



Az adriai bórától a bakonyi lejtőviharig

Kurcsics Máté, Horváth Ákos

Országos Meteorológiai Szolgálat, kurcsics.m@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2022.2.2

A Föld számos pontján megfigyelhető, hogy bizonyos időjárási helyzetekben az alapáramlás és a domborzati (orografikus) hatások eredményeként sajátos szélviszonyok alakulnak ki, melyek akár igen heves szélrohamokat is eredményezhetnek. Ezeknek a szeleknek minden területen megvan a maga neve, az Alpokban ilyen a fön, a Keleti-Kárpátokban a nemere, az Adriai-tenger térségében a bóra. Főnszerű szelek az Alpok mellett előfordulnak többek között a Skandináv-hegységben és a Pireneusokban is, de Magyarországon is többször megfigyelhető fönös hatás (pl. Tüskés, 2010). A bóra létrejöttében sok tényező játszik szerepet, így nem csoda, hogy az elmúlt évtizedekben, a numerikus modellek fejlődésének köszönhetően sokat módosult a kialakulását magyarázó elmélet.

From Adriatic bora to Bakony-Balaton downslope wind

In many places of the Earth, there are areas where, in the presence of certain types of weather, specific wind conditions arise due to the orography and synoptic-scale flow, with strong gusts of wind. Each types of these winds have their own name by areas, for example foehn in the Alps, nemere in the Eastern Carpathians, bora by the Adriatic Sea or chinok in Colorado. Winds, similar to foehn also occur in the Scandinavian Mountains and in the Pyrenees, but sometimes can be observed in Hungary. A lot of factors play important role in the formation of bora, consequently in the last decades, by the development of numerical models, the theory of it's formation changed a lot. In the present study features of the Adriatic bora and the much weaker Bakony-Balaton downslope wind are investigated by WRF model.

A bóra az adriai partvidék jellegzetes szele. A Trieszt körüli olasz és szlovén területektől az Isztriai-félszigeten, a horvát és montenegrói tengerparton át egészen Albániáig kialakulhat. Egy heves bóra időszak alatt az átlagos szélesség meghaladhatja a 70–100 km/h-t is, miközben a legerősebb szellőkések többször elérik a 150 km/h-t. Az eddigi legnagyobb bórához kötődő szellőkés 250 km/h-s volt, 1996 januárjában regisztrálták

a horvátországi Makarska térségében. A bóra sokkal gyakoribb, erősebb és hosszabb ideig tart a téli félévben, mint nyáron (Poje, 1992). Télen napokig, esetleg egy hétig is fennmaradhat, míg nyáron általában csak pár óráig fúj. A bóra tipikusan északkeleties szél, minél merőlegesebb az áramlás iránya a part menti hegyvonulatra, annál erősebb lehet.

Legtöbbször egy az Adriai-tenger térségében kimélyülő alacsony nyomás vagy Közép-Európa felett elhelyezkedő magasnyomás hatására alakul ki (Dorman et al., 2007). Előbbi általában a Genovai-öböl térségében lezajló, lee oldali ciklogenezis eredményeként jön létre. A mediterrán ciklon délkelet felé helyeződve az Adriai-tenger felett is alacsony nyomást alakíthat ki. A magasnyomású eredetre példa a szibériai anticiklonhoz kapcsolódó, Közép-Európa feletti gerinc. Ezek olyan áramlási rendszerek, amelyek a szárazföld felől a Dinári-hegységen átbukva a tenger irányába szállítják a levegőt az alsó troposzférában. Sokszor a kettő kombinációja eredményezi a bóra kialakulását (Heimann, 2001). Rövidebb ideig hidegfront áthaladását követően is előfordulhat bóra (Grisgono és Belussic, 2009).

Bóra alatt első közelítésben a dalmát és az isztriai tengerparton tiszta időben lecsapó, hideg, heves szélrohamokat értjük. Valójában azonban a bórának számos típusa elkülöníthető. Erősségét tekintve a gyengétől a heves, szélsőséges bóráig több típus is megkülönböztethető. Kialakulása szempontjából elválasztható egymástól a „ciklonális” bóra, amely az Adriai-tenger feletti ciklon, illetve az „anticiklonális” bóra, amely a Közép-Európa feletti anticiklon hatására jön létre. Ehhez adhatóak hozzá a ciklonális és anticiklonális helyzetek együttes fennállása esetén létrejövő bóradikus helyzetek. Vertikális kiterjedés alapján sekély és mély bórárt, felhőzet alapján „sötét” és „tiszta” bórárt különböztetnek meg (Jurcec, 1981). Ezek a kategóriák sokszor összefüggenek, pl. a ciklonális bórához általában társul felhőzet, míg az anticiklonális bóra esetén csak kevés felhő van az égen (pl. az úgynevezett bórapad). A mediterrán ciklon alakította bórák esetén sekély és mély bóra is kialakulhat attól függően, hogy sekély, vagy vertikálisan fejlett a mediterrán ciklon. A sekély bóra a legtöbb esetben erősebb, mint a mély bóra (Dorman et al., 2007). A termikus hatás szempontjából a bórárt hideg szélként szokás definiálni, de ez nem tekinthető általánosnak, néhány esetben a leáramlás során adiabatikusan melegedő levegő hatására melegedés tapasztalható a parton.

A bóra megjelenési formája nagyban függ a légkör állapotától, az adott domborzati akadály meredekségétől és a partvonal típusától. Tagolatlan partvonalnál, meredek hegyoldalnál, így például a Dinári-hegység északi részét képező Velebit-hegység Adria felőli oldalán jellemzően lecsap, majd a tenger felé gyorsan gyengül, míg a félszigetekkel, szigetekkel sűrűbben tagolt területeken igen változatos a megjelenése. Egyes helyeken az Adriai-tengeren keresztül egészen az olasz partokig átnyúló, hosszú szélcatornák, a szakirodalmi elnevezésük szerint jetek alakulnak ki (amelyek természetesen nem azonosak a nagy magasságban fújó jet stream-ekkel).

A bóra az Adriai-tenger partján élők számára már régóta ismert jelenség. A hatására kialakuló rotorfelhőket már a 19. század végén vizsgálta Andrija Mohorovicic horvát meteorológus, geofizikus, a földkéreg és földköpeny határán levő diszkontinuitási felület felfedezője (Grubisic és Orlic, 2007).

A heves széllel járó bóra kialakulásának elmélete az elmúlt évtizedekben igen jelentős változáson ment keresztül. Sokáig a bórárt egy katabatikus, hideg bukószélként sorolták be (pl. Jurcec, 1981). A nagy hőmérséklet-különbségen alapuló elmélet azonban csak a bóra gyengébb típusainál állja meg a helyét. A szélsőséges, heves szélrohamokkal kísért bóra kialakulásának és fennmaradásának alapvetően nem termikus oka van (pl. Smith és Sun, 1987). Numerikus modellek alkalmazásával láthatóvá vált, hogy a bóra egy lee oldali lejtővihar (a klasszikus termikusan vezérelt hideg bukószél elmélettel szemben) (Grisgono és Belussic, 2009).

Lejtővihar akkor alakul ki, amikor egy határozott szinoptikus skálájú alapáramlás egy domborzati akadálnak ütközve már a hegy szél felőli oldalán emelkedve gyorsulásnak indul, majd a hegy széllel ellentétes oldalán a süllyedő levegő gyorsulása tovább folytatódik. Eközben a leáramló levegő egy egyre keskenyedő áramlási csatornában rásimul a hegyoldalra és esetenként orkán erejű széllelkésekkel lecsap a hegy túlsó lábánál. Az egyre szűkülő réteg a lejtő alján (vagy attól távolabb) hirtelen felszakadva áll vissza a normális állapotba. Ez utóbbit hidraulikus ugrásnak nevezik.

A lejtőviharok dinamikájának leírásában többféle elmélet is elterjedt az elmúlt évtizedekben, mint például a nem-lineáris, hidraulikus megközelítés (pl. *Holton*, 1992). Egy másik elmélet szerint a belső gravitációs hullámok miatt csapdába esett lee hullámok fejlődése (pl. *Klemp* és *Lilly*, 1975), míg egy harmadik elképzelés szerint a hegy miatti hullámtörés (pl. *Durran*, 1986) váltja ki a lejtőviharokat.

A lejtőviharok kialakulásához kedvező feltétel, ha a feláramlási oldalon egy kisebb meredekségű lejtő, vagy nyereg van, aminek hatására jobban fel tud gyorsulni a hegygerinc felé tartó áramlás. A leáramlási oldalon minél meredekebb egy lejtő, annál nagyobb valószínűséggel alakulhat ki rajta lejtővihar a hegy lábánál és annál nagyobb valószínűséggel fog az áramlás a hegytől távolodva gyorsan gyengülni. Meteorológiai szempontból stabil rétegződésre van szükség, különösen kedvező lehet a termikus inverzió jelenléte. Szükséges nagy nyomásgradiens kialakulása is a hegység térségében, amelynek eredményeként erős alapáramlás jön létre a hegyvonulatra merőleges irányból. Ennek az alapáramlásnak a hegygerinc magasságában erősnek kell lennie, ugyanakkor a magassággal felfelé haladva nem erősödhet túl nagy mértékben [1]. Lejtőviharok gyakran olyan szélviszonyok mellett alakulnak ki, amikor a középső troposzférában jelentősen gyengül a hegyre merőleges áramlás vagy változik a szél iránya.

