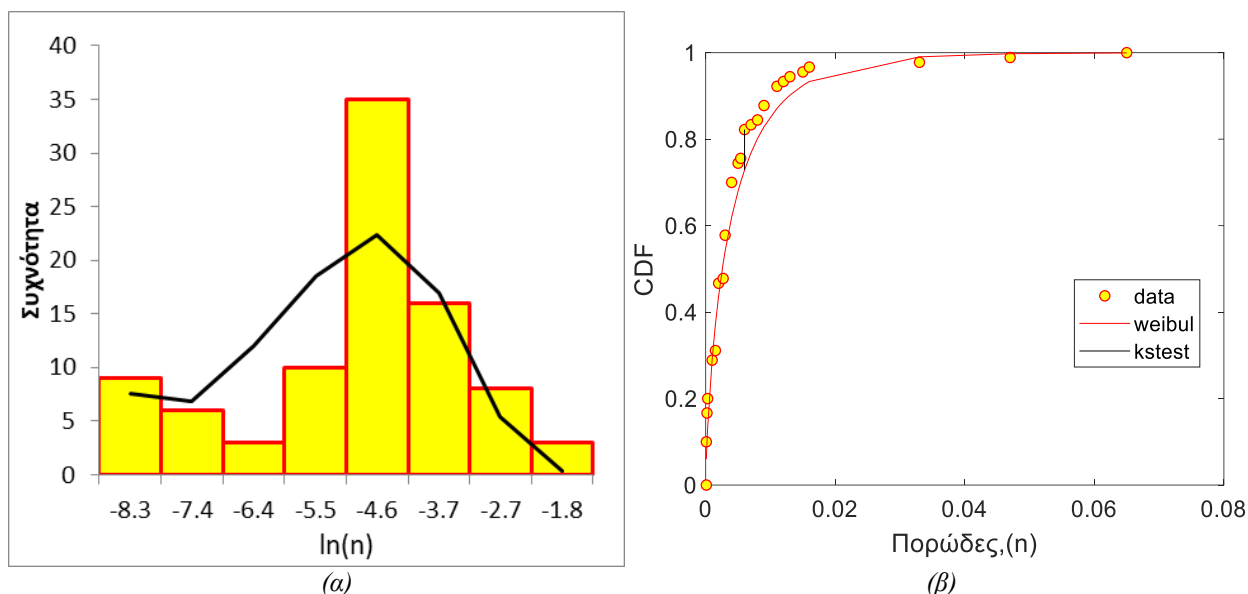
Εικόνα 4.6: α) Ιστόγραμμα ειδικού βάρους των μαρμάρων β) αθροιστικό διάγραμμα ειδικού βάρους μαρμάρων

Από το ιστόγραμμα φαίνεται ότι οι τιμές του ειδικού βάρους συγκεντρώνονται γύρω από τον μέσο όρο, ο οποίος είναι περίπου  $27.5 \text{ kN/m}^3$ . Το εύρος των τιμών είναι περιορισμένο, από  $26.4$  έως  $29.1 \text{ kN/m}^3$ , και η κατανομή είναι συμμετρική, κάτι που υποδεικνύει ότι τα δεδομένα ακολουθούν την κανονική κατανομή με το μικρότερο σφάλμα σύμφωνα με τον Kolmogorov-Smirnov να είναι ίσο με  $0.8531$  και η τιμή  $P$  που εκφράζει την πιθανότητα να ανήκει το ειδικό βάρος στην κανονική κατανομή να είναι  $13.2\%$ .

Αυτό επιβεβαιώνεται και από το αθροιστικό διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει μια ομαλή και συνεχόμενη αύξηση. Η απόκλιση μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και της θεωρητικής κανονικής κατανομής είναι μικρή, κάτι που επιβεβαιώνει την καταλληλότητα της κανονικής κατανομής για τα δεδομένα. Από το CDF μπορούμε επίσης να δούμε ότι περίπου το  $50\%$  των δειγμάτων έχουν ειδικό βάρος κοντά στα  $27.5 \text{ kN/m}^3$ , ενώ το  $90\%$  των δειγμάτων έχει ειδικό βάρος κάτω από  $28.5 \text{ kN/m}^3$ .

Συνολικά, τα δύο διαγράμματα συμπληρώνουν το ένα το άλλο. Το ιστόγραμμα μας δείχνει την πυκνότητα των δεδομένων και τη μορφή της κατανομής, ενώ το αθροιστικό διάγραμμα μας δίνει μια πιο συνολική εικόνα για τη συμπεριφορά των δεδομένων και επιβεβαιώνει την κανονική κατανομή του ειδικού βάρους των μαρμάρων.

Στις [Εικόνες 4.7α-β](#) φαίνεται το πορώδες των μαρμάρων και από τον έλεγχο Kolmogorov-Smirnov προέκυψε ότι η Weibull κατανομή περιγράφει καλύτερα τα δεδομένα αφού το μικρότερο σφάλμα που προέκυψε ήταν ίσο με  $0.6624\%$ , επιβεβαιώνοντας ότι αυτή η κατανομή είναι η πιο κατάλληλη για τα δεδομένα. Η μεταβλητή  $P$  που εκφράζει την πιθανότητα να ανήκουν τα δεδομένα στην Weibull κατανομή με ποσοστό ίσο με  $36.4\%$ .



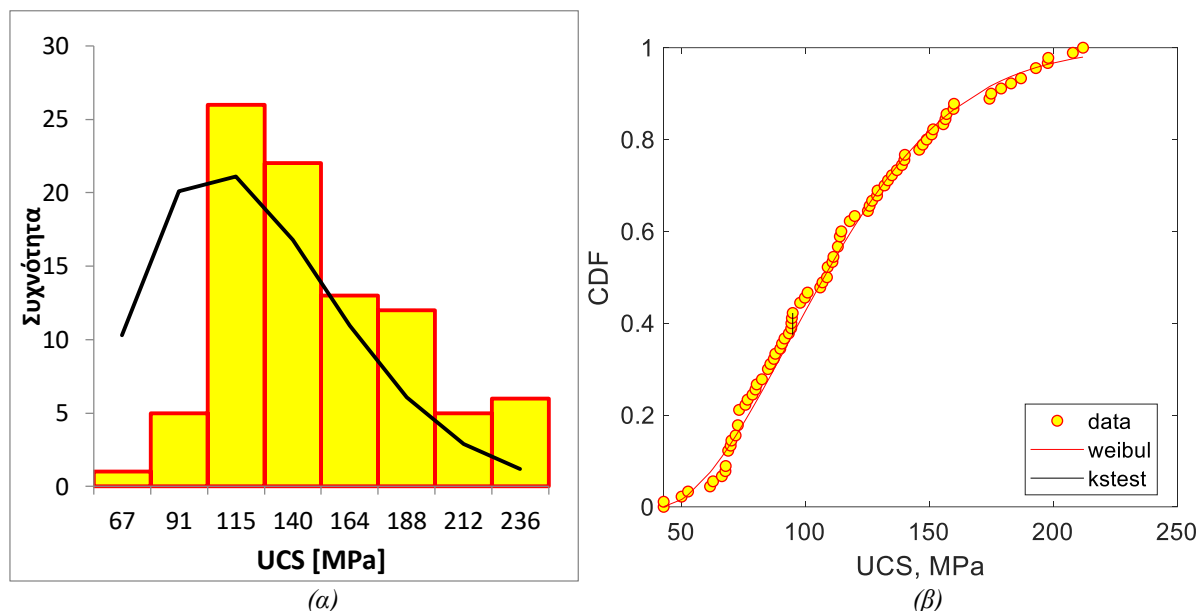
Εικόνα 4.7: α) Ιστόγραμμα πορώδους των μαρμάρων β) αθροιστικό διάγραμμα πορώδους μαρμάρων

Στο αθροιστικό διάγραμμα (CDF), φαίνεται ότι η θεωρητική Weibull κατανομή ταιριάζει αρκετά καλά με τα πραγματικά δεδομένα (κίτρινα κυκλάκια), με μικρές αποκλίσεις σε κάποιες περιοχές. Το διάγραμμα αποκαλύπτει ότι μεγάλο μέρος των δειγμάτων έχει πορώδες μικρότερο του 0.02, κάτι που δείχνει τη χαμηλή πορώδη φύση των μαρμάρων.

Στο ιστόγραμμα του πορώδους, παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης των διαφορετικών τιμών, οι οποίες ακολουθούν μια ασύμμετρη κατανομή, όπως υποδεικνύεται και από τη θεωρητική γραμμή Weibull που έχει προσαρμοστεί στα δεδομένα. Ο λογάριθμος του πορώδους ( $\ln(n)$ ) συγκεντρώνεται κυρίως γύρω από το -4.6, με ένα εύρος τιμών από -8.3 έως -1.8. Αυτή η ασυμμετρία είναι χαρακτηριστική της Weibull κατανομής, η οποία περιγράφει καλά φαινόμενα με θετικές και συχνά μικρές τιμές, όπως το πορώδες.

Τα δύο διαγράμματα επιβεβαιώνουν τη χαμηλή πορώδη φύση των μαρμάρων και δείχνουν ότι οι περισσότεροι λίθοι έχουν εξαιρετικά χαμηλές τιμές πορώδους, κάτι που είναι σημαντικό για τη χρήση τους ως διακοσμητικά υλικά, καθώς η χαμηλή πορώδης δομή συσχετίζεται με μεγαλύτερη αντοχή και μειωμένη απορρόφηση υγρασίας.

Στις [Εικόνες 4.8α-β](#) εξετάστηκε η κατανομή των δεδομένων μέσω του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov. Ο έλεγχος έδειξε ότι η κατανομή που περιγράφει καλύτερα τα δεδομένα είναι η Weibull, με το μικρότερο σφάλμα να είναι 0.3345 και με την μεταβλητή  $P$  να είναι ίση με 96,5%.



Εικόνα 4.8: α) Ιστόγραμμα αντοχής σε θλίψη (UCS) των μαρμάρων β) αθροιστικό διάγραμμα UCS μαρμάρων

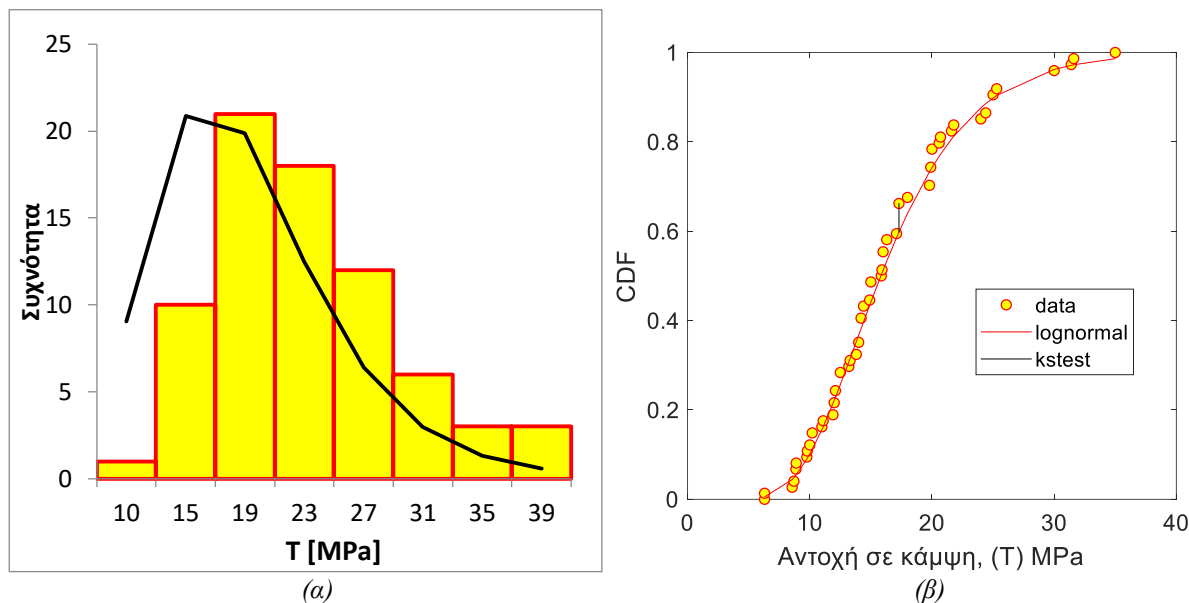
Στο αθροιστικό διάγραμμα (CDF), φαίνεται ότι η θεωρητική κατανομή Weibull προσαρμόζεται πολύ καλά στα πραγματικά δεδομένα, με μικρές αποκλίσεις σε συγκεκριμένα σημεία. Οι κίτρινοι κύκλοι, που αντιπροσωπεύουν τα πειραματικά δεδομένα, ακολουθούν την συνέπεια της καμπύλης της Weibull, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητα της κατανομής. Το ιστόγραμμα αποκαλύπτει την κατανομή της UCS, η οποία χαρακτηρίζεται από μια ασυμμετρία προς τις υψηλότερες τιμές, τυπικό χαρακτηριστικό της Weibull κατανομής. Τα περισσότερα δείγματα συγκεντρώνονται γύρω από την περιοχή των 115-140 MPa, με ένα εύρος τιμών που εκτείνεται από 67 MPa έως 236 MPa. Αυτή η κατανομή δείχνει ότι τα μάρμαρα έχουν σημαντική αντοχή, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογή.

Τα δύο διαγράμματα, το αθροιστικό και το ιστόγραμμα, επιβεβαιώνουν την ικανότητα της Weibull κατανομής να περιγράψει με ακρίβεια την αντοχή σε θλίψη των μαρμάρων.

Η [Εικόνα 4.9α](#) είναι ένα ιστόγραμμα που δείχνει πόσο συχνά εμφανίζονται διαφορετικές τιμές της αντοχής σε κάμψη (T) για τα μάρμαρα. Παρατηρούμε ότι οι περισσότερες τιμές συγκεντρώνονται γύρω στα 15-30 MPa, ενώ υπάρχουν λιγότερες σε μικρότερα και μεγαλύτερα επίπεδα. Η κατανομή έχει μια κορυφή και "σβήνει" σταδιακά προς τα δεξιά, κάτι που δείχνει ότι τα δεδομένα δεν είναι απόλυτα συμμετρικά. Η μαύρη γραμμή που έχει τοποθετηθεί στο διάγραμμα φαίνεται να περιγράφει τη γενική τάση, υποδηλώνοντας ότι τα δεδομένα ταιριάζουν σε μια συγκεκριμένη θεωρητική κατανομή.

Η [Εικόνα 4.9β](#) μας δίνει περισσότερες λεπτομέρειες για αυτή την κατανομή. Παρουσιάζει την αθροιστική κατανομή (CDF), δηλαδή πώς αυξάνονται οι τιμές της αντοχής όσο προχωράμε από τα χαμηλά στα υψηλά επίπεδα. Οι κίτρινοι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα πραγματικά δεδομένα, ενώ η κόκκινη γραμμή δείχνει τη θεωρητική κατανομή, η οποία εδώ είναι η λογαριθμοκανονική με το μικρότερο σφάλμα ίσο με 0.4132 και με το P να είναι 86.4%. Βλέπουμε ότι η κόκκινη

γραμμή ταιριάζει σχεδόν τέλεια με τους κύκλους, κάτι που σημαίνει ότι αυτή η κατανομή περιγράφει πολύ καλά τα δεδομένα. Η μαύρη γραμμή, που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα του KStest, δείχνει ότι η διαφορά μεταξύ των δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής είναι πολύ μικρή.



Εικόνα 4.9: α) Ιστόγραμμα αντοχής σε κάμψη ( $T$ ) των μαρμάρων β) αθροιστικό διάγραμμα  $T$  μαρμάρων

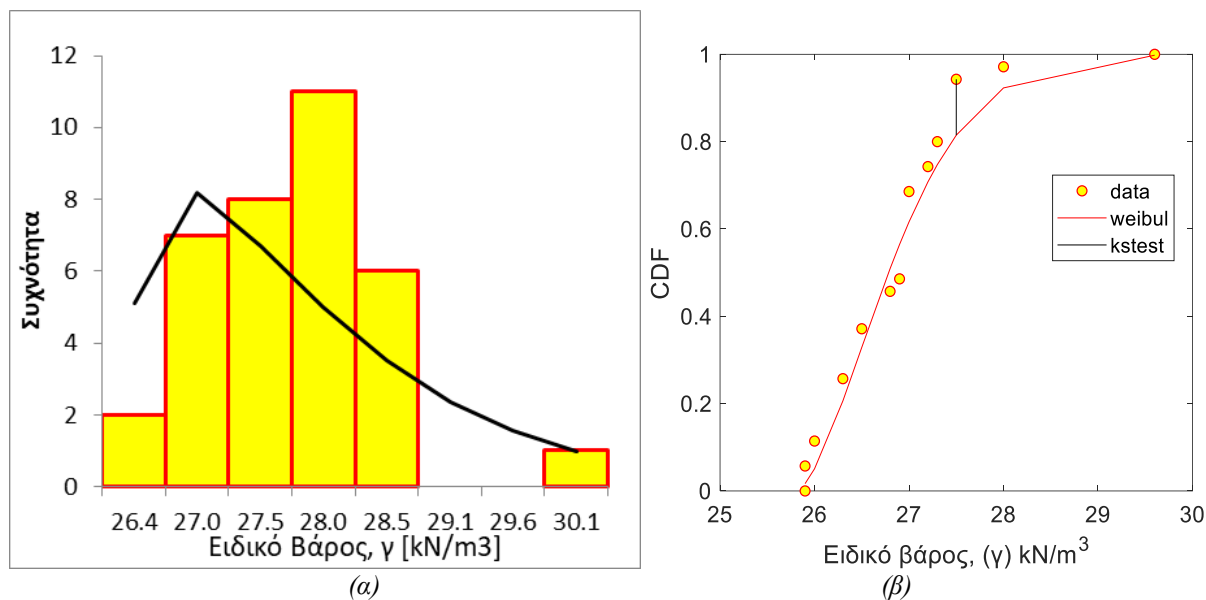
Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε ότι η αντοχή σε κάμψη των μαρμάρων ακολουθεί μια λογαριθμοκανονική κατανομή. Αυτό σημαίνει ότι τα περισσότερα δείγματα έχουν αντοχή κοντά σε ένα συγκεκριμένο εύρος (15-30 MPa), ενώ υπάρχουν λίγες περιπτώσεις με πολύ μικρότερες ή μεγαλύτερες τιμές. Η καλή προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής στα δεδομένα υποδεικνύει ότι αυτή είναι η καλύτερη επιλογή για να περιγράψουμε τη συγκεκριμένη ιδιότητα των μαρμάρων.

