

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Az észak-amerikai Nagy-tavak meteorológiai hatásai

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Szalkai Zsófia

Földtudományi alapszak,
Meteorológus szakirány

Témavezető:

Dr. Pongrácz Rita

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

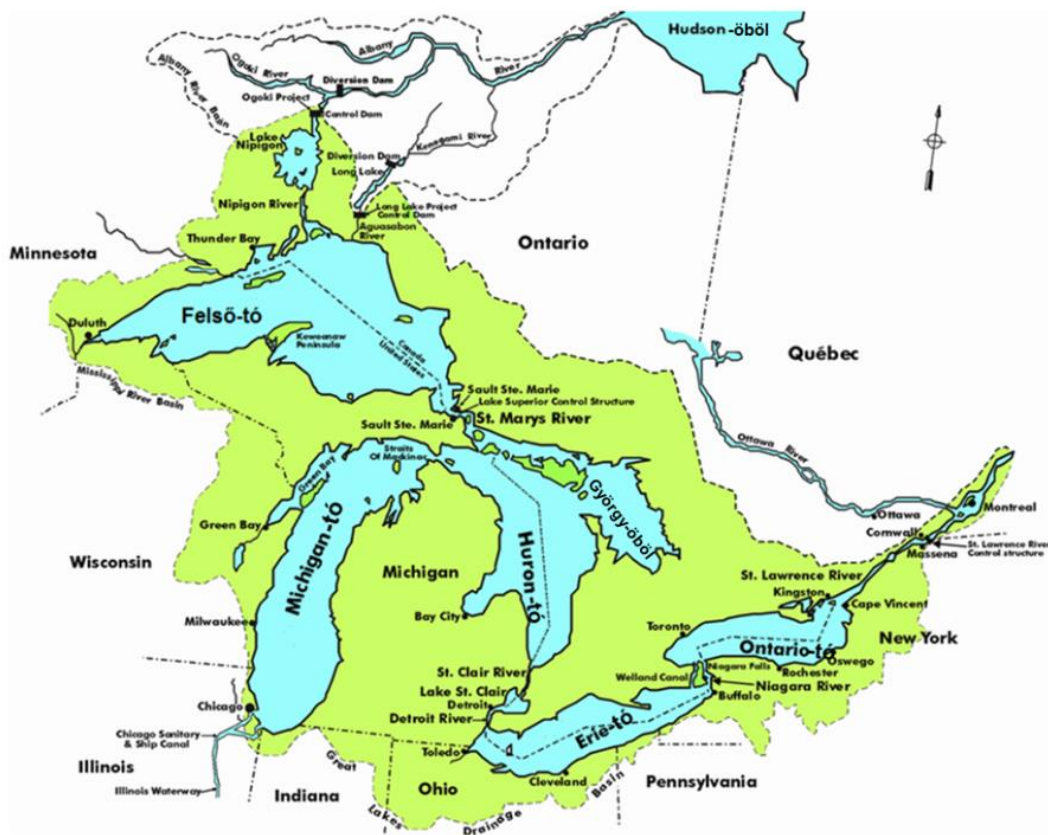
Budapest, 2019

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. A Nagy-tavak elemi hatásai	5
2.1 Hőmérséklet, csapadék és felhőzet	5
2.2 Légnyomás és szél	6
2.3 Megfigyelések és modellek	7
3. Az ún. „lake-effect snow”	8
3.1 A tóparti havazások kialakulása	8
3.2 A tóparti havazások típusai.....	9
3.3 A tóparti havazások előrejelzése.....	11
3.4 Az Ontario-tó téli tóparti havazásainak vizsgálata	13
4. A Nagy-tavak további hatásai	16
4.1 Mérsékeltövi ciklonok	16
4.2 A parti szél és hatásai a levegőminőségre	17
4.3 Az északnyugati áramláshoz kötődő havazás	18
4.4 A meteorológiai cunami.....	19
4.5 Távkapcsolatok	20
5. A klímaváltozás hatásai	23
5.1 A XX. század végéig detektált változások.....	23
5.2 A XXI. században várható éghajlati trendek	24
6. Összegzés	28
Köszönetnyilvánítás	30
Irodalomjegyzék	31

1. Bevezetés

Az észak-amerikai Nagy-tavak vidéke az északi szélesség 40° és 50°, illetve a nyugati hosszúság 75° és 95° között húzódik (1. ábra). A világ legnagyobb kiterjedésű édesvízi tóvidéke, a Föld teljes édesvízkészletének 20%-át tartalmazza. Teljes vízfelszíne 244 000 km², az egyes tavak felszíne 19 000 km²-től (Ontario-tó) 82 000 km²-ig (Felső-tó) terjed, mélységük 19 m-től (Erie-tó) 147 m-ig (Felső-tó) változik (1. táblázat). A tóvidék a legutolsó eljegesedés végén keletkezett (kb. 10 000 éve), a Laurenciai-jégtábla olvadékvizéből (Notaro et al., 2013a).



1. ábra. A Nagy-tavak elhelyezkedése [1-U.S. Army Corps of Engineers]

A hatalmas víztömeg jelentősen befolyásolja a környező területek időjárási viszonyait, így az itt élő emberek életére is hatással van (Suriano et al., 2015). A térség hóvihari jelentős kárt okozhatnak az infrastruktúrában. Ide tartoznak a különféle közlekedési problémák: autóbalesetek, az utak takarításának költségei, légi közlekedési és hajózási gondok. A mezőgazdaságon belül különösen érintett a szőlészet, a kereskedelemben pedig a helyi kiskereskedők. A heves hóviharak és a tavaszi hóolvadást követő áradások nagy

kárt okoznak a középületekben és a magánházakban. Mindenekelőtt azonban az emberi élet védelmében szükséges foglalkozni a problémával és jobban megismerni a várható időjárási jelenségeket és védekezési lehetőségeinket.

1. táblázat. A Nagy-tavak legfontosabb adatai
[2-NOAA, Great Lakes Environmental Research Laboratory]

	Felső-tó	Michigan-tó	Huron-tó	Erie-tó	Ontario-tó
Hosszúság (km)	563	494	332	388	311
Szélesség (km)	257	190	295	92	85
Átlagos mélység (m)	149	85	59	19	86
Legnagyobb mélység (m)	406	281	229	64	244
Vízmennyiség (km ³)	12 232	4 918	3 538	483	1 639
Partvonal hossza a szigetekkel együtt (km)	4 393	2 639	6 164	1 402	1 146
Vízfelszín (km ²)	82 097	57 753	59 565	25 655	19 009
Vízkecsere ideje (év)	173	62	21	2,7	6
Lefolyás	St. Marys-folyó, Huron-tó	Mackinac-szoros, Huron-tó	St. Clair-folyó, St. Clair-tó, majd Detroit folyó, Erie-tó	Niagara folyó és Welland csatorna	Szent. Lőrinc-folyó, Atlanti-óceán

A viszonylag távol lévő földrajzi helyszín ellenére a hazai szakirodalom bővítését célozva választottam szakdolgozati témaként a Nagy-tavakkal kapcsolatos meteorológiai, éghajlati jelenségek áttekintését. A dolgozat 2. fejezete ismerteti a Nagy-tavak alapvető hatásait az időjárási elemekre: a hőmérsékletre, a csapadékra, a felhőzetre, a légnyomásra, valamint a szélre. A 3. fejezet bemutatja a vidék legjellegzetesebb időjárási jelenségét (lake-effect snow¹), és beszámol az OWLeS² program eredményeiről. A 4. fejezet feltárja a Nagy-tavak időjárási távkapcsolatait, összetett hatását a ciklonokra, illetve a levegőminőségre, végül kevésbé ismert jelenségeket mutat be (NWFS³, meteorológiai cunami). Az 5. fejezet az éghajlatváltozás már tapasztalható és a jövőben várható hatásait elemzi. Végül a dolgozat összegzéssel zárul, mely kiemeli a Nagy-tavakra vonatkozó legfontosabb ismereteket.

¹ lake-effect snow: tóparti havazás

² OWLeS: Ontario Winter Lake-effect Systems, az Ontario-tó téli havazási rendszerei

³ NWFS: Northwest flow snowfall, északnyugati áramláshoz kötődő havazás

2. A Nagy-tavak elemi hatásai

A térségre vonatkozóan a legfontosabb éghajlatalakító tényezők a vízfelszín és a szárazföld közötti hőkapacitás-különbség, valamint az eltérő súrlódási viszonyok. Mindezekon kívül az is lényeges hatás, hogy a tavak párolgása állandó nedvesség-utánpótlást biztosít a légtömegek számára.

2.1. Hőmérséklet, csapadék és felhőzet

A tavak hőtehetetlensége csökkenti a WMO⁴ szabvány szerint 2 m magasságban mért léghőmérséklet és a felszínhőmérséklet napi és éves szintű ingadozását, valamint az egyes napok közötti fluktuációt mind a tavak felett, mind a környezetükben (*Bates et al.*, 1993). A legszembetűnőbb a téli átlagos minimum-hőmérséklet enyhítése és a nyári átlagos maximum-hőmérséklet mérséklése. Ennek következménye a légköri instabilitás erősítése késő ősszel és télen, illetve a stabilitás elősegítése tavasz végén és nyáron. Ezenkívül a tavak az éjszakai hőmérsékletet is módosítják, áprilistól szeptemberig hűtik, októbertől márciusig melegítik a levegőt (*Scott & Huff*, 1996). Fontos megjegyezni azt is, hogy a Michigan-tó hatása mellett Chicago városi hősziget hatása (*Coseo & Larsen*, 2014) is jelentkezik a térségben.

A téli hónapokban a térség felett áthaladó hideg, száraz kontinentális-poláris légtömegeknek fontos hő- és nedvességforrást jelent a tavak viszonylag meleg vize. Ennek köszönhetően megnövekszik a csapadék mennyisége a vidéken, különösen a tavak lee oldalán (*Notaro et al.*, 2013a). A nyári hónapokban a tavak hűvösebb vize stabilizálja a légkör alsó részét, csökkentve ezáltal a konvektív csapadékot (*Scott & Huff*, 1996). A legnagyobb hatás minden évszakban a Felső-tó környékén tapasztalható, hatalmas kiterjedése és mélysége, valamint minimális jegesedése miatt.

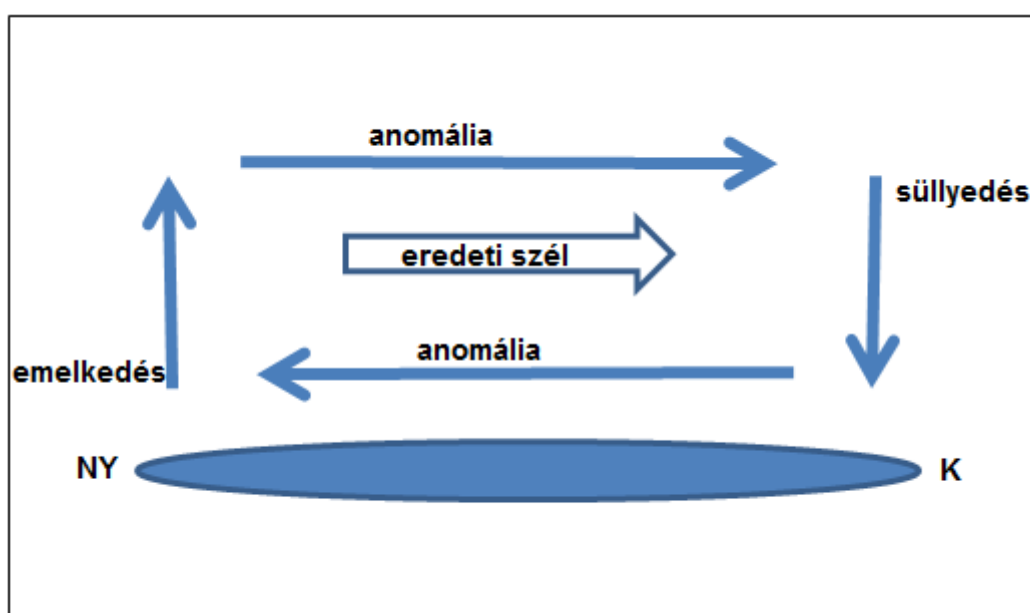
A felhőborítottság tér- és időbeli alakulása a csapadékhoz hasonló. A tavak hatása télen egyértelműen nagyobb mértékben érezhető, mint nyáron. A nyári felhőzetcsökkenés főleg nappal tapasztalható, míg télen a felhőborítottság éjszaka is megnő. A párányomás nyáron magasabb, mivel több vízgőzt képes befogadni a melegebb levegő, viszont ebben az évszakban a szárazföldön fontos nedvességforrást jelent a növényzet evapotranszpirációja is, így csökken a különbség a vízfelszín és a parti területek között (*Scott & Huff*, 1996).

⁴ WMO: World Meteorological Organisation, Meteorológiai Világszervezet

2.2. Légnomás és szél

A hőmérséklet-különbségek hatással vannak a légnyomásra és a szélmezőre is. Nyáron a tavak jelenléte miatt valamelyest magasabb a légnyomás és az áramlás alapvetően anticiklonális jellegű. Télen általában alacsonyabb légnyomás és ehhez kapcsolódóan ciklonális áramlási viszonyok jellemzők (Notaro *et al.*, 2013a). A hideg évszakban a megnövekedett instabilitás és az alacsonyszintű konvergencia kedvez a feláramlásnak: ekkor vastagabb a légköri határreteg.

