Válasz Geresdi István

„A REMO regionális éghajlati modellen alapuló klímadinamikai vizsgálatok a Kárpát-medence éghajlatának jellemzésére”

című PhD értekezéshez készített opponensi véleményéhez

Köszönöm szépen Geresdi Istvánnak opponensi véleménye elkészítését, s legfőképpen azt, hogy nagyon hasznos javaslatokat tesz a dolgozatban leírtak kiegészítésére, a kutatások folytatására. Az alábbiakban részletesen válaszolok a felvetésekre és a kérdésekre. Külön köszönöm a Bíráló megtisztelő dicsérő észrevételeit! Az Opponens véleményét vastaggal szedtem, ebből sárga színnel kiemelve a kritikai felvetéseket, az ezekre adott válaszaimat pedig normál betűtípussal írtam.

A jelölt kutatásaiban a tágabb szakmai közvélemény számára is fontos problémákra keres megoldást. A Föld éghajlatának megbízható előrejelzése az egyik legnagyobb szakmai kihívás, amelynek megoldásához széles, több tudomány területet érintő összefogásra van szükség. Egyetértek a jelölt azon megállapításával, hogy az éghajlati alkalmazkodási stratégiák kidolgozásában döntő szerepet kell kapniuk az éghajlati modelleknek, különösen igaz ez a kisebb régiókra alkalmazható, pontosabb éghajlati forgató könyvek generálására képes regionális klíma modellekre.

A dolgozatban leírtak meggyőzően bizonyítják, hogy a jelölt nagyfokú jártasságra tett szert a kutatott témában, jól ismeri az általa használt numerikus modellt.

A dolgozat a Bevezetés mellett 5 további fejezetet, valamint egy Függeléket tartalmaz. A dolgozat formailag szépen kivitelezett, szerkezete logikusan felépített, nyelvezete jól érthető. Csak néhány, a megértést nem zavaró, valószínűleg elgépelésből származó elírást (pl. felírat 5.4 ábra függőleges tengelyén), illetve helyesírási hibát találtam a dolgozatban.

A dolgozat második fejezetében az éghajlati modellek fizikai alapjairól és az alkalmazott numerikus módszerekről olvashatunk egy nagyon alapos és korrekt ismertetőt. Nyilván a dolgozat terjedelme korlátot jelenet, de szívesen olvastam volna – akár a modellezés alapjaira szánt terjedelem rovására is – egy rövid ismertetőt a jelölt kutatási témájához szorosabban kapcsolódó nemzetközi és hazai kutatások eredményeiről, a kutatások során felmerülő fontosabb problémákról.

A Bíráló érdeklődése teljesen indokolt, s az értekezés valóban csak utalás szintjén és nem feltétlenül a bevezető fejezetben említ meg néhányat a témához kapcsolódó fejlesztési irányokból (pl. a bizonytalanságok számszerűsítését). Az alábbiakban szeretném ezt a hiányosságot – elsősorban a regionális klímamodellezés szempontjaira koncentrálva – pótolni három fontos kutatási terület bemutatásával:

- Napjainkban a számítástechnikai fejlődésnek köszönhetően éghajlati időtávon is lehetővé vált finom-felbontású szimulációk készítése. Az éghajlati modellek esetében a kutatások fő iránya az, hogy ezek a modellek elérjék a nem-hidrosztatikus skálát és képesek legyenek a kisebb skálájú folyamatok sikeres leírására is. Ez a fejlesztési irányvonal komoly kihívást jelent a modellek dinamikáját és fizikai parametrizációit fejlesztő szakemberek számára. Például a hamburgi Max Planck Intézet és a Német Meteorológiai Szolgálat közösen fejleszti az éghajlati alkalmazásra is szánt globális

nem-hidrosztatikus ICON modellt (Giorgetta et al., 2009), bár az jelenleg még „csak” időjárási modellként fut. A regionális klímamodellezésben már a gyakorlatban is megkezdődött a nem-hidrosztatikus modellváltozatok tesztelése és alkalmazása: Európában például a Svéd Hidro-meteorológiai Szolgálatnál folynak kísérletek a HARMONIE-Climate modellel (Lindstedt, 2012). Kissé más filozófiát vallanak a belga meteorológiai intézetnél, ahol nem egy kimondottan a kis-skálájú folyamatok leírására alkalmas modell kidolgozása a cél: ehelyett de Torch et al. (2013) alapján az ALARO modell fizikai parametrizációs eljárásait úgy fejlesztik, hogy a modell több méretskálán (akár a 40 km-es rácstávolságtól a 4 km-es felbontásig) is jól használható legyen, többek között azon a szürke zónának hívott, 6-10 km-es felbontáson is, amelyen mind a hidrosztatikus, mind a nem-hidrosztatikus modelleknek nehézségeik vannak a fizikai folyamatok megfelelő reprezentálásában.

