



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΧΩΡΙΚΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΟΔΕΥΣΗΣ
TOTAL RUNOFF INTEGRATING PATHWAYS (TRIP) ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΜΕΝΗ ΔΙΟΔΕΥΣΗ
ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΚΛΙΜΑΚΑ

του

Αθανάσιου Τσιλιμίγκρα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υποβλήθηκε στη Σχολή
Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος
του Πολυτεχνείου Κρήτης
Για το Δίπλωμα Μηχανικού Περιβάλλοντος

Υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή Αριστείδη Κουτρούλη

Επιτροπή

Αριστείδης Κουτρούλης, Αναπληρωτής Καθηγητής, TUC
Απόστολος Βουλγαράκης, Αναπληρωτής Καθηγητής, TUC
Εμμανουήλ Γρυλλάκης, Ph.D., TUC

Copyright ©TUC, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα και των επιβλεπόντων καθηγητών. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεών του (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright ©TUC, 2022

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission either from the author or the supervisor(s). Reproducing, storing, and distributing this thesis for non-profitable, educational, or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and inclusion of the present text. Any queries concerning the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Chemical and Environmental Engineering of the Technical University of Crete (TUC) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the aforementioned academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

Περίληψη

Τα παγκόσμια μοντέλα χερσαίων διεργασιών (Land Surface Models), προσομοιώνουν διάφορες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του εδάφους, σχετικές με το ισοζύγιο ενέργειας, τον υδρολογικό κύκλο, τον κύκλο του άνθρακα κ.ά. Έχουν αναπτυχθεί για μία πληθώρα εφαρμογών, μεταξύ αυτών η αξιολόγηση του αντίκτυπου της αλλαγής μιας συγκεκριμένης διαδικασίας στο συνολικό οικοσύστημα, π.χ. του αντίκτυπου της κλιματικής αλλαγής στην υδρολογία και της μελέτης πιθανών αλληλεπιδράσεων.

Λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητάς τους, η εξέλιξη αυτών των μοντέλων είναι μια διαρκής και εργώδης διαδικασία, όπως για παράδειγμα η περίπτωση του μοντέλου JULES (Joint UK Land Environment Simulator), που αναπτύχθηκε και εξελίσσεται από μια ευρεία κοινότητα ερευνητών. Είναι γεγονός, ότι παρόλο το υψηλό επίπεδο εξέλιξης του μοντέλου, ορισμένες διεργασίες αντιμετωπίζουν φειδωλή παραμετροποίηση. Μία από αυτές τις διεργασίες είναι η διόδευση της επιφανειακής απορροής, όπως αυτή προσομοιώνεται από το υπό-σύστημα TRIP (Total Runoff Integrating Pathways). Στην παγκόσμιας κλίμακας παραμετροποίησή του το TRIP χρησιμοποιεί ενιαία χαρακτηριστικά ταχύτητας απορροής και μαιανδρισμού για όλη τη χερσαία επιφάνεια της γης, ανεξαρτήτως των πραγματικών φυσιογραφικών ιδιοτήτων κάθε περιοχής.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η βελτίωση της διόδευσης της επιφανειακής απορροής, μέσω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων ταχύτητας ροής και συντελεστή μαιανδρισμού, σε ένα δείγμα 360 λεκανών απορροής, και η έπειτα συσχέτιση αυτών με φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε λεκάνης, με στόχο τη δυνατότητα γενίκευσης σε παγκόσμια κλίμακα. Τα δεδομένα που υποστήριξαν την ανάπτυξη της μεθοδολογίας βελτιστοποίησης ήταν καταγεγραμμένες παροχές από την παγκόσμια βάση GRDC και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του HydroATLAS.

Ένα παραγοντικό πείραμα εκτελέστηκε, μελετώντας συνδυαστικά είκοσι τιμές ταχύτητας ροής και δώδεκα συντελεστές μαιανδρισμού, καταλήγοντας σε 198 προσομοιώσεις. Ο δείκτης Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των παροχών του μοντέλου για κάθε σετ παραμέτρων διόδευσης. Αναπτύχθηκαν δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης, με την πρώτη να επιλέγει το σετ με την καλύτερη βελτίωση του NSE σε σχέση με την απόκλιση των παραμέτρων από τις προκαθορισμένες, και τη δεύτερη να αναθέτει ενιαία τιμή παραμέτρων βάσει κατηγοριοποίησης των λεκανών. Στη συνέχεια, με τη χρήση ενός νευρωνικού δικτύου προσαρμογής και ενός κατηγοριοποίησης, για κάθε μέθοδο αντίστοιχα, συσχετίστηκαν οι βέλτιστοι παράμετροι διόδευσης με φυσιογραφικά χαρακτηριστικά κάθε λεκάνης. Τα εκπαιδευμένα νευρωνικά δίκτυα, εφαρμόστηκαν στις λεκάνες απορροής του HydroATLAS για την παρέκταση της εκάστοτε μεθόδου σε παγκόσμια κλίμακα.

Τα χωρικά κατανεμημένα βέλτιστα σετ παραμέτρων διόδευσης, από κάθε μέθοδο, είναι διαθέσιμα για εισαγωγή στο υπό-σύστημα TRIP, προσφέροντας τη δυνατότητα βελτιωμένης διόδευσης της παγκόσμιας απορροής, καθώς και της συνολικής αναπαράστασης του υδρολογικού κύκλου του JULES.

Abstract

Land Surface Models (LSMs) simulate various processes of the terrestrial land surface related to the energy balance, the hydrological cycle, the carbon cycle, etc. LSMs have been developed for a variety of applications, including assessing the impact of modifying a particular process on the ecosystem as a whole, e.g., the impact of climate change on hydrology, and studying potential feedback.

Due to their great complexity, the development of these models is a continuous and laborious process. For example, the JULES (Joint UK Land Environment Simulator) model is developed by a broad community of inter-disciplinary researchers. It is a fact that despite the high level of model development, some processes face parsimonious parameterization. One of these processes is the routing of surface runoff as simulated by the TRIP (Total Runoff Integrating Pathways) scheme. In its current global parameterization, TRIP uses uniform velocity and meandering characteristics for the entire land surface regardless of the actual physiographic characteristics of each river basin.

This work aims to improve the routing of the surface runoff through the optimization of the effective velocity and meandering ratio parameters. In a sample of 360 global river basins, these parameters are correlated with physiographic characteristics to derive a method of extrapolation at the global scale. The development and application of the method were based on observed river discharge from the global GRDC database and basin-scale physiographic attributes from the HydroATLAS database.

A factorial experiment was performed from a combination of 20 setups of effective velocity values and 12 meandering ratios, resulting in a total of 198 simulations. The Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) was employed to assess the model performance for each set of routing parameters. Two optimization methods were developed; in the first method, the optimum routing parameters are defined for the best NSE improvement with the least deviation from the default routing parameters, whereas in the second method a uniform parameter set was assigned based on a categorization of the basins. Neural Networks were used for regression and classification, respectively for each method, correlating the optimal routing parameters with physiographic attributes at the river basin scale. The trained neural networks were applied to the HydroATLAS attributes to extrapolate the routing parameters at the global scale.

The spatially distributed optimal routing parameters from each method are available as input into the TRIP scheme, enabling the improved routing of the global runoff and the overall representation of the hydrological cycle in the JULES model.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κουτρούλη Αριστείδη. Τον ευχαριστώ, που με εισήγαγε στο ενδιαφέρον αυτό θέμα, και για τις αναρίθμητες ώρες που μου αφιέρωσε. Οι συμβουλές και η στήριξη του ήταν πολύτιμες για εμένα.

Είμαι, επίσης, εξαιρετικά ευγνώμων για τη συμβολή του κ. Γρυλλάκη Εμμανουήλ, του οποίου η βοήθεια ήταν καθοριστική καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας μου. Με βοήθησε να ξεπεράσω συνεχόμενα εμπόδια και βρισκόταν εκεί για εμένα κάθε φορά που τον χρειαζόμουν.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Βουλγαράκη Απόστολο, ο οποίος διετέλεσε μέλος της τριμελούς επιτροπής μου, και αφιέρωσε χρόνο για την αξιολόγηση της εργασίας μου και παρείχε εποικοδομητικά σχόλια.

Ευχαριστώ τον κ. Σειραδάκη Κωνσταντίνο για τη στήριξη και έγνοια του σε τεχνικά και μη θέματα, καθώς και την κα. Σαρχάνη Σοφία για τις γόνιμες παρατηρήσεις της.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον φίλο μου Λάμπη, ο οποίος με φιλοξένησε 3 ολόκληρους μήνες στο σπίτι του, επιτρέποντάς μου να ολοκληρώσω τη διπλωματική μου εργασία από τα Χανιά.

Δε θα μπορούσα να τα είχα καταφέρει χωρίς την κοπέλα μου, Χριστίνα, η οποία έδειξε απaráμιλλη υπομονή όλα αυτά τα χρόνια και με στήριζε σε κάθε στάδιο της πορείας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένεια μου. Οι λέξεις δεν μπορούν να περιγράψουν πόσο ευγνώμων είμαι για τον πατέρα μου Τάσο, τη μητέρα μου Βασιλική και τον αδερφό μου Σταύρο, για όλες τις θυσίες που έχουν κάνει για εμένα. Με μεγάλωσαν, με στήριξαν και βρίσκονταν πάντα δίπλα μου. Χωρίς αυτούς δε θα ολοκλήρωνα αυτό το ταξίδι.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	1
1.1 Πεδίο έρευνας	1
1.2 Δομή εργασίας	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό Υπόβαθρο	3
2.1 Ο υδρολογικός κύκλος και η προσομοίωση της απορροής σε παγκόσμια κλίμακα	3
2.2 Μοντέλα προσομοίωσης των χερσαίων διεργασιών (LSMs)	4
2.3 Το μοντέλο The Joint UK Land Environment Simulator (JULES)	6
2.3.1 Δείκτες αξιολόγησης υδρολογικής προσομοίωσης	8
2.4 Προσομοίωση της διόδευσης της απορροής	9
2.5 Το σύστημα διόδευσης Total Runoff Integrating Pathways (TRIP).....	10
2.5.1 Παράμετροι του συστήματος διόδευσης TRIP	12
2.6 Νευρωνικά δίκτυα.....	13
2.6.1 Μοντέλο τεχνητού νευρώνα – Συναρτήσεις ενεργοποίησης.....	14
2.6.2 Εκπαίδευση – Επικύρωση – Δοκιμή.....	16
2.6.3 Αρχιτεκτονικές ANN.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Υδρολογικές λεκάνες μελέτης και δεδομένα	19
3.1 Ανάλυση σε επίπεδο λεκάνης απορροής.....	19
3.2 Δεδομένα	21
3.2.1 Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά λεκανών απορροής	21
3.2.2 Μετεωρολογικές μεταβλητές.....	23
3.2.3 Δεδομένα παροχής GRDC	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μεθοδολογία.....	25
4.1 Παραγοντικό πείραμα – 198 εκτελέσεις προσομοίωσης JULES.....	27
4.2 Δείκτες αξιολόγησης υδρολογικών προσομοιώσεων	27
4.3 Μεταβολή Επίδοσης (NSE) – Ταχύτητας (u) – Συντελεστή μαιανδρισμού (r_m)	28
4.3.1 Μέθοδος Α – Βέλτιστες παράμετροι διόδευσης.....	28
4.3.2 Μέθοδος Β – Ανάθεση τύπου λεκάνης	29
4.4 Συσχέτιση υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών με χρήση ANN.....	31
4.4.1 Νευρωνικό δίκτυο προσαρμογής – Μέθοδος Α (OPT)	31
4.4.2 Νευρωνικό δίκτυο κατηγοριοποίησης – Μέθοδος Β (SLP)	32
4.5 Παρέκταση σε παγκόσμια κλίμακα	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Αποτελέσματα και συζήτηση.....	35
5.1 Μέγιστη θεωρητική βελτίωση (NSE).....	35
5.2 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης.....	39
5.2.1 Μέθοδος Α – Εξίσωση OPT.....	39
5.2.2 Μέθοδος Β – Ανάθεση τύπου SLP	41
5.3 Εκπαίδευση – Επικύρωση και Δοκιμή ANN.....	43
5.3.1 Απόδοση ANN προσαρμογής - Μέθοδος Α (OPT)	44
5.3.2 Απόδοση ANN κατηγοριοποίησης - Μέθοδος Β (SLP)	47
5.4 Σύγκριση Μεθόδων.....	49
5.5 Βέλτιστες παράμετροι διόδευσης σε παγκόσμια κλίμακα	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα.....	57
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	61
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	69

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Ο υδρολογικός κύκλος (διασκευή από ESA - The Earth's water cycle).....	4
Σχήμα 2.2. Τυπική δομή συστήματος αφομοίωσης δεδομένων χερσαίων διεργασιών.....	5
Σχήμα 2.3. Η εξέλιξη της μοντελοποίησης των χερσαίων διεργασιών μέσα στα χρόνια, απεικονίζοντας κατά προσέγγιση τη χρονική στιγμή εμφάνισης διαφορών παραμέτρων, καθώς και την αύξηση της πολυπλοκότητας με την πάροδο των χρόνων (διασκευή από Fisher et al., 2020).....	6
Σχήμα 2.4. Γραφική απεικόνιση των κύριων δομοστοιχείων και διασυνδέσεων του μοντέλου JULES (αριστερά; διασκευασμένο από Best et al., 2011) και αναπαράσταση ενός τυπικού κελιού του JULES με εννέα τύπους επιφάνειας και τα υποκείμενα εδαφικά στρώματα (δεξιά).....	7
Σχήμα 2.5. Προκαθορισμένη κατεύθυνση ποτάμιας ροής κελιών σε ανάλυση $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ στον Αμαζόνιο, όπου 1:B, 2:BA, 3:A, 4:NA, 5:N, 6:ND, 7:Δ, 8:BD και 9:εκβολή ποταμού (αριστερά). Επισήμανση της αλληλουχίας ποτάμιας ροής κελιών σε ανάλυση $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ στον Αμαζόνιο (δεξιά). (Πηγή: Oki et al., 1999)	10
Σχήμα 2.6. Απεικόνιση του δικτύου διόδευσης του συστήματος TRIP για την Ευρώπη σε πλέγμα $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Οι έντονες γραμμές ισοδυναμούν την αύξηση της αλληλουχίας της ροής των κελιών. (Πηγή: Saruhashi, 2001).....	11
Σχήμα 2.7. Μήκη των κύριων ποταμών του TRIP σε σχέση με βιβλιογραφικές τιμές (αριστερά). Η εξάρτηση του r_m από την έκταση της λεκάνης (δεξιά). (Πηγή: Oki et al., 1998).....	13
Σχήμα 2.8. Τυπική δομή ενός νευρωνικού δικτύου	14
Σχήμα 2.9. Τυπικός τεχνητός νευρώνας	15
Σχήμα 2.10. Κύριες συναρτήσεις ενεργοποίησης	15
Σχήμα 3.1. Κατανομή των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών	22
Σχήμα 4.1. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε	26
Σχήμα 4.2. 198 σετ παραμέτρων διόδευσης (αριστερά) παραγοντικού πειράματος και η αντίστοιχη τιμή του συντελεστή c (δεξιά).....	27
Σχήμα 4.3. Γραφική αναπαράσταση της εξίσωσης επιλογής βέλτιστων παραμέτρων OPT	29
Σχήμα 4.4. Ενδεικτικά γραφήματα μεταβολής NSE_{10} για τους δύο τύπους λεκανών SS και SF	30
Σχήμα 4.5. Αρχιτεκτονική ANN προσαρμογής fitnet	31
Σχήμα 4.6. Αρχιτεκτονική ANN κατηγοριοποίησης patternnet.....	32
Σχήμα 5.1. Κατανομή NSE_{10} προκαθορισμένου και καθολικά βέλτιστου σετ παραμέτρων διόδευσης	38
Σχήμα 5.2. Κατανομή NSE_{10} προκαθορισμένου, μεθόδου A και καθολικά βέλτιστου σετ παραμέτρων διόδευσης	41

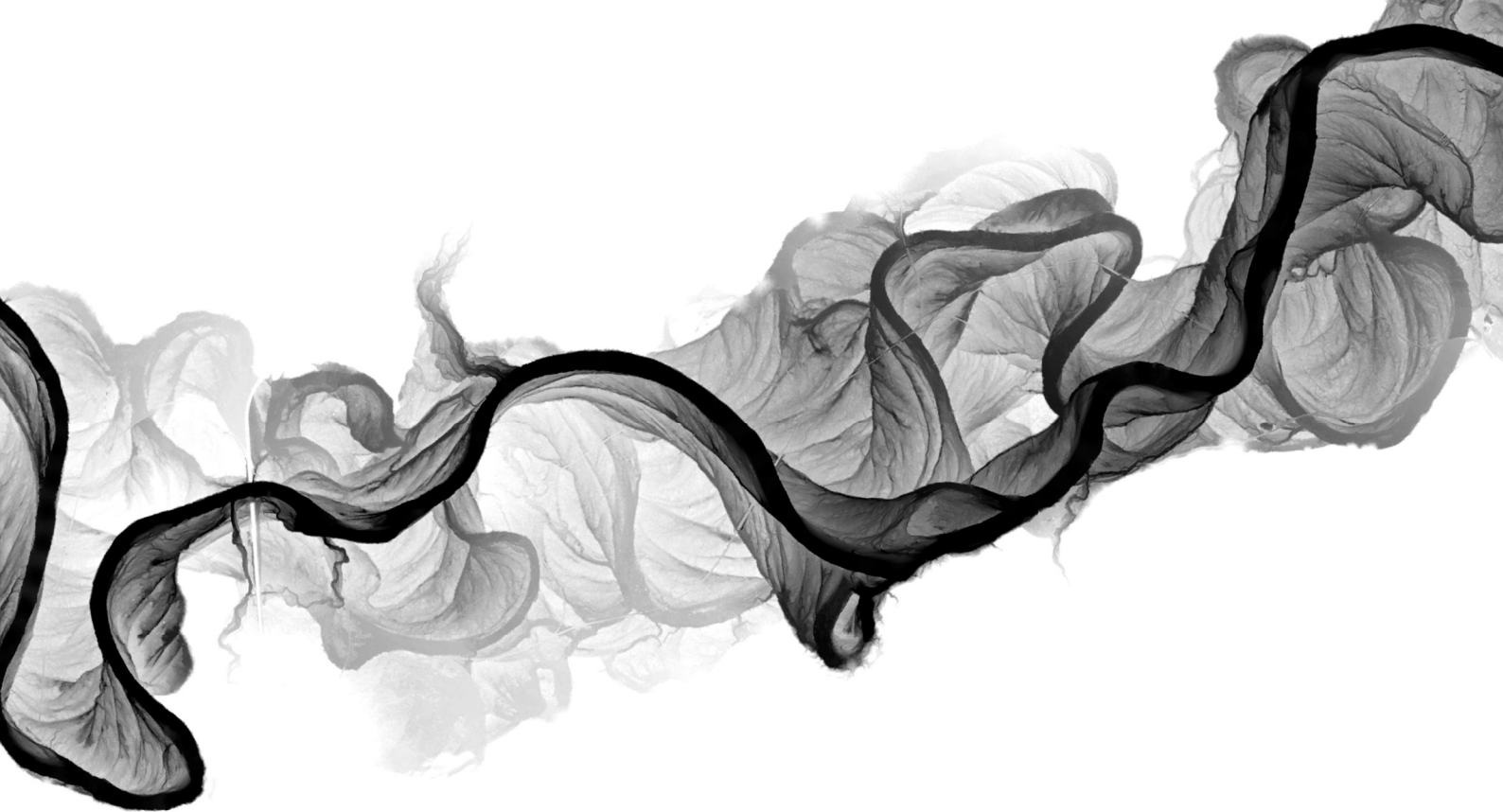
Σχήμα 5.3. Κατανομή καθολικά βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού και ταχύτητας ροής με βάση την κατηγοριοποίηση των λεκανών της μεθόδου B	42
Σχήμα 5.4. Θηκογράμματα κατανομής φυσιογραφικών χαρακτηριστικών μεταξύ των 360 λεκανών GRDC, 1321 λεκανών HydroATLAS και 89 λεκανών GRDC δοκιμής.....	44
Σχήμα 5.5. Προγνωστική ικανότητα ANN προσαρμογής για το δείγμα λεκανών δοκιμής και του συνόλου των λεκανών μελέτης.....	45
Σχήμα 5.6. Σχετική σπουδαιότητα φυσιογραφικών χαρακτηριστικών για το ANN προσαρμογής .	46
Σχήμα 5.7. Προγνωστική ικανότητα ANN κατηγοριοποίησης για το δείγμα λεκανών δοκιμής και του συνόλου των λεκανών μελέτης.....	47
Σχήμα 5.8. Σχετική σπουδαιότητα φυσιογραφικών χαρακτηριστικών για το ANN κατηγοριοποίησης	48
Σχήμα 5.9. Σύγκριση της κατανομής του NSE_{10} βάσει του τύπου της λεκάνης για τα στάδια πριν και μετά του ANN	49

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1. Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά λεκανών μελέτης	22
Πίνακας 3.2. Μετεωρολογικές μεταβλητές εισόδου του μοντέλου JULES	23

Κατάλογος Χαρτών

Χάρτης 3.1. Λεκάνες απορροής GRDC και HydroATLAS	20
Χάρτης 3.2. Χωρική κατανομή φυσιογραφικών χαρακτηριστικών μελέτης σε παγκόσμια κλίμακα	21
Χάρτης 5.1. Απόδοση NSE_{10} των λεκανών μελέτης για τις προκαθορισμένες παραμέτρους διόδευσης (α), για τις καθολικά βέλτιστες παραμέτρους (β), και η διαφορά τους, υποδηλώνοντας τη μέγιστη βελτίωση (γ)	36
Χάρτης 5.2. Χωρική κατανομή καθολικά βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού (α) και καθολικά βέλτιστης ταχύτητας ροής (β)	37
Χάρτης 5.3. Σχετική βελτίωση του NSE_{10} των λεκανών μελέτης σε σχέση με το καθολικά βέλτιστο NSE_{10}	38
Χάρτης 5.4. Απόδοση NSE_{10} των λεκανών μελέτης για τη μέθοδο A (OPT)	39
Χάρτης 5.5. Βελτίωση NSE_{10} των λεκανών μελέτης για τις βέλτιστες παραμέτρους (α), κατανομή βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού (β), κατανομή βέλτιστης ταχύτητας ροής (γ), για τη μέθοδο A (OPT)	40
Χάρτης 5.6. Ανάθεση τύπου λεκάνης (SS,SF) και αντίστοιχο σετ παραμέτρων διόδευσης για κάθε τύπο	41
Χάρτης 5.7. NSE_{10} που έχει επιτευχθεί με τη μέθοδο B (α), και η βελτίωσή του σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων (β)	42
Χάρτης 5.8. Απεικόνιση των λεκανών απορροής που δεν συμμετείχαν στην ανάπτυξη του ANN λόγω αρνητικού NSE_{10} , των λεκανών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και επικύρωση του ANN, και των λεκανών οι που συντέλεσαν στη δοκιμή του ANN.	43
Χάρτης 5.9. NSE_{10} που έχει επιτευχθεί με το ANN προσαρμογής της μεθόδου A (OPT) (α), και η βελτίωσή του σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων (β)	46
Χάρτης 5.10. NSE_{10} που έχει επιτευχθεί με το ANN κατηγοριοποίησης της μεθόδου B (SLP) (α), και η βελτίωσή τους σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων (β)	48
Χάρτης 5.11. Σύγκριση βελτίωσης μεθόδων στο στάδιο της βελτιστοποίησης (α), και μετά την συσχέτιση με φυσιογραφικά χαρακτηριστικά μέσω ANN (β)	50
Χάρτης 5.12. Παρέκταση βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού (α), και βέλτιστης ταχύτητας ροής (β), βάσει της μεθόδου A (OPT) σε παγκόσμια κλίμακα	52
Χάρτης 5.13. Παρέκταση τύπου λεκάνης βέλτιστων παραμέτρων, βάσει της μεθόδου B (SLP), σε παγκόσμια κλίμακα	53
Χάρτης 5.14. Βέλτιστος συντελεστής μαιανδρισμού (OPT) σε χωρική ανάλυση $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$	54
Χάρτης 5.15. Βέλτιστη ταχύτητα ροής (OPT) σε χωρική ανάλυση $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$	55
Χάρτης 5.16. Βέλτιστες παράμετροι διόδευσης (SLP) σε χωρική ανάλυση $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$	56



1

Εισαγωγή

1.1 Πεδίο έρευνας

Με τον αυξανόμενο πληθυσμό της Γης και τις προβλεπόμενες αλλαγές στο παγκόσμιο κλίμα, η πίεση στους υδάτινους πόρους αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια (He et al., 2021). Αυτό έχει δημιουργήσει την ανάγκη για μία αξιόπιστη αξιολόγηση του αντίκτυπου που θα έχουν στους υδάτινους πόρους οι πιθανές μελλοντικές αλλαγές στη διαχείριση και το κλίμα. Η πραγματοποίηση τέτοιων προβλέψεων αποτελεί πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα και μπορεί να επωφεληθεί από συλλογικές δράσεις ανάπτυξης, τεκμηρίωσης και βελτίωσης εξειδικευμένων μοντέλων. Σε αυτό το πλαίσιο, πρωτοβουλίες όπως λ.χ. το πρόγραμμα Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) συμβάλλουν σε μια ολοκληρωμένη και αξιόπιστη εικόνα του κόσμου κάτω από διαφορετικά σενάρια κοινωνικο-οικονομικής και κλιματικής αλλαγής, με τη χρήση πληθώρας μοντέλων. Ένα από αυτά τα μοντέλα είναι το μοντέλο εδαφικών διεργασιών JULES, που συνεισφέρει με παγκόσμιας κλίμακας υδρολογικές προσομοιώσεις για τη μελέτη των επιπτώσεων στους υδάτινους πόρους. Η ικανότητα του μοντέλου για ρεαλιστική αναπαράσταση της παγκόσμιας παροχής είναι συγκρίσιμη με αντίστοιχα μοντέλα, αλλά υποδεέστερη σε ορισμένες περιπτώσεις λόγω των περιορισμών που θέτει η φειδωλή παραμετροποίηση κάποιων φυσικών διεργασιών, όπως η διόδευση της επιφανειακής απορροής (Gädeke et al., 2020). Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η βελτίωση της ικανότητας του μοντέλου προς αυτή την κατεύθυνση.

*Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), από δεδομένα Lidar, του ποταμού Sol Duc River, Ποτάμια τροπικού δάσους, Ολυμπιακή Ακτή. Πηγή: *Daniel Coe (2022)*

1.2 Δομή εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τα ακόλουθα κεφάλαια:

- Στο Κεφάλαιο 2 παρέχεται το θεωρητικό υπόβαθρο σε βασικές έννοιες της συγκεκριμένης εργασίας, όπως τα μοντέλα εδαφικών διεργασιών (Land Surface Models, LSMs), τα συστήματα διόδευσης της απορροής και τα Νευρωνικά Δίκτυα. Περιγράφεται η βασική δομή του LSM μοντέλου The Joint UK Land Environment Simulator (JULES) από υδρολογική σκοπιά, ενώ επίσης η προσοχή εφιστάται στο σύστημα διόδευσης TRIP και τις κύριες παραμέτρους που συντελούν στη διόδευση.
- Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στις υδρολογικές λεκάνες που επιλέχθηκαν για τη μελέτη, ενώ παρουσιάζεται το σύνολο των διαφορετικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας.
- Στο Κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται η ανάπτυξη της μεθοδολογίας με σκοπό αρχικά την βελτιστοποίηση των παραμέτρων διόδευσης και την συσχέτισή τους με φυσιογραφικές μεταβλητές, με απώτερο σκοπό την παρέκτασή τους σε παγκόσμια κλίμακα.
- Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Για κάθε μέθοδο δίνονται χάρτες, όπου απεικονίζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης και συσχέτισης, καθώς και η σύγκριση τους.
- Στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας και παρατίθενται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.



Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Ο υδρολογικός κύκλος και η προσομοίωση της απορροής σε παγκόσμια κλίμακα

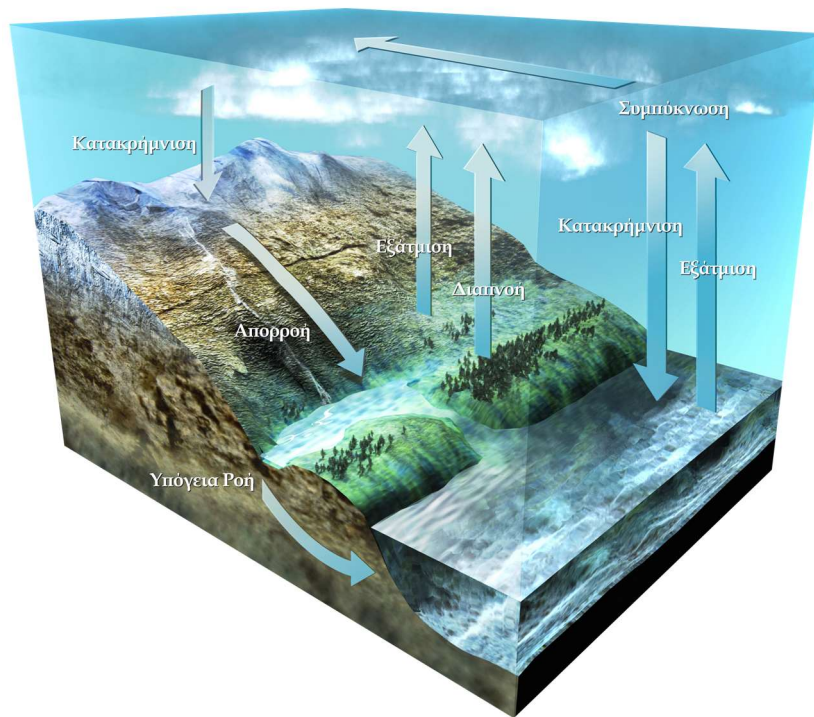
Ο συνολικός όγκος νερού στην επιφάνεια της Γης εκτιμάται κατά προσέγγιση στα $1.39 \times 10^{18} \text{ m}^3$, που αναλογεί σε μία μάζα $1.39 \times 10^{18} \text{ kg}$. Δεδομένης της συνολικής μάζας της Γης ($5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$), το νερό αποτελεί μόνο το 0.02% του πλανήτη, παρόλα αυτά ο πλανήτης μας είναι γνωστός ως «Ο Μπλε Πλανήτη» καθώς το νερό είναι αναγκαίο για τη ζωή. Περίπου το 70% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από το αλμυρό νερό των ωκεανών. Μέρος της υπόλοιπης επιφάνειας καλύπτεται από γλυκό νερό (λίμνες και ποτάμια), στερεό νερό (πάγος και χιόνι), καθώς και «πράσινο» νερό που βρίσκεται στην παγκόσμια χλωρίδα. Παρόλο που η περιεκτικότητα σε νερό της ατμόσφαιρας είναι μικρή (περίπου 0.3% κατά μάζα), περίπου το 60% της Γης καλύπτεται από σύννεφα.

Ο υδρολογικός κύκλος ανακυκλώνει συνεχώς το νερό μέσω των διεργασιών της κατακρήμνισης, της απορροής, επιφανειακής και υπόγειας, της εξάτμισης, της διαπνοής και της συμπύκνωσης (Σχήμα 2.1). Αυτές οι διεργασίες συνδέουν άρρηκτα την επιφάνεια της Γης, με την ατμόσφαιρα και τους ωκεανούς, μέσω της μεταφοράς νερού, ενέργειας και μάζας.

Η μελέτη του παγκόσμιου υδρολογικού κύκλου περιλαμβάνει τόσο την παρατήρηση όσο και την προσομοίωση των συνιστωσών του, συμπεριλαμβανομένης της επιφανειακής απορροής. Η προσομοίωση γίνεται με την ανάπτυξη και εφαρμογή παγκόσμιων βιοφυσικών μοντέλων ποικίλης

*Απεικόνιση του ποταμού Willamette, από δεδομένα Lidar. Πηγή: *Daniel Coe (2021)*

πολυπλοκότητας. Η μοντελοποίηση της απορροής περιλαμβάνει δύο βασικές συνιστώσες: 1) την προσομοίωση της χερσαίας επιφάνειας, στην οποία υπολογίζεται το κατακόρυφο υδατικό ισοζύγιο, προσομοιώνοντας διεργασίες που λαμβάνουν μέρος στην επιφάνεια της Γης και στην ατμόσφαιρα, όπως η κατακρήμνιση, η εξατμισοδιαπνοή, κ.ά., και παράγει χωρο-χρονικές τάσεις της απορροής· 2) τη διόδευση της επιφανειακής απορροής, συσσωρεύοντας την υπολογισμένη απορροή κατάντη, κατά μήκος και πλάτος της επιφάνειας της Γης, εκτιμώντας έτσι τη ροή των ποταμών.



Σχήμα 2.1. Ο υδρολογικός κύκλος (διασκευή από ESA - The Earth's water cycle)

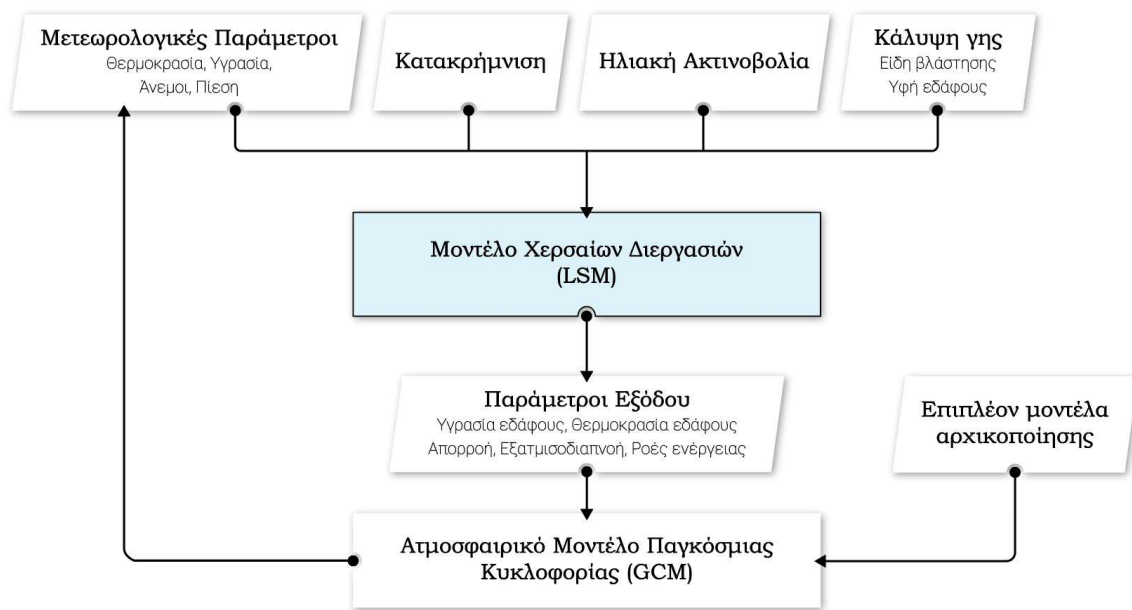
Η μοντελοποίηση των φυσικών αυτών διεργασιών γίνεται σε παγκόσμια κλίμακα, από τα μοντέλα χερσαίων διεργασιών (Land Surface Models, LSMs), χρησιμοποιώντας κελιά πλέγματος (grid boxes) ως μονάδα μοντελοποίησης σε διαφορετικά επίπεδα χωρικής ανάλυσης, συνήθως 0.5×0.5 μοίρες γεωγραφικού πλάτους/μήκους ή και ακόμα πιο αδρομερή. Η ανάπτυξη μοντέλων αυτού του τύπου, και συγκεκριμένα η προσομοίωση της απορροής, αποτέλεσε μια καλή πρακτική αξιολόγησης των αποτελεσμάτων κλιματικών μοντέλων (Russell et al., 1990).

2.2 Μοντέλα προσομοίωσης των χερσαίων διεργασιών (LSMs)

Οι παγκόσμιοι υδάτινοι πόροι αξιολογούνται συνήθως με παγκόσμια υδρολογικά μοντέλα (Global Hydrological Models, GHMs), ενώ η αλληλεπίδραση μεταξύ του επίγειου υδρολογικού κύκλου και της ατμόσφαιρας μελετάται συνήθως με μοντέλα χερσαίων διεργασιών (Land Surface Models, LSMs). Οι δύο αυτές προσεγγίσεις διαφέρουν ως προς την πολυπλοκότητα και την παραμετροποίηση της επιφάνειας της γης. Τα GHMs είναι συνήθως απλούστερα από τα LSMs,

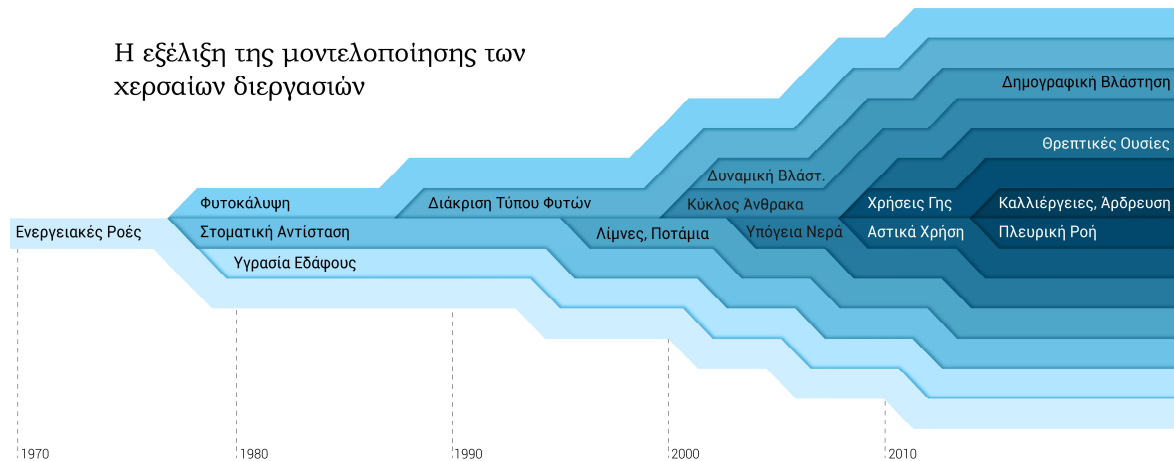
απαιτώντας λιγότερα δεδομένα εισόδου και υπολογιστικούς πόρους. Ωστόσο, η ασθενέστερη φυσική βάση των διεργασιών, π.χ. η απουσία βιοφυσικών διεργασιών όπως η υδρολογική απόκριση της βλάστησης σε αυξημένα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, μειώνουν την ικανότητά τους να προβλέπουν αλλαγές στο υδρολογικό σύστημα υπό αλλαγές στις χρήσεις γης ή αλλαγές στο κλίμα. Από την άλλη μεριά, τα LSMs υστερούν στην ικανότητα προσομοίωσης των άμεσων ανθρωπογενών παρεμβάσεων στον υδρολογικό κύκλο, όπως η προσομοίωση μεγάλων φραγμάτων, η απόληψη νερού κ.ά., ενώ επίσης είναι σημαντικά πιο «υπολογιστικώς απαιτητικά».

Τα LSMs είναι αριθμητικά μοντέλα που επιχειρούν την ολιστική προσέγγιση της ροής ενέργειας, του υδρολογικού κύκλου, καθώς και του κύκλου του άνθρακα μεταξύ χερσαίας επιφάνειας και ατμόσφαιρας. Είναι από τα πιο εξελιγμένα εργαλεία που διαθέτει ο άνθρωπος σήμερα για να προβλέψει την αλλαγή των διάφορων συνθηκών στην επιφάνεια της γης για τις επόμενες δεκαετίες έως αιώνες.



