

## Εκτίμηση υδάτινων απορροών νησιωτικών λεκανών υπό την επίδραση κλιματικών μεταβολών μέσω του υδρολογικού μοντέλου SWAT

Προβατάς Σωτήριος<sup>1</sup>, Τζωράκη Ουρανία<sup>2</sup>, Βελεγράκης Αντώνιος<sup>2</sup>, Προβατάς Νικόλαος<sup>2</sup>, Ζήρος Αθανάσιος<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, e-mail: [geom13025@geo.aegean.gr](mailto:geom13025@geo.aegean.gr), [sotir\\_prov@gmail.com](mailto:sotir_prov@gmail.com)

<sup>2</sup>Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

<sup>3</sup>Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

### Περίληψη

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η μελέτη της υδρολογικής δίκαιας του ποταμού Τσικνιά, Λέσβου (91.3 km<sup>2</sup>) με τη βοήθεια του κατανεμημένου υδρολογικού μοντέλου SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Πρόσφατες μετρήσεις (2013-2014) των παροχών του ποταμού βοήθησαν στη βαθμονόμηση του SWAT για την εκτίμηση των απορροών για το διάστημα 1961-2014. Τα αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου MRI CGCM 2.3.2a χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της παροχής του ποταμού για τις περιόδους 2046-2065 και 2081-2100. Η μέση ετήσια βροχόπτωση των τελευταίων 54 ετών αντιστοιχεί στα 638 mm και η μέση ετήσια απορροή εκτιμήθηκε μέσω του SWAT στα 0.32 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Πτωτική τάση της μέσης ετήσιας παροχής (43-47%) προκύπτει από τα σενάρια κλιματικής αλλαγής.

**Λέξεις κλειδιά:** ποτάμι, SWAT, βαθμονόμηση, κλιματική αλλαγή

### Estimated water runoff of insular basins under the influence of climate change through the hydrological model SWAT

Provatatos Sotirios<sup>1</sup>, Tzoraki Ourania<sup>2</sup>, Velegrakis Adonios<sup>2</sup>, Provatatos Nikolaos<sup>2</sup>, Ziros Athanasios<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Geography, University of Aegean, [geom13025@geo.aegean.gr](mailto:geom13025@geo.aegean.gr), [sotir\\_prov@gmail.com](mailto:sotir_prov@gmail.com)

<sup>2</sup>Department of Marine Sciences, University of Aegean

<sup>3</sup>School of Civil Engineering, National Technical University of Athens

### Abstract

The hydrological model SWAT (Soil and Water Assessment Tool) is used to study the hydrology of River Tsiknia, Lesvos (91.3 km<sup>2</sup>). Recent measurements (2013-2014) of the river flows were used in the SWAT calibration and the long-term runoff simulation (1961-2014). The climatic model MRI CGCM 2.3.2a outcomes were used to predict the river flow for the periods 2046-2065 and 2081-2100. The average annual rainfall of the last fifty-four years (638 mm) and the mean annual runoff, calculated through the SWAT was 0.32 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, show a slight downward trend. Downward trend of maximum flow (43-47%) arises from the climate change scenarios.

**Keywords:** stream, SWAT, calibration, climate change

### 1. Εισαγωγή

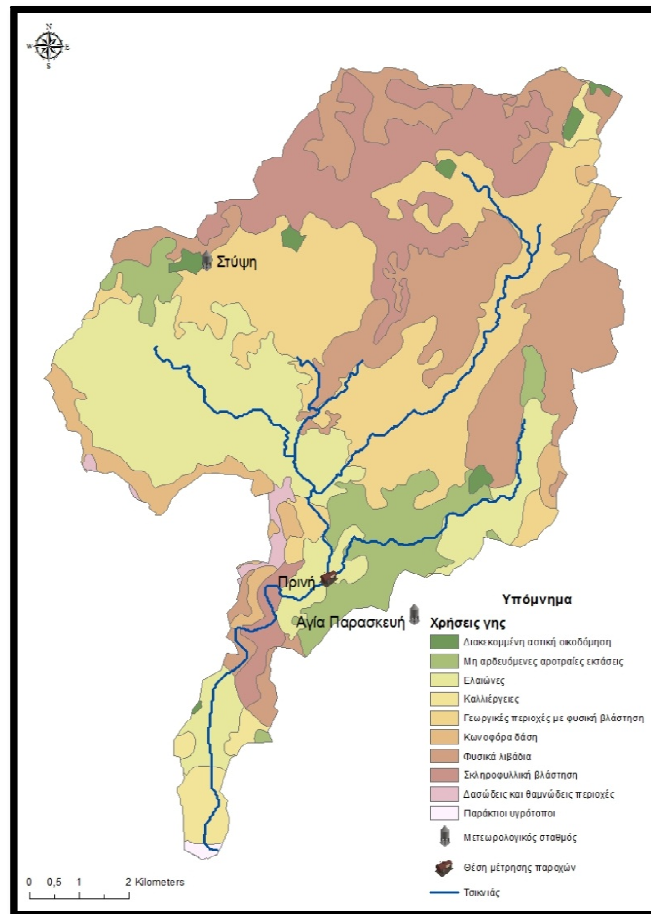
Οι υδρολογικές λεκάνες των νησιών της Μεσογείου είναι κατά το πλείστον μη μόνιμης ροής, emπίπτοντας στην κατηγορία των ρεμάτων διαλείπουσας ροής (Tzoraki and Nikolaidis, 2007). Η έλλειψη μετρήσεων παροχής μπορεί να καλυφθεί εν μέρει από τη χρήση υδρολογικών μοντέλων όπως το APEX, το MIKE-SHE και το SWAT (Golmohammadi et al., 2014). Στη συγκεκριμένη εργασία θα χρησιμοποιηθεί το SWAT, το οποίο είναι ένα μοντέλο φυσικής βάσης και συνεχούς χρόνου, που δημιουργήθηκε προκειμένου να προσομοιώσει την επίδραση των πρακτικών διαχείρισης της γης στο νερό, στα φερτά υλικά και στα μεταφερόμενα χημικά στοιχεία (Neitsch et al., 2011).

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι (i) να προσδιοριστεί η απορροή νησιωτικής λεκάνης απορροής ποταμού που χαρακτηρίζεται από έλλειψη δεδομένων και (ii) να προσδιοριστεί η απόκριση της λεκάνης αυτής στη μεταβολή του κλίματος. Θα εξεταστεί κατά πόσο τα κλιματικά μοντέλα ανταποκρίνονται στις πρόσφατες τοπικές μετεωρολογικές συνθήκες (συνθήκες βάσης), ώστε εν συνεχεία να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μελλοντικές εκτιμήσεις.

### 2. Υλικά και Μέθοδοι

#### 2.1 Εκτέλεση του προτύπου SWAT με μετεωρολογικά δεδομένα για την περίοδο 1961-2014

Περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του χείμαρρου Τσικνιά, 91.3 km<sup>2</sup>, η οποία καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της κεντρικής και βόρειας Λέσβου, με τον υδροκρίτη του να διέρχεται από τους ορεινούς όγκους Λεπέτυμνο, Φουρτούνα, Πετσοφά, Τρουλιές και Μαυριά. Εντός της λεκάνης περιλαμβάνονται μικρά και σχετικά απομακρυσμένα χωριά, στα οποία οι κύριες ασχολίες των κατοίκων επικεντρώνονται στον πρωτογενή τομέα. Οι κύριες χρήσεις γης είναι οι ελαιώνες, τα δάση και οι ετήσιες καλλιέργειες. Ο χείμαρρος Τσικνιάς ρέει πάνω σε ηφαιστειακούς σχηματισμούς, ενώ προς τις εκβολές του εμφανίζονται ποταμοχειμάρριες αποθέσεις πλειστοκαινικής ηλικίας, οι οποίες αποτελούν τον παράκτιο υδροφόρο ορίζοντα έκτασης 31.42 km<sup>2</sup> (Σχήμα 1).



**Σχήμα 1:** Ο χρήσεις γης, οι θέσεις των μετεωρολογικών σταθμών και η περιοχή μέτρησης παροχών

Για την εκτίμηση της παροχής έγινε χρήση του λογισμικού SWAT (Soil and Water Assessment Tool), το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον GIS (Winchell et al., 2009). Η επιτυχής εκτέλεση του μοντέλου έγινε έπειτα από την εισαγωγή των εξής δεδομένων: i) Το τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους (DEM) δημιουργήθηκε από ψηφιοποίηση χαρτών κλίμακας 1:5000 και από επιμέρους σημεία στα πεδινά, ii) Οι χρήσεις γης είναι του Corine, αλλά προστέθηκαν επιπλέον πέντε οικισμοί που δεν είχαν καταγραφεί και στη συνέχεια έγινε αντιστοίχιση αυτών, με τις χρήσεις γης από τη βάση του SWAT, iii) Οι παράμετροι κάθε γεωλογικού σχηματισμού συμπληρώθηκαν εκ νέου, λόγω μη αντιστοίχισης αυτών με τους υπάρχοντες στη βάση του SWAT, iv) Τα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης και μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας προέρχονται από τους σταθμούς Αγίας Παρασκευής και Στύψης.

Μετά την πρώτη εκτέλεση, έπειτα από επαναλαμβανόμενες δοκιμές έγινε η βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου από μετρήσεις παροχής (Chow, 2001) στη γέφυρα Πρινή επί του κεντρικού

κλάδου του υδατορέματος, ώστε να υπάρξει αντιστοιχία μεταξύ της πραγματικής παροχής και της εκτιμημένης παροχής που εξάγει το SWAT.

**Πίνακας 1:** Τιμές βαθμονομημένων παραμέτρων

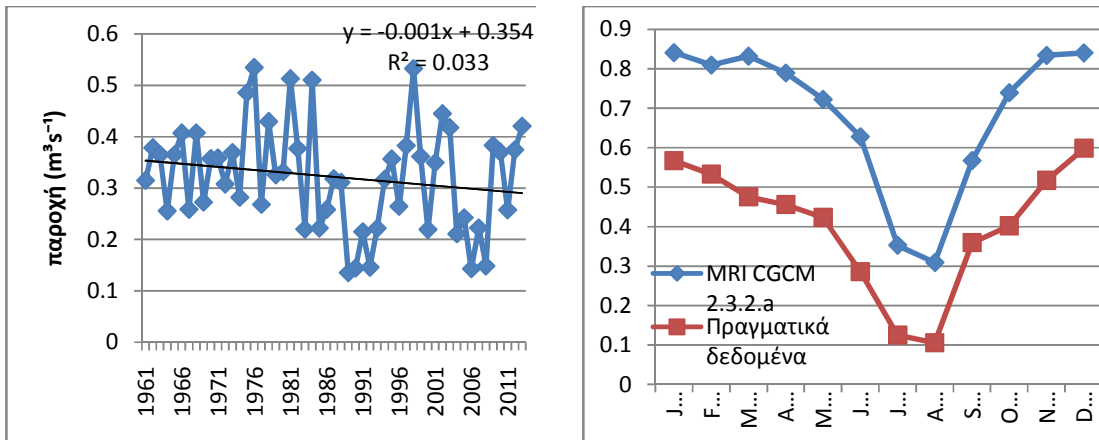
SFTMP	Θερμοκρασία χιονόπτωσης	3 °C
SMTMP	Θερμοκρασία τήξης χιονιού	5 °C
LAT_TIME	Χρόνος μετακίνησης πλευρικής ροής	38 days
SOL_Z	Βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι το κάτω όριο του στρώματος	3500 mm
SOL_BD	Υγρή φαινόμενη πυκνότητα	1.4 grcm <sup>-3</sup>
SOL_AWC	Διαθέσιμη χωρητικότητα νερού στη στρώση του εδάφους	0.35 mmm <sup>-1</sup>
SOL_K	Κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα	7 mmhr <sup>-1</sup>

### 2.2 Εκτέλεση του SWAT με χρονοσειρές κλιματικών μοντέλων

Επιλέχθηκαν τρία κλιματικά μοντέλα KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut), καθένα από τα οποία δίνει πάνω από μία εναλλακτική χρονοσειρά, παρέχοντας ημερήσια δεδομένα μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας και βροχόπτωσης. Τα μοντέλα είναι τα: i) CSIRO Mk3.0, ii) MIROC 3.2 medres και iii) MRI CGCM 2.3.2a με χωρική διακριτική ικανότητα τριών μοιρών και χρονικά διαστήματα εξέτασης τα: i) 1961-2000, ii) 2046-2065 και iii) 2081-2100. Παρόλο που η συσχέτιση πραγματικών και κλιματικών χρονοσειρών για το κοινό διάστημα 1961-2000 είναι πολύ μικρή, έγινε επιλογή της τέταρτης χρονοσειράς του MRI CGCM 2.3.2a, με το μεγαλύτερο συντελεστή γραμμικής συσχέτισης.

## 3. Αποτελέσματα

Μετρήσεις υπαίθρου που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων του Μαΐου και του Ιουνίου του 2014 και χειμερινής ροής του Δεκέμβρη του 2013 έδωσαν παροχές 0.25 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (09/05/2014 και 16/05/2014), 0.38 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (02/06/2014), 1.24 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (04/06/2014), 0.09 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> και 0.044 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (06/12/2013). Εξαιτίας της γεωλογίας της υδρολογικής λεκάνης, η οποία αποτελείται από ιγνιβρίτες και δακτιτικές, λατιτικές, λατιτανδεσιτικές και χαλαζιακές-ανδεσιτικές λάβες, παρατηρείται περιορισμένη κατείσδυση στα όρια της λεκάνης απορροής, ενώ κατά τη διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων εμφανίζονται πλημμυρικά φαινόμενα. Από τα μετεωρολογικά δεδομένα για το διάστημα 1961-2014 το SWAT προσομοίωσε ότι η μέση ετήσια παροχή της λεκάνης είναι 0.32 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, για μέση ετήσια βροχόπτωση 638 mm. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2α, η επιφανειακή απορροή παρουσιάζει μια γενική τάση μείωσης.



**Σχήμα 2:** α) Μέση ετήσια απορροή που προσομοίωσε το SWAT για το διάστημα 1961-2014, β) Πιθανότητα ύπαρξης μιας υγρής μέρας μετά από μια υγρή μέρα

Συγκρίνοντας τις χρονοσειρές βροχόπτωσης των κλιματικών μοντέλων με τις πραγματικές τιμές, προέκυψε ότι για την περιοχή μελέτης ο αριθμός των ημερών χωρίς βροχή είναι πολύ μεγαλύτερος στα πραγματικά δεδομένα από ό,τι παρουσιάζουν τα κλιματικά μοντέλα. Ειδικότερα, έγινε σύγκριση μεταξύ της επιλεγμένης τέταρτης χρονοσειράς του MRI CGCM 2.3.2a και της πραγματικής ως προς την πιθανότητα ύπαρξης μιας υγρής μέρας μετά από μια ξηρή μέρα, την πιθανότητα ύπαρξης μιας υγρής μέρας μετά από μια υγρή μέρα (Σχήμα 2β), τη μέση μηνιαία βροχόπτωση και το μέσο όρο ημερών βροχής το μήνα, καταλήγοντας ότι η πραγματική κατανομή της βροχόπτωσης ακολουθεί διαφορετική κατανομή σε σχέση με τα αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου. Τα διαγράμματα συνολικής βροχόπτωσης κάθε έτους παρουσιάζουν μια γενική τάση μείωσης. Για το κοινό διάστημα 1961-2000, η πραγματική μείωση των βροχοπτώσεων είναι πολύ μεγαλύτερη της συσχετισμένης, ενώ η συσχετισμένη βροχόπτωση για το 2046-2065 και το 2081-2100 έχει πολύ μικρή μείωση. Ως αποτέλεσμα της μειωμένης βροχόπτωσης, η μέση παροχή κάθε έτους που εκτίμησε το υδρολογικό μοντέλο SWAT παρουσιάζει πτωτική τάση. Στο κοινό διάστημα προσομοίωσης, παρατηρείται ότι το κλιματικό μοντέλο έχει μικρές διακυμάνσεις στην παροχή, σε αντίθεση με τα πραγματικά δεδομένα, όπου υπάρχουν πολλές αυξομειώσεις και εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων.

#### 4. Συμπεράσματα

Το μοντέλο SWAT μέσω των πραγματικών τιμών βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για το διάστημα 1961-2014 εκτίμησε μικρή μείωση της απορροής. Για τον έλεγχο των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη λεκάνη απορροής του Σικκιά χρησιμοποιήθηκε η συσχετισμένη τέταρτη χρονοσειρά MRI CGCM 2.3.2a, όπου για το διάστημα 2046-2065 και 2081-2100 παρατηρείται 42.6 % και 46.8 % αντίστοιχα, μείωση της μέσης ετήσιας απορροής σε σχέση με την περίοδο 1961-2000. Φαίνεται ότι τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τις προβλέψεις μείωσης των βροχοπτώσεων και παροχών που αναμένονται για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου σύμφωνα με το Διακυβερνητικό Οργανισμό για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) (Solomon et al., 2007).

Σε επόμενο στάδιο, προβλέπεται να βελτιωθεί η βαθμονόμηση του υδρολογικού μοντέλου SWAT με περισσότερες μετρήσεις παροχής, όπως και η συσχέτιση των κλιματικών και πραγματικών χρονοσειρών, ώστε να αυξηθεί η ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων που σχετίζονται με τις επιπτώσεις τις κλιματικής αλλαγής.

#### 5. Βιβλιογραφία

- Chow Ven Te. 2001. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series, Singapore.
- Golmohammadi Golmar, Prasher Shiv, Madani Ali and Rudra Ramesh. 2014. Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. Open access hydrology, 1, 20-39, doi: 10.3390/hydrology 1010020, ISSN 2306-5338.
- Maidment, D. 1993. Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, University of Michigan.
- Neitsch, S. L, Arnold, J. G., Kiniry, J. R. and Williams, J. R. 2011. Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation, Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory-Agricultural Research Service, Blackland Research Center-Texas Agrilife Research, Texas Water Resources Institute, Technical Report No. 406, Texas A & M University System, College Station, Texas 77843-2118, 618 p.
- Solomon Susan, Qin Dahe, Manning Martin, Marquis Melinda, Averyt Kristen, Tignor Melinda M. B., Miller Henry LeRoy Jr. and Chen Zhenlin. 2007. Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- Tzoraki, O. and Nikolaidis, N.P. 2007. A generalized framework for modeling the hydrologic and biogeochemical response of a Mediterranean temporary river basin. *Journal of Hydrology*, 346, 112-121.
- Winchell, M., Sprinivasan, R., Luzio, M. Di and Arnold, J. 2009. ArcSWAT 2.3.4 Interface for SWAT2005, User's Guide. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 720 East Blackland Road-Temple, Texas 76502, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service, 808 East Blackland Road-Temple, Texas 76502, 460p.