

HOGYAN MŰKÖDNEK A HURRIKÁNOK?

HOW DO HURRICANES WORK?

Fejős Ádám, Tasnádi Péter

ELTE Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.
fejos.adam@gmail.com, tasi@hudens.elte.hu

Összefoglalás. A hurrikánokat gyakran légköri hőerőgépek is nevezik. Jelen írásban a hurrikánok termodinamikájának alapjait ismertetjük, kiemelt figyelmet szentelve a Carnot-ciklussal történő közelítésnek. Kitérünk a termodinamikai leírás vitatott kérdéseire és foglalkozunk a „szuperhurrikán” elmélettel és kritikájával. Végül felvetjük a véges idejű vagy *endoreverzibilis* termodinamika alkalmazásának lehetőségét a hurrikánok energetikájának leírásában.

Abstract. Hurricanes are often called the ‘heat-engines of the atmosphere’. In the present paper the basics of hurricane thermodynamics with advanced focus on the descriptions by Carnot-cycle is considered. A few controversial topics on the thermodynamic models including the ‘Super cane’ theory are also discussed. Finally the idea of applying a finite time or *endoreversible* thermodynamics to investigate the energetics of hurricanes is introduced.

Bevezetés. A trópusi ciklonok (hurrikánok) Európa időjárásában ugyan nem játszanak fontos szerepet, mégis érdemes megvizsgálnunk őket, mert pusztító hatásokról a sajtóban sokat hallunk, s elméleti leírásuk is igen tanulságos. A hurrikán a légkörben zajló folyamatok egyik legösszetettebb jelensége. *Emanuel* (1991) állítása szerint évente körülbelül 50 örvénylő rendszer alakul ki a trópusi vizek fölött, amely hurrikánná fejlődik, ezek közül jó néhány el is éri a szárazföldet. A pusztító erejű szelekkel és felhőszakadással járó hurrikánok mellett, hogy gyakran emberi áldozatokat is szednek, mindig igen komoly anyagi károkat okoznak. Mindemellert számunkra nem csak kuriózumok a trópusi ciklonok, hanem mivel gyakran átalakulnak mérsékelt égövi ciklonná, valódi, időjárásunkat is meghatározó légköri objektumok. Mik a feltételei a hurrikánok keletkezésének? Hogyan működik egy hurrikán? Milyen egyszerű módszerekkel írhatjuk le a hurrikánok termodinamikáját? Ezekre a kérdésekre keressük a választ az alábbi írással.

A hurrikán meghatározása és keletkezési feltételei.

Azokat a trópusi vizek fölött keletkező ciklonális forgásiránnyal örvénylő rendszereket, melyek felszíni területén a szélesség legalább 32 ms^{-1} , a kialakulási helytől függően hurrikánnak/tájfunnak/trópusi ciklonnak nevezük. Az ilyen pusztító erejű viharok kialakulásához és fennmaradásához koncentrált energiaforrás szükséges. Ez az energiaforrás nem más mint a Föld trópusi szélességein elhelyezkedő óceánok meleg tengervize. A hurrikán „csíra” a meleg (kb. 27°C -os, azaz 300 K hőmérsékletű) óceán felszín fölött keletkező nyomási depresszió, amelyben a felszínnel érintkező nedves légtömeg összeáramlik és adiabatikus emelkedésbe kezd. A beáramló levegőt a Coriolis-erő forgatja meg, ezért a hurrikánok az 5. és a 15. szélességi körök között keletkeznek, ahol a tengervíz nagyon meleg és a *Coriolis erő* is elegendően nagy. A ciklonális mezőben heves feláramlás kezdődik, amelyben a levegő lehül és páratartalma kicsapódik, létrejönnek a felhőkarok (1. ábra). A kicsapódáskor felszabaduló hő a levegőt melegíti, így az adiabatikus hűlés ellenére a trópusi ciklon középpontja meleg marad, kialakul a „forró torony”-nak nevezett képződmény, ami már a heves vihar előjele. A feláramló levegő a magasban széttartóvá válik, s emiatt forgásiránya anticiklonális lesz. A folyamatok részletes leírása nem lehet egy rövid cikk témája, ebben a dolgozatban csak a hurrikánok fizi-

kájának globális megértését segítő termodinamikai kérdésekre térünk ki.