Σχήμα 2.2. Τυπική δομή συστήματος αφομοίωσης δεδομένων χερσαίων διεργασιών

Παραδοσιακά, τα LSMs, είχαν το ρόλο της διεπιφάνειας γης με ατμόσφαιρα, τόσο μοντέλων παγκόσμιας κυκλοφορίας (General Circulation Models, GCMs) (Σχήμα 2.2), όσο και άλλων ατμοσφαιρικών μοντέλων (Dickinson, 1983; Liang et al., 1994). Μεταβλητές, όπως η υγρασία και θερμοκρασία του εδάφους, η τραχύτητα του εδάφους, και η ανακλώμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια της γης, έχουν μεγάλη επιρροή στο οριακό στρώμα της ατμόσφαιρας τόσο σε βραχυπρόθεσμες όσο και σε εποχιακές κλίμακες (Betts, 2004; Betts et al., 1996; Fischer et al., 2007). Επομένως, η ακριβής πρόβλεψη των διεργασιών αυτών μπορεί να είναι ιδιαίτερα επωφέλης για την προγνωστική ικανότητα σε βραχυπρόθεσμο (ημέρες) και μεσο-μακροπρόθεσμο (μήνες) ορίζοντα, που εξαρτάται από τις αρχικές και οριακές συνθήκες της χερσαίας επιφάνειας (Drusch et al., 2007; Fischer et al., 2007). Τις τελευταίες δεκαετίες όμως, η σημαντικότητα των χερσαίων διεργασιών στην μοντελοποίηση της ατμόσφαιρας έχει αυξηθεί, γεγονός το οποίο οδήγησε στην αύξηση της πολυπλοκότητας (Desborough, 1999), καθώς και της ακρίβειας των LSMs. Από τη μοντελοποίηση ενός απλού ισοζυγίου ενέργειας με ένα απλό εδαφικό στρώμα (Deardorff, 1978), τα LSMs έχουν μεταβεί στη μοντελοποίηση σύνθετης βλάστησης με προσομοίωση της υδρολογίας πολλαπλών στρωμάτων εδάφους, καθώς και επιπλέον παραμέτρων και βιογεωχημικών κύκλων (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3. Η εξέλιξη της μοντελοποίησης των χερσαίων διεργασιών μέσα στα χρόνια, απεικονίζοντας κατά προσέγγιση τη χρονική στιγμή εμφάνισης διάφορων παραμέτρων, καθώς και την αύξηση της πολυπλοκότητας με την πάροδο των χρόνων (διασκευή από Fisher et al., 2020).

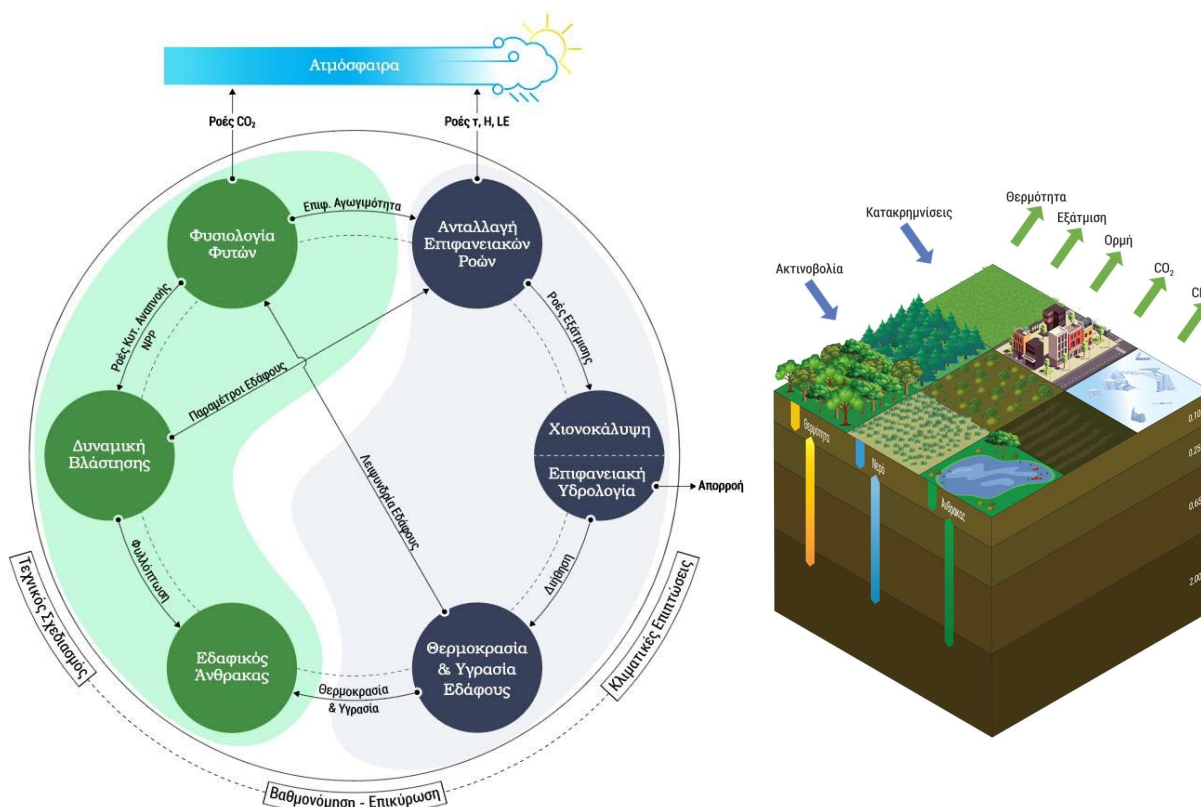
Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων σύνθετων μοντέλων, προσομοίωσης χερσαίων διεργασιών, είναι το μοντέλο The Joint UK Land Environment Simulator (JULES; Best et al., 2011; D. B. Clark et al., 2011), το μοντέλο Interaction Soil-Biosphere-Atmosphere (ISBA; Noilhan et al., 1996), το μοντέλο Canadian Land Surface Scheme (CLASS; D. L. Verseghy et al., 1993; Diana L. Verseghy, 1991), το μοντέλο Tiles ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land που ενσωματώνει την υδρολογία του εδάφους (H-TESSEL; Balsamo et al., 2009; Viterbo et al., 1995), το μοντέλο NOAH (Ek et al., 2003), και το μοντέλο Community Land Model (CLM; Oleson et al., 2010).

2.3 Το μοντέλο The Joint UK Land Environment Simulator (JULES)

Το JULES είναι ένα πλήρως χωρικά καταναμημένο μοντέλο που βασίζεται σε φυσικές διεργασίες (process-based model), και προσομοιώνει τις ροές ενέργειας, νερού, άνθρακα και ορμής ανάμεσα στην επιφάνεια της Γης και της ατμόσφαιρας. Ιδρύθηκε το 2006 και μπορεί να τρέξει αυτόνομα, επιπλέον όμως αποτελεί την προσομοίωση της χερσαίας επιφάνειας της Γης για το αριθμητικό ατμοσφαιρικό μοντέλο του Met Office του Ηνωμένου Βασιλείου UKESM (Walters et al., 2017). Το JULES αποτελείται από δύο κύρια τμήματα: 1) το πρώτο είναι το σύστημα Met Office Surface Exchange Scheme (MOSES; P. M. Cox et al., 1998), το οποίο αποτελεί το ισοζύγιο ενέργειας και νερού του JULES και 2) το δεύτερο είναι το σύστημα Top-down Representation of Interactive Foliage and Flora Including Dynamics (TRIFFID; Peter M Cox, 2001), το οποίο είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης δυναμικής βλάστησης (D. Clark et al., 2010; D. B. Clark et al., 2011; Peter M Cox, 2001). Τα κύρια δομοστοιχεία φυσικών διεργασιών (physics modules) του JULES είναι το δομοστοιχείο ανταλλαγής επιφανειακής ενεργειακής ροής (surface exchange of energy fluxes module), το δομοστοιχείο κάλυψης χιονιού (snow cover module), το δομοστοιχείο επιφανειακής υδρολογίας, το δομοστοιχείο υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους, το δομοστοιχείο φυσιολογίας των φυτών (plant physiology), το δομοστοιχείο εδαφικού άνθρακα (soil carbon module), καθώς και το δομοστοιχείο δυναμικής βλάστησης (vegetation dynamics) (Best et al., 2011; D. B. Clark et al., 2011).

Στο JULES, οι υπολογισμοί εκτελούνται σε επίπεδο κελιού πλέγματος, που αντιπροσωπεύεται από διαφορετικούς τύπους επιφανειών. Το JULES θεωρεί εννέα διαφορετικούς τύπους επιφάνειας (Best et al., 2011; D. B. Clark et al., 2011), από τους οποίους οι πέντε αναπαριστούν τύπους βλάστησης (πλατύφυλλα δέντρα, βελονόφυλλα δέντρα, εύκρατο γρασίδι, τροπικό γρασίδι, και θάμνους) και τέσσερις τύπους απουσίας βλάστησης (αστική περιοχή, επιφανειακά νερά, γυμνό έδαφος και πάγος). Κάθε κελί αντιπροσωπεύεται από ένα ποσοστό τύπου επιφάνειας, και για κάθε κελί γίνεται η επίλυση του ισοζυγίου ενέργειας.

Τα δομοστοιχεία του JULES και οι διασυνδέσεις τους, καθώς και ένα τυπικό κελί πλέγματος με τα αντίστοιχα εδαφικά στρώματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4. Γραφική απεικόνιση των κύριων δομοστοιχείων και διασυνδέσεων του μοντέλου JULES (αριστερά; διασκευασμένο από Best et al., 2011) και αναπαράσταση ενός τυπικού κελιού του JULES με εννέα τύπους επιφάνειας και τα υποκείμενα εδαφικά στρώματα (δεξιά)

Η κατακρήνιση διαχωρίζεται σε βροχοπτώση ή χιονόπτωση βάσει του ορίου θερμοκρασίας των 274 K (Best et al., 2011). Η εκτίμηση της δυνητικής εξάτμισης υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Penman-Monteith (Penman, 1948). Η απορροή διέπεται από δύο διαδικασίες, την επιφανειακή απορροή που ακολουθεί έναν μηχανισμό απορροής της περίσσειας διήθησης, και την υπο-επιφανειακή απορροή και αποστράγγιση από το κατώτερο μέρος της εδαφικής στήλης (Best et al., 2011).

Οι εδαφικές διεργασίες εμπεριέχουν την εδαφική θερμοδυναμική, την εξαγωγή εδαφικής υγρασίας από τη βλάστηση, καθώς και τις ροές νερού. Στον οριζόντιο άξονα υπάρχουν τέσσερα εδαφικά στρώματα πάχους 0.10, 0.25, 0.65, και 2.00 m, με αποτέλεσμα το συνολικό βάθος της εδαφικής στήλης να είναι 3.00 m, ακολουθώντας την προκαθορισμένη ρύθμιση Global Land 7 (Wiltshire et al., 2020), καθώς αυτή η ρύθμιση έχει βρεθεί να καταγράφει ικανοποιητικά τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του εδάφους (Best et al., 2011). Το νερό που δεν έχει αναχαιτιστεί από την κόμη της

βλάστησης, και φτάνει στο έδαφος, διασπάται σε νερό που κατεισδύει στο έδαφος και σε αυτό που οδηγείται σε επιφανειακή απορροή. Ο υπολογισμός της κατεισδυσης βασίζεται στη μέθοδο Richards (Richards, 2004), όπου η κατεισδυση συμβαίνει με ρυθμό ίσο με την κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα πολλαπλασιαζόμενη με έναν συντελεστή διόρθωσης, που εξηγεί την παρουσία και τον τύπο της βλάστησης.

Επιπλέον πληροφορίες για το μοντέλο JULES, καθώς και για τις διεργασίες του, μπορούν να βρεθούν στους Best et al. 2011, D. B. Clark et al. 2011, D. Clark et al. 2009. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας οι προσομοιώσεις έγιναν με την έκδοση 5.9 του JULES (Build 18812).

2.3.1 Δείκτες αξιολόγησης υδρολογικής προσομοίωσης

Για την αξιολόγηση της ικανότητας προσομοίωσης της παροχής χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις δείκτες απόδοσης, εκ των οποίων οι δύο υδρολογικοί: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE, Εξ. (1), Nash et al., 1970) και Kling-Gupta Efficiency (KGE, Εξ. (2), Gupta et al., 2009) και επιπλέον οι γενικοί δείκτες: Ποσοστιαίας Μεροληψίας (Percent Bias, PBIAS, Εξ. (3)) και ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 .

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs.mean})^2} \right] \quad (1)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(R - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{Q_{sim.mean}}{Q_{obs.mean}} - 1 \right)^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum (Q_{sim} - Q_{obs}) \times 100}{\sum Q_{obs}} \right] \% \quad (3)$$

Όπου Q_{sim} η προσομοιωμένη παροχή του μοντέλου, Q_{obs} η παροχή από παρατήρηση, $Q_{sim.mean}$ η μέση τιμή των προσομοιωμένων παροχών, $Q_{obs.mean}$ η μέση τιμή των παροχών από παρατήρηση, R ο συντελεστής συσχέτισης Pearson, σ_{sim} η τυπική απόκλιση των τιμών των προσομοιωμένων παροχών του μοντέλου, και σ_{obs} η τυπική απόκλιση των τιμών των παροχών από παρατήρηση.

Τιμή του NSE ίση με ένα δηλώνει αντιστοιχία μεταξύ των τιμών του μοντέλου και των παρατηρήσεων, ενώ για NSE ίση με το μηδέν το μοντέλο έχει ίδια προγνωστική ικανότητα όσο η μέση τιμή των παρατηρήσεων. Τιμές του NSE μικρότερες του μηδενός υποδεικνύουν ότι το μοντέλο έχει χειρότερη προγνωστική ικανότητα από τη μέση τιμή των παρατηρήσεων (Schaeffli et al., 2007). Γενικά, $NSE = 0$, χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς για τη διάκριση των «καλών» από τις «κακές» προσομοιώσεις (Moriasi et al., 2007; Schaeffli et al., 2007). Στο θετικό εύρος του NSE και συγκεκριμένα για υδρολογικές προσομοιώσεις παγκόσμιας κλίμακας, καλές χαρακτηρίζονται οι τιμές μεγαλύτερες του 0.5, ενώ αποτελέσματα NSE στο εύρος 0.3 έως 0.5, χαρακτηρίζονται από αδύναμα έως ικανοποιητικά (Krysanova et al., 2020; Moriasi et al., 2007).

Ο δείκτης KGE , αντιμετωπίζει επιτυχώς μειονεκτήματα του NSE και χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο για τη βαθμονόμηση και αξιολόγηση των μοντέλων (Knoben et al., 2019).

Όπως και για τον NSE , η τιμή του KGE ίση με ένα, φανερώνει απόλυτη συμφωνία των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις παρατηρήσεις. Επίσης, παρομοίως με το $NSE = 0$, ορισμένοι συγγραφείς δηλώνουν ότι για τιμές KGE μικρότερες του μηδενός, η μέση τιμή των παρατηρήσεων καθίσταται καλύτερη εκτίμηση από ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου (Castaneda-Gonzalez et al., 2018; Koskinen et al., 2017), ενώ άλλοι δηλώνουν ότι η ερμηνεία αυτή δεν έπρεπε να γίνεται για $KGE = 0$ (Gelati et al., 2018; Mosier et al., 2016). Αντίθετα, οι Knoben et al., (2019) υπολόγισαν το $KGE = 1 - \sqrt{2}$ ως σημείο αναφοράς, ώστε το μοντέλο να έχει ίδια προγνωστική ικανότητα με τη μέση τιμή παρατηρήσεων.

Σε κάθε περίπτωση, και λόγω της σύγκρισης που επικρατεί μεταξύ τους, οι δείκτες NSE και KGE δε θα πρέπει να συγκρίνονται άμεσα μεταξύ τους (Knoben et al., 2019).

2.4 Προσομοίωση της διόδευσης της απορροής

Η υγρασία του εδάφους, βασίζεται στην υδρολογία του εδάφους, που με τη σειρά της περιλαμβάνει την αποθήκευση του νερού στο έδαφος και την απορροή, επομένως η ρεαλιστική προσομοίωση της απορροής είναι εξαιρετικά σημαντική για την εκτίμηση της εδαφικής υγρασίας. Στον πραγματικό κόσμο, η απορροή που δημιουργείται πρέπει να διοδευτεί μέσω ενός φυσικού δικτύου υδατικών «μονοπατιών» (υδρογραφικό δίκτυο), όπως ρυάκια, παραπόταμους, καθώς και μεγάλα κανάλια ποταμών. Αυτά τα μονοπάτια έχουν σχηματιστεί με φυσικές διεργασίες διάβρωσης του εδάφους και είναι ορογραφικά διαμορφωμένα και χαραγμένα με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, υπάρχουν και οι εξαιρέσεις λόγω της ανθρώπινης παρέμβασης στο φυσικό σύστημα, όπου έχουν κατασκευαστεί «μονοπάτια» με σκοπό την εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων.

Ο όρος διόδευση (“routing”), γενικά αναφέρεται στην προσομοίωση των διεργασιών απορροής μέσα στο χώρο και χρόνο. Τυπικά αναφέρεται στη διαδικασία με την οποία υπολογίζεται η μεταβολή του μεγέθους, της ταχύτητας και της μορφής ενός πλημμυρικού κύματος, σε οποιοδήποτε σημείο ενός υδρογραφικού δικτύου, και έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή υδρογραφήματος (Maidment, 1993; Τσακίρης Γ., 1995). Σύστημα διόδευσης της απορροής (routing scheme), είναι μία μαθηματική μέθοδος «περιγραφής» της επιφανειακής κίνησης του νερού, η οποία μετατρέπει την απορροή σε ποτάμια παροχή, διοδεύοντας την απορροή που έχει δημιουργηθεί σε μία μονάδα επιφάνειας (π.χ. υπο-λεκάνη, κελί πλέγματος, κ.ά.), στην επόμενη κατάντη μονάδα. Η διεργασία αυτή, για μία υδραυλική προσομοίωση, προϋποθέτει την επίλυση ισοζυγίων μάζας, ενέργειας και ορμής. Αντίθετα, η διόδευση, υπό τη σκοπιά της υδρολογίας, έχει απλούστερη βάση, προσομοιώνοντας την εξίσωση της συνέχειας, προσεγγίζοντας έτσι τη διατήρηση της μάζας. Το σύστημα διόδευσης της απορροής μπορεί να βασίζεται σε εξισώσεις κινηματικού κύματος, εξισώσεις διάχυσης ή πλήρως δυναμικές εξισώσεις. Οι τρεις αυτές εξισώσεις διόδευσης είναι, αντίστοιχα, αυξημένης πολυπλοκότητας, καθώς αντιπροσωπεύουν πληρέστερα τις φυσικές διαδικασίες και λαμβάνουν υπόψη περισσότερες μεταβλητές, όπως την ταχύτητα ροής, την πίεση, την τραχύτητα του πυθμένα κ.ά. (Feldman, 2000).

Με βάση τον τύπο των χωρικών δεδομένων (ψηφιδωτά/διανυσματικά) και της πολυπλοκότητας του συστήματος διόδευσης (υδρολογικό/υδραυλικό), μπορούν να διακριθούν τρεις κύριες προσεγγίσεις της προσομοίωσης της διόδευσης: i) η διόδευση source-to-sink, όπου η απορροή που παράγεται στην εκάστοτε μονάδα επιφάνειας (π.χ. υπο-λεκάνη, κελί πλέγματος, κ.ά.) μεταφέρεται στην αντίστοιχη εκβολή ποταμού (Olivera et al., 2000), ii) η διόδευση που πραγματοποιείται από κελί σε κελί, η οποία εφαρμόζεται σε ψηφιδωτά μοντέλα (π.χ., JULES, WaterGAP, ORCHIDEE, κ.ά.), και iii) η διόδευση

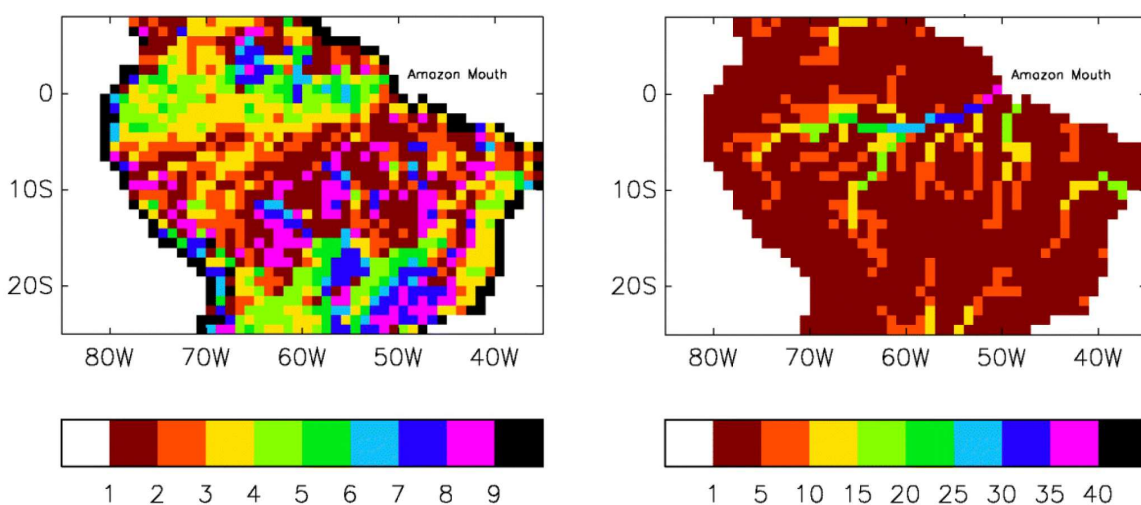
object-to-object, όπου η διόδευση λαμβάνει χώρα μεταξύ διανυσματικών υδρολογικών αντικειμένων (objects), όπως τμήματα ποταμών, ποτάμια ή και λεκάνες (π.χ., Grill, 2014; Paiva et al., 2011)

Η ακριβής προσομοίωση της ροής των ποταμών είναι σημαντική για πολλούς λόγους, όπως π.χ. i) η ροή των ποταμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα ποσοτικό μέσο αξιολόγησης της απόδοσης του LSM, συγκρίνοντας τη σημειακή παροχή ποταμών που υπολογίζεται από τον αλγόριθμο της διόδευσης με τις αντίστοιχες παροχές από σταθμούς μέτρησης (Oki et al., 1999), ii) η αλλαγή της παροχής ενδέχεται να είναι μία σημαντική επιπτώση της κλιματικής αλλαγής (Gudmundsson et al., 2021; Oki et al., 2006), και iii) η ροή του γλυκού νερού από τη στεριά στους ωκεανούς ασκεί σημαντική επίδραση στην κυκλοφορία θερμοαλίνης (Wang et al., 1998; Wijffels et al., 1992) και επομένως μια επιδέξια αναπαράσταση της παγκόσμιας απορροής είναι σημαντική για τη ρεαλιστική αναπαράσταση της κυκλοφορίας θερμοαλίνης σε ένα συζευγμένο μοντέλο παγκόσμιας κυκλοφορίας (ατμόσφαιρας-επιφάνειας-ωκεανού, GCM).

2.5 Το σύστημα διόδευσης Total Runoff Integrating Pathways (TRIP)

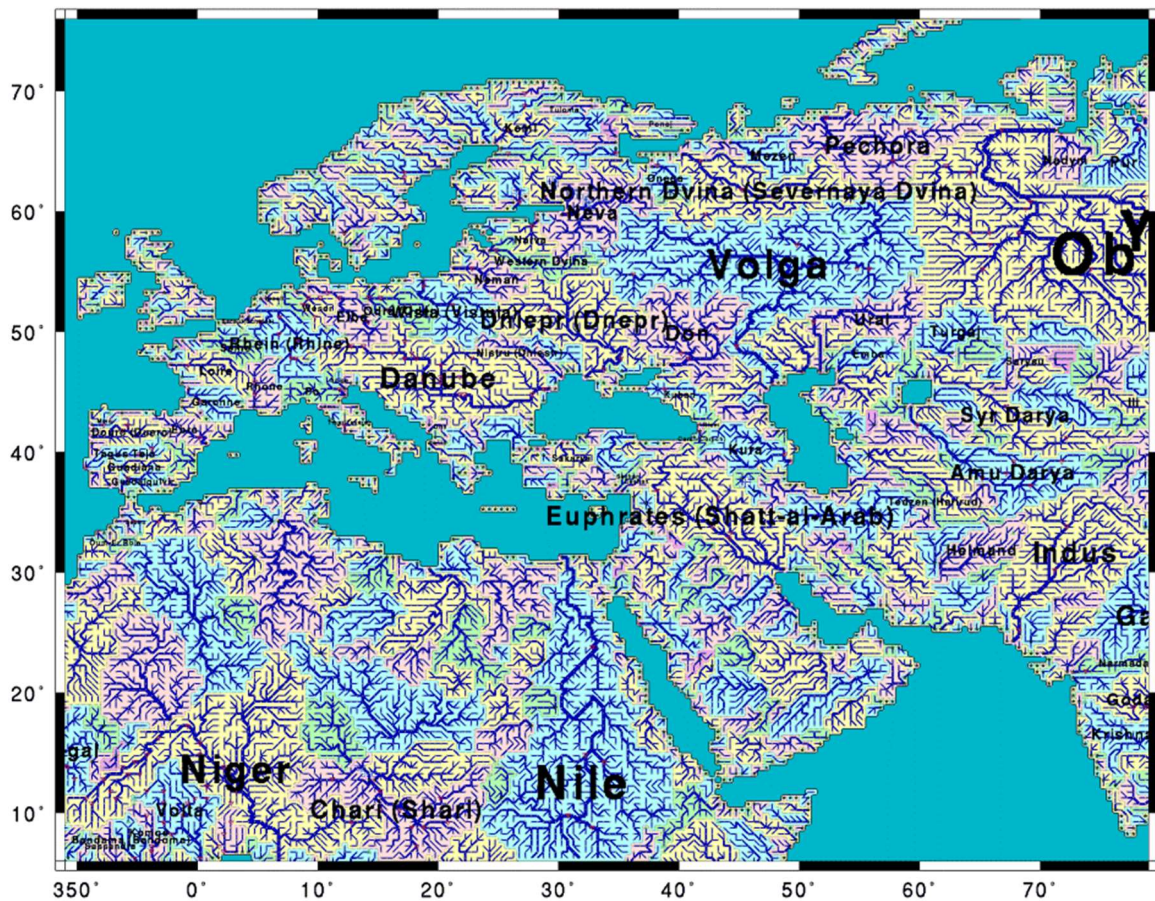
Το σύστημα διόδευσης Total Runoff Integrating Pathways (TRIP; Oki et al., 1998) είναι ένα παγκόσμιο ψηφιδωτό σύνολο δεδομένων, το οποίο υπολογίζει την cell-to-cell πλευρική κίνηση του νερού στη χερσαία επιφάνεια, ακολουθώντας τις διαδρομές των φυσικών καναλιών των ποταμών. Χρησιμοποιεί μία απλή μέθοδο μεταφοράς για τη διόδευση της επιφανειακής και υπο-επιφανειακής απορροής κατά μήκος προκαθορισμένων ποτάμιων καναλιών.

Τα κανάλια των ποταμών αντιπροσωπεύονται από δύο σύνολα δεδομένων, με το πρώτο να δίνει την κατεύθυνση (Σχήμα 2.5; αριστερά) και το δεύτερο την αλληλουχία (Σχήμα 2.5; δεξιά) της ροής. Οι Oki και Sud (1998) ανέπτυξαν το σύστημα διόδευσης TRIP σε ανάλυση $1^\circ \times 1^\circ$ και με βάση το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DEM) ETOPO5 χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό αρχικά αυτοματισμού και έπειτα χειροκίνητων διορθώσεων. Αργότερα, το TRIP αναπτύχθηκε και σε λεπτομερέστερη χωρική ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, βάσει του GTOPO30 (Sarusashi, 2001).



Σχήμα 2.5. Προκαθορισμένη κατεύθυνση ποτάμιας ροής κελιών σε ανάλυση $1^\circ \times 1^\circ$ στον Αμαζόνιο, όπου 1:Β, 2:ΒΑ, 3:Α, 4:ΝΑ, 5:Ν, 6:ΝΔ, 7:Δ, 8:ΒΔ και 9:εκβολή ποταμού (αριστερά). Επισήμανση της αλληλουχίας ποτάμιας ροής κελιών σε ανάλυση $1^\circ \times 1^\circ$ στον Αμαζόνιο (δεξιά). (Πηγή: Oki et al., 1999)

Το σύνολο στοιχείων για την κατεύθυνση της ροής, υποδηλώνει το κελί που θα βρίσκεται κατάντη της ροής, το οποίο πρέπει να είναι μονοσήμαντο. Το TRIP χρησιμοποιεί την τυπολογία διόδευσης “D8”, σύμφωνα με την οποία η κατεύθυνση της εκροής του κελιού μπορεί να είναι 1:B, 2:BA, 3:A, 4:NA, 5:N, 6:ND, 7:Δ, και 8:BD. Εμπεριέχει, επίσης, την τιμή 0, για τα κελιά που βρίσκονται στη θάλασσα, και την τιμή 9, για τα κελιά που εκβάλουν στη θάλασσα. Η τυπολογία τύπου “D8” εάν και θεωρείται σχετικά ικανοποιητική σε μεγάλες κλίμακες, δεν μπορεί να προσομοιώσει το διαμοιρασμό της εκροής σε περισσότερα του ενός κατάντη κελιών, ο οποίος παρατηρείται και εντονότερα σε εκβολές ποταμών (Costa-Cabral et al., 1994). Στο σύνολο δεδομένων αλληλουχίας της ροής, κάθε κελί αριθμείται, ξεκινώντας με την τιμή 1, όταν αυτό βρίσκεται στην απαρχή ενός καναλιού (το πιο ανάντη) και αυξάνοντας κατά ένα μόνο, όταν το κατάντη κελί είναι μέρος μεγαλύτερης αλληλουχίας, μέχρι την εκβολή του στη θάλασσα. Πολλά μικρότερα ποτάμια έχουν τιμή αλληλουχίας 1 μέχρι να φτάσουν ένα κύριο κανάλι. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στα δεξιά στο Σχήμα 2.5, τα σκούρα καφέ κελιά αντιπροσωπεύουν παραπόταμους με τιμές αλληλουχίας 1, 2, 3 ή 4 μέχρι να συναντήσουν έναν κύριο ποταμό ή το κύριο κανάλι του Αμαζόνιου. Ενδεικτικά, στο Σχήμα 2.6 φαίνεται το δίκτυο καναλιών της Ευρώπης σε ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.



Σχήμα 2.6. Απεικόνιση του δικτύου διόδευσης του συστήματος TRIP για την Ευρώπη σε πλέγμα $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Οι έντονες γραμμές ισοδυναμούν την αύξηση της αλληλουχίας της ροής των κελιών. (Πηγή: Saruhashi, 2001)

Η διόδευση στο σύστημα TRIP βασίζεται στην αποθήκευση νερού που πραγματοποιείται σε κάθε κελί, με σκοπό τη δημιουργία χρονικής υστέρησης για την προσομοίωση της ροής. Η διατήρηση της αποθήκευσης της ποτάμιας ροής για κάθε κελί και χρονικό βήμα δίνεται από τη γραμμική εξίσωση διόδευσης του TRIP (4).

$$\frac{dS_{rc}}{dt} = D_{in} - D_{out} \quad (4)$$

Όπου S_{rc} η αποθήκευση νερού του ποταμού (kg) στο κελί, D_{in} το άθροισμα της εισροής νερού ($kg \cdot s^{-1}$) από γειτονικά ανάντη κελιά και της απορροής ($kg \cdot s^{-1}$) που παράχθηκε στο ίδιο κελί. Το σετ δεδομένων της κατεύθυνσης της ροής χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του D_{in} . Το D_{out} δηλώνει την εκροή από το κελί, και βάσει ορισμού είναι προς μόνο μία κατεύθυνση και υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης (5).

$$D_{out} = c \cdot S_{rc} \quad (5)$$

Ο συντελεστής c (s^{-1}) υπολογίζεται από την (6) και εκφράζει το λόγο της ταχύτητας ροής του ποταμού u ($m \cdot s^{-1}$) προς το αντίστοιχο μήκος που διήνυσε το ποτάμι d (m) στο εκάστοτε κελί. Καθώς τα ποτάμια δε ρέουν σε μία ευθεία γραμμή αλλά τείνουν να μαιανδρίζουν, η απόσταση που διανύει το ποτάμι σε κάθε κελί θεωρείται ότι ισούται με την απόσταση του εκάστοτε κελιού d_c (m), πολλαπλασιασμένη με έναν συντελεστή μαιανδρισμού r_m (αδιάστατο). Όπως φαίνεται και από τις μονάδες του (s^{-1}), ο συντελεστής c περιγράφει τη χρονική υστέρηση του νερού, ώστε να απορρεύσει από το ένα κελί στα κατάντη (Liston et al., 1994; Miller et al., 1994).

$$c = \frac{u}{d} = \frac{u}{r_m \cdot d_c} \quad (6)$$

Η εφαρμογή των παραπάνω στο γραμμικό μοντέλο μεταφοράς, έγινε βάσει της εξίσωσης (7), όπου $C_t = \exp(-c \cdot dt)$.

$$S_{rc}(t_o + dt) = C_t \cdot S_{rc}(t_o) + (1 - C_t) \cdot \frac{D_{in}}{c} \quad (7)$$

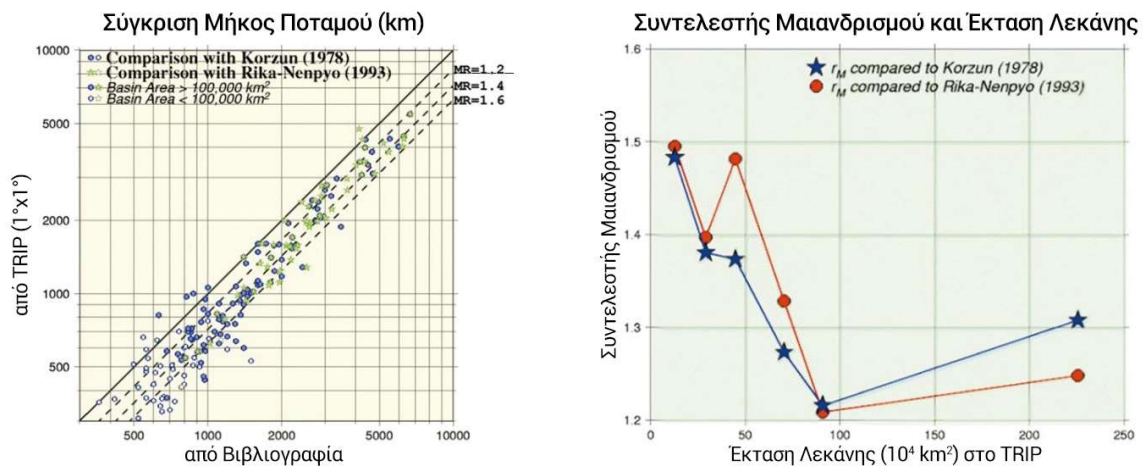
Η εξίσωση (7) υπολογίζει την αποθήκευση νερού του κελιού σε κάθε χρονικό βήμα. Ο υπολογισμός της αποθήκευσης νερού γίνεται αρχικά για όλα τα κελιά απαρχής καναλιών, δηλαδή αυτά με τιμή αλληλουχίας ίση με ένα, έπειτα για όλα τα κελιά αλληλουχίας δύο και ακολούθως μέχρι τη μέγιστη τιμή αλληλουχίας.

2.5.1 Παράμετροι του συστήματος διόδευσης TRIP

Η ταχύτητα ροής u και ο συντελεστής μαιανδρισμού r_m αποτελούν τις σημαντικότερες παραμέτρους του TRIP. Οι Oki και Sud (1998) εκτίμησαν την ταχύτητα ροής u σταθερή και ίση με $0.5 m \cdot s^{-1}$, ενώ αργότερα καθιερώθηκε τιμή ταχύτητας ροής ίση με $0.4 m \cdot s^{-1}$ (Oki et al., 1999). Το γενικότερο εύρος τιμών ταχύτητας που μελετήθηκε ήταν από $0.14 m/s$ έως $1.00 m/s$. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν από βιβλιογραφικά όρια ταχυτήτων για παγκόσμια διόδευση απορροής, καθώς και από συντελεστές χρονικής υστέρησης οι οποίοι μετατράπηκαν σε ταχύτητα ροής, δεδομένων των αναλύσεων

πλέγματος (Oki et al., 1999). Σημειώνεται, ότι οι τιμές ταχύτητας ήταν μεγαλύτερες, όταν η διόδευση της υπο-επιφανειακής ροής γινόταν ξεχωριστά.

Ο συντελεστής μαιανδρισμού r_m δηλώνει την αναλογία του πραγματικού μήκους του καναλιού προς το μήκος του στο TRIP, δηλαδή προς το άθροισμα της αλληλουχίας των κελιών που αντιπροσωπεύουν το ποτάμι. Οι Oki και Sud (1998) εκτίμησαν το συντελεστή r_m ίσο με 1.4 ως μέση παγκόσμια τιμή για όλα τα κελιά/λεκάνες, αφού μελέτησαν το εύρος αναλογίας από 1.2 έως 1.6, συγκρίνοντας το μήκος ποταμών από παρατηρήσεις με το μήκος των αντίστοιχων καναλιών του TRIP. Παρόλο που χρησιμοποιήθηκε σταθερός συντελεστής μαιανδρισμού, συμπέρασμα της μελέτης τους ήταν ότι η τιμή του συντελεστή μαιανδρισμού είναι 1.3 για λεκάνες με έκταση μεγαλύτερη των 500,000 km², ενώ σε λεκάνες με μεγάλα ποτάμια, η τιμή ίση με 1.6 αποτελεί ιδανικότερο συντελεστή μαιανδρισμού (Σχήμα 2.7).



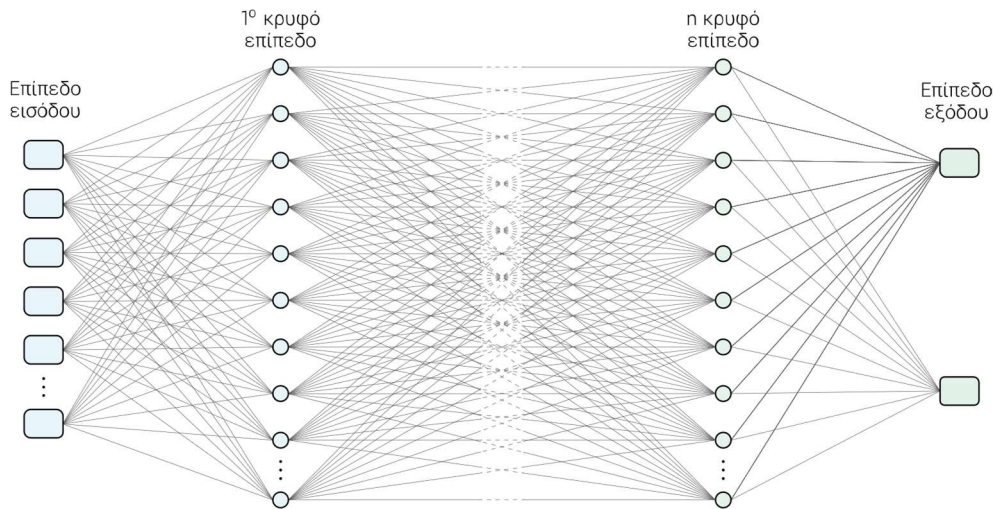
Σχήμα 2.7. Μήκη των κύριων ποταμών του TRIP σε σχέση με βιβλιογραφικές τιμές (αριστερά). Η εξάρτηση του r_m από την έκταση της λεκάνης (δεξιά). (Πηγή: Oki et al., 1998)

Παρατηρείται, λοιπόν, μία εξάρτηση των κύριων παραμέτρων του TRIP με φυσιογραφικές παραμέτρους των λεκανών. Είναι επομένως εφικτή η βελτιωμένη εκτίμηση των παραμέτρων ταχύτητας και μαιανδρισμού με τη χρήση υψηλής λεπτομέρειας φυσιογραφικών χαρακτηριστικών, όπως η έκταση της λεκάνης απορροής, το μήκος του ποταμού, η κλίση των πρανών του εδάφους, η κλίση της κατά μήκος ροής κ.ά.

