



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων λόγω ακραίων
βροχοπτώσεων: διερεύνηση επίδρασης παραμέτρων εδάφους
και βροχής στον κορεσμό του εδάφους

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Α. ΠΑΠΑΘΕΟΔΩΡΟΥ

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων: Ιωάννης Ε. Ζευγώλης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
INTERDISCIPLINARY POSTGRADUATE PROGRAMME
DESIGN AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND WORKS

Flood development due to extreme rainfall events: effect of soil
and rainfall parameters on soil saturation

MASTER OF SCIENCE THESIS

GEORGIOS A. PAPTAEODOROU

Diploma in Mining and Metallurgical Engineering, N.T.U.A.

Supervisor: Ioannis E. Zevgolis
Associate Professor N.T.U.A.

ATHENS, FEBRUARY 2024

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 05/03/2024

Ιωάννης Ε. Ζευγώλης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ανδρέας Καλλιώρας, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Πάυλος Π. Νομικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αντικείμενο της εργασίας είναι η διερεύνηση των πλημμυρικών φαινομένων ως αποτέλεσμα του κορεσμού του εδάφους σε συνθήκες έντονων βροχοπτώσεων. Σκοπός της εργασίας είναι να διερευνηθεί η επιρροή του τύπου του εδάφους στην ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων από ακραίες βροχοπτώσεις. Παράλληλα διερευνάται και η επιρροή διαφορετικών εντάσεων βροχόπτωσης όπως και η επιρροή της θέσης του υδροφόρου ορίζοντα. Οι αναλύσεις πραγματοποιούνται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2 της Rocscience με γεωμετρία που αντιστοιχεί σε 1D συνθήκες όπως είναι και το πρόβλημα της ροής του νερού στο έδαφος. Αξιολογούνται 4 διαφορετικές παράμετροι, ο ρυθμός διήθησης, η αθροιστική διήθηση, ο ρυθμός απορροής και η ποσότητα του νερού που πλημμυρίζει την επιφάνεια το λιμνάζον νερό. Με αυτόν τον τρόπο μέσα από την συγκεκριμένη διπλωματική θα υπάρχει μία καλή γνώση για την αλληλεπίδραση εδάφους – ακραίων βροχοπτώσεων, με απώτερο σκοπό στο μέλλον να μπορούν να προβλεφθούν συνέπειες από τέτοια φαινόμενα.

Ευχαριστίες

Φτάνοντας μετά από 6,5 ακαδημαϊκά χρόνια στην «Ιθάκη» μένουν όλες οι καλές αναμνήσεις. Ένα τεράστιο ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου στον καθηγητή μου κύριο Γιάννη Ζευγώλη που ήταν δίπλα μου σε κάθε βήμα αυτού του ταξιδιού με τις συμβουλές του και η πόρτα του γραφείου του πάντα ανοιχτή. Επίσης θα ήθελα σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω τον κύριο Αλέξανδρο Θεοχάρη για την πολύ καλή και επικοινωνιακή συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής. Από τα άτομα που θέλω να ευχαριστήσω δεν θα μπορούσαν να λείπουν οι καθηγητές του μεταπτυχιακού για το όμορφο έργο τους.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει την ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων λόγω βροχοπτώσεων δίνοντας έμφαση στην εξέλιξη του κορεσμού του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, ορμώμενοι από τις καταστροφικές πλημμύρες στο Θεσσαλικό κάμπο διερευνώνται τα πλημμυρικά φαινόμενα κυρίως σε σχέση με την ικανότητα του εδάφους να απορροφά το νερό από ακραίες εντάσεις βροχής. Κύρια παράμετρος διερεύνησης είναι ο τύπος του εδάφους και για την κάλυψη ενός μεγάλου εύρους εδαφικών υλικών επιλέγονται τρία χαρακτηριστικά εδαφικά υλικά, μία τυπική άμμος, μία τυπική ιλύς και μία τυπική άργιλος ως βάση για τις αναλύσεις. Για την εμβάθυνση των αναλύσεων και την εκτεταμένη σύγκριση επιλέγονται τρεις διαφορετικές εντάσεις βροχής, μία μέτρια που αντιστοιχεί σε συνηθισμένη βροχόπτωση, μία ισχυρή που αντιστοιχεί σε κακοκαιρία τύπου Elias και μία βίαιη που αντιστοιχεί σε κακοκαιρία τύπου Daniel. Με την συμπερίληψη τριών διαφορετικών εντάσεων βροχόπτωσης στις αναλύσεις διερευνάται και η επίδραση τους στην ανάπτυξη πλημμυρών στους συγκεκριμένους τύπους εδαφών. Ακόμα μία σημαντική παράμετρος που διερευνήθηκε η επίδρασή της είναι η θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Πραγματοποιούνται αναλύσεις ροής που αντιστοιχούν σε μονοδιάστατες συνθήκες, και πραγματοποιείται μόνο κατακόρυφη ροή. Αρχικά αξιολογείται ο ρυθμός διήθησης του νερού στο έδαφος και υπολογίζεται η αθροιστική διήθηση δηλαδή η ποσότητα του νερού που έχει εισχωρήσει στους πόρους του εδάφους σε συγκεκριμένο χρόνο. Μέσω υπολογιστικών μεθόδων υπολογίζεται ο ρυθμό απορροής του νερού και η βασική παράμετρος αξιολόγησης που είναι το λιμνάζον νερό, δηλαδή η ποσότητα του βρόχινου νερού που παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους σε συγκεκριμένο χρόνο. Μέσω των εκτεταμένων παραμετρικών αναλύσεων αντλούνται σημαντικές πληροφορίες για το πώς αναπτύσσονται τα πλημμυρικά φαινόμενα και ποσοτικοποιούνται οι βασικές παράμετροι.

Λέξεις Κλειδιά: πλημμύρα, ακραίες βροχοπτώσεις, κλιματική αλλαγή, κορεσμός εδάφους, γεωτεχνική μηχανική, αριθμητικές αναλύσεις, πεπερασμένα στοιχεία, μη κορεσμένα εδάφη

Abstract

The present thesis examines the development of flooding phenomena due to rainfall, emphasizing the evolution of soil saturation. More specifically, driven by the catastrophic floods in the Thessalian plain, the flooding phenomena are studied mainly in relation to the ability of the soil to absorb water under extreme rainfall intensities. The main parameter studied is the soil type, and in order to cover a wide range of soil materials, three typical soil materials, a typical sand, a typical silt, and a typical clay, are selected as the basis for the analyses. Three different rainfall intensities are chosen to deepen the analyses and make an extended comparison: a moderate one corresponding to a typical rainfall, a heavy one corresponding to an Elias-type storm, and a violent one corresponding to a Daniel-type storm. The effect of these three intensities is also studied on the development of flooding in the specific soil types. Another important parameter whose effect has been studied is the location of the groundwater table. Flow analyses corresponding to one-dimensional conditions are carried out, and only vertical flow is considered. Initially, the rate of water infiltration into the soil is evaluated together with the cumulative infiltration, i.e., the amount of water that has infiltrated the soil pores in a given time. Computational methods are used to calculate the rate of the runoff water and the key parameter, the ponding water, i.e., the amount of rainwater remaining on the soil surface at a given time. The extensive parametric analyses provide important information on how flood events develop and evolve and key parameters are quantified.

Keywords: flood, extreme rainfalls, climate change, soil saturation, geotechnical engineering, numerical analysis, finite elements, unsaturated soils

EXTENDED ABSTRACT

❖ Introduction

Modern society is facing a worsening climate crisis with serious global implications. One of the main consequences of climate change is an increase in extreme weather events, such as heavy rainfall. Greece, as a region affected by these changes, has experienced an increase in the frequency of flooding in both rural and urban areas. This challenge is not limited to environmental issues, but also has important social and economic implications. For this reason, the understanding and management of these phenomena is crucial for the development of future prevention and protection measures.

In this context, the thesis focuses on the analysis of the flooding process by investigating the influence of the hydrological capacity of soils. Numerical simulations using Rocscience's finite element software are used to analyse parameters such as soil material, rainfall intensity and groundwater level. Data from actual heavy rainfall events recorded in the area are used to select representative values. Different soil types are also considered to cover a range of fine-grained materials. Finally, different water table height scenarios are considered.

Infiltration & Runoff

Soil infiltration rate refers to the rate at which water enters the soil and is influenced by a number of factors including capillary action and gravity. It is measured in inches or millimetres of water per hour. This rate gradually decreases over time due to the gradual decrease in hydraulic gradient and other factors such as waterproofing and crusting on the soil surface. The different stages of infiltration, from the initial to the final infiltration rate, represent the upper and lower limits of the instantaneous permeability. When the water supply to the soil is interrupted, the rate of infiltration increases.

Runoff is a phenomenon that occurs when the intensity of rainfall exceeds the maximum capacity of the soil to absorb water. This capacity, as mentioned above, refers to the permeability of the soil and decreases with time until it reaches a constant value, which corresponds to the saturated hydraulic conductivity (water permeability).

Extreme Rainfalls

Extreme climatic events are characterised by an unusual situation where climatic conditions exceed a defined threshold, with significant social, economic and environmental impacts. In Greece, one such phenomenon is extreme precipitation, which tends to increase due to climate change, causing extensive damage to property and human life. The occurrence of severe weather events "Daniel" and "Elias" in September 2023 in the southeastern Mediterranean caused severe damage to settlements and infrastructure, with a large number of human and animal casualties and incalculable economic losses.

Table 1 shows some of the most significant extreme weather events observed in Greece, together with the corresponding rainfall amounts and intensities.

Table 1: Extreme rainfall events recorded in Greece during the period 2020 - 2023.

| Year | Month | Place | Quantity (mm) | Duration (h) | Intensity (mm/h) | Intensity (m/s) | Name of Phenomenon |
|------|-------|----------|---------------|--------------|------------------|-----------------|--------------------|
| 2023 | 9 | Volos | 202 | 6 | 33,7 | 9,4E-06 | Elias |
| 2023 | 9 | Zagora | 528 | 10 | 52,8 | 1,5E-05 | Daniel |
| 2022 | 10 | Sitia | 281,8 | 12 | 23,5 | 6,5E-06 | - |
| 2022 | 7 | Kalamata | 77 | 3 | 25,7 | 7,1E-06 | (Burini) |
| 2021 | 10 | Athens | 111,8 | 3,3 | 33,9 | 9,4E-06 | Balos |
| 2021 | 2 | Evros | 175,5 | 8,5 | 20,6 | 5,7E-06 | - |
| 2021 | 1 | Evros | 198,5 | 7,5 | 26,5 | 7,4E-06 | - |
| 2020 | 8 | Evia | 350 | 6 | 58,3 | 1,6E-05 | Thalia |

❖ Parametric Analyses

- Assumptions of numerical analyses, geometrical characteristics of models, soil properties and range of values of parameters

A simple geometry is chosen for the simulation to represent a one dimensional analysis. A soil column 10m high and 1m wide is considered suitable for the requirements of the problem. The analyses are carried out in Rocscience's RS2 finite element software. Figure 1 shows the model designed in the RS2 software for the analyses. The elements are 6-node triangles and the canonical density is moderate and in some cases denser at the upper boundary. The analysis is concerned solely with groundwater flow over time and not with the mechanical behaviour of the material, therefore the analysis method chosen is transient FEM and the initial steady state stage.

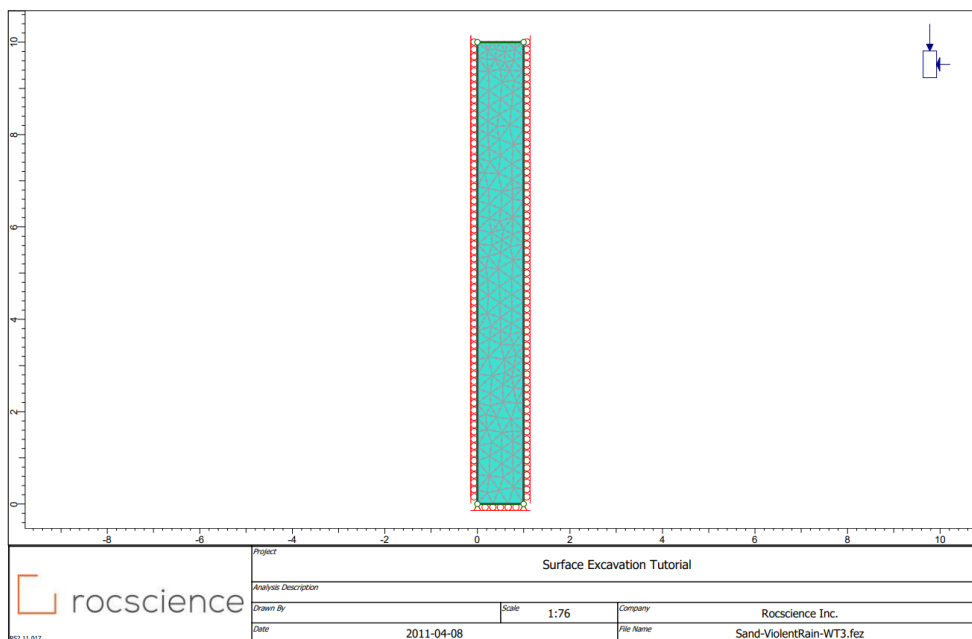


Figure 1: Simulation in the finite element software RS2

For the analyses, 3 basic soil types are selected for the simulations. Sand, silt and clay are considered to be the appropriate materials to cover the range of soil characteristics present. For the groundwater analyses carried out within this thesis, the hydraulic properties of the soils are those that are most relevant to these analyses. The hydraulic model chosen to describe the hydraulic parameters of the materials is the Van Genuchten model, a model widely used in geotechnical engineering and also used in various finite element software such as Plaxis. Van Genuchten (1978, 1980) described the characteristic curve of soil moisture with the following equation:

$$S_e = \frac{1}{[1+(a \times h)^n]^m} \quad [1]$$

where a , n , and m are fitting parameters. The parameter α causes a parallel shift of the characteristic curve without altering its shape, other parameters remaining constant. The parameter n is responsible for the distortion of the curve. The parameter m is given by equation 2 (Sakellariou-Makradonaki, 1986).

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad [2]$$

From relation (1) we obtain for soil moisture the relation:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(a \times h)^n]^m} \quad [3]$$

Three different materials are selected for the analyses and these are sand, silt and clay as mentioned above. Table 2 shows the parameters of these materials as assigned by Carsel & Parrish, 1988.

Table 2: Simulation materials and their parameters according to Carsel & Parrish, 1988.

| Classification | Θ_s | Θ_r | K_s (m/day) | $a(1/m)$ | n |
|----------------|------------|------------|---------------|----------|------|
| Sand | 0.43 | 0.045 | 7.13 | 14.5 | 2.68 |
| Silt | 0.46 | 0.034 | 0.6 | 1.6 | 1.37 |
| Clay | 0.38 | 0.068 | 0.0475 | 0.8 | 1.09 |

Rain in the Rocscience RS2 finite element software is simulated with the Infiltration tool. 3 different rain intensities are selected to perform the analyses. Each intensity represents a category of mild, heavy and torrential rainfall. Table 3 shows the rainfall intensities selected.

Table 3: Rainfall Intensity Analysis

| Category of Rain | Intensity (mm/h) | Name of Phenomenon |
|------------------|------------------|--------------------|
| Moderate | 8 | - |
| Heavy | 34 | Balos - Elias |
| Violent | 58.3 | Thalia - Daniel |

The water table is defined as a boundary condition in the RS2 software using the Total Head tool. For the analyses in this thesis 3 different locations of the water table are selected, at 0m from the lower boundary of the model, at 3m and at 7m. This is done to evaluate the role and influence of the water table during a rainfall event.

As mentioned above, there are 3 different types of material (sand, silt, clay), 3 different rainfall intensities (moderate, heavy, torrential) and 3 different water table heights (0, 3, 7m). In total, 27 parametric analyses were carried out, as shown in the table.

Table 4: 27 combinations of different Material, Rainfall Intensity, and Water Table Depth.

| Water Table | Intensity | Soil | | |
|-------------|-----------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | Sand | Silt | Clay |
| 0m | Moderate | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Heavy | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Violent | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3m | Moderate | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Heavy | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Violent | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 7m | Moderate | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Heavy | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Violent | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |

The Q/Ks ratio is used to describe each analysis of different soil and rainfall intensity. Where Q is the rainfall intensity and Ks is the saturated hydraulic conductivity of the soil. The values are shown in the table below.

Table 5: The values of the Q/Ks ratio.

| Q/Ks | | | | |
|-------------|-----------|------|------|-------|
| Water Table | Intensity | Soil | | |
| | | Sand | Silt | Clay |
| 0, 3, 7m | Moderate | 0.03 | 0.32 | 4.04 |
| | Heavy | 0.11 | 1.36 | 17.18 |
| | Violent | 0.20 | 2.33 | 29.46 |

- Results of Analyses

Diagrams 1, 2 and 3 show the results of some representative analyses to evaluate the simultaneous evolution of infiltration and runoff rates. The analyses refer to an aquifer at 3m, for strong rainfall intensity and each corresponds to silt sand and clay respectively. A correspondence between the changes in infiltration rate and runoff rate is observed, i.e. as the infiltration rate is constant the runoff rate remains constant and when the infiltration rate decreases to 0 then the runoff rate increases until it becomes equal to the rainfall intensity.

A comparison of the results in terms of infiltration rate in different materials and rainfall intensity levels is then presented. Three different rainfall intensities in the same material are analysed, as well as three different water table heights at specific material and rainfall intensity conditions. Diagram 4 is a representative diagram for the effect of soil material on infiltration rate and refers to Violent rainfall intensity. The results show that the infiltration rate depends on the material and rainfall intensity. Sand and silt have higher initial infiltration rate compared to clay, while the infiltration rate decreases with time in all materials. It is also observed that sand reaches full saturation faster compared to silt and clay, while clay has the lowest infiltration rate. Diagrams 5, 6 and 7 show the simulation results for three different rainfall intensities on the same soil. In particular, in Diagram 5, which refers to simulations with sand, it is observed that increasing the Q/Ks ratio leads to a decrease in soil saturation time. In Diagram 6, for simulations with silt, the curves coincide for specific Q/Ks ratios greater than 1. In Diagram 7, corresponding to simulations with clay, it is observed that the 3 curves coincide as $Q/Ks > 1$. Diagram 8 shows the influence of the aquifer on the infiltration rate. It can be seen that it contributes to the time required for the infiltration rate to become equal to 0. The closer to the surface the water table the shorter the time required.

The cumulative permeability, i.e. the amount of water that passes through the material until it is completely saturated, is then evaluated. Diagram 9 shows the cumulative

permeability for violent rainfall intensity. It is observed that sand percolates the largest amount of water, followed by silt and clay, due to its higher porosity. Diagrams 10 to 12 study the effect of Q/K_s ratio on sand, silt and clay, capturing three different rainfall intensities. It is observed that the final amount of water infiltrated is the same regardless of the rainfall intensity. Furthermore, in Figure 10 it is observed that the slope of the plots increases with rainfall intensity as $Q/K_s > 1$. Diagram 13 studies the effect of the water table under constant soil and rainfall intensity conditions. It is observed that the position of the water table influences both the time of filling the voids with water and the final amount of water infiltrating the pores.

Diagrams 14 to 18 show the runoff rate. Diagram 14 shows the effect of the soil material under violent rainfall conditions. For clay, it is observed that the runoff rate starts with high values due to the low infiltration coefficient K_s of the material. Over time, the runoff rate gradually increases until it reaches the intensity of the rainfall, indicating complete saturation of the material with water. For silt and sand, it is observed that initially the runoff rate is zero, as the pores are empty and water infiltrates rapidly. Then, after a period of time, the runoff rate increases sharply and reaches the intensity of rain, indicating complete saturation of the material. Diagrams 15 to 17 focus on the effect of rain intensity on the runoff rate. For sand, it is observed that as the Q/K_s ratio increases, the final runoff rate increases. An increase in the Q/K_s ratio also leads to a decrease in the soil saturation time. For example, for a moderate rainfall intensity (Q/K_s ratio 0.03), it takes approximately 180 minutes to saturate the soil, while for a heavy rainfall intensity (Q/K_s ratio 0.11), this time decreases to 40 minutes, and for a heavy rainfall intensity (Q/K_s ratio 0.20), this time decreases to 25 minutes. In all cases, the runoff rate before saturation is zero. For silt, note that the plots for ratios $Q/K_s > 1$ are parallel in time but differ in runoff rate values due to the different rate at which water falls to the soil surface. For a Q/K_s ratio less than 1 there is no runoff in the early stages of rainfall until the soil resources are saturated, whereas for a Q/K_s ratio greater than 1 there is runoff from the onset of rainfall. For clay, the 3 plots are parallel in time, but the runoff values are different and in particular increase as the Q/K_s ratio increases. Diagram 18 shows the influence of the water table on the runoff rate. The closer the aquifer is to the surface, the faster the runoff rate increases.

Finally, diagrams 19 to 23 relate to pond water. Diagram 19 shows the effect of soil material on the temporal evolution of ponding water under conditions of Violent rainfall intensity. The soil plays a role in the flooding because, as shown in the diagram, the phenomenon occurs from the beginning of the rainfall in clay and silt, while it takes longer in sand. Diagrams 20, 21 and 22 show the effect of rainfall intensity. In diagram 21, corresponding to sand, it can be seen that intensity plays a role in the time and rate of flood generation (slope of the graph). The more intense the rainfall, the earlier and faster the flood will occur. When $Q/K_s > 1$, the intensity of the rainfall only contributes to the rate of flood generation, as the flood is generated from the beginning of the

event. Diagram 23 shows the influence of the water table, which contributes to the time, i.e. the closer it is to the surface, the sooner pond water will appear at the surface.

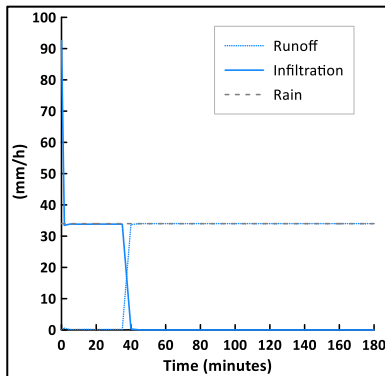


Diagram 1: Infiltration & Runoff (Sand – Heavy Intensity – W.T. 3m)

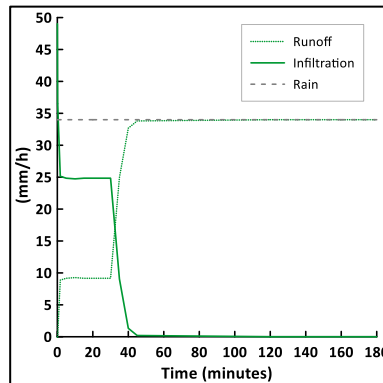


Diagram 2: Infiltration & Runoff (Silt – Heavy Intensity – W.T. 3m)

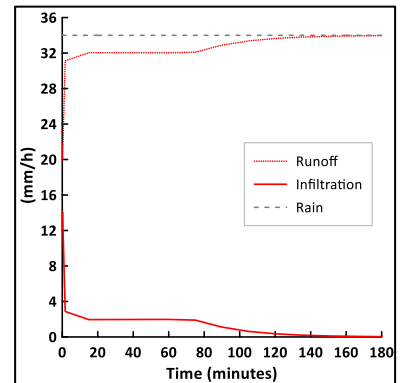


Diagram 3: Infiltration & Runoff (Clay – Heavy Intensity – W.T. 3m)

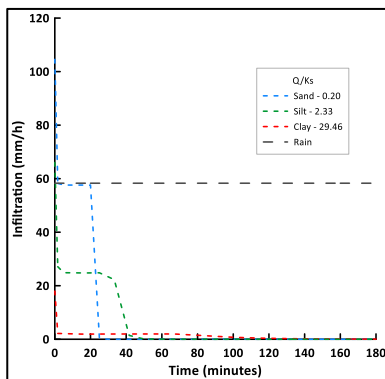


Diagram 4: Infiltration (Violent Intensity – W.T. 3m)

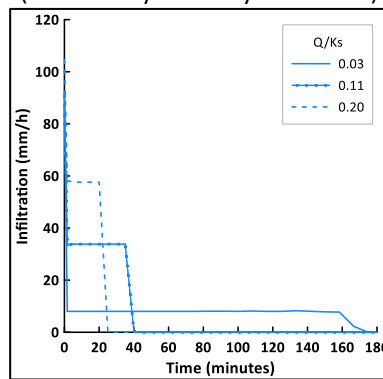


Diagram 5: Infiltration (Sand – W.T. 3m)

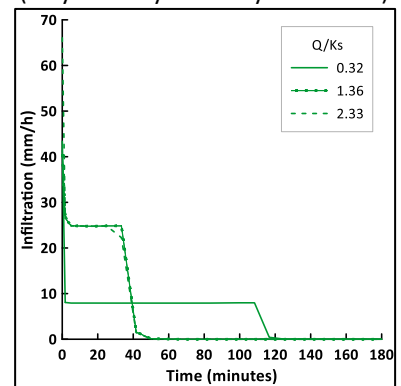


Diagram 6: Infiltration (Silt – W.T. 3m)

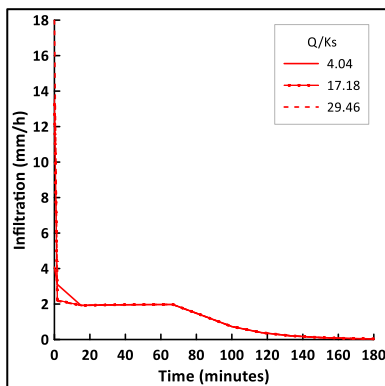


Diagram 7: Infiltration (Clay – W.T. 3m)

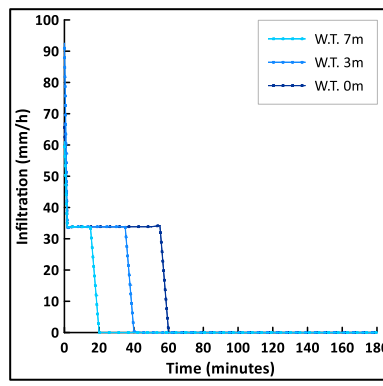


Diagram 8: Infiltration (Sand – Heavy Intensity – $Q/K_s=0.11$)

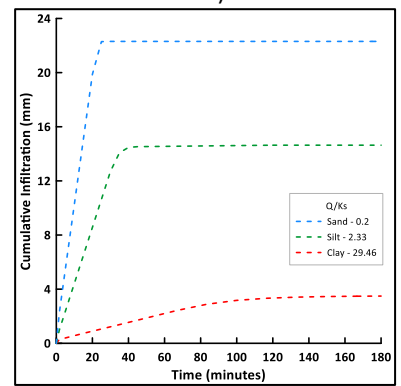


Diagram 9: Cumulative Infiltration (Violent Intensity – W.T. 3m)

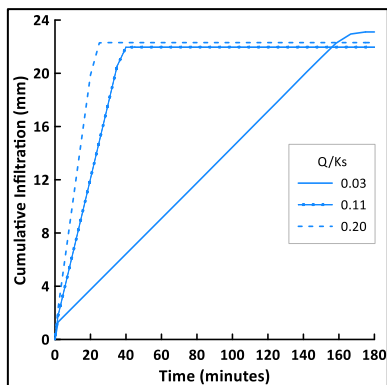


Diagram 10: Cumulative Infiltration (Sand – W.T. 3m)

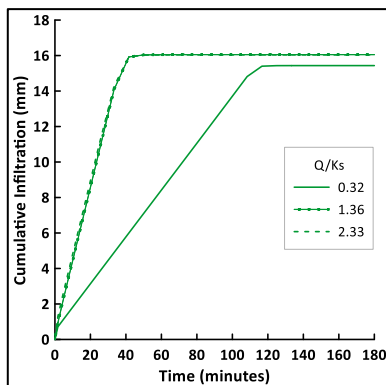


Diagram 11: Cumulative Infiltration (Silt – W.T. 3m)

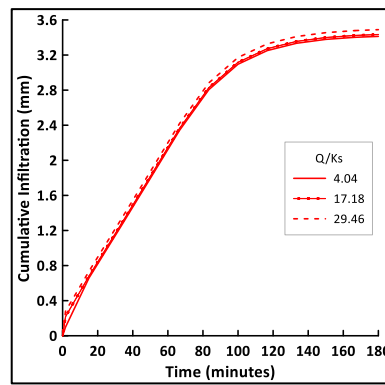


Diagram 12: Cumulative Infiltration (Clay – W.T. 3m)

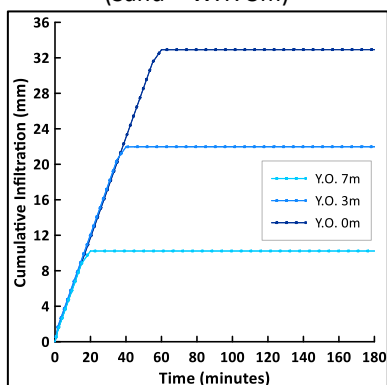


Diagram 13: Cumulative Infiltration (Sand – Heavy Intensity – Q/Ks=0.11)

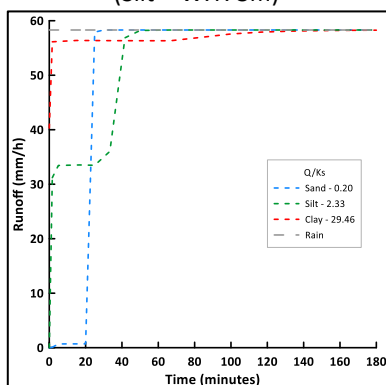


Diagram 14: Runoff (Violent Intensity – W.T. 3m)

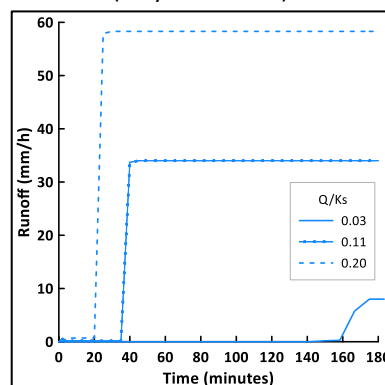


Diagram 15: Runoff (Sand – W.T. 3m)

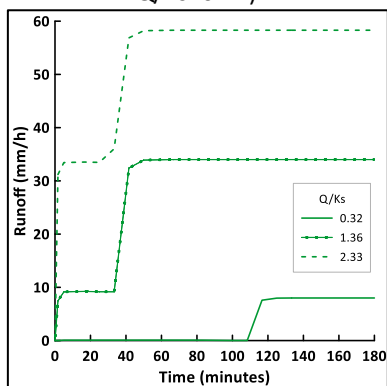


Diagram 16: Runoff (Silt – W.T. 3m)

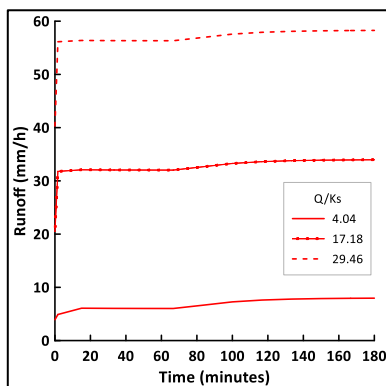


Diagram 17: Runoff (Clay – W.T. 3m)

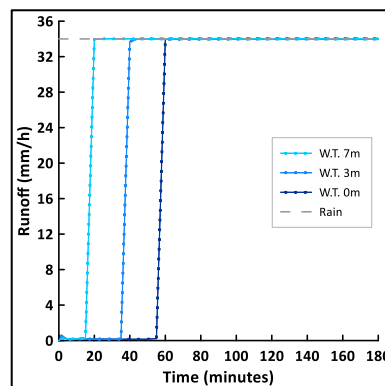


Diagram 18: Runoff (Sand – Heavy Intensity – Q/Ks=0.11)

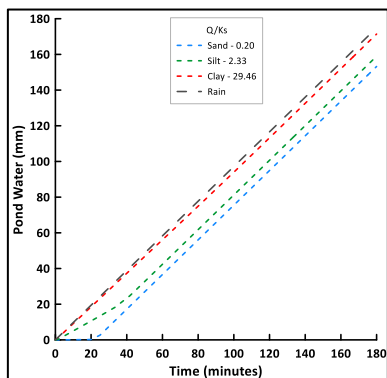


Diagram 19: Pond Water (Violent Intensity – W.T. 3m)

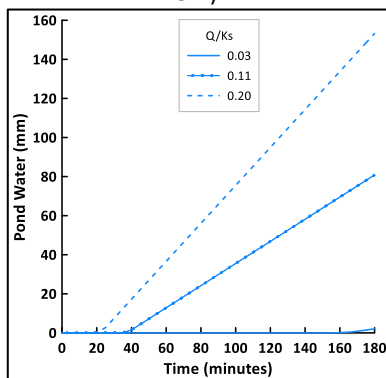


Diagram 20: Pond Water (Sand – W.T. 3m)

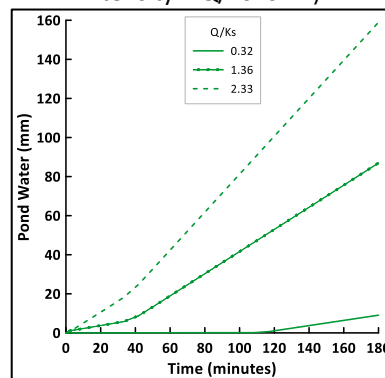


Diagram 21: Pond Water (Silt – W.T. 3m)

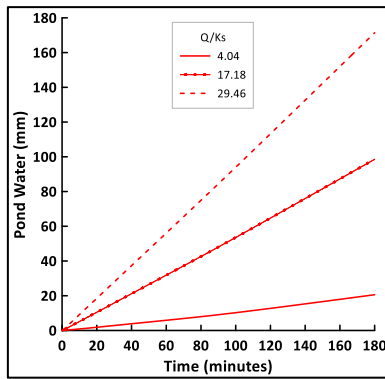


Diagram 22: Pond Water (Clay – W.T. 3m)

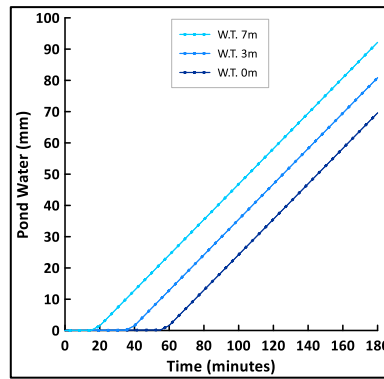


Diagram 23: Pond Water (Sand – Heavy Intensity – $Q/K_s=0.11$)

❖ Conclusion

The first phase of the evaluation focused on the infiltration rate at the onset of rainfall. At the beginning of this phenomenon, the infiltration rate shows a high value, called the initial infiltration rate. This value is higher for sand and lower for clay, with silt in between. The water then infiltrates at a rate that depends on the saturated hydraulic conductivity of the material and its relationship to the intensity of the rainfall. If the hydraulic conductivity is greater than the rainfall intensity, the water will infiltrate at a rate equal to the rainfall intensity, and if it is less, it will infiltrate at a rate equal to K_s . Rainfall intensity only affects the infiltration rate when the ratio $Q/K_s < 1$, as in the case of sand. In clay, on the other hand, rainfall intensity has no effect on the infiltration rate. The location of the water table affects the time taken for the pores to become saturated with water, with saturation occurring more quickly the closer the water table is to the surface.

The cumulative permeability, i.e. the total amount of water entering the soil up to full saturation, and its development over time were then examined. The soil material has a decisive influence on the final amount of water that the resources can hold. The more porous the material, the more water it can hold. Sand, being the most porous, can hold the most water, followed by silt and clay. The intensity of the rainfall does not affect the final amount of water infiltrated, but only its temporal evolution when the ratio $Q/K_s < 1$. For sand, the higher the rainfall intensity, the faster the total infiltrated water reaches its maximum value. For clay, on the other hand, the time evolution is the same for all rainfall conditions. Finally, the water table plays a dominant role in both the final amount of water and the time to full saturation. The lower the aquifer, the longer it takes to fill the resource with water.

The parameter of runoff rate was also studied. This rate depends less on the soil material than on its combination with the intensity of the rainfall, i.e. the ratio Q/K_s . When $Q/K_s < 1$, the runoff rate is 0 until the pores are filled with water. Then, the finer the soil, the faster the pores fill and the runoff rate increases. When $Q/K_s > 1$, the runoff rate is greater than 0 from the beginning of the precipitation. The final value of the runoff rate is the intensity

of the rainfall. The intensity of the rainfall is the main influence on the runoff rate. When $Q/K_s < 1$, it contributes both to the maximum value of the runoff rate and to the time taken to reach it. Rainfall intensity affects the magnitude of the runoff rate, as the more intense the rainfall, the greater the runoff rate during the entire rainfall event. Also, the more intense the rainfall, the faster the pores will fill, causing saturation to occur sooner and the runoff rate to reach its maximum value. Finally, the water table only affects time. The closer it is to the surface, the faster the runoff rate will increase to its maximum value as the space available for water in the pores decreases.

The final evaluation focused on ponding. It was found that soil material affects runoff, especially when the Q/K_s ratio is less than 1, as it determines the onset of surface ponding. For example, silt takes much less time to pond than sand. However, if the Q/K_s ratio is greater than 1, ponding will occur from the beginning of the rainfall, with the rate of increase depending on the composition of the material. In addition, the intensity of the rainfall has a significant effect on the amount of ponding water. In conditions where $Q/K_s < 1$, the more intense the rainfall, the sooner ponding water appears on the surface and the faster the rate of increase in the amount of ponding water. For conditions $Q/K_s > 1$, the heavier the rainfall, the faster the increase in ponding water height. Finally, the closer the water table is to the surface, the faster ponding water is formed.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 1.1 | Εισαγωγή | 1 |
| 1.2 | Στόχος εργασίας | 3 |
| 1.3 | Δομή εργασίας | 5 |
| 2 | ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΗΣ | 6 |
| 2.1 | Υδρολογικός Κύκλος | 6 |
| 2.2 | Διήθηση – Γενικά | 9 |
| 2.3 | Παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό διήθησης | 12 |
| 2.4 | Διαπερατότητα εδάφους και ρυθμός διήθησης | 16 |
| 2.5 | Απορροή και δημιουργία πλημμύρας | 18 |
| 3 | ΘΕΩΡΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ | 20 |
| 3.1 | Το κλίμα της Ελλάδας | 20 |
| 3.2 | Βροχή ορισμός | 21 |
| 3.3 | Βροχοπτώσεις στην Ελλάδα | 23 |
| 3.4 | Μέγιστα παγκόσμια ύψη βροχής | 26 |
| 3.5 | Ακραίες βροχοπτώσεις στην Ελλάδα | 27 |
| 3.6 | Κακοκαιρία Daniel | 28 |
| 3.7 | Κακοκαιρία Elias | 31 |
| 4 | ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ | 33 |
| 4.1 | Γεωμετρία Προσομοίωσης | 33 |
| 4.2 | Στοιχεία Ανάλυσης | 33 |
| 4.3 | Χαρακτηριστικά Εδαφών | 34 |
| 4.4 | Προσομοίωση Βροχής | 37 |
| 4.5 | Υδροφόρος ορίζοντας και Συνοριακές συνθήκες | 38 |
| 4.6 | Σενάρια προσομοιώσεων | 39 |
| 4.7 | Παράμετρος q/K_s | 40 |
| 5 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ | 41 |
| 5.1 | Εισαγωγή | 41 |
| 5.2 | Καμπύλες ρυθμού διήθησης & απορροής αναλύσεων | 41 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3 | Ρυθμός Διήθησης | 48 |
| 5.4 | Αθροιστική Διήθηση | 58 |
| 6 | ΕΞΕΛΙΞΗ ΛΙΜΝΑΖΟΝΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ | 67 |
| 6.1 | Εισαγωγή | 67 |
| 6.2 | Ρυθμός Απορροής | 68 |
| 6.3 | Λιμνάζον Νερό | 79 |
| 7 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 90 |
| 7.1 | Σύνοψη | 90 |
| 7.2 | Συμπεράσματα | 90 |
| 8 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 94 |
| 8.1 | Ξένη Βιβλιογραφία | 94 |
| 8.2 | Ελληνική Βιβλιογραφία | 94 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α | 96 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 2.1: Ο κύκλος του Νερού (Πηγή: plemenosem.wikispaces.com) | 8 |
| Εικόνα 2.2: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού (Μπαρδάνης, 2016) | 9 |
| Εικόνα 2.3: Ικανότητα διήθησης συναρτήσει του χρόνου για συνεχή επιβολή νερού | 10 |
| Εικόνα 2.4: Αθροιστική διηθητικότητα (Πηγή:soilphysics.okstate.edu)..... | 11 |
| Εικόνα 2.5: Μεταβολή του ρυθμού διήθησης με το χρόνο για τρεις διαφορετικούς τύπους εδαφών (Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999) | 14 |
| Εικόνα 2.6: Μεταβολή της αθροιστικής διήθησης με το χρόνο για τρεις διαφορετικούς τύπους εδαφών (Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999) | 15 |
| Εικόνα 2.7: Εδάφη που δεν καλύπτονται από κρούστα έχουν υψηλότερο ρυθμός διήθησης από εδάφη που καλύπτονται από κρούστα (Πηγή: echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1a/chapt_6/main.htm)..... | 15 |
| Εικόνα 2.8: Ρυθμός διήθησης ενός κορεσμένου και ενός ακόρεστου εδάφους (Πηγή: www.interpore.org)..... | 16 |
| Εικόνα 2.9: Ο τελικός ρυθμός διήθησης ισούται με την διαπερατότητα του εδάφους (Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999) | 17 |
| Εικόνα 2.11: Ρυθμός διήθησης και αθροιστική διήθηση για μια σταθερή βροχόπτωση και ερμηνεία του χρόνου βύθισης [Musy, 2001] (Πηγή:echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1a/chapt_6/main.htm)..... | 19 |
| Εικόνα 2.12: Τυπικό γράφημα των καμπυλών ρυθμού διήθησης και απορροής για σταθερή ένταση βροχής..... | 19 |
| Εικόνα 2.13: Διαδικασία ροής που παράγεται όταν αυτή υπερβαίνει την ικανότητα διείσδυσης του εδάφους να συγκρατεί το νερό και όταν αυτή πραγματοποιείται σε κορεσμένες επιφάνειες [Musy, 2001] (Πηγή:echo2.epfl.ch/VICAIRE/mod_1a/chapt_6/main.htm)..... | 20 |
| Εικόνα 3.1: Απεικόνιση των ετήσιων ύψων βροχής στην Ελλάδα | 25 |
| Εικόνα 3.2: Τα 8 μεγαλύτερα ύψη βροχόπτωσης έως το μεσημέρι της 05/09 κατά τη διάρκεια της κακοκαιρίας Daniel | 29 |
| Εικόνα 3.3: Ύψη βροχής (mm) της κακοκαιρίας Daniel | 30 |
| Εικόνα 3.4: Δεδομένα Μετεωρολογικού Σταθμού Ζαγοράς | 31 |
| Εικόνα 3.5: Αθροιστικά Ύψη Βροχής Κακοκαιρίας Elias εως 27/09/2023 | 32 |
| Εικόνα 3.6: Αθροιστικά Ύψη Βροχής Κακοκαιρίας Daniel & Elias..... | 32 |
| Εικόνα 4.1: Προσομοίωμα στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2 | 33 |
| Εικόνα 4.2: Τυπική καμπύλη υγρασίας βασισμένη στην εξίσωση (3.38) (van Genuchten, 1980)..... | 35 |
| Εικόνα 4.3: Καμπύλη της υδραυλικής αγωγιμότητας του τυπικού εδάφους ως προς α) την εδαφική υγρασία και β) το ύψος πίεσης. | 36 |
| Εικόνα 4.4: Συνοριακές συνθήκες στα στάδια προσομοίωσης του φαινομένου της βροχής | 38 |
| Εικόνα 4.5: Συνοριακές συνθήκες στην αρχική φάση | 39 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση Ταχύτητας Διήθησης κατά Νικολον, 1983..... | 11 |
| Πίνακας 2.2: Ποσοστά διήθησης για διαφορετικούς τύπους εδαφών (Πηγή:Shukla and Lal, 2006,..... | 14 |
| Πίνακας 3.1: Υψηλότερα Ύψη Βροχής Παγκοσμίως που έχουν καταγραφεί..... | 26 |
| Πίνακας 3.2: Ακραίες βροχοπτώσεις που καταγράφηκαν στην Ελλάδα το διάστημα 2020 - 2023 | 28 |
| Πίνακας 4.1: Παράμετροι της εξίσωσης του van Genuchten (Carsel & Parrish, 1988) | 36 |
| Πίνακας 4.2: Υλικά προσομοιώσεων μαζί με τις παραμέτρους τους απο Carsel & Parrish 1988 | 37 |
| Πίνακας 4.3: Εντάσεις Βροχής Αναλύσεων | 37 |
| Πίνακας 4.4: 27 συνδυασμοί διαφορετικού Υλικού, Έντασης Βροχής και ύψους Υδροφόρου Ορίζοντα | 39 |
| Πίνακας 4.5: Τιμές του λόγου Q/Ks..... | 40 |

Κατάλογος Διαγραμμάτων

| | |
|--|----|
| Διάγραμμα 1: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος –Ισχυρή Ένταση - Y.O. 0m) | 43 |
| Διάγραμμα 2: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Βίαη Ένταση - Y.O. 0m)..... | 43 |
| Διάγραμμα 3: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Μέτρια Ένταση - Y.O. 0m) | 43 |
| Διάγραμμα 4: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Ισχυρή Ένταση - Y.O. 0m)..... | 43 |
| Διάγραμμα 5: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς -Βίαη Ένταση - Y.O. 0m) | 43 |
| Διάγραμμα 6: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Μέτρια Ένταση - Y.O. 0m)..... | 43 |
| Διάγραμμα 7: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Ισχυρή Ένταση - Y.O. 0m)..... | 44 |
| Διάγραμμα 8: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Βίαη Ένταση - Y.O. 0m) | 44 |
| Διάγραμμα 9: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος -Μέτρια Ένταση - Y.O. 3m) | 44 |
| Διάγραμμα 10: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος –Ισχυρή Ένταση - Y.O. 3m) | 44 |
| Διάγραμμα 11: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Βίαη Ένταση - Y.O. 3m)..... | 44 |
| Διάγραμμα 12: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Μέτρια Ένταση - Y.O. 3m) | 44 |
| Διάγραμμα 13: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Ισχυρή Ένταση - Y.O. 3m)..... | 45 |
| Διάγραμμα 14: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς -Βίαη Ένταση - Y.O. 3m) | 45 |
| Διάγραμμα 15: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Μέτρια Ένταση - Y.O. 3m)..... | 45 |
| Διάγραμμα 16: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Ισχυρή Ένταση - Y.O. 3m)..... | 45 |
| Διάγραμμα 17: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής Άργιλος - Βίαη Ένταση - Y.O. 3m)..... | 45 |
| Διάγραμμα 18: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Μέτρια Ένταση - Y.O. 7m) | 46 |
| Διάγραμμα 19: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος – Ισχυρή Ένταση - Y.O. 7m) | 46 |
| Διάγραμμα 20: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Βίαη Ένταση - Y.O. 7m)..... | 46 |
| Διάγραμμα 21: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Μέτρια Ένταση - Y.O. 7m) | 46 |
| Διάγραμμα 22: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Ισχυρή Ένταση - Y.O. 7m)..... | 46 |
| Διάγραμμα 23: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς -Βίαη Ένταση - Y.O. 7m) | 46 |
| Διάγραμμα 24: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Μέτρια Ένταση - Y.O. 7m)..... | 47 |
| Διάγραμμα 25: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Ισχυρή Ένταση - Y.O. 7m)..... | 47 |
| Διάγραμμα 26: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής Άργιλος - Βίαη Ένταση - Y.O. 7m)..... | 47 |
| Διάγραμμα 27: Ρυθμός Διήθησης (Μέτρια ένταση βροχή - Y.O. 3m) | 51 |
| Διάγραμμα 28: Ρυθμός Διήθησης (Ισχυρή ένταση βροχή - Y.O. 3m)..... | 51 |
| Διάγραμμα 29: Ρυθμός Διήθησης (Βίαη ένταση βροχή - Y.O. 3m) | 52 |
| Διάγραμμα 30: Ρυθμός Διήθησης (Άμμος - Y.O. 3m) | 52 |
| Διάγραμμα 31: Ρυθμός Διήθησης (Ιλύς - Y.O. 3m) | 53 |
| Διάγραμμα 32: Ρυθμός Διήθησης (Άργιλος - Y.O. 3m)..... | 53 |
| Διάγραμμα 33: Ρυθμός Διήθησης (Άμμος - μέτρια ένταση βροχή - $Q/K_s=0.03$) | 54 |
| Διάγραμμα 34: Ρυθμός Διήθησης (Άμμος - ισχυρή ένταση βροχή - $Q/K_s=0.11$) | 54 |
| Διάγραμμα 35: Ρυθμός Διήθησης (Άμμος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/K_s=0.20$)..... | 55 |
| Διάγραμμα 36: Ρυθμός Διήθησης (Ιλύς - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/K_s=0.32$) | 55 |
| Διάγραμμα 37: Ρυθμός Διήθησης (Ιλύς - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/K_s=1.36$) | 56 |
| Διάγραμμα 38: Ρυθμός Διήθησης (Ιλύς - Βίαη ένταση βροχή - $Q/K_s=2.33$) | 56 |
| Διάγραμμα 39: Ρυθμός Διήθησης (Άργιλος - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/K_s=4.04$)..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Διάγραμμα 40: Ρυθμός Διήθησης (Άργιλος - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=17.18$)..... | 57 |
| Διάγραμμα 41: Ρυθμός Διήθησης (Άργιλος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=29.46$) | 58 |
| Διάγραμμα 42: Αθροιστική Διήθηση (Μέτρια ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)..... | 60 |
| Διάγραμμα 43: Αθροιστική Διήθηση (Ισχυρή ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)..... | 60 |
| Διάγραμμα 44: Αθροιστική Διήθηση (Βίαη ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)..... | 61 |
| Διάγραμμα 45: Αθροιστική Διήθηση (Άμμος - Υ.Ο. 3m)..... | 61 |
| Διάγραμμα 46: Αθροιστική Διήθηση (Ιλύς - Υ.Ο. 3m)..... | 62 |
| Διάγραμμα 47: Αθροιστική Διήθηση (Άργιλος - Υ.Ο. 3m)..... | 62 |
| Διάγραμμα 48: Αθροιστική Διήθηση (Άμμος - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/Ks=0.03$) | 63 |
| Διάγραμμα 49: Αθροιστική Διήθηση (Άμμος - ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=0.11$)..... | 63 |
| Διάγραμμα 50: Αθροιστική Διήθηση (Άμμος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=0.20$) | 64 |
| Διάγραμμα 51: Αθροιστική Διήθηση (Ιλύς - μέτρια ένταση βροχή - $Q/Ks=0.32$)..... | 64 |
| Διάγραμμα 52: Αθροιστική Διήθηση (Ιλύς - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=1,36$)..... | 65 |
| Διάγραμμα 53: Αθροιστική Διήθηση (Ιλύς - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=2.33$)..... | 65 |
| Διάγραμμα 54: Αθροιστική Διήθηση (Άργιλος - μέτρια ένταση βροχή - $Q/Ks=4.04$)..... | 66 |
| Διάγραμμα 55: Αθροιστική Διήθηση (Άργιλος - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=17.18$) | 66 |
| Διάγραμμα 56: Αθροιστική Διήθηση (Άργιλος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=29.46$)..... | 67 |
| Διάγραμμα 57: Ρυθμός Απορροής (Μέτρια ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m) | 71 |
| Διάγραμμα 58: Ρυθμός Απορροής (Ισχυρή ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m) | 71 |
| Διάγραμμα 59: Ρυθμός Απορροής (Βίαη ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)..... | 72 |
| Διάγραμμα 60: Ρυθμός Απορροής (Άμμος - Υ.Ο. 3m) | 72 |
| Διάγραμμα 61: Ρυθμός Απορροής (Ιλύς - Υ.Ο. 3m) | 73 |
| Διάγραμμα 62: Ρυθμός Απορροής (Άργιλος - Υ.Ο. 3m) | 73 |
| Διάγραμμα 63: Ρυθμός Απορροής (Άμμος - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/Ks=0.11$) | 74 |
| Διάγραμμα 64: Ρυθμός Απορροής (Άμμος - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=0.11$) | 74 |
| Διάγραμμα 65: Ρυθμός Απορροής (Άμμος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=0.20$)..... | 75 |
| Διάγραμμα 66: Ρυθμός Απορροής (Ιλύς - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/Ks=0.32$) | 75 |
| Διάγραμμα 67: Ρυθμός Απορροής (Ιλύς - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=1.36$) | 76 |
| Διάγραμμα 68: Ρυθμός Απορροής (Ιλύς - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=2.33$)..... | 76 |
| Διάγραμμα 69: Ρυθμός Απορροής (Άργιλος - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/Ks=4.04$)..... | 77 |
| Διάγραμμα 70: Ρυθμός Απορροής (Άργιλος - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=17.18$)..... | 77 |
| Διάγραμμα 71: Ρυθμός Απορροής (Άργιλος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=29.46$) | 78 |
| Διάγραμμα 72: Λιμνάζον Νερό (Μέτρια ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)..... | 82 |
| Διάγραμμα 73: Λιμνάζον Νερό (Ισχυρή ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)..... | 82 |
| Διάγραμμα 74: Λιμνάζον Νερό (Βίαη ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)..... | 83 |
| Διάγραμμα 75: Λιμνάζον Νερό (Άμμος - Υ.Ο. 3m)..... | 83 |
| Διάγραμμα 76: Λιμνάζον Νερό (Ιλύς - Υ.Ο. 3m)..... | 84 |
| Διάγραμμα 77: Λιμνάζον Νερό (Άργιλος - Υ.Ο. 3m)..... | 84 |
| Διάγραμμα 78: Λιμνάζον Νερό (Άμμος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=0.20$)..... | 85 |
| Διάγραμμα 79: Λιμνάζον Νερό (Άμμος - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=0.11$) | 85 |
| Διάγραμμα 80: Λιμνάζον Νερό (Άμμος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=0.20$)..... | 86 |

| | |
|---|----|
| Διάγραμμα 81: Λιμνάζον Νερό (Ιλύς – Μέτρια ένταση βροχή – $Q/K_s=0.32$) | 86 |
| Διάγραμμα 82: Λιμνάζον Νερό (Ιλύς – Ισχυρή ένταση βροχή – $Q/K_s=1.36$) | 87 |
| Διάγραμμα 83: Λιμνάζον Νερό (Ιλύς – Βίαιη ένταση βροχή – $Q/K_s=2.33$)..... | 87 |
| Διάγραμμα 84: Λιμνάζον Νερό (Άργιλος – Μέτρια ένταση βροχή – $Q/K_s=4.04$) | 88 |
| Διάγραμμα 85: Λιμνάζον Νερό (Άργιλος – Ισχυρή ένταση βροχή – $Q/K_s=17.18$)..... | 88 |
| Διάγραμμα 86: Λιμνάζον Νερό (Άργιλος – Βίαιη ένταση βροχή – $Q/K_s=29.46$) | 89 |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Οι σύγχρονες κοινωνίες βρίσκονται αντιμέτωπες με μια ολοένα και επιδεινούμενη κλιματική κρίση, η οποία έχει σοβαρές επιπτώσεις σε παγκόσμιο επίπεδο. Μία από τις κύριες συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι η αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι ακραίες βροχοπτώσεις. Η Ελλάδα είναι μία περιοχή επηρεασμένη δραματικά από αυτές τις αλλαγές και έχει βιώσει αυξημένη συχνότητα πλημμυρών και καταστροφών σε αγροτικές και αστικές περιοχές.

Πρόσφατο σημαντικό συμβάν που έλαβε χώρα στον ελλαδικό χώρο είναι οι 2 διαδοχικές κακοκαιρίες με τα ονόματα Daniel και Elias που έπληξαν περιοχές της ανατολικής Μεσογείου. Οι εντάσεις των βροχοπτώσεων και οι διάρκειές τους ήταν πρωτόγνωρες για τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής. Η εξέλιξη της κακοκαιρίας ήταν υπό την παρακολούθηση επιστημόνων από διάφορες χώρες της Ευρώπης με τις προβλέψεις να δείχνουν πολύ επικίνδυνα φαινόμενα τα οποία δεν μπορούσαν να θεωρηθούν ρεαλιστικά με τα υπάρχοντα δεδομένα.

Οι χώρες που επλήγησαν ήταν αρχικά η Ελλάδα η Βουλγαρία και η Τουρκία ενώ στη συνέχεια η κακοκαιρία Daniel κατευθύνθηκε προς την Λιβύη. Η Λιβύη ήταν η πιο πληγείσα περιοχή καθώς αρίθμησε 11.500 καταγεγραμμένους θανάτους ενώ οι αγνοούμενοι παραμένουν να είναι 10.000. Οι ακραίες βροχοπτώσεις μεγάλης διάρκειας οδήγησαν στη θραύση 2 φραγμάτων στην περιοχή Δάρνη με αποτέλεσμα να εξαφανιστεί το 25% τη πόλης. Οι ζημιές στην Λιβύη από την κακοκαιρία υπολογίστηκαν στα 19 δισεκατομμύρια δολάρια. Η Ελλάδα ως δεύτερη πιο πληγείσα από την κακοκαιρία περιοχή καταγράφει 17 νεκρούς.

Η κακοκαιρία ξεκίνησε από το Ιόνιο πέλαγος και το επίκεντρο ήταν η Θεσσαλία και οι γύρω περιοχές. Στις ορεινές περιοχές καταγράφηκαν κατολισθήσεις από τις μεγάλες ποσότητες νερού με αποτέλεσμα να αποκοπούν ολόκληρα χωριά από το οδικό δίκτυο και να μην υπάρχει δυνατότητα παροχή βοήθειας. Στις πεδινές περιοχές όπως ο κάμπος της Θεσσαλίας αναπτύχθηκαν πλημμύρες μεγάλου εύρους καταστρέφοντας το μεγαλύτερο ποσοστό καλλιεργειών στην περιοχή και βυθίζοντας ολόκληρα χωριά κάτω από το νερό. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με την υπηρεσία FloodHub του Κέντρου Επιστημών Παρατήρησης της Γης και Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης BEYOND, μόνο στην ευρύτερη περιοχή της Καρδίτσας, οι πλημμυρισμένες εκτάσεις ανέρχονται σε 870.000 στρέμματα, η πλειοψηφία των οποίων είναι αγροτικές εκτάσεις (περίπου 90%). Οι υλικές ζημιές σύμφωνα με εκτιμήσεις ξεπερνούν τα 2 δισεκατομμύρια δολάρια.

Όπως είναι αντιληπτό τα έντονα καιρικά φαινόμενα και συγκεκριμένα οι ακραίες βροχοπτώσεις είναι δεδομένα στην περίοδο της κλιματικής κρίσης. Τα προβλήματα

που επιφέρουν εκτείνονται από κοινωνικά, οικονομικά έως και περιβαλλοντολογικά. Το παραπάνω δύο φαινόμενα είναι ενδεικτικά της επίδρασης και των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν. Η συστηματική ανάλυση και διεπιστημονική διερεύνηση τέτοιων φαινομένων είναι επιτακτική ανάγκη καθώς θα βοηθήσει στην κατάλληλη αντιμετώπιση και πρόληψη.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην διερεύνηση της ανάπτυξης πλημμυρικών φαινομένων λόγω βροχοπτώσεων με έναν έμμεσο τρόπο που δίνει έμφαση στον κορεσμό του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα, ορμώμενοι από τις πλημμύρες στο Θεσσαλικό κάμπο διερευνώνται τα πλημμυρικά φαινόμενα τα οποία οφείλονται στην ικανότητα του εδάφους να απορροφήσει το νερό από ακραίες εντάσεις βροχής. Το εδαφικό υλικό είναι ο κύριος παράγοντας που διερευνάται και η επίδραση του σε εντάσεις βροχής που αντιστοιχούν σε αυτές των κακοκαιριών Daniel και Elias.

Για την κάλυψη ενός μεγάλου εύρους εδαφικών υλικών που συναντάται σε πεδινές περιοχές επιλέγεται τρία χαρακτηριστικά εδαφικά υλικά, μία τυπική άμμος, μία τυπική ιλύς και μία τυπική άργιλος ως βάση για τις αναλύσεις. Για τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υλικών χρησιμοποιούνται οι τιμές που έχουν αποδώσει οι Carsel and Parrish (1988) καθώς το υδραυλικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της ακόρεστης ζώνης των εδαφικών υλικών είναι το Van Genuchten (1978, 1980). Στη συνέχεια αντλούνται δεδομένα από ακραία καιρικά φαινόμενα που έλαβαν χώρα την χρονική περίοδο 2020 – 2023. Σημαντικές πληροφορίες για τα φαινόμενα ήταν κατά την έξαρση τους η διάρκεια και η ποσότητα του νερού. Έτσι, υπολογίστηκε η ένταση που αντιστοιχεί στο κάθε φαινόμενο και ταξινομήθηκαν. Οι εντάσεις βροχής διακρίνονται σε 4 κατηγορίες ασθενής, μέτρια, ισχυρή και βίαιη. Οι ακραίες βροχοπτώσεις αναφέρονται στις 2 τελευταίες κατηγορίες με την κακοκαιρία Elias να αντιστοιχεί σε βροχή ισχυρής έντασης και την κακοκαιρία Daniel να αντιστοιχεί σε βροχή βίαιης έντασης.

Για την εμβάθυνση των αναλύσεων και την σύγκριση περισσότερων αποτελεσμάτων επιλέγονται 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής μία μέτρια που αντιστοιχεί σε συνηθισμένη βροχόπτωση, μία ισχυρή που αντιστοιχεί σε κακοκαιρία τύπου Elias και μία βίαιη που αντιστοιχεί σε κακοκαιρία τύπου Daniel. Με την συμπερίληψη τριών διαφορετικών εντάσεων βροχόπτωσης στις αναλύσεις διερευνάται και η επίδραση τους στην ανάπτυξη πλημμυρών σε συγκεκριμένους τύπους εδαφών. Ακόμα μία σημαντική παράμετρος που συμβάλει στην ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων και επιλέγεται να διερευνηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι η θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Ο υδροφόρος ορίζοντας συμβάλει καθώς λειτουργεί ως μια αδιαπέραστη ζώνη στο έδαφος αφού οι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι με νερό.

Για τις αναλύσεις επιλέγεται γεωμετρία προσομοιώματος που αντιστοιχεί σε μονοδιάστατες συνθήκες όπως είναι και το πρόβλημα. Το προσομοίωμα έχει ύψος

10m και πλάτος 1m. Ο υδροφόρος ορίζοντας επιλέγεται να οριστεί σε 3 διαφορετικά ύψη, στη βάση του προσομοιώματος δηλαδή στα 0m, στα 3m και στα 7m από την βάση. Με αυτό τον τρόπο θα διερευνηθεί η επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα στην ανάπτυξη των πλημμυρικών φαινομένων σε ακραίες βροχοπτώσεις. Για τις προσομοιώσεις επιλέγεται το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2 της Rocscience και πραγματοποιούνται seepage αναλύσεις. Από την διεξαγωγή των αναλύσεων το λογισμικό υπολογίζει το ρυθμό με τον οποίο το νερό εισέρχεται στο έδαφος, τον ρυθμό διήθησης. Με τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων υπολογίζεται η συνολική ποσότητα νερού που διηθείται, η αθροιστική διήθηση. Επίσης υπολογίζεται ο ρυθμός του με τον οποίο το νερό παραμένει στην επιφάνεια και δεν εισέρχεται στο εσωτερικό του εδάφους, ο ρυθμός απορροής. Τέλος, μέσω του ρυθμού απορροής υπολογίζεται το ύψος του πλημμυρισμένου νερού, το λιμνάζον νερό που βασική παράμετρος αξιολόγησης. Συνολικά έχουν διεξαχθεί 27 αναλύσεις για την όσο το δυνατόν ευρύτερη και συστηματική κάλυψη ενός αντιπροσωπευτικού εύρους στο πλαίσιο της εργασίας.

1.2 Στόχος εργασίας

Η κλιματική κρίση και η πρόκληση ακραίων καιρικών φαινομένων έχει δημιουργήσει την ανάγκη της ερευνητικής κοινότητας να συνδράμει στην παρακολούθησή της και την αντιμετώπισή της. Οι ακραίες βροχοπτώσεις αυξάνονται τόσο σε πλήθος όσο και σε διάρκεια σε περιοχές ασυνήθιστες σε τέτοια φαινόμενα, όπως είναι και η Ελλάδα. Οι διαδοχικές κακοκαιρίες που έλαβαν χώρα τον Σεπτέμβριο του 2023 με τις ονομασίες Daniel και Elias πυροδότησαν το ενδιαφέρον της ελληνικής επιστημονικής κοινότητας για την διερεύνησή τους. Τα ερωτήματα που δημιουργήθηκαν μετά τις καταστροφικές πλημμύρες είναι πολλά. Το κυριότερο από αυτά είναι κατά πόσο θα μπορούσε να προβλεφθεί κάτι τέτοιο νωρίτερα. Το κομμάτι της έντασης της βροχής καλύπτεται από συγκεκριμένους επιστημονικούς τομείς όπως είναι η μετεωρολογία. Όσον αφορά την πλημμύρα που προκαλείται κατά τη διάρκεια του φαινομένου είναι θέμα που απασχολεί τον ευρύτερο τομέα του μηχανικού (πολιτικού, υδραυλικού, γεωτεχνικού).

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως απώτερο σκοπό την διερεύνηση του φαινομένου της πλημμύρας από ακραίες βροχοπτώσεις. Το συγκεκριμένο πρόβλημα προσεγγίζεται από μηχανικής πλευράς και στοχεύει σε πλημμύρες που δημιουργούνται ακαριαία και οφείλονται στα χαρακτηριστικά του υπεδάφους και όχι τόσο στα υδραυλικά χαρακτηριστικά της περιοχής (λεκάνες απορροής, κλίσης εδάφους, ποτάμια, κλπ). Πραγματοποιώντας παραμετρικές αναλύσεις για 3 διαφορετικούς τύπους εδάφους, άμμο, ιλύ και άργιλο αξιολογείται η επίδραση τους στη δημιουργία πλημμύρας κάτω από ακραίες βροχοπτώσεις, δηλαδή πως αναπτύσσεται το πλημμυρικό φαινόμενο στην κάθε περίπτωση. Η γνώση της

επιρροής του εδαφικού υλικού στην πλημμυρογένεση μπορεί να συμβάλει σε μελλοντικά μοντέλα πρόβλεψης κινδύνου.

Επίσης στην συγκριμένη διπλωματική εργασία διερευνάται και η επιρροή διαφορετικών εντάσεων βροχόπτωσης στην ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων. Στόχος να ερευνηθεί κατά πόσο συμβάλει σε κάθε τύπο εδάφους η ένταση της βροχόπτωσης στην δημιουργία λιμνάζοντος νερού και εμμέσως στην πρόκληση πλημμύρας. Ακόμα ένας παράγοντας που διερευνάται είναι η θέση του υδροφόρου ορίζοντα και πως αυτός συμβάλει. Οι παραμετρικές αναλύσεις διεξάγονται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2 της Rocscience και είναι στο σύνολο 27. Μέσω αυτόν των αναλύσεων αξιολογούνται και άλλες παράμετροι που σχετίζονται με την πλημμύρα, που χαρακτηρίζεται στην παρούσα εργασία από το λιμνάζον νερό που σχηματίζεται στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτές οι παράμετροι που αξιολογούνται με στόχο την εμβάθυνση του προβλήματος είναι ο ρυθμός διήθησης του νερού στο έδαφος, η αθροιστική διήθηση δηλαδή η ποσότητα νερού που διηθείται και ο ρυθμός απορροής. Συνδυάζοντας 3 διαφορετικούς παράγοντες που συμβάλουν στην ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων και αξιολογώντας 4 διαφορετικές παραμέτρους για την διερεύνηση του προβλήματος η παρούσα διπλωματική αποτελεί μία βάση για περαιτέρω έρευνα στον συγκεκριμένο τομέα.