A bóra elsősorban a horvát tengerpartot érinti, de olasz és szlovén területeken is előfordul, így ezekben az országokban is foglalkoznak a vizsgálatával (pl. *Bervida et al.*, 2019). Bóra típusú lejtőviharok a Föld számos pontján előfordulnak. Oroszországban például a Fekete-tenger partján, Novorosszijszk térségében jellemző (*Shestakova et al.*, 2019). Japánban többfelé előfordulnak lejtőviharok, közülük a legmarkánsabbak a Shikoku szigetének délkeleti részén húzódó hegységből a Filippinó-tenger partjára lecsapó Yamaji-kaze és a Tokió közelében kialakuló, a Csendes-óceán irányába fújó Hirodo-kaze, melyek jellemzően tájfunokhoz kötődően jönnek létre (*Kusaka* és *Fudeyasu*, 2017). A Sziklás-hegység keleti lejtőin, Coloradoban kialakuló Chinook nevű szélvihar is a lee oldali lejtőviharok csoportjába tartozik

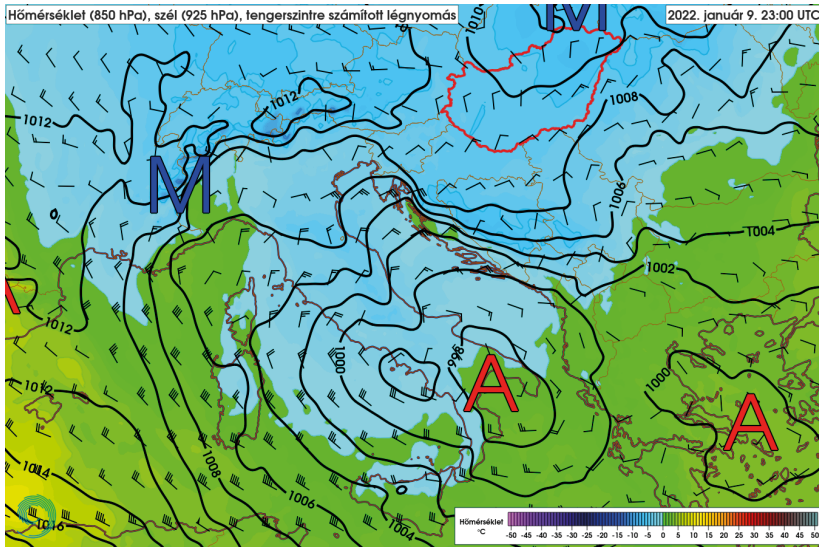
(*Oard*, 1993; *Mercer et al.*, 2008). A Kárpátokban, a Magas-Tátra lábánál 2004-ben lejtővihar okozott igen nagy pusztítást (*Simon et al.*, 2006). Izland legnagyobb összefüggő jégmezejének, a Vatnajökullnak a déli részén melegedéssel járó lejtővihar csapott le az Atlanti-óceán irányába (*Ólafsson* és *Ágústsson*, 2007). Meleg, hasonló módon kialakuló szél az Alpokban a főn vagy az Andokban a Zonda is (*Norte et al.*, 2008).

A tanulmányban bemutatunk egy kiválasztott, jellegzetes adriai bóra időszakot, majd a tapasztalatok alapján megvizsgáljuk, hogy hasonló tulajdonságokkal rendelkező lejtővihar kialakulhat-e Magyarországon is. Ehhez a WRF modell eredményeit használtuk fel.

Bóra az Adrián

Elsőként egy esettanulmány kerül bemutatásra a Dinári-hegység és az Adriai-tenger térségében kialakuló bóráról. 2022. január 10-re virradó éjszaka egy igen erős bóra időszak vette kezdetét az Adriai-tenger partján. A partvidékre lecsapó lejtővihar napokon át, január 13-ig kitarított. Az átlagos szélesebesség sokfelé meghaladta a 60 km/h, helyenként a 70 km/h sebességet is. A bóra lökéses szél, így az alapszélre akár annak a két-háromszorosa is ráakódhatott lökések formájában, amit a továbbiakban bemutatott modelleredmények és mérési adat is megerősít. Január 11-én a horvát A1-es autópálya Velebit-hegység északi részét megközelítő szakaszánál 185 km/h szélsebességet mértek. Ez a hely 15 km távolságra van a tengerparttól, a parthoz közeledve még ezt meghaladó szélsebességek is előfordulhattak. A bóra miatt a part menti területeken utakat zártak le vagy sebességkorlátozásokat vezettek be rajtuk (ami a tengerparti utak esetében rendszeres dolog a bóra miatt a téli félévben), a Horvát Hidrometeorológiai Szolgálat pedig piros riasztást adott ki.

A bórát ez esetben egy mediterrán ciklon idézte elő, ami a Genovai-öbölben alakult ki, majd az Appennini-félsziget mentén délkelet felé mozgott (1. ábra). A ciklon hatására az Adriai-tenger térségében is csökkent a légnyomás, kialakult egy nyomási teknő a vízfelszín felett, miközben a Dinári-hegység vonalában fokozatosan nőtt



1. ábra. Időjárási helyzet 2022. január 9-én 23 UTC-kor az Adriai-tenger térségében, az ECMWF modell alapján. A 850 hPa-os nyomási szint hőmérséklete (színezés), a 925 hPa-os nyomási szint szélmezeje és a tengerszintre számított légnyomás (fekete vonalak). A délkelet felé mozgó mediterrán ciklon nyomási teknőt alakított ki az Adriai-tenger felett.

a lokális nyomási gradiens. Emiatt létrejött egy határozott áramlás a szárazföld felől a tenger irányába a mediterrán ciklon hátoldalán.

A következő napokban a mediterrán ciklon kelet felé eltávolodott a térségből, eközben azonban az eleinte Észak-Európa felett levő anticiklon egyre délebbre helyeződött és folyamatosan erősödött. Január 12-ére kialakult egy Európát nyugat-kelet irányban, az Atlanti-óceántól Közép-Európán át az Ural-hegységig átszelő, igen erős magasnyomás, aminek keleti, délkeleti peremén hideg levegő árasztotta el a Balkán-félszigetet. Kieleződött a hőmérsékleti kontraszt a Balkán-félsziget és az Adriai-tenger között, ami a nyomási mezőben kialakult nagy különbségek fennmaradását, további növekedését eredményezte. A hideg kontinentális és a meleg tengeri légtömeget a Dinári-hegység vonulata választotta el egymástól. A hegység mentén tovább sűrűsödtek az izobárok: mögötte zárt magasnyomás alakult ki, míg az Adriai-tenger felett továbbra is jelen volt a nyomási teknő.

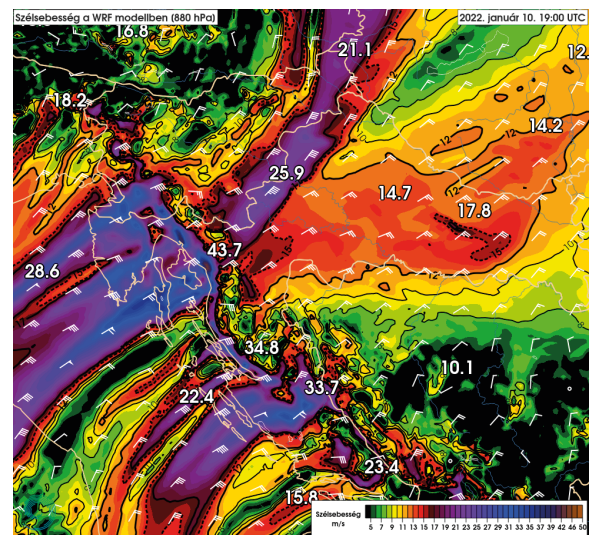
A szinoptikus időjárási helyzet áttekintése alapján látható, hogy a január 10–13. közötti bórá egyszerre volt ciklonális és anticiklonális hatás

eredménye. Kezdetben a mediterrán ciklon, majd az Európa középső részére húzódó anticiklon biztosította fennmaradását.