2.6 Νευρωνικά δίκτυα

Τα νευρωνικά δίκτυα τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Neural Network, ANN) είναι υπολογιστικά συστήματα, τα οποία προσπαθούν να μιμηθούν τις υπολογιστικές δεξιότητες των βιολογικών οργανισμών με τη χρήση διασυνδεδεμένων τεχνητών νευρώνων. Οι τεχνητοί υπολογιστικοί νευρώνες δέχονται δεδομένα από νευρώνες εισόδου ή προηγούμενους υπολογιστικούς νευρώνες, πραγματοποιούν απλούς υπολογισμούς και μεταφέρουν τα αποτελέσματα σε επόμενους. Οι νευρώνες αυτοί είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους, σχηματίζοντας έτσι ένα νευρωνικό δίκτυο. Η γενική αρχή πίσω από τα ANNs είναι ότι η πληροφορία επεξεργάζεται από πολυάριθμους νευρώνες, οι

οποίοι μπορεί να βρίσκονται τόσο παράλληλα (δηλαδή νευρώνες που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο), όσο και σε σειρά (από νευρώνες διαφορετικών επιπέδων). Ένα τυπικό νευρωνικό δίκτυο φαίνεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8. Τυπική δομή ενός νευρωνικού δικτύου

Τα ANNs βρίσκουν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή στον τομέα της υδρολογίας τις τελευταίες δεκαετίες (ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology, 2000). Τα ANNs χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό για επίλυση προβλημάτων πρόγνωσης βροχόπτωσης-απορροής (Rajurkar et al., 2004; Wu et al., 2011), πλημμύρας (Le et al., 2019; Wu et al., 2006), εδαφικής υγρασίας (Elshorbagy et al., 2008; Grillakis et al., 2021), ποτάμιας ροής (Aichouri et al., 2015; Kisi, 2004), υπογείων υδάτων και στάθμης υδροφόρου ορίζοντα (Daliakopoulos et al., 2005), υδατικών πόρων (Ali et al., 2017; Mishra et al., 2006), κ.ά.

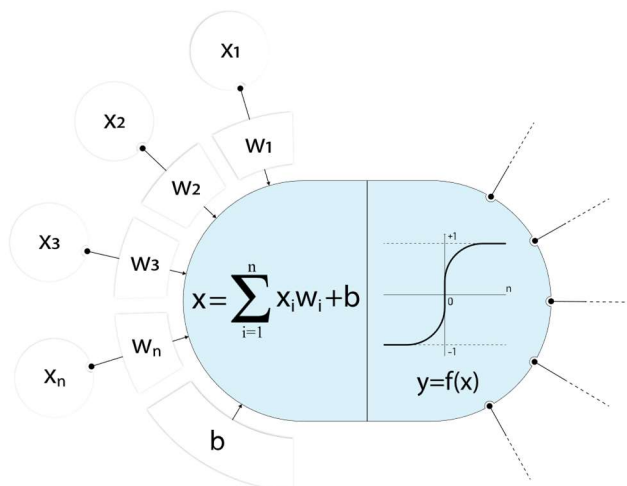
2.6.1 Μοντέλο τεχνητού νευρώνα – Συναρτήσεις ενεργοποίησης

Ένα νευρωνικό δίκτυο με μόλις έναν νευρώνα ονομάζεται Perceptron (Rosenblatt, 1958). Ένα Perceptron έχει ένα ή περισσότερα ορίσματα εισόδου και ένα μοναδικό όρισμα εξόδου. Κάθε στοιχείο εισόδου του νευρώνα πολλαπλασιάζεται με ένα βάρος w_i , το οποίο αντικατοπτρίζει τη σημασία του συγκεκριμένου στοιχείου εισόδου στην έξοδο. Τα σταθμισμένα πλέον στοιχεία αθροίζονται όλα μαζί με μία τιμή πόλωσης b (bias), όπως φαίνεται και στην εξίσωση (8).

$$x = \left(\sum_{i=1}^n w_i \times x_i \right) + b \quad (8)$$

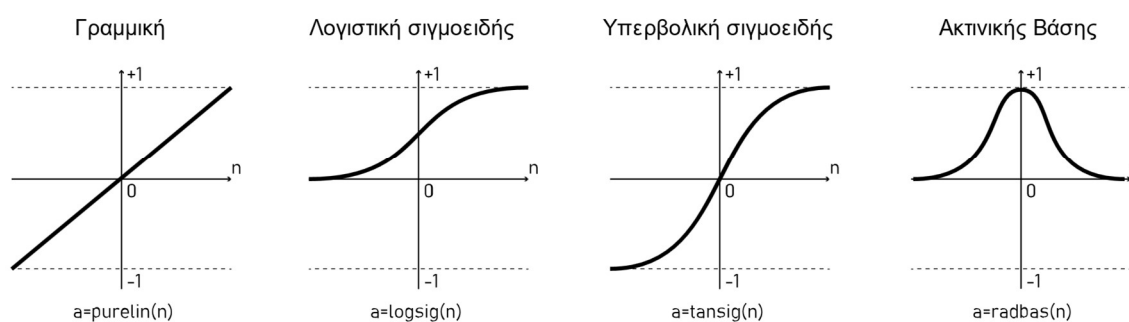
Το άθροισμα αυτό περνάει από μία συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) $f(x)$, η οποία παράγει το τελικό αποτέλεσμα (Bell, 2014). Ιδανικά, όταν ένα Perceptron χρησιμοποιείται για αναγνώριση μοτίβων (pattern recognition) ή σε προβλήματα κατηγοριοποίησης (classification), θα δώσει αποτέλεσμα μονάδα σε τάξεις που οι τιμές τους συσχετίζονται, και μηδέν σε όλες τις υπόλοιπες.

Αυτό μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας την καταλληλότερη συνάρτηση ενεργοποίησης, καθώς και την τιμή μεροληψίας. Η πιο απλή συνάρτηση ενεργοποίησης είναι η βηματική συνάρτηση (step function), η οποία «ενεργοποιεί» το συγκεκριμένο νευρώνα ακαριαία, οπότε και το στοιχείο εξόδου θα αλλάξει από μηδέν σε ένα.



Σχήμα 2.9. Τυπικός τεχνητός νευρώνας

Υπάρχει μια σειρά από διαφορετικές συναρτήσεις ενεργοποίησης, με την κάθε μία να αποδίδει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά στην προγνωστική ικανότητα του ANN (Σχήμα 2.10). Κύριες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν τη γραμμική συνάρτηση (linear function), τη λογιστική σιγμοειδή συνάρτηση (logistic sigmoid function), την υπερβολική λογιστική συνάρτηση (hyperbolic tangent function), και τη συνάρτηση ακτινικής βάσης (radial basis function).



Σχήμα 2.10. Κύριες συναρτήσεις ενεργοποίησης

Η γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης, παρόλη την απλή δομή της, έρχεται να αντιμετωπίσει το ζήτημα της ακαριαίας ενεργοποίησης της βηματικής συνάρτησης, παρέχοντας έξοδο σε ένα εύρος ενδιάμεσων τιμών με γραμμική αύξηση. Οι μη γραμμικές συναρτήσεις ενεργοποίησης είναι εκείνες που δίνουν στα νευρωνικά δίκτυα τις μη γραμμικές δυνατότητές τους. Οι σιγμοειδείς συναρτήσεις αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή συναρτήσεων ενεργοποίησης, καθώς λόγω της εξομάλυνσης

και των ασυμπτωτικών ιδιοτήτων που παρουσιάζουν, αποτελούν μία καλή προσομοίωση της συμπεριφοράς των βιολογικών νευρώνων (Bell, 2014). Υπάρχουν αρκετές κατηγορίες σιγμοειδών συναρτήσεων, όπως η λογιστική, με έξοδο από μηδέν έως ένα λόγω του λογάριθμου, η υπερβολική, κ.ά., ανεξάρτητα όμως της βάσης τους, ορίζονται ως αυστηρά αύξουσες συναρτήσεις. Η συνάρτηση ακτινικής βάσης είναι ακόμα μία συνάρτηση ενεργοποίησης με το χαρακτηριστικό σχήμα «καμπάνας» και έξοδο στο εύρος μηδέν έως ένα. Για υλοποιήσεις ακτινικής βάσης, η συνάρτηση Gauss χρησιμοποιείται κατά το πλείστον. Χαρακτηριστικό γνώρισμα της συνάρτησης αυτής είναι η ακρίβεια της ενεργοποίησης, καθώς αυτή λαμβάνει χώρα μόνο εντός ενός εύρους τιμών, γύρω από ένα κέντρο.

2.6.2 Εκπαίδευση – Επικύρωση – Δοκιμή

Η διεργασία που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του βάρους και της τιμής πόλωσης, που θα επιτρέψουν στο ANN να παράγει το επιθυμητό αποτέλεσμα ελαχιστοποιώντας το σφάλμα μεταξύ εισόδου και εξόδου, λέγεται εκπαίδευση (training). Πριν την εκπαίδευση οι τιμές βάρους και μεροληψίας είναι προκαθορισμένες ίσες με μηδέν. Καθώς το ANN εκπαιδεύεται, προσαρμόζει τα βάρη και τις τιμές μεροληψίας από το σφάλμα μεταξύ της επιθυμητής τιμής και της τιμής που υπολόγισε το ANN. Επίσης, γίνεται προσαρμογή του ρυθμού εκμάθησης (learning rate), έτσι ώστε να αποφεύγονται απότομες μεταβολές.

Τα ANNs για να μπορούν να προβλέψουν με ακρίβεια, θα πρέπει πρώτα να εκπαιδευτούν με ένα σετ δεδομένων εισόδου με γνωστά αποτελέσματα εξόδου, γνωστό ως σετ εκπαίδευσης (training set). Για την εκτίμηση της απόδοσης του ANN μετά την εκπαίδευση χρησιμοποιείται ένα σετ επικύρωσης (validation set), με γνωστά αποτελέσματα εξόδου, όπου αξιολογείται η προσαρμογή του ANN στα δεδομένα του σετ εκπαίδευσης και συντελεί στον τερματισμό εκπαίδευσης του ANN. Συνήθως, το σετ επικύρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περαιτέρω προσαρμογή του ANN, ή ακόμα, τα δύο σετ να διαχωρίζονται τυχαία κατά την εκπαίδευση του ANN, με αποτέλεσμα το σετ επικύρωσης να μην είναι απόλυτα αμερόληπτο. Για την πλήρως αμερόληπτη αξιολόγηση του τελικού ANN χρησιμοποιείται ένα σετ εξέτασης/δοκιμής (test set), το οποίο δεν έχει συμμετάσχει σε κανένα βήμα της εκπαίδευσης ή επικύρωσης, παρέχοντας έτσι μία αντικειμενική αξιολόγηση του ANN. Το σετ δοκιμής, είναι επίσης κατάλληλο για τη σύγκριση νευρωνικών δικτύων με διαφορετικές διαμορφώσεις π.χ. διαφορετικός αριθμός κρυφών επιπέδων και νευρώνων, διαφορετικές εξισώσεις ενεργοποίησης, κ.ά.

Ο στόχος της εκπαίδευσης του ANN είναι να δημιουργήσει ένα δίκτυο με μικρά λάθη στο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, αλλά το οποίο θα έχει επίσης καλή απόδοση στο σύνολο δεδομένων δοκιμής (Dan Foresee et al., 1997). Υπάρχουν δύο γενικά είδη αλγορίθμων εκπαίδευσης: i) εκπαίδευση με επίβλεψη, όπου ο στόχος ή η γνωστή έξοδος είναι διαθέσιμη στο δίκτυο και αυτό βρίσκει το καλύτερο σύνολο βαρών ελαχιστοποιώντας το σφάλμα μεταξύ της εξόδου και του στόχου, και ii) η εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη, όπου μόνο το σύνολο δεδομένων εισόδου δίνεται στο δίκτυο, το οποίο στη συνέχεια προσπαθεί να βρει συμπλέγματα παρόμοιων εισόδων χωρίς προηγούμενη γνώση.

Ο πιο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος εποπτευόμενης εκπαίδευσης είναι ο αλγόριθμος Levenberg-Marquardt (LM), ο οποίος χρησιμοποιείται και στην παρούσα εργασία για την εκπαίδευση των ANN (Gavin, 2020). Ο αλγόριθμος αυτός απαιτεί γενικά περισσότερη υπολογιστική μνήμη σε σχέση με άλλους αλγόριθμους, αλλά ο χρόνος εκπαίδευσης που απαιτείται είναι μικρός. Η εκπαίδευση του ANN τερματίζεται αυτόματα, όταν η «γενίκευση» δε βελτιώνεται περαιτέρω, όταν σημειώνεται δηλαδή αύξηση του μέσου τετραγώνου του σφάλματος με τα δεδομένα

επικύρωσης. Ο αλγόριθμος LM παρεμβάλλεται μεταξύ του αλγόριθμου Gauss-Newton (GNA) και της μεθόδου της εφαπτομένης (gradient descent). Ο LM αποδεικνύεται αποδοτικότερος από τον GNA, καθώς σε πολλές περιπτώσεις βρίσκει λύση ακόμα και αν ξεκινάει αρκετά μακριά από το ολικό ελάχιστο.

2.6.3 Αρχιτεκτονικές ANN

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ANN, με βάση τη σύνδεση που λαμβάνει χώρα και της τοπολογίας του δικτύου (Vlahavas et al., 2006). Το δίκτυο μπορεί να χαρακτηρίζεται από πλήρη (full connection) ή μερική (partial connection) διασύνδεση των νευρώνων ανάμεσα σε δύο διαδοχικά επίπεδα. Επίσης, όταν η πληροφορία ρέει προς τη μία μόνο κατεύθυνση, χωρίς να υπάρχει διασύνδεση των νευρώνων του εκάστοτε επιπέδου με το προηγούμενο, τα δίκτυα αυτά ονομάζονται δίκτυα πρόσθιας μετατόπισης (feedforward), διαφορετικά ονομάζονται δίκτυα ανατροφοδότησης (feedback/recurrent). Τα feedforward ANNs είναι τα πιο κοινά, το οποίο ισχύει και στο πεδίο της υδρολογίας. Οι Maier et al., (2010) εξέτασαν 210 δημοσιεύσεις μεταξύ 1999 και 2007 που χρησιμοποιούσαν ANN για υδρολογική μοντελοποίηση. Βρήκαν ότι 178 δημοσιεύσεις από τις 210, δηλαδή περίπου το 85%, χρησιμοποιούσαν feedforward ANNs. Άλλοι τύποι ANN περιλαμβάνουν τα δίκτυα συναρτήσεων ακτινικής βάσης (Radial Basis Function Networks, RBFNs), τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα (RNN) και τους Αυτό-Οργανωμένους Χάρτες (SOM) (Bishop, 1995).



3

Υδρολογικές λεκάνες μελέτης και δεδομένα

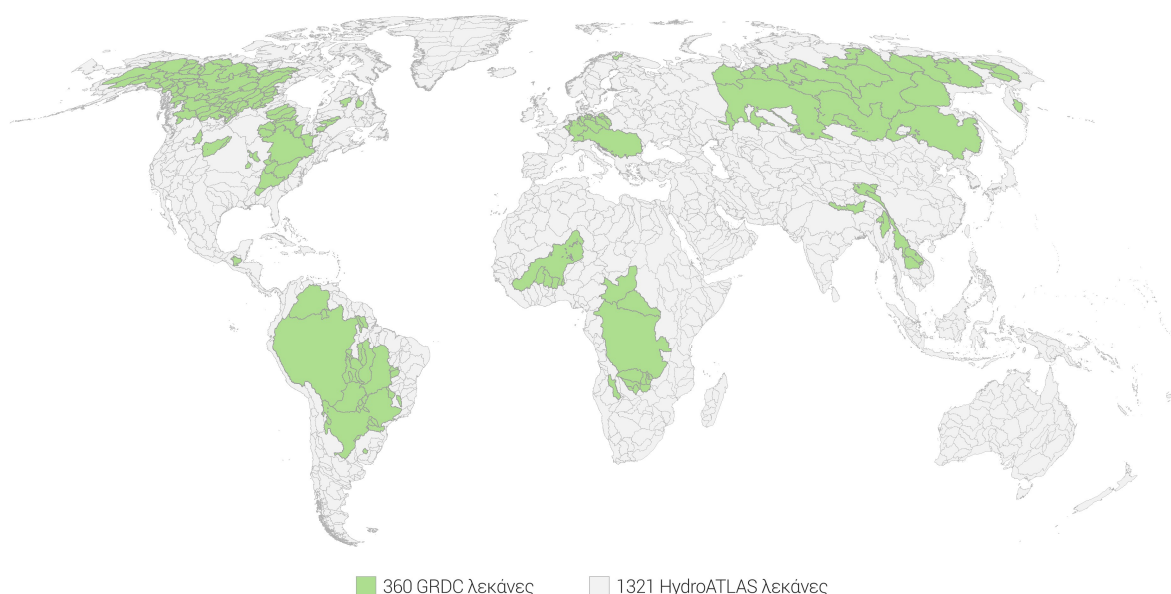
3.1 Ανάλυση σε επίπεδο λεκάνης απορροής

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο λεκάνης απορροής σε παγκόσμια κλίμακα. Η οριοθέτηση των λεκανών απορροής έγινε βάσει των σταθμών απορροής του Global Runoff Data (GRDC, 56068 Koblenz, Germany), για την εκτέλεση του παραγοντικού πειράματος και την συσχέτιση φυσιογραφικών χαρακτηριστικών, και συνδυαστικά του HydroATLAS (Linke et al., 2019) για την παρέκτασή τους σε παγκόσμια κάλυψη. Το GRDC είναι η πληρέστερη βάση δεδομένων απορροής σε παγκόσμιο επίπεδο με δεδομένα για πάνω από 10,000 σταθμούς σε 159 χώρες. Για τους σκοπούς της ανάπτυξης της μεθόδου βελτιστοποίησης της διόδευσης, η οριοθέτηση των λεκανών έγινε βάσει των σταθμών του GRDC, οι οποίοι διαθέτουν τις απαραίτητες παρατηρήσεις απορροής. Με αυτόν τον τρόπο ήταν δυνατή η ποσοτικοποίηση της βελτίωσης, συγκρίνοντας την υπολογισμένη παροχή με την αντίστοιχη μετρημένη. Τα κριτήρια επιλογής των λεκανών απορροής ήταν:

- i) οι λεκάνες να βρίσκονται σε σχεδόν φυσικές συνθήκες (χωρίς σημαντική άμεση ανθρωπογενή παρέμβαση),
- ii) η διαθεσιμότητα κατ' ελάχιστον 10ετούς διάρκειας δεδομένων ημερήσιας παροχής στην περίοδο 1970-2010, και
- iii) η έκταση της κάθε λεκάνης απορροής να είναι τουλάχιστον 13000 km^2 (τουλάχιστον πέντε κελιά πλέγματος).

*Εικόνα του ποταμού Μιζούρι, από δεδομένα Lidar, που μαιανδρίζει κατά μήκος της ροής, νοτιοδυτικά των Great Falls, Montana. Πηγή: Daniel Coe (2021)

Το πρώτο κριτήριο τέθηκε, ώστε να αποφευχθεί η σύγκριση πραγματικών ιστορικών παροχών με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από την υδρολογική προσομοίωση του JULES, το οποίο δε λαμβάνει υπόψη ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στην ποτάμια ροή, όπως φράγματα, αντλήσεις κ.ά., (Krabbenhoft et al., 2022). Επομένως, με βάση την κατηγοριοποίηση κατά Zhao et al., (2017) επιλέχθηκαν σταθμοί που αντιστοιχούν σε λεκάνες υπό σχεδόν φυσικές συνθήκες. Το δεύτερο κριτήριο τέθηκε ως το ελάχιστο μέγεθος χρονοσειράς για την αξιολόγηση της υδρολογικής προσομοίωσης (Gosling et al., 2011). Το τρίτο κριτήριο τέθηκε, ώστε να αποφευχθεί η συμπερίληψη μικρών σε έκταση λεκανών, οι οποίες προσομοιάζονται ανεπαρκώς από μία μεγάλης κλίμακας υδρολογική προσομοίωση (τουλάχιστον 5 κελιών πλέγματος). Απ' την άλλη, μεγαλύτερο όριο έκτασης θα είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του διαθέσιμου δείγματος λεκανών απορροής, που ταυτόχρονα ικανοποιεί τα παραπάνω κριτήρια. Βάσει των παραπάνω κριτηρίων επιλέχθηκαν 360 GRDC λεκάνες απορροής, για την ανάπτυξη της μεθόδου βελτιστοποίησης (Χάρτης 3.1).



Χάρτης 3.1. Λεκάνες απορροής GRDC και HydroATLAS

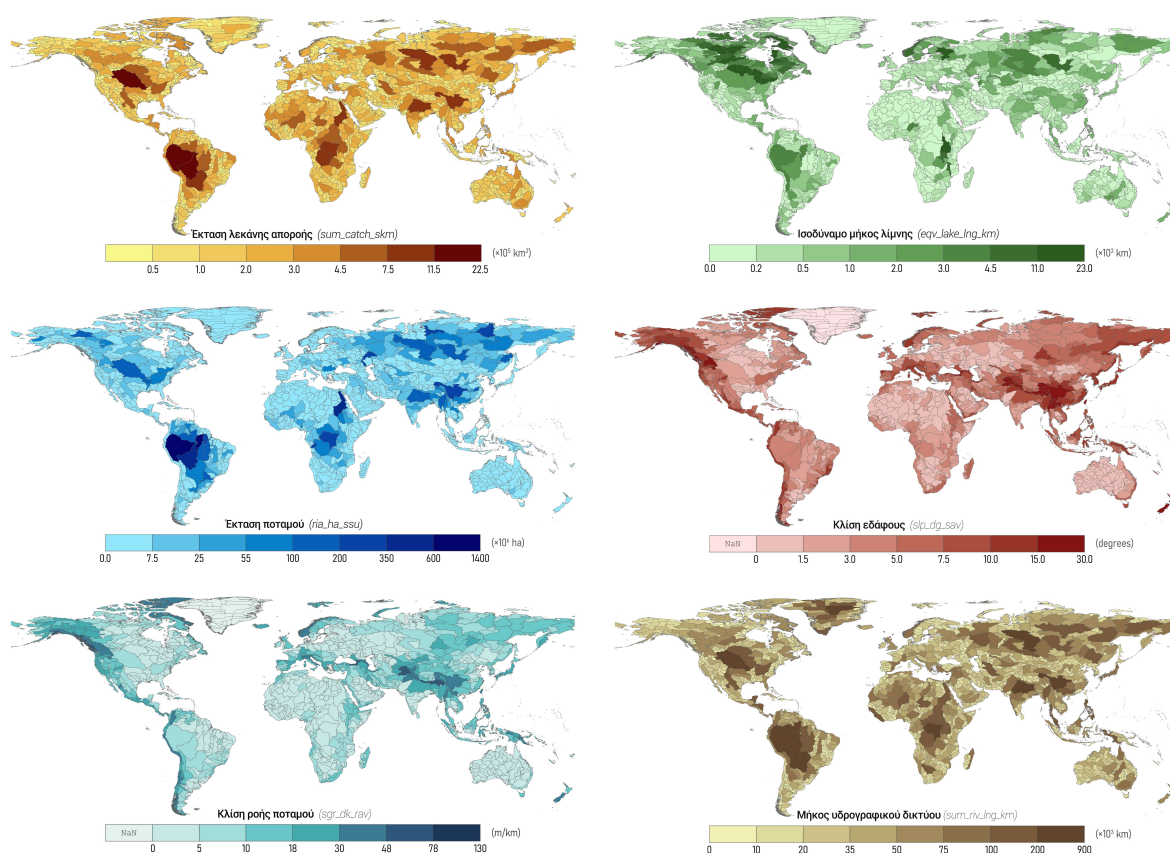
Το HydroATLAS είναι μια συλλογή υδρολογικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών λεκανών απορροής σε παγκόσμια κλίμακα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παρέκταση της ανάλυσης στην παγκόσμια χερσαία επιφάνεια. Απαρτίζεται από το RiverATLAS και BasinATLAS, όπου τα χαρακτηριστικά δίνονται σε επίπεδο υδρογραφικού δικτύου και επίπεδο λεκάνης απορροής αντίστοιχα. Το σύνολο δεδομένων του HydroATLAS προσφέρει μία σουίτα 12 διαφορετικών επιπέδων χωρικής διακριτοποίησης, όπου το κάθε επίπεδο περιέχει ένθετες υπο-λεκάνες που υποδιαιρέθηκαν και κωδικοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την τυπολογική ιδέα του συστήματος (Pfaffstetter, 1989), το οποίο παρέχει μια μεθοδολογία για την κατανομή των υπο-λεκανών σε διαφορετικές κλίμακες με ιεραρχικό και συστηματικό τρόπο. Οι λεκάνες απορροής της μελέτης εξετάστηκαν στο επίπεδο χωρικής διακριτοποίησης Pfaffstetter 4 του HydroATLAS με γνώμονα ότι η διακριτοποίηση αυτή έχει κοινά χαρακτηριστικά με αυτά της οριοθέτησης GRDC (όπως μέση επιφάνεια, μέσο μήκος κ.ά.), προκειμένου να υπάρχει ομοιογένεια μεταξύ συσχέτισης και παρέκτασης. Στο επίπεδο αυτό, η επιφάνεια της γης χωρίζεται σε 1321 λεκάνες απορροής του HydroATLAS.

3.2 Δεδομένα

3.2.1 Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά λεκανών απορροής

Τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής, εφόσον συσχετιστούν με τις παραμέτρους διόδευσης, θα επιτρέψουν την παρέκταση της βελτιστοποίησης σε παγκόσμια κλίμακα. Κατά συνέπεια, επιλέχθηκαν έξι χαρακτηριστικά των λεκανών, τα οποία έχουν επίδραση στη διόδευση της ποτάμιας ροής (Liston et al., 1994; Miller et al., 1994; Oki et al., 1999, 1998). Αναλυτικά, μελετήθηκαν η έκταση της λεκάνης, το ισοδύναμο μήκος λιμνών, η έκταση ποταμού, η κλίση του εδάφους, η κλίση της ροής του ποταμού, και το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου (Πίνακας 3.1). Σημειώνεται, ότι το ισοδύναμο μήκος λιμνών έχει προκύψει από τον υπολογισμό του ποσοστού επιφάνειας λιμνών (Limnicity, lka_pc ; Messenger et al., 2016) πολλαπλασιασμένο με το μήκος του υδρογραφικού δικτύου κάθε λεκάνης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μία προσέγγιση της υστέρησης της οριζόντιας κίνησης της απορροής, λόγω λιμναζόντων υδάτων. Δεδομένα για τις παραπάνω παραμέτρους αντλήθηκαν από το σετ δεδομένων BasinATLAS και RiverATLAS (Linke et al., 2019). Ο Χάρτης 3.2 παρουσιάζει τη χωρική κατανομή τους. Οι χάρτες παρατίθενται σε υψηλή ανάλυση στο Μέρος Α των Παραρτημάτων.

Τα παραπάνω φυσιογραφικά χαρακτηριστικά είναι διαθέσιμα για τις λεκάνες απορροής του HydroATLAS. Το γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών ArcGIS Pro, χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των φυσιογραφικών δεδομένων για τις λεκάνες απορροής του GRDC. Ο υπολογισμός αυτός έγινε με την υπέρθεση των λεκανών GRDC στα γεωχωρικά δεδομένα του HydroATLAS και με τη γεωστατιστική τους ανάλυση.

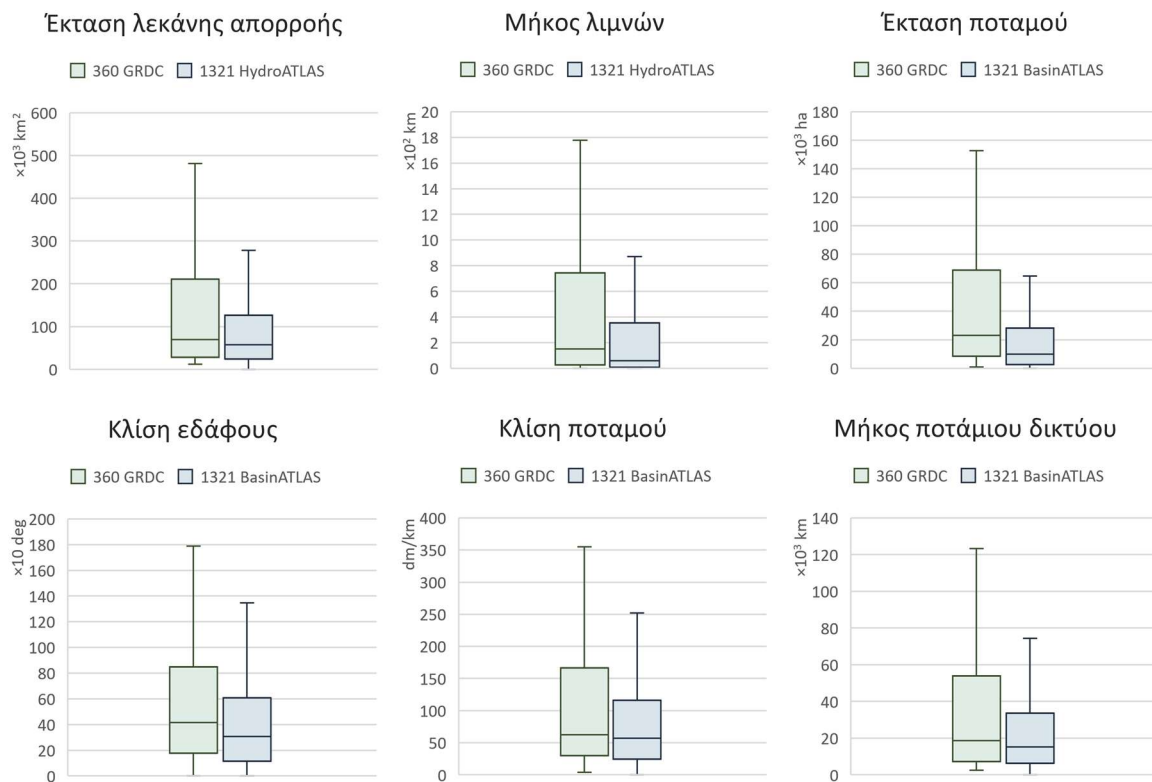


Χάρτης 3.2. Χωρική κατανομή φυσιογραφικών χαρακτηριστικών μελέτης σε παγκόσμια κλίμακα

Πίνακας 3.1. Φυσιογραφικά χαρακτηριστικά λεκανών μελέτης

Μεταβλητή	Μονάδες	Περιγραφή	Πηγή
sum_catch_skm	km ²	Συνολική έκταση λεκάνης απορροής	Lehner et al., 2008
eqv_lake_lng_km	m	Ισοδύναμο μήκος λίμνης	Messenger et al., 2016
sum_ria_ha_ssu	ha	Μέση έκταση ποταμού στη συνολική λεκάνη απορροής ανάντη του σημείου εκροής	Lehner et al., 2013
mean_slp_dg_cav	(×10) deg	Μέση κλίση εδάφους στη λεκάνη απορροής	Robinson et al., 2014
mean_sgr_dk_rav	dm/km	Κλίση ροής κατά μήκος του τμήματος ποταμού	Robinson et al., 2014
sum_riv_lng_km	km	Μήκος υδρογραφικού δικτύου	Lehner et al., 2008

Όπως προαναφέρθηκε, τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά των 360 λεκανών GRDC χρησίμευσαν για την επιλογή του επιπέδου χωρικής διακριτοποίησης του HydroATLAS, που θα χρησιμοποιηθεί για την παρέκταση στην παγκόσμια κλίμακα, με γνώμονα τη μεταξύ τους ομοιογένεια.



Σχήμα 3.1. Κατανομή των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών

Μολονότι οι GRDC λεκάνες μελέτης βασίζονται σε διαφορετική οριοθέτηση από τις BasinATLAS λεκάνες, οι επιλεγμένες λεκάνες κρίθηκαν αντιπροσωπευτικές για την ανάπτυξη της μεθόδου. Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η κατανομή για τα έξι χαρακτηριστικά των 360 GRDC λεκανών μελέτης, σε σχέση με το σύνολο των 1321 λεκανών του επιπέδου 4 του HydroATLAS. Στο σχήμα φαίνεται ότι οι διάμεσες τιμές μεταξύ των δύο συνόλων δεν εμφανίζουν μεγάλες διαφορές, αλλά και το εύρος των λεκανών HydroATLAS βρίσκεται σε ικανοποιητικό βαθμό εντός του εύρους των επιλεγμένων λεκανών GRDC, υπερκαλύπτοντας το.

3.2.2 Μετεωρολογικές μεταβλητές

Το JULES τροφοδοτήθηκε με μετεωρολογικά δεδομένα του πρόσφατου παρελθόντος για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε το σύνολο δεδομένων GSWP3-W5E5 (Lange, 2019a, 2020), που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP; Warszawski et al., 2014).

Το GSWP3-W5E5 είναι ένας συνδυασμός μεθοδολογιών και δεδομένων παρατήρησης και μετά-ανάλυσης. Πιο αναλυτικά, το σετ δεδομένων GSWP3 (Global Soil Wetness Project – Phase 3) απαρτίζεται από μετεωρολογικές παρατηρήσεις ημερήσιου βήματος σε παγκόσμια κλίμακα και ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Βασίζεται σε reanalysis του σετ δεδομένων (Compro et al., 2011) και καλύπτει την περίοδο 1901-2010. Το W5E5 καλύπτει όλη την χερσαία επιφάνεια σε οριζόντια ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ και ημερήσιο βήμα από το 1979 έως το 2016, και είναι αποτέλεσμα της εφαρμογής της μεθοδολογίας του WATCH Forcing Data (Cucchi et al., 2020; Weedon et al., 2014), στα δεδομένα reanalysis του ERA5 (Hersbach et al., 2020), και στα δεδομένα βροχόπτωσης από το Global Precipitation Climatology Project (GPCP; Adler et al., 2018). Τέλος, το GSWP3-W5E5 αποτελεί ένα συνδυασμό των παραπάνω δεδομένων μετά από ομογενοποίηση του GSWP3, βάσει του W5E5 για την περίοδο 1901-1978. Η ομογενοποίηση έγινε με τη μέθοδο ISIMIP3BASD (Lange, 2019b), η οποία μείωσε και τις ασυνέχειες της μετάβασης από το 1978 στο 1979.

Ο Πίνακας 3.2 παρουσιάζει τις μετεωρολογικές μεταβλητές του σετ δεδομένων GSWP3-W5E5.

Πίνακας 3.2. Μετεωρολογικές μεταβλητές εισόδου του μοντέλου JULES

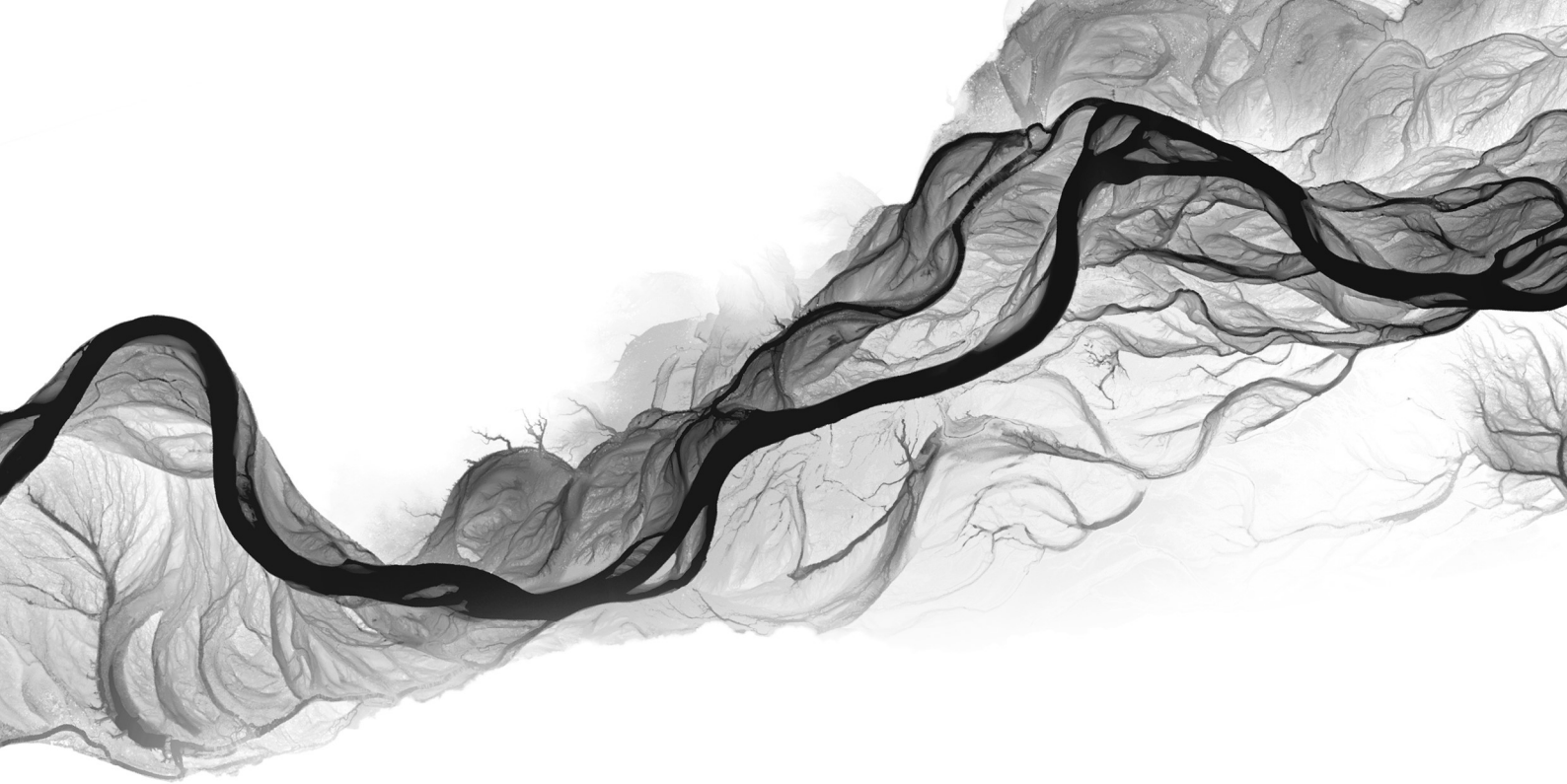
Κλιματικές Μεταβλητές JULES	
huss	Ειδική υγρασία κοντά στην επιφάνεια
tasmax	Μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία
tas	Μέση ημερήσια θερμοκρασία
tasmin	Ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία
rlds	Μεγάλου μήκους κύματος προσπίπτουσα ακτινοβολία
wind	Δυναμικό ανέμου κοντά στην επιφάνεια
rsds	Μικρού μήκους κύματος προσπίπτουσα ακτινοβολία
ps	Επιφανειακή πίεση αέρα
pr	Ολική κατακρήμνιση

Επισημαίνεται ότι η εισαγωγή της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας στο JULES γίνεται με εύρος τιμών θερμοκρασίας, δηλαδή λαμβάνεται η εισαγωγή της διαφοράς της ελάχιστης από τη μέγιστη

θερμοκρασία. Το JULES λειτουργεί σε υπο-ημερήσιο χρονικό βήμα και σε χωρική ανάλυση 0.5°. Οι μετεωρολογικές μεταβλητές είναι διαθέσιμες από το ISIMIP, και υπόκεινται στους όρους χρήσης του ISIMIP.

3.2.3 Δεδομένα παροχής GRDC

Η αξιολόγηση της υπολογισμένης παροχής, μετά από διόδευση της απορροής που υπολόγισε το JULES για κάθε προσομοίωση, πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας με ιστορικές παροχές από τη βάση δεδομένων του GRDC. Ανακτήθηκαν δεδομένα ημερήσιας παροχής για τους 360 σταθμούς μέτρησης παροχής, που ήταν αντιπροσωπευτικοί για τις λεκάνες που επιλέχθηκαν.