1.3 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα εξής επτά κεφάλαια:

1. **ΕΙΣΑΓΩΓΗ:** Παρουσιάζει την κοινή βάση για την έρευνα, δηλώνοντας το θέμα της εργασίας και τη σημασία της σε ευρύτερο πλαίσιο. Στο τέλος της εισαγωγής, καθορίζονται οι στόχοι της έρευνας και παρουσιάζεται η δομή της εργασίας.
2. **ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΗΣ:** Αναλύει τις θεωρητικές βάσεις που αφορούν τη διήθηση και την απορροή του νερού στα εδάφη, περιλαμβανομένων του υδρολογικού κύκλου και των παραγόντων που επηρεάζουν τη διήθηση και την απορροή.
3. **ΘΕΩΡΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ:** Παρουσιάζει τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν στην Ελλάδα και επικεντρώνεται στις ακραίες βροχοπτώσεις που έχουν λάβει χώρα τα τελευταία χρόνια.
4. **ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΕΩΝ:** Αναλύει τη διαδικασία σχεδιασμού και υλοποίησης των προσομοιώσεων, περιλαμβάνοντας τα εργαλεία και τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση του φαινομένου.
5. **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ:** Περιλαμβάνει τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. Αναλύονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες διήθησης και απορροής της κάθε ανάλυσης, ενώ εξετάζεται ο ρυθμός διήθησης και η αθροιστική διήθηση αξιολογώντας την επιρροή του τύπου του εδάφους, την ένταση της βροχής και τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα σε αυτούς.
6. **ΕΞΕΛΙΞΗ ΛΙΜΝΑΖΟΝΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ:** Περιλαμβάνει την αξιολόγηση του ρυθμού διήθησης και του λιμνάζοντος νερού, ως άμεσες παραμέτρους των πλημμυρικών φαινομένων. Αξιολογείται η επιρροή του τύπου του εδάφους, της έντασης της βροχής και της θέσης του υδροφόρου ορίζοντα στην ανάπτυξη πλημμύρας.
7. **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:** Αναλύει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα.
8. **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ:** Παραθέτει όλες τις πηγές και τα έγγραφα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας.

2 ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΗΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

2.1 Υδρολογικός Κύκλος

Το νερό είναι θεμελιώδες στοιχείο της ζωής και η παρουσία του συνδέεται άμεσα με την επιβίωση και την ανάπτυξη των οργανισμών, των ανθρώπων και των κοινωνιών. Η κίνηση του νερού είναι μια μόνιμη και ταχεία διαδικασία που περιλαμβάνει πολυάριθμες διεργασίες που κυκλοφορούν το νερό μεταξύ της υδρόσφαιρας, της ατμόσφαιρας, της ξηράς και της θάλασσας. Η κίνηση αυτή είναι γνωστή ως υδρολογικός κύκλος. Στο πλαίσιο αυτού του κύκλου, το νερό υπάρχει σε όλες τις μορφές: υγρό, αέριο (ατμός) και στερεό (χιόνι, χαλάζι). Η κινητήρια δύναμη πίσω από όλη αυτή τη διαδικασία είναι ο ήλιος.

Φτάνοντας στην επιφάνεια μέσω κατακρημνησμάτων, το μετεωρικό νερό εισέρχεται στο υδρογραφικό δίκτυο και ρέει μέσω ποταμών σε λίμνες και ωκεανούς. Ένα μέρος του βυθίζεται στο έδαφος, αλλά το μεγαλύτερο μέρος του εξατμίζεται από την επιφάνεια των υδάτινων σωμάτων (ποτάμια, λίμνες και ωκεανοί) και μέσω της διαπνοής των φυτών, επιστρέφει στην ατμόσφαιρα και ακολουθεί ξανά την ίδια διαδικασία (Παυλίδης, 2007). Τέλος, το επιφανειακό νερό που διηθείται στα ανώτερα στρώματα του φλοιού της γης αποτελεί το υπόγειο νερό, το οποίο επιστρέφει σχετικά γρήγορα στην επιφάνεια μέσω της άντλησης από πηγές και διάφορες τεχνητές εγκαταστάσεις όπως γεωτρήσεις, πηγάδια και άλλες εγκαταστάσεις αποθήκευσης νερού.

Το σύνολο αυτό των διεργασιών της κυκλοφορίας και κατανομής του νερού στην ατμόσφαιρα και τη γη, είναι δυνατό να εκφραστεί ποσοτικά με την παρακάτω σχέση:

$$P = F + R + E$$

όπου:

P= τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (precipitation)

F= η διήθηση (infiltration)

R= η επιφανειακή απορροή (runoff)

E= η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (evaporation)

Η εξίσωση αυτή αποτελεί μια προσέγγιση του υδρολογικού ισοζυγίου που είναι χαρακτηριστικό για κάθε περιοχή και καθορίζει την υδατική οικονομία της περιοχής. Τα στοιχεία αυτής της εξίσωσης, που ονομάζονται επίσης στάδια του υδρολογικού ισοζυγίου, μπορούν να εκφραστούν σε ύψος νερού βροχής (mm), όγκο νερού (m³)

και σε ποσοστιαία συμμετοχή (%). (Σούλιος, 1986,1996). Αναλυτικότερα οι φάσεις του υδρολογικού ισοζυγίου είναι οι εξής:

Κατακρημνίσματα (P) είναι το σύνολο του μετεωρικού νερού που φθάνει στην επιφάνεια της γης με οποιαδήποτε μορφή (βροχή, χαλάζι, χιόνι, δροσιά κτλ). Μέσα στα κατακρημνίσματα υπερέχει συντριπτικά η βροχή, με ποσοστά 80% (Σούλιος,1986,1996).

Η εξάτμιση είναι η διαδικασία κατά την οποία το νερό μεταφέρεται από την επιφάνεια της γης στην ατμόσφαιρα με τη μορφή υδρατμών ενώ παράλληλα καταναλώνεται ηλιακή ενέργεια που είναι απαραίτητη για τη μετατροπή του νερού από υγρή φάση σε αέρια. Η διαπνοή αναφέρεται στη διαδικασία με την οποία το νερό μετατρέπεται από υγρό σε αέριο μέσα σε ένα φυτικό σώμα.

Η εξατμισοδιαπνοή αντιπροσωπεύει την ποσότητα νερού που επιστρέφει στην ατμόσφαιρα από το συνδυασμό της εξάτμισης και της διαπνοής. Η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία του εδάφους και του αέρα, η υγρασία του εδάφους και του αέρα, η ταχύτητα του ανέμου, η ατμοσφαιρική πίεση, η ηλιακή ακτινοβολία, ο τύπος της βλάστησης και το πορώδες. Η εξατμισοδιαπνοή σε περιοχές με πυκνή βλάστηση και η εξάτμιση από ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες είναι ένα από τα λιγότερο κατανοητά στοιχεία του υδρολογικού κύκλου και παραμένει δύσκολο να προβλεφθεί (Τσακίρης, 1995). Υπάρχει ένας αριθμός εμπειρικών εξισώσεων για τον υπολογισμό της πραγματικής και της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (π.χ. Turc, Coutagne, Thornthwaite).

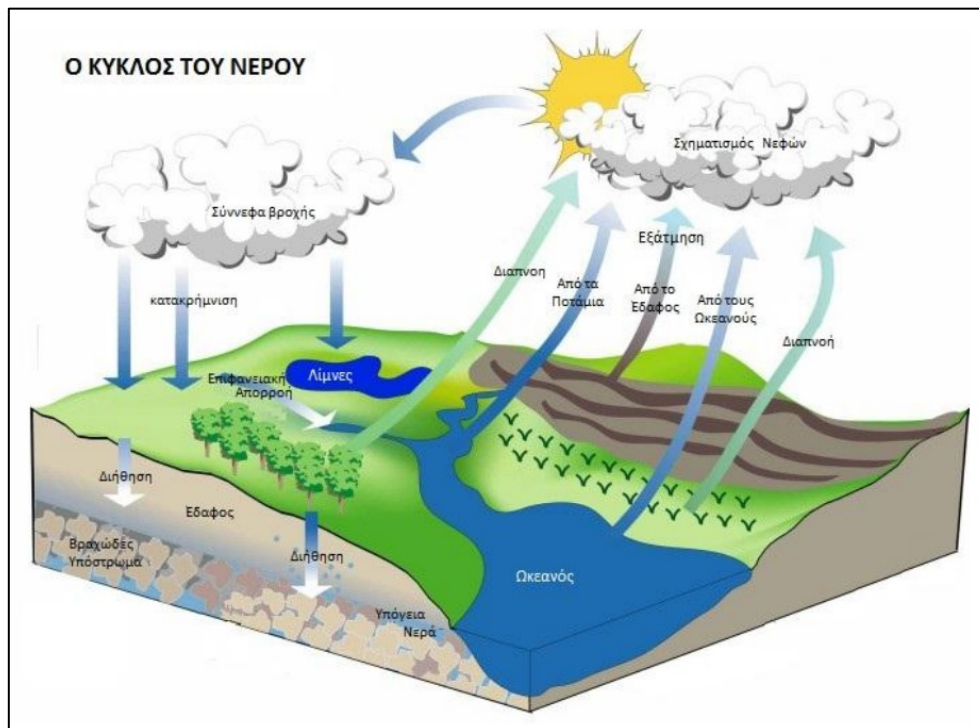
Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (ΔΕ) είναι η κρίσιμη τιμή που μπορεί να φθάσει η εξατμισοδιαπνοή, εάν η προσφορά νερού καλύπτει συνεχώς τις απώλειες λόγω εξάτμισης και διαπνοής κατά τη διάρκεια του υδρολογικού έτους (Σούλιος, 1986, 1996). Στην πραγματικότητα, είναι ένας κλιματικός δείκτης που αντιπροσωπεύει τις θερμοκρασιακές συνθήκες και την οριακή τιμή που μπορεί να φτάσει η πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπό συνθήκες τεχνητής υδροδότησης.

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (ΕΠ) είναι η ποσότητα εξατμισοδιαπνοής που συμβαίνει υπό τις τρέχουσες κλιματικές συνθήκες και τις συνθήκες παροχής νερού. Είναι το πραγματικό μέγεθος της εξατμισοδιαπνοής και είναι σημαντικό στις μελέτες υδρολογικού ισοζυγίου. Σε πολλές ημίξηρες περιοχές της Ελλάδας, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι 70-85% της ετήσιας βροχόπτωσης, ενώ σε ορεινές περιοχές είναι 35-55% (Βουδούρης, 2009). Υπολογίζεται επίσης ότι το 1/3 του νερού στις ξηρές περιοχές χάνεται στην ατμόσφαιρα μέσω των διαδικασιών διαπνοής των φυτών (Παυλίδης, 2007).

Η διήθηση (F) αναφέρεται στη μετακίνηση του μέρους εκείνου του κατακρημνίσματος που διηθείται μέσω της επιφάνειας του εδάφους στον υπόγειο

υδροφορέα και συμμετέχει στην κίνηση του υπόγειου νερού (Σούλιος, 1986, 1996). Πρόκειται για τον σημαντικότερο παράγοντα για την υδραυλική οικονομία της περιοχής, καθώς συμβάλλει στην αναπλήρωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων (Βουδούρης, 2009).

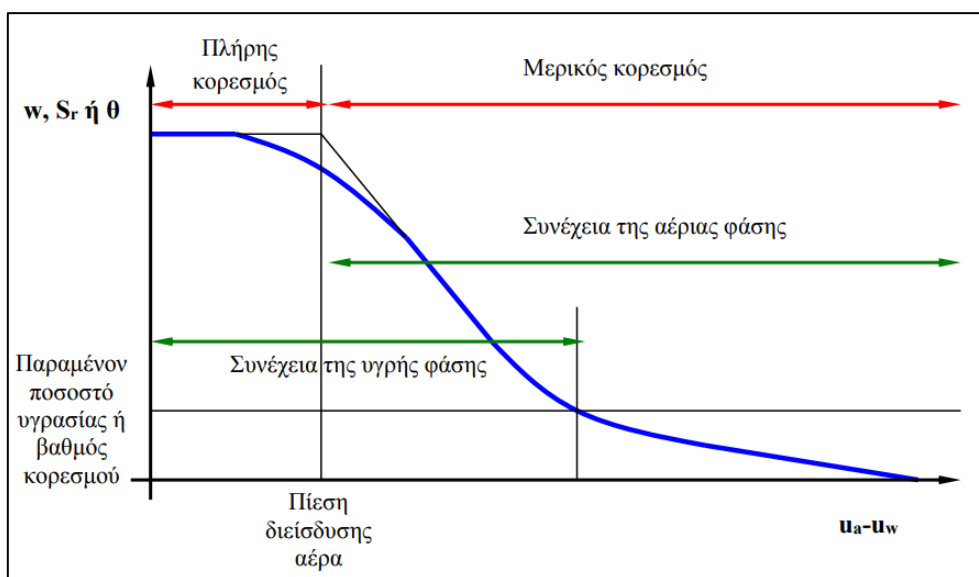
Επιφανειακή απορροή (R) είναι το νερό που φτάνει στην επιφάνεια της γης από τις βροχοπτώσεις, ρέει πάνω από την επιφάνεια της γης σε ένα δίκτυο υδατορευμάτων, απάγεται και τελικά καταλήγει σε λίμνες και στη θάλασσα. Είναι επίσης σημαντικό να αναφερθεί ο συνολικός όγκος απορροής (Q). Αυτός περιλαμβάνει τόσο την επιφανειακή απορροή (R) όσο και την υπόγεια απορροή (IR) και είναι το άθροισμά τους. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή είναι το κλίμα (ένταση βροχόπτωσης, υγρασία αέρα, άνεμος, εξάτμιση), η γεωμορφολογία (κλίση λεκάνης απορροής, πυκνότητα καναλιού), η λιθολογία (τύπος πετρώματος, διαπερατότητα) και ο τύπος βλάστησης.



Εικόνα 2.1: Ο κύκλος του Νερού (Πηγή: Πελέκη, 2013)

2.2 Διήθηση – Γενικά

Διήθηση (infiltration) είναι η φυσική διεργασία της εισχώρησης στο έδαφος του νερού που προέρχεται από τη βροχόπτωση, την τήξη του χιονιού ή την άρδευση (Rawls et al., 1993, σ. 5.1). Η διεργασία αυτή συναρτάται άμεσα με την κίνηση νερού στο έδαφος σε τρόπο ώστε ο ρυθμός διήθησης (f) να εξαρτάται τόσο από τη διαθεσιμότητα νερού για διήθηση, όσο και από τις ιδιότητες του εδάφους ως προς τη δυνατότητα κίνησης του νερού σε αυτό. Η κίνηση του νερού που συνοδεύει τη διεργασία της διήθησης πραγματοποιείται κάτω από την επίδραση δύο πεδίων δυνάμεων, διαφορετικής προέλευσης. Η πρώτη είναι η δύναμή της βαρύτητας, η οποία αποκτά κυρίαρχο ρόλο όταν οι πόροι του εδάφους κορεστούν από νερό. Ωστόσο, όταν οι εδαφικοί πόροι είναι μερικώς κορεσμένοι από νερό και μερικώς από αέρα, δηλαδή στην ακόρεστη ροή, κυριαρχούν οι λεγόμενες δυνάμεις μύζησης (tension, suction), που ισοδυναμούν με αρνητική πίεση σε σχέση με την ατμοσφαιρική και έχουν ως αποτέλεσμα τη συγκράτηση νερού στο έδαφος, ακόμη και μετά από μάκρα περίοδο ξηρασίας. Οι κύριες δυνάμεις αυτού του τύπου οφείλονται στους μηχανισμούς προσρόφησης, τριχοειδών και ώσμωσης (Ward and Robinson, 1990, σ. 132). Ο μηχανισμός αυτός περιγράφεται από την τυπική καμπύλη εδάφους νερού στην εικόνα 2.2.

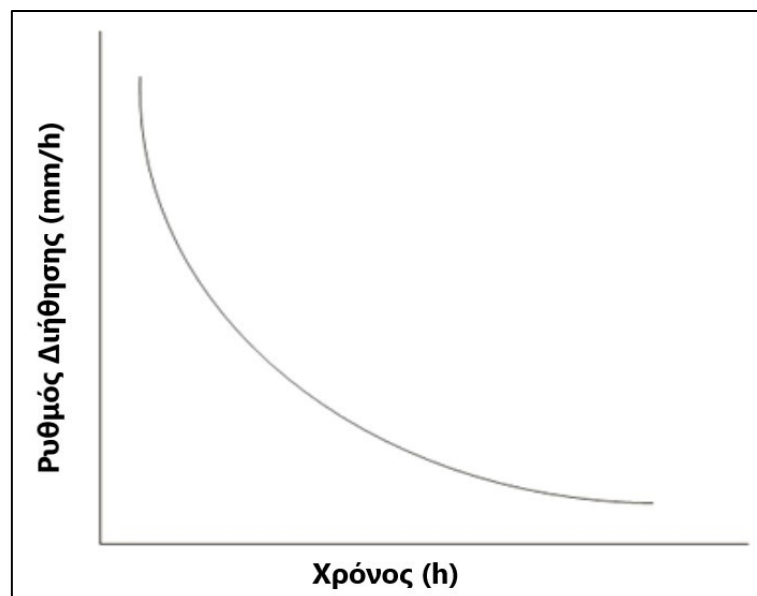


Εικόνα 2.2: Χαρακτηριστική καμπύλη εδάφους – νερού (Μπαρδάνης, 2016)

Στην Περιοχή I μεταξύ μηδενικής πίεσης και πίεσης διείσδυσης αέρα το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο, αλλά η πίεση των πόρων είναι αρνητική. Αυτή η περιοχή αντιστοιχεί κοντά στην επιφάνεια του εδάφους που το νερό έρχεται σε επαφή με το έδαφος και διηθείται στο εσωτερικό του. Στην Περιοχή II μεταξύ της πίεσης διείσδυσης αέρα και του παραμένοντος ποσοστού υγρασίας, το εδαφικό υλικό έχει στο εσωτερικό του και αέρα και νερό και μάλιστα και η υγρή και η αέρια φάση των εδαφών είναι συνεχής. Στην Περιοχή III, δηλαδή μεταξύ του παραμένοντος

ποσοστό υγρασίας και του θεωρητικού σημείου μηδενισμού του ποσοστού υγρασίας, το εδαφικό υλικό έχει στο εσωτερικό του και αέρα και νερό, αλλά μόνο η αέρια φάση του εδαφικού υλικού είναι συνεχής, ενώ η υγρή φάση είναι μη συνεχής, αφού το νερό των πόρων περιορίζεται πια σε απομονωμένους θύλακες στους μικρότερους πόρους ή στις μικρότερου μεγέθους κοιλότητες στα άκρα μεγαλύτερων πόρων. (Μπαρδάνης, 2016)

Η ροή νερού μέσα στο έδαφος χαρακτηρίζεται από τον όρο **ρυθμός διήθησης (Infiltration rate)** ο οποίος αναφέρεται στην ταχύτητα με την οποία το νερό διεισδύει στην επιφάνεια του εδάφους και εισέρχεται στο εσωτερικό του (Rajeh Alhassoun, 2009). Ο ρυθμός αυτός επηρεάζεται από την τριχοειδή δράση, ειδικά στα αρχικά στάδια της διήθησης, καθώς και από τη δύναμη της βαρύτητας. Η μέτρησή του γίνεται σε ίντσες ή χιλιοστά νερού που διεισδύουν στο έδαφος κατά τη διάρκεια μιας ώρας (in/h ή mm/h). Ο ρυθμός με τον οποίο το νερό διηθείται στο έδαφος, μειώνεται με την πάροδο του χρόνου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3. Η μείωση αυτή οφείλεται στην σταδιακή μείωση της υδραυλικής κλίσης στην επιφάνεια του εδάφους (Παπαζαφειρίου, 1999). Όταν αυτή η διαδικασία συνεχίζεται για μεγάλο χρονικό διάστημα, ο ρυθμός διήθησης φτάνει σε μια σταθερή τιμή f_c , την οποία διατηρεί (Παπαζαφειρίου, 1999).



Εικόνα 2.3: Ικανότητα διήθησης συναρτήσεως του χρόνου για συνεχή επιβολή νερού

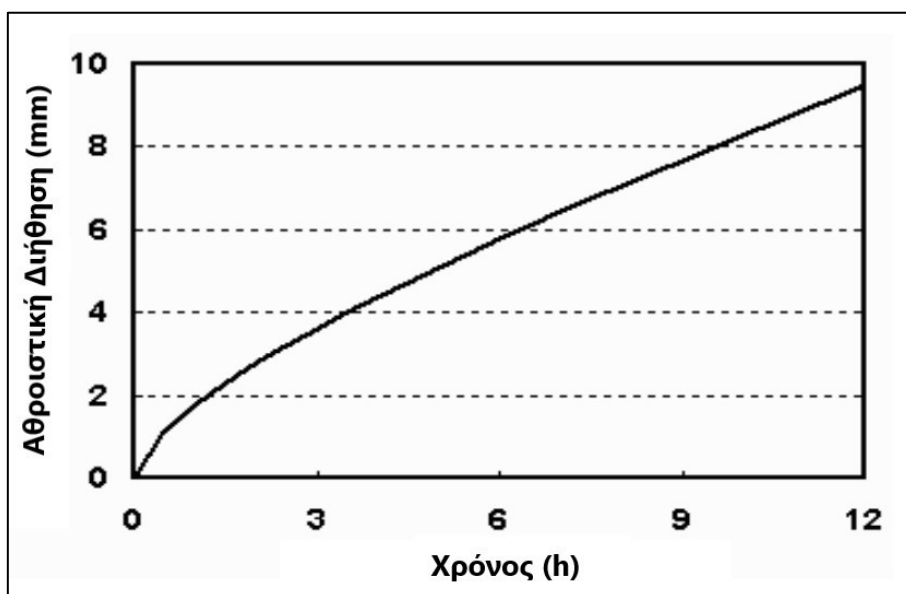
Αμέσως μετά την εφαρμογή του νερού στην επιφάνεια του εδάφους, η ταχύτητα διήθησης είναι υψηλή, γνωστή ως αρχικός ρυθμός διήθησης. Αυτό συμβαίνει όταν το έδαφος είναι εξ' ολοκλήρου στεγνό. Στη συνέχεια, η διήθηση μειώνεται σταδιακά καθώς ο κορεσμός του εδάφους αυξάνεται, μέχρι να σταθεροποιηθεί σε μια τελική τιμή, γνωστή ως τελικός ρυθμός διήθησης (f_c).

Σύμφωνα με τον Νικολον, 1983 η ταχύτητα διήθησης μπορεί να ταξινομηθεί σε διάφορους τύπους σύμφωνα με τον Πίνακα 2.1 .

Πίνακας 1: Ταξινόμηση Ταχύτητας Διήθησης (Nikolon, 1983, από Galawezh B. Bapeer et al., 2010)

| Ταχύτητα Διήθησης | Τύπος |
|-------------------|-------------------------|
| >160mm/h | Ταχεία (R) |
| 60 – 160 mm/h | Μέτρια – Ταχεία (M – R) |
| 20 – 60 mm/h | Μέτρια (M) |
| 5 – 20 mm/h | Αργή – Μέτρια (S – M) |
| 1.2 – 5 mm/h | Αργή (S) |
| < 1.2 | Πολύ Αργή |

Η **αθροιστική διήθηση (cumulative infiltration)** ορίζεται ως η συνολική ποσότητα του νερού που διηθείται στο έδαφος κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου t . Στην Εικόνα 2.4 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη που δείχνει την χρονική εξέλιξη της αθροιστικής διήθησης.



Εικόνα 2.4: Αθροιστική διήθηση (Πηγή: <http://soilphysics.okstate.edu/software/water/infil.html>)

2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό διήθησης

Ο ρυθμός διήθησης του νερού στο έδαφος επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, με τους κυριότερους να είναι:

1. **Τύπος:** Ο τύπος του εδάφους, που καθορίζεται από την περιεκτικότητα σε άμμο, ιλύ, και άργιλο, επηρεάζει τον ρυθμό διήθησης. Τα αμμώδη εδάφη έχουν συνήθως μεγαλύτερη διηθητικότητα σε σύγκριση με τα αργιλώδη εδάφη. Ο τύπος του εδάφους είναι κρίσιμος για την κατανόηση της διήθησης, καθώς αμμώδη εδάφη έχουν υψηλότερες τιμές διήθησης σε σύγκριση με αργιλώδη εδάφη (USDA, 1951) (Παπαζαφειρίου, 1999). Συνεπώς, ο τύπος του εδάφους μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τον ρυθμό διήθησης του εδάφους, με τα αμμώδη εδάφη να έχουν συνήθως υψηλότερη τιμή σε σχέση με τα αργιλώδη εδάφη (USDA, 1998) (Πίνακας 2.2), (Εικόνες 2.5 και 2.6).
2. **Η δομή του εδάφους (Structure)** επίσης επηρεάζει τον ρυθμό διήθησης. Εδάφη με σταθερή και ισχυρή δομή εμφανίζουν συνήθως υψηλότερα ποσοστά διήθησης σε σύγκριση με εδάφη που έχουν αδύναμη και φυλλώδη δομή. Η δομή του εδάφους συνδέεται με το μέγεθος των πόρων. Εδάφη με μικρότερο μέγεθος δομής, δηλαδή με μικρότερους πόρους, χαρακτηρίζονται από υψηλότερα ποσοστά διήθησης σε σύγκριση με εδάφη που έχουν μεγαλύτερο μέγεθος δομής (USDA, 1998). Συνεπώς, η δομή του εδάφους είναι ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διήθηση του νερού, με τα εδάφη που έχουν σταθερή και ισχυρή δομή να παρουσιάζουν βελτιωμένη διήθηση σε σχέση με εκείνα που έχουν αδύναμη δομή.
3. **Μορφολογική κλίση:** Εδάφη με μικρές μορφολογικές κλίσεις ευνοούν την διήθηση, ενώ εδάφη με μεγάλες κλίσεις ευνοούν την επιφανειακή απορροή (Τσακίρης, 1995, από Τσιούνια, 2012).
4. **Η στεγανοποίηση της επιφανειακής στρώσης του εδάφους** αναφέρεται στη διαδικασία και τη δημιουργία επιφανειακής κρούστας, η οποία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Αυτοί περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά του επιφανειακού εδάφους, τη δύναμη πρόσπτωσης των σταγόνων νερού στην επιφάνεια, τη συγκέντρωση και το είδος των στερεών σωματιδίων του αρδευτικού νερού, και άλλους παράγοντες που δυσχεραίνουν την κατανόηση των υδραυλικών ιδιοτήτων της επιφανειακής στρώσης με την πάροδο του χρόνου. Συνολικά, η διαδικασία στεγανοποίησης ενός ακάλυπτου εδάφους είναι ταχεία και επηρεάζει άμεσα τη διηθητικότητα. Εάν η επιφάνεια του εδάφους καλύπτεται από πυκνή βλάστηση ή προστατευτικές στρώσεις φυτικών υπολειμμάτων, η μεταβολή στο ρυθμό διήθησης περιορίζεται (Παπαζαφειρίου, 1999) (Εικόνα 2.7).

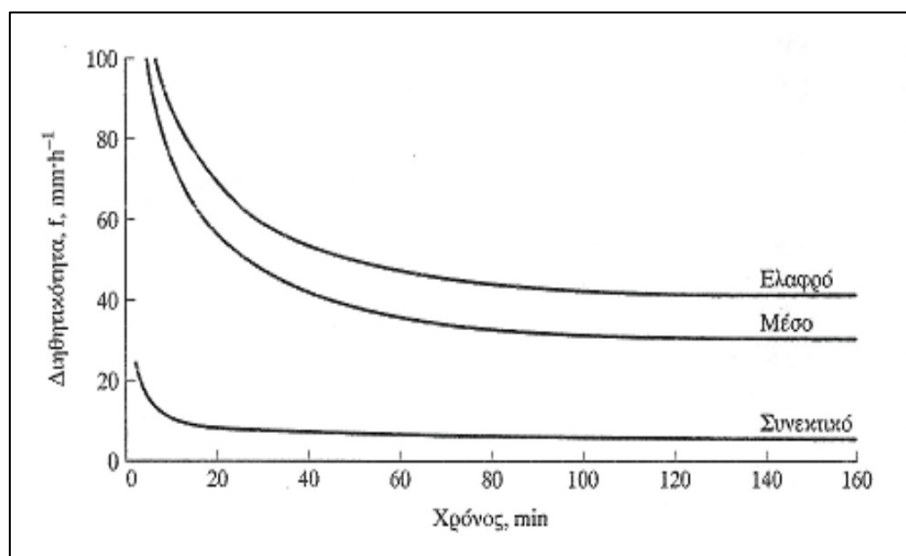
5. **Πυκνότητα εδάφους:** Μια συμπαγής ζώνη ή ένα αδιαπέρατο στρώμα κοντά στην επιφάνεια του εδάφους περιορίζει την είσοδο του νερού και τείνει να οδηγήσει σε απορροή (USDA, 1998).
6. **Η περιεκτικότητα σε νερό στο έδαφος (Water content)** επηρεάζει το ποσοστό διήθησης του νερού. Συγκεκριμένα, όταν το έδαφος είναι αρχικά ξηρό (ακόρεστο), το ποσοστό διήθησης είναι συνήθως υψηλό. Καθώς, ωστόσο, το έδαφος υγραίνεται προοδευτικά, μειώνεται ο ρυθμός διήθησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, σε ξηρό έδαφος, οι πόροι και οι ρωγμές αρχίζουν να γεμίζουν με νερό από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, ενώ με την προοδευτική υγρασία του εδάφους, η διήθηση επιβραδύνεται. Αυτή η επιβράδυνση συμβαίνει όταν οι πόροι και οι ρωγμές γίνονται υγροί, και η διήθηση περιορίζεται στην τιμή της διαπερατότητας του πιο περιοριστικού εδαφικού οριζοντα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8 από το USDA το 1998.
7. **Παγωμένη εδαφική επιφάνεια (Frozen surface):** Ένα παγωμένο έδαφος επιβραδύνει σημαντικά ή αποτρέπει τελείως την είσοδο του νερού στα κατώτερα στρώματα (USDA, 1998).
8. **Οργανικό υλικό (Organic matter):** Η παρουσία ζωντανού ή νεκρού φυτικού υλικού στην επιφάνεια του εδάφους επηρεάζει σημαντικά την ικανότητα διήθησης του νερού μέσα στο εδαφικό προφίλ. Το οργανικό υλικό που επικαλύπτει την επιφάνεια του εδάφους αποτρέπει τη διάσπαση και τον κατακερματισμό των εδαφικών τεμαχίων, αντιστέκεται στις δυνάμεις της βροχής, εμποδίζοντας αρχικά το φράξιμο των πόρων και επιτρέποντας τη διήθηση του νερού. Συνολικά, το οργανικό υλικό είναι περισσότερο πορώδες σε σχέση με τα εδαφικά τεμάχια, επιτρέποντάς του να κρατά μεγαλύτερες ποσότητες νερού. Αυτή η δυνατότητα της οργανικής ουσίας να συγκρατεί νερό παρουσιάζεται γενικά ως ένα θετικό χαρακτηριστικό, σύμφωνα με το USDA το 1998.
9. **Το πορώδες (Porosity):** Η πορώδης δομή του εδάφους, με συνεχείς και συνδεδεμένους πόρους κοντά στην επιφάνειά του, παρουσιάζει το πλεονέκτημα της απρόσκοπτης κατακόρυφης κίνησης του νερού εντός του εδάφους. Αντίθετα, σε εδάφη με ασυνεχείς πόρους, η ροή του νερού επιβραδύνεται λόγω του εγκλωβισμού των φουσκαλών του αέρα, περιορίζοντας την αποδοτικότητα της κίνησης του νερού. Αυτή η χαρακτηριστική διαφοροποίηση στη δομή των πόρων επηρεάζει σημαντικά την υδραυλική συμπεριφορά του εδάφους. (USDA, 1998).
10. **Η ένταση και η διάρκεια της βροχόπτωσης:** Μια ραγδαία βροχόπτωση ευνοεί την απορροή, ενώ μια βροχόπτωση μεγάλης διάρκειας και μικρής έντασης

ευνοεί την διήθηση και είναι ιδανική για τον εμπλουτισμό του υδροφόρου ορίζοντα (Τσακίρης, 1995, από Τσιούνια, 2012).

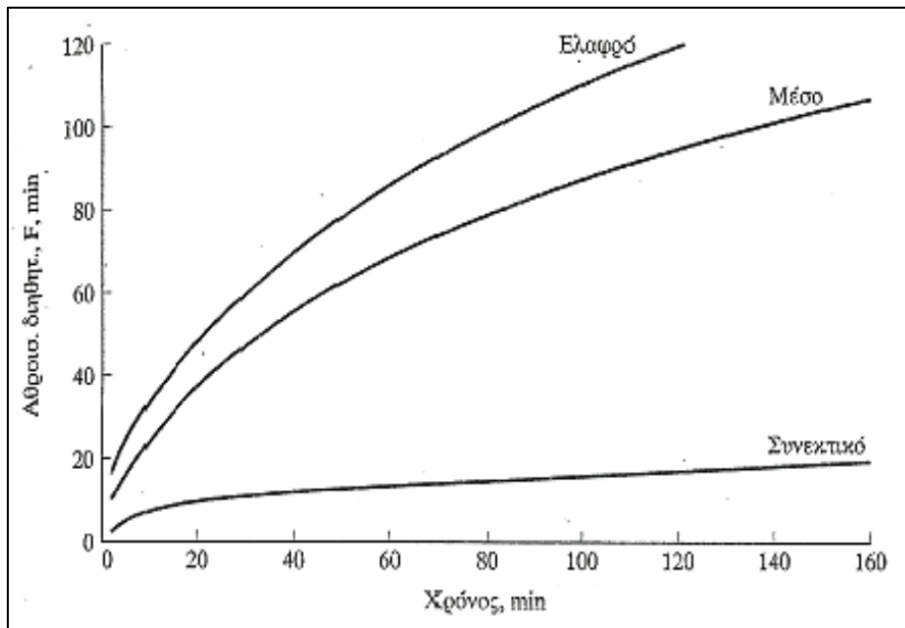
11. **Βλάστηση (Vegetation):** Η παρουσία βλάστησης επηρεάζει θετικά την διήθηση του νερού στο έδαφος, καθώς η κίνηση των ριζών καθιστά το έδαφος πιο πορώδες. Επιπλέον, η βλάστηση συμβάλλει στην επιβράδυνση της απορροής και ανακόπτει την ταχύτητα πτώσης του νερού. Ταυτόχρονα, αποτρέπει την απόπλυση του εδάφους και τη φραγή των πόρων με λεπτόκοκκα υλικά, (USDA ,1998).
12. **Ανθρωπογενείς επεμβάσεις:** Περιορίζουν την διήθηση του νερού που θα εμφανιζόταν αν δεν υπήρχαν τεχνητές κατασκευές ,αυξάνοντας την απορροή.
13. **Χρήσεις γης (Land-use):** Οι χρήσεις γης αλλάζουν την ικανότητα διήθησης με τη συμπίεση, τη μετακίνηση της βλάστησης, την αλλαγή της τραχύτητας της επιφάνειας του εδάφους κ. α.

Πίνακας 2: Ποσοστά διήθησης για διαφορετικούς τύπους εδαφών (Πηγή: Shukla and Lal, 2006, από Alhassoun, 2009)

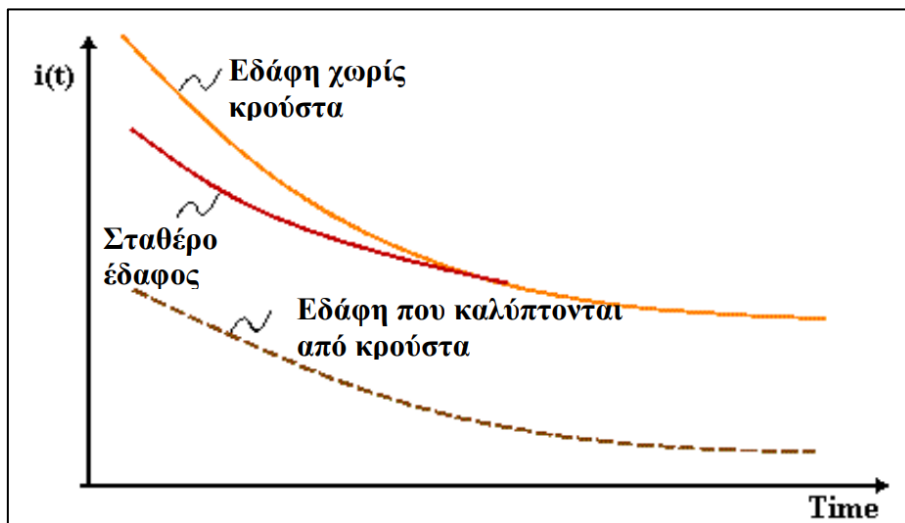
| Τύπος Εδάφους | Σταθερό ποσοστό διήθησης (mm/h) |
|-----------------|---------------------------------|
| Άμμος | >30 |
| Αμμώδεις Ιλύς | 20 – 30 |
| Ιλύς | 10 – 20 |
| Αργιλώδεις Ιλύς | 5 – 10 |
| Άργιλος | 1 – 5 |



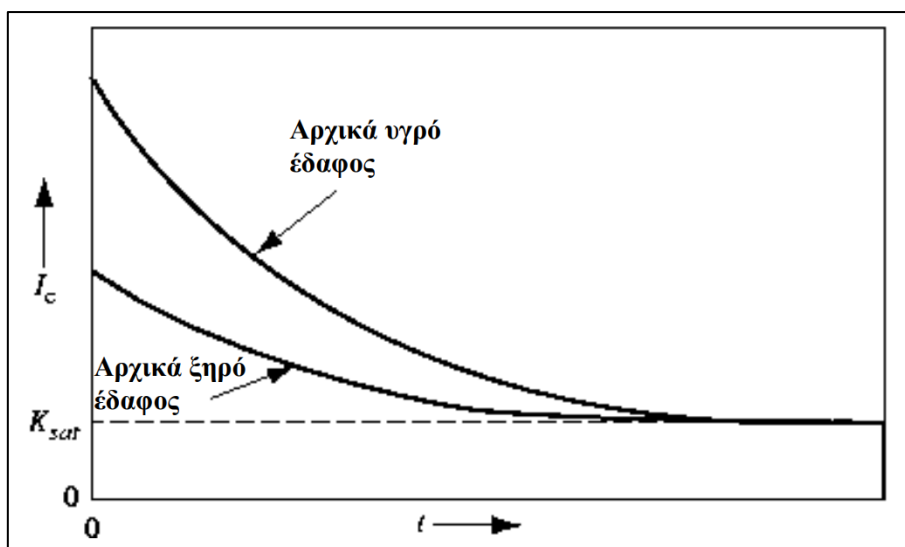
Εικόνα 2.5: Μεταβολή του ρυθμού διήθησης με το χρόνο για τρεις διαφορετικούς τύπους εδαφών (Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999)



Εικόνα 2.6: Μεταβολή της αθροιστικής διήθησης με το χρόνο για τρεις διαφορετικούς τύπους εδάφους (Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999)



Εικόνα 2.7: Εδάφη που δεν καλύπτονται από κρούστα έχουν υψηλότερο ρυθμός διήθησης από εδάφη που καλύπτονται από κρούστα (Πηγή: Πελέκη, 2013)



Εικόνα 2.8: Ρυθμός διήθησης ενός κορεσμένου και ενός ακόρεστου εδάφους (Πηγή: Πελέκη, 2013)

Συνοπτικά, η διαδικασία της διήθησης του νερού στο έδαφος, είτε προκαλείται από ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα είτε από άρδευση, συνδέεται άμεσα με τη μετακίνηση του νερού από ένα σημείο στο άλλο. Ο ρυθμός διήθησης εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους και την διαθεσιμότητα νερού για διήθηση. Αυτός ο ρυθμός υπόκειται σε χρονικές και χωρικές μεταβολές, επηρεάζεται από παράγοντες όπως το ύψος, η ένταση και η διάρκεια της βροχής, οι φυσικές ιδιότητες του εδάφους, το επιφανειακό κάλυμμα του, την παρουσία χλωρίδας, το περιεχόμενο του εδάφους σε νερό κατά την έναρξη της βροχής, και τη θερμοκρασία του αέρα και του εδάφους. Αυτοί οι παράγοντες αξιολογούνται δύσκολα.

2.4 Διαπερατότητα εδάφους και ρυθμός διήθησης

Η διαπερατότητα εκφράζει την ευκολία με την οποία το νερό κινείται μέσα σε ένα υλικό και εξαρτάται αποκλειστικά από τις ιδιότητες του μέσου (σχήμα, μέγεθος, διάταξη κοκκων). Η διαπερατότητα ορίζεται από το νόμο του Darcy, ο οποίος για μονοδιάστατη κατακόρυφη ροή μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$U = -K \, dh/dl$$

Όπου:

U: η ταχύτητα Darcy

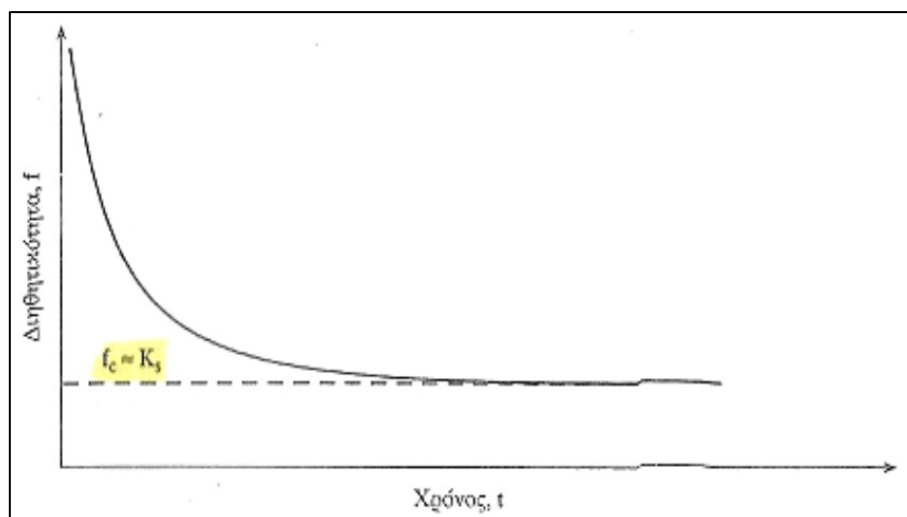
K: διαπερατότητα ή υδραυλική αγωγιμότητα εδάφους

dh/dl : είναι η υδραυλική κλίση (hydraulic gradient), που ορίζεται ως η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής,

Ανάλογα με την τιμή της διαπερατότητας οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως :

- Πολύ υδατοπερατοί όταν $k \geq 10^{-1}$ m/s
- Υδατοπερατοί όταν $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s
- Λίγο υδατοπερατοί όταν $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s
- Πρακτικά στεγανοί όταν $k \leq 10^{-9}$ m/s

Όταν το υδραυλικό φορτίο μετριέται σε κορεσμένο έδαφος, η διαπερατότητα παραμένει σταθερή σε σχέση με το ύψος πίεσης. Στην περίπτωση αυτή αποκαλείται κορεσμένη διαπερατότητα K_{sat} (saturated permeability) και καθορίζεται κυρίως από τη γεωμετρία και την κατανομή των πόρων. Η κορεσμένη διαπερατότητα εδάφους (K_s) ισούται με τον τελικό ρυθμός διήθησης (f_c) (Παπαζαφειρίου, 1999) (Εικόνα 2.9).



Εικόνα 2.9: Ο τελικός ρυθμός διήθησης ισούται με την διαπερατότητα του εδάφους (Πηγή: Παπαζαφειρίου, 1999)

Στην περίπτωση του ακόρεστου εδάφους, όπου το περιεχόμενο νερού μεταβάλλεται ως προς το χρόνο και τη θέση, η υδραυλική αγωγιμότητα γίνεται συνάρτηση τόσο των χαρακτηριστικών του εδάφους όσο και της περιεχόμενης υγρασίας, και αυτή η έννοια ονομάζεται ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα (unsaturated hydraulic conductivity).

Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα, ως μέτρο κίνησης του νερού σε ακόρεστο μέσο, είναι μικρότερη από την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κορεσμένο μέσο. Με βάση την περιεκτικότητα του νερού, η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα ενός ακόρεστου μέσου (K_{unsat}) σε σχέση με την κορεσμένη τιμή (K_s) δίνεται από τη σχέση:

$$K_{unsat} = K_s [(S_s - S_o) / (1 - S_o)]^3$$

Όπου,

K_{unsat} : Είναι η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα,

K_s : Είναι η υδραυλική αγωγιμότητα σε κορεσμένο μέσο,

S_s : Βαθμός Κορεσμού

S_o : Υπολειπόμενος κορεσμός που αντιπροσωπεύει το νερό των πόρων που δεν κινείται και δεσμεύεται από τις τριχοειδείς δυνάμεις (Καλλέργης κ. α, 2004, από Βουδούρη, 2009)

2.5 Απορροή και δημιουργία πλημμύρας

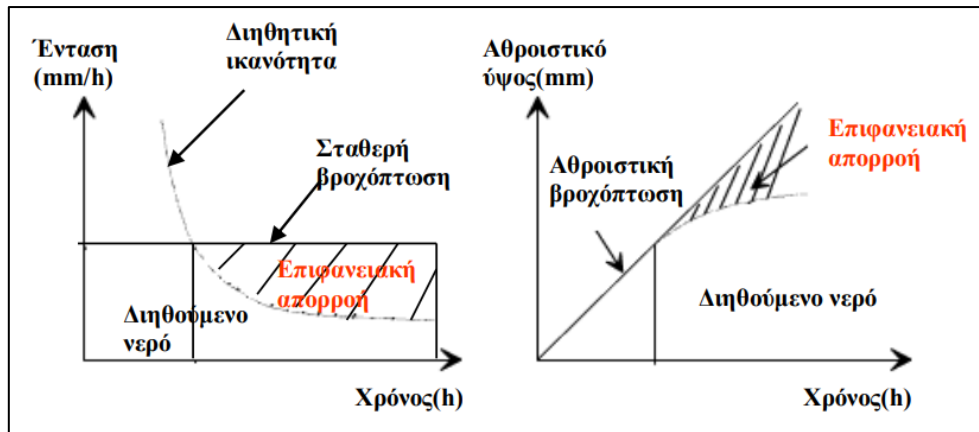
Η απορροή του νερού της βροχής και η πλημμύρα είναι δύο αλληλένδετοι όροι. Με τον όρο απορροή ονομάζεται το φαινόμενο που εξελίσσεται κατά της διάρκεια της βροχόπτωσης και ποσότητα νερού δεν διηθείται και παραμένει στην επιφάνεια. Η ποσότητα αυτή σε συνθήκες επίπεδου εδάφους αποτελεί το λιμνάζον νερό, την πλημμύρα. Τέτοιου είδους πλημμύρες προκαλούνται όταν λαμβάνουν χώρα ακραίες βροχοπτώσεις και το έδαφος δεν έχει την ικανότητα να διηθήσει το νερό με το ρυθμό που εκείνο πέφτει στην επιφάνεια του εδάφους. Τέτοιες πλημμύρες καταγράφηκαν και στο θεσσαλικό κάμπο κατά τη διάρκεια των κακοκαιριών Daniel και Elias το Σεπτέμβριο του 2023. Σε διαφορετική περίπτωση, η διαδικασία της απορροής μπορεί να εξελιχθεί σε δύο φάσεις.

- **Όταν η βροχόπτωση είναι μικρότερη της διήθησης ($q < F$)**

Στην αρχή της βροχόπτωσης, η ικανότητα διήθησης του εδάφους υπερβαίνει την ένταση της βροχόπτωσης, και το νερό διηθείται πλήρως στο έδαφος μέχρις ότου επιτευχθεί ο κορεσμός του. Ο χρόνος βύθισης ορίζεται ως η διάρκεια από την έναρξη της βροχόπτωσης έως τη στιγμή που το έδαφος φτάνει στον κορεσμό του. Ο χρόνος βύθισης είναι μεταβλητός και εξαρτάται από την ένταση της βροχόπτωσης και την αρχική υγρασία του εδάφους (Εικόνα 2.11).

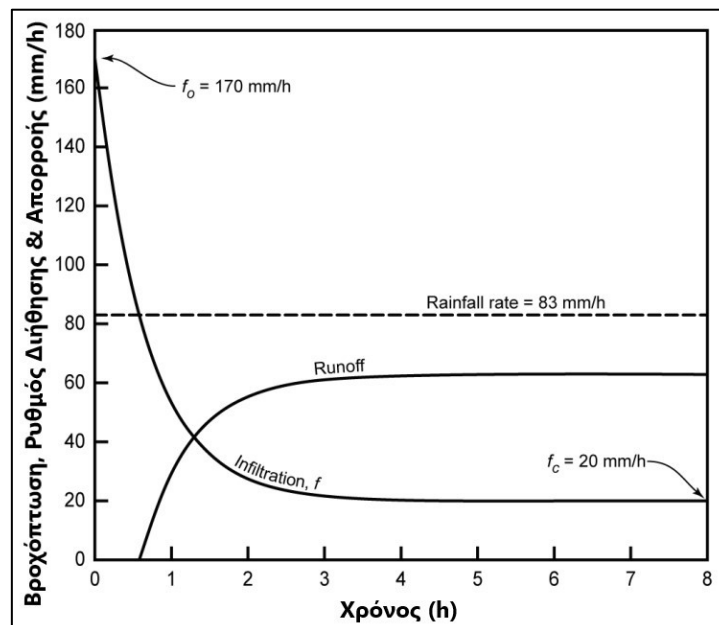
- **Όταν η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη της διήθησης ($q > F$)**

Όταν η ένταση της βροχόπτωσης υπερβαίνει τη μέγιστη διηθητική ικανότητα του εδάφους, τότε εκδηλώνεται η επιφανειακή απορροή. Σε περιπτώσεις όπου η απορροή υπερβαίνει την ικανότητα διήθησης του εδάφους, το νερό κατευθύνεται προς άλλες περιοχές της λεκάνης απορροής που έχουν μεγαλύτερη ικανότητα διήθησης (Εικόνα 2.13).



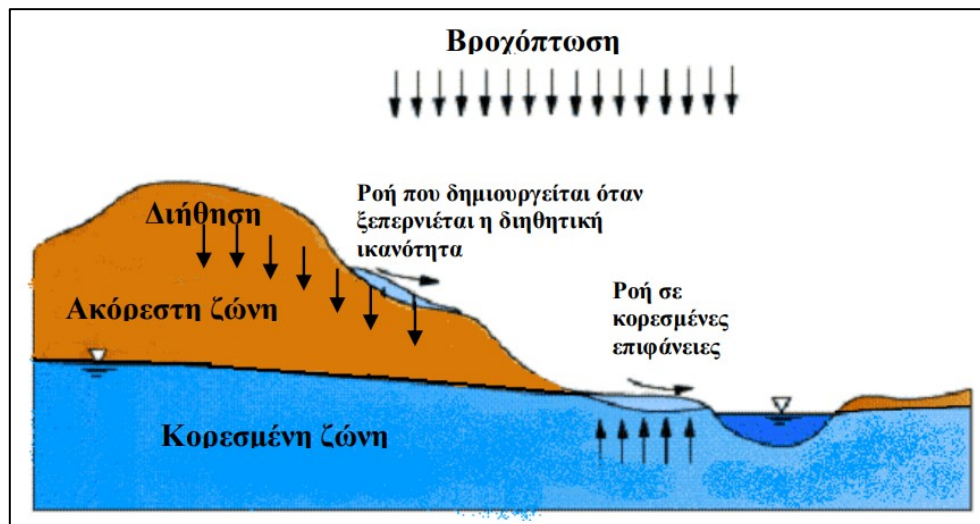
Εικόνα 2.10: Ρυθμός διήθησης και αθροιστική διήθηση για μια σταθερή βροχόπτωση (Πηγή: Πελέκη, 2013)

Ο ρυθμός διήθησης μαζί με τον ρυθμό απορροής παρουσιάζονται στην εικόνα 2.12. Η αρχική διηθητικότητα μόλις έρχεται σε επαφή το νερό με το έδαφος είναι σε πολύ υψηλή τιμή όπως έχει αναφερθεί και μόλις αυτή γίνει μικρότερη από την ένταση της βροχής τότε αρχίζει να αυξάνει και ο ρυθμός απορροής. Με την πάροδο του χρόνου οι 2 γραφικές παραστάσεις ευθυγραμμίζονται με τον ρυθμό διήθησης να λαμβάνει την τιμή του της τελικής διηθητικότητας f_c που είναι ίση με το συντελεστή κορεσμένης διαπερατότητας του εδάφους K_s .



Εικόνα 2.11: Τυπικό γράφημα των καμπυλών ρυθμού διήθησης και απορροής για σταθερή ένταση βροχής.

Η απορροή σε κορεσμένες επιφάνειες δημιουργείται όταν αυτή υπερβαίνει την ικανότητα διήθησης του εδάφους να συγκρατεί νερό και την ικανότητα να μεταδίδει πλευρικά τη ροή του ύδατος (Εικόνα 2.13)



Εικόνα 2.12: Διαδικασία ροής όταν αυτή υπερβαίνει την ικανότητα διήθησης του εδάφους και όταν αυτή πραγματοποιείται σε κορεσμένες επιφάνειες (Πηγή: Πελέκη, 2013)

3 ΘΕΩΡΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΩΝ

3.1 Το κλίμα της Ελλάδας

Το κλίμα της Ελλάδας χαρακτηρίζεται ως μεσογειακό, όπως περιγράφετε. Εντούτοις, οι γεωγραφικές και υδρογραφικές συνθήκες της χώρας δημιουργούν διαφοροποιήσεις στο κλίμα, και έτσι διακρίνονται τέσσερις μεσογειακοί κλιματικοί τύποι:

1. Θαλάσσιος Τύπος:

- Επικρατεί στα δυτικά παράλια της χώρας, στα Ιόνια Νησιά, καθώς και ανατολικότερα στα Δωδεκάνησα.
- Χαρακτηρίζεται από ήπια κλίματα με θερμούς και υγρούς χειμώνες, καθώς και δροσερά και ξηρά καλοκαίρια.

2. Χερσαίος Τύπος:

- Επικρατεί στη νοτιοανατολική Ελλάδα, τη Στερεά Ελλάδα, την Ανατολική Πελοπόννησο, τα νησιά του κεντρικού Αιγαίου και την Κρήτη.
- Περιλαμβάνει ξηρά και θερμά καλοκαίρια, με χειμερινούς μήνες να είναι ψυχροί και βροχεροί.

3. Ηπειρωτικός Τύπος:

- Επικρατεί στη Θράκη, τη Μακεδονία, την Ήπειρο, και τμήματα της Θεσσαλίας.
- Παρουσιάζει ψυχρούς χειμώνες με περισσότερο υγρασία, ενώ τα καλοκαίρια είναι πιο δροσερά σε σχέση με τον χερσαίο τύπο.

4. Ορεινός Τύπος:

- Επικρατεί στους ορεινούς όγκους που διασχίζουν την Ελλάδα.
- Περιλαμβάνει περιοχές με δάση και χαρακτηρίζεται από αλπικό κλίμα κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Αυτή η κατηγοριοποίηση λαμβάνει υπόψη την τοπογραφία, την απόσταση από τη θάλασσα και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν το κλίμα στην Ελλάδα.

Από κλιματολογικής πλευράς, το έτος στην Ελλάδα χωρίζεται κυρίως σε δύο εποχές σύμφωνα με την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία:

α) Τη ψυχρή και βροχερή χειμερινή περίοδο που εκτείνεται από τα μέσα Οκτωβρίου μέχρι το τέλος Μαρτίου. Οι ψυχρότεροι μήνες είναι οι Ιανουάριος και Φεβρουάριος, με τις θερμοκρασίες να κυμαίνονται στα 5-10°C στις παραθαλάσσιες περιοχές και 0-5°C στις ηπειρωτικές. Η βροχή διαρκεί για λίγες ημέρες, και ο ουρανός σπάνια παραμένει συνεφιασμένος για συνεχόμενες ημέρες. Η χειμερινή εποχή είναι πιο έντονη στη Βόρεια και Δυτική Ελλάδα σε σύγκριση με τα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου. Οι χειμερινές κακοκαιρίες συνήθως διακόπτονται από ηλιόλουστες ημέρες, γνωστές ως "Αλκυονίδες ημέρες".

β) Τη θερμή και άνομβρη εποχή που καλύπτει τον περίοδο από Απρίλιο έως Οκτώβριο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, ο καιρός είναι σταθερός, με σχεδόν αίθριο ουρανό και λαμπερό ηλιοφάνεια. Οι υψηλές θερμοκρασίες εκτείνονται από το τέλος Ιουλίου έως το πρώτο Αύγουστο, με μέσες μέγιστες θερμοκρασίες από 29°C έως 35°C. Η δροσερή θάλασσα αύρα και οι βόρειοι άνεμοι συμβάλλουν στη μείωση της θερμότητας στις παράκτιες περιοχές. Παρόλα αυτά, ενώ είναι σπάνιες, εμφανίζονται περιοδικά βροχές ή καταιγίδες μικρής διάρκειας. Η άνοιξη είναι σύντομη, ενώ το φθινόπωρο διαρκεί περισσότερο και είναι θερμό, εκτείνοντας τη θερμή περίοδο μέχρι τα μισά του Δεκεμβρίου στη Νότια Ελλάδα.

3.2 Βροχή ορισμός

Η βροχή αποτελεί την πιο κοινή μορφή κατακρημνισμάτων. Αποτελείται από σταγόνες που φτάνουν στην επιφάνεια της Γης σε υγρή μορφή. Οι σταγόνες δημιουργούνται μέσα στα νέφη μέσω της συνένωσης πολλών σταγονιδίων ή παγοκρυστάλλων. Το φαινόμενο της βροχής δημιουργείται όταν σταγονίδια ή παγοκρυστάλλοι του νέφους κατά την κάθοδό τους προς το έδαφος διατηρήσουν την υγρή τους μορφή πριν φτάσουν στην επιφάνεια της γης. Το μέγεθος των σταγόνων που φθάνουν στο έδαφος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως το αρχικό τους μέγεθος, την εξάτμιση που συμβαίνει κατά την κάθοδό τους και τα καθοδικά

ρεύματα αέρα. (Στάθης, 2015) Οι σταγόνες αυτές ανάλογα με το μέγεθός τους και τον τρόπο καθόδου τους λαμβάνουν διάφορες ονομασίες, όπως όμβρος (όταν προέρχονται από νέφη ανοδικών κινήσεων με απότομη έναρξη και λήξη, καθώς και απότομες μεταβολές στην ένταση), ψιχάλα (όταν αποτελούνται από πολύ μικρές και πολυάριθμες σταγόνες που αιωρούνται και ακολουθούν τα αέρια ρεύματα), κ.λπ. (Μαχαίρας & Μπαλαφούτης, 1985)

Η βροχόπτωση μετριέται σε χιλιοστά ύψους του υδάτινου στρώματος σε οριζόντια επιφάνεια. Η ποσοτική έκφραση του 1 χιλιοστού ύδατος σε επιφάνεια 1 τετραγωνικού μέτρου ισοδυναμεί με 1 λίτρο ύδατος. Η βροχόπτωση η οποία πέφτει σε διάστημα μίας ημέρας, ονομάζεται ημερήσια βροχόπτωση, το άθροισμα των ημερήσιων βροχοπτώσεων κατά τη διάρκεια ενός μήνα αποτελεί το μηνιαίο ύψος της βροχής για τον μήνα αυτό, ενώ αντίστοιχα το σύνολο της βροχής που πέφτει και στους 12 μήνες του χρόνου αποτελεί το ετήσιο ύψος της βροχής. (Στάθης, 2015)

Το φαινόμενο της βροχόπτωσης δεν εκδηλώνεται ταυτόχρονα σε ολόκληρο τον πλανήτη. Μελέτες έχουν δείξει ότι ορισμένες περιοχές παρουσιάζουν ετήσιες βροχοπτώσεις που φτάνουν ή και υπερβαίνουν τα 3.000mm, ενώ σε άλλες περιοχές δεν υπερβαίνουν τα 50mm σε ύψος. Η ετήσια πορεία της βροχόπτωσης μίας περιοχής αποτελεί θεμελιώδες κλιματικό χαρακτηριστικό της. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό και ανάλογα με τους επικρατούντες σε κάθε περιοχή μορφολογικούς, θερμικούς και δυναμικούς παράγοντες κάθε τόπος κατατάσσεται σε μία από τις παρακάτω κατηγορίες βροχομετρικών συστημάτων (Στάθης, 2015):

- **Θαλάσσιο βροχομετρικό σύστημα:** επικρατεί επάνω από τους ωκεανούς και το μέγιστο των βροχών σημειώνεται κατά το φθινόπωρο και τον χειμώνα, αλλά τα ποσά της βροχής είναι σημαντικά και τους υπόλοιπους μήνες του έτους.
- **Ηπειρωτικό βροχομετρικό σύστημα:** επικρατεί στα εσωτερικά των ηπείρων, με αυξημένες θερινές βροχές και χειμερινή συνήθως ξηρασία
- **Μεσογειακό ή υποτροπικό βροχομετρικό σύστημα:** απαντάται στις χώρες της Μεσογείου, την Καλιφόρνια, τη Νότια Αυστραλία και τη Νότια Αφρική. Χαρακτηρίζεται από θερινό ελάχιστο και χειμερινό μέγιστο της
- **Μουσωνικό βροχομετρικό σύστημα:** χαρακτηρίζεται από άφθονες θερινές βροχοπτώσεις και χειμερινή ξηρασία. Απαντάται στις περιοχές όπου επικρατεί το σύστημα των μουσώνων
- **Ισημερινό βροχομετρικό σύστημα:** κυριαρχεί στην ισημερινή ζώνη που περικλείεται μεταξύ των παραλλήλων 10ο βόρεια και νότια του Ισημερινού. Χαρακτηρίζεται από δύο μέγιστα βροχής, τα οποία σημειώνονται κατά τις ισημερίες.
- **Τροπικό βροχομετρικό σύστημα:** χαρακτηρίζει τις περιοχές των ανατολικών ακτών της τροπικής ζώνης, όπου κάνουν συχνή την εμφάνισή τους οι τροπικοί

κυκλώνες. Επειδή η εποχή δράσης τους είναι το φθινόπωρο, οι βροχοπτώσεις έχουν τα μέγιστα τους κατά την εποχή αυτή.

Ο ρυθμός της βροχής διαφέρει σημαντικά σε έναν τόπο από επεισόδιο σε επεισόδιο βροχής. Άλλοτε η βροχή είναι πολύ έντονη και άλλοτε πολύ ασθενής. Για τη μελέτη της συμπεριφοράς της βροχής χρησιμοποιείται η έννοια της ραγδαιότητας ή της έντασης αυτής, η οποία εκφράζει το ύψος της βροχής σε χιλιοστά που φτάνει στην επιφάνεια της Γης σε ορισμένο χρονικό διάστημα. Η κοινότερη έκφραση είναι η βροχόπτωση/24ωρο ή η βροχόπτωση/ώρα, ωστόσο σε ειδικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται εντάσεις μικρότερης διάρκειας όπως βροχοπτώσεις/ημίωρο, ανά 15λεπτο, 10λεπτο ή ακόμα και πεντάλεπτο της ώρας. (Στάθης, 2015)

Η ένταση της βροχής είναι ένας βασικός παράγοντας για τον χαρακτηρισμό ενός φαινομένου βροχόπτωσης. Είναι μια παράμετρος κατανοητή από την κοινωνία και ένας τρόπος των ειδικών για να παρουσιάζουν αυτά τα φαινόμενα στους πολίτες σε κοινή γλώσσα. Οι βροχοπτώσεις μπορούν να διαχωριστούν σε 4 κατηγορίες αναλόγως την ένταση της τους η οποία μετριέται σε χιλιοστά βροχής την ώρα (mm/h). Οι 4 κατηγορίες είναι οι ακόλουθες:

- **Ασθενής:** <2mm/h
- **Μέτρια:** 2-10mm/h
- **Ισχυρή:** 10-50mm/h, συμπεριλαμβάνονται τα μπουρίνια
- **Βίαιη – Καταρρακτώδεις:** >50mm/h, για βροχοπτώσεις που αντιστοιχούν σε ακραία καιρικά φαινόμενα

3.3 Βροχοπτώσεις στην Ελλάδα

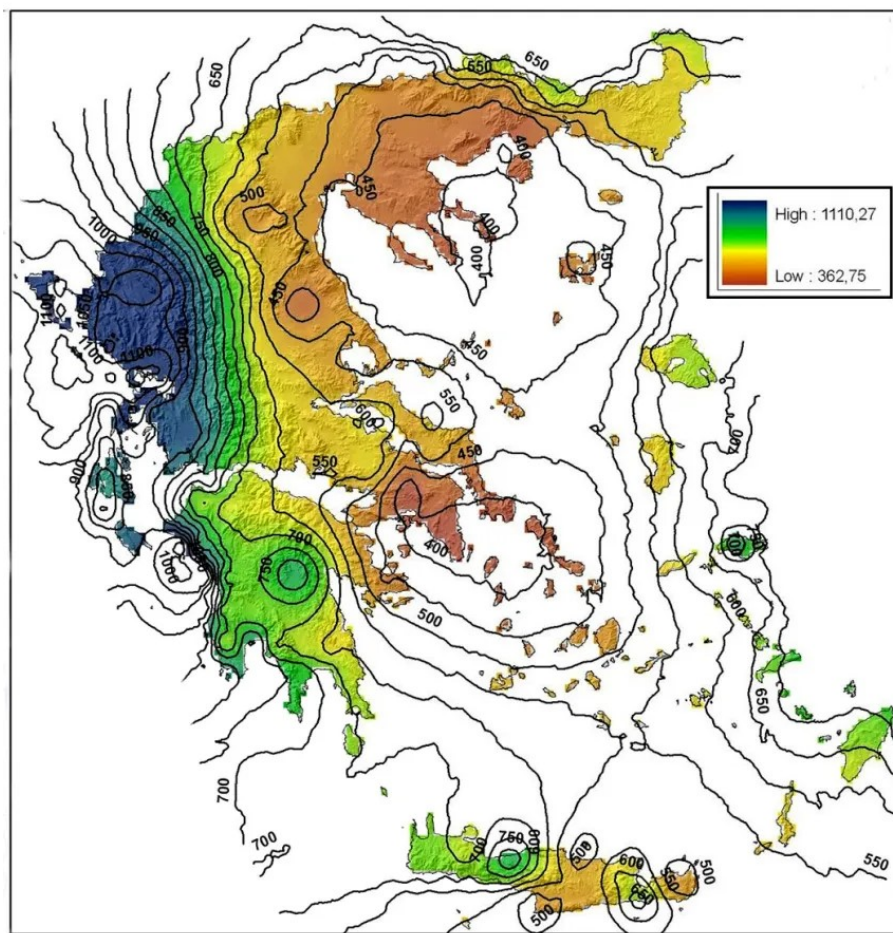
Η βροχόπτωση ανήκει στις σημαντικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους που επηρεάζουν και χαρακτηρίζουν τοπικά τα κλιματικά χαρακτηριστικά (τοπικό κλίμα). Οι ποσότητες βροχής και η γεωγραφική κατανομή τους στην Ελλάδα έχουν αποτελέσει αντικείμενο έρευνας από πολλούς ερευνητές τα τελευταία χρόνια. Η ξηρασία κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και η βροχερή περίοδος από τα μέσα του φθινοπώρου έως τα μέσα της άνοιξης, που χαρακτηρίζει τα μεσογειακά παράλια, συνθέτουν το κλίμα της περιοχής. Παρόλα αυτά, η γεωγραφική θέση της Ελλάδας, η περιβαλλοντική της διαμόρφωση με τη θάλασσα γύρω της, και η ύπαρξη υψηλών οροσειρών διαφόρων κατευθύνσεων συνδυάζονται, προκαλώντας ανομοιογένεια στην κατανομή και το ύψος της βροχής σε διάφορες περιοχές της χώρας. Η γεωγραφική κατανομή των βροχοπτώσεων ακολουθεί την τοπογραφία της Ελλάδας, επομένως, παρατηρούνται πιο έντονες και διαρκείς βροχοπτώσεις στο βόρειο και δυτικό τμήμα.