A továbbiakban részletesen elemezzük az adriai tengerparton kialakult bórá, annak horizontális és vertikális megjelenését, kiterjedését a WRF modell alapján, elsősorban vertikális metszetek használatával. A bórá megjelenése nagyon változatos, ami alapvetően a domborzati viszonyok függvénye, nagyban befolyásolja a hegyoldal meredeksége és a partvonal tagoltsága (szigetek, félszigetek). Ezek függvényében egyes helyeken az Adriai-tenger felett igen erős, hosszan elnyúló, sokszor az olasz partokat is elérő áramlások alakulnak ki, melyeket ahogy arra már a tanulmányunk elején utaltunk, jeteknek neveznek (*Belussic és Klaić, 2006*). Ezek a jetek merőlegesek a part menti hegység vonulatára, egy bórá időszakon belül csak

kis mértékben változtatják a helyüket. Másutt jetek helyett a bórá lecsap a meredek hegyek lábánál, majd a tenger felé haladva gyorsan megszűnik. E mögött a hamar bekövetkező hidraulikus ugrás jelensége áll.

A vizsgált időjárási helyzetben is kialakultak

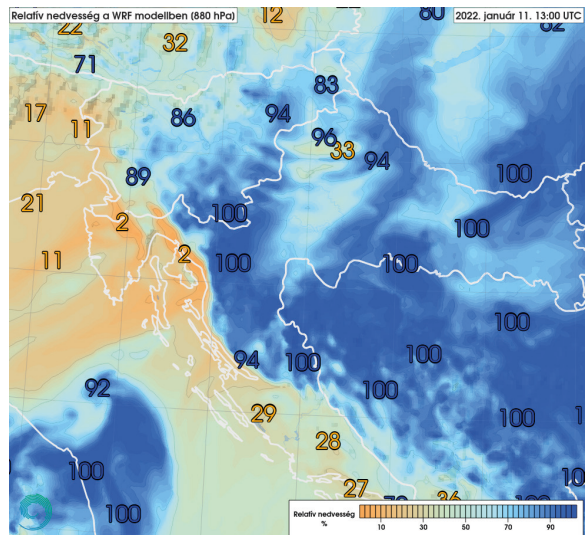


2. ábra. Szélsebesség és szélzászlók a Dinári-hegység térségében 2022. január 10-én 19 UTC-kor a 880 hPa-os nyomási szinten (kb. 1200 m-es magasságban). Az Adriai-tenger felett kialakultak a jetek, a Dinári-hegység lee oldalán a leg-erősebb szélhőkés 43,7 m/s (157 km/h) a WRF modellben.

az Adriai-tenger felett a jetek (2. ábra). A Dinári-hegység völgyeiből, kisebb szakadékaiból kifújó szél egyes helyeken elérte az Appennini-félszigetet is úgy, hogy erejéből csak keveset veszített a tenger felett. Ezek az áramlások a teljes bóra időszak alatt fennmaradtak, helyüket csak alig változtatták. Folyamatosan meandereztek az Adria felett, hol kissé északabbra, hol kissé délebbre kitérve, de mindig visszatérve az eredeti állapotba. A bóra erősségét, különösen a legerősebb szellőkések nagyságát modellkísérleteink alapján a tenger hőmérséklete jelentősen nem befolyásolja. Ez megegyezik az elmúlt időszak kutatási eredményeivel, melyek megállapították, hogy a heves bóra időszakokban a termikus, katabatikus magyarázat nem állja meg a helyét, nem hőmérséklet-különbség okozza a bóra lecsapását. A modellkísérletek igazolták viszont azt, hogy a tengervíz hőmérséklete nagy hatással van az Adriai-tenger feletti jetekre. Hideg tengervíz esetén a jetek nem érik el az olasz partokat, míg ha relatíve meleg a tenger, akkor erejükből alig veszítve érkeznek meg a szélvihar az Appennini-félszigethez. Eközben a Dinári-hegység középső részénél, a Velebit-hegységnél nem alakultak ki (vagy csak jóval gyengébben) jetek. Ezen a területen csak a magas, meredek hegység hágói nyújtanak lehetőséget jetek kialakulására a megfelelő szélirány esetén, de itt sokkal jellemzőbb a hegy lábánál bekövetkező hidraulikus ugrás.

Bár a bóra általában hideg szélként van definiálva, ez egyáltalán nem tekinthető általánosan igaznak. A vizsgált esetben sem az történt, hogy a Dinári-hegységen átbukott volna a tőle északra felgyűlő hideg levegő. A hőmérséklet-különbségnek a gradiens kiépítésében volt szerepe, ami miatt északkeleti irányból megindulhatott az erős áramlás.

A bóra január 10-re virradó éjszaka felhős időben indult, ami jellemző a ciklonális bórak esetén, majd ahogy egyre inkább anticiklonális bórává alakult át, a felhőzet is csökkent. Január 12-én a tenger felett már tiszta volt az ég, csak a hóval borított Dinári-hegység felett voltak felhők. A hegy lee oldalán leáramló légtömegnek fokozatosan csökkent a nedvességtartalma és január 11-re már igen szárazzá vált a levegő azokon a területeken, ahol fúj a bóra. Az Isztriai-

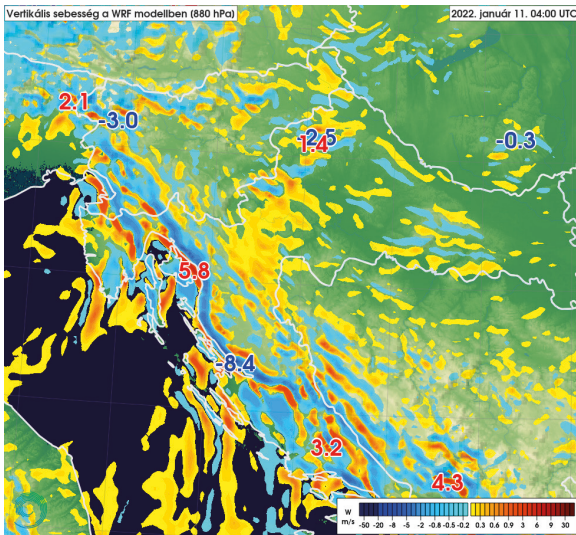


3. ábra. Relatív páratartalom a Dinári-hegység térségében 2022. január 11-én 13 UTC-kor a 880 hPa-os nyomási szinten a WRF modellben. Éles határfelület alakult ki a hegyvonulat mentén. Tőle északra, a szél felől oldalon felhős az ég, míg az Adriai-tenger felett, a széllel ellentétes, lee oldalon erős kiszáradás történt, helyenként 2%-ig csökkent a relatív nedvességtartalom.

félsziget térségében, ahol egy határozott jet volt jelen, 2%-ig csökkent a levegő nedvességtartalma, gyakorlatilag teljesen kiszáradt (3. ábra). Eközben a Dinári-hegység felett gyakori volt a 100%-hoz közeli relatív nedvességtartalom, felhős volt ég.

A bóra hegyi hullámok által kialakított jelenség, a hullámok jelenléte pedig többek között a vertikális áramok vizsgálatával figyelhető meg. A hegyvonulat lee oldalán, gyakorlatilag a part teljes hosszában kialakult egy erős leáramlás, amiben 8 m/s-ot is meghaladó vertikális sebesség is előfordult (4. ábra). A vertikális szélkomponens alakulása a tenger felé haladva azonban meglehetősen változatos volt. Voltak helyek, ahol csak egy gyengébb feláramlás követte a leáramlást, majd a tenger felé a hidraulikus ugrást követően már nem voltak jelentősebb vertikális áramok (pl. Velebit-hegység térsége). Másutt, pl. a jetek területén a tenger felett hosszan követték egymást a le-fel áramlási párok, azaz magasabb hullámszámú hullámok alakultak ki, többfelé még Olaszországig is elért a hullámmozgás.

A továbbiakban a bóra vertikális szerkezetének bemutatása történik. A vizsgált metszetek úgy kerültek kiválasztásra, hogy különböző meredekségű hegyoldalok, illetve eltérő tagoltságú partvona-



4. ábra. Vertikális sebesség a Dinári-hegység térségében 2022. január 11-én 04 UTC-kor a 880 hPa-os nyomási szinten a WRF modellben. A Dinári-hegység vonulata mentén (a lee oldalon) végig jól követhető egy rendezett, erős leáramlás és egy ezt követő gyengébb feláramlás. Helyenként (ahol a jetek kialakultak) ezt hosszan elnyúlva a tenger felett újabb le-fel áramlási párok, hullámok követték.

lak legyenek köztük. Alapvető szempont volt, hogy a metszetek merőlegesek legyenek a Dinári-hegységre, így párhuzamosak az áramvonalakkal. A kiválasztott metszetek között szerepel egy meredek hegyoldal és tagolt partvidék kombinációja (San Marino–Kr–Zágráb) ahol a tenger feletti jet is kialakult, egy meredek hegyoldal tenger feletti jet nélkül (Ancona–Pag–Bihács–Daruvár) és egy lankásabb hegyoldal, tagolatlan partvidékkel, kialakuló jettel (Pescara–Šibenik–Banja Luka), így a bóra különböző megjelenési formáit láthatjuk egy időjárási helyzeten belül.