A tavak befagyása is megváltoztatja a helyi cirkulációs viszonyokat. Közvetlenül a tavak felett gyengül, a magasban viszont erősödik a szél. Teljes befagyást feltételezve az alsó-troposzférában kialakul egy sajátos cirkulációs cella. A tó keleti része felett süllyed, nyugati része felett pedig emelkedik a levegő. Emiatt a felszínen keleties, a magasban ezzel ellentétesen, nyugatias szélkomponens keletkezik, amely ennek megfelelően a magasban erősíti, a felszínen gyengíti az eredeti nyugatias áramlást (2. ábra). A háttéráramlással érkező hidegadvekciónak még jobban lehűti a tó keleti része fölött a levegőt, a part mellett pedig megnöveli a légnyomást. (Vavrus *et al.*, 2013)



2. ábra. A befagyott tó feletti áramlási viszonyok (Vavrus *et al.*, 2013 nyomán)

2.3. Megfigyelések és modellek

A Nagy-tavak meteorológiai szempontú vizsgálata már az 1900-as évek elején megkezdődött. Az egyre újabb és újabb tanulmányok alátámasztották az elméleti elgondolásokat, valamint megerősítették, kiegészítették és pontosították a korábbi munkák eredményeit. Például *Day* (1926) már felhívta a figyelmet arra, hogy az év melegebb hónapjaiban a tavak közelében felerősödnek a zivatarok. *Changon* (1966) szerint ez a hatás a parti szél által létrehozott alacsony szintű konvekciónak köszönhető. *Lyons* (1966) tanulmánya ezzel szemben bizonyítékot adott arra, hogy nyáron nem jellemző a tavak melletti mélykonvekció, sőt, a máshol kialakult viharok a tavak hűvös vize fölé jutva disszipálódnak. *Moore & Orville* (1990) megfigyelte, hogy a tóparti zivatarok többnyire 1. típusú hóviharok, amelyek akkor alakulnak ki, ha az uralkodó szélirány a tavak hossz tengelyével párhuzamos. *Kristovich & Steve* (1995) megmutatta, hogy ez főként az Erie- és az Ontario-tó környezetében igaz. *Steiger et al.* (2009) ebből kiindulva tanulmányában nagyrészt csak a délebbi tavak zivatarait vizsgálta. A kutatásokból egyértelműen kitűnik, hogy a megfelelő minőségű elemzésekhez sűrű megfigyelő-hálózatra van szükség, melyekből elég finom időbeli felbontású és hosszú adatsorokat kaphatunk. Ma már a távérzékelési adatokat is felhasználják a vizsgálatokhoz, például *Zhao et al.* (2012) a MODIS⁵ műholdas szenzorok adataival pontosította szimulációit.

A kutatók a Nagy-tavak időjárás-módosító hatásának tanulmányozásához sokféle modellt alkalmaznak, pl. a RegCM4⁶-et (*Notaro et al.*, 2013b, 2015, *Vavrus et al.*, 2013), az MM4⁷-t (*Bates et al.*, 1993), az MM5-t (*Zhong et al.*, 2005), a WRF⁸-et (*Wright et al.*, 2012). Elterjedt módszer, hogy a légköri modelleket párosítják egy tó-moddellel, például *Hostetler & Bartlein* (1990) tó-modelljével vagy *Mironov* (2008) modelljével. A tó hatását többnyire úgy vizsgálják, hogy két külön szimulációt futtatnak: az egyikben szerepelnek a tavak, a másikon viszont a környező területekre jellemző szárazföldi vegetációval (erdővel, szántófölddel) töltik ki a helyüket. A tó-modellek egyre részletesebbek, ma már több vertikális szintet is tartalmaznak, és egyre több folyamatot vesznek figyelembe (például a jégképződést vagy a víz háromdimenziós cirkulációját).

⁵ MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, Közepes felbontású képképező spektrométer

⁶ RegCM: Regional Climate Model, Regionális éghajlati modell

⁷ MM4: Mesoscale Model 4, mezoskálájú előrejelző és éghajlati modell 4. verziója

⁸ WRF: Weather Research and Forecasting Model, időjárás előrejelző modell

3. Az ún. lake-effect snow⁹

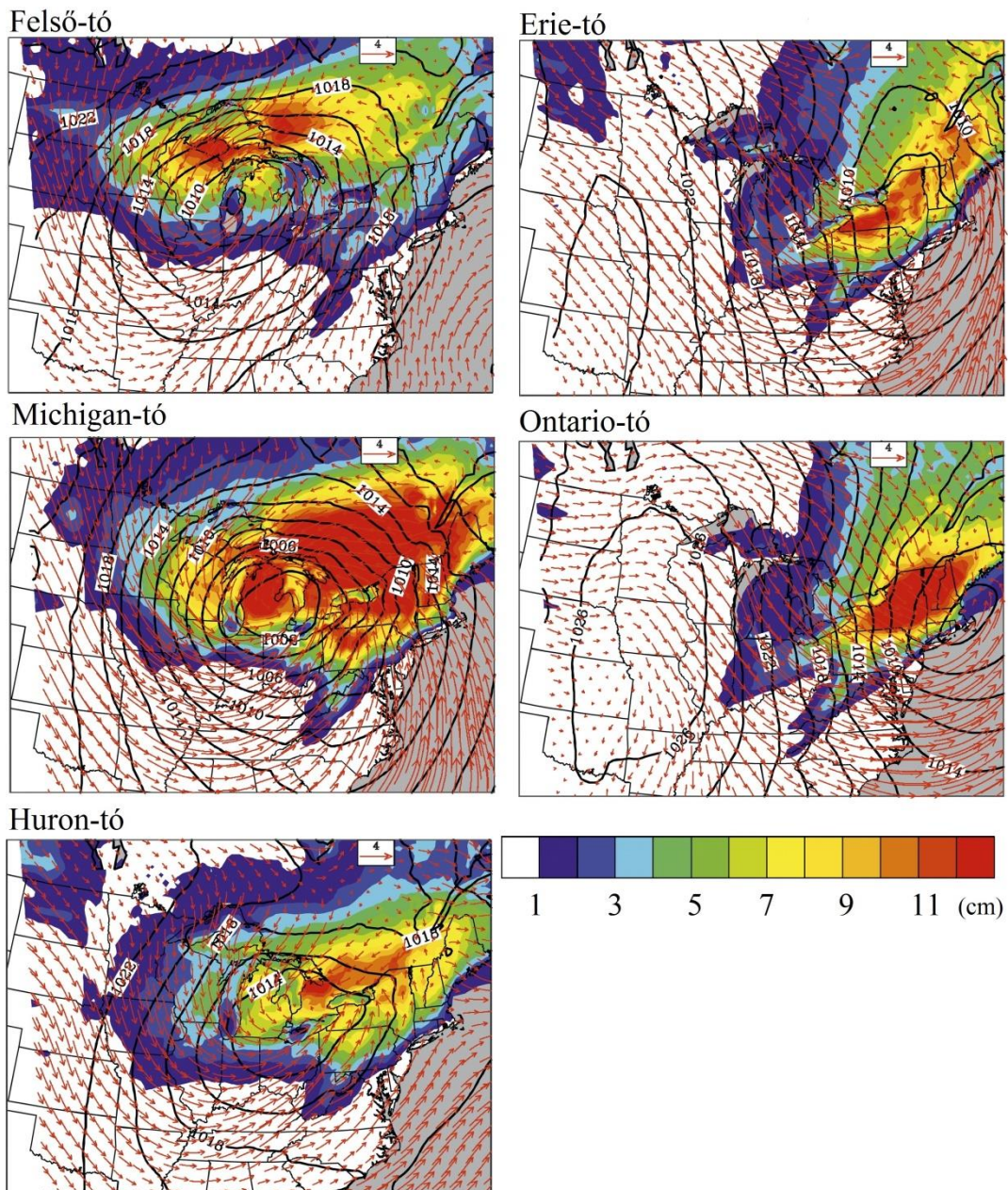
A térséghez kötődő legismertebb jelenség az ún. „lake-effect snow”, amely egy mezoskálájú, konvektív csapadéktípus, jellemzően a Nagy-tavak lee oldalán alakul ki késő ősszel és télen (Niziol *et al.*, 1995). Alkalmoszerűen az erős szél miatt távolabbra is kiterjedhet a hatása, ezért előrejelzése fontos az egész térségben. Éves periódussal rendelkező jelenség, kora ősszel kezdődik éjszakai záporosókkal, majd tél közepén tetőzik heves hóesésekkel. Tél végén a tavak egy része befagy, mérsékelve ezáltal az ilyen jellegű eseményeket. (A sekély Erie-tó teljesen eljegesedik, a mélyebb Ontario-tó többnyire jégmentes marad.)

3.1. A tóparti havazások kialakulása

A vízfelszín és a szárazföld eltérő hőmérséklete és érdességi viszonyai következtében kezdetben konvergencia-zónák jönnek létre, amelyek elősegítik a levegő rendezett felemelkedését. Orografikus hatások tovább fokozhatják a feláramlást. A rendszer fejlődésében kulcsszerepet játszik a poláris vagy arktikus légtömegek betörését kísérő süllyedési inverzió, amelynek magassága és erőssége meghatározza a konvektív felhőképződést. A csapadéksávok kialakulását és elhelyezkedését a határréteg és a 700 hPa nyomási szint közti szélprofil határozza meg. Többnyire az uralkodó széliránnyal párhuzamosan rendeződnek, kivéve ha túl gyenge a szél (<5 m/s), mert ebben az esetben a termikus eredetű áramlás szabja meg kialakulásukat (Niziol *et al.*, 1995). Szélnyírás esetén diffúzzá válnak, és felbomlanak.

A heves tóparti havazásnak kedvező szinoptikus helyzetet (3. ábra) a környező meteorológiai állomások megfigyeléseiből lehet meghatározni. Notaro *et al.* (2013b) összegzése alapján az Erie-tó melletti hóviharak idején az Amerikai Egyesült Államok közepén vagy Kanadában, Manitoba déli részén egy anticiklon tartózkodik, míg az Amerikai Egyesült Államok északkeleti részén vagy Quebec déli részén egy mérsékeltövi ciklon vagy nyomási teknő jellemző. Az Ontario-tó esetén hasonló a helyzet, de a ciklon és az anticiklon (észak)keletre található. Ezenkívül Kanadából érkező hideghullámok is erősítik a viharos időjárási helyzetet. A Huron-tó, a Felső-tó és a Michigan-tó hóviharait egy mérsékeltövi ciklon és az annak hidegfrontja mögötti hidegadvekciónak fokozza.

⁹ lake-effect snow: tóparti havazás



3. ábra. Kompozit kép a heves tóparti havazások idején jellemző szinoptikus helyzetről. Az ábrákon szerepel a tengerszintű légnyomás (hPa), a szélvektorok és a napi havazás mennyisége (cm). (Notaro et al., 2013b nyomán)

3.2. A tóparti havazások típusai

Hjelmfelt (1990) csoportosította a nyugati tavak térségében létrejövő havazásokat. Később az osztályozást kiterjesztették a keleti tavak területére is. Ekkor már figyelembe vették a légtömeg tó felett megtett útjának hosszát is, amely jelentősen befolyásolja a kialakuló időjárási viszonyokat (Niziol et al., 1995).

Az 1. típusú havazási sávok a széllel párhuzamosan alakulnak ki, amikor az uralkodó szélirány a tó hossz tengelyével párhuzamos. Az ellipszis alakú tavak mentén (Erie-tó,

Ontario-tó) gyakoriak. Ezek a havazási sávok 20–50 km szélesek és 50–200 km hosszúak. Lokális természetűek, hatalmas hóviharakat hozhatnak egy-egy városrészre. A New York állambeli Buffalo például ezeknek köszönheti nevezetes téli havazásait.

A 2. típusú havazási sávok is a széllel párhuzamosan alakulnak ki, de olyan esetben, amikor az uralkodó szélirány a tó rövidebb oldalával párhuzamos. Többnyire cellás konvekcióhoz vagy határrétegbeli hosszanti örvényekhez köthetők. Mind az öt tó partján előfordulnak. Ezek a havazási sávok 5–20 km szélesek és 20–50 km hosszúak, de gyakran összeállnak egyetlen felhőtömeggá a lee oldalon. Az 1. típusúhoz képest kevésbé intenzív havazást hoznak.

A 3. típusú havazási sáv az előző kettő keveréke. A Huron-tó felett vagy az annak északkeleti részén található György-öbölben keletkezik, majd áterjed az Ontario-tó vagy az Erie-tó fölé. Ekkor gyengülni látszik, de átkelve a tavak felett újjáéled, és még igen nagy távolságra eljuthat. A rövid megmaradási hajlam miatt nehéz előrejelezni a havazás pontos helyét, idejét és mennyiségét.

A 4. típust a parti szél alakítja ki nagy hidegek és gyenge szinoptikus-skálájú nyomási gradiens esetén. Erősen függnek a hőmérsékleti- és a szélmezőtől, valamint a partvonal alakja és elrendeződése is befolyásolja őket, ami meglehetősen megnehezíti az előrejelzésüket. Tipikusan arktikus magasnyomású légtömegekhez kötődnek, amelyekben a süllyedési inverzió és a gyenge szél korlátozza a konvektív felhőképződést, valamint a hófúvást, így kevésbé romlik a látástávolság. Mindezek ellenére ez a típus is okozhat kiadós havazást, ha sokáig marad egyhelyben és a nagy hideg megnöveli a hó formájában hulló csapadék arányát.

Az 5. típust mezoskálájú örvénynek is nevezik. A tó közepén keletkezik a parti szél konvergencia-zónájában, majd kifejlődés után áthelyeződik a szárazföld fölé. Habár eleinte baljóslatúnak tűnhet, ennek ellenére nem okoz jelentős havazást. Viszonylag ritkán fordul elő; a Felső-, a Michigan- és a Huron-tó vidékén jellemző, főleg ott, ahol a partvonal tál alakú mélyedést alkot.

3.3. A tóparti havazások előrejelzése

Több évtizedes kutatások eredményeként kialakult egy részben szubjektív, regionálisan alkalmazható, klímamodellekben gyakran használt definíció a tóparti havazásokról (*Notaro et al.*, 2013b). Eszerint a heves tóparti hóviharak öt fontos tulajdonsága: (1) átlagosan legalább napi 10 cm hóesés, (2) a Nagy-tavak partvonalától mért legfeljebb 100 km távolság, (3) legalább hat órán át a tó irányából fújó szél (10 m magasságban mérve), (4) legalább 30% nyílt vízfelszín (nem jégfelület) az áramlás útjában és (5) legalább 4 cm-rel több hóesés a környező (a tavak hatáskörén kívül eső) övezethez képest.

A tóparti havazások előrejelzésekor figyelembe vett tényezők *Notaro et al.* (2013b) tanulmánya alapján a következők: a tó és a levegő közti hőmérséklet-különbség mint az instabilitás mértéke, szélirány és szélsébség a tó felett megtett út becslésére (DDNy és NyÉNy irányú szél, illetve legalább 6 m/s a kedvező), szélnyírás az alsó-troposzférában, a tavi jég mennyisége, a párányomás változása a tó felett, inverzió jelenléte a magasabb légrétegekben a felszín közelében konvektív területek fölött, valamint a közép-troposzférikus hullámrendszerek amplitúdója.

Az Amerikai Egyesült Államok Meteorológiai Szolgálatának előrejelzői az évek során bőséges információt gyűjtöttek a tóparti havazásról. A 2. táblázat összegzi a megfigyelési adatokból (GOES¹⁰ műholdak és radarok méréseiből is) és modellfuttatásokból (pl. NGM¹¹) szerzett tapasztalatokat *Niziol et al.* (1995) tanulmánya alapján.

2. táblázat. Meteorológiai változók és szerepük a tóparti havazás előrejelzésében
(*Niziol et al.*, 1995 nyomán)

Változó	Jelentőség
a tó és a 850 hPa, illetve 700 hPa nyomási szint közti hőmérséklet-különbség a süllyedési inverzió magassága és erőssége	a havazás kialakulásának termodinamikai potenciálja
az uralkodó szél iránya és sebessége a felszínen és a 700 hPa nyomási szinten	a havazás helye, típusa és fejlődése
az uralkodó szélhez képesti szélnyírás a felszínen és a 700 hPa nyomási szinten	a havazás kezdete, tartóssága és fejlődése
a helyi alacsonyszintű (felszínközeli) szélmező, konvergencia	a havazás kezdete, intenzitása és terjedése
a szinoptikus skálájú vertikális mozgásokat elősegítő mechanizmusok	a havazás szinoptikus skálájú megerősödése vagy gyengülése

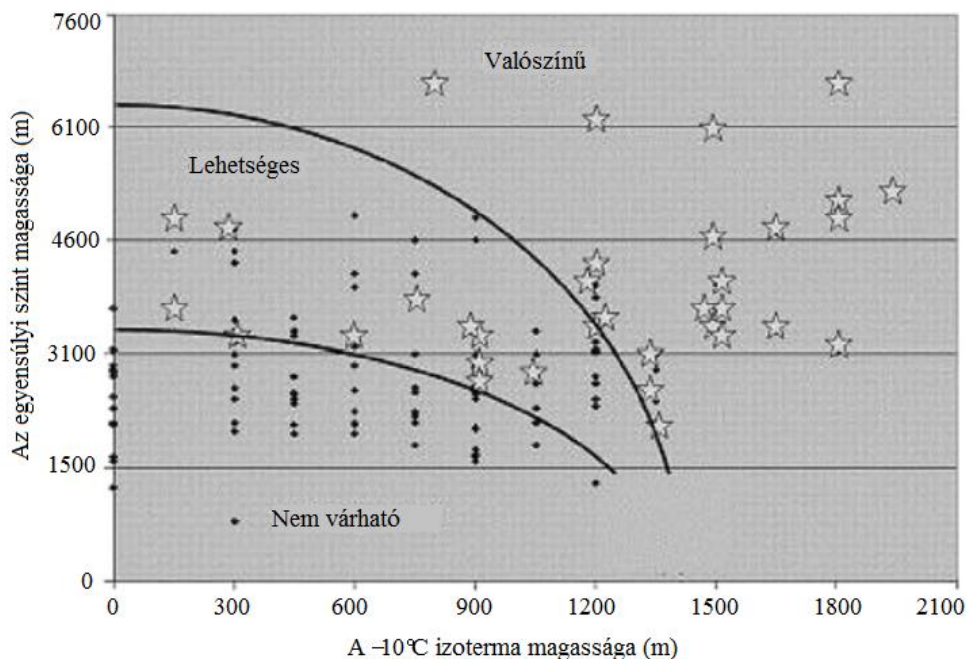
¹⁰ GOES: Geostationary Operational Environmental Satellite, Geostacionárius operatív műhold

¹¹ NGM: Nested Grid Model, beágyazott rácsmodell

A tóparti havazások kialakulását, fejlődését nagymértékben meghatározza a tavak téli végi befagyása is. A jégpáncél növekedésével csökkennek a látens, majd a szenzibilis hőáramok a tavak felett, ezáltal visszaesik a levegő páratartalma, és kevesebb felhőképződés várható. Ahhoz, hogy a tóparti csapadék bekövetkezési idejét és mennyiségét meghatározzuk, pontos előrejelzések szükségesek a jég beálltáról, olvadásáról, kiterjedéséről és vastagságáról (*Wright et al.*, 2012).

A tóparti viharokat zivatar is kísérheti, ez szeptembertől decemberig gyakori, amikor a tavak felszíne viszonylag meleg és a páratartalom is magas; de még év elején, sőt márciusban is előfordulhatnak zivatark. Ezek többnyire adott sávban mozgó viharokhoz köthetők. Előrejelzésük rendkívül nehéz, mivel nincsenek olyan markáns tulajdonságok, amelyek alapján egyértelműen megkülönböztethetők lennének a zivatarral és a zivatar nélkül érkező viharok. *Steiger et al.* (2009) tizenkét év (1995–2007) tóparti viharait vizsgálta az Erie- és az Ontario-tó térségében. Átlagosan hat zivatart jegyeztek fel évente, melyek összesen nyolc zivataros napot eredményeztek ezen a vidéken. A villámlás a tavak keleti és déli része felett volt a leggyakoribb, és csak ritkán terjedt ki a parti területekre. Megfigyelték továbbá, hogy ilyenkor az alsó troposzféra is melegebb. Ennek indikátorai a tó által meghatározott egyensúlyi szint magassága, illetve a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ és a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ izoterma magassága voltak. A jellemző CAPE¹² érték 550 J/kg körül alakult, ami 30%-kal több, mint a zivatar nélküli viharoknál. Észrevették még azt is, hogy a hódera felszíni megjelenését követően egy órán belül mindig megkezdődött a villámlás. Ezen megfigyelések alapján *Steiger et al.* (2009) készített egy nomogramot a tóparti zivatark előrejelzésére (4. ábra).

¹² CAPE: Convective Available Potential Energy, Konvektív hasznosítható potenciális energia



4. ábra. A tóparti zivatarok előrejelzéséhez használt nomogram (Steiger et al., 2009 nyomán). A zivatarral járó hóviharakat csillag jelöli, a zivatar nélküli viharokat pont.

3.4. Az Ontario-tó téli tóparti havazásainak vizsgálata

Az OWLeS¹³ projekt 2013 decemberétől 2014. januárig tartott. A program keretében a résztvevő tudósok és egyetemi hallgatók az Ontario-tó melletti tóparti havazások kialakulásával, a hozzájuk kötődő és őket befolyásoló jelenségekkel foglalkoztak. A hagyományos felszíni méréseken és megfigyeléseken kívül távérzékelési eszközök — például Doppler-radar, Lidar, Wind-profiler — is segítették munkájukat (Kristovich et al., 2017). Az összegyűjtött nagymennyiségű adat elemzése és numerikus modellszimulációk vizsgálata nemcsak a tóparti havazások előrejelzését javítja, hanem mindezek mellett felhívja a figyelmet más, egyelőre kevésbé megértett légköri jelenségek vizsgálatára is.

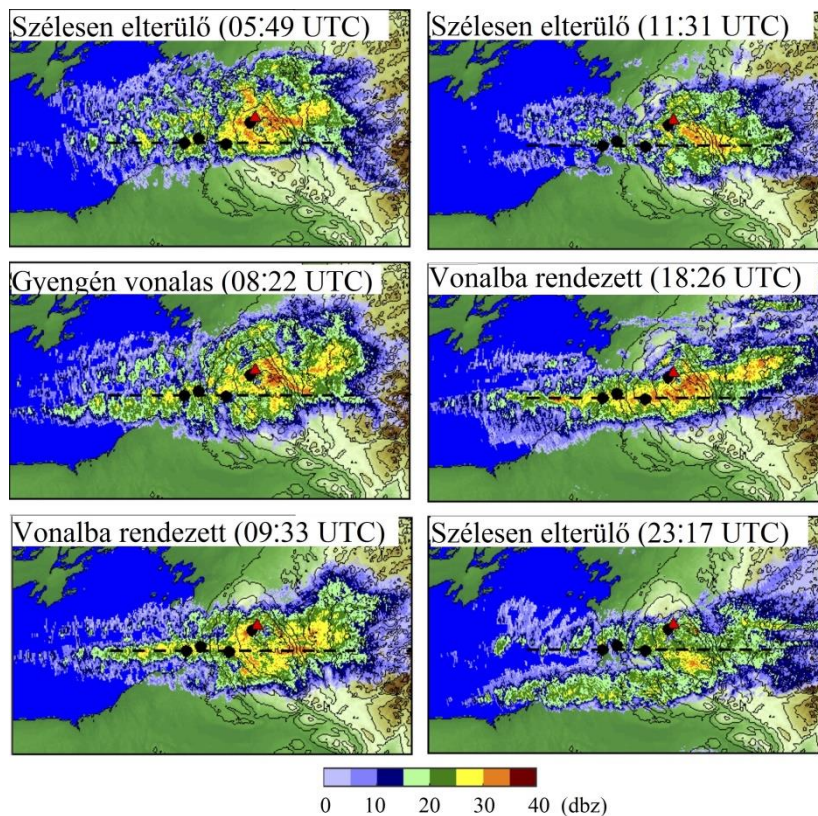
A közbiztonságra gyakorolt jelentős hatása miatt a legfontosabb kutatási területek közé tartozik a tó hossz tengelyével párhuzamosan kialakuló havazások vizsgálata. Ezek veszélyes időjárási helyzeteket hozhatnak létre a parttól távolabb eső területeken is. Bejárt útjuk hosszát főként a konvektív határ réteg magassága és a felső részén beáramló hideg levegő határozza meg (Eipper et al., 2018). Ezek a viharok gyakran járhatnak együtt villámlással is. A projekt kéthavi időtartama alatt hat tóparti zivatart detektáltak, közülük a legaktívabb a január 7.-ei vihar volt (Steiger et al., 2018). Újabb megfigyelések során — akár 4 km átmérőjű — mezoskálájú örvényeket is észleltek a tó hossz tengelyével

¹³ OWLeS: Ontario Winter Lake-effect Systems, az Ontario-tó téli havazási rendszerei

párhuzamosan kialakuló viharokban. Ezek kialakulása a vízszintes nyírási instabilitás feloldásához kapcsolódik (*Mulholland et al., 2017*). A projekt során 2014. január 7.-én, egy rendkívül hideg napon örvények sorozatát detektálták 4 és 8 UTC között, melyeket izolált örvények követtek. A jelenséget sikerült Doppler-radarral vizsgálni, később finom felbontású WRF szimuláció segítségével hasonló méretű és intenzitású örvényeket állítottak elő.

A tóparti viharok gyakran hoznak kiadós csapadékot a Tug Hill fennsík vidékére. (A fennsík — enyhe 1,25%-os emelkedéssel — 500 m-rel magasodik az Ontario-tó keleti partja fölé New York államban.) *Minder et al. (2015)* radarmegfigyelések alapján kimutatta, hogy a csapadéktevékenységnek nem a tó hatására indukált konvekció orografikus megerősödése az oka. Sőt, a parttól távolodva gyengül a konvekció, az intenzív cellák megszűntetik a nedves instabilitást a légtömegben. A konvektív felhőzet stratiform jellegűvé válik, amely ugyanolyan hatékony — vagy akár még hatékonyabb — a csapadék létrehozásában. A réteges felhőzet a kondenzációs magvakat tápláló felhőelem-növekedési mechanizmus által is megnövelheti a lehullott hó mennyiségét a fennsíkon (bár ennek igazolására hiányzott a legalsó 600 m-es réteg profilja). A mélyebben fekvő területeken a felhő alatti szublimáció csökkentheti a lehullott hó mennyiségét, ezáltal fokozva a kontrasztot a különböző magasságú térségeken lehullott csapadékmennyiség között.

A 2013. december 11-12-én zajlott eseményeket (5. ábra) vizsgálva *Campbell et al. (2016)* úgy találta, hogy az ún. orografikus hányados — azaz a magasabb és alacsonyabb vidékeken hullott csapadék aránya — a csapadéksáv szerkezetétől függ. A rendezetlen, szélesen elterülő képződmények eredményezték a legkevesebb csapadékot és a legnagyobb orografikus hányadost. A tó hossz tengelyével párhuzamos, rendezett sávok viszont az alacsonyabban fekvő területeken is olyan mértékben megnövelték a csapadék mennyiségét, hogy az orografikus arány kicsi maradt.



5. ábra. Radarképek a 2013. december 11-én zajlott intenzív tóparti havazásról
(*Campbell et al.*, 2016 nyomán)

Campbell et al. (2017) WRF szimulációk alapján kimutatta, hogy a fenti eseményben meghatározó szerepet töltött be az Ontario-tó délkeleti partvonalá mentén kialakult parti szél kvázistacionárius frontja, amely északkeleti irányban ferdén kettévágta a rendszert, elválasztva egymástól ezáltal a melegebb, tavi és a hűvösebb, kontinentális légtömeget. A határfelület mentén feláramlás indult, amelyet a Tug Hill fennsík felerősített, elősegítve ezáltal a felhőelemek növekedését és csökkentve a szublimációt.

Veals et al. (2018) kilenc év novembertől áprilisig készített radarképei alapján vizsgálta a tóparti csapadékok erősségét meghatározó szárazföldi és orografikus hatásokat. A kapott eredmények alapján a legfontosabb tényezőknek a kísérő határrétegbeli áramlás erőssége, a tó által indukált CAPE és a csapadéksáv szerkezeti felépítése bizonyultak. Erőteljes áramlás több csapadékot eredményezett, amelynek maximuma távolabbra tolódott a parttól; különösen akkor, ha a CAPE értéke magas volt. *Veals et al.* (2015) tizennégy év (2001–2014) radarképeit tanulmányozta. Megfigyelte többek között a tó-hatás napi menetét az átmeneti évszakokban. A tó indukálta események éjszaka és kora reggel gyakoribbak voltak, mint a délután folyamán, bár az eltérés sokkal kisebb volt, mint ami a Nagy-Sóstó partján megfigyelhető (*Alcott et al.*, 2012).

4. A Nagy-tavak további hatásai

4.1. Mérsékeltövi ciklonok

A tavak módosíthatják a felettük áthaladó ciklonok sebességét, mélységét valamint útvonalukat is. *Angel & Isard* (1997) hat feltevést fogalmazott meg, és vizsgált ezzel kapcsolatban (3. táblázat): a ciklonok a régió előterébe érkezve felgyorsulnak, illetve kimélyülnek, a tavak felett hosszú ideig elidőznek, és még inkább kimélyülnek, a térséget elhagyva sebességük ismét megnő, de erejük gyengül. Az évet három szakaszra osztották fel: instabil időszak befagyott tavakkal (januártól márciusig), instabil jégmentes időszak (szeptembertől novemberig) és stabil időszak (májustól júliusig). Áprilist, augusztust és decembert átmeneti hónapnak tekintették, és kihagyták az elemzésből.

3. táblázat. A régión keresztülhaladó ciklonok viselkedése (*Angel & Isard*, 1997 nyomán)

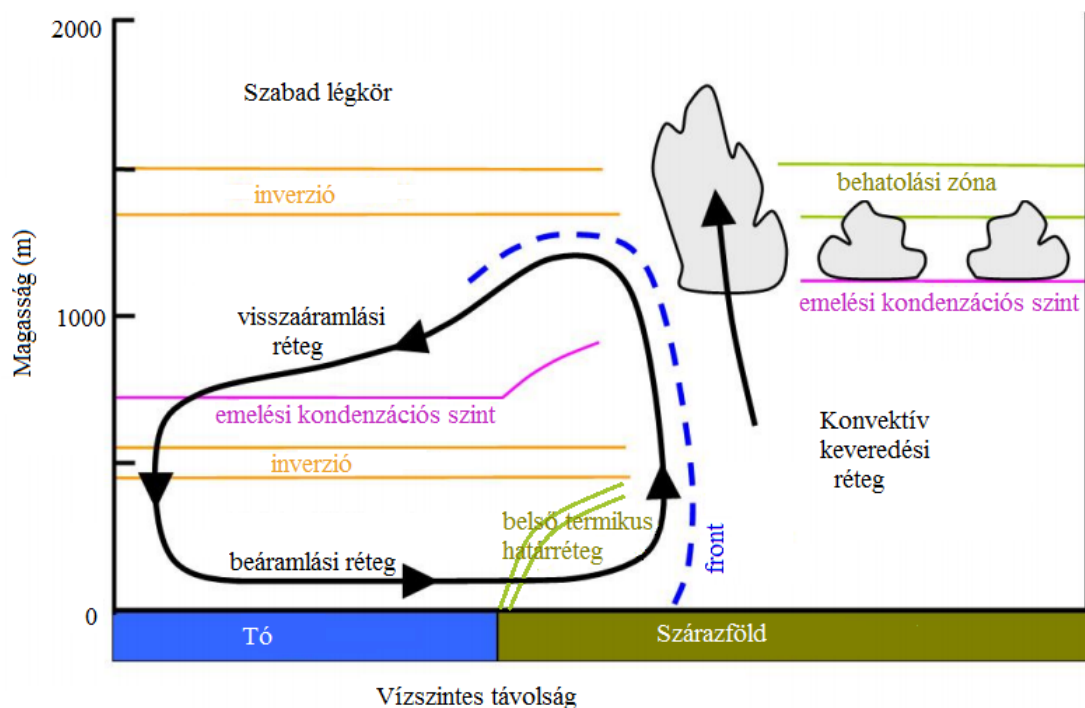
	instabil időszak befagyott tavakkal (I-II-III. hó)	instabil időszak jégmentes tavakkal (IX-X-XI. hó)	stabil időszak (V-VI-VII. hó)
haladási sebesség érkezés előtt	szignifikánsan nő	szignifikánsan nő	szignifikánsan nő
nyomástendencia változása érkezés előtt	csökken	csökken	nem változik
a tavak felett töltött idő	17 óra	18 óra	20 óra
nyomástendencia változása a régióban	nem változik	szignifikánsan csökken	szignifikánsan nő
haladási sebesség távozáskor	csökken	nő	csökken
nyomástendencia változása távozáskor	csökken	nő	csökken

Meglepő módon a stabil hónapokban a hűvös vízfelszín fölé érkező ciklonok intenzitása növekedett. A Nagy-tavak körül és az Atlanti-óceán keleti partján előforduló ciklonokat tanulmányozó kutatók szerint ennek három magyarázata lehetséges: (1) az éjszakai hőmérsékleti viszonyok — hűvösebb szárazföld és melegebb vízfelszín — (*Lansing*, 1965), (2) konvergencia a parti szél frontja mentén (*Simpson*, 1994), vagy (3) a súrlódás csökkenése (pl. *Bosart*, 1975). *Angel & Isard* (1997) elemzése igazolta továbbá *Sousounis & Fritsch* (1994) feltevését, miszerint a tavak általában a gyengébb ciklonokra nagyobb hatással vannak, mint az erősebbekre. A Nagy-tavak ciklonokra gyakorolt

hatásainak pontosabb fizikai magyarázatához szükség lenne egy kontroll mintára, mely hasonló fejlettségű, de a tavak felett át nem haladó ciklonokból állna.

4.2. A parti szél és hatásai a levegőminőségre

A parti szél hajtóereje a tófelszín és a szárazföld fölötti levegő légnyomás-különbsége. Ennek az áramlási rendszernek a felépítését a 6. ábra szemlélteti. A beáramlási ág hűvös, nedves levegőt szállít a part felé, ahol egy keskeny sávban feláramlás indul; ezt a sávot nevezik a parti szél frontjának. Itt gyakran konvektív felhőzet alakul ki. Az aláereszkedő visszaáramlási ág süllyedési inverziót hoz létre a tó felett, amely megakadályozza a konvektív felhők kialakulását a partközelenben (Segal *et al.*, 1997).



6. ábra. Keresztmetszet a parti szél áramlási rendszeréről (Sills *et al.*, 2011 nyomán)

A parti szelek napkelte után néhány órával keletkeznek, és napnyugta körül tűnnek el; a nyári hónapokban átlagosan 10 órán át figyelhetők meg. Elsősorban az áramlási mezőben megjelenő szinoptikus skálán jellemző szél erőssége és iránya szabja meg, milyen mélyen hatolnak be a szárazföldre (pl. King *et al.*, 2003), de Physick (1980) kimutatta, hogy más tényezők — domborzat, talajnedvesség, a víz és a szárazföld közti hőmérsékletkülönbség — is befolyásolhatják útvonalukat. Emellett a szinoptikus skálájú szél deformálhatja is a parti szél áramlási rendszerét, aszimmetrikussá téve azt (Sills *et al.*, 2011).

A kialakuló komplex helyi áramlási rendszer nagymértékben befolyásolja a levegőminőséget: a szennyező anyagok eloszlása, terjedése és a lezajló levegőkémiai

folyamatok révén. A partra kifutó áramlat a lee oldalon elősegíti az ún. fumigációt: habár a partvonalon kibocsátott szennyezőanyag a hűvös, stabil rétegződésű nedves levegőben egy toll alakzatba tömörülne, de kölcsönhatásba kerülve a parton a konvektív keveredési réteggel a szennyeződés lejut a felszínre. A nedves légtömeg keveredési rétegének vastagsága mindössze 10%-a a távolabbi (tó által nem befolyásolt) légtömeg vastagságának, így a szennyezőanyagok sokáig és nagy koncentrációban megmaradhatnak a felszín közelében (*Lyons & Cole, 1973*) — ezt hívják „plume trapping”-nek, vagyis magyarul szennyezés befogásnak. A parti szelek gyakran közreműködnek fotokémiai szmog létrehozásában is (az ózon prekursorok szállításával), ha viszonylag meleg a szárazföldi levegő és erős a besugárzás (*Hastie et al., 1999*). Ezenkívül a nedves mélykonvekció kialakulását is elősegítik, amely átkeveri a levegőt: a szennyező anyagokat a felső troposzférába emeli, helyére viszonylag tiszta levegő áramolhat le.

2007 nyarán a BAQS-Met¹⁴ program tanulmányozta a Nagy-tavak déli részén a határreteg mezoskálájú jelenségeit, főképpen a parti szelet (*Sills et al., 2011*). A felszíni megfigyeléseken kívül műhold- és radarképeket is elemeztek. Emellett a GEM¹⁵ numerikus előrejelző modell (*Côté et al., 1998*) egy korlátos tartományú változatát, valamint az ezzel meghajtott AURAMS¹⁶ regionális levegőkémiai modellt (*Makar et al., 2010a,b*) is tesztelték. A GEM modell kiválóan előrejelzi a parti szél megjelenését és deformációját, illetve a parttól való eltávolodást is képes többé-kevésbé prognosztizálni. Az ózonképződési folyamatok szimulációját nagyban segítené, ha a levegőkémiai modellben fejlesztenék az aromás vegyületek másodlagos oxidációs mechanizmusait.

4.3. Az északnyugati áramláshoz kötődő havazás (NWFS)

Az NWFS a lejtők menti feláramlást és az alacsonyszintű északnyugati szeleket kísérő havazás, amely főként az Appalache-hegység déli területeit érinti (*Holloway, 2007*), gyakran megnehezítve az itt élő emberek mindennapi életét és a közlekedést. A hóesés mennyisége és térbeli eloszlása nem előrelátható, így ez a jelenség nehéz feladat elé állítja az amerikai időjárás-előrejelzőket.

¹⁴ BAQS-Met: Border Air Quality and Meteorology Study, Határmenti levegőminőség és meteorológiai tanulmány

¹⁵ GEM: Global Environmental Multiscale model, Globális környezeti többskálájú modell

¹⁶ AURAMS: A Unified Regional Air-quality Modeling System, Egységesített regionális levegőminőségi modellrendszer

A GSP NSW¹⁷ előrejelzési osztálya többéves megfigyelések alapján három fő csoportba sorolta a havazásokat [3-Lee, 2005]: (1) A legáltalánosabb típus a posztfrontális havazás, amikor hideg légtömeg érkezik a hegyeken át, miközben egy mélyülő alacsonynyomású rendszer a felszínen északkelet felé mozog a Csendes-óceán keleti partja mentén. (2) A második esetben az alacsonynyomású rendszer északnyugati részéből felhőszálya nyúlik hátra. (3) A harmadik típus egy magasszintű cut-off teknő [4-met.hu] jelenlétéhez köthető.

A Nagy-tavak vize fontos hő- és nedvességforrást jelent a felfelé törekvő légtömeg számára, ezáltal elősegíti az instabilitás növekedését. Így több levegő emelkedhet fel, s a lehulló csapadék akár 20-30%-kal is több lehet. A tavak hatása tetten érhető az ún. Froude-szám (*National Research Council*, 1992) megnövekedésében. (Az általános Froude-szám (F_r) a hegyek blokkoló hatását jellemzi, míg a nedves Froude-szám (F_w) az orografikus csapadék előfordulásának meghatározására szolgál.) A Nagy-tavak közreműködése azonban nem feltétlenül szükséges az NWFS kialakulásához, csak erősíti azt. A csapadék mennyiségét és eloszlását is inkább az Appalache-hegység domborzata határozza meg (*Holloway*, 2007).

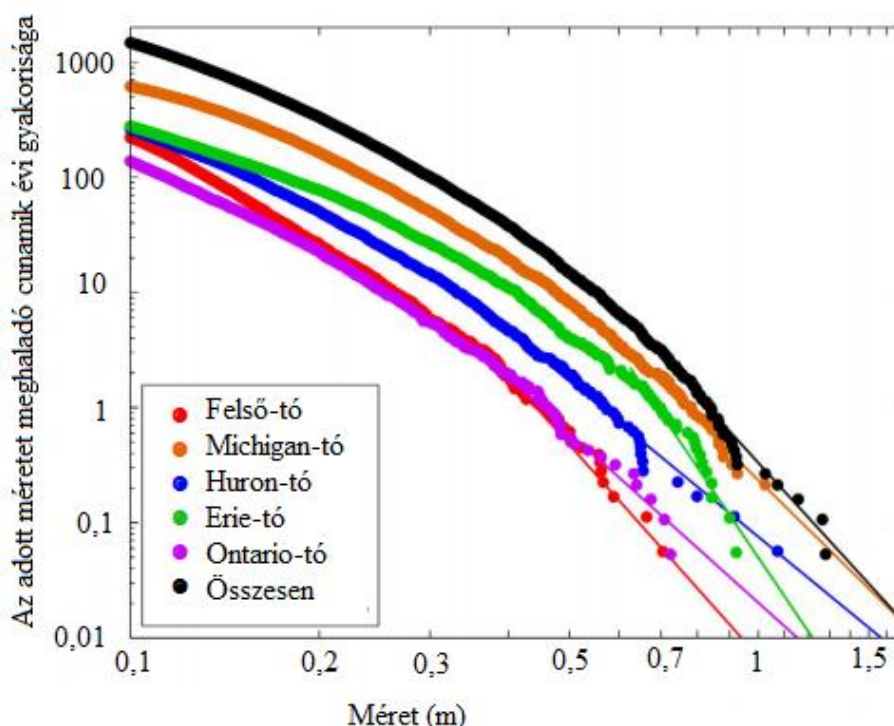
4.4. A meteorológiai cunami

Érdekes helyi jelenség a meteorológiai cunami, azaz olyan víz hullám, amelyet meteorológiai hatások váltanak ki (*Bechle et al.*, 2016), de térbeli és időbeli jellemzőit tekintve nagyon hasonló a szeizmikusan létrejövő szökőárhoz (pl. *Práger & Pieczka*, 2013). Ezt a jelenséget legtöbbször a frontátvonulásokat, mérsékeltövi ciklonokat, légköri gravitációs hullámokat és a mezoskálájú konvektív rendszereket kísérő légnyomás-, illetve szél-perturbáció hozza létre. A szélkeltette meteorológiai cunamik főként a ciklonokhoz köthetők, míg a légnyomáskülönbség által kiváltott események leginkább a konvektív képződményekkel hozhatók kapcsolatba (*Linares*, 2018).

Bechle et al. (2016) kutatásai szerint a Nagy-tavak vidékén évente átlagosan 106 olyan meteorológiai cunami fordul elő, amely két óránál rövidebb periódusidejű és 3 m-nél magasabb. Legsűrűbben (évente mintegy 50 alkalommal) a Michigan-tavon alakulnak ki. A legnagyobb katasztrófa 1954-ben Chicago mellett történt (*Ewing et al.*, 1954), azóta 2012-ben (*Anderson et al.*, 2015) és 2014-ben alakultak ki nevezetes meteorológiai cunamik.

¹⁷ GSP NSW: Greenville-Spartanburg National Weather Service, Greenville-Spartanburgi Nemzeti Időjárési Szolgálat (Amerikai Egyesült Államok)

Méret szerinti gyakoriságuk a Pareto-eloszlást (Dévényi & Gulyás, 1988) követi (7. ábra). A meteorológiai cunamik tavasztól ősziig bármikor előfordulhatnak, de leginkább májusban jellemzőek, s általában a tavak délnyugati részén jönnek létre.



7. ábra. A meteorológiai cunamik méret szerinti gyakorisága. (Bechle et al., 2016 nyomán)

A Nagy-tavak vidékén elsősorban komplex és vonalba rendeződött mezoléptékű konvektív rendszerek alakítanak ki meteorológiai cunamit, valamint a mérsékeltövi ciklonok. Az éghajlatváltozás hatására a ciklonok száma várhatóan csökkenni fog (Trenberth et al., 2007), viszont a konvektív viharok száma — főként tavasszal — növekedhet (Seeley & Romps, 2015). Emiatt a meteorológiai cunamik egyre gyakoribbá válhatnak, vagy a szezonjuk korábbra tolódhat.

4.5. Távkapcsolatok

Észak-Amerika időjárásának hosszabb távú alakulását nagyrészt az ún. PNA¹⁸ oszcilláció (Barnston & Livezey, 1987) határozza meg, így ennek alakulása használható az évszakos előrejelzésekben is. A Nagy-tavak a PNA oszcilláció rendszerének magas és alacsony nyomású centruma között félúton helyezkedik el, így a centrumok elcsúszása vagy a rendszer térbeli szerkezetének változása sokféleképpen módosíthatja a téli időjárást.

¹⁸ PNA: Pacific/North-America Oscillation, Csendes-óceán — Észak-Amerika Oszcilláció

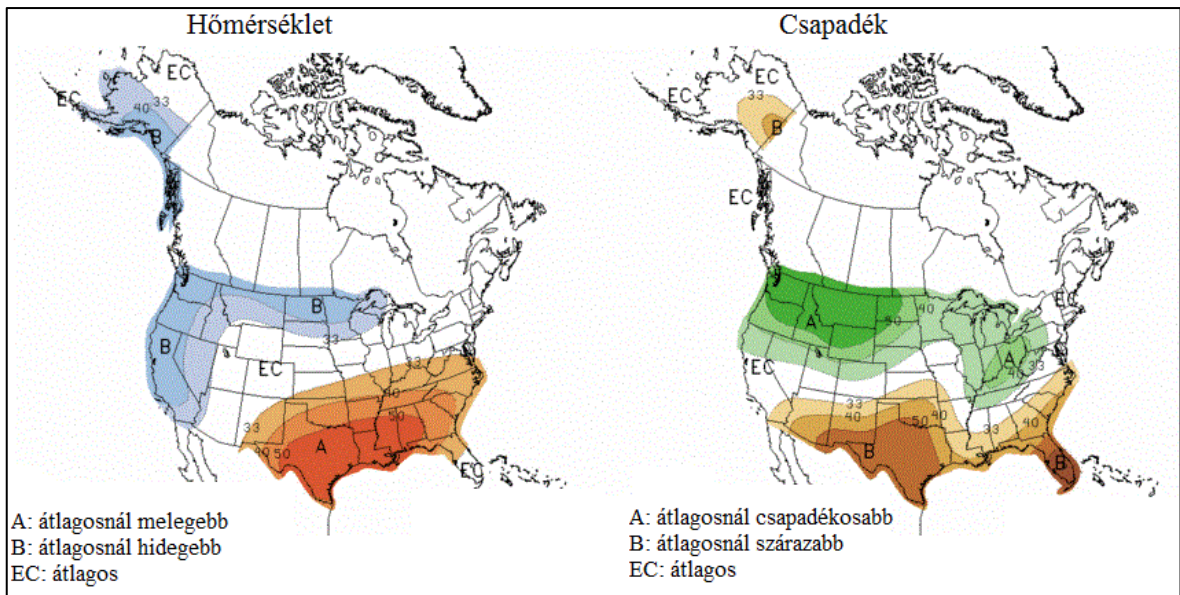
Tulajdonképpen a PNA testesíti meg az ENSO¹⁹ trópusokon kívüli hatását a téli évszakban. *Bai et al.* (2012) elemezte az 1963 és 2010 közötti telek időjárását a térségben. Erőteljes El Niño időszakban a hideg arktikus légtömegek beáramlása gátlódik, míg a meleg csendes-óceáni levegő feljuthat a magasabb szélességekre is, melynek következményeképpen enyhe tél várható a Nagy-tavak vidékén. Ekkor keleti és északkeleti irányú szelek jellemzőek. La Niña időszakban a déli és délnyugati áramlatok meleg levegőt szállítanak a térségbe: így a szokásosnál enyhébb tél várható, mely az El Niño időszakokhoz képest kisebb mértékű eltérést jelent az átlagos viszonyokhoz képest. Gyengébb, illetve neutrális ENSO fázisok idején kiterjedt jégpáncél alakul ki a Nagy-tavakon, míg erőteljes El Niño vagy La Niña időszakok alatt a tavak kisebb mértékben fagynak be (*Bai et al.*, 2012).

Mivel a Nagy-tavak az izlandi teknőtől és az azori gerinctől távol esik, így a NAO²⁰ (*Hurrell et al.*, 2003) hatása kevésbé érvényesül. Negatív NAO fázis esetén gyengül a poláris örvény és a nyugati szél; a tavak felett egy teknő, Észak-Amerika nyugati partjainál pedig egy gerinc alakul ki. Ez a nyomási kép kedvez az arktikus levegő beáramlásának, következésképpen hideg tél várható, és több jég alakul ki a tavak felszínén. Pozitív NAO fázis esetén erősödik a poláris örvény és a nyugati szél, ezért meleg levegő áramlik be délről a Nagy-tavak térségébe, így enyhe tél várható, s kevésbé fagynak be a tavak.

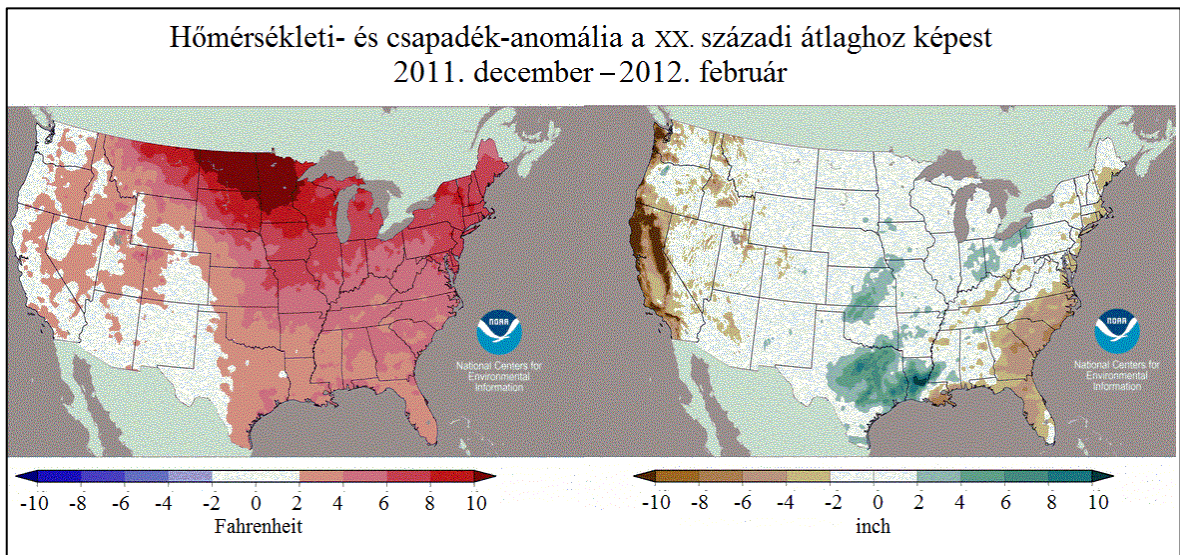
Időnként előfordul, hogy az ENSO és a NAO együttesen alakítja az időjárást a Nagy-tavak térségében. Ez történt 2011/12 telén is, amikor a La Niña és a NAO pozitív fázisának kombinált hatása eredményeként alig fagytak be a tavak (*Bai et al.*, 2015). A vízfelszín hőmérséklete a tél elmúltával másfél hónappal korábban érte el a +4 °C-ot, mint az éghajlati átlag. Ekkora mértékű melegedést nem okozhatott volna külön-külön a két oszcilláció. A kialakult áramlási rendszer gátolta az arktikus légtömegek beáramlását északról, közben utat nyitott a Mexikói-öbölből jövő melegadvekciónak. A pozitív hőmérsékleti anomáliát nem lehetett előre látni: a NOAA éghajlati előrejelző központja novemberben még az átlagosnál hidegebb és nedvesebb időjárást prognosztizált a Nagy-tavak vidékére (8. ábra). Habár a La Niña fázisra számítottak, végül mégis a kevésbé szabályosnak tekinthető NAO döntötte el az időjárás alakulását (9. ábra).