Οι θερμές και υγρές αέριες μάζες που κινούνται από τα δυτικά προς τα ανατολικά, αλλά και εκείνες του νότιου τομέα που συναντούν τις οροσειρές, η κατεύθυνση των

οποίων από βορρά προς νότο είναι σχεδόν κάθετη προς τη ροή των ανέμων, όταν ανυψώνονται στην ομβροπλευρά των βουνών, ψύχονται και απελευθερώνουν τη μεγαλύτερη ποσότητα βροχής στα προσήνεμα μέρη των βουνών. Περνώντας τις κορυφογραμμές οι αέριες μάζες δεν υφίστανται πλέον ανύψωση, αντίθετα κατολισθαίνουν και θερμαίνονται, δίνοντας μικρότερη ποσότητα βροχής στα υπήνεμα μέρη (ομβροσκιά). (Βουδουρή, 2018)

Όσον αφορά τις οροσειρές που διασχίζουν τη χώρα, τα ετήσια ύψη βροχής παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις. Στην Πίνδο, το μέσο ετήσιο ύψος βροχής υπερβαίνει τα 2.200 χιλιοστά, ενώ στα Λευκά Όρη της Κρήτης φτάνει τα 1.800 χιλιοστά και στα βουνά της Πελοποννήσου φθάνει τα 1.600 χιλιοστά. Σε αντίθεση, οι περιοχές της ανατολικής Πελοποννήσου, της Αττικής και του Σαρωνικού κόλπου χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες τιμές ύψους βροχής, λιγότερες από 400 χιλιοστά. Στα νησιά του Ιονίου, η βροχόπτωση κυμαίνεται μεταξύ 1.000 και 1.400 χιλιοστών, ενώ στα δυτικά παράλια της Ηπείρου κυμαίνεται μεταξύ 1.000 και 1.200 χιλιοστών, με αυξανόμενη τάση προς τα ορεινά και μειούμενη προς τις ανατολικές υπήνεμες πλευρές των οροσειρών. Σε περιοχές όπως η Ανατολική Μακεδονία, η Θράκη και η Κρήτη, παρατηρείται αύξηση του ύψους της βροχής προς το εσωτερικό, ενώ στις παράκτιες περιοχές του Αιγαίου σημειώνεται μειωμένη βροχόπτωση. (Ζερεφός κ.ά., 2011)

Πέρα από τη γεωγραφική κατανομή των βροχοπτώσεων, η κατανομή του ετήσιου ύψους βροχής κατά τις διάφορες εποχές είναι εξίσου σημαντική. Καταγράφεται ότι κατά τη διάρκεια των μηνών της ψυχρής περιόδου του έτους, η κατανομή του μέσου ετήσιου ύψους βροχής είναι σχεδόν ομοιόμορφη, με την ποσότητα βροχής να αυξάνεται από το φθινόπωρο προς το χειμώνα και να μειώνεται προς την άνοιξη. Κατά τη θερινή περίοδο, οι βροχές είναι σπάνιες, ενώ όταν συμβαίνουν, πρόκειται συχνά για τοπικές θερμικές καταιγίδες. Αν και συνήθως διαρκούν για μικρό χρονικό διάστημα, μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ποσότητες βροχής. (Ζερεφός κ.ά., 2011)



Εικόνα 3.1: Απεικόνιση των ετήσιων ύψων βροχής στην Ελλάδα (Πηγή: Meteo)

Η πορεία των ετήσιων ημερών βροχής ακολουθεί εκείνη του ετήσιου ύψους βροχής. Παρατηρούνται λοιπόν, αυξητικές τάσεις από τα δυτικά παράλια προς το εσωτερικό με μέγιστο στις κεντρικές οροσειρές και ελαττώνονται προς τα παράλια του Αιγαίου, όπου σημειώνεται και ο ελάχιστος ετήσιος αριθμός ημερών βροχής. (Ζερεφός κ.ά., 2011)

Κατά τη διάρκεια του έτους, το ετήσιο ύψος της βροχής στην Ελλάδα υφίσταται σημαντικές μεταβολές από έτος σε έτος, με το μέσο ύψος της ετήσιας βροχόπτωσης να φτάνει περίπου τα 800 χιλιοστά. Αναλύσεις δεδομένων βροχής που προέρχονται από πολλούς βροχομετρικούς σταθμούς σε όλη τη χώρα, καλύπτοντας το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα, αποκαλύπτουν ότι υπάρχει τάση μείωσης της βροχόπτωσης. Σε ορισμένες περιοχές, αυτή η μείωση είναι στατιστικά σημαντική. Για παράδειγμα, για την περίοδο 1961-1990, παρατηρήθηκε πτώση της μέσης χειμερινής βροχόπτωσης κατά περίπου 60 χιλιοστά βροχής (περίπου 20%), με τη μεγαλύτερη μείωση στη δυτική Ελλάδα και τη μικρότερη στην Αθήνα και το νότιο Αιγαίο. Η τάση αυτή παρατηρείται όχι μόνο στην Ελλάδα αλλά και σε ολόκληρη την Ανατολική Μεσόγειο, με διαφοροποιήσεις ανά περιοχή και έντονη μεταβλητότητα από έτος σε έτος. Αυτή η ποικιλομορφία μπορεί να αποδοθεί σε παράγοντες όπως η τοπογραφία και οι

μεταβολές στην ατμοσφαιρική κυκλοφορία στην ευρύτερη περιοχή. (Maheras et al., 2004)

3.4 Μέγιστα παγκόσμια ύψη βροχής

Η καταγραφή των βροχοπτώσεων στον πλανήτη είναι δεδομένη. Από τη βάση δεδομένων που υπάρχει έχουν εντοπιστεί κάποιες μέγιστες τιμές βροχόπτωσης για σε συγκεκριμένη διάρκεια και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Όπως αναφέρεται το μέγιστο ετήσιο μέσο όρο βροχής καταγράφεται στην περιοχή της Ινδίας Mawsynram με ύψος 11870mm νερού. Σε διάρκεια ενός χρόνου το μεγαλύτερο ύψος βροχής έχει καταγραφεί στο Cherrapunji της Ινδίας και ανέρχεται σε 26470mm. Για 1 μήνα η υψηλότερη ποσότητα νερού που έχει καταγραφεί είναι επίσης στο Cherrapunji της Ινδίας με 9296mm. Η ένταση στις αναφερθείσες τιμές δεν έχει κάποιο ενδιαφέρον καθώς αντιστοιχεί σε αθροιστικές ποσότητες νερού από διαφορετικά φαινόμενα στο συγκριμένο χρονικό διάστημα. Στο νησί Foc Foc έχει καταγραφεί το μεγαλύτερο ύψος βροχής σε διάρκεια 24 ωρών να είναι 1820mm καθώς και σε διάρκεια 12 ωρών με το ύψος βροχής να φτάνει τα 1140mm. Στην πρώτη περίπτωση η ένταση της βροχής υπολογίζεται στα 75,8mm/h ενώ στην δεύτερη περίπτωση υπολογίζεται στα 95mm/h. Εντάσεις που αντιστοιχούν σε καταρρακτώδεις βροχοπτώσεις. Τέλος η υψηλότερη ένταση που έχει καταγραφεί στα χρονικά είναι στο Unionville της Αμερικής όπου ο μετεωρολογικός σταθμός κατέγραψε 31.2mm σε διάρκεια 1 λεπτού που σημαίνει ένταση 1872mm/h. Μία τέτοια ένταση με μεγάλη διάρκεια είναι αντιληπτό ότι μπορεί να είναι καταστροφική σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 3: Υψηλότερα Ύψη Βροχής Παγκοσμίως που έχουν καταγραφεί

| | Ήπειρος | Περιοχή | Ποσότητα (mm) | Ένταση (mm/h) |
|--|-----------------|----------------------|---------------|---------------|
| Υψηλότερος Ετήσιος Μέσος Όρος Βροχή | Ασία | Mawsynram, Ινδία | 11870 | 1,36 |
| Υψηλότερο Ύψος Βροχής σε 1 Χρόνο | Ασία | Cherrapunji, Ινδία | 26470 | 3,02 |
| Υψηλότερο Ύψος Βροχής σε 1 Μήνα | Ασία | Cherrapunji, Ινδία | 9296 | 12,91 |
| Υψηλότερο Ύψος Βροχής σε 24 Ώρες | Ινδικός Ωκεανός | Foc Foc, La Reunion | 1820 | 75,83 |
| Υψηλότερο Ύψος Βροχής σε 12 Ώρες | Ινδικός Ωκεανός | Foc Foc, La Reunion | 1140 | 95 |
| Υψηλότερο Ύψος Βροχής σε 1 Λεπτό | Αμερική | Unionville, Maryland | 31,2 | 1872 |

3.5 Ακραίες βροχοπτώσεις στην Ελλάδα

Ορίζουμε ως ακραίο κλιματικό φαινόμενο την εμφάνιση μιας ασυνήθιστης κατάστασης, κατά την οποία μια κλιματική παράμετρος ή συνδυασμός πολλών παραμέτρων, όπως η βροχή, υπερβαίνει ένα καθορισμένο κατώφλι. Αυτό το κατώφλι συνήθως καθορίζεται σε τοπική κλίμακα για συγκεκριμένη χρονική περίοδο και συνήθως επιφέρει σημαντικές κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι βροχοπτώσεις σε κλίμακα ακραίου φαινομένου είναι ένα χαρακτηριστικό του μεσογειακού κλίματος που χαρακτηρίζει την Ελλάδα. Η συχνότητά τους όμως έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια και αυτό σύμφωνα με τους ειδικούς είναι ένα αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής που μαστίζει τον πλανήτη. Τα κλίματα που χαρακτηρίζουν την κάθε περιοχή του κόσμου τείνουν να μεταβληθούν λόγω της κλιματικής κρίσης, κάτι το οποίο θα έχει σημαντικό αντίκτυπο στην κοινωνία, την οικονομία αλλά και στον γεωτεχνικό κλάδο καθώς τα δεδομένα συνθηκών που κατασκευάζονται τα έργα αλλάζουν.

Τον Σεπτέμβριο του 2023 παρατηρήθηκαν στην Ελλάδα βροχοπτώσεις πρωτόγνωρες για τα δεδομένα της χώρας αλλά και της Ευρώπης. Γνωστές ως Daniel και Elias οι κακοκαιρίες έπληξαν τη νοτιοανατολική Μεσόγειο καθώς και χώρες της βόρειας Αφρικής όπως η Λιβύη. Το αποτέλεσμα, τεράστιες εκτάσεις πλημμυρισμένες, εκτεταμένες ζημιές σε οικισμούς καθώς ολόκληρα χωριά βρέθηκαν κάτω από το νερό, οδικό και σιδηροδρομικό δίκτυο υπέστη ζημιές μεγάλου εύρους, κατολισθήσεις έλαβαν χώρα σε ορεινές τοποθεσίες με αποτέλεσμα την αποκοπή οικισμών για παροχή βοήθειας. Σημαντικότερη επίπτωση όμως η απώλεια ανθρώπινων ζώων καθώς και ζώων που καταγράφηκε από τις ακραίες βροχοπτώσεις.

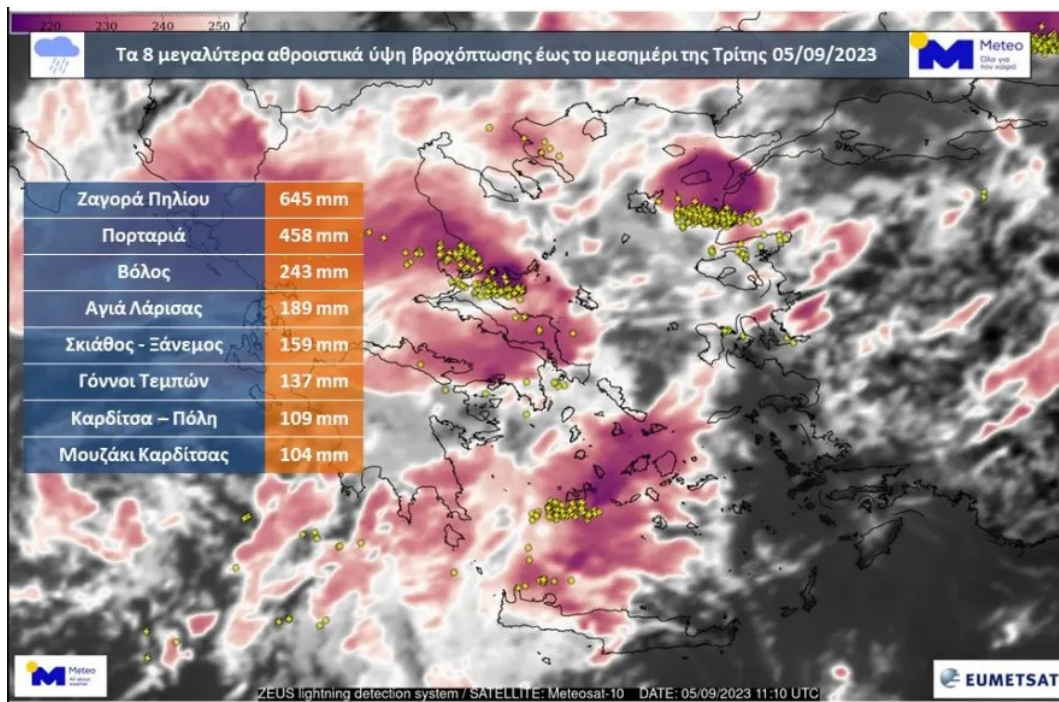
Στον ακόλουθο Πίνακα 3.2 καταγράφονται μερικά από τα πιο σημαντικά ακραία καιρικά φαινόμενα που έχουν καταγραφεί τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα. Σημαντικές παράμετροι η ποσότητα του νερού που καταγράφηκε καθώς και σε πόσο χρόνο έτσι ώστε να υπολογισθεί η ένταση της βροχόπτωσης. Από τον πίνακα παρατηρείται ότι η κακοκαιρία Daniel είχε ένταση 52.8 mm/h στη περιοχή της Ζαγοράς στο Πήλιο όπου ήταν και η μεγαλύτερη που καταγράφηκε. Η ένταση αυτή αντιστοιχεί στην 4^η κατηγορία της βίαιης βροχόπτωσης. Στην αντίστοιχη κατηγορία κατατάσσεται και η κακοκαιρία Θάλεια όπου στην ευβοια καταγράφηκαν 350 χιλιοστά νερού σε διάρκεια 6 ωρών, δηλαδή έντασης 58.3 mm/h. Στην 3^η κατηγορία αυτή της ισχυρής βροχόπτωσης περιλαμβάνονται οι υπόλοιπες κακοκαιρίες όπως η κακοκαιρία Elias που στον Βόλο καταγράφηκαν 202 χιλιοστά νερού σε 6 ώρες (ένταση: 33.7mm/h), η κακοκαιρία Μπάλος όπου στην Αθήνα δημιουργήθηκαν εκτεταμένα προβλήματα στη λειτουργία της πόλεως με καταγεγραμμένα 111.8 χιλιοστά νερού σε διάρκεια περίπου 3 ωρών (ένταση: 33.9mm/h).

Πίνακας 4: Ακραίες βροχοπτώσεις που καταγράφηκαν στην Ελλάδα το διάστημα 2020 - 2023

| Έτος | Μήνας | Περιοχή | Ποσότητα (mm) | Διάρκεια (h) | Ένταση (mm/h) | Ένταση (m/s) | Όνομα |
|------|-------|----------|---------------|--------------|---------------|--------------|------------|
| 2023 | 9 | Βόλος | 202 | 6 | 33,7 | 9,4E-06 | Elias |
| 2023 | 9 | Ζαγορά | 528 | 10 | 52,8 | 1,5E-05 | Daniel |
| 2022 | 10 | Σητεία | 281,8 | 12 | 23,5 | 6,5E-06 | - |
| 2022 | 7 | Καλαμάτα | 77 | 3 | 25,7 | 7,1E-06 | (Μπουρίνι) |
| 2021 | 10 | Αθήνα | 111,8 | 3,3 | 33,9 | 9,4E-06 | Μπαλος |
| 2021 | 2 | Έβρος | 175,5 | 8,5 | 20,6 | 5,7E-06 | - |
| 2021 | 1 | Έβρος | 198,5 | 7,5 | 26,5 | 7,4E-06 | - |
| 2020 | 8 | Έυβοια | 350 | 6 | 58,3 | 1,6E-05 | Θάλεια |

3.6 Κακοκαιρία Daniel



Η κακοκαιρία Daniel έλαβε χώρα το χρονικό διάστημα 04/09/2023 – 08/09/2023 στην Ελλάδα. Η έξαρση του φαινομένου έγινε στις 5 και 6 του μήνα όπου καταγράφηκαν τα μεγαλύτερα ύψη βροχής. Στην ακόλουθη Εικόνα 3.2 παρουσιάζονται τα 8 μεγαλύτερα αθροιστικά ύψη βροχής που καταγράφηκαν έως το μεσημέρι της 05/09 σε διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς της Θεσσαλίας σύμφωνα με το Meteo. Πιο συγκεκριμένα το μεγαλύτερο ύψος καταγράφηκε στη Ζαγορά Πηλίου 645mm ενώ το αμέσως επόμενο ήταν στη Πορταριά ύψους βροχής 458mm. Ακολουθεί η πόλη του Βόλου με 243mm ο σταθμός της Αγίας Λάρισας με 189mm, το νησί της Σκιάθου με 159mm, η περιοχή των Τεμπών με 137mm, η πόλη της Καρδίτσας με 109mm και το Μουζάκι με 104mm. Σημαντικό να σημειωθεί ότι οι περιοχές αυτές σύμφωνα με τα ετήσια στοιχεία βροχόπτωσης δέχονται ποσότητες που δεν ξεπερνούν τα 500mm ετησίως.



Εικόνα 3.2: Τα 8 μεγαλύτερα ύψη βροχόπτωσης έως το μεσημέρι της 05/09 κατά τη διάρκεια της κακοκαιρίας Daniel (Πηγή: Meteo)

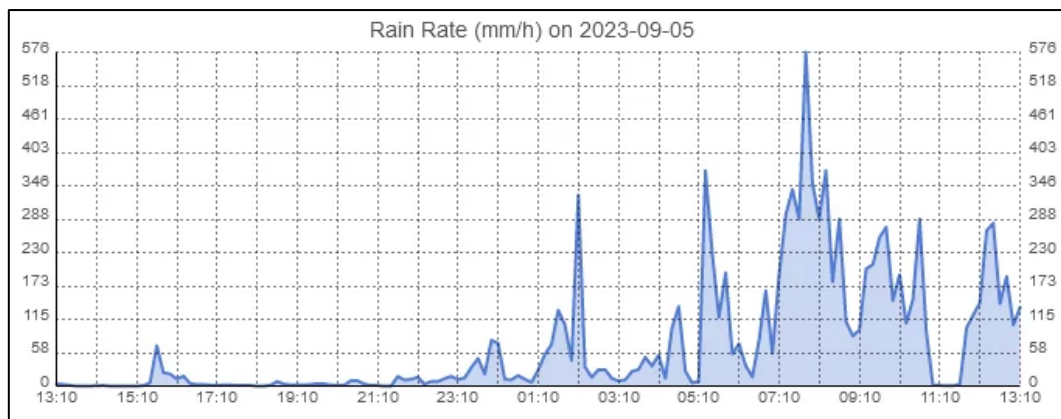
Στην εικόνα 3.3 παρουσιάζονται από το Meteo τα αθροιστικά ημερήσια χιλιοστά νερού που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της κακοκαιρίας Daniel. Η σφοδρότητα της κακοκαιρίας προκάλεσε ζημιές σε διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς και για αυτό κάποιες μετρήσεις είναι με κόκκινο χρώμα. Ενδιαφέρον παρουσιάζονται στις τιμές που καταγράφηκαν στη Ζαγορά και Πορταριά Πηλίου στις 05/09 όπου η ποσότητα του νερού που έπεσε αγγίζει τα 760 mm καθώς και η πόλη του Βόλου κατέγραψε 450 mm την ίδια μέρα. Αντίστοιχα στον κάμπο της Θεσσαλίας τα μεγαλύτερα ύψη έπεσαν στις 06/09 με τον σταθμό της Καρδίτσας να καταγράφει 404 χιλιοστά νερού, την Πεζούλα Καρδίτσας να καταγράφει 378mm και το Μουζάκι 322mm. Τιμές που αντιστοιχούν στις ετήσιες ποσότητες νερού που καταγράφονται στην περιοχή από βροχοπτώσεις. Εξίσου ενδιαφέρον έχουν και οι τελικές αθροιστικές ποσότητες νερού που καταγράφηκαν στους μετεωρολογικούς σταθμούς κατά τη διάρκεια της κακοκαιρίας με την μεγαλύτερη τιμή να καταγράφεται στη Ζαγορά και να είναι 1096mm και να ακολουθεί ο σταθμός της Πορταριάς ο οποίος λόγω βλάβης κατέγραψε 885mm. Μπορεί να θεωρηθεί όμως λόγω της κοντινής απόστασης από το σταθμό της Ζαγορά ότι οι ποσότητες είναι παρόμοιες δηλαδή κοντά στα 1000mm νερού αθροιστικά. Στη συνέχεια οι μεγαλύτερες ποσότητες καταγράφηκαν στον κάμπο της Θεσσαλίας και συγκεκριμένα στους σταθμούς της Πεζούλας Καρδίτσας με 762mm και στην πόλη της Καρδίτσας με 659mm. Στο Περούλη και στο Βόλο ο μετεωρολογικός σταθμός υπέστη βλάβη και κατέγραψε 643 και 617 mm αντίστοιχα τιμές οι οποίες στην πραγματικότητα είναι αρκετά υψηλότερες. Στο Μουζάκι το

αθροιστικό ύψος νερού που μετρήθηκε είναι 598mm στη διάρκεια της κακοκαιρίας. Όλες οι τιμές που αναφέρθηκαν είναι πολύ παραπάνω ακόμα και διπλάσιες των ετήσιων τιμών βροχόπτωσης που καταγράφονται στην περιοχή αντιλαμβάνοντας την σφοδρότητα της κακοκαιρίας και των συνεπειών της.

|  Τα ύψη βροχόπτωσης (mm) της κακοκαιρίας DANIEL στη Θεσσαλία  | | 04/09/2023 | 05/09/2023 | 06/09/2023 | 07/09/2023 | 08/09/2023 | Συνολικά |
|--|--|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| Ζαγορά Πηλίου | | 134,6 | 759,6 | 3,8 | 197,6 | 0,6 | 1096,2 |
| Πορταριά Πηλίου ¹ | | 108,2 | 761,9 | 14,4 | 0 | 0 | 884,5 |
| Πεζούλα Καρδίτσας | | 43,2 | 250 | 378,4 | 90,8 | 0 | 762,4 |
| Καρδίτσα – Πόλη | | 42,4 | 185,2 | 404,4 | 26,8 | 0 | 658,8 |
| Περτούλι Χ/Κ ² | | 0,6 | 58,6 | 415,2 | 165,8 | 2,4 | 642,6 |
| Βόλος ³ | | 35,2 | 450,8 | 121 | 10,4 | 0 | 617,4 |
| Μουζιάκι | | 23,8 | 163,8 | 321,8 | 89 | 0 | 598,4 |
| Κωφοί Μαγνησίας | | 23,4 | 152,6 | 342,2 | 32,2 | 0 | 550,4 |
| Τρίκαλα | | 17,6 | 116,6 | 256,8 | 86,4 | 0 | 477,4 |
| Χαλκιάδες Φαρσάλων | | 19,4 | 205,6 | 223,2 | 17,8 | 0 | 466 |
| Σκιάθος – Ξάνεμος | | 42,4 | 321,8 | 0,8 | 33,6 | 0 | 398,6 |
| Νεράιδα Φαρσάλων | | 19,6 | 226,6 | 99,2 | 23,8 | 0 | 369,2 |
| Καλαμπάκα | | 10,8 | 94,2 | 165,8 | 85,2 | 0,2 | 356,2 |
| Αγιά Λάρισας | | 11,2 | 218,6 | 15,4 | 90,6 | 0 | 335,8 |
| Λάρισα – Χάληη | | 25,2 | 180,8 | 68,8 | 30,4 | 0,2 | 305,4 |
| Αλόνησος | | 25,4 | 216,2 | 0 | 40,8 | 0 | 282,4 |
| Γόννοι Τεμπών | | 14 | 147,4 | 31,4 | 71,2 | 0,2 | 264,2 |
| Σμόκοβο Καρδίτσας ⁴ | | 40,2 | 97 | 89,4 | — | — | 226,6 |
| Σκόπελος ⁵ | | — | — | — | — | — | 218,8 |
| Πλατανούλια Λάρισας | | 18,6 | 75,4 | 91,2 | 25,4 | 0 | 210,6 |
| Πλατύκαμπος Λάρισας | | 20,8 | 107,6 | 0,4 | 76,4 | 1,4 | 206,6 |
| Δέντρα Τυρνάβου | | 19,2 | 86,4 | 64,8 | 22,8 | 0 | 193,2 |
| Γλώσσα Σκοπέλου | | 49 | 104,4 | 0,4 | 15 | 0,2 | 169 |
| Νέσσω Τεμπών | | 11,6 | 78 | 3,6 | 71,6 | 0,2 | 165 |
| Ελασσόνα | | 26,4 | 72,2 | 19,6 | 40,8 | 0 | 159 |

Εικόνα 3.3: Ύψη βροχής (mm) της κακοκαιρίας Daniel (Πηγή: Meteo)

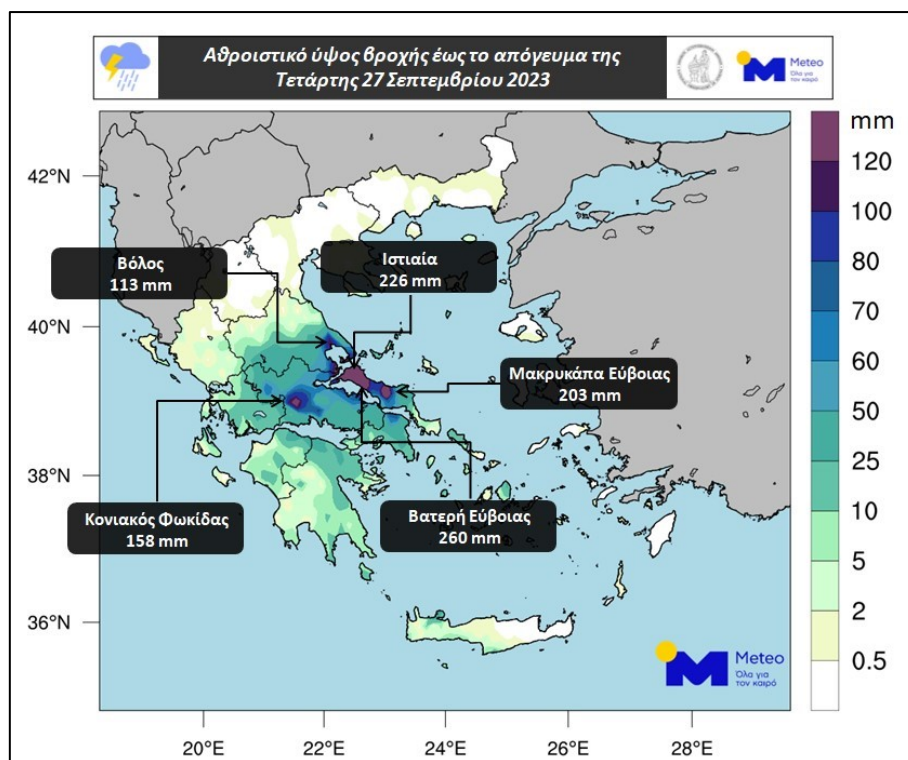
Στην Εικόνα 3.4 παρουσιάζεται η ένταση της βροχής συναρτήσει του χρόνου που καταγράφηκε από τον μετεωρολογικό σταθμός της Ζαγορά από το μεσημέρι της 04/09/2023 έως το μεσημέρι της 05/09/2023 τη μέρα της έξαρσης της κακοκαιρίας Daniel στη περιοχή της Μαγνησίας. Ο σταθμός κατέγραψε υψηλές τιμές έντασης βροχής, υπερβαίνοντας τα 50mm/h για μεγάλο χρονικό διάστημα, ταξινομούμενα στην κατηγορία της βίαιης βροχόπτωσης. Ενδεικτικά, η ένταση φτάνει ακόμα και τα 576mm/h σε στιγμιαίες περιόδους. Επιπλέον, παρατηρούνται ακραίες τιμές μετρήσεων, φτάνοντας τα 300 - 350 mm/h, υπερβαίνοντας σημαντικά το κάτω όριο της κατηγορίας βίαιων βροχοπτώσεων. Τα εν λόγω δεδομένα αποκαλύπτουν την εξαιρετική ένταση της βροχής κατά τη διάρκεια του καιρικού φαινομένου, αναδεικνύοντας τη σοβαρότητα της κατάστασης στην περιοχή.



Εικόνα 3.4: Δεδομένα Μετεωρολογικού Σταθμού Ζαγοράς (Πηγή: Meteo)

3.7 Κακοκαιρία Elias

Στις 25/09/2023 έως τις 28/09/2023 εξελίσσεται η κακοκαιρία Elias για την οποία αναμενότουσαν παρόμοια χαρακτηριστικά με την κακοκαιρία Daniel. Πράγματι τα ύψη βροχής ήταν αρκετά υψηλά σε ορισμένες περιοχές όχι όμως σαν της Daniel. Στην εικόνα 3.6 παρουσιάζονται οι ποσότητες νερού που καταγράφηκαν από τις 2 κακοκαιρίες σε περιοχές της Θεσσαλίας και της Εύβοιας. Από τις καταγραφές της μετεωρολογικής υπηρεσίας παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες ποσότητες έπεσαν στην Ιστιαία της βόρειας Εύβοιας όπου καταγράφηκαν 494mm νερού. Στην συγκεκριμένη περιοχή το ύψος βροχής είναι μεγαλύτερο από αυτό της Daniel (355mm). Ακολουθούν ο σταθμός των Ωραιών Ευβοίας όπου καταγράφηκαν 387mm νερού και ο Βόλος με 316mm νερού. Τα ύψη βροχής μπορεί να είναι χαμηλότερα από την κακοκαιρία Daniel ωστόσο παραμένουν πολύ υψηλά για τα δεδομένα της περιοχής και για αυτό το λόγω προκάλεσαν αρκετά προβλήματα στις τοπικές κοινωνίες.



Εικόνα 3.5: Αθροιστικά Ύψη Βροχής Κακοκαιρίας Elias έως 27/09/2023 (Πηγή: Meteo)

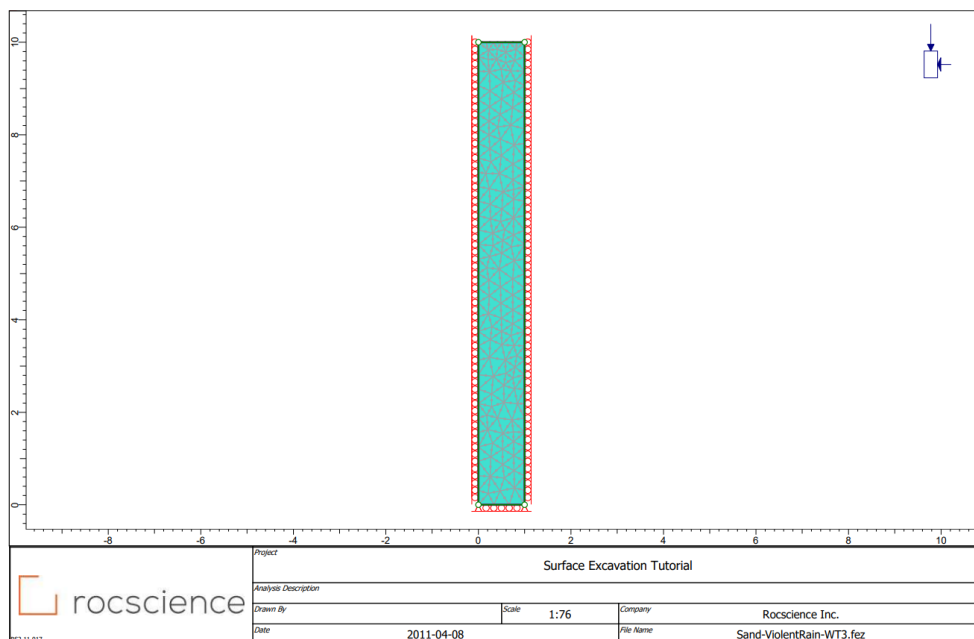
| Σταθμός | Αθροιστικά ύψη βροχής (mm) | |
|-------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| | Κακοκαιρία Daniel 04-08/09/2023 | Κακοκαιρία Elias 25-28/09/2023** |
| Περτούλι | 643* | 205 |
| Πεζούλα Καρδίτσας | 762 | 241 |
| Τρίκαλα | 477 | 143 |
| Καρδίτσα – πόλη | 656 | 130 |
| Λάρισα – Χάλκη | 305 | 65 |
| Ζαγορά | 1096 | 96 |
| Βόλος | 617 | 316 |
| Ιστιαία | 355 | 494 |
| Ωρεσί Ευβοίας | 447 | 387 |
| Βατερή Ευβοίας | 149 | 274*** |
| Μακρυκάπα Ευβοίας | 153 | 254 |
| Στενή Ευβοίας | 192 | 126 |

Εικόνα 3.6: Αθροιστικά Ύψη Βροχής Κακοκαιρίας Daniel & Elias (Πηγή: Meteo)

4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

4.1 Γεωμετρία Προσομοίωσης

Για την προσομοίωση επιλέγεται μία απλή γεωμετρία έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει μονοδιάστατη ανάλυση. Μία στήλη εδάφους ύψους 10m και πλάτους 1m θεωρείται κατάλληλη για τις απαιτήσεις του προβλήματος. Στην Εικόνα 4.1 παρουσιάζεται το μοντέλο που έχει σχεδιαστεί στο λογισμικό RS2 για τις αναλύσεις.



Εικόνα 4.1: Προσομοίωμα στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2

4.2 Στοιχεία Ανάλυσης

Έγινε προκαταρκτικά μια σύγκριση μεταξύ των λογισμικών RS2 της Rocscience και Plaxis της Seequent ως προς την καταλληλότητά τους για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στο παράρτημα Α. Με την κατάλληλη προσοχή ώστε να εφαρμόζονται οι αντίστοιχες συνθήκες στα δύο λογισμικά τα τελικά αποτελέσματα είναι παρεμφερή. Τελικώς επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό RS2 καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη ευκολία για το χρήστη, δίνει περισσότερες επιλογές για την περαιτέρω διερεύνηση της μη κορεσμένης ζώνης και μερικές καλύτερες δυνατότητες στον τρόπο μέτρησης των παραμέτρων που εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία.

Τα στοιχεία είναι τριγωνικά 6 κόμβων (6 Noded Triangles) και η πυκνότητα του κανάβου είναι μέτρια και σε κάποιες περιπτώσεις πιο πυκνή στο άνω όριο. Η ανάλυση αφορά αποκλειστικά την υπόγεια ροή των υδάτων συναρτήσει του χρόνου

και όχι τη μηχανική συμπεριφορά του υλικού, γι' αυτό το λόγο η μέθοδος ανάλυσης που επιλέγεται είναι Transient FEM και το αρχικό στάδιο Steady State.

4.3 Χαρακτηριστικά Εδαφών

Επιλέγονται 3 βασικοί τύποι εδαφών για τις προσομοιώσεις. Η άμμος, η ιλύς και η άργιλος θεωρούνται τα κατάλληλα υλικά για να καλύψουν την γκάμα εδαφικών χαρακτηριστικών που υπάρχουν. Για αναλύσεις υπογείων υδάτων (groundwater analysis) που διεξάγονται στα πλαίσια της συγκεκριμένη διπλωματικής τα μηχανικά χαρακτηριστικά δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν. Αντιθέτως τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των εδαφών είναι αυτά με την κυριότερη σημασία για τις συγκεκριμένες αναλύσεις.

Το λογισμικό RS2 της Rocscience παρέχει ποικιλία σε υδραυλικά μοντέλα για την περιγραφή της μη κορεσμένης ζώνης των υλικών. Για τις αναλύσεις που διεξάγονται επιλέγεται το υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten, ένα μοντέλο ευρέως διαδομένο στον τομέα της γεωτεχνικής μηχανικής και χρησιμοποιείται και σε διαφορετικά λογισμικά πεπερασμένων στοιχείων ως μοναδικό όπως στο Plaxis.

Ο Van Genuchten (1978, 1980) περιέγραψε την χαρακτηριστική καμπύλη της εδαφικής υγρασίας με την παρακάτω εξίσωση:

$$S_e = \frac{1}{[1+(a \times h)^n]^m} \quad [1]$$

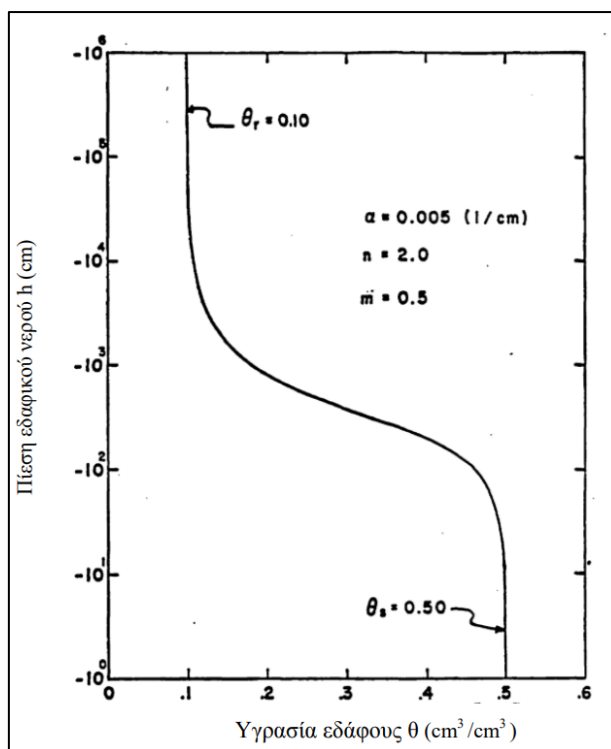
όπου α , n , και m είναι παράμετροι προσαρμογής. Η παράμετρος α προκαλεί παράλληλη μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης χωρίς να αλλοιώνει της μορφή της, εφόσον οι άλλες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Η παράμετρος n είναι υπεύθυνη για την παραμόρφωση της καμπύλης. Η παράμετρος m δίνεται από την εξίσωση 2 (Σακελλαρίου-Μακραντωνάκη, 1986).

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad [2]$$

Από την σχέση (1) προκύπτει για την εδαφική υγρασία η σχέση:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(a \times h)^n]^m} \quad [3]$$

Μια τυπική καμπύλη $\theta(h)$ που βασίζεται στην σχέση (3) και δείχνει την σχέση της περιεχόμενης εδαφικής υγρασίας (moisture content) με το ύψος πίεσης (pressure head) εμφανίζεται στην Εικόνα 4.2. Η καμπύλη είναι σιγμοειδής και η κλίση ($d\theta/dh$) γίνεται μηδενική όταν η υγρασία προσεγγίζει είτε την υγρασία κορεσμού θ_s είτε την υπολειμματική υγρασία θ_r .



Εικόνα 4.2: Τυπική καμπύλη υγρασίας βασισμένη στην εξίσωση (3.38) (van Genuchten, 1980).

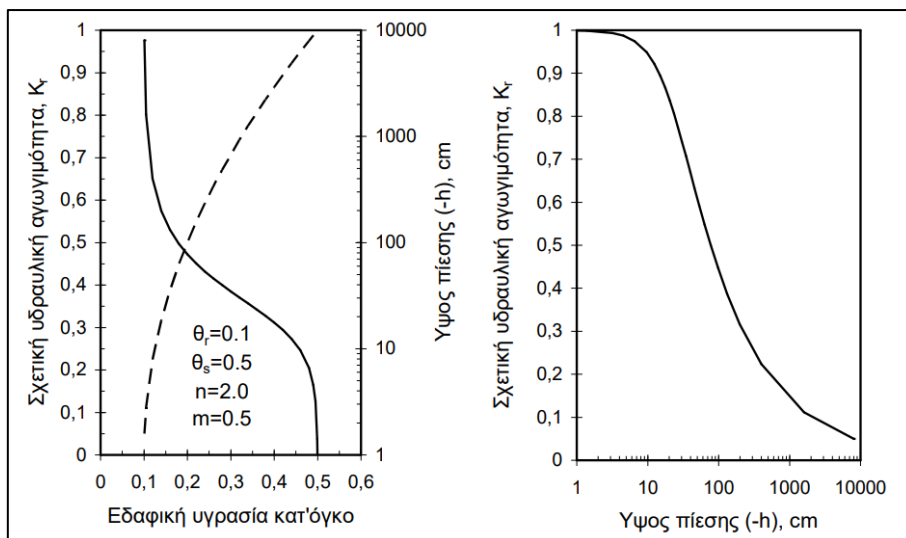
Όσον αφορά την υδραυλική αγωγιμότητα στην μη κορεσμένη ζώνη (ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα) ο Van Genuchten έδωσε την ακόλουθη σχέση:

$$K = K_s(\sqrt{S_e}[1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2) \quad [4]$$

Η εξίσωση (4) είναι μια σχέση που χρησιμοποιείται ευρύτατα τις τελευταίες δεκαετίες γιατί απαιτεί να είναι γνωστές μόνο οι παράμετροι της χαρακτηριστικής καμπύλης της εδαφικής υγρασίας. Η εξίσωση της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να εκφραστεί και ως προς το ύψος πίεσεως, αν αντικατασταθεί η μεταβλητή S_e από την εξ. (1) στην εξίσωση (4).

$$K(h) = K_s\{1 - (\alpha h)^{n-1} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}\} / \{1 + (\alpha h)^n\}^{m/2} \quad [5]$$

Στην Εικόνα 4.3 δίνεται η καμπύλη της υδραυλικής αγωγιμότητας ενός υποθετικού εδάφους και οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης του Van Genuchten.



Εικόνα 4.3: Καμπύλη της υδραυλικής αγωγιμότητας του τυπικού εδάφους ως προς α) την εδαφική υγρασία και β) το ύψος πίεσης.

Οι Carsel and Parrish (1988) χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων της SCS έδωσαν για τις 12 κλάσεις των εδαφών ως προς τη μηχανική σύσταση, τις παρακάτω μέσες τιμές (Πίνακας 4.1) για τις παραμέτρους της συνάρτησης του Van Genuchten και την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα.

Πίνακας 5: Παράμετροι της εξίσωσης του van Genuchten (Carsel & Parrish, 1988)

| Κλάση | Θ_s | Θ_r | K_s (m/day) | a (1/m) | n |
|-----------------|------------|------------|---------------|-----------|------|
| Sand | 0.43 | 0.045 | 7.13 | 14.5 | 2.68 |
| Loamy sand | 0.41 | 0.057 | 3.5 | 12.4 | 2.28 |
| Sandy loam | 0.41 | 0.065 | 1.06 | 7.5 | 1.89 |
| Loam | 0.43 | 0.078 | 0.25 | 3.6 | 1.56 |
| Silt | 0.46 | 0.034 | 0.6 | 1.6 | 1.37 |
| Silt loam | 0.45 | 0.067 | 0.108 | 2 | 1.41 |
| Sandy Clay loam | 0.39 | 0.100 | 0.314 | 5.9 | 1.48 |
| Clay loam | 0.41 | 0.095 | 0.624 | 1.9 | 1.31 |
| Silty clay loam | 0.43 | 0.089 | 0.168 | 1 | 1.23 |
| Sandy clay | 0.38 | 0.100 | 0.288 | 2.7 | 1.23 |
| Silty clay | 0.36 | 0.070 | 0.00475 | 0.5 | 1.09 |
| Clay | 0.38 | 0.068 | 0.0475 | 0.8 | 1.09 |

Για τις αναλύσεις επιλέγονται 3 διαφορετικά υλικά όπως έχει αναφερθεί και αυτά είναι η άμμος (sand) η ιλύς (Silt) και η Άργιλος (Clay). Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται αυτά τα 3 υλικά με τις αντίστοιχες παραμέτρους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Πίνακας 6: Υλικά προσομοιώσεων μαζί με τις παραμέτρους τους απο Carsel & Parrish 1988

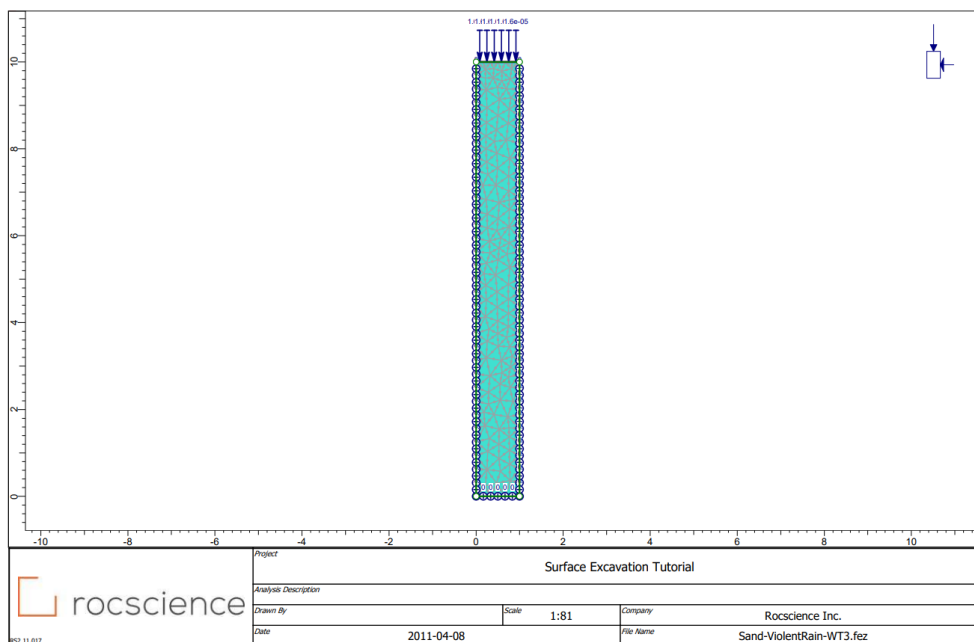
| Κλάση | Θ_s | Θ_r | K_s (m/day) | $a(1/m)$ | n |
|---------|------------|------------|---------------|----------|------|
| Άμμος | 0.43 | 0.045 | 7.13 | 14.5 | 2.68 |
| Ίλύς | 0.46 | 0.034 | 0.6 | 1.6 | 1.37 |
| Άργιλος | 0.38 | 0.068 | 0.0475 | 0.8 | 1.09 |

4.4 Προσομοίωση Βροχής

Η βροχή στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2 της Rocscience προσομοιώνεται με το εργαλείο Infiltration από το πεδίο των υδραυλικών συνοριακών συνθηκών (groundwater boundary condition). Με το εργαλείο infiltration ορίζεται μία τιμή που αντιστοιχεί στην ένταση της βροχής σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια. Στη περίπτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής η βροχή εφαρμόζεται στην άνω επιφάνεια του προσομοιώματος όπως φαίνεται στην εικόνα. Επιλέγονται 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής για την διεξαγωγή των αναλύσεων. Η κάθε ένταση αντιπροσωπεύει μία κατηγορία από τις ήπιες, ισχυρές και καταρρακτώδεις βροχοπτώσεις που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι εντάσεις βροχής που επιλέγονται. Για ήπια ένταση επιλέγεται η τιμή των 8mm/h ως αντιπροσωπευτική. Για ισχυρή βροχόπτωση επιλέγεται η ένταση των 34mm/h που αντιστοιχεί στις κακοκαιρίες Μπάλος και Elias που έπληξαν την Ελλάδα. Ενώ για Βίαιη Βροχόπτωση επιλέγεται η τιμή των 58,3mm/h από τις πιο ισχυρές κακοκαιρίες της Ελλάδας την Daniel και τον μεσογειακό κυκλώνα Θάλεια.

Πίνακας 7: Εντάσεις Βροχής Αναλύσεων

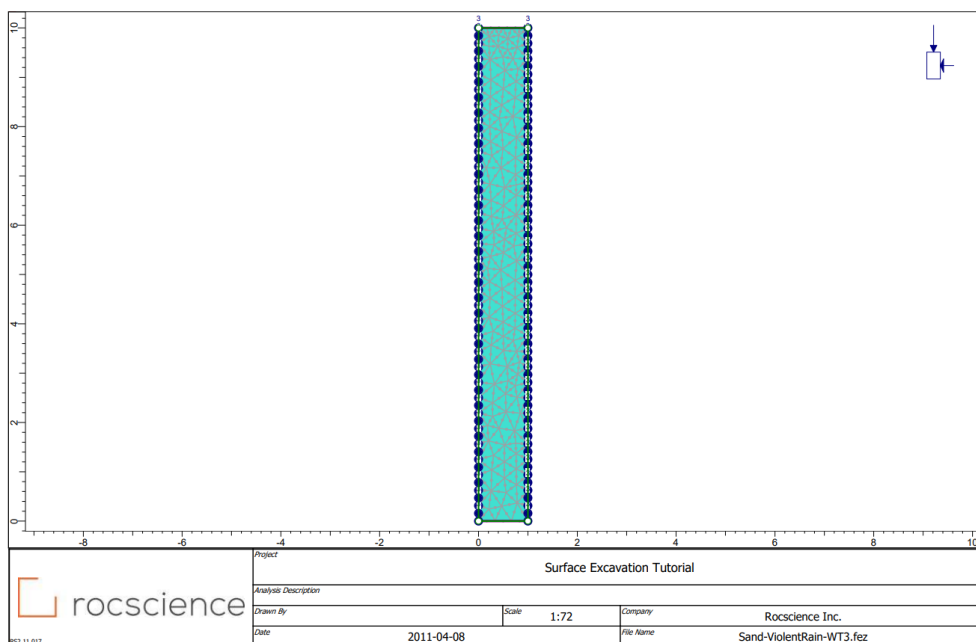
| Κατηγορία Βροχής | Ένταση Βροχής (mm/h) | Κακοκαιρία |
|------------------------|----------------------|-----------------|
| Ήπια | 8 | - |
| Ισχυρή | 34 | Μπάλος - Elias |
| Βίαιη – Καταρρακτώδεις | 58.3 | Θάλεια - Daniel |



Εικόνα 4.4: Συνοριακές συνθήκες στα στάδια προσομοίωσης του φαινομένου της βροχής

4.5 Υδροφόρος ορίζοντας και Συνοριακές συνθήκες

Ο υδροφόρος ορίζοντας στο λογισμικό RS2 ορίζεται ως συνοριακή συνθήκη με το εργαλείο Total Head. Στην αρχική φάση όπου ορίζονται η αρχικές συνθήκες ορίζεται και ο υδροφόρος ορίζοντας όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.5. Στα πλευρικά όρια εισάγεται το πιεζομετρικό ύψος. Για τις αναλύσεις της παρούσας διπλωματικής επιλέγονται 3 διαφορετικές θέσεις του υδροφόρου ορίζοντα, στα 0m από το κάτω όριο του μοντέλου, στα 3m και στα 7m. Αυτό γίνεται να αξιολογηθεί ο ρόλος και η επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάρκεια μιας βροχόπτωσης. Στις υπόλοιπες φάσεις της ανάλυσης οι συνοριακές συνθήκες διαμορφώνονται ως εξής, στο άνω όριο προσομοιώνεται η βροχή όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως ενώ στα πλευρικά και στο κάτω ορίζεται μηδενική ροή του νερού για να μην υπάρχουν διαφυγές με το εργαλείο Nodal Flow. Το μοντέλο που παρουσιάζεται στην εικόνα 4 αντιστοιχεί στις φάσεις της ανάλυσης που αναφέρθηκαν.



Εικόνα 4.5: Συνοριακές συνθήκες στην αρχική φάση

4.6 Σενάρια προσομοιώσεων

Για την έρευνα που πραγματοποιείται στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας υπάρχουν 3 διαφορετικές παράμετροι, το είδος του υλικού, η ένταση της βροχής και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Όπως έχει αναφερθεί και στις προηγούμενες παραγράφους υπάρχουν 3 διαφορετικά είδη υλικού (άμμος, ιλύς, άργιλος), 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής (μέτρια, ισχυρή, καταρρακτώδεις) και 3 διαφορετικά ύψη υδροφόρου ορίζοντα (0, 3, 7m). Έτσι, διεξάγονται 27 παραμετρικές αναλύσεις όπως φαίνονται στον πίνακα.

Πίνακας 8: 27 συνδυασμοί διαφορετικού Υλικού, Έντασης Βροχής και ύψους Υδροφόρου Ορίζοντα

| Υδροφόρος ορίζοντας | Ένταση Βροχής | Υλικό | | |
|---------------------|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | | Άμμος | Ιλύς | Άργιλος |
| 0m | Μέτρια | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Ισχυρή | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Βίαη | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3m | Μέτρια | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Ισχυρή | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Βίαη | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 7m | Μέτρια | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Ισχυρή | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| | Βίαη | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |

4.7 Παράμετρος q/K_s

Η κάθε ανάλυση αντιστοιχεί σε μια τιμή του λόγου έντασης βροχής (q) προς συντελεστή διαπερατότητας (K_s). Ο λόγος αυτός βοηθάει στη σύγκριση των αναλύσεων μεταξύ τους κάτω από ένα κοινό παρονομαστή, καθώς η ένταση της βροχής και η διαπερατότητα του υλικού ανεξάρτητα δεν είναι τόσο εύκολα συγκρίσιμα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα δεν λαμβάνει μέρος επομένως οι τιμές αυτές αντιστοιχούν για κάθε διαφορετικό ύψος αυτού. Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται αυτές οι τιμές.

Πίνακας 9: Τιμές του λόγου q/K_s

| q/K_s | | | | |
|---------------------|---------------|-------|------|---------|
| Υδροφόρος ορίζοντας | Ένταση Βροχής | Υλικό | | |
| | | Άμμος | Ιλύς | Άργιλος |
| 0, 3, 7m | Μέτρια | 0.03 | 0.32 | 4.04 |
| | Ισχυρή | 0.11 | 1.36 | 17.18 |
| | Βίαη | 0.20 | 2.33 | 29.46 |

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των 27 αναλύσεων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να προσεγγιστεί και να αναλυθεί από πολλές πλευρές. Αυτά που θα παρουσιαστούν στην συγκεκριμένη ενότητα είναι ο ρυθμός διήθησης του νερού σε κάθε υλικό καθώς και η αθροιστική διήθηση για κάθε παραμετρική ανάλυση.

Όσον αφορά τις παραμέτρους αξιολόγησης (ρυθμός διήθησης και αθροιστική διήθηση) θα εξετασθεί πως αυτές μεταβάλλονται με το χρόνο σε διαφορετικό τύπο εδάφους, ένταση βροχής και ύψος υδροφόρου ορίζοντα. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της κάθε ανάλυσης ξεχωριστά όσον αφορά το ρυθμό διήθησης και απορροής. Στη συνέχεια η ομάδα των αναλύσεων που αντιστοιχούν σε υδροφόρο ορίζοντα ύψους 3m θα χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της επιρροής του εδαφικού υλικού και της έντασης της βροχής στις παραμέτρους ενδιαφέροντος.

5.2 Καμπύλες ρυθμού διήθησης & απορροής αναλύσεων

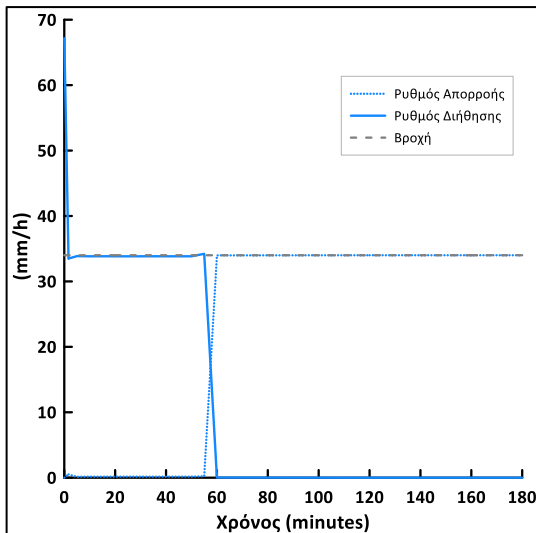
Τα διαγράμματα 1 – 26 αντιστοιχούν στις 27 αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4. Απουσιάζει το διάγραμμα της ανάλυσης που αφορά την άμμο σε συνθήκες μέτριας βροχόπτωσης και τον υδροφόρο ορίζοντα να βρίσκεται στα 0m καθώς ο χρόνος ολοκλήρωσης της ήταν πολύ μεγάλος. Πιο συγκεκριμένα, τα διαγράμματα 1 – 8 αναφέρονται στις αναλύσεις όπου ο υδροφόρος ορίζοντας τοποθετείται στα 0m. Από αυτά, τα διαγράμματα 1 και 2 που είναι με μπλε χρώμα αναφέρονται σε αναλύσεις για άμμο με ένταση βροχής ισχυρή και βίαιη αντίστοιχα. Τα διαγράμματα 3, 4 και 5 που είναι με πράσινο χρώμα παρουσιάζουν τα αποτελέσματα αναλύσεων για ιλύ με ένταση βροχής μέτρια, ισχυρή και βίαιη αντίστοιχα. Τα διαγράμματα 6, 7 και 8 αντιστοιχούν για εδαφικό υλικό την άργιλο με το καθένα από αυτό να αναφέρεται σε ένταση βροχής μέτρια ισχυρή και βίαιη αντίστοιχα.

Τα διαγράμματα 9 – 17 αντιστοιχούν στις αναλύσεις που αναφέρονται σε ύψος υδροφόρου ορίζοντα τα 3m. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με εδαφικό υλικό την άμμο παρουσιάζονται στα διαγράμματα 9, 10 και 11 για τις 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής (μέτρια, ισχυρή καταρρακτώδεις) αντίστοιχα. Τα επόμενα 3 διαγράμματα 12, 13, 14 αναφέρονται στην ιλύ εξίσου για τις 3 διαφορετικές εντάσεις βροχόπτωσης. Οι αναλύσεις που αναφέρονται στην άργιλο παρουσιάζονται στα διαγράμματα 15, 16 και 17, με το καθένα να αντιστοιχεί στις 3 διαφορετικές κατηγορίες βροχόπτωσης που έχουν επιλεχτεί.

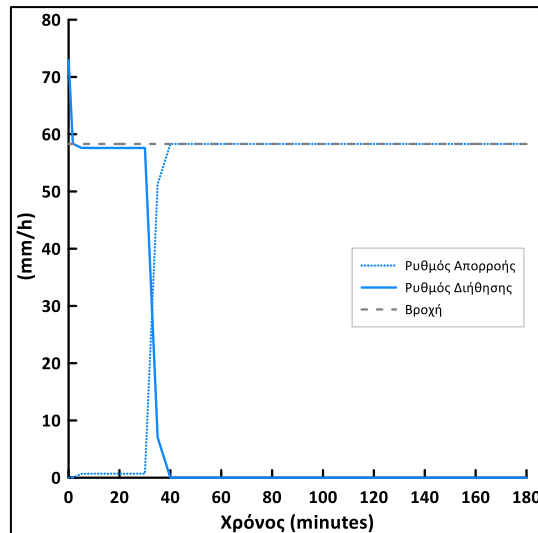
Για την ομάδα αναλύσεων όπου ο υδροφόρος ορίζοντας τοποθετείται στα 7m στα διαγράμματα 18 – 26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τους. Από αυτά, σε άμμο αναφέρονται τα διαγράμματα 18, 19 και 20 για ρυθμούς βροχόπτωσης 8, 34 και 58.3mm/h αντίστοιχα. Τα επόμενα 3 διαγράμματα 21, 22, 23 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των αναλύσεων για ιλύ ενώ τα τελευταία 3 διαγράμματα 24, 25 και 26 αντιστοιχούν στην άργιλο για τις 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής.

Από τη θεωρία που έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 2 είναι γνωστό ότι ο ρυθμός διήθησης μόλις εφαρμόζεται το νερό στην επιφάνεια του εδάφους είναι πολύ υψηλός, και ονομάζεται αρχικός ρυθμός διήθησης. Στη συνέχεια αυτή μειώνεται μέχρι την βασική τιμή διήθησης. Στις αναλύσεις η τελική τιμή διήθησης είναι το 0 καθώς τα όρια του προσομοιώματος είναι κλειστά επομένως μόλις επέλθει πλήρης κορεσμός δεν εισέρχεται άλλο νερό στο έδαφος. Αντίστοιχα για τον ρυθμό απορροής αυτός είναι 0 έως ότου ο ρυθμός διήθησης γίνει μικρότερος της έντασης της βροχής. Ο ρυθμός απορροής γίνεται ίσος με την ένταση της βροχόπτωσης όταν ο ρυθμός διήθησης είναι ίσος με 0, όταν δηλαδή έχει επέλθει πλήρης κορεσμός του υλικού και η ποσότητα του νερού που πέφτει παραμένει στην επιφάνεια.

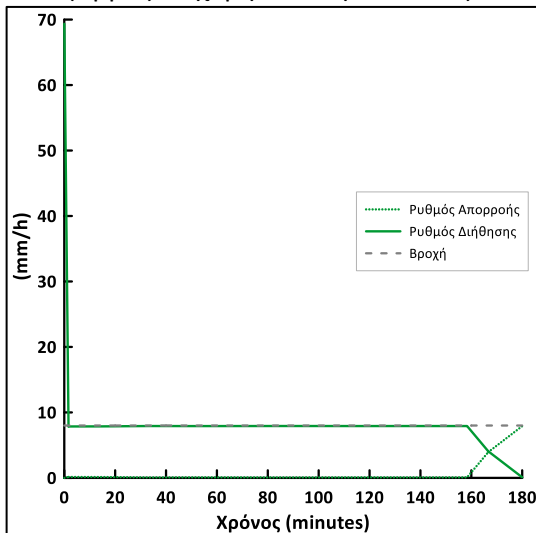
Όπως παρατηρείται στα διαγράμματα 1 έως και 26 η παραπάνω θεωρία αποτυπώνεται και στα αποτελέσματα. Στην αρχή του φαινομένου της βροχόπτωσης παρουσιάζεται ένας πολύ υψηλός ρυθμός διήθησης ο οποίος για τις αναλύσεις που αντιστοιχούν σε άμμους και ιλύες υπερβαίνει την ένταση της βροχής ενώ στις αργίλους αυτό δεν συμβαίνει. Στη συνέχεια αν ο συντελεστής υδροπερατότητας K_s είναι μεγαλύτερος από την ένταση της βροχής τότε ο ρυθμός διήθησης είναι ίσος με την ένταση της βροχής. Αυτό παρατηρείται στα διαγράμματα 1, 2, 3, 9, 10, 11, 12, 18, 19, 20 και 21 τα οποία αντιστοιχούν σε όλες τις αναλύσεις με εδαφικό υλικό την άμμο και στις περιπτώσεις της ιλύς με μέτρια ένταση βροχή. Στην περίπτωση που η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα του υλικού είναι μικρότερη της έντασης της βροχής τότε ο ρυθμός διήθησης είναι ίσος με την υδροπερατότητα του εδάφους. Αυτό παρατηρείται στις αναλύσεις της αργίλου καθώς και στην ιλύ με ένταση βροχής κατηγορίας ισχυρής και βίαιης. Στα διαγράμματα 4, 5, 6, 7, 8, 13, 14, 15, 16, 17, 22, 23, 24, 25 και 26 αποτυπώνεται η συγκεκριμένη περίπτωση.



