

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Földrajz-és Földtudományi Intézet

Meteorológiai Tanszék

A hurrikánok mechanikai és termikus tulajdonságai

SZAKDOLGOZAT



Készítette:

Iván Márk

Földtudományi alapszak

Meteorológus szakirány

Témavezetők:

Dr. Tasnádi Péter

egyetemi tanár

Fejős Ádám

doktorandusz hallgató

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2013

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés.....	3.
2.	Nap, mint a Föld energia forrása	4.
3.	Hurrikánok általános tulajdonságai.....	6.
3.1.	Nevezéktan	6.
3.2.	Saffir–Simpson féle skála	7.
3.3.	Érdekességek.....	8.
4.	Sandy–hurrikán	10.
4.1.	Sandy–hurrikán életútja.....	10.
4.2.	Sandy–hurrikán okozta károk.....	15.
4.3.	Sandy–és Katrina–hurrikán	17.
5.	Trópusi ciklonok keletkezési környezete	19.
6.	Trópusi ciklonok kifejlődése.....	23.
7.	Trópusi ciklonok szerkezete	26.
8.	Trópusi ciklonok mozgása	28.
9.	Termodinamikai körfolyamat a Hurrikánon belül.....	31.
10.	Összefoglalás.....	37.
11.	Irodalomjegyzék.....	38.
12.	Köszönetnyilvánítás	40.

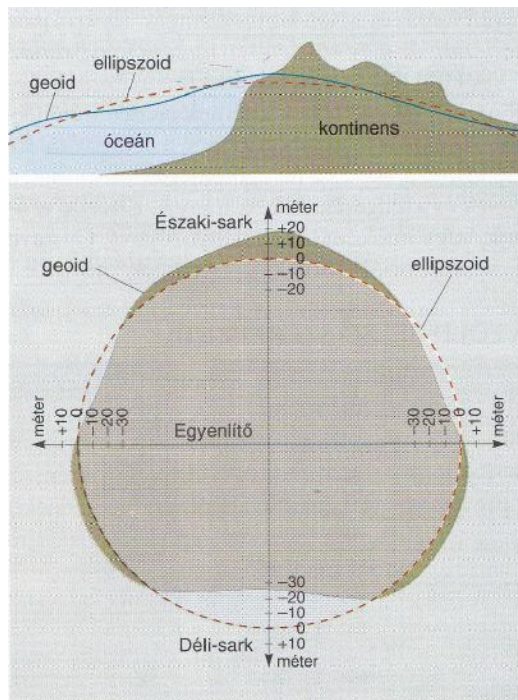
1. Bevezetés

A Meteorológiában sok érdekes és látványos képződményt figyelhetünk meg szabad szemmel, illetve modellezhetünk számítógép segítségével. Ezen képződmények nagyságrendje széles skálán mozog. A legapróbb jégkristályok keletkezésétől, azaz a mikrométeres nagyságrendektől, egészen a jóval nagyobb, több ezer km-es méretekig. A mezoskálájú jelenségek egyik legmarkánsabbika, a trópusi ciklon. E ciklonok között is a leginkább érdekesek, azok melyek tartós szélmaximum értéke eléri a 33m/s-os sebességi küszöbértéket. (Czelnai, 1988) A trópusi ciklonokat speciális, szélsősebességük alapján definiált skálán soroljuk különböző osztályokba. A skála alapján, 33m/s-os sebesség esetén már nem trópusi ciklonról, hanem igen nagy erejű, erős szelekkel rendelkező képződményről, hurrikánról beszélünk. Hurrikánok Földünknek csak bizonyos területein, meghatározott körülmények és feltételek teljesülése mellett keletkezhetnek.

Jelen dolgozatban a hurrikánok általános tulajdonságait, és a bennük végbemenő folyamatokat, a kezdeti konvekciótól egészen az energia disszipációjáig, ismertetjük. Az általános tulajdonságok közül elsősorban a hurrikánok termodinamikájának kritikus kérdéseit részletezzük, de emellett a hurrikánok szerkezetét és keletkezési körülményeit is bemutatjuk. „Mintaként” a hurrikánok szinte minden tulajdonságát jól szemléltető Sandy-hurrikánt, tárgyaljuk.

2. Nap, mint a Föld energia forrása

A Napból jövő nagy energiájú elektromágneses sugárzás, a Földünk légkörének legfontosabb energiaforrása. Ez az energia, irányítja a légkörben lejátszódó levegőkémiai illetve-fizikai folyamatokat. Ez megközelítőleg 99,99%-a teljes légkört kormányzó energiának, a maradék 0,01 % a geotermikus energiából származtatható. (Bartholy, 2010). A beérkező rövidhullámú sugarak elnyelődnek a talajban, majd a talaj által kisugározott hosszuhullámú sugarak melegítik a légkört.

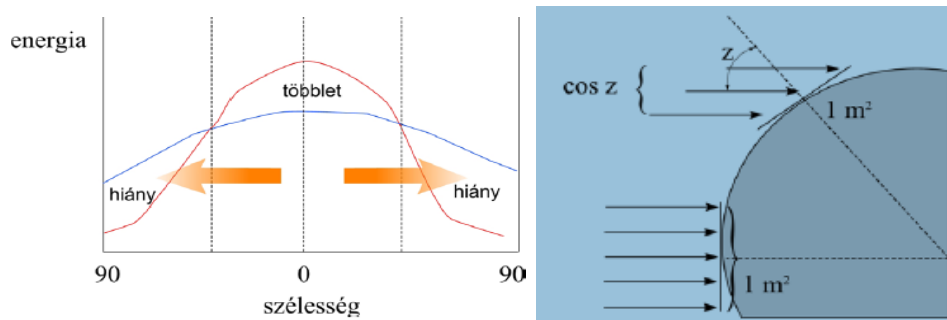


1. ábra jelölt geoid és ellipszoid alakzatok egymáshoz viszonyított eltérései nem méretarányosak, csak tájékoztatás jellegűek.

(Jónás, 2004: Természetföldrajzi környezetünk Földrajz, 17. oldal)

Az 1. ábrán látható Földünk forgásának következtében kialakult alakja. Első közelítésben forgási ellipszoidnak tekinthető. A pólusok mentén kicsit belapult, az egyenlítő mentén kicsit kiszélesedett, nem tökéletes gömb. A Föld tényleges formája azonban még ettől is eltér, ezt az alakzatot nevezzük geoidnak.

Az eltérő beesési szögekből fakadóan a felmelegedés más és más a Föld különböző pontjain. A beesési szögek a szoláris forró övezet területén a legnagyobbak, majd a pólusok felé haladva fokozatosan kisebbek és kisebbek lesznek.



2. és 3. ábrák, a Földön az energia eloszlást és a beeső sugarak hajlásszögét szemléltetik (Mészáros, 2012: Általános meteorológia 2. előadás, Sugárzás PDF 2012-es verzió)

Az (2.–3.) ábrák az eltérő besugárzást szemléltetik. Az egyenlítői területeket energia többlet, a sarki területek energia hiány jellemzi. Ez azt jelenti, hogy míg a pólusokon nagyobb a kisugárzott energia, mint az elnyelt, addig az egyenlítői területeken kevesebb a kisugárzott energia, mint az elnyelt energia. A légkör azonban hőmérsékleti egyensúlyra törekszik, így a hőmérséklet kiegyenlítésére légköri folyamatok indulnak meg. A légkörben a különböző állapotjelzők kiegyenlítődése különböző időskálán megy végbe. A nyomáskülönbség például képes a másodperc tört része alatt kiegyenlítődni. A hőmérsékleti egyensúly beállításához azonban hosszabb idő szükséges, a folyamat eredményeképpen létrejövő nagytérési mozgások hosszú időléptékben mérhetők. Napokig, esetenként hetekig is eltarthatnak. A folyamatos besugárzás és a hatására meginduló folyamatok eredményeként bizonyos területeken a Föld átlagos hőmérsékletéhez viszonyítva magasabb, másutt viszont alacsonyabb hőmérséklet alakul ki. Az eltérő átlaghőmérséklet miatt, a különböző szélességek földrajzi övezetei között folyamatos hő szállítás zajlik. A trópusi területek tipikusan olyan területek, ahol az átlaghőmérséklet magasabb, mint a magasabb szélességeken. A magas átlaghőmérséklet és a nagy mennyiségű nedvesség miatt a trópusi területek kedvezőnek mondhatóak a hurrikánok számára. A trópusi területekről a hőtöbbletet horizontális és vertikális energia transzport szállítja a magasabb szélességek irányába. Ezen hő transzportnak a hordozói többek között a hurrikánok.

3. Hurrikánok általános tulajdonságai

Ahhoz, hogy megértsük a hurrikánok természetét, ismernünk kell néhány alapvető tulajdonságukat.

3.1 Elnevezések és skálák

A trópusi területeken kialakult mezoskálájú képződményeket különböző csoportokba sorolhatjuk. A csoportokat, mint már említettük a képződményekben uralkodó szélsőségek alapján definiáljuk. Ennek alapján különböztethetjük meg a hurrikánokat, az egyéb trópusi viharokat vagy éppen trópusi depressziókat. Amíg a szélsőség a képződményen belül el nem éri a 17 m/s-os értéket, addig trópusi depresszióknak nevezzük. Ekkor még nem rendelkezik a képződmény a hurrikánokra és tájfunokra jellemző spirális karokkal és szemmel. (Wikipedia) A sebesség fokozatos emelkedésével a képződmény a 17 m/s-os értéket is meghaladja, ekkor már trópusi viharoknak nevezzük. A trópusi vihar, mint kategóriai besorolás, egészen addig tart, míg a sebesség el nem éri a 33 m/s-os értéket. Ekkor már hurrikánnak vagy tájfunnak nevezzük. Természetesen a 33 m/s-os sebességhatár átlépésekor már rendelkezik a képződmény a jól ismert, látványos spirális karokkal és az alacsony légnyomású szemmel.

A hurrikánok viszonylag ritka és nagy kárt okozó jelenségek, ezért már hosszú ideje egyedileg is elnevezik őket. Természetesen az elnevezések helyenként és országonként eltérőek lehetnek, mert az elnevezés szabályait nem egyeztetették. Az atlanti térségben a nevezéktan hosszú időre és igen jelentős változékonyságra tekint vissza. Eleinte, a híradásokban a figyelemfelhívás céljából adtak a képződményeknek neveket. A legegyszerűbb megoldást a katolikus szentek nevei jelentették. (Wikipedia) A légköri képződmények a felbukkanásuk napjára eső névnap alapján kapták a nevüket. Ezt később felváltották ismert emberek, politikusok nevei. Az 1940-es években női neveket, majd 1950-es évektől abc sorrendben felváltva női, és férfi neveket kaptak. Fontos megemlíteni, hogy újkor nem kezdik előről az abc-t, hanem folytatólagosan haladnak tovább. Miután körbeérték újra és újra előlről kezdődik a névsor. Így természetesen a történelem

során volt több olyan trópusi ciklon vagy hurrikán mely azonos nevet viselt, azonban ha valami miatt különleges vagy rendkívüli az adott képződmény, akkor a nevét „befagyasztják”, és többé már nem használják fel. Ez a nomenklátúra az Atlanti térségre vonatkozik. A világ egyéb területein más és más módon nevezik el képződményeiket. Így például India, Japán, Hawaii és Ausztrália térségében más és más névlistát vezetnek a meteorológusok.

3.2 Saffir–Simpson féle skála

Az előbbieken már említett szélsébség alapú csoportokba osztás nem csak a 33 m/s-os vagy annál kisebb sebességgel rendelkező képződményeket rendezi osztályokba, hanem a jóval nagyobb sebességűeket is. A legismertebb ilyen speciális skála, a Saffir–Simpson-féle hurrikánskála. (1.táblázat) A fentebb ismertetett nomenklatúrához hasonlóan ezt a skálabeosztást is a Csendes-óceánnak a dátumválasztó vonaltól keletre eső részében illetve az atlanti térségben keletkező képződményekre használják. A skálát egy meteorológus és egy építőmérnök alkotta meg. A beosztás a szél által okozható károk alapján, és a képződmény partot érését követő lehetséges árvíz alapján határozták meg.