#### 4.4.2 Γρανίτες

Το ιστόγραμμα στην [Εικόνα 4.10α](#) παρουσιάζει το ειδικό βάρος ( $\gamma$ ) των γρανιτών. Τα δεδομένα ομαδοποιούνται σε κατηγορίες συχνοτήτων, που δείχνουν τον αριθμό των παρατηρήσεων σε κάθε εύρος τιμών του ειδικού βάρους. Παρατηρείται ότι η κατανομή των δεδομένων είναι ασύμμετρη, με μεγαλύτερη συγκέντρωση τιμών στο κέντρο του εύρους τιμών (27.5-28.5 kN/m<sup>3</sup>), ενώ προς τις ακραίες τιμές, τόσο στα χαμηλά όσο και στα υψηλά, η συχνότητα μειώνεται αισθητά. Επιπλέον, η προσθήκη της μαύρης γραμμής, που φαίνεται να προσαρμόζεται στα δεδομένα με τη βοήθεια του KStest προέκυψε ότι η καλύτερη κατανομή για το ειδικό βάρος των γρανιτών είναι η Weibull με ποσοστό 51.3% και με το μικρότερο σφάλμα να είναι 0.5708.

Η [Εικόνα 4.10β](#) δείχνει την αθροιστική κατανομή (CDF) για το ίδιο σύνολο δεδομένων, μαζί με τα αποτελέσματα του ελέγχου KStest. Η κόκκινη γραμμή (Weibull) φαίνεται να προσαρμόζεται αρκετά καλά στα δεδομένα, καθώς οι παρατηρήσεις (κίτρινοι κύκλοι) βρίσκονται κοντά στη θεωρητική γραμμή της Weibull κατανομής. Ωστόσο, η μαύρη γραμμή, που προκύπτει από τον

έλεγχο KS, υποδηλώνει το σημείο της μέγιστης απόκλισης μεταξύ της εμπειρικής κατανομής των δεδομένων και της θεωρητικής Weibull.

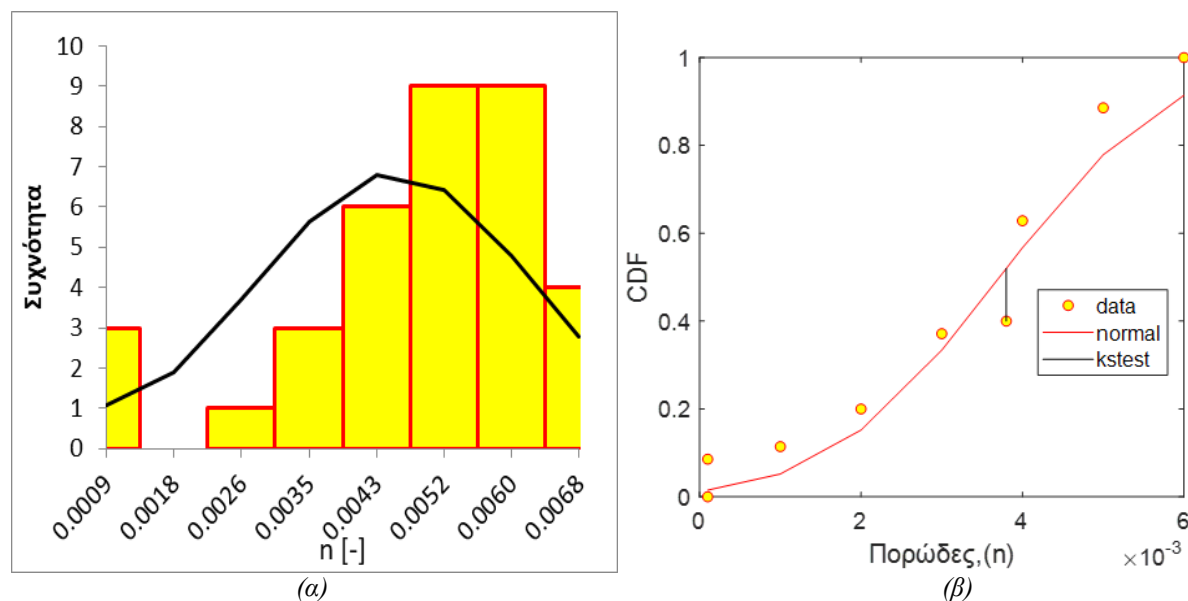


Εικόνα 4.10: α) Ιστόγραμμα κατανομής ειδικού βάρους γρανιτών β) αθροιστικό διάγραμμα ειδικού βάρους γρανιτών

Τα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται στο πορώδες ( $\eta$ ) των γρανιτών και αναλύουν τη συμπεριφορά των πειραματικών δεδομένων τόσο μέσω του ιστογράμματος όσο και μέσω του αθροιστικού διαγράμματος κατανομής (CDF). Σύμφωνα με το KStest, η κατανομή που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα είναι η κανονική κατανομή, με ποσοστό προσαρμογής 59%, γεγονός που υποδηλώνει μέτρια συμφωνία μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής.

Στο ιστόγραμμα (Εικόνα 4.11α), παρατηρούμε ότι οι τιμές του πορώδους παρουσιάζουν μια κατανομή που τείνει να είναι καμπυλόμορφη, αλλά με κάποια ασυμμετρία. Η συγκέντρωση των τιμών είναι πιο έντονη στο κεντρικό εύρος, γεγονός που δείχνει ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των δειγμάτων έχει παρόμοιο πορώδες. Ωστόσο, η ύπαρξη μικρότερης συγκέντρωσης στα άκρα του διαγράμματος μας δείχνει μια σχετική διασπορά των τιμών, κάτι που επηρεάζει την τέλεια προσαρμογή στην κανονική κατανομή. Η μαύρη γραμμή, που αναπαριστά τη συσσώρευση της πιθανότητας, επιβεβαιώνει την ομαλή αύξηση, αλλά παρουσιάζει ελαφρές αποκλίσεις, ενδεικτικές της μη τέλειας συμμετρίας.

Το αθροιστικό διάγραμμα κατανομής (CDF) Εικόνα 4.11β ενισχύει την παραπάνω παρατήρηση. Τα πειραματικά δεδομένα, που απεικονίζονται με τις κίτρινες κουκκίδες, ακολουθούν τη θεωρητική κανονική καμπύλη (κόκκινη γραμμή), αλλά με ορισμένες αποκλίσεις. Η μέτρια προσαρμογή του 59% φανερώνει ότι, παρόλο που η κανονική κατανομή παρέχει μια καλή εκτίμηση, υπάρχουν περιοχές, ιδιαίτερα στα χαμηλά και υψηλά ποσοστά του πορώδους, όπου οι μετρήσεις αποκλίνουν από τη θεωρητική πρόβλεψη. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ανομοιογένεια των δειγμάτων γρανιτών ή σε τυχόν φυσικές ατέλειες.



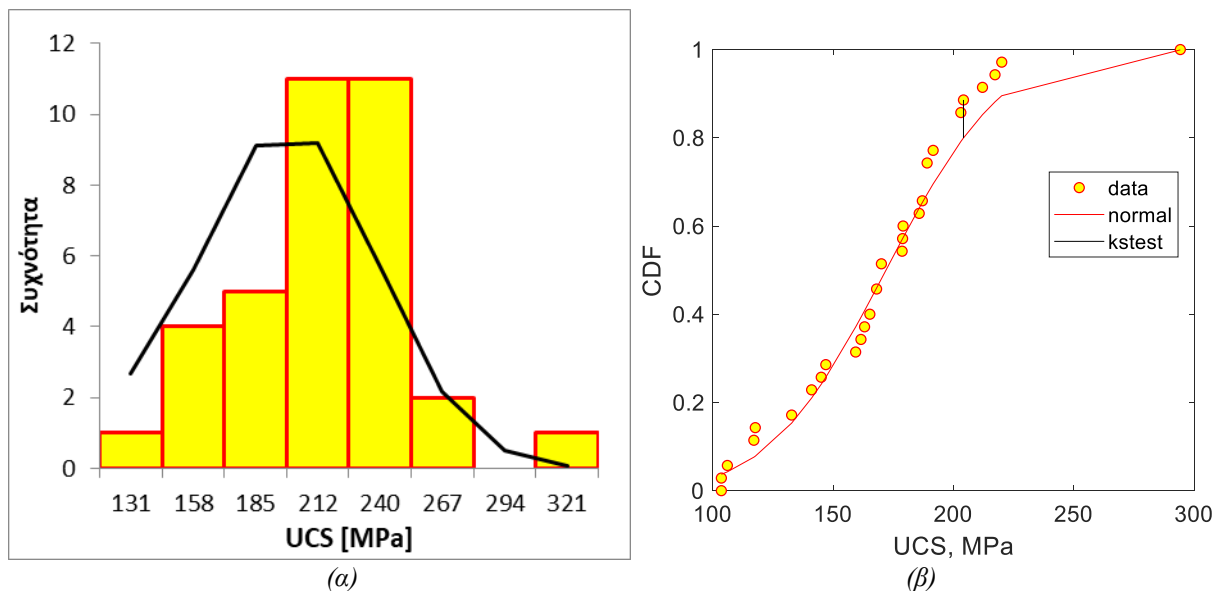
Εικόνα 4.11: α) Ιστόγραμμα κατανομή πορώδους γρανιτών β) αθροιστικό διάγραμμα πορώδους γρανιτών

Η επιλογή της κανονικής κατανομής για την περιγραφή του πορώδους είναι λογική, καθώς η κανονική κατανομή χρησιμοποιείται συχνά για φυσικές ιδιότητες που εξαρτώνται από τυχαίες μεταβλητές και παραλλαγές προελεύσεως και έδωσε και το μικρότερο σφάλμα που είναι 0.5341. Ωστόσο, το ποσοστό του 59% δείχνει ότι τα δεδομένα έχουν κάποια πολυπλοκότητα, η οποία πιθανόν να επηρεάζεται από το μέγεθος των πόρων, την κατανομή τους ή την τοπική γεωλογική προέλευση των γρανιτών.

Η ανάλυση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη (UCS) των γρανιτών, όπως παρουσιάζεται στο ιστόγραμμα (Εικόνα 4.12α), δείχνει τη συγκέντρωση των τιμών και τη στατιστική συμπεριφορά της συγκεκριμένης ιδιότητας. Σύμφωνα με το KStest που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι η κανονική κατανομή είναι η καταλληλότερη για την περιγραφή των δεδομένων με το μικρότερο σφάλμα να είναι 0.3840, και με ποσοστό προσαρμογής 88.4%. Το συγκεκριμένο ποσοστό προσαρμογής υποδηλώνει ότι η κανονική κατανομή ταιριάζει εξαιρετικά καλά στα πειραματικά δεδομένα, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το αθροιστικό διάγραμμα κατανομής (CDF). Στο ιστόγραμμα (Εικόνα 4.12α) παρατηρούμε ότι οι τιμές της UCS συγκεντρώνονται κυρίως γύρω από το διάστημα 185-240 MPa, με τη συχνότητα να κορυφώνεται στο εύρος 210-240 MPa, κάτι που υποδεικνύει μια συμμετρική κατανομή γύρω από έναν μέσο όρο. Το χαρακτηριστικό σχήμα του ιστογράμματος, το οποίο είναι σε μορφή καμπάνας και συμμετρικό, υποδηλώνει σαφώς την τάση των δεδομένων να ακολουθούν την κανονική κατανομή. Η αθροιστική συνάρτηση που εμφανίζεται στην Εικόνα 4.12β σε σύγκριση με την κανονική κατανομή. Η κανονική κατανομή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάλυση των μηχανικών ιδιοτήτων υλικών, καθώς επιτρέπει τη στατιστική περιγραφή των δεδομένων με βάση δύο βασικές παραμέτρους: τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση. Η συμμετρία που παρατηρείται στο ιστόγραμμα δείχνει ότι οι περισσότερες μετρήσεις UCS των γρανιτών συγκεντρώνονται κοντά στη μέση τιμή, με λίγες μόνο αποκλίσεις προς χαμηλότερες ή υψηλότερες τιμές. Αυτό σημαίνει ότι η αντοχή των

γρανιτών είναι προβλέψιμη και παρουσιάζει μικρή διασπορά, κάτι που είναι θετικό για την αξιοπιστία των υλικών αυτών σε εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αντοχή σε θλίψη.

Το αθροιστικό διάγραμμα CDF (εικόνα 4.12β), όπως αναφέρθηκε, δείχνει την εξαιρετική σύγκλιση των πειραματικών δεδομένων με την θεωρητική κανονική κατανομή. Η απουσία σημαντικών αποκλίσεων από τη θεωρητική καμπύλη επιβεβαιώνει την ορθότητα της επιλογής της κανονικής κατανομής για την περιγραφή των δεδομένων



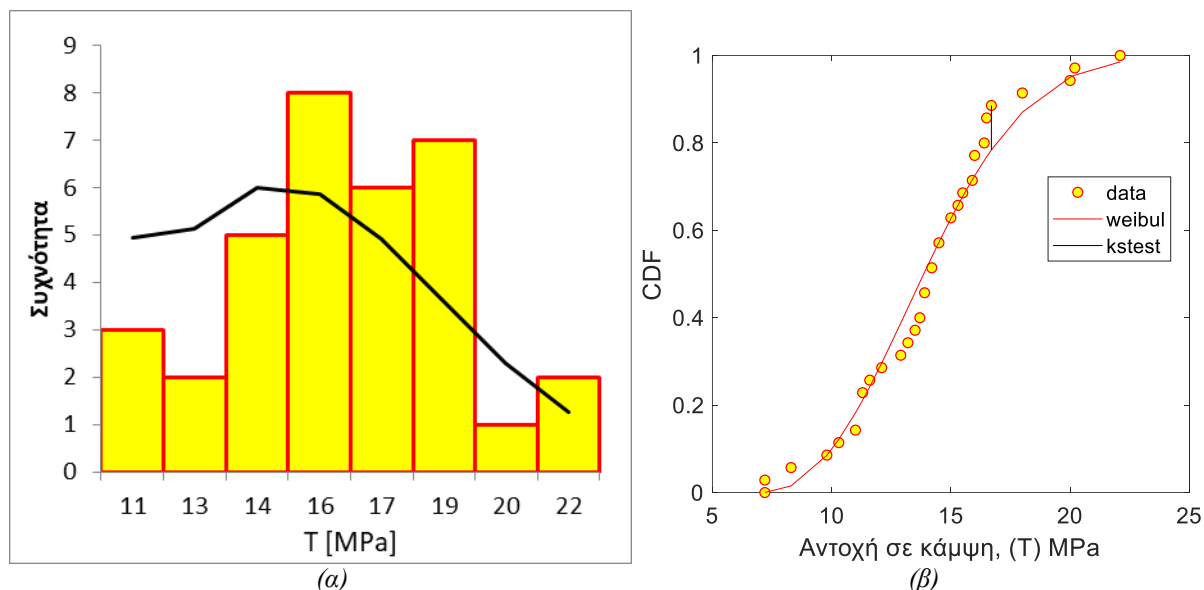
Εικόνα 4.12: α) Ιστόγραμμα κατανομής αντοχής σε θλίψη (UCS) γρανιτών β) αθροιστικό διάγραμμα UCS γρανιτών

Συνοψίζοντας, η κανονική κατανομή που περιγράφει την UCS των γρανιτών με ποσοστό προσαρμογής 88.4% υποδεικνύει ότι τα δεδομένα είναι καλά κατανομημένα γύρω από μια κεντρική τιμή. Ο συνδυασμός του ιστογράμματος και του αθροιστικού διαγράμματος προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα της κατανομής των δεδομένων, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία και την ομοιομορφία των μετρήσεων.

Τα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται στην αντοχή σε κάμψη των γρανιτών, όπου εξετάστηκε η στατιστική κατανομή των δεδομένων με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Από τη στατιστική ανάλυση με το KStest προέκυψε ότι η Weibull κατανομή ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα, με ποσοστό προσαρμογής 75.9%.

Αρχικά, στο ιστόγραμμα [Εικόνα 4.13α](#) παρατηρούμε ότι τα δεδομένα της αντοχής σε κάμψη συγκεντρώνονται κυρίως στο εύρος 13-19 MPa, με τη μεγαλύτερη συχνότητα να εντοπίζεται γύρω στις τιμές 15-17 MPa. Η γενική μορφή του ιστογράμματος δείχνει μια ασύμμετρη κατανομή, με τη συχνότητα να μειώνεται σταδιακά προς τα δεξιά, καθώς οι υψηλότερες τιμές αντοχής εμφανίζονται πιο σπάνια. Η μαύρη γραμμή που συνοδεύει το ιστόγραμμα αντιπροσωπεύει την αθροιστική συνάρτηση συχνοτήτων, η οποία επιβεβαιώνει τη σταδιακή αύξηση της συσσωρευμένης πιθανότητας καθώς αυξάνονται οι τιμές αντοχής σε κάμψη.