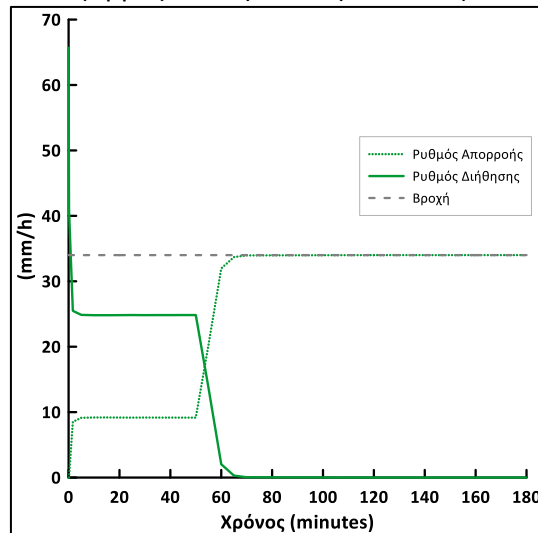
Διάγραμμα 1: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Ισχυρή Ένταση - Υ.Ο. 0m)



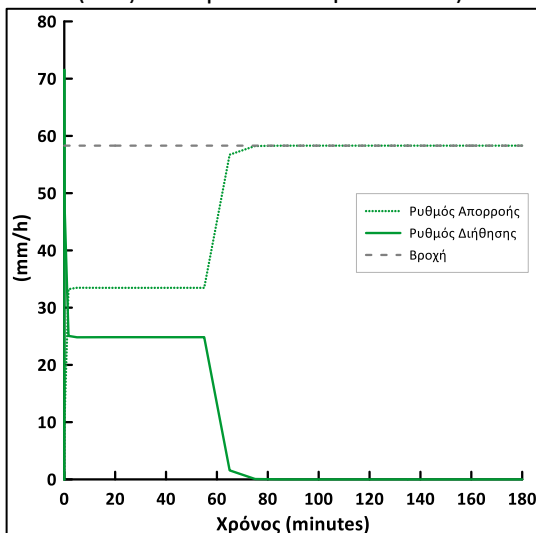
Διάγραμμα 2: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Βίαιη Ένταση - Υ.Ο. 0m)



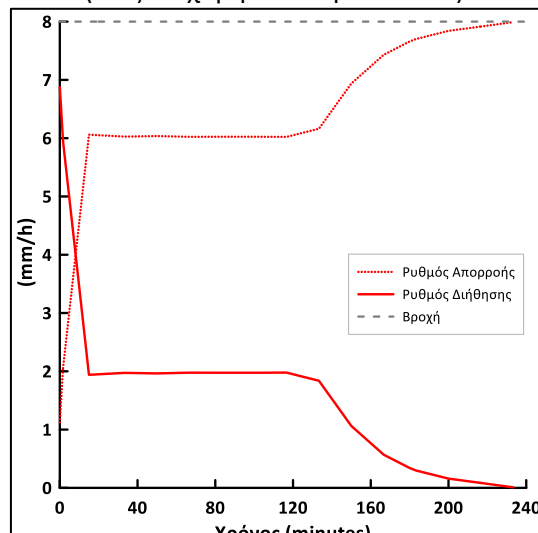
Διάγραμμα 3: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Μέτρια Ένταση - Υ.Ο. 0m)



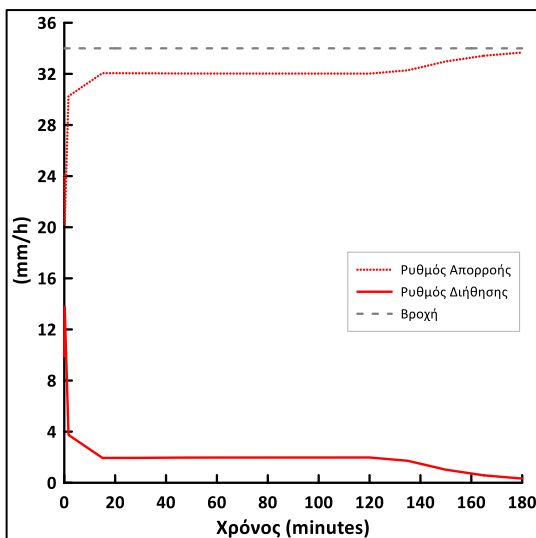
Διάγραμμα 4: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Ισχυρή Ένταση - Υ.Ο. 0m)



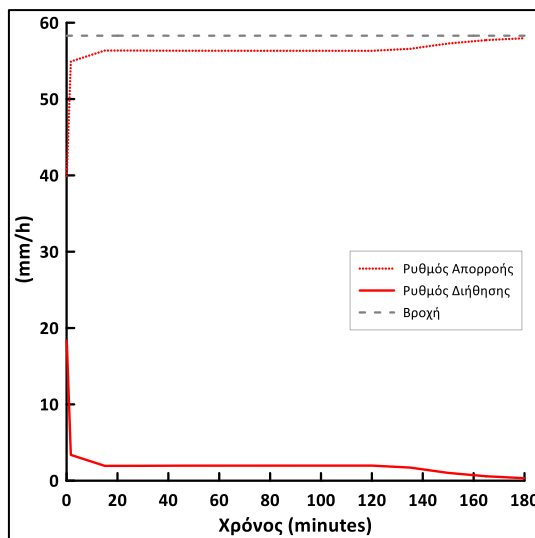
Διάγραμμα 5: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Βίαιη Ένταση - Υ.Ο. 0m)



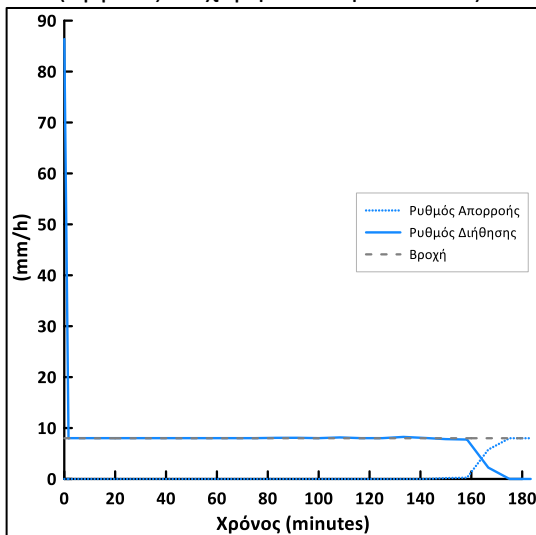
Διάγραμμα 6: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Μέτρια Ένταση - Υ.Ο. 0m)



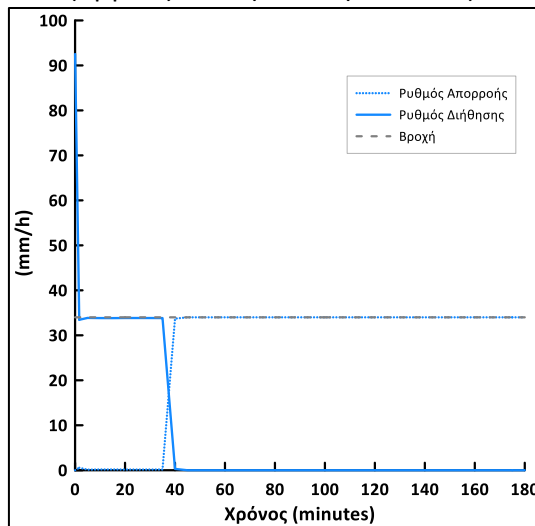
Διάγραμμα 7: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Ισχυρή Ένταση - Υ.Ο. 0m)



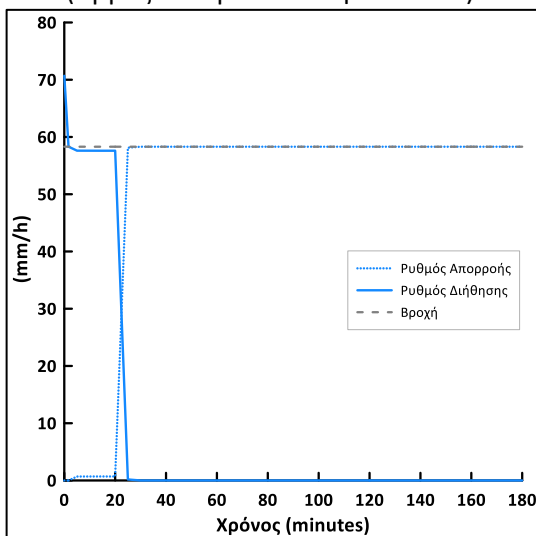
Διάγραμμα 8: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Βίαη Ένταση - Υ.Ο. 0m)



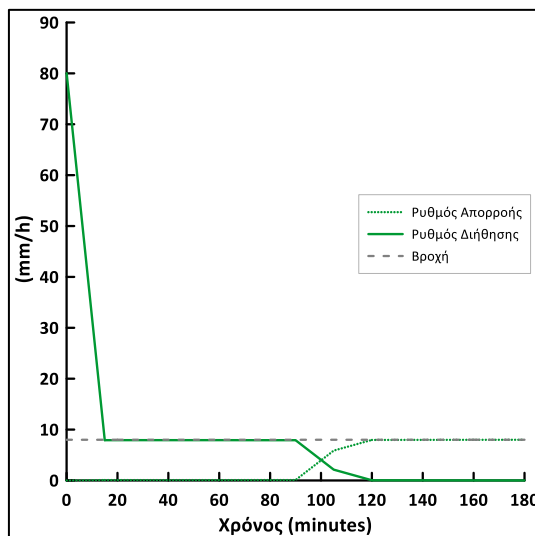
Διάγραμμα 9: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Μέτρια Ένταση - Υ.Ο. 3m)



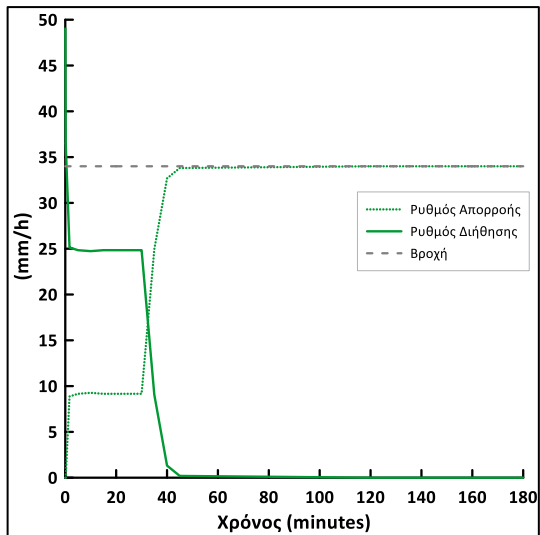
Διάγραμμα 10: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Ισχυρή Ένταση - Υ.Ο. 3m)



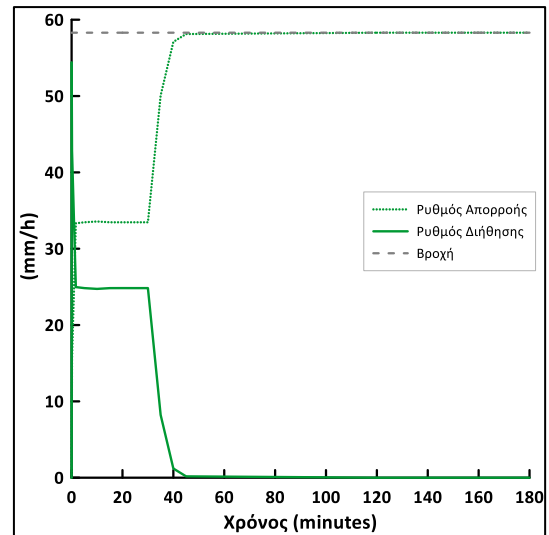
Διάγραμμα 11: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Βίαη Ένταση - Υ.Ο. 3m)



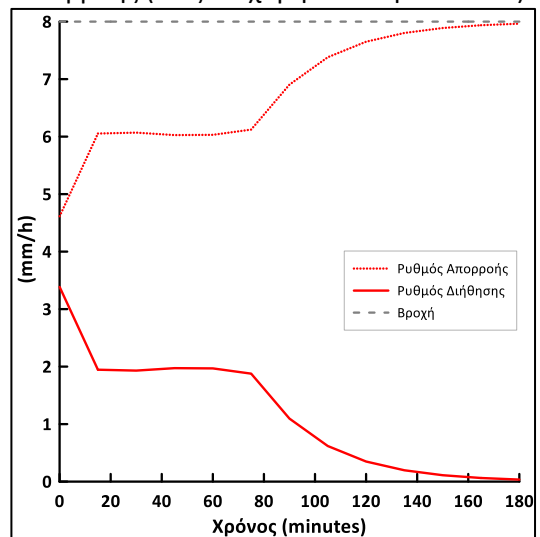
Διάγραμμα 12: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Μέτρια Ένταση - Υ.Ο. 3m)



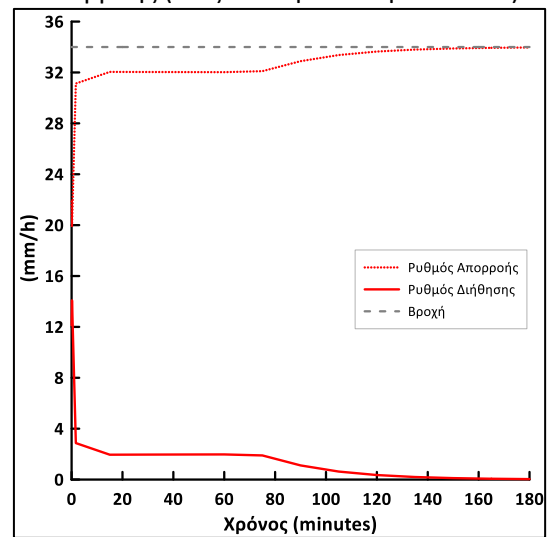
Διάγραμμα 13: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Ισχυρή Ένταση - Υ.Ο. 3m)



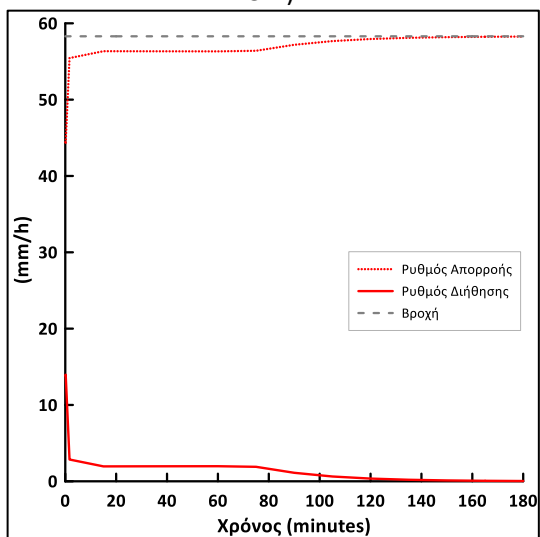
Διάγραμμα 14: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Βίαη Ένταση - Υ.Ο. 3m)



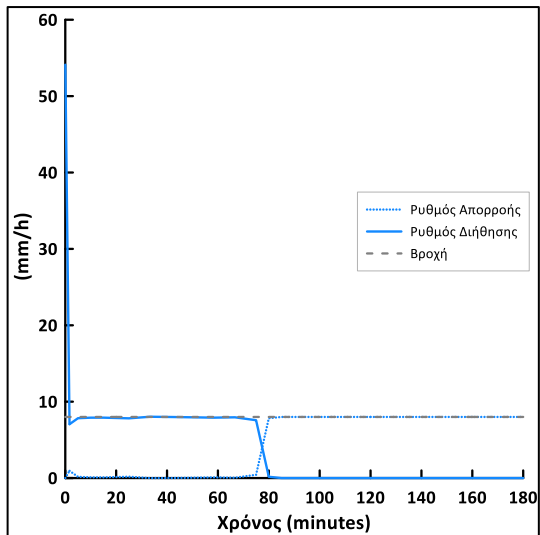
Διάγραμμα 15: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Μέτρια Ένταση - Υ.Ο. 3m)



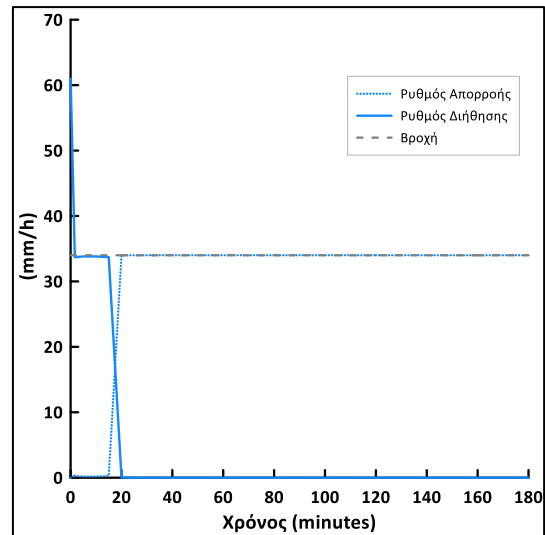
Διάγραμμα 16: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Ισχυρή Ένταση - Υ.Ο. 3m)



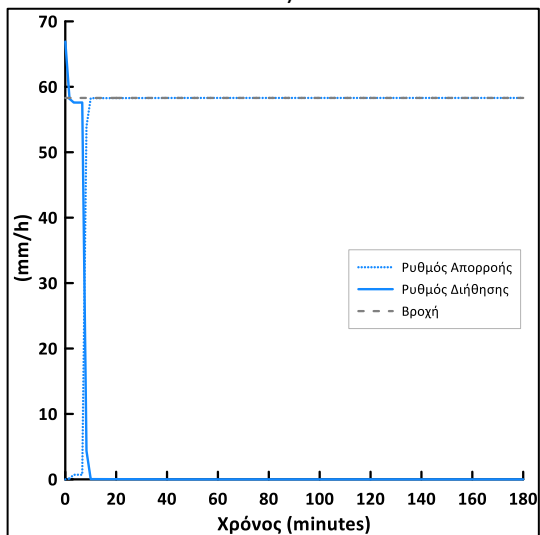
Διάγραμμα 17: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής Άργιλος - Βίαη Ένταση - Υ.Ο. 3m)



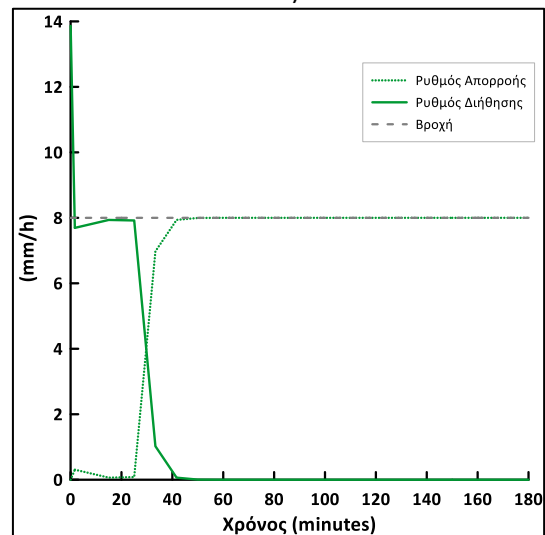
Διάγραμμα 18: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Μέτρια Ένταση - Υ.Ο. 7m)



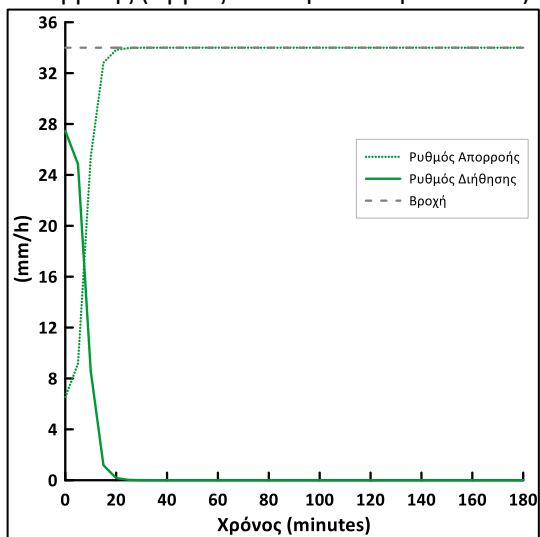
Διάγραμμα 19: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Ισχυρή Ένταση - Υ.Ο. 7m)



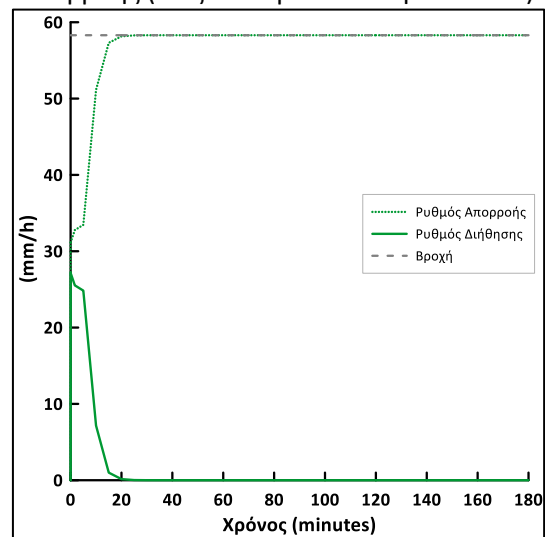
Διάγραμμα 20: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άμμος - Βίαιη Ένταση - Υ.Ο. 7m)



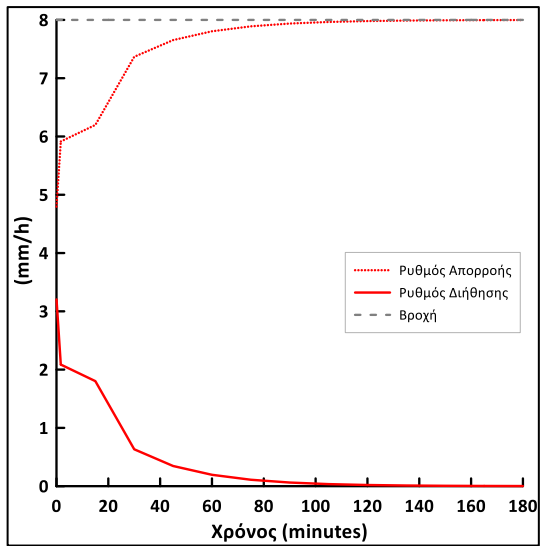
Διάγραμμα 21: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Μέτρια Ένταση - Υ.Ο. 7m)



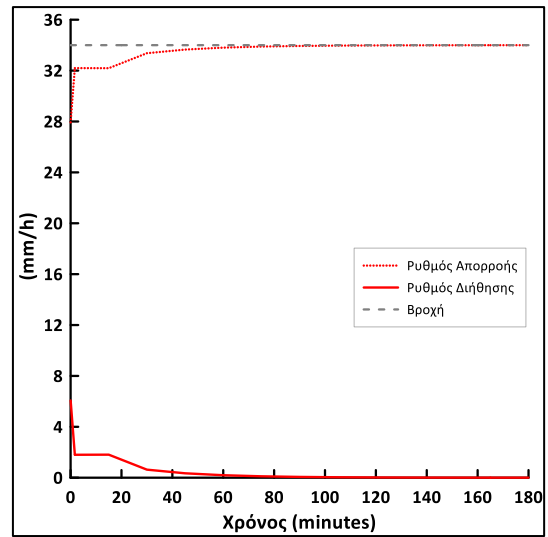
Διάγραμμα 22: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Ισχυρή Ένταση - Υ.Ο. 7m)



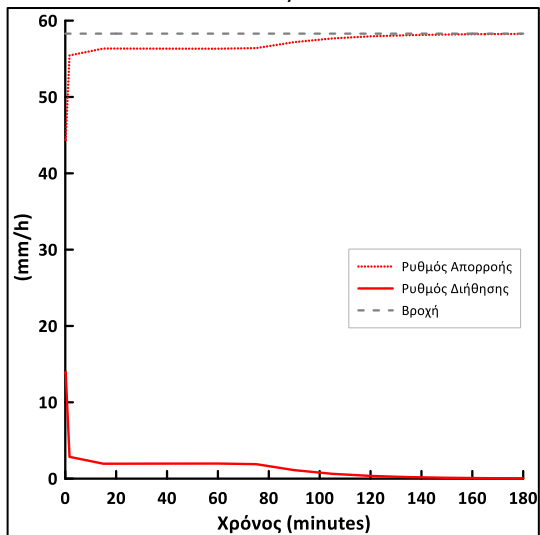
Διάγραμμα 23: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Ιλύς - Βίαιη Ένταση - Υ.Ο. 7m)



Διάγραμμα 24: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Μέτρια Ένταση - Υ.Ο. 7m)



Διάγραμμα 25: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής (Άργιλος - Ισχυρή Ένταση - Υ.Ο. 7m)



Διάγραμμα 26: Ρυθμός Διήθησης & Απορροής Άργιλος - Βίαη Ένταση - Υ.Ο. 7m)

5.3 Ρυθμός Διήθησης

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων όσον αφορά τον ρυθμό διήθησης. Συγκρίνεται ο διαφορετικός τύπος υλικού υπό συγκεκριμένη ένταση βροχής, οι 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής στο ίδιο υλικό καθώς και τα 3 διαφορετικά ύψη υδροφόρου ορίζοντα σε συγκεκριμένες συνθήκες υλικού και έντασης βροχής. Για τις 2 πρώτες κατηγορίες η σύγκριση γίνεται σε αναλύσεις όπου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στα 3m.

Στα διαγράμματα 27, 28 και 29 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις 3 διαφορετικές τιμές βροχόπτωσης μέτρια ισχυρή και βίαιη αντίστοιχα για τα 3 διαφορετικά υλικά άμμος, ιλύς και άργιλος. Ο παράγοντας q/K_s αυξάνει από την άμμο στην ιλύ και στη συνέχεια στη άργιλο καθώς το q (ένταση βροχής) είναι σταθερό και το K_s μικραίνει.

Στο διάγραμμα 27 το οποίο αναφέρεται σε μέτρια ένταση βροχή φαίνεται ότι ο αρχικός ρυθμός διήθησης στην άμμο και την ιλύ είναι πολύ υψηλή ενώ ο ρυθμός διήθησης στη συνέχεια μειώνεται στην τιμή της έντασης της βροχής. Αυτό συμβαίνει καθώς η άμμος και η ιλύς έχουν μεγαλύτερο συντελεστή διαπερατότητας K_s από 8mm/h που είναι η ένταση της βροχής. Ο ρυθμός διήθησης συνεχίζει σταθερός έως ότου έρθει πλήρης κορεσμός και γίνει ίσος με 0 κάτι το οποίο συμβαίνει στα 170 λεπτά. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της ιλύς ο κορεσμός έρχεται πιο γρήγορα απ' ό τι στην άμμο δηλαδή στα 110 λεπτά, κάτι το οποίο είναι φυσιολογικός καθώς η ιλύς έχει μικρότερο πορώδες απ' ό τι η άμμος όπως επίσης η μη κορεσμένη ζώνη είναι μεγαλύτερη από αυτή της άμμου με αποτέλεσμα ο συνολικός διαθέσιμος χώρος να είναι μικρότερος στην περίπτωση της ιλύς. Η άργιλος έχει μικρότερο K_s από 8mm/h που είναι η ένταση της βροχής επομένως στο διάγραμμα παρατηρείται να έχει μία ελάχιστα υψηλότερη τιμή αρχικής διήθησης που στη συνέχεια μειώνεται στη τιμή K_s . Παρατηρείται επίσης ότι μέχρι ο ρυθμός διήθησης να γίνει 0 υπάρχει μία ήπια μείωση η οποία οφείλεται στο γέμισμα των πόρων από νερό.

Το διάγραμμα 28 αναφέρεται σε ισχυρή ένταση βροχή. Και εδώ παρατηρείται οι τιμές αρχικής διήθησης να είναι υψηλές, με αυτής της άμμου να είναι μεγαλύτερη και να ακολουθούν η ιλύς και η άργιλος στη σειρά. Η μη κορεσμένη ζώνη όπως έχει αναφερθεί είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της άργιλου, μικρότερη στην περίπτωση της ιλύς και ακόμα μικρότερη στην περίπτωση της άμμου. Έτσι, το υλικό με την λιγότερη ποσότητα νερού στους πόρους του παρουσιάζει μεγαλύτερο αρχικό ρυθμό διήθησης όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα ο ρυθμός διήθησης της άμμου φαίνεται να είναι ίσος με την ένταση της βροχής καθώς η άμμος έχει μεγαλύτερη διαπερατότητα από την ένταση της ισχυρής βροχόπτωσης 34mm/h. Η ιλύς η οποία έχει μικρότερη διαπερατότητα από την ένταση της βροχής, όπως και η άργιλος, ο ρυθμός διήθησης γίνεται ίσος με την τιμή K_s του υλικού και στη συνέχεια γίνεται 0 αφού έχει επέλθει πλήρης κορεσμός. Παρατηρείται ότι ο χρόνος πλήρης κορεσμού της άμμου και της ιλύς είναι σχεδόν ίδιος στα 40 λεπτά. Η άργιλος όπως και στην πρώτη περίπτωση έτσι και εδώ έχει έναν πολύ

χαμηλό ρυθμό διήθησης ίσο με τον συντελεστή K_s και παρατηρείται ότι χρειάζεται πολύ περισσότερο χρόνο για να επέλθει ο πλήρης κορεσμός της σε σχέση με την άμμο και την ιλύ.

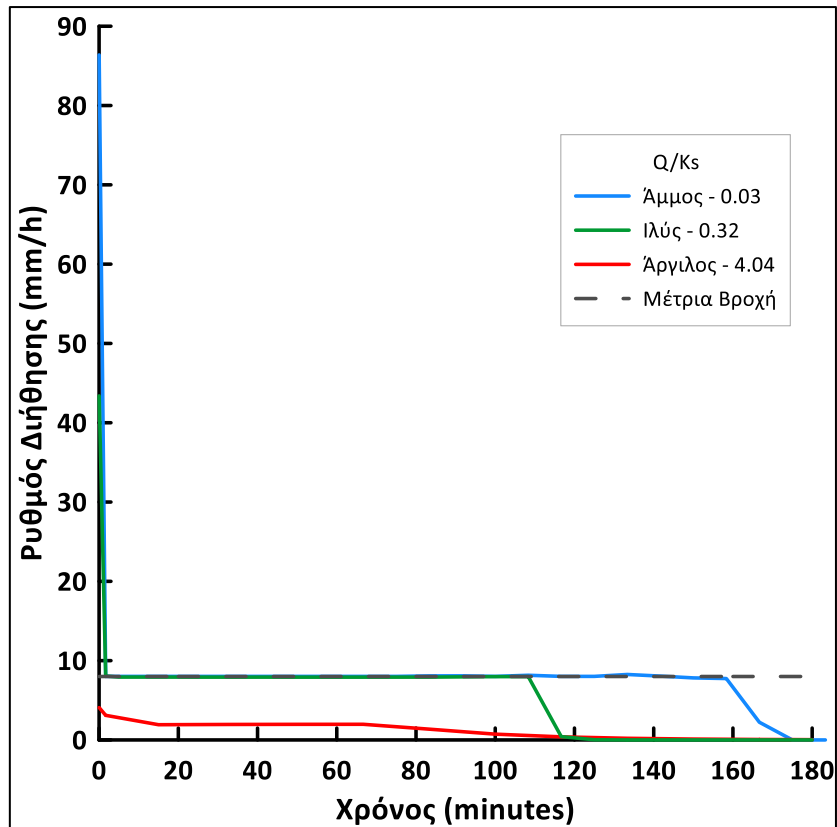
Το διάγραμμα 29 που αναφέρεται βροχή βίαιης έντασης παρατηρούνται παρόμοια αποτελέσματα με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Σημαντική διαφορά είναι ότι η άμμος, που παραμένει ο συντελεστής K_s να είναι μεγαλύτερος από την τιμή της έντασης της βροχής, έρχεται σε κορεσμό σε λιγότερο χρόνο δηλαδή στα 25 λεπτά ενώ η ιλύς και η άργιλος παραμένουν στους ίδιους χρόνους.

Στα διαγράμματα 30, 31 και 32 συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τις 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής που προσομοιώνονται σε ίδιο έδαφος. Ο λόγος q/K_s αναφέρεται σε διαφορετικό q (ένταση βροχής) ενώ το K_s είναι σταθερό για το κάθε υλικό.

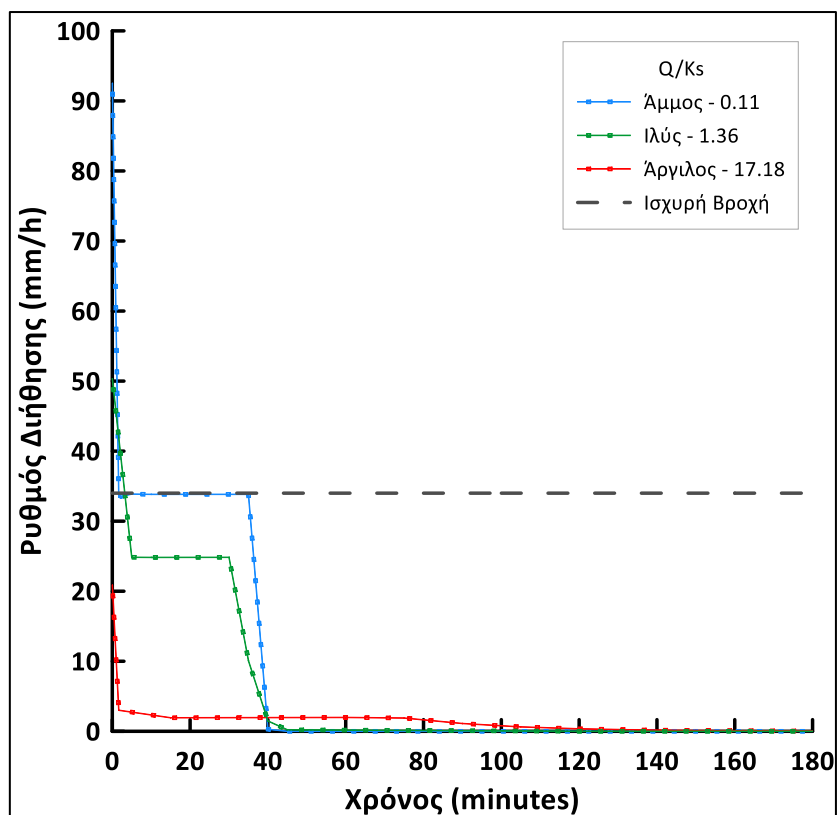
Το διάγραμμα 30 αναφέρεται σε προσομοιώσεις με έδαφος την άμμο. Η άμμος όπως έχει αναφερθεί έχει μεγαλύτερη διαπερατότητα και από τις 3 εντάσεις βροχοπτώσεις που προσομοιώνονται. Από τις 3 γραφικές παραστάσεις είναι αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται ο λόγος q/K_s τόσο μειώνεται ο χρόνος κορεσμού του εδάφους. Αυτό συμβαίνει αφού ο ρυθμός διήθησης του εδάφους είναι ίσος με την ένταση της βροχής επομένως όσο αυξάνεται η ένταση της βροχής τόσο μειώνεται ο χρόνος πλήρωσης των κενών μεταξύ των κόκκων του εδάφους. Αντίστοιχα το διάγραμμα 31 που αναφέρεται στην ιλύ φαίνεται ότι για τους λόγους q/K_s 1.36 και 2.33 οι καμπύλες συμπίπτουν, αυτό συμβαίνει καθώς η υδραυλική αγωγιμότητα της ιλύος είναι μικρότερη της εντάσεως της βροχής και έτσι το νερό διηθείται με ρυθμό ίσο με τον συντελεστή K_s . Στην περίπτωση του λόγου q/K_s 0.32 φαίνεται ότι λόγω μικρότερης έντασης βροχόπτωσης ο ρυθμός διήθησης είναι μικρότερος από τις άλλες 2 περιπτώσεις και απαιτεί περισσότερο χρόνο για επέλθει πλήρης κορεσμός. Τέλος το διάγραμμα 32 αντιστοιχεί στις προσομοιώσεις με έδαφος την άργιλο για την οποία έχει αναφερθεί ότι ο συντελεστής K_s είναι μικρότερος από όλες τις περιπτώσεις βροχόπτωσης. Παρατηρείται ότι οι 3 καμπύλες συμπίπτουν μεταξύ τους αφού το νερό διηθείται με ρυθμό ίσο με την διαπερατότητα της άργιλου.

Στα διαγράμματα 33 έως 41 μελετάται η επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα υπό σταθερές συνθήκες εδάφους και έντασης βροχόπτωσης. Για την περίπτωση της άμμου αναφέρονται τα διαγράμματα 33, 34 και 35 για τις 3 διαφορετικές συνθήκες βροχόπτωσης. Από το διάγραμμα 33 απουσιάζει η γραφική παράσταση για ανάλυση με υδροφόρο στα 0m όπως έχει προαναφερθεί λόγω μεγάλου χρόνου επίλυσης της αριθμητικής ανάλυσης. Και στα 3 είναι αντιληπτό ότι η θέση του υδροφόρου ορίζοντα παίζει καθοριστικό ρόλο στην χρόνο πλήρωσης των κενών από νερό. Για παράδειγμα στο διάγραμμα 34 όπου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στα 7m τότε χρειάζονται 20 λεπτά για έρθει πλήρης κορεσμός στο συγκεκριμένο προσομοίωμα. Εάν ο υδροφόρος βρίσκεται στα 3m τότε χρειάζονται περίπου 40 λεπτά ενώ στα 0m θέλει 60 λεπτά. Όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 4 το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα ορίζεται από τη βάση του προσομοιώματος. Τα διαγράμματα 36, 37, και 38 αντιστοιχούν σε αναλύσεις με έδαφος την ιλύ για τις 3 διαφορετικές συνθήκες

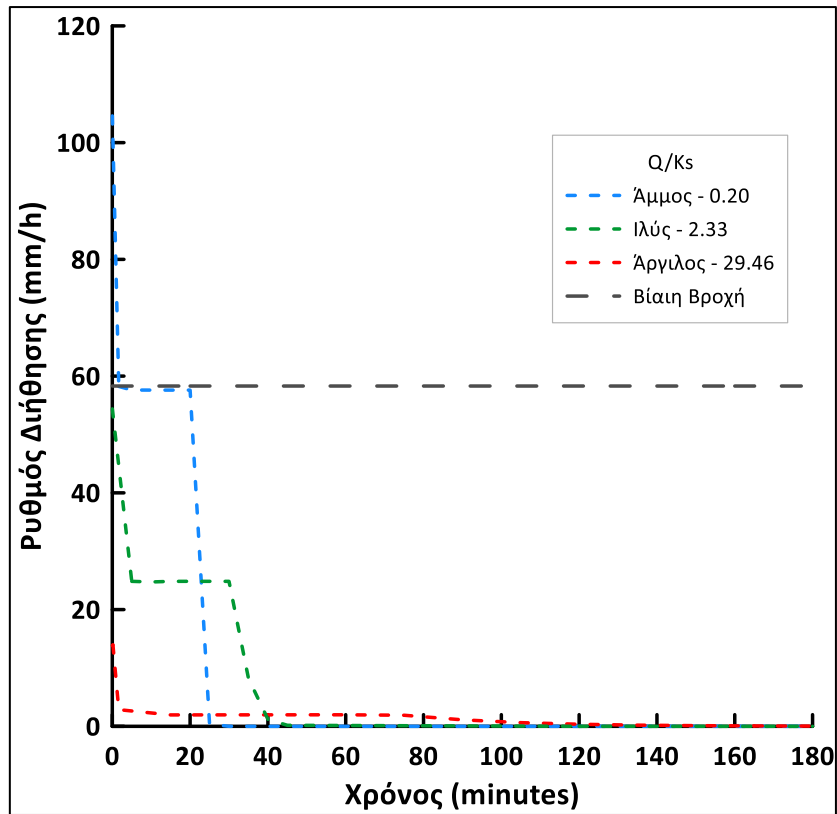
βροχόπτωσης. Τα συμπεράσματα από τη σύγκριση είναι ίδια με αυτά της άμμου που αναφέρθηκε προηγουμένως. Τέλος, τα διαγράμματα 39, 40 και 41 παρουσιάζουν το ρυθμό διήθησης για τις αναλύσεις της αργίλου για μέτρια, ισχυρή και καταρρακτώδεις βροχή αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα και εδώ είναι ίδια με τις 2 προηγούμενες περιπτώσεις της ιλύς και της άμμου, δηλαδή ότι το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα έχει καθοριστικό ρόλο στο χρόνο που χρειάζεται για να έρθει σε πλήρη κορεσμό το υλικό.



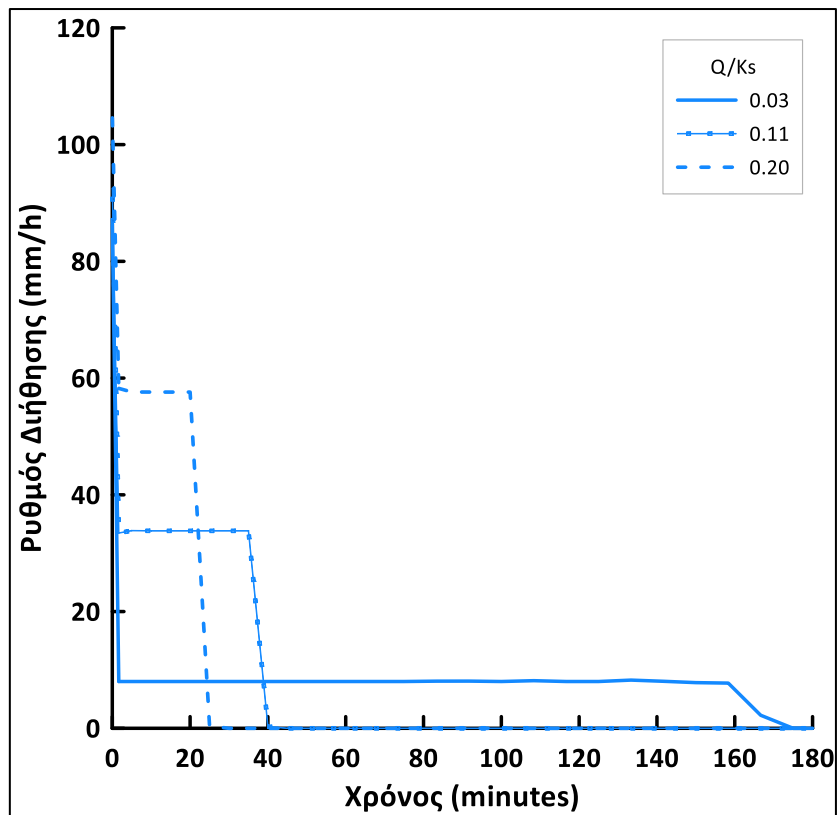
Διάγραμμα 27: Ρυθμός Διήθησης (Μέτρια ένταση βροχής - Υ.Ο. 3m)



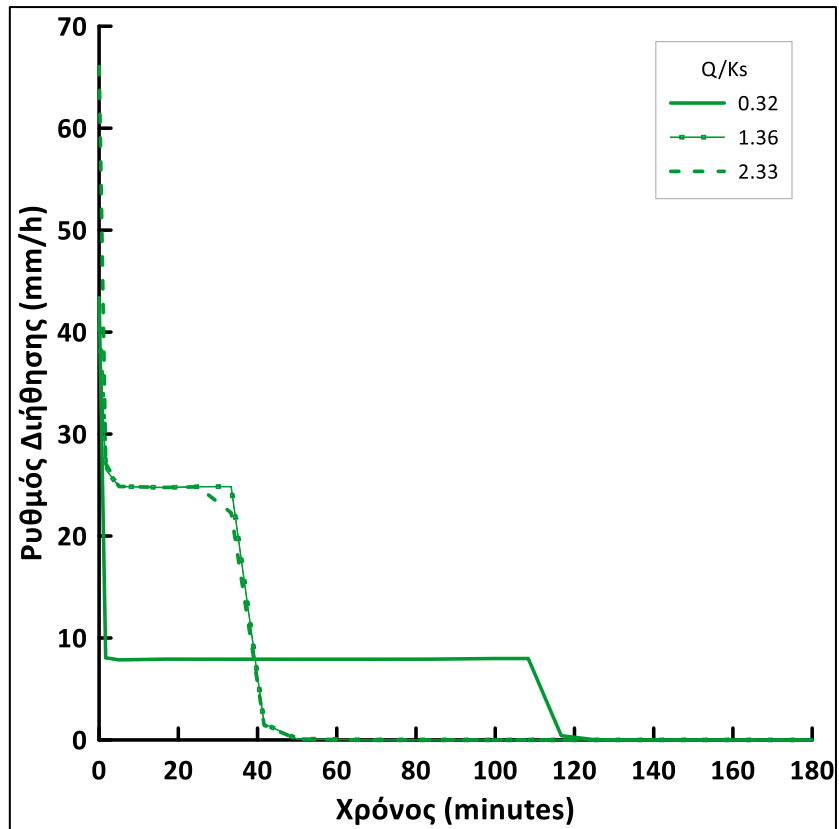
Διάγραμμα 28: Ρυθμός Διήθησης (Ισχυρή ένταση βροχής - Υ.Ο. 3m)



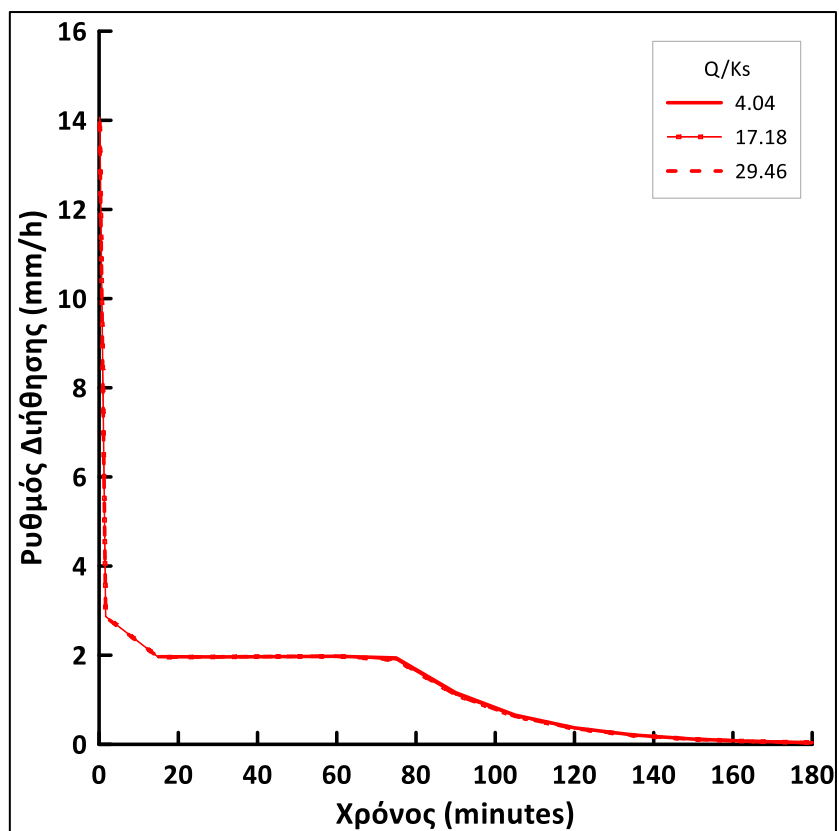
Διάγραμμα 29: Ρυθμός Διήθησης (Βίαιη ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



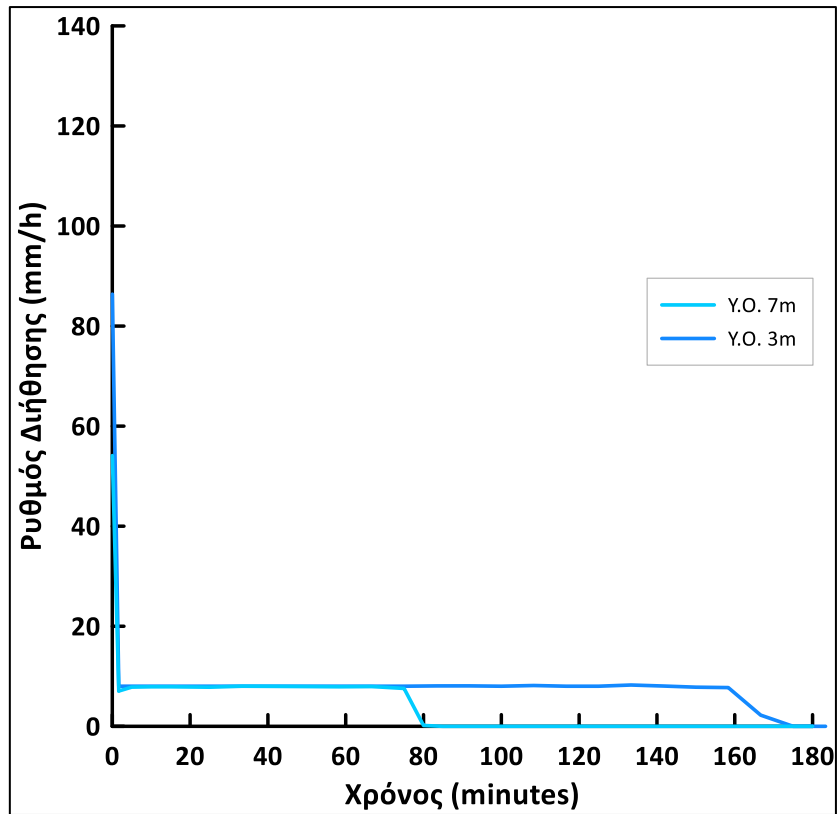
Διάγραμμα 30: Ρυθμός Διήθησης (Άμμος - Υ.Ο. 3m)



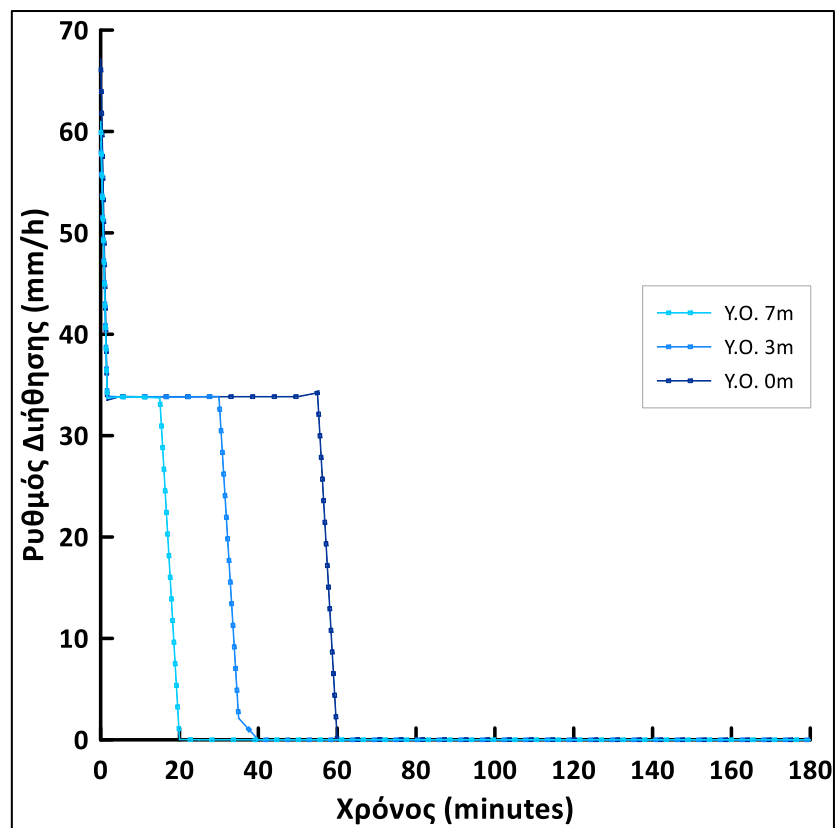
Διάγραμμα 31: Ρυθμός Διήθησης (Ιλύς - Υ.Ο. 3m)



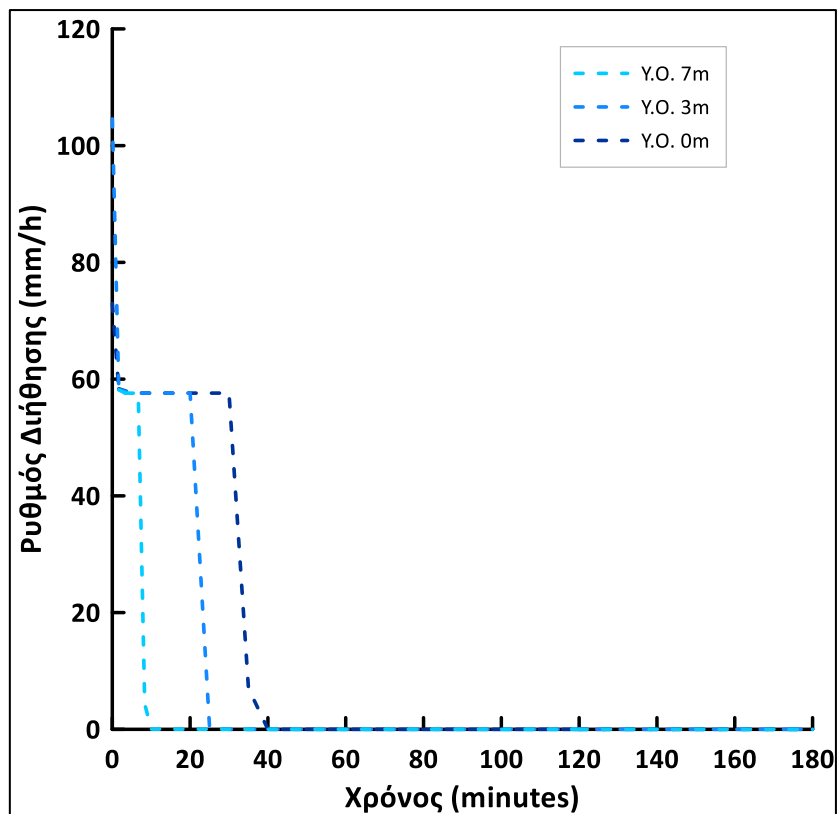
Διάγραμμα 32: Ρυθμός Διήθησης (Άργιλος - Υ.Ο. 3m)



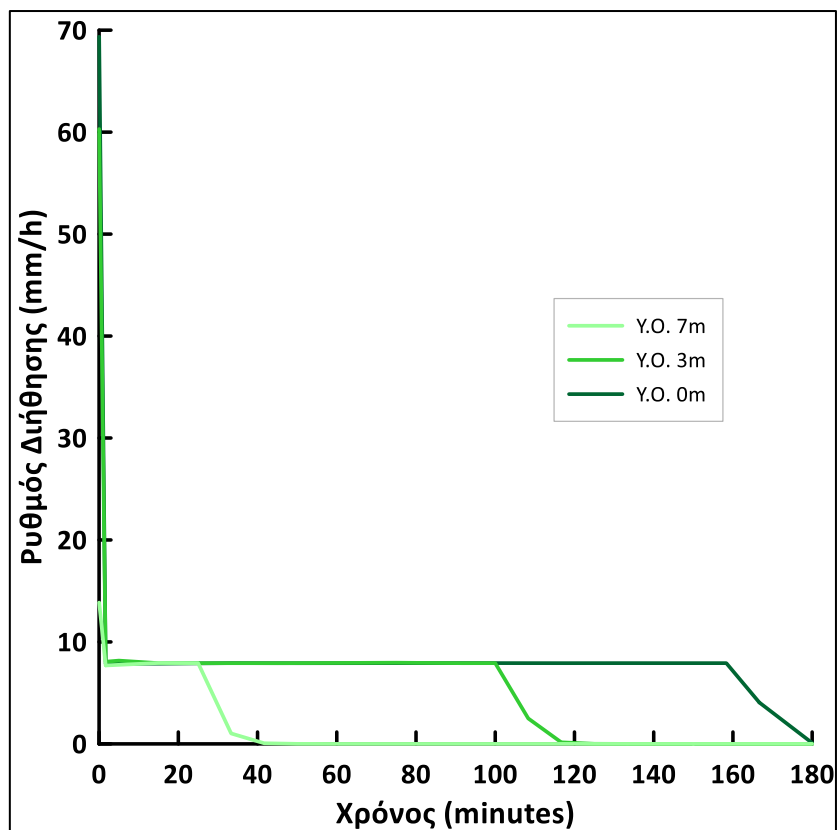
Διάγραμμα 33: Ρυθμός Διήθησης (Άμμος - μέτρια ένταση βροχή - $Q/K_s=0.03$)



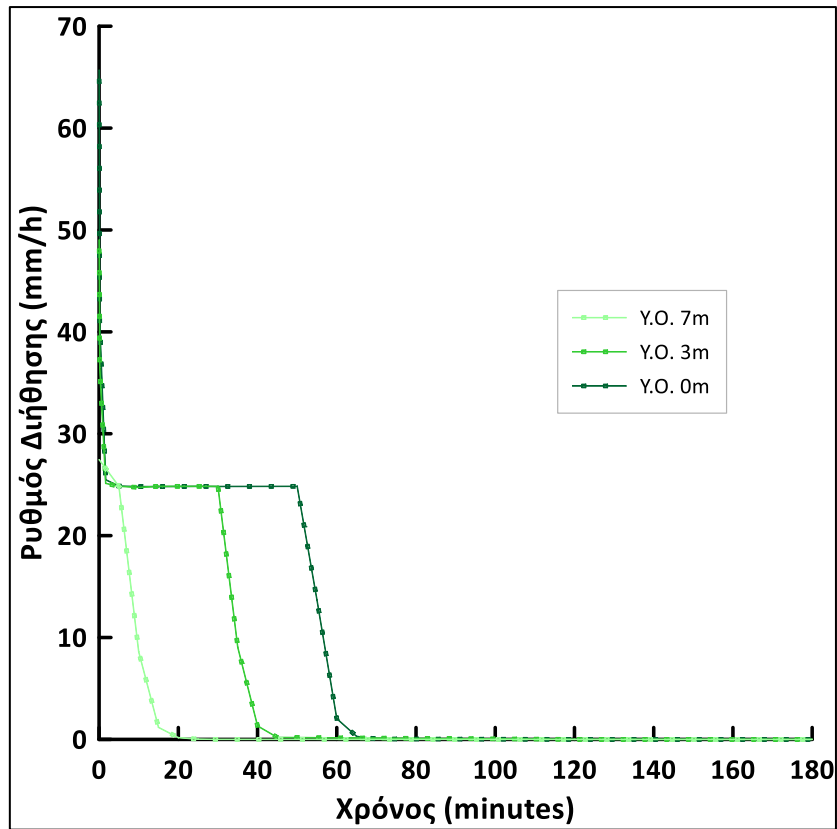
Διάγραμμα 34: Ρυθμός Διήθησης (Άμμος - ισχυρή ένταση βροχή - $Q/K_s=0.11$)



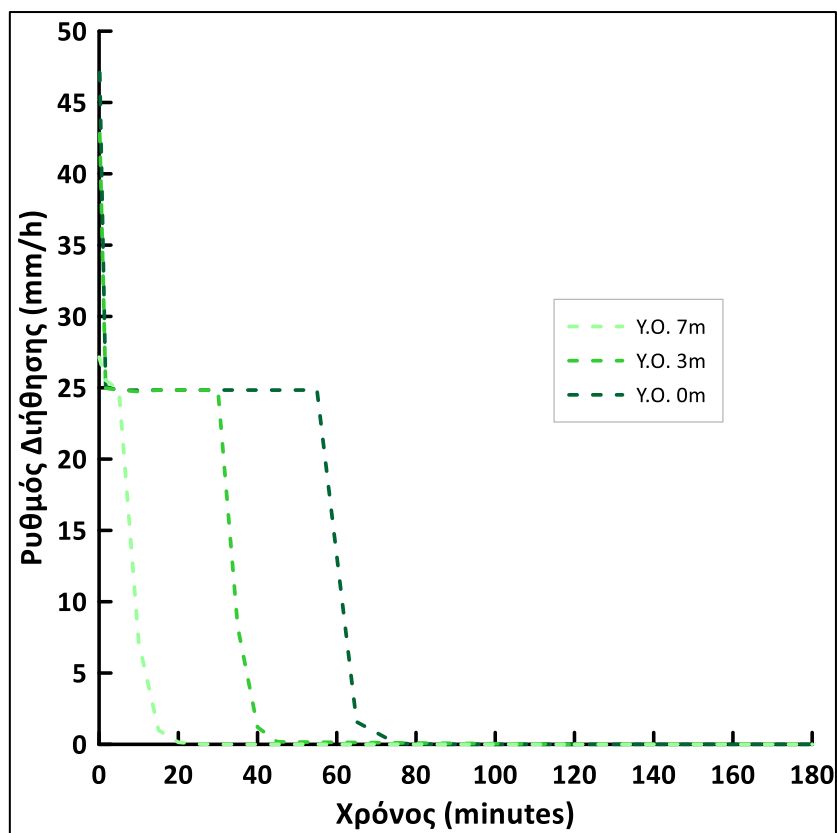
Διάγραμμα 35: Ρυθμός Διήθησης (Άμμος - Βίαιη ένταση βροχή - $Q/K_s=0.20$)



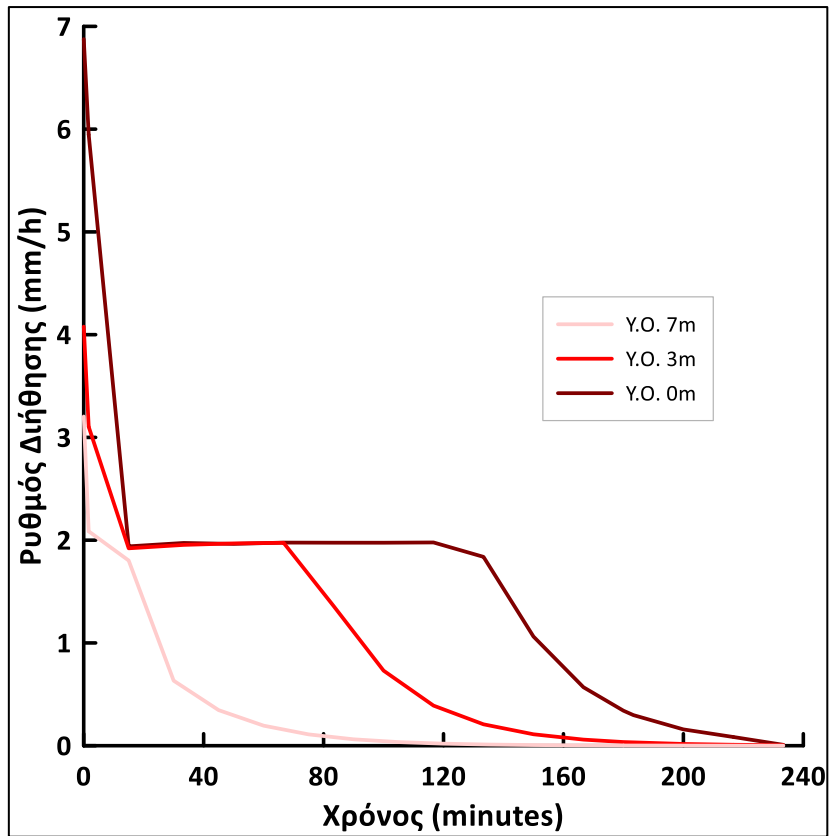
Διάγραμμα 36: Ρυθμός Διήθησης (Ιλύς - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/K_s=0.32$)



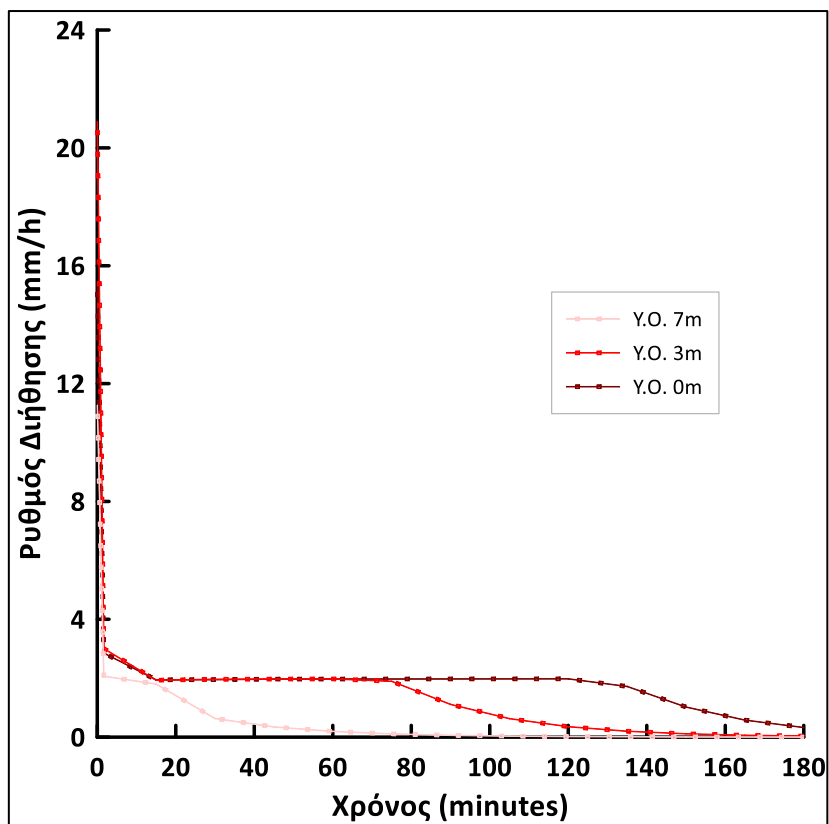
Διάγραμμα 37: Ρυθμός Διήθησης (ιλύς - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/K_s=1.36$)



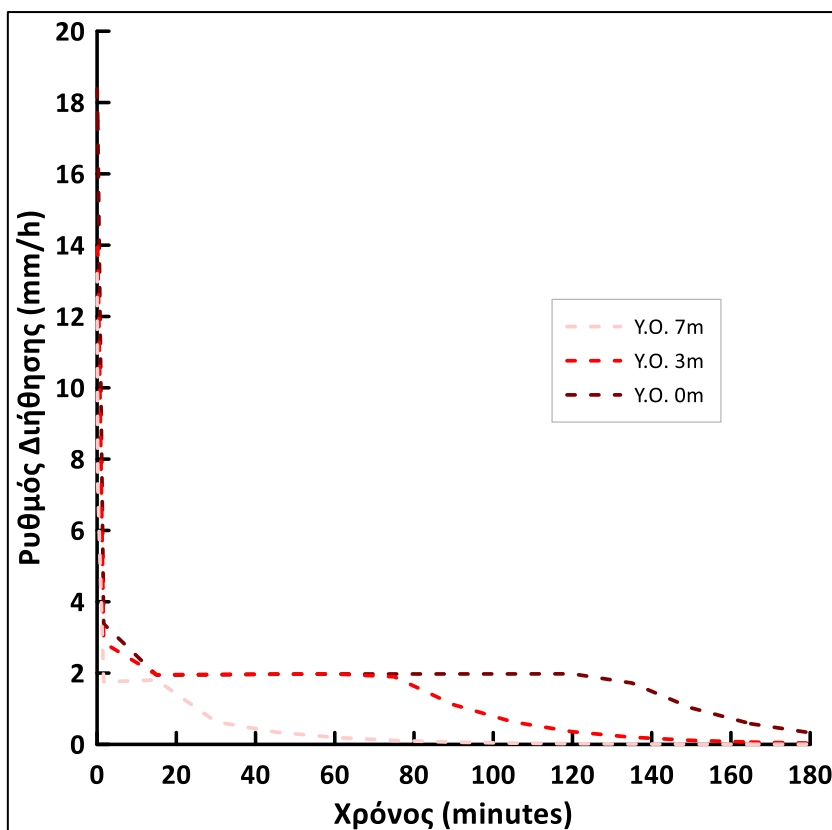
Διάγραμμα 38: Ρυθμός Διήθησης (ιλύς - Βίατη ένταση βροχή - $Q/K_s=2.33$)



Διάγραμμα 39: Ρυθμός Διήθησης (Άργιλος - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/Ks=4.04$)



Διάγραμμα 40: Ρυθμός Διήθησης (Άργιλος - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=17.18$)



Διάγραμμα 41: Ρυθμός Διήθησης (Άργιλος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=29.46$)

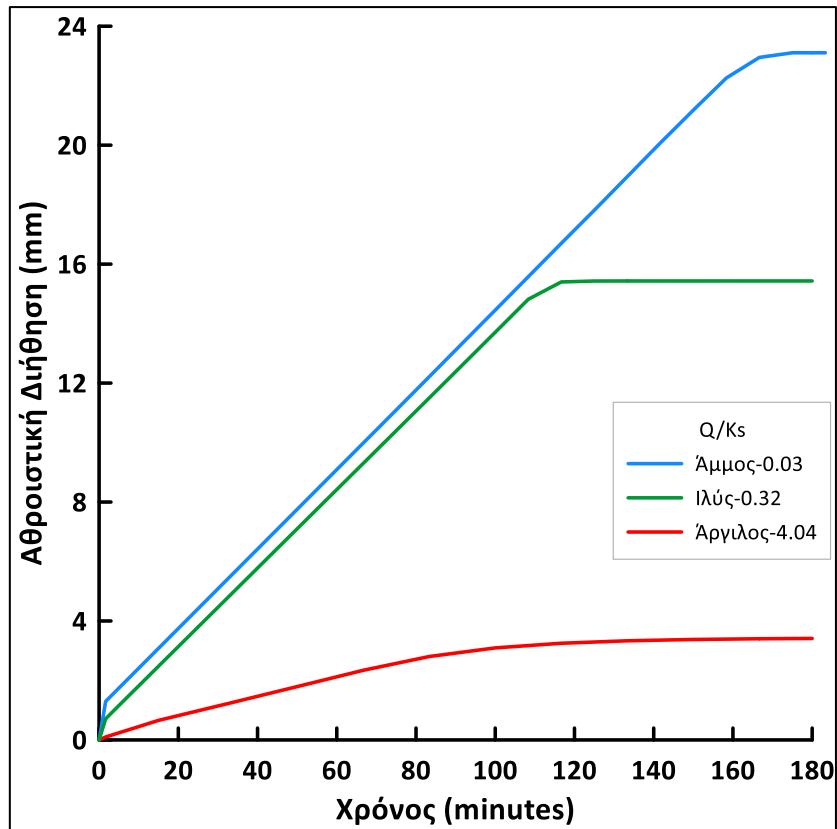
5.4 Αθροιστική Διήθηση

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα μελετηθεί η αθροιστική διήθηση. Είναι η συνολική ποσότητα νερού που διέρχεται στους πόρους του υλικού μέχρι αυτοί να πληρωθούν, δηλαδή να επέλθει πλήρης κορεσμός. Όπως στο προηγούμενο υποκεφάλαιο έτσι και εδώ συγκρίνεται ο διαφορετικός τύπος υλικού υπό συγκεκριμένη ένταση βροχής, οι 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής στο ίδιο υλικό καθώς και τα 3 διαφορετικά ύψη υδροφόρου ορίζοντα σε συγκεκριμένες συνθήκες υλικού και έντασης βροχής. Για τις 2 πρώτες κατηγορίες η σύγκριση γίνεται σε αναλύσεις όπου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στα 3m.

