

Szegedi Tudományegyetem
Földtudományok Doktori Iskola

**A SZEGEDI TERMIKUS KÖRNYEZET VÁROSI LÉPTÉKŰ
ELŐREJELZÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI A WRF MODELL
FELHASZNÁLÁSÁVAL**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Molnár Gergely

Témavezető:

Dr. Gál Tamás

tanszékvezető-helyettes egyetemi docens

SZTE Természettudományi és Informatikai Kar
Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék

**Szeged
2021**

1. Bevezetés

Az éghajlatváltozás, mint napjaink egyik legnagyobb környezeti kihívása, a településeken hatványozottan van jelen. A speciális városi (lokális) és a regionális (háttér)klíma szinergiája a sűrűn beépített területeken a hőterhelés, a légszennyezettség és az energiafelhasználás növekedéséhez, valamint a biodiverzitás és az ivóvízminőség csökkenéséhez járul hozzá. A 21. század elejétől a városi életforma vált dominánssá a Földön, és a különböző becslések egyetértenek abban, hogy a települések népességszáma az előttünk álló évtizedekben további növekedést fog mutatni. Mindez tehát azt jelenti, hogy a városokat érintő környezeti problémákkal egyre nagyobb populációnak kell megbirkóznia, azokhoz alkalmazkodnia.

A helyzet kritikusságát felismerve, az ENSZ 2015-ben 17 globális fenntarthatósági-fejlesztési célt fogalmazott meg, melyek közé a „Fenntartható városok és közösségek” tematikát is besorolta. A részcélok között – a teljesség igénye nélkül – a légszennyezettség visszaszorítása és a zöld-kék infrastruktúra fejlesztése található meg. A célkitűzések minél sikeresebb elérése már csak azért is kulcsfontosságú, mivel mint ahogy arra például a több mint 30 ezer halálos áldozattal járó 2003-as európai hőhullám is rámutatott, a települések sérülékenysége igen jelentős az egyre növekvő számú extrém időjárási eseményekkel szemben.

A városok klimatológiai és ökológiai viszonyainak előrejelzése és a problémákra történő válaszadás tehát egyre sürgetőbb megoldásokat kíván a döntéshozóktól. A válaszok megfogalmazását általában jól megalapozott tudományos vizsgálatok előzik meg. A települések éghajlatának elemzése sűrű mérőhálózatokkal, távérzékeléses technikával vagy numerikus meteorológiai modellekkel egyaránt történhet. A modellezés előnye a többi módszerhez képest, hogy térben és időben folytonos analíziseket tesz lehetővé, alkalmas hipotézisek vizsgálatára, továbbá nemcsak a pillanatnyi helyzetet méri fel, hanem a környezet jövőbeli állapotára is képes becslést adni. Az informatika folyamatos fejlődésének köszönhetően a meteorológiai modellek egyre több kutatás eszközét képezik.

E modellek egyik legelterjedtebb képviselője a Weather Research and Forecasting (WRF), mely nagy fejlesztési tapasztalaton alapul, szabad forráskódú, igen jól dokumentált és rugalmasan alkalmazható a legtöbb probléma elemzéséhez. A WRF sokszínűségét jelzi, hogy esettanulmányokon kívül a légkör jövőbeli állapotának szimulációja is az eszköztárhoz

tartozik. A modell a bőséges parametrizációs opcióin keresztül a városi felszín és a légkör közötti kölcsönhatások vizsgálatát is biztosítja.

Szeged a városklíma-modellezés szempontjából ideális vizsgálati helyszín, mivel kiterjedése, beépítettsége és antropogén aktivitása elegendő a meteorológiai változók módosításához. A város földrajzi elhelyezkedése és homogén domborzata kedvez a környezeti paraméterek város-vidék különbségeinek kiteljesedéséhez. E kontraszt pontos detektálását a Tanszékünk közreműködésével 2014-ben létesített városklíma mérőhálózat támogatja, mely a léghőmérséklet és a relatív nedvesség idősorainak analízise mellett a modellkimenetek verifikációját is szavatolja. A helyi kutatásokhoz egy háromdimenziós épületadatbázis is rendelkezésre áll, mellyel a felszín-morfológia és a hőmérséklet/nedvesség kapcsolatáról nyerhető bővebb információ.

