



Szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtőszél a Bakony-Balaton térségben

Kurcsics Máté, Geresdi István, Horváth Ákos

HungaroMet Nonprofit Zrt., Siófoki Viharjelző Observatórium, kurcsics.m@met.hu

DOI:10.56474/legkor.2024.2.3

A Balaton vízfelülete, valamint a tőle északra húzódó Bakony nagy mértékben képes módosítani az időjárási elemek alakulását: befolyásolják a levegő hőmérsékletét, a szélviszonyokat, de még a felhőzetet és a csapadékhullást is. A balatoni hajósok jól ismerik a Bakony völgyeiből az esti órákban fújó lejtőszélet. Van azonban a Bakonynak egy ennél jóval markánsabb, ugyanakkor kevésbé ismert, a balatoni szélmezőt módosító hatása is. Egy olyan lejtőszél, amelyet szinoptikus skálájú folyamatok alakítanak ki, akár csak az adriai bóra vagy az alpi fön esetében. A Bakonynak ezen hatása a Balatonnál akár 30-40 km/h-val is megnövelheti a szélökések nagyságát, így fontos figyelembe venni ezt a tényezőt a tavi viharjelzések kiadásakor. Cikkünkben a szinoptikusan vezérelt bakonyi lejtőszélet mutatjuk be.

Synoptically-forced downslope wind in the Bakony-Balaton region

The water surface of Lake Balaton, as well as Bakony Mountains to the north of it, can significantly modify the characteristics of weather: they influence the air temperature, wind speed and direction, furthermore the cloud cover and precipitation. Sailors know well the downslope wind blowing from the valleys of Bakony during the evening hours. Bakony also has a more significant, but less well-known effect on the wind field at the Lake: a downslope wind forced by synoptic-scale processes, just like the Adriatic bora or the Alpine foehn. This effect of Bakony at Lake Balaton can increase the speed of wind gusts by 30-40 km/h, so it is important to take this factor into account when issuing lake storm warnings. In this paper results about the synoptically forced downslope wind of Bakony Mountains are presented.

A Balaton környékének időjárása gyakran jelentősen eltér a nagyobb térségre jellemző időjárási viszonyoktól. E mögött számos ok húzódhat: a legfontosabbak a terület nyíltsága, a környezetétől eltérő hőmérsékletű víztömeg és a Balatontól északra húzódó közephegység, a Bakony. A domborzat hatása nemcsak a néhány száz méteres kiterjedésű konvektív felhők esetében figyelhető meg, de a nagytérségű szélviszonyokat is módosítja. Vizsgálataink

szerint – összhangban korábbi kutatási eredményekkel – a Balatonnál hasonló lejtőszél alakulhat ki a Bakony miatt, mint a Kárpát-medence térségében jól ismert bóra és fön, vagy a kevésbé ismert, a Keleti-Kárpátokban kialakuló nemere és a Magas-Tátra lejtővihara, a halny.

A vizsgálatokat a hazai földfelszíni szinoptikus mérőhálózat, valamint radar és műhold mérések adatainak kiértékelésével, továbbá a WRF numerikus modellel

végzett kísérletekre alapozva végeztük el. A Balatonnál működő igen sűrű szélmérő hálózat igazolta a WRF modell eredményeit, jellegzetes lejtővihar-szerű struktúrák voltak megfigyelhetők egyes időjárási helyzetekben. A vizsgálataink bizonyítják, hogy erős lejtőszél kialakulásához nem feltétlenül szükségesek 1000 méteres magasságot meghaladó hegyláncok, kedvező földrajzi helyzet és megfelelő meteorológiai körülmények esetén már egy 400–500 méteres átlagos magasságú középhegység is a jelenség kialakulását okozhatja. Ez a lejtőszél természetesen nem lesz olyan erősségű, mint például egy heves bóra, azonban a balatoni előrejelzések és viharjelzések esetében, melyek közvetlenül életvédelmi célokat szolgálnak, ezen domborzat okozta szélerősítő hatás pontosabb ismerete elengedhetetlen.

1. A légáramlás módosulása a Balaton hatására

A dunántúli területekre általában jellemző nagyskálájú áramlást a Balaton mezoléptékű skálán jelentősen képes módosítani. Ezen hatások ismerete és figyelembevétele pedig alapvető fontosságú az élet- és vagyoni védelmi célokat szolgáló tavi viharjelzésben. Nyugodt, anticiklonális időjárási helyzetekben a helyi hatások érvényesülnek, és kialakul a Balaton sajátos, napszaktól függő szélrendszere, a parti cirkuláció. Határozott irányú és erősségű szinoptikus alapáramlás esetén pedig gyakran tapasztalható, hogy a vízparton és a tó felett erősebb a szél, mint a környező területeken. Ez több tényező együttes hatására vezethető vissza:

Szélnek kitettség, kicsi súrlódás

A Balaton vízfelülete felett az érdesség értelem szerűen kisebb, mint a környező erdős, dombos területeken. Így a felszíni érdesség szélesebb mérséklő hatása a tó felett érvényesül a legkevésbé. Sőt, a Balatont keresztirányban végigfújó szelek esetén gyorsulás tapasztalható, így a délnyugati szél a Balaton keleti medencéjében, míg az északkeleti a nyugati medencében lesz általában a legerősebb. Ebből tehát az is következik, hogy a fent említett szélirányoknál a Balaton nyugati vagy keleti felére különös figyelmet kell fordítani, ugyanis ott érheti el az áramlás a legnagyobb eséllyel a viharos fokozatot (Ambrózy *et al.*, 1963). De ez az egyik oka annak is, hogy északias szél esetén a szélesebb a déli part közelében általában nagyobb, mint az északianál.

Eltérő hőmérséklet

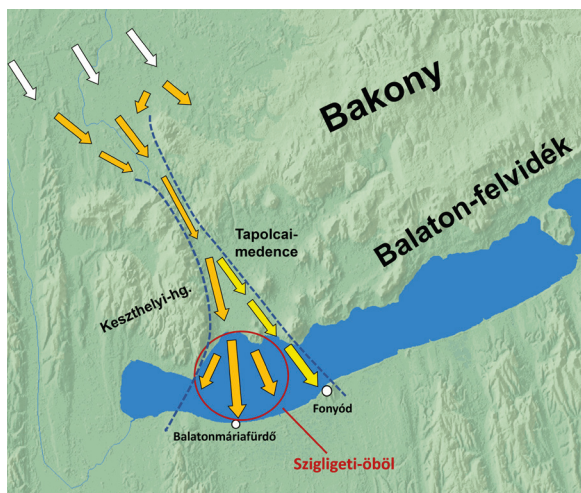
A vízhőmérséklet is összetett módon képes befolyásolni a balatoni szélviszonyokat. A parti cirkuláció jelensége jól ismert: a víznek nagyobb a fajhője, mint a szárazföldnek, így lassabban változik a hőmérséklete. Emiatt általában a víz felett a levegő nappal hűvösebb (kialakul az ún. hideg kupola/dóm), éjszaka melegebb, mint a szárazföld felett. Ez azt eredményezi, hogy éjszaka lokális alacsonynyomás, nappal lokális magasnyomás alakul ki a tó felett, így a felszín közelében éjszaka a part felől a víz felé, nappal a víz felől a part felé fúj a tavi szél. Ez a hatás annyira jellegzetes és olyan jelentős, hogy a szinoptikus alapáramlást akár teljes mértékben képes felülírni. Tipikus példája ennek a meleg, délnyugati szeles időjárási helyzet. Ilyenkor a Dunántúlon már reggeltől megélnékül, megerősödik a délnyugati szél, a Balaton azonban kivételt képez: a víz felett csak a déli óráktól fordul délnyugati irányba és élénkül, erősödik meg határozottan a légáramlás. Előfordulhat azonban olyan eset is, hogy a Balaton nappal is melegebb a szárazföldnél, így még rá is erősít a szélre (Bartha, 1978). A meleg víz felett ugyanis labilisabb a rétegződés, ezáltal magasabb légköri szintekről is le tud keveredni a szél a felszín közelébe. Bár nappal is van erre több példa, a jelenség igazán éjszaka jellegzetes. A meleg Balaton felett csak egy gyengébb inverziós réteg alakul ki, miközben a szárazföld feletti inverziós réteg tetején általában erősödik a szél (éjszakai jet), vagy akár észrevétlenül egy gyengébb hidegfront is elérheti a Balatont. Az éjszakai jet és a gyengébb hidegfrontok a szárazföld feletti inverziót nem tudják áttörni, a Balaton felett azonban le tudnak keveredni a felszín közelébe, ezzel kiugróan nagy szelet okozva a víz felett. Egyes nyári éjszakákon a vízhőmérséklet és a domborzati hatások együttes eredménye lehet, hogy az országban csak egyetlen helyen, a Szigligeti-öbölben fúj erős szél, míg mindenhol másutt gyenge vagy mérsékelt az áramlás.