- Napjainkban egyre elterjedtebbek a regionális klímamodellek eredményeire alapozott hatásvizsgálatok. A különböző szakterületeken azonban nagyon eltérő szempontból vizsgálják az éghajlatváltozás hatásait. A széles skálán mozgó igények kielégítéséhez az utóbbi évek egyik kitüntetett fejlesztési iránya olyan dinamikus almodellek fejlesztése, melyek a légköri modellek (azaz a regionális klímamodellek) eredményeire támaszkodva egy-egy folyamatrendszert részletesebben le tudnak írni. Így működik például az OMSZ-ban is alkalmazott SURFEX modell (Le Moigne, 2009), mely négy felszíntípust különböztet meg: (i) tengert, (ii) tavat és folyót, (iii) növényzetet, illetve (iv) városi felszínt, s az egyes alaptípusokra különböző parametrizációkat alkalmaz. A felszíni modell lehetőséget ad a speciálisan az adott felszínre jellemző és hatással bíró folyamatok pontosabb és részletesebb leírására, így például a SURFEX modell TEB modulja lehetővé teszi finom-felbontású városklimatológiai vizsgálatok elvégzését (Kovács et al., 2012).

- A felhasználókkal egyre intenzívebbé váló együttműködések másik következménye, hogy a klímamodellezéssel foglalkozó szakemberek figyelme a szimulációs bizonytalanságok számszerűsítése irányába fordul. Nemzetközi szinten ennek fontos gyakorlati példái az ENSEMBLES projekt (van der Linden et al., 2009), amelynek keretében nagyszámú globális és regionális modellszimulációt készítettek, valamint a EURO-CORDEX kezdeményezés (Jacob et al., 2013), amely pedig egyenesen ajánlásokat fogalmaz meg a felhasználók számára a modelleredmények felhasználásával kapcsolatban. Hazai szinten nemcsak gyakorlati elemzéseket végzünk a különböző modelleredményekre támaszkodva (Zsebeházi, 2013; Bartholy et al., 2011), de elméleti vizsgálatokat is folytatunk (Szépszó et al., 2013) arra nézve, hogy az éghajlati projekciók eltérő forrásból származó bizonytalanságai milyen szerepet játszanak adott idő- és térskálán, különböző meteorológiai változókra (ezeket a vizsgálatokat Hawkins és Sutton módszertanát követve végezzük; 2009, 2011). Európában és hazánkban is vannak már kezdeményezések arra, hogy a számszerű bizonytalansági információk előnyeit ne csak a meteorológusok, de a felhasználók is élvezzék (Szépszó et al., 2014; Rózsás és Kovács, 2013), ugyanakkor a valószínűségi megközelítés elfogadtatása nagyon hosszú folyamat.

Bartholy J., Horányi A., Krüzselyi I., Pieczka I., Pongrácz R., Szabó P., Szépszó G., Torma Cs., 2011: A várható éghajlatváltozás dinamikus modelleredmények alapján. In: Klímaváltozás – 2011: Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére, 170–234.

Giorgetta, M., Hundertmark, T., Korn, P., Reich, S., Restelli, M., 2009: Conservative space and time regularizations for the ICON model. Berichte zur Erdsystemforschung 67, pp. 32.

Hawkins, E., Sutton, R., 2009: The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. Bull. of Amer. Meteor. Soc. 90, 1095–1107.

Hawkins, E., Sutton, R., 2011: The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. Climate Dynamics 37, 407–418.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P., 2013: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Regional Environmental Change, Springer Berlin Heidelberg, 1–16.

Kovács M., Szépszó G., Krüzselyi I., Unger J., 2012: A városi hősziget modellezésének lehetőségei két hazai város példáján keresztül. III. Települési Környezet Konferencia beszámolókötete, 260–266.

Le Moigne, P., 2009: SURFEX scientific documentation; issue 1. Météo France, Toulouse, France, pp. 211.

Lindstedt, D., 2012: Development of a high resolution regional climate model. Rossby Centre Newsletter.

