



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR  
VÍZI KÖZMŰ ÉS KÖRNYEZETMÉRNÖKI TANSZÉK

Bor Anikó

Mérnöki gyakorlatban alkalmazott hidrológiai modellek  
összehasonlító vizsgálata

Tudományos Diákköri Dolgozat

Konzulensek:

Dr. Koncsos László  
Egyetemi tanár

Kozma Zsolt  
Tanársegéd

Budapest, 2012



## TARTALOMJEGYZÉK

Tartalomjegyzék .....	3
Ábrajegyzék .....	<b>Hiba! A könyvjelző nem létezik.</b>
1. Bevezetés.....	5
2. Irodalmi áttekintés.....	6
2.1. Hidrológiai folyamatok.....	6
2.2. Hidrológiai modellezés .....	7
3. A felhasznált programok rövid ismertetése.....	8
3.1. WMS és HEC-HMS.....	8
3.1.1 WMS-Watershed Modeling System.....	8
3.1.2 Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modelling System.....	8
3.2. WateRisk.....	9
4. Modellezett terület ismertetése .....	13
4.1. Domborzat .....	13
4.2. Éghajlat .....	14
4.3. Talajtípus .....	15
4.4. Területhasználat .....	17
4.5. Zala folyó.....	18
5. Elvégzett Modellezési Feladatok Ismertetése .....	19
5.1. A modell felépítése WMS-ben .....	19
5.2. A modell beállítások és szimuláció HEC-HMS-ben .....	20
5.2.1 Lefolyásképző csapadékszámítási módszer: Soil Moisture Accounting.....	21
5.2.2 Felszíni összegyülekezés számítási módszer: SCS Unit Hydrograph.....	22
5.2.3 Alaphozam számítási módszer: Linear Reservoir Baseflow .....	23
5.2.4 Részvízgyűjtők közti vízmozgás .....	23
5.2.5 A meteorológiai modell beállításai.....	24
5.3. HEC-HMS szimuláció .....	24
5.4. Modell felépítése WateRiskben .....	28
5.5. A modell szimuláció WateRiskben.....	28
5.6. Az eredmények összehasonlítása.....	29
6. A kapott eredmények értékelése .....	31
7. Összefoglalás.....	33
8. Köszönet.....	34
9. Irodalomjegyzék.....	35
Függelék.....	i
I. A domborzat kialakítása .....	ii
II. Talajgridek, és térképek.....	x
III. A mintaterületen található területhasználat típusok és nagyságuk .....	xii
IV. Az automatikusan generált partvonalak javítása ArcGIS-ben.....	xv

**ÁBRAJEGYZÉK**

1. ábra A hidrológiai ciklus (Forrás: PTE TTK internetes jegyzet, 2012).....	6
2. ábra A WMS szoftver kezelőfelülete.....	8
3. ábra A HEC-HMS kezelőfelülete .....	9
4. ábra A WR IHM felépítése (Forrás: Koncsos , 2012) .....	10
5. ábra A WaterRisk modellrendszer részmoduljainak kapcsolata az egyes modellezési feladatoknál .....	11
6. ábra A WaterRisk kezelőfelülete .....	12
7. ábra A vizsgált vízgyűjtőterület Zalaapátiig és a teljes Zala vízgyűjtő .....	13
8. ábra A vizsgált terület domborzata .....	14
9. ábra A szalafői csapadékmérőállomás által rögzített csapadékmennyiségek.....	15
10. ábra Fizikai talajféleségek az AGROTOPO adatbázisból a mintaterületre.....	16
11. ábra A MÁFI adatbázis alapján készített első talajtípus grid. ....	17
12. ábra Területhasználatok a mintaterületen .....	18
13. ábra Az SMA modell felépítése.....	21
14. ábra A mért és számított alaphozamok .....	26
15. ábra A mért és számított felszíni lefolyás.....	26
16. ábra Számított és mért vízhozam .....	27
17. ábra Számított és mért vízhozam .....	27
18. ábra A WaterRisk által számított és a mért felszíni lefolyás .....	29
19. ábra A Zalaapátiánál mért és a WaterRisk által számított vízhozamok összehasonlítása .....	29
20. ábra A mért és a modellek által számított vízhozam adatsorok.....	30
I. ábra SRTM-50 kivágat .....	ii
II. ábra DDM-50 kivágat .....	ii
III. ábra Csapadék összegyülekezés grid az SRTM-50 raszter re.....	iii
IV. ábra Csapadék összegyülekezés grid a DDM-50 raszterre.....	iii
V. ábra Zalaapátiig lehatárolt vízgyűjtő az SRTM 50 raszterfájlon .....	iii
VI. ábra Zalaapátiig lehatárolt vízgyűjtő a DDM 50 raszterfájlon.....	iii
VII. ábra Az exportálás eredménye .....	v
VIII. ábra A Majority eredmény .....	v
IX. ábra A Cubic módszer eredménye.....	v
X. ábra A Bilinear módszer eredménye.....	v
XI. ábra A Nearest módszer eredménye .....	vi
XII. ábra Az exportált módszerrel készített gridből készült csapadék összegyülekezés útja.....	vii
XIII. ábra A Majority módszerrel készült grid csapadék összegyülekezése .....	vii
XIV. ábra A Nearest módszerrel lehatárolt gridből készített.....	vii
XV. ábra A kiexportált griden lehatárolt vízgyűjtőterület Zalaapátiig.....	viii
XVI. ábra A Majority módszerrel előállított griden lehatárolt vízgyűjtőterület.....	viii
XVII. ábra A Nearest módszerrel előállított griden kialakított .....	viii
XVIII. ábra A MÁFI adatbázis alapján készített talajgrid a talaj 2,5-5,0 és 3,3-6,6 m-es mélységében. ....	x
XIX. ábra A MÁFI adatbázis alapján készített talajgrid a talaj 5,0-7,5 és 6,6-9,0 m-es mélységben.....	x
XX. ábra A MÁFI adatbázis alapján készített talajgrid a talaj 7,5-10,0 és 9,9- 10,0 m-es mélységben. ...	xi
XXI. ábra A WMS szoftverben felépített mintaterület és az AGROTOPO fedvény (szürke) .....	xi
XXII. ábra A kiindulási állapot.....	xv
XXIII. ábra A javított partvonal .....	xv
XXIV. ábra A javítandó partszakasz .....	xv
XXV. ábra A partszakasz javítás közben.....	xv

XXVI. ábra A már javított partszakasz.....xv

## 1. BEVEZETÉS

A hidrológiai értelemben zárt Kárpát-medencében elhelyezkedve, Magyarország a hidrológiai szélsőségek „gyűjtőpontja”. Egyszerre néz szembe a víztöbblet és a vízhiány okozta veszélyekkel, melyek jövőbeni alakulását a külső és belső környezeti, társadalmi és politikai folyamatok kombinációi mellett még a napjainkban oly gyakran emlegetett globális éghajlatváltozás is súlyosbítja. A szélsőséges vízkészlet jelenségek, mint például az árvíz és az aszály ugyanabban az évben, akár ugyanazon a helyen is jelentkezhettek, ezért kiemelten fontos a készletek tározása, illetve kiegyenlítése az aktuális igényekkel összhangban. Bár komoly igény van hidrológiai adatokra az előrejelzések, tervezési alternatívák, valamint az egyes területi beavatkozások hatásainak felmérése során, sok esetben nem kielégítő a rendelkezésre álló adatok mennyisége és minősége.

A fenti kérdések fontossága okán választottam dolgozatom témájaként a vízgyűjtő szintű csapadék összegyűlekezés hidrológiai jelenségének vizsgálatát. A vizsgálandó területtel szemben elvárásként támasztottuk, hogy az országhatárokon belül helyezkedjen el és elégséges mennyiségű adat álljon rendelkezésre a modellezési feladatok megkönnyítése, valamint a kapott eredmények validálhatósága érdekében. A fenti paramétereknek a Zala-folyó vízgyűjtője megfelelt, így erre a területre végeztem szimulációkat 2 eltérő felépítésű és működésű (osztott paraméteres, fizikai alapú és empirikus, félempirikus alapú) hidrológiai modell felhasználásával.

A Zala patak Zalaapátinál található mércepontig terjedő vízgyűjtőjét digitális domborzatmodell alapján határoltam le a WMS nevű szoftverben. A vizsgált terület nagysága közel 1500 km<sup>2</sup>. A továbbiakban felhasznált bemeneti információként szolgáló adatokat, mint például a területhasználatot vagy a talajtípust az ArcGIS 10.0 szoftverrel készítettem el. A modellek felépítését követően szimulációs kísérleteket végeztem, kezdetben 1, majd 2 éves időintervallumban és a kapott eredmények alapján kalibráltam és módosítottam a modellbeállításokat. Azt tapasztaltam, hogy a WateRisk használata könnyebb volt, számos esetben köszönhetően a felhasználóbarát szoftverfelületnek, és a szoftverbe integrált szerkesztőfelületeknek, a megfelelő paraméterek beállítása azonban gondot okozott. A modell felépítése a HEC-HMS-ben sok esetben olyan adatokat igényelt, melyek beszerzése komoly feladatot jelentett, valamint a programba integrált automata kalibráció funkció használatával is gondok adódtak. A kalibráció során mindkét modell esetében problémát jelentett az algoritmusok túlparaméterezett jellege: a számításokban lényegesen több állítható paraméter szerepel, mint a rendelkezésre álló mért idősorok száma.

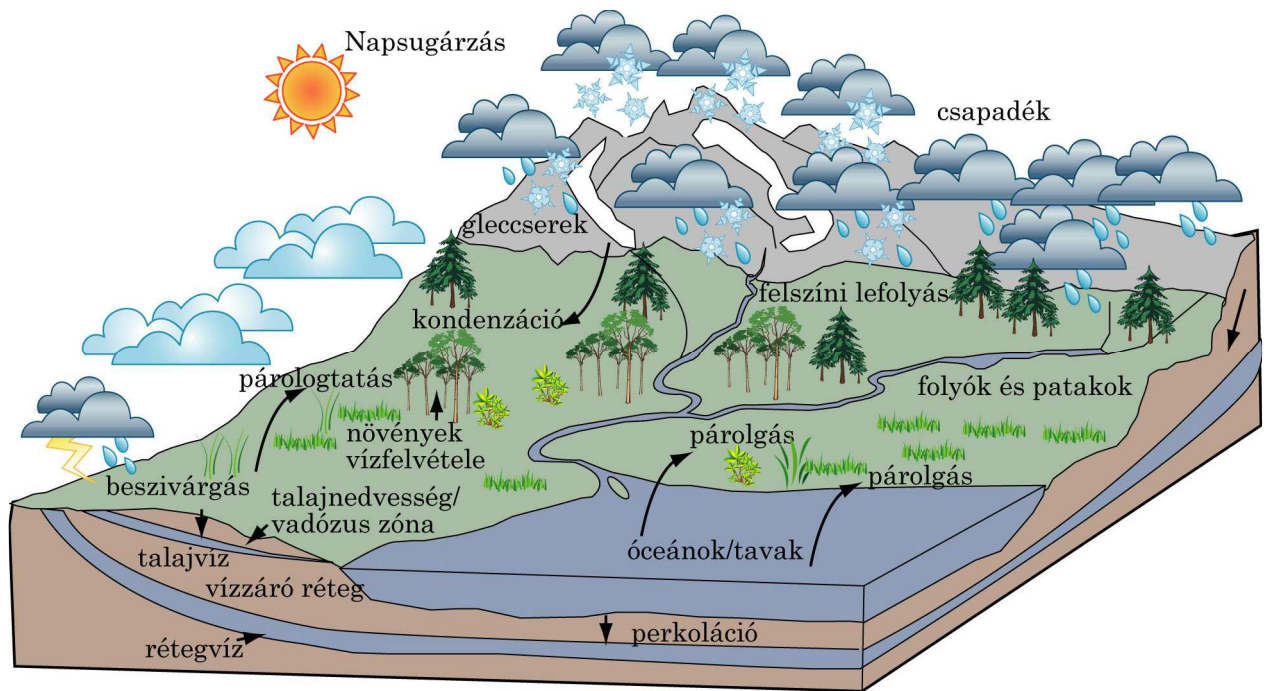
Dolgozatom célja volt megvizsgálni, hogy (1) egy osztott paraméteres, fizikai alapú, illetve (2) egy hidrológiai válasz egységeken alapuló (Hydrological Response Unit, HRU) empirikus, félempirikus összefüggéseket használó modell milyen eltéréseket mutat ugyanazon mintaterületre számított, éveket átfogó csapadék lefolyás szimulációk esetén. Ezzel kapcsolatban célom volt elsajátítani a szoftverek használatát és a modellépítés, adatelőkészítés menetét, valamint összegezni a két modell alkalmazása során fellépő különbségeket, nehézségeket.

## 2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

### 2.1. Hidrológiai folyamatok

A sikeres hidrológiai modellezés megköveteli a hidrológiai ciklus ismeretét, melynek főbb pontjait a következőkben röviden ismertetem.

A Föld felszínének 71%-át víz borítja, a teljes vízkészlet állandó mennyisége megközelítőleg 1400 millió  $\text{km}^3$ . (Összehasonlításképpen a Balaton térfogata 2  $\text{km}^3$  körüli.) (Somlyódi, 2012) A víz folyamatos körforgását a geoszférák (azon belül is a litoszféra és a hidroszféra) valamint az atmoszféra között a hidrológiai ciklus írja le, amelynek mozgatórugói a gravitáció és a napsugárzás. (1. ábra)



1. ábra A hidrológiai ciklus (Forrás: PTE TTK internetes jegyzet, 2012)

A napsugárzás hatására a légkör és a hidroszféra felmelegednek. A hőmérséklet növekedés hatására megkezdődik a párolgás (azaz a víztér cseppfolyós molekulái kilépnek a folyadéktérből és gáznemű állapotba kerülnek), melynek az alábbi formáit különböztetik meg a párologtató test függvényében:

- evaporáció: a szabad vízfelszín, a hó, a jég és a fedetlen talaj párolgása
- transzspiráció: a növények párologtatása
- evapotranszspiráció: a növényzet és a talaj együttes párolgása

A párolgás maximális értékét, azaz a légtér által maximálisan felvehető páramennyiséget a potenciális párolgás értékével adják meg. A légtömeg front a helyi konvekció vagy domborzati (orografikus) okok miatt felfelé emelkedik, és folyamatosan csökken a hőmérséklete. Az egyre alacsonyabb hőmérséklet hatására a vízgőz kicsapódik és felhő képződik, melyből a csapadék hó, jég, vagy eső formájában hullhat vissza a szárazföldre, vagy felszíni víztestekbe. A szárazföldre hulló csapadék a következő módokon kerülhet vissza a körforgásba:

1. Elpárolog közvetlenül a talajfelszínről (ez kevésbé intenzív, mint a szabad vízfelületek párolgása), vagy a növényzet felfogja egy részét (intercepció), mely majd később párolog el.
2. Amikor a talajba szivárgást meghaladja az esőzés, vagy az olvadás intenzitása, akkor a domborzati viszonyoktól függően vagy a felszínen marad, vagy a gravitáció hatására kisebb

potenciálú helyek irányába indul. Ez a lefolyás helyétől függően lehet felszíni, mederbeli, felszín közeli, vagy felszín alatti.<sup>1</sup>

3. Beszivárgás útján a felszín alatti pórusokat részben vagy egészben telítve a talaj háromfázisú zónájában visszamarad. (Leszivárgás vagy perkoláció amikor a beszivárgó víz a talaj háromfázisú zónájából a kétfázisú zónába jut.)

## 2.2. Hidrológiai modellezés

A hidrológiai folyamatok leírására számos módszer létezik. Napjainkban a szoftveres modellalkalmazások tekinthetők a legelterjedtebbeknek. A szakirodalomban számos cikk (Panday & Huyakorn, 2004, Spanoudaki, Stamou, & Nanou-Giannarou, 2009) tartalmaz összefoglaló ismertetést az elterjedt modellekről. Ezek hidrológiai megközelítés, (tér- és időbeliség, paraméterezés, a fizikai folyamatok matematikai leírása) szempontjából eltérő elvek mentén működnek, máshogy kezelik a hidrológiában még kérdéses hatással bíró tényezőket, mint például a területhasználatot, talajtani viszonyokat, mintaterületet borító erdők hatását.

A munkám során a WateRisk, valamint a HEC-HMS programokat használtam.

A tanszéken fejlesztett osztott paraméteres, fizikai alapú WateRisk szoftver a lokális- regionális vízkörforgás folyamatait térinformatikai és matematikai eszközök felhasználásával írja le. A program részmodellekből épül fel, mely egységek megfelelő alkalmazásával számos vízgazdálkodási kérdéskör könnyen kezelhető. A mintaterület felépítésében nagy segítséget jelentett a programmal korábban végzett modellezési feladatok ismerete (Koncsos, 2012) (Dévai, 2010).

A nemzetközi gyakorlatban is elterjedt HEC-HMS, - melyet a US Army Corps of Engineers fejlesztett ki - alapvetően egy hidrológiai modellezésre specializált program, amely az egyes vízgyűjtők felszíni lefolyását és beszivárgását képes modellezni empirikus, illetve félempirikus összefüggések felhasználásával. A modellezés megkezdése előtt itt is sokat segített a már korábban elvégzett modellezési feladatok eredményeit bemutató cikkek, dolgozatok áttekintése. (Quan, 2006) (McEnroe, 2010)

---

<sup>1</sup> Összegyülekezés: az a folyamat, amely során a lehullott csapadék a terep felszínén és a felszín alatt mozogva a vízfolyás medrébe jut, majd abban koncentrálódva halad tovább.

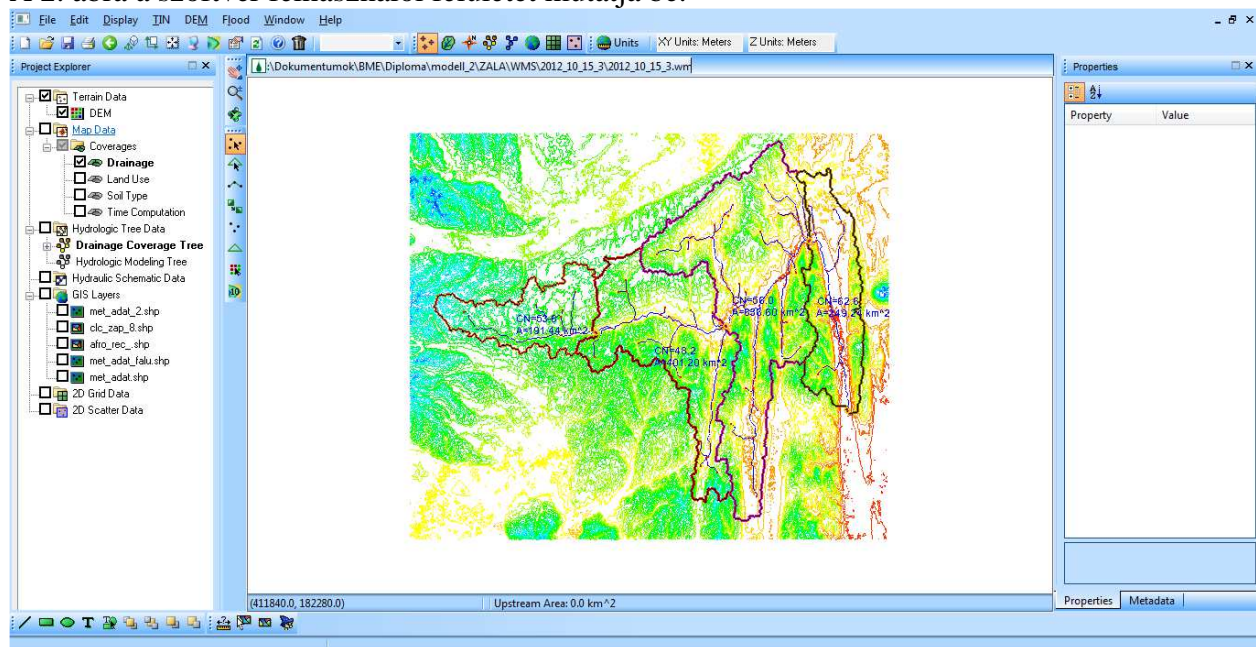
### 3. A FELHASZNÁLT PROGRAMOK RÖVID ISMERTETÉSE

#### 3.1. WMS és HEC-HMS

##### 3.1.1 WMS-Watershed Modeling System

A Watershed Modeling System (WMS) egy átfogó grafikus modellezési környezet egy adott vízgyűjtő hidrológiai és hidraulikai összes fázisának modellezésére. A program moduláris felépítésű, és számos eszközzel rendelkezik a modellezési folyamat megkönnyítése érdekében. Ezek közül kiemelendő funkciók az automatikus vízgyűjtő lehatárolás, a geometrikus paraméter számítás (például a vízgyűjtőterület nagysága, lejtése, általános magassága), a GIS fedvényekkel való számítások (csapadék mélység, felület érdességi együtthatók, stb.), valamint a keresztmetszvény kinyerése terepi adatokból. A szoftver számos egyéb, a nemzetközi gyakorlatban elterjedt modellel (például: HEC-1, HEC-HMS, TR-20, TR-55, HSPF, MODRAT) való modellezést is támogatja beépített interface-eken keresztül. (Jakab és Társai Környezetvédelmi szolgáltató Kft., 2012)

A 2. ábra a szoftver felhasználói felületét mutatja be.