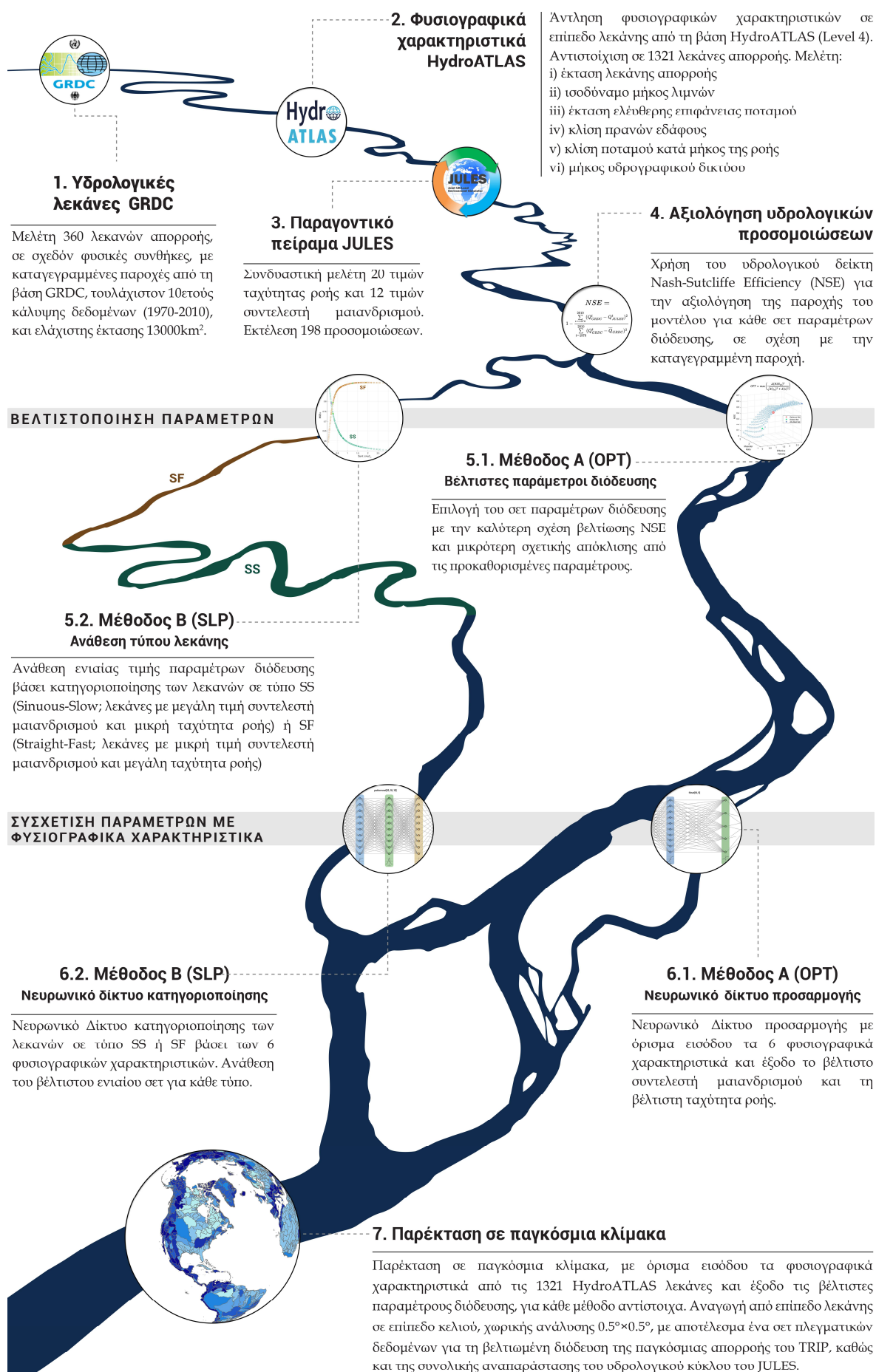
4

Μεθοδολογία

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την παραμετροποίηση του συστήματος διόδευσης TRIP. Αρχικά, ήταν αναγκαίο να διασαφηνιστεί η μεταβολή της υδρολογικής απόδοσης κάθε λεκάνης, για τη δοκιμή διαφορετικών παραμέτρων διόδευσης. Ένα παραγοντικό πείραμα εκτελέστηκε, μελετώντας συνδυαστικά είκοσι τιμές ταχύτητας ροής και δώδεκα συντελεστές μαιανδρισμού, καταλήγοντας σε 198 προσομοιώσεις. Ο δείκτης Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των παροχών του μοντέλου για κάθε σετ παραμέτρων διόδευσης του πειράματος, συγκρίνοντας τις με τις καταγεγραμμένες παροχές GRDC. Βάσει ποιοτικής ανάλυσης της μεταβολής του NSE_{10} με την ταχύτητα ροής και το συντελεστή μαιανδρισμού, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης των παραμέτρων διόδευσης. Η πρώτη μέθοδος αναπτύχθηκε με σκοπό την επιλογή του σετ τιμών, που σημείωσε την καλύτερη βελτίωση NSE_{10} , για τη μικρότερη απόκλιση από το NSE_{10} του προκαθορισμένου σετ. Η δεύτερη μέθοδος που μελετάται, εστιάζει στην κατηγοριοποίηση των λεκανών σε δύο τύπους, με βάση το λόγο των παραμέτρων διόδευσης. Η μέση τιμή της κάθε παραμέτρου διόδευσης υπολογίστηκε για κάθε τύπο και ανατέθηκε ως ενιαία τιμή. Η συσχέτιση των βέλτιστων παραμέτρων διόδευσης με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά κάθε λεκάνης, πραγματοποιήθηκε μέσω της ανάπτυξης Νευρωνικών Δικτύων, κατάλληλα για κάθε μέθοδο. Τα εκπαιδευμένα νευρωνικά δίκτυα, χρησιμοποιήθηκαν για την παρέκταση της εκάστοτε μεθόδου σε παγκόσμια κλίμακα, με όρισμα εισόδου τις φυσιογραφικές μεταβλητές από τις 1321 HydroATLAS λεκάνες, και έξοδο τις βέλτιστες παραμέτρους διόδευσης. Τα βέλτιστα σετ παραμέτρων κάθε μεθόδου ανάχθηκαν από επίπεδο λεκάνης απορροής σε επίπεδο κελιού και το αποτέλεσμα ήταν ένα σετ πλεγματικών δεδομένων, για την παραμετροποίηση του TRIP σε χωρική ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ και παγκόσμια κλίμακα.

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

*Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), από δεδομένα Lidar, του ποταμού Snake River. Πηγή: *Daniel Coe (2022)*

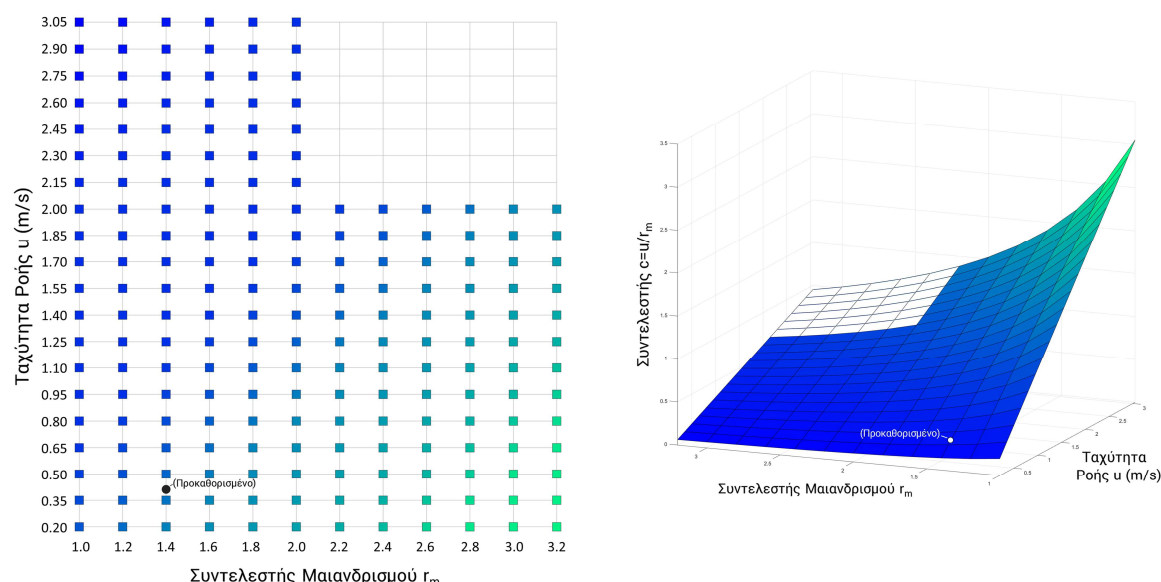


Σχήμα 4.1. Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε

4.1 Παραγοντικό πείραμα – 198 εκτελέσεις προσομοίωσης JULES

Στην προκαθορισμένη (default) παραμετροποίηση του JULES οι παράμετροι διόδευσης του TRIP έχουν ενιαία τιμή για όλη τη χερσαία επιφάνεια της γης, με ταχύτητα ροής u ίση με $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, και συντελεστή μαιανδρισμού r_m ίσο με 1.4. Για τη βελτίωση της διόδευσης πραγματοποιήθηκε παραγοντικό πείραμα, με στόχο να εξεταστεί η βελτίωση της υδρολογικής προσομοίωσης με χρήση διαφορετικών τιμών ταχύτητας ροής και συντελεστή μαιανδρισμού σε επίπεδο υδρολογικής λεκάνης.

Μελετήθηκαν είκοσι διαφορετικές τιμές ταχύτητας ροής στο φάσμα από $0.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ μέχρι $3.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ με βήμα $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, καθώς και δώδεκα τιμές του συντελεστή μαιανδρισμού από την τιμή 1.0 έως την τιμή 3.2 με βήμα 0.2 (Σχήμα 4.2), καταλήγοντας σε 198 προσομοιώσεις. Το εύρος των τιμών επιλέχθηκε έτσι ώστε να εμπεριέχει τιμές ταχύτητας ροής, αλλά και τιμές συντελεστών μαιανδρισμού που έχουν εξεταστεί στο παρελθόν (Miller et al., 1994) ή έχουν προκύψει από μετρήσεις (Schulze et al., 2005; Verzano et al., 2012). Οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν απομακρυσμένα στον υπερυπολογιστή (συστοιχία IBM/Lenovo NeXtScale, HPC Service) του Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) στη Γερμανία.



Σχήμα 4.2. 198 σετ παραμέτρων διόδευσης (αριστερά) παραγοντικού πειράματος και η αντίστοιχη τιμή του συντελεστή c (δεξιά).

4.2 Δείκτες αξιολόγησης υδρολογικών προσομοιώσεων

Η αξιολόγηση του κάθε σετ παραμέτρων του TRIP έγινε για κάθε λεκάνη ξεχωριστά, υπολογίζοντας το δείκτη αξιολόγησης NSE μεταξύ των προσομοιωμένων και καταγεγραμμένων παροχών. Συγκεκριμένα, με βάση τις συντεταγμένες του σταθμού GRDC, επιλέχθηκε η χρονοσειρά προσομοιωμένης παροχής στο κελί που αντιστοιχεί ο εκάστοτε υδρομετρικός σταθμός, πραγματοποιώντας έτσι μία αντικειμενική σύγκριση. Επίσης, ο υπολογισμός του δείκτη NSE έγινε σε χρονικό βήμα 10 ημερών, υπολογίζοντας δηλαδή τον μέσο όρο των παροχών του μοντέλου και των παρατηρήσεων ανά 10 ημέρες, με στόχο να αποσβεστούν χρονικές ασυνέπειες μικρότερου

χρονικού βήματος. Η εξίσωση (1) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του NSE_{10} σε κάθε μία από τις 360 λεκάνες για το σύνολο των 198 προσομοιώσεων.

4.3 Μεταβολή Επίδοσης (NSE) – Ταχύτητας (u) – Συντελεστή μαιανδρισμού (r_m)

Η συμπεριφορά της κάθε λεκάνης σε κάθε σετ παραμέτρων διόδευσης μπορεί να απεικονιστεί με ένα διάγραμμα μεταβολής του δείκτη NSE_{10} συναρτήσει της ταχύτητας ροής u και του συντελεστή μαιανδρισμού r_m . Επομένως, για τη βελτιστοποίηση της διόδευσης απαιτείται η επίλυση ενός τρισδιάστατου προβλήματος.

Η μεταβολή της επίδοσης για κάθε λεκάνη εξετάστηκε ποιοτικά από τα διαγράμματα $NSE_{10} - u - r_m$, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη δύο μεθόδων βελτιστοποίησης.

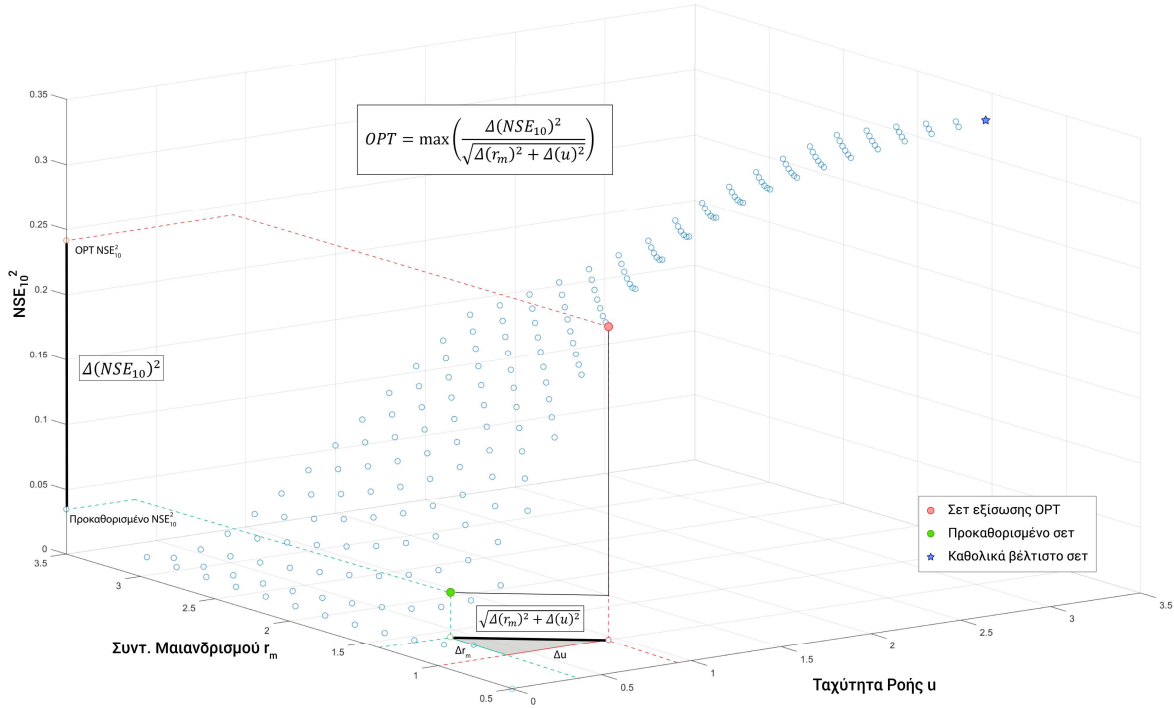
4.3.1 Μέθοδος A – Βέλτιστες παράμετροι διόδευσης

Από την ποιοτική ανάλυση των διαγραμμάτων $NSE_{10} - u - r_m$, παρατηρήθηκε, ότι η βελτίωση του NSE_{10} παρουσιάζει μια μορφή λογαριθμικής συμπεριφοράς για τα διάφορα σετ παραμέτρων διόδευσης. Συμπεραίνεται, επομένως, ότι σημαντική βελτίωση της διόδευσης παρατηρείται για μικρή αλλαγή των παραμέτρων διόδευσης. Με περαιτέρω μεταβολή των παραμέτρων η διόδευση εξακολουθεί να βελτιώνεται, αλλά η βελτίωση αυτή παρατηρήθηκε οριακή για μεγάλες όμως μεταβολές της ταχύτητας ροής και συντελεστή μαιανδρισμού. Παρατηρήθηκαν, επίσης, περιπτώσεις όπου το βέλτιστο σετ παραμέτρων αποτελούσε οριακή τιμή του πειράματος. Βάσει των παραπάνω, η επιλογή του καθολικά βέλτιστου σετ τιμών, δηλαδή του σετ τιμών που έδωσε τη μέγιστη τιμή NSE_{10} , κρίθηκε ακατάλληλη για την αποφυγή οριακών τιμών.

Η εξίσωση (9), αντιμετωπίζει τα παραπάνω ζητήματα, επιλέγοντας το σετ παραμέτρων, το οποίο σημειώνει τη μέγιστη βελτίωση του NSE_{10} , σε σχέση με τη μεταβολή των παραμέτρων r_m και u έναντι των προκαθορισμένων τιμών.

$$OPT = \max \left(\frac{\Delta(NSE_{10})^2}{\sqrt{\Delta(r_m)^2 + \Delta(u)^2}} \right) \quad (9)$$

Ο αριθμητής της (9) δηλώνει το τετράγωνο της διαφοράς του $NSE_{10.default}$ από το NSE_{10} που έχει επιτευχθεί από το εκάστοτε σετ παραμέτρων, ενώ ο παρονομαστής υπολογίζει τη θεωρητική υποτείνουσα του τριγώνου με πλευρές τις διαφορές της ταχύτητας και συντελεστή μαιανδρισμού από τις προκαθορισμένες τιμές. Δηλαδή η εξίσωση σταθμίζει την εκάστοτε βελτίωση του NSE_{10} με την αύξηση ή μείωση του σετ παραμέτρων διόδευσης από το προκαθορισμένο. Με αυτό τον τρόπο η εξίσωση απορρίπτει τα σετ τιμών που έχουν πετύχει βελτίωση του NSE_{10} για σημαντική όμως απόκλιση τους από το προκαθορισμένο. Το τετράγωνο της διαφοράς εξυπηρετεί τη λήψη βέλτιστων τιμών που τείνουν πλησιέστερα στο καθολικά βέλτιστο. Το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει μια γραφική αναπαράσταση της λειτουργίας της εξίσωσης επιλογής βέλτιστων παραμέτρων OPT.



Σχήμα 4.3. Γραφική αναπαράσταση της εξίσωσης επιλογής βέλτιστων παραμέτρων OPT

Η εξίσωση (9) εφαρμόζεται επαναληπτικά για όλες τις λεκάνες, επιλέγοντας κάθε φορά το βέλτιστο σετ παραμέτρων.

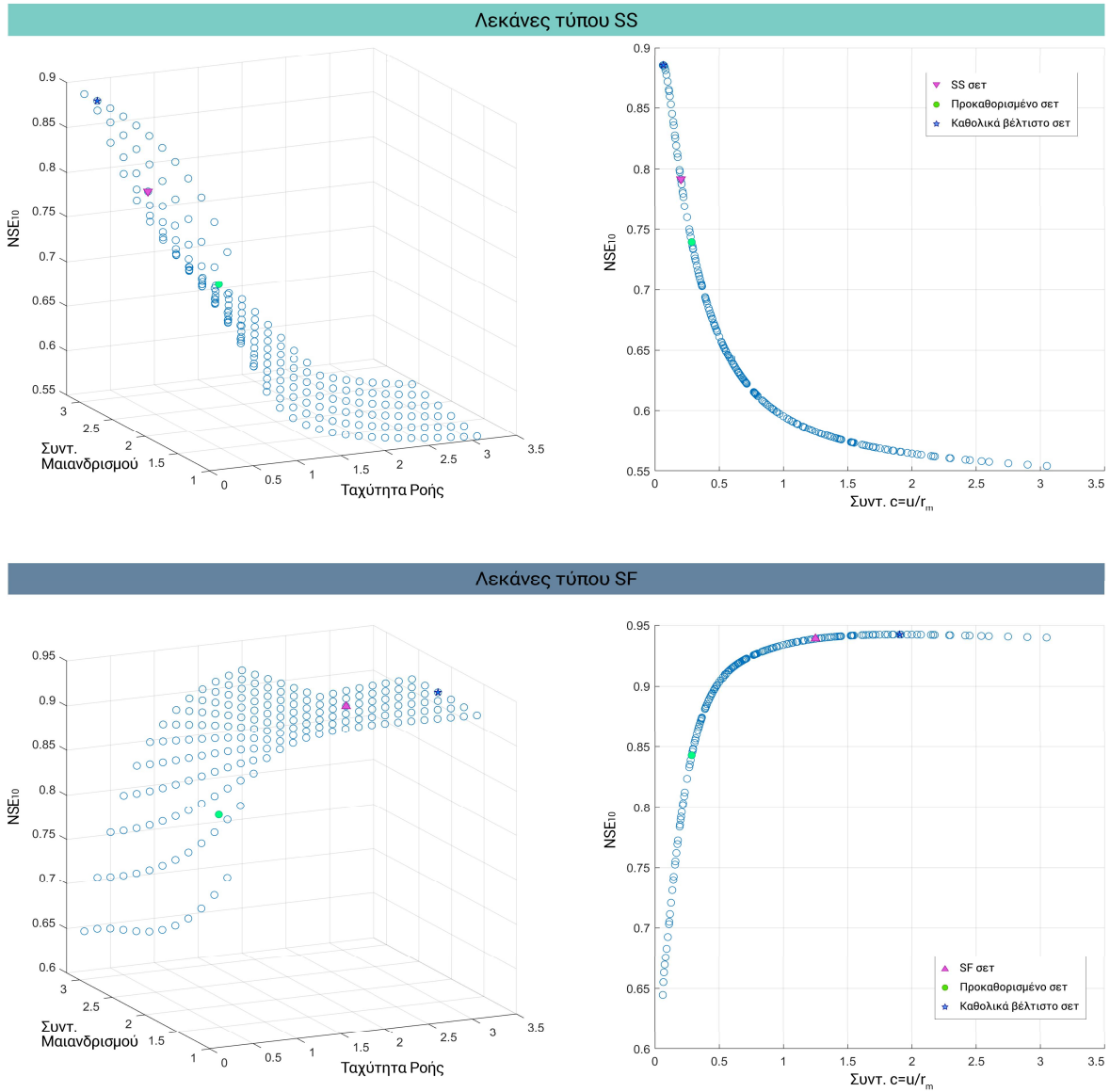
4.3.2 Μέθοδος B – Ανάθεση τύπου λεκάνης

Επιπλέον της εξίσωσης βέλτιστου σετ παραμέτρων, μελετήθηκε μία δεύτερη μέθοδος. Μετά από ποιοτική ανάλυση των γραφημάτων $NSE_{10} - u - r_m$, παρατηρήθηκε, ότι η αύξηση του NSE_{10} επιτυγχανόταν είτε με την αύξηση της ταχύτητας ροής και ταυτόχρονης μείωσης του συντελεστή μαιανδρισμού, είτε με αύξηση του συντελεστή μαιανδρισμού και μείωση της ταχύτητας. Επομένως, σκοπός της μεθόδου B, είναι η ταξινόμηση των λεκανών σε μία από τις δύο κατηγορίες, SF (Straight-Fast) για λεκάνες με μεγάλη ταχύτητα ροής και μικρό συντελεστή μαιανδρισμού, και SS (Sinuous-Slow) για λεκάνες με μεγάλο συντελεστή μαιανδρισμού και μικρή ταχύτητα ροής. Έπειτα, ανάλογα τον τύπο της λεκάνης, γίνεται η ανάθεση ενός προκαθορισμένου σετ παραμέτρων διόδευσης.

Καθώς η κλίση δεν ορίζεται σε τρεις διαστάσεις, έναντι του γραφήματος $NSE_{10} - u - r_m$, έγινε χρήση του γραφήματος $NSE_{10} - c$. Ο συντελεστής c (Εξ. 6) αποτελεί μία καλή ταυτόχρονη αναπαράσταση των παραμέτρων διόδευσης, ανεξάρτητα του μήκους κελιού, καθώς ο λόγος της ταχύτητας με το συντελεστή μαιανδρισμού είναι αυτός που λαμβάνεται άμεσα υπόψη από το TRIP. Η κλίση του γραφήματος $NSE_{10} - c$ για κάθε λεκάνη υπολογίστηκε βάσει της εξίσωσης (10).

$$SLP = \text{round}_{[-1,1]} \left(\frac{\sum \left((c - \bar{c}) \times (NSE_{10} - \overline{NSE_{10}}) \right)}{\sum (c - \bar{c})^2} \right) \quad (10)$$

Η εξίσωση (10) αρχικά επιστρέφει την κλίση της γραμμής παλινδρόμησης που προσαρμόζεται στα σημεία δεδομένων των ορισμάτων NSE_{10} και c (όπου \bar{c} η μέση τιμή του λόγου u/r_m). Έπειτα, τιμές μικρότερες του μηδενός, δηλαδή διαγράμματα με αρνητική κλίση λαμβάνουν την τιμή -1, χαρακτηρίζοντας έτσι λεκάνες SS, και τιμή 1, για λεκάνες SF, όταν η κλίση είναι θετική. Με τον τρόπο αυτό, οι λεκάνες κατηγοριοποιούνται σε δύο διακριτούς τύπους. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται ενδεικτικά διαγράμματα $NSE_{10} - u - r_m$ για κάθε τύπο λεκάνης, καθώς και η αντίστοιχη μεταβολή του NSE_{10} σε σχέση με το συντελεστή c .



Σχήμα 4.4. Ενδεικτικά γραφήματα μεταβολής NSE_{10} για τους δύο τύπους λεκανών SS και SF

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο μέσος όρος των καθολικά βέλτιστων ταχυτήτων ροής και συντελεστών μαιανδρισμού για τους δύο τύπους λεκανών και ορίζεται ως το προκαθορισμένο σελ σε κάθε τύπο αντίστοιχα.

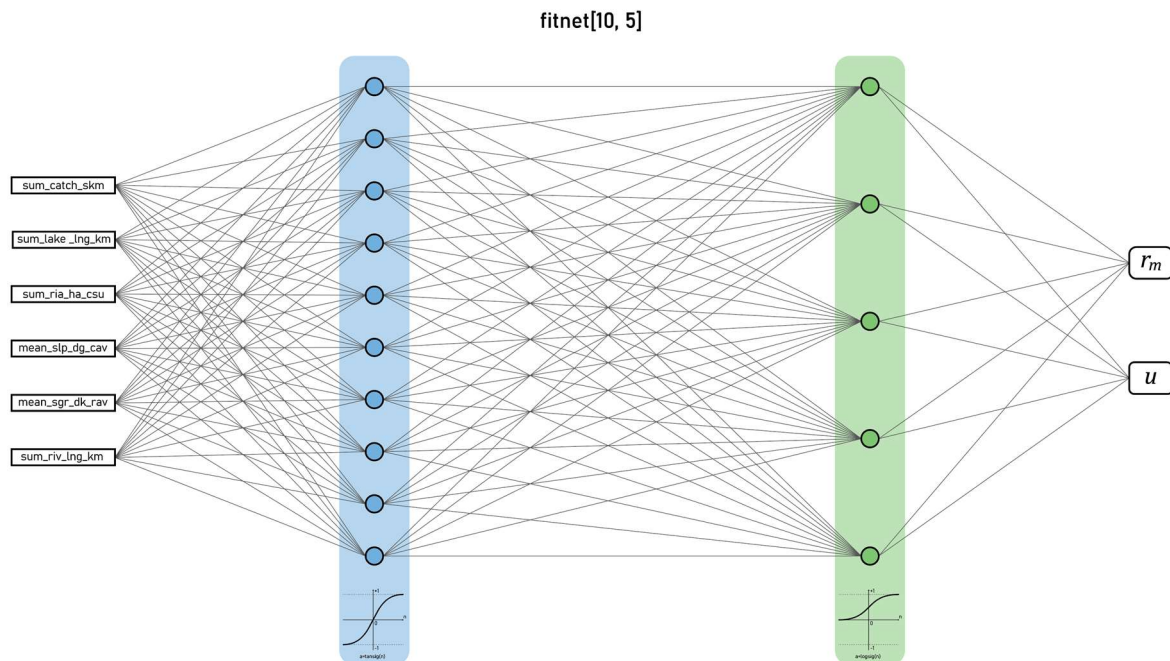
4.4 Συσχέτιση υδρολογικών και φυσιογραφικών μεταβλητών με χρήση ANN

Η συσχέτιση των βελτιωμένων παραμέτρων διόδευσης TRIP, με τις φυσιογραφικές μεταβλητές κάθε λεκάνης, είναι ένα απαραίτητο βήμα για την εφαρμογή της παρέκτασης των παραμέτρων μετά από βελτιστοποίηση, σε παγκόσμια κλίμακα.

Ένα feedforward ANN, μέσω της βιβλιοθήκης του Matlab, αναπτύχθηκε ώστε να συσχετίσει το βέλτιστο σειταχύτητα ροής και συντελεστή μαιανδρισμού με έξι φυσιογραφικά χαρακτηριστικά κάθε λεκάνης και για κάθε μέθοδο (OPT, ανάθεση τύπου λεκάνης). Αναλυτικά, το ANN εκπαιδεύτηκε με ορίσματα εισόδου την i) έκταση λεκάνης απορροής, ii) το μήκος λίμνης, iii) την επιφάνεια ποταμού, iv) την κλίση του εδάφους, v) την κλίση του ποταμού, και vi) το συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου σε επίπεδο λεκάνης απορροής. Για την ανάπτυξη του ANN χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι λεκανές που το καθολικά βέλτιστο NSE_{10} ήταν μεγαλύτερο του μηδενός. Το 70% των λεκανών αυτών επιλέχθηκαν τυχαία για την εκπαίδευση και επικύρωση του ANN σε κάθε μέθοδο. Το υπόλοιπο 30% των λεκανών δεν έλαβε καθόλου μέρος στην εκπαίδευση ή επικύρωση του ANN, αλλά χρησιμοποιήθηκε για την αμερόληπτη δοκιμή του τελικού ANN κάθε μεθόδου, αποτελώντας έτσι ένα αντικειμενικό μέτρο αξιολόγησης του ANN για τη μετέπειτα παρέκταση σε παγκόσμια κλίμακα.

4.4.1 Νευρωνικό δίκτυο προσαρμογής – Μέθοδος A (OPT)

Για τη μέθοδο βέλτιστου σειτα παραμέτρων μέσω της εξίσωσης OPT, χρησιμοποιήθηκε ένα feedforward ANN προσαρμογής (fitnet), με όρισμα εισόδου τις έξι φυσιογραφικές μεταβλητές των λεκανών και όρισμα εξόδου τη βέλτιστη ταχύτητα ροής και το βέλτιστο συντελεστή μαιανδρισμού (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5. Αρχιτεκτονική ANN προσαρμογής fitnet

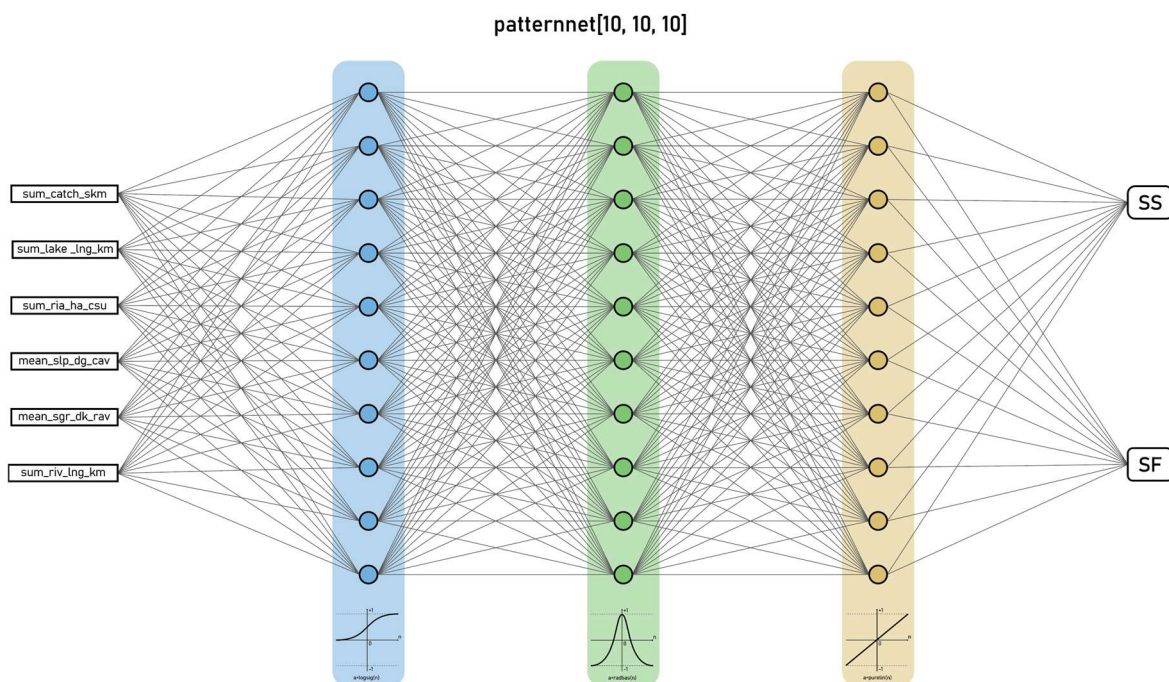
Εντός του ANN χρησιμοποιήθηκε το 70% των λεκανών για εκπαίδευση, 20% για επικύρωση και 10% για δοκιμή. Για την εκπαίδευση χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση Levenberg-Marquardt. Επιλέχθηκαν δύο κρυφά επίπεδα, με το πρώτο να αποτελείται από δέκα νευρώνες και υπερβολική σιγμοειδή συνάρτηση ενεργοποίησης (tansig), και το δεύτερο από πέντε νευρώνες με λογιστική σιγμοειδή συνάρτηση ενεργοποίησης (logsig). Ο Πίνακας B.1 στα Παραρτήματα παρουσιάζει λεπτομέρειες για την παραμετροποίηση του νευρωνικού δικτύου προσαρμογής.

Η αξιολόγηση του ANN πραγματοποιήθηκε υπολογίζοντας τους δείκτες $RMSE$ και R^2 ανάμεσα στο υπολογισμένο από το ANN σετ παραμέτρων και του σετ που προέκυψε από την εξίσωση βελτιστοποίησης για τις λεκάνες δοκιμής.

4.4.2 Νευρωνικό δίκτυο κατηγοριοποίησης – Μέθοδος B (SLP)

Στόχος του ANN στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η συσχέτιση των φυσιογραφικών μεταβλητών με τους δύο διακριτούς τύπους λεκανών. Επομένως, χρησιμοποιήθηκε ένα feedforward ANN κατηγοριοποίησης (patternnet) με όρισμα εισόδου τις έξι φυσιογραφικές μεταβλητές των λεκανών και όρισμα εξόδου τους δύο τύπους λεκανών, SS και SF (Σχήμα 4.6). Οι λεκάνες που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη του ANN χωρίζονται κατά 70% σε λεκάνες για εκπαίδευση, 25% για επικύρωση, ενώ το 5% των λεκανών χρησιμοποιείται για τη δοκιμή του ANN. Ορίστηκαν τρία κρυφά επίπεδα με δέκα νευρώνες το καθένα. Η εξίσωση Levenberg-Marquardt χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του νευρωνικού.

Η λογιστική σιγμοειδής συνάρτηση (logsig) χρησιμοποιήθηκε ως συνάρτηση ενεργοποίησης του πρώτου επιπέδου, η gaussian ακτινική (radbas) για το δεύτερο, και η γραμμική συνάρτηση (purelin) για το τρίτο κρυφό επίπεδο. Λεπτομέρειες για τη διαμόρφωση του ANN κατηγοριοποίησης παρουσιάζονται στον Ο Πίνακας B.2 στα Παραρτήματα .



Σχήμα 4.6. Αρχιτεκτονική ANN κατηγοριοποίησης patternnet

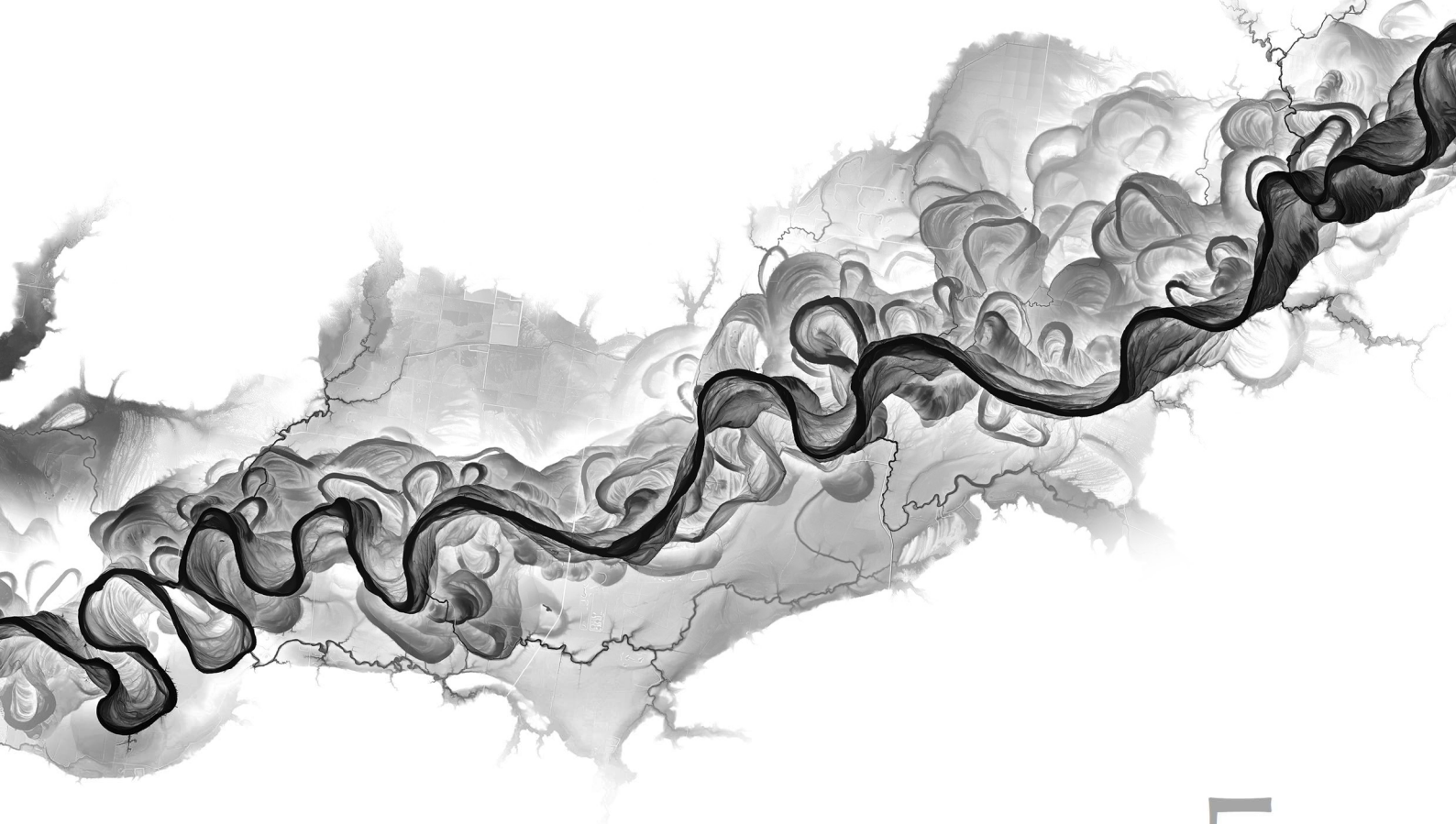
Η αξιολόγηση του ANN πραγματοποιήθηκε με πίνακες σύγχυσης, οι οποίοι ενδείκνυνται για προβλήματα κατηγοριοποίησης. Με αυτόν τον τρόπο διαμορφώθηκε το ANN, το οποίο σημείωσε τη μικρότερη σύγχυση στην κατηγοριοποίηση των λεκανών του δείγματος δοκιμής.

4.5 Παρέκταση σε παγκόσμια κλίμακα

Τα εκπαιδευμένα ANN, χρησιμοποιήθηκαν για την παρέκταση της εκάστοτε μεθόδου σε παγκόσμια κλίμακα, με ορίσματα εισόδου τις φυσιογραφικές μεταβλητές από τις 1321 HydroATLAS λεκάνες.