Στο δεύτερο διάγραμμα (*Εικόνα 4.13β*), που απεικονίζει την αθροιστική κατανομή (CDF) των δεδομένων, παρατηρούμε την προσαρμογή των πραγματικών δεδομένων (κίτρινοι κύκλοι) στην θεωρητική Weibull κατανομή (κόκκινη καμπύλη). Η μορφή της καμπύλης επιβεβαιώνει την καλή προσέγγιση της Weibull κατανομής αφού δίνει το μικρότερο σφάλμα ίσο με 0.4538, καθώς τα δεδομένα ακολουθούν σε μεγάλο βαθμό τη θεωρητική γραμμή, με ελάχιστες αποκλίσεις σε ορισμένα σημεία.



Εικόνα 4.13: α) Ιστόγραμμα κατανομής αντοχής σε κάμψη (T) γρανιτών β) αθροιστικό διάγραμμα T γρανιτών

Ο συνδυασμός των δύο διαγραμμάτων μας προσφέρει μια πλήρη και ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς των δεδομένων. Το ιστόγραμμα δίνει μια οπτική αναπαράσταση της κατανομής των δεδομένων και αναδεικνύει τη συγκέντρωσή τους σε συγκεκριμένα διαστήματα, ενώ το αθροιστικό διάγραμμα προσφέρει μια ποσοτική αξιολόγηση μέσω του KStest.

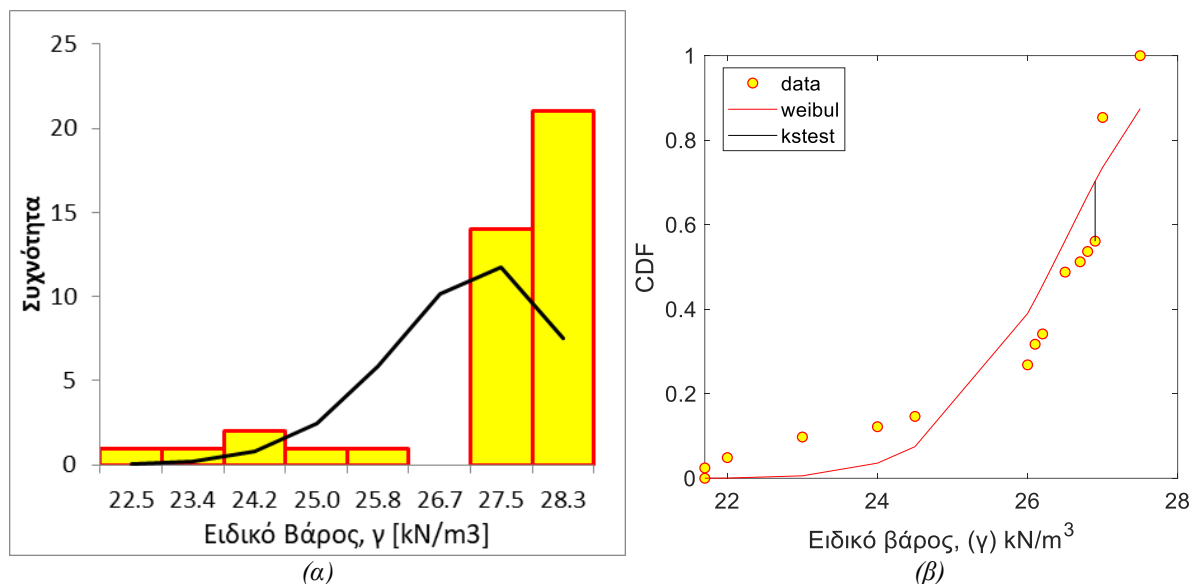
Συνοψίζοντας, το ιστόγραμμα και το αθροιστικό διάγραμμα μέσω του KStest λειτουργούν συμπληρωματικά, παρέχοντας τόσο οπτική όσο και ποσοτική τεκμηρίωση της κατανομής των δεδομένων αντοχής σε κάμψη. Η Weibull κατανομή, με ποσοστό προσαρμογής 75.9%, αποδεικνύεται η πιο κατάλληλη επιλογή για την περιγραφή των δεδομένων, καθώς λαμβάνει υπόψη την ασυμμετρία και τη στατιστική συμπεριφορά των τιμών.

#### 4.4.3 Ασβεστόλιθοι

Η *Εικόνα 4.14α* παρουσιάζει το ιστόγραμμα του ειδικού βάρους ( $\gamma$ ) των ασβεστόλιθων. Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε μέσω του KStest, η κατανομή που προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα είναι η Weibull με το μικρότερο σφάλμα να είναι 0.8953 και το ποσοστό προσαρμογής 9,91%. Η τιμή αυτή είναι αρκετά μικρή, γεγονός που υποδηλώνει ότι η προσαρμογή της Weibull κατανομής στα πειραματικά δεδομένα δεν είναι ιδανική, αλλά παρόλα αυτά αποτελεί την καλύτερη διαθέσιμη επιλογή λόγω του μικρότερου σφάλματος σε σχέση με άλλες κατανομές. Από το ιστόγραμμα, παρατηρούμε ότι οι

περισσότερες τιμές του ειδικού βάρους συγκεντρώνονται σε ένα στενό εύρος υψηλών τιμών, κυρίως γύρω από τα 27.5–28.3 kN/m<sup>3</sup>. Η συγκέντρωση αυτή δημιουργεί μια έντονη ανισορροπία στο διάγραμμα, καθώς τα μικρότερα εύρη ειδικού βάρους (22.5–25.0 kN/m<sup>3</sup>) περιέχουν ελάχιστες παρατηρήσεις. Αυτή η ανομοιογένεια προκαλεί τη μη ιδανική προσαρμογή της Weibull κατανομής και πιθανόν εξηγεί το χαμηλό ποσοστό των 9.91% που έδωσε το KStest. Η μαύρη γραμμή που εμφανίζεται πάνω στο ιστόγραμμα, καταδεικνύει την αθροιστική αύξηση της συχνότητας, επιβεβαιώνοντας ότι η συντριπτική πλειοψηφία των τιμών συγκεντρώνεται προς τα υψηλά επίπεδα του ειδικού βάρους. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι τα δείγματα των ασβεστόλιθων έχουν κυρίως υψηλές τιμές ειδικού βάρους, κάτι που μπορεί να σχετίζεται με την πυκνότητα και τη σύνθεση των συγκεκριμένων ασβεστόλιθων. Η επιλογή της Weibull κατανομής είναι ενδιαφέρουσα, καθώς η συγκεκριμένη κατανομή συχνά χρησιμοποιείται για δεδομένα που παρουσιάζουν ασυμμετρία και έντονη συγκέντρωση τιμών προς το ένα άκρο, όπως παρατηρείται εδώ. Παρόλα αυτά, το χαμηλό ποσοστό (9.91%) δείχνει ότι η προσαρμογή δεν είναι ιδανική και ότι τα δεδομένα του ειδικού βάρους παρουσιάζουν σημαντική απόκλιση από τη θεωρητική καμπύλη Weibull. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε φυσικές διαφορές στα δείγματα ασβεστόλιθων, όπως μεταβλητότητα στην ορυκτολογική σύσταση, τη γεωλογική προέλευση ή την ύπαρξη κενών και ατελειών.

Στο αθροιστικό διάγραμμα (*Εικόνα 4.14β*) η θεωρητική καμπύλη Weibull (κόκκινη γραμμή) προσπαθεί να προσαρμοστεί στα πειραματικά δεδομένα (κίτρινοι κύκλοι). Παρατηρείται ότι η προσαρμογή είναι αρκετά καλή στα υψηλότερα εύρη ειδικού βάρους, ωστόσο, αποκλίνει σημαντικά για τις μικρότερες τιμές. Συγκεκριμένα, στην περιοχή 22–25 kN/m<sup>3</sup>, η θεωρητική καμπύλη δεν ακολουθεί πιστά τα δεδομένα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το σφάλμα προσαρμογής. Η έντονη συγκέντρωση των δεδομένων στις υψηλότερες τιμές (27.5–28.3 kN/m<sup>3</sup>) οδηγεί σε απότομη αύξηση της αθροιστικής συνάρτησης, γεγονός που αντανακλάται στην κλίση της καμπύλης. Αντίθετα, στις χαμηλότερες τιμές, η διασπορά των δεδομένων είναι πιο ομοιόμορφη αλλά με μικρότερη συχνότητα, γεγονός που μειώνει την ακρίβεια της Weibull κατανομής σε αυτή την περιοχή.

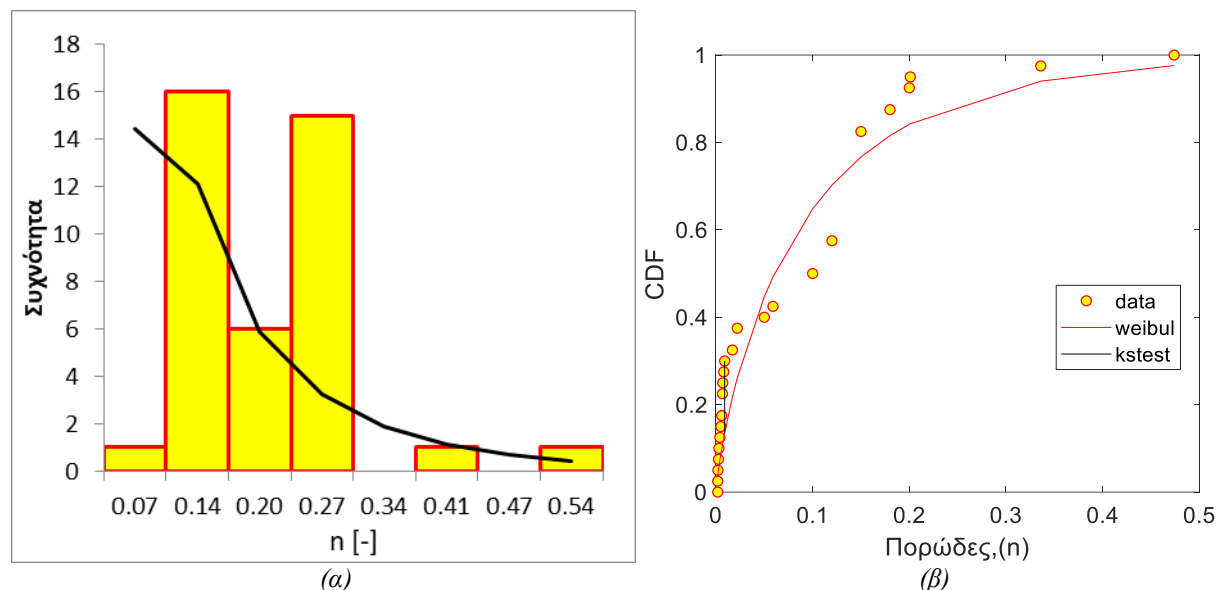


Εικόνα 4.14: α) Ιστογράμμο ειδικού βάρους ασβεστόλιθων β) αθροιστικό διάγραμμα ειδικού βάρους ασβεστόλιθων

Η συνδυαστική ανάλυση των δύο διαγραμμάτων δείχνει ότι το ειδικό βάρος των ασβεστόλιθων παρουσιάζει έντονη συγκέντρωση στα υψηλότερα επίπεδα τιμών, γεγονός που υποδεικνύει ότι τα δείγματα ασβεστόλιθων διαθέτουν κυρίως υψηλή πυκνότητα και ομοιογενή δομή.

Στα παρακάτω διαγράμματα εξετάζεται το πορώδες των ασβεστόλιθων μέσω του ιστογράμματος και του αθροιστικού διαγράμματος κατανομής. Το ιστογράμμο (Εικόνα 4.15α) παρουσιάζει τη συχνότητα των μετρήσεων του πορώδους ( $n$ ), με τις τιμές να κατανέμονται κυρίως σε δύο εύρη, γύρω από τις τιμές 0.1 και 0.2. Η συγκέντρωση των δεδομένων σε αυτά τα διαστήματα υποδεικνύει τη σημαντική συχνότητα αυτών των τιμών, ενώ οι υψηλότερες τιμές πορώδους (0.3 και άνω) εμφανίζονται με πολύ μικρή συχνότητα. Η γραμμή στο ιστογράμμο, που αναπαριστά την αθροιστική συνάρτηση, αποκαλύπτει ότι η κατανομή των τιμών είναι έντονα ασύμμετρη και παρουσιάζει κλίση που μειώνεται απότομα, υποδεικνύοντας μια μη κανονική συμπεριφορά των δεδομένων. Η χρήση του KStest για τον έλεγχο της καταλληλότερης κατανομής έδειξε ότι η Weibull κατανομή είναι η πιο κατάλληλη με το μικρότερο σφάλμα να είναι 0.7829, και με ποσοστό αποδοχής 19.2%. Το χαμηλό ποσοστό αποδοχής της Weibull κατανομής φανερώνει ότι, παρά τη σχετική προσαρμογή, υπάρχει απόκλιση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και της θεωρητικής καμπύλης.

Το αθροιστικό διάγραμμα κατανομής (CDF) (Εικόνα 4.15β) επιβεβαιώνει τα παραπάνω συμπεράσματα. Στο CDF παρατηρούμε την κατανομή των πειραματικών δεδομένων (κίτρινοι κύκλοι) σε σχέση με τη θεωρητική Weibull κατανομή (κόκκινη γραμμή). Η καμπύλη της Weibull κατανομής ακολουθεί την τάση των δεδομένων, αλλά με αποκλίσεις κυρίως στο αρχικό τμήμα (τιμές πορώδους κοντά στο 0,1), όπου τα δεδομένα συγκεντρώνονται περισσότερο από ό,τι προβλέπει η θεωρητική καμπύλη. Αυτό σημαίνει ότι η Weibull κατανομή δεν περιγράφει τέλεια το σύνολο των δεδομένων, αλλά παραμένει η πιο κατάλληλη λόγω του μικρότερου σφάλματος που έδειξε το KStest.



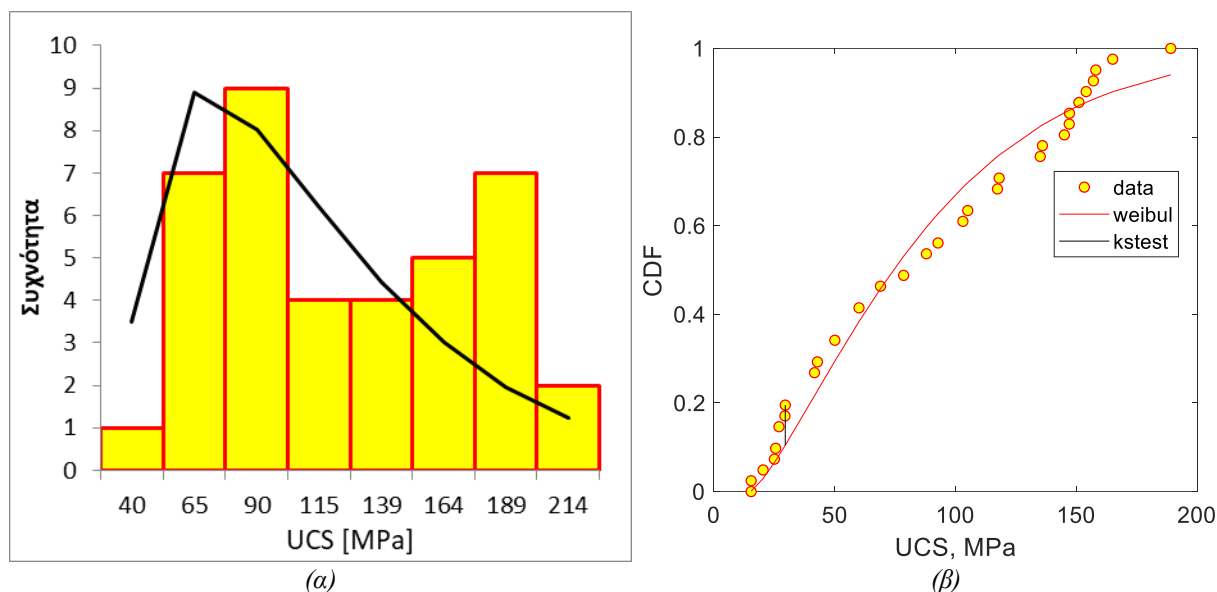
Εικόνα 4.15: α) Ιστόγραμμα πορώδους ασβεστόλιθων β) αθροιστικό διάγραμμα πορώδους ασβεστόλιθων

Συμπερασματικά το ιστόγραμμα και το αθροιστικό διάγραμμα δείχνουν ότι το πορώδες των ασβεστόλιθων συγκεντρώνεται κυρίως σε χαμηλές τιμές και χαρακτηρίζεται από ασυμμετρία. Παρά το χαμηλό ποσοστό καταλληλότητας της Weibull κατανομής, αυτή θεωρείται η καλύτερη επιλογή για την περιγραφή των δεδομένων. Ωστόσο, οι αποκλίσεις μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών υποδεικνύουν ότι η κατανομή του πορώδους δεν ακολουθεί απόλυτα τη Weibull κατανομή.

Η ανάλυση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής (UCS) των ασβεστόλιθων, όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα (Εικόνα 4.16α), αποκαλύπτει σημαντικές πληροφορίες για τη στατιστική συμπεριφορά των δεδομένων.

Στο ιστόγραμμα (Εικόνα 4.16α), οι τιμές της UCS κυμαίνονται κυρίως στην περιοχή 65-90 MPa, υποδηλώνοντας ότι οι περισσότερες μετρήσεις συγκεντρώνονται σε αυτή τη ζώνη. Αυτό υποδεικνύει ότι οι ασβεστόλιθοι που μελετήθηκαν εμφανίστηκαν κυρίως μέτρια θλιπτική αντοχή. Ο αριθμός των δειγμάτων με αντοχή πάνω από 140 MPa μειώνεται, ενώ οι πολύ χαμηλές τιμές είναι επίσης περιορισμένες. Το προσαρμοσμένο καμπύλο γράφημα δείχνει την εφαρμογή της κατανομής Weibull, η οποία προέκυψε από τον έλεγχο καταλληλότητας μέσω του KStest ως η πιο κατάλληλη κατανομή με σφάλμα 0.4367, και με ποσοστό προσαρμογής 79.9%.