A hurrikánok termodinamikája. A kilencvenes évek második felétől kezdve napjainkig heves vitát váltott ki a hurrikánok termodinamikájának tárgyalása. *Kerry Emanuel*, az MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) professzora szerint a trópusi ciklonokat légköri hőerőgépként kezelhetjük, hiszen energetikailag nem történik más, mint a tenger belső energiájának mechanikai munkává (rendezett kinetikus energiává) való átalakítása. Modellje szerint a hurrikánok működése jó közelítéssel magyarázható a (veszteséges) Carnot-ciklussal.



1. ábra: Az Andrew hurrikán fejlődése, 1992.08.23, 24 és 25-én GOES-7 adatok, készítők: Hasler, F., Jentoft-Nilsen, M., Pierce, H., Palaniappan, K. és Manyin, M. (NASA)

Az ideális (*reverzibilis*) Carnot-ciklus jól ismert, a bevezető termodinamika tankönyvekből (*Budó*, 1977) tudjuk, hogy a két adiabatából és két izotermából álló körfolyamatban végzett W munka a T_m hőmérsékletű meleg hőtartályból felvett Q_m , és a T_h hőmérsékletű hideg hőtartálynak leadott Q_h hő különbsége. A körfolyamat hatásfoka:

$$\eta_C = \frac{T_m - T_h}{T_m} \quad (1)$$

A kérdés már csak az, hogy milyen körülmények között zajlik az energiacsere és a levegő mozgásában hogyan különíthetőek el a termodinamikai diagramon megjeleníthető folyamat szakaszai. Kérdéses, hogy mik a hőerőgép hőtartályai, mi a munkaközeg, és a végzett munka mire fordítódik?

A hurrikánok Carnot-ciklusának szakaszai. A 2. ábra Emanuel (1991) nyomán, a Carnot-ciklus részfolyamatait mutatja az idealizált, tengelyszimmetrikus hurrikán metszeti képén.

(*a* → *c*) A meleg tengerfelszín jó közelítéssel állandó hőmérsékleten tartja a levegőt, ami a konvergencia hatására elkezd beáramlani a hurrikán középpontja (*c* pont) felé. Az áramló levegő a hatalmas kiterjedésű óceán felett gyakorlatilag telítetté válik. A felszínen a konvergencia következtében már elkezdődik az örvénylő mozgás, ami a szinoptikus skálájú rendezett feláramlás alapvető feltétele.

(*c* → *o*) A telített meleg levegő az így kialakult áramlási rendszerben emelkedésbe kezd. Az emelkedő légréteg pályáját az abszolút impulzusmomentum megmaradása határozza meg [Emanuel, 1986], ugyanakkor a feláramlás jó közelítéssel nedves adiabatikus. Az adiabatikus feláramlásban a levegő lehül, csapadék képződik és heves zivatarok keletkeznek. A csapadékképződéskor, mint már említettük, hő szabadul fel, emiatt a ciklon magja meleg marad. Az emelkedő levegő mozgása lassul, kialakul a divergens zóna és a szétterülő levegő a kiáramlás során messze kerül a ciklon középpontjától (*o* pont). A sematikus kép szerint itt kezdődik az ereszkedő légmozgás és a hőleadás.

(*o* → *o'*) Ebben a magasságban a levegő jó közelítéssel azonos hőmérsékletű felhőelemek között tartózkodik, ráadásul a sztratoszféra alsó rétege miatt a hőmérséklet magassággal való változása igen csekély (itt vált előjelet a vertikális hőmérsékleti gradiens) és adott hőmérsékleten hőt ad le. Ezt a rövid szakaszt a modell szerint izotermikusnak tekintjük. Az izotermikus szakasz végét az *o'* jelöli.