Το νευρωνικό δίκτυο προσαρμογής της μεθόδου Α, χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη του βέλτιστου σετ παραμέτρων διόδευσης για το σύνολο των 1321 λεκανών απορροής. Τιμές ταχύτητας και συντελεστή μαιανδρισμού, οι οποίες ξεπερνούσαν τα όρια του εύρους του παραγοντικού πειράματος, στρογγυλοποιήθηκαν στο κοντινότερο κατώτερο ή ανώτερο όριο αντίστοιχα. Το νευρωνικό δίκτυο κατηγοριοποίησης που αναπτύχθηκε για τη μέθοδο Β, κατέταξε κάθε λεκάνη σε τύπο SS ή SF, με τον κάθε τύπο λεκάνης να λαμβάνει ένα προκαθορισμένο σετ παραμέτρων διόδευσης.

Τα αποτελέσματα παρέκτασης κάθε μεθόδου σε παγκόσμια κλίμακα λαμβάνονται σε επίπεδο λεκάνης. Το λογισμικό ArcGIS Pro χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία πλεγματικών σετ δεδομένων για την παραμετροποίηση του TRIP σε χωρική ανάλυση $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Λαμβάνονται, συνεπώς, οι παράμετροι διόδευσης για κάθε κελί, και αποθηκεύονται σε ένα αρχείο netCDF, με σκοπό να είναι σε θέση να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα προκαθορισμένο σετ δεδομένων για προσομοιώσεις του μοντέλου JULES, ή ακόμα και για αυτόνομη/ανεξάρτητη (standalone) προσομοίωση του TRIP.



5

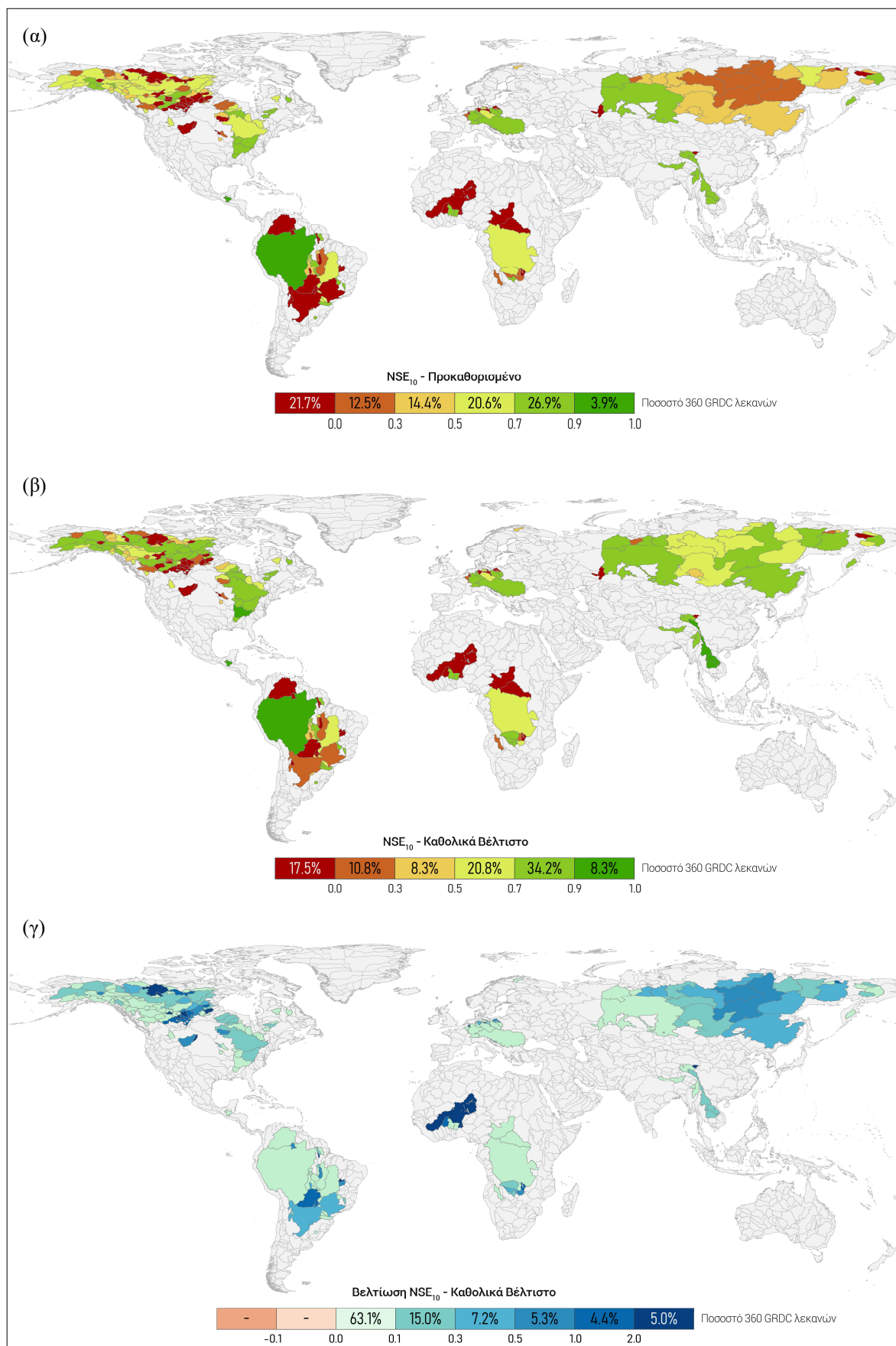
Αποτελέσματα και συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης και γίνεται ο σχολιασμός τους. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων χωρίζεται σε δύο επιμέρους φάσεις. Αρχικά, παρατίθενται τα αποτελέσματα απόδοσης των δύο μεθόδων στο στάδιο της βελτιστοποίησης των παραμέτρων διόδευσης, και σε δεύτερη φάση κατά το στάδιο της συσχέτισής τους με τις φυσιογραφικές παραμέτρους, μέσω ANNs. Έπειτα, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συγκρίνονται και σχολιάζεται η αποδοτικότερη μέθοδος για κάθε στάδιο. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παρέκτασης σε παγκόσμια κλίμακα τόσο σε επίπεδο λεκάνης, όσο και σε επίπεδο κελιού χωρικής ανάλυσης $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

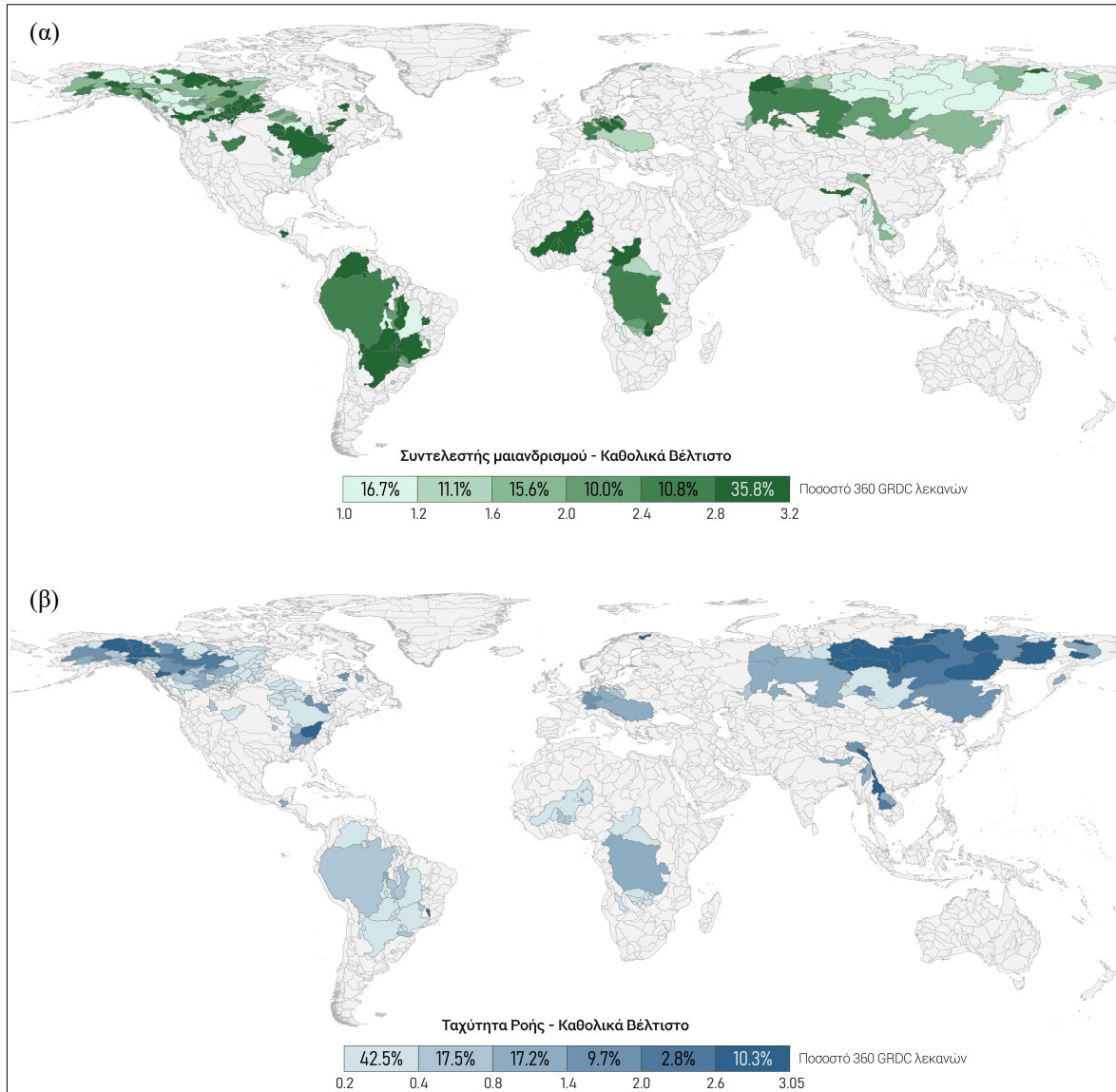
5.1 Μέγιστη θεωρητική βελτίωση (NSE)

Για να υπάρχει μια αντικειμενική εικόνα της βελτίωσης που δύναται να επιτευχθεί σε κάθε μέθοδο, παρουσιάζεται η μέγιστη θεωρητική βελτίωση, όπως αυτή προκύπτει από την εφαρμογή του παραγοντικού πειράματος. Η βελτίωση αυτή αντιστοιχεί στις παραμέτρους διόδευσης με το καθολικά βέλτιστο NSE_{10} που έχει επιτευχθεί. Ο Χάρτης 5.1.α παρουσιάζει το NSE_{10} για το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων, ενώ ο Χάρτης 5.1.β παρουσιάζει το αντίστοιχο NSE_{10} για τις καθολικά βέλτιστες. Ο Χάρτης 5.1.γ παρουσιάζει τη βελτίωση του NSE_{10} σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ, και στη συνέχεια απεικονίζεται η κατανομή των καθολικά βέλτιστων παραμέτρων του συντελεστή μαιανδρισμού (Χάρτης 5.2.α), και της ταχύτητας ροής (Χάρτης 5.2.β).

*Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), από δεδομένα Lidar, του Κόκκινου Ποταμού (Red River). Πηγή: *Daniel Coe (2022)*



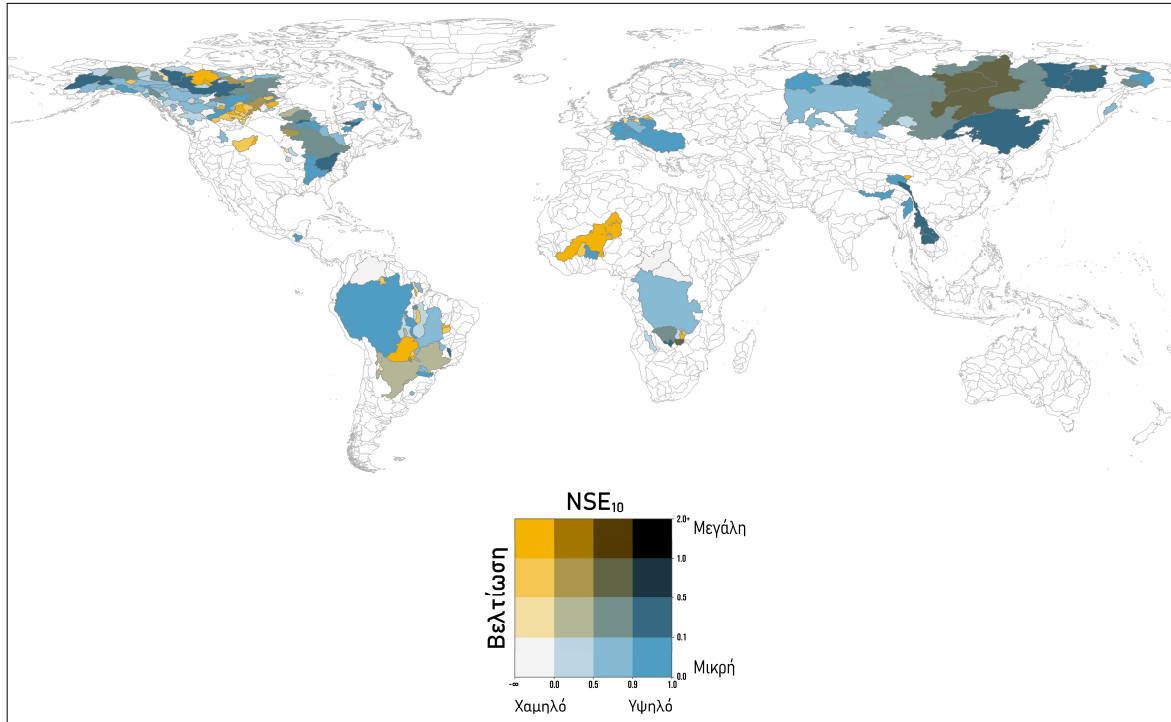
Χάρτης 5.1. Απόδοση NSE_{10} των λεκανών μελέτης για τις προκαθορισμένες παραμέτρους διόδευσης (α), για τις καθολικά βέλτιστες παραμέτρους (β), και η διαφορά τους, υποδηλώνοντας τη μέγιστη βελτίωση (γ)



Χάρτης 5.2. Χωρική κατανομή καθολικά βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού (α) και καθολικά βέλτιστης ταχύτητας ροής (β)

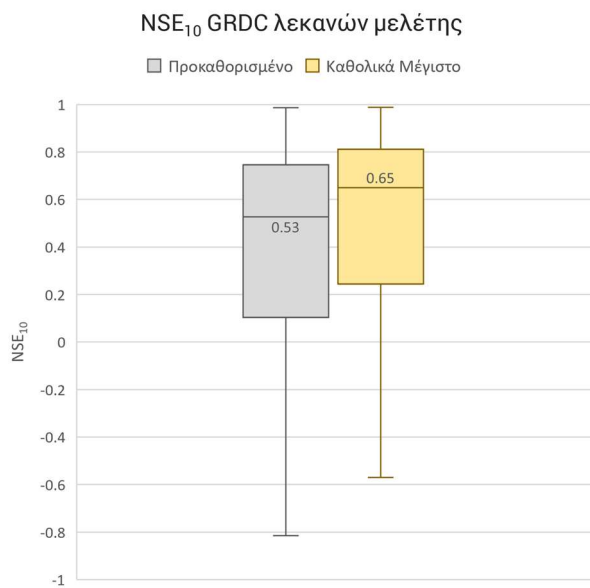
Ο Χάρτης 5.1.α υποδεικνύει, ότι το προκαθορισμένο σαι παραμέτρων διόδευσης αποτελεί μία γενικά καλή αναπαράσταση της διόδευσης, με το 51.4% των λεκανών να σημειώνει NSE_{10} μεγαλύτερο του 0.5. Συγκεκριμένα, το προκαθορισμένο σαι για 3.9% του συνόλου των λεκανών που αντιστοιχούν σε μεγάλα ποτάμια, όπως του Αμαζόνιου, του Μισισσιππή, και του Μεκόνγκ, παρουσίασε αρκετά υψηλές τιμές NSE_{10} . Οι υψηλές αυτές τιμές απόδοσης είναι λογικές, καθώς οι λεκάνες αυτές χρησιμοποιήθηκαν από τους Oki et al., (1999) για τη βαθμονόμηση και αξιολόγηση του προκαθορισμένου σαι. Παρατηρείται, επίσης, ένα σημαντικό ποσοστό λεκανών, 21.7%, το οποίο σημειώνει αρνητική τιμή NSE_{10} , υποδηλώνοντας έτσι έλλειψη της ικανότητας του μοντέλου να προσομοιώσει καλύτερα από τη μέση τιμή των ιστορικών παρατηρήσεων.

Το NSE_{10} που επιτεύχθηκε για το καθολικά βέλτιστο σαι παραμέτρων κάθε λεκάνης, μπορεί να υποδείξει τόσο την επιρροή του σαι παραμέτρων στη βελτίωση της διόδευσης, όσο και τις προσδοκίες βελτίωσης.



Χάρτης 5.3. Σχετική βελτίωση του NSE_{10} των λεκανών μελέτης σε σχέση με το καθολικά βέλτιστο NSE_{10}

Ο Χάρτης 5.1.β, αναπαριστά αύξηση του ποσοστού των λεκανών που η προσομοίωσή τους μπορεί να χαρακτηριστεί καλή, από 51.4% σε 63.3%, ενώ σημειώθηκε μείωση των λεκανών με κακή συμπεριφορά, από 21.7% σε 17.5%. Από το Σχήμα 5.1 φαίνεται, ότι το καθολικά βέλτιστο σετ παραμέτρων οδηγεί σε μία αύξηση κατά 0.12 του διάμεσου NSE_{10} . Ο Χάρτης 5.1 παρουσιάζει και χωρικά τη βελτίωση του NSE_{10} για τις καθολικά βέλτιστες παραμέτρους, σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων.



Σχήμα 5.1. Κατανομή NSE_{10} προκαθορισμένου και καθολικά βέλτιστου σετ παραμέτρων διόδεσης

Για την αξιολόγηση της βελτίωσης είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη και το NSE_{10} που έχει επιτευχθεί, καθώς μία μεγάλη βελτίωση μπορεί να είναι αδιάφορη, όταν το τελικό NSE_{10} παραμένει αρνητικό. Ο Χάρτης 5.3 παρουσιάζει τη γενική-ωφέλιμη βελτίωση σταθμίζοντας τη μέγιστη βελτίωση ως προς το καθολικά βέλτιστο NSE_{10} , κατηγοριοποιώντας έτσι τις λεκάνες που η βελτίωση έχει (ή όχι) ουσιαστικό αντίκτυπο. Μπορεί να παρατηρηθεί έτσι, ότι η βελτίωση προσομοίωσης για τις υδρολογικές λεκάνες που ανήκουν στην πρώτη στήλη του υπομνήματος, και παρουσιάζονται στο χάρτη με αποχρώσεις κίτρινου χρώματος, είναι άνευ σημασίας, καθώς ανεξάρτητα της βελτίωσης, δεν υπάρχουν παράμετροι διόδεσης που να επιτύχουν NSE_{10} μεγαλύτερο του μηδενός. Λαμβάνοντας όλα

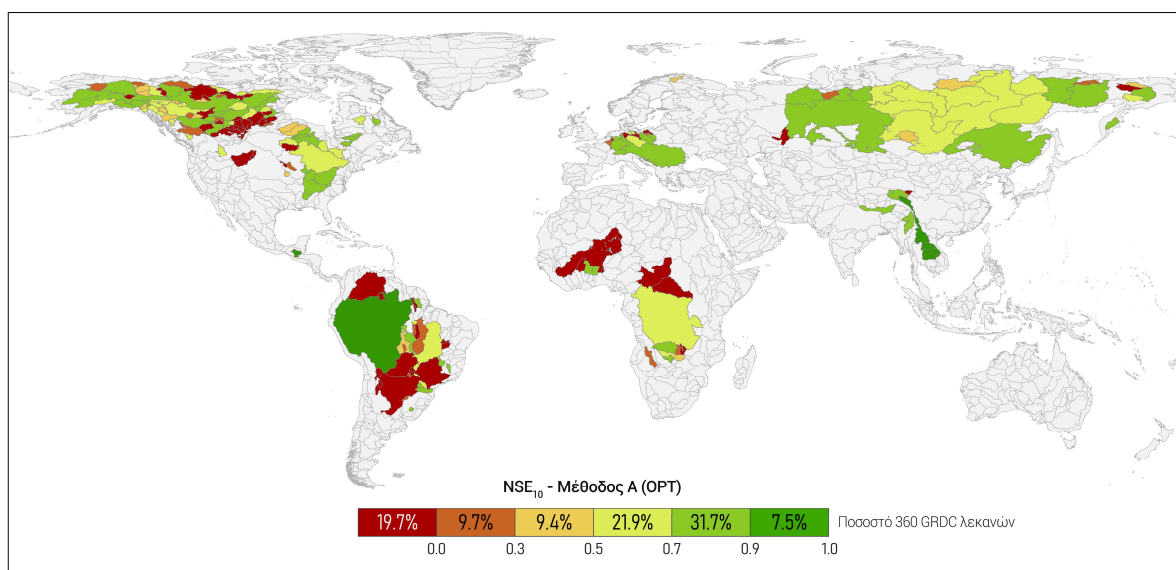
τα παραπάνω υπόψη, τη σημαντικότερη βελτίωση σημειώνουν κυρίως οι λεκάνες μελέτης της Βόρειας Αμερικής και Βόρειας Ασίας.

Ο Χάρτης 5.2.α και Χάρτης 5.2.β αναπαριστούν το συντελεστή μαιανδρισμού και την ταχύτητα ροής αντίστοιχα, που συντέλεσαν στη μέγιστη βελτίωση. Το 72.2% των λεκανών χαρακτηρίζεται από βέλτιστο συντελεστή μαιανδρισμού, από 1.6 έως 3.2, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το προκαθορισμένο 1.4. Επίσης, για τις περισσότερες λεκάνες της Βόρειας Ασίας και για έναν αριθμό λεκανών στη Βόρεια Αμερική, η βέλτιστη απόδοση επιτεύχθηκε για συντελεστή μαιανδρισμού μικρότερο του 1.2. Οι ίδιες λεκάνες παρουσιάζουν ταχύτητα ροής μεγαλύτερη των $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ενώ στο εύρος ταχυτήτων από 0.2 έως $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (κάτω από το προκαθορισμένο $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) αποδίδει βέλτιστα το 42.5% των λεκανών. Μπορεί να παρατηρηθεί, επίσης, ότι η σχέση μεταξύ ταχύτητας και συντελεστή μαιανδρισμού είναι αντιστρόφως ανάλογη, καθώς οι υδρολογικές λεκάνες που αποδίδεται μεγάλος συντελεστής μαιανδρισμού συνοδεύονται ταυτόχρονα από μικρές ταχύτητες ροής, και το αντίστροφο.

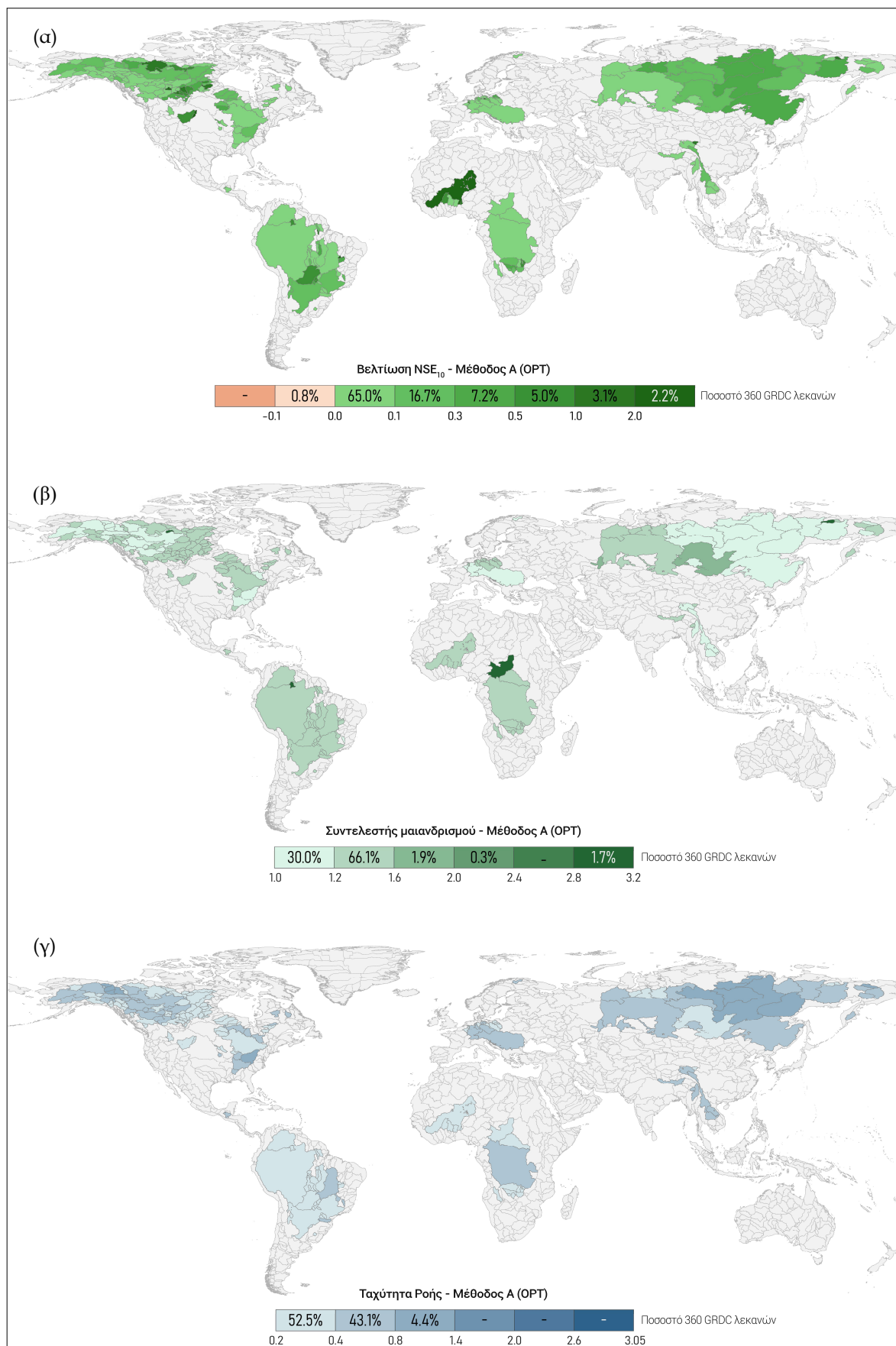
5.2 Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

5.2.1 Μέθοδος A – Εξίσωση OPT

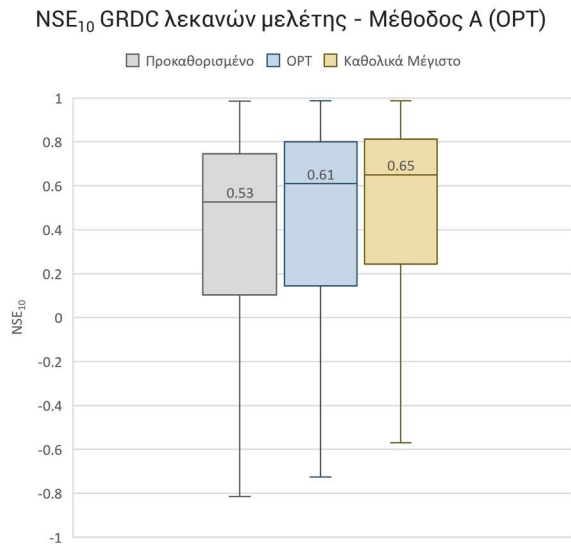
Χρησιμοποιώντας την εξίσωση OPT για την επιλογή του βέλτιστου σετ παραμέτρων, καταλήγουμε στις τιμές NSE_{10} που παρουσιάζει ο Χάρτης 5.4. Το ποσοστό των υδρολογικών λεκανών που η προσομοίωση τους μπορεί να χαρακτηριστεί καλή (με $NSE_{10} > 0.5$) βρέθηκε ίσο με 61.1%, έναντι του προκαθορισμένου 51.4%, ενώ σημειώθηκε μείωση των λεκανών με κακή συμπεριφορά, από 21.7% σε 19.7%. Ο Χάρτης 5.4.α αναπαριστά τη βελτίωση λόγω της μεθόδου A, η οποία παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το καθολικά βέλτιστο σετ. Ομοίως, και σε αυτή την περίπτωση οι υδρολογικές λεκάνες της Βόρειας Αμερικής και Βόρειας Ασίας επωφελούνται περισσότερο της βελτίωσης.



Χάρτης 5.4. Απόδοση NSE_{10} των λεκανών μελέτης για τη μέθοδο A (OPT)



Χάρτης 5.5. Βελτίωση NSE_{10} των λεκανών μελέτης για τις βέλτιστες παραμέτρους (α), κατανομή βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού (β), κατανομή βέλτιστης ταχύτητας ροής (γ), για τη μέθοδο A (OPT)

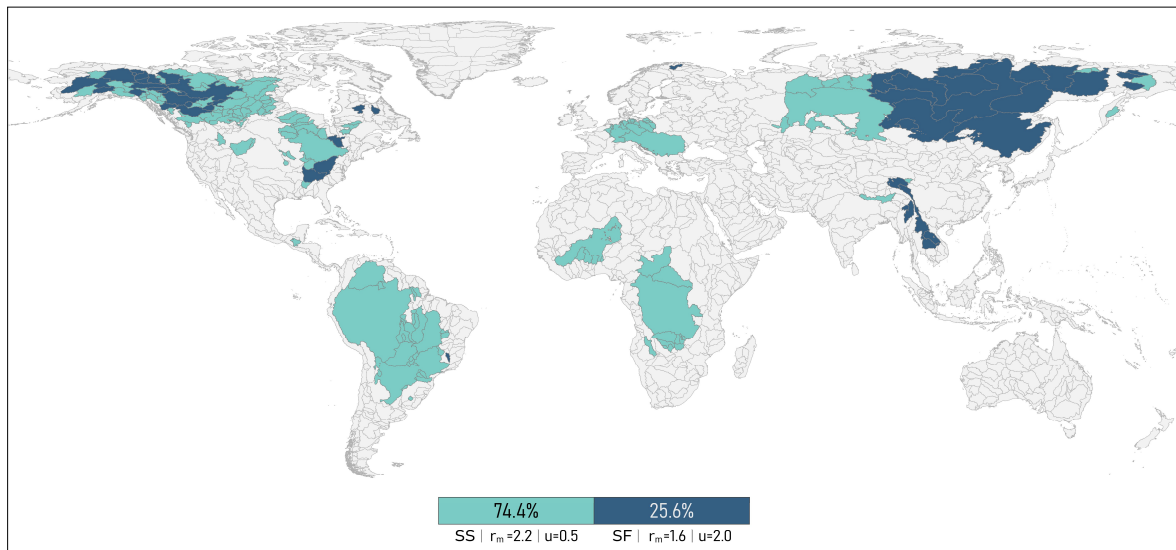


Σχήμα 5.2. Κατανομή NSE_{10} προκαθορισμένου, μεθόδου A και καθολικά βέλτιστου σετ παραμέτρων διόδευσης

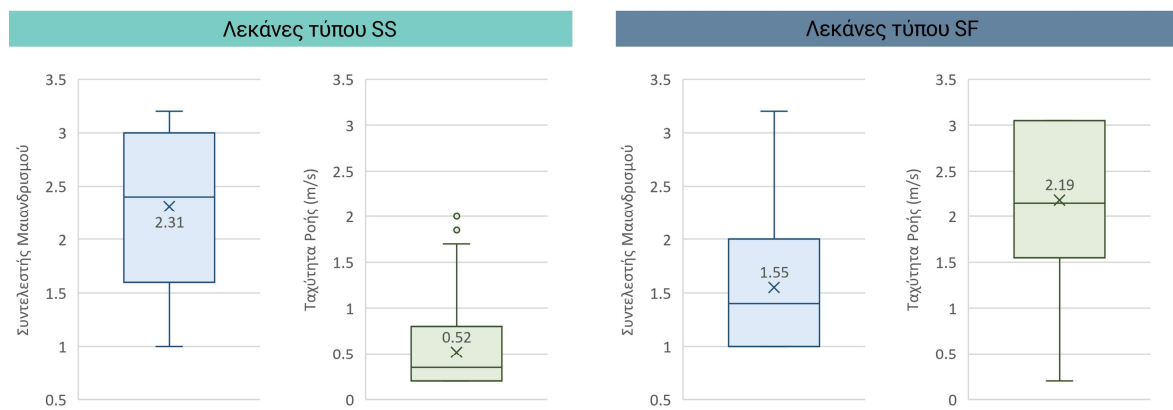
Η μέθοδος OPT είναι προσαρμοσμένη έτσι ώστε να επιλέγει το σετ παραμέτρων με το καλύτερο NSE_{10} , ενώ ταυτόχρονα να αποκλίνει το λιγότερο δυνατό από το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων. Αυτό παρατηρείται από τα αποτελέσματα που απεικονίζει ο Χάρτης 5.5.β και Χάρτης 5.5.γ, όπου τόσο ο συντελεστής μαιανδρισμού, όσο και η ταχύτητα ροής λαμβάνουν τιμές κοντά στα προκαθορισμένα. Μολονότι την μικρή απόκλιση από το προκαθορισμένο σετ, η μέθοδος A επιτυγχάνει σημαντική βελτίωση του NSE_{10} έναντι του προκαθορισμένου, με 0.61 διάμεσο NSE_{10} , το οποίο δεν απέχει αρκετά από το θεωρητικά βέλτιστο (Σχήμα 5.2).

5.2.2 Μέθοδος B – Ανάθεση τύπου SLP

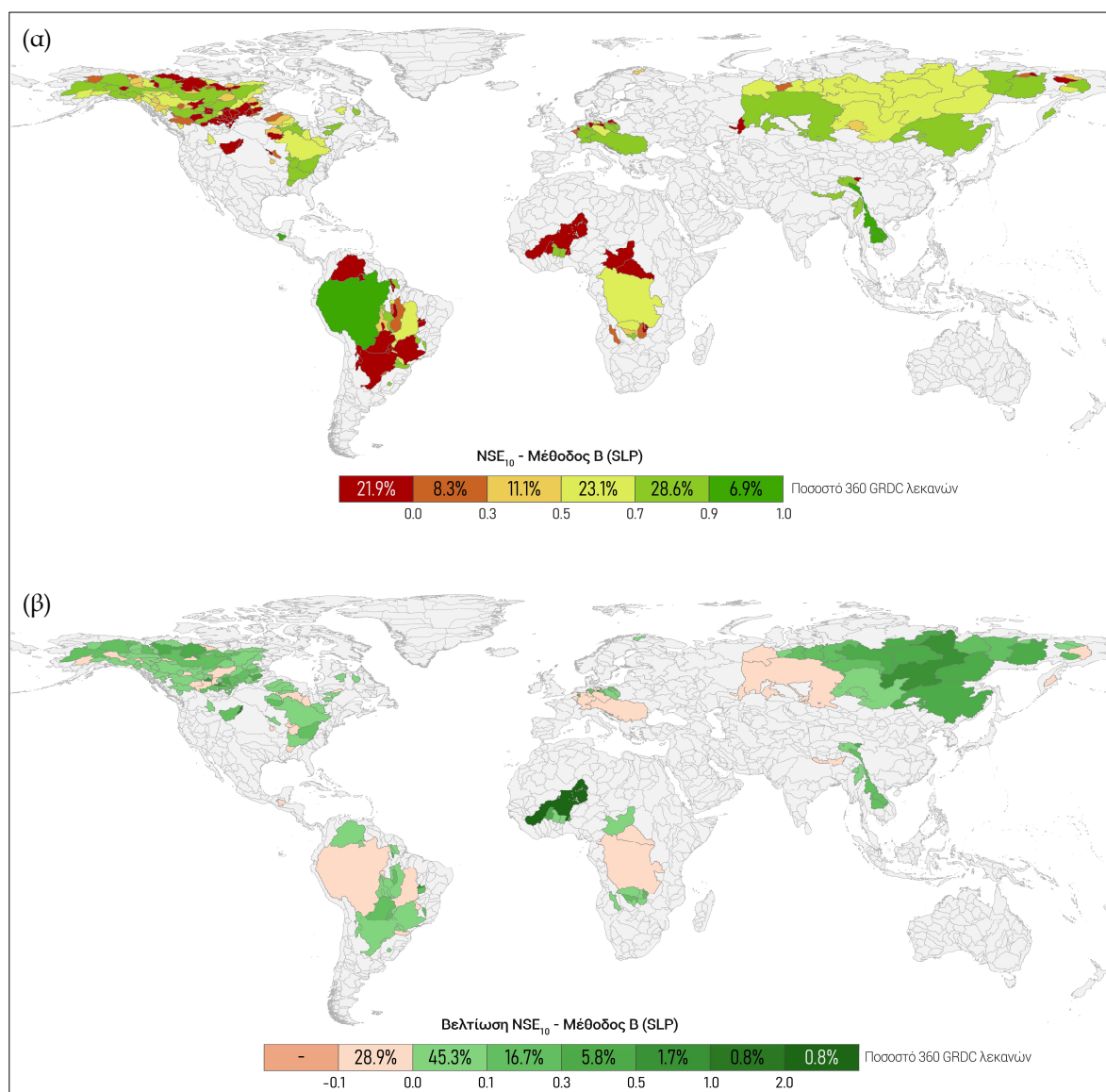
Η μέθοδος B βασίζεται στην κατηγοριοποίηση των υδρολογικών λεκανών σύμφωνα με την κλίση του διαγράμματος της μεταβολής του NSE_{10} με τον συντελεστή c. Οι λεκάνες με αρνητική κλίση χαρακτηρίστηκαν ως τύπος SS, και αντίθετα οι λεκάνες με θετική κλίση ως τύπος SF. Ο Χάρτης 5.6 παρουσιάζει το αποτέλεσμα της κατηγοριοποίησης. Είναι άμεσα εμφανές, ότι οι λεκάνες που παρουσίασαν τη μέγιστη θεωρητική βελτίωση, δηλαδή οι λεκάνες της Βόρειας Αμερικής και Βόρειας Ασίας, είναι αυτές που χαρακτηρίστηκαν ως SF, οι οποίες στο σύνολό τους αντιπροσωπεύουν το 25.6% των λεκανών. Οι υπόλοιπες λεκάνες χαρακτηρίστηκαν ως SS, και αντιπροσωπεύουν σχεδόν τα ¾ των υδρολογικών λεκανών μελέτης. Για την ανάθεση παραμέτρων σε κάθε τύπο, υπολογίστηκε ο μέσος όρος του συντελεστή μαιανδρισμού και ταχύτητας ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



Χάρτης 5.6. Ανάθεση τύπου λεκάνης (SS,SF) και αντίστοιχο σετ παραμέτρων διόδευσης για κάθε τύπο



Σχήμα 5.3. Κατανομή καθολικά βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού και ταχύτητας ροής με βάση την κατηγοριοποίηση των λεκανών της μεθόδου B



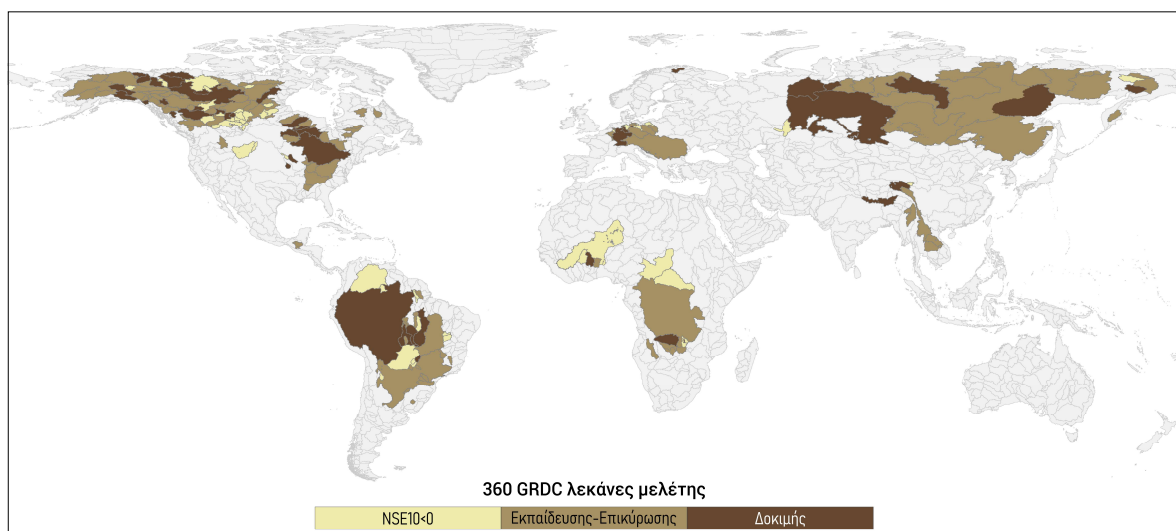
Χάρτης 5.7. NSE₁₀ που έχει επιτευχθεί με τη μέθοδο B (α), και η βελτίωσή του σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων (β)

Για τις SS λεκάνες, ο βέλτιστος συντελεστής μαιανδρισμού εκτιμήθηκε ίσος με 2.2 και η βέλτιστη ταχύτητα ίση με $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, ενώ για τις SF λεκάνες, το βέλτιστο σέτ εκτιμήθηκε με συντελεστή μαιανδρισμού ίσο με 1.6, και ταχύτητα ροής $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Η στρογγυλοποίηση των παραμέτρων σε τιμές του πειράματος ήταν απαραίτητη για τον υπολογισμό της απόδοσής τους. Στα δύο σέτ τιμών σημειώνεται η αντιστρόφως ανάλογη συμπεριφορά μεταξύ των δύο παραμέτρων, η οποία είχε παρατηρηθεί για τα βέλτιστα σέτ τιμών.