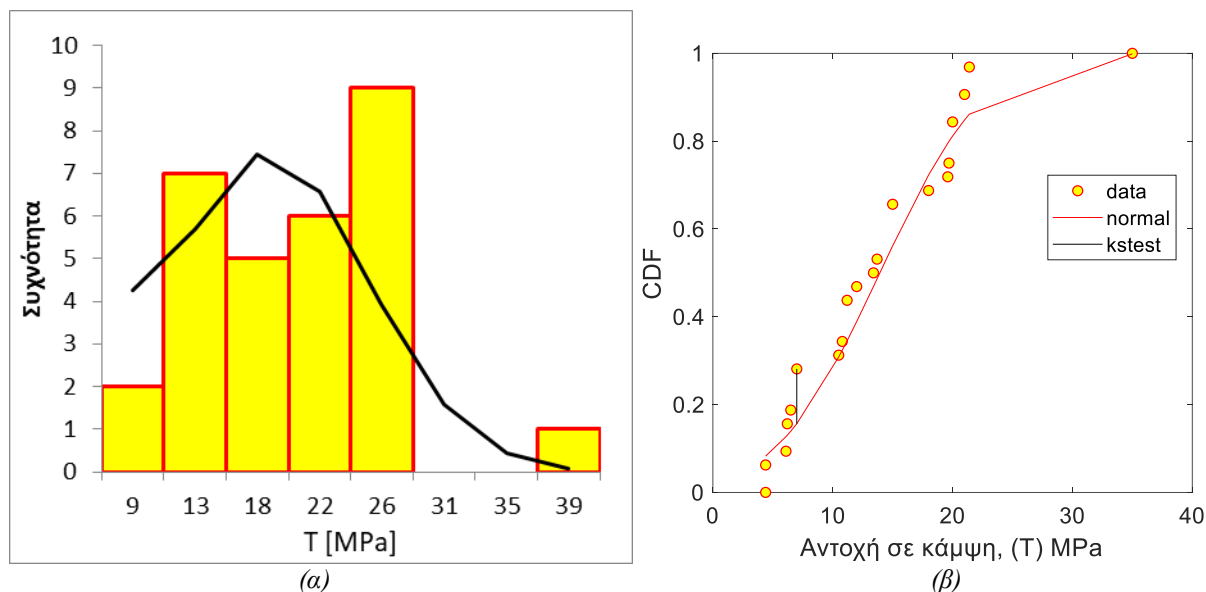
Το αθροιστικό διάγραμμα (CDF) (Εικόνα 4.16β) επιβεβαιώνει την επιλογή της Weibull κατανομής, καθώς οι πειραματικές τιμές (κίτρινοι κύκλοι) ευθυγραμμίζονται σε μεγάλο βαθμό με τη θεωρητική καμπύλη Weibull (κόκκινη γραμμή). Αυτό δείχνει ότι η Weibull κατανομή περιγράφει ικανοποιητικά τα δεδομένα της UCS των ασβεστόλιθων. Η γραμμή του KStest (μαύρη γραμμή) επιβεβαιώνει τη μικρή απόκλιση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, υποδεικνύοντας την αξιοπιστία για την επιλογή αυτής της κατανομής.



Εικόνα 4.16: α) Ιστόγραμμα αντοχής σε θλίψη (UCS) ασβεστόλιθων β) αθροιστικό διάγραμμα UCS ασβεστόλιθων

Η ανάλυση των δεδομένων για την αντοχή σε κάμψη (T) των ασβεστόλιθων βασίζεται στο ιστόγραμμα που παρουσιάζεται στην [Εικόνα 4.17α](#) και στο αθροιστικό διάγραμμα (CDF) [Εικόνα 4.17β](#). Το ιστόγραμμα των ασβεστόλιθων δείχνει ότι οι περισσότερες τιμές συγκεντρώνονται στο εύρος 18–30 MPa, με μέγιστη συχνότητα γύρω από τα 26 MPa. Αυτή η συγκέντρωση τιμών και η γενική συμμετρία του ιστογράμματος ευθυγραμμίζονται με τα χαρακτηριστικά της κανονικής κατανομής.

Το αθροιστικό διάγραμμα δείχνει την πολύ καλή συμφωνία των πειραματικών δεδομένων με την κανονική κατανομή. Η κανονική κατανομή επελέγη ως η καταλληλότερη από τον έλεγχο KStest, αφού είχε το μικρότερο σφάλμα 0.5334, καθώς παρουσίασε ποσοστό καταλληλότητας 59.8%. Παρότι το ποσοστό αυτό είναι σχετικά μέτριο, είναι αρκετό για να υποστηρίξει την επιλογή της κανονικής κατανομής ως καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα. Η κανονική κατανομή είναι μια λογική επιλογή για την περιγραφή της αντοχής σε κάμψη των ασβεστόλιθων, όπως επιβεβαιώνεται από το KStest. Τα πειραματικά δεδομένα συμφωνούν σε μεγάλο βαθμό με τα θεωρητικά στο αθροιστικό διάγραμμα αφού βλέπουμε ότι τα πειραματικά δεδομένα (κίτρινοι κύκλοι) ακολουθούν την θεωρητική κατανομή (κόκκινη γραμμή), δείχνοντας ότι οι τιμές κατανέμονται συμμετρικά γύρω από τον μέσο όρο, χωρίς μεγάλες αποκλίσεις.



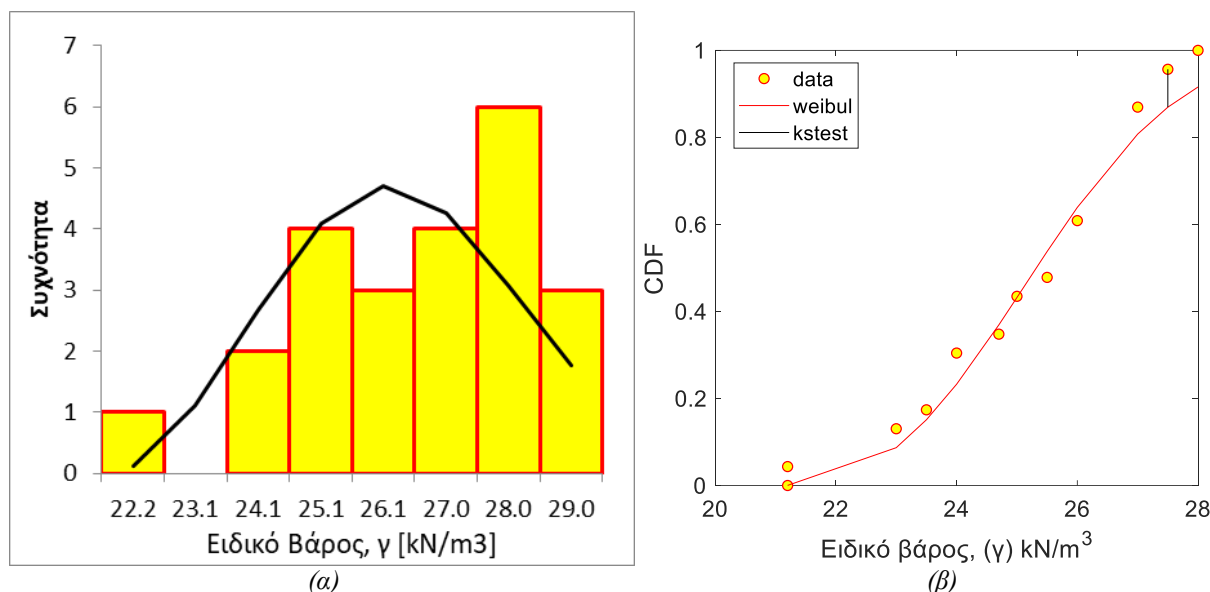
Εικόνα 4.17: α) Ιστόγραμμα αντοχή σε κάμψη ( $T$ ) ασβεστόλιθων β) αθροιστικό διάγραμμα  $T$  ασβεστόλιθων

#### 4.4.4 Ψαμμίτες

Τα δύο διαγράμματα που παρουσιάζονται αναλύουν τα δεδομένα του ειδικού βάρους ( $\gamma$ ) των ψαμμιτών. Με τη χρήση της KStest διαπιστώθηκε ότι η καταλληλότερη κατανομή για την περιγραφή των δεδομένων αυτών είναι η κατανομή Weibull με σφάλμα 0.3167 και με ποσοστό προσαρμογής 95.5%, γεγονός που υποδηλώνει ότι η κατανομή Weibull περιγράφει εξαιρετικά τα δεδομένα.

Στην [Εικόνα 4.18α](#), βλέπουμε το ιστόγραμμα και παρατηρούμε την κατανομή των δεδομένων του ειδικού βάρους. Οι κίτρινες μπάρες δείχνουν τη συχνότητα εμφάνισης των τιμών του ειδικού βάρους σε κάθε κλάση. Η μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει την καταλληλότερη καμπύλη πυκνότητας πιθανότητας που βασίζεται στην κατανομή Weibull. Η καμπύλη αυτή δείχνει μια καλή εφαρμογή στα πειραματικά δεδομένα, καθώς περιγράφει με ομαλό τρόπο την αλλαγή στη συχνότητα εμφάνισης.

Η δεύτερη [Εικόνα 4.18β](#) παρουσιάζει το διάγραμμα της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής (CDF) του ειδικού βάρους. Τα κίτρινα σημεία αντιστοιχούν στα πειραματικά δεδομένα, ενώ η κόκκινη καμπύλη δείχνει τη θεωρητική κατανομή Weibull, όπως προέκυψε από την KStest. Η εξαιρετική προσέγγιση της κόκκινης καμπύλης στα πειραματικά δεδομένα επιβεβαιώνει τη συμβατότητα της κατανομής Weibull με τα δεδομένα. Η μαύρη γραμμή υποδεικνύει την απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων, η οποία είναι ελάχιστη.

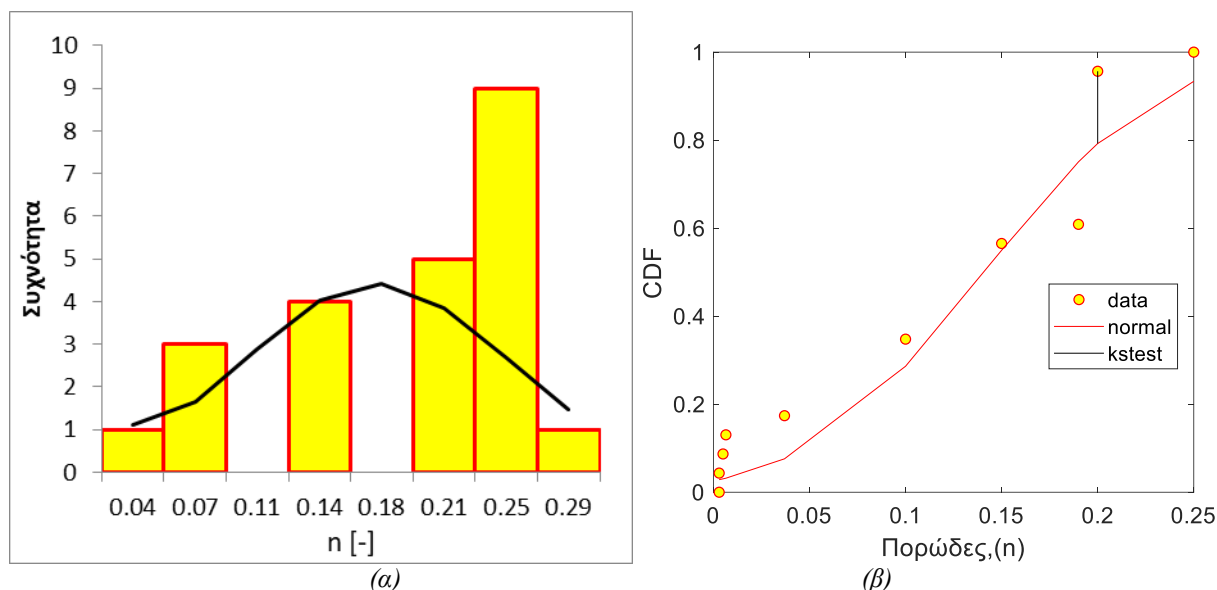


Εικόνα 4.18: α) Ιστόγραμμα ειδικού βάρους ψαμμιτών β) αθροιστικό διάγραμμα ειδικού βάρους ψαμμιτών

Το παρακάτω ιστόγραμμα παρουσιάζει την κατανομή του πορώδους ( $n$ ) των ψαμμιτών. Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της KStest, διαπιστώθηκε ότι η καταλληλότερη κατανομή για την περιγραφή των δεδομένων είναι η κανονική κατανομή, με ποσοστό προσαρμογής 45.1% και το μικρότερο σφάλμα που έδωσε να είναι 0.5973.

Το ιστόγραμμα (Εικόνα 4.19α) δείχνει τη συχνότητα εμφάνισης του πορώδους για συγκεκριμένα διαστήματα τιμών. Οι κίτρινες μπάρες υποδεικνύουν τον αριθμό παρατηρήσεων σε κάθε διάστημα, ενώ η μαύρη γραμμή αντιπροσωπεύει την καμπύλη της κατανομής που προσαρμόστηκε στα δεδομένα. Η κανονική κατανομή φαίνεται να περιγράφει ικανοποιητικά την τάση των δεδομένων, παρότι το ποσοστό προσαρμογής 45.1% υποδηλώνει μέτρια απόκλιση μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων.

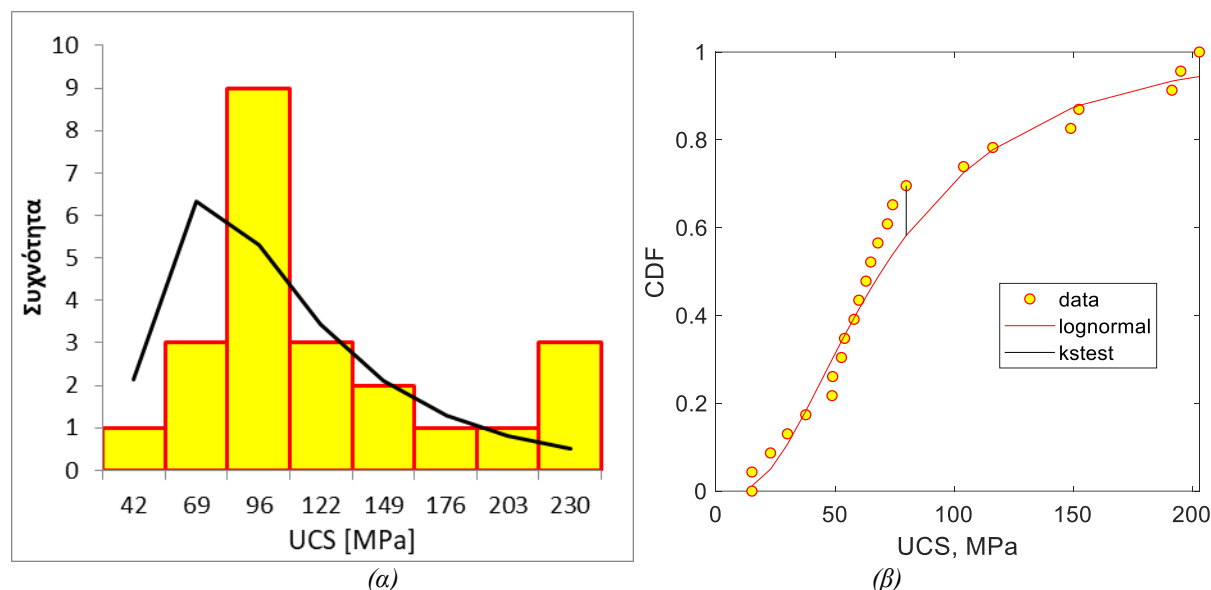
Στο αθροιστικό διάγραμμα (Εικόνα 4.19β) βλέπουμε τα πειραματικά δεδομένα (κίτρινοι κύκλοι) να ξεφεύγουν λίγο στην αρχή του διαγράμματος ενώ στην συνέχεια τα πειραματικά δεδομένα παρατηρούμε να ακολουθούν την κόκκινη γραμμή όπου είναι η θεωρητική κατανομή.



Εικόνα 4.19: α) Ιστόγραμμα πορώδους ψαμμιτών β) αθροιστικό διάγραμμα πορώδους ψαμμιτών

Στο ιστόγραμμα (Εικόνα 4.20α) παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών της αντοχής σε θλίψη (UCS) για τους ψαμμίτες. Παρατηρούμε ότι οι περισσότερες τιμές συγκεντρώνονται στην περιοχή 69-96 MPa, γεγονός που υποδηλώνει ότι αυτή η κατηγορία τιμών είναι η πιο αντιπροσωπευτική για το συγκεκριμένο δείγμα ψαμμιτών. Η μαύρη καμπύλη στο ιστόγραμμα αντιπροσωπεύει τη θεωρητική προσαρμογή με βάση την κατανομή που προέκυψε από τον έλεγχο KStest στη Matlab. Η καμπύλη τείνει να προσαρμόζεται ικανοποιητικά στις υψηλές και μεσαίες τιμές του δείγματος, ενώ στις ακραίες τιμές η απόκλιση είναι εμφανής, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο λόγω της φύσης της λογαριθμοκανονικής κατανομής και του περιορισμένου αριθμού παρατηρήσεων στις άκρες.