Domborzati hatások

A Kárpát-medence térségében a szélviszonyok alakulását nagyban befolyásolja a domborzat. A medencét nyugaton az Alpok, délnyugaton a Dinári-hegység határolja, észak és kelet felől pedig körülöleli a Kárpátok vonulata. Attól függően tud érvényre jutni a hegyek hatása, hogy a szinoptikus időjárási körülmények milyen irányú és erősségű szelet okoznak a közép-európai térségben. Amikor egy légtömeg egy domborzati akadályhoz ér, a légkör stabilitási viszonyainak függvényében több módon is folytathatja az útját:

- beleütközik a hegybe és a hágókon, völgyeken át felgyorsulva áramlik tovább;
- az akadály felett áramlik tovább, de nem okoz erősebb szelet a hegy túlsó lábánál;
- átáramlik az akadály felett, majd lecsap a túlsó, lee oldali hegyláb közelében.

Az északnyugat felől jövő légtömegek a légkör alacsonyabb rétegeiben elsősorban az Alpok és a Kárpátok között, a Dévényi-kapu térségében érkeznek a Kárpát-medence nyugati felébe. A medence keleti területeire már a Kárpátokat megkerülve, elsősorban a hegyvonulat hágóin (Vereckei-hágó, Tatár-hágó) át északkelet felől érkezik a szél a felszín közelében. A domborzat tehát a nagytérségű hatások okozta szelet becsatornázza, ezzel a Dunántúlon, így a Balaton térségében is a szélviharok elsősorban északnyugati, északi irányból alakulnak ki. Az északnyugat felől jövő frontok ráadásul a medencébe belépve, a domborzati akadályt leküzdve fel is gyorsulhatnak, megnehezítve ezzel az előrejelzésüket (Tánczer, 1961). Stabil légrétegződés mellett a Balatonnál is találunk példát becsatornázott szélre: a Keszthelyi-hegység és a Bakony közötti szélcsatornába, a Lesence-patak völgyébe szoruló áramlás jelentősen felgyorsulhat. A megerősödött szél a környezeténél melegebb Balaton felett le is keveredhet a magasból a felszín közelébe, kiugróan nagy szelet okozva a Szigligeti-öbölben (1. ábra).



1. ábra. Az északnyugati áramlás becsatornázódása a Keszthelyi-hegység és a Bakony között.

Az esetek többségében, amikor a magasban erősebb a szél vagy labilis a légrétegződés, akkor az áramló levegő könnyebben áthalad a hegyvonulat felett, így a szélcsatornáknak nincs nagyobb jelentősége. Különösen a labilis időjárási helyzetekben jellemző, hogy

a hegyvonulat még némi szélárnyékot is ad, csökkenti az átlagszelet, lökésessé téve ezzel az áramlást: alacsonyabb sebességű átlagszelekre rakódnak nagy széllekökészek.

Abban az esetben, amikor olyanok a stabilitási viszonyok, hogy a levegő éppen hogy képes az akadály felett átáramlani egy keskeny csatornába szűkülve, szükségszerűen gyorsulnia kell az áramlásnak. Egyes helyeken, megfelelő domborzati adottságok és meteorológiai körülmények között ez a hatás a hegyek lee oldalán szélviharokat okoz. Erre a típusra is több példát találunk a Kárpát-medence térségében. Ilyen az Adriai partvidék jellegzetes lejtővihara, a bóra, illetve az Alpok lábánál fújó fön. A lejtőviharokat nagy amplitúdójú, vertikálisan kiterjedt orografikus hullámok alakítják ki, melyek létrejöttét máig többféle elmélettel is magyarázzák. Jelen tanulmánynak nem célja ezek bemutatása, általánosságban azonban elmondható: ahhoz, hogy egy hegység lee oldalán hullámok alakuljanak ki, három légköri feltétel teljesülése szükséges (Ambrózy, 1970): az áramlás legyen merőleges a hegyvonulatra, a szélesebbé nőjön a magassággal, és kellően nagy értéket érjen el, továbbá a légkör stabil egyensúlyi állapotban legyen. Alapvető fontosságú a szélesebbé és a légköri stabilitási viszonyok egymáshoz viszonyított aránya is.

2. A bakonyi szél tudományos vizsgálatának a története

Nem csak a Kárpát-medencét körülölelő hegyek lábánál alakulhat ki bukószél, a medence belső területein is találkozhatunk vele. Erre különösen alkalmas lehet a Bakony-Balaton térség. Az itt kialakuló, a bórahoz vagy a nemeréhez több tulajdonságában is hasonlító szelekről, a domborzat keltette szélviharokról a hazai meteorológiai szakirodalomban kevés említés esik, pedig a Bakony igen fontos szerepét a Balatonra lecsapó szélviharok kialakulásában már a XX. század elején is ismerték, több korai vizsgálat is lejtővihar-szerű jelenségként írta le a bakonyi szelet.

A Balaton térségének a meteorológia területére is kiterjedő tudományos vizsgálata az 1890-es években kezdődött meg a Magyar Földrajzi Társaság Lóczy Lajos vezette Balaton-bizottságának köszönhetően. Már a kutatások kezdeti szakaszában a Bakony nagy szerepet tulajdonítottak a balatoni szélviszonyok alakításában (a valóságosnál is nagyobb, mivel az időjárási frontokat még nem ismerték; a Balatonra lecsapó északi szélviharok mögött is a Bakony hatását sejtették). Maga Lóczy Lajos földrajztudós például a Bakonyból lecsapó szélnek tulajdonította,

hogy a Balaton medre a földtörténet során fenn tudott maradni (Lóczy, 1913). Ezt a megállapítását frissebb geológiai vizsgálatok is igazolhatják (Sebe et al., 2011), melyek a Balaton medencéinek kialakulásában elsődleges szerepet tulajdonítanak a bakonyi szélnek. A Balaton kutatásában szintén nagy érdemeket szerzett Cholnoky Jenő, akit elsősorban természettudósként ismerünk, de a meteorológia területén végzett munkásságát mi sem mutatja jobban, mint hogy több éven át a Magyar Meteorológiai Társaság elnöke volt. Cholnoky a balatoni halászkötőtől átvett „bakonyi főszelel” kifejezéssel illette a Balaton északi szelét, és párhuzamot vont közte, illetve a bóra, a fön vagy éppen a misztrál között (Cholnoky, 1914). A bakonyi bukószél kialakulásának okát ugyan tévesen írta le, számos megfigyelése azonban helytállónak bizonyult. Pontosan megállapította, hogy a legnagyobb szélsébség nem a felszínen alakul ki (100–200 méteres magasságot állapított meg), illetve a szél legnagyobb sebességét nem a parton, hanem a Balaton közepén éri el (Cholnoky, 1936). Pontosan leírta az északi part mentén megfigyelhető adiabatikus kiszáradás jelenségét is.

A hazai csapadékvizonyokat vizsgálva megállapításra került, hogy a Balaton déli partvidékén kevesebb csapadék hullik a környező területekhez képest (Hajósy, 1952). Ennek okaként a szinoptikus alapáramlás és a Bakony együttes hatását jelölték meg. Zách Alfréd, a balatoni viharjelzés II. világháború utáni újraszervezője és a Siófoki Viharjelző Observatórium építetője, szintén döntő szerepet tulajdonított a Bakonynak a balatoni viharok kialakulásában (Zách, 1957). Hangsúlyozta, hogy a hegység merőleges az uralkodó szélirányra, ezzel pedig feltorlasztja a frontokat, amelyek aztán nagyobb erősséggel csapnak le a tóra. Megemlítette azt az elméletet is, miszerint a bakonyi lejtőszeleknek még a tó medrének kialakulásában is szerepük volt (Zách, 1953).

1957-re megépült Siófokon az Országos Meteorológiai Intézet Balaton Kutató és Viharjelző Observatóriuma, így amellet, hogy megfelelő állomás létesült a balatoni viharjelzés feladatának ellátásához, egy kiterjedt Balaton kutató program is elindult, melynek keretében újabb lendületet vett a térség időjárási viszonyainak, ezzel a Bakony áramlásmódosító hatásának a vizsgálata is. A bakonyi bukószelét az 1950-es évek végén fön jellegű, örvényes, lökéses szélként írták le, amely felelős a Balatonnál hirtelen fellépő szelekért (Valent, 1959).

Az 1950-es, 60-as években zajló Balaton kutatás során kiterjedt mérési expedíció zajlott a Balaton térségében, melynek keretében többek között léggömbökkel vizsgálták a Balaton felett kialakuló hullámok szerkezetét

(Béll és Takács, 1974). Ezek kiegyensúlyozott, lassú emelkedésű léggömbök voltak. Arra törekedtek, hogy a léggömb vertikális mozgást elsősorban a hullámokhoz kapcsolódó le- és feláramlások miatt végezzen, azaz a léggömbre ható felhajtóerő közel azonos legyen a léggömb súlyával. A léggömböket Tihany, illetve Alsóörs közelében engedték fel északnyugati szeles időjárási helyzetekben. Abban az esetben, amikor a léggömb az igen összetett domborzat fölül a Balaton fölé sodródott, már egyéb zavaroktól mentesen tudta detektálni a Bakony hatására kialakult, Balaton feletti léghullámokat. A mérési adatok elemzésével 10 perc körüli rezgésidőket, 2–10 km-es hullámhosszakokat és 100–250 m-es hullám amplitúdókat mutattak ki. Fontos megállapítása volt a mérési expedíciónak, hogy a Balaton feletti léghullámok északnyugati szélirány esetén alakulnak ki, olyan időjárási helyzetekben, amikor a beáramló hűvös levegő az alsó légrétegeket már stabilizálta. Inverzió jelenlétére azonban ehhez nincs feltétlenül szükség. A vizsgálat nagy szélsébségek esetén az északi part közelében a hegyektől elszakadt, vízszintes tengely mentén forgó rotorok jelenlétét is kimutatta, melyek átmérője 100–250 m közötti volt. Az eredmények tehát igazolták, hogy a Balaton felett is kialakulnak olyan nagy amplitúdójú lee oldali hullámok, melyek szinoptikusan vezérelt lejtőszelet okozhatnak.

Az olyan időjárási helyzetekben, amikor nem elég nagy a stabilitás a nagy amplitúdójú hullámok kialakulásához, a Bakony árnyékában turbulenssé, lökésessé válhat a szél. Ezt a jelenséget mérésekkel is sikerült kimutatni a Balatonnál: a Balatonfüred és Siófok között közlekedő menetrend szerinti hajójáratra forgókanalas szélmérőműszert szereltek, és vele minden ÉNy-i szeles időjárási helyzetben szélméréseket végeztek (Titkos, 1963). Az eredmények azt mutatták, hogy a Balaton déli partjának közelében sokkal egyenletesebb, egyúttal nagyobb sebességű szél fúj, mint Balatonfüred térségében. A déli parttól pár km-re eltávolodva az átlagos szélsébség csökkenni kezd, de a siófokihoz hasonló széllelkések észak felé haladva is előfordulnak. Balatonfürednél az átlagos szélsébség már csak a siófoki 60%-ának adódott, mégis a legnagyobb széllelkést az északi part közelében detektálták (Götz et al., 1966). Ezek az eredmények azt mutatják, hogy bár a Bakony szélárnyéka az átlagszelet csökkenti, turbulenssé, örvényessé is teszi az áramlást, lehetővé téve nagyobb széllelkések lekeveredését az északi part közelében.

A csapadék hazai középhegységeink körüli eloszlásával foglalkozó vizsgálat kimutatta, hogy a hegyek, köztük a Bakony hatása az olyan időjárási helyzetekben tud a leginkább megnyilvánulni, amikor az áramlás

merőleges a hegyvonulatra, mind a talaj közelében, mind a magasabb szinteken (Szepesi, 1962). A labilitási viszonyokra is meghatározó tényezőként tekintettek, nemcsak közvetlenül, a csapadékképződésen keresztül, hanem közvetett módon is, mint a vertikális sebesség befolyásolójaként. Ezek a bakonyi bukószelék szempontjából is fontos eredmények.

Péczely György a hazai hegyeket nem tartotta elég magasnak ahhoz, hogy jellegzetes bukószél kialakulhasson (Péczely, 1976). Ugyanakkor vizsgálta a Bakony hatására kialakuló hullámokat, melyekről megállapította, hogy a hegy déli oldalán kiszáradást okozhatnak, és ezzel nem halnak el, hanem tovább terjedhetnek délkelet felé, akár több teljes hullámrendszert alkotva (Péczely, 1962). Ugyancsak megfigyelte az északi szeles időjárási helyzetekben a Bakony déli oldalán kialakuló „ciklonális beöblösödést” (lee oldali teknő), amely a leszálló légáramlásra utal.

Az 1980–2010 közötti időszakban a balatoni szélre gyakorolt domborzati hatásokról kevés szó esett, bár a térségben zajlottak a domborzat légáramlást módosító hatását vizsgáló projektek, mint például az ALPEX (Götz, 1981). 2010-ben azonban rövid időn belül két erős ciklon is elérte a térséget: a mediterrán eredetű Zsófia és az atlanti eredetű Angéla ciklon. A két légörvénynek a hátoldali áramlási rendszere nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a Balatonnál 2010-ben fordult elő a legtöbbször erősen viharos, 90 km/h-t meghaladó széllelkésű nap a távszélmérő hálózat 1987-es telepítése óta (Zsikla, 2011). A Balatonnál többfelé 35 m/s feletti, Balatonfüreden 39,7 m/s-os, Kab-hegyen 45 m/s-os széllelkést mértek. Ezen széllelkések magyarázatául a lejtővihar jelensége szolgálhatott – a 2004-es tátrai viharhoz hasonlóan (Simon et al., 2006; Horváth, 2004). A Zsófia viharciklon esetén egyértelműen megnyilvánult a Bakony hatása. A WRF modell segítségével kimutatták, hogy a hegység déli oldalán igen erős leáramlás alakult ki, a légnyomási mezőben pedig megjelent a Balaton felett a lejtőviharokra jellemző alacsony légnyomás, a lee oldali teknő (Horváth et al., 2010a). A pár héttel későbbi Angéla viharciklon hátoldalán kialakuló áramlásnak köszönhetően szintén a Balaton térsége volt az ország legszelesebb területe (Horváth et al., 2010b). Ez minden bizonnyal a hasonló nagytérségű izobár-elrendeződés és a lee oldali teknő megjelenése miatt szintén lejtővihar volt. Ezen két esetből általánosan is következtethetünk arra, hogy a nagy légnyomási-gradiensű, ciklonálisan görbülő izobárokkal rendelkező, ciklon hátoldali időjárási helyzetek kedveznek a balatoni bukószelék kialakulásához, azaz az ilyen szinoptikus helyzetekben egy

a Bakony hatására jelentkező szélesebbesség többlettel számolhatunk. 2020 októberének közepén szintén egy ciklon alakította a Balaton térségének időjárását egész napos esőzést és hátoldalán tartósan viharos szelet okozva (Zsikla és Szilágyi, 2020). Ebben az időjárási helyzetben a mért szélviszonyok, a megfigyelt felhőzet és csapadék, illetve a WRF modelleredmények is lejtővihar struktúrára utaltak (Kurcsics és Horváth, 2022). A Balaton északi partján a leáramlási területen jóval nagyobb volt a szélesebbesség, mint a déli parton, a Balaton keleti medencéjének vízközépi mérőplatformján elhelyezett szélműszer pedig még egy az alapáramlás-szal szembeforduló rotort is kimért (Horváth, 2020).

3. A bakonyi szél vizsgálata mérések és modell alapján napjainkban

A rendelkezésre álló sűrű mérőhálózatot és meteorológiai modellek eredményeit felhasználva arra keressük a választ, hogy valóban kialakulhat-e a Bakony déli oldalán a lejtőviharokhoz hasonló, szinoptikus folyamatok által generált lejtőszél, és amennyiben igen, ez mekkora hatással van a hegység lábánál fekvő Balatonnál tapasztalt szélviszonyokra. A szinoptikus mérésekből a szélesebbesség, szélirány, széllelkés és légnyomás adatok voltak a legfontosabbak. Emellett felhasználtunk műholdfelvételeket, radarméréseket, illetve a Siófoki Viharjelző Observatóriumban készített felhőfilmeket is. Mind a mérési adatokat, mind a modelleredményeket az OMSZ HAWK3 munkaállomásának segítségével jelenítettük meg.

A bemutatott eredmények mérési adatok és numerikus modelleredmények elemzésén alapulnak. A számításokat a HungaroMet Nonprofit Zrt. (korábban Országos Meteorológiai Szolgálat) Siófoki Viharjelző Observatóriumának Ventus szuper-számítógépén futtatott WRF modellel végeztük el, melynek horizontális felbontása 1,6 km volt. A WRF modellel számított áramlásokban rendre jellegzetes, lejtővihar szerű struktúrák jelentek meg.

A WRF modellel elvégzett kísérletek mellett számos mérési adatot is elemeztünk. Megvizsgáltuk a hazai földfelszíni mérőhálózat adatait, különös tekintettel a balatoni szélmérő állomásokat. Ezek a mérések 10 perces időbeli felbontással állnak rendelkezésre. A Balaton térségében a felszíni szélmérő állomások elhelyezkedése meglehetősen sűrű, a tavi viharjelző szolgálat igényeinek megfelelően 10–20 km-enként helyezkednek el a tó körül, sőt, a nyári félévben még négy, a víz közepén elhelyezett meteorológiai mérőplatform is üzemel. Ennek a mérőhálózatnak köszönhetően



2. ábra. Álló léghullám a Balaton felett fényképen és műholdfelvételen 2023.02.02-án.

a mérési adatokból is jól vizsgálható a Bakony nagytérségű szélmezőre gyakorolt módosító hatása. Ez a hatás általában a szél jelentős megerősödésében nyilvánul meg, azonban vannak esetek, amikor a szél egyes helyeken történő gyengülése utal rá. Az, hogy a szelerősödés a tó melyik területét érinti, attól függ, hogy milyen hullámhosszú hullám alakul ki a Bakony felett. Rövid hullámok (~5 km-es hullámhossz) esetén az északi part térségében tapasztalható – esetenként 20–40 km/h-s – növekedés a szélökésekben. Ezek az esetek általában egyértelműen a lejtőszéllel magyarázhatók. Ha a hullámhossz nagyobb (10–15 km), akkor a lecsapó szél közelíti a déli partot, és a vízközei mérőplatformok vagy a déli parti mérőállomások detektálhatják a szélesebb növekedést. Ilyenkor az északi parton gyengébb a szél, ott már a hegység szelárnyékoló hatása érvényesül. Az ilyen helyzetekben általában már nehezebb megállapítani, hogy a Bakony vagy a Balaton hatása okozza a szélesebb növekedést, azonban erre vonatkozóan is végeztünk vizsgálatokat.

Összességében elmondható, hogy hátoldali időjárási helyzetekben, az erős hidegadvekcio megszűnését követően, az eleinte viszonylag homogén balatoni szélmező igencsak változékonnyá válik a Bakony hatására, egyes területeken jelentős széltebblet, míg másutt akár mérséklődés és átmeneti irányváltás is előfordulhat. A Bakony hatására kialakuló orografikus hullámok általában a szélmezőben mutathatók ki a legjobban, kevésbé jellemző az, hogy a 2 méteres hőmérsékleti vagy nedvességi mezőben megjelenjen a hatásuk.

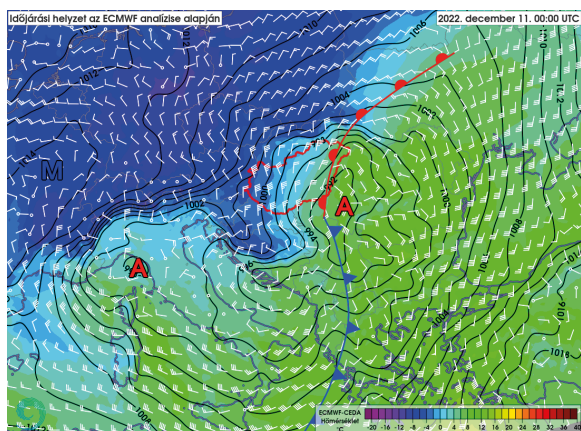
A modellszámítások és a felszíni mérési adatok mellett a felhőzet struktúrája is utalhat a szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtőszél kialakulására. Ezt műholdas megfigyelések, valamint timelapse felhőfilmek is kimutathatják. Gyakran megfigyelhető, hogy a Bakonytól délre, a Balaton északi része felett egy, az alacsonyabb szinteken megfigyelhető, felhőmentes terület utal a leáramlás hatására. Dél felé haladva pedig, ahol a leáramlás feláramlásba vált, egy tartós felhővel fedett

zóna alakul ki. Onnan a felhőket az erős magassági áramlás általában gyorsan dél felé szállítja, a folyamatos kondenzáció miatt azonban úgy tűnik, mintha egyhelyben állna a felhőzet [1]. Ezek az állóhullámok az idő előrehaladtával lassan mozognak. Hol északabbra, hol délebbre mozdul a kondenzációs zóna. Ezzel együtt a széles területek helye is változik: ha egy állomás a feláramlási területről a leáramlásra kerül, ott igen gyors szelerősödés tapasztalható. Ezen állóhullámok helyének a megfigyelése adja az egyik legmegbízhatóbb információt a bakonyi lejtőszélről.

Általában a Bakony által generált hullám gyorsan csillapodik, esetenként azonban a lejtőszel követően többször is megismétlődik a fel-le áramlás, akár 50–100 km-rel távolabb is megfigyelhető a Bakony keltette hullámfelhőzet. Ilyen hullámfelhőzetet rögzített 2023.02.02-án a Siófoki Viharjelző Observatórium felhőkamerája, illetve a Suomi NPP kvázipoláris műhold VIIRS szenzora [2] is (2. ábra).

4. 2022. december 10-11-ei esettanulmány: egy jellegzetes téli balatoni lejtővihar

2022. december 10-én egy mediterrán ciklon alakította a térség időjárását. Az ország déli határához közel haladó, északkelet felé mozgó ciklonban nagy nyomásgradiens alakult ki. Központjában 990 hPa köré süllyedt a légnyomás, míg az Alpok térségében magasnyomás uralkodott. Ahogy egyre inkább a ciklon hátoldalára került a Kárpát-medence nyugati fele, úgy erősödött meg a szél is. December 10-én északias áramlással megkezdődött a hideg levegő beáramlása, december 11-re pedig olyan nagy légnyomás-különbségek alakultak ki a Dunántúlon, hogy már a hőmérséklet advekcioától függetlenül is tovább tudott erősödni a légmozgás. A 3. ábrán a színezett területek a 850 hPa-os nyomási szint hőmérsékletét, a szélzászlók a 925 hPa-os nyomási szint szélviszonyait, míg a folytonos vonalak a tengerszintre átszámított légnyomást jelölik. 2022. december 11-én 00 UTC-kor a mediterrán ciklon középpontja Magyarországtól délkeletre helyezkedett el, a hátoldalán pedig áramlott be a hideg levegő a Dunántúlra. A szinoptikus helyzet kedvezett a bakonyi bukószel kialakulásának. Ugyanis a közeli ciklonközepptől adódóan az izobárok ciklonálisan görbültek, illetve a ciklon helyzetéből adódóan merőlegesek voltak a Bakony

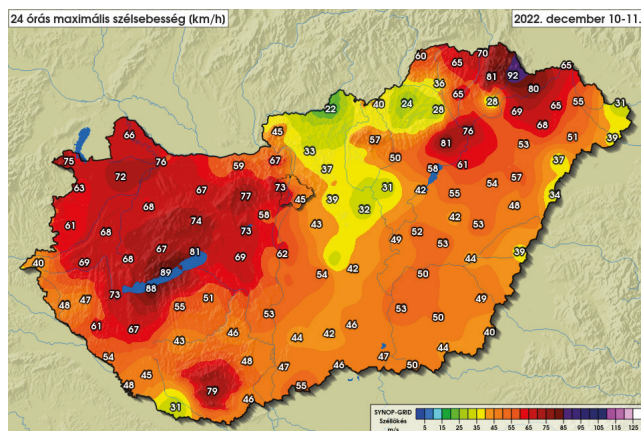


3. ábra. Időjárási helyzet az ECMWF analízise alapján 2022.12.11. 00 UTC-kor.

vonulatára, továbbá látható az is, hogy az áramlás közel geosztrofikus volt. A máshol kialakuló, szinoptikusan vezérelt bukászelekre vonatkozó ismereteink is alátámasztják, hogy ezek a körülmények kedveznek a nagy amplitúdójú lee oldali hullámok kialakulásához, ezáltal a lee oldali szélerősödéshez.

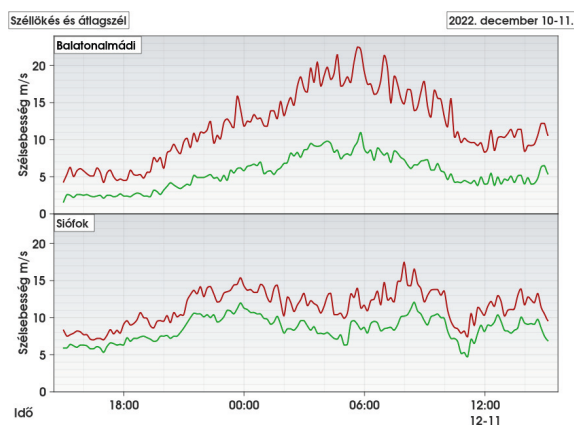
A mediterrán ciklon hátoldalán az északi, északnyugati szél fokozatosan megerősödött, majd többfelé viharossá fokozódott. Az ilyen szinoptikus helyzetekben Magyarországon a Dunántúl, illetve az északkeleti országrész a legszelesebb terület, míg a középső országrészben az Északi-középhegység (és az Északnyugati-Kárpátok) szélárnyékoló hatásának eredményeként mérsékeltebb a légmozgás. Tipikusan ilyenkor a Dunántúlon északi, északnyugati, keleten pedig északkeleti szélirány a jellemző. December 10–11-én a Bakony déli oldalán, a Balaton térségében jóval nagyobb volt a maximális szélesebesség, mint a környező területeken. A Dunántúlon egyedül ott fordultak elő 80 km/h-t meghaladó széllesek (4. ábra). Egy hasonló, a környezetéhez képest még nagyobb kiugrás a Mecsek déli oldalán is megfigyelhető. Utóbbi azt is igazolja, hogy a Balatonnál tapasztalható széltebblet oka nem a Balaton, mint nyílt vízfelület, hanem a tőle északra húzódó Bakony. Ez abból is következik, hogy ebben az időjárási helyzetben (a megszokottól eltérő módon) a tó északi partja szelesebb volt a délinél.

A szélviszonyok időbeli alakulását vizsgálva egymástól egészen eltérő menetet figyelhetünk meg a Balaton északi és a déli partján. Az átlagos szélesebesség az időszak nagyobb részében a déli parton volt a nagyobb, a legnagyobb széllesek mégis a tó északi partján alakultak ki. Hasonló eredményt publikált Titkos Ervin (Titkos, 1963). Az időszak első részében, december 11-én kb. 00 UTC-ig a Balaton



4. ábra. Legnagyobb széllesek a 2022.12.11. 12 UTC-t megelőző 24 órában az ország területén.

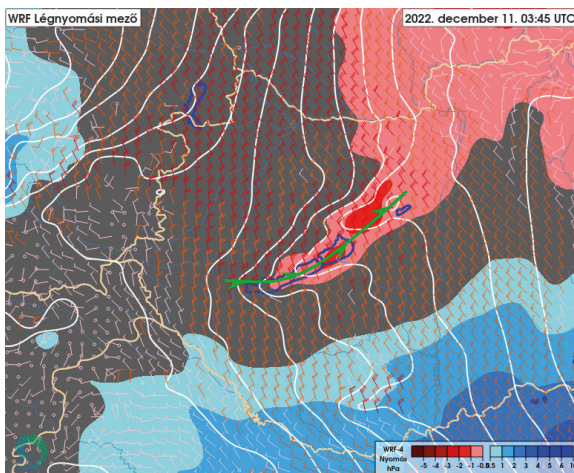
déli partján, Siófokon volt erősebb a szél, ott fordultak elő nagyobb széllesek, az északi parti Balatonalmádi-ban gyengébb volt az áramlás (5. ábra). 00 UTC körül a déli parton csökkent, az északi parton pedig növekedni kezdett a szélesebesség. Ennél azonban jóval nagyobb mértékben növekedtek meg Balatonalmádi-ban a maximális széllesek, melyek többször meghaladták a 20 m/s-os sebességet is. Ez a folyamat a déli parti állomáson nem játszódott le, ott továbbra is jellemzően 15 m/s alatt maradtak a maximális lökések. Az időszak végére a szélviszonyok ismét hasonlóvá váltak. A szélesebesség és a széllesek Balatonalmádi-ban mért időbeli változásához hasonlókat mértek a Balaton keleti felének összes északi parti állomásán. A déli parton csak Fonyódon tapasztaltak hasonlókat. Ez arra utal, hogy ebben a sávban egy rendezett leáramlás alakult ki, a Bakonyból lebukó szél 5–8 m/s-os többletet jelentett a mért széllesek értékekben.



5. ábra. Szélesebesség (zöld) és széllesek (piros) alakulása Balatonalmádi és Siófok állomásokon 2022.12.10-11-én.

A 2022. december 10–11-i időjárás helyzetet a WRF modellel is megvizsgáltuk. Az ECMWF modell eredményei igazolták, hogy a nagytérségű időjárás helyzet alkalmas volt bukószél kialakulására: a Balatontól keletre jelen volt egy zárt ciklon, amelynek hátoldalán a Bakonyra közel merőlegesen futottak az izobárok (3. ábra). A WRF modell eredményei alapján pedig emellett azt is megállapíthatjuk, hogy a Bakony déli oldalán, a Balaton felett egy jelentős nyomásdepresszió is kialakult. A 6. ábrán a fehér vonalak a tengerszintre átszámított légnyomást, a piros területek a 3 óra alatt bekövetkező nyomás-süllyedést, a kék területek a nyomásemelkedést jelölik. A nagyfelbontású numerikus modellek eredményeiben megfigyelhető lee oldali teknő fontos jele a bukószél kialakulásának. Ennek tengelyét a 6. ábrán a zölddel feltüntetett összeáramlási vonal jelzi. December 10-én, a kezdeti hidegadvékiós időszakban ez a teknő még csak gyenge formában jelentkezett. Majd ahogy a mediterrán ciklon középpontja kelet felé haladt, az izobárok pedig egyre inkább merőlegessé váltak a Bakony vonulatára, a lee oldali teknő gyorsan ki tudott mélyülni. Erre utal az ábrán látható légnyomás-tendencia is. A Dunántúl nagyobb részén a megelőző három órában nem változott jelentősen a légnyomás, a déli területeken emelkedés volt a jellemző. Eközben a Bakony déli oldalán három óra alatt 1–2 hPa-os nyomás-süllyedés figyelhető meg.

A lejtőviharok kialakulása szempontjából a szinoptikus helyzet mellett a másik igen fontos tényező a vertikális hőmérsékleti rétegződés, valamint a szélprofil. Ezekről a mennyiségekről a vizsgált időszakban a Balaton térségére csak modelladatok álltak rendelkezésre.



6. ábra. Légnyomás és 3 órás nyomástendencia a WRF modellben 2022.12.11. 03:45 UTC-kor.

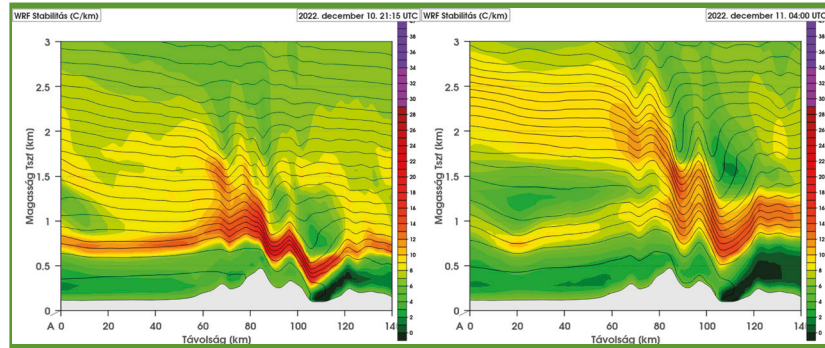
kezésre. 2023 tavaszától azonban a Siófoki Viharjelző Observatóriumban már egy LIDAR berendezés is üzemel, amelynek segítségével szélprofilok állíthatók elő. A légköri stabilitási viszonyok és a szélesség vertikális profilja között megfelelő egyensúly szükséges ahhoz, hogy a lejtővihar kialakulhasson. A lejtőviharokhoz szükséges egy stabil réteg a hegycsúcs magassága felett, de nem túl magasan, ha pedig egy második stabil réteg is van a troposzféra alsó tartományában, az különösen kedvező lehet.

2022. december 10-én 21 UTC körül egy erősen stabil réteg figyelhető meg a luv oldalon kb. 700–800 méteres tengerszint feletti magasságban. Ebben a rétegben a hegy fölött zavar keletkezett, a lee oldalon pedig az izentrópok (lsd. Kislexikon) rásimultak a hegyoldalra. Ezáltal az áramlás egy keskenyebb csatornába korlátozódott, ami szükségszerűen a szélesség növekedését eredményezte. A 7. ábrán a folytonos fekete vonalak a potenciális hőmérséklet izovonalai (izentrópok), míg a színezés a potenciális hőmérséklet vertikális gradiensét ábrázolja ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$). A pirosas színek nagy gradienst, ezáltal erősen stabil rétegződést, míg a sötétzöld színek kis gradienst, instabilabb rétegződést jelölnek. December 11-én 04 UTC-re a 800 méter körüli stabil réteg gyengült, 2–2,5 km-es magasságban viszont kialakult egy újabb, erősen stabil réteg. Jól látható módon ez is nagy szerepet játszott a lejtővihar fennmaradásában. A Balatonnál nagyon gyakori, hogy egy hidegfront mögött két erősen stabil réteg is kialakul, ennek oka a földrajzi környezet. Ahogy már korábban említettük, a Dunántúlra a frontok mögött a hideg levegő az Alpok és Kárpátok közötti alacsonyabb térszínen, a Dévényi-kapu térségében áramlik be elsőként. Ahogy a front Kárpát-medencébe érő szakasza vertikálisan egyre jobban kiterjed, előbb-utóbb határozottan megindul a hidegadvékió a hegyek felett is, így a Balatonhoz egy második, magassági hidegfront is érkezik. Így hátoldali helyzetben egy második, 2–3 km magasságú stabil réteg is képződik, ez pedig különösen kedvezhet a bakonyi lejtőviharoknak, ahogy jelen esetben is látható.

Az időjárás helyzetben jól megfigyelhetők a bórához hasonló, lejtővihar-szerű struktúrák, ahogy a hidraulikus ugrás és az orografikus hullámtörés jelensége is (8. ábra). A szélesség metszetén látható, hogy a vizsgált időpontban a légkör alsó 2 km-es tartományában viharos, erősen viharos szél fújt. A luv oldalon a szélesség eloszlása közel homogén, majd a lee oldalra érve nagy mértékben megerősödött a felszínközeli szél, miközben 2 km-es magasságban teljes szélcsend alakul ki. Ez az adriai bórának is jellegzetessége.

A legerősebb szél a Balaton felett figyelhető meg, majd a tó déli partja felett egy határozott gyengülés is látható. A Balatonhoz mérten erős vertikális áramok alakultak ki, mind az északi parti leáramlás, mind a déli parti feláramlás sebessége meghaladta az 1,5 m/s-ot, ami a Balatonnál csak az erősebb lejtőviharok esetén szokott előfordulni. Látható az is, hogy a hullám-mozgás horizontális irányban nem terjed tovább, csak vertikálisan kiterjedt hullámok alakultak ki. A lee oldalon igen erős kiszáradás figyelhető meg azon a területen, ahol a potenciális hőmérséklet izovonalai a Bakony déli lejtője felé közelítenek, beszűkítve az áramlási csatornát.

A szinoptikus folyamatok által kialakított bakonyi lejtőszélhez a vertikális sebesség jellegzetes struktúrája társítható. A 9. ábrán a kékes színek a leáramlásokat, a narancssárga színek a feláramlásokat jelölik. A Bakonytól délre, általában a Balaton északi partjának térségében egy rendezett leáramlási zóna húzódik végig szinte a teljes part mentén. Ez a leáramlás vertikálisan a légkör magasabb tartományaira is kiterjed, erőssége néhol megközelítheti a 2 m/s-os sebességet. A Balaton déli partja felé közeledve – a lee oldali hullám hosszától függően – megszűnik a leáramlás, majd egy feláramlási csatorna figyelhető meg. A feláramlás helyén csökken a szélsébség a felszínközeli

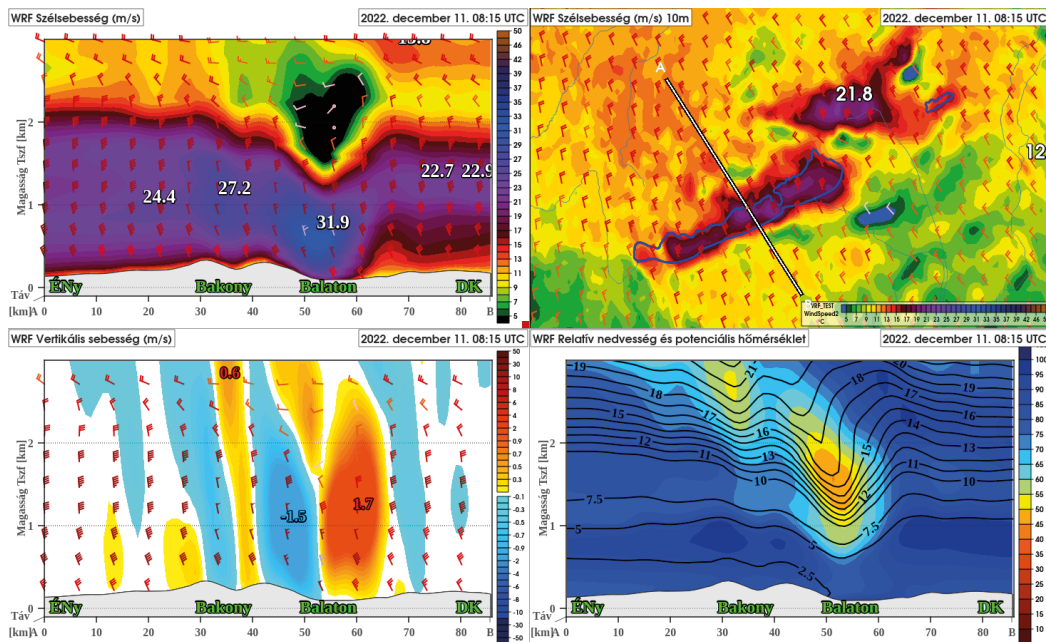


7. ábra. WRF modellel számított stabilitási viszonyok a Bakonyra merőleges, ÉNy-DK irányú metszet 2022.12.10. 21:15 UTC-kor és 2022.12.11. 04 UTC-kor.

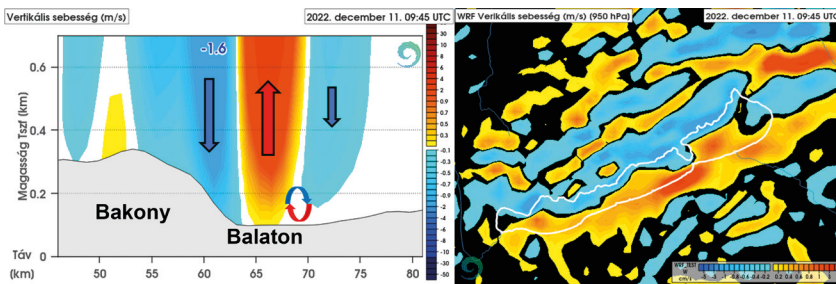
légrétegekben. A feláramlási csatornát egy második, gyengébb leáramlás is követheti délebbre, ezek határán pedig olyan rotorok alakulhatnak ki, melyek a felszín közeli szelet átmenetileg akár szembe is fordíthatják az alapáramlással (Kurcsics és Horváth, 2022).

A WRF modellel hatásvizsgálatot végeztünk arra vonatkozóan, hogy az egyes, a Balaton térségében előforduló módosító hatásoknak az adott időjárási helyzetben mekkora szerep juthatott a szélviszonyok alakításában. Négy ilyen kísérletet végeztünk el: Az első kísérletben minden befolyásoló tényezőt (Bakony és Balaton) kivettünk a modelltől, azzal a céllal, hogy sem a domborzat, sem az eltérő hőmérsékletű víz, sem maga a vízfelszín ne legyen hatással a szélre.

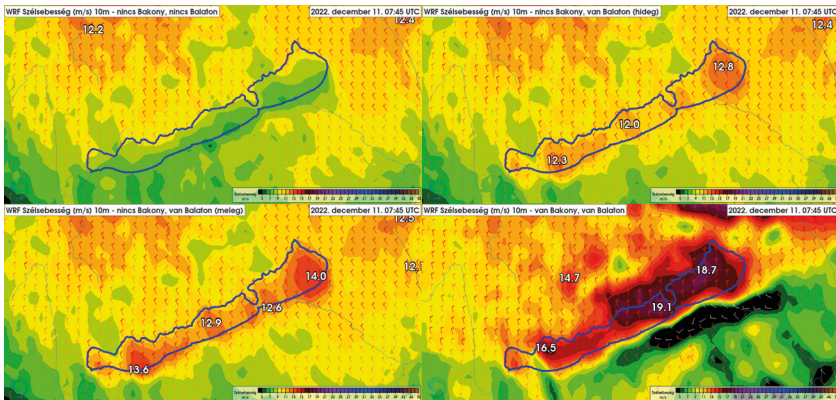
A második kísérletben a Balaton már bekerült a modellbe, a vízhőmérsékletét még a szárazföld hőmérsékletével azonosra állítottuk be, hogy először csak az alacsony sűrűdásból eredő hatást kapjuk meg. A harmadik kísérletben már a tényleges, a szárazföldnél pár fokkal magasabb vízhőmérsékletet adtuk meg. A negyedik kísérletben pedig a Bakony vonulatát is visszatettük a modellbe, így a valós domborzatot és felszínborítottságot kaptuk vissza. Az így kapott eredményeket megjelenítettük



8. ábra. WRF modellel számított szélsébség (bal felső), vertikális sebesség (bal alsó), potenciális hőmérséklet és relatív nedvesség (jobb alsó) vertikális metszete, illetve a felszíni szellőkés mező (jobb felső) 2022.12.11. 08:15 UTC-kor.



9. ábra. Vertikális sebesség a Balaton térségében egy Balaton feletti, ÉNy-DK irányú metszet mentén, illetve a 950 hPa-os nyomási szinten 2022.12.11. 09:45 UTC-kor a WRF modellben.



10. ábra. Szélsebesség a WRF modellben 2022.12.11. 07:45 UTC-kor, különböző módosítások esetén.

térképesen, egy adott időpontban (10. ábra), illetve ábrázoltuk a szélsebesség időbeli változását is egy adott pontban (11. ábra).

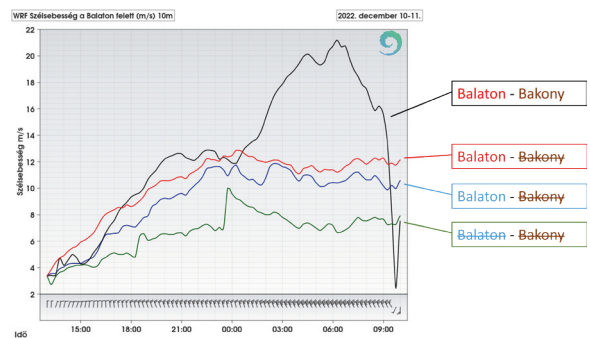
A Bakony és Balaton nélküli esetben - ahogy az várható volt -, a Balaton helyén a szélmező beáll a környező területekre, felette kiemelkedő szélsebesség nem figyelhető meg, a választott pontban pedig a szélsebesség végig 10 m/s alatt alakul. Ha már a Balatont betesszük a modellbe, megjelenik a tó felett egy a környezetéből kis mértékben kiemelkedő, szeles sáv, és az időbeli meneten is látható, hogy a teljes időszakban megnövekedett a szélsebesség. A vízhőmérséklet 4 fokos megemelése (ami ténylegesen megvalósult) további 1–2 m/s-os szélgyorsítást eredményezett, még kis mértékben ugyan, de már egyértelműen megkülönböztetve a Balatont a környezetétől. Ennek hátterében a melegebb vízfelület feletti labilisabb légrétegződés áll. A vízhőmérsékletből eredő hatás a téli időszakban kisebb, nyáron, kisebb alapszél esetén, illetve a szellőkések tekintetében akár lényegesen nagyobb is lehet. Ez azonban még mindig nem ad magyarázatot a Balatonnál tapasztalt jelentős szél-többletre. Az utolsó kísérletben, amikor már mindent a valóságnak megfelelően beillesztettünk a modellbe,

– így az előző kísérlethez képest a Bakony is bekerült – az időszak második felében egy igen jelentős szélnövekmény figyelhető meg.

Ez az eredmény, összevetve a lealacsonyított domborzatú futtatásokkal egyértelműen igazolja, hogy a Bakony hegyvonulata nélkül, önmagában a Balaton miatt a szélsebesség közel sem lenne olyan kiugróan nagy, mint amit amilyen a valóságban. Összevetve az egyes hatásokat látható, hogy ebben a decemberi időjárási helyzetben a legnagyobb szerepe a Bakonynak volt, ezt követte a Balaton vize, majd a vízhőmérséklet.