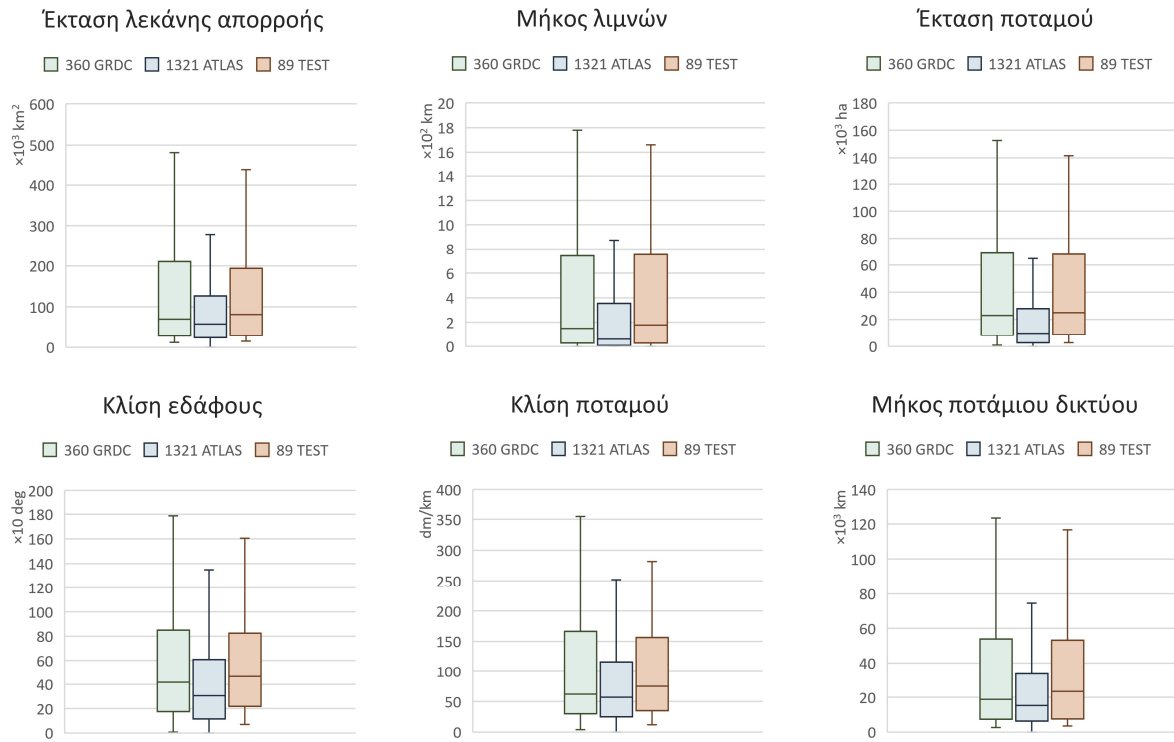
Ο Χάρτης 5.7.α αναπαριστά τη χωρική κατανομή της απόδοσης NSE_{10} για τις λεκάνες μελέτης βάσει της βελτιστοποίησης της μεθόδου SLP. Παρατηρείται, ότι το 58.9% των λεκανών σημειώνει NSE_{10} , μεγαλύτερο του 0.5, χαρακτηρίζοντας την προσομοίωση των λεκανών καλή. Το ποσοστό των λεκανών με αρνητικό NSE_{10} παρουσίασε μία οριακή αύξηση, από 21.7% για το προκαθορισμένο σέτ σε 21.9%. Ο Χάρτης 5.7.β υποδεικνύει ότι για το 28.9% των λεκανών, ένα σημαντικό ποσοστό των λεκανών μελέτης, η διαφορά του NSE_{10} με το προκαθορισμένο είναι έως 0.1 μονάδες αρνητική. Η επιδείνωση αυτή παρατηρείται σε λεκάνες, οι οποίες προσομοιώνονταν αρκετά καλά με το προκαθορισμένο σέτ, όπως π.χ. ο Αμαζόνιος. Η διαφορά αυτή όμως μπορεί να χαρακτηριστεί μικρής σημασίας, καθώς η μεταβολή είναι μικρή (από 0 έως 0.1). Παρατηρώντας, επίσης, τους χάρτες του NSE_{10} της μεθόδου B και του προκαθορισμένου (Χάρτης 5.7.α και Χάρτης 5.1.α), οι λεκάνες που η απόδοσή τους επιδεινώθηκε δεν έχουν μετατεθεί σε υποδεέστερη κλάση. Πρέπει να τονιστεί, ότι η επιδείνωση ορισμένων λεκανών είναι απολύτως αναμενόμενη, καθώς κατά κανόνα η μέθοδος αναθέτει ένα ενιαίο σέτ για κάθε τύπο, το οποίο σέτ αποτελεί τη μέση τιμή και δεν μπορεί να εξυπηρετήσει τη μεμονωμένη βελτίωση κάθε μίας λεκάνης, αλλά σαν διαδικασία παρουσιάζεται ωφέλιμη για το σύνολο των λεκανών. Συμπεραίνεται δηλαδή, ότι η βελτίωση των λεκανών υπερτερεί της ελάχιστης επιδείνωσης που επήλθε σε ορισμένες.

5.3 Εκπαίδευση – Επικύρωση και Δοκιμή ANN

Για την ανάπτυξη των ANN κάθε μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι λεκάνες για τις οποίες το μέγιστο θεωρητικό NSE_{10} ήταν μεγαλύτερο του μηδενός. Αυτό οδήγησε στον αποκλεισμό 63 λεκανών



Χάρτης 5.8. Απεικόνιση των λεκανών απορροής που δεν συμμετείχαν στην ανάπτυξη του ANN λόγω αρνητικού NSE_{10} , των λεκανών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και επικύρωση του ANN, και των λεκανών οι που συνέτέλεσαν στη δοκιμή του ANN.

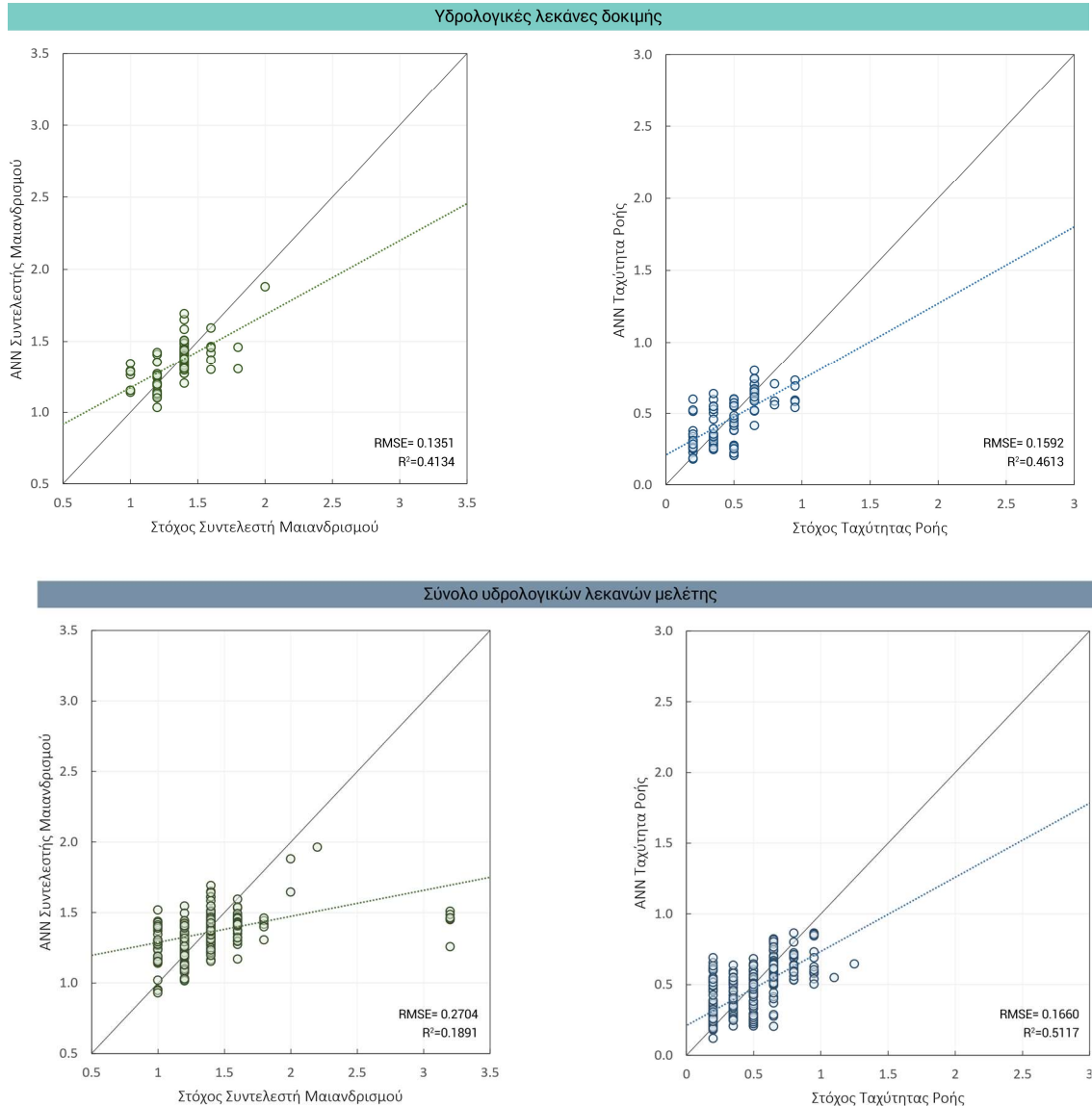


Σχήμα 5.4. Θηκογράμματα κατανομής φυσιογραφικών χαρακτηριστικών μεταξύ των 360 λεκανών GRDC, 1321 λεκανών HydroATLAS και 89 λεκανών GRDC δοκιμής

τις οποίες παρουσιάζει ο Χάρτης 5.8 ($NSE_{10} < 0$). Οι υπόλοιπες λεκάνες χωρίστηκαν τυχαία σε ένα σετ εκπαίδευσης-επικύρωσης και σε ένα σετ δοκιμής, με αντίστοιχα ποσοστά 70% και 30%, τα οποία αντιστοιχούν σε 208 λεκάνες εκπαίδευσης-επικύρωσης και 89 λεκάνες δοκιμής. Ο Χάρτης 5.8 παρουσιάζει τη κατανομή των λεκανών χωρικά. Παρότι το δείγμα των λεκανών δοκιμής ήταν τυχαίο, έγινε έλεγχος ομοιογένειας της κατανομής των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών τους, τόσο σε σχέση με τις συνολικές λεκάνες GRDC, όσο και με το σύνολο των 1321 λεκανών HydroATLAS (Σχήμα 5.4). Παρατηρείται, ότι το δείγμα δοκιμής είναι ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα των 360 λεκανών GRDC, και επίσης είναι ικανό να χρησιμοποιηθεί ως αξιολόγηση των ANN που αναπτύχθηκαν για την παρέκταση των παραμέτρων σε παγκόσμια κλίμακα.

5.3.1 Απόδοση ANN προσαρμογής - Μέθοδος A (OPT)

Για τη συσχέτιση των βέλτιστων παραμέτρων με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της αντίστοιχης λεκάνης, αναπτύχθηκε το ANN προσαρμογής fitnet της βιβλιοθήκης της Matlab. Το ANN προσαρμογής, μετά τη βέλτιστη διαμόρφωσή του, απέδωσε RSME ίσο με 0.135 για την πρόγνωση του συντελεστή μαιανδρισμού, και ίσο με 0.159 για την ταχύτητα ροής. Η συσχέτιση των παραμέτρων εξαγωγής του ANN και των βέλτιστων παραμέτρων της μεθόδου A παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5, αρχικά για τις λεκάνες δοκιμής, και έπειτα για το σύνολο των λεκανών GRDC που μελετώνται. Η πρόβλεψη του βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού και ταχύτητας ροής, για τις λεκάνες δοκιμής, με δεδομένα μόνο τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά κάθε λεκάνης, χαρακτηρίζεται καλή, με R^2 ίσο με 0.41 και 0.45 αντίστοιχα. Η χρήση του ANN για την πρόβλεψη των βέλτιστων παραμέτρων διόδευσης όλων των λεκανών σημειώθηκε καλή για την ταχύτητα ροής, με R^2 ίσο με 0.51, δε διατήρησε όμως τόσο την ικανότητα πρόγνωσης για τον συντελεστή μαιανδρισμού, με το R^2 να μειώ-

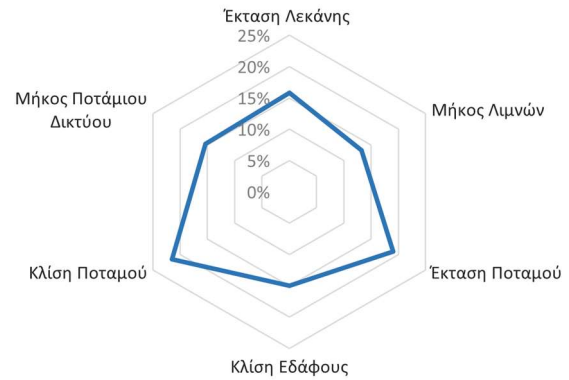


Σχήμα 5.5. Προγνωστική ικανότητα ANN προσαρμογής για το δείγμα λεκανών δοκιμής και του συνόλου των λεκανών μελέτης

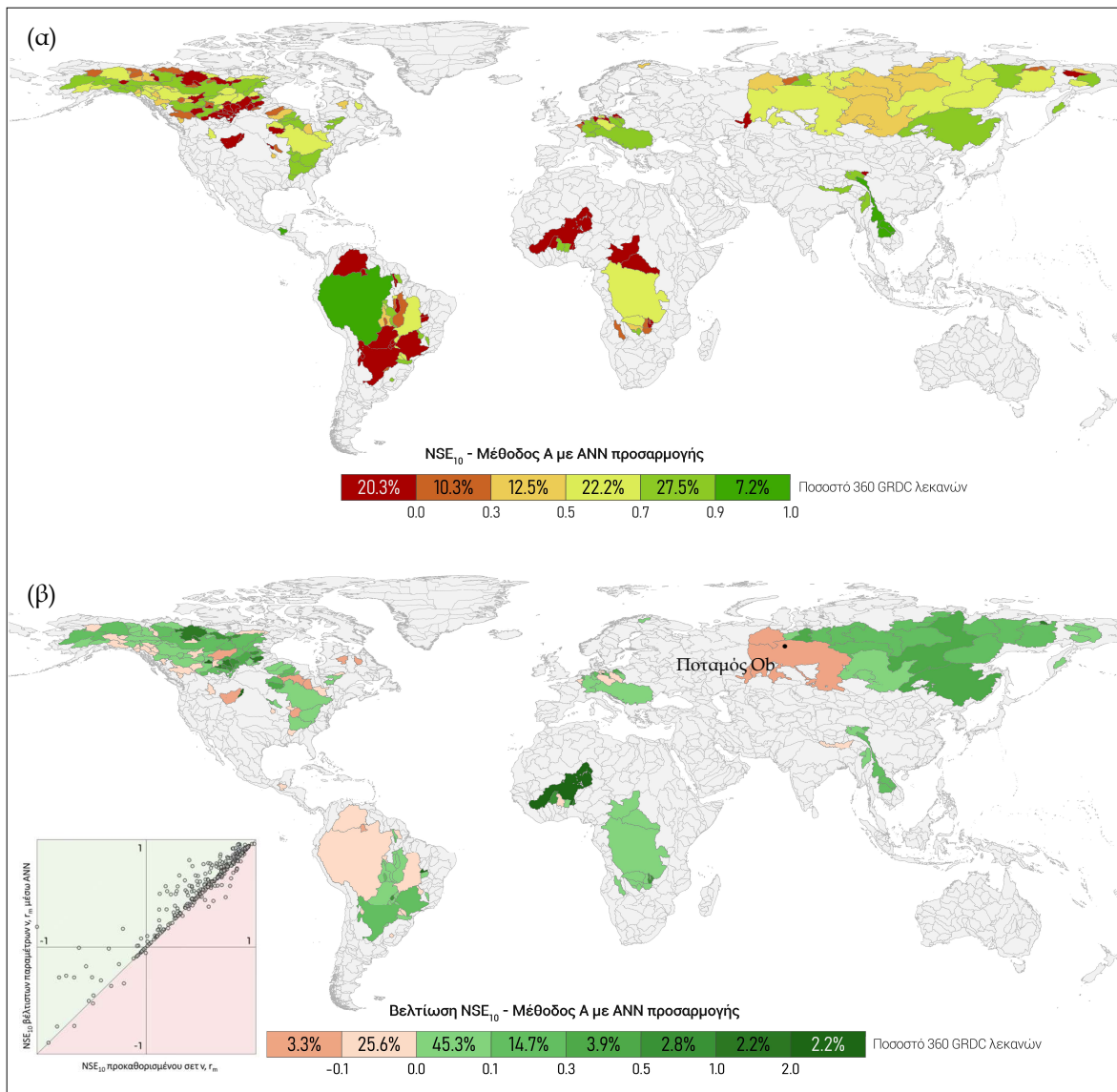
νεται στο 0.19. Αυτό εξηγείται, λόγω της ύπαρξης λεκανών με υψηλό συντελεστή μαιανδρισμού, οι οποίες δεν έλαβαν μέρος στη διαδικασία της εκπαίδευσης και δοκιμής, καθώς ήταν λεκάνες με NSE_{10} μικρότερο του μηδενός. Στην περίπτωση όπου οι λεκάνες αυτές δε λαμβάνονται υπόψη, η τιμή του R^2 για την πρόγνωση του συντελεστή μαιανδρισμού για όλες τις λεκάνες ανέρχεται σε 0.36, η οποία βελτίωση λόγω της μη γραμμικής κλίμακας του R^2 είναι σημαντική. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η σχετική σπουδαιότητα κάθε φυσιογραφικής μεταβλητής, η οποία υπολογίζεται βάσει των τελικών βαρών των νευρώνων του ANN. Παρατηρείται, ότι το μεγαλύτερο βάρος για την πρόγνωση του βέλτιστου σετ, είχε η κλίση του ποταμού με 21.5%, ακολούθησε η έκταση της επιφάνειας του ποταμού με 19.0%, ενώ οι υπόλοιπες παράμετροι είχαν παρόμοιο αντίκτυπο με περίπου 15%. Το βέλτιστο σετ παραμέτρων διόδευσης που εκτιμήθηκε από το ANN για κάθε λεκάνη, στρογγυλοποιήθηκε στο πλησιέστερο σετ του πειράματος. Με τον τρόπο αυτό, είναι εφικτή η σύγκριση του NSE_{10} που έχει επιτευχθεί από το ANN με το προκαθορισμένο και μπορεί να αξιολογηθεί η συνολική διεργασία βελτιστοποίησης και αντιστοίχισης με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά (regionalization).

Ο Χάρτης 5.9.α αναπαριστά το NSE_{10} που επιτεύχθηκε από το ANN προσαρμογής. Το 56.9% των λεκανών σημειώνουν NSE_{10} μεγαλύτερο του 0.5 σε σχέση με το 51.4% του προκαθορισμένου σετ. Οι λεκάνες με NSE_{10} μεγαλύτερο του 0.9 σχεδόν διπλασιάστηκαν, από 3.9% σε 7.2%. Επίσης, το ποσοστό των λεκανών με $NSE_{10} < 0$ μειώθηκε από 21.7% στο 20.3%. Χωρικά, η σημαντικότερη βελτίωση επήλθε στις λεκάνες βόρειων γεωγραφικών πλατών (Χάρτης 5.9.β). Δεν μπορεί να αγνοηθεί όμως και η επιδείνωση που προέκυψε, ειδικά σε λεκάνες που προηγουμένως είχαν σημειώσει υψηλές τιμές NSE_{10} , όπως π.χ., η λεκάνη του ποταμού Ob.

Σχετική Σπουδαιότητα Φυσιογραφικών Μεταβλητών



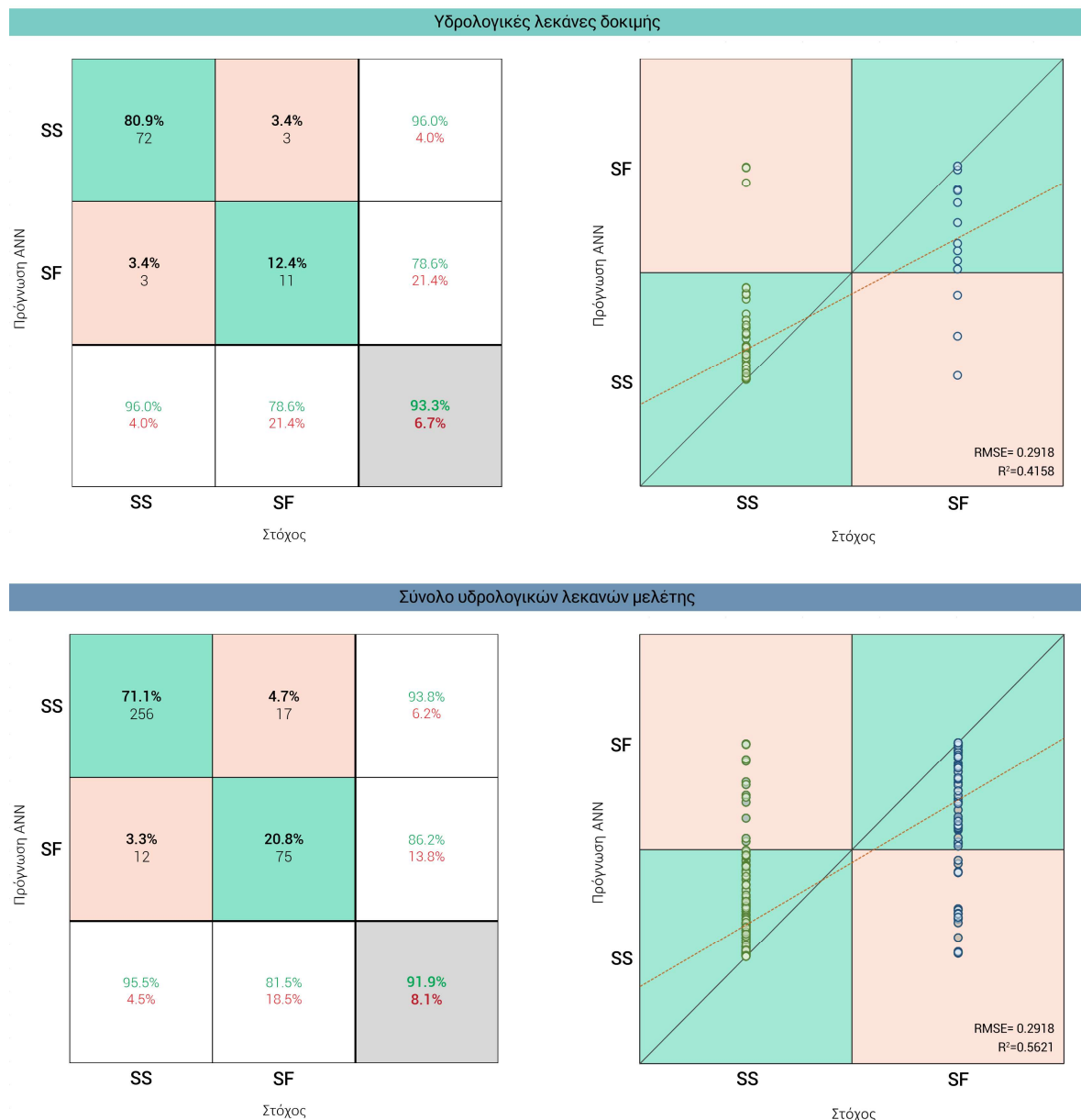
Σχήμα 5.6. Σχετική σπουδαιότητα φυσιογραφικών χαρακτηριστικών για το ANN προσαρμογής



Χάρτης 5.9. NSE_{10} που έχει επιτευχθεί με το ANN προσαρμογής της μεθόδου Α (OPT) (α), και η βελτίωσή του σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων (β)

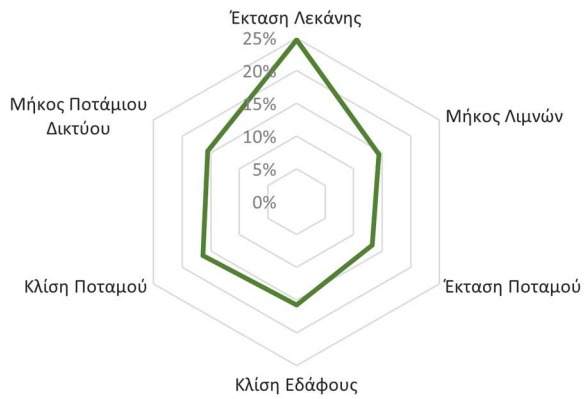
5.3.2 Απόδοση ANN κατηγοριοποίησης - Μέθοδος B (SLP)

Το ANN κατηγοριοποίησης patternnet αναπτύχθηκε για την κατηγοριοποίηση των λεκανών σε τύπο SS ή τύπο SF. Η έξοδος του ANN κατηγοριοποίησης είναι ένας αριθμός ανάμεσα στο 0 και 1 για κάθε τύπο λεκάνης, με 1 να αναγνωρίζει την εκάστοτε λεκάνη με απόλυτη σιγουριά/εμπιστοσύνη, και με 0 να αγνοεί τον εκάστοτε τύπο. Η ανάθεση του τύπου γίνεται στρογγυλοποιώντας την εκάστοτε πρόβλεψη στο πλησιέστερο όριο. Επομένως, σε περίπτωση που το ANN προβλέψει για έναν τύπο 0.7, η λεκάνη χαρακτηρίζεται με αυτόν τον τύπο, μολονότι θεωρεί ένα 30% αβεβαιότητα για το συγκεκριμένο τύπο. Για την παρουσίαση τόσο της διακριτής κατηγοριοποίησης σε κάθε τύπο, όσο και της σιγουριάς σε κάθε περίπτωση, δίνεται το Σχήμα 5.7, όπου παρουσιάζεται ο πίνακας σύγχυσης αρχικά για τις λεκάνες δοκιμής, και έπειτα για το σύνολο των λεκανών, καθώς και τα διαγράμματα 0 έως 1 αντίστοιχα, όπου μπορεί να γίνει αντιληπτή η αβεβαιότητα για κάθε τύπο λεκάνης. Το ANN προσαρμογής σημειώνει αρκετά μικρή σύγχυση σε μόλις 6.7% των λεκανών δοκιμής. Συγκεκριμένα,



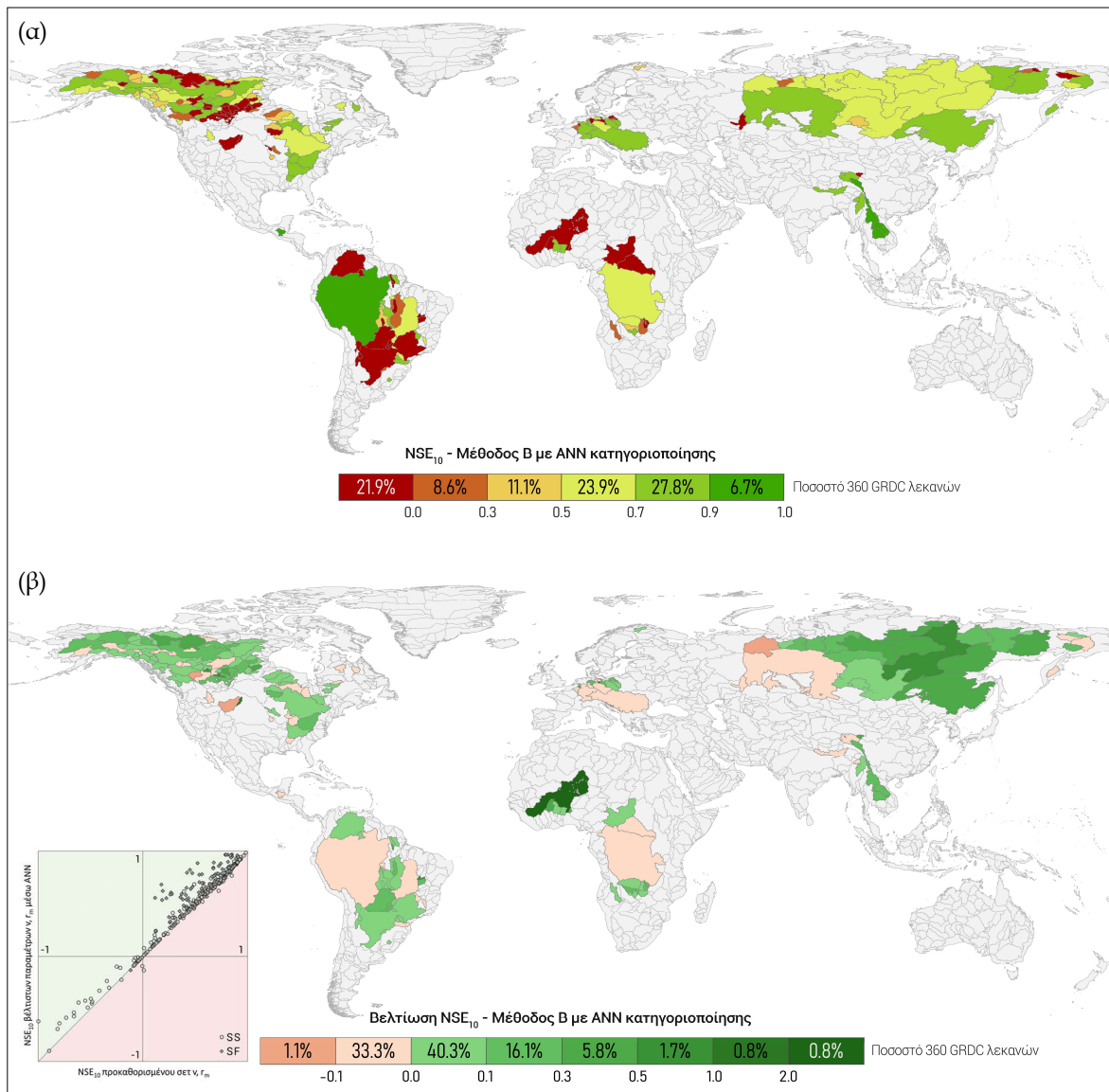
Σχήμα 5.7. Προγνωστική ικανότητα ANN κατηγοριοποίησης για το δείγμα λεκανών δοκιμής και του συνόλου των λεκανών μελέτης

Σχετική Σπουδαιότητα Φυσιογραφικών Μεταβλητών



Σχήμα 5.8. Σχετική σπουδαιότητα φυσιογραφικών χαρακτηριστικών για το ANN κατηγοριοποίησης

μπορεί σωστά να κατηγοριοποιήσει το 96.0% των SS λεκανών και το 78.6% των λεκανών δοκιμής. Η κατηγοριοποίηση αξιολογείται επίσης αρκετά καλή και για το σύνολο των λεκανών, με ποσοστό σύγχυσης ίσο με 8.1%, βρίσκοντας σωστά το 95.5% των SS λεκανών και 81.5% των SF λεκανών. Το μικρότερο ποσοστό επιτυχίας στον εντοπισμό των λεκανών SF, πιθανά οφείλεται στο μικρότερο αριθμό αυτών στο σύνολο (25.6%), με αποτέλεσμα η εκπαίδευση να μην είναι απόλυτα ισορροπημένη. Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 5.8, για την πρόγνωση του τύπου λεκάνης, κυριότερο ρόλο αποτέλεσε η έκταση της υδρολογικής λεκάνης

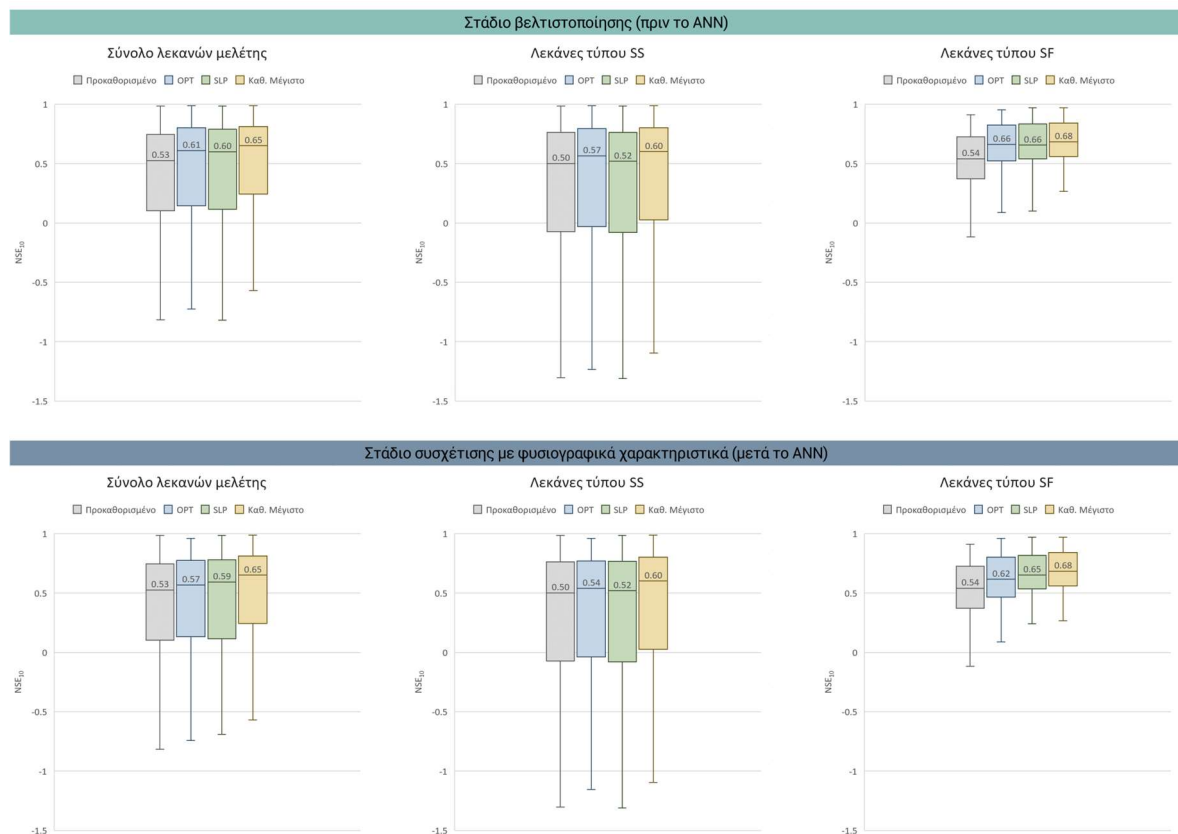


Χάρτης 5.10. NSE_{10} που έχει επιτευχθεί με το ANN κατηγοριοποίησης της μεθόδου Β (SLP) (α), και η βελτίωσή τους σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων (β)

με 24.7% σχετική σπουδαιότητα, ενώ τα υπόλοιπα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά παρουσίασαν παρόμοιο βάρος. Με δεδομένο τον τύπο λεκάνης, όπως εκτιμήθηκε από το ANN, έγινε η ανάθεση του προκαθορισμένου σετ παραμέτρων διόδευσης σε κάθε λεκάνη. Συγκεκριμένα, τέθηκε συντελεστής μαιανδρισμού ίσος με 2.2 και ταχύτητα ίση με $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ για τις λεκάνες τύπου SS, και αντίστοιχες τιμές ίσες με 1.6 και $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ για τις λεκάνες τύπου SF. Ο Χάρτης 5.10.α παρουσιάζει το NSE_{10} που επιτεύχθηκε, μέσω του ANN κατηγοριοποίησης για τη μέθοδο Β, ενώ στο (β) μέρος του χάρτη αποτυπώνεται η βελτίωση κάθε λεκάνης σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ. Παρατηρείται, ότι το 58.4% των λεκανών αποδίδει NSE_{10} μεγαλύτερο του 0.5, μία αύξηση 7.0% σε σχέση με το προκαθορισμένο, ενώ το ποσοστό των λεκανών με NSE_{10} μικρότερο του μηδενός παρέμεινε σχεδόν το ίδιο. Η σημαντικότερη βελτίωση εξακολουθεί να παρατηρείται στις λεκάνες της Βόρειας Αμερικής και Βόρειας Ασίας, ενώ το 34.4% των λεκανών σημείωσε ελάχιστη επιδείνωση σε σχέση με το προκαθορισμένο σετ.