Από την άλλη στο αθροιστικό διάγραμμα (Εικόνα 4.20β) παρουσιάζεται η σύγκριση των δεδομένων με τη θεωρητική καμπύλη προσαρμογής, που βασίζεται στη λογαριθμοκανονική κατανομή. Η καμπύλη (κόκκινη γραμμή) δείχνει μια εξαιρετική προσαρμογή στα παρατηρηθέντα δεδομένα (κίτρινες κουκκίδες), με ποσοστό καταλληλότητας 81.9% και το μικρότερο σφάλμα να είναι 0.4124, όπως προέκυψε από τον έλεγχο KStest. Η μαύρη γραμμή υποδεικνύει την απόσταση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, η οποία είναι μικρή, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της επιλογής της λογαριθμοκανονικής κατανομής.

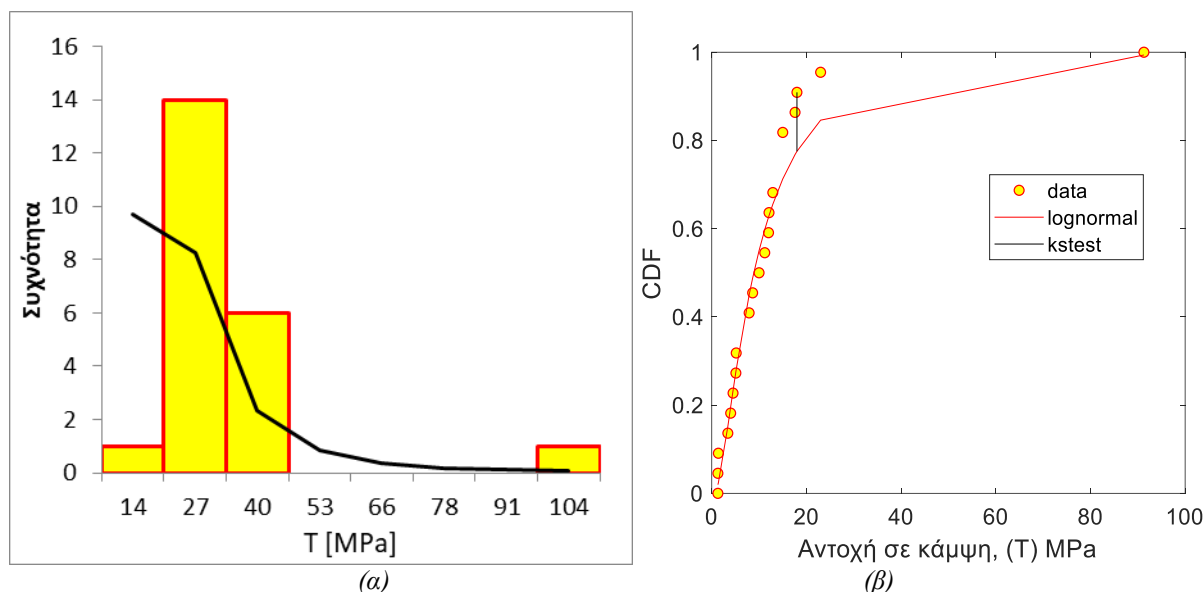


Εικόνα 4.20: α) Ιστόγραμμα αντοχή σε θλίψη (UCS) ψαμμιτών β) αθροιστικό διάγραμμα UCS ψαμμιτών

Συμπερασματικά και τα δύο διαγράμματα βοηθούν στην στατιστική ανάλυση των ψαμμιτών σχετικά με την UCS, καθώς μας δίνεται μια ολοκληρωμένη εικόνα για την κατανομή των δεδομένων, την καταλληλότητα της κατανομής που επιλέχθηκε σύμφωνα με το KStest αλλά και την ερμηνεία της μαύρης γραμμής στο β διάγραμμα.

Το ιστόγραμμα (Εικόνα 4.21α) απεικονίζει την κατανομή των τιμών της αντοχής σε κάμψη (T) για τους ψαμμίτες. Παρατηρείται ότι η πλειονότητα των τιμών βρίσκεται στην περιοχή 27-40 MPa, με τη συχνότητα να κορυφώνεται στην κατηγορία των 27 MPa. Αυτό δείχνει ότι οι περισσότεροι ψαμμίτες εμφανίζουν μέτρια αντοχή σε κάμψη. Η κατανομή είναι έντονα ασύμμετρη, με μεγαλύτερη πυκνότητα στις χαμηλές τιμές και μια μακριά "ουρά" προς τις υψηλότερες τιμές. Η μαύρη καμπύλη αντιπροσωπεύει τη θεωρητική προσαρμογή της κατανομής που προέκυψε από το KStest. Η καμπύλη ακολουθεί ικανοποιητικά τη διακύμανση των δεδομένων, ιδιαίτερα στις χαμηλές και μεσαίες τιμές. Ωστόσο, στις υψηλές τιμές (άνω των 66 MPa), η συχνότητα μειώνεται δραστικά, ενώ η προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης γίνεται πιο περιορισμένη λόγω του μικρού αριθμού παρατηρήσεων.

Το αθροιστικό διάγραμμα (Εικόνα 4.21β) παρουσιάζει τη σωρευτική κατανομή των δεδομένων και συγκρίνεται με τη θεωρητική λογαριθμική κατανομή, η οποία, σύμφωνα με τον έλεγχο KStest, είναι η καταλληλότερη με ποσοστό προσαρμογής 69.5% αφού το μικρότερο σφάλμα που έδωσε ήταν 0.4761. Η καμπύλη της λογαριθμικής κατανομής (κόκκινη γραμμή) τείνει να προσαρμόζεται στις περισσότερες περιοχές της κατανομής, ειδικά στα χαμηλά και μεσαία τμήματα των δεδομένων. Η μαύρη γραμμή, που δείχνει την απόκλιση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και της θεωρητικής κατανομής, παραμένει σχετικά κοντά στην καμπύλη, γεγονός που επιβεβαιώνει τη στατιστική καταλληλότητα της λογαριθμικής κατανομής, παρά το μέτριο ποσοστό (69.5%).



Εικόνα 4.21: α) Ιστόγραμμα αντοχής σε κάμψη (T) ψαμμιτών β) εμπειρικό διάγραμμα T ψαμμιτών

Συμπερασματικά το ιστόγραμμα καταδεικνύει την τάση και τη διασπορά των δεδομένων, τονίζοντας τη συγκέντρωση των τιμών στις χαμηλές περιοχές ενώ το CDF από την άλλη, προσφέρει ένα συνολικό ποσοστό που περιγράφει την πιθανότητα ένα δείγμα να έχει τιμή μικρότερη ή ίση με μια συγκεκριμένη τιμή. Έτσι, μπορούμε να δούμε ότι τα περισσότερα δείγματα συγκεντρώνονται κάτω από τα 40 MPa. Ο συνδυασμός των διαγραμμάτων αποκαλύπτει ότι οι ψαμμίτες έχουν μια ασύμμετρη κατανομή στην αντοχή τους σε κάμψη, όπου οι υψηλές τιμές είναι πιο σπάνιες. Η λογαριθμική κατανομή είναι επαρκής για την περιγραφή αυτής της συμπεριφοράς, αν και η προσαρμογή της δεν είναι απόλυτα ιδανική, όπως δείχνει το ποσοστό του 69.5%.

#### 4.5 Εκτίμηση αντοχής από άλλες ιδιότητες (correlations) και σχολιασμός

Η εκτίμηση της αντοχής σε θλίψη (UCS) των πετρωμάτων είναι κρίσιμη για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς τους, ιδιαίτερα σε εφαρμογές γεωτεχνικής μηχανικής και λατομικών δραστηριοτήτων. Για την υποστήριξη αυτής της ανάλυσης, η συσχέτιση της UCS με άλλες πηγές, όπως το ειδικό βάρος ( $\gamma$ ), το πορώδες ( $n$ ) και την αντοχή σε κάμψη (T). Οι συσχετίσεις παρουσιάζουν διαφορετική ακρίβεια ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος και την εξεταζόμενη ιδιότητα, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της γεωλογικής προέλευσης και της εσωτερικής δομής των πετρωμάτων.

Στο παρόν υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται οι γραμμικές συσχετίσεις (correlations) που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων μας για διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων. Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι σχέσεις της UCS με το ειδικό βάρος, το πορώδες και η αντοχή σε κάμψη, για δύο κύριες κατηγορίες πετρωμάτων: τους ψαμμίτες-αβεστόλιθους και τα μάρμαρα-γρανίτες. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται μέσω γραφημάτων που δημιουργήθηκαν στο Excel, τα οποία αναδεικνύουν τη φύση των συσχετίσεων. Για κάθε τύπο πετρώματος και κάθε συνδυασμό ιδιοτήτων, παρουσιάζεται ξεχωριστά το διάγραμμα της συσχέτισης, με τη γραμμή

τάσης και το αντίστοιχο 95% διάστημα εμπιστοσύνης (CL estimation), εκτός για την αντοχή σε κάμψη (T). Η εισαγωγή του διαστήματος εμπιστοσύνης ενισχύει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, προσφέροντας ένα εύρος τιμών εντός του οποίου αναμένεται να βρίσκεται η πραγματική τιμή της UCS με 95% βεβαιότητα. Η εξίσωση που δίνει το όριο εμπιστοσύνης 95% είναι η παρακάτω :

$$\hat{y} \pm t_{\text{crit}} * s.e. \quad (4.4)$$

$$\text{όπου } s.e. = s_{yx} * \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{ss_x}},$$

με το  $s_{yx}$  να είναι η τυπική εκτίμηση του σφάλματος,

το  $s_x$  να είναι η τετραγωνική απόκλιση των  $x$  τιμών στο δείγμα

και το  $t_{\text{crit}}$  είναι η κρίσιμη τιμή της κατανομής  $t$  . (Charles Zaiontz., 25/2/2025).

Συνολικά, οι συσχετίσεις αυτές προσφέρουν ένα χρήσιμο εργαλείο για την ταχεία εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, μειώνοντας την ανάγκη για χρονοβόρες και δαπανηρές δοκιμές. Παράλληλα, η ενσωμάτωση του διαστήματος εμπιστοσύνης παρέχει μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση, συμβάλλοντας στον σχεδιασμό γεωτεχνικών έργων και προσφέροντας μια πρώτη εκτίμηση για την αντοχή των πετρωμάτων σε πραγματικές συνθήκες.

#### 4.5.1 Συσχέτιση UCS με ειδικό βάρος ( $\gamma$ )

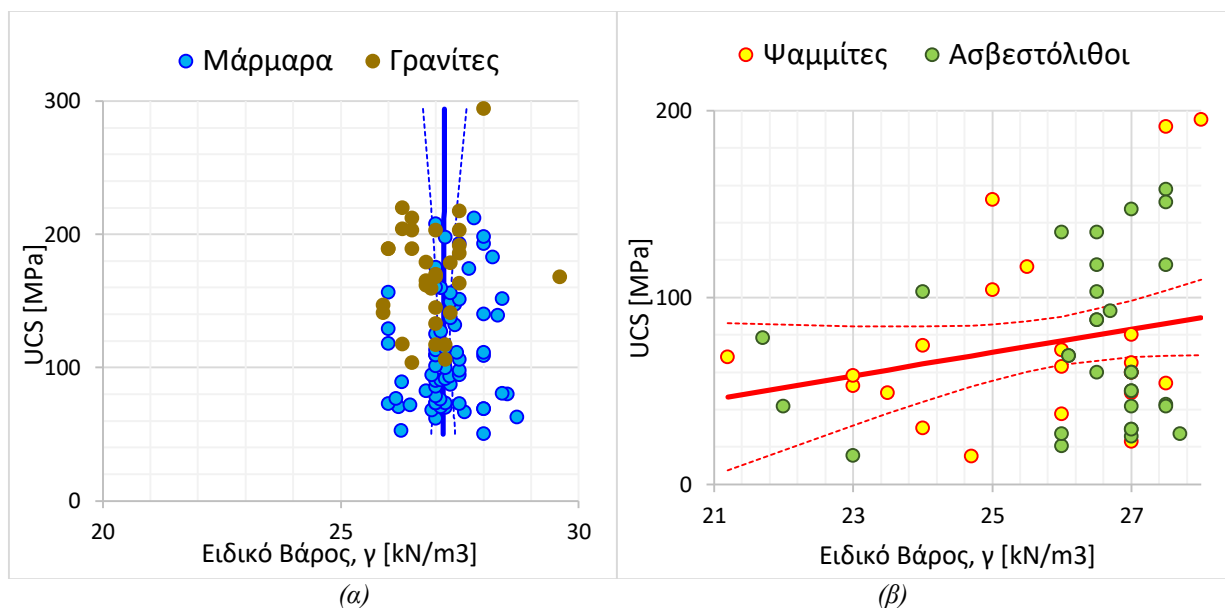
Στα δύο διαγράμματα παρουσιάζονται η συσχέτιση της αντοχής σε θλίψη (UCS) με το ειδικό βάρος για δύο ομάδες πετρωμάτων: μάρμαρα - γρανίτες και ψαμμίτες - ασβεστόλιθοι. Η ανάλυση γίνεται λαμβάνοντας υπόψη το όριο εμπιστοσύνης 95%, γεγονός που επηρεάζει την αξιολόγηση της συσχέτισης μεταξύ των ιδιοτήτων.

Στο πρώτο διάγραμμα *Εικόνα 4.22α*, όπου εξετάζονται τα μάρμαρα και οι γρανίτες, παρατηρείται ότι οι τιμές του ειδικού βάρους είναι συγκεντρωμένες σε ένα σχετικά στενό εύρος μεταξύ 26 kN/m<sup>3</sup> και 28.5 kN/m<sup>3</sup>. Η αντοχή σε θλίψη (UCS) εμφανίζει σημαντική διασπορά, με τιμές που συγκεντρώνονται μεταξύ 50 και 200 MPa. Η γραμμή παλινδρόμησης παρουσιάζει σχεδόν κατακόρυφη κλίση, ενώ τα όρια εμπιστοσύνης υποδηλώνουν μεγάλη αβεβαιότητα. Αυτό σημαίνει ότι η συσχέτιση μεταξύ του ειδικού βάρους και της αντοχής σε θλίψη είναι ιδιαίτερα ασθενής ή ακόμα και μη στατιστικά σημαντική. Με άλλα λόγια, το ειδικό βάρος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αξιόπιστος δείκτης για την πρόβλεψη της αντοχής σε θλίψη για τα μάρμαρα και τους γρανίτες.

Στο δεύτερο διάγραμμα *Εικόνα 4.22β*, που αφορά τους ψαμμίτες και τους ασβεστόλιθους, το ειδικό βάρος έχει μεγαλύτερο εύρος τιμών, ξεκινώντας από περίπου 21 kN/m<sup>3</sup> και φτάνοντας έως 27 kN/m<sup>3</sup>. Σε αυτή την περίπτωση, η γραμμή παλινδρόμησης δείχνει μια ήπια θετική κλίση, γεγονός που υποδηλώνει μια τάση αύξησης της αντοχής σε θλίψη καθώς το ειδικό βάρος αυξάνεται. Ωστόσο, τα όρια εμπιστοσύνης 95% δείχνουν ότι η διασπορά των δεδομένων είναι σημαντική, περιορίζοντας την αξιοπιστία αυτής της συσχέτισης. Σε σύγκριση με το πρώτο

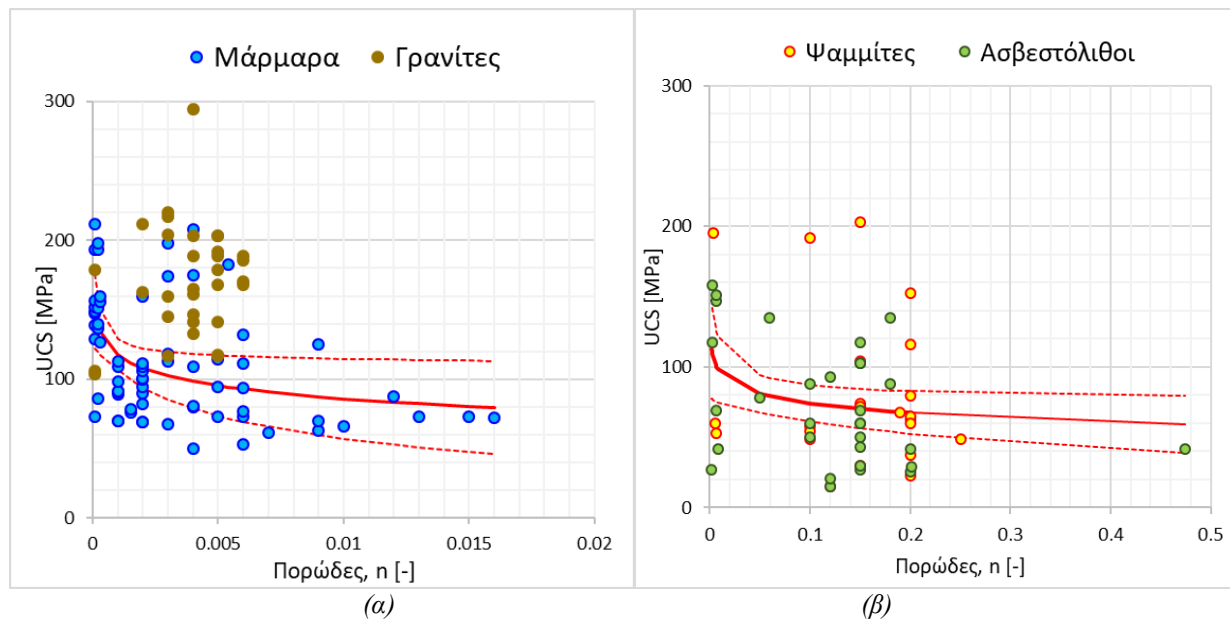
διάγραμμα, η σχέση εδώ είναι σαφέστερη, αλλά εξακολουθεί να είναι αρκετά ασθενής και να υποβάλλεται σε υψηλή αβεβαιότητα.