Összefoglalás

Különböző meteorológiai méréseken, illetve modellezésen alapuló kutatásaink alapján beigazolódni látszik, hogy szinoptikus folyamatok által vezérelt lejtővihar – mint például a bóra vagy a fön – akár alacsonyabb hegyek lábánál, esetünkben a Bakony hatására a Balatonnál is kialakulhat. Ehhez egy adott szinoptikus helyzetre, illetve a légkör megfelelő vertikális rétegződésére is szükség van. A szinoptikus helyzetet megfelelőnek tekinthetjük amennyiben a Dunától keletre egy zárt alacsonynyomású képződmény helyezkedik el, hátoldali áramlási rendszerében pedig az izobárok kikutása közel merőleges a Bakony vonulatára. Vertikálisan egy kellően stabil réteg jelenléte szükség a hegycsúcs felett, attól nem túl nagy távolságban. Emellett a szélprofilnak is megfelelőnek kell lennie, a szélsebességnek növekednie kell a magassággal. A lejtővihar várható kialakulásának egyik biztos jele a modellekben a lee oldali teknő megjelenése a Balaton felett az északi, északnyugati szeles időjárási helyzetekben.



11. ábra. A szélsebesség alakulása a Balaton egy adott pontja felett a WRF modellben, különböző módosításokat követően 2022. december 10-11-én.

Amennyiben a fenn említett feltételek adottak, a Bakony hatására a Balaton felett jelentős szél erősödés következhet be. Ez a szél erősödés azonban még nem feltétlenül jelentkezik a felszín közvetlen közelében. A tapasztalatok azt mutatják, hogy ehhez általában még szükséges valamely trigger hatás, ami kellő turbulenciát biztosít az átkeveredéshez. Ez lehet például a besugárzás okozta átkeveredés vagy egy pozitív örvényességi advekciónál által generált turbulencia is.

A bakonyi lejtőviharok kialakulását igazolhatjuk (és előrejelezhetjük) WRF modelledményekkel, melyek jellegzetes lejtővihar struktúrákat adnak vissza a Bakony déli oldalán. Szintén alkalmasak erre a felszíni szélméresek, melyekben esetenként a váratlan szél erősödések, máskor az egyes területeken megfigyelhető hirtelen gyengülések utalnak a hullámok kialakulására. A műholdfelvételek szintén többször igazolják a Bakony hatására kialakuló állóhullámokat, ezzel a lejtővihar kialakulását.

A jelenség pontosabb megismerése fontos feladat a balatoni viharjelzésben. A vizsgálatokat a jövőben is folytatjuk annak érdekében, hogy olyan módszereket dolgozzunk ki, melyek lehetővé teszik a Bakony okozta széltebblet, a bakonyi lejtőviharok kialakulásának előrejelzését.

A kézirat megjelenését GINOP-2.3.2-15-2016-00055 számú projekt keretében a Pénzügyminisztérium támogatta.

Irodalomjegyzék

- Abatzoglou, J.T., Hatchett, B.J., Fox-Hughes, P., Gershunov, A., Nauslar, N.J., 2021: Global climatology of synoptically forced downslope winds. *Int. J. Climatol.* 41, 31–50.
- Ambrózy, P., 1970: Lee hullámok hosszának számítása és összehasonlítása a műholdak felhőképeiről vett hullámhosszal. *Időjárás* 74, 251–261.
- Ambrózy, P., Götz, G., Tanczer, T., 1963: Hirtelen kitörő szélviharok vizsgálata a Balaton térségében. *Időjárás* 67, 153–158.
- Bartha, I., 1978: A DNY-i szél megerősödésének egy sajátos esete a Balatonnál. *Léggör* 23(4), 119–123.
- Béll, B., Takács, L., 1974: A Balaton éghajlata. Az Országos Meteorológiai Szolgálat hivatalos kiadványa 105–117.
- Cholnoky, J., 1914: Somogy vármegye természeti viszonyai. In: Magyarország vármegyéi és városai.
- Cholnoky, J., 1936: Balaton. Budapest.
- Götz, G., 1966: Sturmwarnung am Balatonsee. Az Országos Meteorológiai Intézet kiadványa 30.
- Götz, G., 1981: ALPEX GARP – Kísérlet az Alpok térségében. *Léggör* 26(2), 2–8.
- Hajósy, F., 1952: Magyarország csapadékviszonyai 1901–1940. Az Országos Meteorológiai Intézet hivatalos kiadványa. Magyarország Éghajlata 6.
- Horváth, Á., 2004: A 2004. november 19-ei nagy vihar. *Léggör* 49(4) 6–9.
- Horváth, Á., Zsikla, Á., Hadvári, M., 2010a: A „Zsófia” ciklon meteorológiai leírás. OMSZ Tanulmányok. https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1082&hir=A_%22Zsofia%22_ciklon_meteorologiai_leirasa
- Horváth, Á., Zsikla, Á., Kovács, A., 2010b: Az „Angéla” ciklon meteorológiai leírás. OMSZ Tanulmányok. https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1084&hir=Az_%22Angela%22_ciklon_meteorologiai_leirasa
- Horváth, Á., 2020: Álló léghullám a Balaton felett: miért fúj erősebb szél a Balatonnál hidegfront esetén? OMSZ Tanulmányok. https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=2920&hir=Allo_leghullam_a_Balaton_felett_miért_fuj_erosebb_szel_a_Balatonnal_hidegfront_eseten?
- Kurcsics, M., Horváth, Á., 2022: Az adriai bórától a bakonyi lejtőviharig. *Léggör* 67(2) 77–89. OMSZ Tanulmány: https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3157&hir=Az_adriai_borától_a_bakonyi_lejtőviharig
- Lóczy, L., 1913: A Balaton tudományos tanulmányozásának eredményei. I. kötet: A Balatonnak és környékének fizikai földrajza, I. rész: A Balaton környékének geológiája és morfológiája, I. szakasz: a Balaton környékének geológiai képződményei és ezeknek vidékek szerinti telepedése. Budapest.
- Péczeley, Gy., 1962: Főjelenség Magyarországon 1962. február 6-án. *Időjárás* 66, 306–309.
- Péczeley, Gy., 1976: Helyi szelek. *Léggör* 21(4), 81–86.
- Sebe, K., Csillag, G., Ruzsiczay-Rüdiger, Z., Fodor, L., Thámó-Bozsó, E., Müller, P., Braucher, R., 2011: Wind erosion under cold climate: A Pleistocene periglacial mega-yardang system in Central Europe (Western Pannonian Basin, Hungary). *Geomorphology* 134, 470–482.
- Simon A., Horváth Á., Vivoda J., 2006: Case study and numerical simulations of the November 19, 2004 severe windstorm in Central Europe. *Időjárás* 110, 91–123.
- Szepesi, D., 1962: Középhegységeink orografikus csapadékképző hatásának mennyiségi vizsgálata. *Időjárás* 66, 269–274.
- Tanczer, T., 1961: A balatoni viharjelzésről. *Léggör* 6(2), 9–12.
- Titkos, E., 1963: A Balaton-felvidék szélárnyékoló hatása. *Időjárás* 67, 248–249.
- Valent, E., 1959: A Balaton éghajlatkutatásának története. *Léggör* 4(2) 6–7.
- Zách, A., 1953: Balatoni szél. Az Országos Meteorológiai Intézet kis népszerű kiadványa 1.
- Zách, A., 1957: Elkészült a siófoki obszervatórium. *Léggör* 2(1), 6–8.
- Zsikla, Á., 2011: A 2010 évi balatoni és velencei-tavi viharjelzési szezonról. *Léggör* 56(2) 69–72.
- Zsikla, Á., Szilágyi, E., (2020): A 2020 évi tavi viharjelzési szezonról. *Léggör* 65(4), 190–196.

Internetes hivatkozások

- [1] https://met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=3365
- [2] <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>