Meredek hegyoldali lejtővihar jet nélkül

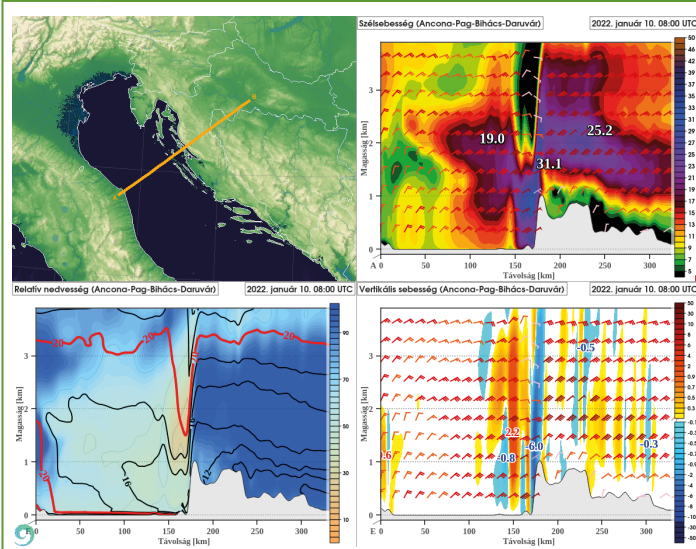
Elsőként az 5.a és 6.a ábrákon narancssárga színnel jelölt Ancona–Pag–Bihács–Daruvár metszet kerül bemutatásra, amely Zárától északra metszi Pag szigetét, majd a Velebit-hegységet. A Velebit-hegység a Dinári-hegység északi vonulatának a része, északkeleti oldalán lankásabb, erős, délnyugati részén meredek, sziklás hegység. Ezen a területen a vizsgált esetben klasszikus lejtővihar alakult ki a hegy lábához közeli hidraulikus ugrással. A bóra létrejöttékor a viharos szél tel-

jesen rásimult a hegyoldalra és rögtön lecsapott a hegy lábánál is (5.b ábra). Hosszan elnyúló jet nem figyelhető meg a tenger felett, ugyanis az igen meredek hegyoldal miatt az áramlás a felszínre érést követően kevéssel hirtelen ugrással visszaállt a stabil állapotba és jelentős mértékben gyengült a tenger irányába. Az Adriai-tenger felett csak élénk, erős volt a szél, miközben a hegyoldalon erősen viharos alapszél fújt. A szélmaximum ekkor még a hegy felső részén (de nem a hegycsúcson) jelentkezett. A hegy luv oldalán az inverzió alatt gyenge, felette azonban viharos volt a szél, a lee oldalon viszont az inverzió felett közel szélcsend volt.

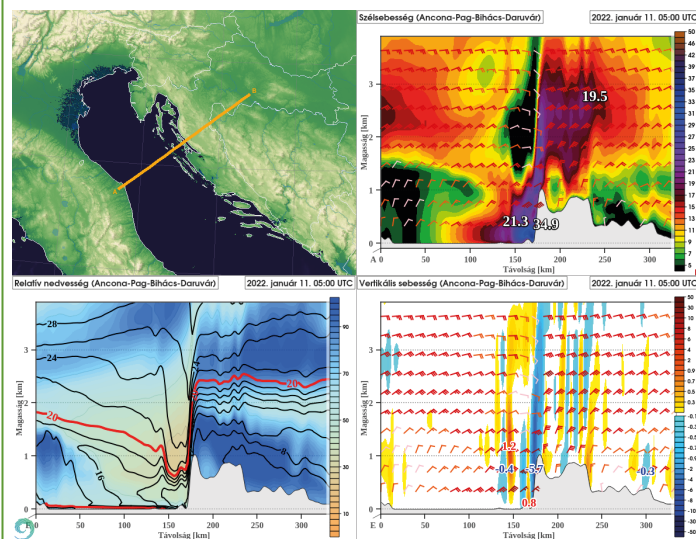
Általánosságban elmondható, hogy az áramvonalak közel egybeesnek az azonos potenciális hőmérsékletű helyeket összekötő izovonalakkal, az izentróppokkal. A vizsgálatok során jelen tanulmányban az ekvivalens potenciális hőmérsékletet használtuk, mivel az egyszerre fejezi ki a levegő hőmérsékleti és nedvességi tulajdonságait is, és az áramlás hasonlóan az izovonalai mentén történik. A továbbiakban az azonos ekvivalens potenciális hőmérsékletű felületeket thetaE felületeknek, vagy áramvonalaknak nevezzük a száraz folyamatoknál alkalmazott izentróp felületek analógiájára. Lejtővihar esetén ezek a thetaE felületek a hegy szél felőli oldalán közel párhuzamosak, vízszintesen futnak, majd a széllal ellentétes oldalra érve egy hirtelen beszakadás történik, a thetaE felületek nagy szögben megtörnek és rásimulnak a hegyoldalra, miközben jelentősen be is sűrűsödnek, igen nagy gradienst kialakítva (5.c ábra).

A hegy gerincét elérve a nagy gradiensű thetaE felület a vizsgált metszet mentén is beszakadt és rásimult a hegyoldalra (5.c ábra). A luv oldalon még közel vízszintesen futó izovonalak a lee oldalra érve hirtelen közel 90 fokban megdőttek és szinte függőlegessé váltak, az áramlás pedig ezeket az izovonalakat követte. Az igen nagy szélesség az izovonalak besűrűsödéséből adódott, ami arányos az áramlás sebességével. Ez a nagy gradiensű terület éles határfelületet képezett a nedves (felhős) luv oldal és az egyre inkább kiszáradó lee oldal között.

A hegyoldalra rásimuló keskeny leáramlási csatorna több, mint 4 km-es magasságból indult, és közel eddig a magasságig feláramlási csatornák is kialakultak a közelben a tenger felett (5.d ábra),



5. ábra. Vertikális metszetek a WRF modell alapján 2022. január 10. 08 UTC-kor. **a. (bal felső):** A metszetek vonala az Ancona-Pag-Bihács-Daruvár vonal mentén. **b. (jobb felső):** Szélsébség és szélzások. A lilás színek jelölik a legszelesebb, a fekete szín a szélszél területeket. A 2-3 km-es magasságban fújó viharos szél a Velebit-hegység lee oldalát követve, erősödve lecsapott az Adriára. **c. (bal alsó):** Relatív nedvességtartalom az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalaival. A luv oldalon még közel vízszintesen futó theta_E felületek a lee oldalon a hegyoldal követve közel függőleges irányúvá váltak. A lee oldalon megindult a kiszáradás. **d. (jobb alsó):** Szél és vertikális sebesség. A kékes színek jelölik a leáramlást, a sárgás színek a feláramlást. A Velebit-hegységre rásimult a leáramlási csatorna, az Adria felett kevesebb, a szárazföld felett több volt a hullám.



6. ábra. Vertikális metszetek a WRF modell alapján 2022. január 11. 05 UTC-kor. **a. (bal felső):** Metszetek vonala az Ancona-Pag-Bihács-Daruvár vonal mentén. **b. (jobb felső):** Szélsébség és szélzások. A lilás színek jelölik a legszelesebb, a fekete szín a szélszél területeket. Tovább erősödött a bóra, a Velebit-hegység lábánál alakult ki a legnagyobb, 125 km/h körüli szélsébség. **c. (bal alsó):** Relatív nedvességtartalom az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalaival. Tovább nőtt a gradiens, és ez a nagy gradiens még inkább ráhúzódott a hegyre. **d. (jobb alsó):** Szél és vertikális sebesség. A kékes színek jelölik a leáramlást, a sárgás színek a feláramlást. A keskeny leáramlási csatorna továbbra is simult a hegyoldalra, a tenger felé haladva hamar megszűntek a hullámok.

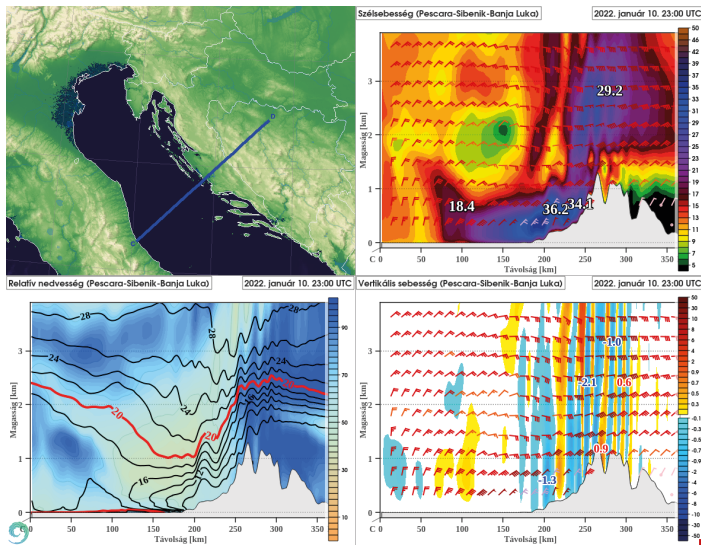
azaz kb. 4 km-ig terjedtek ki a hegység által kiváltott hullámok. A leáramlás nem volt teljesen homogén, Pag szigete indukált egy másodlagos feláramlást is az erősebb, tenger feletti feláramlási csatorna előtt. Megfigyelhető, hogy ezen a helyen a luv oldalon sokkal több a hullám, a lee oldalra érve a harmadik fel-le áramlási csatornát követően a hidraulikus ugrással a hullámok megszűntek. A legerősebb leáramlási csatornában 6 m/s-ot elérő vertikális sebesség alakult ki.