Συμπερασματικά, στα μάρμαρα και τους γρανίτες η συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε θλίψη και του ειδικού βάρους είναι πολύ ασθενής, γεγονός που καθιστά δύσκολη την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Αντίθετα, στους ψαμμίτες και τους ασβεστόλιθους παρατηρείται μια ασθενής αλλά θετική συσχέτιση, η οποία όμως συνοδεύεται από μεγάλη διασπορά στις τιμές, μειώνοντας την προβλεπτική της ικανότητα.



Εικόνα 4.22: Συσχέτιση UCS με ειδικό βάρος ( $\gamma$ )

#### 4.5.2 Συσχέτιση UCS με πορώδες ( $n$ )



Εικόνα 4.23: Συσχέτιση UCS με πορώδες ( $n$ )

Στο πρώτο διάγραμμα (*Εικόνα 4.23α*), το οποίο αφορά τη συσχέτιση της αντοχής σε θλίψη (UCS) με το πορώδες για τα μάρμαρα και τους γρανίτες, παρατηρούμε ότι τα δεδομένα των γρανιτών συγκεντρώνονται σε πολύ χαμηλές τιμές πορώδους, κάτω από 0,005, και συνοδεύονται από σχετικά υψηλές τιμές αντοχής, φτάνοντας τα 200MPa και λίγο περισσότερο. Αντίθετα, στα μάρμαρα βλέπουμε να υπάρχουν δύο κατηγορίες πετρωμάτων, τα «σκληρά» μάρμαρα όπου είναι κοντά στο 200MPa και τα «μαλακά» μάρμαρα, που έχουν πιο χαμηλή τιμή σε αντοχή σε θλίψη. Επίσης, εμφανίζουν μεγαλύτερη διακύμανση στο πορώδες, με τιμές που εκτείνονται σε ευρύτερο φάσμα, και γενικά χαμηλότερες τιμές σε θλίψη συγκριτικά με τους γρανίτες. Η καμπύλη παλινδρόμηση δείχνει μια τάση μείωσης της αντοχής, καθώς αυξάνεται το πορώδες σημαντικά για τα μάρμαρα, ωστόσο η διασπορά των δεδομένων είναι αρκετά μεγάλη, γεγονός που υποδεικνύει ότι η συγκεκριμένη σχέση παρουσιάζει σημαντική αβεβαιότητα. Τα όρια του 95%, που απεικονίζονται με τις διακεκομμένες γραμμές.

Στο δεύτερο διάγραμμα (*Εικόνα 4.23β*), το οποίο αφορά τη συσχέτιση της αντοχής σε θλίψη με το πορώδες για τους ψαμμίτες και τους ασβεστόλιθους, διακρίνεται ότι το πορώδες των ψαμμιτών είναι γενικά υψηλότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα πετρώματα, φτάνοντας ακόμα και τιμές κοντά στο 0.3, ενώ η αντοχή τους σε θλίψη κυμαίνεται κυρίως κάτω από 100MPa. Οι ασβεστόλιθοι, αντίθετα, παρουσιάζουν τη συγκέντρωση των τιμών πορώδους σε χαμηλότερα επίπεδα, κυρίως κάτω από 0.2, με την αντοχή τους σε θλίψη να εμφανίζει επίσης σημαντική διακύμανση. Η καμπύλη παλινδρόμησης δείχνει μία φθίνουσα τάση, υποδεικνύοντας ότι η αύξηση του πορώδους συνδέεται με τη μείωση της αντοχής σε θλίψη, αν και τα δεδομένα είναι αρκετά διασκορπισμένα, γεγονός που καταδεικνύει ότι η σχέση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα ισχυρή. Τα όρια του 95% δείχνουν τη μεγάλη αβεβαιότητα στην πρόβλεψη αυτής της σχέσης, κάτι που μπορεί επίσης να οφείλεται στην ετερογένεια των πετρωμάτων αυτών και σε άλλες μεταβλητές που επηρεάζουν την αντοχή τους.

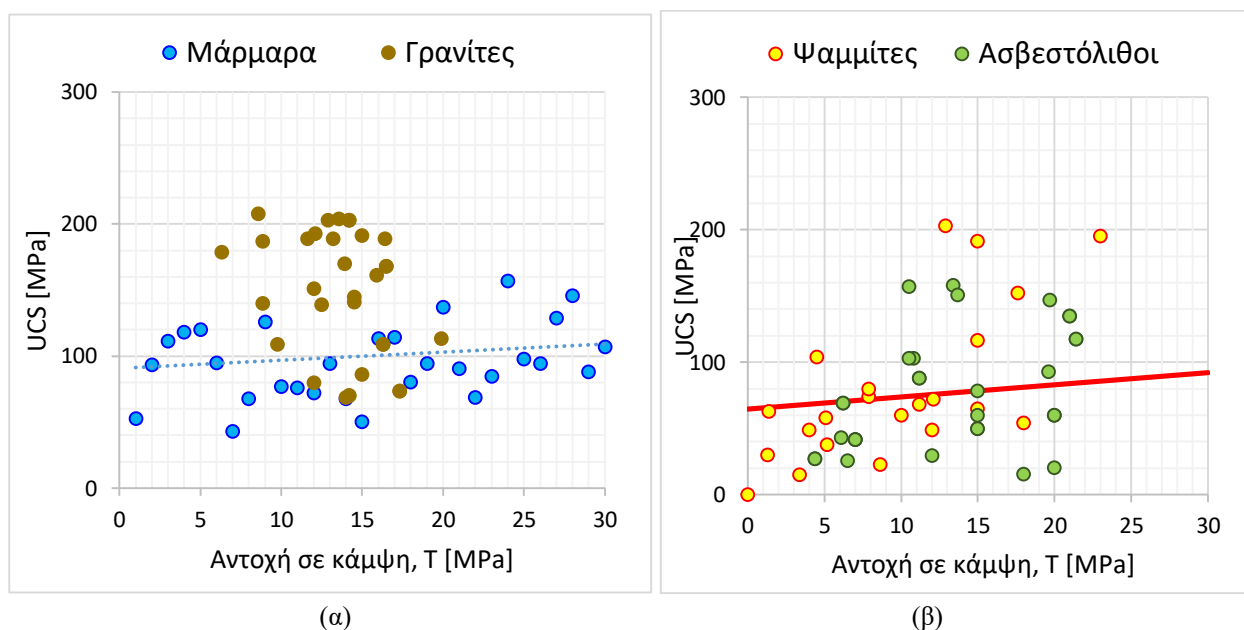
#### 4.5.3 Συσχέτιση UCS με αντοχή σε κάμψη (*T*)

Σε αντίθεση με τις συσχετίσεις της αντοχής σε θλίψη (UCS) με το ειδικό βάρος και το πορώδες, όπου εφαρμόστηκε το 95% όριο εμπιστοσύνης για πιο ακριβή εκτίμηση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών, στην περίπτωση της αντοχής σε κάμψη δεν εφαρμόστηκε το ίδιο κριτήριο. Αυτό έγινε σύμφωνα με την καθοδήγηση του επιβλέποντα καθηγητή, καθώς κρίθηκε ότι τα δεδομένα και η φύση της συγκεκριμένης αντοχής δεν απαιτούσαν μια τέτοια προσαρμογή. Η επιλογή αυτή διατηρεί τη συνέπεια της ανάλυσης και επιτρέπει τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων με προηγούμενες σχετικές μελέτες.

Στο πρώτο διάγραμμα (*Εικόνα 4.24α*) βλέπουμε τα μάρμαρα και τους γρανίτες, παρατηρούνται δύο διαφορετικές τάσεις. Στα μάρμαρα, η καμπύλη τάσης υποδεικνύει μια ασθενή θετική συσχέτιση, με την αντοχή σε θλίψη να ελαφρύνει καθώς και μεγάλη αντοχή σε κάμψη. Παρά τη θετική αυτή τάση, η μεγάλη διασπορά των σημείων δείχνει ότι η σχέση είναι αδύναμη και επηρεάζεται από άλλους παράγοντες. Αντίθετα, στους γρανίτες παρατηρείται μια αρνητική συσχέτιση γεγονός που είναι ασυνήθιστο και μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως ότι οι γρανίτες προφανώς προέρχονται από διαφορετικές περιοχές με διαφορετική

ορυκτολογική σύσταση, μικροδομή και διαφορετικές φυσικές ιδιότητες όπως το ειδικό βάρος, το πορώδες κ.α. Αυτές οι διαφοροποιήσεις μπορούν να επηρεάσουν διαφορετικά την αντοχή σε θλίψη και την αντοχή σε κάμψη, οδηγώντας σε φαινομενικά αντικρουόμενες συσχετίσεις.

Στο δεύτερο διάγραμμα (Εικόνα 4.24β), που αναφέρεται στους ψαμμίτες και τους ασβεστόλιθους, η συσχέτιση εμφανίζεται διαφορετική. Στους ψαμμίτες (πορτοκαλί κύκλοι), παρατηρείται μια πιο έντονη θετική συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε θλίψη και της αντοχής σε κάμψη. Η καμπύλη τάσης δείχνει ότι η αύξηση της αντοχής σε κάμψη συνοδεύεται από σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής, κάτι που υποδεικνύει έναν στενό μηχανισμό συσχέτισης ανάμεσα στις δύο μονάδες. Στους ασβεστόλιθους, η συσχέτιση είναι πολύ πιο αδύναμη, με την καμπύλη τάσης να παρουσιάζει μια ελαφριά θετική κλίση. Η μεγάλη διασπορά των σημείων δείχνει ότι η αντοχή σε θλίψη επηρεάζεται λιγότερο από την αντοχή σε κάμψη σε αυτά τα πετρώματα.



Εικόνα 4.24: Συσχέτιση UCS με αντοχή σε κάμψη ( $T$ )

#### 4.6 Λογισμικό πρόγραμμα CougarStats

Το CougarStats (<https://www.cougarstats.ca/>) αποδεικνύεται ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων στην παρούσα εργασία, καθώς παρέχει βασικές μεθόδους ανάλυσης και οπτικοποίησης, όπως περιγραφικά στατιστικά, κατανομές πιθανοτήτων, καθώς και εργαλεία ανάλυσης συσχέτισης και παλινδρόμησης. Η εφαρμογή του στη μέτρηση της συσχέτισης μεταξύ μεταβλητών, όπως η αντοχή σε θλίψη (UCS) με το ειδικό βάρος, το πορώδες και την κάμψη, αποδείχθηκε ιδιαίτερα χρήσιμη. Στην Εικόνα 4.25 φαίνεται ένα μέρος του λογισμικού CougarStats στο οποίο φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο ανεβαίνουν τα δεδομένα στο λογισμικό και πατώντας την εντολή «υπολογίζω» υπολογίζεται αυτό που έχει επιλέγει, τη συσχέτιση και παλινδρόμηση στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Εικόνα 4.25: Λογισμικό πρόγραμμα CougarStats (<https://www.cougarstats.ca/>)

Οι διάφορες μέθοδοι συσχέτισης που προσφέρει, όπως η Pearson, η Kendall και η Spearman, εξυπηρετούν ανάγκες ανάλογα με τη φύση των δεδομένων. Η μέθοδος Pearson είναι κατάλληλη για γραμμικές σχέσεις και δεδομένα που ακολουθούν κανονική κατανομή, ενώ οι μέθοδοι Kendall και Spearman είναι ιδανικές για μονοτονικές σχέσεις και δεδομένα που δεν είναι κανονικά κατανομημένα ή περιέχουν ακραίες τιμές. Κάθε μία από τις μεθόδους προσφέρει μια διαφορετική προσέγγιση, επιτρέποντας την ακριβή ανάλυση των δεδομένων (El-Hashash, E. F., & Shiekh, R. H. A., 2022).

#### 4.6.1 Αποτελέσματα συσχετίσεων κατάταξης διακοσμητικών λίθων

Στον [πίνακα 4.1](#) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό CougarStats, σύμφωνα με τις παραπάνω τρεις μεθόδους που αναφέρθηκαν.

Πίνακας 4.1: Ανάλυση Συσχετίσεων UCS με Ειδικό Βάρος, Πορώδες και Κάμψη

Πέτρωμα	Συσχέτιση	Pearson (r)	Kendall (τ)	Spearman (ρ)
Μάρμαρα	UCS-ειδικό βάρος	0,1208	0,0941	0,1241
	UCS-Πορώδες	0,0828	0,0375	0,0772
	UCS-Κάμψη	-0,0766	-0,0197	-0,0326
Γρανίτες	UCS-ειδικό βάρος	0,1414	0,0142	0,0331
	UCS-Πορώδες	-0,1148	-0,1068	-0,1255

	UCS-Κάμψη	0,2616	0,0902	0,1117
<b>Ασβεστόλιθος</b>	UCS-Ειδικό βάρος	0,1469	0,0248	0,0660
	UCS-Πορώδες	-0,4068	-0,2367	-0,3469
	UCS-Κάμψη	0,2593	0,2378	0,3378
<b>Ψαμμίτες</b>	UCS-Ειδικό βάρος	0,3535	0,1775	0,2847
	UCS-Πορώδες	-0,5042	-0,3705	-0,4769
	UCS-Κάμψη	0,0854	0,3275	0,4705

Η σύγκριση των τριών μεθόδων συσχέτισης (Pearson, Kendall και Spearman) δείχνει ότι δεν υπάρχει καμία σαφής γραμμική ή μονοτονική σχέση μεταξύ των παραμέτρων UCS και των άλλων φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων, όπως το ειδικό βάρος, το πορώδες και η κάμψη. Για να υπάρχει ισχυρή γραμμική ή μονοτονική σχέση θα πρέπει οι τιμές να είναι κοντά στο -1 ή στο +1. Συγκεκριμένα, οι τιμές των Pearson, Kendall και Spearman είναι αρκετά χαμηλές σε όλες τις περιπτώσεις, υποδεικνύοντας την έλλειψη ισχυρών συσχετίσεων, είτε γραμμικών είτε μονοτονικών. Αυτό ενισχύεται από τα διαγράμματα συσχετίσεων που έχουν παρουσιαστεί, τα οποία δεν δείχνουν καμία σαφή τάση ή σχέση μεταξύ των μεταβλητών, ακόμη και όταν εξετάζουμε τις ισχυρές συσχετίσεις με το όριο εμπιστοσύνης 95%, όπου καμία συσχέτιση δεν ήταν στατιστικά σημαντική.

Η πιο αρνητική σχέση παρατηρείται μεταξύ UCS και πορώδους στους ψαμμίτες (Pearson = -0.5042), αλλά η τιμή αυτή είναι αρκετά αδύναμη για να υποστηρίξει μια ειδική ισχυρή συσχέτιση. Ομοίως, η πιο ισχυρή θετική συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ UCS και ειδικού βάρους στους ψαμμίτες (Pearson = 0.3535), αλλά και αυτή η σχέση δεν δείχνει σαφή γραμμική τάση. Στα διαγράμματα, η έλλειψη εμφανών συσχετίσεων, ακόμη και με υψηλά όρια εμπιστοσύνης, ενισχύει την υπόθεση ότι η σχέση μεταξύ UCS και άλλων παραμέτρων είναι αρκετά αδύνατη.

## Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η εργασία με τίτλο "Συγκέντρωση παραμέτρων αντοχής διακοσμητικών λίθων από βάσεις δεδομένων και στατιστική επεξεργασία τους" ανέλυσε τη μηχανική συμπεριφορά διαφόρων διακοσμητικών πετρωμάτων μέσω της συλλογής δεδομένων από αξιόπιστες βάσεις δεδομένων και της εφαρμογής στατιστικών μεθόδων. Η εστίαση δόθηκε στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, όπως το ειδικό βάρος, το πορώδες, η αντοχή σε θλίψη και η αντοχή σε κάμψη, με στόχο τη βαθύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων αυτών και της σημασίας τους για τις πρακτικές εφαρμογές.

Η ανάλυση έδειξε ότι τα μάρμαρα, οι γρανίτες, οι ασβεστόλιθοι και οι ψαμμίτες παρουσίασαν διαφοροποιήσεις στις μηχανικές τους ιδιότητες λόγω της γεωλογικής τους προέλευσης και της μικροδομής τους. Η πιο συχνή κατανομή που παρατηρήσαμε ήταν η Weibull διότι ήταν αυτή που προσαρμοζόταν καλύτερα στα δεδομένα μας.