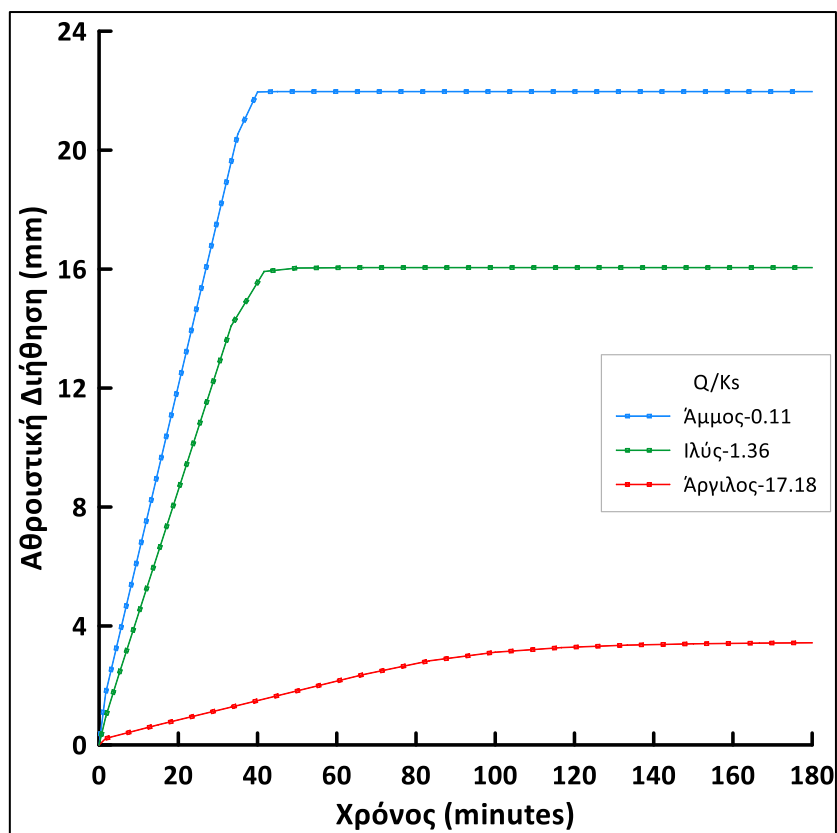
Το καθένα από τα διαγράμματα 42, 43 και 44 αναφέρονται στις 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής, μέτρια ισχυρή και βίαη αντίστοιχα. Οι γραφικές παραστάσεις ξεκινάνε από το 0 και το διηθούμενο νερό αυξάνεται έως ότου σταθεροποιηθεί σε μια συγκεκριμένη τιμή που σημαίνει ότι το προσομοίωμα έχει γίνει πλήρως κορεσμένο. Παρατηρείται επίσης και στις 3 περιπτώσεις ότι τη μεγαλύτερη ποσότητα διηθούμενου νερού την έχει η άμμο και ακολουθεί η ιλύς και στη συνέχεια η άργιλος. Η συγκεκριμένη παρατήρηση είναι απολύτως φυσιολογική καθώς το κενό μεταξύ των κόκκων της άμμου συγκριτικά με αυτό της ιλύς και αργίλου είναι πολύ μεγαλύτερο με αποτέλεσμα να μπορεί να δεχτεί περισσότερο νερό.

Τα επόμενα 3 διαγράμματα 45, 46 και 47 αναφέρονται στην άμμο, την ιλύ και την άργιλο αντίστοιχα. Οι 3 γραφικές παραστάσεις διαφορετικού λόγου q/K_s αντιπροσωπεύουν τις 3 διαφορετικές εντάσεις βροχόπτωσης. Από τα 3 διαγράμματα είναι αντιληπτό ότι ανεξαρτήτως της έντασης της βροχής το τελικό διηθούμενο νερό είναι το ίδιο, κάτι απόλυτα λογικό καθώς το πορώδες του υλικού είναι αυτό που καθορίζει την συνολική διαθέσιμη χωρητικότητα. Στο διάγραμμα 45 για την άμμο παρατηρούνται οι 3 γραφικές παραστάσεις να έχουν διαφορετική κλίση. Πιο συγκεκριμένα πιο ήπια κλίση έχει η γραφική παράσταση με λόγο q/K_s 0.03 (μέτρια ένταση), ακολουθεί με πιο έντονη κλίση η γραφική παράσταση με λόγο 0.11 (ισχυρή ένταση) και πιο απότομη αυτή με 0.20. Αυτό συμβαίνει αφού η άμμος έχει μεγαλύτερο συντελεστή K_s από τις εντάσεις της βροχής με αποτέλεσμα το νερό να διηθείται με ρυθμό όσο και η ένταση της βροχής. Επομένως, η ένταση της βροχής συμβάλει στον χρόνο κορεσμού του εδάφους. Το διάγραμμα 46 που αντιστοιχεί στην ιλύ φαίνεται για τους λόγους 1.36 και 2.33 οι καμπύλες να συμπίπτουν. Οι δύο γραφικές παραστάσεις αντιστοιχούν σε ισχυρή και βίαιη ένταση βροχή. Ο λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας που σημαίνει ότι το έδαφος δεν έχει την ικανότητα να απορροφήσει όλη την ποσότητα του νερού από τη βροχή και την απορροφά με ρυθμό ίσο με το συντελεστή K_s . Αντίθετα στην ανάλυση με λόγο 0.32 μικρότερο της μονάδας που αντιστοιχεί σε βροχή μέτριας έντασης η διήθηση γίνεται με μικρότερο ρυθμό γι' αυτό και η καμπύλη έχει μικρότερη κλίση από τις άλλες 2. Τέλος στο διάγραμμα 47 που αφορά την άργιλο όλες οι καμπύλες συμπίπτουν μεταξύ τους αφού και στις 3 αναλύσεις ο λόγος είναι μεγαλύτερος της μονάδας οπότε το νερό της βροχής διηθείται με ρυθμό όσο ο συντελεστής K_s .

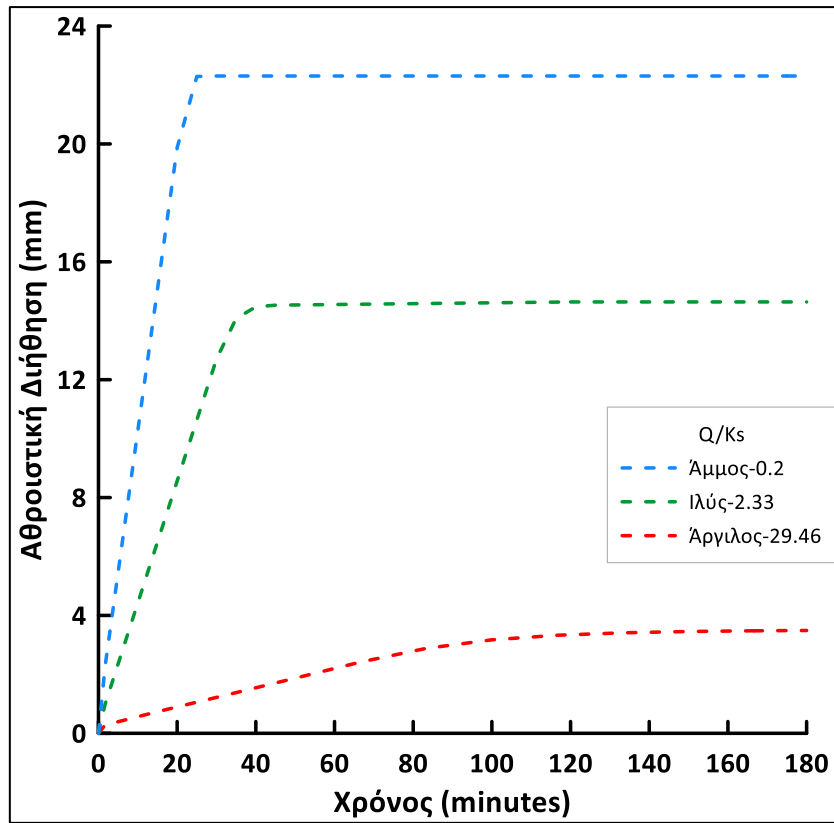
Στα διαγράμματα 48 έως 56 μελετάται η επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα υπό σταθερές συνθήκες εδάφους και έντασης βροχόπτωσης. Για την περίπτωση της άμμου αναφέρονται τα διαγράμματα 48, 49 και 50 για τις 3 διαφορετικές συνθήκες βροχόπτωσης. Για την περίπτωση της ιλύς αναφέρονται τα διαγράμματα 51, 52 και 53. Στην άργιλο αναφέρονται τα τελευταία 3 διαγράμματα 54, 55 και 56. Και στα 3 είναι αντιληπτό ότι η θέση του υδροφόρου ορίζοντα παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στον χρόνο πλήρωσης των κενών από νερό όσο και στην τελική ποσότητα που θα διεισδύσει στους πόρους. Στα διαγράμματα για την άμμο και ιλύ παρατηρείται ότι οι γραφικές παραστάσεις συμπίπτουν μέχρι όπου το υλικό έρθει σε κορεσμό ενώ στην άργιλο δεν είναι τόσο έντονη αυτή η παρατήρηση.



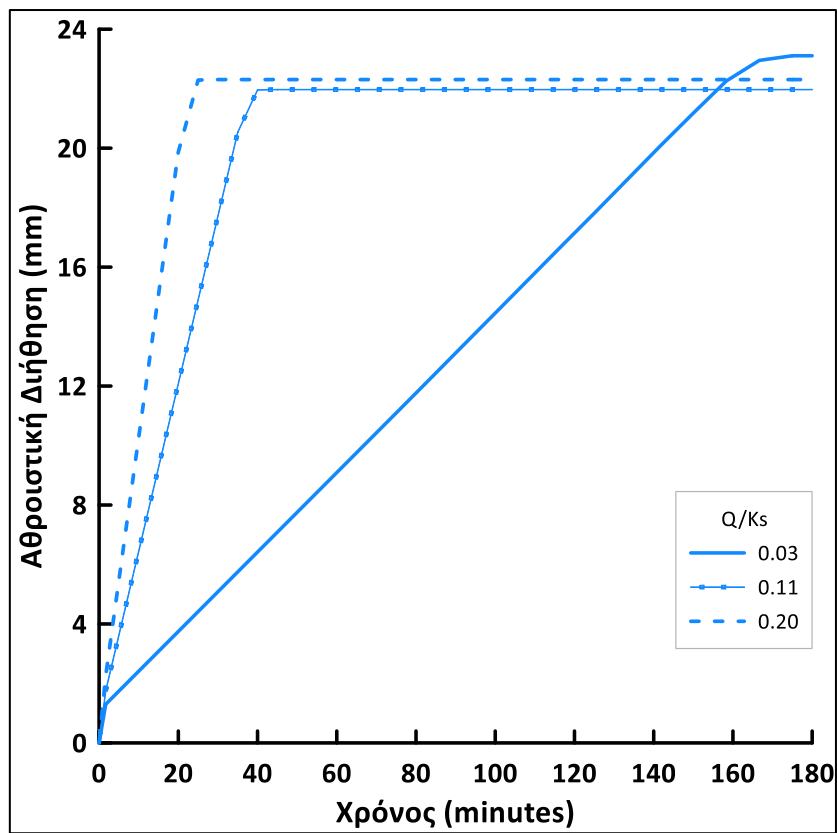
Διάγραμμα 42: Αθροιστική Διήθηση (Μέτρια ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



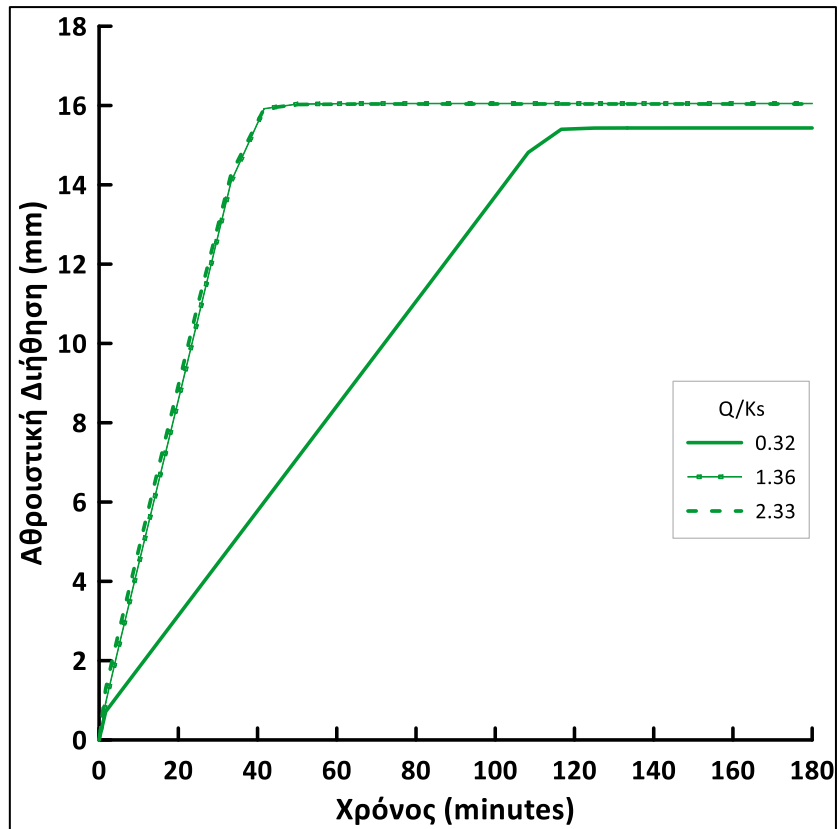
Διάγραμμα 43: Αθροιστική Διήθηση (Ισχυρή ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



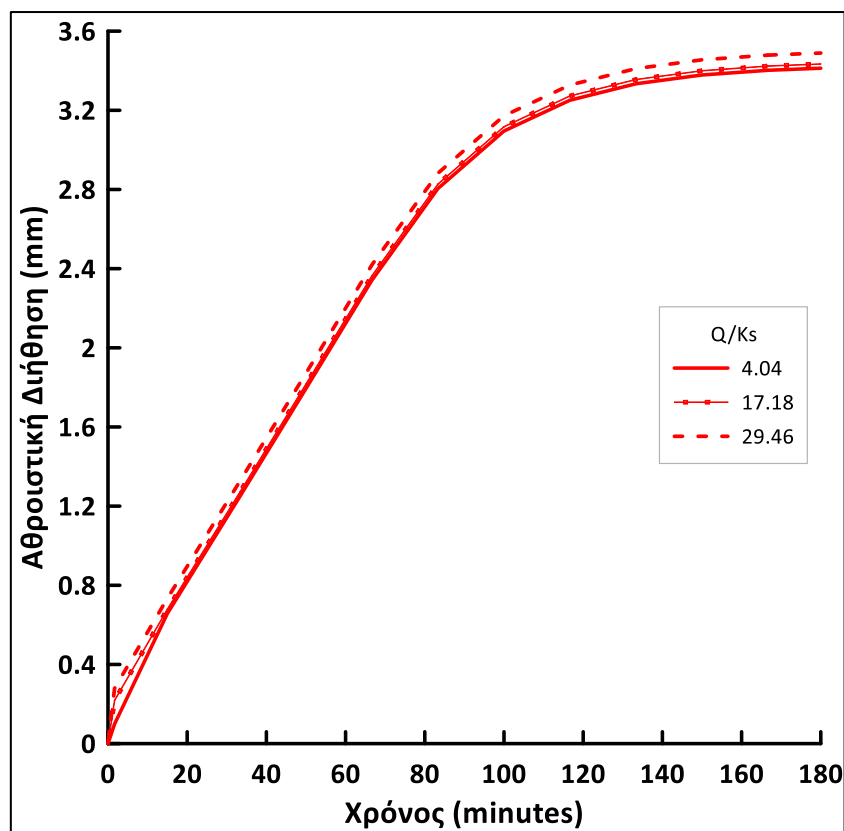
Διάγραμμα 44: Αθροιστική Διήθηση (Βίαη ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



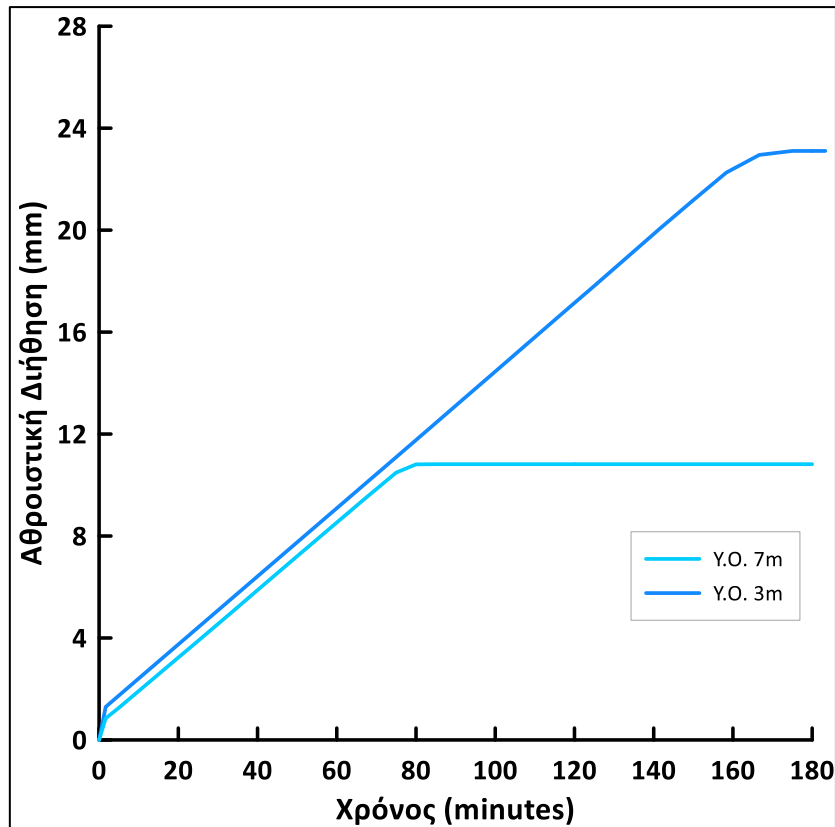
Διάγραμμα 45: Αθροιστική Διήθηση (Άμμος - Υ.Ο. 3m)



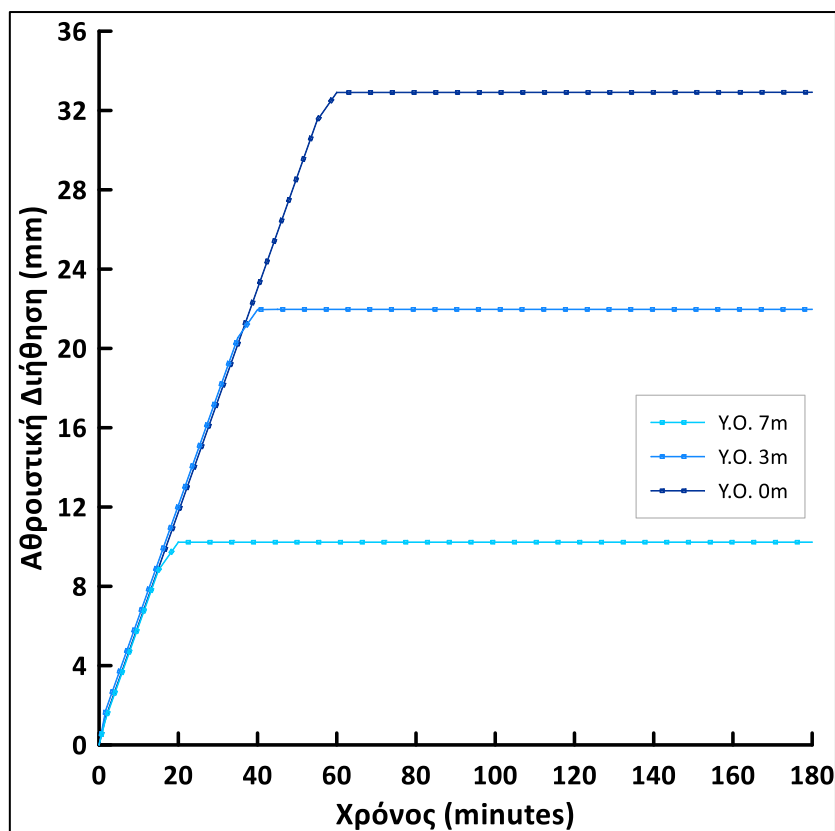
Διάγραμμα 46: Αθροιστική Διήθηση (Ιλύς - Υ.Ο. 3m)



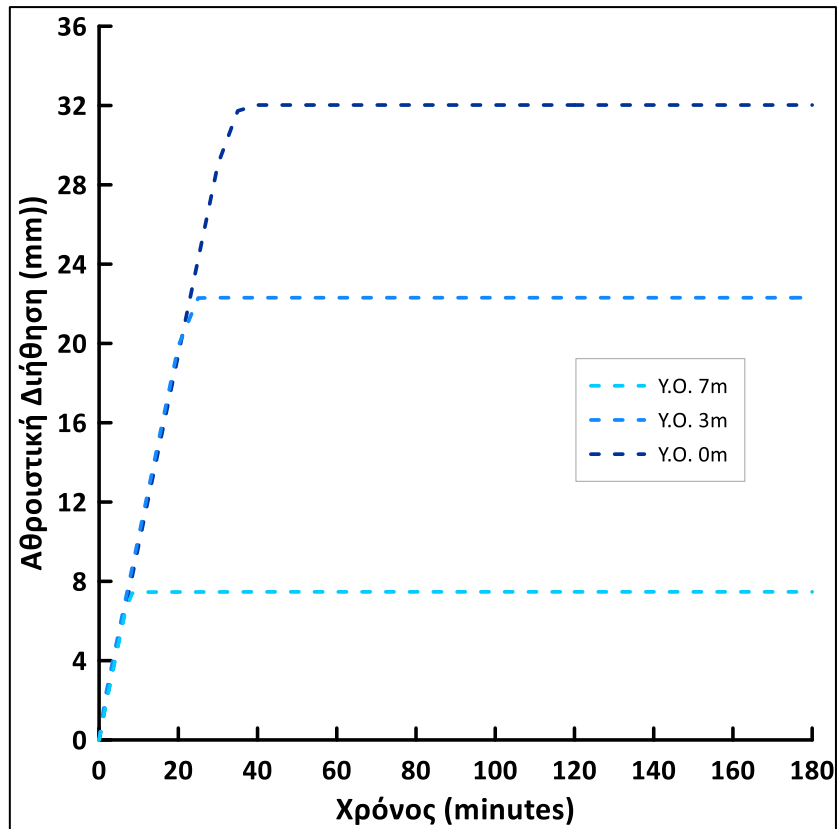
Διάγραμμα 47: Αθροιστική Διήθηση (Άργιλος - Υ.Ο. 3m)



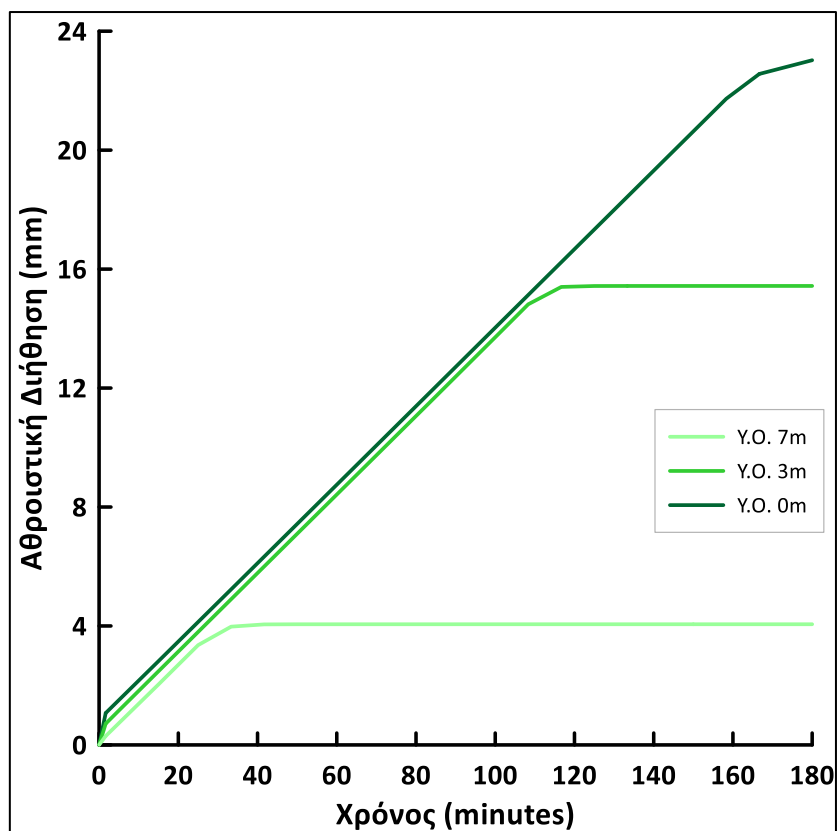
Διάγραμμα 48: Αθροιστική Διήθηση (Άμμος – Μέτρια ένταση βροχή - $Q/Ks=0.03$)



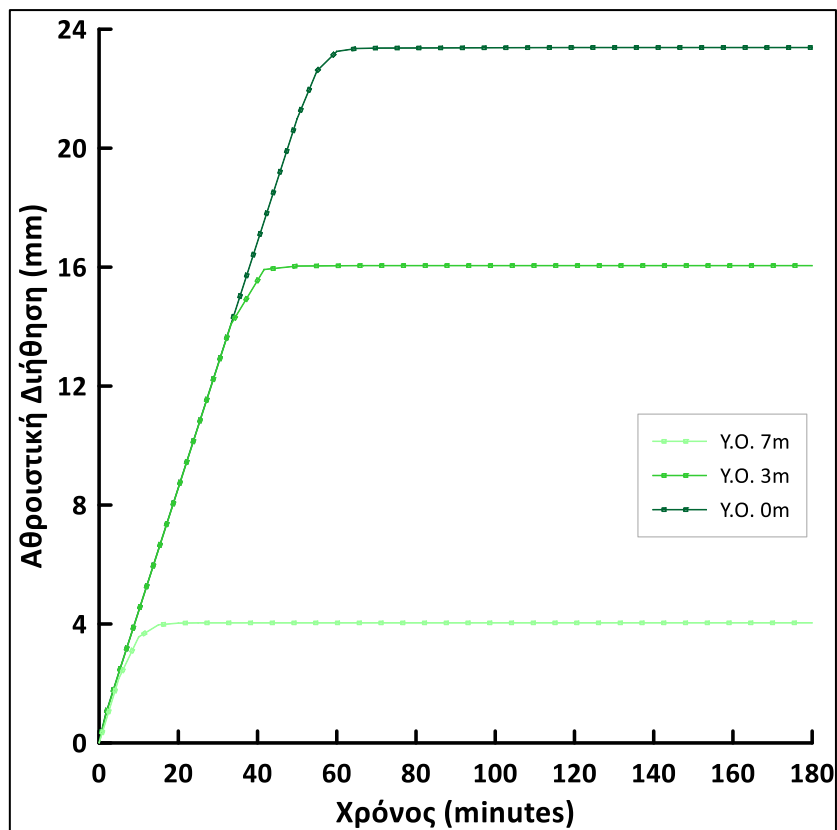
Διάγραμμα 49: Αθροιστική Διήθηση (Άμμος - ισχυρή ένταση βροχή - $Q/Ks=0.11$)



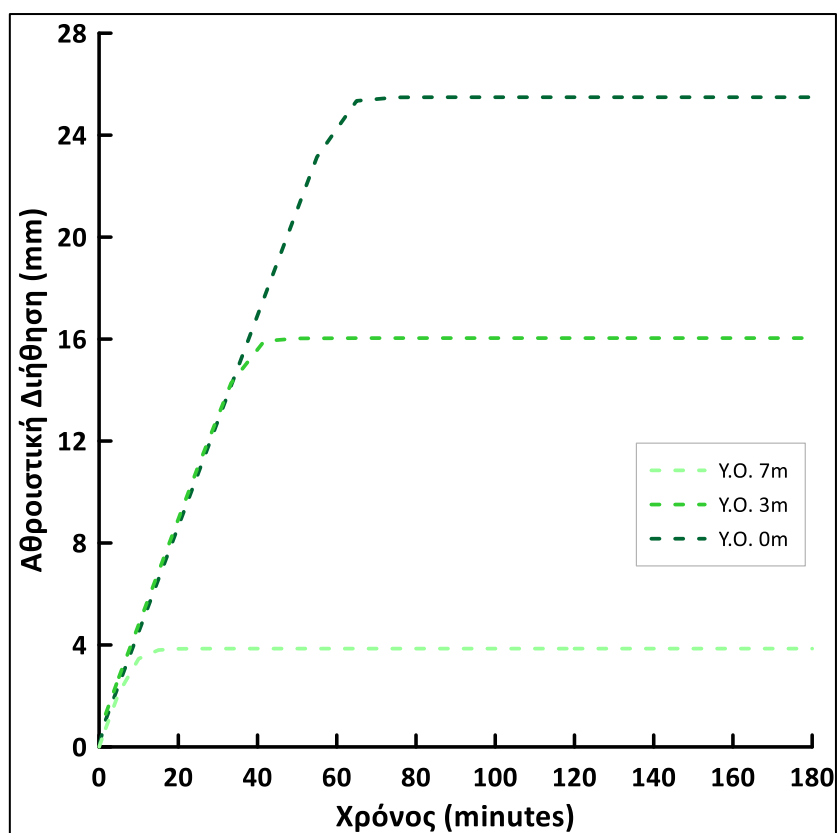
Διάγραμμα 50: Αθροιστική Διήθηση (Άμμος - Βίαιη ένταση βροχής - $Q/K_s=0.20$)



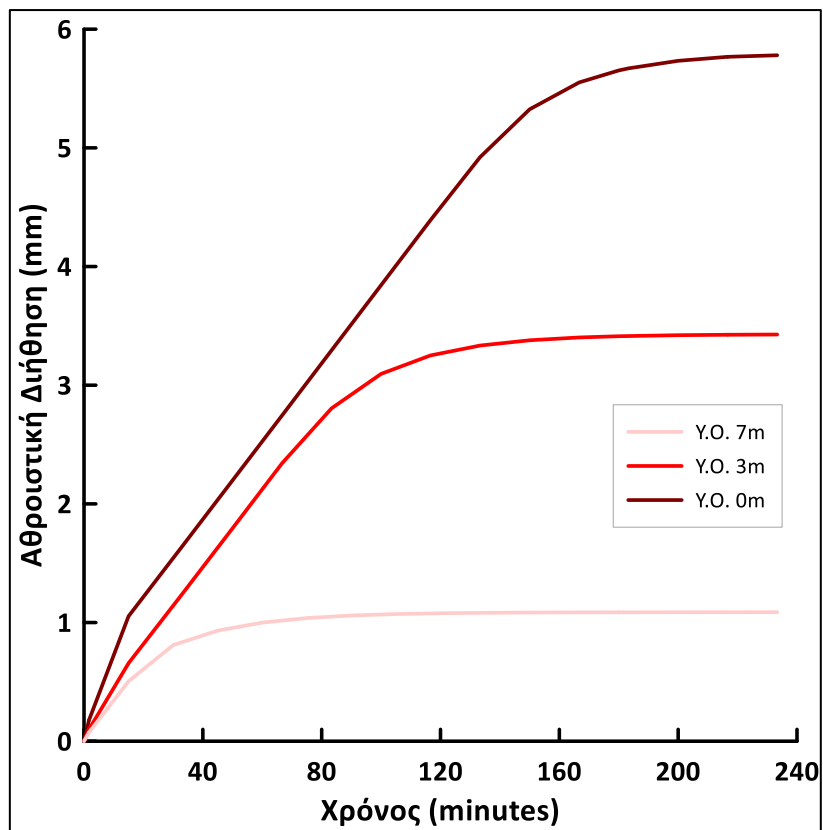
Διάγραμμα 51: Αθροιστική Διήθηση (Ιλύς - μέτρια ένταση βροχής - $Q/K_s=0.32$)



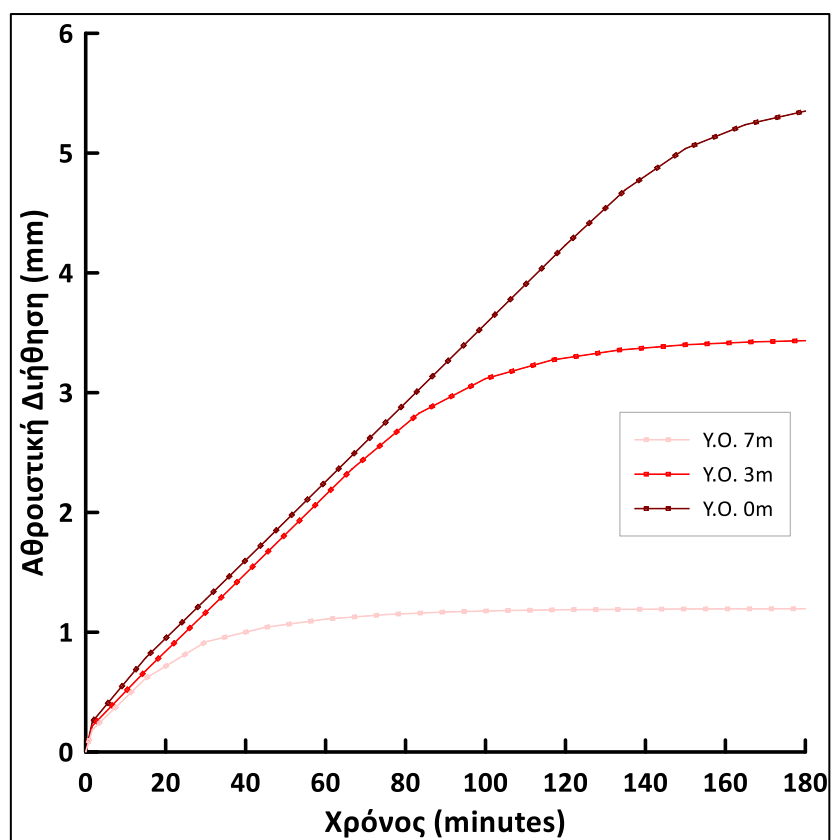
Διάγραμμα 52: Αθροιστική Διήθηση (Ιλύς - Ισχυρή ένταση βροχής - $Q/K_s=1,36$)



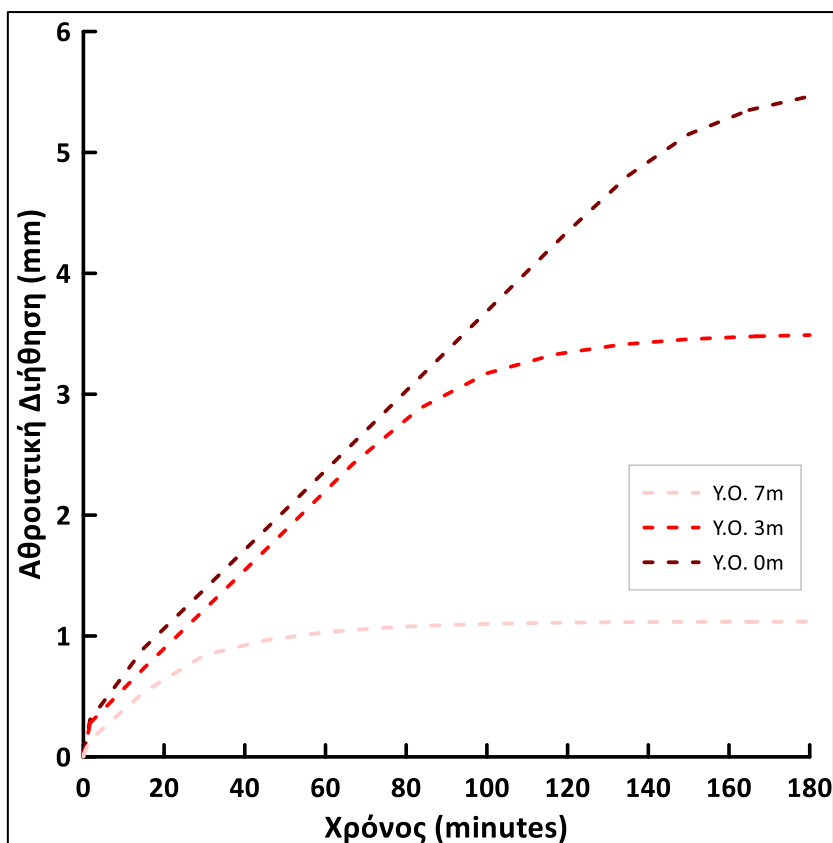
Διάγραμμα 53: Αθροιστική Διήθηση (Ιλύς - Βίαη ένταση βροχής - $Q/K_s=2,33$)



Διάγραμμα 54: Αθροιστική Διήθηση (Άργιλος - μέτρια ένταση βροχή - $Q/K_s=4.04$)



Διάγραμμα 55: Αθροιστική Διήθηση (Άργιλος - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/K_s=17.18$)



Διάγραμμα 56: Αθροιστική Διήθηση (Άργιλος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/Ks=29.46$)

6 ΕΞΕΛΙΞΗ ΛΙΜΝΑΖΟΝΤΟΣ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΠΙΘΑΝΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

6.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα αξιολογηθούν οι παράμετροι που σχετίζονται άμεσα με τα πλημμυρικά φαινόμενα. Αυτοί είναι ο ρυθμός απορροής και το λιμνάζον νερό. Ο όρος ρυθμός απορροής αναφέρεται στον ρυθμό με τον οποίο το νερό παραμένει στην επιφάνεια και δεν εισέρχεται στο έδαφος. Ο όρος λιμνάζον νερό αναφέρεται στην αθροιστική ποσότητα νερού που δημιουργείται στην επιφάνεια του εδάφους σε συγκεκριμένο χρόνο και είναι ουσιαστικά το πλημμυρικό φαινόμενο. Μέσω αυτή της αξιολόγησης θα είναι άμεσα αντιληπτό πως επιδρά ο τύπος του εδάφους, η ένταση της βροχής και η θέση του υδροφόρου ορίζοντα στην ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων τόσο χρονικά όσο και ποσοτικά.

6.2 Ρυθμός Απορροής

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο θα αξιολογηθεί ο ρυθμός απορροής δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο το νερό παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους και δεν διέρχεται στους πόρους του. Οι συγκρίσεις θα είναι ίδιες με αυτές που σχολιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή ο διαφορετικός τύπος υλικού υπό συγκεκριμένη ένταση βροχής, οι 3 διαφορετικές εντάσεις βροχής στο ίδιο υλικό καθώς και τα 3 διαφορετικά ύψη υδροφόρου ορίζοντα σε συγκεκριμένες συνθήκες υλικού και έντασης βροχής. Για τις 2 πρώτες κατηγορίες η σύγκριση γίνεται σε αναλύσεις όπου ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στα 3m.

Στα διαγράμματα 57, 58 και 59 παρουσιάζεται η επιρροή του είδους του εδάφους στις 3 διαφορετικές εντάσεις βροχόπτωσης. Στο διάγραμμα 57 που τα αποτελέσματα αντιστοιχούν σε βροχή μέτριας έντασης παρατηρείται ότι ο ρυθμός απορροής της αργίλου ξεκινάει από τα 4mm/h από την αρχή της προσομοίωσης του φαινομένου. Αυτό συμβαίνει καθώς όπως έχει αναφερθεί η άργιλος έχει πολύ μικρό συντελεστή K_s με αποτέλεσμα να μην έχει την ικανότητα να απορροφήσει το νερό ακόμα και μιας βροχής μέτριας έντασης. Στη συνέχεια παρατηρείται σταδιακή αύξηση του ρυθμού απορροής μέχρις ότου φτάσει την τιμή της έντασης της βροχής δηλαδή τα 8mm/h που σημαίνει ότι όσο νερό πέφτει παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους δηλαδή το υλικό έχει έρθει σε πλήρη κορεσμό. Στην γραφική παράσταση της ιλύς παρατηρείται ότι μέχρι τα 110 λεπτά ο ρυθμός απορροής είναι 0 δηλαδή όλο το νερό διέρχεται στους πόρους του εδάφους ενώ στη συνέχεια παρατηρείται μια απότομη αύξηση του ρυθμού και φτάνει τα 8mm/h δηλαδή όσο και η ένταση της βροχής κάτι που υποδηλώνει τον πλήρη κορεσμό από νερό. Όσον αφορά την ανάλυση της άμμου παρατηρείται ότι απαιτούνται 140 λεπτά για να γίνει ο ρυθμός απορροής μεγαλύτερος του μηδενός, περισσότερος χρόνος από την ιλύ καθώς η άμμος είναι πιο κοκκώδες υλικό με μεγαλύτερο πορώδες από την ιλύ άρα περισσότερο διαθέσιμο χώρο για να πληρωθεί από το νερό.

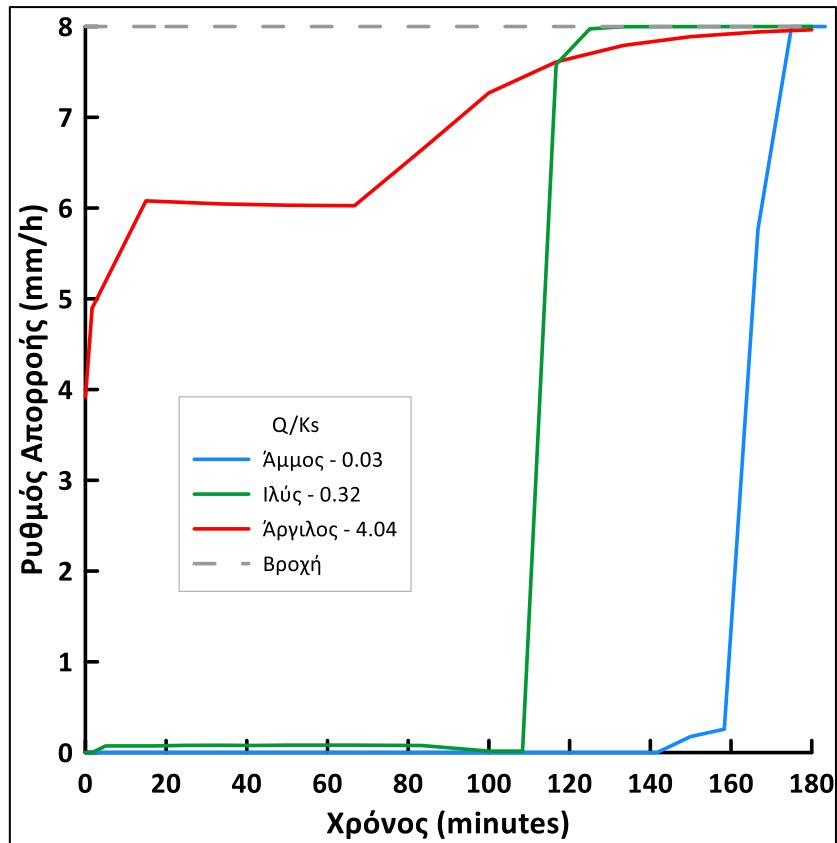
Στο διάγραμμα 58 το οποίο αναφέρεται σε βροχή ισχυρής έντασης παρατηρείται ένα παρόμοιο μοτίβο με το προηγούμενο με κάποιες διαφορές. Πιο συγκεκριμένα, η άργιλος εξακολουθεί να έχει έναν υψηλό αρχικό ρυθμό απορροής στα 20mm/h με μία απότομη αύξηση στα 32mm/h και στη συνέχεια ήπια αύξηση μέχρι τα 34mm/h που είναι η ένταση της βροχής. Η ιλύς ξεκινάει με μηδενικό ρυθμό απορροής στην αρχή του φαινομένου και αυξάνεται απότομα στα 9mm/h για περίπου 30 λεπτά, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται στο μέγεθος της έντασης τη βροχής που υποδηλώνει και τον πλήρη κορεσμό. Τέλος, η άμμος όπως στην περίπτωση της μέτριας βροχής έτσι και εδώ λόγω του ότι το νερό διηθείται πλήρως ο ρυθμός απορροής είναι 0 για χρόνο 30 λεπτών και στη συνέχεια αυξάνεται στην τιμή της έντασης της βροχής αφού οι πόροι έχουν πληρωθεί με νερό.

Το διάγραμμα 59 που αναφέρεται σε βροχή βίαιης έντασης παρατηρείται αρχικά ότι η άργιλος έχει ίδια συμπεριφορά με τις προηγούμενες περιπτώσεις, η ιλύς φαίνεται να έχει ίδια συμπεριφορά με την περίπτωση της ισχυρής βροχόπτωσης ενώ η άμμος φαίνεται να έρχεται σε πλήρη κορεσμό σε μικρότερο χρονικό διάστημα από τις προηγούμενες περιπτώσεις και αν είναι στα 20 λεπτά.

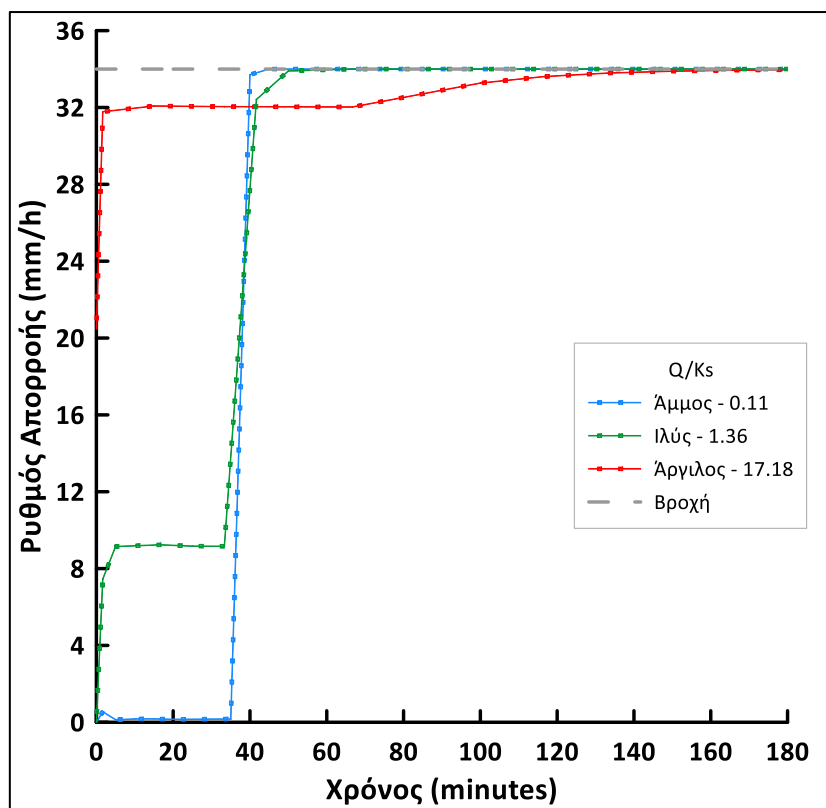
Τα διαγράμματα 60, 61 και 62 αποσκοπούν στην αξιολόγηση της επιρροής της έντασης της βροχής στο ρυθμό απορροής. Οι αναλύσεις με εδαφικό υλικό την άμμο αποτυπώνονται στο διάγραμμα 60. Αρχικά διαπιστώνεται ότι όσος αυξάνεται ο λόγος Q/K_s αυξάνεται και ο τελικός ρυθμός απορροής. Επίσης με την αύξηση του λόγου Q/K_s μειώνεται ο χρόνος κορεσμού του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα λόγο 0.03 (μέτρια ένταση) το υλικό απαιτεί περίπου 180λεπτά για να κορεστεί, για λόγο 0.11 (ισχυρή ένταση) το υλικό απαιτεί περίπου 40λεπτά ώστε να πληρωθούν οι πόροι του με νερό, ενώ για λόγο 0.20 (βίαιη ένταση) απαιτούνται περίπου 25 λεπτά. Και στις 3 γραφικές παραστάσεις ο ρυθμός απορροής πριν τον κορεσμό ισούται με 0. Όσον αφορά την ιλύ παρατηρείται ότι οι γραφικές παραστάσεις για τους λόγους 1.36 και 2.33 ταυτίζονται σε θέμα χρόνων δηλαδή ότι ο κορεσμός επέρχεται περίπου στα 40λεπτά. Διαφέρουν στις τιμές του ρυθμού απορροής που οφείλεται στον διαφορετικό ρυθμό που πέφτει το νερό στην επιφάνεια του εδάφους. Για τον λόγο 0.32 παρατηρείται ότι δεν υπάρχει απορροή σε αρχικά στάδια της βροχόπτωσης μέχρι ότου το έδαφος τείνει να πληρωθεί με νερό στους πόρους του. Τέλος όσον αφορά της αναλύσεις της αργίλου είναι φανερό ότι οι γραφικές παραστάσεις είναι παρόμοιες απλά μετατοπισμένες κατακόρυφα ανάλογα την ένταση της βροχής. Κάτι το οποίο μπορεί να παρατηρηθεί είναι ότι ο λόγος όταν είναι μικρότερους του 1 δεν παρατηρείται απορροή από την αρχή του φαινομένου ενώ όταν είναι μεγαλύτερος του 1 τότε η απορροή είναι δεδομένη με την έναρξη της βροχόπτωσης.

Στη συνέχεια εξετάζεται η συμβολή του υδροφόρου ορίζοντα στον ρυθμό διήθησης στα διαγράμματα 63 έως 71. Από όλα τα διαγράμματα είναι αντιληπτό ότι ο υδροφόρος ορίζοντας έχει καθοριστικό ρόλο στον χρόνο που απαιτείται για να έρθει το προσομοίωμα σε πλήρη κορεσμό. Αυτό αποτυπώνεται στα διαγράμματα με τις γραφικές παραστάσεις να μετακινούνται προς τα αριστερά όσο ο υδροφόρος ορίζοντας είναι πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ δεν παρατηρείται μεταβολή τόσο στην κλίση τους όσο και στις τιμές του ρυθμού απορροής. Για παράδειγμα παρατηρώντας το διάγραμμα 64 για την ανάλυση με τον υδροφόρο ορίζοντα στην βάση της προσομοίωσης δηλαδή τα 0m, ο ρυθμός απορροής αυξάνεται στα 55 λεπτά, στην περίπτωση του υδροφόρου ορίζοντα να είναι στα 3m η αύξηση του ρυθμού απορροής γίνεται στα 35 λεπτά ενώ για υδροφόρο στα 7m αυτό γίνεται στα 15 λεπτά. Ένα ακόμα διαχωρισμός που μπορεί να γίνει είναι στις αναλύσεις με λόγο Q/K_s μικρότερο του 1 και αυτές με μεγαλύτερο της μονάδας. Πιο συγκεκριμένα τα διαγράμματα 63 έως 66 που ο λόγος κυμαίνεται από 0 έως 1 παρατηρείται ότι ο ρυθμός απορροής διατηρείται μηδενικός για το μεγαλύτερο

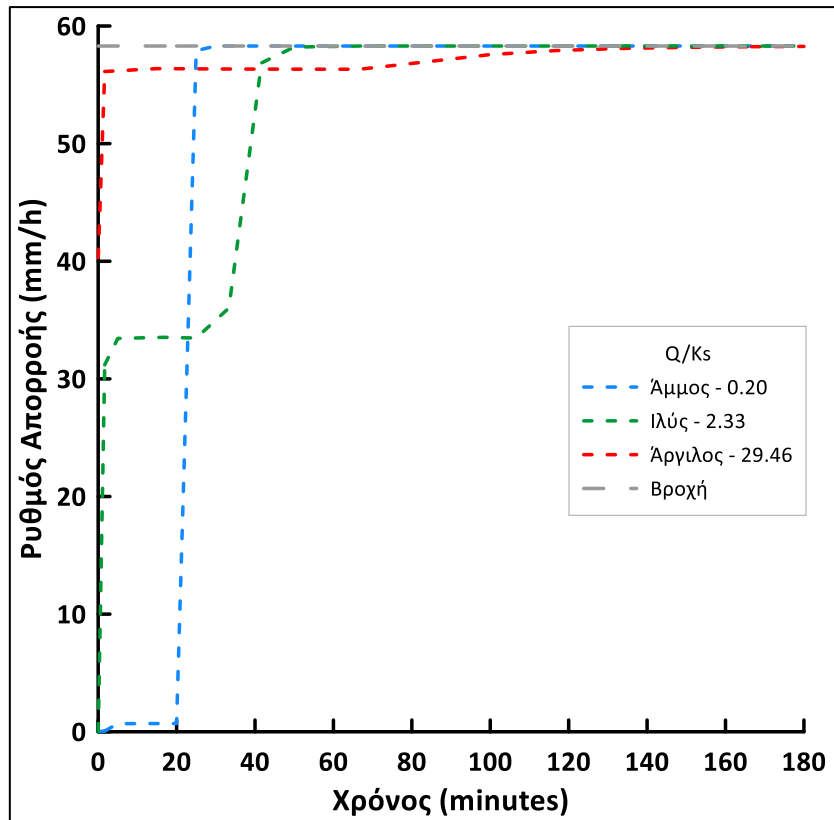
μέρος της προσομοίωσης και αυξάνεται όταν οι πόροι δεν μπορούν να δεχθούν περεταίρω νερό με αποτέλεσμα ο ρυθμός απορροής να αυξάνεται και να ισούται με την ένταση της βροχής. Τα διαγράμματα 67 έως 71 που αναλύσεις αντιστοιχούν σε λόγο μεγαλύτερο της μονάδας παρατηρείται ότι ο ρυθμός απορροής μέχρι να κορεστεί το υλικό είναι μεγαλύτερος του μηδενός και πρακτικά ισούται με την διαφορά της έντασης της βροχής και της υδραυλικής αγωγιμότητας του υλικού. Για παράδειγμα στο διάγραμμα 67 για την ιλύ η οποία έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με 0.6m/d δηλαδή 25mm/h ο ρυθμός απορροής μέχρι τον κορεσμό είναι ίσος με 9mm/h που προκύπτει από τη διαφορά με την βροχή έντασης 24mm/h. Επίσης παρατηρείται στην ιλύ η ομαλή αύξηση του ρυθμού απορροής μέχρι την ανώτερη τιμή που λαμβάνει κάτι το οποίο στις περιπτώσεις της άμμου και ιλύος δεν παρατηρείται, αυτό οφείλεται στην μικρή διαπερατότητα που έχει η άργιλος που προκαλεί χαμηλό ρυθμό διήθησης του νερού.



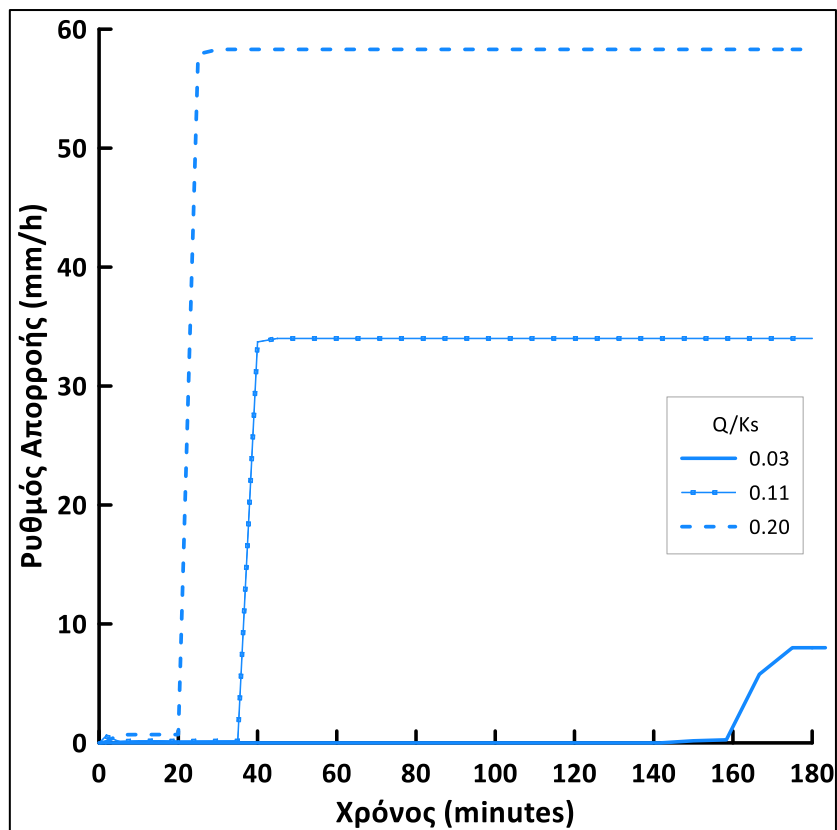
Διάγραμμα 57: Ρυθμός Απορροής (Μέτρια ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



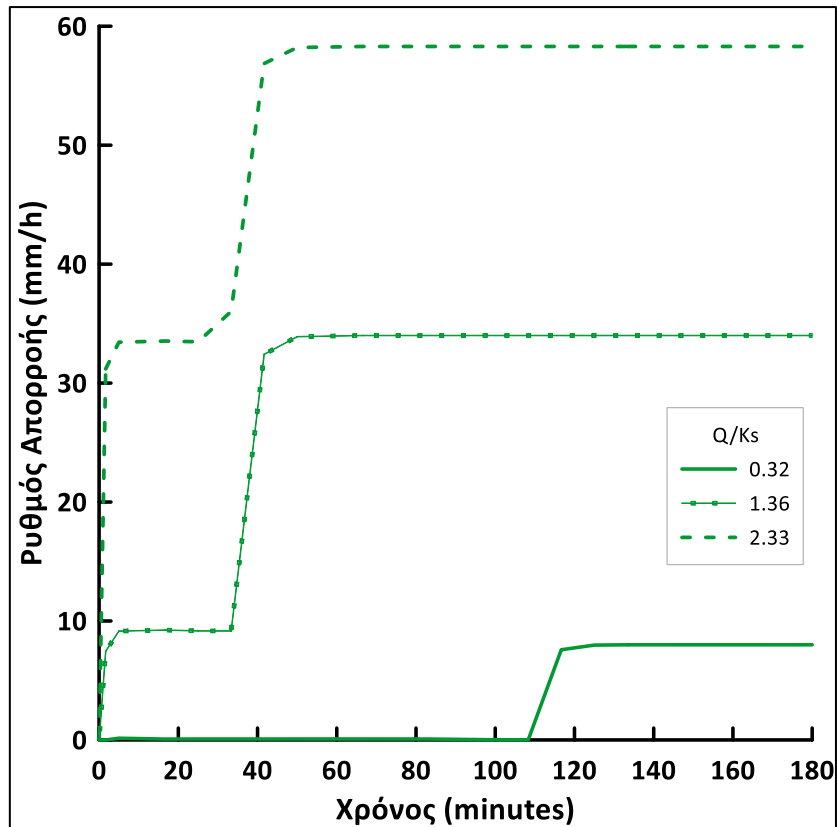
Διάγραμμα 58: Ρυθμός Απορροής (Ισχυρή ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



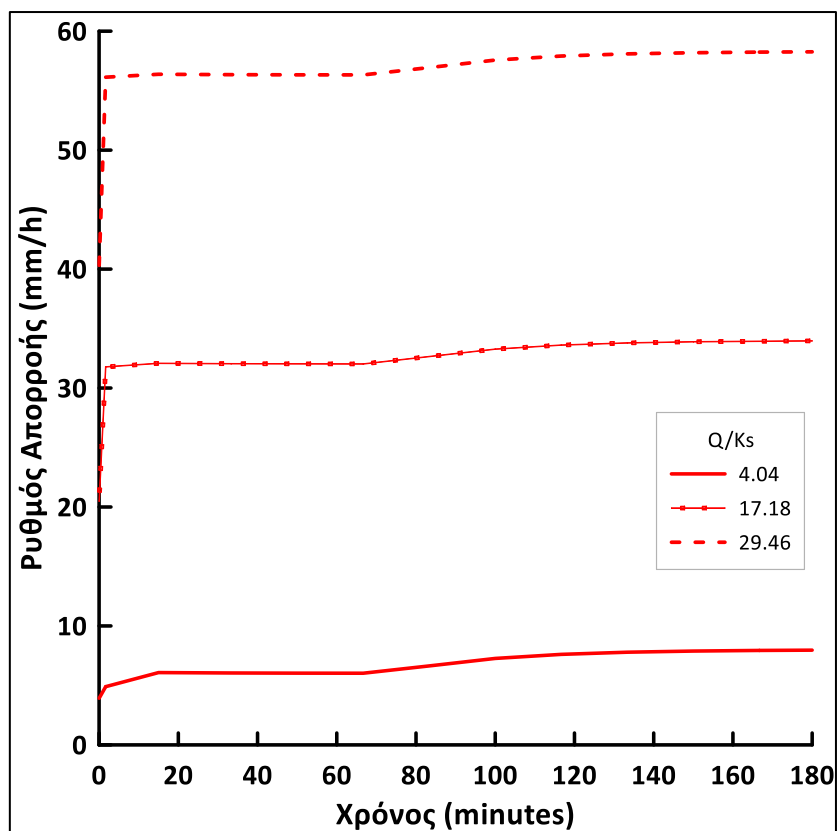
Διάγραμμα 59: Ρυθμός Απορροής (Βίαη ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



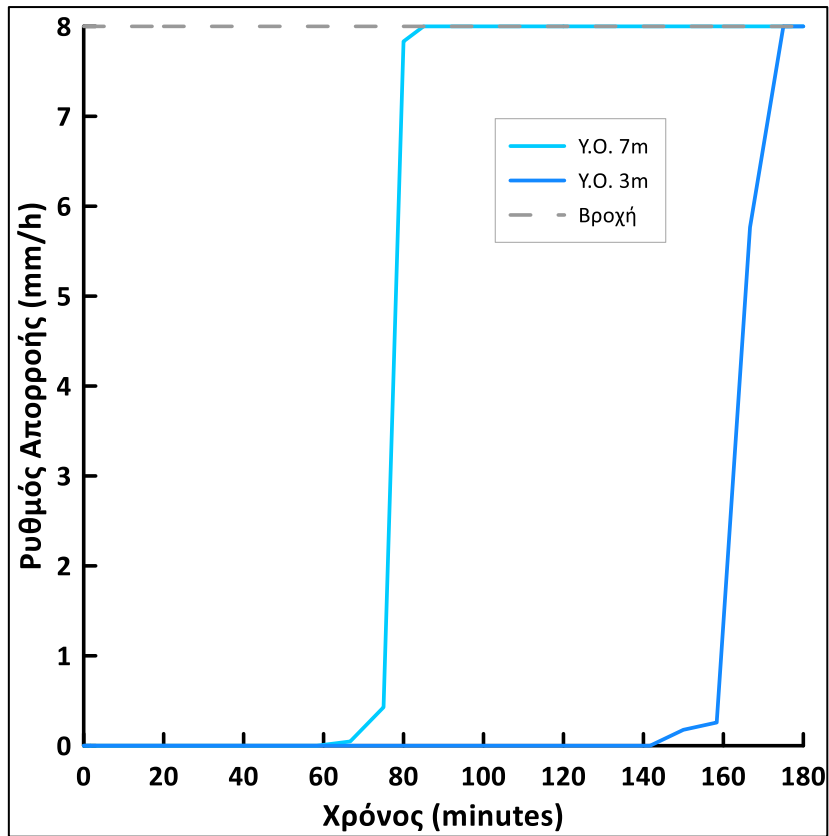
Διάγραμμα 60: Ρυθμός Απορροής (Άμμος - Υ.Ο. 3m)



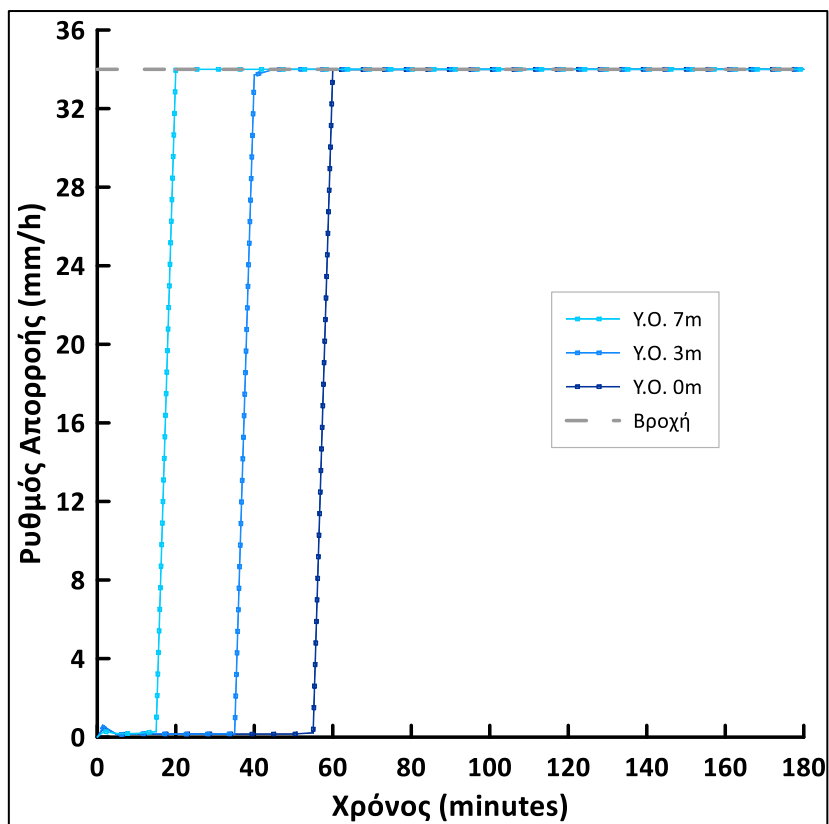
Διάγραμμα 61: Ρυθμός Απορροής (Ιλύς - Υ.Ο. 3m)