Kategória	Uralkodó szélsébség		Nyomás a szemben (mbar)	Hullám magasság (m)	Károkozás		Példa
	m/s	km/h			Épület	Egyéb	
1	33-42	119-153	980	1,2-1,5	nem tesz kárt	Lakókocsi- kat, fákat rongál.	Danny hurrikán
2	43-49	154-177	965-979	1,8-2,4	nyílászárók és tetőszerkezet sérül	Lakókocsi súlyos kár. Parti árvizek.	Sandy hurrikán
3	50-58	178-209	945-964	2,7-3,7	jelentős károk	Lakóko- csik tönk- remennek. Árvíz	Rita hurrikán
4	59-69	210-249	920-944	4,0-5,5	tetőszerkezet teljesen megsemmisül	Belterüle- tek víz alá- kerülnek.	Hugo hurrikán
5	≥70	≥250	<920	≥5,5	lakosság kitelepítése, házak megsemmisül ése	Jelentős árvíz.	Andrew hurrikán

1.táblázat: Saffir–Simpson-féle szélsébség skála

(http://hu.wikipedia.org/wiki/Saffir%E2%80%93Simpson-f%C3%A9le_hurrik%C3%A1nsk%C3%A1la)

3.3 Érdekességek

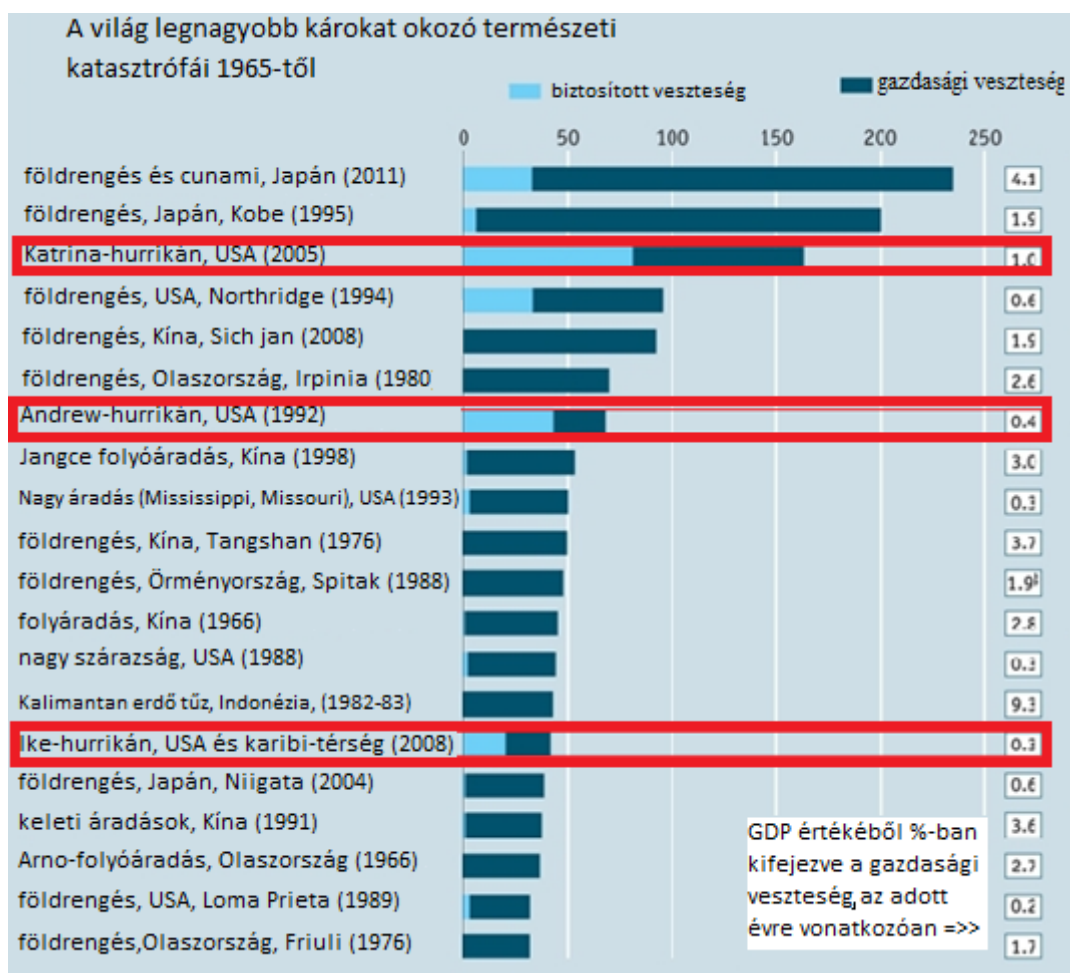
Az alábbiakban néhány ismertebb, a történelem során vagy napjainkban kimagasló pusztítást végző hurrikánt és tájfun sorolunk fel.

- **1281**: A **Kamikaze** (Isteni szél). A tájfun elsüllyesztette a Japán ellen támadó mongol hajóflottát.
- **1720**: A "**Nagy Hurrikán**" a Karib tengeren pusztított, következtében közel 22.000 ember veszett oda.
- **1970. november 13.**: **Bohla** ciklon a Gangesz deltatorlatánál, bangladesi területen, közel 500.000 halálos áldozatot szedett. Mindezidáig a legtöbb halálos áldozatot követelő vihar volt.
- **1979. október**: **Tip** tájfun több paraméterével is kiérdemelte a listán való részvételt. Minden idők legkiterjedtebb viharaként ismert, illetve igen magas, 310 km/h szélsébséget mértek benne.
- **1997. december**: **Paka** szupertájfun. Mindezidáig benne mérték a legnagyobb olyan felszín közeli szélsébséget, ami nem tornádóhoz köthető. Pontos szélsébség maximumot nem lehet tudni, mivel életútja során csak egyetlen szigetet, (Guam szigetet) érintette, ahol a mérőműszer 380 km/h sebességnél összetört. Feltehetően ennél is nagyobb szélsébséggel rendelkezett. Ez arra alapozható, hogy a szárazföldek felett a trópusi ciklonok, így a tájfunok szélsébsége is csökken, viszont Guam a maga 541 km² -vel nem túl kiterjedt ahhoz, hogy képes legyen megfékezni egy ilyen erejű szupertájfun.
- **2004. március 26.**: **Catarina** trópusi ciklon. Az első olyan detektált viharrendszer, mely az Atlanti-óceán déli féltekéjén alakult ki.
- **2005. augusztus 30.**: **Katrina**-hurrikán, New Orleans-t pusztította el, s ezzel közel 150 millió dollárnyi kárt okozott. Minden idők legnagyobb biztosított értékben okozott kára fűződik a nevéhez.
- **2005. október 10.**: **Vince** hurrikán, az első olyan hurrikán, mely eléri Európa partjait.

Természetesen előfordulhat, hogy a történelem során voltak nagyobb erejű hurrikánok vagy tájfunok, mint a Paka, vagy kiterjedtebbek, mint a Tip. De

amióta rendszeres megfigyeléseket, méréseket folytatnak szerte a világon, azóta ezek a trópusi ciklonok a „rekorderek”. Így az atlanti térség nomenklatúrája miatt, a jövőben keletkező képződmények a fentiek közül a Katrina nevet nem kaphatják.

Az előbbiek alapján látható, hogy egy-egy hurrikán vagy tájfun igen nagy pusztítást képes végezni. Természetesen a világban egyéb pusztító katasztrófák is jelen voltak. Egy angol gazdasági lap, The Economist kimutatást készített (4.ábra), melyben a legpusztítóbb természeti katasztrófákat gyűjtötte össze. A felsorolás az okozott kár értéke alapján, csökkenő sorrendbe rendezi az egyes természeti katasztrófákat. A felsorolásban 1965 után pusztító természeti katasztrófák találhatóak, többnyire földrengések szerepelnek, de mint látható három hurrikán is felkerült a listára. Ezeket a piros keretek közt láthatóak.



4. ábra, természeti katasztrófák okozta károk 1965-től

The Economist, angol gazdasági lap 2011.03.21.

http://www.economist.com/blogs/dailychart/2011/03/natural_disasters

4. Sandy-hurrikán

4.1 Sandy-hurrikán életútja és speciális átalakulása

A Karib-tenger délnyugati régiójában 2012. október 22. -én helyi idő szerint délelőtti 11 órakor a NASA műholdfelvételén egy forró levegőtömb, úgynevezett hot-tower, azaz forró-torony mutatkozott. (5. ábra)

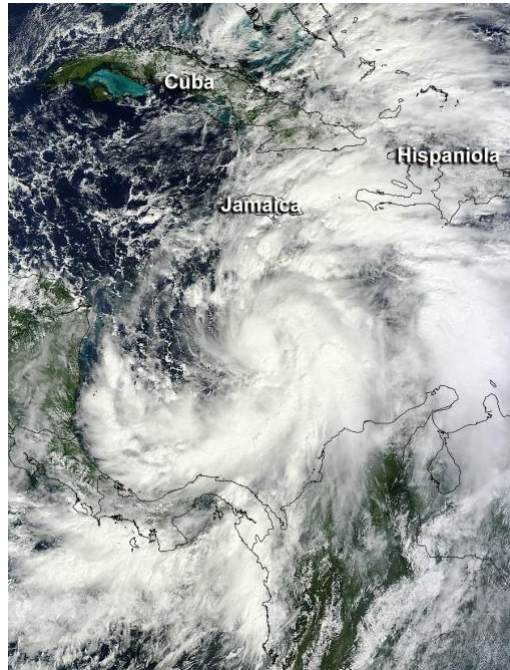


5. ábra TD18 detektálása (NASA(Rob Gutro), 2012:

http://www.nasa.gov/images/content/698946main_20121022_Sandy-GOES_full.jpg)

A trópusi ciklon kialakulásának eshetőségét fenntartva TD18-as kóddal látták el a képződményt, és folyamatos megfigyelés alatt tartották. Az észlelést követően műholdas mérésekkel határozták meg, a TD18 egyes paramétereit. A forró-tornyot intenzív, mély konvekció jellemezte. A feláramlás közel 15 km-es magasságot ért el. A TD18-at nem messze a jamaicai partoktól, mindössze 320 km-re a fővárostól, Kingstontól detektálták. Ekkor a becsült szélessége 45 km/h és a központi nyomása 1003 hpa volt. Ekkor már tudták a meteorológusok, ha tovább erősödik és szelei eléri a trópusi ciklonra jellemző 17 m/s-os tartós szélmaximum értéket, akkor a „Tropical Storm Sandy” nevet fogja kapni. A forró-torony intenzív fejlődésének következtében, mindössze hat óra alatt érte el a trópusi viharnek megfelelő szélességet. A következő napon, azaz 23. -án észak

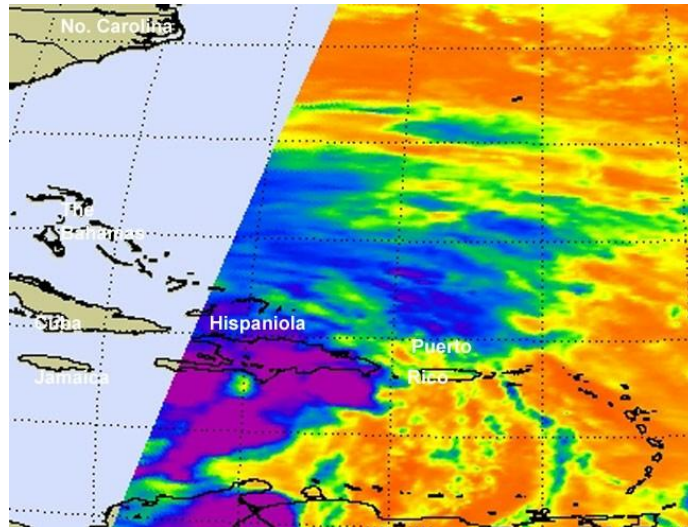
felé folytatta útját. (6. ábra) Ekkor már elképzelhetővé vált, hogy a következő órákban hurrikánná erősödik, ezért Jamaica és Haiti környékén vészjelzést adtak ki. (Rob Gutro, 2012)



6. ábra: Sandy, mint trópusi ciklon (NASA(Rob Gutro), 2012:

http://www.nasa.gov/images/content/699880main_20121024_Sandy-MODIS_full.jpg)