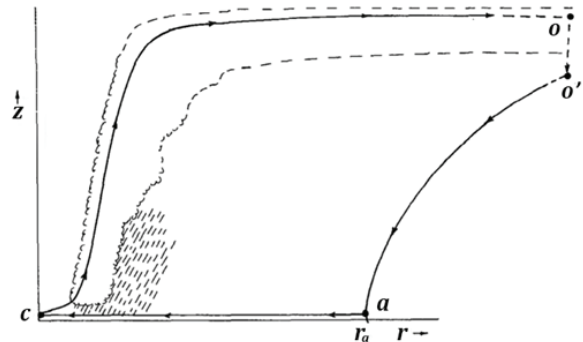
(*o'* → *a*) A körfolyamatot az *o'* *a* szakasz zárja. A levegő ezen adiabatikusan áramlik lefelé, ugyanakkor – hasonlóan a (*c* → *o*) szakaszhoz – az abszolút perđület megmaradása is teljesül.

A hurrikán Carnot-ciklusának hatásfoka. Amennyiben a valóságban nem lépne fel disszipáció illetve termodinamikai irreverzibilitás, akkor a kifejlett hurrikánban lévő levegőrészek ideális Carnot-ciklust írnának le, a körfolyamat hatásfokát az (1) összefüggés határozná meg.

A hurrikán esetén T_m (kb. 300 K) a meleg tengervíz hőmérséklete, míg T_h (kb. 200 K) a hideg hőtartálynak tekinthető tropopauza hőmérsékletét jelöli. Ideális esetben tehát ennek a ciklusnak a hatásfoka 1/3 lenne.

Érdekes azonban kissé részletesebben megvizsgálni a szokásos Carnot-gépek és a hurrikán Carnot-ciklusának sajátos vonásait. Az ideális Carnot-gépek két hőtartály között működnek, munkaközegük hőt vesz fel a meleg hőtartályból, és hőt ad le a hideg hőtartálynak. A kettő különbségét alakítja a gép valamilyen külső közegen végzett munkává. A Carnot-gépek hatásfoka azt mutatja meg, hogy a hőerőgép a felvett hőnek mekkora hányadát konvertálja munkává. Ebben az esetben azonban a ciklusban keletkezett munka a munkaközeg rendezett kinetikus energiájaként jelenik meg. A hőt maga a munkaközeg veszi fel és fordítja a levegő drift (vándorlási) sebességének növelésére. Figyelembe kell venni továbbá,

hogy a hurrikán forgásának stacionárius szakaszában a levegő mozgása azonban néhány napra jó közelítéssel stacionáriussá válik, azaz a disszipáció felemészti a



2. ábra: A hurrikán, mint Carnot-gép

munkát. Ekkor a szélesség maximálissá válik és további kinetikus energia produkció nem jelenik meg a rendszerben. Amit a hurrikán termel, az azonnal disszipálódik.

Ezeket a problémákat elegánsan elfedi az, hogy az idealizált Carnot-körfolyamat végtelen lassan megy végbe, valódi teljesítmény tehát nem határozható meg.

Emanuel egyszerű modellje. A trópusi ciklonok életének érett szakaszában, mint említettük a felszíni szél már nem erősödik tovább, ilyenkor jó közelítéssel egyensúlyi áramlásról beszélhetünk. Emanuel (1986) tengelyszimmetrikus (az egyik horizontális koordináta mellőzését alkalmazó) modelljében a gradiens szél közelítést alkalmazta. Felhasználva, hogy a levegő emelkedése olyan adiabatikus folyamat, amelynek során az abszolút impulzusmomentum is megmarad, kapcsolatot talált a két hőtartály hőmérséklete és a hurrikán struktúrája, alakja között és egyszerű becslést adott a hurrikán maximális szélességére.

A szél erőssége általában a hurrikán középpontjához közel a határreteg tetején veszi fel maximumát, amit a mérések is alátámasztanak. A határreteg tetején mérhető szélesség azért fontos, mert jól mutatja, hogy mekkora kinetikus energia disszipálódik, amikor a hurrikán a sima vízfelszínről a szárazföld fölé érkezik. Ez a hirtelen energia disszipáció hatalmas pusztítással járhat.

A maximális szélességre vonatkozó számítások bonyolultak (Bister and Emanuel, 1998), ezért itt csak a legfontosabb eredményeket foglaljuk össze. Emanuel az abszolút impulzusmomentum és a telített nedves levegő ekvivalens potenciális hőmérsékletének radiális irányú megváltozását fejezte ki és az utóbbi mennyiséget értelemszerűen megfeleltette az entrópiának. Ezek átalakításával, valamint Ooyama (1969) határreteg lezárási módszerének alkalmazásával a határreteg tetején mérhető maximális szélesség négyzetére, azaz az egységnyi légtömeg kinetikus energiájára a

$$\frac{1}{2} V^2 = \frac{T_m - T_h}{T_m} \frac{1}{2} \frac{C_k}{C_D} (k^* - k) \quad (2)$$

becslést kapta, ahol k^* és k a tengerfelszín feletti telített nedves levegő, illetve a határretegbeli levegő fajlagos en-

talpiája, C_D és C_K a momentum és az entalpia kicserélődési együtthatói. A (2) egyenlet, bár levezetése nem egyszerű, fizikailag könnyen értelmezhető. Az egyenlet bal oldalán az egységnyi tömegű légtömeg kinetikus energiája áll, míg a jobboldal a felvett hő és a Carnot-hatásfok szorzata. A hurrikán Carnot-gépként történő felfogását ez jól indokolja, hiszen a levegő kinetikus energiája éppen a munkavégzést jelenti.

Az Emanuel-féle gondolatmenet itt úgy működik, mintha a Carnot-körfolyamat a stacionárius szakasz kezdetéig tartana, addig semmiféle disszipáció nem történne, így a felvett hőből kinetikus energiává konvertálódó rész éppen a maximális kinetikus energiát jelentené.

A „Supercane” (a hurrikánok leírása disszipáció figyelembevételével). A fenti tetszetős képet azonban elrontja, hogy a határreteg sem áramlástanilag, sem termodinamikailag nem ideális. A reverzibilis Carnot-körfolyamat kvázisztatikus, ami azt jelenti, hogy a ciklus végtelen hosszú idő alatt zajlana le. A hurrikán azonban folyamatosan „termeli” a kinetikus energiát, amelynek egy része a sűrűlódás hatására folyamatosan disszipálódik. A stacionárius szakaszban a disszipált energia megegyezik a termelt energiával. A hurrikánban végbemenő disszipációs folyamat azért különleges, mert a disszipált energia a meleg hőtartályba kerül vissza hő formájában.

Ennek alapján Bister és Emanuel érdekes következtetésre jutott. (*Bister and Emanuel*, 1998). Úgy gondolták, hogy mivel a határretegben fellépő disszipáció következményeként, a felvett hő a meleg hőtartályba (tenger) jut vissza, a hatásfok számításakor ezzel csökkenteni kell a felvett hőt.

Az összes felvett hő ebben az esetben tehát nem más, mint a tengerből felvett és a disszipált hő különbsége. Minthogy a stacionárius szakaszban a teljes munka disszipálódik, a felvett hőt a munkavégzéssel kell csökkenteni. Összességében tehát felírhatunk egy hatásfokhoz hasonló, η' -val jelölt összefüggést, ahol a felvett hő helyére beírjuk a felvett hő és a munka különbségét:

$$\eta' = \frac{W}{Q_f - W} = \frac{1}{\frac{Q_f}{W} - 1} = \frac{1}{\frac{T_m - T_h}{T_m - T_h} - 1} = \frac{T_m - T_h}{T_h} \quad (3)$$

Ezzel a hatásfokkal Bister és Emanuel megismételte a maximális szélességre vonatkozó számítását és nem meglepő módon azt kapta, hogy a szélesség képletben a Carnot-hatásfok helyére η' -t kell írni:

$$V^2 = \frac{T_m - T_h}{T_h} \frac{C_k}{C_D} (k^* - k) \quad (4)$$

Az $\eta' = \frac{T_m - T_h}{T_h}$ hatásfokot *Bister and Emanuel* (1998) *supercarnot*-hatásfoknak nevezte, amellyel a hurrikánok maximális szélességére adott becslés eredeti értéke éppen $\sqrt{\frac{T_m}{T_h}}$ szorosára nő. $T_m = 300$ K, és $T_h = 200$ K mellett $\sqrt{\frac{3}{2}}$ -szeresére.