A dél-alföldi település éghajlatának numerikus modellezésen alapuló, lokális léptékű vizsgálatára eddig nem került nagyobb hangsúly, így doktori disszertációmban arra törekedtem, hogy egy olyan, a WRF-en nyugvó modellrendszert alakítsak ki, amely Szeged lokális időjárás-módosításának eseti jellegű és prognosztikus (néhány napos előrejelzés formájában) szimulációjára is alkalmas. Munkám során a következő célokat tűztem ki magam elé:

- I. a WRF statikus adatbázisának felülvizsgálata, szükség esetén az adatok módosítása a helyi viszonyoknak megfelelően;
- II. a modellbeállítások rögzített és változó elemeinek meghatározása;
- III. a modellbeállítások változtatása és az érzékenység vizsgálata pár napos szimulációs időszakon keresztül;
- IV. a modell legjobb beállításának a tesztelése egy hosszabb szimulációs időszakon keresztül;
- V. a körvonalazódó előrejelzési modellrendszer későbbi fejlesztési irányainak kijelölése és más városi területekre való adaptációjának lehetősége.

2. A kutatás módszertana és az alkalmazott adatbázisok

A doktori kutatásomat a modellezési alapadatbázisok elkészítése, valamint a szimulációk verifikációja határozta meg. Az első, több lépésből álló szakaszt az a felismerés alapozta meg, hogy a WRF alapértelmezett statikus adatbázisaiban Szeged felszínének és a környező területek talajbo-

rítottságának nagyfokú változékonysága pontatlanul, jelentősen leegyszerűsítve jelent meg. Ez a probléma a talajtextúra mellett a városi felszínborítottság, a tetőszint-réteg geometriai és termodinamikai paramétereinek adatait is érintette. A megfelelő minőségű modelleredmények előállításához tehát a statikus és dinamikus adatbázisok frissítésére volt szükség.

Az új talajosztályokat a már meglévő, hazai fejlesztésű DKSIS-állomány felhasználásával ültettem át a modellbe. Az alapértelmezett városi felszínosztályok területi heterogenitásának növelését két módszerrel is megvalósítottam. Az egyik eljárás során Landsat-8 műholdképeken tanulóterületeket jelöltem ki, és ezek segítségével ún. maximum likelihood felszínklasszifikációt végeztem. A folyamat végén egy három városi felszínkategóriát elkülönítő adatbázis keletkezett. Ezt a kollégáim által korábban elkészített, összesen tíz osztályt definiáló LCZ-adatállománnyal egészítettem ki. Mivel a WRF eredetileg nem képes tíz urbánus kategóriát kezelésére, így ehhez a modell egyes fizikai parametrizációs moduljainak Fortran programozási nyelven írt kódjait is módosítanom kellett.

A geometriai felszínparaméterek szegedi specifikációja egy 2003-ban összeállított háromdimenziós épületállomány alapján, a vektoros állományon a QGIS szoftverrel végzett műveletekkel történt. A helyi épületek és utak releváns termodinamikai változóinak becslését pedig az adott LCZ épületeit reprezentáló tanulóterületek körülhatárolása előzte meg. Utóbbi eljárás a tanulóterületeken lévő mesterséges burkolatok építőanyagainak ismeretét igényelte, amit Google Earth műholdfelvételek és terepbejáráson készített fotók feldolgozásával közelítettem. Az előbb említett módszerek eredményeként hozzávetőleg 90 alapértelmezett geometriai és termodinamikai városi felszínparamétert írtam felül.

A módosított változók számát az antropogén hőfluxussal bővítettem. Ezen dinamikus adatbázist egy globális antropogén hő modell és egy regressziós módszer adaptációjával, valamint az LCZ-konceptió alapértelmezett értékeinek figyelembevételével állítottam össze. Az adaptáció jelentősen támaszkodott a népsűrűség szegedi eloszlására, amit a 2018-as parlamenti választások választókerületekre vonatkozó adataiból származtattam. A módszerek a közlekedés és a lakossági energiafogyasztás dinamikájának ismeretét is igényelték. Ehhez a hazai közművek által publikált adatforrásokat hívtam segítségül. Az így kapott bemenő adatokat feldolgozása és a szükséges számítások elvégzése egy erre a célra összeállított Fortran-programmal valósult meg.

A dinamikus adatbázis részét képezi a szegedi városklíma-mérőhálózat és az OMSZ magaslégtérbeli megfigyeléseit tartalmazó adattáblák, melyeket egy adatasszimilációs folyamathoz használtam fel. Ehhez először a szöveges állományban lévő mért változókat egy saját bash szkript segítségével ún. LittleR formátummá alakítottam. Majd a háromdimenziós variációs eljárás megkezdése előtt, a rendelkezésre álló adatok ismeretében egy részletes, a mintaterület sajátosságaira optimalizált asszimilációs stratégiát dolgoztam ki.