Rózsás, Á., Kovács, N., 2013: Probabilistic Assessment of the Effect of Climate Change on the Carbonation of Concrete Structures in the Carpathian Basin. In: Proceedings of Creative Construction Conference 2013 (eds.: Hajdu, M., Skibniewski J.M.), ISBN: 978-963-269-366-8.

Szépszó, G., Krüzselyi, I., Szabó, P., Zsebeházi, G., 2013b: From the RCM results to their interpretation for the users. In: Abstract booklet of the conference programme: International Conference on Regional Climate – CORDEX 2013, Paper 66.

Szépszó, G., Lingemann, I., Klein, B., Kovács, M., 2014: Impact of climate change on hydrological conditions of Rhine and Upper Danube rivers based on the results of regional climate and hydrological models. Natural Hazards 72, 1, 241–262. DOI: 10.1007/s11069-013-0987-1.

De Troch, R., Hamdi, R., Van de Vyver, H., Geleyn, J.-F., Termonia, P., 2013: Multiscale Performance of the ALARO-0 Model for Simulating Extreme Summer Precipitation Climatology in Belgium. J. Climate 26, 8895–8915.

van der Linden, P., Mitchell, J.F.B. (eds.), 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, Exeter, United Kingdom, 160 pp.

Zsebeházi G., 2013: A XXI. század során Magyarországon várható éghajlatváltozás jellemzése a hazai és ENSEMBLES-beli ALADIN és REMO regionális éghajlati modellfuttatások eredményei alapján. M.Sc. diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 87 pp.

A fejezetben leírtakkal kapcsolatban néhány kiegészítő, illetve pontosító megjegyzésem lenne. (i) A 9. és a 10. oldalakon olvashatunk az üvegház gázok hatásáról, és arról, hogy az egyes gázoknak milyen szerepük van hőmérséklet szabályozásában. Itt érdemes lett volna még arra is kitérni, hogy nem csak a gázok átlagos légköri koncentrációja és kémiai összetétele, de a koncentráció vertikális profilja is hatással van arra, hogy a gázok

hogyan befolyásolják a Föld-légkör rendszer sugárzás egyenlegét. Ez a hatás különösen a vízgőz esetében kritikus.

Köszönöm szépen a Bíráló kiegészítését!

(ii) A felhők szerepe azért árnyaltabb, annál mint azt a jelölt a 11. oldalon kifejti. Pl. a cirrus felhők szerepe egyáltalán nem tisztázott, mai ismereteink szerint inkább melegítő hatásúak.

A dolgozatban valóban csak néhány egyszerű példát említettünk a felhők bonyolult szerepének érzékeltetésére. A felhők még ma is számos nyitott kérdést tartogatnak a kutatók számára, emiatt mind az időjárás-előrejelzések, mind az éghajlati projekciók esetében a bizonytalanság (azaz a modelleredmények közötti eltérések) egy jelentős részéért a felhőzetben zajló folyamatok leírása felelős.

(iii) A 11. oldal első bekezdésében olvashatjuk: „… a sok vízcseppből álló felhők világos színűknél fogva a nap sugárzás jelentős részét visszaverik." Ez a megállapítás így hibás, ugyanis a felhők pont azért fehérek mert a felhőt alkotó vízcseppek és jégkristályok a rövidhullámú sugárzást – a hullámhossztól függetlenül – szórják.

Köszönöm szépen a Bíráló pontosító észrevételét!

(iv) A 11. oldal „…nagy függőleges kiterjedésű magas szintű felhők…". Legjobb tudomásom szerint ilyen felhő kategória nem létezik. Vagy magas szintűt, vagy nagy függőleges kiterjedésűt (pl. zivatarfelhők) kellett volna írni.

Köszönöm a Bírálónak, hogy felhívta a figyelmet a pontatlan fogalmazásra! Nagy magasságokban elhelyezkedő, tehát magasszintű felhőkre utalt volna a szöveg.

A 3. fejezetben a kutatáshoz használt REMO modellt, valamint a számítások elvégzéséhez szükséges kezdeti és határfeltételek előállításának, továbbá a számítási eredmények kiértékelésének módját ismerteti a jelölt.