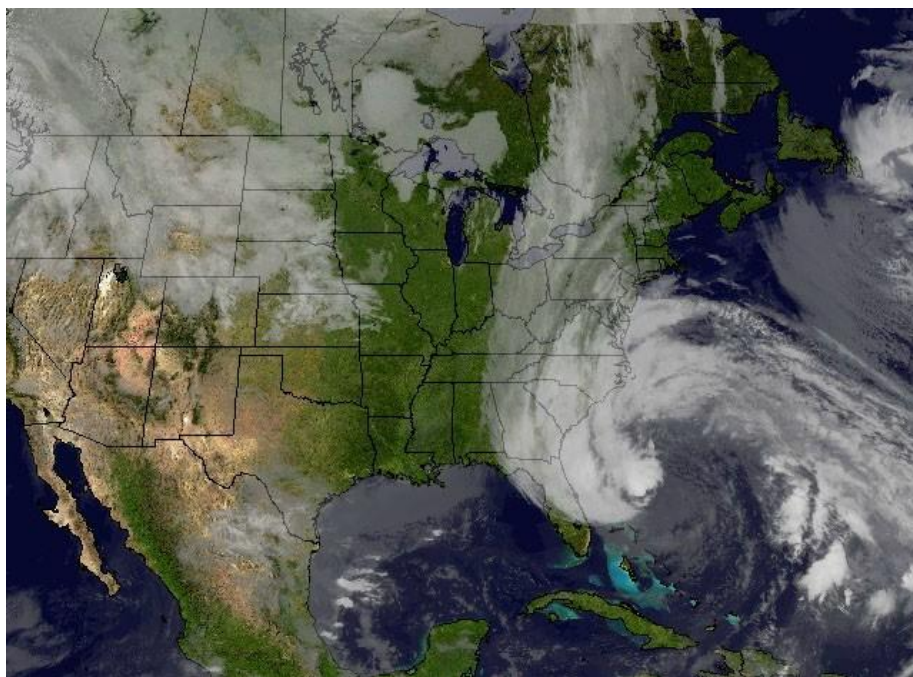
Ezt követően, 24. -én reggelre, szélsébsége a hurrikán fokozat erősségét súrolta, már 110 km/h-s volt. Ekkor a vihar közepe közel 155 km-re volt Kingston-tól. A délutánra 130 km/h-ra erősödött, s ezzel elérte az egyes hurrikán fokozatot. A központi légnyomása 972 hpa volt. A vihar mozgása felgyorsult és október 25. -én elérte a kettes fokozatot. Ekkor már Santiago-tól nyugatra, a kubai partokat pusztította. A hurrikán szeme közel 40 km átmérőjű, tartós szélmaximuma pedig 130 km/h volt. A közép-karibi térség pusztítása után a vihar szeme közel 30 km/h sebességgel észak felé folytatta az útját.



7. ábra: infravörös kép, melyet a NASA műholdja készített a Sandy keleti feléről (NASA(Rob Gutro), 2012:

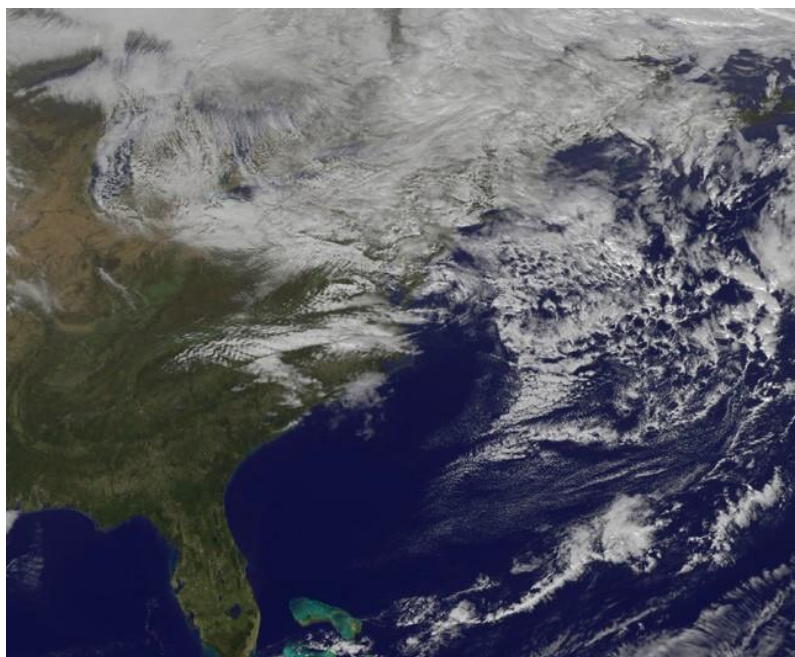
http://www.nasa.gov/images/content/700526main_20121025_Sandy-AIRS_full.jpg)

A 7. ábrán a NASA műholdfelvétele látszik. Az ábra lilás színnel a szemfalban lévő intenzív feláramlást mutatja. A lilás színnel jelzett felhőzet, a troposzféra és a sztratoszféra határába nyúló felhőzet tetejének hőmérsékletét mutatja, ami $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ volt. Miközben a karibi-térségben a folyamatosan erősödő és pusztító hurrikántól való rettegés, addig az Egyesült Államokban a Halloween-i készülődés lett úrrá az embereken. A következő napon, október 26. -án a NASA műholdfelvétele, északról betörő sarki levegőt szállító hidegfrontot detektált, a délről jövő Sandy hurrikán útjában. Az előrejelzések azt mutatták, hogy elképzelhető a hidegfront és a hurrikán összeolvadása. Mindeközben, a Kubát letaroló észak felé haladó hurrikán vesztett energiájából és ezzel együtt sebességéből is, egyes fokozatúvá gyengült. Az „összeolvadás” eshetősége és a Halloween közelsége kapcsán a meteorológusok humorosan, a „Frankenstorm” nevet akarták adni a képződménynek, de mivel Sandy egy női név, ezért a "bride of Frankenstorm", azaz Frankenstorm menyasszonya nevet adták neki. Sandy 27. -én 22 km/h -s sebességgel északkeleti irányban folytatta az útját.



8. ábra: hidegfront és Sandy találkozása (NASA(Rob Gutro), 2012:
http://www.nasa.gov/images/content/701071main_20121027_Sandy-GOES_full.jpg)

A következő, 8. ábra bemutatja az északról betörő hidegfront és a hurrikán egymáshoz viszonyított helyzetét az amerikai partok mentén. A hideg fronttal való összeolvadás következtében a hurrikán szélsébsége trópusi ciklonévá gyengült, de lassulását követően cirkulációja hatalmas területre, közel 2000 mérföldes zónára szélesedett ki. A hideg légtömeggel való érintkezése során a Sandy magjának hőmérséklete is hideggé vált. Ez az intenzív, kiterjedt szuper-vihar, mert, hogy a helyiek így nevezték, szelein kívül árvízzel is pusztított. Az egyesülést követően, azaz 29. -ére virradóan, 400 km-re volt New York-tól. Ekkor tartós szélmaximuma 140 km/h-s, központi nyomása 943 hpa volt. A nap folyamán erősödött, és délutánra 150 km/h-s szélsébsége és 940 hpa-os központi nyomása lett. Az esti órákba elérte Atlantic City-t és New York-ot. A legnagyobb károkat a széllokések és a közel 2,5-3 méteres vihardagályok okozták. Természetesen az ezt követő órákban és napokban folyamatosan nyugatias, északnyugatias irányban haladt, így a felszínnel való súrlódása révén, az energiaveszteség drasztikussá vált.



9. ábra: a vihar teljes disszipációja utáni felhőzet (NASA(Rob Gutro), 2012:
http://www.nasa.gov/images/content/704016main_20121102_Sandy-GOES_full.jpg)

A vihar utáni állapotokat tükrözi 9. ábra. A hurrikánra jellemző szem eltűnt, a cirkuláció megszűnt, csak néhány visszamaradt felhő, és a károk emlékeztetnek a pár nappal ezelőtti természeti katasztrófára. Sandy érdekessége abban rejlik, hogy trópusi ciklonról, mérsékeltövi ciklonná alakulása közben az energia vesztesége kisebb volt, mint amire számítani lehetett. Az átalakulásra jellemző karakterisztikák, mint a ciklon haladási sebességének a csökkenése, illetve a lassulásából fakadó szélesebb sávra való kiterjedése, mind bekövetkezett. Viszont tartós szélmaximumai az összeolvadást megelőző állapothoz képest nem csökkentek drasztikus mértékben. Közel megtartotta a trópusi ciklonokra jellemző szélesebséget. Így keletkezett belőle a kiterjedt, de a hurrikánhoz mérten, alig gyengébb viharrendszer. A legjobb elnevezés, amivel kategorizálni lehet, a helyi meteorológia kategorizálása: szuper-vihar.



10. ábra: Sandy-hurrikán pályáját mutatja be (Wikipedia, http://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:Sandy_2012_track.png)

A 10. ábra a Sandy-hurrikán által befutott pályát reprezentálja. Ahogyan látható is a trópusi övben keletkezett, majd észak felé, a mérsékelt övezetben folytatta útját. A pálya a hurrikán szeme által befutott utat ábrázolja. Sandy életútja és élettartama átlagon felülinek mondható, mindössze 9–10 nap alatt közel, 3000 km-t tett meg. Ez idő alatt a Karib-térség szigeteit: Kubát, Jamaicát, Bahamákat, Dominikát és Haitit is megtépázta. A karibi-térséget elhagyván északi irányba folytatta az útját, ahol az Egyesült Államok keleti partvonalát pusztította. Miközben észak felé haladt, életútjának utolsó harmadában a világ egyik legismertebb városát a New York állambeli New York City-t is megtépázta. A város lakosságát a vihar érkezése előtt evakuálni kellett. Szerencsére az épületekben csak kisebb károkat okoztak a vihar szelei, de árvizei Manhattan nagy részét, főleg a metróhálózatot tette használhatatlanná néhány napra. A Karib-térséget trópusi ciklonként az Egyesült Államok területét mérsékeltövi ciklonként pusztította.

4.2 Sandy-hurrikán okozta károk

A hurrikán emberi áldozatok mellett más meglehetősen nagy anyagi károkat is okozott. Az érintett országok becsléseket végeztek, az okozott károk mértékét illetően. A következő statisztikát készítették. (wikipedia) Látható, hogy

két ország kiemelkedik. Kubában és az Egyesült Államokban kimagaslóan nagy kárt okozott a vihar. Ez nem meglepő, hiszen mikor Kuba térségét pusztította, életútjának legerősebb pillanatait élte a hurrikán. Ekkor kettesfokozatú volt. Az Egyesült Államokat területi nagysága miatt, több napon keresztül pusztította mint bármely más országot. Így nyilvánvaló, hogy ez a két ország szenvedte el, az anyagi kárban mérhető legnagyobb pusztítást. (2. táblázat)

Ország	Kár (amerikai dollárban)
 Bermuda	Minimális
 Canada	\$100 millió
 Cuba	\$2 milliárd
 Dominican Republic	\$30 millió
 Haiti	\$750 millió
 Jamaica	\$100 millió
Offshore of the U.S.	—
 Puerto Rico	—
 The Bahamas	\$700 millió
 United States	\$71.4 milliárd (becsült)
Összegezve:	≥\$75 milliárd (becsült)

2. táblázat: országokra levetített károk (Wikipedia:
http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Sandy)

Az okozott károk tekintetében a következő kimutatást publikálta a National Hurricane Cente. A Sandy-hurrikán a nagy kiterjedésével, erős szeleivel és árvizeivel igen jelentős kárt okozott, mind a karibi-térségben, mind az Egyesült Államok területén. De a kimutatás kizárólag az USA területén okozott károkat összegzi.

A legnagyobb kárt okozó hurrikánok
az USA atlanti térségében (károk becsült értéket)

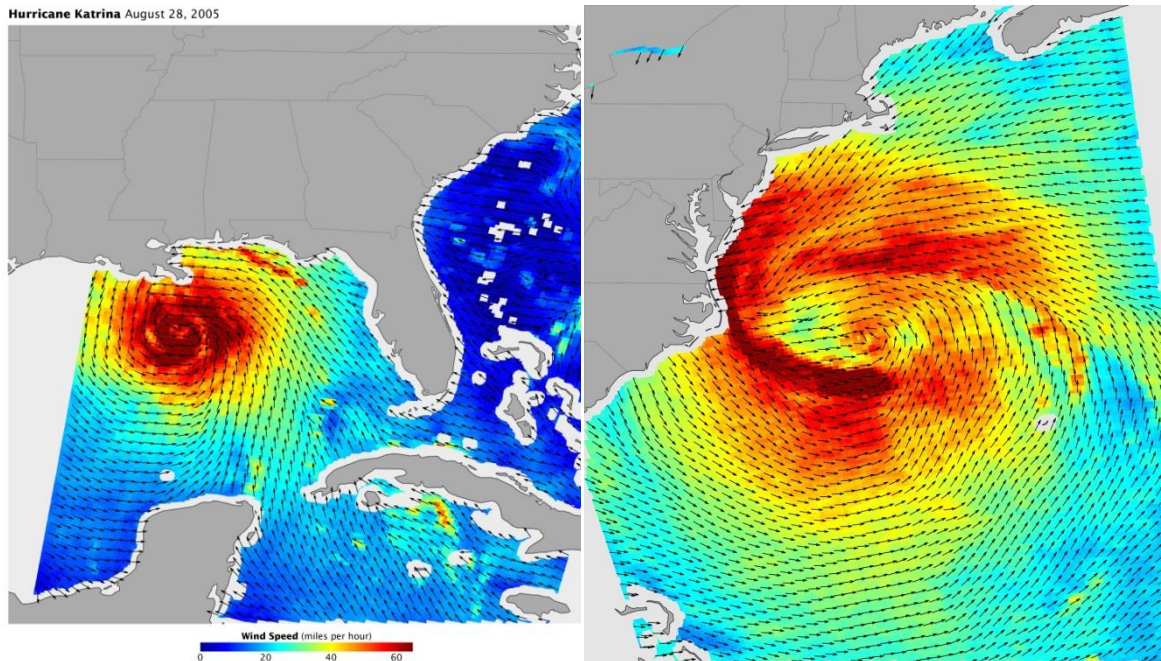
rangsor	Hurrikán neve	Pusztítás éve	Kár (amerikai dollárban)
1	Katrina	2005	\$ 108 milliárd
2	Sandy	2012	\$ 71,4 milliárd
3	Ike	2008	\$ 29,5 milliárd
4	Andrew	1992	\$ 26,5 milliárd
5	Wilma	2005	\$ 20,6 milliárd
6	Ivan	2004	\$ 18,8 milliárd
7	Irene	2011	\$ 15,6 milliárd
8	Charley	2004	\$ 15,1 milliárd
9	Rita	2005	\$ 12 milliárd
10	Frances	2004	\$ 9,51 milliárd
Forrás: National Hurricane Center			

3. táblázat: Hurrikánok okozta károk az USA atlanti térségében (Wikipedia:
http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Sandy)

4.3 Sandy-és Katrina-hurrikán

Látható a 3. táblázatban, hogy az elmúlt évek egyik legpusztítóbb vihara volt a Sandy-hurrikán. Az okozott kár értékében megközelítette a 2005-ben pusztító Katrina-hurrikánt, mely New Orleans-t pusztította le. Párhuzamot nem érdemes vonni, e két hurrikán közt, csak pusztításuk volt hasonló. Mindketten nagy árral öntöttek el egy-egy világvárost, és szakítottak el otthonuktól milliókat. Szerkezetüket tekintve jelentős különbségek vannak. Míg a Katrina, tökéletes, tankönyvbe illő trópusi ciklon volt, ami szimmetrikus, energikus és a meleg tengervíztől szerzi az energiáját, addig a Sandy nem. Utóbbi csak addig, míg a trópusi övben volt, addig viselkedett tipikus trópusi ciklonként. Amint északabbra vándorolt, energia viszonyait a hideg és meleg levegőtömbök közti hőmérséklet különbségek határozták meg. Mikor egy trópusi ciklon, nem trópusivá alakul, aszimmetrikussá válik. Az angol szakirodalom „Extra-tropical cyclone”-nak kategorizálta Sandy-t. A kifejezés megfelel a magyar nyelvben használt mérsékeltövi ciklon kifejezésnek. Egy trópusi ciklon mérsékeltövi ciklonná alakulása során a szél-és felhőzónák drasztikusan megnyúlnak, ettől vált aszimmetrikussá a Sandy is. A megnyúlás következtében a tartós szélmaximumok

alacsonyabbak lesznek. A következő (11. és 12.) ábrák a két hurrikán szélzónáit hasonlítják össze. (Voiland, 2012) A bal oldali a Katrina-hurrikán, mint tipikus trópusi ciklon, a jobb oldali a Sandy-hurrikán, mint „Extra-tropical cyclone”.



11. ábra Katrina-hurrikán szélzónáit, a 12. ábra a Sandy-hurrikán szélzónáit ábrázolja (NASA(Rob Gutro), 2012:

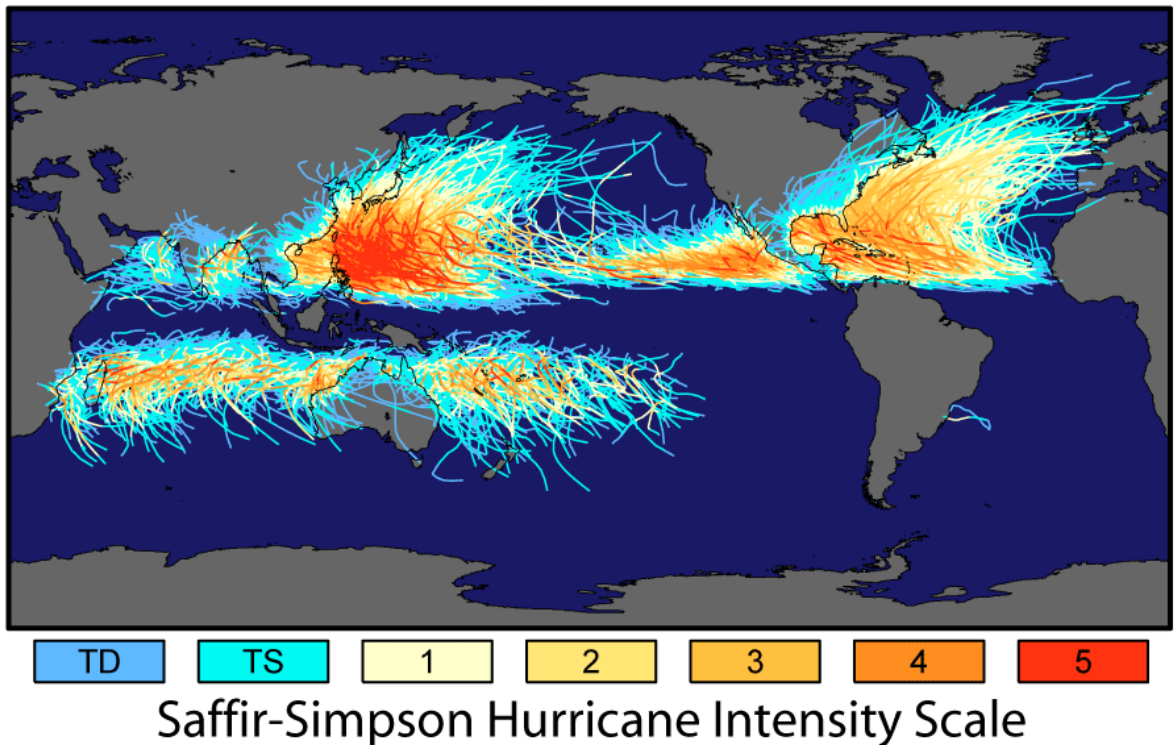
http://www.nasa.gov/images/content/706195main_20121109_Sandy2-QuickSCAT_full.jpg és

http://www.nasa.gov/images/content/706193main_20121109_Sandy1-OceanSat_full.jpg)

Látható, hogy míg a Katrina kb.: 500 km, addig a Sandy 1500 km átmérőjű volt. A másik igen jelentős különbség, hogy a Katrina-hurrikán a tankönyvi példának megfelelően, a szemtől keletre a szemfalban a legerősebb, míg a Sandy-hurrikánnak ugyanezen zónában a „leggyengébb” szelei voltak.

6. Trópusi ciklonok keletkezési környezete

Tracks and Intensity of All Tropical Storms



13. ábra: a trópusi ciklonokat és a Saffir-Simpson skálán jegyzett hurrikánok útvonalait és erősségüket szemlélteti (<https://www.meted.ucar.edu/index.php>)

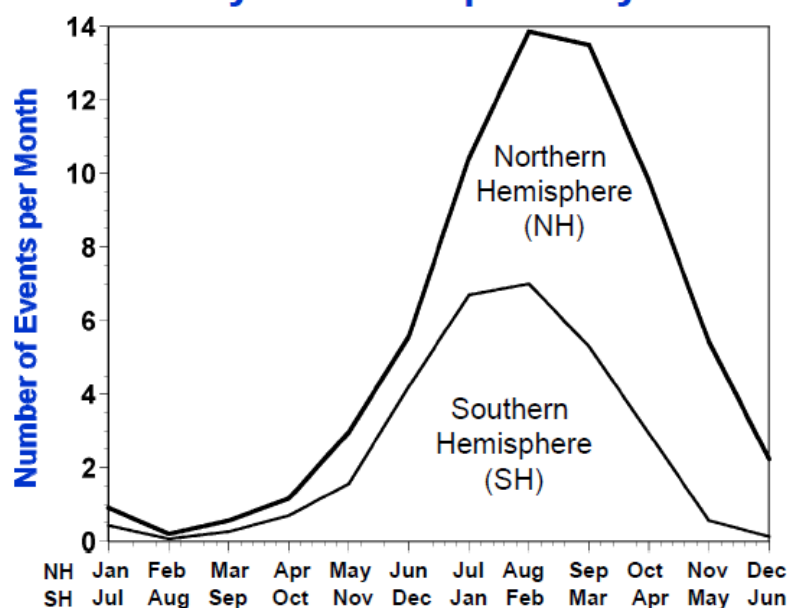
Valójában a hurrikánok pontos keletkezési helyéről nem beszélhetünk, hiszen ilyen hely talán nincs is. Leginkább körzeteket vagy nagy térségeket említhetünk, ahol a trópusi ciklonok általában keletkezhetnek, és ahol hurrikánná erősödhetnek.

A 13. ábráról igen jól leolvashatók azon területek, melyek a trópusi ciklonok keletkezési helyéül szolgálnak. Általában elmondható, hogy a hurrikánok magas hőmérsékletű, nagy kiterjedésű, nyílt vízfelszínnek fölött keletkeznek. Ezek a trópusi óceáni területek, mert a tengervíz hőmérséklete ott a legmagasabb.(Czelnai, 1988) A vízfelszínre azért van szükséges, mert az közel homogén és a felette keletkező súrlódás elhanyagolható, a szárazföld felettihez képest. A trópusi ciklon kialakulásához elengedhetetlen a levegő nagysebességű örvénylése, amit az erős súrlódás okozta nagy energia veszteség megakadályozna, ezért csak és kizárólag vízfelszín fölött képes kialakulni trópusi ciklon.

Jól látható, hogy a trópusi ciklonok kialakulási területe párhuzamosan követi mind északról és mind délről is az Egyenlítő vonalát, azonban az egyenlítő két oldalán kimarad egy közel tíz földrajzi szélességi fokban mérhető sáv. Ott nem csak, hogy nem keletkeznek hurrikánok, de életútjuk során sem keresztezik ezt a térséget. (Czelnai, 1988) Ugyanakkor a keletkezési mechanizmus kizárja azt is, hogy az északi és déli szélesség 20° -ánál magasabb szélességen jöjjenek létre. Közvetlenül az egyenlítő környezetében azért nem jöhetnek létre, mert a Coriolis-erő horizontális komponense, mely a konvektív cellák bepörgetésére szolgál, elhanyagolhatóan kicsiny. Az „elhanyagolhatóan kicsi” azt jelenti, hogy lényegében csak az Egyenlítőn lehetetlen trópusi ciklon keletkezéséről beszélni. Ebből következően 1° , 2° vagy 3° szélességi fokon már létre tudna jönni, de az általa megmozgatni kívánt levegőtömeg igen nagy. Nagyobb tömegük révén, nagyobb a tehetetlenségük is, ennek következtében nehezebb is őket „bepörgetni”. Így az elhanyagolhatóan kis Coriolis-erő a nagyobb tömeggel bíró levegőt, képtelenek oly módon megmozgatni, hogy azok tartós szélmaximumok a 17 m/s -os sebességi értéket meghaladják.

A 13. ábrán látható szabálytalan görbe vonalak a trópusi ciklonok pályáit jelölik. A színek erősségbeli különbségeket fejeznek ki. A kép alatt látható is a magyarázat, minél sötétebb a szín, annál erősebb hurrikánt reprezentál. A keletkezett trópusi ciklonok és a belőlük kifejlődött hurrikánok vagy tájfunok gyakorisága más és más az egyes óceáni területeken. A megjelenésük nem csak az óceánok területein más és más, hanem az északi és déli félteke között is eltérés mutatkozik. (Emanuel, 2006) Mivel kialakulásukhoz igen meleg tengerfelszín szükséges, érthető, hogy leggyakrabban az adott félteke nyarán alakulnak ki. Ez az időszak az északi féltekén júniustól novemberig, míg a déli féltekén decembertől májusig tart. Az alábbi grafikon a trópusi ciklonok havi megjelenésének gyakoriságát mutatja a két féltekére vonatkozóan. A két félteke nyara egymáshoz igazítva látható a grafikon alatt. (14. ábra)

Annual Cycle of Tropical Cyclones



14.ábra: a két félteke nyári időszaka egymáshoz igazítva, és e két időszakot összehasonlítva a trópusi ciklonok havi szintű megjelenésére alapozva (KERRY A. EMANUEL (2006): Hurricanes: Their physics and relationship to climate –*Előadás prezentáció*)

A térkép alapján elmondható, hogy mind mennyiségileg mind erősségileg a legaktívabb zónája a trópusi ciklonoknak a Nyugat-Csendes-óceáni régió. Ezt valószínűleg a felszíni, hosszú, széles sávban elnyúló kelet-nyugat irányú meleg tengeráramlat okozza. A tengeráramlat kelet-nyugat irányultsága, megegyezik a trópusi ciklonok elméleti haladási irányával. A közös haladási irány, egyfajta futószalagot szolgáltat a trópusi ciklonok számára. A meleg tengeráramlat (Golf-áramlat) az atlanti térségben is megtalálható, de iránya más. A Golf-áramlat nyugat-kelet irányú, így sokkal kisebb sávban metszi a trópusi ciklonok elméleti haladási irányát. Emellett leolvasható az ábráról, hogy mind két térségben minél északabbra „vándorol” egy-egy trópusi ciklon, annál inkább veszít az erejéből. Amikor ereje drasztikusan csökken, többnyire mérsékeltövi ciklonná alakul át. Ilyen trópusi ciklon volt a 2012-es Sandy-hurrikán is. Az energia csökkenés oka nem más, mint a meleg tengervízzel való közvetlen kapcsolat megszakadása. Mérsékeltövi ciklonná való átalakulása azért következett be, mert egy éppen fejlődő hideg képződménnyel, fronttal „találkozott”. Ezt a fajta átalakulást a

színekkel is reprezentálja az ábra. A vajszínű és az akva kék színű vonalak végződéseinél figyelhetünk meg ilyen átalakulási zónát.

A 13. ábráról leolvasható, hogy a déli féltekén is keletkeznek trópusi viharok, de gyakoriságuk sokkal kisebb, mint az északi félteke nagy, erős és kiterjedt viharainak. Míg északon a Saffir–Simpson skálát teljes szélességében kihasználó hurrikánok és tájfunok viszonylag nagy számban jönnek létre és pusztítanak, addig délen csak ritkán találkozhatunk hármas, négyes vagy ötös fokozatú trópusi ciklonokkal. Ezt is jól érzékelteti az ábrán található színskála és vonalhálózat. A keletkezési körzetek kapcsán meg kell említeni az Indiai-óceánt is, hiszen ezen a területen is $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű az óceán, tehát képes energiát szolgáltatni a keletkező trópusi ciklonok számára. A régió sajátossága az, hogy igen kis területen képesek létrejönni és elmozdulni a képződmények. Azért sajátságos, mert az Indiai-óceán jelentős része beleesik abba a zónába, ahol fizikai korlátok miatt nem keletkezhetnek trópusi ciklonok. Ez a tartomány jó közelítéssel az 5° -os északi-és 5° -os déli-szélességek közé esik. A fizikai korlát mellett északon és nyugaton nagyon közel van a szárazföld. Keleten szintén szigetvilággal és szárazfölddel találkozhatunk, míg dél-felé haladva hideg óceáni vizek vannak. A szárazföldek-és hideg vízfelszínek korlátozzák a képződmények élettartamát. Az Indiai-óceánról lefűződő beltengerek, öblök, tipikus trópusi ciklon keletkezési körzetek. A Bengáli-öböl térségében sok trópusi vihar keletkezik, és bár viszonylag ritka az igazán erős, ha mégis keletkezik, akkor nagyon pusztítóvá válik, mert a tengert elhagyván a szárazföld felett kimagaslóan nagy távolságokat tudnak megtenni, a terület karakterisztikájából fakadóan. A Bengáli-öböl partvidéke a Gangesz és a Brahmaputra folyók deltatorkolatai miatt, feltöltött síkság. A trópusi ciklon számára az ilyen terület közel homogénnek minősül, és ezért kevésbé veszít energiát a súrlódása miatt. Az Indiai-félsziget áttellenes oldalán található az Arab-tenger. A Bengáli-öbölhöz hasonlóan ez is az Indiai-óceán peremtengere, de karakterisztikáit tekintve lényegesen különbözik attól. A Bengáli-öbölben több a trópusi vihar, mint az Arab-tengeren. A magyarázat erre igen egyszerű, hiszen a Szomáli-áramlás, ami az Arab-tenger legnagyobb vízmennyiségét megmozgató áramlata, hideg vizű tengeráramlás. Így az áramlat a meleg tengervízfelszínhez képest nemhogy táplálja, hanem inkább akadályozza a trópusi ciklon fejlődését.

6. Trópusi ciklonok kifejlődése

A meleg óceáni vízfelszínnek felett az 5°. és 20°. szélességi fok között a felszín közeléből intenzív konvekció alakul ki, ami egyébként jellegzetessége a trópusi övezetnek. A levegő folyamatosan felfelé áramlik, és emiatt Cumulus felhőzet alakul ki. Mivel a levegő rossz hővezető, nincs hőcsere a felszálló levegőbuborék és környezetük között. Mivel a nyomás minden magassági szintben kiegyenlítődik, ezért szükséges, hogy a felfelé áramló levegőbuborékok táguljanak. Ez a tágulás hőcserementes, azaz adiabatikus tágulás, ami jelentősen csökkenti a felszálló levegő hőmérsékletét. A meleg tenger felett azonban ez a csökkenés nem jelentős, mert az egyre nagyobb sebességgel besodródó, közel telített levegő összetömörül és telítetté válik. A levegő besodródása a konvekció helyén, a vízfelszín fölött kialakuló alacsony légnyomásnak köszönhető. A nedves levegőből emelkedés közben a nedvesség kicsapódik. Ekkor látenshő szabadul fel. (Czelnai, 1988) A látenshő felszabadulásával a levegő tovább melegszik és hatalmas zivatarfelhők (Cumulonimbus-ok) keletkeznek. A víznek nagyon magas a párolgáshője, 2257 kJ/kg 100°C-on, ami lecsapódáskor visszamelegíti a lehűlésben lévő levegőt. Így bár az emelkedő levegő továbbra is húlni fog a lehűlés mértéke jelentősen csökken. Emellett a magasba érő levegő vertikális gyorsulása is csökken. A levegő ekkor még mindig melegebb a környezeténél, az ilyen légoszlopot, forró toronynak (hot tower) nevezzük. A forró-tornyok megléte esetén, már nem csak a vízfelszín közelében, hanem a troposzféra magasabb rétegeiben is kialakul egy alacsony nyomású központ, amit a trópusi ciklon kialakulása közben egy magasnyomású gyűrű vesz körül. (Czelnai, 1988) A későbbi forgás közben alakulnak ki a magasnyomású gyűrűből a spirálkarok. Forró tornyok csak gyenge szélnyírás esetén alakulhatnak ki, azaz a vízfelszíni és a felsőtroposzférában mozgó szelek sebességei között nem lehet nagyobb a különbség, mint 7 m/s. Ennél nagyobb eltérés esetén a forró torony szétesik, felbomlik. A levegő a vízfelszíntől a felsőtroposzféráig emelkedik, ahol szétáramlás indul meg, a szétáramlási zóna után leáramlás figyelhető meg a fejlődő képződmény körül. Míg a levegő feláramlása felhőket hoz létre addig a leáramlás, felhőoszlató hatású. Eközben a képződmény közepén alacsony nyomású mag alakul ki, mely egyre nagyobb sebességgel szívja maga felé a levegőt a vízfelszín közelében. Az Északi féltekén a

beáramló levegő spirálisan, az óramutató járásával ellentétes irányban felfelé mozog. Mikor eléri a felsőtroposzférát, a Coriolis-erőnek köszönhetően ellentétes irányba térül el, azaz anticiklonális forgású lesz. Hasonló a helyzet a déli féltekén is, csak ott a spirálisan felfelé emelkedő levegő, nem óramutató járásával ellentétes irányban, hanem az óramutató járásával megegyező irányban mozog, majd a felső troposzféra elérése után a Déli félteke anticiklonális, azaz az óramutató járásával egyező forgásirányát veszi fel.

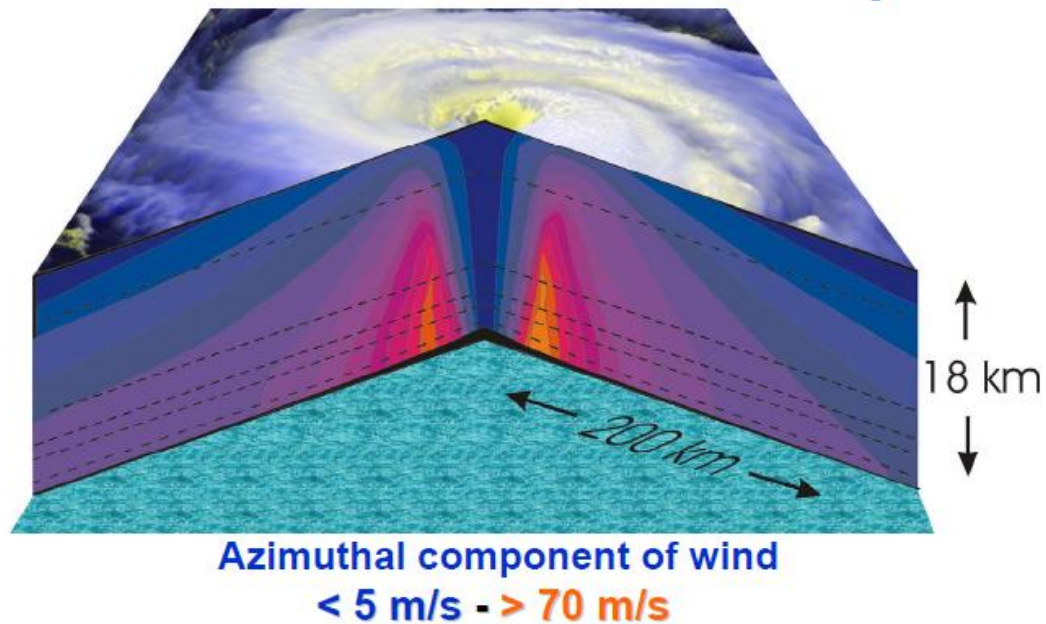


15.ábra: Katrina–hurrikán stadion–szerűen kiszélesedő szem fölötti felhőrendszer (<http://www.ec.gc.ca/ouragans-hurricanes/default.asp?lang=En&n=00677163-1>)

A képen az északi féltekén keletkezett trópusi ciklon látható. A szétterülés és az ellentétes forgás okozza, a jól ismert ciklonképeken látható jellegzetes stadion–hatást. A ciklon közepén az alacsony nyomás miatt felhőtlen zóna alakul ki. Ezt nevezzük a ciklon szemének. A szem olyan felhőmentes övezet melyben leáramlás figyelhető meg. A szem feletti levegőréteg nem részesül a felszabaduló látens hőből, közvetlen környezeténél hidegebb lesz, és süllyedő mozgásba kezd. Mikor ez a rendszer önfenntartóvá válik, és tartós szélmaximum értéke eléri a szemfalban a 17 m/s–os értéket, akkor beszélhetünk trópusi ciklon kialakulásáról. Mikor a szemfalban a sebesség már igen nagy, akkor a szem zsugorodni kezd, majd a teljes képződmény átmérője is csökkeni fog. Mindez az impulzusmomentum megmaradásának következménye. A kifejlett hurrikán belsejében a szélviszonyok

igen összetettek. A hurrikánokat általában szélsébségükkel, méghozzá a szemfalban spirálisan felfelé áramló levegőnek a sebességével szokták jellemezni. Ennek a sebességnek a nagyságát a következő ábra szemlélteti.

Hurricane Structure: Wind Speed



16. ábra: a hurrikánban kialakuló szélsébségekről kapunk információt (Emanuel, 2006; KERRY A. EMANUEL (2006): Hurricanes: Their physics and relationship to climate –Előadás prezentáció)

Ahogy 16. ábrán látható, a feláramlási sebesség közvetlenül a szemfal első harmadában a legnagyobb, majd csökkenő tendenciát mutat. Ez a csökkenési tendencia megfigyelhető a szemfaltól sugárirányban kifelé távolodva is.

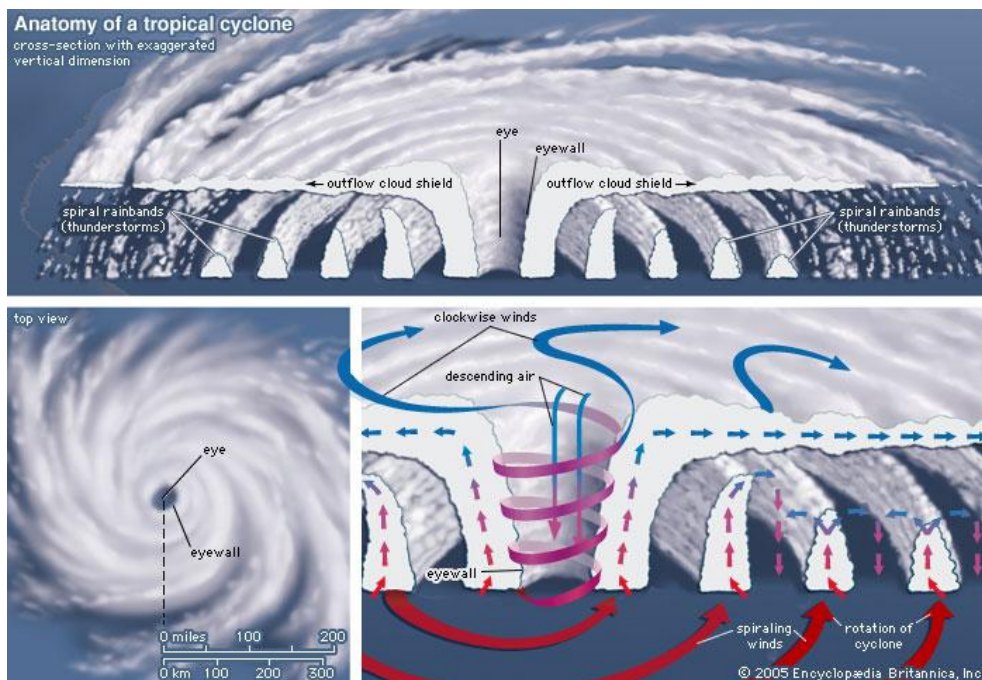
Összefoglalva elmondható, hogy a trópusi ciklon kialakulásához az alábbiak szükségesek:

- mély konvekció, azaz teljes troposféra magasságát átérő feláramlás,
- erős örvényesség,
- feltételes instabilitás,
- meleg tengervízfelszín és
- gyenge szélnyírás.

E tényezők együttes hatásaként jöhet létre trópusi ciklon.

7. Trópusi ciklonok szerkezete

Az alábbi, 17. ábra az északi félteke trópusi ciklonjainak függőleges keresztmetszetét ábrázolja. Látható az alsótroposzférára jellemző ciklonális, míg a felsőtroposzférára jellemző anticiklonális áramlás. Ezek kapcsán érdemes megfigyelni a kék és a piros színekkel jelölt nyilakat, amelyek a főbb áramlások irányát és általuk megmozgatott levegőtömegek hőmérsékletét mutatják. Az ábra illusztrálja, hogy a beáramló levegő a szemfalban spirálisan felfelé áramlik, majd a felsőtroposzférában, ahol Cirrus és Cirrostratus felhőzet alakul ki, anticiklonálisan kifelé áramlik. A felhősávokban erős csapadékhullás figyelhető meg. A szemfal felhőoszlopától kifelé a csapadék intenzitása csökken. Legbelül 50mm/óra is lehet az intenzitás értéke. Belülről kifelé haladva Cumulonimbus, Nimbostratus és Cumulus felsősávokkal találkozhatunk. Ezen felhősávok mindegyikében feláramlás zajlik, hiszen ott keletkezik felhő, ahol a levegő feláramlik. (Czelnai, 1988) A sávok közti zónákban leáramlás figyelhető meg, amiről tudjuk, hogy felhőoszlató hatású. Ennek megfelelően felhőmentes is. A levegőmozgásokat is jól szemlélteti az ábra. Az ábra szaggatott nyilai a levegőmozgást reprezentálják.



17. ábra: virtuális kép, hurrikán szerkezet vertikális profilja

(<http://www.britannica.com/EBchecked/media/100134/A-top-view-and-vertical-cross-section-of-a-tropical>)

A hurrikánok akkor szimmetrikusak, ha a szem kör alakú és felülnézetben a forgási karok is kört alkotnak. Innen a hurrikánok dinamikájára is következtethetünk. A hurrikán kiegyensúlyozottnak tekinthető, ha saját koordináta-rendszerében az erők egyensúlyt tartanak. A hurrikánon belüli tartományokban más és más erők dominálnak és tartanak egyensúlyt egymással. Az előző ábrából kiindulva a szemtől távolodva, ahol Cumulonimbus felhőzet a gyakori, ott a (3) -as számhoz tartozó esetet kell megvizsgálni. Ekkor a hurrikán szeméhez közeli zónában tartózkodunk, azaz az „R” forgási sugár viszonylag kicsi. Ezen a területen a nyomási gradiens erő és a centrifugális erő tart egyensúlyt. A Coriolis erő itt elhanyagolható. A (2) -es tartományban, ahol Nimbostratus és a Cumulus felhősávokkal is találkozhatunk, a Coriolis-erő és a Centrifugális-erő összege tart egyensúlyt a Nyomási gradiens-erővel. Ebben a zónában átlagos „R” távolsággal számolhatunk. Az (1) -es tartományban, ahol igen nagy az „R” értéke, a Centrifugális-erő elhanyagolható és a Nyomási gradiens erő tart egyensúlyt a Coriolis-erővel.

$$(3) \rightarrow -\frac{\partial P}{\partial R} = \rho \frac{v^2}{R}$$

$$(2) \rightarrow f\rho v + \rho \frac{v^2}{R} = -\frac{\partial P}{\partial R}$$

$$(1) \rightarrow -\frac{\partial P}{\partial R} = f\rho v$$

$$-\frac{\partial P}{\partial R} = \text{Nyomási gradiens} - \text{erő}$$

$$\rho \frac{v^2}{R} = \text{Centrifugális} - \text{erő}$$

$$f\rho v = \text{Coriolis} - \text{erő}$$



18.ábra: trópusi ciklon felülnézetben

(<http://static1.origos.hu/i/0908/20090824b>

illhurri1.jpg)

Az egyenletek természetes koordináta rendszerben egységnyi tömegre vannak felírva.

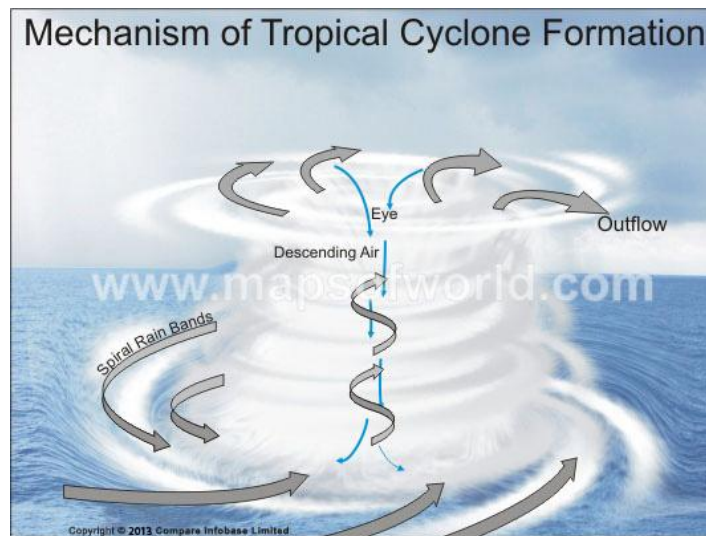
8. Trópusi ciklonok mozgása

A trópusi ciklonok kialakulásukat követően, az adott légköri viszonyoknak megfelelően, alakítják útjukat. Általánosságban elmondható, hogy kialakulásukat követően nyugati irányban majd északi irányba haladnak. (13. ábra) Ezt követően némely esetben keleti irányban is folytathatják útjukat, mígnem teljesen disszipálódnak. Adott esetben, ha bekerülnek a nyugati szelek övébe, ami az előzőekkel ellentétben már nem a trópusi övezet része, hanem a mérsékelt övezeté, ha nem szűnnek meg átalakuláson mennek keresztül. Az átalakulás során a hajdani trópusi ciklonok mérsékeltövi ciklonná alakulnak át. Az átalakulás jelentős fizikai változással jár, hiszen a trópusi ciklonok meleg maggal, a mérsékeltöviéek viszont hideg maggal rendelkeznek. Az átalakulás valójában a ciklon belsejében végbemenő termikus változás. A változást, a meleg tengervízfelszíntől való elszakadás generálja. A meleg tengervízfelszíntől való elszakadás következtében azon termodinamikai folyamatok, melyek kormányzója a nedves levegő és a felszabaduló látens hő volt, megváltoznak. A változás oka, hogy a hideg levegő a meleggel ellentétben sokkal kevesebb nedvességet tud hordozni. A változás strukturális átalakulásokhoz vezet. A csapadékszóna aszimmetrikussá válása a szélzónák és felhőzónák drasztikus megnyúlásából eredeztethető. A megnyúlás hatására lassul a képződmény, szélmaximumai az eddigi értékeknél kisebbeket vesznek fel, így nagyobb területen terül szét a vihar. A folyamat következtében az eddig csak lassulásban lévő trópusi ciklon meleg magú eddig stabilnak mondható központja sérül. Ennek hatására, az eddig meleg és nedves levegő egyre hidegebbé és szárazabbá fog válni. (Clark, 2012) Az átalakulás a magasabb szélességek felé vándorlás mellett egy másik hideg levegőjű időjárási képződménnyel való találkozást is megkövetel. A Sandy-hurrikán esetében a Kanada felől sarki hideg levegőt hozó hidegfront volt az átalakulást kiváltó képződmény. Ennek hatására vált mérsékeltövi ciklonná és szélesedett ki.

A trópusi ciklonok kialakulásuk során a földtől kapott impulzusmomentumot használják fel saját forgómozgásuk kialakításához. Ennek következtében a Földhöz képest lemaradnak a trópusi ciklonok, ezért tűnik úgy, mintha nyugati irányba haladnának. Amennyiben közben észak felé sodródnak,

akkor ez a lemaradás csökken, sőt a ciklon a Földhöz képest kelet felé kezdhet mozogni. A pálya mintha visszakanyarodna. Mindez a planetáris és a relatív impulzusmomentum összegének megmaradásával magyarázható. (Czelnai, 1988)

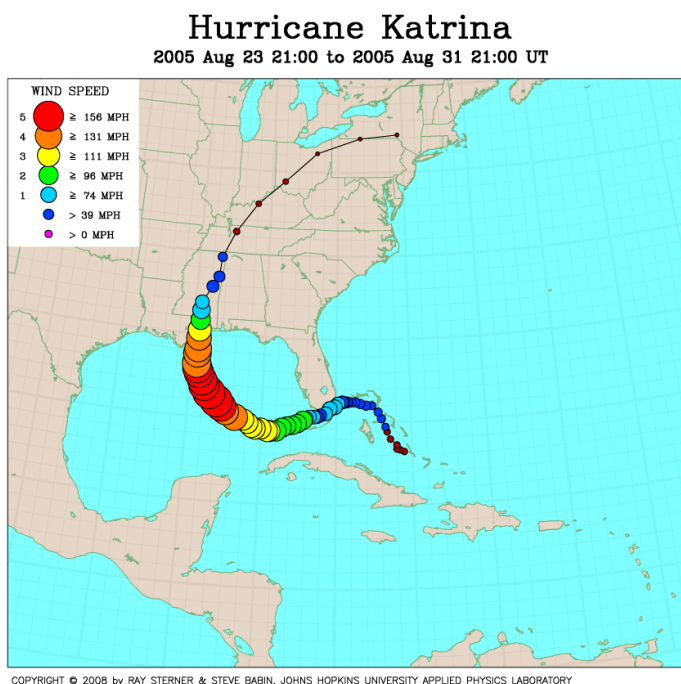
A szárazföld vagy hideg vízfelszín elérését követően a trópusi ciklonok energiája, így a benne uralkodó szélsőségek is drasztikusan csökken. Ez az energia csökkenés a kinetikus energia disszipációja miatt jön létre. A 19. ábrán a vízfelszín közeléből beszívott levegőt, s annak feláramlását, majd a troposzféra és sztratoszféra határfelületén, a széttartását mutatja be.



19. ábra: a szemfal felé és benne mozgó levegő, jellegzetes, uralkodó irányát mutatja

(<http://www.mapsofworld.com/hurricane/mechanism-of-tropical-cyclone-formation.html>)

A hideg tengervízfelszínnél sokkal erőteljesebb a szárazföldek feletti súrlódás miatt bekövetkező disszipáció. Amikor életútja során a trópusi ciklon szárazföld fölé érkezik, azért veszíti gyorsabban kinetikus energiáját, mint a vízfelszínen, mert a szárazföld felszínének nagyobb az érdessége.



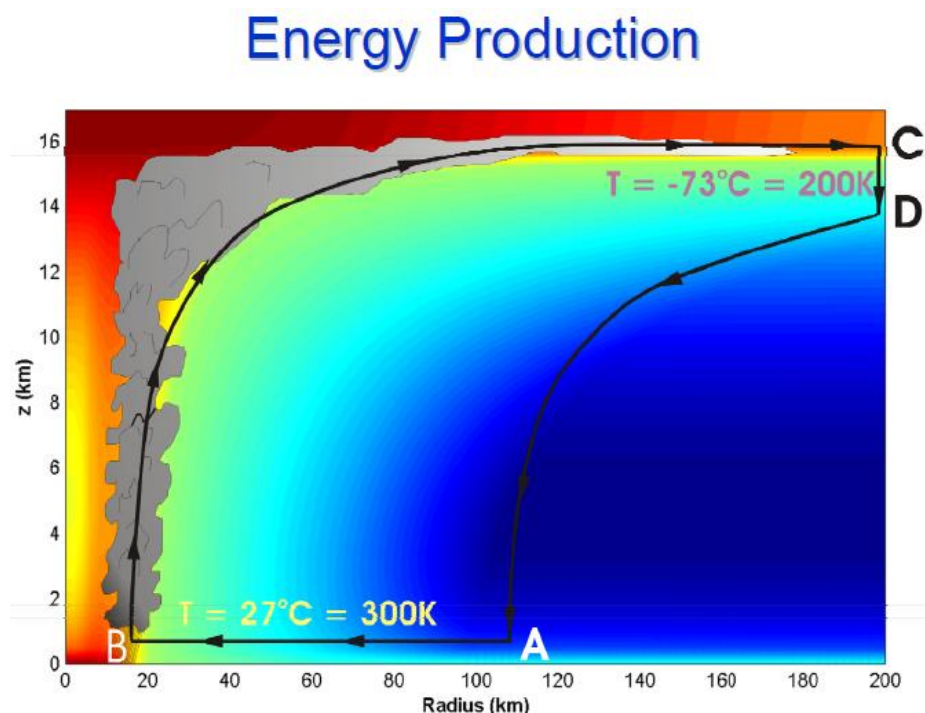
20.ábra: a Katrina–hurrikán útját mutatja be

(<http://meto.umd.edu/~stevenb/hurr/05/katrina/Katrina.png>)

A fentiek alátámaszthatók a Katrina–hurrikán példáján keresztül. A Katrina 2005. augusztus végén és szeptember elején pusztította az Egyesült Államok déli partvidékét. A 20. ábra alapján elmondható, hogy kialakulását követően, a Bahama-szigetek mentén, még folyamatosan fejlődő, erősödő tendenciát mutató trópusi ciklon volt. A későbbiekben, mikor Floridát elérte a szélsősége csökkent, ami a felbomlás első jele. Az ábra a színváltozásával érzékelteti a hurrikán energiájának változását életútja során. A hurrikán a New Orleans-i lakosság szerencsétlenségére a Mexikói-öbölben folytatta útját. Az igen magas hőmérsékletű vízfelszínnel rendelkező öbölben nagy energiára tett szert. Ezt az erősödést a kék színből a vörös színbe való átmenettel érzékelteti az ábra. A felerősödést követően a hurrikán Louisiana és Mississippi államok határán hagyta el az öböl térségét. A partot érést követően rohamosan vesztett a sebességéből, miközben hatalmas károkat okozott. A sebességvesztést egyértelműen a szárazföldfelszínével való súrlódás és a meleg tengervíztől való elszakadás, azaz az energia utánpótlás, megszűnése eredményezte. A Katrina–hurrikán a Nagy-tavak vidékéhez érve már csak egyszerű hidegfrontként mutatkozott. Ebből is látszik, hogy a súrlódás révén bekövetkező disszipáció igen erőteljes.

9. Termodinamikai körfolyamat a Hurrikánon belül

Hőtani szempontból a szakirodalom (Emanuel, 1991) a hurrikánban lezajló folyamatok termodinamikáját Carnot-körfolyamattal közelíti. A közelítés azonban problematikus. Az elmélet szerint, ha a hurrikán folyamatosan működő Carnot-gép lenne, akkor folyamatosan mechanikai energiává konvertálná a felvett és a leadott hő különbségét. Mivel a mechanikai energia a hurrikánban fújó szél kinetikus energiájában jelenik meg, így az előzőek alapján, a szél sebességének folyamatosan növekednie kellene. De a tapasztalatok azt mutatják, hogy nem nő, hanem disszipálódik és hővé alakul. A hurrikán az így keletkezett hőt a magas hőmérsékletű hőtartályba termeli vissza. Ezért azt mondhatjuk, hogy a hurrikán nem tankönyvi értelemben vett Carnot-gép, hanem olyan hőerőgépnek tekinthető, amely nagyon hasonlít a Carnot-gépre. Ennek ellenére a közelítés még sem rossz. A valós szituáció egy közbeiktatott modell segítségével jól kezelhető. Tételezzük fel, hogy a mechanikai energiát nem a súrlódás emészti fel, hanem a szél elektromos erőművet működtet. A hurrikán által folyamatosan termelt kinetikus energiát áramfejlesztő segítségével, hőszugárzón keresztül tápláljuk vissza határrétegbe, azaz melegítjük a magas hőmérsékletű hőtartályt. (Bister és Emanuel, 1997) Ezzel helyettesítjük a valós körülmények között disszipálódó és óceánt melegítő folyamatot.



21.ábra: a hurrikánban lévő termodinamikai körfolyamat (KERRY A. EMANUEL (2006): Hurricanes: Their physics and relationship to climate, PDF előadás)

A körfolyamat során (21. ábra), két izotermikus és két adiabatikus szakaszt szemlélhetünk. Nézzük az egyes szakaszokat külön-külön.

1. (A–B) A Hurrikán alját a földfelszíntől vagy vízfelszíntől elválasztó levegőréteget, határrétegnek nevezzük. Ez az a levegőréteg, ahol az energiafelvétel zajlik. Ez körülbelül 1,5–3 km vastagságú, hurrikán fejlettségi szintjétől és napszaktól függően változó. Az energia felvétele mellett itt, intenzív levegőbeszívás is megfigyelhető. (A hurrikánban kialakuló konvergencia miatt rendezett feláramlás zajlik, a hurrikán az alatta lévő levegőt a szem felé szívja, melyet később a szemfalban emelkedésre bír.) A beszívás során megfigyelhető, hogy a szélvektorok szem felé mutatnak és nagyságuk kívülről befelé folytonosan növekvő. A hurrikán területén a határrétegen belül zajló folyamatok jó közelítéssel izotermikusnak tekinthetők. A meleg hőtartály közvetlen közelsége és az izotermikus állapotváltozás miatt, ezt a szakaszt meleg izotermának nevezzük.

2. (B–C) A második szakasz az, ahol a nedves–adiabata egybeesik egy olyan konstans impulzusmomentum felülettel, melynek mentén a tengerszintről, a troposzféra és sztratoszféra határfelületére, egészen a spirálkarok végéig juthatunk el. (Emanuel, 1991) Ez a körülbelüli 16–18 km-es magasságot jelöl ki. A levegőrészek adiabatikus emelkedésük közben folyamatosan tágulnak és hűlnek. Ez a hűlés véges, de folytonos. A levegő a meleg hőtartálynál felvett hőmérsékleti értéktől kezdődően hűl, egészen a C-D szakasszal meghatározott hideg izotermáig.

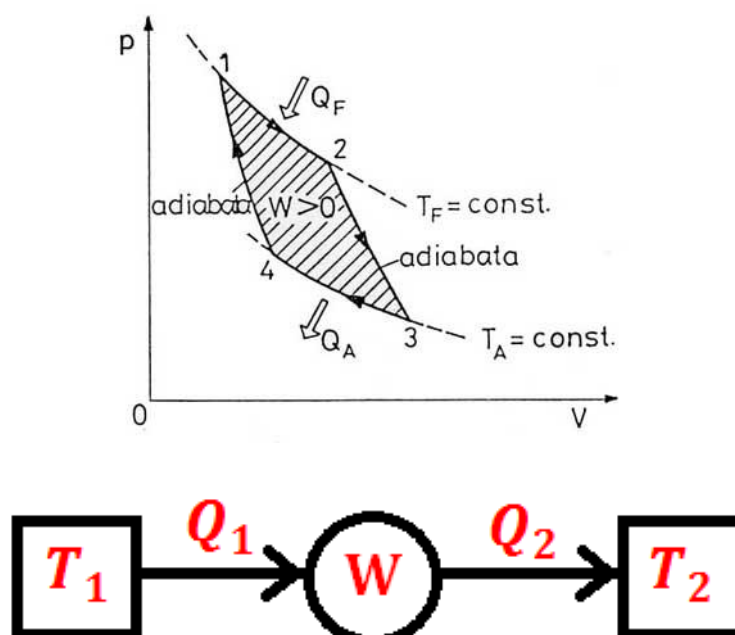
3. (C–D) A troposzféra és sztratoszféra határán szétterülő levegő állapotváltozását ismét izotermikusnak tekintjük. Ez a feltevés a valóságban csak durva közelítéssel teljesül. Ennek a szerepe igen eltérő a határfelületen tapasztalható izotermáétól. Míg a meleg izotermán hőfelvétel, addig itt hőleadás tapasztalható. A hő leadásával a hideg izoterma hőmérséklete jó közelítéssel megegyezik az alacsony hőmérsékletű hőtartály hőmérsékletével.

4. (D–A) A hideg–izoterma mentén mozgó levegőrész a hurrikán centrális részén túljutva leszálló mozgást vesz fel és egy újabb adiabatával egybeeső konstans impulzusmomentumú felületen mozog. A levegőrészek süllyedésük során kompresszió hatására egyre magasabb hőmérsékleti értékeket

vesznek fel. A vertikális süllyedésük következtében visszajutnak a kiindulási pontba, azaz a beszívási határréteg zónájába.

Ez a négy folyamat a Carnot-körfolyamattal modellezhető.

A reverzibilis Carnot-ciklus, a következő sematikus 22. ábrával szemléltethető. A folyamatára kezdő és végpontját a T_1 magas hőmérsékletű és a T_2 alacsony hőmérsékletű hőtartály adja meg. Az egyes izotermákon történő hőfelvételt Q_1 -el illetve a hőleadást Q_2 -vel jelöljük. A W pedig nem más, mint a folyamat során keletkezett hasznos munka.



22. ábra: reverzibilis Carnot-körfolyamat sémája és P-V diagrammon a képe
(http://www.google.hu/imgres?imgurl=http://www.sulinet.hu/tovabban/felveteli/ttkuj/fizika/hotan/kepek/nyolcadik.jpg&imgrefurl=http://www.sulinet.hu/tovabban/felveteli/ttkuj/fizika/hotan/hotan.htm&h=342&w=420&sz=23&tbnid=_uh842prwJIp8M:&tbnh=90&tbnw=111&zoom=1&usg=__x_uL_rKJ69CRNTC7l-RqcoVrXVA=&docid=_RdvrAfPXhXKYM&sa=X&ei=CoaSUfGVLcbSsgbmroHgDQ&ved=0CEIQ9QEwAw&dur=307)

A reverzibilis Carnot-körfolyamat esetén, a munkaközeg egyes izotermáin felvett hőmérséklete megegyezik az egyes hőtartályok hőmérsékletével és a reverzibilitás miatt a folyamat kvázisztatikusan, azaz végtelen lassan megy végbe. A valóságban a körfolyamat nem reverzibilis. Ezt például úgy vehetjük figyelembe,

hogy feltételezzük, hogy az izotermákon a munkaközeg hőmérséklete nem egyezik meg a hőtartályok hőmérsékletével. A hőmérséklet különbség miatt következik be a hőtartály és a munkaközeg közötti irreverzibilis hőcsere.

A valóságban a munkaközeg a magas hőmérsékletű hőtartálynál hidegebb, az alacsony hőmérsékletű hőtartálynál melegebb. Ezért a hőtartályok és a munkaközeg közötti hőcsere nem reverzibilis. Magának a munkaközegnek az állapotváltozását azonban reverzibilisnek tekinthetjük. Az ilyen körfolyamatot nevezzük endoreverzibilis (belsőleg reverzibilis) körfolyamatnak.

Ebben a modellben két új változó jelenik meg, a munkaközeg hő felvételi és hő leadási hőmérséklete. Ezeket a hőmérsékleteket önkényesen adhatjuk meg, azonban kézenfekvő, hogy az egy ciklus alatt a hőerőgép által végzett munka maximalizálásából következtessünk értékükre.



23. ábra: endoreverzibilis Carnot-körfolyamat

Az adiabatikus tágulás illetve kompresszió során, a térfogatváltozásnak megfelelően nő illetve csökken a levegő hőmérséklete. A hurrikán esetében a T_1 a tengerfelszín hőmérsékletét, a t_1 a határrétegben felvett nedves levegőtömeg hőmérsékletét határozza meg. A T_2 a hideg hőtartály, azaz a sztratoszféra vagy világűr hőmérsékletét, a t_2 a troposzféra és sztratoszféra határán felvett levegő hőmérsékletét határozza meg. (23. ábra) A fent megjelenő hőmérsékleti paraméterekre értelemszerűen igaz az alábbi összefüggés:

$$T_1 > t_1 > t_2 > T_2$$

Feltevással kell élnünk a hőtartály és a munkaközeg közötti hőcserére vonatkozóan is. Alul, a meleg izotermánál az óceán és a határrétegbeli levegő között megy végbe hőcsere. A magasban, a felemelkedett, csapadéktól már megszabadult, lehűlt, sztratoszférába áramló levegő és a világűr (=hideg hőtartály) között megy végbe a hőcsere. A meleg-és hideg-izotermák mentén nem feltétlen

ugyanaz a hőcsere típusú valósul meg. A felszín közelében, ahol igazán kicsi a távolság a két közeg között, a hőcserét a hővezetéssel érdemes jellemezni. A magasban a világűr felé, a sugárzási törvény jobban leírja a valóságot, ezért itt a hőcserét hősugárzással jellemezhetjük. A következő egyenletek a hőcsere folyamatokat határozzák meg:

$$Q_1 = \alpha (T_1^n - t_1^n)$$

$$Q_2 = \alpha (t_2^m - T_2^m)$$

A hővezetés kapcsán az n változó helyére egyet, míg a sugárzási törvény kapcsán az m helyére a Stefan–Boltzmann törvény miatt négyet helyettesítünk be. A második egyenlet a Stefan–Boltzmann egyenlethez hasonlóan, az egységnyi felületen egységnyi idő alatt kisugárzott összes energia mennyiségét fejezi ki. Ez alapján meghatározhatók a felvett és leadott hőmennyiségek.

A reverzibilis Carnot–körfolyamat reverzibilitási feltétele megsérül a disszipációban vagy a hőfelvétel/hőleadásban. Azaz a folyamat kvázisztatikus jellege eltűnik és az eddig végtelennek hitt időfaktorral már a továbbiakban számolni kell.

Míg reverzibilis esetben a $Q_1/T_1 = Q_2/T_2$, addig az endoreverzibilis esetben, ahol a munkaközeg izotermán felvett hőmérséklete más, mint a közvetlen környezetében lévő hőtartály hőmérséklete, ott a $Q_1/t_1 = Q_2/t_2$ összefüggés határozza meg a reverzibilitás feltételét. Ez azt jelenti, hogy ezentúl, nem a hőtartályok közötti folyamatokra írhatjuk fel a reverzibilitás feltételét, hanem a munkaközeg egyes állapotai (meleg-és hideg-izoterma) között.

Mindezek után azt mondhatjuk, hogy a termodinamikai körfolyamat által végzett munka, azaz a W egyenlő lesz a hő felvétel és a hő leadás különbségével.

$$W = Q_1 - Q_2$$

Ahhoz, hogy a hőerőgép hatásfokát maximalizálni tudjuk, szükségünk van, a lehető legnagyobb hasznos munkára. Ezt a t_1 segédhőmérséklet segítségével, deriválás útján kaphatjuk meg. A hasznos munkát t_1 szerint deriváljuk.

$$\frac{dW}{dt_1}$$

Ez a feladat még nem megoldott, de ehhez hasonló modellt már vizsgáltak, ahol mindkét hőcserefolyamatot hővezetéssel közelítenek. Ekkor a hatásfok:

$$\eta = \frac{W}{Q} = 1 - \sqrt{\frac{t_1}{t_2}}$$

10. Összefoglalás

A munkám során a trópusi ciklonok, azon belül is a hurrikánok jellegzetes és speciális tulajdonságaival foglalkoztam. Belátható, hogy a Napból jövő sugárzás, azaz energiaforrás, mely a lokális energia felhalmozódást követően konvektív folyamatok megjelenését eredményezi szerte a világon. A Föld karakterisztikáit tekintve elmondható, hogy a legtöbb energiát felhalmozó zónák az Egyenlítő környékére, a trópusi övezetre tehetők. Ezen kívül beláttuk a trópusi ciklonok kialakulásának szükséges feltételeit. Ide sorolható a meleg tengervíz, a mély konvekció és az instabil, örvényes légkör. A kialakulási folyamatok mellett a kialakulási körzeteket, ezen belül is az egyik speciális területet, az Indiai-óceán területét ismerhettük meg.

Továbbiakban a már kifejlődött hurrikánok esetében, a mozgásukat és szerkezetüket vizsgáltuk meg. A trópusi hurrikánok sajátossága, hogy speciális körülmények között trópusi ciklonokból mérsékeltövi ciklonokká alakulnak át. A Sandy-hurrikánt, aktualitása mellett azért is tárgyaltam részletesebben, mert ezt az átalakulást is tökéletesen példázza.

A dolgozat második felében a hurrikánok termodinamikai körfolyamatát tárgyaltam. A szokásos körfolyamat mellett bemutattam a hurrikánt modellező endoreverzibilis körfolyamatot is, amivel a valósághoz jobban közelítő, a folyamatok irreverzibilitását is figyelembe vevő kép alakítható ki.

A dolgozatban érdekességként feltüntettem statisztikai adatokat, melyek az egyes hurrikánok, tájfunok vagy éppen földrengések által okozott károkat összesítik. Az okozott károk mellett a viharok teljesítménye kapcsán egy listát is mellékeltem. A listán a feljegyzések kezdetétől napjainkig olyan hurrikánokat és tájfunokat soroltak fel, melyek valamilyen tulajdonságukban rendkívülinek bizonyultak.

11. Irodalomjegyzék

- DR. BARTHOLY JUDIT (2010): A meteorológia alapjai, dr. Geresdi István, dr. Matyasovszky István, dr. Mészáros Róbert, dr. Pongrácz Rita
- JÓNÁS ILONA (2004): Természetföldrajzi környezetünk Földrajz, dr. Kovács Lászlóné, Vízvári Albertné– *Gimnáziumi Földrajz Tankönyv*
- CZELNAI RUDOLF (1988): Bevezetés a meteorológiába II. A mozgó légkör és óceán, Götz Gusztáv, Iványi Zsuzsanna
- WIKIPEDIA: trópusi ciklonok, Sandy–hurrikán, Saffir–Simpson–féle skála
- KERRY A. EMANUEL (2006): Hurricanes: Their physics and relationship to climate –*Előadás prezentáció*
- ROB GUTRO (2012): NASA Sees 18th Atlantic Depression Form –NASA hivatalos honlapjáról 2013.04.26. –án letöltve
- ROB GUTRO (2012): NASA's Hot Tower Research Confirmed Again with Tropical Storm Sandy–NASA hivatalos honlapjáról 2013.04.26. –án letöltve
- ROB GUTRO (2012): GOES-13 Sees Hurricane Sandy Move over Jamaica–NASA hivatalos honlapjáról 2013.04.27. –án letöltve
- ROB GUTRO (2012): Suomi NPP Satellite Captures Detailed Imagery of Hurricane Sandy Intensification–NASA hivatalos honlapjáról 2013.04.27. –án letöltve
- ROB GUTRO (2012): NASA Sees Hurricane Sandy as the "Bride of Frankenstorm" Approaching U.S. East Coast, Hal Pierce, Marshall Shepherd–NASA hivatalos honlapjáról 2013.04.28. –án letöltve
- ROB GUTRO (2012): NASA Examines Hurricane Sandy as it Affects the Eastern U.S. –NASA hivatalos honlapjáról 2013.04.28. –án letöltve
- ROB GUTRO (2012): Satellite Still Shows Sandy's Remnant Clouds Over Eastern Canada and the Northeastern U.S. –NASA hivatalos honlapjáról 2013.04.28. –án letöltve

ADAM VOILAND (2012): Comparing the Winds of Sandy and Katrina, NASA–NASA
hivatalos honlapjáról 2013.04.28. –án letöltve

KERRY A. EMANUEL (1991): The Theory of the Hurricanes

CLARK EVANS (2012): The Thermodynamic Evolution of an
Extratropically Transitioning Tropical Cyclone, Robert E. Hart

MARJA BISTER (1997): Program in Atmospheres, Oceans and Climate
Massachusetts Institute of Technology, Kerry A. Emanuel : Meteorology and
Atmospheric Physics

12. Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni Tasnádi Péter egyetemi tanárnak és Fejős Ádám doktorandusznak, akik az anyaggyűjtéstől kezdődően, a fogalmazás nehézségein át, bonyolultabb fizikai összefüggésekig segítettek és figyelemmel követték a munkámat.