A szimulációk elindítását a későbbiekben változatlanul tekintett modellbeállításokat (pl. vízszintes ráctávolság, modelltartományok száma és pozíciója) és parametrizációs csomagokat (pl. sugárzási, határréteg, mikrofizika) kijelölése előzte meg. Ezt részben a szakirodalom alapján, részben nemzetközi kutatókkal való konzultáció után tettem meg.

A nem rögzített modellbeállítások változtatásával négy érzékenységi vizsgálatcsoportot különítettem el, melyek további modellkísérletekből tevődtek össze. Ezen szimulációkat két időszakra is elvégeztem. A modellezési periódusokat, melyek a városi felszín termikus-módosítás szempontjából kitüntetett napokat takartak, a korábban már számos publikációban alkalmazott „Időjárési Tényező” kiszámításával definiáltam. A modellrendszer továbbá nemcsak „ideális napokra”, hanem egy változatos szinoptikus helyzetű időszakra is teszteltem. Ezt a kéthetes periódust az OMSZ Napijelentés-kiadványában fellelhető szöveges és grafikus adatok elemzése után választottam ki.

Az előrejelzésre összeállított modellrendszer optimalizálása a modellezett hőmérséklet részletes verifikációjával történt. A vizsgálatba bevont verifikációs mérőszámok a szakirodalomban legszélesebb körben alkalmazott statisztikai elemeket tükrözik.

Az alapértelmezett statikus adatbázisok módosításánál a QGIS, ERDAS IMAGINE, ArcGIS és SAGA GIS szoftverekre támaszkodtam. Az adatok feldolgozása Fortran és Python programozási nyelveken történt. A modellkimenetek vizualizációjában GrAds, NCL és Python szkriptek, valamint a Gnuplot és a CorelDRAW grafikai eszköztára nyújtott segítséget.

3. Az eredmények tézisszerű összefoglalása

I. Felismertem, hogy a WRF alapértelmezett statikus adatbázisának fejlesztése szükségszerű a szimulációk megkezdése előtt (Molnár et al., 2017; Molnár et al., 2019b).

1. A WRF WPS_GEOG könyvtárban lévő talajtextúra és felszínborítottság bináris fájljainak exportálása és megjelenítése után arra a következtetésre jutottam, hogy Szegeden és a település szűkebb környezetében a talajosztályok és a városi felszínkategóriák területi eloszlása nem felel meg a valós viszonyoknak. Mivel a statikus adatok helyes reprezentációja lényeges egy urbánus terület termikus környezetének kellő pontosságú modellezéséhez, így statikus adatbázis ezen elemeinek módosítását fontosnak tartottam a célkitűzések eléréséhez.
2. A szakirodalmi tapasztalatokat követve szükségszerűnek láttam a talajtextúra és a mesterséges felszínborítottság kategóriákhoz kapcsolódó statikus paraméterek felülvizsgálatát is. Ezt főként azért tartottam indokoltnak, mivel ezen alapértelmezett paramétereket nemzetközi talajmintákon és városi felszíneken végzett analízisek után határozták meg, ezért a szegedi viszonyokat kevésbé tükrözték.

II. A vizsgálati terület egyedi jellege miatt módosítottam a WRF statikus adatbázisainak egyes elemeit (Molnár et al., 2017; Molnár et al., 2019a; Molnár et al., 2019b).

1. Tanulóterületek kijelölésével ún. felügyelt felszínosztályozást végeztem Landsat-8 műholdképeken. Ennek eredményeként az egy alapértelmezett helyett immáron három különböző városi felszínborítottsági kategória állt rendelkezésre a vizsgálati terület mesterséges felszíneinek jellemzésére. A CORINE-adatbázisban a mesterséges felszínosztályok pixeleit ezen új kategorizálással helyettesítettem. Ezzel egy olyan adatbázist készítettem el, ami már alkalmas volt az alapértelmezett városi felszínborítottsági adatok kiváltására.
2. A Tanszék munkatársai által létrehozott LCZ-térképeket a modellbe implementáltam, amivel egy még kedvezőbb, a mintaterületen öt városi osztályt megkülönböztető felszínborítottsági adatbázis vált elérhetővé. Az implementáció során a WRF

egyres fizikai csomagjainak kódreszleteit is átírtam, melynek köszönhetően a modellt kompatibilissé tettem az LCZ-osztályozás befogadására.