Η στατιστική ανάλυση ανέδειξε την καταλληλότητα διαφορετικών πρότυπων κατανομών για την περιγραφή των δεδομένων. Η κανονική κατανομή περιέγραψε καλύτερα τις τιμές του ειδικού βάρους για τα μάρμαρα, ενώ για τα υπόλοιπα πετρώματα ήταν η Weibull κατανομή γύρω από το ειδικό βάρος. Στους ασβεστόλιθους και τα μάρμαρα η κατανομή που περιέγραψε καλύτερα το πορώδες ήταν η Weibull, ενώ για γρανίτες και ψαμμίτες καλύτερη ήταν η κανονική κατανομή. Σχετικά με την αντοχή σε θλίψη (UCS) τα μάρμαρα και οι ασβεστόλιθοι περιγράφονται καλύτερα τα δεδομένα με την Weibull, ενώ η UCS για τους ψαμμίτες με την λογαριθμοκανονική και οι γρανίτες με την κανονική. Τέλος η αντοχή σε κάμψη (T) για τα μάρμαρα και τους ψαμμίτες περιγράφεται καλύτερα με την λογαριθμοκανονική κατανομή, οι ασβεστόλιθοι με την κανονική και οι γρανίτες με την Weibull. Το συμπέρασμα που μπορούμε να διατυπώσουμε από αυτά τα αποτελέσματα είναι ότι δεν υπάρχει μία ενιαία κατανομή που να περιγράφει όλες τις βασικές ιδιότητες των πετρωμάτων, αλλά αντίθετα, η καταλληλότερη κατανομή εξαρτάται από το είδος του πετρώματος και την εξεταζόμενη ιδιότητα. Αυτό υποδεικνύει όπως είπαμε και παραπάνω, ότι οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων επηρεάζονται από τη γεωλογική τους σύσταση και τη μικροδομή τους, οδηγώντας σε διαφορετικές στατιστικές συμπεριφορές. Η διαφοροποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ορθή μοντελοποίηση των πετρωμάτων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους σε μηχανικές εφαρμογές. Συμπερασματικά οι κατανομές μας βοηθούν να κατανοήσουμε τη φύση των πετρωμάτων και την μεταβολή των χαρακτηριστικών τους, κάτι που είναι σημαντικό για διάφορες εφαρμογές τους. Μας βοηθάει να δούμε αν υπάρχουν ασυνήθιστες τιμές που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα (όπως υψηλή ή χαμηλή αντοχή).

Ωστόσο, η ισχύς των συσχετίσεων διαφέρει ανάμεσα στις ομάδες πετρωμάτων των παραμέτρων. Η αντοχή σε θλίψη (UCS) σε σχέση με το ειδικό βάρος για τα μάρμαρα-γρανίτες δεν έχουν κάποια τάση, ενώ με το πορώδες έχουν αρνητική σχέση. Από την άλλη, η αντοχή σε θλίψη (UCS) για τους ασβεστόλιθους-ψαμμίτες σχετίζεται θετικά με το ειδικό βάρος και αρνητικά με το πορώδες. Επίσης, η αντοχή σε κάμψη (T) συνδέθηκε με την αντοχή σε θλίψη, αν και η

συσχέτιση αυτή διέφερε σημαντικά ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος. Τα ευρήματα της εργασίας ανέδειξαν τη διαφοροποιημένη στατιστική συμπεριφορά των διακοσμητικών πετρωμάτων, επιβεβαιώνοντας ότι οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες τους δεν ακολουθούν ενιαίους κανόνες συσχέτισης.

Τα αποτελέσματα αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μελλοντικές μελέτες για την ανάπτυξη των πιο μικρών ειδικών προσεγγίσεων της αντοχής των πετρωμάτων, λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον τους γεωλογικούς τους παράγοντες. Επιπλέον, η στατιστική ανάλυση και η επιλογή των κατάλληλων κατανομών μπορούν να βοηθήσουν στην ποσοτική περιγραφή των ιδιοτήτων των πετρωμάτων, γεγονός που βρίσκει εφαρμογή τόσο στην επιστημονική έρευνα όσο και σε πρακτικούς τομείς, όπως η γεωτεχνική μηχανική και η βιομηχανία δομικών υλικών.

Η ανάλυση αυτή ανοίγει τον δρόμο για περαιτέρω μελέτες που θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στη βελτίωση της ακρίβειας των συσχετίσεων μέσω της συλλογής περισσότερων δεδομένων, τη μελέτη των επιπτώσεων περιβαλλοντικών παραγόντων, όπως η υγρασία και η θερμοκρασία στις μηχανικές ιδιότητες. Μια ακόμη σημαντική παράμετρος που θα μπορούσε να διερευνηθεί είναι η ορυκτολογική σύνθεση των πετρωμάτων, καθώς μπορεί να παίζει καθοριστικό ρόλο στη μηχανική συμπεριφορά τους, μια λεπτομερής πετρογραφική και χημική ανάλυση θα μπορούσε να προσφέρει σημαντικές πληροφορίες για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Επιπλέον μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για μελλοντική έρευνα θα ήταν η χρήση μεθόδων μηχανικής μάθησης, όπως τα νευρωνικά δίκτυα, για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων των πετρωμάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια. Συσχετίσεις που δεν είναι άμεσα εμφανείς μέσω παραδοσιακών στατιστικών μεθόδων μια τέτοια ανάλυση θα μπορούσε να συμβάλει στη βελτίωση της συμπεριφοράς των διακοσμητικών πετρωμάτων και στην ακριβέστερη εκτίμηση των ιδιοτήτων τους.

Συνοψίζοντας, η εργασία κατέδειξε τη σημασία της στατιστικής ανάλυσης για την κατανόηση των ιδιοτήτων των διακοσμητικών πετρωμάτων και ανέδειξε τον ρόλο των βάσεων δεδομένων ως πολύτιμο εργαλείο για τη συλλογή, οργάνωση και ανάλυση.

## Βιβλιογραφία

### Αγγλική

1. Atkinson, B.K., & Meredith, P.G. (1987). Experimental fracture mechanics data for rocks and minerals. In B.K. Atkinson (Ed.), *Fracture Mechanics of Rock*. London: Academic Press.
2. Badouna, I., Koutsovitis, P., Karkalis, C., Laskaridis, K., Koukouzas, N., Tyrologou, P., Patronis, M., Papatrechas, C., & Petrounias, P. (2020). Petrological and Geochemical Properties of Greek Carbonate Stones, Associated with Their Physico-Mechanical and Aesthetic Characteristics. *Minerals*, 10(6), 507. <https://doi.org/10.3390/min10060507>.
3. El-Hashash, E. F., & Shiekh, R. H. A. (2022). A Comparison of the Pearson, Spearman Rank and Kendall Tau Correlation Coefficients Using Quantitative Variables. *Asian Journal of Probability and Statistics*, 36–48. <https://doi.org/10.9734/ajpas/2022/v20i3425>.
4. Tilton, J. E. (2005). Depletion and the Long-Run Availability of Mineral Commodities. In *Wealth Creation in the Minerals Industry*, 61–70. Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/SP.12.03>.
5. Wahab, G. M. A., Gouda, M., & Ibrahim, G. (2019). Study of physical and mechanical properties for some of Eastern Desert dimension marble and granite utilized in building decoration. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(4), 907–915. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.07.003>
6. Xeidakis, G. S., & Samaras, I. S. (1996). A contribution to the study of some greek marbles. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 53(1), 121–129. <https://doi.org/10.1007/BF02594948>.
7. Haggag, F. A. (2012). Economic and financial valuation of the marble industry in Egypt
8. Agust Gudmundsson, (2011). Rock Fractures in Geological Processes. Chapter 10 - Toughness and fracture mechanics. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511975684.011>

### Ελληνική

1. Αγιουτάντης, Ζ. (2002). Στοιχεία Γεωμηχανικής: Μηχανική Πετρωμάτων. Εκδόσεις ΙΩΝ, Αθήνα.
2. Βέντεχορστ, Ρ. (2017). Δομικά Υλικά. Μ. Γκιούρδας, Αθήνα, 21<sup>η</sup> έκδοση.
3. Δήμου-Χωνιανάκη, Ε. (2020). Οι χρήσεις των Λίθων στην Αρχαιότητα. Σύνδεσμος Μεταλλευτικών Επιχειρήσεων, Αθήνα.
4. Νομικός, Π. (2015). Εισαγωγή στη Μηχανική των Πετρωμάτων: Μονοαξονική θλίψη άρρηκτου πετρώματος. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/3988>.
5. Παναγιώτου, Γ.Ν. (2025). Εργαστήριο Εξόρυξης Πετρωμάτων Ι, Εξόρυξη με εκκρηκτικές ύλες. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις ΕΜΠ.

6. Χρηστίδης. (2012). Βιομηχανικά Ορυκτά και Κοιτασματολογία. Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Πολυτεχνείου Κρήτης.
7. Ανανίας Τσιραμπίδης, 2015. Ποιοτικά χαρακτηριστικά - Αποθέματα και αξία-Βιομηχανικές, περιβαλλοντικές και αγροτικές εφαρμογές. Επιχειρησιακό πρόγραμμα «Μακεδονία-Θράκη» 2007-2013.

#### *Πηγές Διαδικτύου*

8. Oryktos Ploutos. (2015). Το ελληνικό μάρμαρο: εξόρυξη, στοιχεία παραγωγής. [https://www.oryktosploutos.net/2015/02/blog-post\\_5-17/](https://www.oryktosploutos.net/2015/02/blog-post_5-17/)
9. ThoughtCo. (20/2/2025) What is Granite?. Retrieved from <https://www.thoughtco.com/what-is-granite-1440992>
10. Orykta (20/1/2025). Μάρμαρα. Retrieved from <https://www.orykta.gr/oryktes-prototypes-tis-ellados/latomika-orykta/marmara>
11. Hellenic Granite. (24/2/2025). Product List. Retrieved from <https://www.hellenic-granite.gr/gr/productlist/6.1>
12. Greece Is. (27/2/2025). Greek Marble: The Stone that Shaped the World. Retrieved from <https://www.greece-is.com/greek-marble-the-stone-that-shaped-the-world/>
13. HLC Metal Parts. (27/2/2025). What is Flexural Strength?. Retrieved from <http://gr.hlc-metalparts.com/news/what-is-flexural-strength-78850347.html>
14. Emelda, M. (2018). Διαφορά μεταξύ ασβεστόλιθου και μαρμάρου. Retrieved from <http://www.differencebetween.net/science/nature/difference-between-limestone-and-marble/>
15. Goumas, S. (2015). Slides on Marble. Retrieved from <https://www.slideshare.net/stratosgoumas/ss-53664789>
16. Investopedia (13/12/2024). Log-Normal Distribution. Retrieved from <https://www.investopedia.com/terms/l/log-normal-distribution.asp>
17. Statistics by Jim. (13/12/2024). Weibull Distribution. Retrieved from <https://statisticsbyjim.com/probability/weibull-distribution/>
18. Stack Exchange. (10/2/2025). Normality Tests. Retrieved from <https://stats.stackexchange.com/questions/362/what-is-the-difference-between-the-shapiro-wilk-test-of-normality-and-the-kolmog>
19. Charles Zaiontz. (25/2/2025). Πραγματικά στατιστικά με χρήση του Excel. Διαστήματα εμπιστοσύνης και πρόβλεψης για προβλεπόμενες τιμές. <https://real-statistics.com/regression/confidence-and-prediction-intervals/>
20. Depositphotos. (7/3/2025). Μετασχηματισμός πετρωμάτων κύκλου και διαδικασία σχηματισμού πετρωμάτων. <https://depositphotos.com/gr/vector/rock-cycle-transformation-and-stone-formation-process-labeled-outline-diagram-459340476.html>
21. Βάση δεδομένων STREMA-DB. (10/1/2025). <http://minelab.mred.tuc.gr/stremadb/>
22. Βάση δεδομένων RMDB. (10/1/2025). <http://minelab.mred.tuc.gr/rmdb/>
23. Βάση δεδομένων Stone Contact (10/1/2025). <https://www.stonecontact.com/>
24. Στατιστικό πρόγραμμα CougarStats. (20/2/2025). <https://www.cougarstats.ca/>

## Παράρτημα Α: Δεδομένα φυσικομηχανικών ιδιοτήτων πετρωμάτων

Τα δεδομένα του παραρτήματος Α προέρχονται από βάσεις δεδομένων που αναφέρθηκαν στο κείμενο και μερικά από αυτά από την εργασία του (Xeidakis, G. S., & Samaras, I. S., 1996).

Τοποθεσία	Ειδικό Βάρος ( $\gamma$ )	Πορώδες ( $n$ )	Πυκνότητα ( $\rho$ )	Συντελεστής Υδαταπορρόφησης (%)	Αντοχή σε Θλίψη (UCS) [MPa]	Αντοχή σε Κάμψη (T) [MPa]
Μάρμαρο Καβάλας	2.627	0.004	2.678	0.248	52.83	16
Μάρμαρο Θάσος (δολομιτικό)	2.729	0.006	2.782	0.274	93.45	16
Μάρμαρο Δράμας	2.744	0.007	2.797	0.339	111.42	20
Μάρμαρο Ελικώνα Ροζ (δολομιτικό)	2.75	0.011	2.82	-	118	10
Μάρμαρο λευκός Ελικώνας (δολομιτικό)	2.65	0.033	2.72	-	120	-
Μάρμαρο γκρί Αλιβερίου	2.714	0.005	2.71	-	95	-
Μάρμαρο Καφέ Καρύστου (Εύβοια)	2.7	0.002	2.715	-	43	-
Καφέ Μάρμαρο Καπανδρίτη Αττικής	2.51	0.065	2.51	-	68	-
Μάρμαρο Μαύρη πέτρα Ελούντας	2.7	0.003	2.7	-	126	-
Μπεζ μάρμαρο Αργολίδας	2.616	0.003	2.667	0.56	76.82	18
Σκούρο μάρμαρο στο χωριό Δίδυμα Αργολίδας (δολομιτικό)	2.709	0.002	2.761	0.4	75.93	25
Μάρμαρο στο χωριό Λυγούριο	2.646	0.002	2.697	0.27	71.99	17.3

Αργολίδας						
Μάρμαρο από το Όρος Πάρνωνας Αρκαδίας	2.692	0.001	2.745	0.04	94.47	30
Καρναζιέικο Μάρμαρο (δολομιτικό)	2.692	0.001	2.7	0.09	67.89	14.2
Canaloni Μάρμαρο Ιταλίας	2.8	0.009	2.69	0.2	50.223	15
Μάρμαρο γκρί Διόνυσου	2.73	0.003	2.71	0.1	114	20
Μάρμαρο λευκό Διόνυσου	2.717	0.016	2.66	0.11	113.2	19.9
Μάρμαρο arabescato Cervairole	2.72	0.013	2.71	0.01	114.593	30
Μάρμαρο Goia Carrara	2.84	0.015	2.67	0.15	80.5	35
Μάρμαρο Βέροιας (Veria Green Marble)	2.75	0.006	2.7	0.22	94.4	19.9
Μάρμαρο Δαμάστας	2.73	0.005	2.7	1.01	137	11.9
Μάρμαρο Bianco Naxos	2.71	0.0001	2.71	0.99	90.7	13.2
Γκρί μάρμαρου Αστερούσια Ηρακλείου Κρήτης	2.7	0.004	2.69	-	69	-
Μάρμαρο Κόκκινο Καστοριάς	2.685	0.0027	2.716	-	85	-
Μάρμαρο Ροδίτη Ημίλευκο Κοζάνης (ασβεστιτικό- δολομιτικό)	2.698	0.004	2.75	-	157	-
Μάρμαρο Ημίλευκο Βαθυλλάκου Δράμας	2.71	0.004	2.7	-	98	-
Μάρμαρο ημίλευκο Αγίας Μαρίνας Αττικής	2.705	0.008	2.69	-	94.67	-

Μάρμαρο Λατυτοπαγές Σκύρου (δολομιτικό)	2.8	0.003	2.73	-	129	-
Μάρμαρο Theologos Evia Semi White (δολομιτικό)	2.732	0.011	2.81	0.12	146	15.85
Μάρμαρο Akrotiri Chania Semi White	2.7	0.011	2.67	-	88	-
Μάρμαρο Ημίλευκο Τρανόβαλτου Κοζάνης	2.718	0.002	2.72	-	114	-
Μάρμαρο Λευκό Τρανόβαλτου Κοζάνης	2.7	0.002	2.718	-	107	-
Μάρμαρο ημίλευκο Άγιος Κοσμάς, Αθήνα	2.75	0.003	2.71	-	85	-
Μάρμαρο White of Limnia Kavala	2.65	0.004	2.71	0.03	135	17.3
Μάρμαρο Έδεσσας	2.72	0.0015	2.69	0.01	99.9	31.6
Μάρμαρο Ιωαννίνων	2.6	0.006	2.662	0.42	118	17.3
Μάρμαρο Νερού Καβάλας	2.75	0.0015	2.71	0.08	98	15
Λευκό μάρμαρο Πρίνου	2.84	0.004	2.84	0.1	151.61	15.91
Μάρμαρο Bianco Carrara	2.71	0.004	2.71	0.1	127	21.78
Μάρμαρο Botticino Classico	2.78	0.002	2.68	0.16	212	17.1
Μάρμαρο Rosso Verona	2.7	0.0002	2.69	0.19	160	9.8
Μάρμαρο Breccia Sarda	2.75	0.012	2.673	0.012	193	14.9
Μάρμαρο Nero Portoro Vena Larga	2.82	0.001	2.71	0.09	183	10.2
Μάρμαρο Nero Marquina	2.87	0.002	2.68	0.2	62.9	14.4

Ισπανίας						
Μάρμαρο Crema Marfil Ισπανίας	2.73	0.001	2.72	0.15	155.7	19.8
Μάρμαρο Crema Valencia Ισπανίας	2.75	0.001	2.71	0.23	72.9	12.5
Μάρμαρο Blanco Ibiza Ισπανίας	2.73	0.006	2.72	0.16	87.4	14.2
Μάρμαρο Crema Nuova Τουρκίας	2.7	0.005	2.68	0.037	101	31.4
Οθωμανικό μπεζ μάρμαρο Τουρκίας	2.72	0.002	2.695	0.3	91.7	13.81
Μαύρο Ξύλινο Μάρμαρο Κίνας	2.77	0.001	2.72	0.06	174.3	25
Ανατολίτικο Λευκό Μάρμαρο	2.7	0.002	2.66	0.24	90	12.1
Γκρι William Marble Ιταλίας	2.74	0.002	2.7	0.12	147.42	30
Μάρμαρο Giallo Antico	2.7	0.002	2.71	0.04	175	25.3
Μάρμαρο Arabescato Carrara	2.74	0.001	2.724	0.4	132	20.7
Pentelikon Μάρμαρο	2.76	0.004	2.68	0.3	66.46	25
Μάρμαρο Calacatta Siena	2.73	0.002	2.72	0.22	149	16
Μάρμαρο Νέστου	2.72	0.006	2.7	0.17	73.4	10.2
Μάρμαρο Γαλατά Βουλγαρίας	2.72	0.002	2.78	1.284	197.8	20
Μάρμαρο Μουράτα Βουλγαρίας	2.7	0.001	2.73	0.084	78.8	11.1
Μάρμαρο Γορτύνης	2.8	0.003	2.68	0.08	69	14
Μάρμαρο Verde Antico	2.75	0.005	2.72	0.1	106.1	8.7
Μάρμαρο Red Spider Πύργων Δράμας	2.71	0.003	2.85	0.057	159.8	24.4