Az ekvivalens potenciális hőmérséklet gradiensének további jelentős növekedésével, a lee oldal egyre szárazabbá válásával a bóra tovább erősödött január 10-én, és 11-én hajnalra megváltozott a szerkezete. Ekkorra a hegyoldal magasabb része helyett kifejezetten a hegy lábához koncentrált a legnagyobb, orkán erősgű szél, tipikus lejtővihar jött létre (6.b ábra). A tenger közepe felé haladva fokozatosan, gyorsan gyengült a szél. Az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalai tovább sűrűsödtek, még jobban ráhúzódott az áramlás a hegyre (6.c ábra). Kb. 5 km-es távolságon belül a közel függőleges izovonalak mentén több, mint 15 °C-os gradiens jött létre az ekvivalens potenciális hőmérsékletben a száraz és nedves légtömeg határán. Ez a gradiens alacsonyabb szintre is húzódott, elősegítve, hogy a hidraulikus ugrás csak a hegy lábát követően történjen meg, ott jöjjön létre a szélmaximum. A hullámszerkezetben, a vertikális áramok tekintetében jelentős változás nem történt az eltelt közel egy nap alatt (6.d ábra).

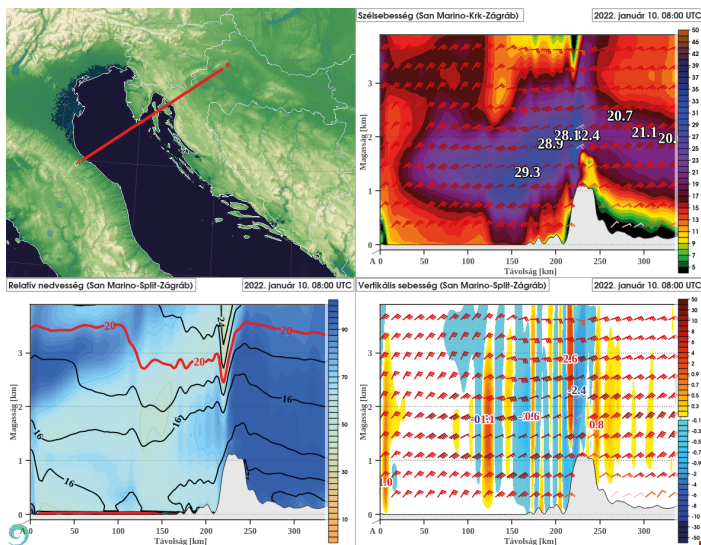
Lankás hegyoldali lejtővihar jettel

A következő vizsgált metszet a 7.a ábrán kék színnel jelölt Pescara–Šibenik–Banja Luka vonal, ami Zára és Split között, Šibenik térségében metszi a partvonalat és a Dinári-hegységet. Egy lankásabb, kevésbé meredek hegyoldal, így itt más formában jelentkezett a bóra, mint a Velebit-hegységnél. Ezen a területen a bóra lecsapását követően a szélmező szerkezete végig viszonylag homogén volt, csak a szélerősségben történtek nagyobb változások.

A szél a hegység luv oldalán itt is elfűjt a nagy



7. ábra. Vertikális metszetek a WRF modell alapján 2022. január 10. 23 UTC-kor. **a. (bal felső):** A metszetek vonala a Pescara-Sibenik-Banja Luka vonal mentén. **b. (jobb felső):** Szélsebesség és szélzászlók. A lilás színek jelölik a legszelesebb, a fekete szín a szélcsendes területeket. A lejtővihar a kevésbé meredek hegyoldalon egyenletesebb szélmezővel és tenger feletti jettel jelentkezett. **c. (bal alsó):** Relatív nedvességtartalom az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalaival. A thetaE felületek a lee oldalra simulva beszakadtak, azonban nagy gradiensnövekedés nem látható. **d. (jobb alsó):** Szél és vertikális sebesség. A kékes színek jelölik a leáramlást, a sárgás színek a feláramlást. A lee oldalon is sok hullám alakult ki, több gyengébb fel- és leáramlás jött létre.



8. ábra. Vertikális metszetek a WRF modell alapján 2022. január 10. 08 UTC-kor. **a. (bal felső):** A metszetek vonala a San-Marino-Krk-Zágráb vonal mentén. **b. (jobb felső):** Szélsebesség és szélzászlók. A lilás színek jelölik a legszelesebb, a fekete szín a szélcsendes területeket. Két ágra szakadt a bóra: egy rásimult a hegy felső részére, egy elérte a nyílt tengert. **c. (bal alsó):** Relatív nedvességtartalom az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalaival. A hegység felett egy markáns beszakadás kezdődik, de a tenger felett is határozott törés, süllyedés figyelhető meg a thetaE felületekben. **d. (jobb alsó):** Szél és vertikális sebesség. A kékes színek jelölik a leáramlást, a sárgás színek a feláramlást. Sűrű hullámszerkezet alakult ki a hegyoldaltól a tenger közepéig, a legintenzívebb le- és feláramlás viszont még csak a hegy felső részére terjedt ki.

gradiensű thetaE felület felett, miközben alatta közel szélcsend volt. A lee oldalon a domborzatot követve lecsapott a hegyoldalra és a tengerpartra, mindez azonban viszonylag egyenletesen történt, nem koncentrált kiemelten a legnagyobb szél-erősség a hegy felső részéhez vagy éppen a hegy lábához (7.b ábra). A leghevesebb, 25 m/s-ot meghaladó szélesebb, közel 1 km magasságú zóna a hegygerinctől 100-150 km-re benyúlt a tenger fölé, kialakult a jet. A legerősebb szélesebb a WRF modellben a partnál jelentkezett, ahol 130 km/h-s szélökés is megfigyelhető volt. A jet Olaszországig nem ért el, az Adriai-tenger közepén egy feláramlási csatornával végződött. Ebben az esetben tehát az áramlás csak kevésbé húzódtott rá a hegyoldalra, a hidraulikus ugrás csak az Adriai-tenger közepén történt meg.

Ez a megjelenés jól magyarázható az ekvivalens potenciális hőmérsékleti metszettel. A luv oldalon közel vízszintes izovonalak a lee oldalra érve nagy szögben megtörték és simultak a hegyoldalra, azonban nem váltak közel függőleges irányúvá, és a gradiensük sem nőtt jelentősen a luv oldalról a lee oldalra érve, csak a már meglévő gradiens húzódtott rá a domborzatra (7.c ábra). A relatív nedvesség profiljában jól elkülönül a lee oldali száraz és a luv oldali nedves légtömeg, határukon a hegy gerince felett azonban nem éles, hanem fokozatos átmenet figyelhető meg.

Ezen a helyen nem alakultak ki nagy vertikális sebességek, ellentétben például a Velebit-hegység térségével. A legnagyobb leáramlások 2 m/s körüliek voltak, a feláramlások pedig ezt a sebességet sem érték el. Kialakult azonban egy sűrűbb, sok fel- és leáramlási csatornából álló hullámszerkezet nem csak a luv, hanem a lee oldalon is, a vertikális áramok kiterjedése pedig elérte a 4 km-es tengerszint feletti magasságot (7.d ábra). A tengeri jet az Adriai-tenger közepén megfigyelhető feláramlásig tartott.

Meredek hegyoldal tagolt partvidékkel, tenger feletti jettel

A harmadik vizsgált metszet a 8.a és 9.a ábrákon piros színnel jelölt San Marino-Krk-Zágráb metszet. Ezen a területen a legváltozatosabb a domborzat, itt alakult ki a legösszetettebb szer-

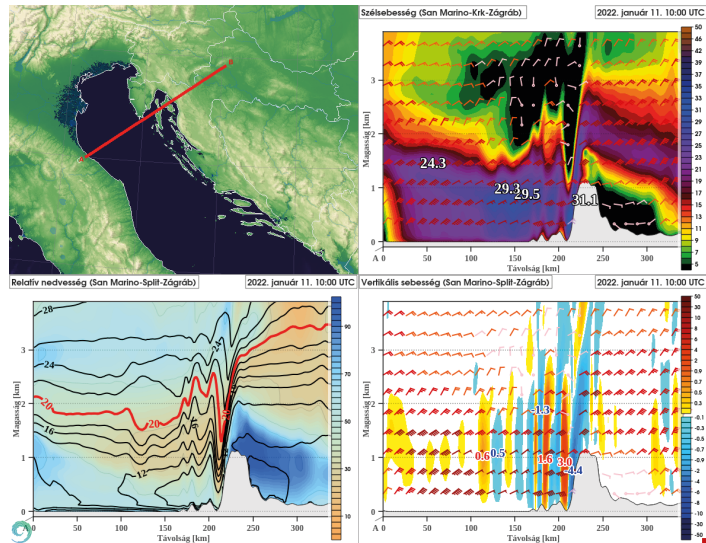
kezetű bőra a három hely közül, ami az időszak során is jelentős változáson ment át, ellentétben például a lankás, tagolatlan partvonallal Šibenik térségében. Ez a metszet Fiume közelében, tőle kissé délre metszi a partvonalat és a Dinári-hegységet, Krk szigetén áthaladva.

Ezen a szigetekkel (Krk, Rab) tagolt területen jelentős eltérés az előző két esettel szemben, hogy a bórának két ága is volt. Az egyik a már bemutatott módon követte a hegyoldalt (mint a Velebit-hegységénél), a kezdeti időszakban azonban nem csapott le a hegy lábánál. Hol megközelítette azt, hol eltávolodott tőle, de nem érte el a Balkán-félsziget és Krk szigete közötti területet, jellemzően csak a hegyoldal felső tartományát érintette (8.b ábra). A második ág nem követte a hegyoldalt, hanem átbukott a Dinári-hegység felett és anélkül, hogy rásimult volna a domborzatra, csak a nyílt tengerrel érte el a felszín, miközben a szigeteken jóval gyengébb volt a szél. A legnagyobb szélességek az 1–3 km-es magasságban jelentkeztek, így még az Adriai-tenger felett sem beszélhetünk ekkor kifejezett lecsapásról.

A szélmező szerkezete ezúttal is szorosan összefügg az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalaival. A hegyre simuló ágat magyarázza a 2–4 km-es magasságban az izovonalakban történő hirtelen törés a hegygerinc felett, a Velebit-hegységhez hasonlóan. Mivel azonban ez a nagy gradiensű rész még magasban volt, így nem tudta kifejteni a hatását a hegy lábánál, a bőra csak a magasabb részekben alakult ki. A második, az Adriai-tengert elérő ághoz is tartozik egy kisebb törés az izovonalakban a tenger felett, ami jól magyarázza azt a szélmaximumot. Megfigyelhető továbbá, hogy a szigetek felett nagyon hullámossá vált az ekvivalens potenciális hőmérsékleti mező, nagy hatással voltak az áramlás szerkezetére a kisebb orografikus akadályok is (8.c ábra). A szél két különböző ágát a relatív nedvességben látható, egymástól jól elkülönülő két kiszáradás is mutatja.

A hegy lábáig kiterjedő leáramlás és hozzá tartozó feláramlás ebben a kezdeti szakaszban még nem alakult ki, a hegycsúcs közeléből indultak a vertikális áramok (8.d ábra). A tenger irányába többek között a félszigetek, szigetek hatására is igen sűrű hullámszerkezet figyelhető meg.

A bőra a következő órákban fokozatosan fejlő-



9. ábra. Vertikális metszetek a WRF modell alapján 2022. január 11. 10 UTC-kor. **a. (bal felső):** A metszetek vonala a San-Marino-Krk-Zágráb vonal mentén. **b. (jobb felső):** Szélesség és szélzások. A lilás színek jelölik a legszelesebb, a fekete szín a szélcsendes területeket. Lecsapott a bőra a partvidékre és az Adriai-tengerre is, egészen az olasz partokig. **c. (bal alsó):** Relatív nedvességtartalom az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalaival. Megfigyelhető a két szakadás a hegyoldalnál és a tenger felett, de nagy gradiens ezek közül csak a hegyoldal esetében van. **d. (jobb alsó):** Szél és vertikális sebesség. A kékes színek jelölik a leáramlást, a sárgás színek a feláramlást. Jól látható a hullámszerkezet az olasz partokig a lee oldali erősebb vertikális áramoktól egészen a gyengébb, Adriai-tenger feletti fel- és leáramlásokig.

dött, erősödött, egy nappal később, január 11-ére pedig mindkét említett ága lecsapott a tengerszint közelében is (9.b ábra). Az első, hegyoldalra rásimuló ág elérte a hegy alját, 100 km/h-t jelentősen meghaladó szélességgel. Az Adriai-tenger feletti ág is hevesse vált, egyes időpontokban a 130 km/h-t is meghaladta benne a szélesség, emellett pedig a térbeli kiterjedése is változott: a kialakult jet elérte az Appennini-félszigetet. Az Adriai-tenger felett a viharos, erősen viharos vagy éppen orkán erejű szeles zóna 1,5–2 km-es magasságig terjedt ki, míg a hegyoldalnál egy keskeny sávba szűkült az áramlás. Érdeemes még megemlíteni, hogy a szigetek lee oldalán is kialakultak lokális szélmaximumok.

Az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalai ezen a helyen, ebben az időszakban mutatták a legváltozatosabb képet. Jól látható, hogy az első két esetben (6. és 7. ábra) bemutatott típus kombinációja jött létre a szigetekkel tagolt meredek hegyoldalnál (9.c ábra). Az áramlás a bőra felett

állapotában teljesen rásimult a hegyre, a közel függőlegessé váló θ_{E} felület mentén pár km-en belül 10 fok feletti ekvivalens potenciális hőmérséklet-különbségek alakultak ki. Az egy nappal korábbi időponthoz képest (8.c ábra) a gradiens igen nagy mértékben nőtt, és jóval alacsonyabb szintre húzódott. Az Adriai-tenger felett is megfigyelhető az izovonalak nagyobb mértékű törése, azonban besűrűsödés ott nem történt a luv oldali gradiensekhez képest. A két hely között sem vízszintesek az izovonalak, a szigetek hatása akár még a 3–4 km-es magasságban is hullámokat eredményezett, a megközelítőleg az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalait követő áramlás pedig így a szigetek lee oldalán is erősebb volt a luv oldalhoz képest.

A vertikális áramokat vizsgálva megállapítható, hogy ezen a helyen a luv oldalon kevesebb, a lee oldalon viszont több hullám alakult ki (9.d ábra). A hegyoldal egy erős, 4 m/s vertikális sebességet meghaladó leáramlás jött létre, amit a szigetek luv oldalán feláramlások, lee oldalukon újabb, gyengébb leáramlások követtek. Ez a hullámszerkezet még hosszan megmaradt az Adriai-tenger felett is, és az olasz partoknál is kimutatható volt.

Lejtővihar a Bakonyban

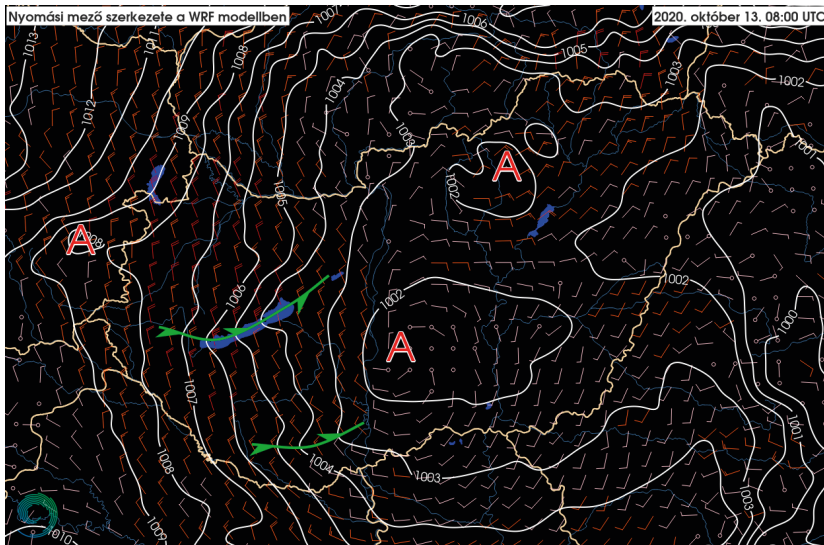
Látható, hogy a Dinári-hegység és az Adriai-tenger térségében a kedvező meteorológiai feltételek fennállása esetén változatos formában és erősséggel jelenik meg a bórá a különböző helyeken, amit nagyban befolyásol az orográfia és a partvonal tagoltsága. Meredek hegyoldalak esetén jellemzően lecsap a hegy lábánál, míg a lankásabb hegyoldal vagy félszigetekkel tagolt part esetén jellemzőbb az egyenletesebb szélmező, akár hosszasan a tenger fölé nyúló szélcsatornákkal.