3. Egy 2003-as háromdimenziós épületadatbázis és távérzékelt adatok felhasználásával a módosított CORINE- és az LCZ-alapú felszínhasználati adatbázisok városi kategóriáihoz geometriai paraméterekeket határoztam meg. A geoinformatikai eszközökkel történő elemzés után előbbi (utóbbi) adatbázishoz összesen 18 (12) új értékeket rendeltem hozzá.
4. Az LCZ-osztályokhoz nemcsak geometriai, hanem termodinamikai jellegű paraméterekeket is definiáltam. A műholdas adatokon és terepi bejárásokon készített fotókra támaszkodó eljárás során a falak, tetők, utak hőkapacitására, hővezető-képességére és emisszivitására adtam becslést. Ezzel a módszerrel összesen 54 új értékeket származtattam.

III. Három különböző módszerrel megbecsültem Szeged antropogén hőkibocsátásának tér- és időbeli alakulását (Molnár et al., 2020).

1. A szakirodalom alapján felismertem, hogy az antropogén hő elhanyagolásával a modell fizikai konzisztenciája sérülne. Az antropogén hőfluxus szegedi eloszlását az LCZ-konceptióval, a LUCY modell egyenleteivel és egy regressziós eljárással is közelítettem. Az módszerek a közlekedés helyi dinamikájának és a lakossági energiafogyasztás ismeretén alapultak. Ezeket az információkat energiaszolgáltatók országos és forgalomszámlálások pontszerű adataival becsültem meg.
2. A kapcsolódó számítások Szeged lakosságának területi eloszlására nagymértékben alapoztak. Megfelelő minőségű, szabadon elérhető populációs adatok hiányában a lakosság térbeliségét politikai választási adatok révén határoztam meg. A kapott területi mintázat jól reagált Szeged lakótelepi övezetének nagy népességére és a lakosság külváros irányába való csökkenésére.
3. Megállapítottam, hogy a lakosság és a kiszámított antropogén hő területi eloszlása között Szegeden erős kapcsolat adódik. A különböző becslésekkel egyaránt azt találtam, hogy a téli napok antropogén hőkibocsátása nagyobb a nyári napokéhoz képest. A hőfluxus napi menetét illetően kimutattam, hogy a közleke-

dés és az energiafelhasználási szokások miatt egy kora reggeli és egy késő délutáni maximum, azaz bimodális eloszlás rajzolódik ki.

IV. Kidolgoztam egy eljárást a szegedi városklíma mérőhálózat felszíni és az OMSZ rádiószondás méréseinek WRF-es adatszimulációjára (Molnár et al., 2018).

1. A 3DVAR adatasszimilációs eljárás részeként felismertem, hogy a mérőállomások lefedettsége miatt egy hibrid, a GFS modellkimenetekből és az asszimilált megfigyelésekből álló módszert szükséges alkalmaznom. Összeállítottam egy bash szkriptet, ami a mért adatokat csak az alapértelmezett GFS adatok időpontjaiban veszi figyelembe, és csak ezekben az időpontokban alakítja át a mért változók felszíni és rádiószondás értékeit a WRDA-ban szükséges LittleR formátumba.

V. Négy vizsgálatcsoporton keresztül teszteltem a modell érzékenységét a felszínborítottsági adatok, a tetőszint réteg sémák, az antropogén hő és a bemenő meteorológiai adatok változtatására (Molnár et al., 2019a; Molnár et al., 2019b; Molnár et al., 2020).

1. Az első, a felszínborítottsági adatbázisokra irányuló érzékenységi vizsgálatban megállapítottam, hogy a modell a legjobb teljesítménye az LCZ-alapú városi osztályokkal és az azokhoz kapcsolódó felszínparaméterekkel érhető el. Ezzel egyben azt is kimutattam, hogy a kiválasztott szimulációs időpontokban a mesterséges felszínek modellbeli komplexitásának növelése kedvezően hat a verifikációs eredményekre.
2. A második, a tetőszint sémákra irányuló érzékenységi vizsgálatban megállapítottam, hogy a modell a legjobb teljesítménye a kiválasztott szimulációs időpontokban az SLUCM_{WRF} parametrizációval tapasztalható. Az alkalmazott 1,5 km-es felbontás mellett tehát azt érzékelttem, hogy a sémák komplexitásának növelése nem eredményezte arányosan a verifikációs mérőszámok javulását.
3. A harmadik, az antropogén hő kibocsátásra irányuló érzékenységi vizsgálatban megállapítottam, hogy Szegeden az antropogén aktivitás elegendően nagy ahhoz, hogy a modellezett válto-

zokat (pl. hőmérséklet, feláramlási sebesség, turbulens kinetikus energia) a felszín közelében és a határréteg magasabb szintjein egyaránt módosítsa. Kimutattam azt is, hogy ez a módosítás a téli napok során lehet a legnagyobb. Az eredmények alapján azt is beláttam, hogy az antropogén hőkibocsátás intenzitása és a generált hőtöbblet közötti kapcsolat nem lineáris jelleggel rendelkezik.

4. A negyedik, a bemenő meteorológiai adatokra irányuló érzékenységi vizsgálatban megállapítottam, hogy a vizsgált téli napokon az adatasszimiláció után nem következett be javulás a szimulált felszínközeli hőmérséklet verifikációs eredményeiben. Az adatasszimilációs futtatásban a modellhibák leginkább az asszimilációs lépések háromóránkénti időpontjaiban nőttek meg. Ebből arra a következtetésre jutottam, hogy a modellezési hibák az asszimilációs lépések sűrítésével és a hibrid eljárás kiáltásával mérsékelhetőek.

VI. Kijelöltem és teszteltem azokat a modellbeállításokat, melyekkel Szeged termikus környezete optimálisan előrejelezhető (Molnár et al., 2019a; Molnár et al., 2020).

1. Az érzékenységi vizsgálatok tapasztalatai után ki tudtam jelölni azokat a nem rögzített, a felszínborítottságra, a városi tetőszint parametrizációs sémákra, az antropogén hőkibocsátásra és a bementő meteorológiai adatokra vonatkozó beállításokat, amik egy operatíván működő, városi léptékű előrejelzésre specializált meteorológiai modellnek a vázát képezhetik.
2. A modellbeállításokat egy kéthetes, véletlenszerűen kiválasztott, összefüggő időszakra teszteltem. A felszínközeli hőmérséklet mellett több változó verifikációjára is irányuló vizsgálatban azt állapítottam meg, hogy a modellrendszer az időjárás jellegéből adódó változásokra összességében jól reagál, azonban a csapadék és a felhőzet szimulációja még tartogat fejlesztési lehetőségeket. Azt is világossá tettem, hogy az összeállított modellrendszer további hiányosságainak kijelöléséhez újabb tesztelési időszakokat szükséges vizsgálni.

VII. Javaslatot tettem a Szegedre adaptált modellrendszer más városi területre való átültetésére.

1. Meghatároztam a beállítások azon szabadsági fokait, melyek változtatásával a modellrendszer bármely urbánus mintaterületen, hasonló pontosság mellett alkalmazható. Egy döntési fa típusú folyamatábrával kijelöltem azokat a lépéseket is, amelyekkel az újraadaptálás végrehajtható, és amelyek száma – a rendelkezésre álló adatmennyiség függvényében – csökkenthető vagy akár a jelenleginél tovább is növelhető.
2. Kiemeltem azokat az alkalmazási területeket, melyek a városi léptékű előrejelzés hőmérsékleti vagy származtatott produktumait a legnagyobb hatásfokkal tudnák hasznosítani.

A tézisek alapjául szolgáló publikációk

1. **Molnár G**, Kovács A, Gál T (2020): How does anthropogenic heating affect the thermal environment in a medium-sized Central European city. A case study in Szeged, Hungary. *Urban Clim* 34, 100673. (Q1; IF₂₀₂₀: 3,834)
2. **Molnár G**, Gyöngyösi AZ, Gál T (2019a): Integration of an LCZ-based classification into WRF to assess the intra-urban temperature pattern under a heatwave period in Szeged, Hungary. *Theor Appl Climatol* 138, 1139–1158. (Q2; IF₂₀₁₉: 2,882)
3. **Molnár G**, Gyöngyösi AZ, Gál T (2019b): Modeling of urban heat island using adjusted static database. *Időjárás* 123, 371–390. (Q4; IF₂₀₁₉: 0,277)
4. **Molnár G**, Gyöngyösi AZ, Gál T (2018): Evaluation of a WRF-LCZ system in simulating urban effects under non-ideal synoptic patterns. *Acta Clim Chorol Univ Szegediensis* 51–52, 57–73.
5. **Molnár G**, Gyöngyösi AZ, Gál T (2017): A városi hősziget vizsgálata meteorológiai modell segítségével Szeged. *Légkör* 62, 130–135.