Az Eredmények című fejezet elején a modell alkalmazása szempontjából fontos kérdésekről (felpörgési idő, térbeli felbontás), és az ezzel kapcsolatos eredményekről olvashatunk. Az ebben a fejezetben ismertetett, a modell validációjával, valamint az éghajlati forgatókönyvek előállításával kapcsolatos érzékenységi vizsgálatok eredményeit új tudományos eredménynek tartom. A jelölt az eredmények ismertetése során bemutatta a lehetséges hibaforrásokat és becslést adott a modellszámítással kapcsolatos bizonytalanságokra. A fejezet tartalmát illetően két megjegyzésem lenne. (i) A térbeli felbontás esetében arra a megállapításra jut a jelölt, hogy a horizontális felbontás közel 30 %-os növelése nem eredményez érdemi javulást az eredményekben. Azt elfogadom, hogy a számítások alátámasztják ezt a kijelentést. A kérdés csak az, hogy mi lehet ennek ez oka. A dolgozatban számos utalás történik arra, hogy a globális modelleknél pontosabb éghajlati forgatókönyvet szolgáltatnak a jobb térbeli felbontással rendelkező regionális modellek. Miért nem javulnak tovább az eredmények, ha egy regionális modellen belül csökkentjük a rácspontok közötti távolságot? Én úgy gondolom, hogy ez a modell valamilyen hiányosságának a következménye. Ennek a kérdésnek a megválaszolása segíthet a modell korlátainak felderítésében, és talán kijelölheti a fejlesztés egy lehetséges irányát is.

Köszönöm a Bírálónak ezt a jogos észrevételt! Általában a modellek felbontásának növelése nem feltétlenül jelenti az eredmények automatikus javulását, különösen a kisebb (10 km körüli) skálák közelében. Ugyanis a rácstávolság csökkentésével párhuzamosan a fizikai parametrizációk beállításait is hangolni kell ahhoz, hogy a részletesebb felbontás előnyeit maximálisan ki tudjuk használni. Ráadásul néhány km-es felbontáson túl nem elég a paraméterek hangolása, hanem egyenesen új sémák alkalmazására van szükség, amelyek megfelelően le tudják írni az adott skálájú folyamatokat (pl. „minőségi ugrást" jelent a parametrizációk tekintetében a nem-hidrosztatikus modellek alkalmazása, amelyek közvetlenül, s nem parametrizáció útján írják le a mélykonvekció folyamatát; de igaz ez az említett 6-10 km-es szürke zónában dolgozó modellekre is).

Az értekezést megalapozó kutatásokban a felbontás növelése mellett változatlanul hagytuk a fizikai parametrizációk beállításait, s valószínűleg ez az oka annak, hogy nem kaptunk jobb eredményeket a finomabb felbontáson. Az elvégzett vizsgálatok arra adnak választ, hogy kizárólag a felbontás növelésével tudunk-e javítani az eredményen. Természetesen ez nem jelenti azt, hogy ne lenne lehetséges a fizikai parametrizációk hangolása a REMO-ban, de sajnos a vizsgálataink erre nem terjedtek ki, s ezért a dolgozat sem tűzte ki ezt célul. Mindazonáltal a felvetett kérdés valóban jó iránya a továbblépésnek és a fejlesztésnek, különös tekintettel arra, hogy a legújabb modellszimulációkat már 10 km-es felbontáson tervezzük elvégezni.

(ii) A 82. oldal első bekezdésében olvashatjuk: „… a „magassabbá váló" hegységek tovább növelik a kiindulásként kapott légköri nedvesség kihullását …". Ez a megállapítás nem pontos. Ugyanis a jobb térbeli felbontás nem csak a szél felöli oldalon növeli a meredekséget, de a széllel átellenes oldalon is. Így nem csak a feláramlás, de a leáramlás is erősebb lesz. Ez utóbbi pedig felhőoszlató hatása révén csökkenti a csapadékot (főn hatás). Ezért a térbeli felbontásnak a csapadék mennyiségére gyakorolt hatása nem olyan egyértelmű, mint azt a jelölt állítja. Például függhet az uralkodó széliránytól is.

Köszönöm szépen a Bíráló pontosító észrevételét és kiegészítését!

Az 5. fejezetben a klíma modellek együttes alkalmazásának lehetőségeiről, a modellek által szolgáltatott klíma forgatókönyvek értékelésének módszertanáról ír a szerző. A nagyszámú modell futtatása során kapott eredmények statisztikai értékelése, és az ez alapján készülő legvalószínűbb forgatókönyv meghatározása széles körben elfogadott. Nekem azért vannak aggályaim a módszer alkalmazását illetően. Ugyanis a statisztika készítése során a minőségileg igen eltérő modellek eredményeit azonos súllyal veszik figyelembe.