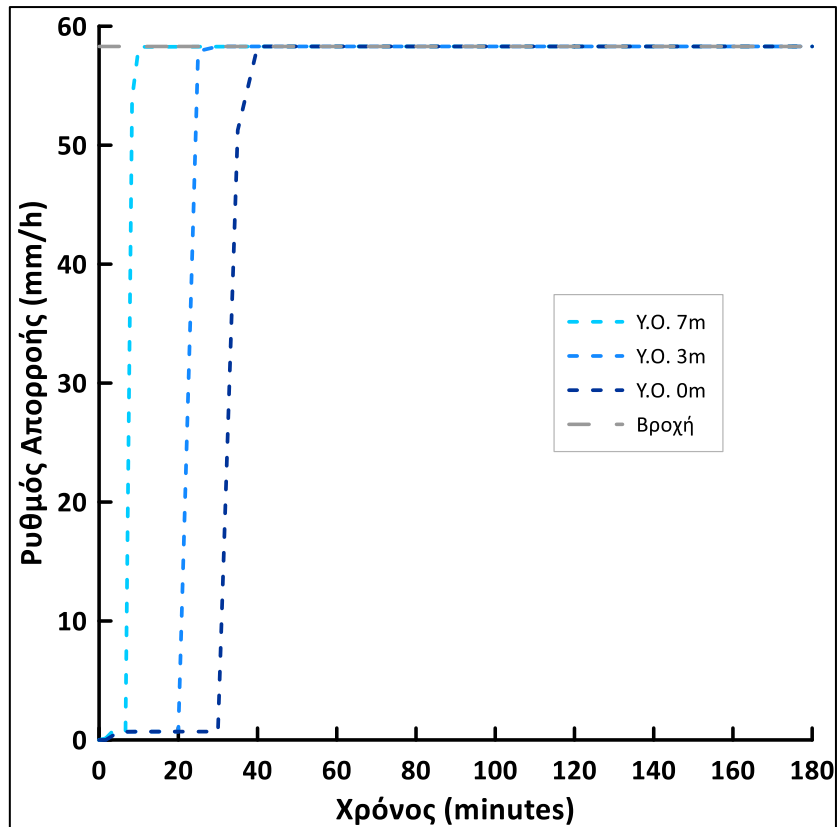
Διάγραμμα 62: Ρυθμός Απορροής (Άργιλος - Υ.Ο. 3m)



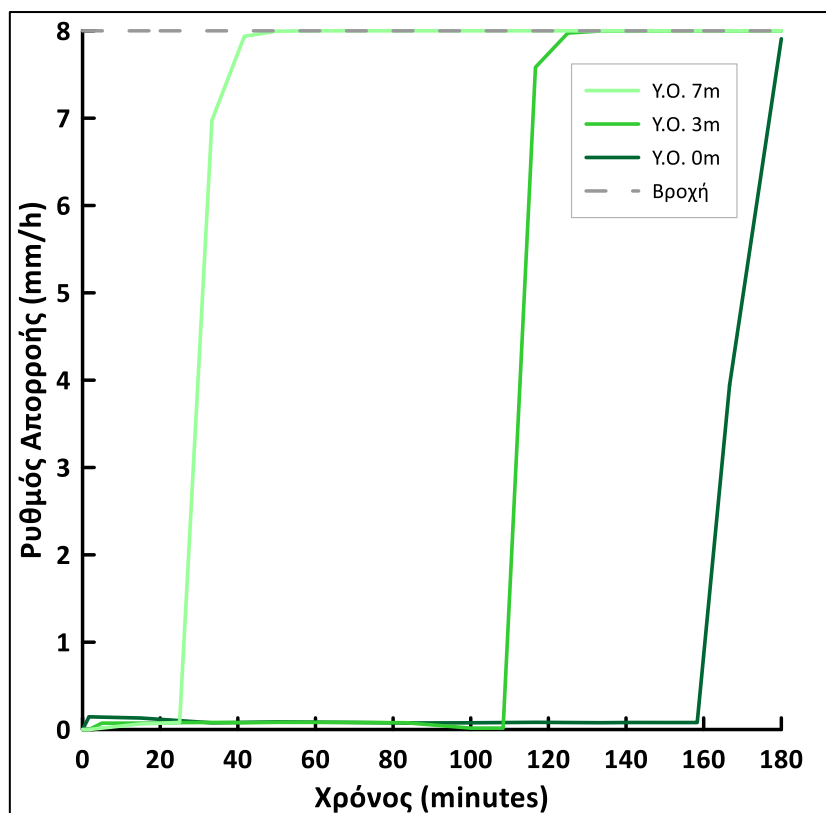
Διάγραμμα 63: Ρυθμός Απορροής (Άμμος - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/K_s=0.11$)



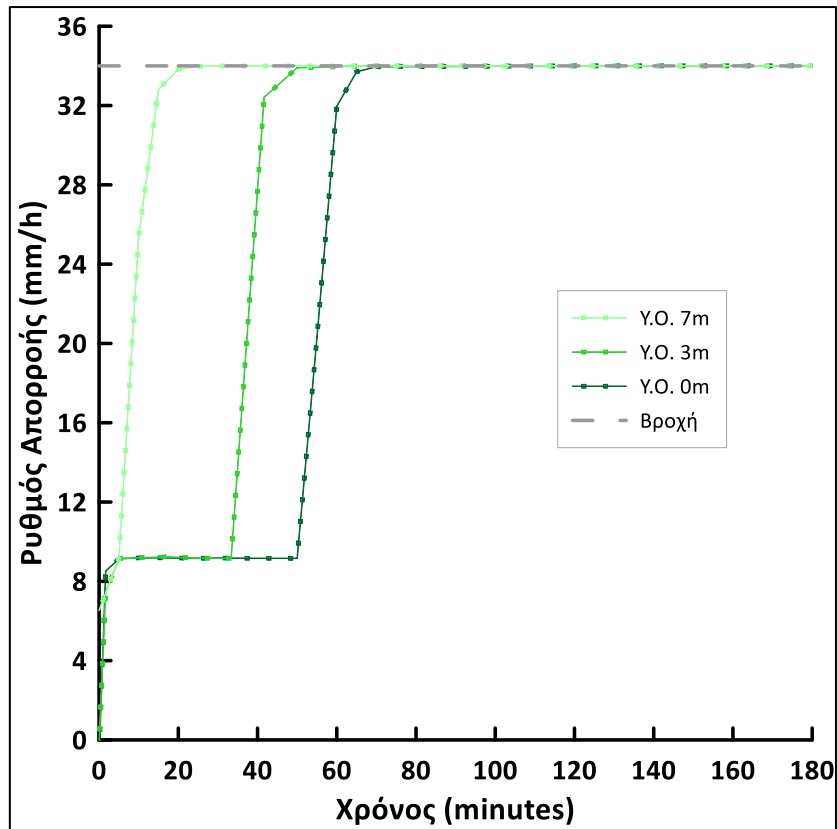
Διάγραμμα 64: Ρυθμός Απορροής (Άμμος - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/K_s=0.11$)



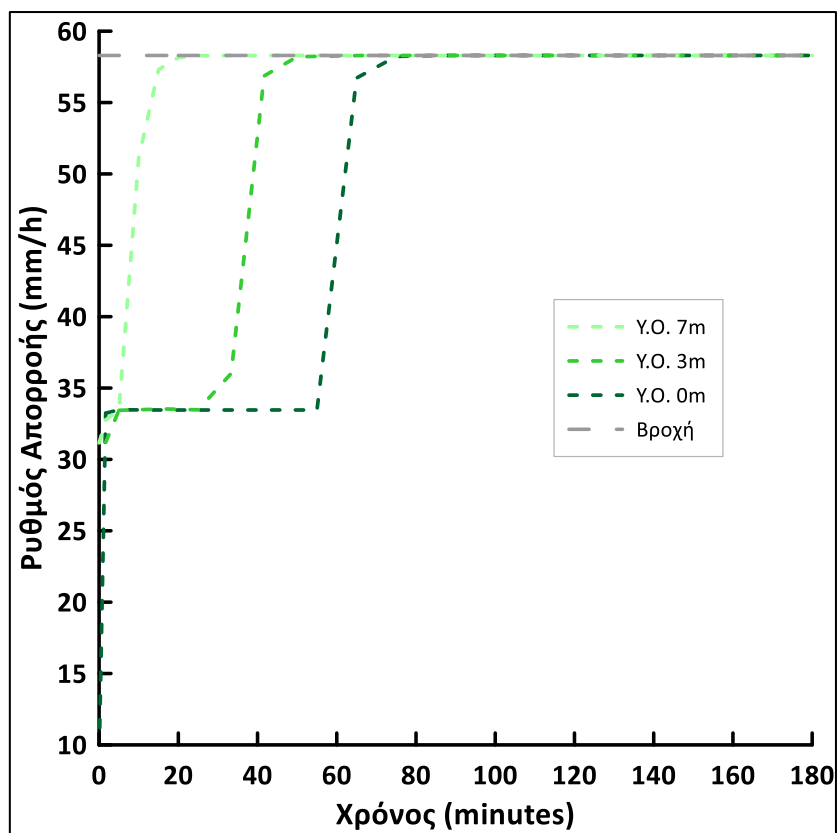
Διάγραμμα 65: Ρυθμός Απορροής (Άμμος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/K_s=0.20$)



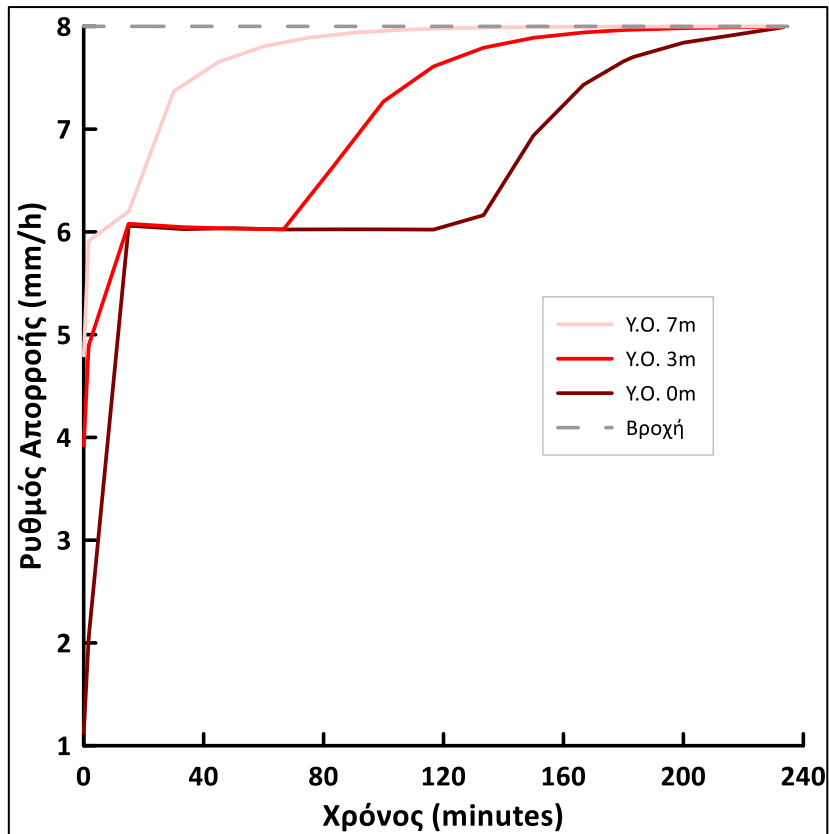
Διάγραμμα 66: Ρυθμός Απορροής (Ιλύς - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/K_s=0.32$)



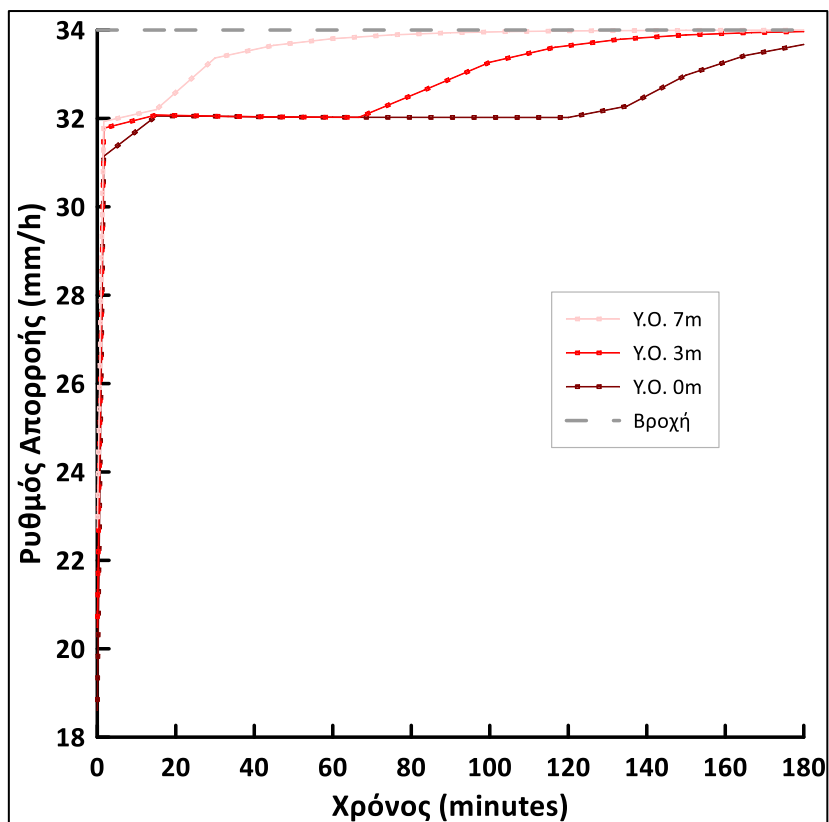
Διάγραμμα 67: Ρυθμός Απορροής (ιλύς - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/K_s=1.36$)



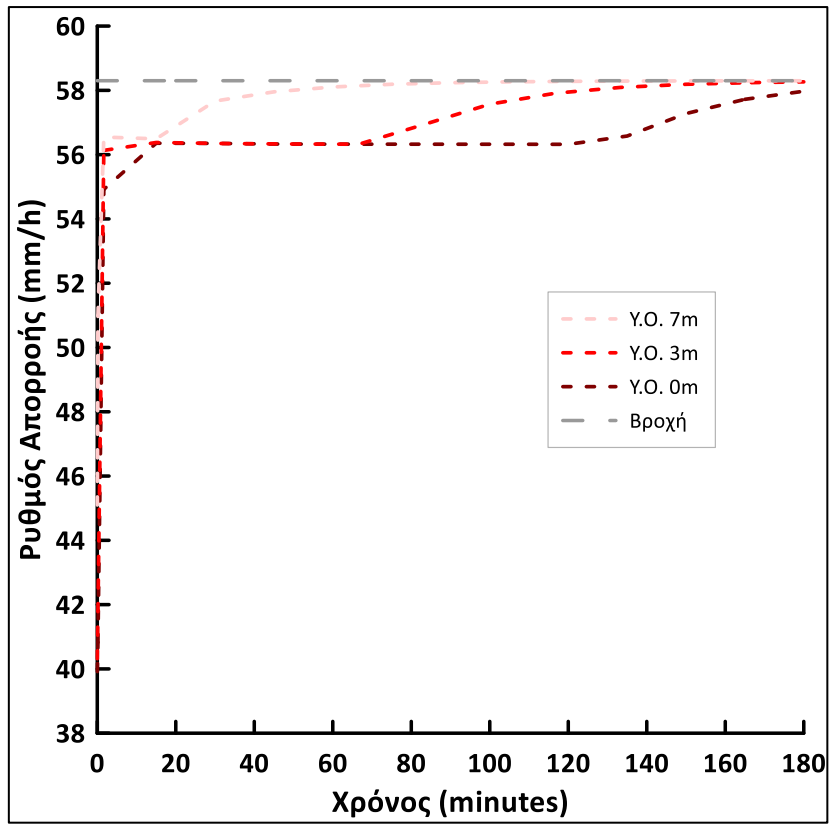
Διάγραμμα 68: Ρυθμός Απορροής (ιλύς - Βίαιη ένταση βροχή - $Q/K_s=2.33$)



Διάγραμμα 69: Ρυθμός Απορροής (Άργιλος - Μέτρια ένταση βροχή - $Q/K_s=4.04$)



Διάγραμμα 70: Ρυθμός Απορροής (Άργιλος - Ισχυρή ένταση βροχή - $Q/K_s=17.18$)



Διάγραμμα 71: Ρυθμός Απορροής (Άργιλος - Βίαη ένταση βροχή - $Q/K_s=29.46$)

6.3 Λιμνάζον Νερό

Στο τελευταίο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αθροιστική ποσότητας νερού που παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους κατά τη διάρκεια της βροχόπτωσης, το λιμνάζον νερό. Είναι η βασική παράμετρος ενδιαφέροντος της συγκεκριμένης διπλωματικής καθώς μέσα από την αξιολόγηση της θα διαπιστωθεί πως επηρεάζει ο κάθε παράγοντας στην ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων. Οι συγκρίσεις θα παραμείνουν αντίστοιχες με εκείνες που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια. Αυτό περιλαμβάνει την αξιολόγηση των διαφορετικών υλικών υπό συγκεκριμένη ένταση βροχής, των τριών διαφορετικών εντάσεων βροχής στο ίδιο υλικό, καθώς και των τριών διαφορετικών υψών υδροφόρου ορίζοντα υπό συγκεκριμένες συνθήκες υλικού και έντασης βροχής. Σε ό,τι αφορά τις δύο πρώτες κατηγορίες, η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί μέσω αναλύσεων με τον υδροφόρο ορίζοντα τοποθετημένο στα 3 μέτρα.

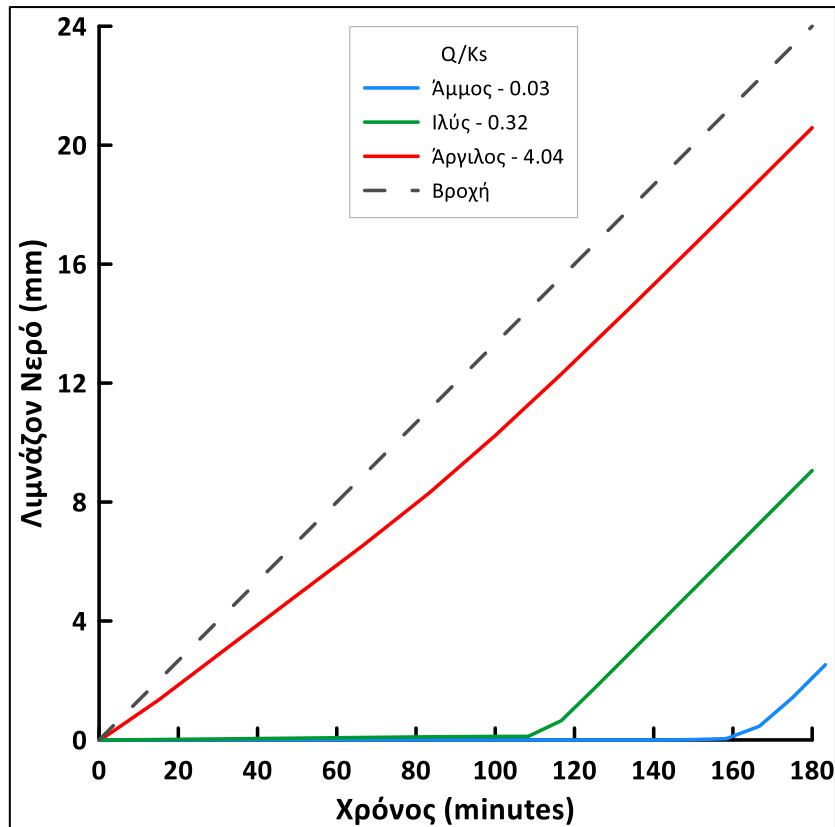
Τα πρώτα 3 διαγράμματα 72, 73 και 74 αποσκοπούν στην αξιολόγηση της επιρροής του είδους του εδαφικού υλικού. Στο διάγραμμα 72, που οι συνθήκες αφορούν βροχή μέτριας έντασης, παρατηρείται ότι σε άμμο και ιλύ αργεί να παρουσιαστεί λιμνάζον νερό, που σημαίνει ότι το έδαφος έχει την ικανότητα να απορροφά βροχή της συγκεκριμένης έντασης γι' αυτό και ο λόγος Q/Ks είναι μεγαλύτερος του 1. Η άμμος υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες απαιτεί περίπου 160 λεπτά για να αρχίσει να πλημμυρίζει η επιφάνεια ενώ η ιλύς χρειάζεται 110 λεπτά. Στη συνέχεια παρατηρείται ότι οι γραφικές παραστάσεις αποκτούν κλίση ίδια με αυτή της γραφικής παράστασης της βροχής που δείχνει το αθροιστικό νερό που πέφτει στην επιφάνεια, συνεπώς αυτό δείχνει ότι όλο το νερό της βροχής δεν περνάει στον εδαφικό σκελετό αλλά παραμένει στην επιφάνεια. Στην περίπτωση της αργίλου η πλημύρα αρχίζει να δημιουργείται από την έναρξη της βροχόπτωσης. Στην αρχή η γραφική παράσταση έχει μία πιο ήπια κλίση μέχρις ότου γίνει παράλληλη με αυτή της βροχής. Αυτό μεταφράζεται ότι αρχικά ο ρυθμός του λιμνάζοντος νερού είναι μικρότερος και στη συνέχεια που το έδαφος έχει κορεστεί πλήρως το νερό της βροχής παραμένει όλο στην επιφάνεια. Στα διαγράμματα 73 και 74 για ισχυρή και βίαιη ένταση βροχή αντίστοιχα παρατηρείται ότι η άμμος δεν παρουσιάζει εξ' αρχής νερό που να λιμνάζει. Στην πρώτη περίπτωση απαιτείται χρόνος της τάξεως των 35 λεπτών ενώ στην δεύτερη περίπτωση των 20 λεπτών. Αντίθετα η ιλύς και η άργιλος από την αρχή της βροχόπτωσης παρατηρείται πλημύρα στην επιφάνεια τους με την ιλύ αρχικά να έχει πιο ήπιο ρυθμό δημιουργίας αφού η γραφική παράσταση έχει μικρότερη κλίση από αυτή της αργίλου. Στη συνέχεια όλες οι γραφικές παραστάσεις ευθυγραμμίζονται και γίνονται παράλληλες με την γραφική παράσταση της βροχής που σημαίνει ότι όσο νερό πέφτει τόσο παραμένει στην επιφάνεια ως λιμνάζον.

Τα επόμενα 3 διαγράμματα 75, 76 και 77 έχουν ως παράμετρο την ένταση της βροχής. Και στα 3 διαγράμματα βασική παρατήρηση είναι η διαφορετική κλίση που έχουν οι γραφικές παραστάσεις. Πιο συγκεκριμένα όσο αυξάνεται ο λόγος Q/Ks , δηλαδή η

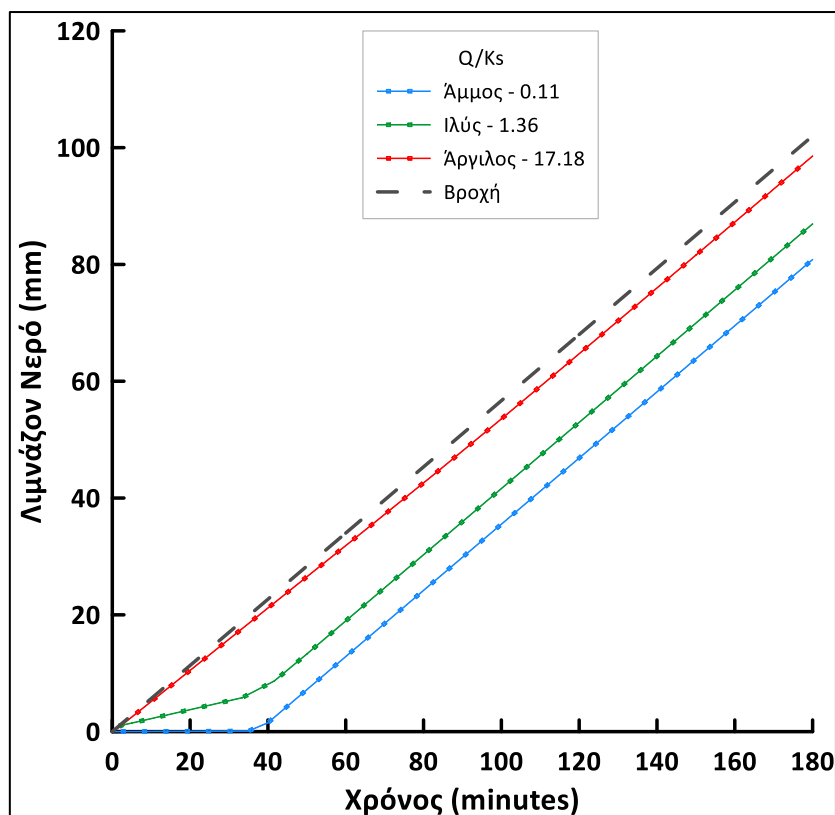
ένταση της βροχής στην προκειμένη περίπτωση, τόσο η κλίση αυξάνεται που σημαίνει ότι αυξάνεται ο ρυθμός δημιουργίας του λιμνάζοντος νερού. Στο διάγραμμα 75 για τις 3 αναλύσεις της άμμου αρχικά δεν παρατηρείται το φαινόμενο της πλημμύρας όπως έχει αναφερθεί και προηγούμενος. Για να αρχίσει να παραμένει νερό στην επιφάνεια του εδάφους για λόγο Q/Ks 0.03 (μέτρια ένταση) απαιτούνται 170 λεπτά, για λόγο 0.11 απαιτούνται 35 λεπτά ενώ για λόγο 0.20 απαιτούνται 20 λεπτά. Στο διάγραμμα 76 για τις αναλύσεις της ιλύς παρατηρείται ότι για λόγο 0.32 το έδαφος έχει επαρκεί απορροφητική ικανότητα για να μην πλημμυρίζει στην επιφάνεια και χρειάζονται περίπου 110 λεπτά για να κορεστεί και να αρχίσει να δημιουργείται λίμνη στην επιφάνεια. Για λόγο 1.36 το έδαφος δεν έχει την απαιτούμενη διαπερατότητα για να απορροφά το νερό της βροχής με τον συγκεκριμένη ένταση με αποτέλεσμα να συγκεντρώνεται νερό στην επιφάνεια από την αρχή του φαινομένου. Η κλίση είναι σταθερή μέχρι τα πρώτα 40 λεπτά και στη συνέχεια γίνεται πιο απότομη αφού οι πόροι του εδάφους έχουν πληρωθεί με νερό και το ύψος του λιμνάζοντος νερού στην επιφάνεια αυξάνεται με πιο ταχύ ρυθμό. Για τον λόγο 2.33 οι παρατηρήσεις είναι παρόμοιες, το έδαφος χρειάζεται αρχικά 40 λεπτά μέχρι να κορεστεί και στην συνέχεια η κλίση της γραφικής παράστασης γίνεται πιο έντονη αφού το νερό της βροχής πλέον παραμένει όλο στην επιφάνεια. Ο χρόνος μέχρι τον κορεσμό είναι ο ίδιος αφού ο ρυθμός της διήθησης είναι ο ίδιος και στις 2 περιπτώσεις. Το νερό διηθείται με ρυθμό όσο η υδραυλική αγωγιμότητα του υλικού αφού η ένταση της βροχής είναι μεγαλύτερης τιμής από αυτή. Τέλος στο διάγραμμα 77 που παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις αναλύσεις της αργίλου σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται ότι η πλημύρα ξεκινάει από την αρχή του φαινομένου, το υλικό δεν έχει την δυνατότητα να απορροφήσει όλο το νερό σε καμία από τις περιπτώσεις διαφορετικής έντασης. Η μεταβολή στις κλίσεις τη στιγμή που οι πόροι γεμίζουν με νερό δεν είναι εμφανή και δεν μπορεί να διακριθεί από το συγκεκριμένο διάγραμμα. Αυτό συμβαίνει καθώς η διηθητική ικανότητα της αργίλου είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα ο ρυθμός απορροής πολύ μεγάλος και κοντά στην τιμή της έντασης της βροχής.

Στα επόμενα διαγράμματα 78 έως 86 συγκρίνεται η επιρροή του υδροφόρου ορίζοντα στην δημιουργία του λιμνάζοντος νερού. Για τις αναλύσεις όπου ο λόγος Q/Ks είναι μικρότερος του 1, όπως στα διαγράμματα 78 έως 81, παρατηρείται ότι όσο ο υδροφόρος ορίζοντας είναι πιο κοντά στην επιφάνεια τόσο σε πιο σύντομο χρόνο ξεκινάει η δημιουργία του λιμνάζοντος νερού. Για παράδειγμα στο διάγραμμα 79 με λόγο Q/Ks 0.11 φαίνεται ότι αν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στη βάση της προσομοίωσης (Υ.Ο. 0m) μέχρι τα 55 λεπτά δεν έχει παρουσιαστεί στην επιφάνεια νερό σε μορφή λίμνης. Αν ο υδροφόρος βρίσκεται στα 7m από την επιφάνεια (Υ.Ο. 3m) τότε απαιτούνται 35 λεπτά για να αρχίσει το νερό να λιμνάζει. Ενώ στην περίπτωση που ο υδροφόρος είναι στα 3 μέτρα από την επιφάνεια (Υ.Ο. 7m) τότε θα παρατηρηθεί να λιμνάζει νερό στα 15 λεπτά. Για τις αναλύσεις με λόγο Q/Ks μεγαλύτερο του 1 (διαγράμματα 82 έως 86), αρχικά παρατηρείται μία ταύτιση των

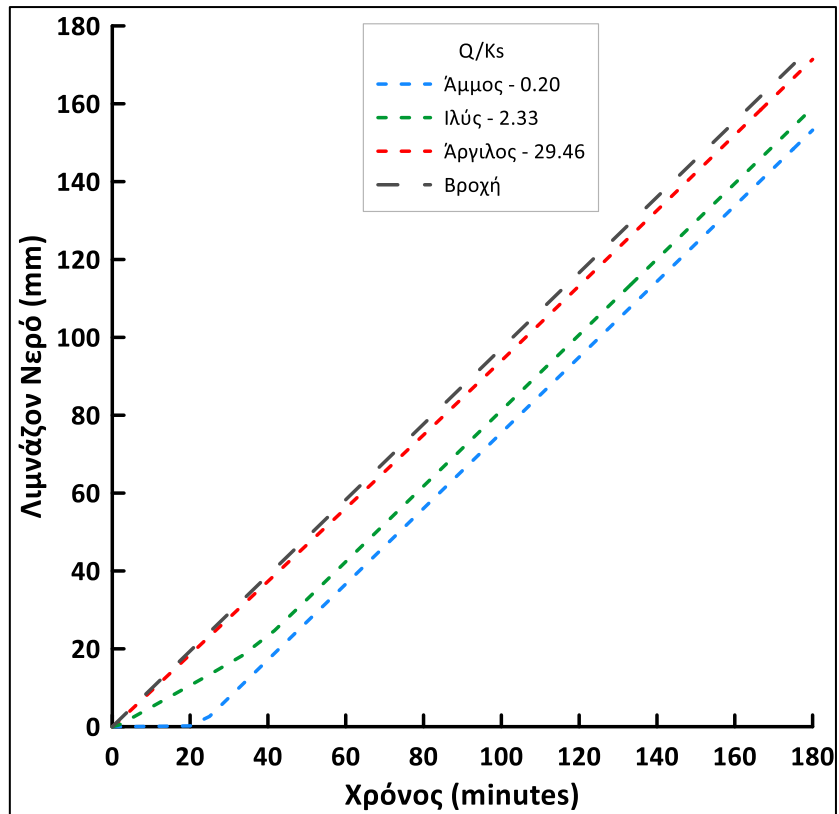
γραφικών παραστάσεων έως μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή ενώ στη συνέχεια απομακρύνονται και γίνονται παράλληλες όταν πλέον όλο το νερό της βροχής που πέφτει μένει στην επιφάνεια επειδή το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο. Για παράδειγμα στο διάγραμμα 83 παρατηρείται ότι και οι 3 γραφικές παραστάσεις ταυτίζονται μέχρι την χρονική στιγμή των 10 λεπτών. Εκεί η ανάλυση με τον υδροφόρο ορίζοντα στα 3 μέτρα από την επιφάνεια (Υ.Ο. 7m) αλλάζει κλίση και γίνεται πιο απότομη που σηματοδοτεί τον πλήρη κορεσμό του υλικού. Στη συνέχεια οι άλλες 2 αναλύσεις συνεχίζουν να ταυτίζονται μέχρι τη χρονική στιγμή των 35 λεπτών όπου και η γραφική παράσταση για την ανάλυση με τον υδροφόρο ορίζοντα στα 7 μέτρα από την επιφάνεια (Υ.Ο. 3m) αλλάζει την κλίση σε πιο έντονη για τον ίδιο ακριβός λόγο και γίνεται παράλληλη με την γραφική παράσταση Υ.Ο. 7m . Τέλος η ανάλυση με τον υδροφόρο στη βάση του προσομοιώματος (Υ.Ο. 0m) συνεχίζει η γραφική παράσταση να έχει μία ήπια κλίση έως τα 55 λεπτά όπου και μεταβάλλεται και γίνεται παράλληλη με τις άλλες 2 αναλύσεις. Ακόμα μια παρατήρηση είναι η αμελητέα διαφορά που υπάρχει μεταξύ των αναλύσεων στα διαγράμματα 85 και 86. Οι γραφικές παραστάσεις σχεδόν ταυτίζονται σε όλη τη διάρκεια που προσομοιώνεται το φαινόμενο κάτι που οφείλεται στον συνδυασμό της μεγάλης έντασης της βροχής, της μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας της και του πορώδους της αργίλου με αποτέλεσμα το νερό που δεν περνάει στο εσωτερικό του εδάφους να είναι πολύ περισσότερο από αυτό που εισχωρεί στους πόρους.



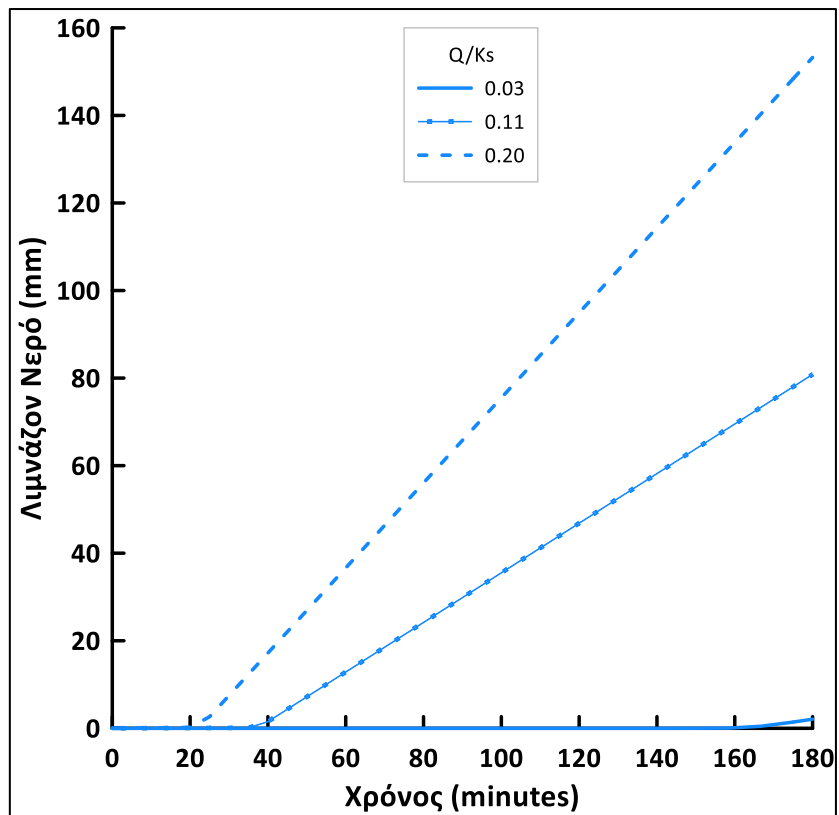
Διάγραμμα 72: Λιμνάζον Νερό (Μέτρια ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



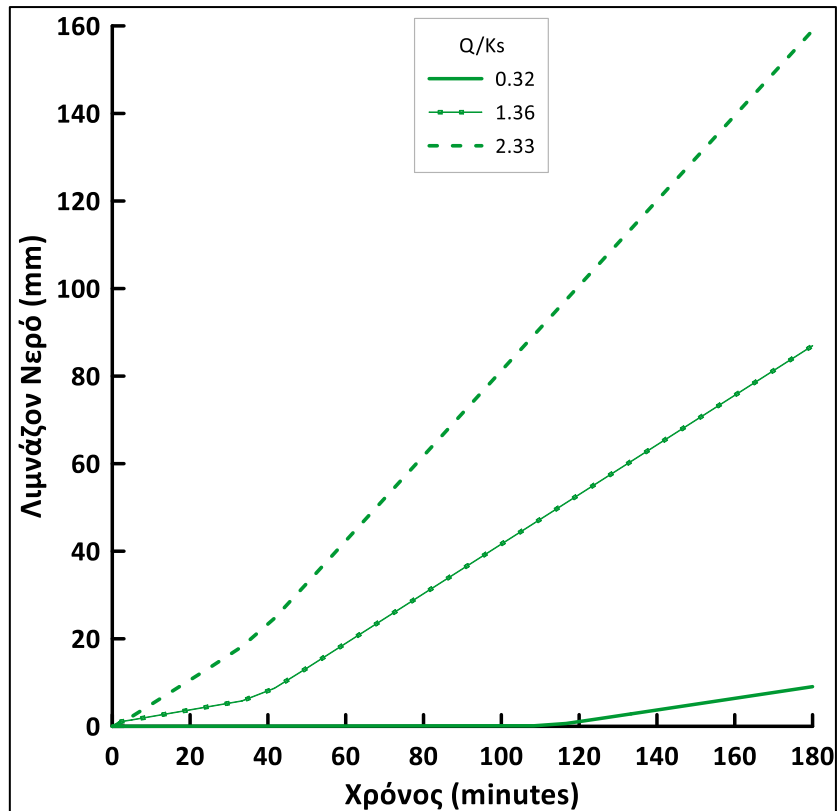
Διάγραμμα 73: Λιμνάζον Νερό (Ισχυρή ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



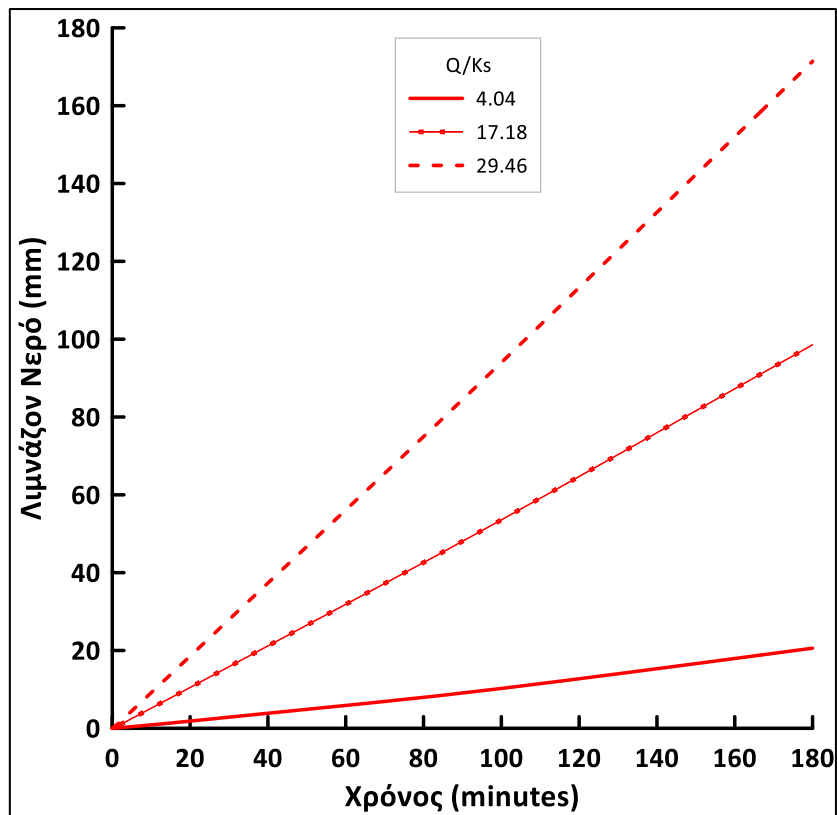
Διάγραμμα 74: Λιμνάζον Νερό (Βίαιη ένταση βροχή - Υ.Ο. 3m)



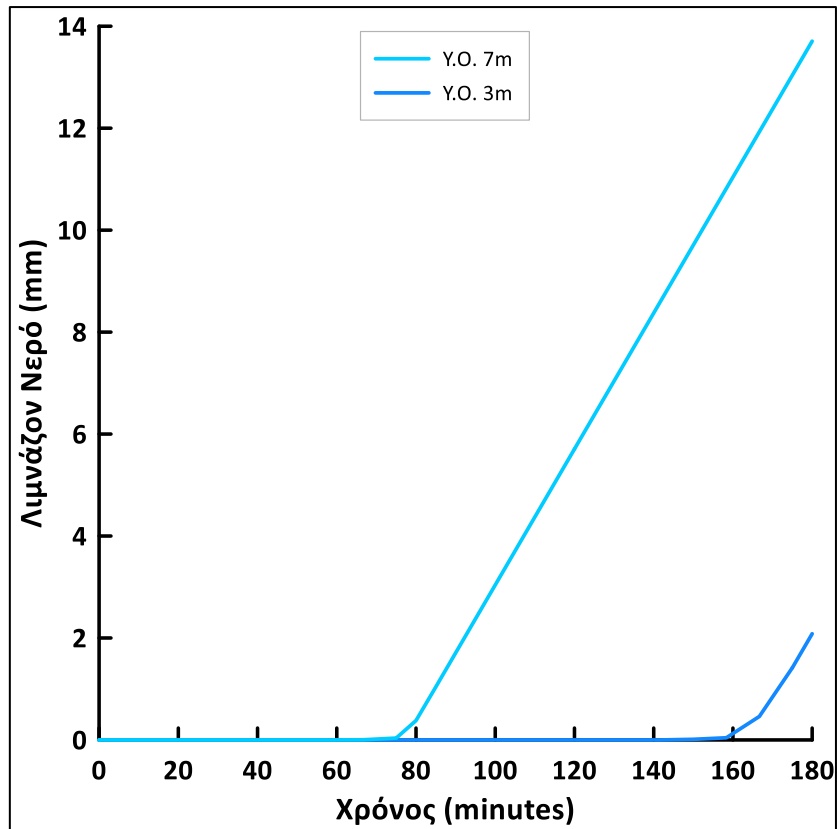
Διάγραμμα 75: Λιμνάζον Νερό (Άμμος - Υ.Ο. 3m)



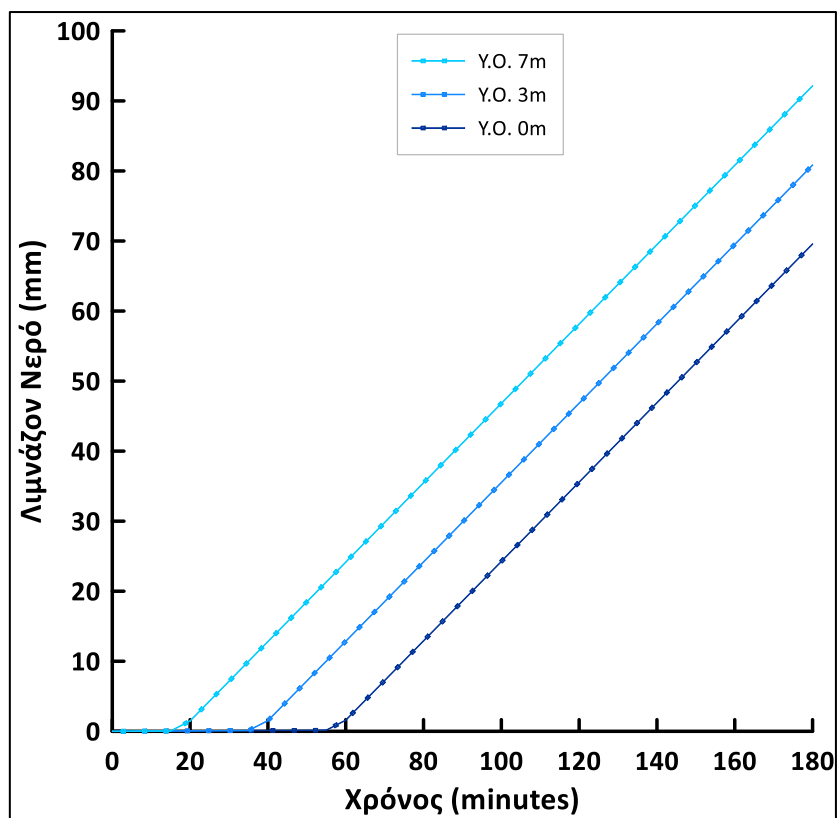
Διάγραμμα 76: Λιμνάζον Νερό (Ιλύς - Υ.Ο. 3m)



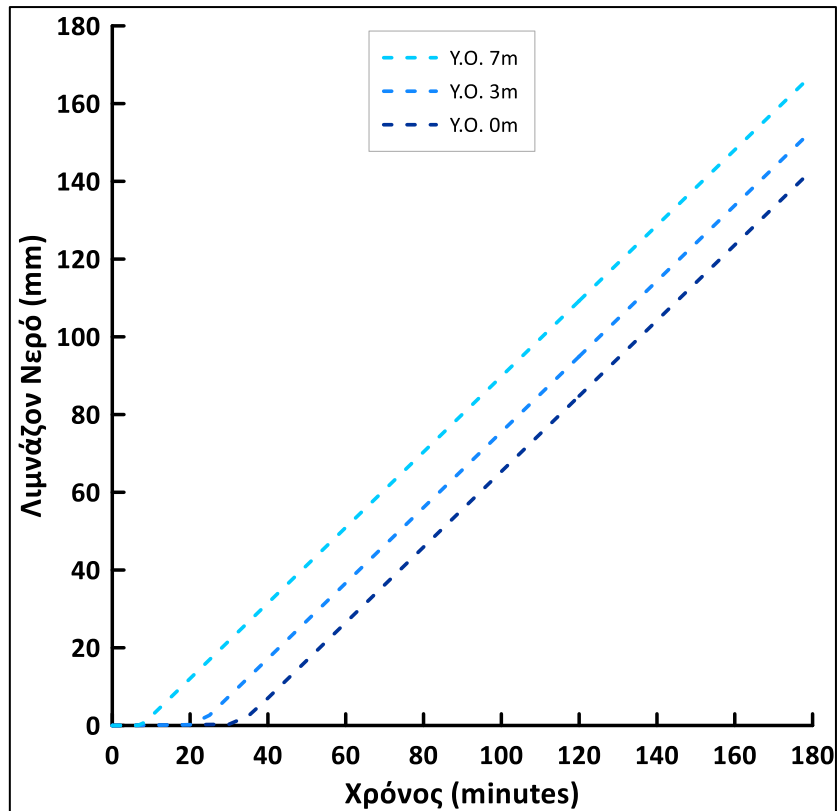
Διάγραμμα 77: Λιμνάζον Νερό (Άργιλος - Υ.Ο. 3m)



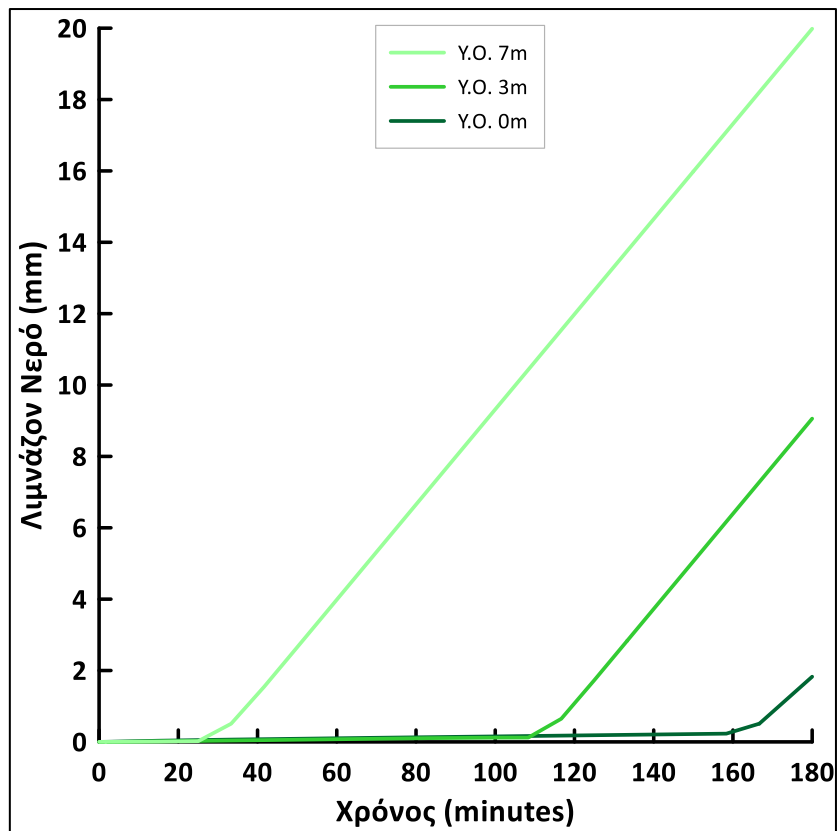
Διάγραμμα 78: Λιμνάζον Νερό (Άμμος – Βίαιή ένταση βροχή – $Q/Ks=0.20$)



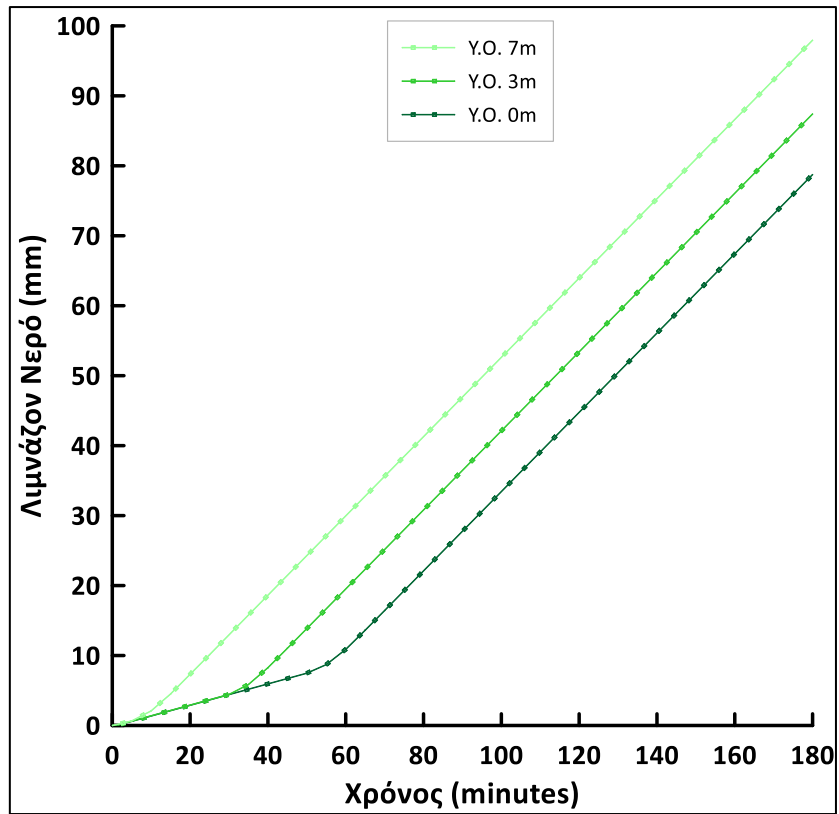
Διάγραμμα 79: Λιμνάζον Νερό (Άμμος – Ισχυρή ένταση βροχή – $Q/Ks=0.11$)



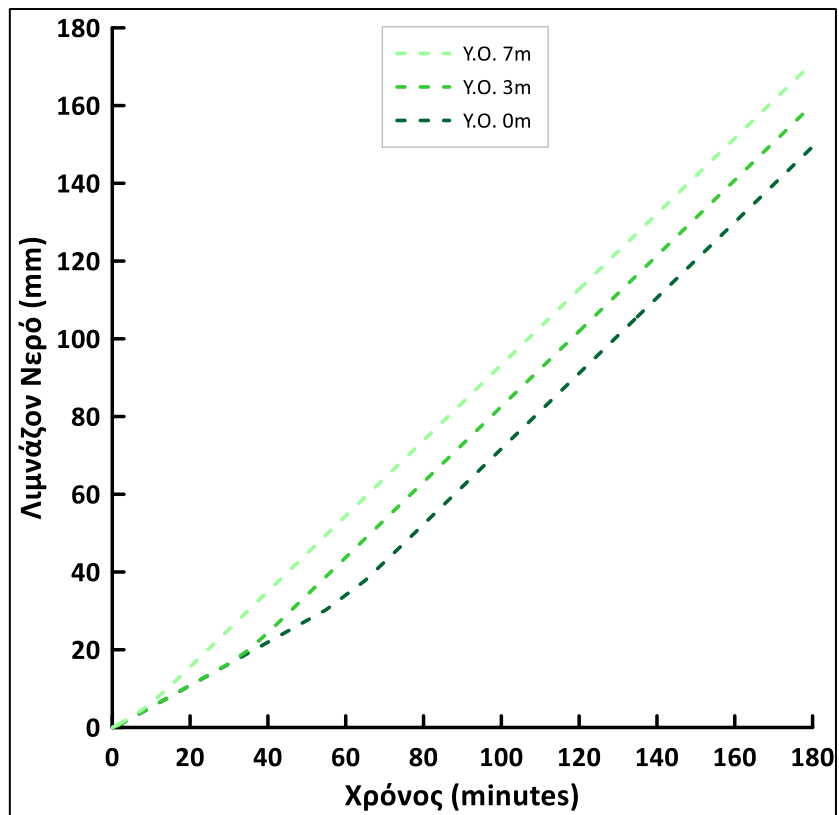
Διάγραμμα 80: Λιμνάζον Νερό (Άμμος – Βίαιή ένταση βροχή – $Q/Ks=0.20$)



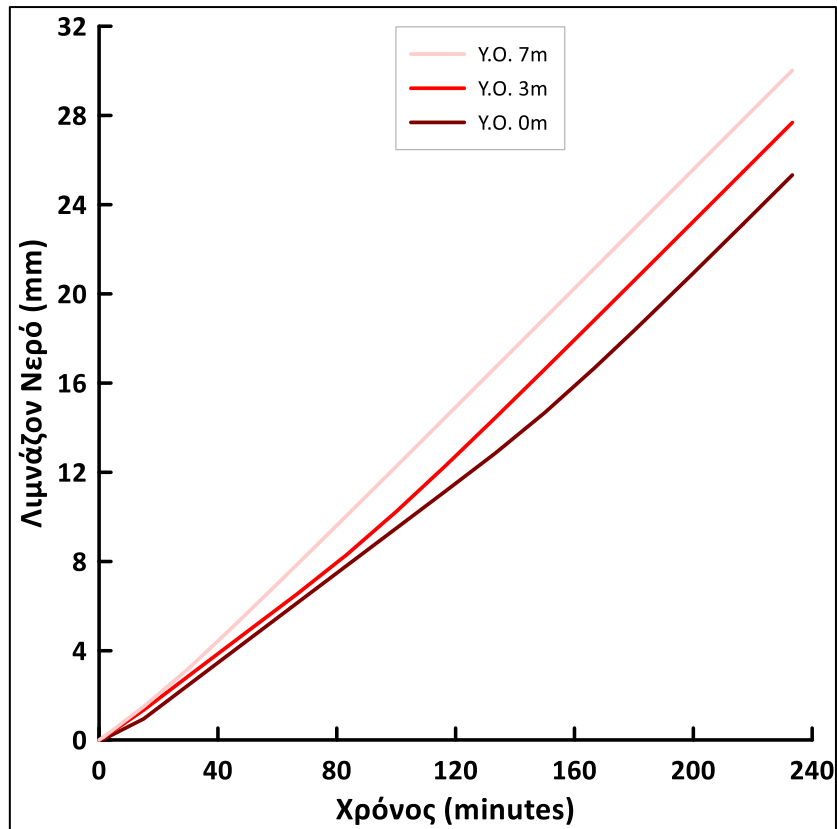
Διάγραμμα 81: Λιμνάζον Νερό (Ιλύς – Μέτρια ένταση βροχή – $Q/Ks=0.32$)



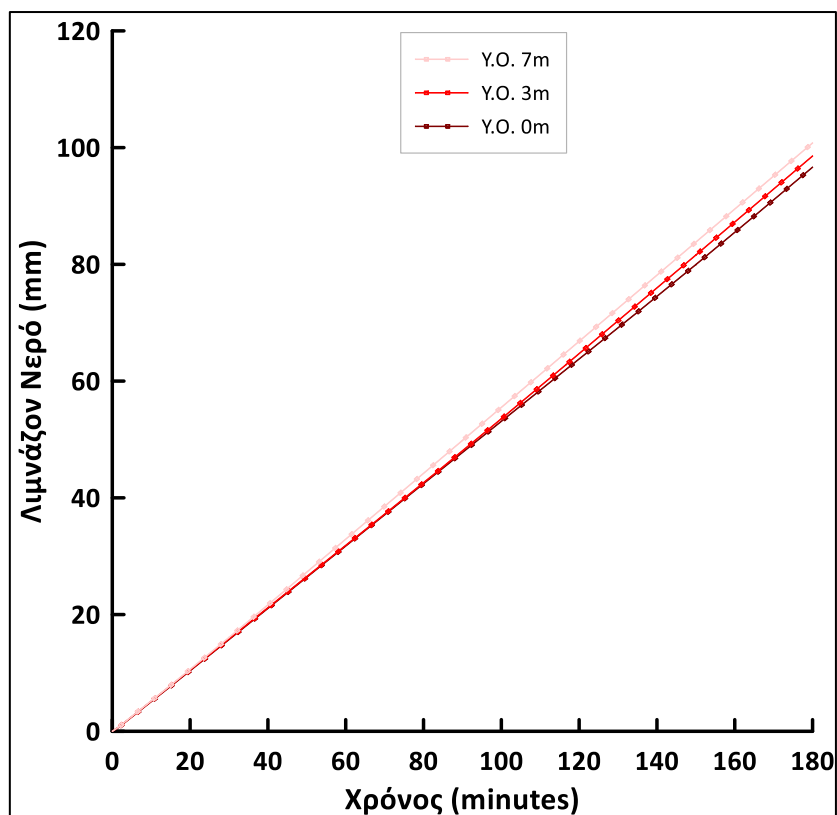
Διάγραμμα 82: Λιμνάζον Νερό (Ιλύς – Ισχυρή ένταση βροχής – $Q/K_s=1.36$)



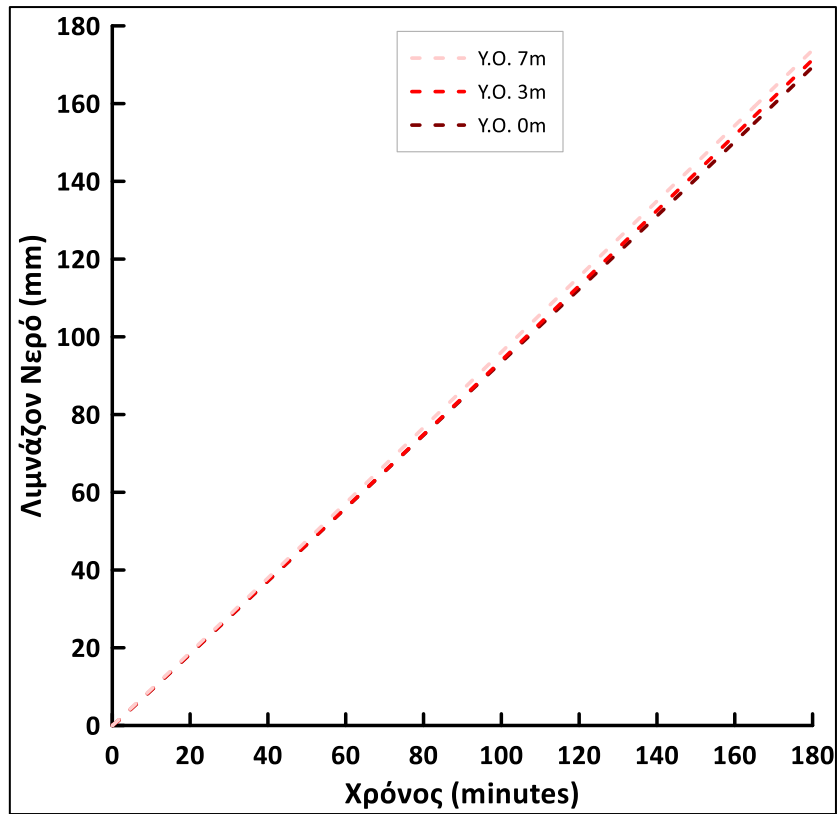
Διάγραμμα 83: Λιμνάζον Νερό (Ιλύς – Βίαιη ένταση βροχής – $Q/K_s=2.33$)



Διάγραμμα 84: Λιμνάζον Νερό (Άργιλος – Μέτρια ένταση βροχή – $Q/Ks=4.04$)



Διάγραμμα 85: Λιμνάζον Νερό (Άργιλος – Ισχυρή ένταση βροχή – $Q/Ks=17.18$)



Διάγραμμα 86: Λιμνάζον Νερό (Άργιλος – Βίαιη ένταση βροχή – $Q/Ks=29.46$)

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Σύνοψη

Τα τελευταία χρόνια η κοινωνία έχει έρθει αντιμέτωπη με την κλιματική κρίση. Οι ακραίες βροχοπτώσεις είναι ένα από τα φαινόμενα που όλο και πληθαίνουν σε περιοχές όπως η Ελλάδα με αποτέλεσμα την πρόκληση πλημμυρών σε αγροτικές και οικιστικές περιοχές. Οι συνέπιες σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο είναι τόσο σημαντικές που η διερεύνηση τέτοιων φαινομένων είναι απαραίτητη για μελλοντικά μέτρα πρόληψης. Η δημιουργία πλημμυρών είναι ένα πρόβλημα υδρογεωλογικό που ταυτόχρονα μπορεί να προσεγγιστεί και από γεωτεχνικής άποψης. Στην συγκεκριμένη διπλωματική στόχος ήταν η διερεύνηση του φαινομένου της πλημμύρας ως αποτέλεσμα της διηθητικής ικανότητας των εδαφών. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις με τη χρήση αριθμητικού προσομοιώματος και συγκεκριμένα του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων RS2 της Rocscience. Οι παράμετροι για τις αναλύσεις ήταν 3, το εδαφικό υλικό, η ένταση της βροχής και το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Από την βιβλιογραφία αντλήθηκαν δεδομένα από έντονες βροχοπτώσεις που έχουν καταγραφεί στην Ελλάδα και ταξινομήθηκαν βάση της διεθνούς κλίμακας σε μέτρια, ισχυρή και βίαιη ένταση. Επιλέχτηκε μία αντιπροσωπευτική ένταση για κάθε κατηγορία, 8mm/h για μέτρια ένταση, 34mm/h για ισχυρή ένταση, 58.3mm/h για βίαιη ένταση. Για εδαφικό υλικό επιλέχτηκε η άμμος η ιλύς και η άργιλος που καλύπτει ένα ευρύ φάσμα των λεπτόκοκκων υλικών που συναντάμε κατά κύριο λόγο στο πεδίο. Το υδραυλικό που επιλέχτηκε για την περιγραφή των υδραυλικών τους ιδιοτήτων είναι το Van Genuchten με τις παραμέτρους να επιλέγονται βάση των πινάκων των Carsel & Parrish 1988. Τέλος, στο γεωμετρικό προσομοίωμα ύψους 10m επιλέγονται 3 διαφορετικά ύψη υδροφόρου ορίζοντα στη βάση της γεωμετρίας δηλαδή στα 0m, στα 3m και στα 7m.

7.2 Συμπεράσματα

Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία πραγματοποιήθηκε για ένα εύρος συνθηκών βροχόπτωσης, εδάφους και ύψους υδροφόρου ορίζοντα προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση αυτών των παραμέτρων στη πρόκληση πλημμύρας. Κατά τη διερεύνηση αξιολογήθηκε ο ρυθμός διήθησης, η αθροιστική διήθηση, ο ρυθμός απορροής και το λιμνάζον νερό συναρτήσει του χρόνου. Οι καμπύλες των αποτελεσμάτων συγκρίθηκαν με τυπικές καμπύλες από τη βιβλιογραφία.

Στο πρώτο μέρος των αναλύσεων αξιολογήθηκε ο ρυθμός διήθησης. Ο ρυθμός διήθησης κατά την αρχή του φαινομένου της βροχόπτωσης παρουσιάζει μία πολύ

υψηλή τιμή, την αρχική διήθηση. Η αρχική διήθηση είναι υψηλότερη για την περίπτωση της άμμου και χαμηλότερη για την περίπτωση της αργίλου ενώ η ιλύς λαμβάνει μια ενδιάμεση τιμή. Το νερό στη συνέχεια διηθείται με τιμή η οποία εξαρτάται από την υδραυλική κορεσμένη αγωγιμότητα του υλικού και τη σχέση της με την ένταση της βροχόπτωσης, αν είναι δηλαδή μεγαλύτερη ή μικρότερη. Στην περίπτωση που υδραυλική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη της έντασης της βροχής, δηλαδή ο λόγο $Q/K_s < 1$, το νερό διηθείται με ρυθμό ίσο με την ένταση της βροχής. Στην περίπτωση που υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους είναι μακρότερη της έντασης της έντασης της βροχής, δηλαδή $Q/K_s > 1$, τότε το νερό διηθείται με ρυθμό ίσο με την τιμή K_s . Όσον αφορά την επίδραση της έντασης της βροχής στο ρυθμό διήθησης μόνο στις περιπτώσεις για λόγο $Q/K_s < 1$ έχει ρόλο όπως η περίπτωση της άμμου που όσο μικρότερη η ένταση της βροχής τόσο μικρότερος και ο ρυθμός διήθησης και περισσότερος χρόνος για να πληρωθεί το έδαφος με νερό. Αντίθετα στην περίπτωση της αργίλου η ένταση της βροχής δεν έχει καμία επίδραση στο ρυθμό διήθησης και στο χρόνο μέχρι τον πλήρη κορεσμό. Η τελευταία παράμετρος, αυτή της θέσης του υδροφόρου ορίζοντα έχει καθοριστικό ρόλο στο χρόνο που απαιτείται για να πληρωθούν οι πόροι με νερό. Όσο πιο κοντά στην επιφάνεια είναι ο υδροφόρος ορίζοντας τόσο πιο γρήγορα επέρχεται ο κορεσμός.

Εν συνεχεία αξιολογήθηκε η αθροιστική διήθηση, δηλαδή το αθροιστικό νερό που έχει περάσει στο έδαφος μέχρι τον πλήρη κορεσμό, καθώς και η χρονική της εξέλιξη. Η πρώτη παράμετρος, το εδαφικό υλικό, συμβάλει καθοριστικά στην τελική ποσότητα του νερού που μπορούν να δεχτούν οι πόροι. Όσο μεγαλύτερο το πορώδες του υλικού τόσο μεγαλύτερη και η ποσότητα του νερού που απαιτείται για αν πληρωθούν οι πόροι. Η άμμος με το μεγαλύτερο πορώδες δέχεται την μεγαλύτερη ποσότητα νερού ακολουθούμενη η ιλύς και τελικά η άργιλος. Η δεύτερη παράμετρος, η ένταση της βροχής, δεν συμβάλει καθόλου στη τελική ποσότητα νερού που διηθείται αλλά έχει ρόλο στην χρονική εξέλιξη και συγκεκριμένα μόνο στις περιπτώσεις που $Q/K_s < 1$. Για την άμμο που η συνθήκη του λόγου τηρείται, όσο πιο υψηλή η ένταση της βροχής τόσο πιο γρήγορα το αθροιστικό διηθούμενο νερό φτάνει στην μέγιστη τιμή του. Αντίθετα για την άργιλο η χρονική εξέλιξη είναι ίδια και για τις 3 συνθήκες βροχόπτωσης. Η Τρίτη παράμετρος, ο υδροφόρος ορίζοντας έχει κυρίαρχο ρόλο τόσο στην τελική τιμή του διηθούμενου νερού όσο και στο χρόνο για τον πλήρη κορεσμό. Όσο πιο χαμηλά είναι ο υδροφόρος τόσο μεγαλύτερη ζώνη μη πληρωμένη με νερό υπάρχει που συνεπάγεται περισσότερο διαθέσιμο χώρο άρα και περισσότερο χρόνο για να πληρωθεί.