A bórához hasonló lejtőviharok nem feltétlenül csak a Dinári-hegységhez hasonló, 1000 méternél magasabb hegyeknél jöhetnek létre, hanem akár dombvidékeken is kialakulhat olyan speciális légköri állapot, ami lehetővé teszi a kialakulásukat. Bizonyos időjárási helyzetekben (a WRF modelleredmények alapján) Magyarországon is előfordulhat lejtővihar. Erre a legalkalmasabb hely a Bakony, ahol a Dunántúli-középhegységen

átbukó szél a dombság lee oldalán lecsap a Balatonra is. A balatoni időjárási előrejelzések szempontjából fontos minél pontosabban megismerni a Bakonyban kialakuló hullámok okozta szélerősödések, lejtőviharok sajátosságait. Ezek közé tartozik, hogy milyen időjárási helyzetekben, milyen izobárikus mező esetén tudnak kialakulni, vagy hogy az orografikus hullámok milyen mértékben erősítik fel az alapáramlást a Balaton felett. A lejtőviharok kialakulásának megismerése különösen fontos az olyan időjárási helyzetek szempontjából, amikor nem egyértelmű, hogy lesz viharos szél a Balatonnál, ezért akár a kiadott viharjelzés is függhet tőle. A Balaton, mint nyílt, nagy kiterjedésű vízfelszín esetében általánosan jellemző, hogy nagyobb a szél sebessége, mint a környező területeken. A sík vízfelszín ezen hatása megnehezíti a lejtőviharok felismerését, ugyanis messze nem minden időjárási helyzetben van lejtővihar, amikor a Balatonnál fordulnak elő a legnagyobb széllelkések országszerte.

A folytatásban bemutatásra kerül egy olyan időjárási helyzet, amikor a Bakonyban (és a Mecsekben is) lejtőviharra utaló állapotot számított a WRF modell, amely órákig, de akár több mint egy napig is fennállhatott és mérések, valamint megfigyelések is alátámasztják a jelenséget. Az időjárási helyzet és a kialakuló orografikus állóhullámok már egy korábbi tanulmányban bemutatásra kerültek [1], ezúttal azonban kifejezetten a lejtővihar jelenségének elemzésével foglalkozunk.

2020. október 12–13-án egy ciklon helyezkedett el Közép-Európa felett, ez alakította a térség időjárását. A ciklon hátoldalán viharos északi, északnyugati szél fűjt. Október 13-ára a ciklon középpontja Erdély fölé került, de az Alföldön is kialakult egy lokális alacsony légnyomású centrum, aminek a hátoldalán a Dunántúlon sűrűn helyezkedtek el a közel észak-déli kifutású, ciklonálisan görbülő izobárok. Az ilyen nyomási mező kialakulásához rendre arra van szükség, hogy egy ciklon helyezkedjen el a Dunától keletre eső területen. A hidegfront hátoldali helyzetek ettől eltérőek, ugyanis azokban az esetekben más izobárikus mező alakul ki. Így az adriai bórához hasonlóan a bakonyi lejtővihar számára sem a markáns hidegfrontok jelentik az ideális kiala-



10. ábra. Légnyomás (fehér vonalak) és 10 méteres szélsébség 2020. október 13-án 08 UTC-kor a WRF modell alapján. A zöld konvergencia-vonalak jelölik a dombvidékek déli oldalán kialakult teknőket.

kulási feltételt (ettől függetlenül természetesen ez is egy hidegadvekciónak felelt meg). 2020. október 12–13-án az észak-déli kifutású, az orográfiára és a Balatonra közel merőleges izobárok a domborzati akadályt elérve megtörtek, teknő alakult ki mind a Bakonytól délre (a Balaton felett), mind a Mecsektől délre (10. ábra). Ezek a lee oldali teknők szintén hasonlítanak a bórá esetében tapasztalt, Adriai-tenger feletti teknőhöz, a szerepük is hasonló: lokális gradiens növekedést idéznek elő, ami a lejtővihar feltétele.

A lejtővihar már október 12-én is kialakult a modelleredmények alapján, október 13-án azonban több mérés, felvétel is alátámasztotta létrejöttét, melyeket az [1] tanulmány mutat be. A markáns hullámok, Balaton feletti le- és feláramlási zóna jelenlétét a Balaton feletti állóhullám mutatta, amelyet „megfestett” az órákon át egy helyben kialakuló felhőzet. A szélmerések pedig magára a lejtőviharra is utaltak: a Balaton északi partján jóval erősebb szél fújt, mint a déli parton, emellett a tó közepén elhelyezett meteorológiai mérőcölöpön rövid időre még szembe is fordult a szélirány az erős, viharos északias alapáramlással. A Balatonnál északi szeles helyzetben legtöbbször a déli parton nagyobb a szél, így az északi parton mért jelentősen nagyobb

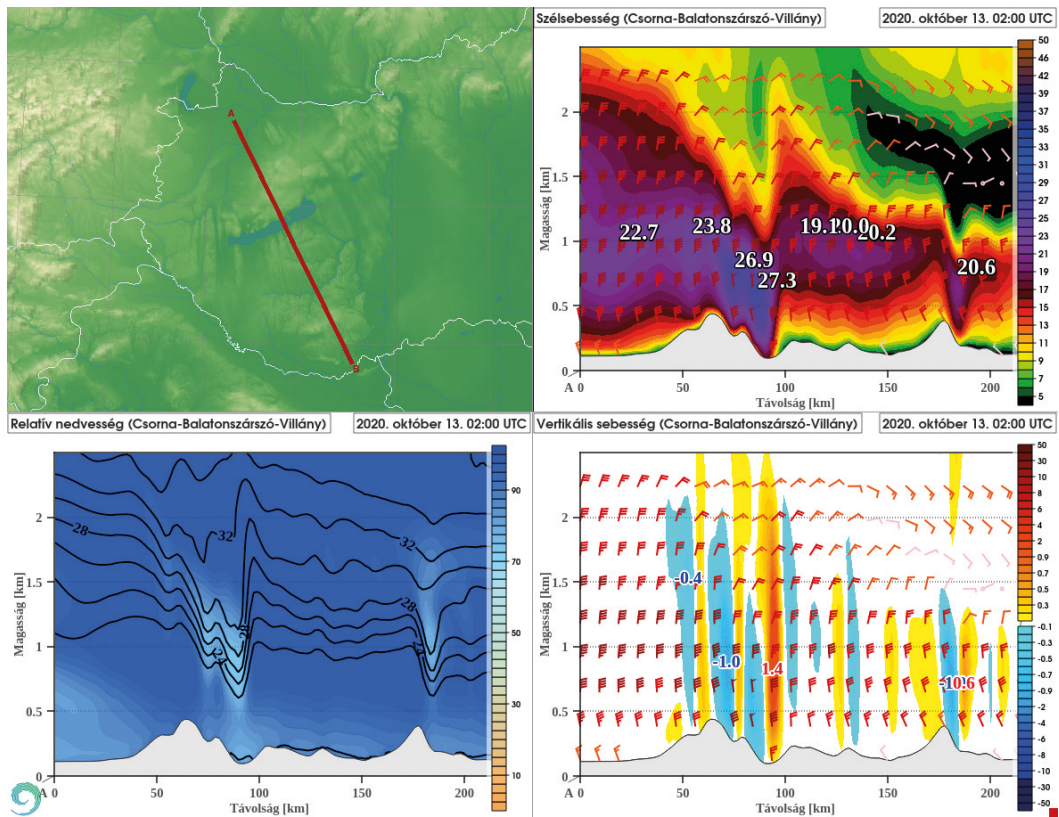
szellőkések utalhatnak lejtővihar kialakulására.

A WRF modell szerint 2020. október 13-ára lejtővihar alakulhatott ki a Bakonyban, amit egy északnyugat-délkelet irányú, a Bakonyon és a Balatonon keresztül húzódó metszet mentén vizsgáltunk (11.a ábra). A luv oldalon a viharos áramlás követte a domborzatot, a lee oldalon viszont ráhúzódott a felszínre és lecsapott a Bakony déli oldalán, így a Balaton északi részén is (11.b ábra). A Balaton déli felében, illetve tőle délre a felszín közelében nem alakult ki viharos szél, egészen a Mecsekig. A Mecsekben a bakonyinál jóval gyengébb formában, jellemzően csak a magasabban fekvő területeket érintve, de szintén kialakult a lejtővihar jelensége.

A vizsgált metszet a Balaton középső medencéjén húzódik keresztül, de nagyon hasonló lejtővihar figyelhető meg a keleti medencében is. A nyugati medencében, amitől északra már alacsonyabb a domborzat, a lejtővihar kialakulása már nem valószínű, helyette a Bakony és a Keszthelyi-hegység közötti völgyekben becsorgó, vagy éppen betörő szél teszi sokszor kiszámíthatatlanná a szélviszonyokat.