Általánosságban az éghajlati projekciók esetében magam is osztom a Bíráló aggályait. A meteorológiai előrejelzések (időjárás-előrejelzések és éghajlati projekciók) bizonytalanságai az ensemble (együttes) technika segítségével számszerűsíthetők. Ennek során több, különböző beállításokkal végrehajtott szimuláció eredményeit együttesen értékelik ki, s az eredmények által lefedett értéktartomány alapján intervallumok vagy valószínűségek adhatók meg. Éghajlati skálán a bizonytalanság elsősorban az emberi tevékenység és a fizikai folyamatok leírásának nehézségeiből ered, amit több reprezentatív kibocsátási forgatókönyv, globális és regionális modell alkalmazásával lehet meghatározni.

Egy ensemble akkor reprezentálja kiegyensúlyozottan a szimulációk bizonytalanságát, ha minden bizonytalansági forrást megfelelő számú modellkísérlet ír le. Míg az időjárás-előjelzések esetében a globális ensemble rendszerek összeállításában ez az elv többnyire ér-

vényesül (vagy legalábbis jobban teljesül), addig az éghajlati szimulációk esetében sokszor pragmatikus (gyakorlati, technikai) szempontok határozzák meg, hogyan épül fel a projekció-együttes. A klímaszimulációk számításigénye miatt egy-egy intézmény általában csak kis-számú regionális modellfuttatás készítésére vállalkozhat, így az éghajlati ensemble rendszerek általában nagyon heterogén szimulációkból épülnek fel. Erre jó példa az ENSEMBLES európai uniós projekt, amelyben bár 5-6 globális modell eredményei álltak rendelkezésre határfeltételként, ezek közül csak néhány eredményeivel készült nagyszámú regionális szimuláció. Mivel a regionális eredményekre nagy hatással van a határfeltételt adó globális modell, néhány globális modell „túlsúlya" a valószínűségi információk torzulásához vezet. Így ezek közlésénél mindig szem előtt kell tartani, hogy a szimuláció-együttes, amire alapozzuk őket, milyen jellemzőkkel bír ebben a tekintetben.

Egyetértek a Bírálóval abban, hogy a modellszimulációk közötti súlyozás objektív meghatározása optimális módszer lenne arra, hogy figyelembe vegyük az egyes modellek gyengeségeit és erősségeit. A legnagyobb kérdés ezzel kapcsolatban az, hogy mi alapján választjuk meg az egyes kísérletek súlytényezőit. Kézenfekvőnek tűnik, hogy a múltra vonatkozó validáció eredményei alapján súlyozzuk a modellek eredményeit, és a jobban teljesítő modellek nagyobb szerepet kapjanak az ensemble rendszerben. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a modellek közötti súlytényezők rácspontonként, meteorológiai változónként, időszakonként eltérhetnek, s mivel a numerikus modell hibái a meteorológiai (éghajlati) viszonyoktól is függenek, így egy változó éghajlatban nem tekinthetők szükségszerűen állandónak. Ebből következően a validáció alapján egy múltbeli időszakra megállapított súlytényezők nem feltétlenül lesznek érvényesek egy jövőbeli időszakon is. Ezek miatt a nehézségek miatt bár vannak vizsgálatok arra, hogy különbséget tegyenek az ensemble tagjai között (pl. Déqué and Somot, 2010), a gyakorlatban a legtöbb esetben egyforma súllyal veszik őket figyelembe.

Déqué, M., Somot, S., 2010: Weighted frequency distributions express modelling uncertainties in the ENSEMBLES regional climate experiments. Clim. Res. 44, 195–209.

A Tézisekben felsorolt, 5 pontban összefoglalt tudományos eredmények mindegyikét új eredménynek fogadom el. A jelölt egy korrekt, a lehetséges hibákat is figyelembevevő technológiát dolgozott ki a Kárpát-medence éghajlati forgatókönyvének előállítására. A dolgozat mind tartalmi, mind formai szempontból teljesíti a doktori iskola követelményeit. A jelölt eredményeit három, impakt faktorral rendelkező folyóiratban publikálta. A disszertációban és a csatolt publikációkban leírt eredmények alapján a doktori értekezést summa cum laude minősítéssel javaslom elfogadni.

Budapest, 2014. november 27.

Szépszó Gabriella