Ο ρυθμός απορροής ήταν ακόμα μία παράμετρος που αξιολογήθηκε. Ο ρυθμός απορροής δεν εξαρτάται τόσο άμεσα από το εδαφικό υλικό όσο από τον συνδυασμό του με την ένταση της βροχόπτωσης δηλαδή τον λόγο Q/K_s . Πιο συγκεκριμένα, όταν ισχύει η συνθήκη $Q/K_s < 1$ τότε ο ρυθμός απορροής είναι 0 μέχρι να γεμίσουν οι πόροι με νερό. Στη συνέχεια όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το έδαφος τόσο πιο άμεσα θα

πληρωθούν οι πόροι και θα αυξηθεί η τιμή του ρυθμού απορροής. Όταν $Q/K_s > 1$ τότε από την πρώτη στιγμή της βροχόπτωσης ο ρυθμός απορροής είναι μεγαλύτερος από 0. Στη συγκεκριμένη συνθήκη όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το έδαφος τόσο από πιο μεγάλη τιμή ξεκινάει ο ρυθμός απορροής. Σε κάθε περίπτωση η τελική τιμή που λαμβάνει ο ρυθμός απορροής είναι η ένταση της βροχής. Όσον αφορά την παράμετρο της έντασης της βροχής αυτή συμβάλει καθοριστικά στο ρυθμό απορροής. Για την περίπτωση που ισχύει $Q/K_s < 1$ τότε συμβάλει τόσο μέγιστη τιμή που λαμβάνει ο ρυθμός απορροής όσο και στο χρόνο που απαιτείται για να τον φτάσει. Συγκεκριμένα όσο πιο ισχυρή η ένταση της βροχόπτωσης τόσο μεγαλύτερος και ο τελικός ρυθμός απορροής. Επίσης όσο πιο ισχυρή είναι η ένταση της βροχής τόσο πιο γρήγορα γεμίζουν οι πόροι του εδάφους με αποτέλεσμα να επέρχεται κορεσμός πιο σύντομα και να λαμβάνει ο ρυθμός απορροής την μέγιστη τιμή του. Στην περίπτωση που ισχύει $Q/K_s > 1$ τότε η ένταση της βροχής έχει επιρροή μόνο στο μέγεθος του ρυθμού απορροής, όσο πιο έντονη τόσο πιο μεγάλος και ο ρυθμός απορροής καθ' όλη την χρονική του εξέλιξη. Για την τελευταία παράμετρο που αξιολογήθηκε, που είναι ο υδροφόρος ορίζοντας, αυτός έχει επίδραση μόνο σε χρονικό επίπεδο. Όσο πιο κοντά στη επιφάνεια είναι ο υδροφόρος ορίζοντας τόσο πιο γρήγορα αυξάνεται και ο ρυθμός απορροής στην μέγιστη τιμή του αφού ο διαθέσιμος χώρος στους πόρους για να εισέλθει το νερό μειώνεται.

Τελική αξιολόγηση έγινε στο λιμνάζον νερό, δηλαδή στο αθροιστικό ύψος νερού που παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους. Το εδαφικό υλικό έχει σημαντικό ρόλο στην περίπτωση που ο λόγος Q/K_s είναι μικρότερο του 1 αφού καθορίζει τη χρονική στιγμή που θα ξεκινήσει να λιμνάζει το νερό στην επιφάνεια. Για παράδειγμα στην άμμο με μεγαλύτερο πορώδες απαιτείται περισσότερος χρόνος για να λιμνάσει το νερό απ' ότι στην ιλύ. Στην περίπτωση που $Q/K_s > 1$ τότε το λιμνάζον νερό εμφανίζεται από την αρχή της βροχόπτωσης και ουσιαστικά όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το υλικό τόσο μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης έχει μέχρι να κορεστεί πλήρως. Να σημειωθεί ότι μετά τον πλήρη κορεσμό το λιμνάζον νερό αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό σε κάθε είδος εδάφους. Όσο αφορά την παράμετρο της έντασης της βροχής, αυτή έχει κυρίαρχο λόγο στη ποσότητα του νερού που λιμνάζει. Αρχικά σε συνθήκες $Q/K_s < 1$ η ένταση της βροχής συμβάλει στο χρόνο που θα αρχίσει να λιμνάζει το νερό στην επιφάνεια. Όσο πιο έντονη η βροχόπτωση τόσο πιο γρήγορα θα δημιουργηθεί και η πλημμύρα. Από τον πλήρη κορεσμό του εδάφους και μετά η ένταση της βροχής καθορίζει και την ποσότητα του νερού που λιμνάζει, όσο πιο υψηλό ο ρυθμός βροχόπτωσης τόσο περισσότερο και το αθροιστικό νερό στην επιφάνεια του εδάφους. Σε συνθήκες $Q/K_s > 1$ συμβάλει μόνο στη ποσότητα του νερού που συσσωρεύεται στην επιφάνεια και πιο συγκεκριμένα η αυξανόμενη ένταση της βροχής συνεπάγεται και μεγαλύτερη αθροιστική ποσότητα λιμνάζοντος νερού. Τέλος η παράμετρος για τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα έδειξε ότι όσο πιο κοντά στην επιφάνεια είναι ο υδροφόρος ορίζοντας τόσο πιο γρήγορα θα δημιουργηθεί πλημμύρα στην επιφάνεια για την

περίπτωση που $Q/K_s < 1$, αλλά και στην αντίθετη περίπτωση ελαχιστοποιεί το χρόνο που απαιτείται για να κορεστεί το έδαφος και να αυξηθεί ο ρυθμός με τον οποίο λιμνάζει το νερό.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

8.1 Ξένη Βιβλιογραφία

1. Analytical Analysis of Rainfall Infiltration Mechanism in Unsaturated Soils, (2004). Tony L. T. Zhan and Charles W. W. Ng, M.ASCE, INTERNATIONAL JOURNAL OF GEOMECHANICS.
2. <https://meteo.gr/>
3. Hydrologic Scaling and Spatial Heterogeneity, (2019). Cambridge University Press, Gordon Bonan.
4. Maheras P., Anagnostopoulou C., (2003). Circulation Types and Their Influence on the Interannual Variability and Precipitation Changes in Greece, στο: Bolle HJ. (eds) Mediterranean Climate. Regional Climate Studies, Βερολίνο, Εκδόσεις Springer.
5. Maheras, P., Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Vafiadis, M., Patrikas, I. and Floca, H., (2004). “On the relationship between circulation types and changes in rainfall variability in Greece”, International Journal of Climatology.
6. Rajeh Alhassoun., (2009). Studies on factors affecting the infiltration capacity of agricultural soils.
7. USDA, (1998). The United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
8. Water Movement in Soils, Department of Plant Soils Sciences, Oklahoma State University (<http://soilphysics.okstate.edu/>)
9. Galawezh B. Bapeer, Ali M. Surdashy and Kareem M. Hassan., (2010). Infiltration rates of soils in some locations within erbil plain, Kurdistan Region, North Iraq, Iraqi Bulletin of Geology and Mining Vol.6, No.2, 2010 p 127-137

8.2 Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Βασίλειος Ζ. Αντωνόπουλος, (2020). Υδρολογία της Ακόρεστης Ζώνης του Εδάφους, Θεσσαλονίκη, Α.Π.Θ.
2. Βουδουρή Μαρία Όλγα, (2018). Ακραίες Βροχοπτώσεις στην Ελλάδα, Θεσσαλονίκη, ΑΠΘ.
3. Βουδούρης Κ., (2009). Υδρογεωλογία περιβάλλοντος, υπόγεια νερά και περιβάλλον, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Τζιόλα.
4. Δ. Κουτσογιάννης & Θ. Ξανθόπουλος, (2016). Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα, Ε.Μ.Π., 4η έκδοση.
5. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, «Το κλίμα της Ελλάδας», διαθέσιμο στο: <http://www.hnms.gr/emv/el/climatology/climatology>
6. Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία. (Δεν υπάρχει έτος). Ανακτήθηκε από: <https://meteo.gr/>

7. Εργαστηριακή και αναλυτική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς των μη κορεσμένων εδαφών (2016). Διδακτορική διατριβή, Μιχαήλ Εμμ. Μπαρδάνης, Αθήνα, Ε.Μ.Π.
8. Ζαμπάκας Ι., (1981). Γενική Κλιματολογία, Αθήνα, Εκδόσεις Αθηνά.
9. Ζερεφός, Χρ. (συντονιστής έκδοσης), (2011). Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα, Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής, Αθήνα, Τράπεζα της Ελλάδας.
10. Μ. Καββαδάς, (2007). Στοιχεία Περιβαλλοντικής Γεωτεχνικής, Αθήνα, Ε.Μ.Π.
11. Μπαλαφούτης, Χ., Μαχαίρας, Π., (1985). Μαθήματα γενικής κλιματολογίας : με στοιχεία βιοκλιματολογίας, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις ΓΙΑΧΟΥΔΗ Ο.Ε.
12. Μπαλιακούτα Θεανώ, (2023). Πλημμυρικά Φαινόμενα στην Ελλάδα, Βόλος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
13. Μπεθάνης Σωτήριος, (2020). Αξιολόγηση Επιπτώσεων Πλημμυρικών Επεισοδίων στην Ελλάδα, Αθήνα, ΕΜΠ.
14. Παπαζαφειρίου Ζ., (1999). Οι ανάγκες σε νερό των καλλιεργειών, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη.
15. Παυλίδης Σ., (2007). ΠΑΝ-ΓΑΙΑ (Παγγαία), Αθήνα, Εκδόσεις Leader Books.
16. Σούλιος Γ., (1996). Γενική Υδρογεωλογία, τόμος Ι, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις University Press.
17. Στάθης, Δ., (2015). Μαθήματα δασικής μετεωρολογίας και κλιματολογίας, διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/4657>
18. Τσακίρης Γ., (1995). Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία, Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Σύγκριση λογισμικού RS2 και Plaxis

A.1. Προσομοιώσεις στο λογισμικό RS2

Το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων RS2 της Rocscience αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την διεξαγωγή αναλύσεων στον τομέα της γεωτεχνικής μηχανικής. Για την προσομοίωση του προβλήματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας απαιτήθηκαν βασικές υδραυλικές/γεωτεχνικές παράμετροι όπως τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών καθώς και η ένταση μιας βροχής. Για την επίλυση των υπόγειων υδάτων που είναι κύριο χαρακτηριστικό στις αναλύσεις που θα ακολουθηθούν το λογισμικό RS2 δίνει 3 διαφορετικούς τρόπους επίλυσης, Static Water, Steady State, Transient. Με τη μέθοδο Static Water δίνεται η δυνατότητα να οριστεί ο υδροφόρος ορίζοντας με εργαλεία όπως η πιεζομετρική γραμμή (Piezometric line) και ο κάρναβος υδροστατικής πίεσης (Water Pressure Grid) . Η Steady State μέθοδος προσδιορίζει τις πιέσεις πόρων βάση των οριακών συνθηκών υπογείων υδάτων (groundwater boundary conditions) που έχουν οριστεί στο μοντέλο. Τέλος η μέθοδος Transient λαμβάνει υπόψη το χρόνο στην ανάλυση καθώς δίνει και τη δυνατότητα η ανάλυση της αρχικής κατάστασης να γίνει με μέθοδο Static Water ή Steady State. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα που είναι η ανταπόκριση του εδαφικού σχηματισμού υπό συνθήκες βροχής για συγκεκριμένο χρόνο επιλέγεται οι αναλύσεις να πραγματοποιηθούν με την μέθοδο Transient.

A.1.1. Υδραυλικό Μοντέλο

Το υδραυλικό μοντέλο που επιλέγεται είναι το Van Genuchten ένα μοντέλο που προσφέρεται και στο Plaxis έτσι ώστε τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο σύμφωνα για σύγκριση. Το συγκεκριμένο μοντέλο περιγράφει την υδραυλική συμπεριφορά ενός μη κορεσμένου εδάφους. Η συναρτήσεις που χρησιμοποιεί το RS2 είναι οι ακόλουθες.

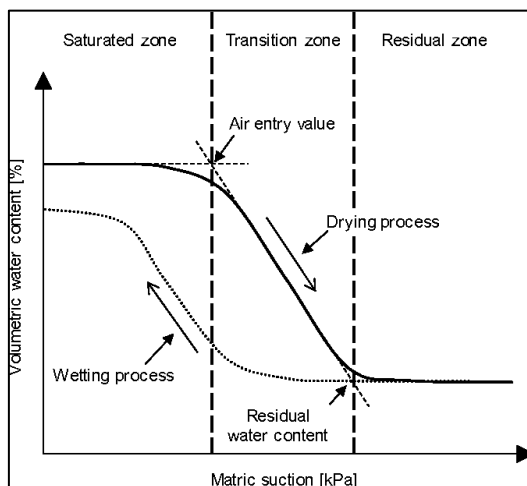
$$S_e = \frac{1}{[1 + (a \times h)^n]^m}$$

$$K = K_s(\sqrt{S_e}[1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2)$$

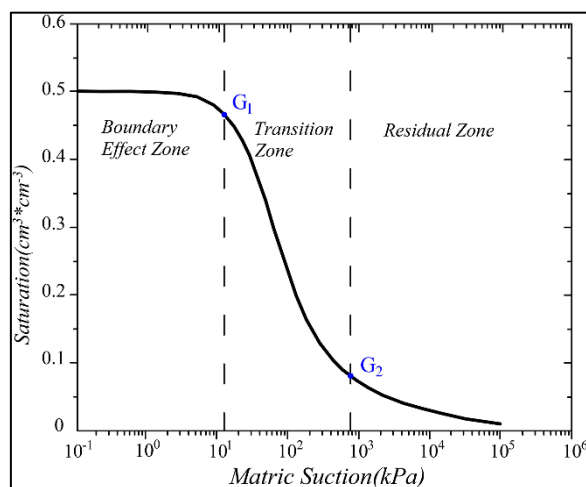
Όπου,

- S_e : Βαθμός κορεσμού
- h : Μύζηση

- a, n, m : παράμετροι
- K : Διαπερατότητα
- K_s : Κορεσμένη Διαπερατότητα
- $m = 1 - \frac{1}{n}$



Σχήμα 1: Χαρακτηριστική καμπύλη εδαφικής υγρασίας (Volumetric Water Content – Matric Suction)



Σχήμα 2: Χαρακτηριστική καμπύλης κορεσμού του εδάφους στη μη κορεσμένη ζώνη

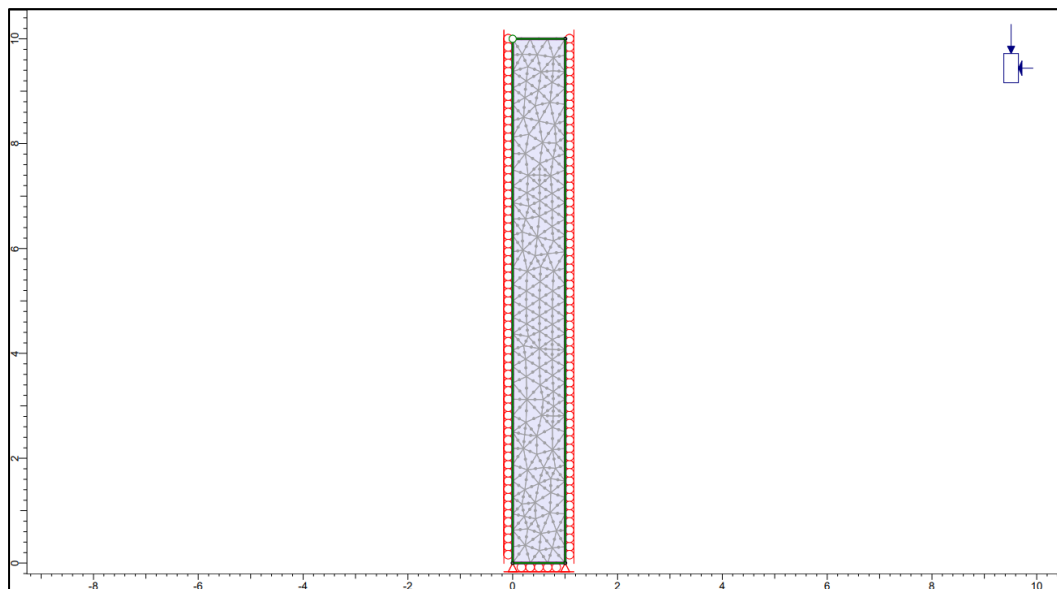
Τα παραπάνω διαγράμματα αντιστοιχούν σε τυπικές καμπύλες αλληλεπίδρασης εδάφους νερού. Στο διάγραμμα 1 φαίνεται πως μεταβάλλεται η φυσική υγρασία (Volumetric Water Content) με τη μύζηση (Matric Suction), ενώ στο διάγραμμα 2 φαίνεται πως μεταβάλλεται ο κορεσμός (Saturation) του υλικού συναρτήσει της μύζησης. Οι καμπύλες ακολουθούν την ίδια δομή καθώς φυσική υγρασία και κορεσμός είναι παρόμοια μεγέθη. Οι καμπύλες μπορούν να διαιρεθούν σε 3 ζώνες αναλόγως την κλίση τους. Η πρώτη ζώνη (Saturated Zone – Boundary effect Zone)

αντιστοιχεί στην κορεσμένη φάση του υλικού όπου όσο η μύζηση αυξάνεται ο κορεσμός και η φυσική υγρασία μεταβάλλονται με πολύ χαμηλός ρυθμό έως και μηδενικό, η δεύτερη ζώνη (Transition Zone) αντιστοιχεί στην φάση που το υλικό με μικρή μεταβολή της μύζησης ο κορεσμός και η φυσική υγρασία μεταβάλλονται με μεγάλο ρυθμό, η τρίτη ζώνη (Residual Zone) αντιστοιχεί στη φάση του υλικού όπου το νερό που έχει παραμείνει εντός του εδαφικού σκελετού δεν μπορεί να απομακρυνθεί λόγω τριβών μεταξύ κόκκων και αυτού, έτσι όσο και να αυξηθεί η μύζηση ένα ποσοστό του νερού παραμένει στο έδαφος.

A.1.2. Σχεδιασμός Προσομοιώματος

A.1.3.1. Γεωμετρία

Η γεωμετρία που επιλέγεται για τις αναλύσεις φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, αντιστοιχεί σε συνθήκες μονοδιάστατου προσομοιώματος όπου το ενδιαφέρον επικεντρώνεται μόνο στη μία κατεύθυνση, την κατακόρυφη. Οι διαστάσεις που έχουν δοθεί στο προσομοίωμα είναι 10m στην κατακόρυφη διεύθυνση και 1m στην οριζόντια έτσι ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί ένας αξιόλογος κάνναβος με επαρκή πεπερασμένα στοιχεία. Τα πεπερασμένα στοιχεία επιλέγονται να είναι τριγωνικά 6 κόμβων σε κάνναβο μέτριας πυκνότητας για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα αλλά και μικρό χρόνο διάρκειας κάθε ανάλυσης.



Σχήμα 3: Γεωμετρία Προσομοιώματος

A.1.3.2. Υδροφόρος Ορίζοντας

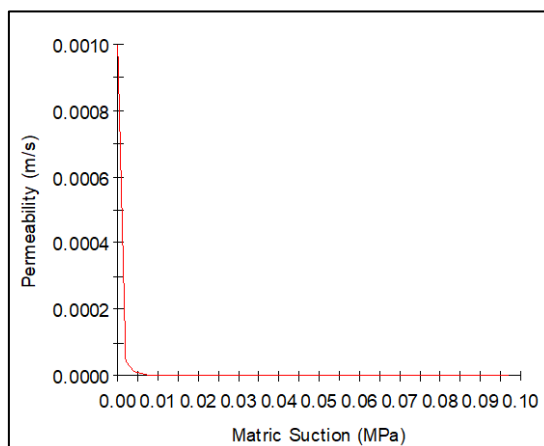
Ο υδροφόρος ορίζοντας επιλέγεται να είναι στα 3m έτσι ώστε να υπάρχει μία πλήρως κορεσμένη ζώνη και να είναι εφικτή η επαλήθευση των αποτελεσμάτων στις πιέσεις των πόρων.

A.1.3.3. Υδραυλικές Παράμετροι

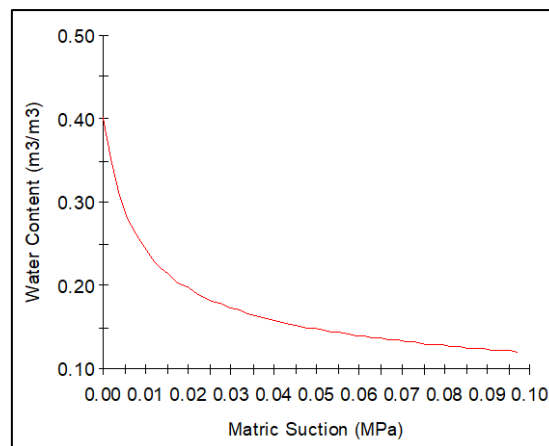
Το υλικό θέλουμε να αντιστοιχεί σε χονδρόκοκκη άμμο υψηλής διαπερατότητας έτσι ώστε να πετύχουμε ολική διήθηση του νερό της βροχής που θα προσομοιωθεί. Επιλέγεται υλικό με διαπερατότητα K_s ίση με 0,001m/s. Οι παράμετροι WC sat, WC res, Alpha και n λαμβάνουν τις τιμές που αντιστοιχούν σε έδαφος της επιλογής μας και δίνονται στο εγχειρίδιο του Plaxis. Η υδραυλική συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται από το μοντέλο Van Genuchten. Στα ακόλουθα διαγράμματα παρουσιάζεται η μεταβολή της φυσικής υγρασίας με τη μύζηση καθώς και τις διαπερατότητας (Permeability) με τη μύζηση.

Πίνακας 10: Υδραυλικές Παράμετροι

| Παράμετρος | Τιμή |
|----------------------|--------|
| K_s (m/s) | 0.001 |
| $K2/K1$ | 1 |
| WC sat (m^3/m^3) | 0.403 |
| WC res (m^3/m^3) | 0.025 |
| Alpha | 3.83 |
| n | 1.3774 |



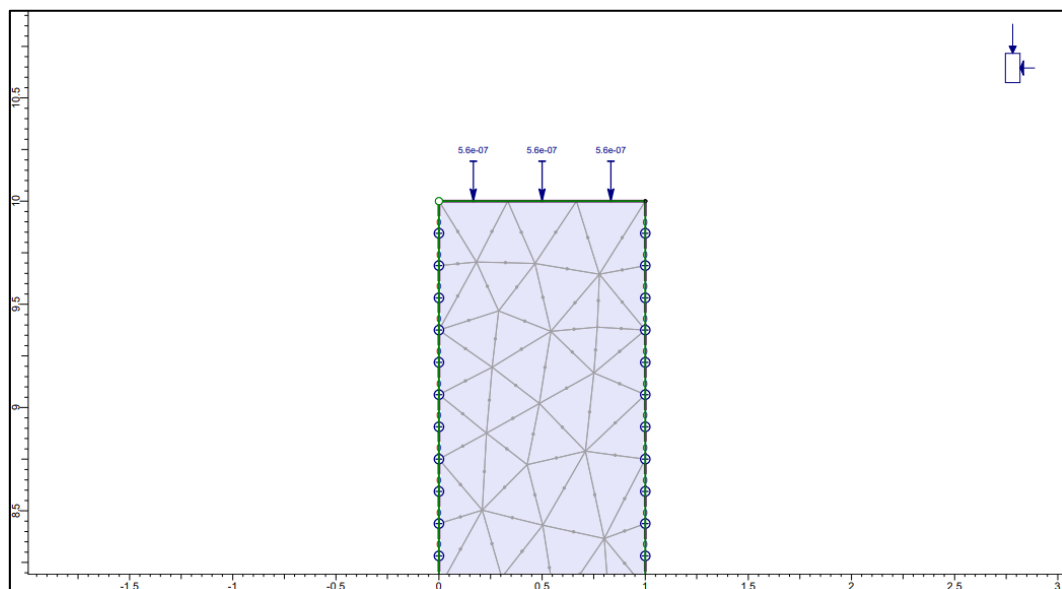
Σχήμα 4: Μεταβολή της διαπερατότητας με τη Μύζηση (RS2)



Σχήμα 5: Μεταβολή της εδαφικής υγρασίας με τη μύζηση (RS2)

A.1.3.4. Βροχή

Για τις αναλύσεις επιλέγεται μια χαμηλής έντασης βροχής της τάξης των 20mm/h για διάστημα 10 ωρών. Η επιλογή αυτή έχει στόχο την επίτευξη στράγγισης του νερού που πέφτει στο έδαφος και την παρατήρηση των μεταβολών στις πιέσεις των πόρων, τον κορεσμό, την ροή. Η προσομοίωση της βροχής γίνεται με το εργαλείο Vertical Infiltration $q=5.6 \times 10^{-7}$ m/s στο άνω όριο του μοντέλου όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Οι 10ωρες διάρκειες της βροχής χωρίζονται σε 10 διαφορετικά στάδια στην ανάλυση της 1 ωρας.



Σχήμα 6: Προσομοίωση βροχής

A.1.3. Αναλύσεις

Πραγματοποιούνται 4 αναλύσεις οι οποίες χωρίζονται σε 2 κατηγορίες αναλόγως τον τρόπο επίλυσης των συνθηκών της αρχικής κατάστασης, 2 με Static Water στην αρχική φάση (Initial Phase) και 2 με Steady State. Στην κάθε κατηγορία ο υδροφόρος ορίζοντας ορίζεται με 2 διαφορετικούς τρόπους γι' αυτό προκύπτουν και 4 διαφορετικές αναλύσεις.

A.1.3.1. Static Water Αναλύσεις

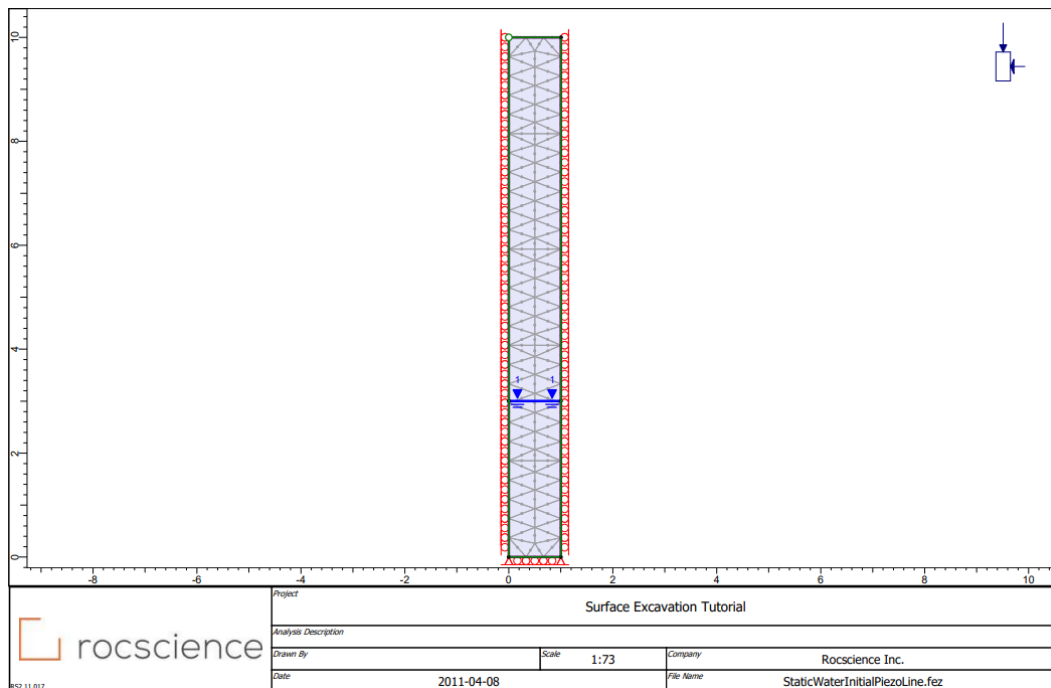
Ο ορισμός του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να γίνει με 2 διαφορετικούς τρόπους σε αναλύσεις Static Water είτε με το εργαλείο της πιεζομετρικής γραμμής (Piezometric Line) είτε με τον κάρναβο υδροστατικής πίεσης (Water Pressure Grid).

I. Piezometric Line

Στην πρώτη περίπτωση ορίζουμε την πιεζομετρική γραμμή στα 3m όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.

Αρχική Φάση

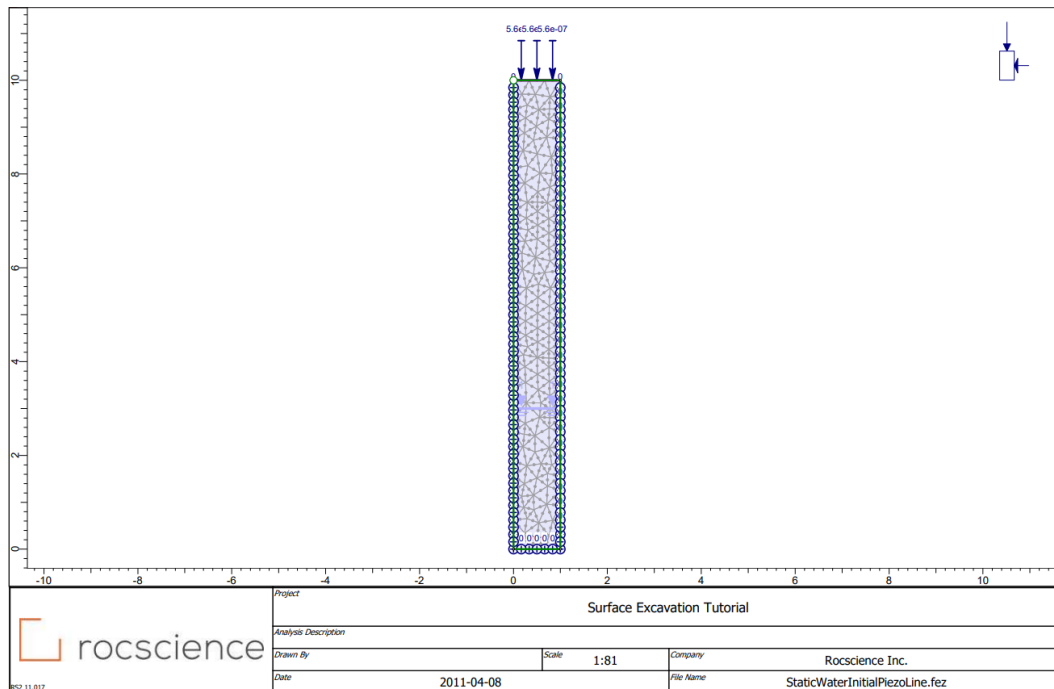
Στην αρχική φάση της ανάλυσης δεν γίνεται κάποια παραδοχή στα υδραυλικά όρια, ενώ όσο αφορά τις μετακινήσεις στα όρια αυτές περιορίζονται αποκλειστικά σε κατακόρυφες στα πλευρικά και οριζόντιες στο κάτω όριο του μοντέλου. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η όψη του προσομοιώματος στην αρχική φάση. Στο παράθυρο Initial Condition του Define Materials που εισάγονται οι παράμετροι που αφορούν την αρχική κατάσταση, επιλέγεται στο Initial Water Condition η πιεζομετρική γραμμή ενώ η τιμή H_u λαμβάνει την τιμή 1.



Σχήμα 7: Προσομοίωμα - Αρχική Φάση

Υπόλοιπα Στάδια

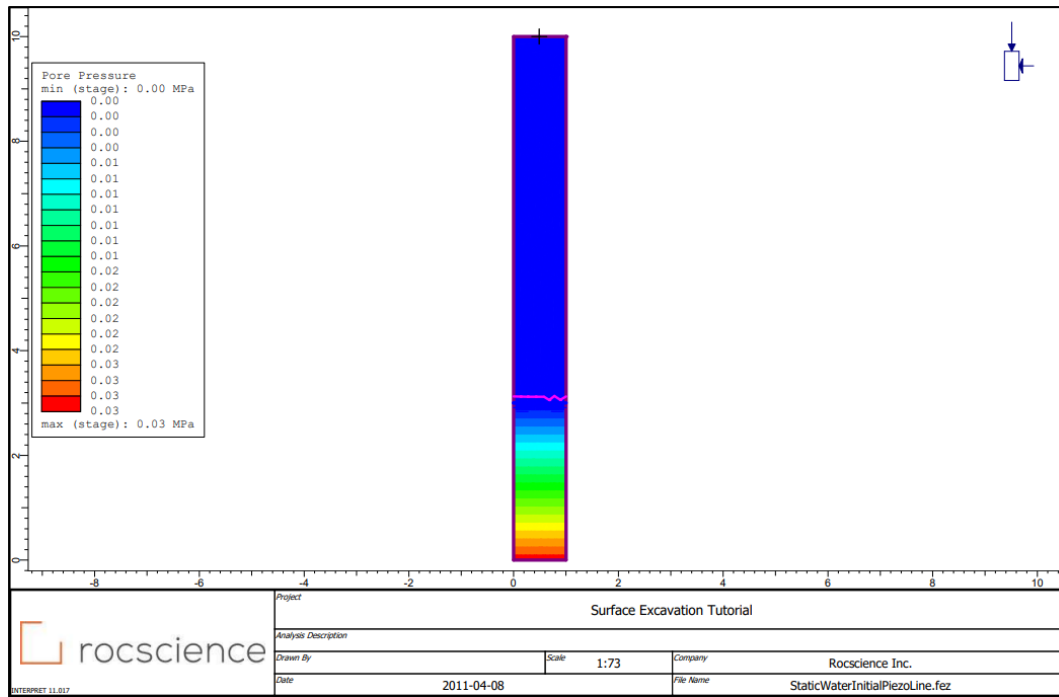
Την αρχική φάση διαδέχονται 10 στάδια τα οποία αφορούν το φαινόμενο της βροχόπτωσης, κάθε στάδιο διαρκεί 1ώρα και σε όλα ορίζονται οι ίδιες παραδοχές. Τα πλευρικά όρια όπως και το κατώτερο θέτονται με μηδενική ροή χρησιμοποιώντας το εργαλείο Nodal Flow Rate από το Set Boundary Conditions. Όταν ορίζονται τα όρια θα πρέπει η επιλογή Seepage Face Condition να μην είναι επιλεγμένη. Η όψη του μοντέλου στα στάδια αυτά φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



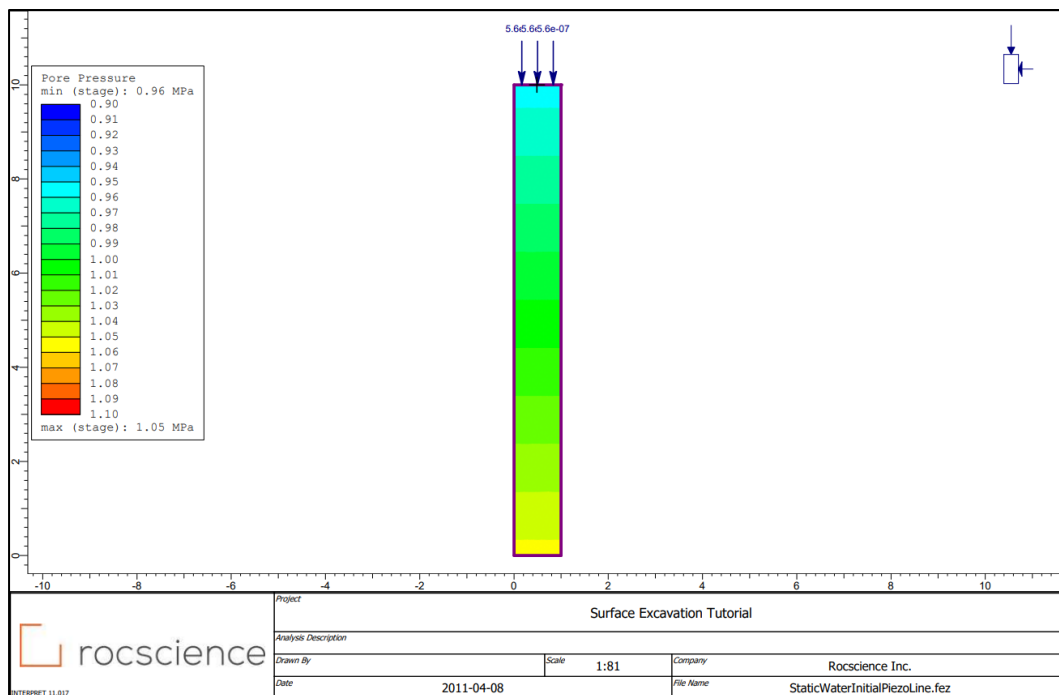
Σχήμα 8: Προσομοίωμα Υπόλοιπες Φάσεις

Αποτελέσματα

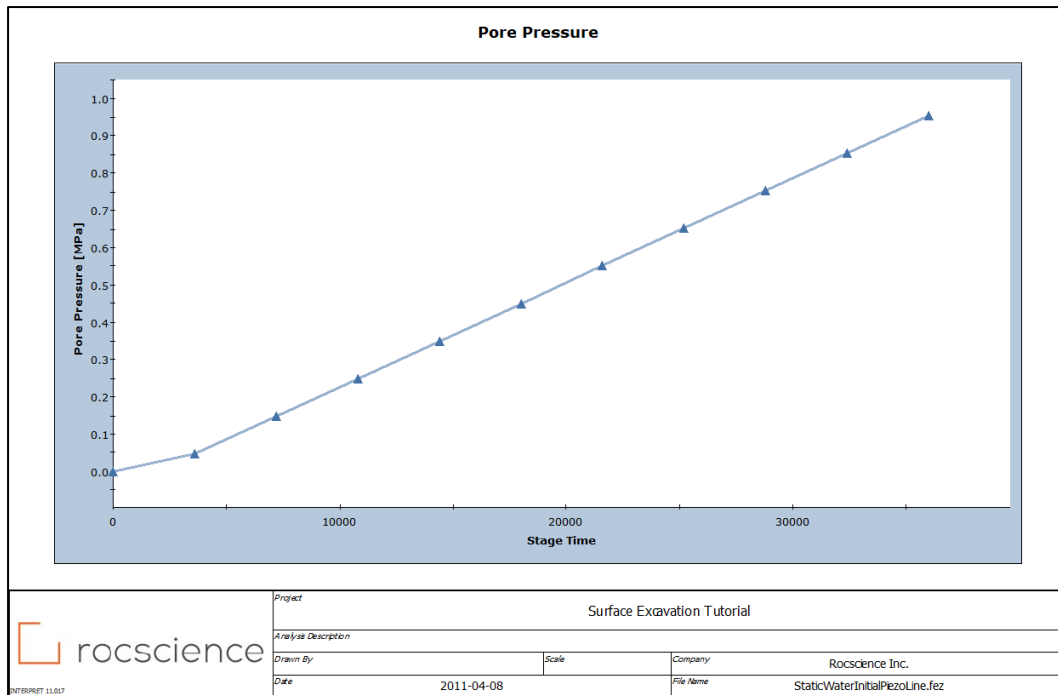
Η ανάλυση με την μέθοδο Static Water έχει τον περιορισμό ότι δεν υπολογίζεται ο βαθμός κορεσμού στην αρχική φάση με αποτέλεσμα και στις επόμενες να μην είναι αξιολογήσιμα τα αποτελέσματα για το συγκεκριμένο. Στις ακόλουθες εικόνες βλέπουμε τις πιέσεις των πόρων στην αρχική φάση και την τελική καθώς και την εξέλιξη της πίεσης των πόρων στην κορυφή του μοντέλου. Από την πρώτη εικόνα παρατηρούμε ότι από τις πιέσεις πόρων ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στα 3m όπως έχει οριστεί, στο υπόλοιπο έδαφος αυτή η πίεση είναι 0. Στην δεύτερη εικόνα που αντιστοιχεί στην τελική φάση η πίεση των πόρων στη βάση του μοντέλου



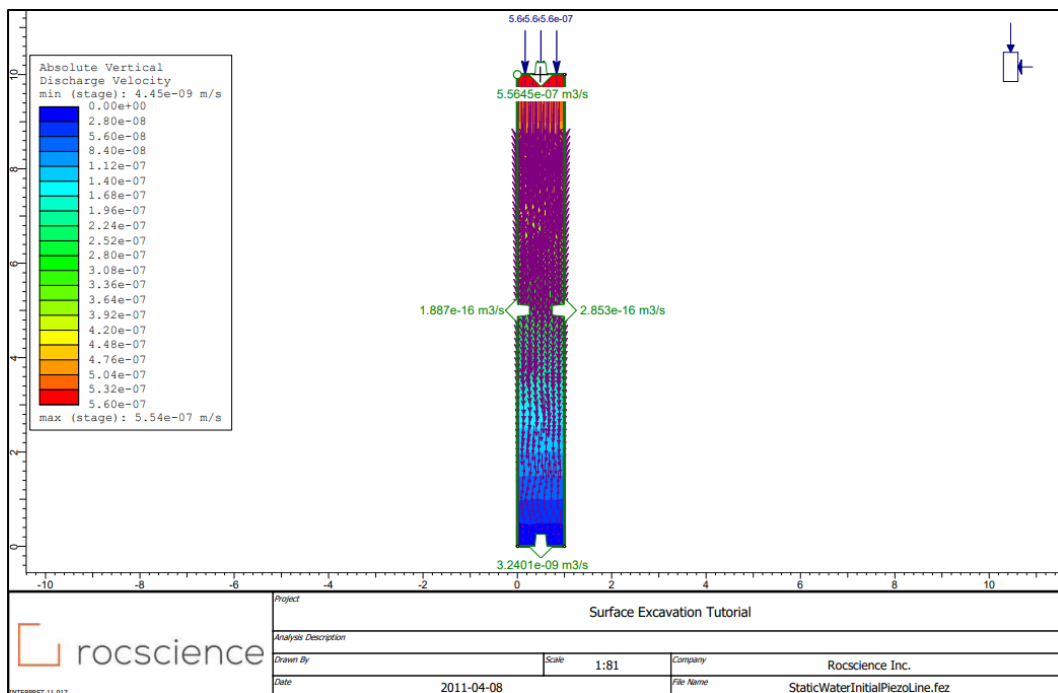
Σχήμα 9: Πιέσεις πόρων - Αρχική Φάση



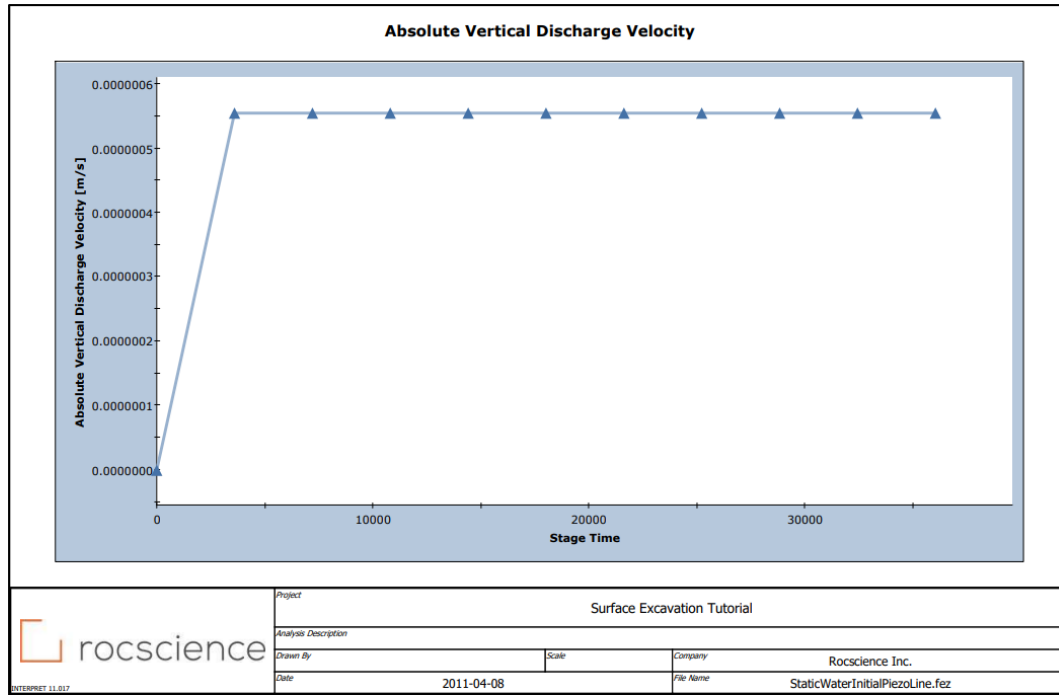
Σχήμα 10: Πιέσεις πόρων - Τελική Φάση



Σχήμα 11: Χρονική Εξέλιξη πιέσεων πόρων



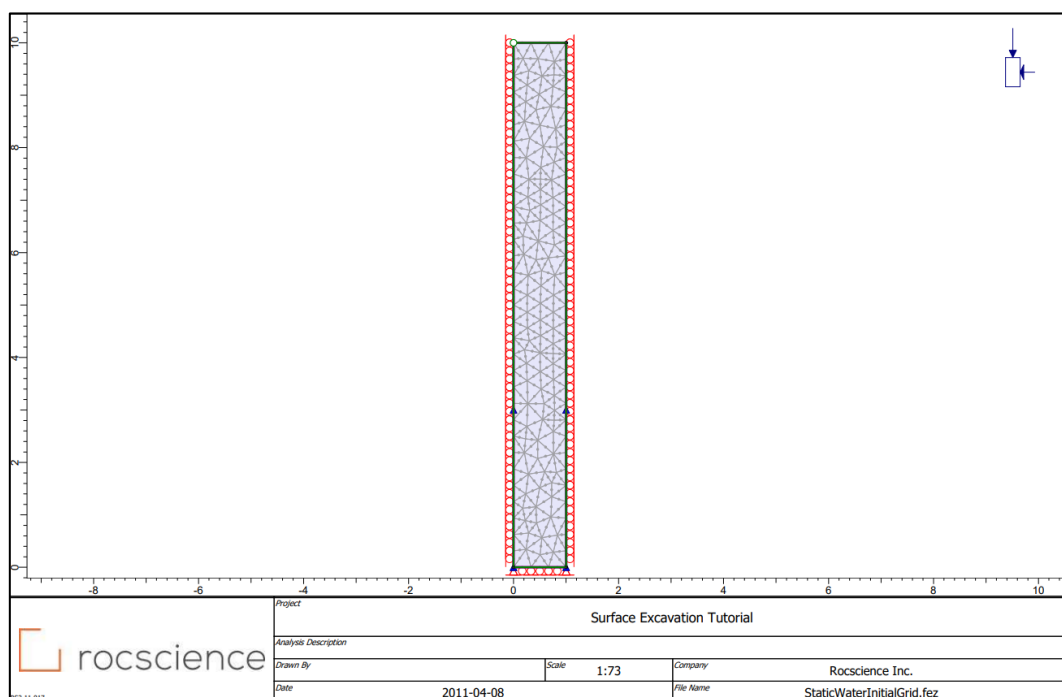
Σχήμα 12: Ροή νερού κατά την εφαρμογή της βροχής



Σχήμα 13: Εξέλιξη ροής νερού στην επιφάνεια (ρυθμός διήθησης)

II. Water Pressure Grid

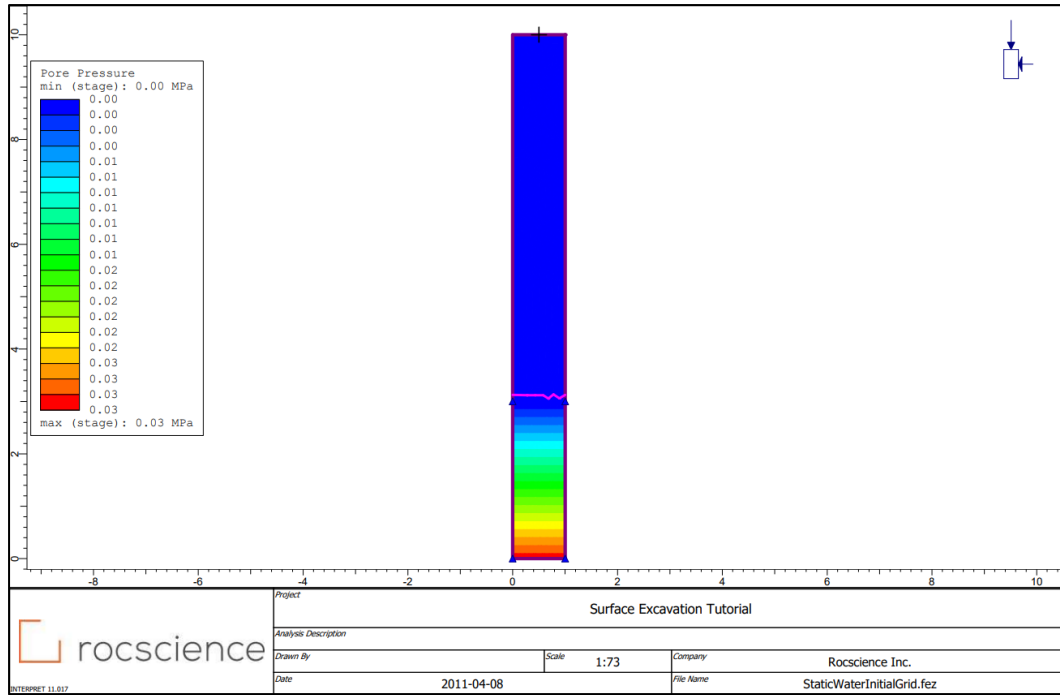
Στην δεύτερη περίπτωση ο υδροφόρος ορίζοντας ορίζεται με τη χρήση του εργαλείου Water pressure grid. Στον συγκεκριμένο κάρναβο ορίζουμε το πιεζομετρικό ύψος σε μια συγκεκριμένη περιοχή του μοντέλου, στην κορεσμένη ζώνη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το πιεζομετρικό ύψος ορίστηκε στα 3m και ο κάρναβος ορίστηκε από τη βάση του μοντέλου μέχρι το ύψος των 3m όπως φαίνεται και στο ακόλουθο σχήμα. Όσον αφορά την αρχική φάση δεν γίνεται κάποια παραδοχή στα υδραυλικά όρια αλλά μόνο σε αυτά που σχετίζονται με τις μετακινήσεις όπως και στην πρώτη περίπτωση. Στις υπόλοιπες φάσεις της ανάλυσης τα υδραυλικά όρια ορίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως και στην πρώτη περίπτωση.



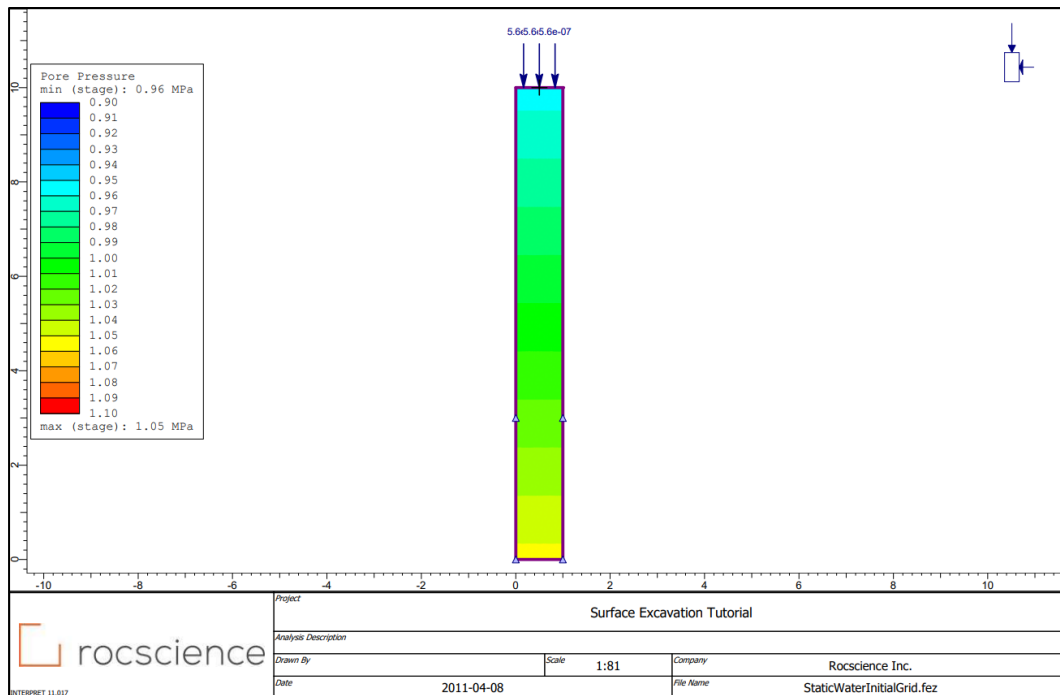
Σχήμα 14: Προσομοίωμα - Αρχική Φάση

Αποτελέσματα

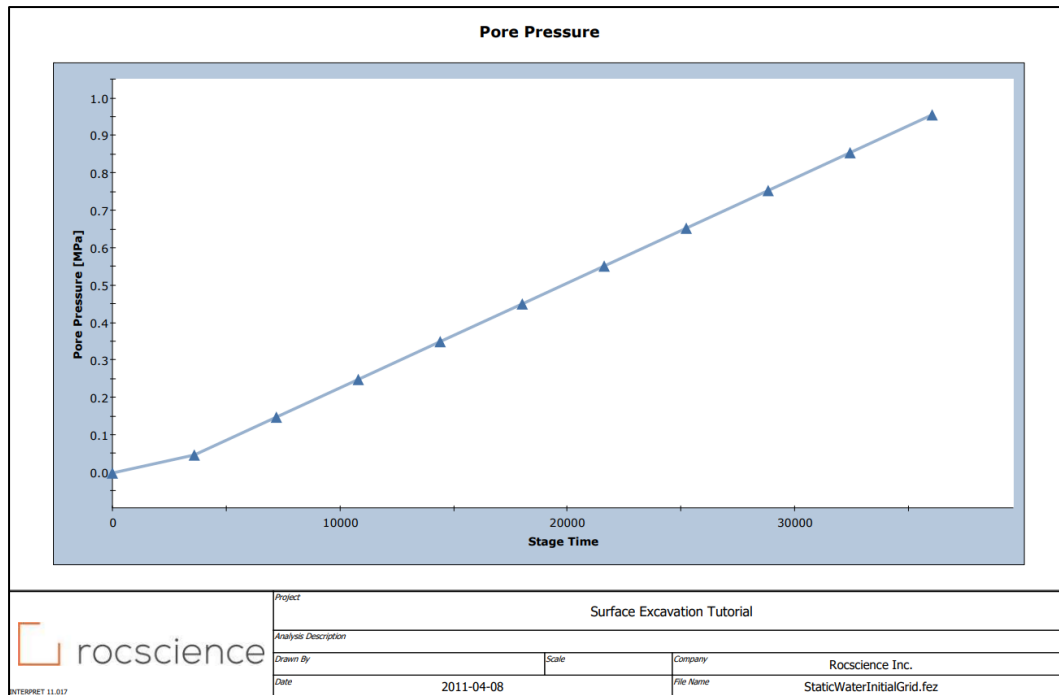
Η συγκεκριμένη ανάλυση όπως βλέπουμε και στα ακόλουθα σχήματα έχει δώσει ίδια αποτελέσματα με την πρώτη περίπτωση όπου ο υδροφόρος ορίζοντας ορίστηκε με την πιεζομετρική γραμμή.



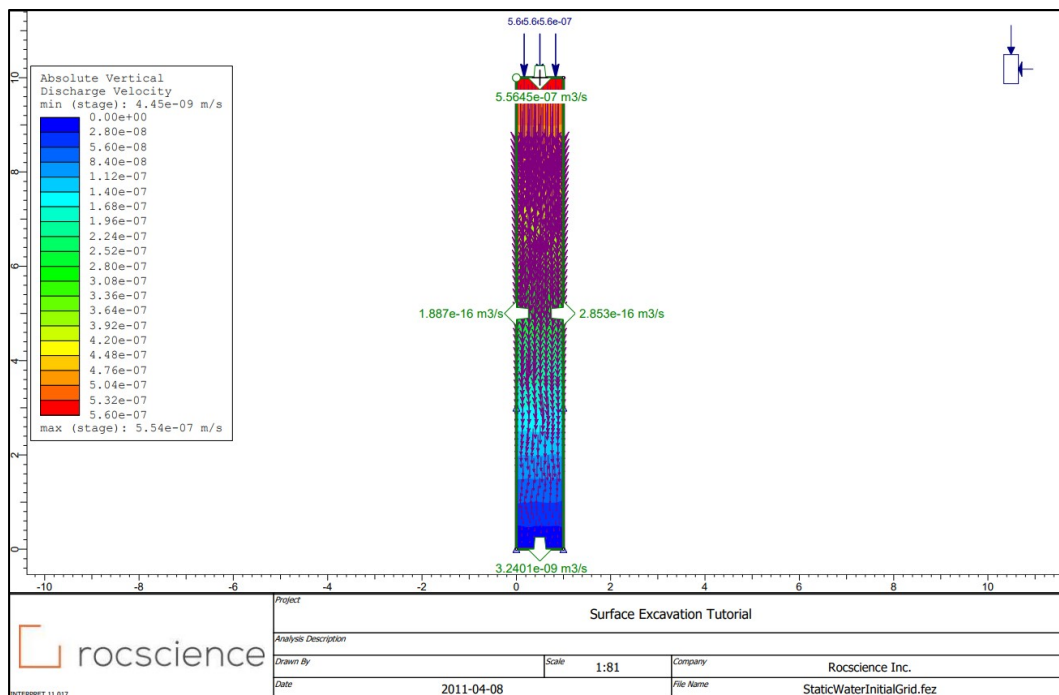
Σχήμα 15: Πιέσεις πόρων - Αρχική Φάση



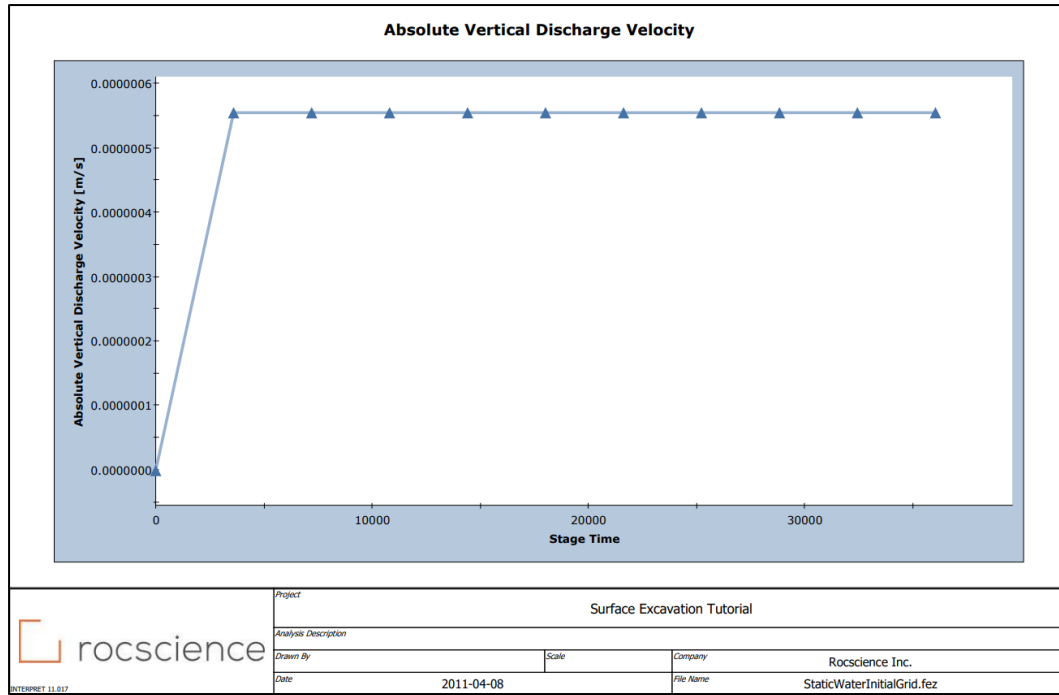
Σχήμα 16: Πιέσεις πόρων - Τελική Φάση



Σχήμα 17: Εξέλιξη πιέσεων πόρων στην επιφάνεια



Σχήμα 18: Ροή νερού κατά την βροχόπτωση



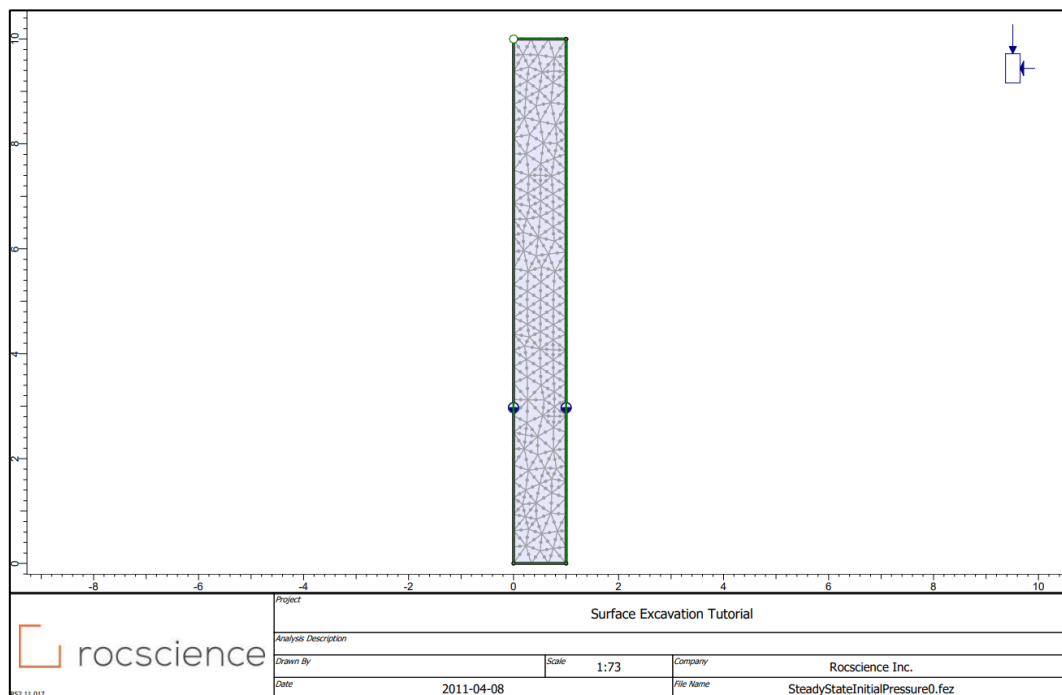
Σχήμα 19: Εξέλιξη ροής νερού στην επιφάνεια (ρυθμός διήθησης)

A.1.3.2. Steady State Αναλύσεις

Τόσο στις Static Water αναλύσεις όσο και στις Steady State αναλύσεις ο υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς τρόπους. Στο συγκεκριμένο τύπο ανάλυσης ο υδροφόρος ορίζοντας ορίζεται μέσω των υδραυλικών ορίων είτε θέτοντας 2 αντικρουστά σημεία με μηδενική πίεση με το εργαλείο Zero Pressure είτε με θέτοντας ένα πιεζομετρικό ύψος με το εργαλείο Total Head.

I. Zero Pressure

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίζονται 2 αντιδιαμετρικά σημεία στο ύψος των 3m με πίεση 0 όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Στην καρτέλα Initial Conditions του Define Materials η ιδιότητα Initial Water Condition επιλέγεται ως Dry.

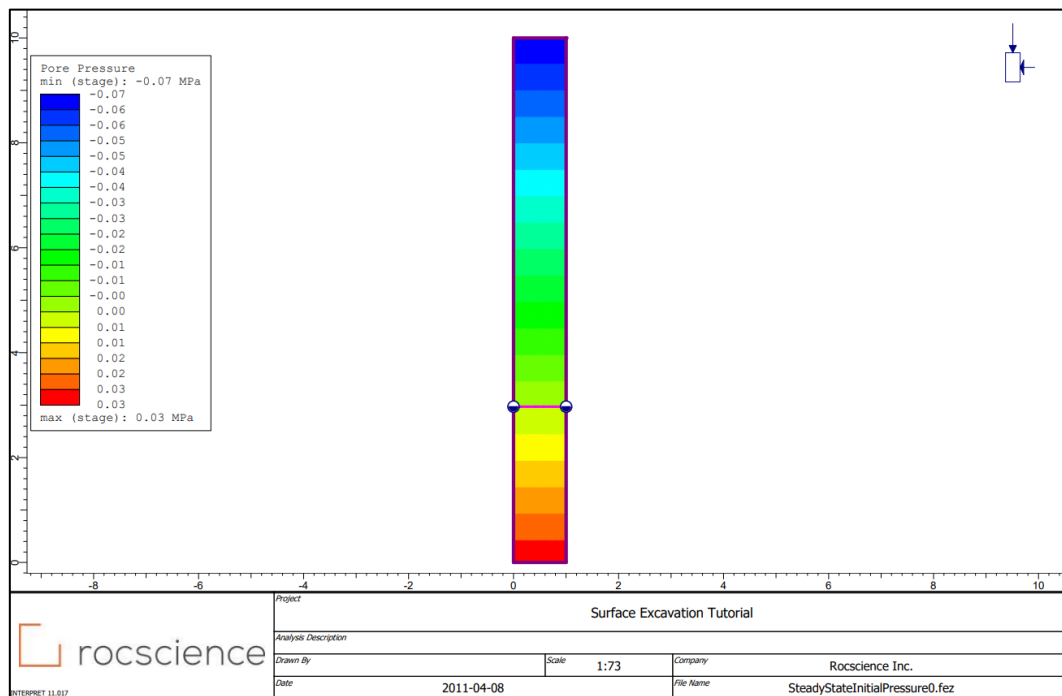


Σχήμα 20: Προσομοίωμα - Αρχική Φάση

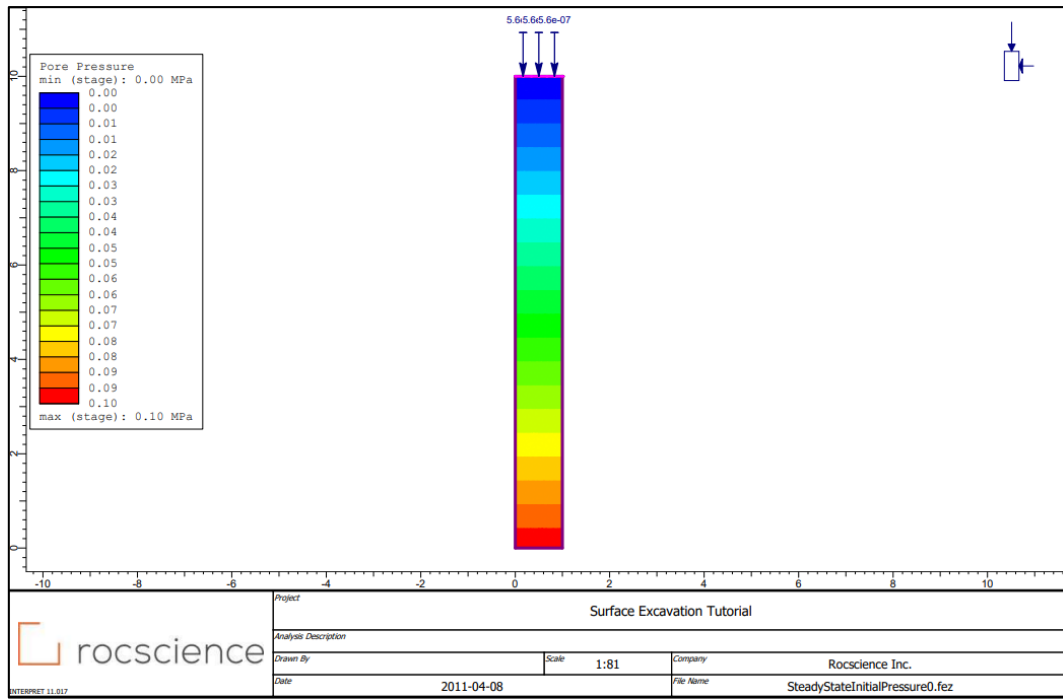
Όσον αφορά τα στάδια της βροχόπτωσης αυτά είναι 10 διάρκειας 1 ώρας. Τα υδραυλικά όρια που θέτονται είναι η μηδενική ροή στα πλευρικά και το κάτω όριο όπως και στα προηγούμενα μοντέλα.