2. ábra A WMS szoftver kezelőfelülete

Munkám során sok esetben gondot jelentett bizonyos programfunkciók megtalálása. Hasznos volt, hogy a korábban térinformatikai szoftverekben lehatárolt fedvények kezelésére képes, és hogy az adatok importálása igen könnyű. Hátrányként említendő, hogy a vízgyűjtőterület lehatárolásához szükséges domborzat modellt, - mely vektoros adatformátumú – csak egy harmadik program segítségével lehetett a WMS által megkövetelt fájlformátumúvá alakítani.

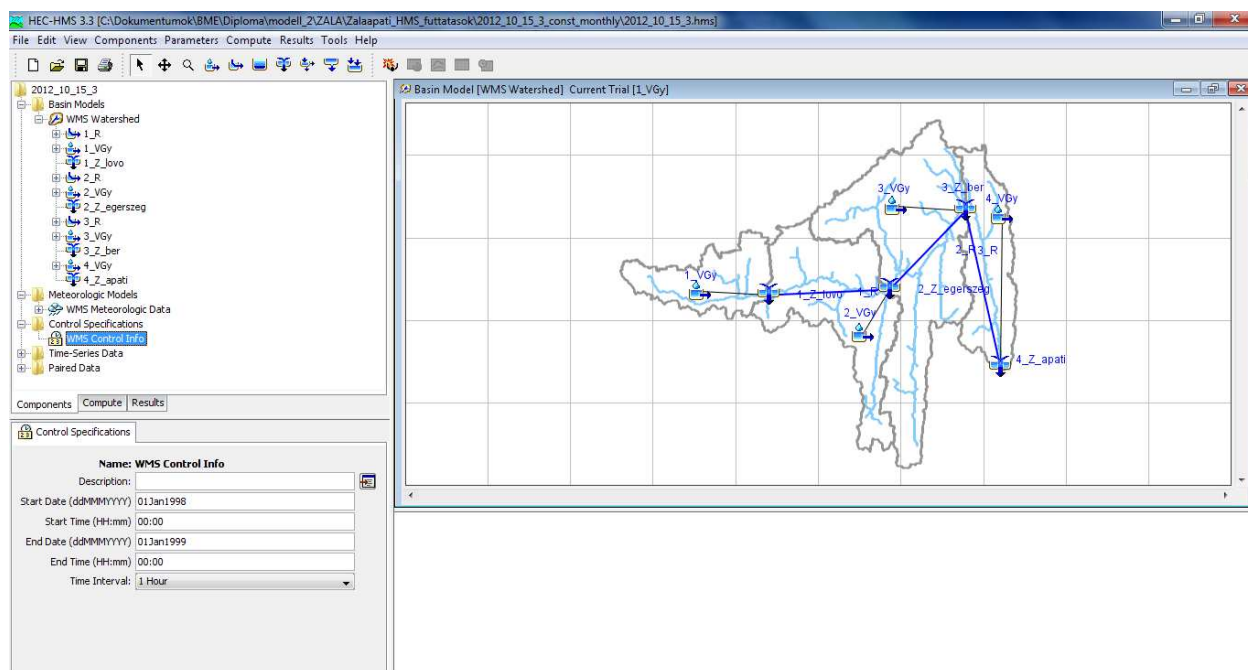
##### 3.1.2 Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modelling System

A nemzetközi gyakorlatban is elterjedt HEC-HMS-t (Hydrologic Modelling System) a US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineers Center (HEC) fejlesztette ki az 1998-ban kidolgozott HEC-1 továbbfejlesztett verziójaként mely már tartalmazza a párolgást, a hóolvadást és a hosszabb idejű szimulációs feladatokhoz megfelelő beszivárgási modellt (Soil Moisture Accounting). A HEC-HMS alapvetően egy hidrológiai modellezésre specializált program, amely az egyes vízgyűjtőkön a csapadék felszíni lefolyását és beszivárgását képes modellezni empirikus, illetve félempirikus összefüggések felhasználásával egyszeri csapadék események és hosszabb idejű szimulációs feladatok esetén is. Tervezése során nagy figyelmet fordítottak arra, hogy különféle földrajzi területek minél szélesebb körű



problémáit képes legyen kezelni. Ez magába foglalja a jelentős kiterjedésű folyók víz utánpótlási kérdéseit, árvízi elöntését, valamint a kisebb léptékű természetes vagy mesterséges vízgyűjtőterületen történő lefolyást. A vizsgált vízgyűjtő felépítésénél a modell kezelhető darabokba osztja a hidrológiai ciklust és a feladat típusának megfelelően peremfeltételeket alkot. Ezután bármilyen anyag- vagy energiaáram reprezentálható a megfelelő matematikai algoritmusokkal. Számos módszer közül lehet választani, melyek különböző környezetekben, eltérő feltételekkel is alkalmazhatók. A megfelelő matematikai modell kiválasztása megköveteli a vizsgált terület ismerete mellett a szimuláció céljának ismeretét valamint a mérnöki ítélőképesség birtoklását.

A 3. ábra a HEC-HMS szoftver kezelőfelületét ábrázolja.



3. ábra A HEC-HMS kezelőfelülete

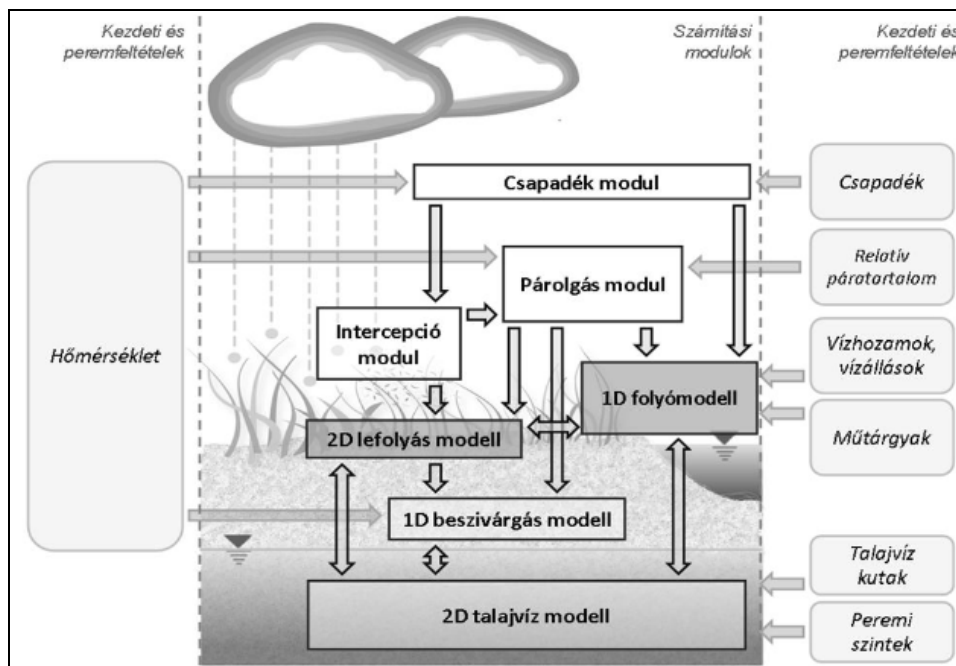
A szoftver nem képes a térképes adatállományok feldolgozására, ezért volt szükség a mintaterület előzetes felépítésére a WMS-ben. A HEC-HMS kezelőfelülete átlátható, a paraméterek módosítására több helyen is lehetőség van. A kezdetekkor komoly nehézségeket okozott a mértékegységrendszer átállítása SI-re, mivel nem elég egy menüpontban módosítani az alapbeállításokat. A szimulációs idők igen rövidek (1 perc alattiak), az optimalizációs számítások azonban már hosszabbak (legalább 10- 20 percesek). Utóbbiak pontos hossza a kalibrálandó paraméterek számától függ. Az eredmények grafikus megjelenítése könnyen értelmezhető.

### 3.2. WateRisk

Felismerve, hogy a vízgazdálkodási szélsőséges események (például: árvíz, belvíz, aszály) hatékony kezeléséhez integrált gazdasági, mérnöki, területhasználati szemléletmód szükséges 2009-ben a Nemzeti Technológiai Program keretében elkezdődött a 3 éves WateRisk projekt. A program célja egy vízgazdálkodási döntéstámogató rendszer, és annak működtetéséhez szükséges adatbázis, valamint a szakmai háttér megalkotása volt. A konzorciumban részt vevő tagok a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszéke, a GeneralCom Mérnöki Kft, a Corvinus Egyetem Környezetgazdaságtani és Technológia Tanszéke, a MTA Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete, valamint a Szövetség az Élő Tiszáért Egyesület voltak. A program céljaként megalkotott WateRisk Döntés Támogató Rendszer (WR DSS) központi elemeként a projekt keretein belül

kifejlesztésre került egy osztott paraméteres integrált hidrológiai modell (WR IHM) amely a lokális regionális vízkörforgás folyamatait térinformatikai és matematikai eszközök – különböző léptékű, fizikai alapú modellek – segítségével írja le. A modell fejlesztése során felhasználásra kerültek a BME VKKT és Koncsos László korábbi munkáinak eredményei, tapasztalatai is, például a kidolgozott algoritmus koncepciója és több eleme az ARES modellrendszerre épül. (Fürjes, 2011)

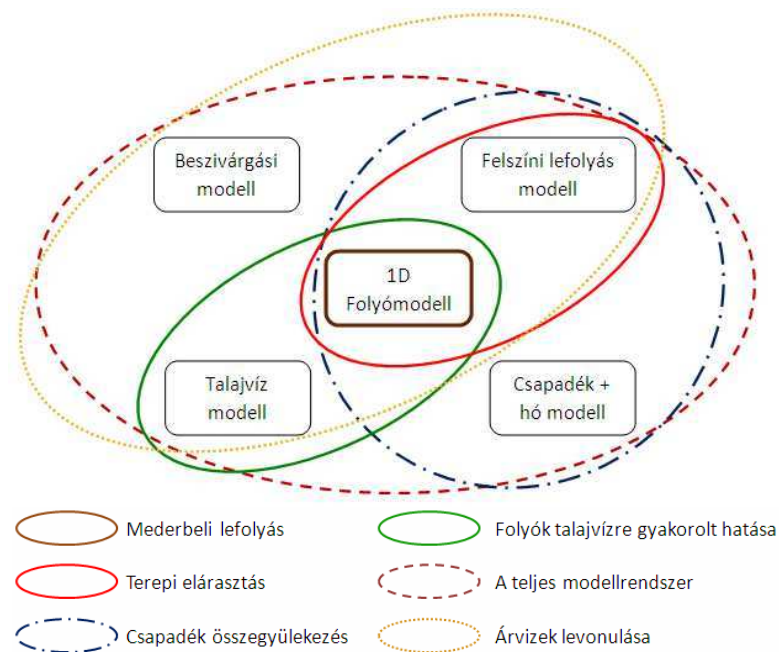
A WateRisk modellrendszer, a mederbeli, a felszíni és a felszín alatt vízmozgást leíró hidrológiai/hidrodinamikai modellek algoritmikus egyesítésén alapszik. Előnye, hogy az egyes almodulok futás közbeni, algoritmikus kapcsolatban állnak egymással, szimulációs időlépésenként térfogatáramot adnak át egymásnak, és ezen térfogatáramok preemfeltételként jelennek meg a többi számításmodulban. Az így létrejövő modell a hidrológiai ciklus legtöbb elemét dinamikus kapcsolatban tudja modellezni. (Koncsos, 2012) A WR IHM konceptuális felépítését a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra A WR IHM felépítése (Forrás: Koncsos, 2012)

A 4. ábrán látható, hogy a modell a felszíni és a felszín közeli vízkészletek leírására korlátozódik, a légköri folyamatok többsége (mint például a légkör hő- és vízháztartása), vagy a regionális felszín alatti áramlási rendszerek nem képezik a szimuláció részét. Ezek a peremfeltételekbe épülnek be az adott feladat megfogalmazásától függően.

A WR IHM számos vízgazdálkodási probléma vizsgálatára képes, mivel az algoritmus felépítése moduláris, így a részmodellek nem csak együttesen, de adott problémához igazodva számos kombinációban is képesek szimulációs feladatok elvégzésére, melyet az 5. ábra szemléltet.



5. ábra A WaterRisk modellrendszer részmoduljainak kapcsolata az egyes modellezési feladatoknál

(Forrás: WaterRisk 1.0 Kockázat alapú vízkészletgazdálkodási döntéstámogató rendszer , 2011)

Az 5. ábra bemutatja, hogy a modellrendszer felépítésében központi szerepet tölt be az 1D folyómodell, mely a Saint Venant anyagmegmaradási (1) és momentum (2) egyenletek numerikus megoldásán alapszik.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

Q	vízhozam (m <sup>3</sup> /s);
A	áramlási keresztmetszet (m <sup>2</sup> );
q	vonali mentő hozzáfolyás (m <sup>3</sup> /ms)
x	hosszirányú koordináta (m)
t	idő (s)

$$\frac{1}{g} \frac{\partial \left( \frac{Q}{A} \right)}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{Q}{A} \frac{\partial \left( \frac{Q}{A} \right)}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} + S_f - S_0 = 0 \quad (2)$$

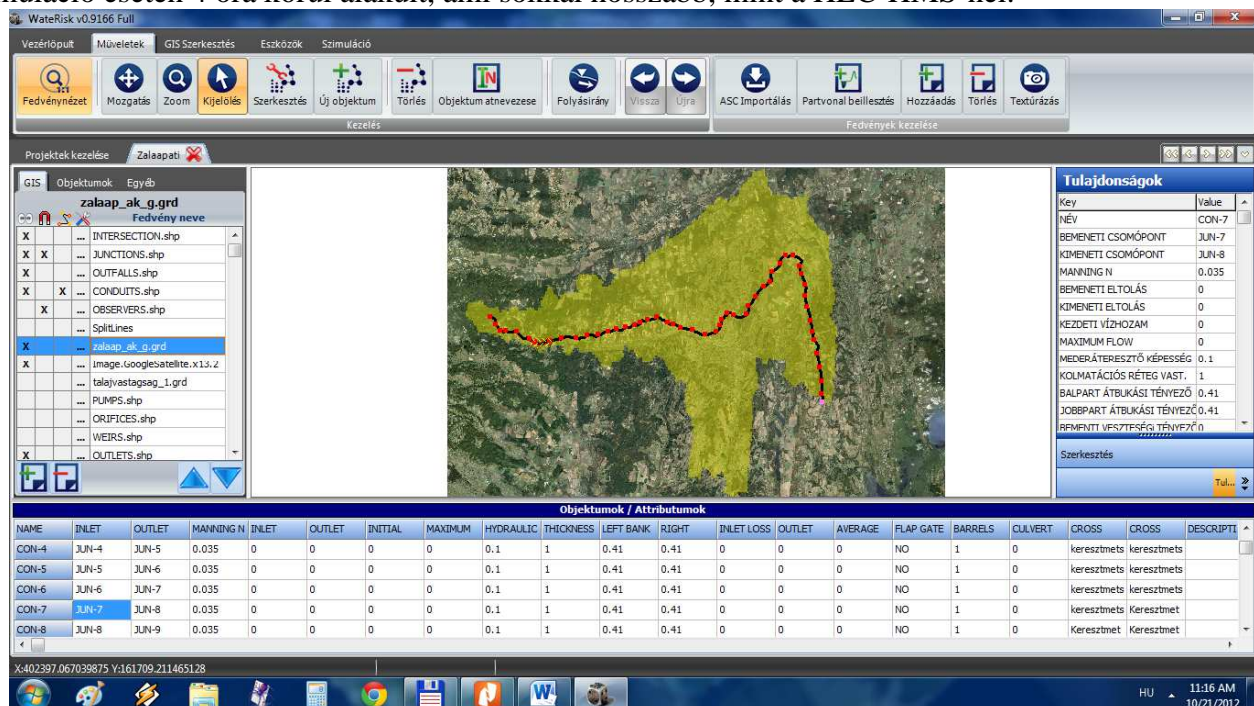
Q	vízhozam (m <sup>3</sup> /s);
A	áramlási keresztmetszet (m <sup>2</sup> );
g	nehézségi gyorsulás (m/s <sup>2</sup> );
S <sub>f</sub>	súrlódási veszteség (-)
S <sub>0</sub>	mederesítés (-)
z	vízmélység (m)
x	hosszirányú koordináta (m)
t	idő (s)

A WateRisk modellrendszer további fontos almoduljai:

- a beszivárgás modell,
- a felszíni lefolyás modell,
- a talajvíz modell, valamint
- a csapadék, a párolgás, az intercepció és a hó modell.

Az egyes modellek összekapcsolása eltérő úton valósul meg, a 2D felszíni és az 1D mederbeli vízmozgások kommunikációja iteratív, míg a többi kapcsolat nem iteratív jellegű megoldásokon alapszik. (Kozma és Koncsos, 2011)

A program felhasználóbarát, GIS alapú kezelőfelületét mutatja be a 6. ábra. A térinformatikai szoftverek működéséhez hasonlóan egy gombnyomással betölthetők különböző raszteres, illetve vektoros fedvények, melyek tulajdonságainak módosítására is lehetőséget biztosít a program. A modellben felépített csatornák módosítása sok esetben nehézkes volt. A modell szimulációs ideje 1-2 éves szimuláció esetén 4 óra körül alakult, ami sokkal hosszabb, mint a HEC-HMS-nél.

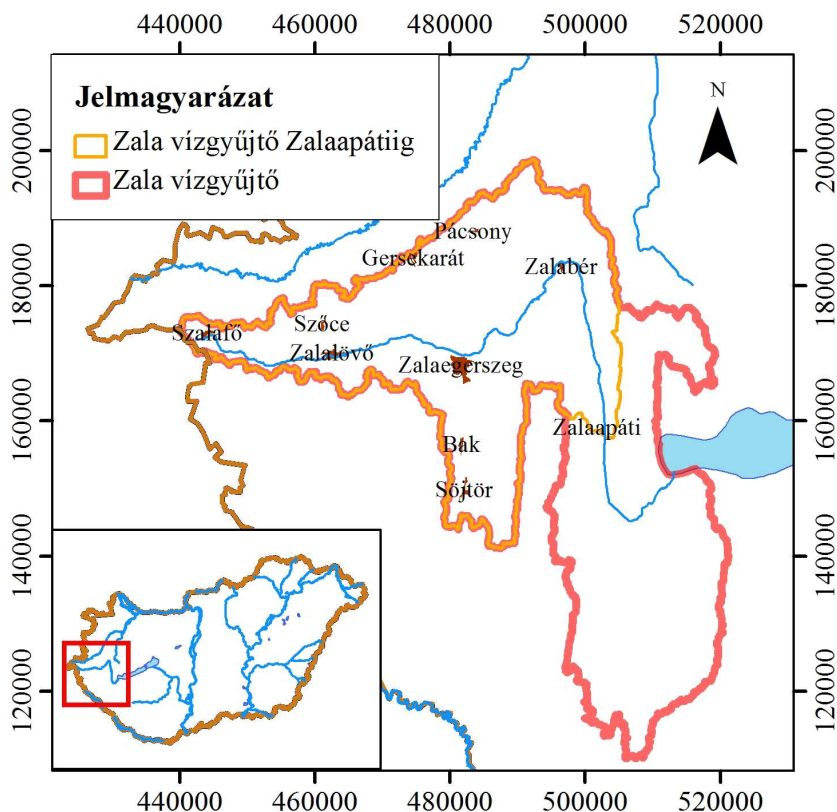


6. ábra A WateRisk kezelőfelülete

A Műveletek fül alatt található eszközök segítségével a programban könnyen felépíthetők, és igény szerint módosíthatók a különféle csatornarendszerek, belvív-elvezető rendszerek. A GIS Szerkesztés fülön a raszter alapú fedvények módosíthatók. Az Eszközök menüpontban lehetőség van különféle idősorok (például csapadék, vagy hőmérséklet) létrehozására, ábrázolására, és módosítására, valamint keresztmetszetek generálására, akár szabálytalan meder esetén is. A Szimuláció fül alatt a Modellbeállítások menüpontban lehetséges a modell beállításainak módosítása, egyes számítási almodulok ki és bekapcsolása. Ugyanitt módosítható a futtatás ideje, és az adatkimentés időintervalluma. Továbbá itt található a Hibakeresés - melyet minden egyes szimuláció indítása előtt el kell végezni – valamint a Futtatás funkció, amely a szimulációt elindítja, amennyiben a modell már nem tartalmaz hibát. Az Utófeldolgozóban a szimuláció során számított anyagmérlegek, számítási idők, valamint a modellezett vízfolyás hosszirányú modellje is megtekinthető.

#### 4. MODELLEZETT TERÜLET ISMERTETÉSE

A modellek minél pontosabb és könnyebb felépíthetősége érdekében, a mintaterület kiválasztásakor fontos szempont volt, hogy megfelelő adatellátottságú területtel dolgozzunk. Ezért választottuk a Zala vízgyűjtőjét, mivel a Tanszék korábban már végzett vizsgálatokat ezen a területen így megfelelő mennyiségű és minőségű adattal rendelkezünk. Azonban a teljes Zala vízgyűjtőt kiterjedésében (2550 km<sup>2</sup>) túl nagyoknak ítéltük meg, így egy köztes vízhozam mérési pontban, Zalaapátiban határoztuk le a vízgyűjtőt, mely így 1479 km<sup>2</sup>-es mintaterületet eredményezett. A 7. ábra a WMS modellben lehatárolt vízgyűjtőterületeket, és a csapadékadatok beszerzési helyét mutatja be.



7. ábra A vizsgált vízgyűjtőterület Zalaapátiig és a teljes Zala vízgyűjtő

##### 4.1. Domborzat

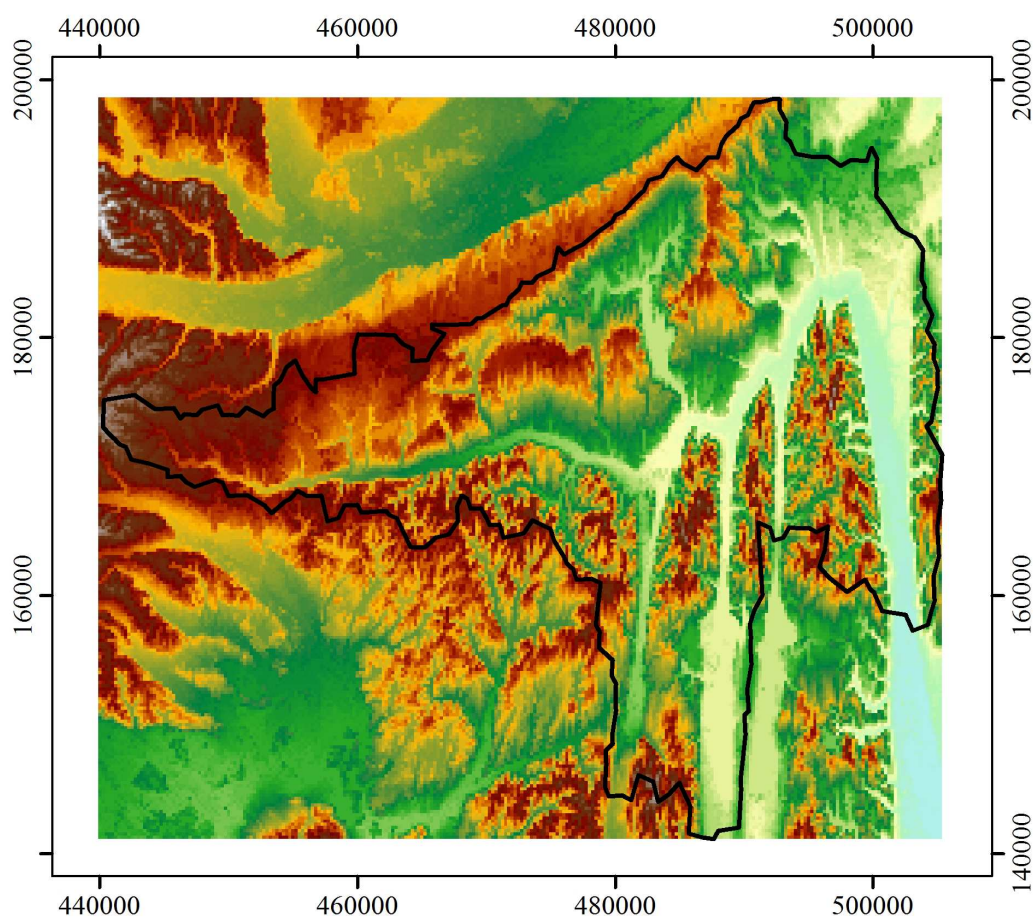
A mintaterület a Nyugat-Magyarországi-Peremvidék nagytájhoz, a Zalai-Dombvidék középtájhoz tartozik. A vízgyűjtő Zala és Vas megye területén helyezkedik el. A Zala két szerkezeti árokban alakította ki a völgyét. A folyó felső szakasza a forrástól a Zalabér és Túrje községeknél lévő kanyarig tart. A Felső-Zala völgy az Ős-Rába elhagyott völgye, amelyet a középleisztocén végétől a Zala formált. Legszembetűnőbb szerkezeti-morfológiai vonása az „aszimmetrikus teraszos árok” jelleg. A völgyet hordalékkúp teraszmaradványok szegélyezik. Jobb partja (északias lejtő) nagyon meredek, alámosott, számos fülkével és csuszamlással tarkított. A bal partot (délies kitétségű lejtők) kevésbé tagolt, hosszú lankás lejtők szegélyezik. Esése jelentős (1,5 m/km), de nem egyenletes, mert a mellékpatakok torkolatában nagy mennyiségű hordalék rakódik le.

A tūrjei kanyarral kezdődő Alsó-Zala-völgy legjellegzetesebb alakrajzi vonása szintén a nagyfokú völgyaszimmetria, a jelentékeny völgy szélesség (2-4 km) és -mélység (150-200 m), valamint a nagymértékű feltöltődés. A tágas völgy jobb partját (Ny-i oldal) meredek, csuszamlásos lejtők jellemzik;



ugyanakkor a bal partot 1-2 km széles, fokozatosan lealacsonyodó lejtők kísérik. E szakasz széles, feltöltött völgyekkel rendelkezik és esése a folyás mentén jelentősen fokozódik. Mindemellett a mintaterületén dombsági és síkvidéki területek is találhatóak. (Nyugat-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság, 2007)

A domborzat modell elkészítésénél 50x50 méteres cellamérettel rendelkező SRTM digitális domborzat modellt vettem alapul (SRTM Digital Elevation Data, 2008), melyből 250 m-es ekvidisztáns gridet készítettem. A grid méretének megváltoztatására azért volt szükség, hogy a WaterRiskben még elfogadható legyen a modell szimulációs ideje. Mivel a mintaterület megközelítőleg 1500 km<sup>2</sup>, ha 50x50 méteres cellaméretet alkalmazok, akkor a program közel 600000 aktív cellával számol, míg a módosított gridmérettel az aktív cellák száma 24000-re csökken. Az ekvidisztáns cellák számának csökkentésével a szimuláció ideje jelentősen lerövidül (a számítási idő a cellaszámmal hatványozottan nő). A domborzat modell elkészítése során több probléma is felmerült. Ezek elemzését és megoldását az I. Függelékben részletesebben is ismertetem. A WaterRiskben felhasznált domborzatot a 8. ábrán látható.



8. ábra A vizsgált terület domborzata

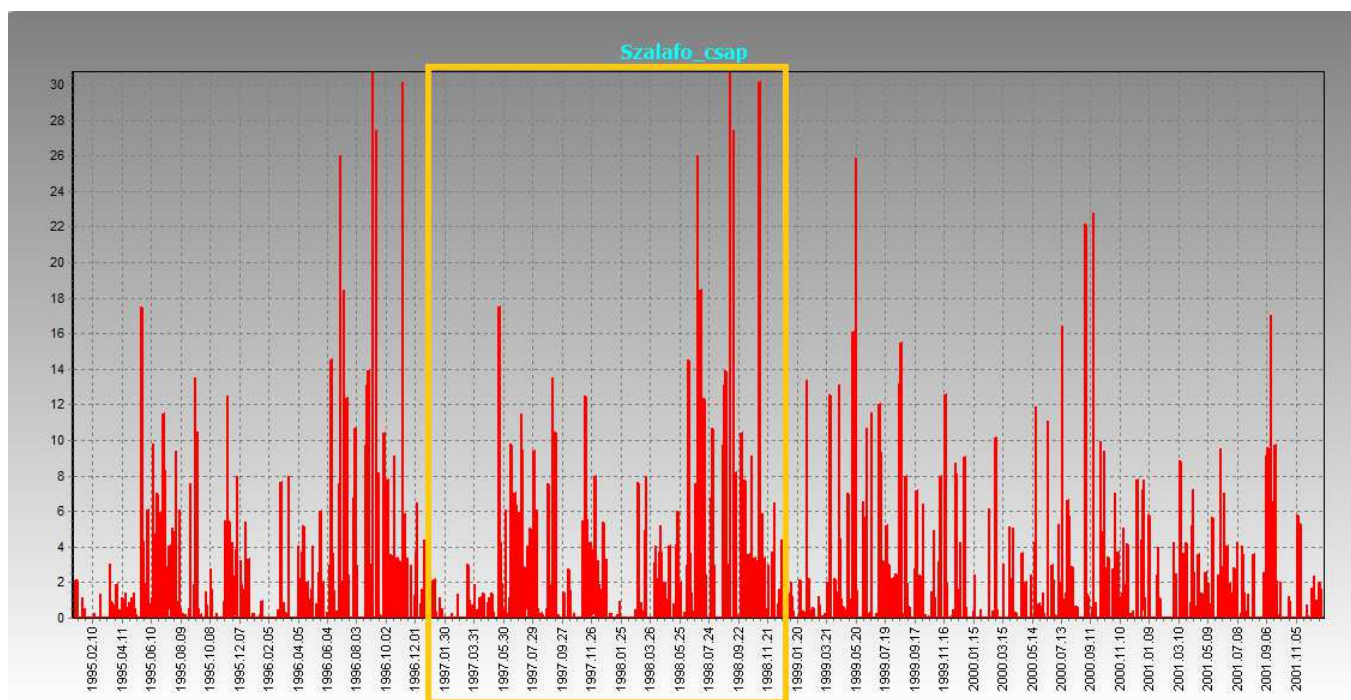
## 4.2. Éghajlat

A vízgyűjtő éghajlatát jelentősen befolyásolja, hogy hazánkban ez a terület fekszik legközelebb az Atlanti-óceánhoz, és viszonylag közel található az Adriához, így mérsékeltén hűvös, a kontinentális éghajlattól eltérő időjárással rendelkezik. A terület keleti és nyugati fele között hőmérsékletben, csapadékmennyiségben és a napsütéses órák számának mennyiségében is megfigyelhetők az eltérések. A terület nyugati fele mérsékeltén meleg, nedves, enyhe telű. A januári középhőmérséklet -1,5 és -2,0 °C között változik, a júliusi középhőmérséklet 19,5-20,0 °C. A napsütéses órák száma 2000 körüli. Ezzel

szemben a mintaterület keleti része mérsékelten meleg, mérsékelten nedves, enyhe telű. A januári középhőmérséklet  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig sem süllyed, a júliusi középhőmérsékletek sokéves átlaga pedig  $20,0\text{-}20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  közötti. A napsütéses órák száma nyugatról kelet felé csökken egészen 1900 óráig. A vízgyűjtő csapadéokban gazdag, évi összege nyugaton  $800\text{ mm}$  fölött. Csapadéokra  $100\text{-}110$  nap lehet számítani évenként,  $10\text{ mm}$ -t meghaladó mennyiségre átlagosan legalább  $20$  napon. A  $24$  óra alatt lehulló csapadékmennyiségek maximumai a területen  $80\text{-}120\text{ mm}$  között fordultak elő. Hóban gazdag terület. Uralkodó szele É-i, az Alpok eltérítő hatása és a táj dombvonulatainak É-D-i irányú elrendeződése miatt. (Nyugat-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság, 2007)

A modellek felépítése során a 7. ábrán jelölt 10 településről rendelkeztem naponta kétszer feljegyzett csapadékadatokkal 1995. január 1-je és 2001. december 31.-e között. A felhasznált hőmérséklet adatok is ezekről a településekről származtak, azonban csak  $2$  évvel rövidebb időtartamot fedtek le, 1997. január 1-je és 2001. december 31.-e között. Érdekes, hogy a hőmérséklet adatsorok mind a  $10$  mérőállomás esetén megegyeztek. A meteorológiai adatokat a Nyugat-dunántúli Vízügyi Igazgatóság szolgáltatta.

A HEC-HMS-ben végzett szimulációk időtartama  $2$  év volt. Az 1997. év csapadékszegénynek tekinthető, a csapadék-mérőállomások által mért éves átlagcsapadék mennyisége  $600\text{ mm}$  alatti. A második év (1998) már átlagosnak tekinthető a  $800\text{ mm}$ -t is meghaladó csapadékmennyiséggel. A két vizsgált év közötti eltérés jól látható a 9. ábrán.



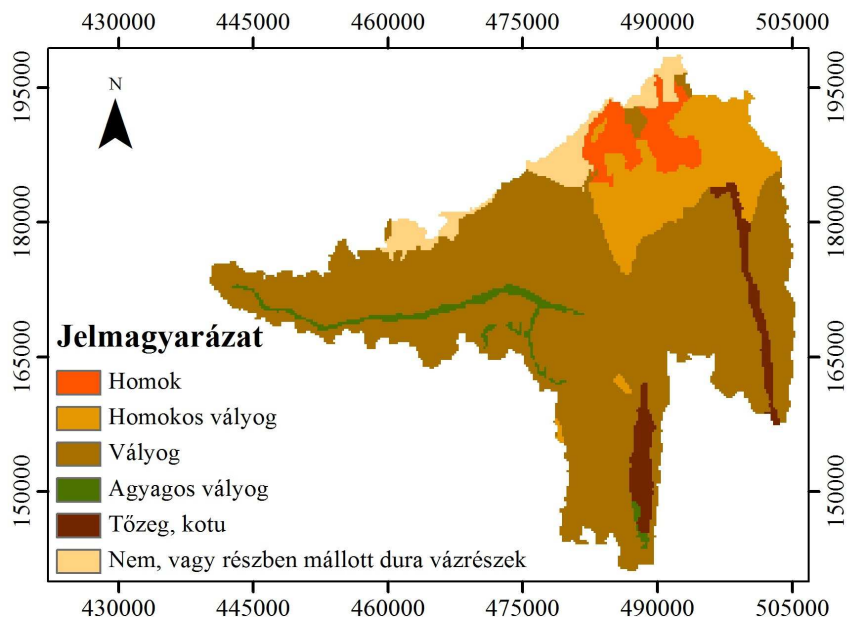
9. ábra A szalafői csapadékmérőállomás által rögzített csapadékmennyiségek.

### 4.3. Talajtípus

A vízgyűjtőterületen a fedőképződmények  $99\%$ -át aluviális üledék,  $1\%$ -t pedig dolomit teszi ki. Az üledék több mint  $40\%$ -át finom kőzetliszt és agyag, valamivel kevesebb, mint  $40\%$ -át homok, és a fennmaradó  $20\%$ -át durva kőzetliszt teszi ki. (Vízügyi és Környezetvédelmi Központi Igazgatóság, 2010)

A WaterRiskben felépített modellben a talaj felső  $10$  méterét definiáltam, mely munka során a Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani és Agrokémiai Intézete (MTA TAKI) által kidolgozott AGROTOPO adatbázist a felső  $1$  méterben, valamint a Magyar Állami Földtani Intézet (MÁFI) sekélyföldtani fúrásainak adatain alapuló  $1:100.000$ -es agrogeológiai térképet a fennmaradó  $9$  méterben használtam fel.

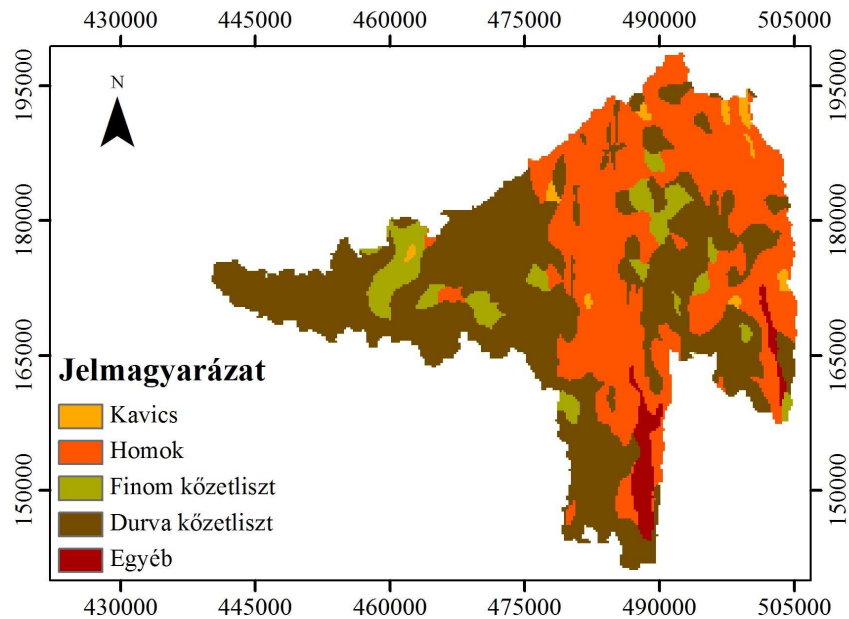
Az AGROTOPO GIS adatbázis a magyar talajtani tudomány és talajtani gyakorlat több mint 150 éves tevékenységének eredményeként létrehozott Agrotopográfiai térképsorozat tematikus adataiból kialakított számítógépes adatbázis, amely EOTR szabványos, 1:100 000 méretarányú, országos adatokat tartalmaz (AGROTOPO adatbázis) A 10. ábra a mintaterületre jellemző fizikai talajféleségeket mutatja be, melyeket felhasználtam a modellépítés során.



10. ábra Fizikai talajféleségek az AGROTOPO adatbázisból a mintaterületre.

A MÁFI adatbázisban egy shape fileban három számjegyből álló kóddal jelölik, hogy az adott területen a talaj felső 10 méterében milyen talajrétegek követik egymást. A háromjegyű számok jelentése táblázatból visszakereshető. Mivel a talajoszlop felépítése három vagy négy részre oszlik, ezért egyes talajtípusok más és más vastagságúak ezeken a térképeken, így ebben a modellben talajvastagság grideket is készítenem kellett, az egyértelmű használhatóság érdekében. A könnyebb kezelhetőség érdekében úgy vettem, hogy a négy rétegből felépülő talajoszlopok rétegei 2,5 m vastagságúak, míg az adatbázisban csak három rétegből felépülő talajoszlopokat is négy rétegre osztottam; 3 db 3,3 m-es és 1 db 0,1 m-es vastagságú rétegre. A 11. ábra a talaj felső 1-2,5 illetve, 1-3,3 m-es vastagságában előforduló talajfelépítő kőzeteket mutatja be.





11. ábra A MÁFI adatbázis alapján készített első talajtípus grid.

A képen látható vörös színnel jelzett talaj kategória az AGROTOPO adatbázissal való összevetés alapján szerves anyagból felépülő talajtípusokat (például: tőzeg, kotu) jelez. (További képek a függelékben találhatóak.)

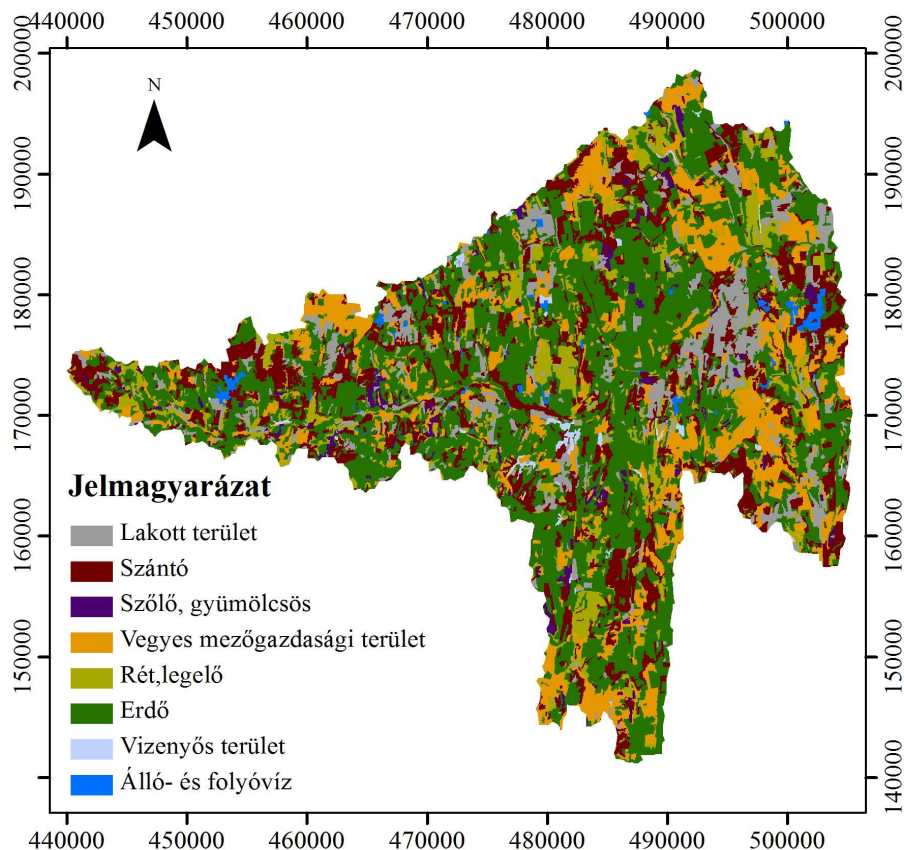
A WMS szoftverben a modell felépítése során a talajt felépítő rétegek változatosságának szemléltetésére sokkal kevesebb lehetőség adódik, mint a WateRisk programban. A modell építése közben lehetséges a talajadatok integrálása, azonban itt csak egy réteg bevitelére van lehetőség, és a talajt alkotó talajtípusok száma 4 típusban maximalizált, ellentétben a WateRisk programmal ahol ez az érték tetszés szerint módosítható a rendelkezésre álló adatok alapján. (Ábra a II: függelékben)

#### 4.4. Területhasználat

A vízgyűjtőterületen található területhasználatok megismeréséhez a CORINE CLC digitális adatbázist alkalmaztam (European Environment Agency, 2000), mely alapján, a területen 59 féle területhasználat különíthető el. Ezt a könnyebb kezelhetőség érdekében az alábbi 8 csoportba szortíroztam:

1. Belterület
2. Szántó
3. Gyümölcsös
4. Rét, legelő
5. Vegyes mezőgazdasági terület
6. Erdő
7. Vizenyős terület
8. Álló és folyóvizek

A mintaterület egészére vonatkoztatva a legjelentősebb területhasználatot a kis és nagytáblás szántó típusú mezőgazdasági művelés teszi ki 40,43%-kal. A főbb termelt szántóföldi növények: a kukorica, a silókukorica, a búza, a cukorrépa, az őszi árpa, a tavaszi árpa. Az általam lehatárolt vízgyűjtő 37,02%-án erdőgazdálkodás folyik. Rét, valamint legelő a terület 6,67%-án, vegyes mezőgazdasági terület pedig 6,94%-án található. Még jelentős területfoglalással bír a belterületi csoport, mely magába foglalja többek között a városközpontokat, családi házas területeket, ipari létesítményeket. Gyümölcsstermesztéssel a terület 2,51%-án foglalkoznak. A 12. ábra a területen található területhasználatokat szemlélteti.



12. ábra Területhasználatok a mintaterületen

A mintaterületen található egyes területhasználatok csoportosítását táblázatos formában a II. függelék tartalmazza.

#### 4.5. Zala folyó

A mai állapotában ismert Zala folyó felső szakasza az Ós-Rába egy korábbi mellékágából, az Ós-felső-Zalából, az alsó szakasza az Ós-Duna egy elhagyott völgyében csordogáló Ós-Alsó-Zala folyóból alakult ki. Erre szolgál bizonyítékként az Ós-Duna kavicsanyaga, ami még napjainkban is megtalálható a Zala környéki lápok finom üledékei alatt, valamint a folyamvölgy teraszain. (Nyugat-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság, 2007)

A Zala forrása a Vas megyei Szalafő község határában 310-320 m-es magasságban található. Medre erősen magán hordozza a korábbi folyamszabályozások nyomait. A vízfolyás hosszú szakaszait gyakorlatilag mesterségesen alakították ki a XIX.-XX. század során, majd az 1950-60-as években ismét átalakították. A folyó így kialakult hossza, 126 km, átlagos vízhozama  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . A meder szélessége 7-20 m, mélysége 0,5 -2,5 m között változik, fenéke homokos és iszapos. A part 50-75 fokos lejtésszögű. A terület domborzatához hasonlóan a talajvíz mélysége is különbözik a Zala völgyében. Egyes források 1-4 m közötti talajvízszint tükröt (Nyugat-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság, 2007) jelentenek mérvadónak, még mások a felszín alatt 9 m-rel húzódnó talajvízszintet tartják helyesnek (MÁFI, Magyarország Földtani Atlasza). Figyelembe véve a vízgyűjtő domborzati viszonyait (jelentős felszínesések) és a mozaikos területhasználatot valószínű, hogy a talajvíztükrök pozíciója térben (és időben is) több méteres tartományban ingadozik.

## 5. ELVÉGZETT MODELLEZÉSI FELADATOK ISMERTETÉSE

### 5.1. A modell felépítése WMS-ben

A HEC-HMS szoftver csak részvízgyűjtőkből álló sematikus modell építésére alkalmas, és a térinformatikai fedvények (például: domborzat, területhasználat, talajtípusok) feldolgozására nem képes, így a modell felépítését részben a WMS programban végeztem el. A vízgyűjtőterület lehatárolásához először a raszteres adatformátumú digitális domborzatot át kellett alakítanom szintvonalassá (a program csak ezt képes felhasználni), majd a könnyebb kalibrálhatóság érdekében a vízgyűjtőterületet négy részvízgyűjtő területre osztottam a vízfolyáson még Zalaapáti előtt található vízhozam mérési pontok (Zalalövő, Zalaegerszeg, Zalabér) alapján. Ezt követően az ArcGISban már elkészített területre jellemző talaj és területhasználati fedvényeket hívtam be a programba, majd integráltam őket a modellbe.

A modell által a magasság adatokból számított mintaterületet a vízhozammérési pontoknál részvízgyűjtőkre osztottam. Az 1. táblázat a részvízgyűjtők lehatárolási pontjait és az automatikusan meghatározott területüket tartalmazza.

<i>Részvízgyűjtő kifolyási pont</i>	<i>Terület (km<sup>2</sup>)</i>
1. Zalalövő	191.44
2. Zalaegerszeg	401.20
3. Zalabér	636.60
4. Zalaapáti	249.24

1. táblázat Az egyes részvízgyűjtők kifolyási pontjai és területeik

A WMS szoftver (az USA-ban elterjedt modellezési gyakorlatnak megfelelően) csupán négy eltérő tulajdonságokkal rendelkező talajtípus megkülönböztetésére képes, melyek az alábbiak:

- A típus: kis lefolyási érték, magas beszivárgási tényező, például: homok, kavics
- B típus: közepes lefolyási érték, és beszivárgási tényező, például: homokos vályog, lösz
- C típus: kis beszivárgási tényező, magas lefolyási érték, például: agyagos vályog
- D típus: magas lefolyási érték, nagyon kicsi beszivárgási tényező, közel vízzáró tulajdonságokkal bíró talaj.

A talajtípusokat bemutató shape fájl, azonban 7 különböző típust tartalmazott, így azokat át kellett csoportosítanom a WMS által alkalmazott 4 talajtípus szerint.

<i>AGROTOPO talaj típus</i>	<i>WMS talajtípus</i>
Homok	A típus
Homokos vályog	B típus
Vályog	B típus
Agyagos vályog	C típus
Agyag	C típus
Szerves	B típus
Nem vagy részben mállott	D típus

2. táblázat Az AGROTOPO talajtípusok és a nekik megfelelő WMS talajtípus

A WMS szoftverben a területhasználatok száma nem korlátozott. Az összegyülekezési idő (lag time) számításánál az egyes területhasználatok mind külön-külön CN (Curve Number) számmal rendelkeznek az eltérő területhasználat esetén. (CN számok forrása: Neitsch, Arnold, Kiniry, Williams, 2009 és Scharffenberg & Fleming, 2008.)

<i>Területhasználat</i>	<i>A típus</i>	<i>B típus</i>	<i>C típus</i>	<i>D típus</i>
Belterület	68	79	86	89
Szántó	67	78	85	89
Szőlő, gyümölcsös	43	65	76	82
Vegyes mezőgazdasági területek	63	74	82	85
Rét, legelő	36	57	71	78
Erdő	36	60	73	79
Vizenyős területek	12	15	18	21
Álló- és folyóvíz	10	10	10	10

**3. táblázat** Az egyes területhasználatok és a hozzájuk tartozó CN számok a 4 féle talajtípus esetén

A CN szám egy empirikus hidrológiai tényező, melynek célja megmutatni a csapadék lefolyást. Széles körben alkalmazott, és hatékony megoldás a direkt lefolyás meghatározására egy specifikus területen. A CN szám a terület hidrológiai talaj típusától, a terület használatától és a hidrológiai kondícióktól függ.

A modell végleges beállítása során a felszíni összegyülekezés számításánál a WMS által a CN számokból meghatározott összegyülekezési időket tekintetem az optimálási eljárás kezdeti értékének. Az alaphozam számításánál más módszert választottunk, mivel a CN számokat alkalmazó módszerek csak csapadék események (maximum 14 nap) szimulálására alkalmasak.

A WMS-ben felépített modell egyszerűen konvertálható a HEC-HMS számára megfelelő formátumba. Lehetséges a HEC-HMS számos paraméterének előzetes beállítása is. Azonban én ezzel a lehetőséggel nem éltem, csupán a WMS-ben kiszámolt értékeket (például: terület nagysága, összegyülekezési idő) vettem át a HEC-HMS modellbe.

## 5.2. A modell beállítások és szimuláció HEC-HMS-ben

A HEC-HMS modell felépítésénél a Hydrological Response Unit (HRU) szemlélet érvényesül, azaz a területet a modell az azonos területhasználatok és talajtípusok alapján bontja számítási részegységekre. A program az alkalmazott halmozott paraméteres, empirikus jellegű hidrológiai összefüggéseket minden esetben egy-egy HRU-ra végzi el.

Az egyes részvízgyűjtőkre az alábbi paramétereket kell megadni:

- csapadék
- lefolyásképző csapadék
- párolgás
- alaphozam
- felszíni összegyülekezés
- mederbeli lefolyás

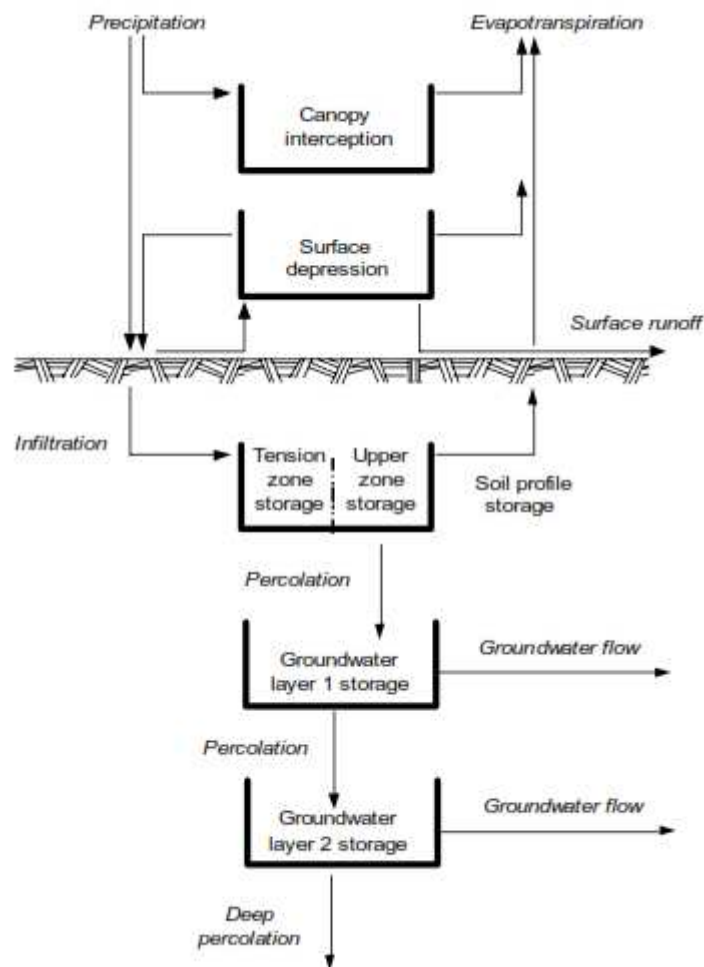
A szoftverben az egyes részvízgyűjtők esetén lehetőség van számos lehetőség közül kiválasztani a megfelelő számítási módszert.

- Baseflow method - alaphozam számítási módszer
- Loss method – lefolyásképző csapadékszámítási módszer
- Transform method – felszíni összegyülekezés számítási módszer

A modellben a részvízgyűjtők közti vízmozgás (flow routing in reach) leírására több módszer közül választhatjuk ki az adott vízgyűjtőnek legmegfelelőbbet.

### 5.2.1 Lefolyásképző csapadékszámítási módszer: Soil Moisture Accounting

A Soil Moisture Accounting (SMA) modell, mely a lefolyásképző csapadék mennyiségét határozza meg, hosszabb idejű modellezési feladatok esetén alkalmazható. A modell alapját Leavesley csapadék lefolyás modell rendszere (1983) alkotja. Beállításához szükség van a kiindulási állapot ismeretére. A modell szimulálja a csapadék mozgását és tározását a növényzeten, a talaj felületén, a talaj szerkezetében, valamint a talajvízben. Adott csapadék és potenciális párolgás adatok alapján a modell kiszámolja a vízgyűjtőterület felületén összegyülekező vízmennyiséget, a talajvízáramlást, a veszteségeket a párolgásból kifolyólag, valamint a mélységi beszivárgást az egész területre. Az SMA modell a vízgyűjtőterületet lineáris tározók láncolatával jellemzi, melyeket a 16. ábra szemléltet.



13. ábra Az SMA modell felépítése

A csapadék egy része tározódik a növényeken, a talaj felületén, a talajban, valamint a talajvízben. A növényeken történő csapadék tározódás kezdeti veszteség, a további tározókba ez a mennyiség már nem jut, párolgás útján hagyja el a rendszert. A felületen tározódó csapadék mennyisége a csapadék és a növényeken történő tározódás különbségével egyenlő. A későbbiekben ezen különbségből alakul ki a felszíni lefolyás. A felületen tározódó víz mennyisége beszivárgás és párolgás által is csökkenhet. Azt a maximális sebességet, amellyel adott kiindulási állapotban a talajba beszivároghat a csapadék, a potenciális beszivárgási tényező (potential infiltration rate) írja le, mely értelemszerűen függ a talaj kezdeti víztartalmától. (SMA modellben feltételezik, hogy a potenciális beszivárgási tényező értéke fordítottan arányos kapcsolatban áll a talaj víztartalmával.) A talajba beszivárgó víz a modell leírása

alapján két tározó között oszlik meg. A tension zone storage-nak nevezett tározó a hasznosítható/diszponzibilis víztartalomnak feleltethető meg, melyből a nedvesség csak párolgás útján távozik, ha a talaj felsőbb rétegei már kiszáradtak. Az upper zone storage pedig a telített és a szabadföldi vízkapacitás közötti vízmennyiségnek, azaz a fajlagos hozamnak felel meg. Az itt elraktározott vízmennyiség párolgás és a gravitációs szivárgás útján is elhagyhatja a tározót. Az ábrán jelölt két talajvízréteg közül a második opcionális. A felső talajvízréteg szemlélteti a sekély talajfelszín alatti vízmozgásokat, míg az alsó talajvízréteg a folyókhöz hidrológiailag kapcsolódó mélyebben fekvő talajvizet jelöli. A talajvíz rétegek oldalirányú szivárgása adja az alaphozamot.

A módszer alkalmazásához 12 paraméterre és 5, a kiindulási állapotot leíró tulajdonság ismeretére van szükség. Ezek a 4. és az 5. táblázatban láthatók angol megfelelőikkel.

<i>Kezdeti feltétel</i>		<i>Initial condotion</i>
Növényi tározás a kezdetekkor	%	Canopy storage initially filled
Felületi tározás a kezdetekkor	%	Surface storage initially filled
Talaj tározása kezdetekkor	%	Soil storage initially filled
Talajvíz 1 tározása a kezdetekkor	%	Groundwater layer 1 storage initially filled
Talajvíz 2 tározása a kezdetekkor	%	Groundwater layer 2 storage initially filled

4. táblázat Az SMA használatához szükséges kezdeti feltételek

<i>Paraméter</i>	<i>Mértékegység</i>	<i>Parameter</i>
Növény tározás	mm	Canopy storage
Felületi tározás	mm	Surface storage
Maximális beszivárgási tényező	mm/óra	Maximum infiltration rate
beszivárgás mentes terület	%	Impervious surface area
Teljes talaj tárolás	mm	Total soil storage
Talaj tározás	mm	Soil tension storage
Talajvíz 1 tározás	mm	Groundwater layer 1 storage
Talajvíz 1 maximális szivárgási tényező	mm/óra	Groundwater layer 1 maximum percolation rate
Talajvíz 1 tározási együttható	óra	Groundwater layer 1 storage coefficient
Talajvíz 2 tározás	mm	Groundwater layer 2 storage
Talajvíz 2 maximális szivárgási tényező	mm/óra	Groundwater layer 2 maximum percolation rate
Talajvíz 2 tározási együttható	óra	Groundwater layer 2 storage coefficient

5. táblázat Az SMA alkalmazásához szükséges paraméterek

### 5.2.2 Felszíni összegyülekezés számítási módszer: SCS Unit Hydrograph

A felszíni összegyülekezés számításához az SCS Unit Hydrograph módszert alkalmaztam, amit eredetileg kis mezőgazdasági területeken megfigyelt adatok esetén alkalmaztak. A sokoldalú felhasználás érdekében az adatokat általánosították, és a hidrográfot dimenziómentesítették. (Hidrográf: a vízhozam az idő függvényében ábrázolva.) Ennél a modellenél a hidrográfon minden esetben a csapadék lefolyás 37,5 %-a levonul a csúcs előtt.

A modell futtatásához, csak az összegyülekezési időre (lag time) van szükség, ami megmutatja mennyi idő telik el a vízgyűjtőterületre lehulló csapadékmennyiség súlypontja, és a vízhozam görbe

maximális értéke között. Ezt az értéket mind a négy részvízgyűjtő esetén még a WMS-ben meg tudtam határozni.

### 5.2.3 Alaphozam számítási módszer: Linear Reservoir Baseflow

Mivel az alaphozam számítási módszert az SMA-val együtt alkalmaztam, ezért a beszivárgás kapcsolatban áll a talajvízrétegek oldalirányú szivárgásával. A módszer alkalmazása 6 paraméter ismeretét követeli meg, melyeket a 6. táblázat tartalmaz.

<i>Paraméter</i>	<i>Mértékegység</i>	<i>Parameter</i>
GW1 kezdeti érték	m <sup>3</sup> /s	GW1 Initial
GW1 tározási együttható	óra	GW1 Storage Coefficient
GW1 tározó	-	GW1 Reservoirs
GW2 kezdeti érték	m <sup>3</sup> /s	GW2 Initial
GW2 tározási együttható	óra	GW2 Storage Coefficient
GW2 tározó	-	GW2 Reservoirs

6. táblázat A Lineáris tározó módszer által megkövetelt paraméterek

Korábbi tanszéki munkák eredményeként rendelkezésemre álltak a 4 részvízgyűjtő lehatárolási pontjaihoz (Zalalövő, Zalaegerszeg, Zalabér, Zalaapáti) tartozó mért vízhozam értékek alapján vízhozam-szeparációs módszerekkel előállított adatsorok 1993 és 2002 között. (Clement, szóbeli közlés) Ezeket az adatokat használtam fel a GW1 és GW2 kezdeti paraméterek értékének megadásánál. GW1-nek a szeparációs módszerekkel előállított idősorok közül a gyors talajvizet tekintettem, GW2-nek pedig a lassú talajvizet.

A talajvíz tározási együttható megmutatja, hogy a csapadék esemény kezdetétől számítva mennyi idő szükséges a talajvízrétegben kialakuló válaszig.

A talajvíz tározók száma megmutatja, hogy a talajvíz hány tározón halad keresztül. Az alaphozam csillapítása a tározók számával egyre nő, azaz minél több tározót alkalmazok, az alaphozam csapadékeseményre adott válasza annál hosszabb idejű, és kisebb intenzitású lesz.

### 5.2.4 Részvízgyűjtők közti vízmozgás

A csatornában lefolyó vízmozgás meghatározásához 6 féle módszer közül lehet választani. Én a Muskingum-Cunge módszert választottam, ami a tömeg- és impulzusmegmaradás törvényeinek kombinációján alapszik. Gyakran a változó együtthatók módszereként utalnak rá (variable coefficient method), mert a paramétereket minden egyes időlépésben újra számolja a modell.

Az algoritmus alkalmazásához szükséges paramétereket a 7. táblázat tartalmazza.

<i>Paraméter</i>	<i>Mértékegység</i>
Idő lépés	-
Hossz	m
Lejtés	m/m
Manning n	-
Fenék magasság	m
Alak	-
Bal oldali Manning n	-
Jobb oldali Manning n	-
Keresztmetszet	-

7. táblázat

A 7. táblázatban szereplő paraméterek jelentését a következőkben ismertetem. A hossz paraméter a csatorna teljes hosszát jelenti, általában térképekről könnyen meghatározható. A lejtés a csatorna teljes hosszára vonatkoztatott lejtés. Ez az érték megbecsülhető térképekről, vagy terepi mérések alapján meghatározható. A Manning n érdességi tényező értékét az egész csatornára átlagolva kell megadni. A fenék magasság megadása opcionális. Alkalmazása esetén a kiszámított vízmélység értéke hozzáadódik a vízszint meghatározása érdekében. A keresztmetszet meghatározására az alábbi lehetőségek adóttak: kör alakú, négyszögletes, trapéz, háromszög, 8 pontos. A modell beállításánál én a 8 pontosat alkalmaztam, majd meghatároztam a keresztmetszet alakját a 8 pont által.

### 5.2.5 A meteorológiai modell beállításai

Mind a 4 részvízgyűjtő alegységen a területén található csapadékmérő állomások idősorait használtam fel (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**), súlyozva a kifolyási ponttól vett távolságuk alapján.

1_VGy	2_VGy	3_VGy	4_VGy
Szalafő	Bak	Gersekarát	Zalaapáti
Szőce	Söjtör	Pácsony	
Zalalövő	Zalaegerszeg	Zalabér	

A párolgás számításánál a havi átlagos párolgási módszert alkalmaztam. A számításokhoz Kovács Ákos Domonkos PhD értekezésében található adatokat használtam fel. (Kovács, 2011)

### 5.3. HEC-HMS szimuláció

A szimuláció elvégzéséhez felhasznált paramétereket az 1. részvízgyűjtő területen a 9. táblázat tartalmazza.



<i>Paraméter</i>	<i>Érték</i>
Canopy Capacity	7
Canopy Initial Storage Percentage	20
Groundwater 1 Capacity	65
Groundwater 1 Initial Storage Percentage	100
Groundwater 1 Percolation Rate	2.1
Groundwater 1 Storage Coefficient	400
Groundwater 2 Capacity	75
Groundwater 2 Initial Storage Percentage	50
Groundwater 2 Percolation Rate	2.2
Groundwater 2 Storage Coefficient	700
Linear Reservoir GW 1 Coefficient	15
Linear Reservoir GW 1 Steps	60
Linear Reservoir GW 2 Coefficient	60
Linear Reservoir GW 2 Steps	75
SCS Lag	749.28
Soil Capacity	20
Soil Infiltration Rate	1.3
Soil Initial Storage Percentage	80
Soil Percolation Rate	1.3
Surface Capacity	
Surface Initial Storage Percentage	75
Tension Zone Capacity	10

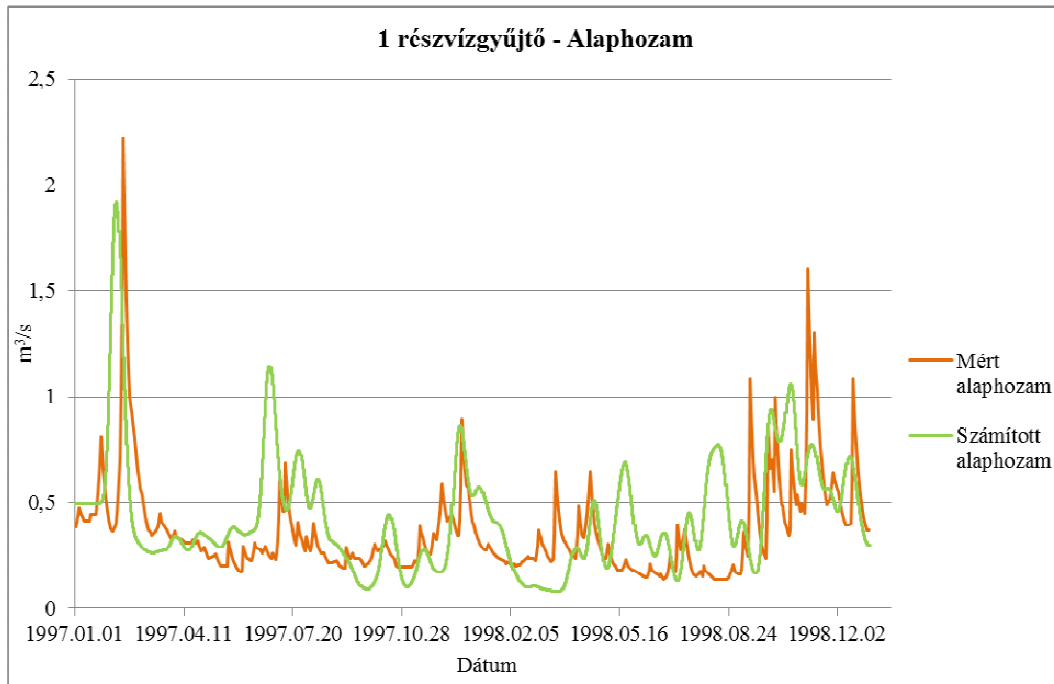
8. táblázat

A fenti paraméterkészletet egy soklépéses optimálási folyamat eredményeként kaptam. Napokat töltöttünk vele, hogy az egyes paraméterek módosító hatását, valamint a beépített optimálás funkcióit, eredményeinek értelmezését megismerjük.

Az optimálás során módosítottuk:

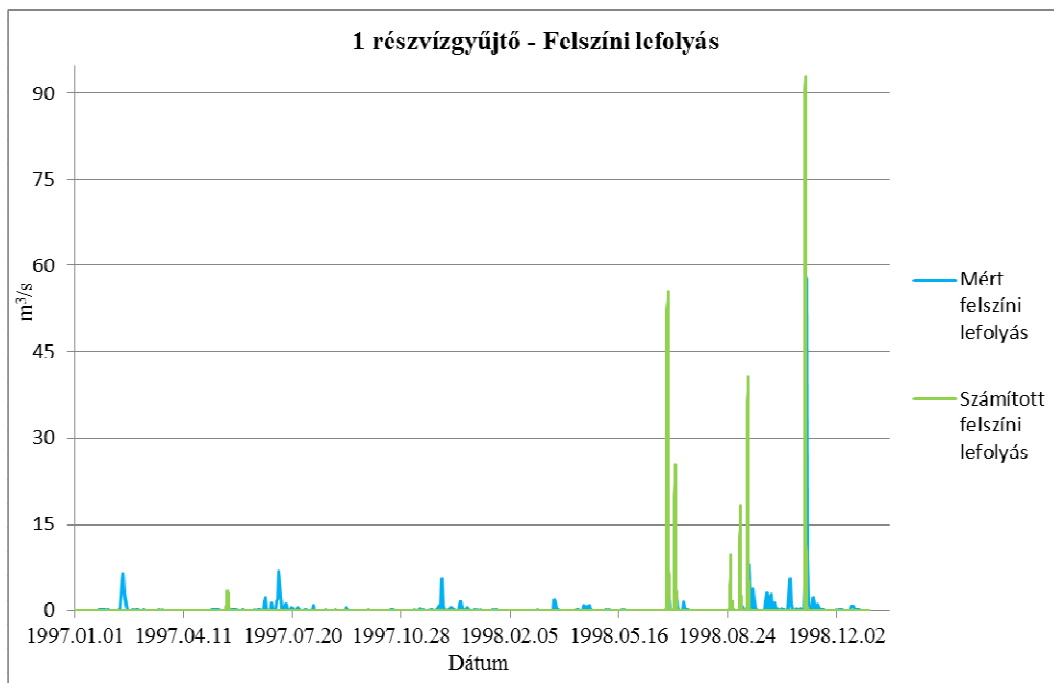
- a célfüggvényt
- a keresési algoritmust
- a rögzített és a kalibrálandó paraméterek listáját és a kiindulási adatokat (manuálisan és automatizáltan)
- a kalibrálás célját (csak alaphozam, együtt a teljes vízhozam)

Az előbb felsoroltak elvégzéséhez ezres nagyságrendű szimulációt végeztünk el manuálisan és automatizáltan. A kalibrálást az 1. részvízgyűjtőre végeztem, mivel ez az egyetlen olyan részvízgyűjtő, ahova felvízi irányból nem jön víz a mederbe. Ezért itt nincs felvízi peremfeltétel, ami valószínűleg már eleve hibával terhelt lenne. A modellezés általános elvét követve, próbáltunk minden zavaró hatást, hibalehetőséget kizárni.



14. ábra A mért és számított alaphozamok

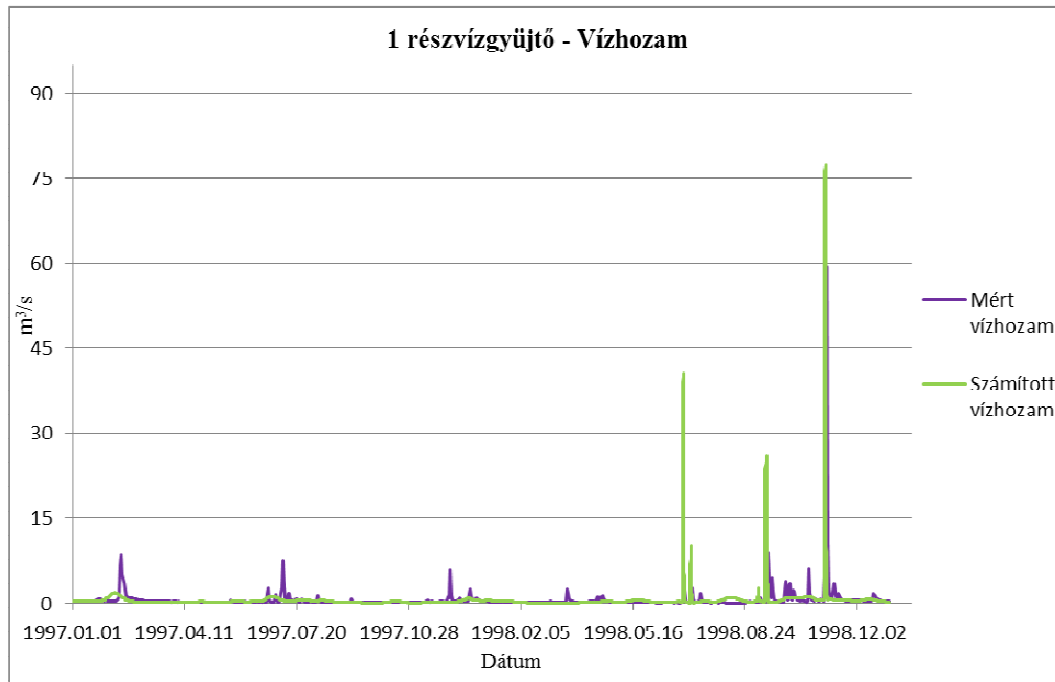
A 14. ábrán az előzőekben már ismertetett paraméterek felhasználásával számított alaphozam, valamint a mért idősből vízhozamszeparációval kapott alaphozam látható Zalalövönél. A szimuláció idejét képző két év alatt a vízhozamszeparáció alapján kapott alaphozam mennyisége  $22925030,4 \text{ m}^3$ , míg a számított alaphozam összege  $27197643,6 \text{ m}^3$ . Ez alapján a számított idősor összértéke kevesebb, mint 20 %-kal haladja meg a mért adatsor összértékét.



15. ábra A mért és számított felszíni lefolyás

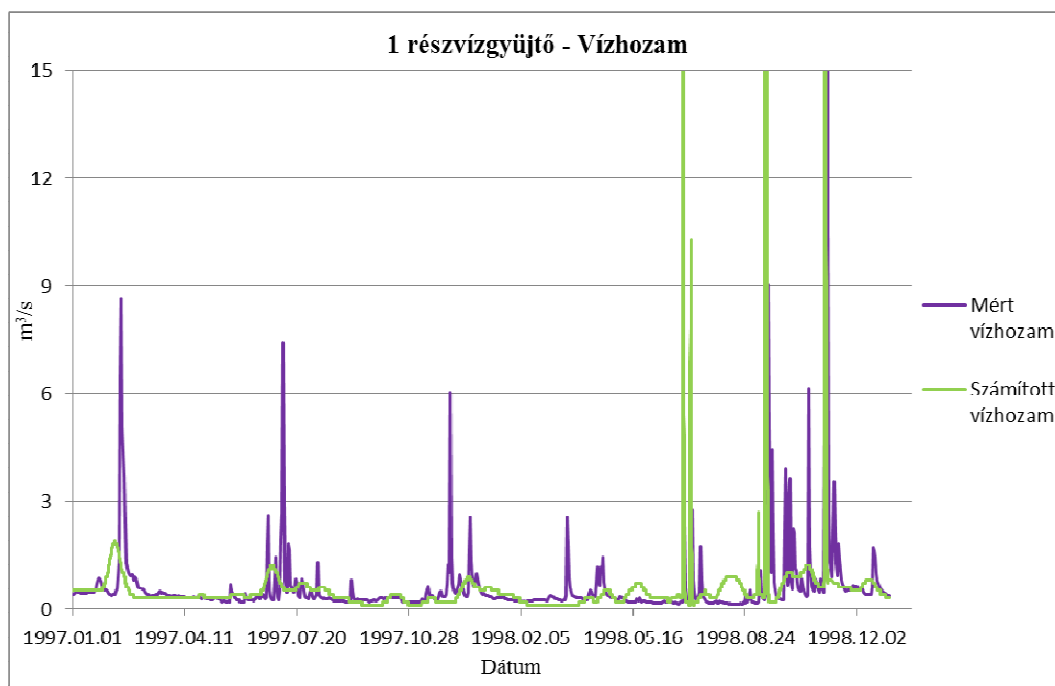
A 15. ábrán a számított és a viszonyítási alaphozam vett vízhozamszeparációból származó zalalövői felszíni lefolyás idősorok láthatók. A számított adatsor nem minden esetben követi a mért adatsort. A kezdeti, viszonylag kicsi csúcsokat nem jól követi időben. A szimuláció végéhez közelebb eső csúcsokat

már időben pontosabban, de mennyiségileg túlbecsülve szimulálja. Az összesített vízmennyiségek alapján a számított adatsor még így is közel 10%-kal kevesebb vizet tartalmaz.



16. ábra Számított és mért vízhozam

A 16. ábrán - a felszíni lefolyáshoz hasonlóan - a vízhozamok esetén is látható, hogy a számított adatsorok esetén vannak olyan dokumentált árhullámcsúcsok, melyeket a modell nem képes leírni, és vannak olyanok, melyeknél a modell jelentősen meghaladja a mért értékeket. (Ezt a 17. ábra nagyon jól szemlélteti.) Az összegzett vízmennyiségek alapján a számított adatsor kevesebb, mint 8 %-kal százalékkal haladja meg a mért adatsor összértékét.



17. ábra Számított és mért vízhozam

#### 5.4. Modell felépítése WateRiskben

Első lépésként az ArcGis-ban már elkészített adatállományokat (például aktivációs grid, domborzat, meteorológiai mérőállomások helyei), valamint a területről készült Google Earth képet hívtam be a WateRisk felhasználói felületére. Ezután felépítettem a Zala folyót. A felületre behívott fedvényen követve a Zala nyomvonalát elhelyeztem a keresztmetszvényeket reprezentáló csomópontokat és az általuk közrefogott folyószakaszokat, kitöltöttem az egyes elemek tulajdonságait. Létrehoztam a 4 eltérő mederfenék szélességű trapéz keresztmetszvényt a keresztmetszvény-szerkesztőben, valamint a különféle (csapadék, hőmérséklet, vízhozam) idősorokat. Mindegyik keresztmetszvényt hozzárendeltem a megfelelő csomópontokhoz, az idősorokat a meteorológiai megfigyelő állomásokhoz és a kifolyási ponthoz. Sorban megadtam a még hiányzó számítási modell tér- és időbeli diszkrétizációra vonatkozó beállításokat (például: szimuláció időtartama, egyes eredmények mentési időköze, talajtípusok, talajvastagságok, stb.) korábbi modellezési feladatok eredményeit figyelembe véve. Minden szimuláció előtt hibakeresést kell végezni, amikor a program ellenőrzi, hogy a megadott paraméterek között nem található-e olyan, amely ellehetetlenítené a feladatot. A hibakeresés funkció nagymértékben megkönnyítette a szerkesztést és a reális modell felállítását. Így derült ki például az első hibakeresés alkalmával, hogy a térinformatikai szoftverben, domborzat alapján lehatárolt mintaterület kis része már nem Magyarországon található, és így nem ismerjük hozzá a talajtulajdonságokat. A hibát a gridszerkesztőben könnyen ki tudtam javítani, egyszerűen csak le kellett vágni a felesleges területet az aktivációs gridből.

Az első szimuláció eredményeként a zalabéri kanyart követő szakaszon áradásos időszakban jelentős mennyiségű víz öntötte el a folyót is magába foglaló völgyet. A valóságban a hullámtérre kikerülő víztömeg mozgását a modell egyszerű prizmatikus trapézmeder segítségével nem tudta helyesen kezelni. Ennek a hibának a kiküszöbölése érdekében, az ArcGIS-ben, majd az Excelben a domborzat alapján az egész völgyet átszelő keresztmetszeteket készítettünk, melyek merőlegesek voltak a folyóra. Az előállított metszetek hullámtérből és főmederből álló összetett keresztmetszvényt adnak meg. Ezeket a WateRiskben felhasználva újabb szimulációkat végeztünk. Előtte azonban még ki kellett javítani az új keresztmetszetekhez generált partvonalat, ami a keresztmetszetek végpontjait összekötő egyenes, mely a terepi (2D) és mederbeli (1D) modellek számítási tartományát elhatárolja. (A keresztmetszet javításáról a képek a IV. Függelékben találhatóak.)

Az újabb futtatások eredményeként a Zala folyó mellett a terep bizonyos helyein még így is jelentős mennyiségű víz gyülemlett fel, ezért az alábbi mellékfolyókat szerkesztettük meg:

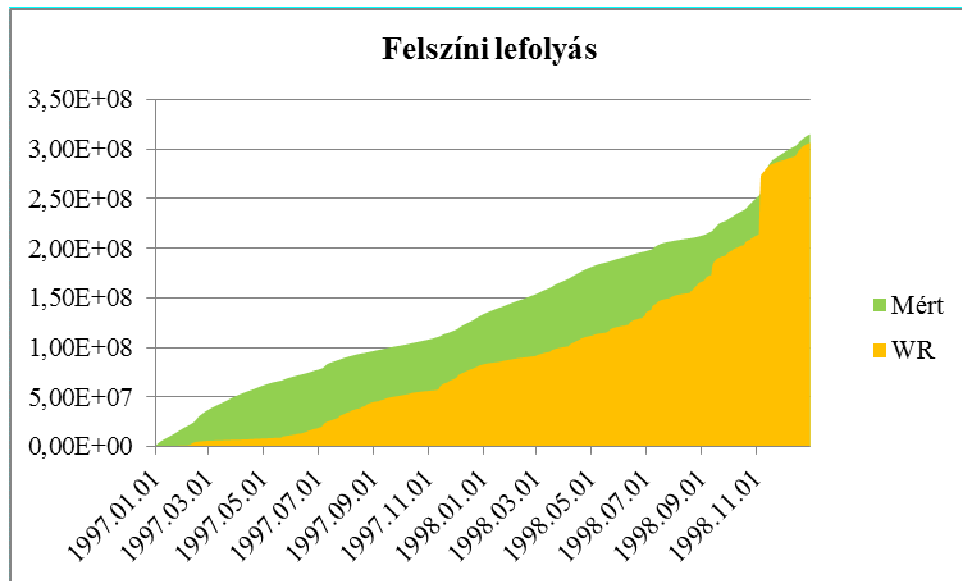
- Sárvíz-patak
- Felső-Válicka-patak
- Szévíz-csatorna

A továbbiakban tárgyalt szimulációs eredményeket az előzőekben ismertetett módon felépített modellen végeztük.

#### 5.5. A modell szimuláció WateRiskben

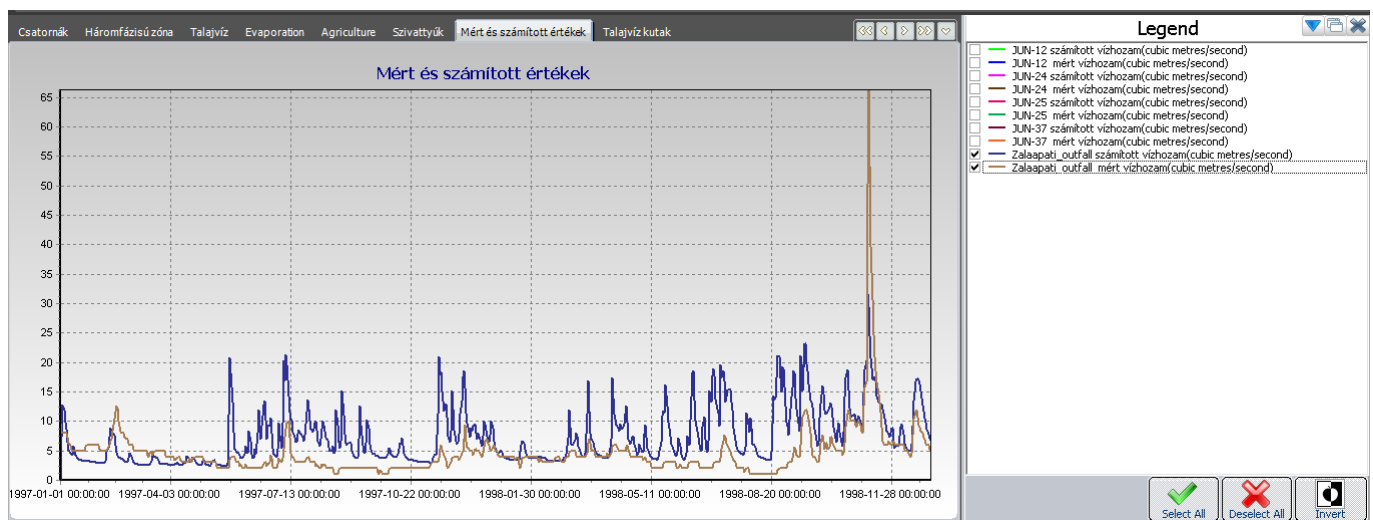
A modell által megkövetelt paraméterek kalibrálásának eredményei.

A számított felszíni lefolyás kumulált értéke összehasonlítva a mért felszíni lefolyáskumulált értékével a 18. ábrán látható.



18. ábra A WateRisk által számított és a mért felszíni lefolyás

A 18. ábrán látható, hogy a WateRisk által számított felszíni lefolyás mértéke az 1998. novemberi nagy esőzésekig számottevően kevesebb a mért adatok értékénél. A jelentős csapadék mennyiség hatására megnövekedett a számított felszíni lefolyás mértéke, de még így is nagyobb a mért kumulált adat.



19. ábra A Zalaapátinál mért és a WateRisk által számított vízhozamok összehasonlítása

A 19. ábrán jól látható, hogy a kékkkel jelölt idősor, ami a WateRisk által számított vízhozam értékeket jelöli, nem képes a mederben levonuló árhullám megjelenítésére. A mért  $66 \text{ m}^3/\text{s}$ -os érték helyett, csak  $32 \text{ m}^3/\text{s}$ -os értéket számított. Ennek oka - a kalibráció hiányosságán felül -, hogy a modell jelenlegi állapotában még nem képes az árvízi vízhozamok számítására. A dolgozat a

## 5.6. Az eredmények összehasonlítása

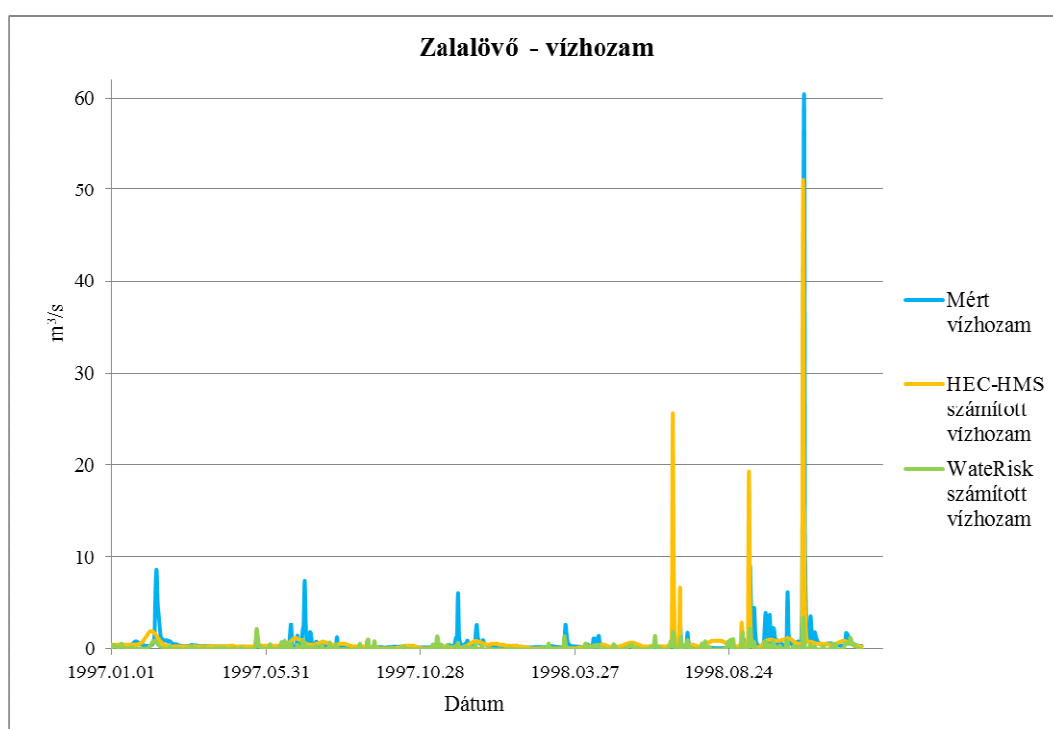
A modellek eredményeinek összehasonlítása érdekében kiszámoltam a százalékos térfogat hibát (PEV, Percent error volume), valamint az „eltérések négyzetösszegeként” (RMSE, „root mean square error”) aposztrófált mennyiséget. A számításokhoz a Zalalövőnél mért valamint oda számított vízhozam

adatokat használtam fel 1997. január 1-je és 1998. december 31.-e között. A kapott eredményeket 9. táblázat tartalmazza.

	<i>HEC-HMS</i>	<i>WateRisk</i>
PEV	7.28	74.62
RMSE	2.21	2.70

**9. táblázat A számítási eredmények minőségét jellemző számok**

Az eltérések négyzetösszegeként használt paraméter értéke kisebb a HEC-HMS által számított vízhozam adatok felhasználása esetén. Ez azt jelenti, hogy ennek a modellnek kisebb a szisztematikus hiba mértéke, és kevesebb kiugró hibát tartalmaz, mint a WateRisk által számított vízhozam adatsor. A százalékos térfogat hibára WateRisk esetén kiugróan magas értéket számítottam, ami azt jelenti, hogy a számított térfogat jelentős mértékben eltér a mért térfogattól. Ezt jól szemlélteti a 20. ábra is.



**20. ábra A mért és a modellek által számított vízhozam adatsorok**

A 20 ábrán látható, hogy a százalékos térfogat hiba azért olyan magas a WateRisk esetén, mert a szimulált értékek mennyiségileg jelentősen elmaradnak a mért értékek mögött.

## 6. A KAPOTT EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Az HEC-HMS-ben a hosszabb idejű események szimulálására csak az SMA algoritmus alkalmazható az alaphozam meghatározási módszerek közül, mivel a többi csak 14 napnál rövidebb események számítására alkalmas. A szimulációs időlépés hossza meghatározó jelentőségű a vizsgált folyamatok dinamikájának helyes leírása szempontjából. Ennek megfelelően a lépésköz megválasztását McEnroe (McEnroe, 2010) a szimuláció céljától teszi függővé:

- Ha az árhullámok csúcsainak pontos időbeli eltalálása a cél, akkor 1 éves vízhozam adatsort és 15 perces szimulációs időlépést javasol. (Ha technikailag lehetséges, akkor az 5 perces időlépés még jobb, de ez nem minden esetben megoldható.)
- Ha az összterfogatok minél pontosabb megadása a cél, akkor 1 órás időlépést és legalább 1 évtizednyi vízhozam adatsort ajánl.

Az SMA alkalmazása esetén, a párolgás számítására a havi átlagos (Constant monthly) módszert javasolják, ahol a párolgás értéke – a hőmérséklettől és egyéb meteorológiai tényezőktől függetlenül – egy hónapon belül állandó a nap minden szakában, a hónap minden napján. Vagyis a fent megadott számítási lépésközök alapján a havi átlagérték alkalmazása durván elnagyolt megoldásnak tűnik. Figyelembe véve, hogy a párolgás a hidrológiai folyamatok szempontjából jelentős tényező, így ilyen nagyságrendű elhanyagolása a modell részletességét vonja kétségbe.

A szimuláció eredményei ezt igazolják. Még egy kis (a 192 km<sup>2</sup> összterületű, Zalalövőig tartó) részvízgyűjtőn is nehézséget jelent a modell kalibrálása. Sok esetben a mért árhullámokat a modell nem képes leírni, míg egyes árhullámokat a modell jelentősen felerősít.

A HEC-HMS-ben felépített modellem másik gyengesége a növények által felfogott csapadék (canopy interception) mértéke, melyet egész évben állandónak tekint a szimuláció során. A tényleges fizikai folyamat valójában erős összefüggést mutat a levél felületi index (Leaf Area Index, LAI) mérőszámmal, mely Magyarországon az évszaknak megfelelően nagy mértékben változik. A növények felületén tározódó csapadék mennyisége jelentősen befolyásolja a hidrológiai folyamatokat, így ennek elhanyagolása durva közelítést eredményez.

A HEC-HMS-ben csak az első részvízgyűjtőt kalibráltam. Ennek az az oka, hogy ez az egyetlen olyan részvízgyűjtő, ahova felvízi irányból nem jön víz a mederbe, így nincs felvízi peremfeltétel, ami valószínűsíthetően már alaphibával terhelt lenne. Próbáltunk minden zavaró hatást, hibalehetőséget kizárni.

A WateRisk integrált hidrológiai modell a HEC-HMS-hez képest lényegesen több információt nyújt a vizsgált mintaterületről. Segítségével a területen részletes vízmérleg állítható fel, megbecsülhető a felszíni összegyülekezés, leírható a talajvízszint változása. Nagy előnye a HEC-HMS-hez képest, hogy a számítások eredményei cellaszinten, térképesen is megjeleníthetők. Ilyen területi információ például a talajvízszint tükör pozíciója, a potenciális és tényleges párolgás, a terepi lefolyás, vagy a csatornában lefolyó víz mélység változásának nyomon követése.

Ebben az esetben a kalibrálás folyamata könnyebb volt abból a szempontból, hogy a szükséges paraméterek többsége – becsülhető – fizikai tartalommal bír, nem csak empirikus összefüggések – gyakran értelmezhetetlen értékű – együtthatója. Így a WateRisk esetében alapvetően nincs szükség hosszas érzékenységvizsgálatra alapuló tanulási folyamatra, melynek során az egyes paraméterek módosításának következtében kialakuló változásokat figyeljük. Mindennek ellenére a modell kielégítő kalibrálását idő hiányában már nem tudtam elvégezni.

További általános tapasztalatom, hogy az ún. túlparametrizált rendszer probléma mindkét algoritmus esetén fennáll. Ez azt jelenti, hogy a kalibráció során viszonyítási alapként szolgáló mérési pontok száma

lényegesen kisebb, mint a beállítandó paramétereké. Így könnyen előfordulhat, hogy illeszkedés, „jószág” szempontjából hasonló eredmények akár teljesen eltérő paraméter kombinációkkal is elérhetőek. Ennek a problémának a feloldását jelenti új mérési pontok, mért adatsorok bevonása. Ilyen szempontból – figyelembe véve a számított eredmények széles skáláját – a WateRisk modellben lényegesen több tartalék van még.

Mindemellett még a bemenő adatok (csapadék, hőmérséklet és vízhozamok) bizonytalansága is felmerül, amelyek szintén hozzájárulhatnak az eredmények rosszabb minőségéhez. Például a hőmérséklet minden állomásra ugyanaz, a vízhozam adatsorokban szélsőségesen nagy és kis értékek is vannak. Az adatbizonytalanság mértékére vonatkozóan azonban érdemi információval nem rendelkezem.



## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatom célja vízgyűjtő szintű csapadék összegyűlekezés vizsgálat volt a Zala folyó Zalaapátiig lehatárolt közel 1500 m<sup>2</sup>-es vízgyűjtőterületén. A feladat elvégzéséhez 2 eltérő felépítésű és működésű hidrológiai modellt alkalmaztam. Az első a nemzetközi gyakorlatban elterjedt HEC-HMS modell volt, amely hidrológiai válaszegységeken alapul (HRU) és empirikus, félempirikus összefüggésekkel írja le a folyamatokat. A második modellt a tanszéken fejlesztett WateRisk integrált hidrológiai modell volt, amely osztott paraméteres és fizikai alapú.

A vízgyűjtő modelljének felépítését követően 2 éves (1997-1998) szimulációs vizsgálatokat végeztem a szoftverekkel, majd a kapott eredmények alapján elkezdtem kalibrálni a modelleket. A HEC-HMS-ben az empirikus összefüggésekből származtatott paraméterek és értelmezésük, a WateRiskben pedig a paraméterek nagyobb száma okozott nehézséget a kalibrálás folyamata során.

A HEC-HMS modellben az eddigi legjobb kalibráció alapján az alábbi eredményeket értem el az Zalalövőig lehatárolt vízgyűjtőterületen:

- Alaphozam: Sikerült egy olyan paraméterkészletet összeállítanom, mellyel a program által számított alaphozam változásai jól követik a mért alaphozamot. Ezzel a beállítással a számított idősor összértéke csak 20 %-kal haladja meg a mért idősor kumulált értékét.
- Felszíni lefolyás: A program a szimulációs időszak második felében az esetek többségében már sikeresen szimulálja a nagyobb jelentőséggel bíró csúcsokat, bár néha még számottevő értékbeli túlbecslés figyelhető meg.
- Vízhozam: A szimuláció eredményeként kapott vízhozam adatsor kumulált értéke, csak 8%-kal haladja meg a mért összértéket. A vízhozam csúcsok időbeni pontos leképzése ebben az esetben is a modellezett időszak második felében nagyságrendekkel jobb, mint az első felében.

A szimulációs vizsgálatok közben a program egyes nagymértékű elhanyagolásaira is fény derült. Például a hosszú idejű modellezési feladatok esetén javasolt Havi átlagos párolgás számítási módszer.

Összességében a modellezési feladatok során a programot technikailag könnyen kezelhetőnek találtam.

A WateRisk integrált hidrológiai modellben elért eredményeim.

- Felszíni lefolyás: A program által számított felszíni lefolyás értéke kisebb, mint a mért értékeké. Ez a különbség a modell kalibrálását követően várhatóan csökkenni fog.
- Vízhozam: A szimulációk eredményei alapján felmerül annak is a lehetősége, hogy a modell jelenlegi állapotában még megfelelő paraméterkészlettel sem lenne képes teljes mértékben leírni az árvízi vízhozamokat. Ez az eredmény a modellrendszer egy lehetséges továbbfejlesztési irányára világított rá, amin az érintett fejlesztői csapat el is kezdett dolgozni.

Mindent összevetve, a program a térinformatikai felületnek köszönhetően könnyen kezelhető, csak a felületi szerkesztés funkciók nehézkesebbek néha kicsit, de ez a probléma szintén fejlesztés alatt áll.

A dolgozat leadása után még terveim között szerepel a modellek kalibrálásának befejezése, valamint a validálási feladatok elvégzése.

## 8. KÖSZÖNET

Szeretnék köszönetet mondani konzulenseimnek: Dr. Koncsos Lászlónak és Kozma Zsoltnak a lehetőségért, hogy bekapcsolódhattam a tanszéken folyó munkába, a dolgozatomban való közreműködésért, valamint a segítő, biztató szavakért.

Ezen felül köszönettel tartozom a fejlesztői szoba minden „lakójának” ☺ akik türelmesen meghallgatták az összes kérdésemet, és rengeteget segítettek.

És végül, de nem utolsó sorban hálával tartozom az „olvasószerkesztőmnek”. ☺

## 9. IRODALOMJEGYZÉK

- European Environment Agency. (2000). *Corine Land Cover Data*. Letöltés dátuma: 2012.. szeptember 1., forrás: <http://www.eea.europa.eu/themes/landuse/interactive/clc-download>
- WaterRisk 1.0 Kockázat alapú vízkészletgazdálkodási döntéstámogató rendszer . (2011). *Felhasználói Kézikönyv*.
- Jakab és Társai Környezetvédelmi szolgáltató Kft. (2012). Letöltés dátuma: 2012. október 17, forrás: <http://www.jaketa.hu/software/wms/wms.html>
- AGROTOPO adatbázis. (dátum nélk.). *MTA TAKI*. Letöltés dátuma: 2012. szeptember 1., forrás: <http://www.mta-taki.hu/hu/osztalyok/gis-labor/agrotopo>
- Bódis, K. (2008). Digitális domborzatmodellek és alkalmazási lehetőségeik az árvízi kockázatkezelésben (PhD értekezés) . Szegedi Tudományegyetem.
- Daniel, E. B. (2011). Watershed modeling and its application: a state-of-the-art review. *The Open Hydrology Journal*, 26-50.
- Dévai, G. (2010). Vízgazdálkodási modellrendszer érzékenységvizsgálata a Szamos-Kraszna belvizes területen (TDK dolgozat). BME VKKT.
- Feldman, D. A. (2000. március). *HEC-HMS Technical Reference*. Letöltés dátuma: 2012. augusztus 30, forrás: [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Users\\_Manual\\_3.3.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_3.3.pdf)
- Fürjes , Z. (2011). Integrált hidrológiai modell fejlesztése: beszivárgási modellek vizsgálata a Tiszanagykörűi öblözetén (TDK dolgozat). BME VKKT.
- Hydrologic Engineering Center. (dátum nélk.). *HEC-HMS 3.3 softwer*. Letöltés dátuma: 2012. augusztus 1., forrás: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- Koncsos , L. (. (2012). *Jövőképtől a vízkészletkockázatig*. Budapest: BME VKKT.
- Koncsos , L., Jolánkai , Z., Koncsos, T., & Kozma, Z. (2011. szeptember). *Környezeti rendszerek modellezése (jegyzet)*. Letöltés dátuma: 2011. október 7., forrás: <http://www.vkkt.bme.hu/tantargy/?tid=94>
- Kovács, Á. D. (2011. február). Tó- és területi párolgás becslésének pontosítása és magyarországi alkalmazásai (PhD értekezés) . BME VIT.
- Kozma , Z. (2010). WaterRisk modellrendszer, elméleti áttekintés. SCENES nyári egyetem. Budapest.
- Kozma , Z., & Koncsos, L. (2011). Methodological Overview of a Coupled Water Resources Management Model System. In Topping , & Tsompanakis, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing* (old.: 157). Stirlingshire: Civil-Comp Press.
- Magyarország Földtani Atlasza. (dátum nélk.).
- McEnroe, B. M. (2010). *Guidlines for continous simolution of streamflow in Johnson County, Kansas, with HEC-HMS*. Kansas, USA: Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Kansas.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2009). *Soil and Water Assesment Tool Theoretical Documentiation*. Letöltés dátuma: 2012. október 3, forrás: <http://twri.tamu.edu/reports/2011/tr406.pdf>
- Nyugat-dunántúli Környezetvédelmi és Vízügyi Igazgatóság. (2007. november 12.). *Jelentős vízgazdálkodási kérdések/problémák azonosítása a Zala vízgyűjtő- gazdálkodás tervezési alegységen*. Letöltés dátuma: 2012. augusztus 28., forrás: [http://www.vizeink.hu/files/vizeink.hu\\_0052.pdf](http://www.vizeink.hu/files/vizeink.hu_0052.pdf)
- Panday, S., & Huyakorn, P. S. (2004). A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources*, 361-382.

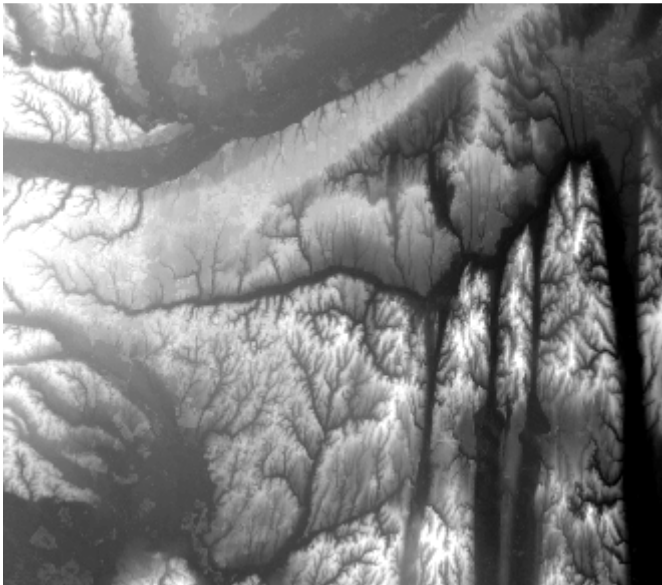
- PTE TTK internetes jegyzet. (2012). *Földtudományi alapismeretek*. Letöltés dátuma: 2012. október 22., forrás: <http://tamop412a.ttk.pte.hu/files/kornyezettan9/www/ch16s03.html>
- Quan, N. H. (2006). Rainfall-runoff modelling in the ungagued Can Le catchment, Saigon river basin. Enschede, The Netherlands.
- Scharffenberg, W. A., & Fleming, M. J. (2008. szeptember). *HEC-HMS User's Manual*. Letöltés dátuma: 2012. augusztus 14, forrás: [http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS\\_Users\\_Manual\\_3.3.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Users_Manual_3.3.pdf)
- Somlyódi, L. (2012). A víz világdilemmája.
- Spanoudaki, K., Stamou, A. I., & Nanou-Giannarou, A. (2009). Development and verification of a 3-D integrated surface water-groundwater model. *journal of Hydrology*, 410-427.
- SRTM Digital Elevation Data. (2008. augusztus 19.). *The CIGAR Consortium*. Letöltés dátuma: 2012. augusztus 22., forrás: SRTM 90m Digital Elevation Data: <http://srtm.csi.cgiar.org/index.asp>
- Vízügyi és Környezetvédelmi Központi Igazgatóság. (2010. április). Letöltés dátuma: 2012. augusztus 28, forrás: [http://www.nyuduvizig.hu/upload/4\\_1\\_Zala\\_vgt.pdf](http://www.nyuduvizig.hu/upload/4_1_Zala_vgt.pdf)

## FÜGGELÉK

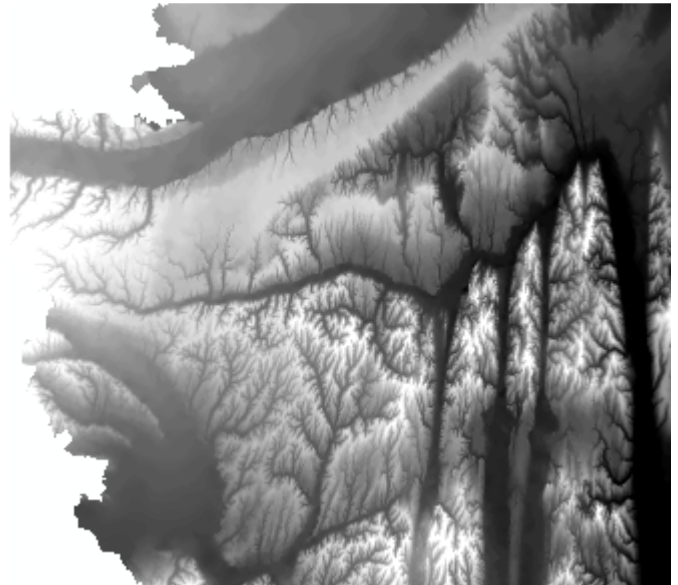
## I. A domborzat kialakítása

A WateRiskben alkalmazott domborzatmodell elkészítésénél számos szempontot figyelembe vettem, hogy a lehető legpontosabban alkalmazzam a szimulációk sikeressége érdekében.

A domborzat elkészítéséhez először a tanszéken megtalálható SRTM 50x50 méteres felbontású, méteres pontosságú raszter fájlt, valamint a FÖMI féle 50x50 méteres felbontású 2 tizedes pontosságú raszter fájlt hasonlítottam össze. Mind a kettőből kivágotam (a WMS-ben már előzőleg lehatárolt vízgyűjtő kiterjedésének megfelelően), melyek az 1. és a 2. ábrán láthatók.

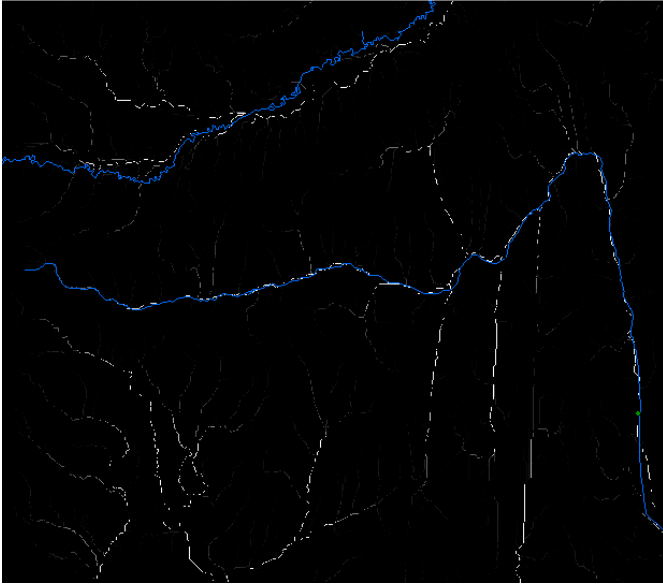


I. ábra SRTM-50 kivágat

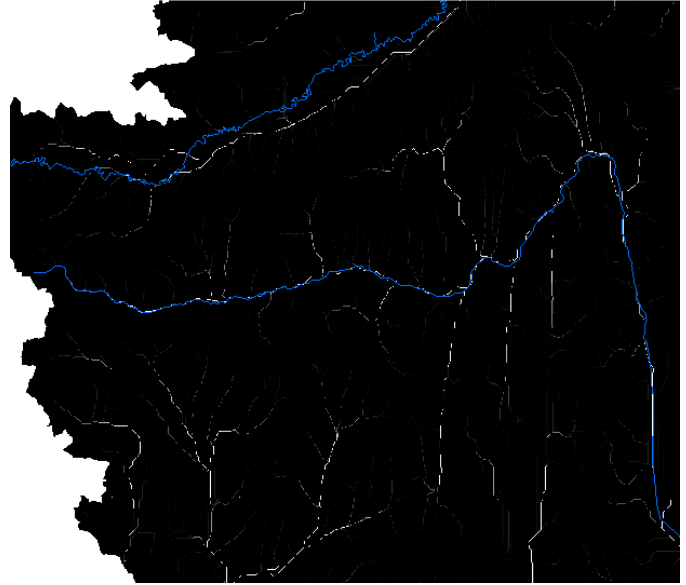


II. ábra DDM-50 kivágat

Ezután az ArcGIS program hidrológiai alkalmazásait felhasználva a domborzatmodellek alapján elkészítettem a csapadék összegyülekezés gridet (számos egyéb mellett), melyek a 3. és 4. ábrán láthatók.

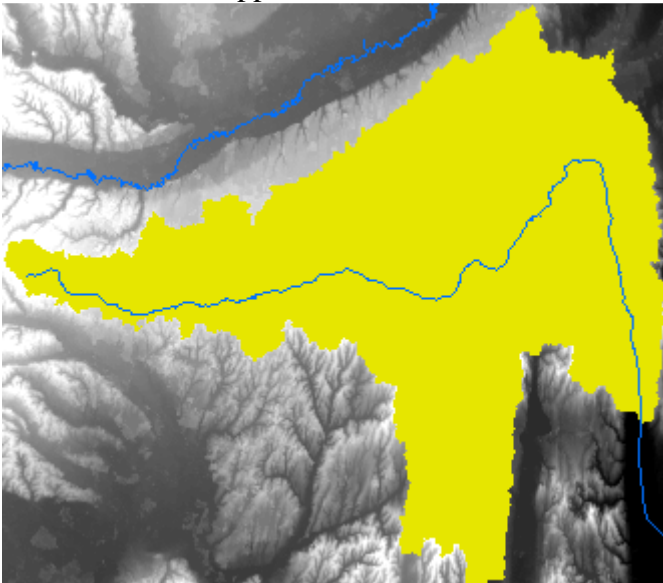


III. ábra Csapadék összegyülekezés grid az SRTM-50 raszter re

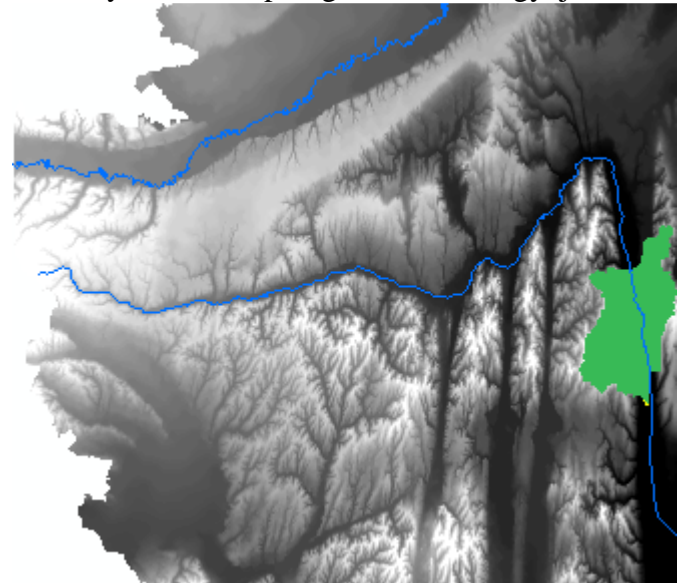


IV. ábra Csapadék összegyülekezés grid a DDM-50 raszterre

Az ábrákon kék színnel megjelenítettem a Zala és a Rába folyókat is. A képeken a fehér szín azokat a szomszéd cellákhoz képest alacsonyabban fekvő cellákat mutatja, melyeken a csapadék összegyülekezik és tovább folyik. Jól látható, hogy a két modellen eltérő a csapadék összegyülekezésének útvonala, és sok esetben a domborzat hibái miatt meg is szakad az. Összehasonlításképpen, elkészítettem a területeken a Zala folyóra a Zalaapátiig lehatárolt vízgyűjtőt.



V. ábra Zalaapátiig lehatárolt vízgyűjtő az SRTM 50 raszterfájlon



VI. ábra Zalaapátiig lehatárolt vízgyűjtő a DDM 50 raszterfájlon

Az 5. ábrán található vízgyűjtőterület alakja igen jó közelítése a már WMS-ben lehatárolt vízgyűjtőnek. A 6. ábrán azonban látható, hogy a DDM-50-ben nem sikerült megfelelő vízgyűjtő területet lehatárolnom még akkor sem, amikor megváltoztattam a kifolyási pont helyzetét, mivel a domborzat nem tette ezt lehetővé. Ezért a továbbiakban, csak az SRTM adatállománnyal dolgoztam.

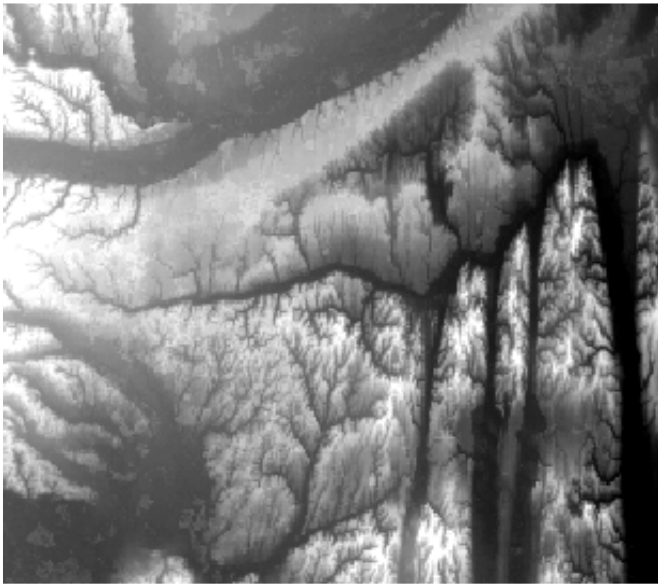
Mivel a vizsgált mintaterületem meglehetősen nagy (közel 1500 km<sup>2</sup>), ezért a WateRiskben felhasznált adatok cellaméretét 250 m X 250 m-ben határoztuk meg. Így megközelítőleg 24000 aktív cellával kell számolni a programnak a szimulációk közben, még ha 50 m X 50 m-es cellaméretet

alkalmaznánk, ez a szám 600000 lenne, mely jelentősen megnövelné a szimuláció futási idejét. A domborzat modell cellaméretének módosításához az alábbi 5 módszert alkalmaztam:

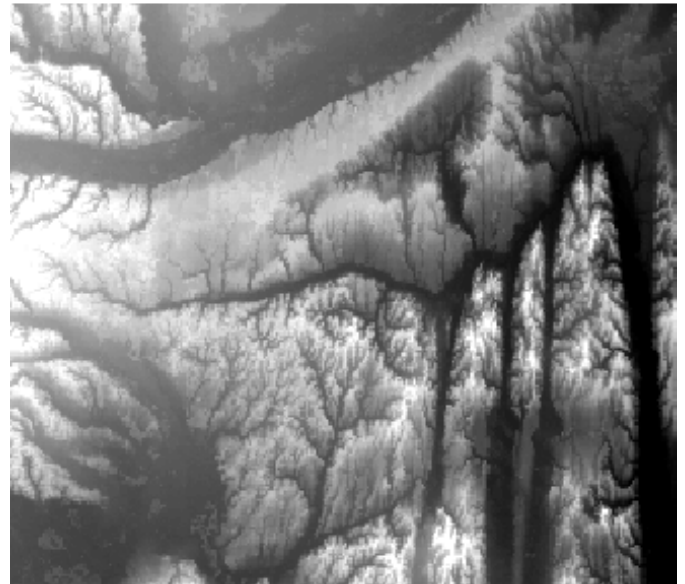
1. Adott domborzat cellaméretét csak az adat kiexportálásakor módosítottam, és mentettem (továbbiakban: Exportálás)
2. Majority
3. Nearest
4. Cubic
5. Bilinear

Az eredményül kapott gridek a 7-11. ábrán láthatók.

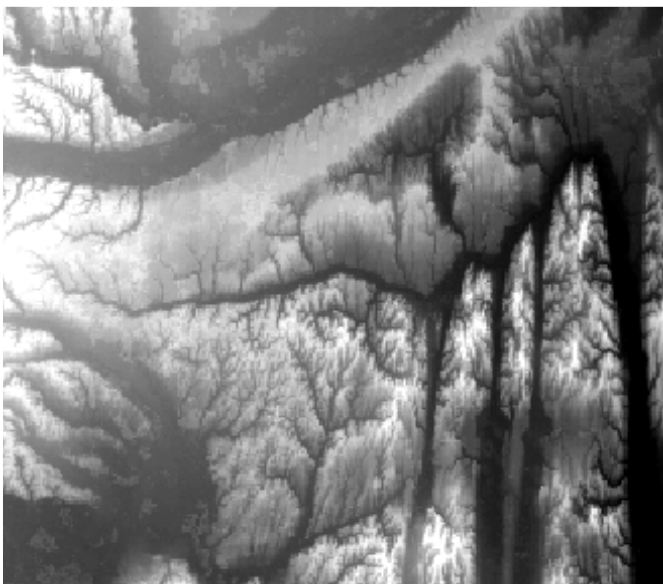




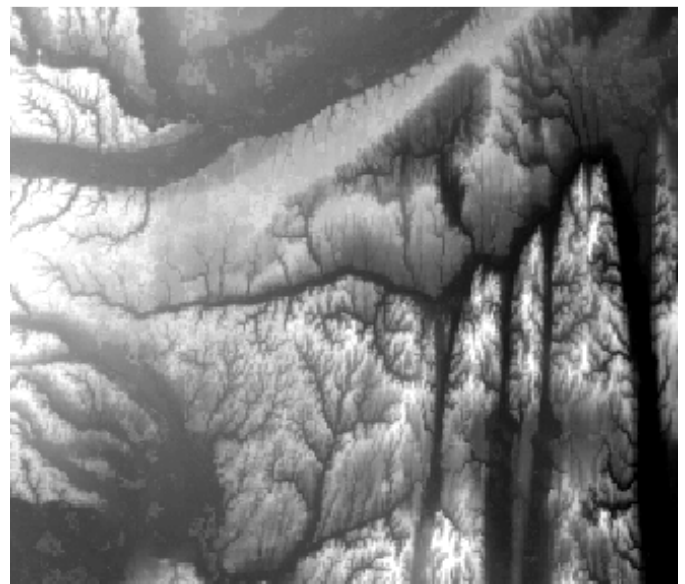
**VII. ábra** Az exportálás eredménye



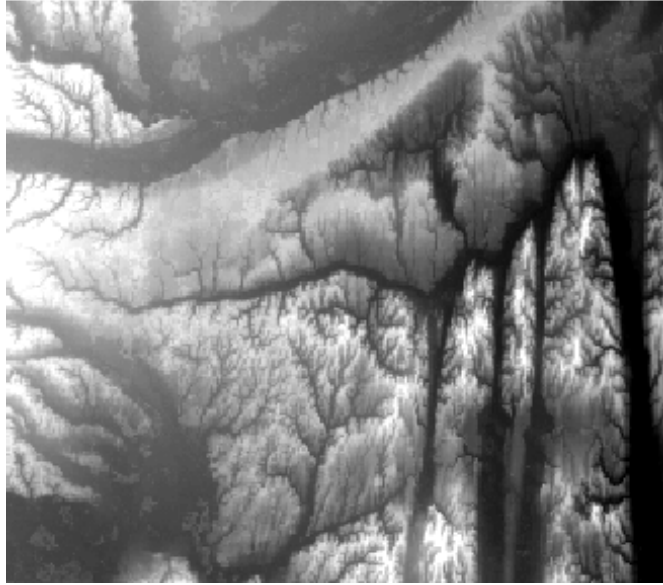
**VIII. ábra** A Majority eredmény



**IX. ábra** A Cubic módszer eredménye



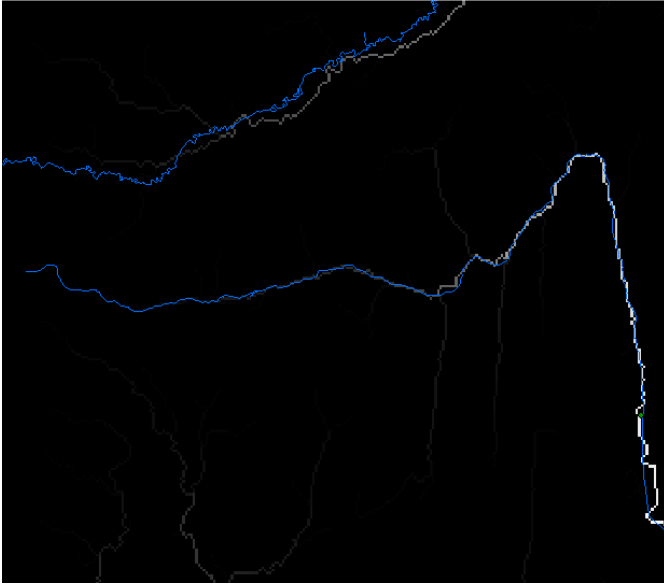
**X. ábra** A Bilinear módszer eredménye



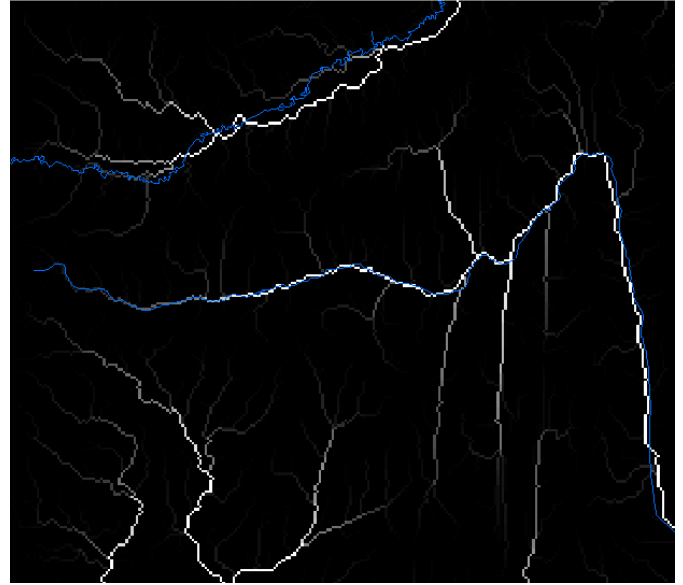
**XI. ábra A Nearest módszer eredménye**

Az eredményül kapott 5 db domborzat gridből 3 (Nearest, Bilinear, Cubic módszerrel létrehozott) magasság tartománya (101m -371m) teljes mértékben megegyezett, ezért a Raster Calculatorral ellenőriztem azt a feltevésemet, hogy ezek a domborzatok teljes egészében megegyeznek. Ez igaznak bizonyult, így a továbbiakban a Nearest funkcióval előállított domborzatot vizsgáltam csak.

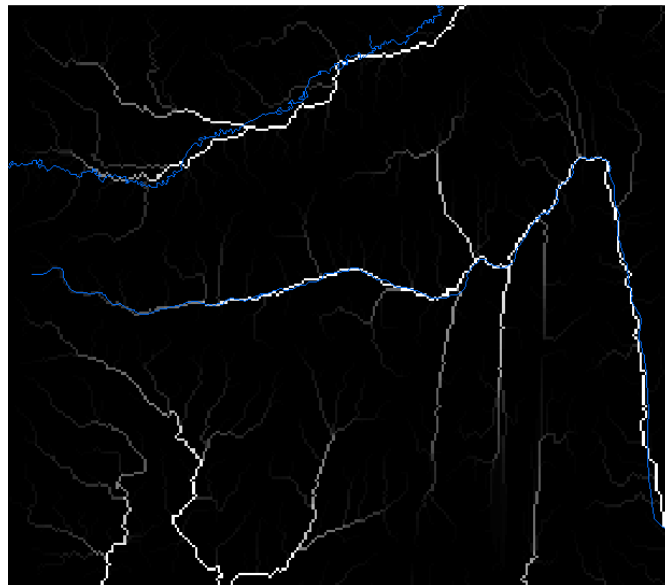
A következő ábrákon a csapadék összegyülekezési gridek és a Zala, valamint a Rába folyók láthatók. Az SRTM 50-hez és DDM 50-hez hasonlóan, itt is jól megfigyelhető, hogy az egyes domborzatok közötti különbségek eredményeként az összegyülekezési cellák más és más helyen helyezkednek el mindhárom esetben.



**XII. ábra** Az exportált módszerrel készített gridből készült csapadék összegyűlekezés útja

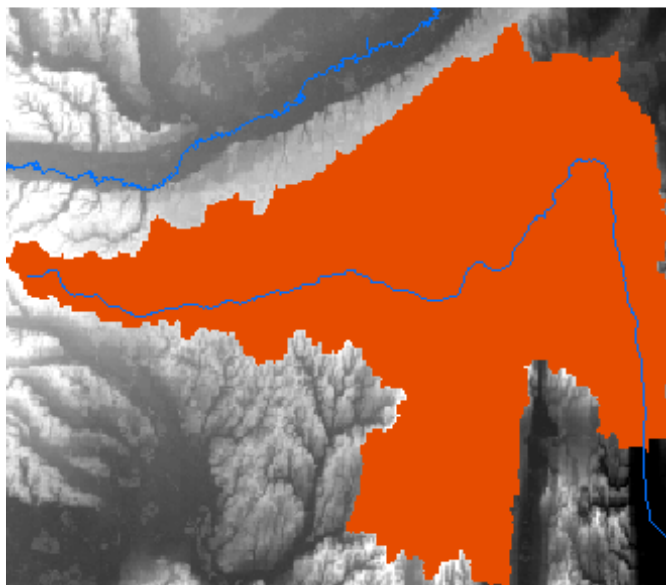


**XIII. ábra** A Majority módszerrel készült grid csapadék összegyűlekezése

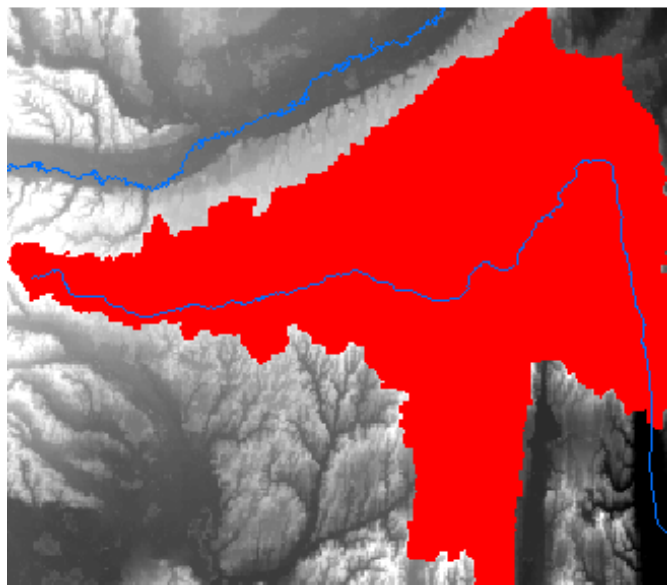


**XIV. ábra** A Nearest módszerrel lehatárolt gridből készített csapadék összegyűlekezési grid

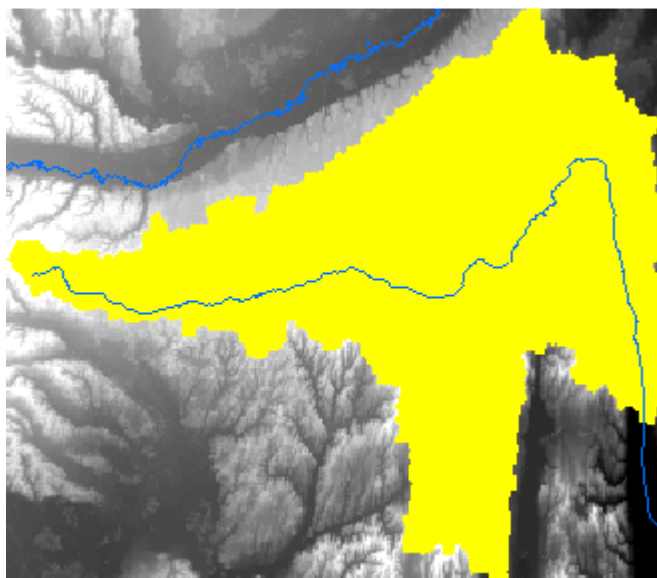
A 3 domborzatra lehatároltam a vízgyűjtőterületeket is, hogy a méretüket össze tudjam hasonlítani a WMS-ben lehatárolt vízgyűjtő méretével. A 15. – 17. ábrákon ezeket ábrázoltam.



**XV. ábra** A kiexportált griden lehatárolt vízgyűjtőterület Zalaapátiig



**XVI. ábra** A Majority módszerrel előállított griden lehatárolt vízgyűjtőterület

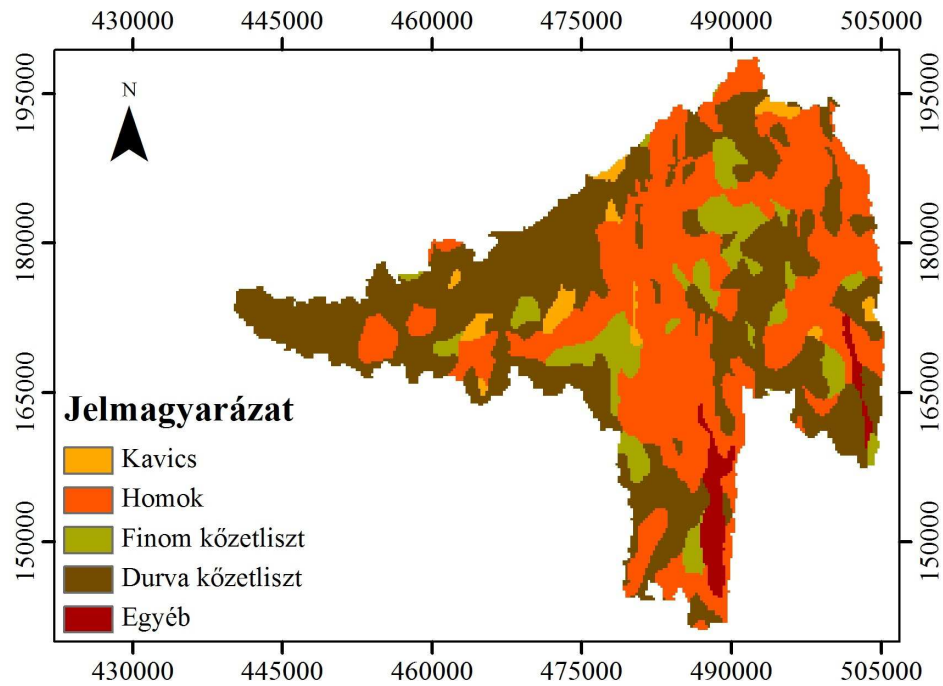
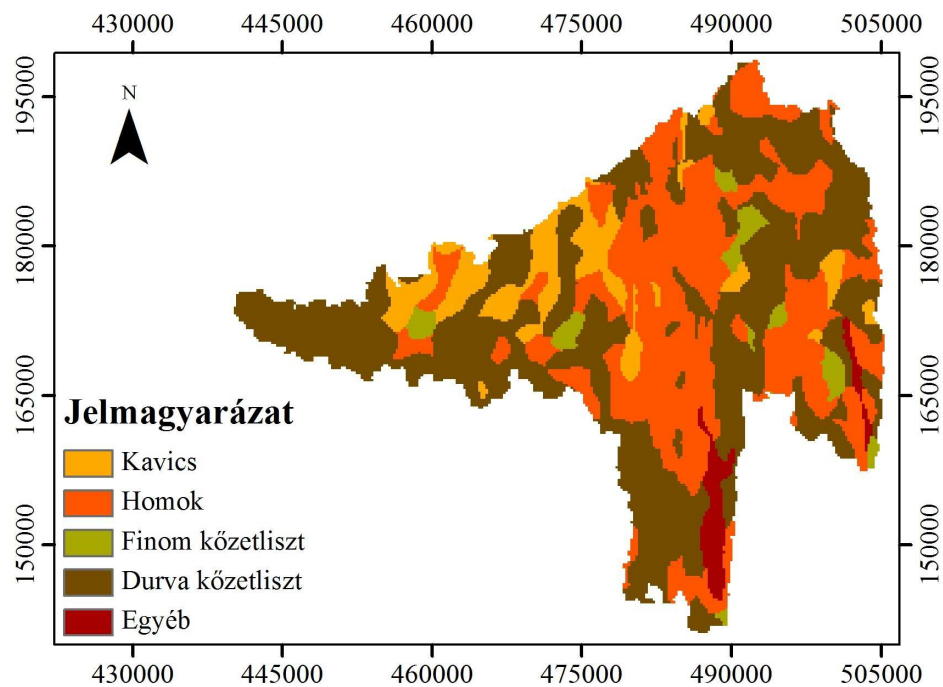


**XVII. ábra** A Nearest módszerrel előállított griden kialakított vízgyűjtőterület Zalaapátiig

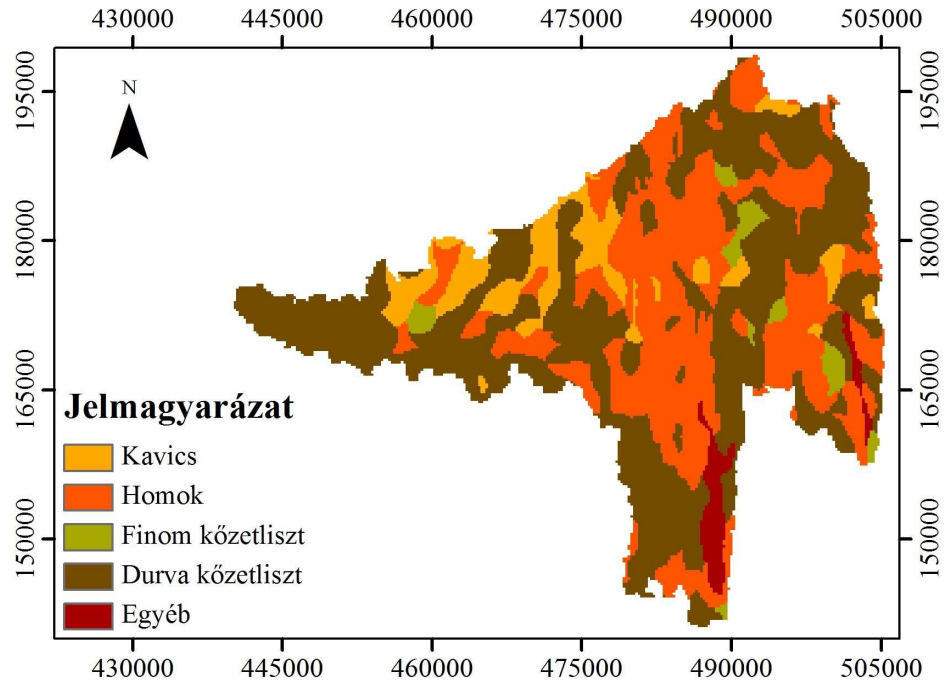
A kapott eredményeket a domborzatok magasságtartományának, a lefolyástalan cellák számának, és a lehatárolt vízgyűjtőterület nagyságának függvényében összehasonlítottam. A számszerűsített értékeket az 9. táblázat tartalmazza.

	<i>SRTM-50</i>	<i>DDM-5</i>	<i>SRTM-50</i> <i>Nearest</i>	<i>SRTM-50</i> <i>Majority</i>	<i>SRTM-50</i> <i>Kiexportált</i>
Magasság tartomány (m)	101-374	102-361	101-380	102-368	101-370
Sink-ek	526	2132	829	717	890
		0.2025/97.152			
Vízgyűjtőterület nagysága (km <sup>2</sup> )	1479	5	1483.936	1490.125	1566.9375

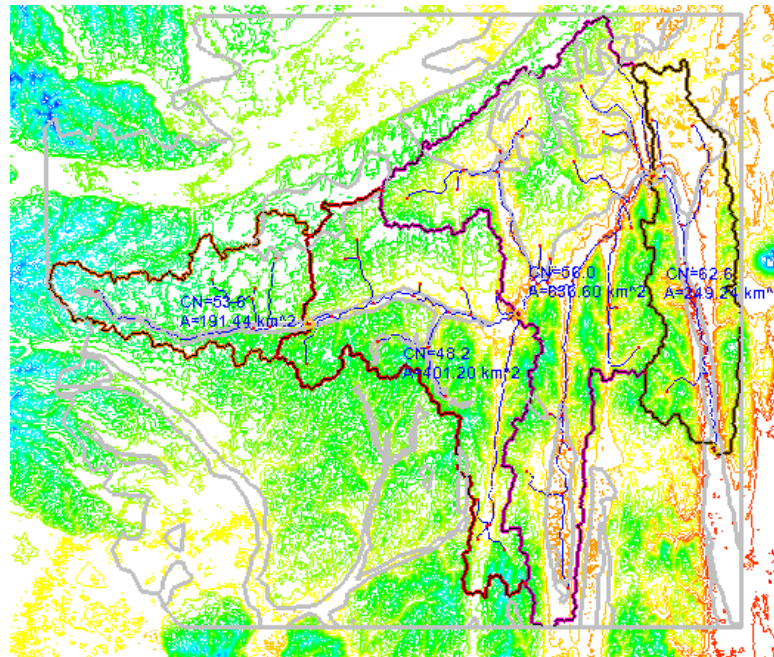
Az összehasonlítás eredményeként a Nearest módszerrel előállított domborzatot alkalmaztam a WateRiskben történő szimulációk alkalmával.

**II. Talajgridek, és térképek****XVIII. ábra** A MÁFI adatbázis alapján készített talajgrid a talaj 2,5-5,0 és 3,3-6,6 m-es mélységében.**XIX. ábra** A MÁFI adatbázis alapján készített talajgrid a talaj 5,0-7,5 és 6,6-9,0 m-es mélységében.





XX. ábra A MÁFI adatbázis alapján készített talajgrid a talaj 7,5-10,0 és 9,9- 10,0 m-es mélységben.



XXI. ábra A WMS szoftverben felépített mintaterület és az AGROTOPO fedvény (szürke)

**III. A mintaterületen található területhasználat típusok és nagyságuk**

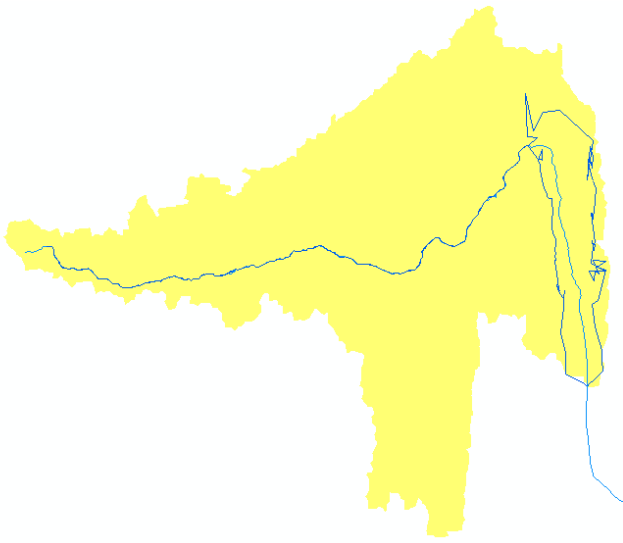
Ábrázolás	CORINE kód	Megnevezés	Terület (km <sup>2</sup> )
Belterület	1111	Városközpontok	0.27
Belterület	1112	Történelmi belvárosi területek	0.21
Belterület	1121	Nem összefüggő település szerkezet, kertek nélküli többemeletes lakóházakkal beépítve	2.36
Belterület	1122	Nem összefüggő, családi házas és kertes beépítés	52.17
Belterület	1123	Erdei környezetben lévő, nem-összefüggő beépítés	0.05
Belterület	12111	Ipari és kereskedelmi létesítmények	4.61
Belterület	12112	Agrár létesítmények	7.31
Belterület	12113	Oktatási és egészségügyi létesítmények	0.35
Belterület	1212	Speciális műszaki létesítmények	0.48
Belterület	1222	Vasúthálózat és csatlakozó területek	1.43
Belterület	1242	Füves kifutópályájú repülőterek	0.82
Belterület	1311	Külszíni bányák	0.80
Belterület	1321	Szilárd-hulladék lerakó helyek	0.04
Belterület	1331	Építési munkahelyek	1.25
Belterület	1411	Parkok	0.93
Belterület	1412	Temetők	0.14
Belterület	1421	Sport létesítmények	0.13
Belterület	1422	Szabadidő területek	0.31
Belterület	1423	Üdülő települések	0.41
Szántó	2111	Nagytáblás szántóföldek	379.10
Szántó	2112	Kistáblás szántóföldek	218.80
Gyümölcsös	22111	Nagytáblás szőlők	2.69



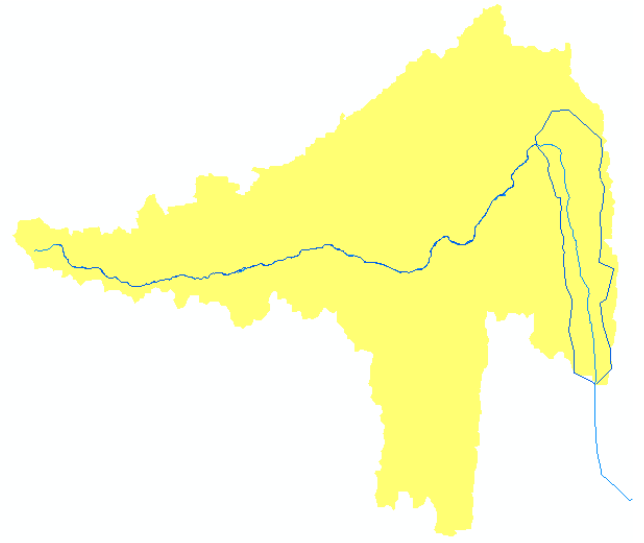
Gyümölcsös	22112	Kistáblás szőlők	24.10
Gyümölcsös	2221	Gyümölcsfa ültetvények	10.13
Gyümölcsös	2222	Bogyós ültetvények	0.17
Rét, legelő	2311	Intenzív legelők és erősen degradált gyepek bokrok és fák nélkül	52.84
Rét, legelő	2312	Intenzív legelők és erősen degradált gyepek fákkal és bokrokkal	27.36
Rét, legelő	3211	Természetes gyepek fák és cserjék nélkül	18.47
Vegyes mezgazd.-i terület	2421	Komplex művelési szerkezet épületek nélkül	16.47
Vegyes mezgazd.-i terület	24221	Komplex művelési szerkezet szórt elhelyezkedésű épületekkel	55.73
Vegyes mezgazd.-i terület	24222	Tanyák	1.28
Vegyes mezgazd.-i terület	2431	Mezgazd.-i területek túlsúlyban szántókkal és jelentős természetes vegetációval	8.30
Vegyes mezgazd.-i terület	2432	Mezgazd.-i területek túlsúlyban intenzív legelőkkel és jelentős természetes vegetációval	8.96
Vegyes mezgazd.-i terület	2433	Mezgazd.-i területek túlsúlyban szórt megjelenésű természetes vegetációval	3.44
Vegyes mezgazd.-i terület	2435	Mezgazd.-i területek állandó kultúrák jelentős előfordulásával, és szórt megjelenésű természetes vegetációval	8.45
Erdő	2226	Fűzfa ültetvények	0.50
Erdő	3111	Zárt lombkoronájú természetes lombhullató erdők nem vizenyős területen	261.98
Erdő	3112	Zárt lombkoronájú természetes lombhullató erdők, vizenyős területen	14.46
Erdő	3113	Nyílt lombkoronájú természetes lombhullató erdők nem vizenyős területen	2.20
Erdő	3114	Nyílt lombkoronájú természetes lombhullató erdők, vizenyős területen	6.63
Erdő	3115	Lombos erdő ültetvények	73.34
Erdő	3121	Zárt lombkoronájú természetes fenyőerdők	19.23
Erdő	3125	Tülevelű ültetvények	62.92
Erdő	3131	Szálanként elegyes természetes (lombos és fenyő) erdők zárt lombkoronával	13.20
Erdő	3135	Csoportosan elegyes természetes (lombos és fenyő) erdők zárt lombkoronával	17.05

Erdő	3139	Elegyes ültetvények	16.07
Erdő	3212	Természetes gyep fákkal és cserjékkel	17.75
Erdő	3241	Fiatalos erdők és vágásterületek	26.95
Erdő	3243	Spontán cserjésedő-erdősödő területek	15.17
Erdő	3244	Csemetekertek, erdei faiskolák	0.05
Vizenyős terület	4111	Édesvízű mocsarak	7.04
Vizenyős terület	4121	Tőzeglápok kitermelés alatt	1.41
Vizenyős terület	4122	Természetes tőzeglápok bokrok és fák szórványos előfordulásával	3.96
Álló- és folyóvizek	5111	Folyóvizek	0.58
Álló- és folyóvizek	5112	Csatornák	0.85
Álló- és folyóvizek	51211	Állandó vizű természetes tavak	0.00
Álló- és folyóvizek	51212	Természetes, időszakos, szikés tavak	0.01
Álló- és folyóvizek	51221	Mesterséges tavak, víztározók	6.98
Álló- és folyóvizek	51222	Halastavak	0.32

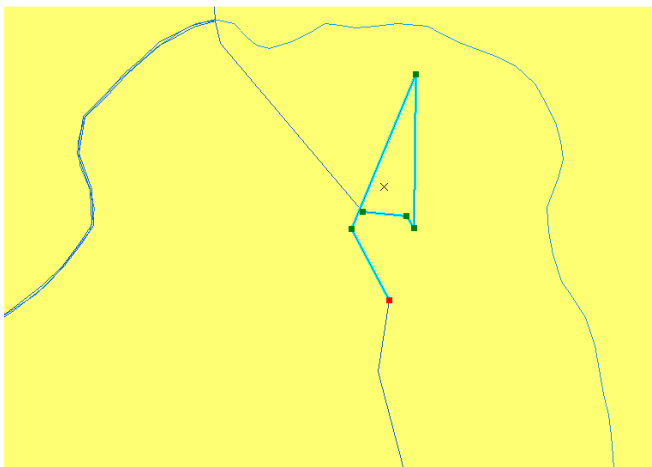
#### IV. Az automatikusan generált partvonalak javítása ArcGIS-ben



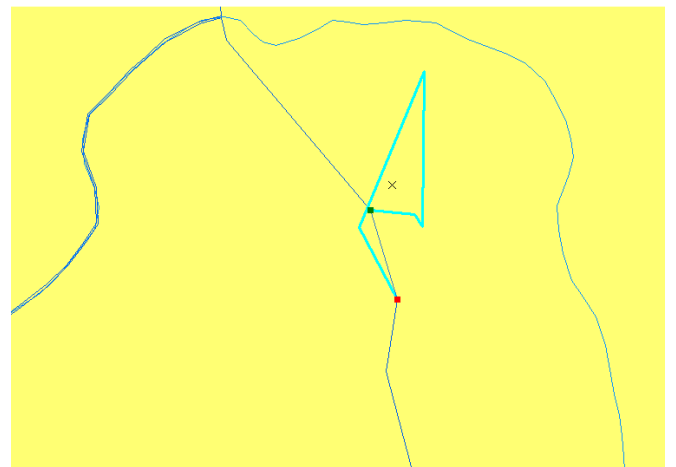
XXII. ábra A kiindulási állapot



XXIII. ábra A javított partvonal



XXIV. ábra A javítandó partszakasz



XXV. ábra A partszakasz javítás közben



XXVI. ábra A már javított partszakasz