(δολομιτικό)						
Πράσινο Μάρμαρο Τήνου	2.8	0.009	2.802	0.41	111	13.3
Μάρμαρο MARÍTIMA Πορτογαλίας Δολομιτικό	2.62	0.047	2.62	-	133.4	10.99
Μάρμαρο ENCARNADO NEGRAIS (Πορτογαλία)	2.69	0.004	2.7	-	140.2	-
Ροζ Μάρμαρο Αιγαίου	2.68	0.0003	2.65	0.07	82.6	24
Μάρμαρο Crema Marfil Ivory Ισπανίας	2.7	0.0001	2.72	0.15	125.3	19.8
Μάρμαρο Marron Imperial Ισπανίας	2.8	0.006	2.73	0.28	198	21.6
Χρυσό ισπανικό Μάρμαρο	2.6	0.0002	2.65	0.3	129.2	8.89
Μάρμαρο Gaudi Ισπανίας	2.6	0.0001	2.66	0.19	156.57	20.59
Μάρμαρο Crema Valencia Ισπανίας	2.6	0.0002	2.71	0.23	72.9	12.5
Μάρμαρο Florido Marquina Ισπανίας	2.7	0.0001	2.68	0.15	61.7	14.4
Μάρμαρο Areti White Classic	2.83	0.0001	2.7	0.16	139	12.5
Μάρμαρο Domvrena Red	2.7	0.0002	2.65	0.04	86	15
Μάρμαρο Evia Red	2.7	0.0001	2.72	0.04	109.1	16.3
Μάρμαρο Verde Xiropotamos	2.7	0.0003	2.694	0.09	73.4	17.3
Μάρμαρο Aghios Kyrillos	2.7	0.0001	2.72	0.04	109.1	16.3
Μάρμαρο Agios Petros	2.7	0.0003	2.694	0.09	73.4	17.3
Μάρμαρο Penteli Green	2.71	0.002	2.693	0.08	70.3	14.2

Μάρμαρο Agios Petros	2.72	0.003	2.693	0.08	70	14.2
Μάρμαρο Penteli Green	2.7	0.004	2.717	0.11	113.2	19.9
Μάρμαρο White of Oxiro Dramas (δολομιτικό)	2.7	0.009001	2.83	0.2	187	8.87
Μάρμαρο White Bianco Venatino Δράμας	2.8	0.011	2.83	-	179	6.3
Μάρμαρο Βόλακας Δράμας	2.8	0.0054	2.825	0.19	140	8.87
Volax White	2.8	0.0001	2.835	0.22	108.8	9.76
Μάρμαρο Arabescato Orobico Grigio Ιταλίας	2.8	0.0002	2.705	0.12	193	12.1
Γκρι Μάρμαρο Δολομίτη	2.85	0.0002	2.85	0.015	80	12
Ariston Marble	2.8	0.003	2.68	0.08	69	14
Μάρμαρο Polaris Καβάλας	2.75	0.004	2.84	0.15	151	12
Μάρμαρο Ambrosia	2.7	0.0001	2.8	0.26	207.9	8.56
Αλφά (Μαργαϊκός Ασβεστόλιθος)	2.6	0.05	2.08	0.143	20.322	20
Ασβεστόλιθος Lecce	2.3	0.474	1.42	0.1	15.381	18
Ασβεστόλιθος Demati Esperia	2.61	0.12	2.61	1.06	68.9	6.21
Ασβεστόλιθος Demati Oilgrey Esperia	2.61	0.15	2.61	1.06	68.9	6.21
Ασβεστόλιθος Zakinthos Beige	2.75	0.12	1.92	6.71	42.8	6.1
Ασβεστόλιθος Γκρι Ελιάς	2.65	0.15	2.65	0.29	135	21
Ασβεστόλιθος Vicenza	2.7	0.18	2.2	0.08	29.491	35
Ασβεστόλιθος Μεσολογγίου	2.75	0.0067	2.68	0.25	117.3	21.4
Ασβεστόλιθος	2.65	0.15	2.65	0.1	60	20

Chara Salaminos						
Ασβεστόλιθος Midia	2.7	0.059	2.7	0.12	50	15
Ασβεστόλιθος Terra Coral	2.65	0.15	2.58	0.01	87.9	11.2
Ασβεστόλιθος Creta	2.7	0.1	2.7	0.12	60	20
Ασβεστόλιθος Milos Green	2.7	0.15	2.7	0.12	60	15
Ασβεστόλιθος Meteora Beige	2.7	0.15	2.7	0.12	50	15
Ασβεστόλιθος Grigio Argento	2.2	0.18	2.2	0.075	41.6	7
Ασβεστόλιθος Nabresina	2.75	0.12	2.585	1.06	158	13.4
Ασβεστόλιθος Giallo Dorato	2.75	0.15	1.925	0.7	41.6	7
Ασβεστόλιθος Aurisina Granitello	2.75	0.1	2.575	0.06	151	13.7
Ασβεστόλιθος Bianco Avorio	2.75	0.15	1.925	10.7	26.9	4.4
Ασβεστόλιθος Pietra di Vicenza	2.6	0.1	1.925	10.7	26.9	4.4
Ασβεστόλιθος Pietra Pece	2.7	0.15	2.05	10	25.5	6.5
Ασβεστόλιθος Warstein	2.7	0.2	2.7	0.06	29.355	12
Ασβεστόλιθος Portland	2.17	0.201	2.5	0.05	78.461	15
Ασβεστόλιθος Moca Creme	2.67	0.0059	2.515	0.0234	92.7	19.6
Ασβεστόλιθος Porto Beige	2.4	0.2	2.567	0.0173	103	10.8
Μπλε Ασβεστόλιθος Gascogne	2.65	0.15	2.567	0.0173	103	10.5
Ασβεστόλιθος Azul Monica	2.7	0.0026	2.66	0.005	147.1	19.7
Ασβεστόλιθος Grigio Vicenza	2.7	0.002	2.2	0.075	41.6	7
Ασβεστόλιθος Karnazeika cream (Μπέζ Καρναζέϊκων Αργολίδος)	2.6	0.017	2.7	-	147	-

Ασβεστόλιθος Jerusalem Golden Stone	2.62	-	2.637	1.1	135.9	11.2
Ασβεστόλιθος Olive Grey	2.6	0.008	2.65	0.0029	135	21
Ασβεστόλιθος Blue Ataija Azul (Πορτογαλία)	2.68	0.009	2.68	-	157	-
Ασβεστόλιθος Κρέμα Ψαθά Σητείας Maltezopectra	2.3	0.336	1.76	-	25	-
Ασβεστόλιθος Κόκκινο Κάντιας Αργολίδος	2.6	0.003	2.685	-	145	-
Ασβεστόλιθος Metsovo Beige	2.7	0.004	2.69	-	118	-
Ασβεστόλιθος Λιβαδειάς Μαύρος	2.7	0.005	2.7	-	105	-
Ασβεστόλιθος Ioannina Beige - Vrachos	2.69	0.02	2.65	-	189	-
Ασβεστόλιθος Golden Brown of Chios	2.7	0.0069	2.69	-	165	-
Ασβεστόλιθος Ioannina Beige - Trani	2.45	0.022	2.65	-	154	-
Ασβεστόλιθος Mesologgiou Meli	2.65	0.0067	2.68	0.0025	117.3	21.4
Ασβεστόλιθος Terra Honey	2.65	0.0018	2.58	0.01	87.9	11.2
Ψαμμίτης Sander	2.7	0.19	2.11	0.0648	48.753	12
Ψαμμίτης Achaia	2.4	0.037	2.58	-	149	-
Ψαμμίτης Serena	2.55	0.0065	2.49	0.0182	116.277	15
Ψαμμίτης YorkStone	2.75	0.1	2.4	0.04	54	18
Ψαμμίτης Verde Guatemala	2.8	0.1	2.7	0.48	195.2	23
Ψαμμίτης	2.7	0.15	2.7	0.08	60	10

Μάνδρας						
Demati Grey Sandstone	2.7	0.15	2.7	0.1	65	15
Ψαμμίτης Kybides	2.7	0.15	1.9	0.7	22.9	8.64
Ψαμμίτης Niwala Amarillo	2.6	0.2	2.32	0.1	37.71	5.17
Μπεζ ψαμμίτης της ερήμου	2.5	0.2	2.413	0.1	104	4.5
Ψαμμίτης Arenisca Μπεζ Montjuic	2.4	0.2	2.4	0.046	74.2	7.9
Ψαμμίτης Μπεζ Pirineo	2.5	0.2	2.629	0.0073	152.4	17.6
Ψαμμίτης Νέα Niwala	2.3	0.15	2.38	0.022	52.7	91.29
Ψαμμίτης Αρενίσκα Κόρβιο	2.6	0.25	2.13	0.053	63	1.4
Ψαμμίτης Arenisca Cuarcitica	2.7	0.005	2.7	0.01	79.9	7.9
Ψαμμίτης Arenisca Pitillas	2.47	0.2	2.0	0.05	15.1	3.4
Ψαμμίτης Dorada Urbion	2.3	0.2	2.17	0.059	58	5.1
Ψαμμίτης Arenisca Dorada Pinares	2.35	0.2	2.13	0.059	49	4
Ψαμμίτης Villamayor	2.4	0.2	2.4	0.1355	30	1.3
Ψαμμίτης Beig Champagne	2.6	0.15	2.12	0.002	72	12.1
Ψαμμίτης Gris Nava	2.12	0.1	2.12	0.002	68	11.2
Ψαμμίτης River Black	2.75	0.1	2.65	0.0026	191.5	15
Ψαμμίτης China Wooden	2.7	0.003	2.69	0.0048	203	12.9
Γρανίτης Bianco Sardo	2.75	0.0001	2.69	0.0058	203	14.2
Γρανίτης Rosa Beta	2.75	0.0001	2.65	0.0026	191.5	15
Γρανίτης Grigio Sardo	2.7	0.003	2.69	0.0048	203	12.9
Γρανίτης Luna	2.63	0.005	2.61	0.0031	204.05	13.54

Pearl						
Γρανίτης Sardinian White	2.65	0.005	2.69	0.003	203	14.2
Γρανίτης Duke Λευκός	2.6	0.004	2.6	0.0052	189	16.4
Γρανίτης London White	2.6	0.005	2.6	0.0052	189	11.6
Γρανίτης Grigio Perla	2.7	0.004	2.61	0.0058	170	13.9
Γρανίτης Silver Waves	2.96	0.003	2.655	0.0038	168	16.5
Γρανίτης Serizzo Monterosa	2.7	0.004	2.655	0.0038	168	16.5
Γρανίτης Rosa Sadro	2.65	0.003	2.585	0.0055	189	13.2
Γρανίτης Gran Perla	2.68	0.004	2.68	0.0019	161.47	15.89
Γρανίτης Branco Cristal	2.7	0.002	2.61	0.0026	145	14.5
Γρανίτης Azul Platino	2.59	0.004	2.63	0.0019	141	14.5
Γρανίτης Silver Cloud	2.68	0.006	2.686	0.0021	165.2	11.3
Γρανίτης Virginia Mist	2.8	0.005	3.105	0.0014	294.19	20.2
Γρανίτης Wausau Red	2.75	0.006	2.611	0.001	217.18	13.89
Γρανίτης Barre Grey	2.75	0.005	2.654	0.0021	163.03	14.97
Γρανίτης Bethel White	2.65	0.0001	2.628	0.0025	212	15.5
Γρανίτης Chelmsford Gray	2.69	0.006	2.696	0.0031	159.3	9.8
Γρανίτης Missouri Red	2.75	0.005	2.607	0.0025	185.74	12.07
Γρανίτης Deer Isle	2.73	0.004	2.615	0.003	178.62	11.34
Γρανίτης Pedras Salgadas	2.65	0.006	2.618	0.0021	103.5	16.7
Γρανίτης Crema Terra	2.7	0.005	2.62	0.0017	117	16
Γρανίτης Dallas White	2.63	0.004	2.7	0.0024	220	20
Γρανίτης Bianco Romano	2.59	0.005	2.63	0.0036	146.9	7.2
Γρανίτης Salt	2.63	0.005	2.63	0.0128	117.6	15.3

and Pepper						
Γρανίτης Crema Terra Granite	2.72	0.003	2.62	0.0017	117	16
Γρανίτης Cinza Penalva	2.7	0.002	2.625	0.026	132.7	13.7
Γρανίτης Cinza Alpendurada	2.68	0.003	2.652	0.002	178.8	22.1
Γρανίτης Amarelo Macieira Granite	2.73	0.003	2.6	0.007	141	10.3
Γρανίτης Amarelo San Martinho	2.72	0.004	2.61	0.0036	106	11
Γρανίτης Arctic White Φιλανδίας	2.63	0.001	2.65	0.0025	179	18
Γρανίτης Καφέ Βαλτικής Φιλανδίας	2.7	0.002	2.65	0.0018	187	11.3
Γρανίτης New Balmoral Red Φιλανδίας	2.63	0.0038	2.62	0.0026	170	8.25

## Παράρτημα Β: Παρουσίαση κώδικα Kolmogorov-Smirnov και Monte Carlo στη Matlab

Κανονική Κατανομή (Normal Distribution)
<pre> x=[data]; [mu,su] = normfit(x); [f,y]=ecdf(x); x2=norminv(f,mu,su); f2=normcdf(y,mu,su); [~,p1,d1] = kstest2(x,x2); [D1,I]=max(abs(f2-f)); yd=[y(I) y(I)]; cd=[f(I) f2(I)]; figure(1); plot(y,f,'.',y,f2,'r-',yd,cd,'black-'); % xlabel 'Πορώδες, (n)'; % xlabel 'Ειδικό βάρος, (γ) kN/m^3' % xlabel 'UCS, MPa' % xlabel 'Αντοχή σε κάμψη, (T) MPa' % xlabel 'Ειδικό βάρος, (γ) kN/m^3' ylabel 'CDF'; legend('data','normal','kstest','location','best'); figure(2); </pre>
Λογαριθμοκανονική Κατανομή (Log-Normal Distribution)
<pre> z=x; x=log(x); [mu2,su2] = normfit(x) x2=normrnd(mu2,su2,size(x)); [f,y]=ecdf(x); x2=norminv(f,mu2,su2); f2=normcdf(y,mu2,su2); [~,p2,d2] = kstest2(x,x2); [D2,I]=max(abs(f2-f)); yd=[y(I) y(I)]; cd=[f(I) f2(I)]; y=exp(y); yd=exp(yd); plot(y,f,'.',y,f2,'r-',yd,cd,'black-'); % xlabel 'Πορώδες, (n)'; % xlabel 'Ειδικό βάρος, (γ) kN/m^3' % xlabel 'UCS, MPa' % xlabel 'Αντοχή σε κάμψη, (T) MPa' % xlabel 'Ειδικό βάρος, (γ) kN/m^3' ylabel 'CDF'; legend('data','lognormal','kstest','location','best'); figure(3); </pre>
Weibull Κατανομή
<pre> c=x; x=z-c; pu=wblfit(x); [f,y]=ecdf(x); x2=wblinv(f,pu(1),pu(2)); f2=wblcdf(y,pu(1),pu(2)); [h,p3,d3] = kstest2(x,x2,'Tail','larger'); </pre>

```
[D3,I]=max(abs(f2-f));
yd=[y(I) y(I)];
cd=[f(I) f2(I)];
plot(y+c,f,'.',y+c,f2,'r-',yd+c,cd,'black-');
% xlabel 'Πορώδες, (n)';
% xlabel 'Ειδικό βάρος, (γ) kN/m^3'
% xlabel 'UCS, MPa'
% xlabel 'Αντοχή σε κάμψη, (T) MPa'
% xlabel 'Ειδικό βάρος, (γ) kN/m^3'
ylabel 'CDF';
legend('data','weibul','kstest','location','best');
[~,~,~,Dmax] = kstest(x);
[D1/Dmax,D2/Dmax,D3/Dmax]
```

### Κώδικας Monte Carlo

```
function [P,Dm5]=PKST(D,n)
% Input #1 D: Normalized Kolmogorov smirnov statistic D=Dm/Dmax (CL5%)
% Input #2 n: Data size
% Output # 1 P: Probability of null hypothesis
% Output # 2 Dm5: Critical value for 5% confidence level
M=1000000;
% Produce M sorted samples with size n from the normal distribution
Z=sort(normrnd(0,1,n,M));
% Compute empirical cumulative distribution function (cdf)
cdf1= repmat(linspace(0.5,n-0.5,n)/(n-1),1,M);
% Compute normal distributed data cdf
cdf2=normcdf(Z,0,1);
% Define Kolmogorov Smirnov Statistic for M samples;
Dmax=max(abs(cdf1-cdf2));
% Sort in descending order
Dmax=-sort(-Dmax);
% Define the limit value for confintent interval 5%
Dm5=Dmax(round(5*M/100));
Dm=Dm5*D;
Pm=(1:M)';
% Define the probability base the data that are grater than measured
% statistic
P=interp1(Dmax,Pm,Dm,'linear','extrap')/M;
end
```