¹⁹ ENSO: El Niño Southern Oscillation, El Niño Déli Oszcilláció

²⁰ NAO: North-Atlantic Oscillation, Észak-Atlanti Oszcilláció



8. ábra. Valószínűségi előrejelzések Észak-Amerika téli időjárására készült: 2011 novemberében [5-noaa.gov]



9. ábra. Detektált éghajlati anomáliák Észak-Amerikában 2011/12 telén [6-noaa.gov]

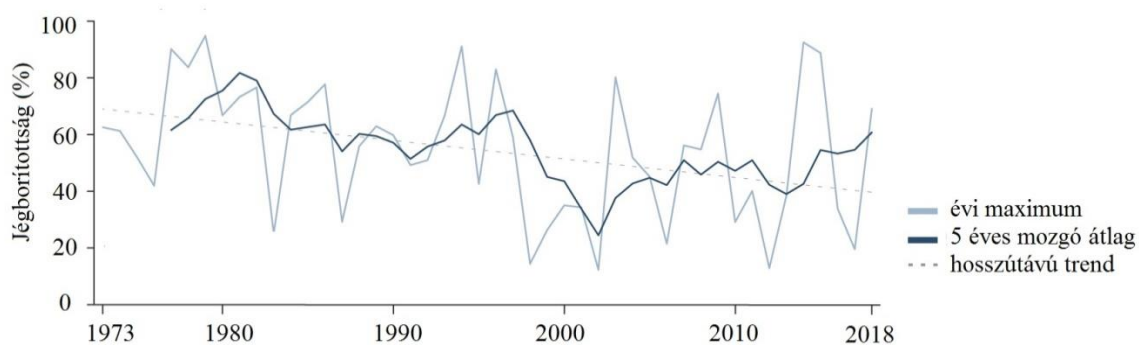
5. A klímaváltozás hatásai

5.1. A XX. század végéig detektált változások

Mint mindenütt a Földön, a Nagy-tavak térségében is tapasztalható az éghajlatváltozás. A XX. században a tavak csökkenő jegesedése és a vízfelszín hőmérsékletének emelkedése kedvezett a tóparti havazás kialakulásának (*Kunkel et al.*, 2009). Fontos hangsúlyozni, hogy a levegő hőmérséklete elsősorban tavasszal és nyáron lett magasabb, a tavak vize a nagy hőkapacitás miatt később melegedett, biztosítva a megfelelő mennyiségű párolgást, miközben a levegő télen már eléggé lehűlt ahhoz, hogy hó hullhasson. Közeleli tavak (Finger Lakes) üledékének oxigénizotópos vizsgálatával *Burnett et al.* (2003) kiderítette, hogy a csapadékvíz valóban a Nagy-tavakból és nem az óceánból származik, és a tavaszi hóolvadást követő lefolyáskor került az üledékbe.

Kunkel et al. (2009) vizsgálatában néhány állomás adatait mellőzte, mivel időbeli inhomogenitás miatt (áthelyezés, műszercsere, valamint a megfigyelési módszerek változása következtében) nem találta azokat alkalmasnak hosszútávú trendek vizsgálatára. A megmaradt állomásokon mind az öt tó körül növekvő trendet mutatott a hőmérséklet, illetve a hő- és nedvesség-áramok által kiváltott havazás is, bár csak feleakkorát, mint amit a megelőző tanulmányok (pl. *Ellis & Johnson*, 2004) kaptak. A pontosabb eredményekhez a helyi hatásokon kívül figyelembe kell venni a nagyobb skálájú változásokat is, például a hideg arktikus légtömegek betörési gyakoriságát és intenzitását.

Az 1970-es évek óta egyértelműen kimutatható a Nagy-tavak évi maximális eljegesedésének csökkenése (10. ábra). Mára már az Ontario-tó és a Michigan-tó vizének akár 80–90%-a is jégmentes maradhat egész télen át. A legnagyobb csökkenő trendet a Felső-, a Huron-, és az Erie-tó téli jégpáncélja mutatja. Az évtizedes és az ezen belül megfigyelhető éves ingadozásokat részben az időjárás változékonysága, részben a 4.5. alfejezetben ismertetett oszcillációk okozzák [7-noaa.gov].



10. ábra. A Nagy-tavak évi legnagyobb arányú eljegesedésének alakulása 1973 és 2018 között [7-noaa.gov].

A megfigyelt változások nagy valószínűséggel összefüggnek az emberi tevékenység által kiváltott klímaváltozással (*Hayhoe et al.*, 2010), bár regionális skálán nehéz elkülöníteni az antropogén hatásokat. A jövőbeli állapotok előrejelzésében bizonytalanságot okoz az emberiség további tevékenységének (pl. üvegházhatású gázok kibocsátása) és az erre adott éghajlati válasznak a becslése. Ennek elemzésére a kutatók többféle scenáriót dolgoztak ki, előbb a SRES²¹ (*Nakićenović & Swart*, 2000), majd a sugárzási kényszeren alapuló RCP²² scenáriók (*van Vuuren et al.*, 2011) születtek meg.

5.2. A XXI. században várható éghajlati trendek

A különböző elemzésekből úgy tűnik, hogy a közelmúltban detektált éghajlati trendek előreláthatóan a jövőben is folytatódni fognak a térségben (*Gula & Peltier*, 2012). A léghőmérséklet emelkedését várhatóan követi a tavak vizének felmelegedése is. Ennek következtében egyre később és egyre kisebb mértékben fagynak be, és a jég is korábban indul olvadásnak tavasszal. A hőmérséklet növekedése elősegíti az intenzívebb párolgást, a klímamodellek nagy része a csapadékmennyiség növekedését prognosztizálja a téli és tavaszi hónapokra, viszont ennek egyre kevesebb része hullik hó formájában (*Gula & Peltier*, 2012), ezáltal csökken a tavaszi hóolvadás és a lefolyás. A heves tóparti hóviharaknak kedvező időjárási helyzetek egyre ritkábbak lesznek, s *Kunkel et al.* (2002) elemzései alapján télen is inkább az őszi hónapokra jellemző esőzések várhatók majd.

²¹ SRES: Special Report on Emissions Scenarios, Tematikus Jelentés a Kibocsátási Forгатókönyvekről

²² RCP: Representative Concentration Pathway, Reprezentatív Koncentrációs Nyomvonalak

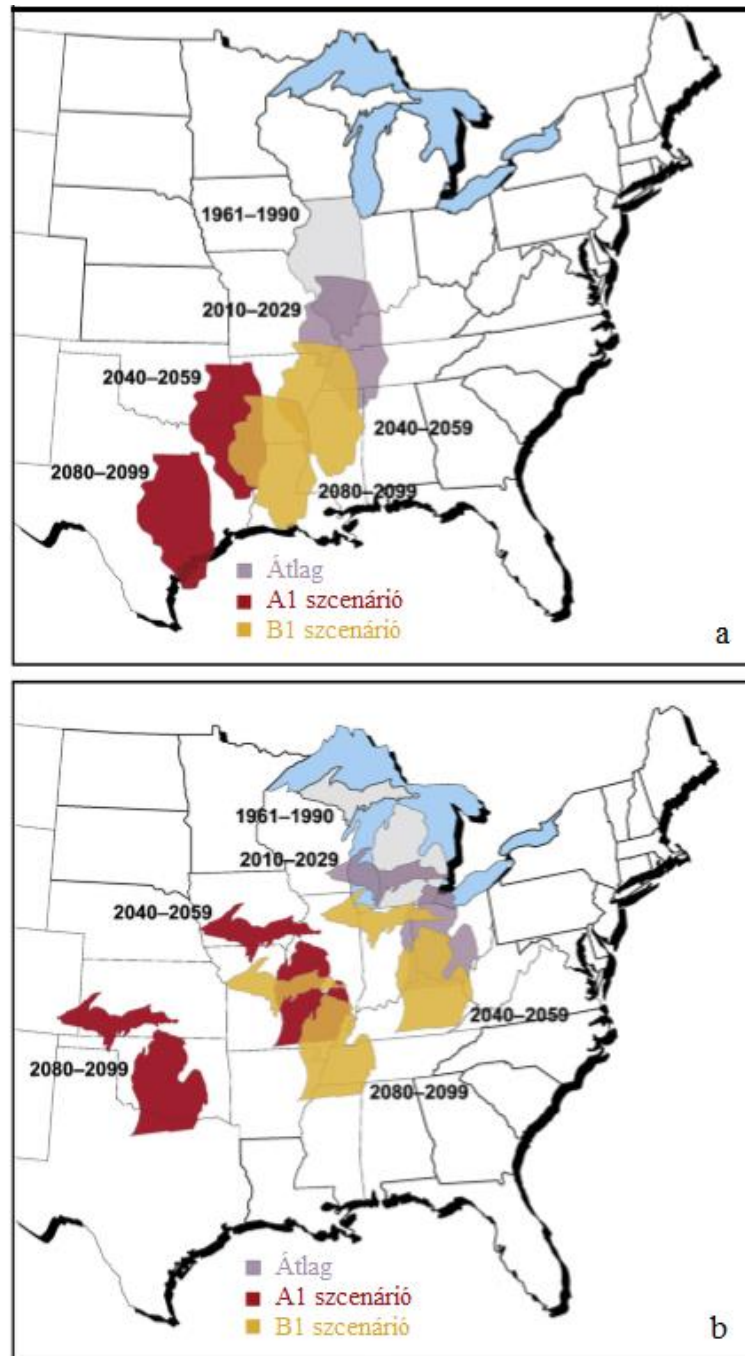
A tavak által indukált havazást nem mindig különböztetik meg a tavak által felerősített havazástól. Elkülöníthető azonban egy, a tavak által befolyásolt övezet és a tavak hatáskörén kívül eső övezet. Az egész területre kiterjedő havazásokat átlagolva és kivonva az előbbi övezetet képviselő cellák értékéből megkapjuk a tavak által kiváltott hatásokat (Suriano *et al.*, 2015). A havazás részaránya a csapadékban várhatóan egyre kevesebb lesz a teljes régióban, viszont a két övezet közti éghajlati jellegű eltérés egyre kisebb lesz, mivel a tavak által befolyásolt övezetben erősebb a havazás becsült csökkenése.

Egyre nagyobb érdeklődés tapasztalható a tóparti havazások gyakoriságának és erősségének jövőbeli alakulása iránt, jelentős gazdasági és társadalmi hatásuk miatt. Notaro *et al.* (2015) megjegyezte: Jóllehet az IPCC²³ Ötödik helyzetértékelő jelentése (IPCC, 2013) sorra vette az extrém időjárási eseményekre irányuló kutatásokat, ez a jelenség kimaradt a listából. Sajnos a Negyedik helyzetértékelő jelentés (IPCC, 2007) Észak-Amerikával foglalkozó fejezete (Field *et al.*, 2007) sem említette a tóparti havazásokat.

Hayhoe *et al.* (2010) a nyári átlaghőmérséklet és csapadék várható alakulását, illetve a napi maximumhőmérsékletből és a páratartalomból származtatott hőindexet (Union of Concerned Scientists, 2006) vizsgálva éghajlati analógiákat keresett a becsült változások utáni éghajlati viszonyok jelenlegi előfordulására. Az elemzés alapján a változások úgy is tekinthetők, mintha a Nagy-tavak körüli államok egyre délebbre és nyugatabbra „vándorolnának” (11. ábra).

Emellett a tavak vízszintjét befolyásoló hatásokat tanulmányozva Hayhoe *et al.* (2010) úgy találta, hogy a felmelegedés módosíthatja a tavi cirkulációt, a párolgás és lefolyás mennyiségét, a fagyás és olvadás idejét, valamint a nyári hőmérsékleti rétegződést. A tavak vízszintje erős felmelegedés esetén várhatóan csökkenni fog, de a korábbiakhoz hasonló évtizedes ingadozásokkal.

²³ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change, Éghajlatváltozási Kormányközi Testület



11. ábra. A nyári átlaghőmérséklet és csapadék várható alakulása alapján a Nagy-tavakkal szomszédos államok — Illinois (a) és Michigan (b) — jövőben valószínűsíthető éghajlati viszonyaihoz hasonló jelenlegi éghajlati analógia térségek.

(Hayhoe et al., 2010 nyomán)

A tavak csökkenő jegesedése és felmelegedése elősegíti a víz korai átrétegződését, amely a XXI. század végére akár egy hónappal előbb is bekövetkezhet (Notaro et al., 2015). A felső 15 m vertikális hőmérsékleti profilja alapján valószínűsíthető, hogy a vízszlop stabilitása jelentősen megnő tavasz végén és nyár elején. Emiatt a tó mélyén

oxigénhiány léphet fel, amely károsan hat a tavi élővilágra és szélsőséges esetben akár a pusztulásához is vezethet.

Évtizedes kutatások és fejlesztések után az ECCC²⁴ nemrég létrehozta a WCPS²⁵ modellrendszert, amely a Nagy-tavak és a Szent-Lőrinc folyó vizének körforgását szimulálja (*Durnford et al., 2018*). A legfontosabb vizsgált jellemzők a csapadék, a párolgás, a vízszint alakulása, a vízhőmérséklet, az áramlatok és a jégvastagság. Naponta két, megbízható prognózis készül a következő három napra. Ezek felhasználhatók szélsőséges események előrejelzésére (pl. hirtelen olvadás, áradás, aszály); valamint segítik a kialakult katasztrófák (pl. olajfoltok) kezelését.

²⁴ ECCC: Environment and Climate Change Canada, Környezet- és Klímaváltozás Kanadában

²⁵ WCPS: Water Cycle Prediction System, Hidrológiai Ciklus Előrejelző Rendszer

6. Összegzés

Az észak-amerikai Nagy-tavak a világ legnagyobb kiterjedésű édesvízi tóvidéke. A hatalmas víztömeg jelentősen befolyásolja a környező területek időjárási viszonyait, ezáltal számottevő hatást gyakorol a közlekedésre, a mezőgazdaságra és a kereskedelemre (Suriano *et al.*, 2015). A térség hóviharai jelentős kárt okozhatnak a középületekben és a magánházakban. Mindenekelőtt azonban az emberi élet védelmében szükséges foglalkozni a problémával és jobban megismerni a várható időjárási jelenségeket és védekezési lehetőségeinket. Szakdolgozatom célja, hogy — a viszonylag távol lévő földrajzi helyszín ellenére — a hazai szakirodalmat kiegészítsem a Nagy-tavakkal kapcsolatos meteorológiai, éghajlati jelenségek áttekintésével.

A térségre vonatkozóan a legfontosabb éghajlatalakító tényezők a vízfelszín és a szárazföld közötti hőkapacitás-különbség, az eltérő sűrűlási viszonyok, valamint a tavak állandó párolgása. Már az 1900-as évek meteorológiai témájú tanulmányai (pl. Lansing, 1965, Bates *et al.*, 1993) is felismerték a Nagy-tavak legfontosabb hatásait az időjárási elemekre:

(1) A tavak hőtehetetlensége csökkenti a léghőmérséklet és a felszínhőmérséklet napi és éves szintű ingadozását.

(2) A téli hónapokban a légköri instabilitás erősödése révén megnövekszik a csapadék mennyisége a vidéken, különösen a tavak lee oldalán.

(3) A hőmérséklet-különbségek hatással vannak a légnyomásra és a szélmezőre is. Nyáron a tavak jelenléte miatt valamelyest magasabb a légnyomás és az áramlás alapvetően anticiklonális jellegű, télen általában alacsonyabb légnyomás és ehhez kapcsolódóan ciklonális áramlási viszonyok jellemzők (Notaro *et al.*, 2013a).

(4) A tavak befagyása egyrészt megváltoztatja a helyi cirkulációs viszonyokat (Vavrus *et al.*, 2013), másrészt csökkennek a látens, majd a szenzibilis hőáramok a tavak felett, ezáltal visszaesik a levegő páratartalma, és kevesebb felhőképződés várható.

A térséghez kötődő legismertebb jelenség az ún. „lake-effect snow”, amely egy mezoskálájú, konvektív csapadéktípus, jellemzően a Nagy-tavak lee oldalán alakul ki késő ősszel és télen (Niziol *et al.*, 1995). Ilyenkor a térség felett áthaladó hideg, száraz kontinentális-poláris légtömegeknek fontos hő- és nedvességforrást jelent a tavak viszonylag meleg vize. A vízfelszín és a szárazföld eltérő hőmérséklete és érdessége következtében kezdetben konvergencia-zónák jönnek létre, amelyek elősegítik a levegő rendezett felemelkedését. A tóparti havazások kialakulását meghatározó és előrejelzésekor

figyelembe vett legfőbb tényezők *Notaro et al.* (2013b) tanulmánya alapján a következők: a tó és a levegő közti hőmérséklet-különbség, a párányomás változása a tó felett, szélirány, szélsébség, és szélnyírás az alsó-troposzférában, a tavi jég kiterjedése és vastagsága, inverzió jelenléte a magasabb légrétegekben, valamint a közép-troposzférikus hullámrendszerek amplitúdója.

Hjelmfelt (1990) csoportosította a nyugati tavak térségében létrejövő havazásokat. Később az osztályozást kiterjesztették a keleti tavak területére is. Ekkor már figyelembe vették a légtömeg tó felett megtett útjának hosszát is, amely jelentősen befolyásolja a kialakuló időjárási viszonyokat (*Niziol et al.*, 1995).

A Nagy-tavak további említésre méltó hatásai a következők.

(1) A tavak módosíthatják a felettük áthaladó ciklonok sebességét, mélységét valamint útvonalukat is (*Angel & Isard* (1997).

(2) A parti szél komplex helyi áramlási rendszere nagymértékben befolyásolja a levegőminőséget: a szennyező anyagok eloszlása, terjedése és a lezajló levegőkémiai folyamatok révén (*Sills et al.*, 2011).

(3) A tavak közreműködnek a lejtők menti feláramlást és az alacsonyszintű északnyugati szeleket kísérő havazás (NWFS) kialakulásában is, amely főként az Appalache-hegység déli területeit érinti (*Holloway*, 2007).

(4) A Nagy-tavak vidékén a mérsékeltövi ciklonok, valamint a komplex és vonalba rendeződött mezoléptékű konvektív rendszerek viszonylag gyakran alakítanak ki meteorológiai cunamit (*Bechle et al.*, 2016).

(5) A téli évszakban számolni kell az ENSO és a NAO időjárás-módosító hatásaival is. (*Bai et al.*, 2012).

A Nagy-tavak térségében tapasztalható éghajlatváltozás előreláthatóan a jövőben is folytatódni fog (*Gula & Peltier*, 2012). A léghőmérséklet emelkedését várhatóan követi a tavak vizének felmelegedése is. Ez elősegíti az intenzívebb párolgást, a modellek nagy része a csapadékmennyiség növekedését prognosztizálja a téli és tavaszi hónapokra, viszont ennek egyre kevesebb része hullik hó formájában, télen is inkább az őszi hónapokra jellemző esőzések várhatók (*Kunkel et al.*, 2002).

Emellett a felmelegedés módosíthatja a tavi cirkulációt, a párolgás és lefolyás mennyiségét, a fagyás és olvadás idejét, valamint a nyári hőmérsékleti rétegződést. A tavak vízszintje erős felmelegedés esetén várhatóan csökkenni fog, de a korábbiakhoz hasonló évtizedes ingadozásokkal. (*Hayhoe et al.*, 2010)

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt hálásan köszönöm témavezetőmnek, Dr. Pongrácz Ritának a szakdolgozat elkészítésében nyújtott mindennemű segítségét, türelmét, szüntelen bátorítását, az OWLeS projekttel kapcsolatos érdekesítő cikksorozatot; és ezúton szeretnék köszönetet mondani, hogy sok elfoglaltsága között is időt tudott szakítani konzultációra.

Tiszta szívből köszönöm szüleimnek, testvéreimnek és Erdei Annának az állandó biztatást és a nyugodt, csendes környezetet a szakdolgozat megírásához.

Irodalomjegyzék

- Alcott, T. I., Steenburgh, W. J., Laird, N. F., 2012: Great Salt Lake–effect precipitation: Observed frequency, characteristics, and associated environmental factors. *Weather and Forecasting*, 27, 954–971, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00016.1>
- Anderson, E. J., Bechle, A. J., Wu, C. H., Schwab, D. J., Mann, G. E., Lombardy, K. A., 2015: Reconstruction of a meteotsunami in Lake Erie on 27 May 2012: Roles of atmospheric conditions on hydrodynamic response in enclosed basins. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 120, 8020–8038, <https://doi.org/10.1002/2015jc010883>
- Angel, J. R., Isard, S. A., 1997: An Observational Study of the Influence of the Great Lakes on the Speed and Intensity of Passing Cyclones. *Monthly Weather Review*, 125, 2228–2237, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<2228:AOSOTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<2228:AOSOTI>2.0.CO;2)
- Bai, X., Wang, J., Austin, J., Schwab, D. J., Assel, R., Clites, A., Bratton, J. F., Colton, M., Lenters, J., Lofgren, B., Wohlleben, T., Helfrich, S., Vanderploeg, H., Luo, L., Leshkevich, G., 2015: A record-breaking low ice cover over the Great Lakes during winter 2011/2012: combined effects of a strong positive NAO and La Nina. *Climate Dynamics*, 44, 1187–1213, <http://doi.org/10.1007/s00382-014-2225-2>
- Bai, X.; Wang, J.; Sellinger, C.; Clites, A.; Assel, R., 2012: Interannual variability of Great Lakes ice cover and its relationship to NAO and ENSO. *Journal of Geophysical Research*, 117, C03002, <https://doi.org/10.1029/2010JC006932>
- Barnston, A. G., Livezey, R. E., 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115, 1083–1126, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2)
- Bates, G. T., Giorgi, F., Hostetler, S. W., 1993: Toward the Simulation of the Effects of the Great Lakes on Regional Climate. *Monthly Weather Review*, 121, 1373–1387, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1993\)121<1373:TTSOTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<1373:TTSOTE>2.0.CO;2)
- Bechle, A. J., Wu, C. H., Kristovich, D. A. R., Anderson, E. J., Schwab, D. J., Rabinovich, A. B., 2016: Meteotsunamis in the Laurentian Great Lakes. *Nature, Scientific Reports*, 1–8, <https://doi.org/10.1038/srep37832>
- Bosart, L. F., 1975: New England coastal frontogenesis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 101, 957–978, <https://doi.org/10.1002/qj.49710143016>
- Burnett, A. W., Kirby, M. E., Mullins, H. T., Patterson, W. P., 2003: Increasing Great Lake–Effect Snowfall during the Twentieth Century: A Regional Response to Global Warming?. *Journal of Climate*, 16, 3535–3542, [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3535:IGLSDT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3535:IGLSDT>2.0.CO;2)
- Campbell, L. S., Steenburgh, J. W., Veals, P. G., Letcher, T. W., Minder, J. R., 2016: Lake-Effect Mode and Precipitation Enhancement over the Tug Hill Plateau during OWLeS IOP2b. *Monthly Weather Review*, 144, 1729–1748, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0412.1>
- Campbell, L. S., Steenburgh, J. W., 2017: The OWLeS IOP2b Lake-Effect Snowstorm: Mechanisms Contributing to the Tug Hill Precipitation Maximum. *Monthly Weather Review*, 145, 2461–2478, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0461.1>
- Changon, S. A., 1966: Effect of Lake Michigan on severe weather. *Proceedings 9th Conference Great Lakes Research*, 15, 220–234
- Coseo, P., Larsen, L., 2014: How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago. *Landscape and Urban Planning*, 125, 117–129, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.019>
- Côté, J., Gravel, S., Méthot, A., Patoine, A., Roch, M., Staniforth, A., 1998: The operational CMC–MRB Global Environmental Multiscale (GEM) model, Part I: Design considerations and formulation. *Monthly Weather Review*, 126, 1373–1395, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1373:TOCMGE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1373:TOCMGE>2.0.CO;2)
- Day, P. C., 1926: Precipitation in the drainage area of the Great Lakes, 1875–1924. *Monthly Weather Review*, 54, 85–106, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1926\)54<85:PITDAO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1926)54<85:PITDAO>2.0.CO;2)
- Dévényi, D., Gulyás, O., 1988: *Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában*. Tankönyvkiadó, Budapest, 443p
- Durnford, D., Fortin, V., Smith, G. C., Archambault, B., Deacu, D., Dupont, F., Dyck, S., Martinez, Y., Klyszejko, E., Mackay, M., Liu, L., Pellerin, P., Pietroniro, A., Roy, F., Vu, V., Winter, B., Yu, W., Spence, C., Bruxer, J., Dickhout, J., 2018: Toward an Operational Water Cycle Prediction System for the Great Lakes and St. Lawrence River. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 521–546, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0155.1>
- Eipper, D. T., Young, G. S., Greybush, S. J., Saslo, S., Sikora, T. D., Clark, R. D., 2018: Predicting the Inland Penetration of Long-Lake-Axis-Parallel Snowbands. *Weather and Forecasting*, 33, <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0033.1>

- Ellis, A.W., Johnson, J.J., 2004: Hydroclimatic analysis of snowfall trends associated with the North American Great Lakes. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 471–486, [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0471:HAOSTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0471:HAOSTA>2.0.CO;2)
- Ewing, M., Press, F., Donn, W. J., 1954: An explanation of the Lake Michigan wave of 26 June 1954. *Science*, 120, 684–686, <https://doi.org/10.1126/science.120.3122.684>
- Field, C. B., Mortsch, L. D., Brklacich, M., Forbes, D. L., Kovacs, P., Patz, J. A., Running, S. W., Scott, M. J., 2007: North America. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., Hanson, C.E. (szerk.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 617–652, <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg2/>
- Gula, J., Peltier, W. R., 2012: Dynamical Downscaling over the Great Lakes Basin of North America Using the WRF Regional Climate Model: The Impact of the Great Lakes System on Regional Greenhouse Warming. *Journal of Climate*, 25, 7723–7742, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00388.1>
- Hastie, D. R., Narayan, J., Schiller, C., Niki, H., Shepson, P. B., Sills, D. M. L., Taylor, P. A., Moroz, Wm. J., Drummond, J. W., Reid, N., Taylor, R., Roussel, P. B., Melo, O. T., 1999: Observational evidence for the impact of the lake breeze circulation on ozone concentrations in Southern Ontario. *Atmospheric Environment*, 33, 323–335, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00199-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00199-X)
- Hayhoe, K., VanDorn, J., Croley, T., Schlegal, N., Wuebbles, D., 2010: Regional climate change projections for Chicago and the US Great Lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 36, 7–21, <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2010.03.012>
- Hjelmfelt, M. R., 1990: Numerical Study of the Influence of Environmental Conditions on Lake-Effect Snowstorms over Lake Michigan. *Monthly Weather Review*, 118, 138–150, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1990\)118<0138:NSOTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1990)118<0138:NSOTIO>2.0.CO;2)
- Holloway, B. S., 2007: The Role of the Great Lakes in Northwest Flow Snowfall Events in the Southern Appalachian Mountains. Diplomamunka, North Carolina State University, Raleigh, (témavezető: Dr. Lackmann, G. M.), 204p, <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/1202>
- Hostetler, S. W., Bartlein, P., 1990: Simulation of Lake Evaporation With Application to Modeling Lake Level Variations of Harney-Malheur Lake, Oregon. *Water Resources Research*, 26, 2603–2612, <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02603>
- Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Ottersen, G., Visbeck, M., 2003: An Overview of the North Atlantic Oscillation. In: *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. Geophysical Monograph, 134, American Geophysical Union, Washington, 1–35, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1029/GM134>
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (szerk.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 996p, <https://www.ipcc.ch/reports/>
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (szerk.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535p, <https://www.ipcc.ch/reports/>
- King, P. W. S., Leduc, M., Sills, D. M. L., Donaldson, N. R., Hudak, D. R., Joe, P. I., Murphy, B. P., 2003: Lake breezes in Southern Ontario and their relation to tornado climatology. *Weather and Forecasting*, 18, 795–807, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2003\)018<0795:LBISOA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2003)018<0795:LBISOA>2.0.CO;2)
- Kristovich, D. A. R., Clark, R. D., Frame, J., Geerts, B., Knupp, K. R., Kosiba, K. A., Laird, N. F., Metz, N. D., Minder, J. R., Sikora, T. D., Steenburgh, W. J., Steiger, S. M., Wurman, J., Young, G. S., 2017: The Ontario Winter Lake-Effect Systems Field Campaign: Scientific and Educational Adventures to Further Our Knowledge and Prediction of Lake-Effect Storms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 315–332, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00034.1>
- Kristovich, D. A. R., Steve, R. A., 1995: A Satellite Study of Cloud-Band Frequencies over the Great Lakes. *Journal of Applied Meteorology*, 34, 2083–2090, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<2083:ASSOCB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<2083:ASSOCB>2.0.CO;2)
- Kunkel, K. E., Ensor, L., Palecki, M., Easterling, D., Robinson, D., Hubbard, K. G., Redmond, K., 2009: A new look at lake-effect snowfall trends in the Laurentian Great Lakes using a temporally homogeneous data set. *Journal of Great Lakes Research*, 35, 23–29, <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2008.11.003>

- Kunkel, K. E., Westcott, N. E., Kristovich, D. A. R., 2002: Assessment of Potential Effects of Climate Change on Heavy Lake-Effect Snowstorms Near Lake Erie. *Journal of Great Lakes Research*, 28(4), 521–536, [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(02\)70603-5](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(02)70603-5)
- Lansing, L., 1965: Air mass modification by Lake Ontario during the April–November period. *Proceedings 8th Conference on Great Lakes Research*, 13, 257–261
- Linares, A., 2018: *Meteotsunami Characterization, Impacts, and Predictability in the Great Lakes*. Doktori értekezés, University of Wisconsin – Madison, Madison, (témavezető: Wu, C. H.), ProQuest Dissertations Publishing, 203p, <https://search.proquest.com/openview/9332937f14912ff5c73f95f71e1fb918/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Lyons, W. A., 1966: Some effects of Lake Michigan upon squall lines and summertime convection. *Satellite Mesometeorology Research Project Research Paper 57*, University of Chicago, 22p, <http://hdl.handle.net/10605/261840>
- Lyons, W. A., Cole, H. S., 1973: Fumigation and plume trapping on the shores of Lake Michigan during stable onshore flow. *Journal of Applied Meteorology*, 12, 494–510, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1973\)012<0494:FAPTOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1973)012<0494:FAPTOT>2.0.CO;2)
- Makar, P. A., Gong, W., Mooney, C., Zhang, J., Davignon, D., Samaali, M., Moran, M. D., He, H., Tarasick, D. W., Sills, D., Chen, J., 2010a: Dynamic adjustment of climatological ozone boundary conditions for air-quality forecasts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 8997–9015, <https://doi.org/10.5194/acp-10-8997-2010>
- Makar, P. A., Zhang, J., Gong, W., Stroud, C., Sills, D., Hayden, K. L., Brook, J., Levy, I., Mihele, C., Moran, M. D., Tarasick, D. W., He, H., Plummer, D., 2010b: Mass tracking for chemical analysis: the causes of ozone formation in southern Ontario during BAQS-Met 2007. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 11151–11173, <https://doi.org/10.5194/acp-10-11151-2010>
- Minder, J. R., Letcher, T. W., Campbell, L. S., Veals, P. G., Steenburgh, J. W., 2015: The Evolution of Lake-Effect Convection during Landfall and Orographic Uplift as Observed by Profiling Radars. *Monthly Weather Review*, 143, 4422–4442, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0117.1>
- Mironov, D. V., 2008: Parameterization of lakes in numerical weather prediction: Description of a lake model. Consortium for Small-Scale Modelling, Technical Report 11, 47p, <http://cosmo-model.org/content/model/documentation/techReports/docs/techReport11.pdf>
- Moore, P. K., Orville, R. E., 1990: Lightning characteristics in lake-effect thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 118, 1767–1782, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1990\)118<1767:LCILET>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1990)118<1767:LCILET>2.0.CO;2)
- Mulholland, J. P., Frame, J., Nesbitt, S. W., Steiger, S. M., Kosiba, K. A., Wurman, J., 2017: Observations of Misovortices within a Long-Lake-Axis-Parallel Lake-Effect Snowband during the OWLeS Project. *Monthly Weather Review*, 145, 3265 – 3291, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0430.1>
- Nakićenović, N., Swart, R., 2000: *Special Report on Emissions Scenarios*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, UK, 570p, <https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/>
- National Research Council, 1992: *Coastal Meteorology: A Review of the State of the Science*. Washington, DC, The National Academies Press, <https://doi.org/10.17226/1991>
- Niziol, T. A., Snyder, W. R., Waldstreicher, J. S., 1995: Winter Weather Forecasting throughout the Eastern United States, Part IV: Lake Effect Snow. *Weather and Forecasting*, 10, 61–77, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1995\)010<0061:WWFTTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1995)010<0061:WWFTTE>2.0.CO;2)
- Notaro, M., Bennington, V., Vavrus, S., 2015: Dynamically Downscaled Projections of Lake-Effect Snow in the Great Lakes Basin. *Journal of climate*, 28, 1661–1684., <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00467.1>
- Notaro, M., Holman, K., Zarrin, A., Fluck, E., Vavrus, S., Bennington, V., 2013a: Influence of the Laurentian Great Lakes on Regional Climate. *Journal of Climate*, 26, 789–804, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00140.1>
- Notaro, M., Zarrin, A., Vavrus, S., Bennington, V., 2013b: Simulation of Heavy Lake-Effect Snowstorms across the Great Lakes Basin by RegCM4: Synoptic Climatology and Variability. *Monthly Weather Review*, 141, 1990–2014, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00369.1>
- Physick, W. L., 1980: Numerical experiments on the inland penetration of the sea breeze. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 735–746, <https://doi.org/10.1002/qj.49710645007>
- Práger, T., Pieczka, I., 2013: Szökőárhullámok. In: *Oceanográfia*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, 130–188, <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/Oceanografia/book.pdf>, https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0073_oceanografia/ch06s02.html
- Scott, R. W., Huff, F. A., 1996: Impacts of the Great Lakes on Regional Climate Conditions. *Journal of Great Lakes Research*, 22, 4, 845–863, [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(96\)71006-7](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(96)71006-7)
- Seeley, J. T., Romps, D. M., 2015: The Effect of Global Warming on Severe Thunderstorms in the United States. *Journal of Climate*, 28, 2443–2458, <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00382.1>

- Segal, M., Arritt, R. W., Shen, J., Anderson, C., Leuthold, M., 1997: On the clearing of cumulus clouds downwind from lakes. *Monthly Weather Review*, 125, 639–646, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<0639:OTCOCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<0639:OTCOCC>2.0.CO;2)
- Sills, D. M. L., Brook, J. R., Levy, I., Makar, P. A., Zhang, J., Taylor, P. A., 2011: Lake breezes in the southern Great Lakes region and their influence during BAQS-Met 2007. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7955–7973, <https://doi.org/10.5194/acp-11-7955-2011>
- Simpson, J. E., 1994: *Sea Breeze and Local Winds*. Cambridge University Press, 234p
- Sousounis, P. J., Fritsch, J. M., 1994: Lake-aggregate mesoscale disturbances, Part II: A case study of the effects on regional and synoptic-scale weather systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75, 1793–1811, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1994\)075<1793:LAMDPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1994)075<1793:LAMDPI>2.0.CO;2)
- Steiger, S. M., Hamilton, R., Keeler, J., Orville, R. E., 2009: Lake-Effect Thunderstorms in the Lower Great Lakes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 889–902, <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1935.1>
- Steiger, S. M., Kranz, T., Letcher, T. W., 2018: Thunderstorm Characteristics during the Ontario Winter Lake-Effect Systems Project. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57, 4, <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0188.1>
- Suriano, Z. J., Leathers, D. J., 2015: Twenty-first century snowfall projections within the eastern Great Lakes region: detecting the presence of a lake-induced snowfall signal in GCMs. *International Journal of Climatology*, 36, 2200–2209, <https://doi.org/10.1002/joc.4488>
- Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M., Soden, B., Zhai, P., 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (szerk.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-chapter3-1.pdf>
- Union of Concerned Scientists, 2006: *Confronting climate change in the Northeast. A Report of the Union of Concerned Scientists*, Cambridge MA, <http://www.northeastclimateimpacts.org/>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J. A., Kainuma, M., Riahi, K., Weyant, J., 2011: *Climatic Change*. 109, 1, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0157-y>
- Vavrus, S., Notaro, M., Zarrin, A., 2013: The Role of Ice Cover in Heavy Lake-Effect Snowstorms over the Great Lakes Basin as Simulated by RegCM4. *Monthly Weather Review*, 141, 148–165, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00107.1>
- Veals, P. G., Steenburgh, J. W., 2015: Climatological Characteristics and Orographic Enhancement of Lake-Effect Precipitation East of Lake Ontario and over the Tug Hill Plateau. *Monthly Weather Review*, 143, 3591–3609, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0009.1>
- Veals, P. G., Steenburgh, J. W., Campbell, L. S., 2018: Factors Affecting the Inland and Orographic Enhancement of Lake-Effect Precipitation over the Tug Hill Plateau. *Monthly Weather Review*, 146, 6, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0385.1>
- Wright, D. M., Posselt, D. J., Steiner, A. L., 2012: Sensitivity of Lake-Effect Snowfall to Lake Ice Cover and Temperature in the Great Lakes Region. *Monthly Weather Review*, 141, 670–689, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00038.1>
- Zhao, L., Jin, J., Wang, S. Y., Ek, M. B., 2012: Integration of remote-sensing data with WRF to improve lake-effect precipitation simulations over the Great Lakes region. *Journal of Geophysical Research*, 117, D09102, <https://doi.org/10.1029%2F2011JD016979>
- Zhong, S., In, H., Bian, X., Charney, J., Heilman, W., Potter, B., 2005: Evaluation of Real-Time High-Resolution MM5 Predictions over the Great Lakes Region. *Weather and Forecasting*, 20, 63–81, <https://doi.org/10.1175/WAF-834.1>

Internetes

[1-U.S. Army Corps of Engineers]

<http://www.lrd-wc.usace.army.mil/GreatLakes/GreatLakes.html>

[2-NOAA, Great Lakes Environmental Research Laboratory]

<https://www.glerl.noaa.gov/education/ourlakes/lakes.html>

[3-Lee, 2005]

https://www.weather.gov/media/gsp/localdat/NWFS_discussion_group/Additional%20Links/Northwest%20Flow%20Snow_Dec05.pdf

[4-met.hu]

https://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=699

[5-noaa.gov]

https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/archives/long_lead/llarc.ind.php

[6-noaa.gov]

<https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/us-maps/>

[7-noaa.gov]

<https://www.climate.gov/news-features/featured-images/great-lakes-ice-cover-decreasing-over-last-40-years>