Αποτελέσματα

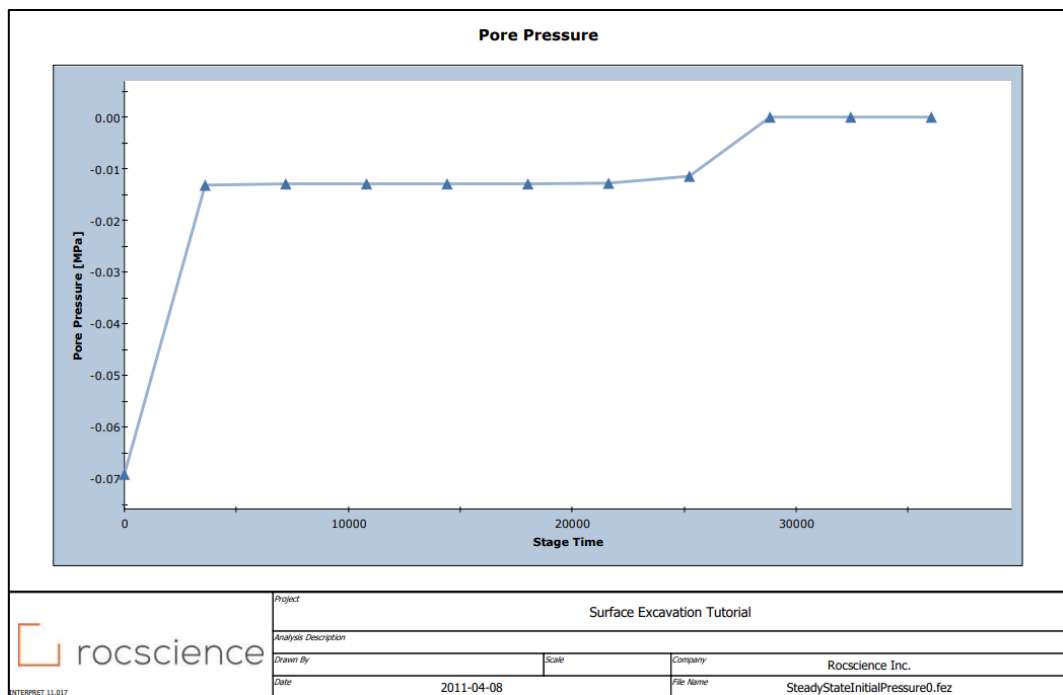
Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης ανάλυσης βλέπουμε διαφέρουν από αυτά των αναλύσεων που προηγήθηκαν. Από τις πιέσεις των πόρων γίνεται αντιληπτό ότι στην αρχική φάση υπάρχει πλήρης κορεσμός του υλικού έως τα 3m ενώ στην τελική φάση το υλικό είναι πλήρως κορεσμένο. Από το διάγραμμα των πιέσεων συναρτήσει του χρόνου παρατηρείται μια σταθερή σχεδόν πτωτική πορεία τις πρώτες 7 ώρες την βροχής ενώ στη συνέχεια ο ρυθμός μεταβολής αυξάνεται μέχρι να γίνει ίση με 0.



Σχήμα 21: Πιέσεις πόρων - Αρχική Φάση

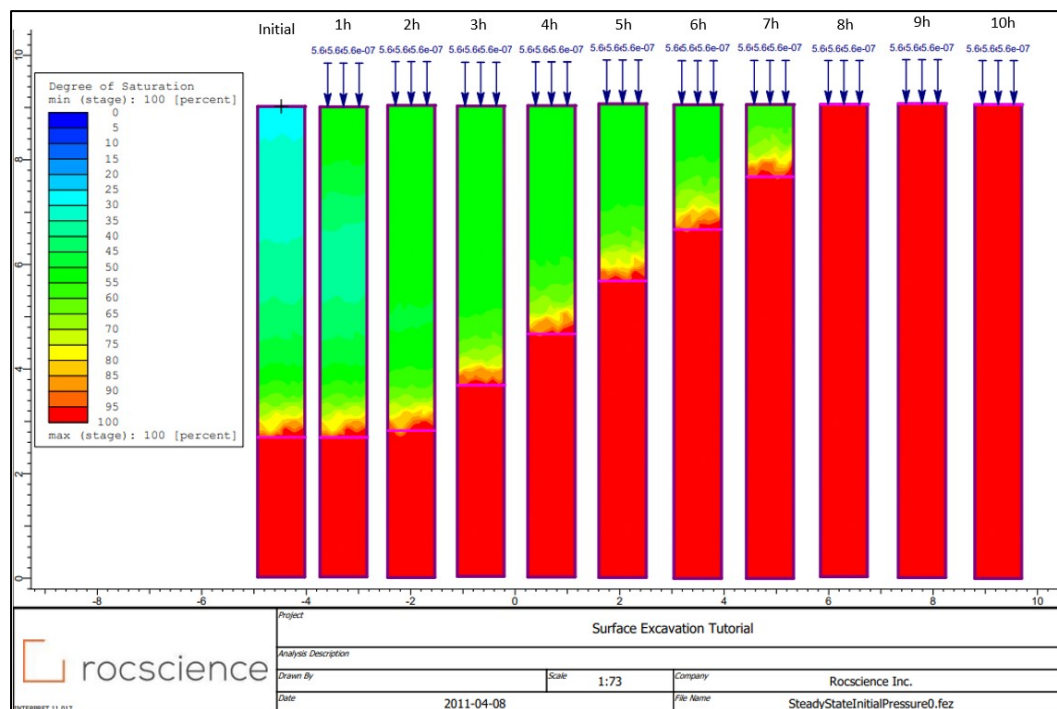


Σχήμα 22: Πιέσεις πόρων - Τελική Φάση



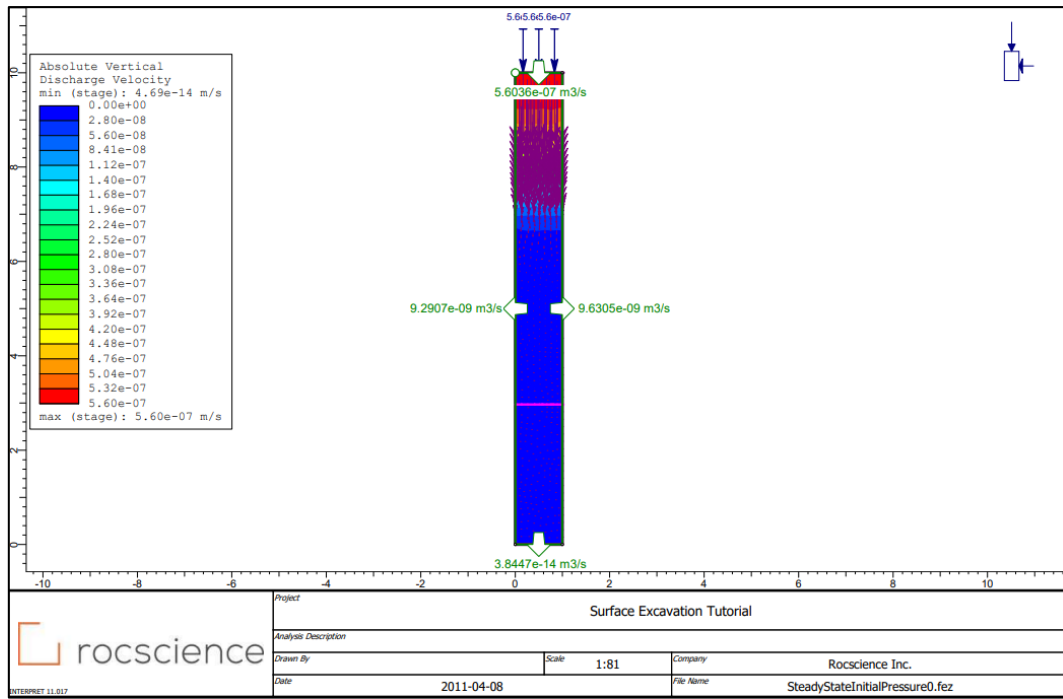
Σχήμα 23: Εξέλιξη Πιέσεων πόρων στην επιφάνεια του προβοδώματος

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η εξέλιξη του κορεσμού του υλικού κατά τη διάρκεια του φαινομένου. Τις πρώτες 7 ώρες παρατηρείται μια μη κορεσμένη ζώνη η οποία μπορεί να δεχθεί ποσότητα νερού ενώ στην συνέχεια παρατηρείται πλήρης κορεσμός του υλικού.

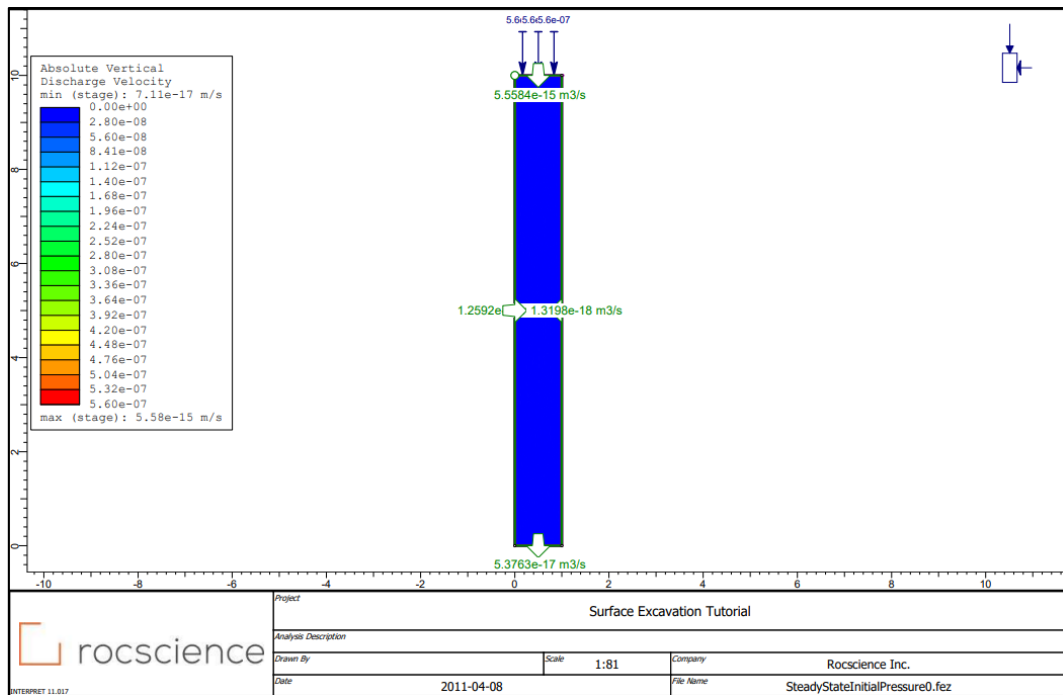


Σχήμα 24: Κορεσμός του εδάφους

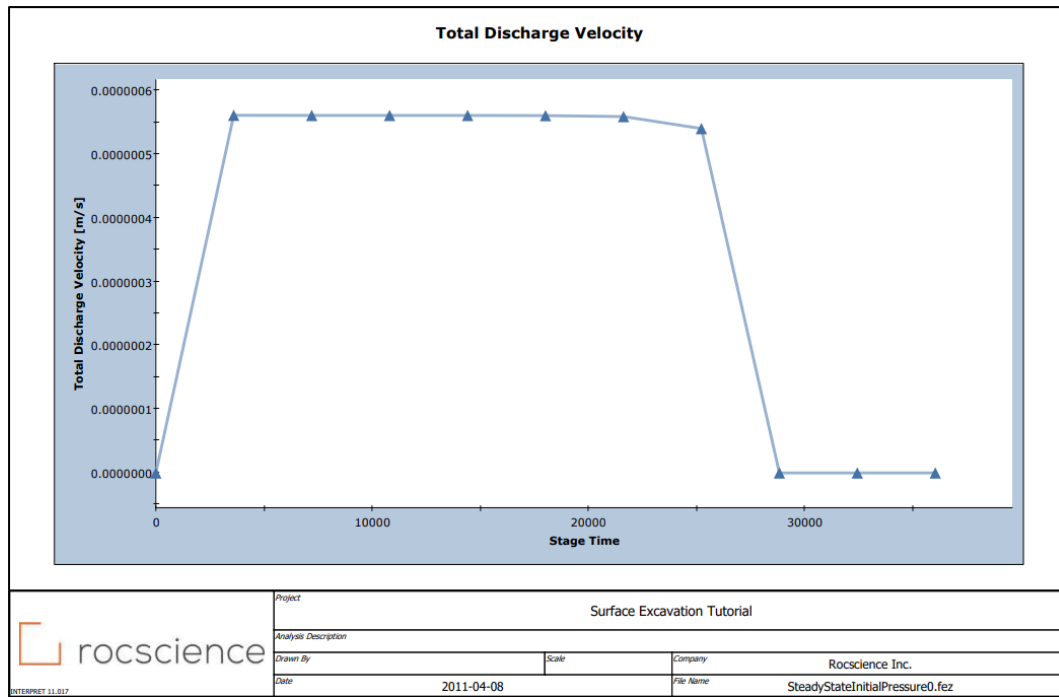
Όσον αφορά την ροή στην προσομοίωση αυτή στην αρχή του φαινομένου έχει τιμή ίση με την ένταση της βροχής, κάτι το οποίο έχει επιτευχθεί λόγω του μεγάλου συντελεστή διαπερατότητας k_s αλλά και της μικρής έντασης της βροχής. Στο τέλος του φαινομένου όπου όπως παρατηρήθηκε και από τα προηγούμενα μεγέθη που αξιολογήθηκαν έχει υπάρξει πλήρης κορεσμός επομένως και η ροή στο προσομοίωμα είναι μηδενική. Από το διάγραμμα ροής χρόνου τις πρώτες 7 ώρες παρατηρείται μια σταθερή έως ελάχιστα πτωτική τιμή της ροής του νερού στην επιφάνεια ενώ στην συνέχεια η ροή μηδενίζεται λόγω του πλήρη κορεσμού όπως αναφέρθηκε.



Σχήμα 25: Ροή νερού



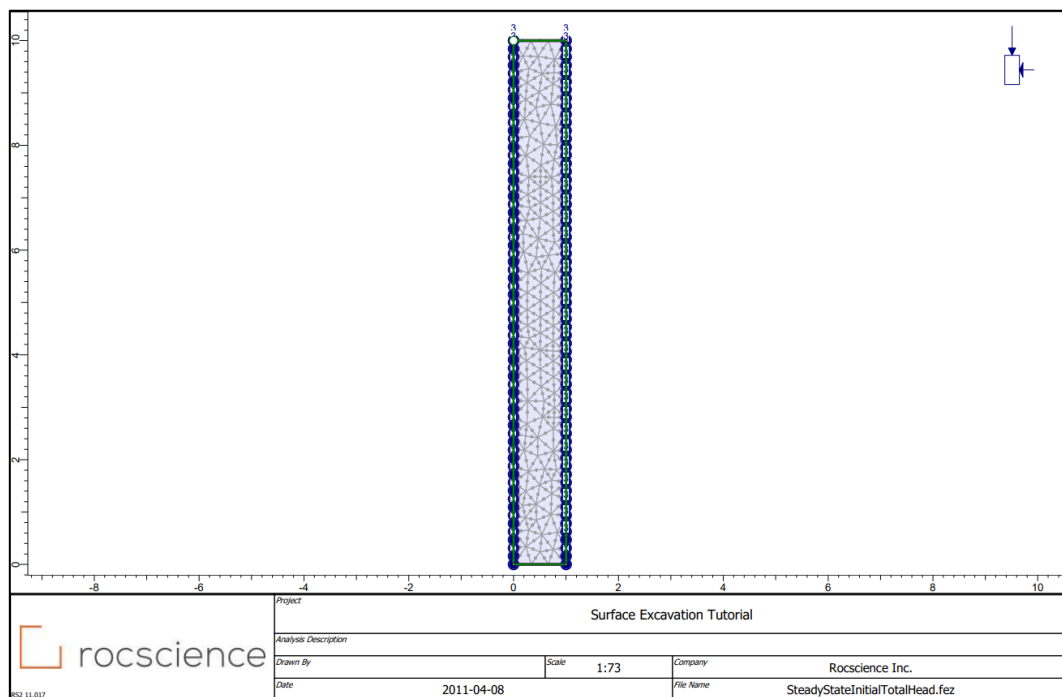
Σχήμα 26: Ροή νερού - Τελική Φάση



Σχήμα 27: Εξέλιξη ροής νερού στην επιφάνεια (ρυθμός διήθησης)

II. Total Head

Ο υδροφόρος ορίζοντας στην συγκεκριμένη περίπτωση ορίζεται με το εργαλείο των υδραυλικών ορίων Total Head στα πλευρικά όρια όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα. Το ύψος εισάγεται στα 3m. Στην καρτέλα Initial Conditions του Define Materials η ιδιότητα Initial Water Condition επιλέγεται ως Dry.

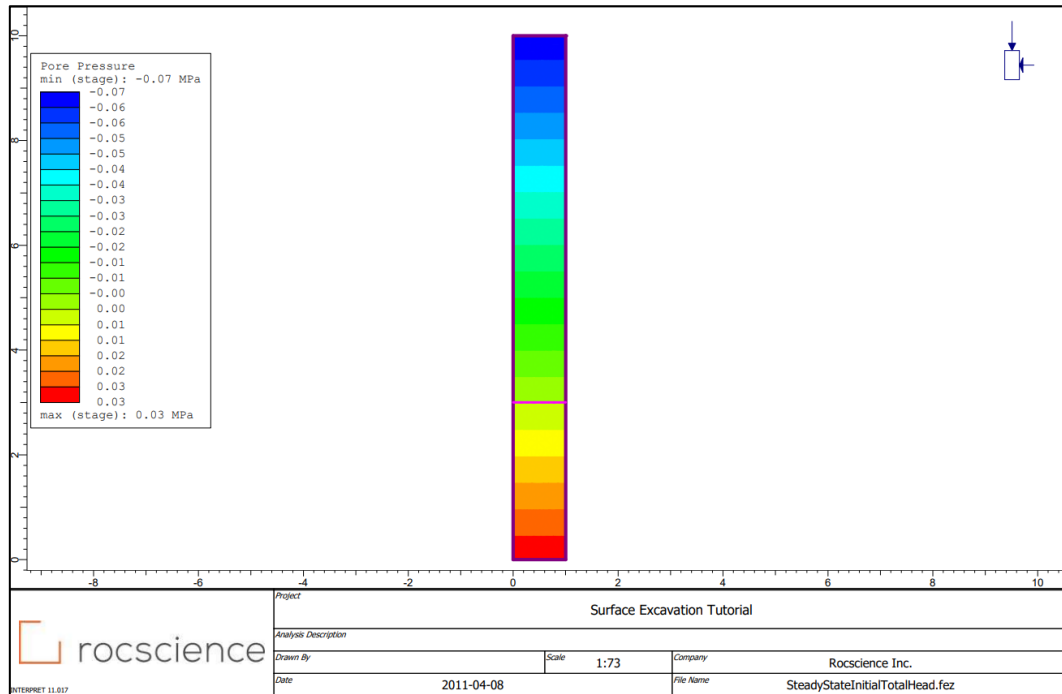


Σχήμα 28: Προσομοίωμα - Αρχική Φάση

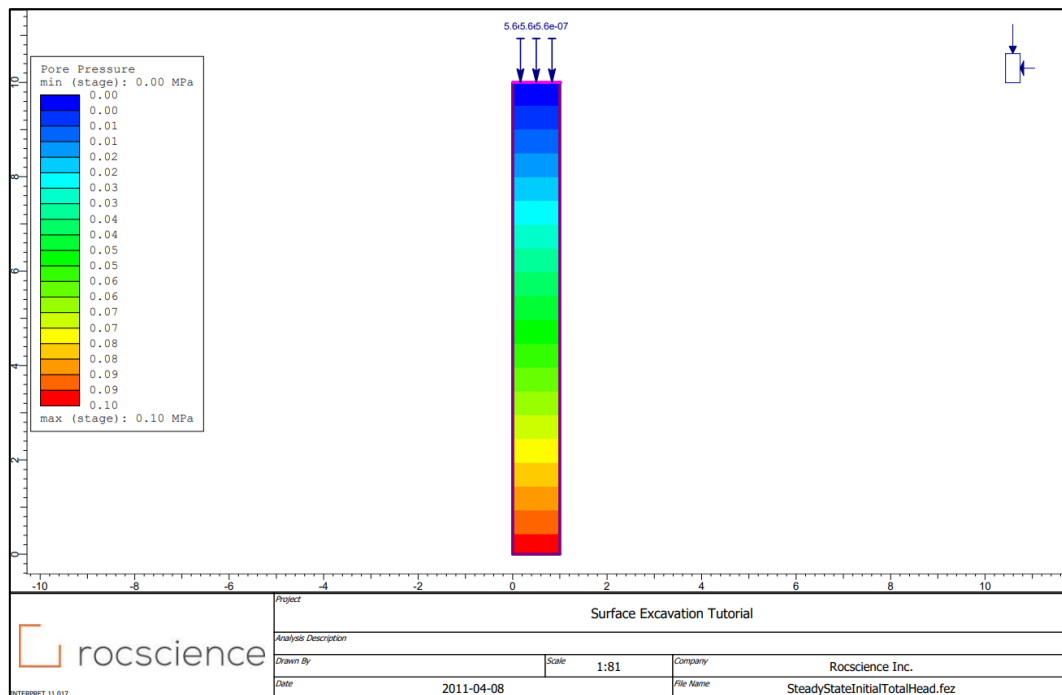
Όσον αφορά τα στάδια της βροχόπτωσης αυτά είναι 10 διάρκειας 1 ώρας. Τα υδραυλικά όρια που θέτονται είναι η μηδενική ροή στα πλευρικά και το κάτω όριο όπως και στα προηγούμενα μοντέλα.

Αποτελέσματα

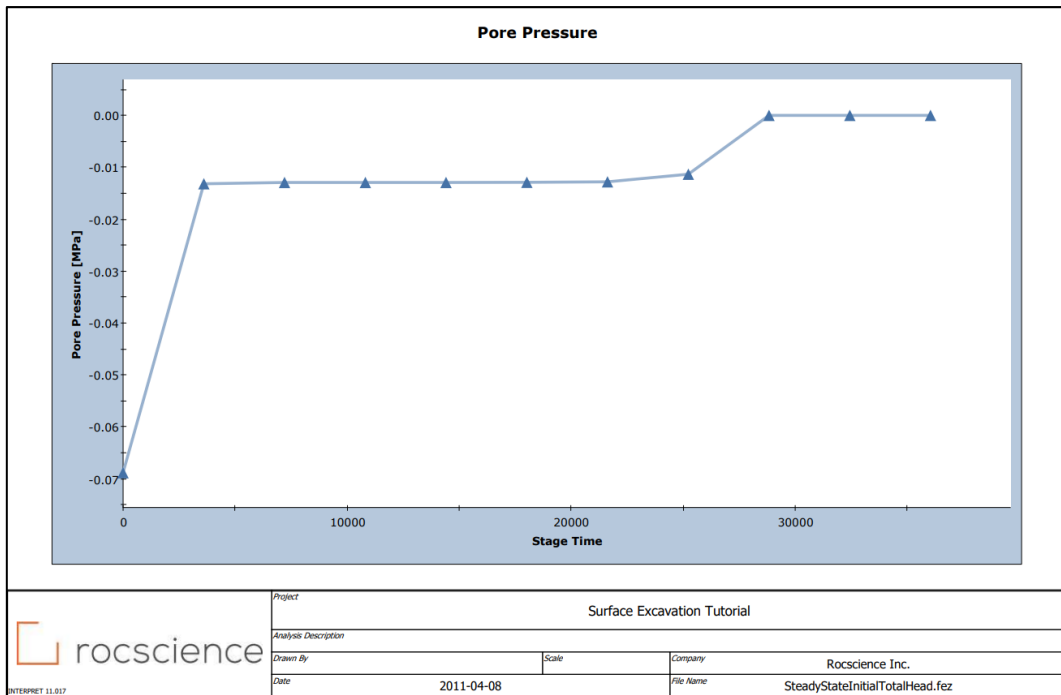
Τα αποτελέσματα και στις 2 Steady State αναλύσεις είναι ίδια όπως παρατηρείται από τα παρακάτω σχήματα.



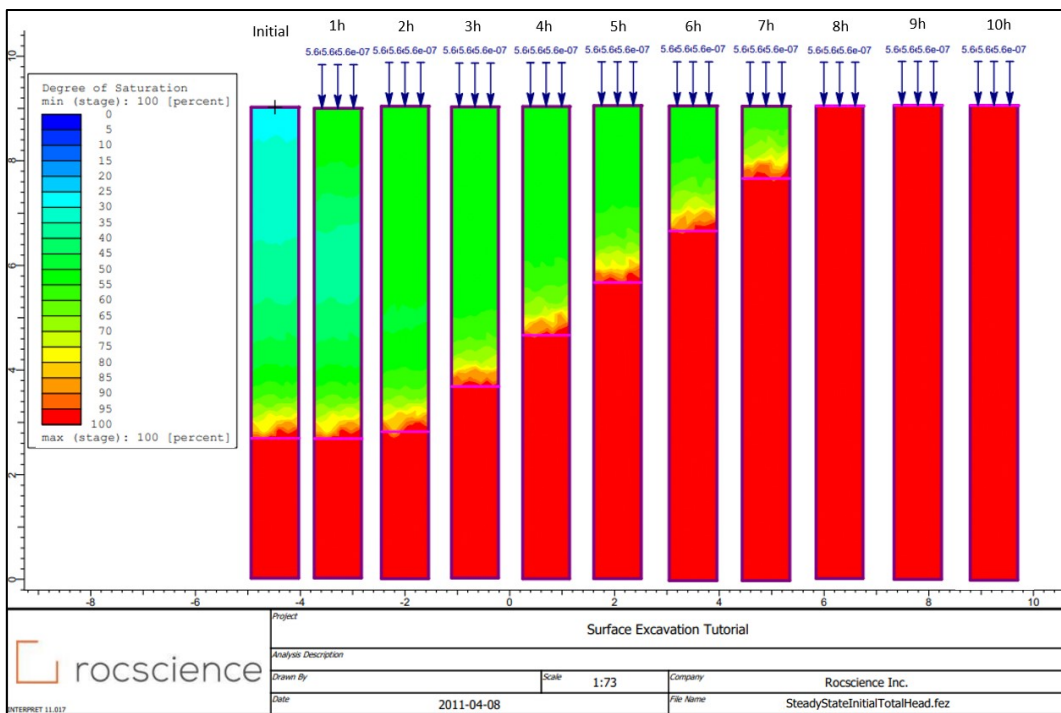
Σχήμα 29: Πιέσεις πόρων - Αρχική Φάση



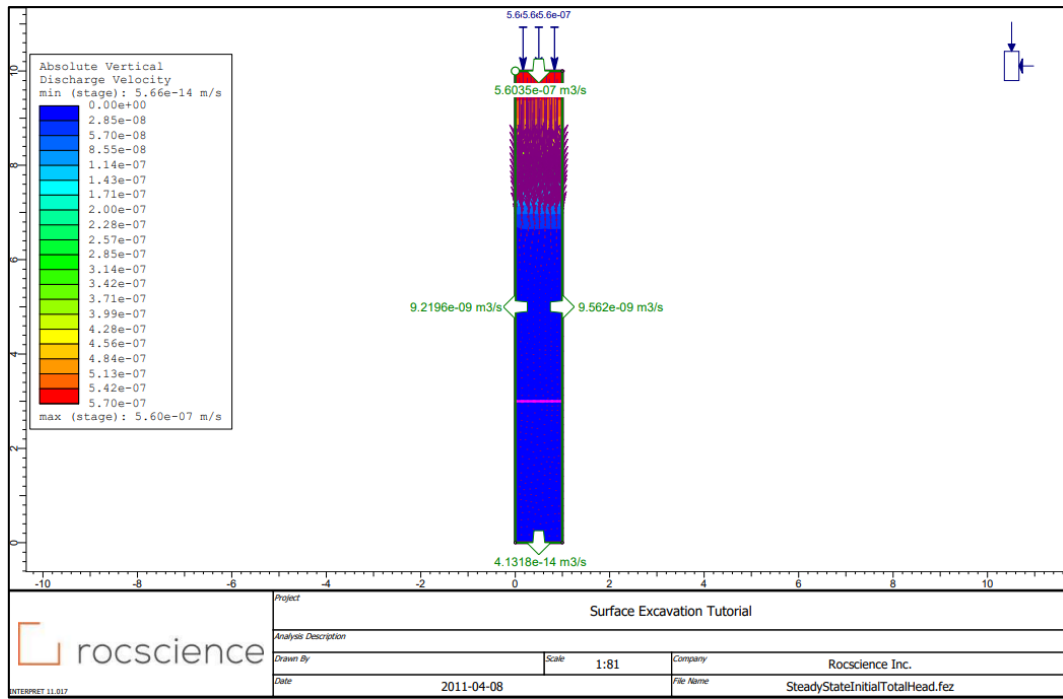
Σχήμα 30: Πιέσεις πόρων - Τελική Φάση



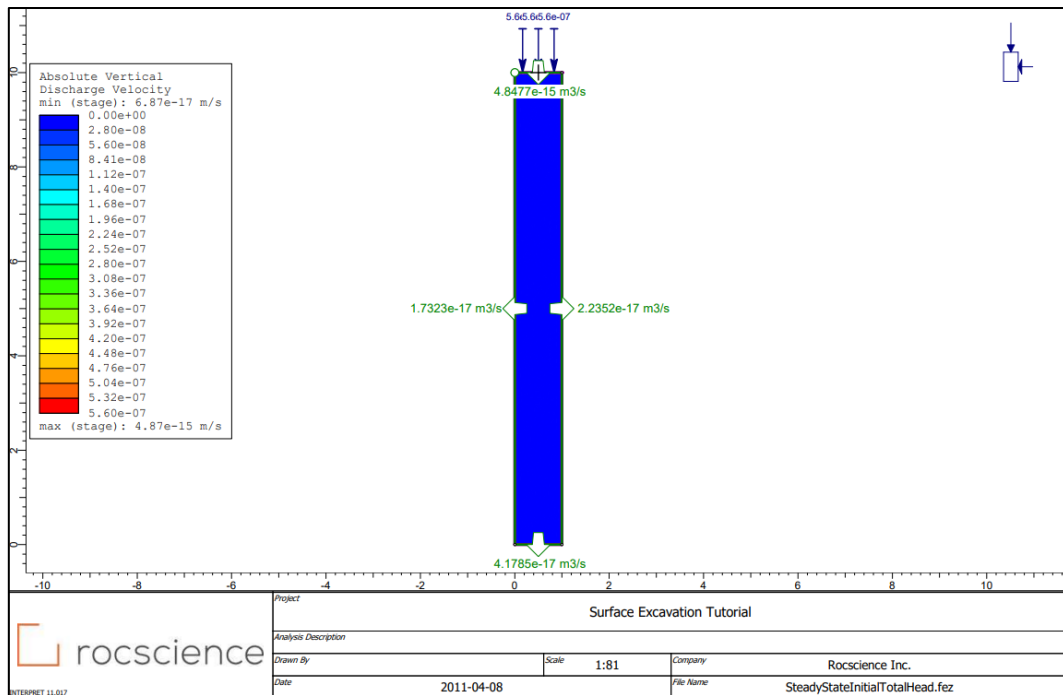
Σχήμα 31: Εξέλιξη πιέσεων πόρων στην επιφάνεια



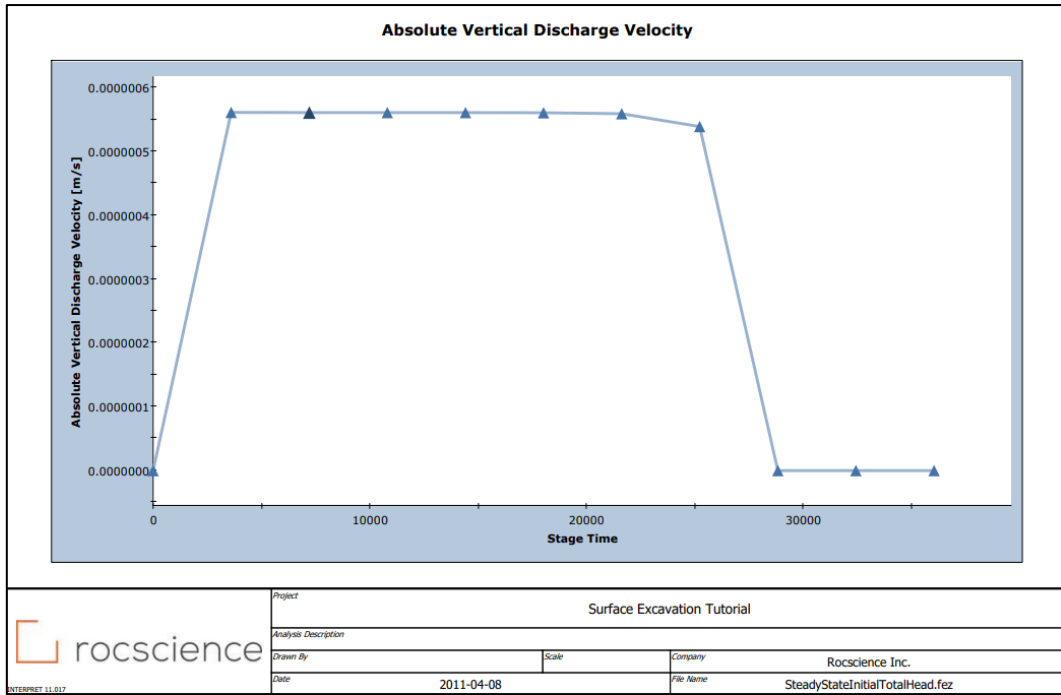
Σχήμα 32: Κορεσμός του εδάφους



Σχήμα 33: Ροή του νερού κατά την βροχόπτωση



Σχήμα 34: Ροή νερού - Τελική Φάση



Σχήμα 35: Εξέλιξη ροής νερού στην επιφάνεια (ρυθμός διήθησης)

A.2. Προσομοιώσεις στο λογισμικό PLAXIS 2D

A.2.1. Υδραυλικό Μοντέλο

Το Plaxis για τις υδραυλικές ιδιότητες των υλικών χρησιμοποιεί το υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten. Βασική διαφορά με το RS2 είναι οι εξισώσεις που λύνει οι οποίες είναι με διαφορετικό τρόπο διατυπωμένες. Ο κορεσμός συναρτηθεί της μύζησης δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$S(\psi) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res})[1 + (g_a|\psi|)^{g_n}]^{g_c}$$

Όπου:

$$\psi = -\frac{p_w}{\gamma_w}$$

p_w : Πιέσεις πόρων μύζησης

γ_w : ειδικό βάρος νερού

S_{res} : Παραμένον Βαθμός κορεσμού

S_{sat} : γενικά σε συνθήκες κορεσμού οι πόροι δεν είναι ποτέ πλήρως κορεσμένοι με νερό καθώς παγιδεύεται και αέρας, ο κορεσμός αυτός λέγεται S_{sat} και είναι μικρότερος του 1. Ωστόσο λαμβάνεται από προεπιλογή ίσος με 1.

g_a, g_n, g_c : Παράμετροι υδραυλικού μοντέλου

$$g_c = \frac{1 - g_n}{g_n}$$

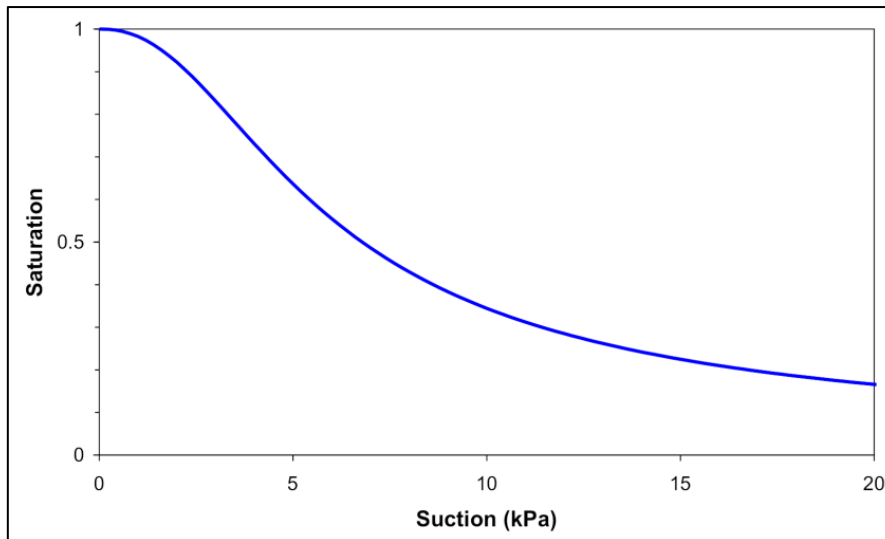
Η σχετική διαπερατότητα σχετίζεται με τον κορεσμό μέσω του ενεργού κορεσμού ο οποίος εκφράζεται μέσω της ακόλουθης σχέσης:

$$S_{eff} = \frac{S - S_{res}}{S_{sat} - S_{res}}$$

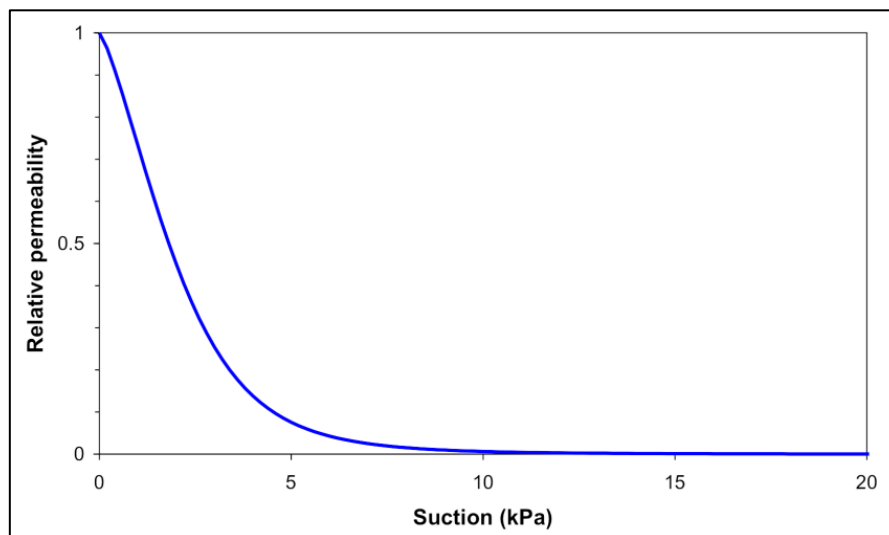
Η σχετική διαπερατότητα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$k_{rel}(S) = \max \left[(S_{eff})^{g_l(1-[1-S_{eff}(\frac{g_n}{g_n-1})]^{(\frac{g_n-1}{g_n})^2})}, 10^{-4} \right]$$

Η σχέση αυτή θέτει ένα κατώτατο όριο που μπορεί να πάρει αυτή η τιμή και είναι το 10^{-4} , άρα να μην γίνει ποτέ 0. Στα ακόλουθα σχήματα παρατηρείται η μεταβολή του κορεσμού και της σχετικής διαπερατότητας με την μύζηση.



Σχήμα 36: Μεταβολή κορεσμού συναρτήσει της μύζησης (Plaxis)



Σχήμα 37: Μεταβολή διαπερατότητας συναρτήσει μύζησης (Plaxis)

A.2.2. Σχεδιασμός Προσομοιώματος

A.2.2.1. Γεωμετρία

Η γεωμετρία του προβλήματος θα είναι ίδια ακριβώς με αυτή του μοντέλου στο λογισμικό RS2, δηλαδή θα αντιστοιχεί σε συνθήκες μονοδιάστατου προσομοιώματος. Το ύψος του μοντέλου είναι 10m και το πλάτος 1m. Τα πεπερασμένα στοιχεία επιλέγονται τριγωνικά 6 κόμβων και ο κάρναβος μέτριας πυκνότητας όπως και στο RS2 έτσι ώστε το μοντέλο να είναι όσο το δυνατό παρεμφερές ώστε να τα αποτελέσματα να μπορούν να αξιολογηθούν με ίδιο μέτρο σύγκρισης.

A.2.2.2. Υδροφόρος Ορίζοντας

Στο Plaxis, αντιθέτως με το RS2 που τον υδροφόρο ορίζοντα μπορείς να το ορίσεις με διαφορετικούς τρόπους, υπάρχει μόνο έν εργαλείο για να ορίσεις τον υδροφόρο, το Create Water Level από το στάδιο Flow Condition. Ο υδροφόρος ορίζεται στα 3m όπως αντίστοιχα και στις αναλύσεις του RS2.

A.2.2.3. Υδραυλικές Παράμετροι

Το υλικό θέλουμε να αντιστοιχεί σε χονδρόκοκκη άμμο υψηλής διαπερατότητας έτσι ώστε να πετύχουμε ολική απορρόφηση του νερό της βροχής που θα προσομοιωθεί. Επιλέγεται υλικό με διαπερατότητα k_s ίση με 0,001m/s. Το λογισμικό δίνει την δυνατότητα να επιλέξουμε σύστημα κατάταξης εδαφών μέσα από ένα εύρος που διαθέτει. Για το συγκεκριμένο προσομοίωμα επιλέγουμε το Hygres το οποίο είναι διεθνώς αποδεκτό. Το κάθε σύστημα κατάταξης συνοδεύεται και από μια βάση δεδομένων εδαφικών υλικών ϵ τις αντίστοιχες παραμέτρους τους για το υδραυλικό μοντέλο Van Genuchten. Ο ακόλουθος πίνακας αντιστοιχεί στο σύστημα κατάταξης Hygres και επιλέγεται για τις αναλύσεις το εδαφικό υλικό Coarse.

Πίνακας 2: Υδραυλικές παράμετροι για μοντέλο Van Genuchten απο Carsel & Parrish (1988)

| Topsoil: | θ_r | θ_s | K_{sat} (m/day) | g_a (1/m) | g_l (-) | g_n (-) |
|-------------|------------|------------|-------------------|-------------|-----------|-----------|
| coarse | 0.025 | 0.403 | 0.6 | 3.83 | 1.25 | 1.3774 |
| medium | 0.01 | 0.439 | 0.121 | 3.14 | -2.3421 | 1.1804 |
| medium fine | 0.01 | 0.43 | 0.0227 | 0.83 | -0.5884 | 1.2539 |
| fine | 0.01 | 0.52 | 0.248 | 3.67 | -1.9772 | 1.1012 |
| very fine | 0.01 | 0.614 | 0.15 | 2.65 | 2.5 | 1.1033 |

Πίνακας 3: Υδραυλικές παράμετροι υλικού

| Παράμετρος | Τιμή |
|--------------------------|--------|
| K_s (m/s) | 0.001 |
| θ_s (m^3/m^3) | 0.403 |
| θ_r (m^3/m^3) | 0.025 |
| g_a | 3.83 |
| g_n | 1.3774 |
| g_l | 1.25 |

A.2.2.4. Βροχή

Η βροχόπτωση στο Plaxis ορίζεται με διάφορους τρόπους είτε με σταθερό ρυθμό είτε και με μεταβαλλόμενο. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται ο σταθερός ρυθμός. Το φαινόμενο της βροχής προσομοιώνεται από το εργαλείο infiltration από το στάδιο Flow Condition και από το εργαλείο Percipitation. Και τα 2 εργαλεία αποδίδουν τα ίδια αποτελέσματα. Ένα βασικό μειονέκτημα του Plaxis είναι ότι υπάρχει ελάχιστο όριο στην ένταση της βροχής και αυτό είναι τα 10^{-6} m/s δηλαδή σε καθημερινούς όρους 3,6mm/h. Επομένως η ένταση που έχουν γίνει οι αναλύσεις στο RS2 στο Plaxis δεν μπορεί να προσομοιωθεί και έτσι επιλέγεται η μικρότερη ένταση που μπορεί να δεχτεί το λογισμικό.

A.2.3. Ανάλυση

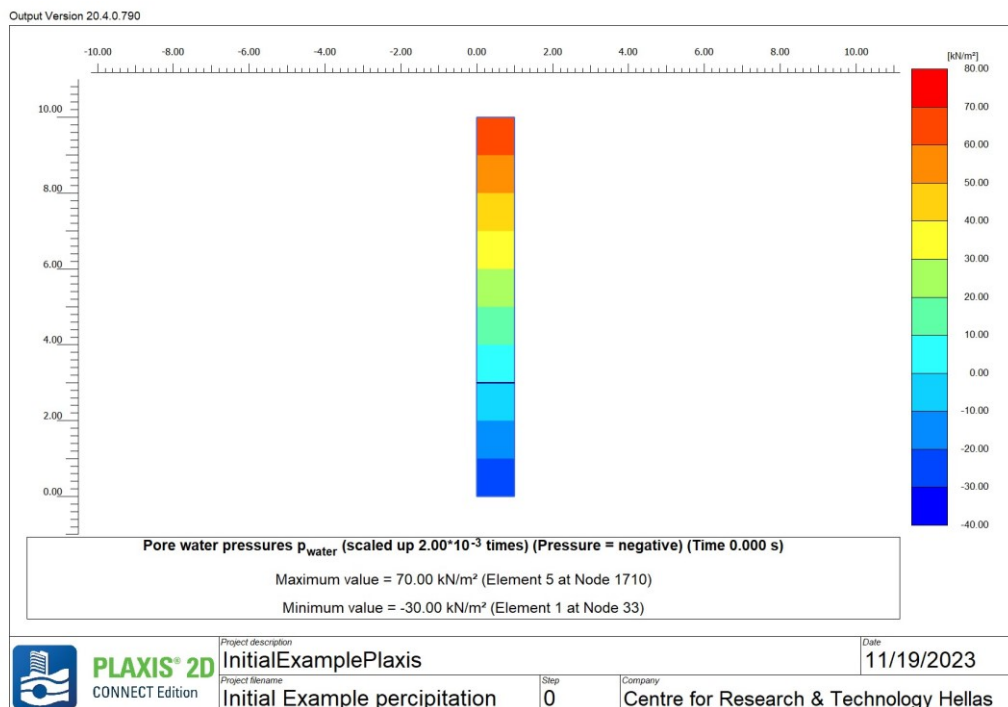
Η ανάλυση αποτελείται από 11 στάδια, 1 αρχικό (Initial) και 10 που αναφέρονται στην βροχή. Στο αρχικό στάδιο ως τρόπος υπολογισμού (Calculation Type) επιλέγεται το Flow Only ενώ ο υπολογισμός των πιέσεων πόρων (Pore Pressure Calculation Type) με τη μέθοδο Steady State Groundwater. Στα υπόλοιπα στάδια της βροχόπτωσης ο υπολογισμός των πιέσεων των πόρων γίνεται με την μέθοδο Transient Groundwater Flow και το κάθε στάδιο έχει διάρκεια 1 ώρας.

Συνοριακές Συνθήκες

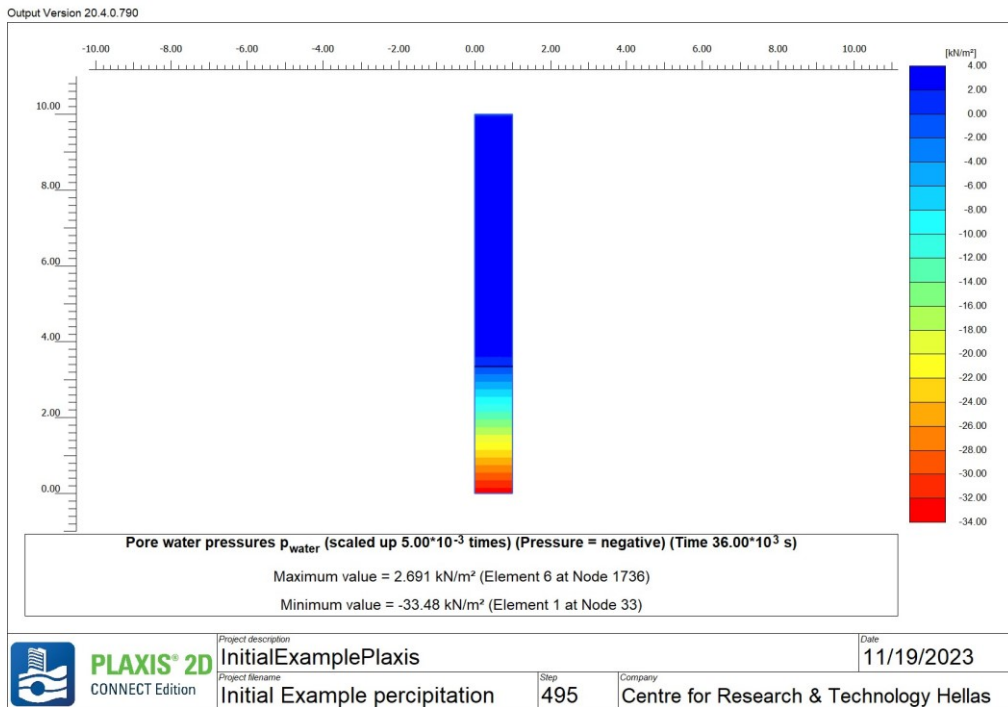
Οι οριακές συνθήκες επιλέγονται να είναι όμοιες με αυτές των αναλύσεων στο λογισμικό RS2. Έτσι τα υδραυλικά όρια επιλέγονται να είναι κλειστά σε όλο το μοντέλο εκτός της επιφάνειας όπου γίνεται η εισροή του νερού της βροχής. Η μέθοδος της αναλύσεις που επιλέγεται δεν υπολογίζει μετακινήσεις επομένως ο περιορισμός αυτό στα όρια του προσομοιώματος δεν είναι απαραίτητο στοιχείο.

Αποτελέσματα

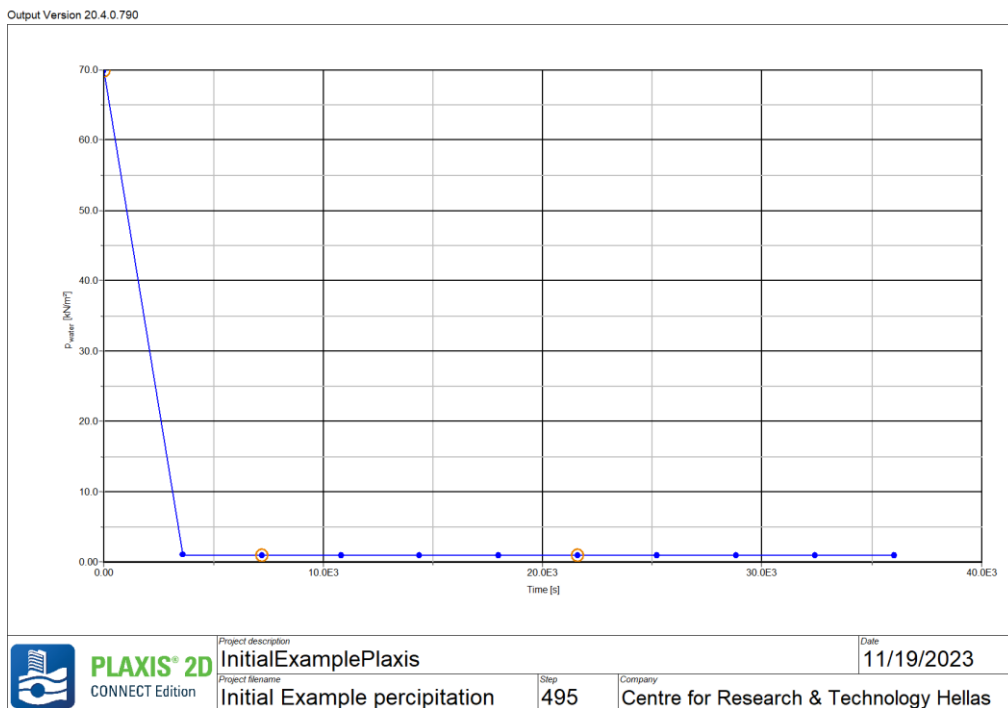
Στα ακόλουθα 2 σχήματα αποτυπώνεται η κατανομή των πιέσεων των πόρων στο εδαφικό προφίλ. Οι πιέσεις έχουν αρνητικό πρόσημο στα αποτελέσματα του λογισμικού Plaxis. Παρατηρείται στην αρχική φάση μία σωστή κατανομή όπως και στο τελικό στάδιο όπου δεν έχει υπάρξει πλήρης κορεσμός στο υλικό και οι πιέσεις δεν είναι σε όλο το ύψος του προσομοιώματος αρνητικές.



Σχήμα 38: Πιέσεις πόρων - Αρχική Φάση

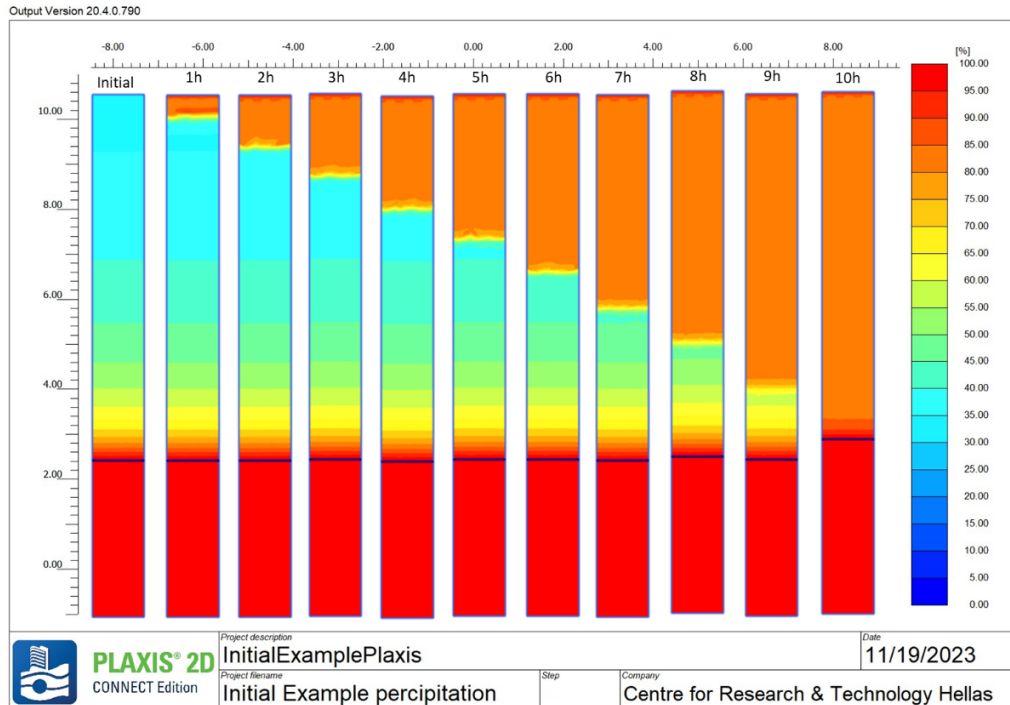


Σχήμα 39: Πιέσεις πόρων - Τελική Φάση

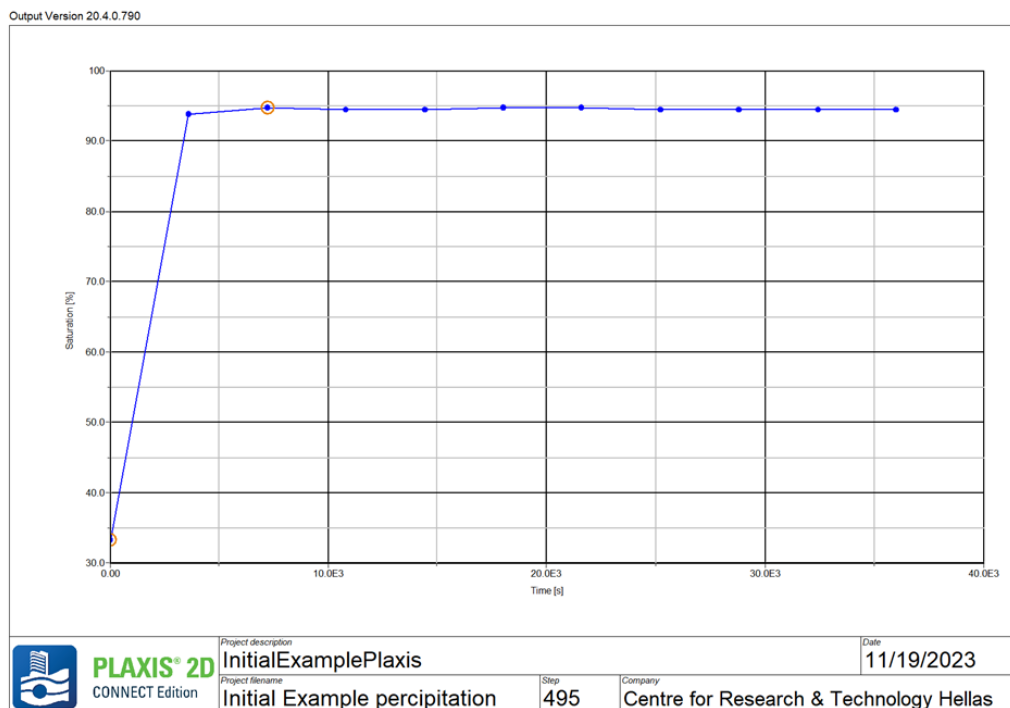


Σχήμα 40: Εξέλιξη πιέσεων πόρων στην επιφάνεια

Στο ακόλουθο σχήμα παρατηρείται ο βαθμός κορεσμού σε όλα τα στάδια της προσομοίωσης.

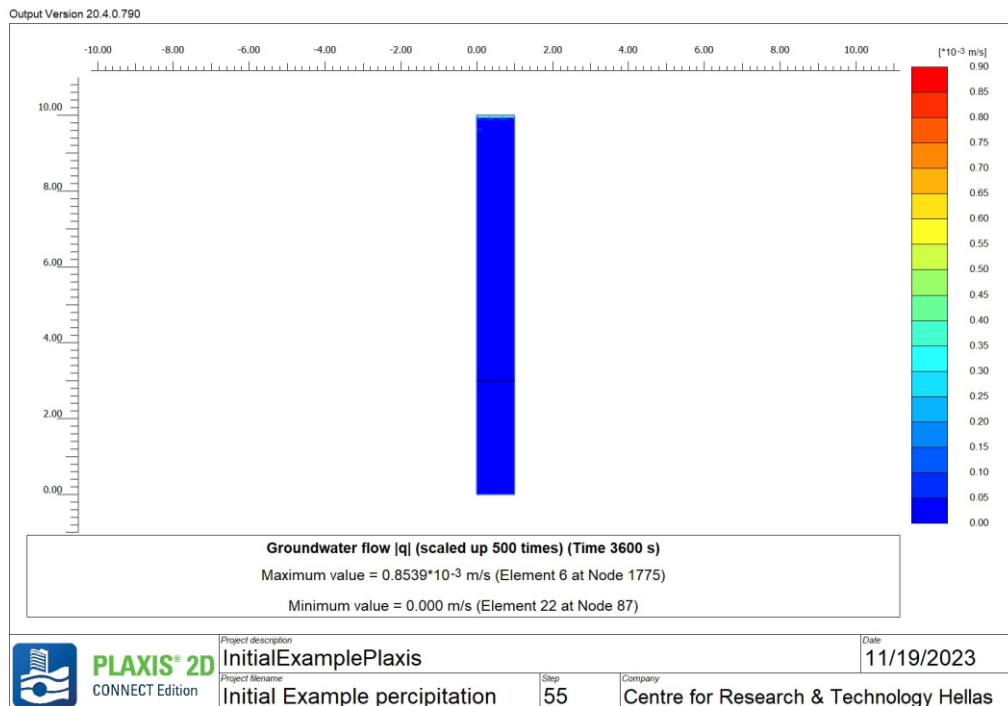


Σχήμα 41: Κορεσμός του εδάφους

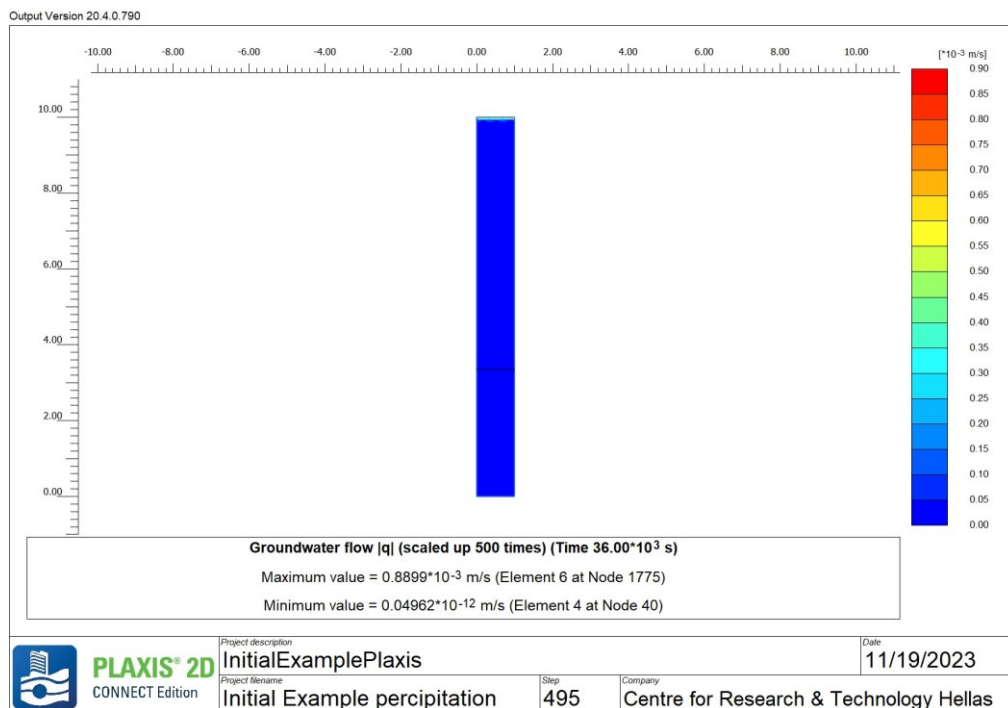


Σχήμα 42: Εξέλιξη κορεσμού στην επιφάνεια

Όσον αφορά τη ροή εντός του προσομοιώματος βλέπουμε ότι αυτή περιορίζεται στην επιφάνεια μόνο και όχι σε όλο το ύψος, τόσο στην αρχή του φαινομένου όσο και στο τέλος. Η ροή τείνει να πλησιάσει την τιμή της διαπερατότητας του υλικού.



Σχήμα 43: Ροή νερού κατά την βροχόπτωση



Σχήμα 44: Ροή νερού - Τελική Φάση.

Συμπεράσματα

Με τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν μελετήθηκαν αρχικά οι τρόποι που μπορεί να προσομοιωθεί το φαινόμενο στο λογισμικό RS2, καθώς οι αρχικές συνθήκες και συγκεκριμένα ο υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς τρόπους. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανάλυση στο λογισμικό Plaxis εφαρμόζοντας τις αντίστοιχες συνθήκες με αυτές στις αναλύσεις του RS2 ώστε να είναι όσο των δυνατών πιο αξιόπιστη η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στην περίπτωση του RS2 παρατηρήθηκε ότι χρησιμοποιώντας την μέθοδο Steady State για τον ορισμό των αρχικών συνθηκών είναι προτιμότερο στα πλαίσια τις συγκεκριμένη διπλωματικής καθώς έχουμε αποτελέσματα όσων αφορά τον κορεσμό του εδάφους τα οποία είναι πολύ σημαντικά. Για τον υδροφόρο ορίζοντα είτε ορίζοντας τον με την συνοριακή συνθήκη Total Head είτε με την συνοριακή συνθήκη Zero pressure δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν. Επομένως ως πιο κατάλληλη ανάλυση από αυτές που πραγματοποιήθηκαν στο RS2 είναι αυτή που οι αρχικές συνθήκες ορίζονται με τη μέθοδο Steady State και ο υδροφόρος ορίζοντας με τη συνοριακή συνθήκη Total Head.

Στη συνέχεια συγκρίθηκε η παραπάνω ανάλυση με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Plaxis. Τα αποτελέσματα ήταν παρεμφερή με κάποιες όμως διαφορές. Κύρια διαφορά ήταν ο τρόπος που φαίνεται να εξελίσσεται ο κορεσμός του υλικού στο έδαφος. Στο Plaxis η ζώνη κορεσμού ξεκινάει από την επιφάνεια και εξελίσσεται προς τα κάτω μέχρις ότου συναντήσει τον υδροφόρο ορίζοντα. Στη συνέχεια παρατηρείται ότι ο υδροφόρος ορίζοντας αρχίζει να ανεβαίνει καθώς το υλικό έρχεται σε πλήρη κορεσμό. Μια ακόμα σημαντική διαφορά είναι ότι στο λογισμικό RS2 έχουμε πλήρη κορεσμό στο υλικό από την 7^η ώρα της βροχόπτωσης ενώ στο Plaxis μέχρι και την 10^η ώρα δεν έχει υπάρξει πλήρης κορεσμός του υλικού παρόλο που η βροχή είναι μικρότερης έντασης λόγω περιορισμού. Επίσης ένα ακόμα μειονέκτημα του Plaxis όσον αφορά τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν είναι ότι δεν μας δίνει πληροφορίες για τη ροή του νερού μέσα στο έδαφος αλλά μόνο στην επιφάνεια.

Τελικώς επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθεί το λογισμικό RS2 καθώς παρουσιάζει μεγαλύτερη ευκολία για το χρήστη, δίνει περισσότερες επιλογές για την περαιτέρω διερεύνηση της μη κορεσμένης ζώνης και μερικές καλύτερες δυνατότητες στον τρόπο μέτρησης των παραμέτρων που εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία.