

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Földrajz – és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A Trópusi ciklonok energiaviszonyai

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Iván Márk

Meteorológus mesterszakos hallgató

Időjárás - előrejelző szakirány

Témavezető:

Dr. Tasnádi Péter

egyetemi tanár

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Trópusi ciklonok definíciója	4
3. Trópusi ciklonok keletkezési környezete	7
4. Trópusi ciklonok keletkezési folyamata	10
5. A <i>Katrina</i> – hurrikán ismertetése	15
<i>Katrina</i> – hurrikán szemhez rögzített GPS koordináták.....	19
<i>Katrina</i> – hurrikán CAPE.....	20
6. <i>Katrina</i> – hurrikán energiasűrűsége	23
Kinetikus energiasűrűség.....	24
Potenciális energiasűrűség	34
7. Trópusi ciklonok összehasonlító vizsgálata	37
<i>Tip</i> – tájfun és <i>Ike</i> – hurrikán	44
<i>Mark</i> – trópusi ciklon és <i>Rita</i> – hurrikán.....	45
<i>Vince</i> – trópusi ciklon és <i>Wilma</i> – hurrikán	46
<i>Daniel</i> – és <i>Charley</i> – hurrikán	47
<i>Andrew</i> – és <i>Sandy</i> – hurrikán	48
<i>Ivan</i> – hurrikán	49
8. Összefoglalás	51
9. Irodalomjegyzék	53
10. Köszönetnyilvánítás	56

1.Bevezetés

A meteorológia a légkörben végbemenő fizikai folyamatokat és hatásukat vizsgálja. A légkör sokszínű jelenségei gyakran gyönyörűek, de gyakran veszélyesek és félelmetesek is. Dolgozatom témájaként olyan jelenséget választottam, amely rövid élettartama alatt sok áldozatot szedett és hatalmas anyagi kárt okozott. Egy trópusi ciklon, a Katrina 2005. augusztusában elérte a Saffir-Simpson féle hurrikán skála legerősebb kategóriáját, és ötös fokozatú hurrikánként ért partot. A Katrina - hurrikán, a valaha volt egyik legnagyobb pusztítást végezte, nem csak az amerikai kontinens, hanem az egész Föld tekintetében is. A feljegyzések kezdete óta, a természeti katasztrófák közül, mindössze néhány földrengés volt képes nagyobb kárt okozni, mint ez a trópusi ciklon. [1] A Mexikói-öböl északi partvidékén fekvő New Orleans városát pusztította a vihar. A rombolást a tenger vízszintjének emelkedése, a hatalmasra gerjesztett hullámokkal és az elképesztő erejű szél együttesen okozta. Mindezek mellett, a pusztításhoz nagyban hozzájárult New Orleans városának tengerszinthez képesti elhelyezkedése is. Érthető, hogy a hurrikánokat Japánban Kamikazének, azaz Isteni szélnek nevezik.

Munkámat az vezérelte, hogy megértem és megismerjem, hogyan képes a természet ilyen, akár városokat is elpusztító jelenséget létrehozni. A trópusi ciklonok viselkedésének megértésben a nagy földi légkörzés és a mezo skálájú folyamatok tanulmányozása mellett, a légkörben hasznosítható energia átfogó ismerete is segít. Fontos leszögezni, hogy a New Orleansban, 2005-ben történt pusztításnak rengeteg fizikai összetevője volt. A rombolást jellemezni és bemutatni az okozott károk pénzben kifejezett összegével vagy fotók alapján lehetne, de a vihar erejét reprezentáló energia is jó indikátor lehet. A megértés kulcsa, az energiának a számítása és értelmezése, ez ugyanis magyarázhatja a pusztítás mértékét. A dolgozat vezérfonalát a trópusi ciklonok általános bemutatása mellett, a Katrina – hurrikán jellemzése és az energiaviszonyainak bemutatása képezi. A nyilvánosan felhasználható adatok alapján kiszámítjuk a hurrikán kinetikus, belső és a helyzeti energiáját is. Az energiák tanulmányozásával válaszokat kapunk, azokra a kérdésekre melyek felmerülhetnek egy nagyterjedésű trópusi ciklon kapcsán. A kérdések a következők lehetnek: Mennyire képes befolyásolni a légköri képződmény energiáját az óceáni vízfelszín hőmérséklete? Van – e egyértelmű kapcsolat a vízfelszín hőmérséklete és a pusztítás között? Illetve, húzható – e

bármilyen párhuzam a trópusi ciklon kiterjedése, a maximális szélesség és kinetikus energia között? A kérdésekre a válaszokat grafikonok, táblázatok és egyéb ábrák segítségével teszem szemléletesebbé, hogy mindenki számára érthetőbbek legyenek az összefüggések.

2.Trópusi ciklonok definíciója:

A trópusi ciklonok egzakt, definícióját igen nehéz meghatározni. A trópusi ciklonok életútját szakaszokra felbontva, fejlődő és érett fázisra, más-más definíciót adhatunk nekik. Az életútbeli különböző fázisok és így a különböző definíciók okát a légköri képződmény különböző térskálán vett értelmezése adja. Így, ha a trópusi ciklon fejlődő fázisáról beszélünk, akkor egyértelműen szinoptikus skálájú képződményről van szó. Ilyenkor a trópusi ciklonnak az átmérője akár 800 km is lehet. A szinoptikus skálára abból következtethetünk, hogy a kialakulás során, egy adott zóna felé, távoli területekről konvergálódik a nedvesség, a távoli területek impulzusmomentuma és maga a megmozgatott igen nagy tömegű levegő. Ez a konvergencia adja a rendszer kiterjedését. A fejlődő fázist követő érett fázisban a már konvergálódott rendszer, a kezdeti mezőnél kisebb területet fed le. Ekkor már mezo skáláról beszélhetünk. Ebből is látszik, hogy a teljes élettartamot lefedő definíciót csak jó közelítéssel adhatunk meg. A kezdeti fázisokat figyelembe véve, mikor még nem lehet tudni, hogy a jelenségből lesz-e trópusi ciklon vagy megmarad trópusi depresszió vagy viharnak, akkor egyértelműen szinoptikus skálájú képződményről van szó. Ezzel szemben, ha már érett trópusi ciklonról beszélünk, mely nem csak, hogy elérte a 33 m/s – os szélesség értékét, hanem át is lépte azt, egyértelműen mezo skálájúnak nevezhetjük. Ekkor a képződmény már kisebb átmérővel rendelkezik a kezdetekhez képest. (körülbelül 500 – 600 km) Ebből kiindulva azokat a jelenségeket nevezhetjük trópusi ciklonoknak, melyek karakterisztikus mérete a szinoptikus és mezo skála határán mozgó, a jelenség életszakaszától erősen függő mérettel rendelkezik. A kiterjedésen túl fontos pontja még a definíciónak, hogy a képződmény az Egyenlítőhöz közeli területeken alakuljon ki. Az Egyenlítőtől vett távolság kétélű. Ha túl közel van az Egyenlítőhöz, akkor kisebb az esély a trópusi ciklon létrejöttére. Ennek, azaz oka, hogy a konvektív cellák bepörgetéséért szolgáló Coriolis-erő horizontális komponense a földrajzi szélesség függvényében változik. Minél kisebb a földrajzi szélesség, azaz minél közelebb van a képződmény az Egyenlítőhöz, annál kisebb a Coriolis – erő. A kicsiny Coriolis – erő képtelen bepörgetni a konvektív cellákat, így trópusi ciklon nem, legfeljebb zivatar góc vagy zivatar lánc alakul ki. Ezzel szemben, ha túl távol van az Egyenlítőtől, s így a trópusoktól, akkor alapjaiban nem nevezhető trópusinak a légköri képződmény. A legideálisabb Egyenlítőtől vett fokban kifejezett távolság, minimum öt és maximum húsz. A kiterjedés és keletkezési körzet mellett további három rendkívül fontos feltételnek kell szerepelnie a definícióban. Csak akkor

beszélhetünk trópusi ciklonról, ha benne a szélesség meghatározott értéket ér el. Ezt az értéket átlépve, már létrejöhet az egész troposzférát átfogó mély konvekció. Ez az érték a már említett 33 m/s –os szélesség. Ha a szélesség ennél kisebb, de a 17 m/s – os értéket meghaladja, akkor trópusi viharról, ha a 17 m/s – os érték alatt marad, akkor trópusi depresszióról beszélhetünk. Természetesen a szélesség most a tangenciális szélességet jelenti. A definíció szerves részét képezi, hogy a képződmény ciklon mivoltából kifolyólag alacsony légnyomási központtal kell, hogy rendelkezzen. Ez az a tulajdonság, mely generálja a képződmény létrejöttét, hiszen az alacsony nyomás alacsonyszintű konvergenciát hoz létre, ahol a későbbiekben intenzív feláramlás, konvekció alakul ki. Mindezen tulajdonságok mellett egy további tulajdonság is megkülönbözteti a trópusi ciklonokat az egyéb alacsony nyomásközpontú rendszerektől. A trópusi ciklonok meleg magúak. A ciklon szeme környezeténél magasabb hőmérsékletű. Ezt a jelleget egyébként a poláris ciklonok esetében is megfigyelhetjük, csak ott a „relatív meleg” kifejezés a helytálló, hiszen bár a poláris ciklonnak a központja melegebb a közvetlen környezeténél a poláris zónában a hőmérséklet alacsony. Éppen ezért abszolút értelemben nem tekinthetők meleg magúnak a poláris ciklonok.

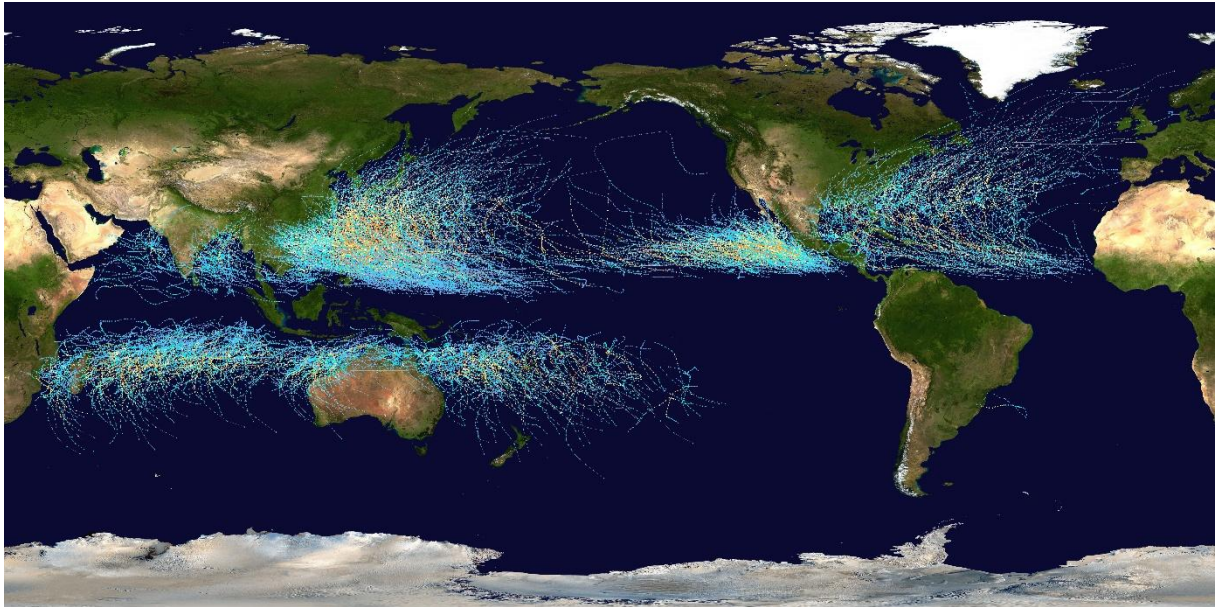
A fenti tulajdonságok mellett a trópusi ciklonoknak vannak olyan szerkezetbeli és vizuális jegyei is, melyek igazán egyedivé teszik őket. Ilyen például a légköri képződmény jól kivehető, szinte szabályos kör alakú alacsony légnyomású központja, mely jól elkülönül a közvetlen környezetétől. Ezt nevezzük a vihar szemének. A szem olyan felhőmentes övezet, ahol más légáramlási viszonyok uralkodnak, mint az őt körbevevő szemfalban. A legfőbb vizuális jegyek kapcsán a szem mellett nagyon fontos megemlíteni, a trópusi ciklonok felső részét jellemző anticiklonálisan kifelé, spirálisan tekeredő felhősávokat is.

A vihartól független, bizonyos tényezők megléte is kiemelendő. A képződmény fennmaradásához az óceáni vízfelszín megfelelően magas hőmérséklete kitüntetett fontosságú. Azt lehet mondani, az a legideálisabb, ha a vízfelszín hőmérséklete, abszolút hőmérsékleti skálán 293 K fölött van. A természet adta lehetőségek révén, a Földön több olyan óceáni terület is van, ahol az óceáni vízfelszín hőmérséklete akár 300 K fölötti értéket is felvesz. Ezek a területek igen jó „táptalajt” biztosítanak a trópusi ciklonoknak. A magas óceáni vízfelszín hőmérséklet azért fontos, mert a meleg nedves levegőben igen nagy mennyiségű felhasználható energia rejlik a viharrendszer számára. Összefoglalva elmondható, hogy azokat

a szinoptikus és mezo skála határán mozgó képződményeket, melyek Egyenlítőhöz közeli területeken alakulnak ki, alacsony légnyomású és meleg magú központtal rendelkeznek, és szélességük meghaladja a 33 m/s – os szélesség értéket, trópusi ciklonnak nevezzük.

Természetesen ahány féle szervezet, tankönyv és nézőpont, annyi féle definíció létezik. Az angol wikipédia szerint, a trópusi ciklon olyan, gyors forgású vihar rendszer, melyet alacsony nyomású központ, erős szelek és a nagy csapadékot adó spirál karok jellemeznek. [2] Ezzel az egyszerű, lényegre törő definícióval szemben a NOAA, (National Oceanic and Atmospheric Administration), jóval összetettebb definíciót fogalmazott meg. A NOAA szerint, a trópusi és szubtrópusi óceáni vízfelszínnek fölött kialakuló meleg magú, frontokkal nem rendelkező, szinoptikus skálájú képződmények, amelyekben megfigyelhető a teljes troposzférát átfogó mély konvekció, és a jól körülhatárolt központ körüli zárt cirkulációs zóna, trópusi ciklonoknak tekinthetőek. [3] A NOAA kiemeli a trópusi és egyéb ciklonok közt, az energia szállításbeli különbségét. Míg a trópusi ciklonok esetében egy vertikális energia transzport megy végbe a meleg óceáni vízfelszín és az igen hidegnek mondható felső troposzféra között, addig más ciklonok esetében horizontális hőmérsékleti gradiensek, azaz baroklin hatások által megy végbe az energia szállítása.

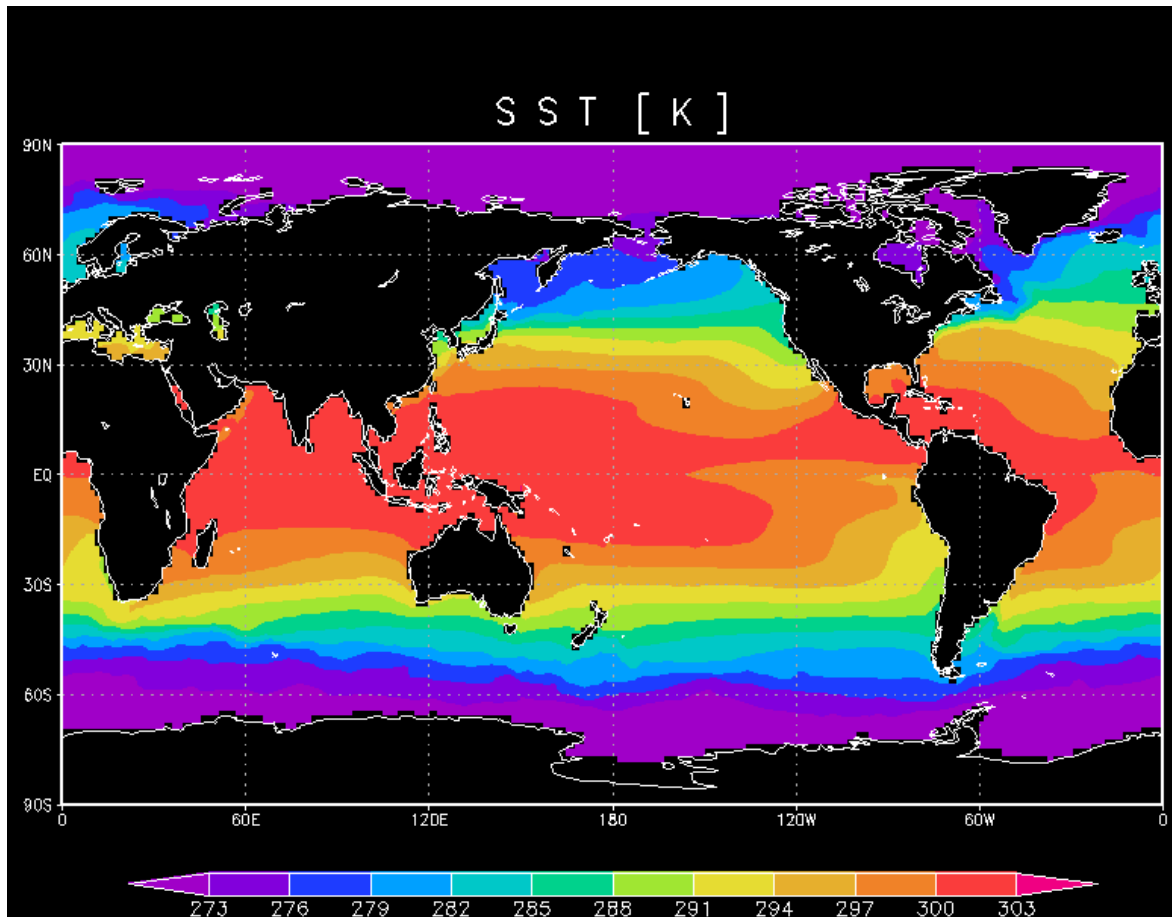
3.Trópusi ciklonok keletkezési környezete



1. **ábra:** Trópusi ciklonok trajektóriái.

Forrás: [4]

A térképen a trópusi ciklonok leggyakoribb útvonalai és a keletkezési környezete látható. (1. ábra) Az ábrán különböző színnel jelzett vonalak a légköri képződmények erősségét fejezik ki. Minél sötétebbek a görbék, annál erősebbek az általuk reprezentált trópusi ciklonok. A térképet több tartományra lehet osztani. Közülük az első tartomány a trajektóriák által kirajzolt Egyenlítőtől nem túl távoli terület, ahol nem találunk ciklonpályát. Ezen nem csodálkozunk, hiszen ebben a térségben igen kicsi a Coriolis-erő horizontális komponense, így a konvektív cellák képtelenek megfelelően bepörögni. A második tartományt az egyenlítőtől távoli területek képezik. Akár észak, akár dél felé haladunk, további trajektória mentes óceáni területek láthatóak. Ez is jól érthető, hiszen az óceáni vízfelszín hőmérséklete az Egyenlítőtől távolodva az Északi - és Déli - sarkhoz közeledve fokozatosan alacsonyabb és alacsonyabb. (2. ábra) A trópusi ciklonok számára a megfelelően magas óceáni vízfelszín hőmérséklet kitüntetett fontossággal bír, hiszen ez az, ami energiával látja el őket. Ilyen módon azon vízfelszínek felett, melyek hőmérséklete alacsonyabb, mint a trópusi vízfelszín hőmérséklete nem alakulhat ki trópusi ciklon. Mindamellett fontos megemlíteni, hogy a már kifejlődött trópusi ciklonok esetében, nem csak az óceáni vízfelszín hőmérséklete, hanem a teljes troposzféra hőmérsékleti profilja az, ami meghatározó. (Emanuel, K. A., 2005)



2. **ábra:** Világtenger vízfelszín hőmérséklete [K]

Forrás: ECMWF ERA Interim, napi felszíni adata.

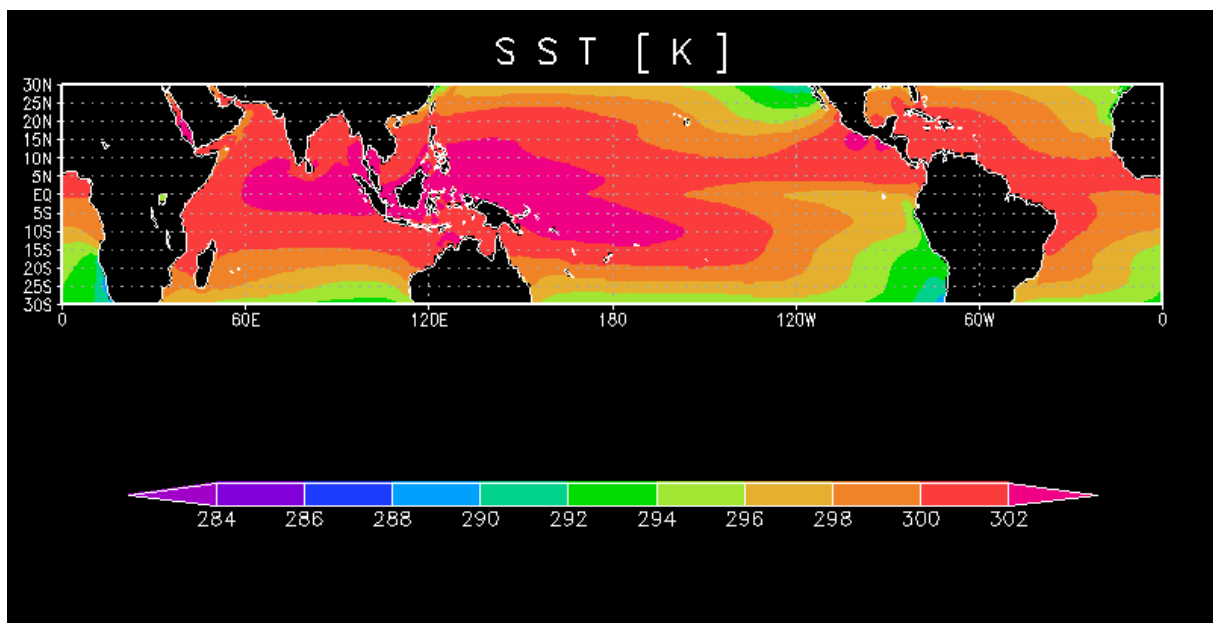
A térképen (1. ábra) az óceánok mellett a kontinensek is láthatóak. Feltehető a kérdés, hogy miért van kevesebb ciklonpálya a szárazföldi területek felett, mint az óceáni területek felett? A kérdésre egyszerű a válasz. A görbék egy - egy trópusi ciklon életútját mutatják be. Több olyan eset is van, ahol a képződmény az óceánt elhagyva szárazföldön folytatja tovább az útját, ahol energia-utánpótlása megszűnik. Természetesen vannak olyan esetek, ahol a görbék nem érintik a szárazföldet, ilyenkor a vihar-rendszer az óceán felett keletkezett, élt, és bomlott is fel. Olyan ciklonpálya azonban nem található, ahol a görbe kezdőpontja szárazföld felett van. Ennek oka kettős. Egyrészt, ahogyan már említettük, a trópusi ciklonok számára elengedhetetlen a meleg óceánnal való kapcsolat a kiinduló forró torony képződéséhez, másrészt a szárazföld feletti nagy sűrűlódás miatt, a nagy sebességű levegő gyorsan fékeződné, és sok energiát veszítene.

Azt is lehet mondani, hogy a szárazföld egyfajta fizika gát a kialakulás tekintetében. Az óceán feletti kezdőponttal és szárazföld feletti végponttal rendelkező pályát már viszonylag

sokat találunk. Ekkor a trópusi ciklon elszakad az őt tápláló óceántól, és mindeközben a megnövekedett súrlódás miatt több kinetikus energiát is veszít. Ilyenkor általában már Egyenlítőtől távolabbra is kerülnek a képződmények, ahol hidegebb vízfelszín fölött vannak, mindenképpen átalakulás vagy felbomlás vár rájuk. *(Ginis I., 2002)*

4. Trópusi ciklonok keletkezési folyamata

A trópusi ciklonok kialakulása a napból jövő nagy energiájú elektromágneses sugaraknak köszönhető. Természetesen ez az összefüggés közvetett módon értendő. A napsugarak a földi légkör legnagyobb energiaforrása. A felszíntől az ionoszféráig lejátszódó levegőkémiai illetve fizikai folyamatok 99,99 % - a, a nap által vezérelt. A maradék 0,01 % - ot a geotermikus energia teszi ki. (Bartholy J., at al., 2010) A napból jövő sugarak egész évben a trópusi és egyenlítői területeket éri a legnagyobb szögben. Ennek köszönhetően a direkt sugárzás értéke is nagyobb az Egyenlítőhöz közeli területeken. Éppen ezért igen jelentős felmelegedést biztosítanak az északi és déli félteke huszadik szélességi fokai közt. A trópusi ciklonok kialakulása szempontjából ideálisnak mondható, az északi és déli ötödik szélességi foktól a huszadik szélességi fokig terjedő zóna. A képeken látható, hogy milyen hőmérsékletbeli eltérések vannak az egyenlítőhöz közeli és a tőle távolabbi helyeken.

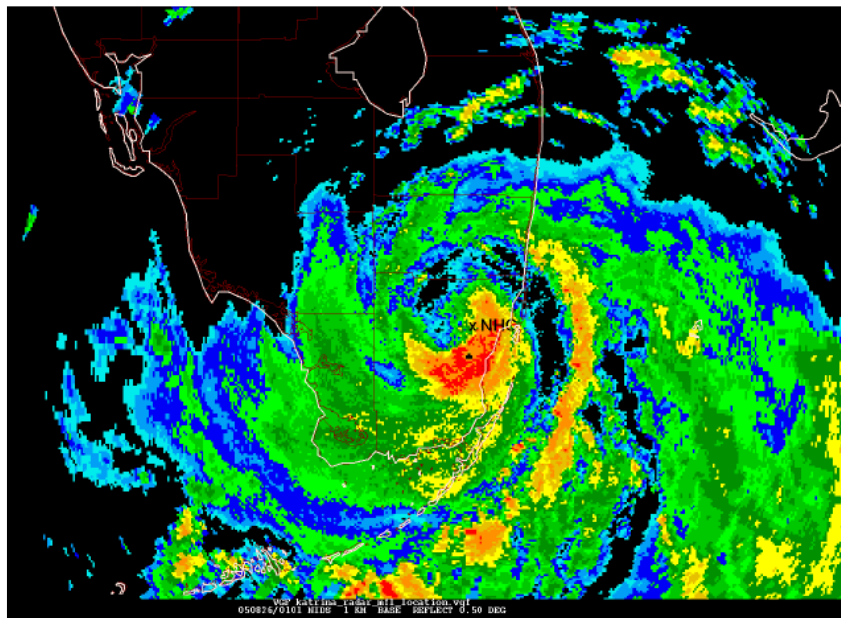


3. **ábra:** A Föld trópusi területeinek vízfelszín hőmérséklete [K]

Forrás: ECMWF ERA Interim, napi vízfelszín hőmérséklet adatai.

A trópusi ciklonok kialakulásához elengedhetetlen tényező, a megfelelően meleg óceáni vízfelszín, ezen a területen található meg. Az intenzív felmelegedésnek köszönhetően igen jelentős konvektív zónák alakulnak ki. A felmelegedés következtében termikek formájában hőáramok indulnak meg a talajról. A folyamatos termikképződés során igen labilis, jól átkevert alsó légkör jön létre, ahol a még mindig felfelé áramló levegőnek köszönhetően

Cumulus felhőzet jelenik meg. A feláramlás közben a légbuborékok tágulásra kényszerülnek, amiatt, hogy a légnyomás állandó kiegyenlítődségre törekszik. Ez esetben fontos megemlíteni, hogy a végbemenő tágulás adiabatikus folyamat, azaz hőcserementes. (Litz J., at al, 2003) A folyamatos feláramlás alacsony szinten tömeghiányt hoz létre, melynek pótlására levegő áramlik befelé. Ekkor a talaj közelében már alacsony légnyomású zóna található. Az alacsony nyomású központ felé áramló levegő igen telített. Mialatt a felfelé áramló levegő adiabatikusan tágul és eközben hűl, a konvergenciával beáramló és felemelkedésre kényszerített telített levegőben az emelkedés következtében a nedvesség kicsapódik. Ez a kicsapódás melegíti a levegőt, hiszen látens energia szabadul fel. (Czelnai R., at al.,1983) A látenshő felszabadulásával a felhőzet növekszik és a Cumulus felhőzet mellett már viharfelhők is megjelennek. Ezek a Cumulonimbus felhők. Ekkor a konvekció már nem csak az alsó rétegeket, hanem az egész troposzférát átfogja. Ezt nevezzük mély konvekciónak. A Cumulonimbus felhőzet megjelenése kapcsán, megemlíthető egy érdekesség. Ismeretes, hogy a Cumulonimbus felhőzetben igen gyakori a jégkristály képződés. Hazánkban gyakran mérhető 35 – 55 dBZ körüli érték, míg a 2005 – ben pusztító Katrina – hurrikán maximális reflektivitás értéke is ugyanezen tartományban volt. Laikusan az ember többet várna egy ilyen hatalmas légköri képződménytől, mint egy zivatartól. [5]



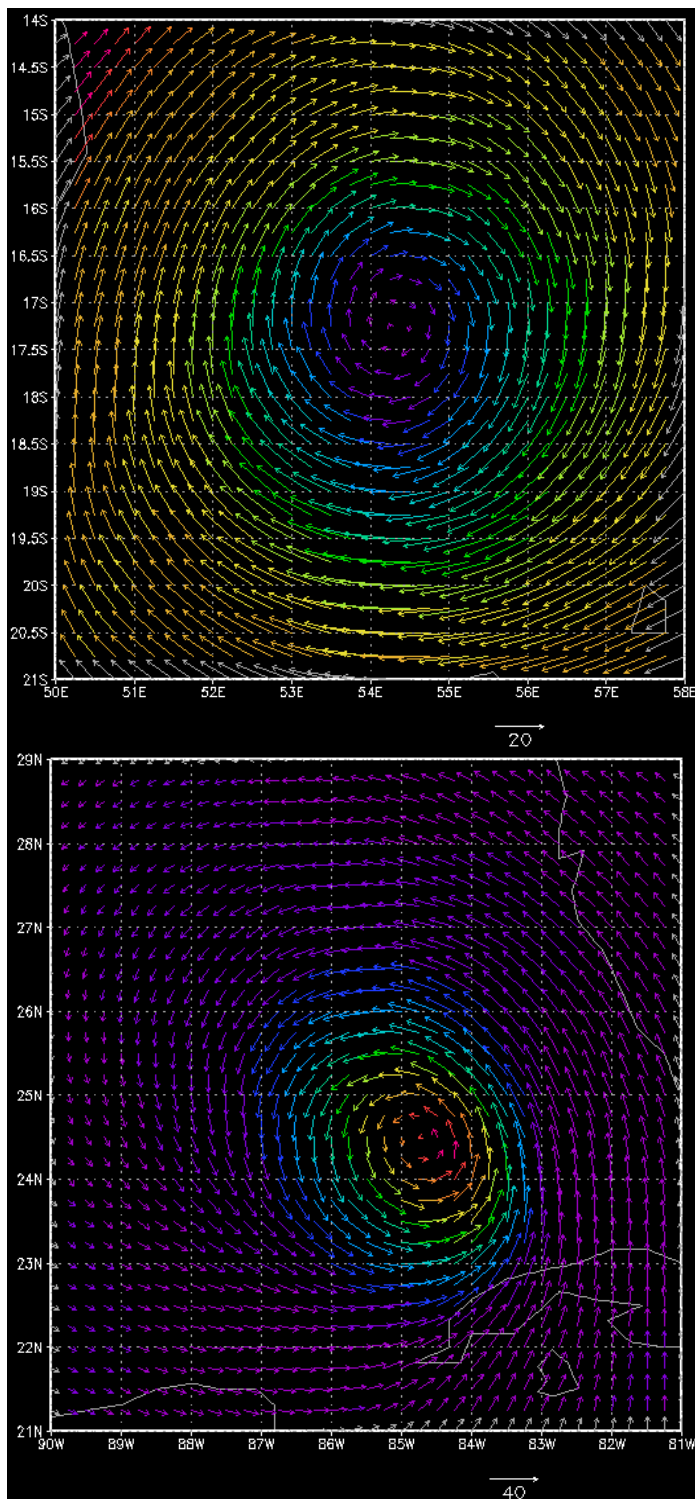
4. ábra: A Katrina hurrikánról készült radarkép, Miami környékén

Forrás: Knabb, Richard D., at al., 2005: Tropical Cyclone Report Hurricane Katrina

A Cumulonimbus felhőzet megjelenését követően a konvergencia továbbra is fenn áll és egyre erőteljesebb. A konvergencia távoli területek légrézecskeit gyűjti össze. A kezdetekben egymástól távol kialakult zivatargócok a konvergencia révén egyre közelebb és közelebb kerülnek egymáshoz. A folyamat végeztével kialakul az az alakzat, mely a későbbi trópusi ciklon központját fogja képezni. Ezt nevezik *hot towernek*, azaz forró toronynak. A forró torony kialakulása viszonylag gyakori jelenség, de nagyon „védtelen” képződmények ezek, hiszen ha a szélnyírás értéke az alsó és felső troposzféra között nagyobb, mint 7 m/s, akkor a torony könnyedén felbomlik. Ha a szélnyírás értéke ennél kisebb, akkor jó esély van rá, hogy a forró torony fennmaradjon és a későbbiekben beinduló rotáció hatására se bomoljon fel. Amikor a forró torony stabilan fenn áll, akkor kialakul a képződmény meleg magja, ami a ciklon életútja során végig megmarad és melegebb lesz a környezeténél. Amikor a forró torony kialakul, a felső troposzférában alacsony nyomású zóna keletkezik. Ez a zóna a forrótorony belsejében leáramlási fősávot fog létrehozni. Ennek következtében jön létre a kifejlett trópusi ciklonoknál a szem. A felső troposzférában az alacsony nyomásközpont „beszívást”, konvergenciát generál, melynek következtében körülötte magasnyomású gyűrű alakul ki. (Czelnai R., at al., 1983) A trópusi ciklon forgásának következtében a jól ismert, jellegzetes spirálkarok az előbb említett magas nyomású gyűrűhöz kapcsolódva alakulnak ki. A spirálkarok meglététől független az alsó troposzférikus konvergencia. Ennek a folyamatos beáramlásnak és feláramlásnak a kompenzációjára jött létre a spirálkarok mentén a leáramlás. Ez a lefelé irányuló légmozgás felhőmentes sávot hoz létre, ahol a levegő adiabatikus kompresszió megy keresztül. (Emanuel, K. A., 1991) Ennek következtében a légbuborékok egyre kisebb és kisebb térfogatot vesznek fel, és a légrézecskek hőmérséklete is fokozatosan nő. A légköri képződmény forgása közben a spirálkarok miatt, a trópusi ciklon vertikális metszetét tekintve látható, hogy a felhő sávot felhőmentes, majd újabb felhős sáv, és újabb felhőmentes sáv követi. Ezzel a trópusi ciklon kisebb cirkulációs cellákat is létrehoz az egész troposzférát felölelő nagy cirkuláció mellett. Ahogyan a ciklon magja egyre jobban kimélyül, azaz egyre inkább kisebb légnyomású zóna lesz a szerkezet közepén, annál jobban szívja magába a levegőt a határrétegből. A határréteg ez esetben az óceáni vízfelszín és a trópusi ciklon közt elhelyezkedő igen keskeny sáv. A megerősödött rendszerben a feláramlás is az örvényesség által irányított mozgás, azaz spirálisan felfelé csavarodva emelkedik a közel telített levegő. A spirális emelkedés a szemfalban történik. Itt található a legvastagabb felhőzet, és a trópusi ciklon legmelegebb és legnagyobb csapadékot adó zónája is. A kialakult trópusi ciklon élettartama és erőssége a felszíntől és annak

hőmérsékletétől függően változhat. (Elsner, James B., at al., 2008) Több, a trópusi ciklonok erősségét és élettartamát érintő kutatás készült az évek során, ahol például az Északnyugat - Csendes – óceáni képződmények és az ENSO jelenségkör kapcsolatáról is írnak. Ezek szerint, az El Nino években gyakoribb az előfordulása a Saffir – Simpson skálán mért 3 – 5 fokozatú tájfunoknak. Ezek élettartama is hosszabb. Illetve kevesebb olyan képződmény van, mely elérve a trópusi vihar fokozatot nem fejlődött tovább, mint amelyek tovább fejlődtek. Ezzel szemben La Nina időszakokban, kevesebb trópusi vihar éri el a tájfun fokozatot, és élettartamilag is elmaradnak az El Nino időszakban tapasztaltaktól. (Camargo, Suzana J., and Sobel, Adam H., 2004)

Ahogy már említettük a Földön mind az északi mind a déli féltekén keletkezhetnek és keletkeznek is trópusi ciklonok. Mindössze a nevezéktan és a műholdfelvételek alapján tehetünk köztük különbségeket. A nevezéktan elég összetett és nagy múltra visszatekintő hagyományokkal rendelkezik a világ legkülönbözőbb trópusi területein. Ennek megfelelően az Amerikai Egyesült Államokban a kifejlődött trópusi ciklonokat hurrikánoknak, míg Távolsági – Keleten tájfunoknak nevezik őket. Ez a két legjellegzetesebb és leginkább ismert elnevezése a trópusi ciklonoknak, de tudni kell, hogy Indiában, Hawaii-on és Ausztráliában, hogy csak néhányat említsek, más és más az elnevezés. A műholdfelvételek alapján az Északi és Déli félteke ciklonjai között érdekes eltérést találhatunk. Míg az Északi féltekén a spirál karok az óra mutató járásával megegyező irányban, jobbra forognak, addig a Déli féltekén ezzel ellentétes irányban, azaz balra forognak. E lényeges és szembeötlő különbséget a Coriolis – erő okozza. Amíg az Egyenlítőtől északra a Coriolis – erő jobbra, addig az Egyenlítőtől délre a Coriolis – erő balra téríti el a horizontálisan mozgó légréseket. A nevezéktan és a vizuális tekintetben vett fenti különbségtől eltekintve teljesen mindegy, hogy a képződmény északi vagy déli féltekén keletkezett, mert a kifejlődési folyamatuk, a szerkezetük és legfőbb tulajdonságaik tökéletesen megegyeznek. Az 5. ábra egy északi és egy déli féltekén kialakult képződmény szélmezejét mutatja be. Ebből látható a Coriolis – erőből származó eltérülés.



5. **ábra:** A kétféle forgásirány, az első déli, a második az északi féltekei példát mutatja.

Forrás: ECMWF ERA Interim, nyomás szintű adatai.

energiával a rendszert. Az instabilitás és a konvekció a megfelelő zivatargócok kialakulását, míg a gyenge szélnyírás az ezekből a zivatargócokból felépülő forrótoronyok kialakulását segíti elő. Az örvényesség a képződmény bepörgetéséért felel.

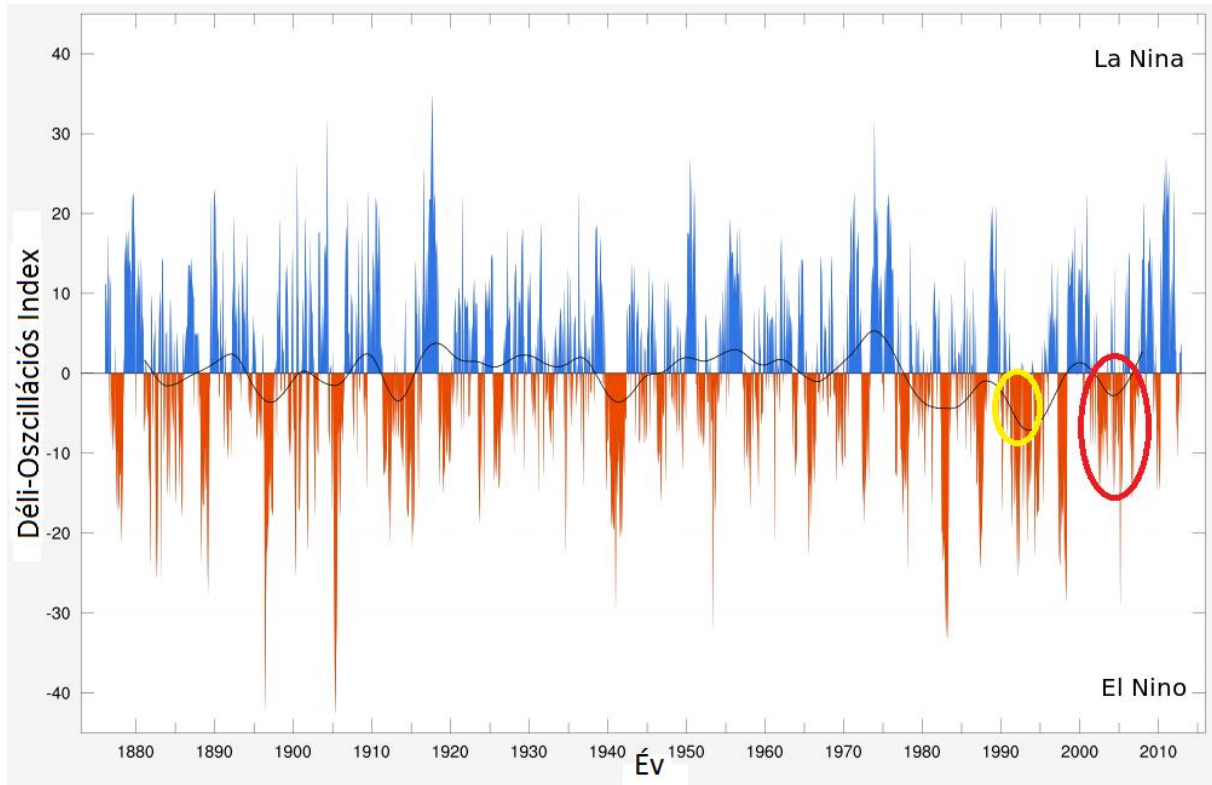
A képen a 2012-ben a déli féltekén, Madagaszkár szigetén pusztító Giovanna trópusi ciklonról készült pillanatfelvétel látható. A szélvektorok az óramutató járásával megegyező irányba mutatnak, azaz a Déli féltekének megfelelően ciklonális forgású léghöri képződményt jeleznek. A Giovanna áramlási rendszere tipikus déli féltekei. A második kép a Katrina – hurrikánt mutatja, melyen az előző képpel ellentétben, a szélvektorok óramutató járásával ellentétes irányba mutatnak. Mivel a Katrina az Északi féltekén pusztított, ez ismét ciklonális forgásra utal.

A saját vonatkoztatási rendszerükben mindkét vihar ciklonális forgású. Ezzel szemben egymással összehasonlítva őket, mindkettő a másikkal anticiklonális, azaz ellentétes forgású példája.

Összegezve a trópusi ciklonok kialakulásának feltételeit, azt mondhatjuk, hogy a megfelelően magas óceáni vízfelszín alapvető fontosságú, hiszen ez táplálja

5. Katrina – hurrikán ismertetése

A 2005 – ös év igen intenzív volt az Észak - Atlanti – óceán térségében trópusi ciklonok megjelenése szempontjából. (6.ábra) Ez nem meglepő, hiszen El Nino időszakban intenzívebb a trópusi ciklon aktivitás, mint egyéb neutrális vagy éppen La Nina időszakokban.

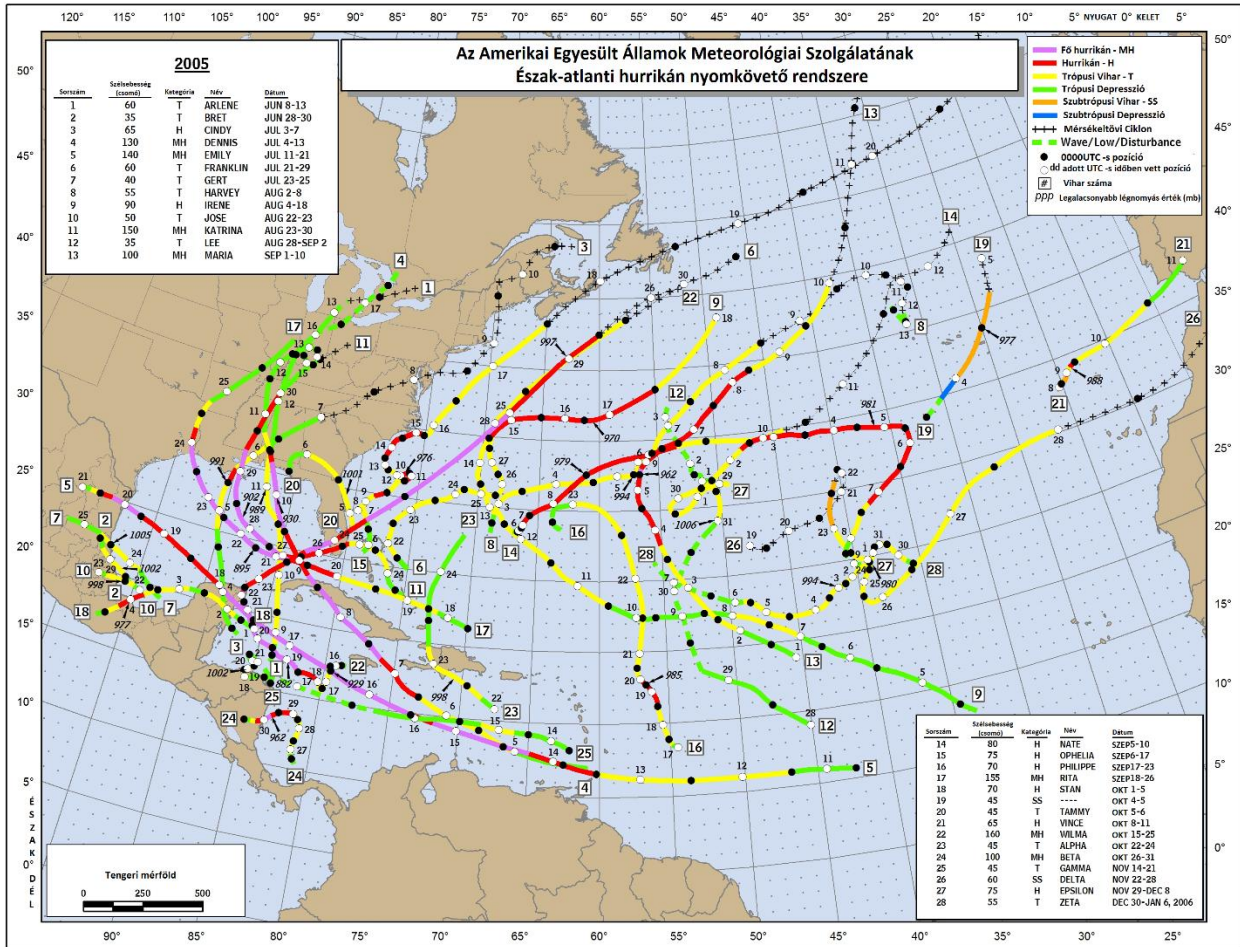


6. **ábra:** El Nino és La Nina időszakok a déli-oszcillációs index alapján.

Forrás: http://en.wikipedia.org/wiki/El_Ni%C3%B1o_Southern_Oscillation#/media/File:Soi.svg, [6]

Az ábrán látható az ENSO jelenségkör, azaz a déli-oszcillációs rendszer, két különböző fázisa: az El Nino és a La Nina időszakok. A statisztikák szerint, minél alacsonyabb az index értéke, annál inkább számíthatunk 1-2 nagyobb, erősebb, az adott időszakot meghatározó trópusi vihar jelenlétére. (Camargo, Suzana J., and Sobel, Adam H., 2004) A 6. ábrán piros körrel jelöltem azt az időszakot, amikor a *Katrina* – hurrikán és zölddel, amikor az *Andrew* – hurrikán fejlődött ki és pusztított.

A 7. ábra bemutatja, hogy a 2005 – ös EL Nino esztendőben, milyen sok és milyen erősséget képviselő viharrendszerek alakultak ki az Atlanti – óceán északi térségében.

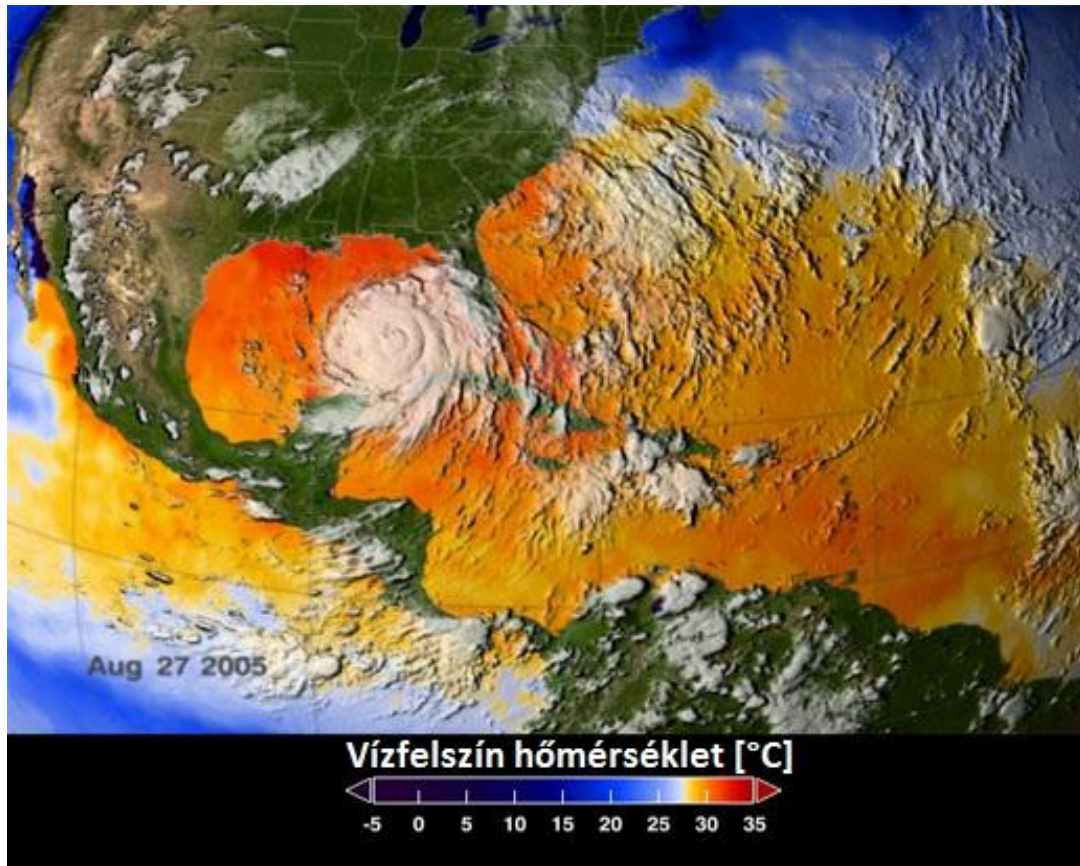


7. ábra: Észak – Atlanti – óceánon 2005 – ben kialakult trópusi ciklonok útvonalai

Forrás: National Hurricane Center, adatbázisának képe, [7]

A térképen ábrázolt viharok közt találkozhatunk: hurrikánokkal, trópusi viharokkal, trópusi depressziókkal, szubtrópusi viharokkal, szubtrópusi depresszióval és extratrópusi viharrendszerekkel is. Összesen huszonnyolc vihar alakult ki 2005 június nyolcadika (az első vihar megjelenésének napja) és december harmincadika (az év utolsó viharának megjelenési napja) között. Ezek közül a légtörési képződmények közül is kiemelkedett, a Katrina – hurrikán. A vihar augusztus 23.-án 18 UTC – kor, 1008 hPa – os légnyomás központtal, trópusi depresszióként jelent meg a műholdfelvételeken. Nem több, mint tizenkét órával később már trópusi viharoként, 1006 hPa – os központi nyomással jelezte, hogy minden fizikai feltétel teljesült ahhoz, hogy igen erős hurrikán legyen. Így is történt. Kereken harminchat órával később, azaz augusztus 26.-án 00 UTC – kor, 983 hPa – os központi nyomással elérte a hurrikán fokozatot. Ekkor maximális szélsőségek értéke körülbelül 65 csomó volt. (1 csomó=0,514

m/s) Ekkor hatalmas magas szintű kiáramlási "anticiklonja" volt a hurrikánnak, ami a Mexikói – öböl kijáratát teljes mértékben felhőzettel borította be. (8. ábra)



8. **ábra:** Katrina – hurrikán felhőzete és az óceán vízfelszín hőmérséklete (°C).

Forrás: [8]

A szemfalban lévő szélsébség augusztus 27.-ére elérte a 100 csomós értéket. Ez idő alatt a vihar Kuba nyugati részét heves esőzésekkel és nagy szelekkel sújtotta. Amitől mindenki tartott augusztus 28.-án 00UTC-tól 12 UTC-re be is következett. A Katrina tovább erősödött és hármas fokozatú hurrikánból ötös fokozatú hurrikán lett. (Knabb, Richard D., at al., 2005) A Saffir – Simpson féle hurrikán skálán ez a legnagyobb és legpusztítóbb fokozat, amit az Egyesült Államok partjai közelében elhelyezkedő trópusi ciklon elérhet. Ekkor a viharnek már 145 csomós szélsébség értéke volt. Ezzel még nem fejeződött be a hurrikán erősödése, a maximális szélsébséget 18 UTC - kor érte el. Ekkor a hurrikán szemfalában 150 csomós szélsébséget lehetett mérni. Ezzel egyidejűleg a trópusi ciklon központi nyomása 902 hPa – ra süllyed, ami életútja során felvett legalacsonyabb érték volt. A part elérésére augusztus 29.-én 1110UTC – kor került sor, amikor 923 hPa – os központi nyomása és 110 csomós

szélsősége volt a hurrikánnak. Amikor elérte a partot az ötös fokozatú hurrikánból már gyengébb, hármas fokozatú hurrikán lett. A partot érés két amerikai állam határán, a Pearl River nevű kisváros mentén történt. A Katrina – hurrikán 150 csomós csúcs intenzitását követően 18 órával, már az előbb említett hármas fokozatnak megfelelő 110 csomóra gyengült. A gyors gyengülés kapcsolatba hozható azzal, hogy a partot érés miatt a ciklon elszakadt az energiaforrástól és ennek következtében szerkezete megváltozott. A belső szerkezet változása az addig jól működő mély konvekciót gátolta, s így a külső szerkezet szétrobbanásához vezetett. Ezt szétterülés és szélsőségek csökkenés követte. Ez nem egyedi jelenség, hiszen az energia utánpótlástól való elszakadást követően minden trópusi ciklon hasonlóképpen viselkedne. A hurrikán augusztus 30.-át követően már oly mértékben veszített az erejéből, hogy teljesen felbomlott. Az energia leszállódása következtében hidegfront alakult ki, mely északra haladt tovább a Nagy – tavak vidéke felé. A hurrikán detektálása és felbomlása közt eltelt idő alatt közel 108 milliárd USA \$ kárt okozott. Az Amerikai Egyesült Államok történelmében, ez volt a legnagyobb kárt okozó hurrikán. A következő ábra szemlélteti a Katrina – hurrikán életútjának hat órás időlépcsővel vett felbontását, ahol a vihar szemének koordinátái mellett, nyomási és szélsőségek értékeit láthatjuk. (9. ábra)

Katrina – hurrikán szeméhez rögzített GPS koordináták:

Dátum/Idő (UTC)	Szélesség (°N)	Hosszúság (°W)	Nyomás (mb)	Szélesség (kt)	Típus
23 / 1800	23.1	75.1	1008	30	Trópusi depresszió
24 / 0000	23.4	75.7	1007	30	"
24 / 0600	23.8	76.2	1007	30	"
24 / 1200	24.5	76.5	1006	35	Trópusi vihar
24 / 1800	25.4	76.9	1003	40	"
25 / 0000	26.0	77.7	1000	45	"
25 / 0600	26.1	78.4	997	50	"
25 / 1200	26.2	79.0	994	55	"
25 / 1800	26.2	79.6	988	60	"
26 / 0000	25.9	80.3	983	70	Hurrikán
26 / 0600	25.4	81.3	987	65	"
26 / 1200	25.1	82.0	979	75	"
26 / 1800	24.9	82.6	968	85	"
27 / 0000	24.6	83.3	959	90	"
27 / 0600	24.4	84.0	950	95	"
27 / 1200	24.4	84.7	942	100	"
27 / 1800	24.5	85.3	948	100	"
28 / 0000	24.8	85.9	941	100	"
28 / 0600	25.2	86.7	930	125	"
28 / 1200	25.7	87.7	909	145	"
28 / 1800	26.3	88.6	902	150	"
29 / 0000	27.2	89.2	905	140	"
29 / 0600	28.2	89.6	913	125	"
29 / 1200	29.5	89.6	923	110	"
29 / 1800	31.1	89.6	948	80	"
30 / 0000	32.6	89.1	961	50	Trópusi vihar
30 / 0600	34.1	88.6	978	40	"
30 / 1200	35.6	88.0	985	30	Trópusi Depresszió
30 / 1800	37.0	87.0	990	30	"
31 / 0000	38.6	85.3	994	30	Mérsékeltövi Ciklon
31 / 0600	40.1	82.9	996	25	"
31 / 1200					Hidegfront

9. **ábra:** A Katrina – hurrikán szeméhez rögzített GPS koordináták, illetve szélesség és légnyomás értékek.

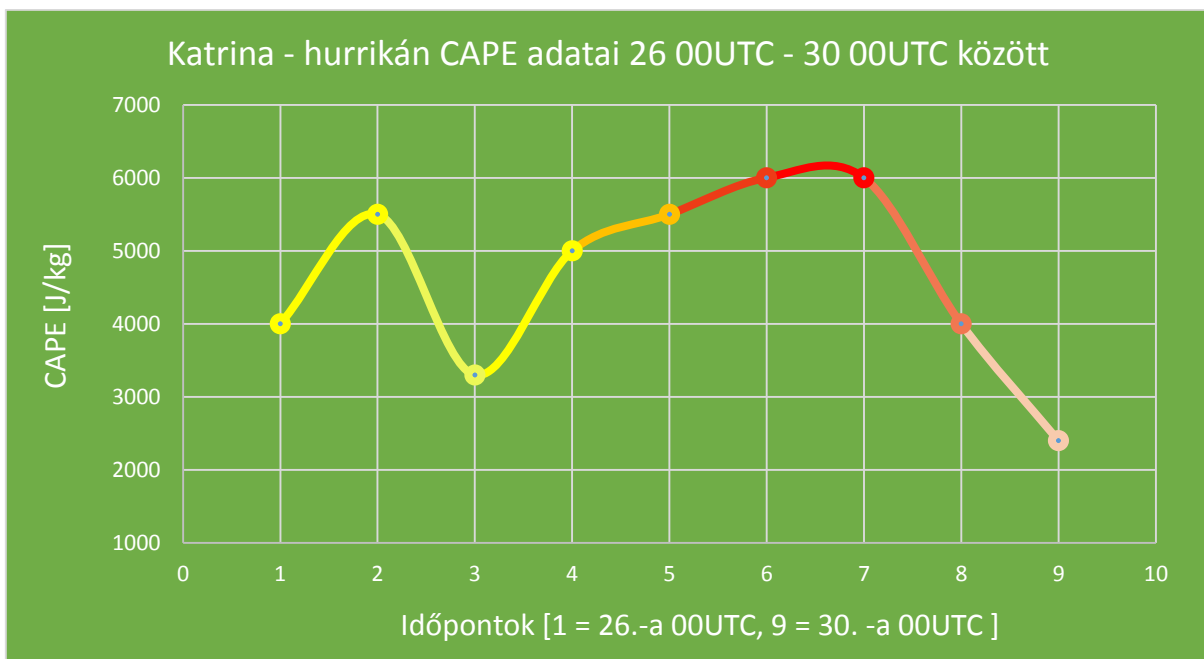
Forrás: [9]

A GPS koordináták és a hozzá fűződő nyomási és szélesség értékek kapcsán érdekes lehet megvizsgálni, hogy ezen időpontokban mekkora volt a Katrina – hurrikán Konvektív Hasznosítható Potenciális Energiája.

Konvektív hasznosítható Potenciális Energia:

A konvektív hasznosítható potenciális energia az emagrammról olvasható le a legegyszerűbben. A ballonos felszállásokat emagrammon ábrázolva kialakul az energia felszabadulást jelző pozitív terület. A pozitív terület a szabad konvekciós szint (LFC) és a kiegyenlítődési szint (EL) között található. Ennek a területnek a nagyságát a konvekcióban résztvevő, emelkedő légrézecske hőmérséklete és a közvetlen környezetét jellemző hőmérséklet különbsége határozza meg. Minél nagyobb a különbség, annál nagyobb a pozitív terület. A pozitív terület nagysága megadja számunkra az adott körülmények közt felszabaduló energiát. Ez a **Convective Available Potential Energy, (CAPE)**, azaz a konvektív hasznosítható potenciális energia.

A CAPE – et mutatja be a következő grafikon.

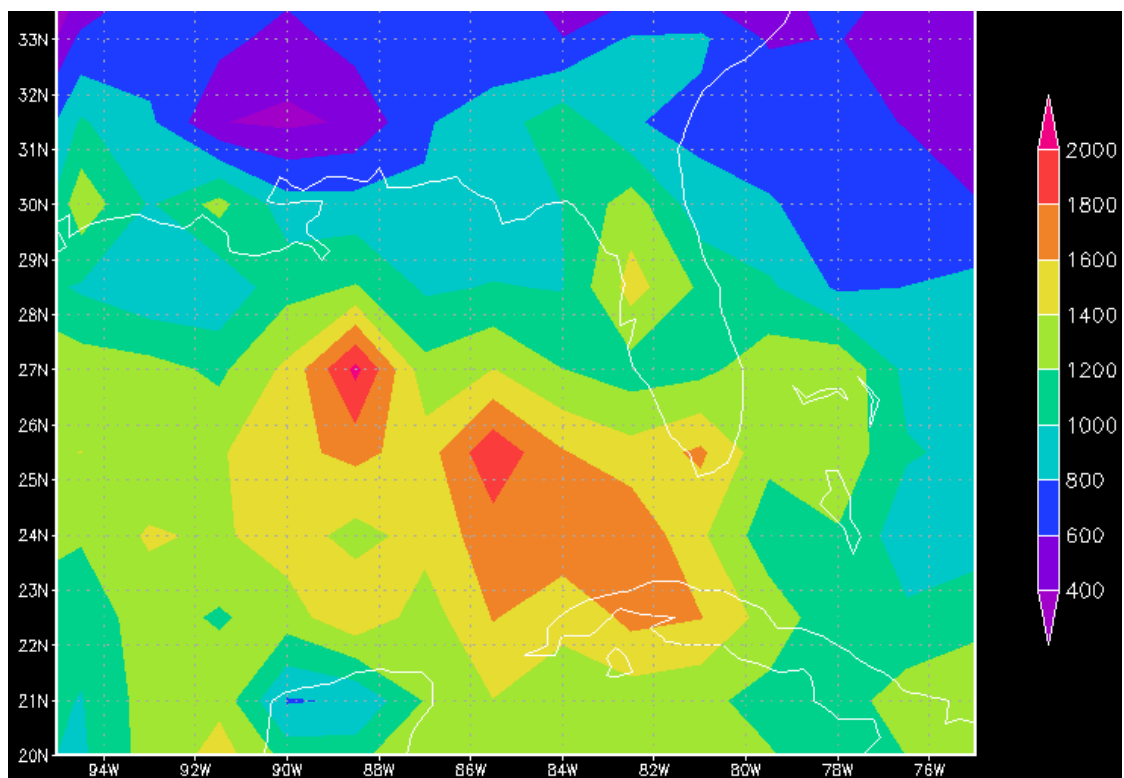


10. **ábra:** A Katrina – hurrikán legerősebb fokozatainak CAPE adatai.

Forrás: ECMWF ERA Interim, napi adatai. [10]

A grafikonon tizenkét órás időlépcsővel vett konvektív hasznosítható potenciális energia értékek láthatóak. A szín változása érzékelteti, hogy hogyan változott a hurrikán Saffir – Simpson skálabeli fokozata a vizsgált időintervallumban. Az első időlépcsőben hármas fokozatú volt, majd az idő előrehaladtával négyes és később ötös fokozatú hurrikán lett. Az értékek fokozatos emelkedése a megfelelően magas óceáni vízfelszín hőmérsékletnek, míg az

első időlépcsőkben tapasztalható hirtelen energia csökkenés majd emelkedés a Floridai – félszigetnek köszönhető. Amikor a hurrikán érintette Miami városát elszakadt az óceántól, így az energia utánpótlástól, és rövid időn belül láthatóvá is vált ennek hatása. A vihar szemszögéből nézve szerencse, hogy a Floridai – félsziget egy keskeny kontinens nyelv, így csak néhány órára volt hatással a trópusi ciklon energia viszonyaira. A félszigetet elhagyva először az azt megelőző energia szintet érte el, majd gyorsan erősödve, négyes később ötös fokozatúvá erősödött. Ezt érzékelteti a görbe színének fokozatos mélyülése. (A harmadik és hetedik időlépcsők közt.)

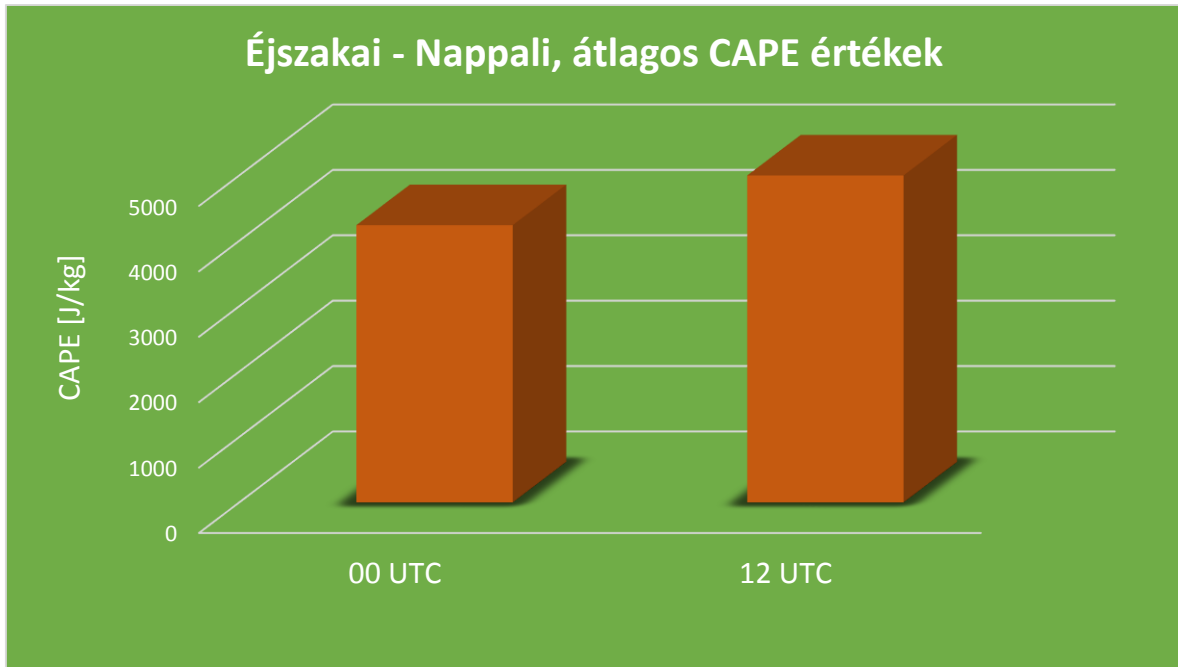


11. **ábra:** A Katrina augusztus 24.-étől augusztus 30.-áig, 12 UTC-kor vett átlagos CAPE értékei.
[J/kg]

Forrás: ECMWF ERA Interim, napi adatai. [10]

A 11. ábrán látható, hogy a legnagyobb átlagos CAPE érték helye megegyezik azzal a hurrikán pozícióval, amikor ötös fokozatú volt. Érdekes összehasonlítani az éjszakai és a nappali átlagos CAPE értékeket is. Természetesen nem számíthatunk nagy csodára ettől az oszlopdiagramtól, hiszen várhatóan a nappali érték lesz a nagyobb. A napból jövő nagy energiát képviselő sugárzás miatt számíthatunk a nagyobb értékekre. Az viszont érdekes, hogy a nappali átlagos és az éjszakai átlagos értékek közt csekély eltérés van. Ebből arra lehet

következtetni, hogy habár nagyon sok komponens szerencsés együttállása szükséges ahhoz, hogy létrejöhessen egy trópusi ciklon, de ha már létrejött és megerősödött kvázi ön fenntarthatónak tekinthető. Azért kvázi az ön fenntarthatósága, mert a megfelelően magas óceáni vízfelszíntől nem lehet függetlenné tenni a rendszert.



12. **ábra:** A Katrina augusztus 24.-étől augusztus 30.-áig, 00 UTC – kor és 12 UTC-kor vett átlagos CAPE értékeinek összehasonlítása.

Forrás: ECMWF ERA Interim, napi adatai. [10]

6.Katrina – hurrikán energiasűrűsége

Az energiák számításához a jól ismert energiasűrűségre vonatkozó képleteket használtam. (*Rákóczi F., Götz G., 1981*)

Kinetikus energiasűrűség:

$$E_k = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (1)$$

Belső vagy termikus energiasűrűség:

$$E_T = \rho C_v T \quad (2)$$

Potenciális vagy helyzeti energiasűrűség:

$$E_P = \rho g z \quad (3)$$

A (1) – es egyenletben szereplő „v” [ms⁻¹] a szélsébséget, a (2) – es egyenletben a „C_v” [kJkg⁻¹K⁻¹] az állandó térfogaton vett fajhőt, míg a (3) – as egyenletben szereplő „g” [ms⁻²] a nehézségi gyorsulást és a „z” [m] a felszíntől vett távolságot jelenti. Az állandó térfogaton vett fajhő értéke 0,718 kJ kg⁻¹K⁻¹ és a nehézségi gyorsulás értéke 9,81 ms⁻¹. Ezekkel az értékekkel végeztem a számításokat.

A Katrina – hurrikán energiafajtaát a hurrikán teljes élettartamára hat órás lépésközzel tíz különböző nyomási szinten határoztuk meg az (1), (2), (3) – as egyenletek segítségével.

Kinetikus energiasűrűség

A számításokat a hurrikán teljes élettartamára tíz nyomási szintre, 1000 hPa –tól 100 hPa – ig 100 hPa – os lépésközzel végeztük el. Az így kapott adatok a következő táblázatban láthatóak.

1.táblázat: Katrina – hurrikán kinetikus energiasűrűség szintenkénti értékei.

	1000 hPa	900 hPa	800 hPa	700 hPa	600 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa	200 hPa	100 hPa
23. 18UTC	200,06	309,18	276,36	264,66	252,46	266,59	289,48	400,44	754,58	226,24
24. 00UTC	218,95	356,78	328,80	294,26	294,94	278,99	220,38	225,95	665,86	144,73
24. 06UTC	301,72	507,96	440,61	393,84	375,12	342,83	296,72	349,73	636,26	149,15
24. 12UTC	254,47	446,95	412,23	390,24	350,24	298,73	265,02	392,02	542,68	203,77
24. 18UTC	289,97	502,26	471,36	417,27	401,03	415,87	352,14	403,68	694,81	204,15
25. 00UTC	244,34	393,68	395,75	385,24	364,90	351,30	336,42	333,82	599,11	212,67
25. 06UTC	393,38	726,38	763,53	716,48	726,05	697,81	503,40	522,64	646,00	223,44
25. 12UTC	280,57	518,67	529,27	571,32	614,75	571,53	504,68	341,52	572,52	267,27
25. 18UTC	424,67	958,50	941,94	895,99	914,76	814,69	733,48	536,81	875,51	188,81
26. 00UTC	392,14	840,79	859,80	889,43	927,41	909,46	754,30	644,13	1072,49	277,92
26. 06UTC	405,94	887,20	770,30	713,04	817,63	829,71	793,29	691,67	1081,86	298,54
26. 12UTC	349,75	824,39	784,41	785,06	803,64	752,72	742,95	613,17	939,31	282,33
26. 18UTC	424,13	946,93	992,15	964,30	1014,16	943,18	881,39	560,13	1111,95	244,84
27. 00UTC	421,43	990,21	938,34	855,60	846,87	855,28	750,25	668,77	1009,91	223,00
27. 06UTC	558,28	1346,37	1216,33	1136,83	1197,04	1212,34	1008,45	741,27	900,63	267,21
27. 12UTC	820,41	1924,18	1592,75	1429,21	1305,79	1293,24	1220,34	993,53	0,00	346,95
27. 18UTC	1141,67	2689,11	2354,33	2065,67	1867,35	1823,41	1704,97	1356,99	0,00	521,23
28. 00UTC	766,64	2030,75	1884,68	1838,20	1761,47	1703,81	1550,25	1278,45	926,78	347,17
28. 06UTC	912,14	2534,24	2560,67	2492,96	2394,92	2336,70	2110,65	1763,21	0,00	462,80
28. 12UTC	1151,18	3091,37	2880,78	2639,62	2377,34	1813,69	2001,78	1872,14	0,00	581,79
28. 18UTC	947,52	2606,90	2654,12	2660,35	2442,16	2190,05	1768,77	1689,92	1300,63	555,49
29. 00UTC	977,87	2902,45	2632,86	2591,50	2640,58	2479,59	2322,98	2106,70	1442,02	543,44
29. 06UTC	1044,41	3484,64	3937,38	3730,60	3435,92	2913,74	2443,79	2212,38	1511,14	689,76
29. 12UTC	1397,65	3756,52	3765,06	3472,02	2988,12	2692,89	2538,78	2514,74	0,00	779,43
29. 18UTC	1030,32	2780,20	3048,22	2995,71	2873,05	2561,38	2563,55	2569,09	1712,51	853,08
30. 00UTC	741,33	2710,60	2837,73	2665,42	2569,38	2315,43	2393,40	2575,47	4467,28	543,85
30. 06UTC	648,89	2401,44	2679,50	2481,47	2118,48	2086,58	2216,92	2343,72	2679,12	699,48
30. 12UTC	523,37	1765,06	2076,00	1988,55	1866,34	1852,88	1998,46	1969,78	2372,80	529,78
30. 18UTC	307,80	1197,78	1495,60	670,79	1452,70	604,94	1893,38	1882,25	2258,90	420,68

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

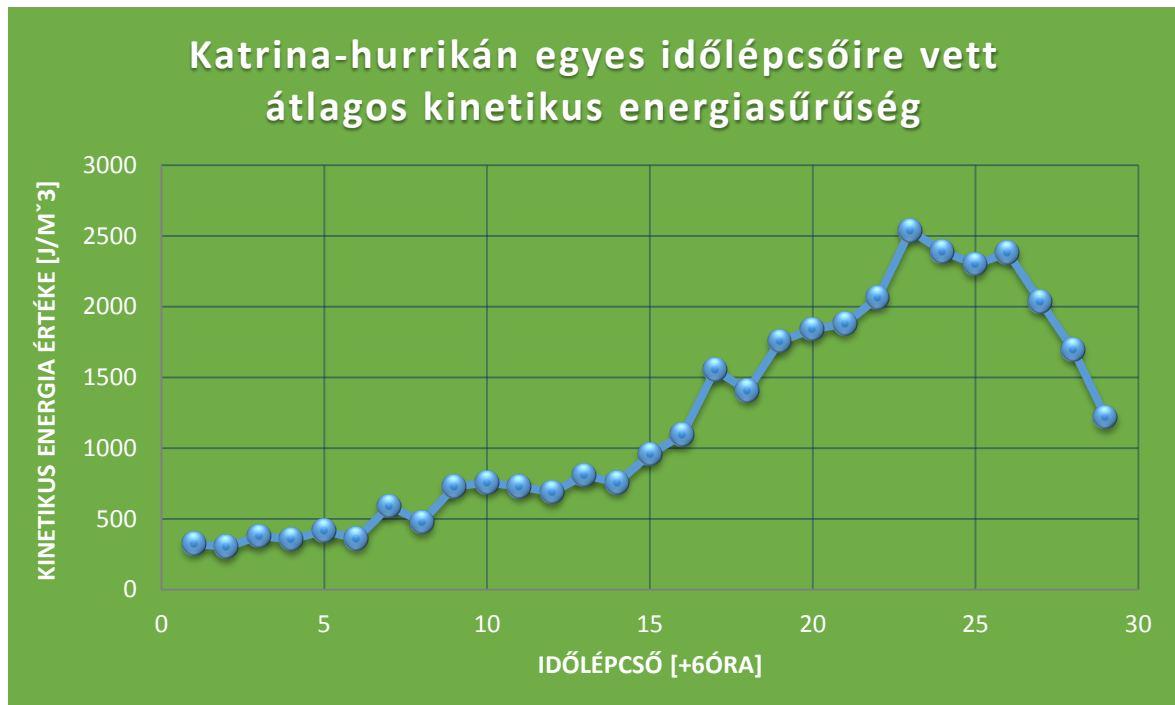
A számítás menete a következő volt: Az ECMWF, (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) által készített nyomásszintekre vonatkozó, napi adatait használtuk. Az adatok 0,75*0,75 fokos rácsfelbontásúak. A kinetikus energiasűrűséghez értelem szerűen az adott nyomási szinthez tartozó geopotenciál, hőmérsékleti és szélesség adatokat használtuk. Először kiválasztottuk a hurrikán által lefedett legnagyobb területet, majd a széladatokat szerint csökkentettük. Figyelembe kívántuk venni ugyanis, hogy a hurrikán területe

és térfogata is időben változik. A szélesebbesség értékeit a hurrikán teljes területén a 900 hPa – os nyomási szinten mért maximális szélesebbesség értékkel vetettük össze. (Azért ennek a nyomási szintnek a maximális értékével, mert itt voltak a legnagyobb szélesebbesség értékek.) Ezután kinetikus energia becslésénél csak azokat a széladatokat vettem figyelembe, amelyek elérték a 900 hPa – os nyomási szinten mért maximális sebesség negyven százalékát. Ez azt jelenti, hogy ha a 900 hPa – os nyomási szint maximális szélesebbessége 10 ms^{-1} , akkor a küszöbérték 4 ms^{-1} . A példának megfelelően a 200 hPa – os nyomási szint öt időpontban nem érte el ezt a negyven százalékos küszöbszintet. Így ezekben az esetekben nullás értékeket tüntettem fel az adatok között. A megmaradó szélesebbesség értékekkel kijelölt területen, területi átlagot, majd az (1) egyenlet alapján kinetikus energiasűrűséget képeztem. Ezt elvégeztem minden egyes időpontra és, minden egyes vizsgált nyomási szintre. A térfogati sűrűség meghatározásához figyelembe kellett venni az egyes rácspontokhoz tartozó cella méretének változását. Horizontálisan a rácspontokhoz tartozó terület állandó volt, de a cellák magassága a nyomási koordináta-rendszer miatt különböző lehetett. Ezért a mérési adatokat a cellamagassággal súlyoztam. Az adott nyomási szint magasságát, az adott nyomási szintet közrefogó két másik nyomási szint geopotenciál értékei segítségével határoztam meg. A nyomási szinthez tartozó geopotenciál értékeket 9,81 –el elosztva, a nyomási szint méterben kifejezett magasságát kaptam meg.

Az adattábla tetején látható a nyomási szintek oszlopit jelző értékek (1000 hPa, 900 hPa,...,100 hPa), míg a legelső oszlop, a 2005. év, augusztusi napjainak időpontjait jelzi UTC – ben. Az adatok között található nullás értékeket. Ez azért van, mert az adott nyomási szinten az adott időpontokban nem haladta meg a küszöbértéket a szélesebbesség nagysága. A küszöbérték a már említett negyven százalékos szűrő. Erre a szűrésre azért volt szükség, hogy a hurrikánt el lehessen különíteni a közvetlen környezetétől. Ezzel is elősegítve, hogy a trópusi ciklon valós méreteivel és értékeivel végezzük a számításokat. Az adatok mértékegysége a kinetikus energia térfogati sűrűség képletének dimenzióanalízise alapján igazán könnyedén levezethető:

$$\left[\frac{1}{2} \rho v^2 \right] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right]$$

Az adatokat végignézve látható, hogy az idő előrehaladtával egyre nagyobb és nagyobb, majd az utolsó szakaszban pedig gyorsan csökkenő energia értékeket kaptunk. A következő ábrán az egyes időpontok átlagos kinetikus energia sűrűsége látható.



13. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

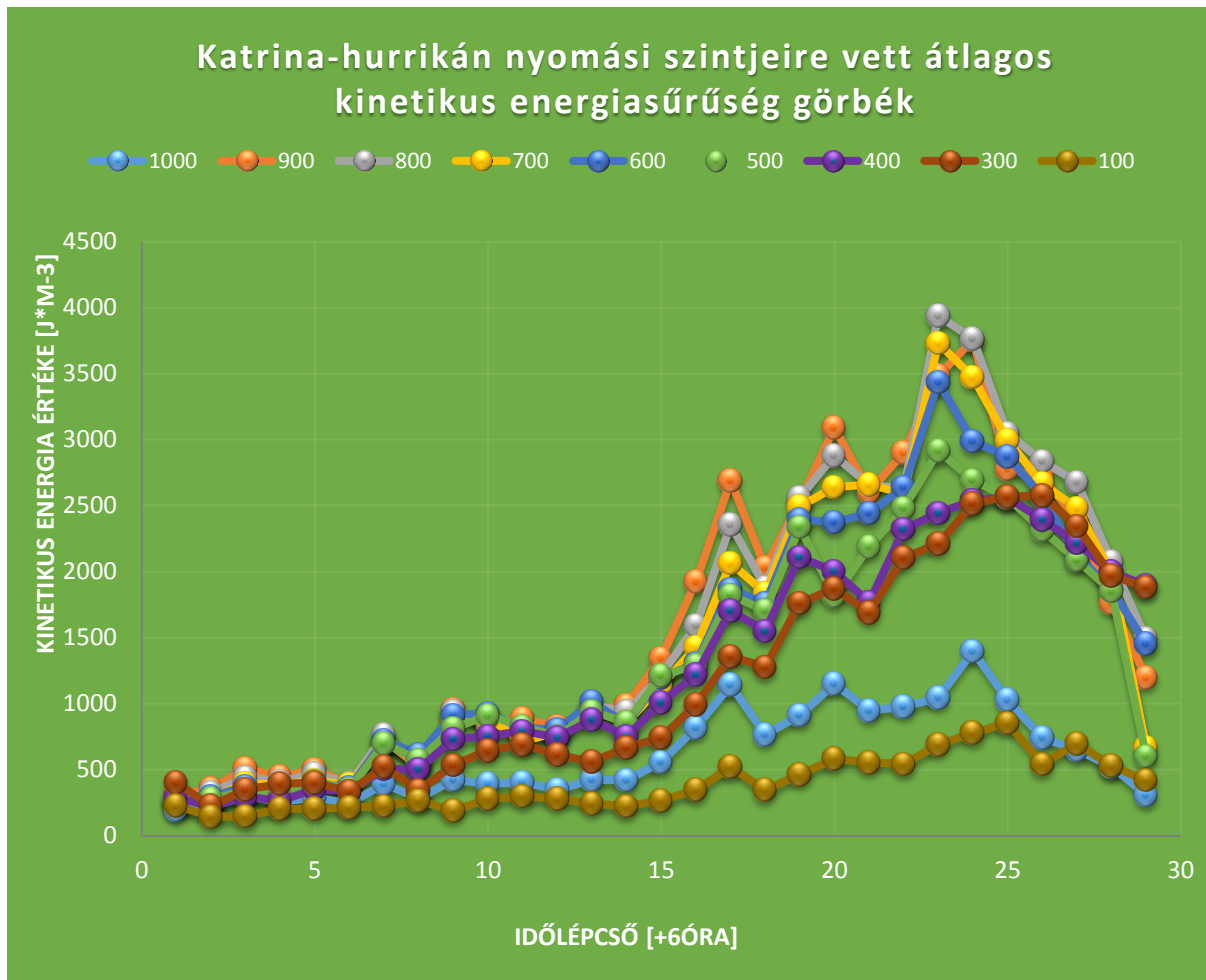
Az első időlépcső: 2005.08.23. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2005.08.30. 18 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai. [10]

A diagramról leolvasható, hogy a hurrikán életútja során folyamatosan erősödött, egészen addig a pontig, ahol már elszakadt az energiát adó óceáni vízfelszíntől. Ez volt az a pont, ahol az energiagörbe intenzíven és határozottan csökkenni kezd. A légköri képződmény ezt a tendencia változást még trópusi ciklonként kezdte meg, de rövid időn belül trópusi viharként, majd trópusi depresszióként folytatta az útját. A görbe menetén belül több kisebb-nagyobb hirtelen kiugrás, változás látható. Az első ilyen, a hetedik időlépcsőben van, ez volt az a pillanat, amikor a ciklon a Bahama – szigetek fölé ért. (Knabb, Richard D., at al., 2005) A második ilyen kiugró pont a görbén, hatvan órával később, azaz a tizenhetedik időlépcsőben látható. Ekkor a hurrikán a Floridai – félszigetet érintette. A következő és egyben utolsó kimagasló pontja a görbének, kijelöli a hurrikán legerősebb pillanatát. Ekkor volt a Katrina ötös fokozatú hurrikán. Ezt követően partot ért, és energiája rohamosan csökkenni kezdett.

Ehhez hasonló tendenciájú grafikont mutat a következő ábra is, ahol minden nyomási szint, teljes időintervallumra vett energia görbéi láthatók. (A 200 hPa – os görbe kivétel, mert intenzíven fluktuál, határozott menettel nem rendelkezik.)



14. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása az egyes nyomási szinteken vizsgált időtartam során.

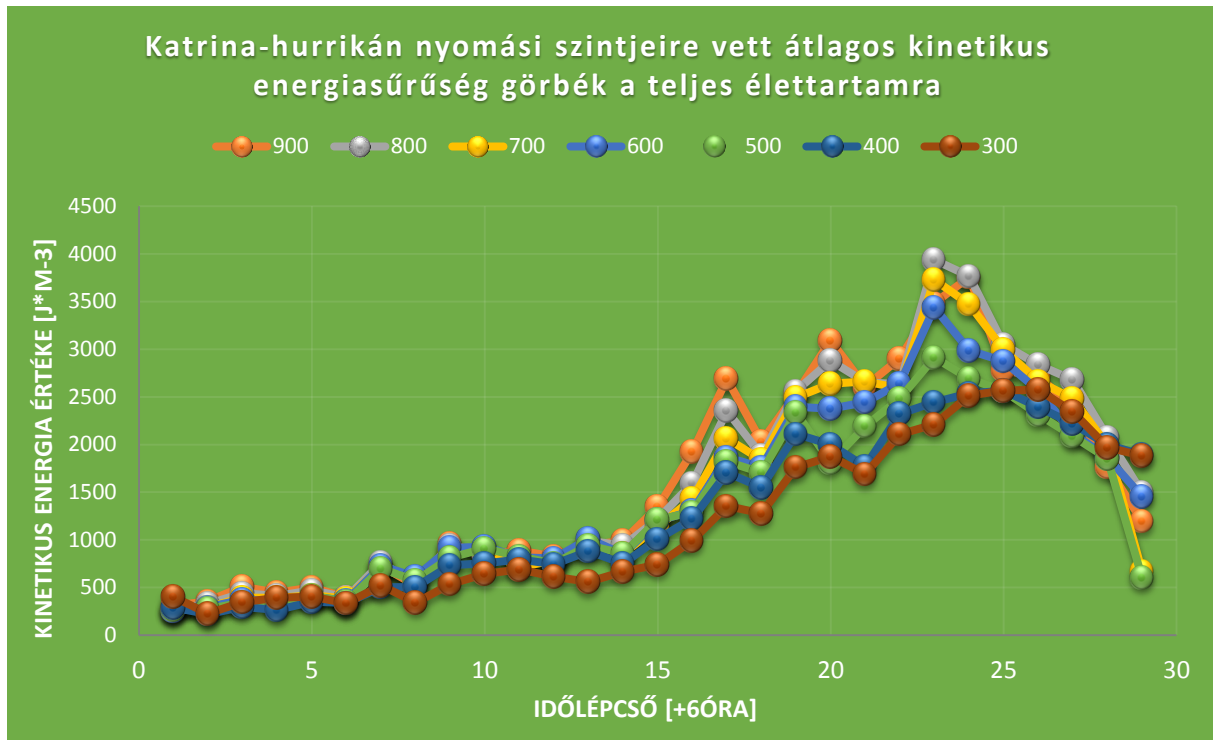
Az első időlépcső: 2005.08.23. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2005.08.30. 18 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai. [10]

A nyomási szintenként ábrázolt görbék esetében látható, hogy minden szint más mértékben járul hozzá a teljes kinetikus energiához. A görbesereget azonban egyértelműen két csoportra oszthatjuk. Az egyik a „határ” csoport, mely az 1000 és 100 hPa – os nyomási szinteket tartalmazza, míg a másik, a „belső” csoport az összes többi nyomási szintet tartalmazza. A csoportok elnevezése abból fakad, hogy a nyugalmi légkörben hogyan

helyezkednének el a nyomási szintek. A két csoportot vizuálisan igen könnyen elkülöníthetjük egymástól. A következő két grafikon ezeket mutatja be külön – külön.



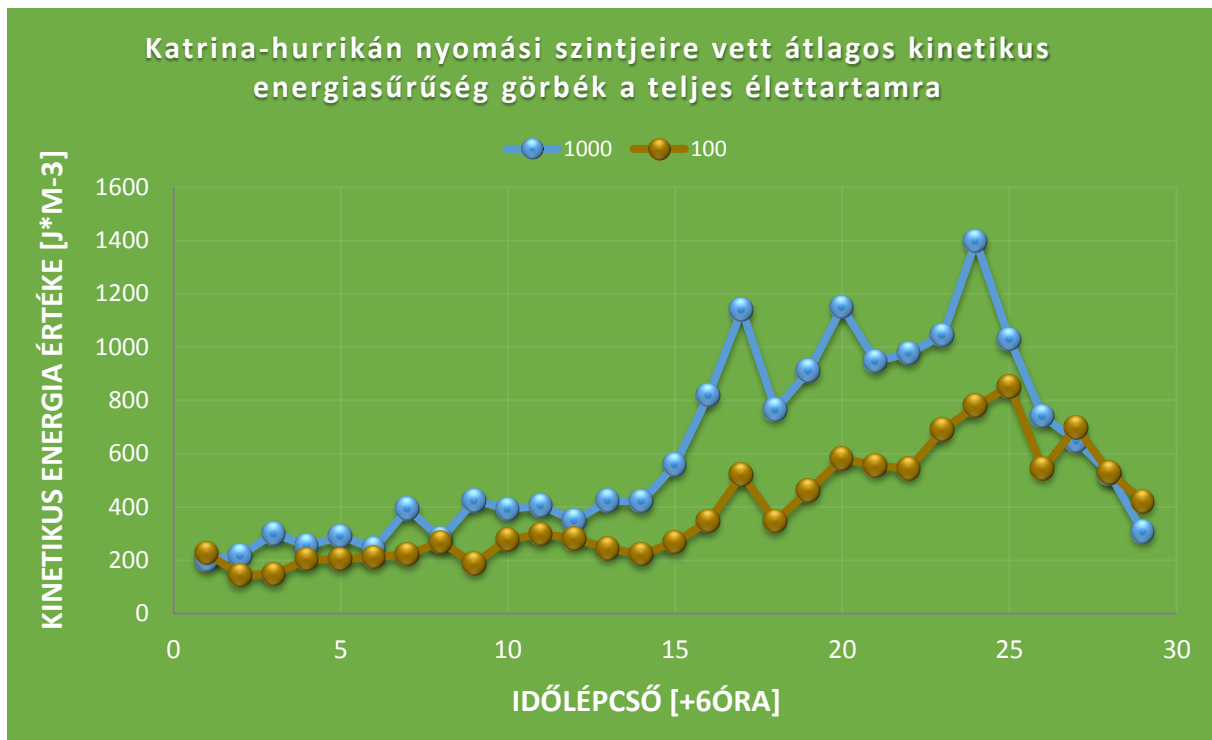
15. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a 900 hPa, 800 hPa, ... ,300 hPa – os nyomási szinteken a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2005.08.23. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2005.08.30. 18 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai. [10]

Látható a grafikonon, hogy minden görbe menete megegyezik. Ezen kívül azt is észrevehetjük, hogy minél magasabban helyezkedik el egy nyomási szint, annál lassabban „reagál” a hurrikánt érő hatásokra. A 300 hPa – os nyomási szint esetében látható, hogy a többi görbéhez hasonlóan növekszik és csökken is, de minden ilyen változás lassabban, késleltetve és a magasságból kifolyólag kisebb mértékben is következik be. Ezzel szemben azok a görbék, melyek a talajhoz közelebb vannak, sokkal gyorsabban, intenzívebben reagálnak a képződményt érő külső hatásokra. (Külső hatásokon a tengervíz felszíni hőmérsékletének és a felszín érdességének a változása értendő.) Mindezek mellett megemlíthető, ami már a 13. ábránál is látható volt, azaz a hetedik és a tizenhetedik időlépcsőbeli hirtelen tendencia változás. Ezen kívül látható még, hogy a görbeseregéből kimagaslanak a 900 és 800, helyenként a 700 és 600 hPa – os nyomási szintek értékei.



16. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása az 1000 hPa és 100 hPa – os nyomási szinteken a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2005.08.23. 18 UTC

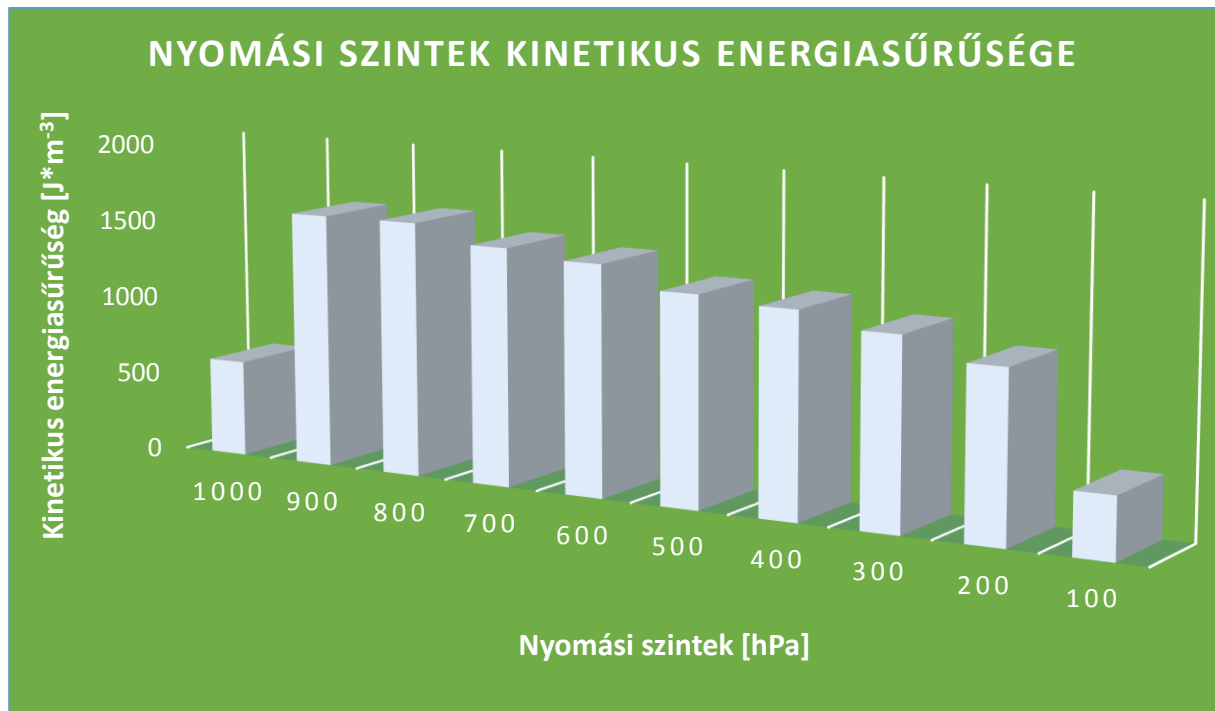
Utolsó időlépcső: 2005.08.30. 18 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai. [10]

Azok a nyomási szintek, melyek a felszínhez közelebb helyezkednek el, nagyobb energiaértékeket képviselnek, mint a felszíntől távolabbi nyomási szintek. Tendenciájukban hasonlóak a görbék, kivéve a 1000 és 100 hPa – os nyomási szintek. (4. ábra) Ennek oka az lehet, hogy az (1) egyenletben szereplő sűrűség értéke a nagy magasságokban igen csekély, így bármilyen nagy is lehet a szélesség, a kis értékű sűrűség, kompenzálja ezt. Az 1000 hPa tekintetében pedig, hozzávetőleges, kvázi, fiktív energia tendenciát figyelhetünk meg, hiszen a hurrikánnak hosszú időn át nem is volt tényleges 1000 hPa – os nyomási felülete. Gondoljunk csak a maximális kimélyülésre. Ekkor 902 hPa – os nyomási központja volt a hurrikánnak. Éppen ezért azt mondhatjuk, hogy az 1000 hPa adatai származtatott értékek.

A 17. ábrán nem az időbeli változás, hanem az adott nyomási szintre vett átlagos kinetikus energiasűrűség nagysága figyelhető meg. A 14. ábránál definiált két csoport, itt a 17. ábránál a legszembevetőbb. Egyértelmű, hogy a határon lévő nyomási szintek és a belső

nyomási szintek másként viselkednek. Óriási eltérések tapasztalhatóak az egyes nyomási szintek között.



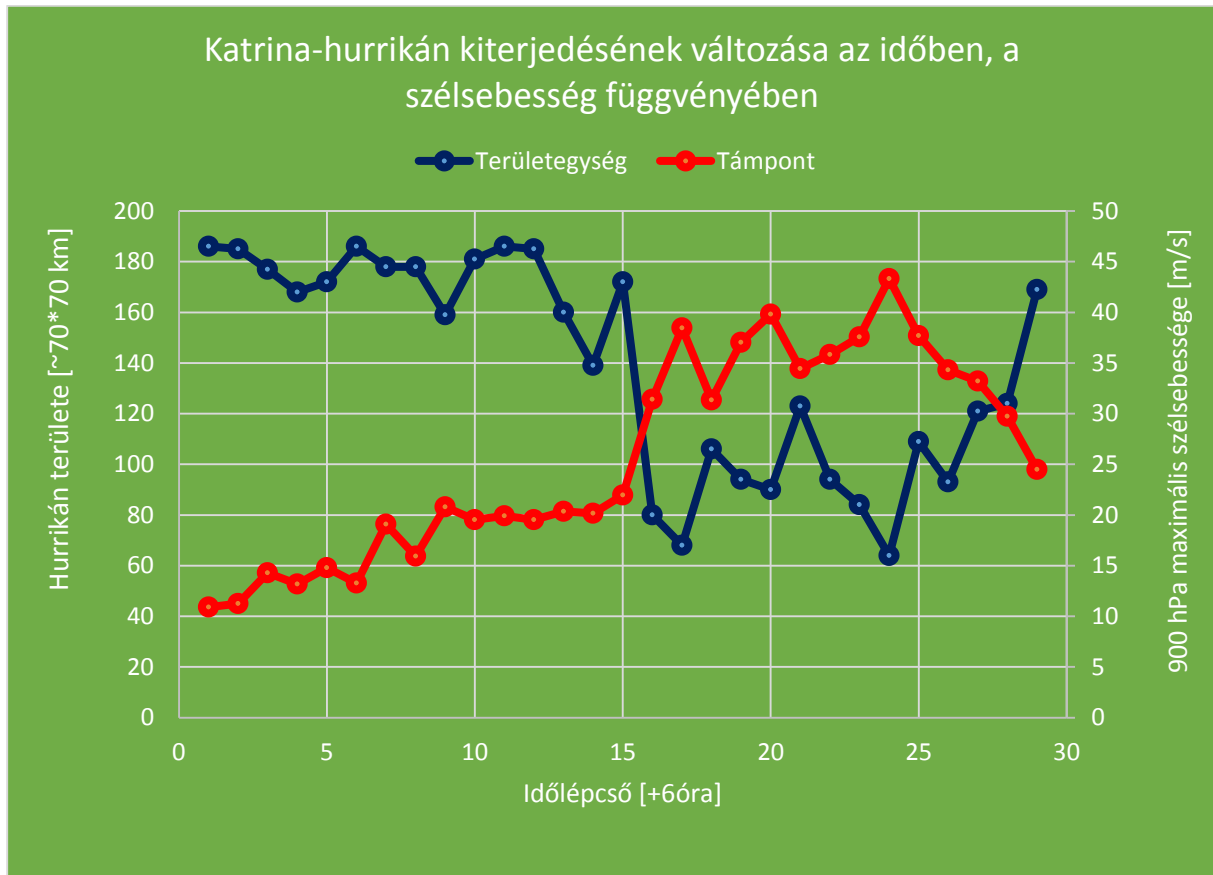
17. **ábra:** Teljes hurrikán élettartamára vett átlagos, szintenkénti kinetikus energiasűrűség.

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai. [10]

Látható, hogy az 1000 és a 100 hPa – os nyomási szintek értékei eltörpülnek a belső nyomási szintek értékei mellett. Érdekes, hogy a belső nyomási szintek energiái közt nem sok különbség tapasztalható. A teljes időszakra nézve, a 800 hPa – os nyomási szint átlagos kinetikus energia sűrűsége a legnagyobb. A 900 hPa – os nyomási szint értéke is igen magas, de néhány Jm^{-3} – el elmarad a 800 hPa – os nyomási szint értékétől.

Még érdekesebb jelenséget mutat a 18. ábra. A grafikonon két görbe látható, a kék a bal oldali „y” tengely skála szerint a hurrikán adott időpillanathoz tartozó legnagyobb kiterjedését mutatja, a 70 km * 70 km – es területegységek darabszámával az idő függvényében. Ez az adott pillanathoz tartozó maximális kiterjedés nem nyomási szinthez kötött. Az első tizennégy időlépcsőben a 100 hPa – os nyomási szint, majd felváltva a 800, 900, 800, 900 hPa – os nyomási szintek és végül az utolsó négy időlépcsőben a 100 és 200 hPa – os nyomási szintek kiterjedése szerepel a grafikonon. A piros görbe a jobb oldali „y” tengely skála szerint, a 900 hPa – on mért maximális szélsősebesség értéket mutatja az idő függvényében. A

grafikkal összevethető a ciklon méretének és szélességének változása a teljes életút során.



18. ábra: Kiterjedés és szélesség kapcsolata

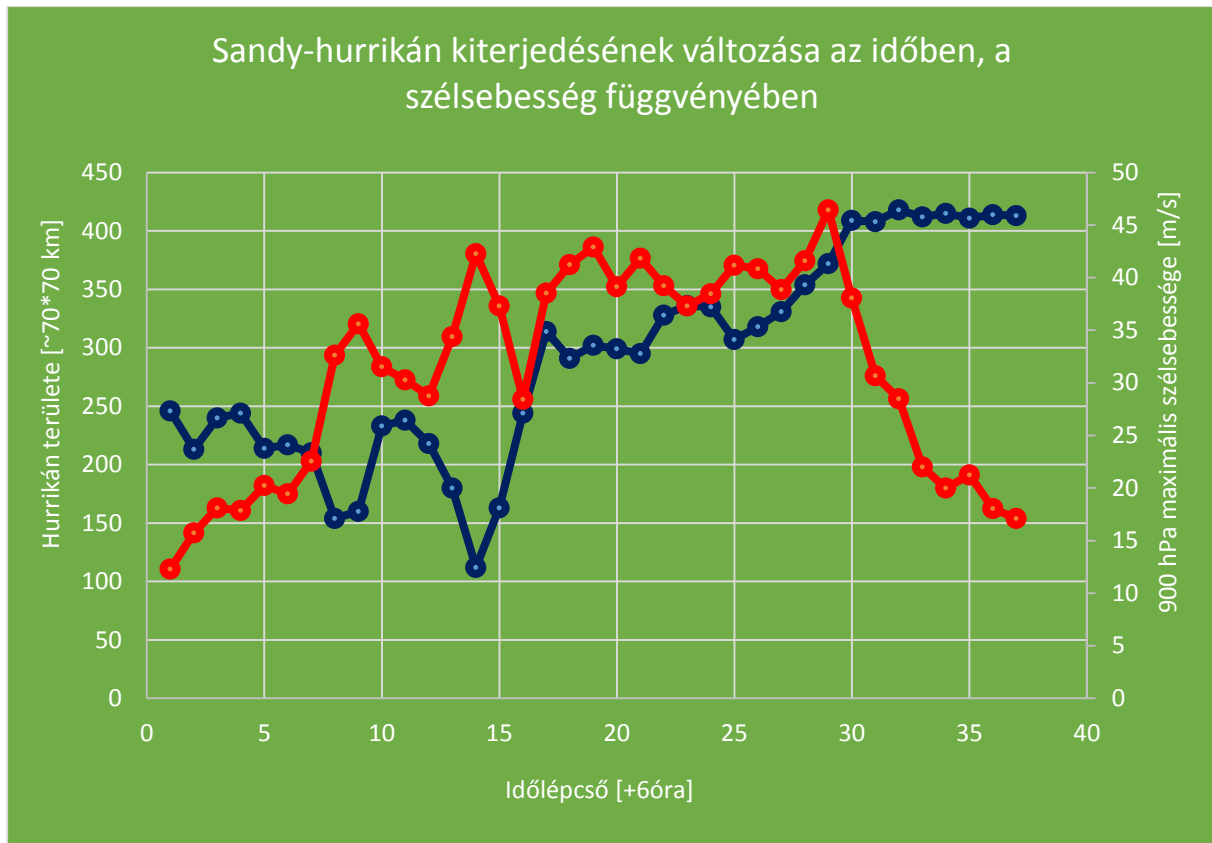
Az első időlépcső: 2005.08.23. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2005.08.30. 18 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai. [10]

Leolvasható a grafikonról, hogy a hurrikán kiterjedése és a 900 hPa – os nyomási szint legnagyobb szélessége ellentétesen viselkedik. Ez azt jelenti, hogy amikor a szélesség növekedett, akkor a hurrikán kiterjedése csökkent, és fordítva. Jó közelítéssel azt mondhatjuk, hogy a görbék „tökéletes” tükörképei egymásnak. A két görbe menete az impulzusmomentum közel állandóságára utal a ciklon időbeli fejlődése során. (A jelenség hasonló a műkorcsolyások piruett gyakorlatához. Amikor a kiterjesztett karral forgó korcsolyázó karjait behúzza, majd testközelben felemeli, akkor gyorsabban kezd pörögni.) Ahogyan csökkent a Katrina – hurrikán kiterjedése úgy nőtt a szélessége. Mivel a Katrina – hurrikán klasszikus értelemben vett tökéletes trópusi ciklon, ezt a jelenséget előre megjósolhattuk. Ezzel szemben a Sandy –

hurrikán, mely szintén tökéletes trópusi ciklonként kezdte meg életútját, néhány időlépcsőt követően viszont konverzió ment át, és a trópusi ciklonból mérsékeltövívé vált, meleg magú ciklonból hideg magú ciklonná alakult. Ekkor változott a Sandy szerkezete és aszimmetrikussá és így kiterjedtebbé vált. Ezen tulajdonságai miatt érdekesnek láttuk a Sandy – hurrikánra vonatkozóan is elkészíteni a Katrina – hurrikánra vonatkozó 18. ábrának megfelelő ábrát. (19. ábra)



19. **ábra:** Sandy – hurrikán kiterjedésének és szélesebbességének kapcsolata.

Az első időlépcső: 2012.10.22. 06 UTC

Utolsó időlépcső: 2012.10.29. 2330 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai. [10]

A 19. ábra grafikon - felépítése ugyanaz, mint a 18. ábráé. Látható, hogy a Sandy a tizenhatodik időlépcsőig tökéletes trópusi ciklonként viselkedett és jellegében hasonlít a Katrina – hurrikán grafikonjára is. Ezt követően viszont, elegendően nagy távolságra került a trópusi területektől, hogy már „extratropical cyclone” –ként folytassa az útját, és végbemenjen az előbb már említett konverzió. Látható, hogy a tizenhatodik időlépcsőt követően az addigi fordított arányú kapcsolat a kiterjedés és szélesebbesség közt megszakad. Ezt

követően a teljes felbomlást megelőző fázisban kapjuk vissza ezt a fordított arányú kapcsolatot. A kiterjedése folyamatosan növekszik, miközben a szélsőbesség értéke a tizenkilencedik és huszonhetedik időlépcsők közt, ha nem is nagymértékű, de folyamatosan csökkenő tendenciát mutat.

Potenciális energiasűrűség

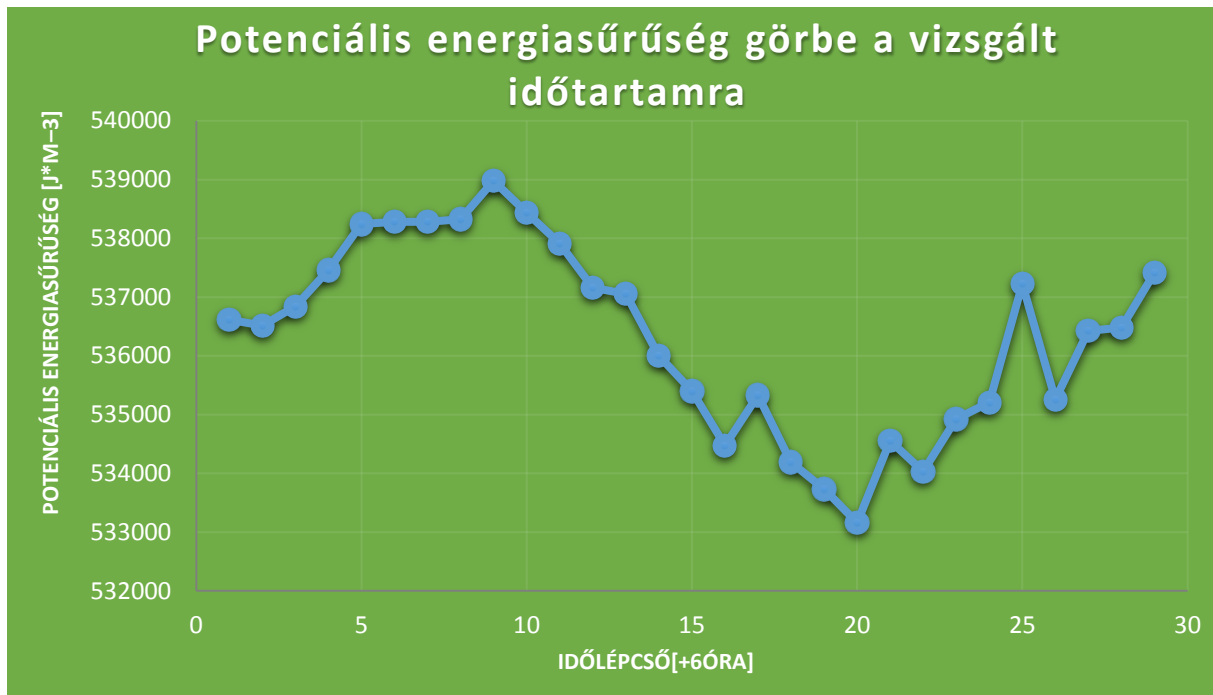
2.táblázat: Katrina – hurrikán potenciális energiasűrűség szintenkénti értékei.

	1000 hPa	900 hPa	800 hPa	700 hPa	600 hPa	500 hPa	400 hPa	300 hPa	200 hPa	100 hPa
23. 18UTC	7632,5	105259,8	207110,8	319707,2	447861,9	594489,6	770403,4	993302,6	1332840,1	587550,3
24. 00UTC	7203,5	104570,4	206351,2	319067,0	447453,7	594153,7	770626,6	993856,6	1332704,1	589165,1
24. 06UTC	7353,8	104679,6	206523,8	319210,2	447693,3	594472,6	771163,7	994768,9	1333101,0	589447,0
24. 12UTC	7540,2	104783,6	206521,9	319266,7	447906,5	594591,6	771350,3	994811,4	1332385,5	595451,8
24. 18UTC	7833,8	105546,4	207590,9	320371,2	448760,8	595943,5	772280,3	995856,3	1333234,4	595020,3
25. 00UTC	7842,9	105461,3	207449,0	320334,1	448935,4	596038,9	772622,9	995943,0	1332984,9	595191,9
25. 06UTC	8027,8	105665,5	207634,8	320583,8	449064,7	596507,6	772832,6	997005,8	1332080,5	593393,4
25. 12UTC	7986,4	105415,5	207237,6	320282,1	448910,0	596043,6	772672,7	996224,2	1331592,0	596911,2
25. 18UTC	7864,4	105735,5	207714,1	320910,7	449174,3	596594,9	773628,5	997121,7	1333074,2	597994,9
26. 00UTC	7011,0	104582,8	206625,7	319820,9	448410,5	595661,4	772492,8	996946,0	1333323,5	599508,4
26. 06UTC	6662,6	103977,5	206141,1	319206,8	447912,1	595341,4	771970,4	996361,9	1331300,5	600216,5
26. 12UTC	6214,9	103234,1	205211,0	318204,2	446900,7	594229,4	771108,6	995910,3	1330489,7	600082,2
26. 18UTC	5753,0	103012,2	205077,8	318053,6	446496,0	593810,6	771289,1	996052,6	1328450,8	602567,0
27. 00UTC	4851,7	101584,1	203703,1	316736,1	445222,3	592270,2	769549,5	994327,9	1329084,1	602712,9
27. 06UTC	4656,5	101337,3	203535,4	316372,8	444875,6	592017,9	769161,1	992759,7	1329933,3	599364,7
27. 12UTC	2973,3	99036,1	201348,2	314455,4	443283,7	591040,2	768565,9	992924,2	1328444,1	602679,8
27. 18UTC	3155,0	99324,9	201633,3	315012,0	443678,7	591578,1	769417,6	994077,0	1328310,9	607124,5
28. 00UTC	2160,5	97798,4	200174,6	313435,3	442425,0	590032,1	767821,2	992801,9	1325649,7	609619,8
28. 06UTC	2000,1	97569,3	200039,7	313217,2	442143,9	590302,9	767317,1	992545,6	1326902,6	605264,1
28. 12UTC	1573,6	96711,5	199044,6	312518,2	441464,9	589469,6	766650,0	992107,6	1325937,1	606122,1
28. 18UTC	1974,9	97494,3	199933,9	313367,0	442135,2	590465,8	768003,2	994410,4	1325175,5	612613,5
29. 00UTC	1564,4	96779,3	199279,9	312661,3	441861,4	589569,6	767493,7	993878,3	1323944,0	613279,9
29. 06UTC	2211,2	97751,3	200089,9	313539,2	442318,3	590368,1	768974,8	994600,5	1327470,2	611919,1
29. 12UTC	2710,1	98519,9	200993,0	314529,9	443216,0	590707,0	768826,9	994507,6	1327337,5	610741,8
29. 18UTC	3871,6	100606,0	203220,9	316116,4	444845,5	592548,7	770548,0	996467,3	1326858,6	617161,1
30. 00UTC	3535,1	98860,5	200667,0	312977,0	440759,4	587399,5	765778,3	993419,4	1329041,3	620139,2
30. 06UTC	3873,0	99095,4	201028,9	313854,8	442072,5	589031,5	768586,1	996632,7	1331151,4	618891,8
30. 12UTC	4103,3	99282,1	201087,1	314009,9	442301,1	589049,1	768462,8	995862,9	1332891,8	617760,4
30. 18UTC	4404,5	100122,4	201879,2	314810,3	443240,7	590661,5	769027,8	996604,1	1334086,6	619299,7

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

A potenciális energiasűrűség értékek kiszámítása a (3) – as egyenlet segítségével történt. A számítás során elvégzett átlagolások hasonlóan zajlottak, mint a kinetikus energiasűrűség esetében. Először területi majd később térfogati átlagokat képeztem. A mértékegysége: Jm^{-3} , mint a kinetikus energiasűrűség esetében. A potenciális energiasűrűség értékek nagyságán látható, hogy nagyságrendekkel meghaladja a kinetikus energiasűrűség értékeket. A belső energia igazolja a hidrosztatikus feltevést és arányosan változik a potenciális energiasűrűséggel. A következő grafikon a potenciális energiasűrűség értékeinek alakulását mutatja be. A 20. ábra a potenciális energiasűrűség görbe, a Katrina – hurrikán

egyres időlépcsőire vett átlagos értékeit mutatja be. Ezek alapján azt mondhatjuk, hogy a huszadik időlépcső környékén volt a legkisebb a potenciális energiasűrűség.



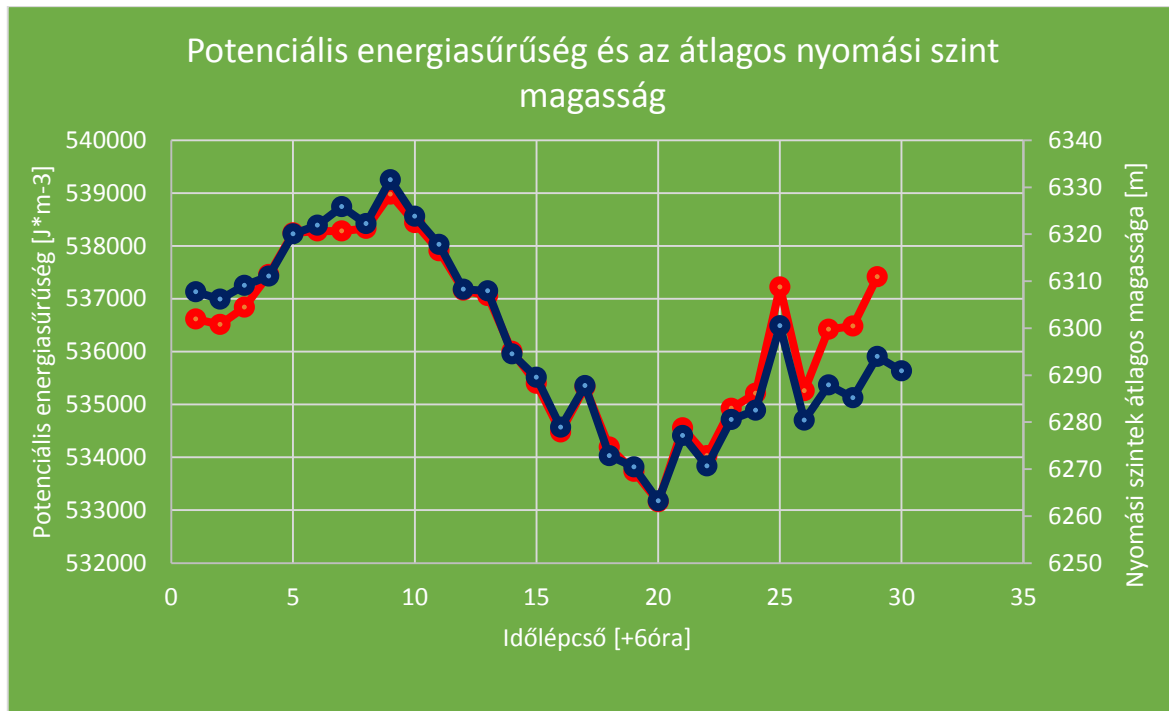
20. **ábra:** Katrina – hurrikán potenciális energiasűrűsége a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2005.08.23. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2005.08.30. 18 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai. [10]

Ez megfelel annak a gondolatmenetnek, hogy ekkor volt a legalacsonyabb központi nyomása és legalacsonyabb átlagos magassága a nyomási szinteknek. Összevethető a potenciális energiasűrűség és a nyomási szintek átlagos magassága is. (21. ábra) Ebből látható, hogy a két görbe igen hasonló menetű, és a görbék igen rövid szakaszán térnek el egymástól. Ez az adott pillanathoz tartozó hőmérséklet és a segítségével származtatott sűrűség függvényének következménye.



21. **ábra:** A potenciális energiasűrűsége és a nyomási szintek magassága.

Az első időlépcső: 2005.08.23. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2005.08.30. 18 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai. [10]

7.Trópusi ciklonok összehasonlító vizsgálata

A környezeti feltételek és a trópusi ciklon kialakulási környezete minden esetben más és más, így igen nehéz általánosan megfogalmazható következtetéseket levonni a trópusi ciklonok életútja során létrejött energiákról. Általános következtetéseket csak akkor fogalmazhatunk meg, ha több különböző helyen kialakult és eltérő erősségűre fejlődött trópusi ciklont is megvizsgálunk. Ennek érdekében az előző részletesen bemutatott Katrina - hurrikán mellett, az alábbi hurrikánokat és tájfunokat vizsgáltuk meg.

- *Andrew – hurrikán*, mely 1992 augusztusában alakult ki. Érdekessége, hogy a Katrina – hurrikánhoz hasonló utat járt be, melynek korai fázisában a karibi – térségben, később Floridában, majd életútja végén a Mississippi - folyó torkolata közelében is járt. A Katrinához hasonlóan ötös fokozatú is volt. (*Edward N. Rappaport., 1992*) Tehát, jellegében a Katrina – hurrikánra hasonlító trópusi ciklon volt, azonban több, mint tíz évvel a Katrinát megelőzően jött létre.



22. **ábra:** Andrew – hurrikán útvonala.

Forrás: [11]

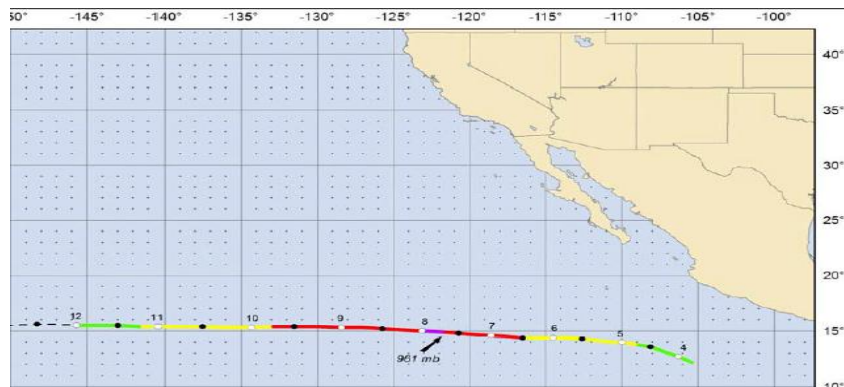
- *Charley – hurrikán*, mely 2004 augusztusában jött létre. Hasonlóan az előzőekhez, Charley is az atlanti – térségben kialakult hurrikánok közé tartozik. Az előzőekkel szemben ez a trópusi ciklon nem érte el az ötös fokozatot a Saffir – Simpson féle hurrikán skálán, mindössze négyes fokozatú volt. Az NHC, (National Hurricane Center) feljegyzései szerint az 1992 – ben lecsapó Andrew – hurrikánt követően a Charley – hurrikán volt a legerősebb. (*Pasch, Richard J., at al., 2011*)



23. **ábra:** Charley – hurrikán útvonala.

Forrás: [12]

- *Daniel – hurrikán*, az előzőekkel ellentétben nem az Atlanti – óceánon, hanem a Csendes – óceánon, annak is az északi részén, 2012 júliusában fejlődött hármask fokozatú hurrikánná. (Avila, Lixion A., at al., 2012) A Daniel – hurrikán kialakulásától a felbomlásáig a 15. szélességi fok mentén haladt. Kis kitérései ellenére mintha „madzagon” húzták volna, úgy mozgott a 15. szélességi kör mentén.



24. **ábra:** Daniel – hurrikán útvonala.

Forrás: Avila, Lixion A., at al., 2012

- *Ike – hurrikán*, mely az atlanti – térség egyik hurrikánja volt 2008 – ban fejlődött ki. Életútja két szakaszra bontható, ugyanis kétszer is erős fejlődésnek indult, melyet az alábbi grafikon is jól mutat. A Saffir – Simpson féle hurrikán skálán négyes fokozatig erősödött. (Berg, Robbie, 2009)



25. **ábra:** Ike – hurrikán útvonala.

Forrás: [13]

- *Ivan – hurrikán*, az atlanti – térségben fejlődött ki. Kialakulására 2004 szeptemberében került sor és igen hosszú ideig állt fenn. Közel huszonekét napig veszélyeztette a karibi majd később az Egyesült Államok déli államainak térségét. Ez idő alatt háromszor is elérte a legmagasabb fokozatot, melyet trópusi ciklon elérhet, ötös fokozatú hurrikán volt. (Stewart, Stacy R., at al., 2004)

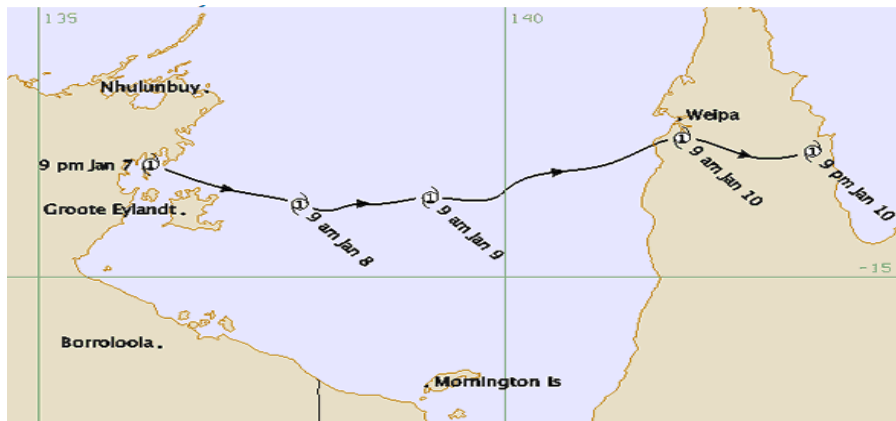


26. **ábra:** Ivan – hurrikán útvonala.

Forrás: [14]

- *Mark – trópusi ciklon*, mely az előzőekkel ellentétben nem az északi féltekén, hanem a déli féltekén alakult ki. Ausztrália partjai mentén pusztított és bomlott is fel 1992 januárjában. Igen rövid élettartamú volt, viszont ez volt az egyetlen olyan trópusi

ciklon, mely az 1990 – es évek elején nevet kapott a Brisbane TCWC – től (Tropical Cyclone Warning Centre).



27. **ábra:** Mark – trópusi ciklon útvonala.