Az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalaiban az adriai bórához nagyon hasonló beszakadás alakult ki a lee oldalon a Bakony és a Mecsek esetében is (11.c ábra). A gradiensek jelentősen megnöttek, ami az izovonalakat követő áramlás felgyorsulását eredményezte. Borult idő jellemezte a vizsgált időszakot, 100% közelében alakult a relatív nedvesség a troposzféra alsó részén, a lee oldali légréteg kiszáradása azonban ezúttal is határozottan megtörtént a Bakony és a Mecsek dél oldalán is.

Az orográfia hatására kialakult hullámokhoz 1–2 km magas vertikális áramok társultak (11.d ábra). A Bakony hatására létrejött hullámok a Mecsekig értek, ahol az újabb domborzati



11. ábra. Vertikális metszetek a WRF modell alapján 2020. október 13. 02 UTC-kor. **a. (bal felső):** A metszetek vonala a Csorna - Balatonszárszó - Villány vonal mentén. **b. (jobb felső):** Szélsebesség és szélzások. A lilás színek jelölik a legszelesebb, a fekete szín a szélcsendes területeket. A Bakonyban a bórához nagyon hasonló szél figyelhető meg a lee oldalon és a Mecsekben is kialakulhatott a lejtővihar. **c. (bal alsó):** Relatív nedveségtartalom az ekvivalens potenciális hőmérséklet izovonalával. A két lee oldali szélerősödéshez a bórához hasonló nagy törés társul az izovonalakban, az áramlási csatornák részükültek a hegyoldalra. **d. (jobb alsó):** Szél és vertikális sebesség. A kék színek jelölik a leáramlást, a sárgás színek a feláramlást. A Bakonytól a Mecsekig jól látható a kialakult hullámszerkezet, a legerősebb le-, majd feláramlásokkal a dombvidékek déli oldalán.

akadály újabb hullámokat generált. A két dombvidék déli oldalán a legnagyobb le- és feláramlási sebességek 1,0–1,5 m/s körül alakultak (a lankásabb hegyoldalnál kialakult adriai bórá esetében sem voltak lényegesen nagyobbak). A Balatonnál a leáramlás a tó közepe körül váltott feláramlásba, az ezen a határon kialakult állóhullám pedig a nedves alsó légkörben folyamatos felhőképződést eredményezett [2].

Összefoglalás

Lejtőviharok a Föld számos pontján kialakulnak az orográfia hatására a megfelelő meteorológiai körülmények között. A hegységek lee oldalán alábukó szelet gyakran igen heves széllokécek

kísérhetik. A lejtőviharok csoportjába tartozik az adriai bórá is. A Dinári-hegységéből az Adriai-tenger partjára lecsapó szél kialakulásában a termikus hatások csak másodlagos szerepet játszanak, elsősorban a dinamika alakítja ki őket. A bórá a téli félévben gyakoribb, akkor ugyanis jóval többször fordul elő a hullámok kialakulásához szükséges stabil rétegződés. A bórá megjelenését, szerkezetét nagyban befolyásolja a domborzat, elsősorban annak meredeksége, emellett a partvonal tagoltsága is fontos tényező. Az igen meredek hegyoldalak esetén már a hegy lábánál, közel a szélmaximumhoz bekövetkezhet a hidraulikus ugrás jelensége, amikor a lejtő aljától a tenger felé távolodva hirtelen nagy mértékben csökken a szélsebesség, egy feláramlási csatornában vég-

zódik a rendszer. A lankásabb hegyoldalakon vagy jól tagolt partvonal mentén ellenben a tengerbe hosszan benyúló, akár az olasz partokat is elérő szélcsatornák, jetek alakulnak ki. Bórához hasonló lejtővihar akár hazánkban is létrejöhet pl. a Bakony vagy a Mecsek déli oldalán, amit megfigyelések és a WRF modelleredmények is alátámasztanak. Ezek a lejtőviharok a legerősebb széllokékat a Balatonnál okozhatják, ezért további vizsgálatuk fontos a balatoni előrejelzések, viharjelzések szempontjából is. A bakonyi lejtőviharok vizsgálata igazolni látszik azt az elképzelést, hogy a földtörténeti múltban a szélérózió által a Balaton medencéjének kialakításában is szerepük lehetett.

Irodalom

- Belussic, D. and Klaić, Z. B., 2006: Mesoscale dynamics, structure and predictability of a severe Adriatic bora case. *Meteorol. Z.* 15, 157–168
- Bervida, M., Stanic, S., Bergant, K. and Strajnar, B., 2019: Near-Ground Profile of Bora Wind Speed at Razdrto, Slovenia. *Atmosphere*, 10 (10), 601. <https://doi.org/10.3390/atmos10100601>
- Dorman, C. E., Carniel, S., Cavaleri, L., Sclavo, M., Chiggiato, J., and co-authors., 2007: February 2003 marine atmospheric conditions and the bora over the northern Adriatic. *J. Geophys. Res.* 112, C03S03. doi:10.1029/2005JC003134.
- Durran, D. R., 1986: Another look at downslope windstorms. Part I: The development of analogs to supercritical flow in infinitely deep continuously stratified fluid. *J. Atmos. Sci.* 43, 2527–2543.
- Enger, L. and Grisogono, B., 1998. The response of bora-type flow to sea surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 124, 1227–1244.
- Grisogono, B. and Belussic, D., 2009: A review of recent advances in understanding the meso and microscale properties of the severe Bora wind. *Dyn. Met. and Oceanography*, 61, 1–16. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00369.x
- Grubisic, V. and Orlic, M., 2007. Early observations of rotor clouds by Andrija Mohorovicic. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 88, 693–700.
- Heimann, D. 2001. A model-based wind climatology of the eastern Adriatic coast. *Meteorol. Z.* 10, 5–16.
- Holton, J. R., 1992: An Introduction to Dynamic Meteorology. *Third edition. Academic Press*, 282–287.
- Jurcec, V., 1981: On Mesoscale Characteristics of Bora Conditions in Yugoslavia. (In: Liljequist, G. H. (eds) Weather and Weather Maps.) Contributions to Current Research in Geophysics. Birkhäuser, Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-5148-0_15
- Klemp, J. B. and Lilly, D. K., 1975: The dynamics of wave-induced downslope winds. *J. Atmos. Sci.* 32, 320–339.
- Kusaka, H. and Fudeyasu, H., 2017: Review of downslope windstorms in Japan. *Wind and Structures*, 24, 637–656. DOI: <https://doi.org/10.12989/was.2017.24.6.637>
- Mercer, A. E., Richman, M. B. and Bluestein, H. B., 2008: Statistical Modeling of Downslope Windstorms in Boulder, Colorado. *Weath. and Forec.*, 23, 1176–1194.
- Norte, F. A., Ulke, A. G., Simonelli, S. C. and Viale, M., 2008: The severe zonda wind event of 11 July 2006 east of the Andes Cordillera (Argentina): a case study using the BRAMS model. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 102, 1–14.
- Oard, M. J., 1993. A method for predicting Chinook winds east of the Montana Rockies. *Weath. Forec.*, 8, 166–180.
- Ólafsson, H. and Ágústsson H., 2007: The Freysnes downslope windstorm. *poje*, 16, 123–130.
- Poje, D. 1992. Wind persistence in Croatia. *Int. J. Clim.* 12, 569–586.
- Shestakova, A. A., Moiseenko, K. B. and Toropov, P. A., 2019: Hydraulic and Wave Aspects of Novorossiysk Bora. (In: Vilibic, I., Horvath, K., Palau, J.: Meteorology and Climatology of the Mediterranean and Black Seas.) Pageoph Topical Volumes. Birkhäuser, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11958-4_3
- Simon A., Horváth Á. and Vivoda J., 2006: Case study and numerical simulations of the November 19, 2004 severe windstorm in Central Europe, *Időjárás*, 110, 2006, 91–123.
- Smith, R. B. and Sun, J., 1987: Generalized hydraulic solutions pertaining to severe downslope winds. *J. Atmos. Sci.* 44, 2934–2939.
- Tüskés, B., 2010: Főnszerű hatások detektálása a Kárpát-medencében MODIS műholdképek és meteorológiai adatok alapján 2005–2010 téli hónapjaiban. *Diplomamunka, ELTE*. (Témavezetők: Tímár, G.; Barcza, Z.)

Hivatkozások

- [1] [ps://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2920&hir=Allo_leghullam_a_Balaton_felett_miert_fuj_erosebb_szel_a_Balatonnal_hidegfront_eseten?](https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2920&hir=Allo_leghullam_a_Balaton_felett_miert_fuj_erosebb_szel_a_Balatonnal_hidegfront_eseten?)
- [2] https://glossary.ametsoc.org/wiki/Downslope_windstorm