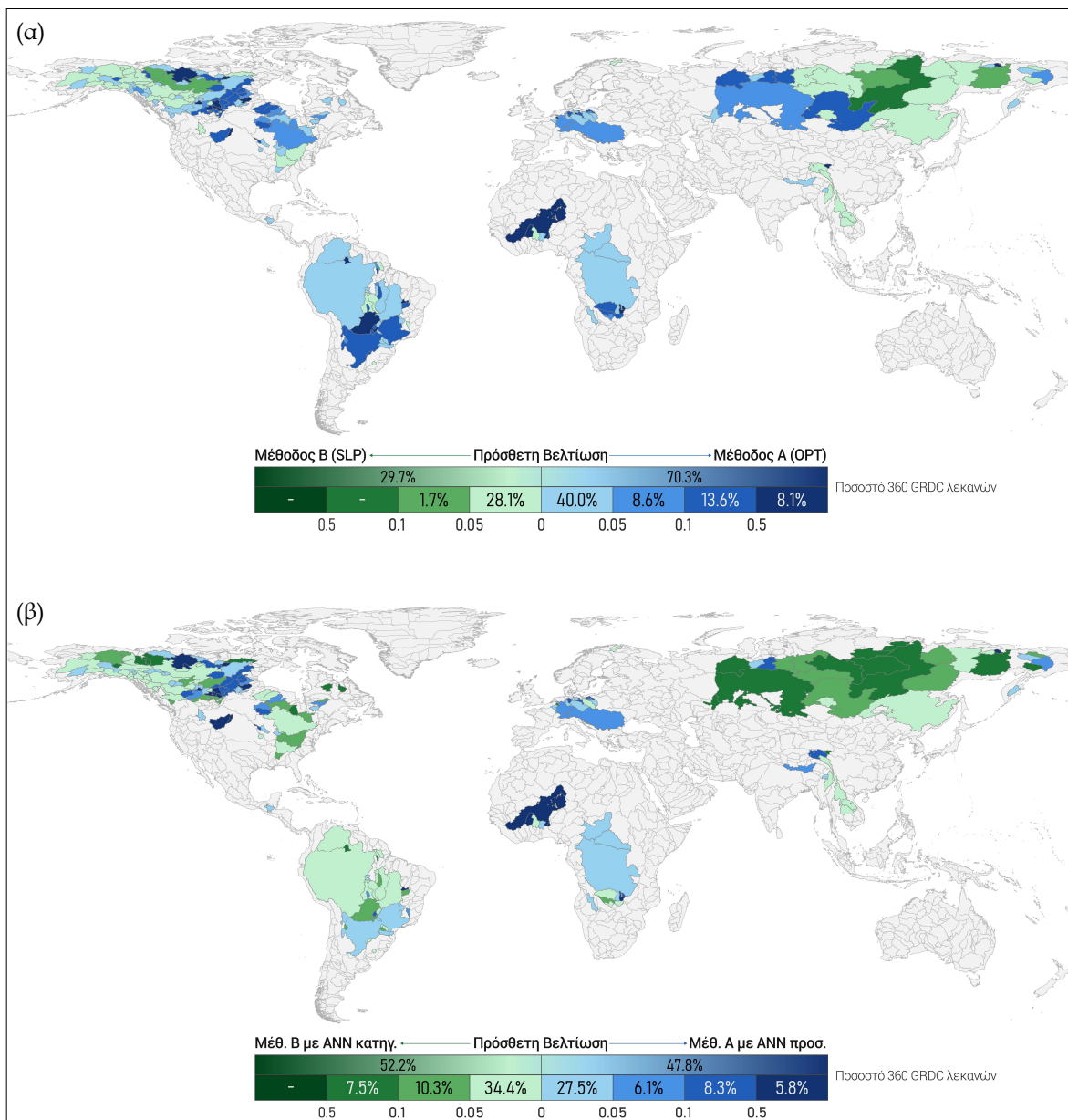
5.4 Σύγκριση Μεθόδων

Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιείται η σύγκριση των δύο μεθόδων, OPT και SLP, τόσο κατά το στάδιο της βελτιστοποίησης, όσο και κατά το στάδιο της συσχέτισης με φυσιογραφικές παραμέτρους, μετά τη χρήση δηλαδή του ANN. Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται τα θηκογράμματα κατανομής του NSE_{10} για τα δύο αυτά στάδια, και σε κάθε περίπτωση αναλύονται και με βάση τον τύπο της λεκάνης. Αρχικά βλέπουμε, ότι μεγαλύτερο περιθώριο βελτίωσης σημειώνουν οι λεκάνες τύπου SF, όπου στο στάδιο της βελτιστοποίησης, τόσο η μέθοδος Α (OPT), όσο και η μέθοδος Β (SLP) επιτυγχάνουν μία



Σχήμα 5.9. Σύγκριση της κατανομής του NSE_{10} βάσει του τύπου της λεκάνης για τα στάδια πριν και μετά του ANN

βελτίωση του διαμέσου NSE_{10} κατά 0.12 μονάδες, και τιμή αρκετά κοντά στο θεωρητικά βέλτιστο NSE_{10} . Παραμένοντας στο στάδιο βελτιστοποίησης, η μέθοδος A παρατηρείται ότι παράγει αρκετά καλύτερα αποτελέσματα στις λεκάνες SS, με το διάμεσο NSE_{10} να ανέρχεται στο 0.57, σε σχέση με το 0.52 της μεθόδου B, και το 0.50 του προκαθορισμένου σετ. Επίσης, η βελτίωση αυτή προσεγγίζει ικανοποιητικά το θεωρητικά βέλτιστο, με τιμή 0.60 του NSE_{10} . Αυτό αποτυπώνεται, όταν παρατηρούμε το σύνολο των λεκανών όπου η μέθοδος A υπερτερεί οριακά της μεθόδου B. Αυτό ανατρέπεται όμως όταν τα βέλτιστα σετ τιμών προσεγγίζονται μέσω των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών, με την εφαρμογή του ANN. Στο στάδιο αυτό, η μέθοδος B σημειώνει διάμεσο NSE_{10} ίσο με 0.59, μία μείωση κατά 0.01 σε σχέση με το στάδιο πριν το ANN, ενώ η μέθοδος A αδυνατεί να διατηρήσει το υψηλό διάμεσο NSE_{10} που έχει επιτευχθεί, το οποίο μειώνεται από 0.61 σε 0.57, χαμηλότερα δηλαδή της μεθόδου B, αλλά σε αρκετά καλά επίπεδα κατά μέσο όρο. Η συμπεριφορά αυτή παρατηρείται και στο επίπεδο του τύπου των λεκανών, όπου, ενώ η μέθοδος B



Χάρτης 5.11. Σύγκριση βελτίωσης μεθόδων στο στάδιο της βελτιστοποίησης (α), και μετά την συσχέτιση με φυσιογραφικά χαρακτηριστικά μέσω ANN (β)

διατηρεί το NSE_{10} στο στάδιο βελτιστοποίησης, η μέθοδος A επιδεινώνεται κατά 0.03 για τις λεκάνες τύπου SS, και κατά 0.04 για τις λεκάνες τύπου SF.

Για τη σύγκριση των μεθόδων σε επίπεδο λεκάνης δημιουργήθηκε ο Χάρτης 5.11, στον οποίο αποτυπώνεται η πρόσθετη βελτίωση κάθε μεθόδου σε σχέση με την άλλη. Πιο απλά, έχει γίνει η αφαίρεση των NSE_{10} που έχει επιτευχθεί από κάθε μέθοδο, με τη φορά προς τα δεξιά να δείχνει τις περιπτώσεις, όπου η μέθοδος A υπερτερεί της B, και προς τα αριστερά όταν υπερτερεί η μέθοδος B. Για την περιοχή στην αρχή των αξόνων που εσωκλείει ένα εύρος 0.1 συνολικά, μπορεί να θεωρηθεί πως και οι δύο μέθοδοι σημειώνουν περίπου την ίδια βελτίωση. Με την αύξηση της διαφοράς αποτυπώνεται καλύτερα ποια μέθοδος είναι αποδοτικότερη για κάθε λεκάνη. Οι λεκάνες που σημειώνουν βελτίωση μεγαλύτερη από 0.5 μπορούν να αγνοηθούν, καθώς παρατηρώντας τις λεκάνες αυτές και συγκρίνοντας τις με τις λεκάνες με βέλτιστο NSE_{10} μικρότερο του μηδενός (Χάρτης 5.3) αυτές αντιστοιχούν σε λεκάνες, ακόμα και μετά τη θεωρητικά μέγιστη βελτίωση τους. Βάσει των παραπάνω, ωφέλιμη βελτίωση, χαρακτηρίζεται ανάμεσα στο εύρος από 0.05 έως 0.5.

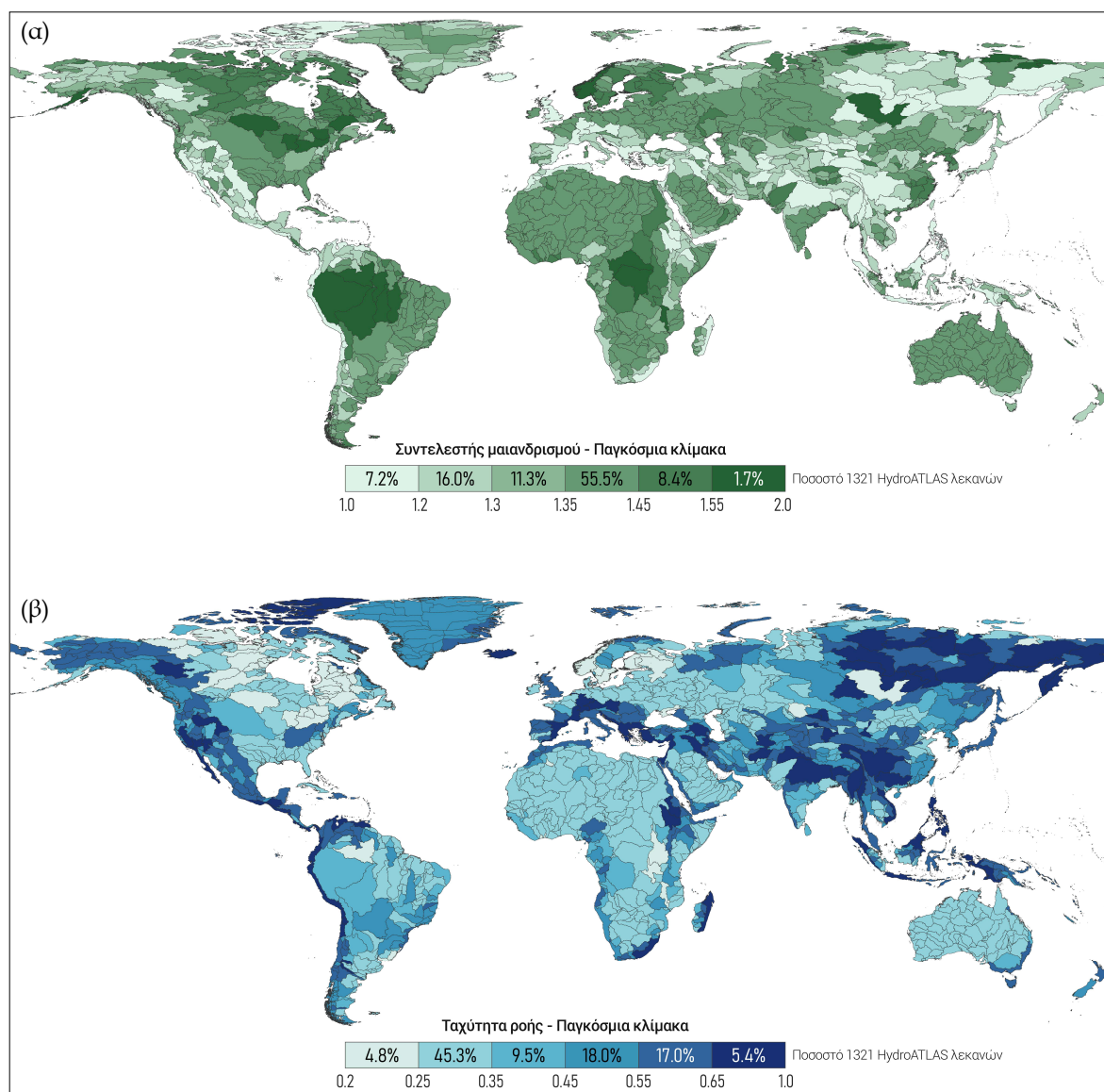
Παρατηρούμε, επομένως, ότι στο στάδιο της βελτιστοποίησης, δηλαδή πριν τη χρήση του ANN (Χάρτης 5.11.α), η μέθοδος A (OPT) υπερτερεί σημαντικά της μεθόδου B, τόσο στον αριθμό λεκανών, όσο στη σχετική βελτίωση, με το σύνολο των λεκανών να σημειώνουν υψηλότερα NSE_{10} με τη μέθοδο A, πλην των περιοχών της Βόρειας Αμερικής και Βόρειας Ασίας. Συγκεκριμένα το 70.3% των λεκανών επιδέχεται περισσότερη βελτίωση με τη μέθοδο A, ενώ πρόσθετη ωφέλιμη βελτίωση σημειώνει το 22.2% των λεκανών με τη μέθοδο A, εν αντιθέσει του μόλις 1.7% με τη μέθοδο B. Η συμπεριφορά αυτή αλλάζει στο στάδιο της συσχέτισης με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, όπου η μέθοδος B αποδίδει καλύτερη βελτίωση στο 52.2% των λεκανών. Ομοίως, η ωφέλιμη βελτίωση είναι μεγαλύτερη για τη μέθοδο B στο 17.8% των λεκανών σε σχέση με το 14.4% με τη μέθοδο A. Σημαντικό είναι και το ποσοστό των λεκανών, που και οι δύο μέθοδοι αποδίδουν παρόμοια, σε ένα εύρος εντός 0.1, τόσο στο στάδιο της βελτιστοποίησης όσο και στο στάδιο της συσχέτισης, με αντίστοιχα ποσοστά 68.1% και 61.9% αντίστοιχα.

Βάσει όλων των παραπάνω, βλέπουμε ότι η μέθοδος A είναι αποδοτικότερη της μεθόδου B κατά το στάδιο της βελτιστοποίησης. Η δυνατότητα να μην αποκλίνει σημαντικά από το προκαθορισμένο σεν, αλλά παρόλα αυτά να σημειώνει αξιόλογη βελτίωση του NSE_{10} , καθιστούν τη μέθοδο A ιδανική για την επιλογή των βέλτιστων παραμέτρων. Αντίθετα, στο στάδιο της συσχέτισης μέσω του ANN η απόδοση της μεθόδου A επιδεινώνεται υπολογίσιμα. Συγκεκριμένα, αποδεικνύεται ότι η κατηγοριοποίηση βάσει των φυσιογραφικών παραμέτρων είναι αρκετά αποδοτικότερη, σε σχέση με την προσπάθεια του ANN της μεθόδου A να προσαρμοστεί στο βέλτιστο σεν για κάθε λεκάνη. Η μέθοδος B υστερεί στη βελτιστοποίηση συγκεκριμένων λεκανών, αφού το βέλτιστο ενιαίο σεν είναι ενδεικτικό για το σύνολο κάθε τύπου, και αντιπροσωπεύει τη γενικότερη βελτίωση των λεκανών. Σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθόδου B, επίσης, είναι το αντίκτυπο της λανθασμένης πρόγνωσης του ANN κατηγοριοποίησης. Ενώ, οι λεκάνες κατά τη μέθοδο A λαμβάνουν παραμέτρους διόδευσης κοντά στο προκαθορισμένο σεν, (επομένως το εύρος που μπορεί να προγνώσει το ANN είναι μικρό), η λανθασμένη κατηγοριοποίηση στη μέθοδο B θα αναθέσει σεν το οποίο αποκλίνει σημαντικά από τον πραγματικό τύπο της εκάστοτε λεκάνης. Ευτυχώς, το πρόβλημα αυτό της μεθόδου B παρατηρήθηκε ελάχιστα, έως καθόλου, λόγω μικρής σύγχυσης του ANN να διακρίνει τον σωστό τύπο λεκάνης.

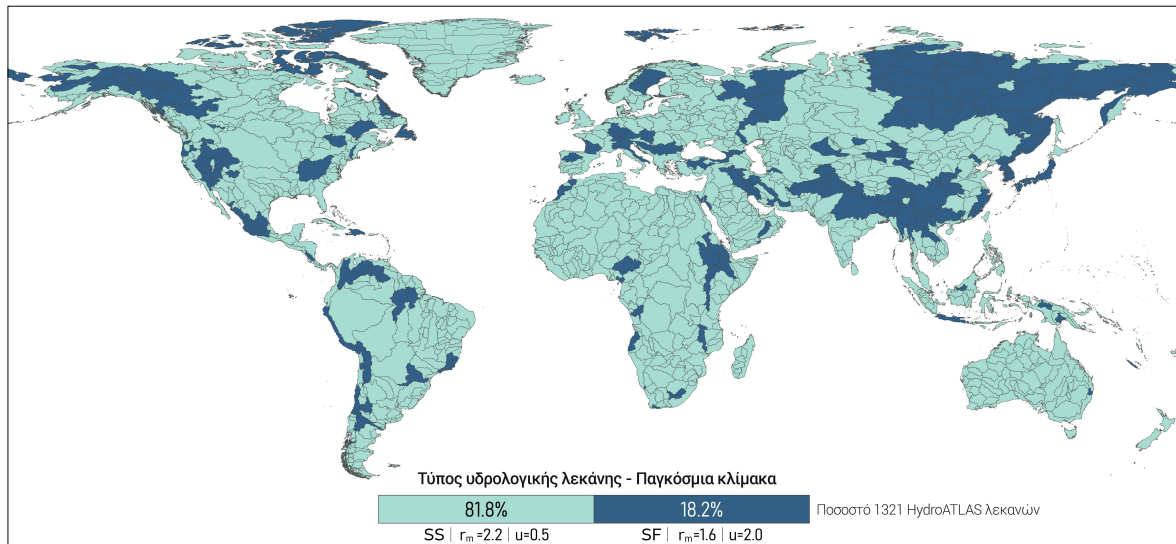
5.5 Βέλτιστες παράμετροι διόδευσης σε παγκόσμια κλίμακα

Οι φυσιογραφικές παράμετροι για το σύνολο των λεκανών του HydroATLAS επιπέδου 4, χρησιμοποιήθηκαν ως ορίσματα εισόδου για τα ANN προσαρμογής και κατηγοριοποίησης, με σκοπό την παρέκταση του βέλτιστου σετ παραμέτρων διόδευσης, σε παγκόσμια κλίμακα.

Ο Χάρτης 5.12.α και Χάρτης 5.12.β απεικονίζουν την παρέκταση του βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού και βέλτιστης ταχύτητας ροής σε παγκόσμια κλίμακα. Αρχικά, είναι άμεσα αντιληπτή η αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ τους, όπου λεκάνες με μεγάλο συντελεστή μαιανδρισμού χαρακτηρίζονται από μικρή ταχύτητα ροής και αντιστρόφως. Για το ANN προσαρμογής που χρησιμοποιήθηκε, η κλίση του ποταμού χαρακτηρίστηκε με μεγαλύτερη σχετική σπουδαιότητα ανάμεσα στις άλλες παραμέτρους, το οποίο γίνεται και αντιληπτό στους δύο αυτούς χάρτες. Η εκτίμηση της ταχύτητας έχει φυσική υπόσταση, αφού μεγάλες ταχύτητες αποδίδονται σε περιοχές με έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο, πχ. στα Βραχώδη Όρη, στις Άνδεις, στα Ιμαλάια, στις Άλπεις κ.ά.



Χάρτης 5.12. Παρέκταση βέλτιστου συντελεστή μαιανδρισμού (α), και βέλτιστης ταχύτητας ροής (β), βάσει της μεθόδου A (OPT) σε παγκόσμια κλίμακα

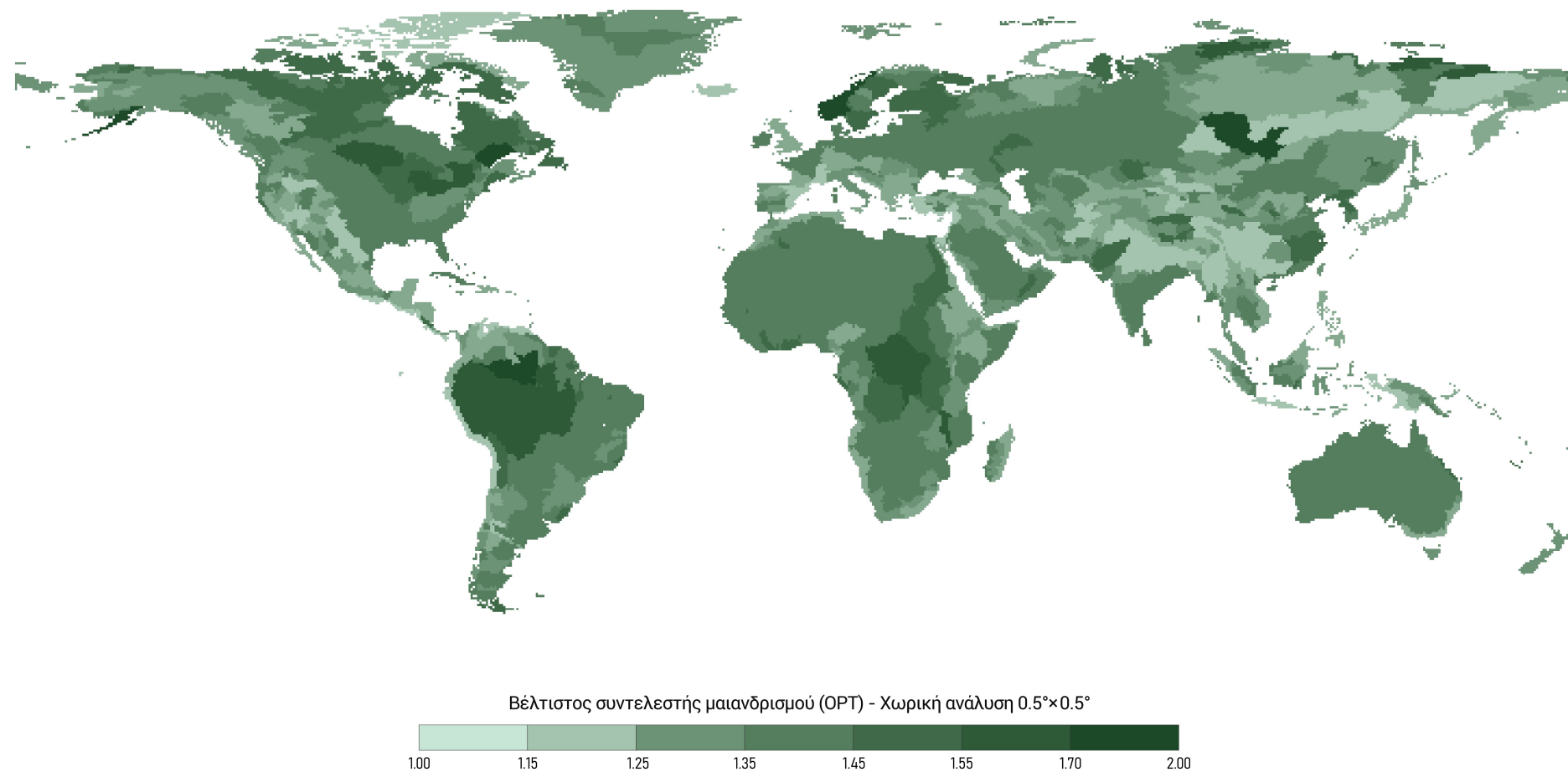


Χάρτης 5.13. Παρέκταση τύπου λεκάνης βέλτιστων παραμέτρων, βάσει της μεθόδου B (SLP), σε παγκόσμια κλίμακα

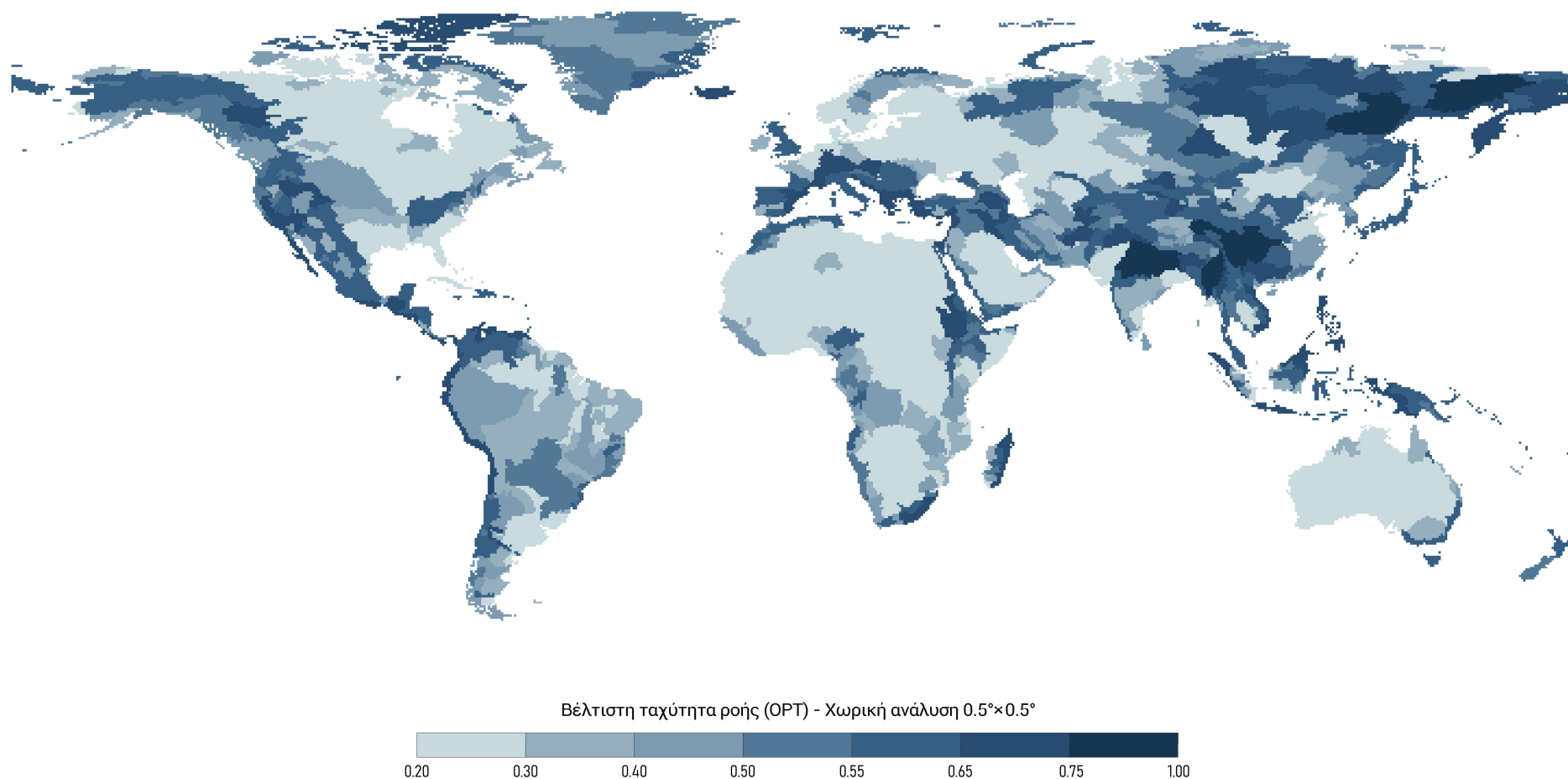
Ο Χάρτης 5.13 παρουσιάζει τη χωρική κατανομή του τύπου λεκάνης σε SS και SF. Το ANN κατηγοριοποίησης χαρακτήρισε το 81.8% των λεκανών σε SS, δηλαδή σε λεκάνες μικρής ταχύτητας ροής και μεγάλου μαιανδρισμού, και 18.2% σε λεκάνες SF, λεκάνες με μεγάλη ταχύτητα ροής και μικρό συντελεστή μαιανδρισμού. Σημειώνεται, ότι για τις GRDC λεκάνες μελέτης τα ποσοστά ήταν 74.4% και 25.6% για λεκάνες SS και SF αντίστοιχα. Σε κάθε τύπο λεκάνης γίνεται η ανάθεση του ενιαίου βέλτιστου σετ παραμέτρων διόδευσης για τον εκάστοτε τύπο.

Παρατηρώντας συνολικά την παρέκταση και για τις δύο μεθόδους, είναι αντιληπτή η κοινή συμπεριφορά στον εντοπισμό λεκανών με μικρότερες ταχύτητες ροής και μεγάλους συντελεστές μαιανδρισμού, καθώς και το αντίστροφο. Η σημαντικότερη ίσως διαφορά μεταξύ τους είναι τα εύρη των ταχυτήτων ροής και συντελεστών μαιανδρισμού που έχουν χαρακτηριστεί βέλτιστα. Συγκεκριμένα, η βέλτιστη τιμή της ταχύτητας ροής των λεκανών SF, η οποία εκτιμήθηκε ίση με $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, είναι εκτός του εύρους των βέλτιστων ταχυτήτων της μεθόδου A. Ομοίως συνέβη για τον συντελεστή μαιανδρισμού για τις λεκάνες SS, που εκτιμήθηκε ίσος με 2.0.

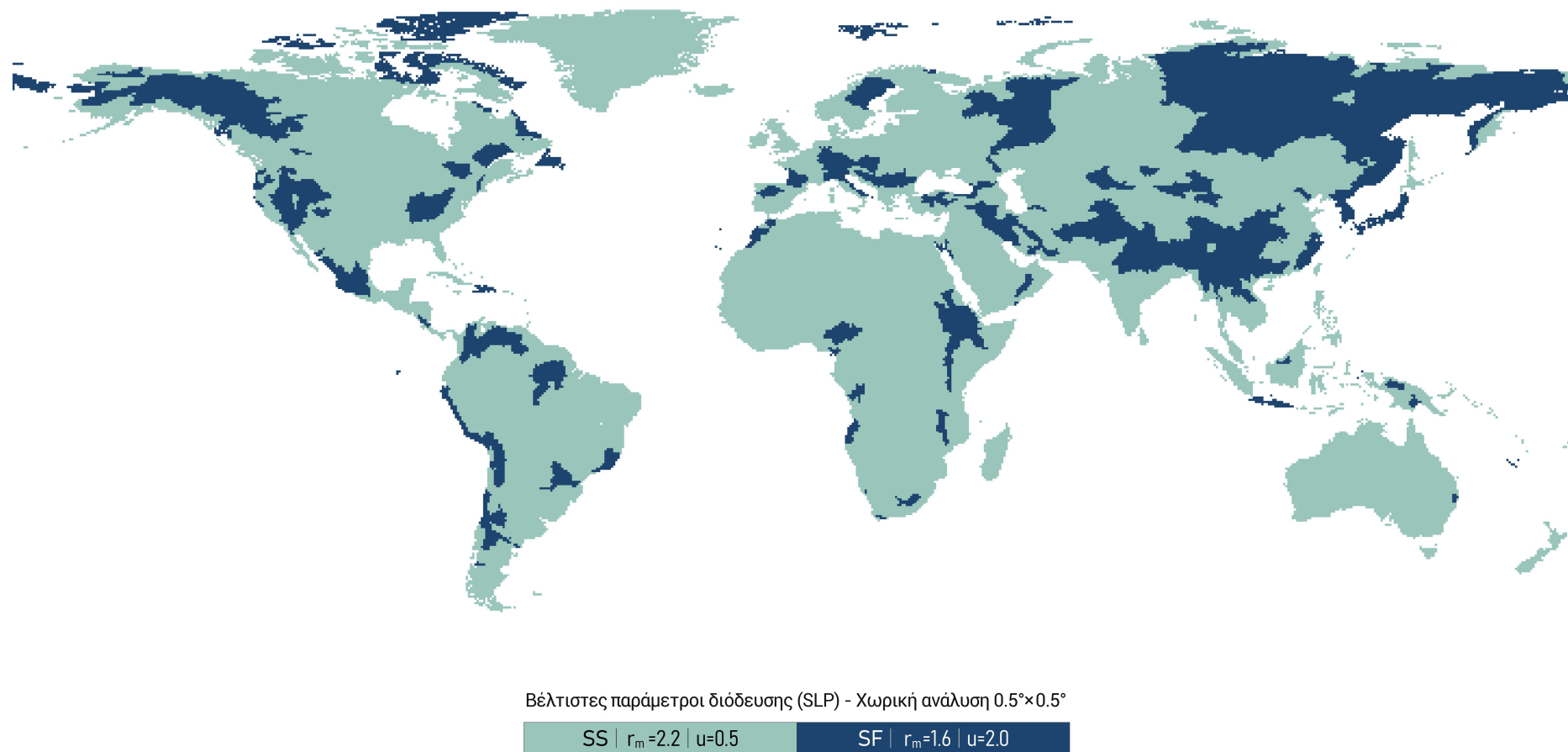
Το βέλτιστο σετ τιμών με τη μέθοδο A, και ο τύπος λεκάνης με τη μέθοδο B, ανάχθηκαν από επίπεδο λεκάνης σε επίπεδο κελιού, υπερθέτοντας κάναβο χωρικής ανάλυσης $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ μέσω του λογισμικού ArcGIS Pro. Ο Χάρτης 5.14 και Χάρτης 5.15 αποδίδουν το βέλτιστο συντελεστή μαιανδρισμού και τη βέλτιστη ταχύτητα ροής σε επίπεδο κελιού για τη μέθοδο A αντίστοιχα. Ο Χάρτης 5.16 αποδίδει τα ενιαία σετ παραμέτρων διόδευσης σε επίπεδο κελιού βάσει του τύπου λεκάνης.



Χάρτης 5.14. Βέλτιστος συντελεστής μαιανδρισμού (OPT) σε χωρική ανάλυση 0.5°x0.5°



Χάρτης 5.15. Βέλτιστη ταχύτητα ροής (OPT) σε χωρική ανάλυση 0.5°x0.5°



Χάρτης 5.16. Βέλτιστες παράμετροι διόδευσης (SLP) σε χωρική ανάλυση 0.5°×0.5°



6

Συμπεράσματα

Σε έναν κόσμο που αλλάζει ταχύως, τα μοντέλα εδαφικών διεργασιών αποτελούν ένα από το πιο κρίσιμα εργαλεία πρόβλεψης των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα της αναπαράστασης διεργασιών από τα μοντέλα αυτά, η υψηλότερη ακρίβεια των ατμοσφαιρικών και γεω-περιβαλλοντικών δεδομένων που είναι διαθέσιμα, παράλληλα με τη βελτίωση της υπολογιστικής ισχύος, έχουν αναδείξει τη χρησιμότητά τους για την εκτίμηση επιπτώσεων συμπεριλαμβανομένου του τομέα των υδάτων. Το JULES είναι ένα ελεύθερης πρόσβασης μοντέλο εδαφικών διεργασιών, πράγμα που επιτρέπει τη συνεχή ανάπτυξή του από τη διεθνή επιστημονική κοινότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι ένα από τα πιο εξελιγμένα μοντέλα αυτού του τύπου, αλλά παρόλη την πολυπλοκότητά του, η παραμετροποίηση ορισμένων διεργασιών δεν έχει αναπτυχθεί επαρκώς. Η διόδευση της επιφανειακής απορροής όπως αυτή προσομοιώνεται από το υπο-σύστημα TRIP (Total Runoff Integrating Pathways) είναι μία τέτοια περίπτωση. Συγκεκριμένα, το TRIP χρησιμοποιεί ενιαία χαρακτηριστικά ταχύτητας ροής και συντελεστή μαιανδρισμού για όλη τη χερσαία επιφάνεια της γης, ανεξαρτήτως των πραγματικών φυσιογραφικών ιδιαιτεροτήτων κάθε περιοχής.

Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία εστιάζει στη βελτίωση της διόδευσης της επιφανειακής απορροής, αρχικά μέσω της βελτιστοποίησης των παραμέτρων ταχύτητας ροής και συντελεστή μαιανδρισμού σε ένα δείγμα 360 υδρολογικών λεκανών απορροής, και έπειτα της συσχέτισης αυτών

*Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), από δεδομένα Lidar, του δέλτα του ποταμού Κολοράντο. Πηγή: *Daniel Coe (2022)*

με φυσικά χαρακτηριστικά της κάθε λεκάνης, με στόχο τη δυνατότητα παρέκτασης σε παγκόσμια κλίμακα. Η οριοθέτηση των λεκανών μελέτης και η περεταίρω ανάλυση βασίστηκε σε δεδομένα από την παγκόσμια βάση καταγεγραμμένων παροχών GRDC. Τα φυσικά χαρακτηριστικά των λεκανών αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων HydroATLAS, μία υψηλής ανάλυσης συλλογή υδρολογικών και περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών λεκανών απορροής σε παγκόσμια κλίμακα. Το σύνολο δεδομένων του HydroATLAS είναι διαθέσιμο σε διαφορετικά επίπεδα χωρικής διακριτοποίησης και το επίπεδο που επιλέχθηκε αντιστοιχεί σε 1321 λεκάνες απορροής, με γνώμονα την ομοιογένεια των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών με τις 360 λεκάνες GRDC.

Η επιλογή των GRDC λεκανών της μελέτης έγινε με κριτήρια την επάρκεια δεδομένων κατ'ελάχιστον 10ετούς ημερήσιας παροχής, την κατάσταση των λεκανών να βρίσκονται σε σχεδόν φυσικές συνθήκες, ενώ ταυτόχρονα η έκτασή τους να είναι τουλάχιστον 13000 km² (τουλάχιστον 5 κελιά κανάβου του JULES). Ένα παραγοντικό πείραμα εκτελέστηκε, μελετώντας συνδυαστικά είκοσι τιμές ταχύτητας ροής και δώδεκα συντελεστές μαιανδρισμού, καταλήγοντας σε 198 προσομοιώσεις. Ο δείκτης Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των παροχών του μοντέλου για κάθε σετ παραμέτρων διόδευσης του πειράματος, συγκρίνοντας με τις καταγεγραμμένες παροχές GRDC. Βάσει ποιοτικής ανάλυσης της μεταβολής του NSE₁₀ με την ταχύτητα ροής και το συντελεστή μαιανδρισμού, αναπτύχθηκαν δύο μέθοδοι βελτιστοποίησης των παραμέτρων διόδευσης. Σύμφωνα με τη μέθοδο A (OPT) επιλέγεται το σετ τιμών που σημείωσε την καλύτερη βελτίωση NSE₁₀ για τη μικρότερη απόκλιση από το NSE₁₀ του προκαθορισμένου σετ. Η μέθοδος B (SLP) έχει σκοπό την κατηγοριοποίηση των λεκανών σε δύο τύπους SS (Sinuous-Slow) και SF (Straight-Fast), με βάση την κλίση του διαγράμματος NSE σε σχέση με το λόγο της ταχύτητας ροής προς το συντελεστή μαιανδρισμού. Η κατηγοριοποίηση αυτή έχει σκοπό τη διχοτόμηση των λεκανών, που αντιπροσωπεύονται από μικρό συντελεστή μαιανδρισμού και μεγάλη ταχύτητα ροής, και αντίστροφα. Η μέση τιμή της κάθε παραμέτρου διόδευσης υπολογίστηκε για κάθε τύπο και ανατέθηκε ως ενιαία τιμή. Ένα νευρωνικό δίκτυο προσαρμογής και ένα νευρωνικό δίκτυο κατηγοριοποίησης αναπτύχθηκε για τη μέθοδο A και B αντίστοιχα, με σκοπό να συσχετίσει τις βέλτιστες παραμέτρους διόδευσης με έξι φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της κάθε λεκάνης. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν τα χαρακτηριστικά (i) έκτασης της λεκάνης απορροής, (ii) ισοδύναμου μήκους λίμνης, (iii) έκτασης ποταμού, (iv) κλίσης εδάφους, (v) κλίσης ποταμού κατά μήκος της ροής, και (vi) μήκους του υδρογραφικού δικτύου σε κάθε λεκάνη. Ένα τυχαίο σετ λεκανών απορροής, που δεν έλαβε μέρος στην ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων, χρησιμοποιήθηκε για την αμερόληπτη αξιολόγηση του νευρωνικού δικτύου κάθε μεθόδου. Τα εκπαιδευμένα νευρωνικά δίκτυα, χρησιμοποιήθηκαν για την παρέκταση της εκάστοτε μεθόδου σε παγκόσμια κλίμακα, με όρισμα εισόδου τις φυσιογραφικές μεταβλητές από τις 1321 HydroATLAS λεκάνες και έξοδο τις βέλτιστες παραμέτρους διόδευσης. Τα βέλτιστα σετ παραμέτρων κάθε μεθόδου ανάχθηκαν από επίπεδο λεκάνης απορροής σε επίπεδο κελιού, και το αποτέλεσμα ήταν ένα σετ πλεγματικών δεδομένων για την παραμετροποίηση του TRIP σε χωρική ανάλυση 0.5° × 0.5° και παγκόσμια κλίμακα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι το NSE₁₀ για το προκαθορισμένο σετ παραμέτρων υπολογίστηκε ίσο με 0.53, ενώ το θεωρητικά βέλτιστο NSE₁₀ που μπορεί να επιτευχθεί με προσαρμογή των παραμέτρων διόδευσης υπολογίστηκε ίσο προς 0.65. Η μέθοδος OPT κρίθηκε αποδοτικότερη στο στάδιο της βελτιστοποίησης των παραμέτρων διόδευσης, έναντι της μεθόδου SLP. Συγκεκριμένα, η μέθοδος OPT μεταξύ του συνόλου των εξεταζόμενων λεκανών, σημείωσε διάμεσο NSE₁₀ = 0.61, ενώ η μέθοδος SLP ίσο με 0.60, αντίστοιχα. Ο υπολογισμός των βέλτιστων παραμέτρων μετά από συσχέτιση με τις φυσιογραφικές παραμέτρους των λεκανών ήταν αποδοτικότερος με τη μέθοδο SLP, μετά από συσχέτιση με το νευρωνικό δίκτυο κατηγοριοποίησης, έναντι του νευρωνικού δικτύου προσαρμογής της μεθόδου OPT. Αναλυτικότερα, το διάμεσο NSE₁₀ για τη μέθοδο SLP βρέθηκε ίσο με 0.59, μειώθηκε δηλαδή κατά 0.01 σε σχέση με πριν την εφαρμογή του ANN, έναντι του 0.57 της μεθόδου OPT, μείωσης δηλαδή κατά 0.04. Η κλίση του ποταμού κατά μήκος της ροής είχε τη μεγαλύτερη σχετική

οπουδαιότητα για την πρόγνωση των βέλτιστων παραμέτρων για το ANN προσαρμογής της μεθόδου OPT, ενώ για το ANN κατηγοριοποίησης της μεθόδου SLP συντέλεσε περισσότερο η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής. Χωρικά, οι λεκάνες βόρειων γεωγραφικών πλατών σημείωσαν τη μεγαλύτερη βελτίωση και με τις δύο μεθόδους. Οι λεκάνες αυτές κατηγοριοποιήθηκαν κατά το πλείστον ως λεκάνες τύπου SF, δηλαδή λεκάνες που ευνοούνται από μικρούς συντελεστές μαιανδρισμού και μεγάλες ταχύτητες ροής. Η ανάλυση του NSE_{10} που επιτεύχθηκε από κάθε μέθοδο, με βάση τον τύπο της λεκάνης, έδειξε ότι η μέθοδος OPT βρέθηκε καταλληλότερη στις λεκάνες τύπου SS, ενώ η μέθοδος SLP σημείωσε γενικά υψηλότερα NSE_{10} σε λεκάνες τύπου SF.

Μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στον συνδυασμό των μεθόδων που μελετήθηκαν. Όπως συζητήθηκε, η μέθοδος OPT σημείωσε την καλύτερη βελτιστοποίηση των παραμέτρων διόδευσης, ενώ η συσχέτιση των παραμέτρων με τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά μέσω κατηγοριοποίησης των λεκανών ήταν αποδοτικότερη. Προτείνεται, επομένως, η ανάπτυξη νέων εξισώσεων, βασισμένες στην εξίσωση OPT, εξειδικευμένες όμως στον εκάστοτε τύπο λεκάνης. Επιπλέον, ενδιαφέρουσα θα ήταν η μελέτη περεταίρω φυσιογραφικών χαρακτηριστικών για τη συσχέτιση με τις παραμέτρους διόδευσης. Βάσει των αποτελεσμάτων της εργασίας, καλοί «οιωνοί» ίσως αποτελούν η θερμοκρασία/κλιματική ζώνη της κάθε λεκάνης, το γεωγραφικό πλάτος της, και πιθανά η αλληλουχία των υπο-λεκανών.

Βασική αδυναμία της ανάλυσης που παρουσιάστηκε, είναι ότι η βελτίωση του NSE , δε σημαίνει σε κάθε περίπτωση βελτίωση της διόδευσης της απορροής. Οι παράμετροι διόδευσης προσαρμόζονται έτσι ώστε το μοντέλο να σημειώνει μικρότερη απόκλιση από τις παρατηρήσιμες παροχές, με αποτέλεσμα να αποκρύπτονται και σφάλματα που δεν έχουν σχέση με τη διόδευση, αλλά σφάλματα της εκτίμησης της απορροής τα οποία πηγάζουν από άλλες διεργασίες του JULES, όπως π.χ. σφάλματα στις διεργασίες εξατμισοδιαπνοής. Επίσης, το σύνολο της ανάλυσης πραγματοποιήθηκε με μόνο ένα σετ δεδομένων εισόδου του JULES, το σετ GSWP3-W5E5 του ISIMIP. Καλή πρακτική θα ήταν η ανάπτυξη της μεθοδολογίας ή η επαλήθευση της με περισσότερα σετ κλιματικών δεδομένων, με σκοπό να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα λόγω των δεδομένων re-analysis. Πρέπει να σημειωθεί, επίσης, ότι μολονότι γίνεται ανάθεση βέλτιστου σετ παραμέτρων σε κάθε κελί πλέγματος, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί να εφαρμοστεί σε επίπεδο λεκάνης. Ο περιορισμός έγκειται στο γεγονός η μεθοδολογία βασίζεται στη σύγκριση της παροχής του μοντέλου με παρατηρημένες παροχές από τους σταθμούς μέτρησης των λεκανών απορροής.

Τα βέλτιστα σετ παραμέτρων διόδευσης, που έχουν προκύψει από την παρέκταση σε παγκόσμια κλίμακα, θα ενσωματωθούν στο μοντέλο JULES, με σκοπό την αξιολόγηση της παραμετροποίησης του TRIP.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adler, R. F., Sapiiano, M. R. P., Huffman, G. J., Wang, J. J., Gu, G., Bolvin, D., Chiu, L., Schneider, U., Becker, A., Nelkin, E., Xie, P., Ferraro, R., & Shin, D. bin. (2018). The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly analysis (New Version 2.3) and a review of 2017 global precipitation. *Atmosphere*, 9(4). doi: 10.3390/ATMOS9040138
- Aichouri, I., Hani, A., Bougherira, N., Djabri, L., Chaffai, H., & Lallahem, S. (2015). River Flow Model Using Artificial Neural Networks. *Energy Procedia*, 74, 1007–1014. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.07.832
- Ali, Z., Hussain, I., Faisal, M., Nazir, H. M., Hussain, T., Shad, M. Y., Mohamd Shoukry, A., & Hussain Gani, S. (2017). Forecasting Drought Using Multilayer Perceptron Artificial Neural Network Model. *Advances in Meteorology*, 2017. doi: 10.1155/2017/5681308
- ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. (2000). Artificial Neural Networks in Hydrology. II: Hydrologic Applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(2), 124–137. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2000)5:2(124)
- Balsamo, G., Viterbo, P., Beijaars, A., van den Hurk, B., Hirschi, M., Betts, A. K., & Scipal, K. (2009). A revised hydrology for the ECMWF model: Verification from field site to terrestrial water storage and impact in the integrated forecast system. *Journal of Hydrometeorology*, 10(3), 623–643. doi: 10.1175/2008JHM1068.1
- Bell, J. (2014). Chapter 5 - Artificial Neural Networks. *Machine Learning: Hands-On for Developers and Technical Professionals*, 91–116.
- Best, M. J., Pryor, M., Clark, D. B., Rooney, G. G., Essery, R. . L. H., Ménard, C. B., Edwards, J. M., Hendry, M. A., Porson, A., Gedney, N., Mercado, L. M., Sitch, S., Blyth, E., Boucher, O., Cox, P. M., Grimmond, C. S. B., & Harding, R. J. (2011). The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 677–699. doi: 10.5194/GMD-4-677-2011
- Betts, A. K. (2004). Understanding Hydrometeorology Using Global Models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(11), 1673–1688. doi: 10.1175/BAMS-85-11-1673
- Betts, A. K., Ball, J. H., Beljaars, A. C. M., Miller, M. J., & Viterbo, P. A. (1996). The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D3), 7209–7225. doi: 10.1029/95JD02135
- Castaneda-Gonzalez, M., Poulin, A., Romero-Lopez, R., Arsenault, R., Brissette, F., Chaumont, D., & Paquin, D. (2018). Impacts of Regional Climate Model Spatial Resolution on Summer Flood Simulation. In *EPiC Series in Engineering* (Vol. 3).
- Clark, D. B., Mercado, L. M., Sitch, S., Jones, C. D., Gedney, N., Best, M. J., Pryor, M., Rooney, G. G., Essery, R. L. H., Blyth, E., Boucher, O., Harding, R. J., Huntingford, C., & Cox, P. M. (2011). The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 2: Carbon fluxes and vegetation dynamics. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 701–722. doi: 10.5194/gmd-4-701-2011
- Clark, D., & Harris, P. (2009). *Joint UK Land Environment Simulator (JULES) Version 2.1 User Manual*.

-
- Clark, D., Harris, P., Pryor, M., & Hendry, M. (2010). *Joint UK Land Environment Simulator (JULES) Version 2.2 User Manual*.
- Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Matsui, N., Allan, R. J., Yin, X., Gleason, B. E., Vose, R. S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., BroNnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R. I., Grant, A. N., Groisman, P. Y., Jones, P. D., Kruk, M. C., Kruger, A. C., Marshall, G. J., ... Worley, S. J. (2011). The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654), 1–28. doi: 10.1002/QJ.776
- Costa-Cabral, M. C., & Burges, S. J. (1994). Digital Elevation Model Networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. *Water Resources Research*, 30(6), 1681–1692. doi: 10.1029/93WR03512
- Cox, P. M., Huntingford, C., & Harding, R. J. (1998). A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme. *Journal of Hydrology*, 212–213(1–4), 79–94. doi: 10.1016/S0022-1694(98)00203-0
- Cox, Peter M. (2001). *Description of the “TRIFFID” Dynamic Global Vegetation Model*.
- Cucchi, M., P. Weedon, G., Amici, A., Bellouin, N., Lange, S., Müller Schmied, H., Hersbach, H., & Buontempo, C. (2020). WFDE5: Bias-adjusted ERA5 reanalysis data for impact studies. *Earth System Science Data*, 12(3), 2097–2120. doi: 10.5194/ESSD-12-2097-2020
- Daliakopoulos, I. N., Coulibaly, P., & Tsanis, I. K. (2005). Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, 309(1–4), 229–240. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2004.12.001
- Dan Foresee, F., & Hagan, M. T. (1997). Gauss-Newton approximation to bayesian learning. *IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings*, 3, 1930–1935. doi: 10.1109/ICNN.1997.614194
- Deardorff, J. W. (1978). Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research*, 83(C4), 1889. doi: 10.1029/JC083IC04P01889
- Desborough, C. E. (1999). Surface energy balance complexity in GCM land surface models. In *Climate Dynamics* (Vol. 15). Springer-Verlag.
- Dickinson, R. E. (1983). Land Surface Processes and Climate—Surface Albedos and Energy Balance. *Advances in Geophysics*, 25(C), 305–353. doi: 10.1016/S0065-2687(08)60176-4
- Drusch, M., & Viterbo, P. (2007). Assimilation of Screen-Level Variables in ECMWF’s Integrated Forecast System: A Study on the Impact on the Forecast Quality and Analyzed Soil Moisture. *Monthly Weather Review*, 135(2), 300–314. doi: 10.1175/MWR3309.1
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., Gayno, G., & Tarpley, J. D. (2003). Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22), 8851. doi: 10.1029/2002JD003296
- Elshorbagy, A., & Parasuraman, K. (2008). On the relevance of using artificial neural networks for estimating soil moisture content. *Journal of Hydrology*, 362(1–2), 1–18. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2008.08.012
- ESA - The Earth’s water cycle. (n.d.). Retrieved from https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2004/09/The_Earth_s_water_cycle

-
- Feldman, A. (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS : technical reference manual*. Davis CA: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.
- Fischer, E. M., Seneviratne, S. I., Vidale, P. L., Lüthi, D., & Schär, C. (2007). Soil Moisture–Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave. *Journal of Climate*, 20(20), 5081–5099. doi: 10.1175/JCLI4288.1
- Fisher, R. A., & Koven, C. D. (2020). Perspectives on the Future of Land Surface Models and the Challenges of Representing Complex Terrestrial Systems. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(4), e2018MS001453. doi: 10.1029/2018MS001453
- Gädeke, A., Krysanova, V., Aryal, A., Chang, J., Grillakis, M., Hanasaki, N., Koutroulis, A., Pokhrel, Y., Satoh, Y., Schaphoff, S., Müller Schmied, H., Stacke, T., Tang, Q., Wada, Y., & Thonicke, K. (2020). Performance evaluation of global hydrological models in six large Pan-Arctic watersheds. *Climatic Change*, 163(3), 1329–1351. doi: 10.1007/S10584-020-02892-2/TABLES/5
- Gavin, H. P. (2020). *The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems*.
- Gelati, E., Decharme, B., Calvet, J. C., Minvielle, M., Polcher, J., Fairbairn, D., & Weedon, G. P. (2018). Hydrological assessment of atmospheric forcing uncertainty in the Euro-Mediterranean area using a land surface model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4), 2091–2115. doi: 10.5194/HESS-22-2091-2018
- Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2011). Simulating current global river runoff with a global hydrological model: model revisions, validation, and sensitivity analysis. *Hydrological Processes*, 25(7), 1129–1145. doi: 10.1002/HYP.7727
- GRDC. (n.d.). *The Global Runoff Data Centre, 56068 Koblenz, Germany, 56068 Koblenz, Germany*. 56068 Koblenz, Germany.
- Grill, G. (2014). *Challenges and opportunities in large-scale river routing: Development and application of a hyper-resolution river routing model to assess anthropogenic impacts on freshwater ecosystems*.
- Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., Alexakis, D. D., Polykretis, C., & Daliakopoulos, I. N. (2021). Regionalizing Root-Zone Soil Moisture Estimates From ESA CCI Soil Water Index Using Machine Learning and Information on Soil, Vegetation, and Climate. *Water Resources Research*, 57(5). doi: 10.1029/2020WR029249
- Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., Leonard, M., Liu, J., Schmied, H. M., Papadimitriou, L., Pokhrel, Y., Seneviratne, S. I., Satoh, Y., Thiery, W., Westra, S., Zhang, X., & Zhao, F. (2021). Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science*, 371(6534), 1159–1162. doi: 10.1126/SCIENCE.ABA3996/SUPPL_FILE/ABA3996_GUDMUNDSSON_SM.PDF
- Gupta, H. v., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2009.08.003
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. doi: 10.1002/QJ.3803
- I . Vlahavas, P . Kefalas, N . Bassiliades, F . Kokkoras, & I. Sakellariou. (2006). *Artificial Intelligence* (3rd Edition). University of Macedonia Press.
- Kişi, Ö. (2004). River Flow Modeling Using Artificial Neural Networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(1), 60–63. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2004)9:1(60)

-
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*. doi: 10.5194/hess-2019-327
- Koskinen, M., Tahvanainen, T., Sarkkola, S., Menberu, M. W., Laurén, A., Sallantausta, T., Marttila, H., Ronkanen, A. K., Parviainen, M., Tolvanen, A., Koivusalo, H., & Nieminen, M. (2017). Restoration of nutrient-rich forestry-drained peatlands poses a risk for high exports of dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus. *Science of The Total Environment*, 586, 858–869. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2017.02.065
- Krabbenhoft, C. A., Allen, G. H., Lin, P., Godsey, S. E., Allen, D. C., Burrows, R. M., DelVecchia, A. G., Fritz, K. M., Shanafield, M., Burgin, A. J., Zimmer, M. A., Datry, T., Dodds, W. K., Jones, C. N., Mims, M. C., Franklin, C., Hammond, J. C., Zipper, S., Ward, A. S., ... Olden, J. D. (2022). Assessing placement bias of the global river gauge network. *Nature Sustainability* 2022, 1–7. doi: 10.1038/s41893-022-00873-0
- Krysanova, V., Zaherpour, J., Didovets, I., Gosling, S. N., Gerten, D., Hanasaki, N., Müller Schmied, H., Pokhrel, Y., Satoh, Y., Tang, Q., & Wada, Y. (2020). How evaluation of global hydrological models can help to improve credibility of river discharge projections under climate change. *Climatic Change*, 163(3), 1353–1377. doi: 10.1007/S10584-020-02840-0/TABLES/8
- Lange, S. (2019a). WFDE5 over land merged with ERA5 over the ocean (W5E5). In GFZ Data Services. doi: <https://doi.org/10.5880/pik.2019.023>
- Lange, S. (2019b). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3055–3070. doi: 10.5194/GMD-12-3055-2019
- Lange, S. (2020). ISIMIP3BASD. doi: 10.5281/ZENODO.3648654
- Le, X. H., Ho, H. V., Lee, G., & Jung, S. (2019). Application of Long Short-Term Memory (LSTM) Neural Network for Flood Forecasting. *Water* 2019, Vol. 11, Page 1387, 11(7), 1387. doi: 10.3390/W11071387
- Lehner, B., & Grill, G. (2013). Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, 27(15), 2171–2186. doi: 10.1002/HYP.9740
- Lehner, B., Verdin, K., & Jarvis, A. (2008). New Global Hydrography Derived From Spaceborne Elevation Data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(10), 93–94. doi: 10.1029/2008EO100001
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), 14415–14428. doi: 10.1029/94JD00483
- Linke, S., Lehner, B., Ouellet Dallaire, C., Ariwi, J., Grill, G., Anand, M., Beames, P., Burchard-Levine, V., Maxwell, S., Moidu, H., Tan, F., & Thieme, M. (2019). Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution. *Scientific Data*, 6(1), 283. doi: 10.1038/s41597-019-0300-6
- Liston, G. E., Sud, Y. C., & Wood, E. F. (1994). Evaluating GCM Land Surface Hydrology Parameterizations by Computing River Discharges Using a Runoff Routing Model: Application to the Mississippi Basin. *Journal of Applied Meteorology*, 33(3), 394–405. doi: 10.1175/1520-0450(1994)033<0394:EGLSHP>2.0.CO;2
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of hydrology*.

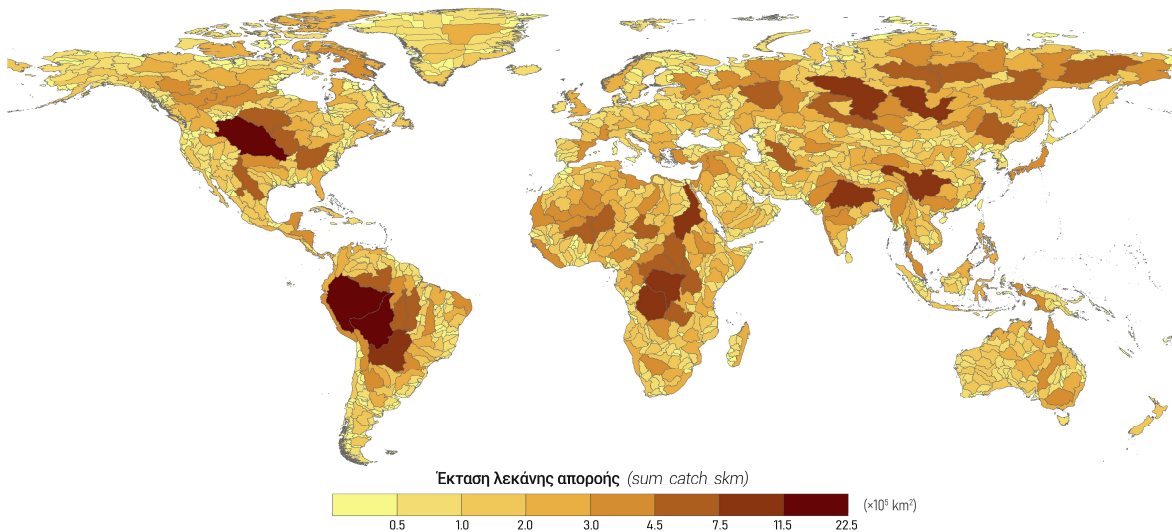
-
- Maier, H. R., Jain, A., Dandy, G. C., & Sudheer, K. P. (2010). Methods used for the development of neural networks for the prediction of water resource variables in river systems: Current status and future directions. *Environmental Modelling & Software*, 25(8), 891–909. doi: 10.1016/J.ENVSOFT.2010.02.003
- Messenger, M. L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I., & Schmitt, O. (2016). Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, 7. doi: 10.1038/NCOMMS13603
- Miller, J. R., Russell, G. L., & Caliri, G. (1994). Continental-Scale River Flow in Climate Models. *Journal of Climate*, 7(6), 914–928. doi: 10.1175/1520-0442(1994)007<0914:CSRFIC>2.0.CO;2
- Mishra, A. K., & Desai, V. R. (2006). Drought forecasting using feed-forward recursive neural network. *Ecological Modelling*, 198(1–2), 127–138. doi: 10.1016/J.ECOLMODEL.2006.04.017
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. doi: 10.13031/2013.23153
- Mosier, T. M., Hill, D. F., & Sharp, K. v. (2016). How much cryosphere model complexity is just right? Exploration using the conceptual cryosphere hydrology framework. *Cryosphere*, 10(5), 2147–2171. doi: 10.5194/TC-10-2147-2016
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. v. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Noilhan, J., & Mahfouf, J. F. (1996). The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, 13(1–4), 145–159. doi: 10.1016/0921-8181(95)00043-7
- Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science*, 313(5790), 1068–1072. doi: 10.1126/SCIENCE.1128845
- Oki, T., Nishimura, T., & Dirmeyer, P. (1999). Assessment of Annual Runoff from Land Surface Models Using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 77(1B), 235–255. doi: 10.2151/JMSJ1965.77.1B_235
- Oki, T., & Sud, Y. C. (1998). Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP)-A Global River Channel Network. *Earth Interactions* •, 2. Retrieved from <http://EarthInteractions.org>
- Oleson, K. W., Lawrence, D. M., Bonan, G. B., Flanner, M. G., Kluzek, E., Lawrence, P. J., Levis, S., Swenson, S. C., Thornton, P. E., Dai, A., Decker, M., Dickinson, R., Feddema, J., Heald, C. L., Hoffman, F., Lamarque, J.-F., Mahowald, N., Niu, G.-Y., Qian, T., ... Zeng, X. (2010). *Technical Description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM)*. Retrieved from <http://www.ucar.edu/library/collections/technotes/technotes.jsp>
- Olivera, F., Famiglietti, J., & Asante, K. (2000). Global-scale flow routing using a source-to-sink algorithm. *Water Resources Research*, 36(8), 2197–2207. doi: 10.1029/2000WR900113
- Paiva, R. C. D., Collischonn, W., & Tucci, C. E. M. (2011). Large scale hydrologic and hydrodynamic modeling using limited data and a GIS based approach. *Journal of Hydrology*, 406(3–4), 170–181. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.06.007
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193(1032), 120–145. doi: 10.1098/RSPA.1948.0037

-
- Pfafstetter, O. (1989). *Classification of hydrographic basins: coding methodology, unpublished manuscript*. Rio de Janeiro.
- Rajurkar, M. P., Kothyari, U. C., & Chaube, U. C. (2004). Modeling of the daily rainfall-runoff relationship with artificial neural network. *Journal of Hydrology*, 285(1-4), 96-113. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2003.08.011
- Richards, L. A. (2004). CAPILLARY CONDUCTION OF LIQUIDS THROUGH POROUS MEDIUMS. *Physics*, 1(5), 318. doi: 10.1063/1.1745010
- Robinson, N., Regetz, J., & Guralnick, R. P. (2014). EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void-free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 57-67. doi: 10.1016/J.ISPRSJPRS.2013.11.002
- Rosenblatt, F. (1958). The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain. *Psychological Review*, 65(6), 386-408. doi: 10.1037/H0042519
- Russell, G. L., & Miller, J. R. (1990). Global river runoff calculated from a global atmospheric general circulation model. *Journal of Hydrology*, 117(1-4), 241-254. doi: 10.1016/0022-1694(90)90095-F
- Saruhashi, T. (2001). *Global water resource assessment using total runoff integrating pathways*. Master's thesis.
- Schaepli, B., & Gupta, H. v. (2007). Do Nash values have value? *Hydrological Processes*, 21(15), 2075-2080. doi: 10.1002/HYP.6825
- Schulze, K., Hunger, M., & Döll, P. (2005). Simulating river flow velocity on global scale. *Advances in Geosciences*, 5, 133-136.
- Verseghy, D. L., McFarlane, N. A., & Lazare, M. (1993). Class – A Canadian land surface scheme for GCMS, II. Vegetation model and coupled runs. *International Journal of Climatology*, 13(4), 347-370. doi: 10.1002/JOC.3370130402
- Verseghy, Diana L. (1991). Class – A Canadian land surface scheme for GCMS. I. Soil model. *International Journal of Climatology*, 11(2), 111-133. doi: 10.1002/JOC.3370110202
- Verzano, K., Bärlund, I., Flörke, M., Lehner, B., Kynast, E., Voß, F., & Alcamo, J. (2012). Modeling variable river flow velocity on continental scale: Current situation and climate change impacts in Europe. *Journal of Hydrology*, 424-425, 238-251. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2012.01.005
- Viterbo, P., & Beljaars, A. C. M. (1995). An Improved Land Surface Parameterization Scheme in the ECMWF Model and Its Validation. *Journal of Climate*, 8(11), 2716-2748. doi: 10.1175/1520-0442(1995)008<2716:AILSPS>2.0.CO;2
- Walters, D., Boutle, I., Brooks, M., Melvin, T., Stratton, R., Vosper, S., Wells, H., Williams, K., Wood, N., Allen, T., Bushell, A., Copsey, D., Earnshaw, P., Edwards, J., Gross, M., Hardiman, S., Harris, C., Heming, J., Klingaman, N., ... Xavier, P. (2017). The Met Office Unified Model Global Atmosphere 6.0/6.1 and JULES Global Land 6.0/6.1 configurations. *Geoscientific Model Development*, 10(4), 1487-1520. doi: 10.5194/GMD-10-1487-2017
- Wang, X., Stone, P., & Marotzke, J. (1998). Global Thermohaline Circulation. Part I: Sensitivity to Atmospheric Moisture Transport. *Center for Global Change Science*, 71-82. doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012%3C0071:GTCPI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012%3C0071:GTCPI%3E2.0.CO;2)
- Warszawski, L., Frieler, K., Huber, V., Piontek, F., Serdeczny, O., & Schewe, J. (2014). The inter-sectoral impact model intercomparison project (ISI-MIP): Project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3228-3232. doi: 10.1073/PNAS.1312330110

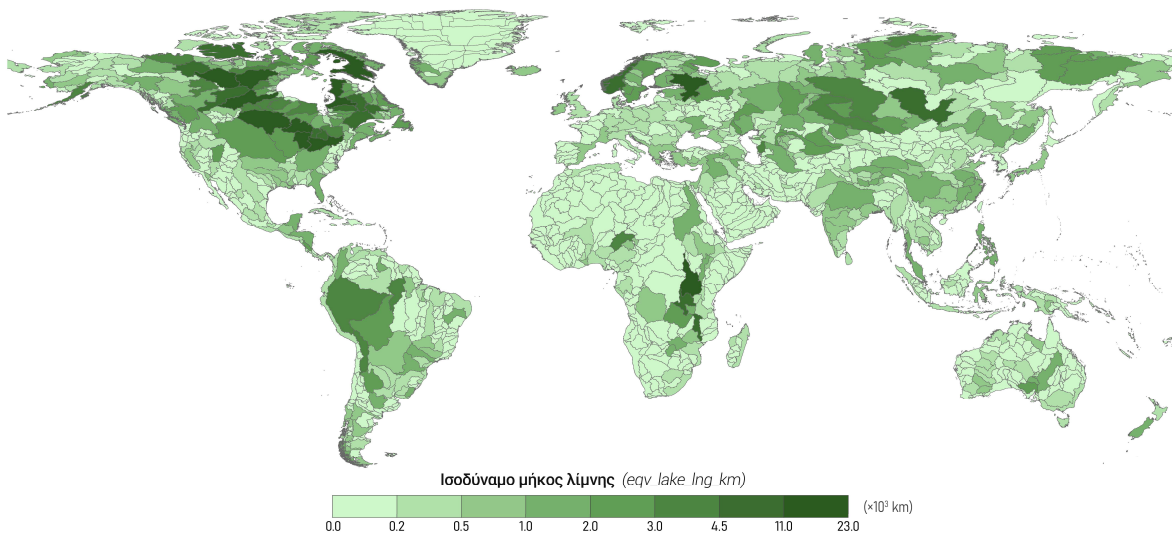
-
- Weedon, G. P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M. J., & Viterbo, P. (2014). The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resources Research*, 50(9), 7505–7514. doi: 10.1002/2014WR015638
- Wijffels, S. E., Schmitt, R. W., Bryden, H. L., & Stigebrandt, A. (1992). Transport of Freshwater by the Oceans. *Journal of Physical Oceanography*, 22(2), 155–162. doi: 10.1175/1520-0485(1992)022<0155:TOFBTO>2.0.CO;2
- Wiltshire, A. J., Carolina Duran Rojas, M., Edwards, J. M., Gedney, N., Harper, A. B., Hartley, A. J., Hendry, M. A., Robertson, E., & Smout-Day, K. (2020). JULES-GL7: The Global Land configuration of the Joint UK Land Environment Simulator version 7.0 and 7.2. *Geoscientific Model Development*, 13(2), 483–505. doi: 10.5194/GMD-13-483-2020
- Wu, C. L., & Chau, K. W. (2006). Flood forecasting neural network model with genetic algorithm A flood forecasting neural network model with genetic algorithm. *Article in International Journal of Environment and Pollution*, 28, 261–273. doi: 10.1504/IJEP.2006.011211
- Wu, C. L., & Chau, K. W. (2011). Rainfall-runoff modeling using artificial neural network coupled with singular spectrum analysis. *Journal of Hydrology*, 399(3–4), 394–409. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2011.01.017
- Zhao, F., Veldkamp, T. I. E., Frieler, K., Schewe, J., Ostberg, S., Willner, S., Schauburger, B., Gosling, S. N., Schmied, H. M., Portmann, F. T., Leng, G., Huang, M., Liu, X., Tang, Q., Hanasaki, N., Biemans, H., Gerten, D., Satoh, Y., Pokhrel, Y., ... Yamazaki, D. (2017). The critical role of the routing scheme in simulating peak river discharge in global hydrological models. *Environmental Research Letters*, 12(7), 075003. doi: 10.1088/1748-9326/AA7250
- Τσακίρης Γ. (1995). *ΥΔΑΤΙΚΟΙ ΠΟΡΟΙ: Ι. Τεχνική Υδρολογία & Εισαγωγή στη διαχείριση υδατικών πόρων*. Εκδόσεις Συμμετρία.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

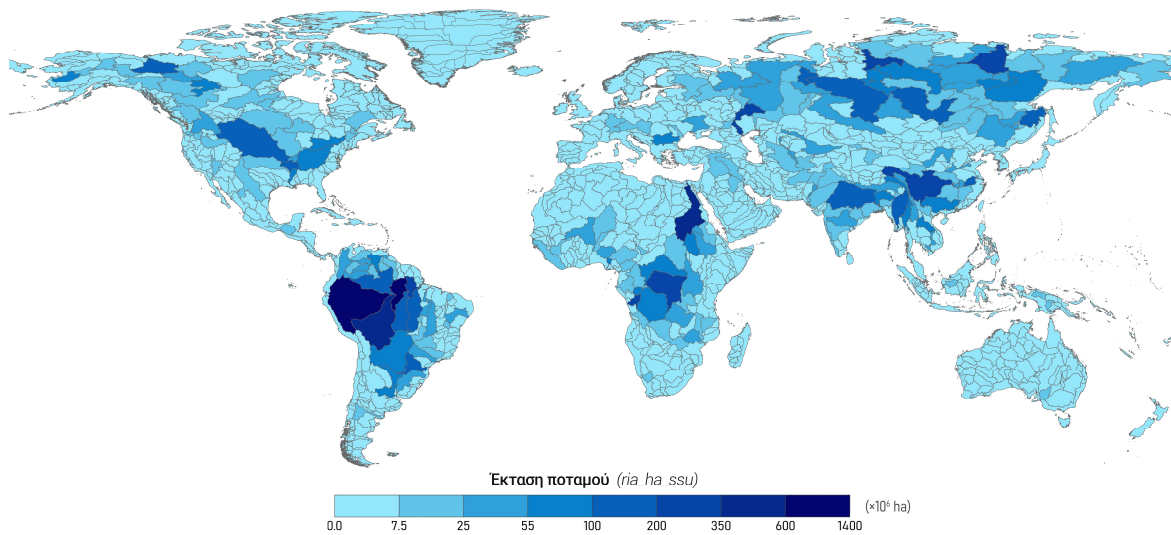
Α' Μέρος – Κατανομή φυσιογραφικών χαρακτηριστικών μελέτης



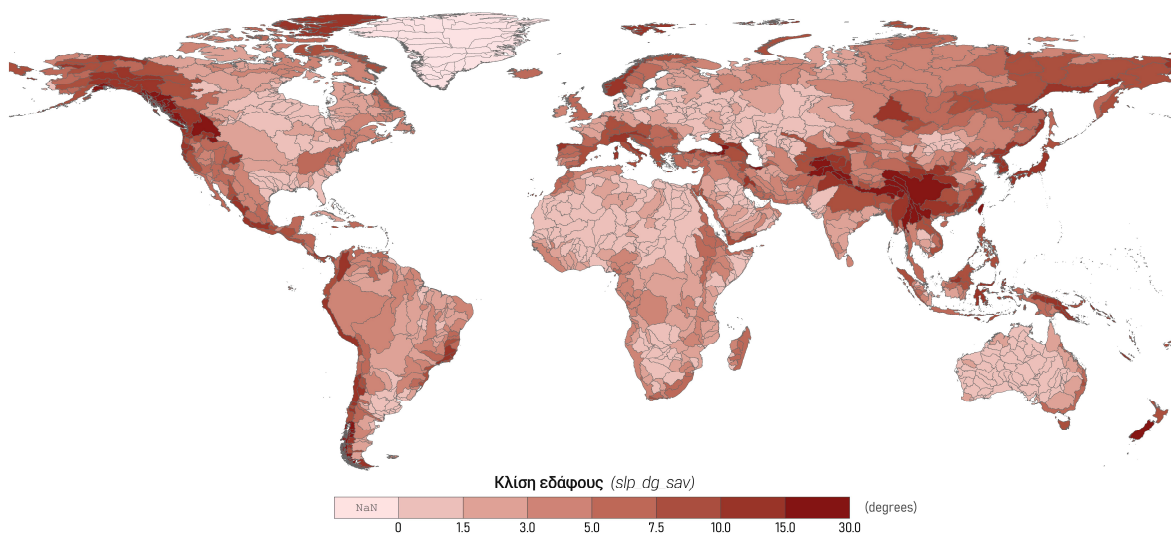
Χάρτης Α.1. Συνολική έκταση λεκάνης απορροής (Πηγή: Lehner et al., 2008)



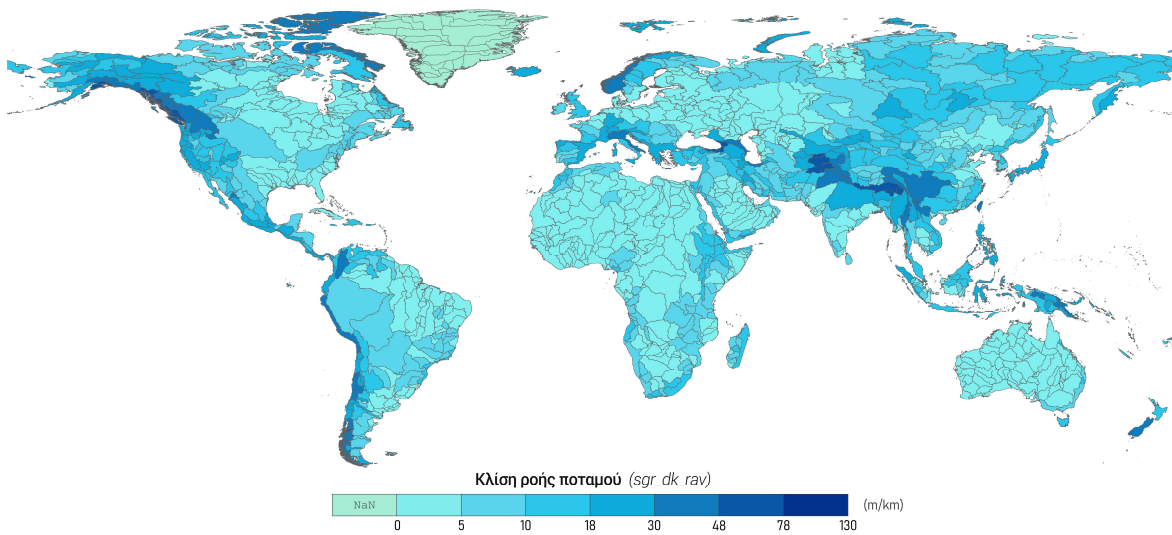
Χάρτης Α.2. Ισοδύναμο μήκος λίμνης (Πηγή: Messenger et al., 2016)



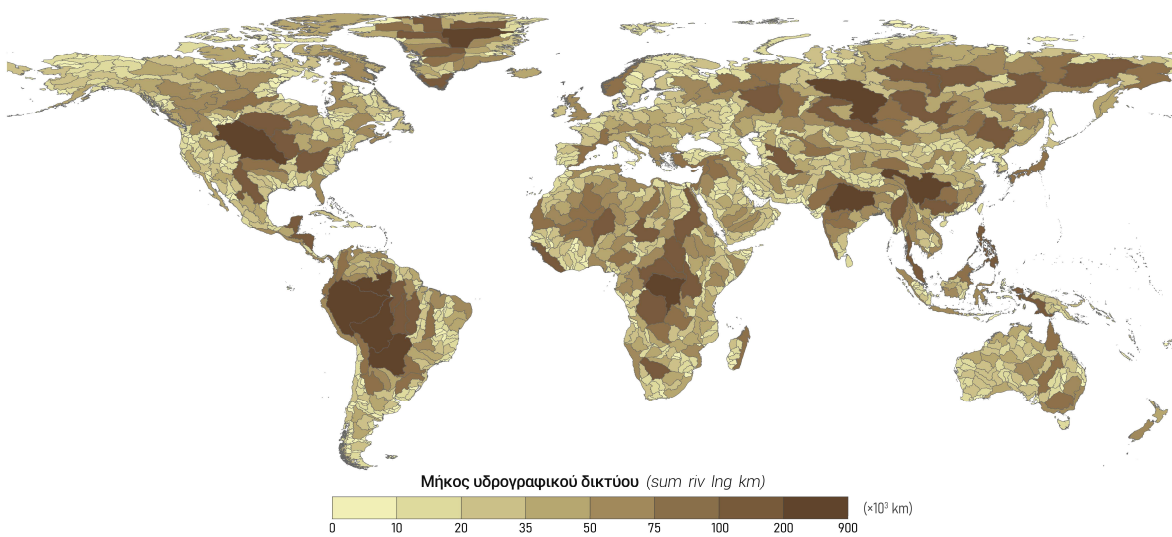
Χάρτης A.3. Έκταση ελεύθερης επιφάνειας ποταμού (Πηγή: Lehner et al., 2008)



Χάρτης A.4. Μέση κλίση πρανών εδάφους (Πηγή: Robinson et al., 2014)



Χάρτης Α.5. Μέση κλίση ποταμού κατά μήκος της ροής (Πηγή: Robinson et al., 2014)



Χάρτης Α.6. Συνολικό μήκος του υδρογραφικού δικτύου, εντός κάθε λεκάνης (Πηγή: Lehner et al., 2008)

Β' Μέρος – Διαμόρφωση Νευρωνικών Δικτύων

Πίνακας Β.1. Διαμόρφωση Νευρωνικού Δικτύου προσαρμογής – Μέθοδος Α (OPT)

Νευρωνικό δίκτυο προσαρμογής	
Τύπος	fitnet
Κρυφά επίπεδα	2
Νευρώνες (ανά επίπεδο)	10(1), 5(2)
Ποσοστό εκπαίδευσης/επικύρωσης/δοκιμής	70/20/10
Αλγόριθμος εκπαίδευσης	Levenberg-Marquardt
Συνάρτηση ενεργοποίησης 1 ^{ου} κρ. επιπέδου	tansig
Συνάρτηση ενεργοποίησης 2 ^{ου} κρ. επιπέδου	logsig
Εποχές (epochs)	4000
Ρυθμός εκμάθησης (learning rate)	0.01
Δείκτης απόδοσης NN (performance function)	MSE
Στόχος απόδοσης NN (performance goal)	1e-10
Ελάχιστη κλίση απόδοσης (Minimum performance gradient)	1e-15
Μέγιστος αριθμός αποτυχημένων επικυρώσεων (Validation checks)	10

Πίνακας Β.2. Διαμόρφωση Νευρωνικού Δικτύου κατηγοριοποίησης – Μέθοδος Β (SLP)

Νευρωνικό δίκτυο κατηγοριοποίησης	
Τύπος	patternnet
Κρυφά επίπεδα	3
Νευρώνες (ανά επίπεδο)	10(1), 10(2), 10(3)
Ποσοστό εκπαίδευσης/επικύρωσης/δοκιμής	70/25/5
Αλγόριθμος εκπαίδευσης	Levenberg-Marquardt
Συνάρτηση ενεργοποίησης 1 ^{ου} κρυφού επιπέδου	logsig
Συνάρτηση ενεργοποίησης 2 ^{ου} κρυφού επιπέδου	radbas
Συνάρτηση ενεργοποίησης 3 ^{ου} κρυφού επιπέδου	purelin
Εποχές (epochs)	4000
Ρυθμός εκμάθησης (learning rate)	0.01
Δείκτης απόδοσης NN (performance function)	MSE
Στόχος απόδοσης NN (performance goal)	1e-10
Ελάχιστη κλίση απόδοσης (Minimum performance gradient)	1e-15
Μέγιστος αριθμός αποτυχημένων επικυρώσεων (Validation checks)	10