Forrás: [15]

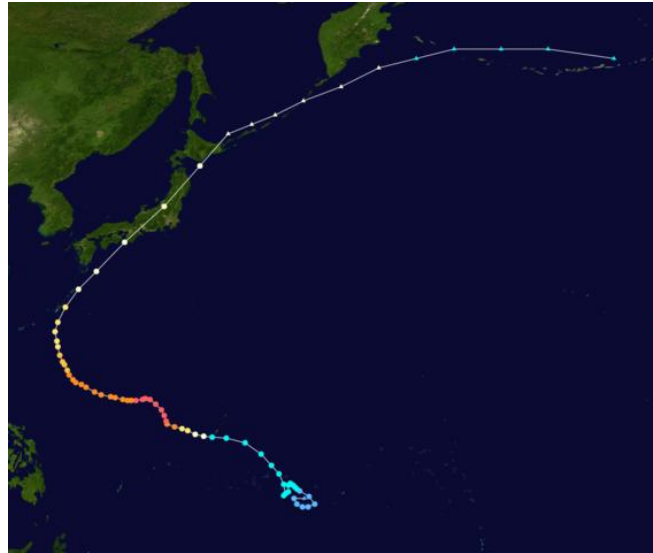
- *Rita* – hurrikán, mely a Katrina – hurrikánnal azonos évben és közel azonos területen fejlődött ki és pusztított. A Rita – hurrikán elérte az ötös fokozatot, viszont a helyiek szerencséjére a partot ennél alacsonyabb, hármas fokozatúként érte el. Igen jelentős vízszint emelkedésével, erős szeleivel és tornádóival jelentős pusztítást végzett Texastól Alabamáig. (Knabb, Richard D., at al., 2006) A Katrina – hurrikán után három héttel alakult ki és ugyanazon a területen haladt át. A Rita – hurrikán az előbb említett három hét és az ötös fokozat miatt került fel a listára.



28. **ábra:** Rita – hurriká útvonala.

Forrás: [16]

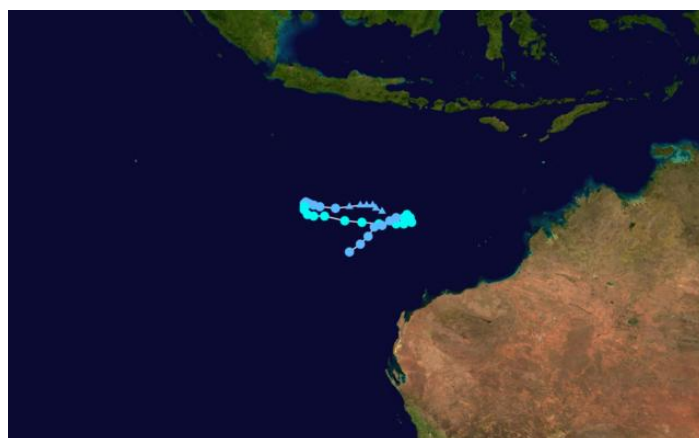
- *Tip – tájfun*, mely 1979 – ben jött létre és írta be magát a történelemkönyvekbe. A Csendes – óceán nyugati medencéjében alakult, majd Japán és Kelet – Oroszországot is veszélyeztette. Ennek a trópusi ciklonnak a különlegessége, hogy elképesztően hatalmas kiterjedésű volt, életútja során a vihar maximális átmérője elérte a 2200 km – t is. Több forrás is szupertájfun néven emlegeti azóta is. Hatalmas mérete mellett a NOAA adatai szerint 306 km/óra – s szélsőséget is jegyeztek a tájfunban. [17],[18]



29. **ábra:** Tip – tájfun útvonala.

Forrás: [19]

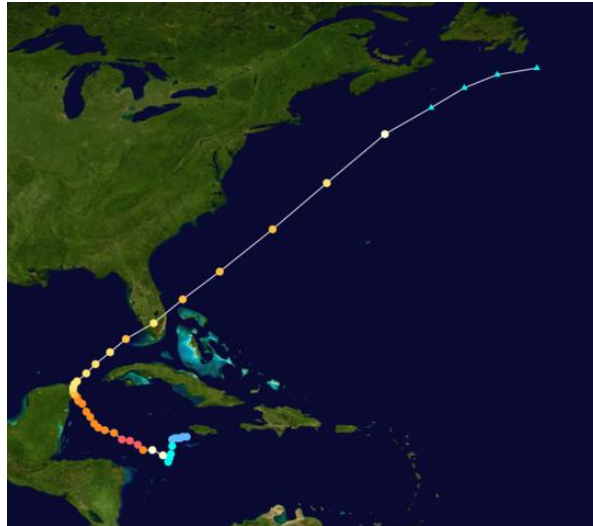
- *Vince – trópusi ciklon*, mely a Mark - és Daniel - trópusi ciklonokhoz hasonlóan rövid életű volt. Vince – trópusi ciklon a déli féltekén az Indiai – óceán keleti régiójában mozgott. A műholdas megfigyelések szerint 2011 január 10. – én az Egyenlítőtől délre, mindössze tizenöt fokra, az Indonéz szigetvilágtól nem messze fejlődött ki. [20]



30. **ábra:** Vince – trópusi ciklon útvonala.

Forrás: [21]

- *Wilma – hurrikán*, mely a feljegyzések kezdete óta az atlanti – térség legalacsonyabb központi nyomású trópusi ciklonja. A hurrikánokban gazdag 2005 – ös esztendőben fejlődött ki. A mért adatok alapján, elképesztően alacsony 882 hPa – os központi nyomása volt. (*Pasch, Richard J., at al., 2006*)



31. **ábra:** Wilma – hurrikán útvonala.

Forrás: [22]

- *Sandy – hurrikán*, mely 2012 – ben az atlanti – térségben fejlődött ki, hármasként sodródott be a nyugati szelek övébe. Az Egyenlítőtől ilyen távolságban trópusi ciklonok képtelenek életben maradni (*Emanuel, K. A., 1991*), így konverzió ment keresztül és különleges légköri képződményként, meleg magú, mérsékeltövi ciklonként fejezte be életútját. (*Blake, Eric S., at al., 2013*)

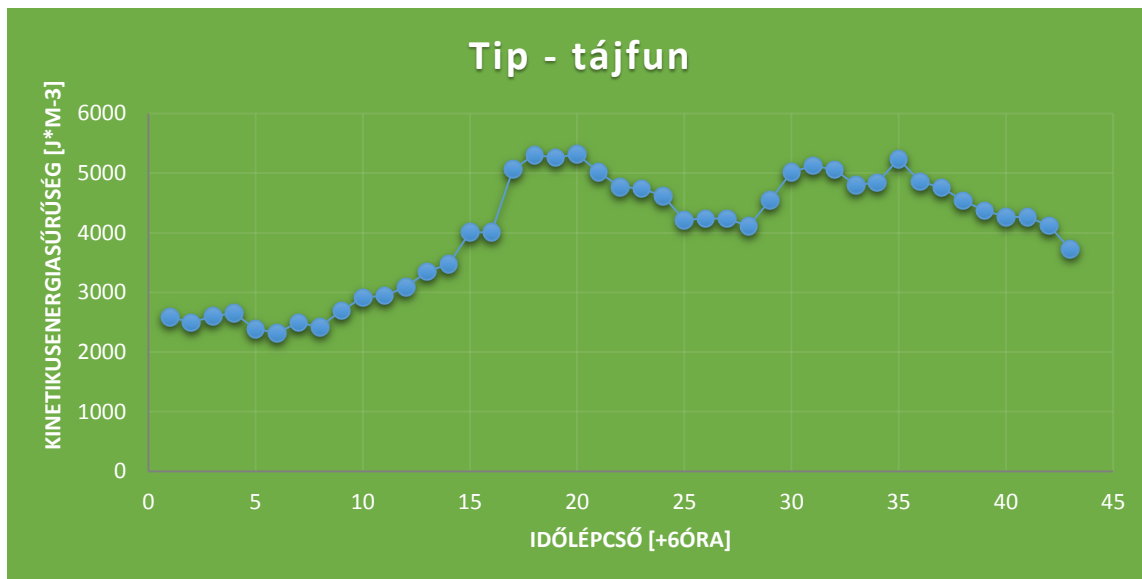


32. **ábra:** Sandy – hurrikán útvonala.

Forrás: [23]

A különböző helyen és időben keletkezett trópusi ciklonok más és más körülményből fejlődtek ki. Életútjuk során ennek megfelelően eltérő energiaszintű állapotot értek el. Az úgymond, különböző kezdeti feltételekből keletkező trópusi ciklonok összehasonlítására végeztük el a kinetikus energiasűrűség számítását. Azért a kinetikus energiasűrűség számítását választottuk, mert a trópusi ciklonokat energetikai szempontból ez jellemzi a legjobban. Mindazonáltal, a kinetikus energiasűrűség mellett a potenciális energiasűrűséget is kiszámítottuk, azonban a potenciális energiasűrűség értékek a trópusi ciklonok kialakulásától a felbomlásáig relatíve kis skálán mozogtak, ezért a potenciális energia részletes menetét nem is mutatjuk be. Nagy átlagban a potenciális energiasűrűség értékeknek $9 - 10 \text{ kJ/m}^3$ a maximális szórása. Ez igen kicsinek tekinthető, ugyanis a potenciális energiasűrűség értéke ezres nagyságrendű, így a fluktuáció értéke közel három nagyságrenddel kisebb. Azt mondhatjuk, hogy minden vizsgált ciklon esetében jó közelítéssel kvázi változatlan a potenciális energiasűrűség értéke. Ezért a trópusi ciklonok esetében jobb indikátornak tekinthetjük a kinetikus energiasűrűséget, mint a potenciális energiasűrűséget.

A fentebb jelzett trópusi ciklonokkal végeztük el azokat a számításokat, melyeket a Katrina – hurrikán esetében már részletesen bemutattunk. A számítások szerint elmondható, hogy a kinetikus energiasűrűség nagysága erősen függ a képződmény teljes élettartamától. Ha a körülmények olyanok, hogy a trópusi ciklon mindössze három napig képes fenn állni, mint például a *Mark – trópusi ciklon* esetében, akkor a hat órás időlépcsőben feltüntetett energiasűrűség értékek kisebbek, azon viharokénál, melyek esetén a környezeti feltételei biztosítják a vihar számára a tíz, akár húsz napos élettartam lehetőségét is. Ezt a következő grafikonok is alátámasztják.

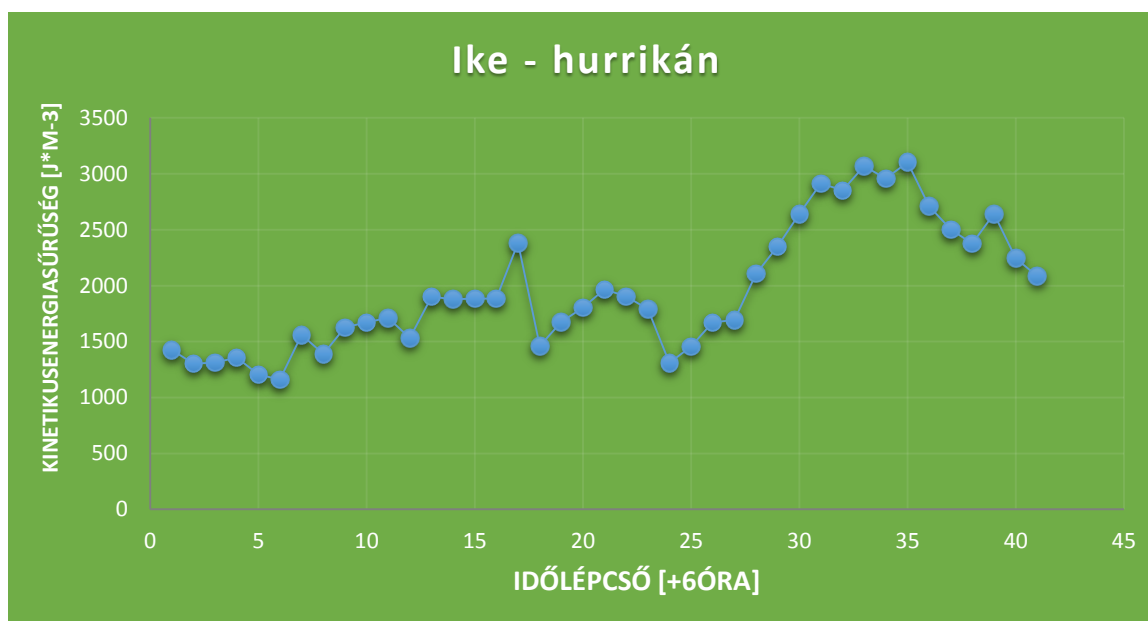


33. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 1979.10.10. 06 UTC

Utolsó időlépcső: 1979.10.21. 06 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai



34. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2008.08.03. 00 UTC

Utolsó időlépcső: 2008.08.13. 06 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

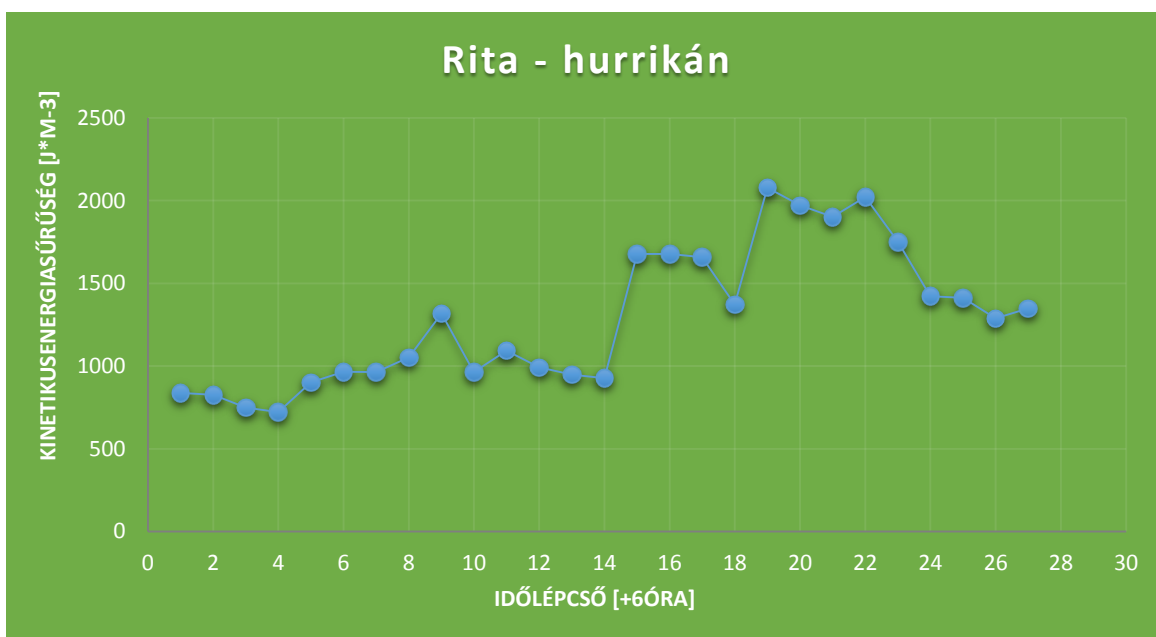


35. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 1992.01.08. 06 UTC

Utolsó időlépcső: 1992.01.11. 06 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

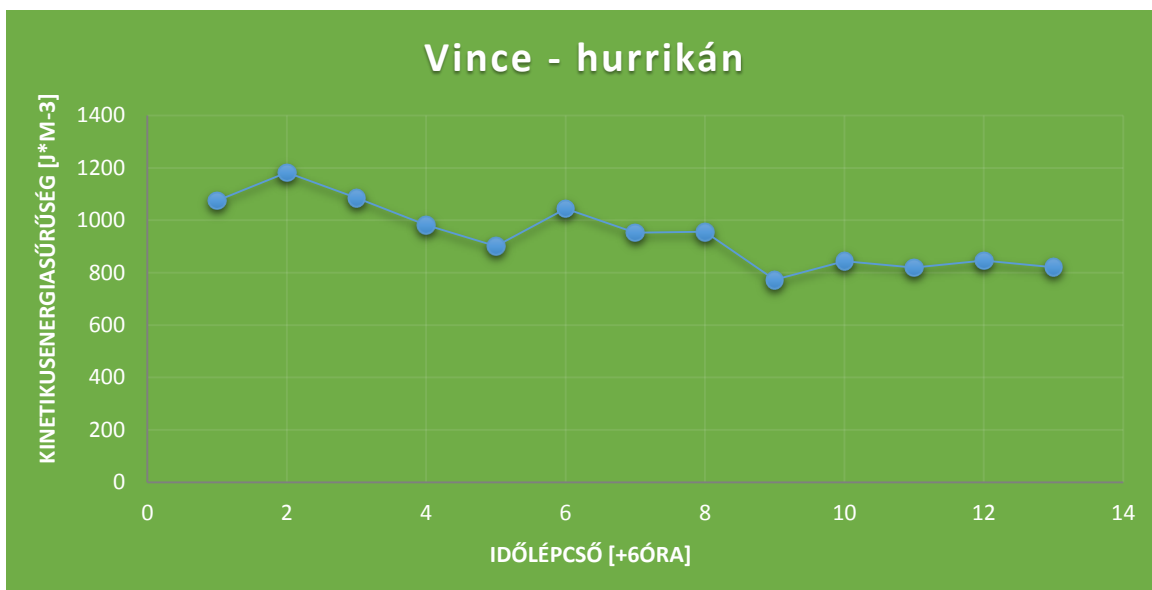


36. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2005.09.17. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2005.09.24. 06 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

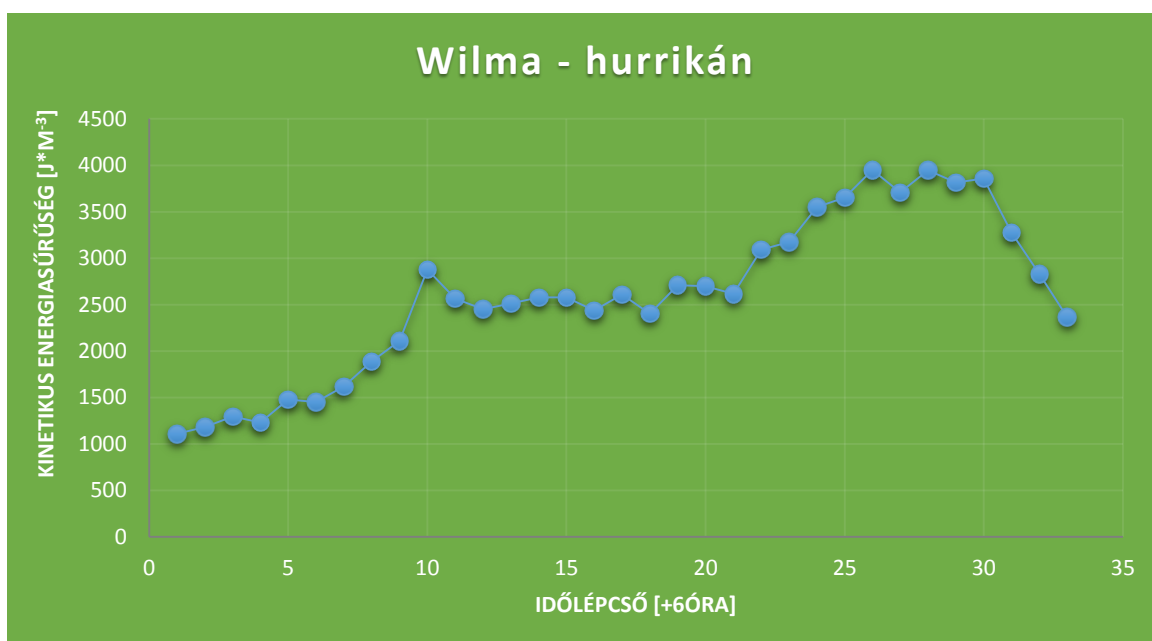


37. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2011.08.23. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2011.08.30. 18 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

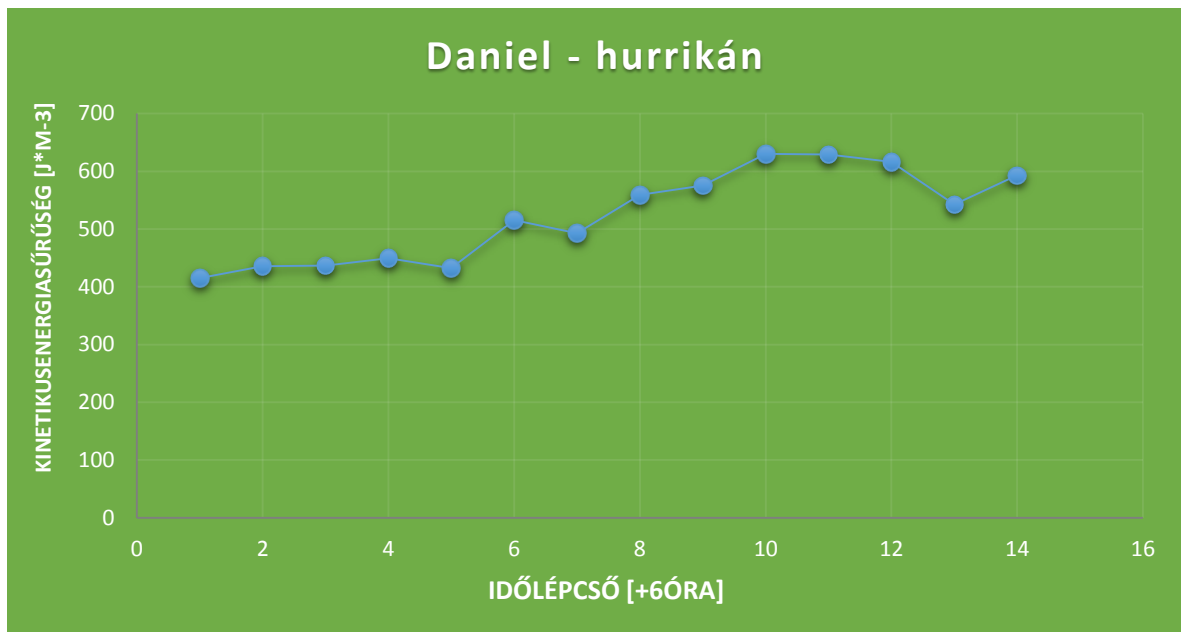


38. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2005.10.17. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2005.10.26. 00 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

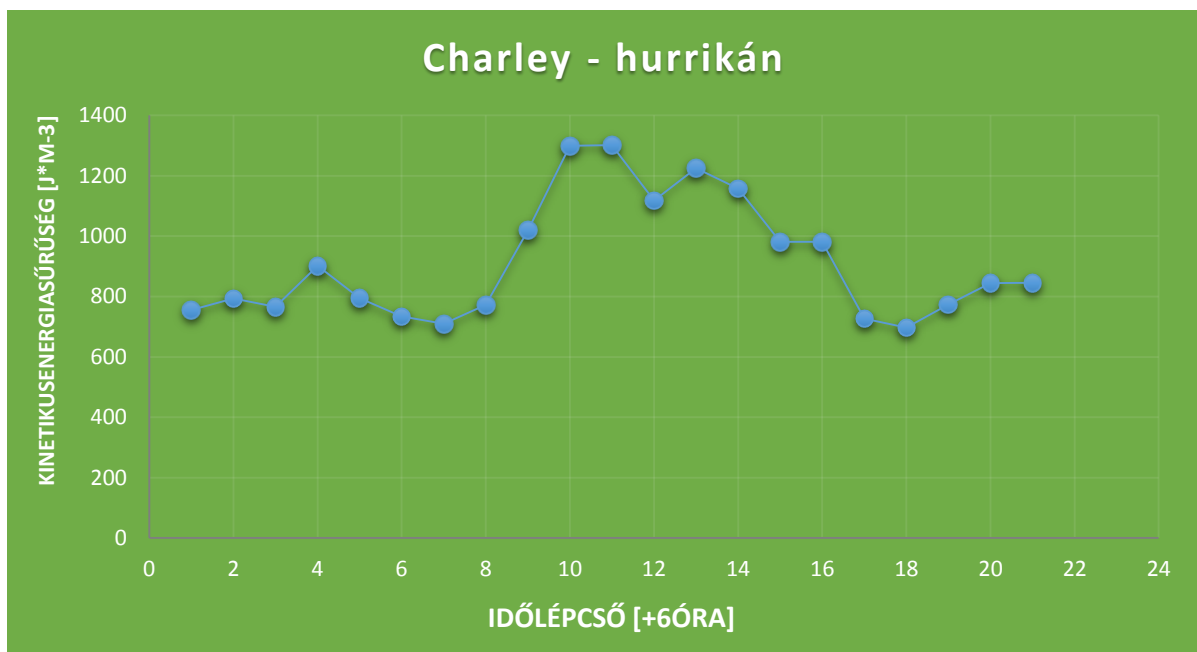


39. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2012.07.8. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 2012.07.12. 00 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

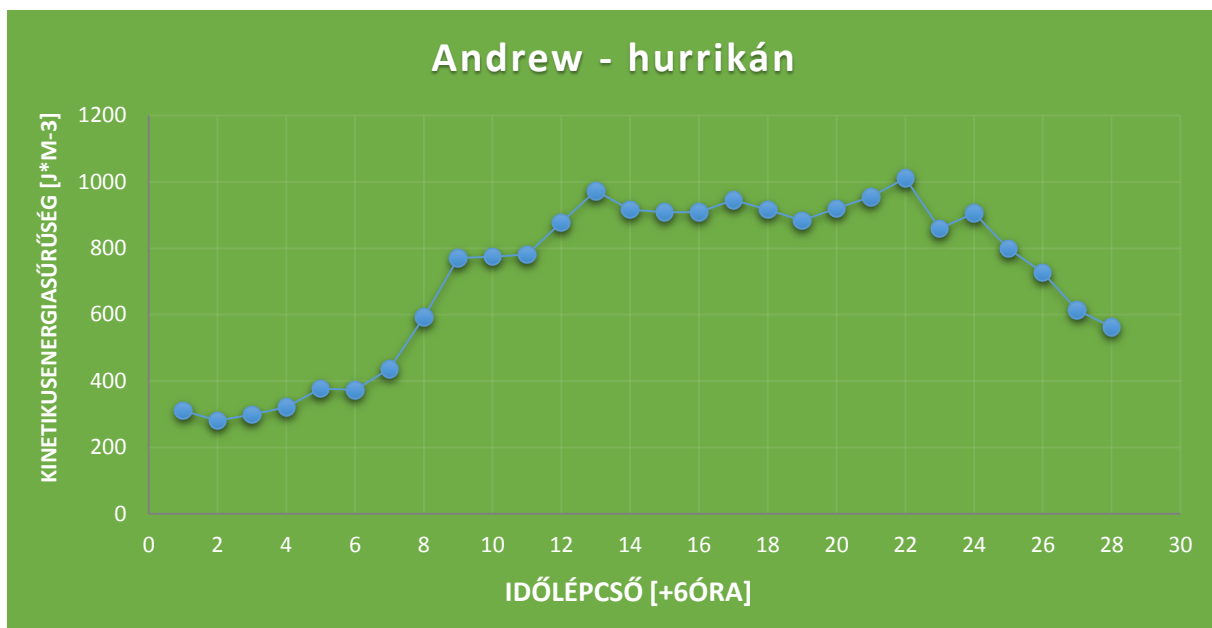


40. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2004.08.10. 06 UTC

Utolsó időlépcső: 2004.08.15. 00 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

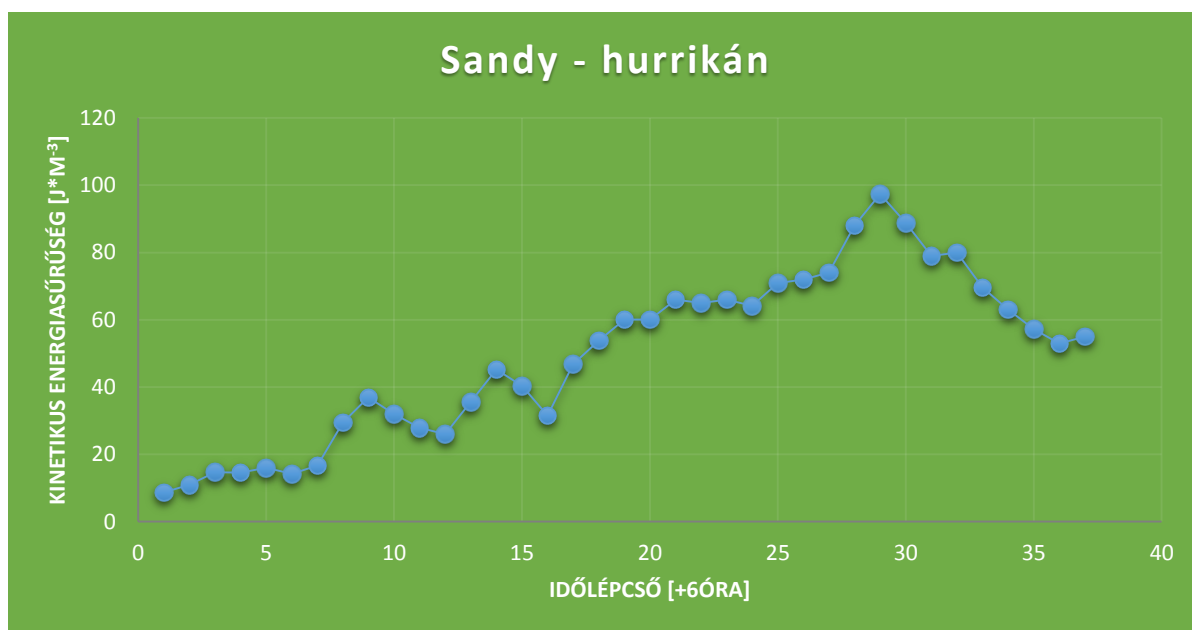


41. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 1992.08.21. 18 UTC

Utolsó időlépcső: 1992.08.28. 18 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai



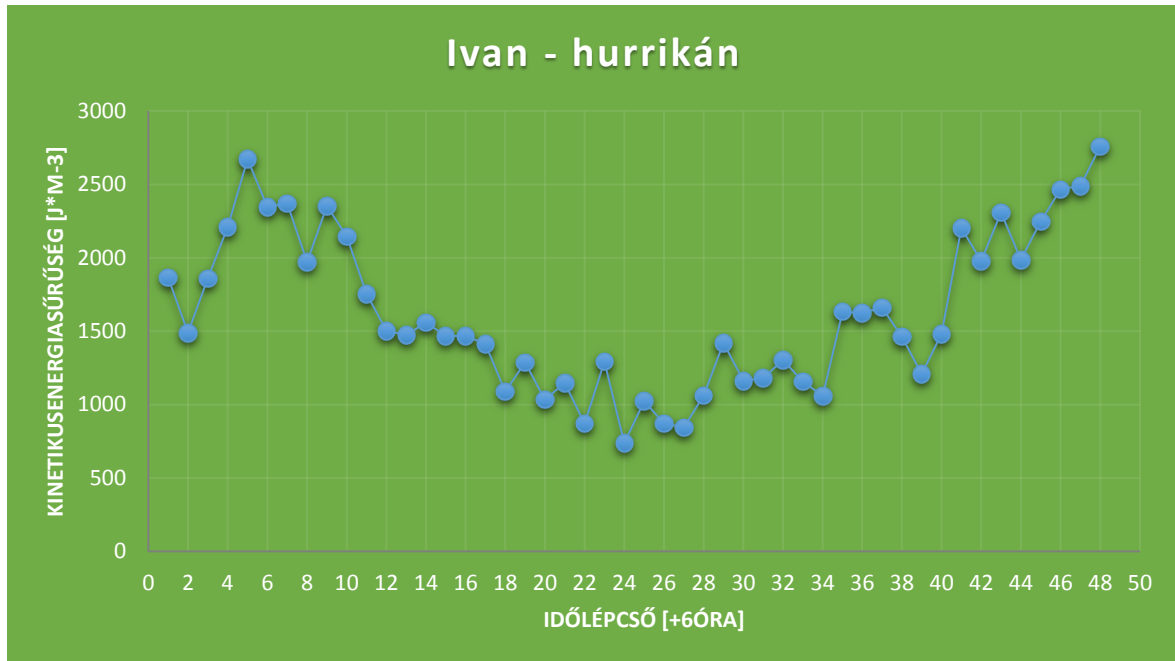
42. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2012.10.22. 06 UTC

Utolsó időlépcső: 2012.10.29. 2330 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

Azt mondhatjuk a grafikonok alapján, hogy az élettartam nem csak az energiasűrűség nagyságára, hanem az életút során felvett energia szórására is igen erős hatást gyakorol. A hosszabb élettartamú trópusi ciklonok görbéi jobban mutatják az életutak azon pontjait, amikor legerősebb időszakukat élték a viharok. Különösen érdekes viselkedése miatt kiemeljük a sorból az Ivan – hurrikánt.



43. **ábra:** Kinetikus energiasűrűség alakulása a vizsgált időtartam során.

Az első időlépcső: 2004.09.03. 06 UTC

Utolsó időlépcső: 2004.09.15. 00 UTC

Forrás: ECMWF ERA Interim napi, nyomás szintű adatai

Az Ivan – hurrikán az egyetlen a felsoroltak közül, mely teljesen máshogy viselkedik, mint az összes többi vihar. A számítás módja ugyanaz volt, mint a többi vizsgált trópusi ciklon esetében. A kialakulási környezete, több a felsorolásban is szereplő vihar környezetével is megegyezik. Ha nem a számítás, nem a helyszín és feltételezhetően nem is a nyers adatok azok, melyek okozzák a „furcsaságot”, elgondolkozhatunk, hogy esetleg nem hibával, hanem a Sandy – hurrikánhoz hasonló érdekes jelenséggel állunk szemben. Az Ivan – hurrikán az időben viselkedik másképpen, mint az előzőek. Nagy átlagban, mindegyik vizsgált trópusi ciklon az idő előrehaladtával, meghatározott fokozatú hurrikánna vagy tájfunná erősödött. Ezzel szemben az Ivan – hurrikán a legnagyobb kinetikus energiasűrűség értékeket a kezdeti és az utolsó időlépcsőkben vette fel. Látható a grafikonon, hogy a legalacsonyabb kinetikus

energiasűrűség a tizennyolcadik és a harmincnegyedik időlépcsők közt volt. Ez a minimum érték a vizsgált időskála felénél volt. Ezzel szemben a többi vizsgált trópusi ciklon saját időskálájuk ezen szakaszában, a maximálisához közeli értékeket vettek fel. Tehát az Ivan – hurrikán kinetikus energiasűrűség görbéje máshol veszi fel a maximumát és a minimumát, mint a többi vizsgált trópusi ciklon.

8.Összefoglalás

Ahhoz, hogy általános érvényű következtetéseket vonhassunk le a trópusi területek legnagyobb viharairól, a lehető legpontosabban ismernünk kell őket. A légköri képződményeket vizuális tulajdonságaik mellett a bennük rejlő energiákkal lehet a lehető legjobban jellemzi. A megvizsgált trópusi ciklonok teljes életére, hat órás időlépcsővel kaptunk kinetikus és potenciális energiasűrűség értékeket. A számításban résztvevő trópusi ciklonokról elmondható, hogy minden esetben a környezeti feltételek (szélnyírás, óceáni vízfelszín hőmérséklet, érdesség) azok, amik előrevetítik a képződmény élettartamát, s így erősségét. Ha kedvezőek a feltételek, akkor a képződmény képes addig fennmaradni, míg a körülmények drasztikusan meg nem változnak, illetve elegendően távolra nem kerül a meleg, energiát adó trópusi területektől. Ha kedvezőtlenek a feltételek, akkor vagy ki sem alakul vagy mindössze néhány órát képes megélni. Az eredmények alapján elmondható, hogy a kinetikus energiasűrűség annál nagyobb volt, minél hosszabb élettartamú és minél nagyobb fokozatú volt az adott trópusi ciklon. (A fokozat kapcsán, a Saffir – Simpson féle hurrikán skála értendő.) Ha az *Ivan – hurrikán* különös viselkedésétől eltekintünk, akkor minden vizsgált trópusi ciklon a saját időskáláján, az idő előrehaladtával egyre erősebb és erősebb lett. Azaz, a grafikonokon jelzett görbék az idő előrehaladtával egyre nagyobb kinetikus energiasűrűség értékekhez tartoztak. Azonban a görbék menetében több helyen is találkozhatunk lokálisan csökkenő tendenciákkal. Ennek az az oka, hogy az egyes trópusi ciklonok életútjuk során nem kizárólag óceáni vízfelszínre, hanem bizonyos esetekben kisebb szigetek és kontinensek felett is megfordultak. A szárazföld felszíni érdességének a következménye, hogy ilyenkor a kinetikus energiasűrűség értékekben csökkenő tendencia mutatkozik meg. Ebből is látható, hogy a kinetikus energiasűrűség jó indikátora a trópusi ciklonoknak. A trópusi ciklonok szárazfölddel való érintkezése, az esettanulmányok szerint, minden esetben hasonló eredményeket mutat. A trópusi ciklon kontinens fölé érkezése sok esetben a ciklon felbomlását is eredményezi. Ilyen volt például a *Katrina* -, *Andrew* - és a *Rita – hurrikán* is. Mindezek mellett fontos megemlíteni, hogy a felbomlás nem szárazföldhöz kötött, ilyen volt például a *Tip – tájfun*, amely északra sodródásával távol került a trópusi, energiát adó melegebb óceáni vizektől. Ismeretes, hogy a hidegebb vízfelszín hasonlóan a szárazföldhöz, kedvezőtlen a trópusi ciklonok számára. A meleg vízfelszínre, mint energiát szolgáltató szintérre van szükségük. Mindezek mellett fontos

megemlíteni, hogy a kinetikus energiasűrűség enyhe napi menetet mutat. Ahogyan már említettem, a kinetikus energiasűrűség mellett potenciális energiasűrűséget is számítottunk. Ez esetben az értékkészlet jóval kisebb szórású volt, mint ahogyan a kinetikus energiasűrűségek esetében láthattunk. A vizsgált trópusi ciklonok esetében a maximális potenciális energiasűrűség fluktuáció értéke körülbelül 10 KJ/m^3 – volt. Ez nem tekinthető nagyknak, hiszen három nagyságrenddel kisebb, mint az adott időpillanathoz tartozó átlagos potenciális energiasűrűség érték. Ezért a trópusi ciklonok teljes élettartamára vonatkozóan a potenciális energiasűrűség értékeket közel állandónak tekinthetjük.

9. Irodalomjegyzék

- Avila, Lixion A., and Hogsett, Wallace 2012: Tropical Cyclone Report Hurricane Daniel. National Hurricane Center*
- Bartholy J., Geresdi I., Matyasovszky I., Mészáros R., Pongrácz R., 2010: A meteorológia alapjai*
- Berg, Robbie, 2008: Tropical Cyclone Report Hurricane Ike. Revised 2009, National Hurricane Center*
- Blake, Eric S., Kimberlain, Todd B., Berg, Robert J., Cangialosi, John P., and Beven II., John L., 2013: Tropical Cyclone Report Hurricane Sandy. National Hurricane Center*
- Camargo, Suzana J., and Sobel, Adam H., 2004: Western North Pacific Tropical cyclone Intensity and ENSO. *Journal of climate*, vol. 18, 2996-3006*
- Czelnai R., Götz G., Iványi Zs., 1983: Bevezetés a meteorológiába II. A mozgó légkör és óceán*
- Elsner, James B., Kossin, James P., Jagger, Thomas H., 2008: The inceasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Natue Letters*, vol. 455, 2008.09.04. doi:10.1038/nature07234*
- Emanuel K. A., 1991: Theory of the Hurricane. *Annual Reviews, Fluid Mechanics* 1991. 23:179-96*
- Emanuel K. A., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature Letters* vol. 436, 2005. 08. 04. doi:10.1038/nature03906*
- Emanuel, K. A., 1994: Tropical Cyclone Energetics and Structure. *Program in Atmospheres, Oceans, and Climate**
- Ginis I., 2002: Tropical Cyclone - Ocean Interactions. *Atmosphere – Ocean Interactions, Advanced in Fluid Mechanics Series, No. 33, WIT Press, 83-114.**

Knabb, Richard D., Brown, Daniel P., and Rhome, Jamie R., 2005: Tropical Cyclone Report Hurricane Rita. Revised 2006, National Hurricane Center

Knabb, Richard D., Rhome, Jamie R., Brown, Daniel P., 2005: Tropical Cyclone Report Hurricane Katrina

Litz J., Erostyák J., Bérces Gy., Klebniczki J., Raics P., Pintér F., Skarptis L., Sükösd Cs., Tasnádi P., 2003: A fizika alapjai

Pasch, Richard J., Blake, Eric S., Cobb III., Hugh D., and Roberts, David P., 2006: Tropical Cyclone Report Hurricane Wilma. National Hurricane Center. Update 2014 for new U.S. damage estimate

Pasch, Richard J., Brown, Daniel P., and Blake, Eric S., 2004: Tropical Cyclone Report Hurricane Charley. Revised 2011 National Hurricane Center

Rákóczi F., Götz G., 1980: A dinamikus meteorológia alapjai.

Rappaport, Edward N., 1992: Hurricane Andrew

Stewart, Stacy R., 2004: Tropical Cyclone Report. National Hurricane Center. Update 2005 and 2011

Internetes források:

- [1] http://www.economist.com/blogs/dailychart/2011/03/natural_disasters
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Tropical_cyclone
- [3] <http://www.nhc.noaa.gov/aboutgloss.shtml>
- [4] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/23/Global_tropical_cyclone_tracks-edit2.jpg
- [5] http://www.met.hu/ismertetok/radar_ismerteto.pdf
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/El_Ni%C3%B1o_Southern_Oscillation#/media/File:Soi.svg
- [7] <http://www.nhc.noaa.gov/data/tracks/tracks-at-2005.png>
- [8] http://www.nasa.gov/vision/earth/lookingatearth/h2005_katrina.html

- [9] http://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL122005_Katrina.pdf
- [10] <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/>
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Andrew#/media/File:Andrew_1992_track.png
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Charley#/media/File:Charley_2004_track.png
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Ike#/media/File:Ike_2008_track.png
- [14] http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Ivan#/media/File:Ivan_2004_track.png
- [15] <http://www.bom.gov.au/cyclone/history/mark.shtml>
- [16] http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Rita#/media/File:Rita_2005_track.png
- [17] <http://www.scientificamerican.com/article/earths-strongest-most-massive-storm-ever/>
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon_Tip
- [19] http://en.wikipedia.org/wiki/Typhoon_Tip#/media/File:Tip_1979_track.png
- [20] <http://www.bom.gov.au/announcements/sevwx/wa/watc20110110.shtml>
- [21] http://en.wikipedia.org/wiki/2010%E2%80%9311_Australian_region_cyclone_season#/media/File:Vince_2011_track.png
- [22] http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Wilma#/media/File:Wilma_2005_track.png
- [23] http://en.wikipedia.org/wiki/Hurricane_Sandy#/media/File:Sandy_2012_track.png

10.Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném kifejezni mérhetetlen nagy hálámat és köszönetemet dr Tasnádi Péter egyetemi tanárnak, aki szaktudásával, hasznos tanácsaival és lelkiismeretes munkájával segítette a diplomamunkám létrejöttét. Nem csak iránymutatóként, hanem követendő példaként tekintek a Tanár úrra. Köszönöm a sok segítséget, melyet a fizika rejtelsei mellett, az olykor nehéznek bizonyuló fogalmazás során nyújtott számomra.