Lehetséges-e a supercarnot-folyamat? A supercarnot hatásfok heves vitát váltott ki, hiszen azonnal látszik,

hogy a fogalom számos problémát rejt magában. A supercarnot-hatásfok csak abban különbözik a Carnot hatásfoktól, hogy nevezőjében a Carnot-hatásfokkal szemben nem a meleg, hanem a hideg hőtartály hőmérséklete áll. Ez a hurrikánok hőmérsékleti körülményei között látszólag nem jelent problémát, ha azonban a hideg hőtartály hőmérséklete tart a nullához (a hőtartályt egyre közelebbinek tekintjük a világűrhez), akkor a supercarnot-hatásfok végtelenhez tart. Ez azt jelenti, hogy η termodinamikai értelemben nem lehet hatásfok.

A hatásfok kérdését kissé mélyebben vizsgálva felmerül a kérdés, hogy a disszipált hő figyelembevételekor miért csak a felvett hőt módosítjuk, miért nem tesszük meg ezt a munkavégzéssel is, hiszen a hurrikán stacionárius szakaszában már nincsen kinetikus energiatermelés.

Lényegében az utóbbi érv mentén fogalmazta meg kritikáját *Makarieva and Gorshkov* (2010), amikor a disszipációs elmélet termodinamikai háttérét mélyen elemezve arra a következtetésre jutott, hogy Bister és Emanuel gondolatmenete sérti a termodinamika törvényeit. Szerintük a stacionárius folyamatra vonatkozóan a disszipált hő visszatáplálása miatt a munkavégzés is zérus lesz, ezért értelmetlen a hurrikánokat Carnot-körfolyamattal modellezni.

Ezt az érvet Emanuel és munkatársai a munkavégzés és a disszipáció folyamatát jól elválasztó elméleti konstrukcióval cáfolták (*Bister et al.*, 2011). Tekintsük úgy a hurrikán és a felszín kölcsönhatását, hogy nincsen sűrűlódás, helyette azonban a hurrikán területén kialakuló széllel szélkereket hajtunk, s a szélkerék által végzett munka teszi állandóvá a hurrikánban a szélességet. Ezután a szélkerékkel áramot fejlesztünk, amivel hősugárzót működtetünk. A hősugárzóval pedig a tengervizet fűtjük. Ez a konstrukció a munkavégzést és a munka disszipációját elválasztja egymástól, és a hagyományos termodinamikai terminológiával jól követhetővé teszi a hurrikán által folyamatosan disszipált kinetikus energiát (3. ábra).

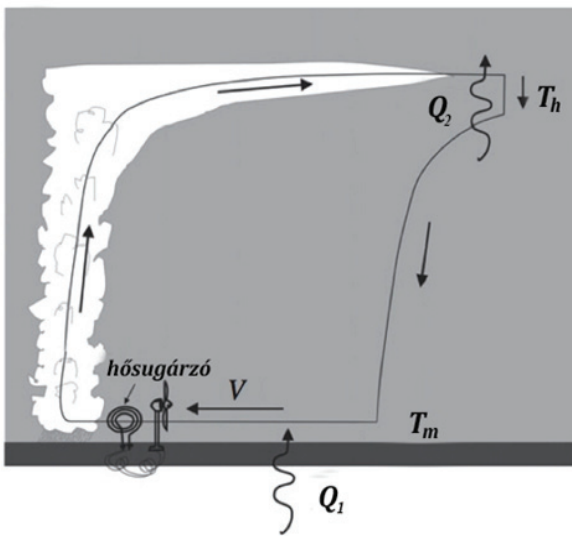
Ez az érv azonban semmiképpen sem vezethet a supercarnot-folyamatok létezésének elfogadásához, hiszen a supercarnot-hatásfok 1-nél nagyobb is lehet, ami fizikailag elfogadhatatlan.

Endoreverzibilis hőerőgépek. A hurrikánok termodinamikájának tárgyalásakor mindeddig nem vettük figyelembe a hőcserék irreverzibilitását és azt, hogy a folyamatok nem végtelen lassúak. A Carnot-ciklusban mindkét probléma kezelhetővé válik az endoreverzibilis termodinamika eszközeinek felhasználásával. *De Vos*, (1981) részletesen tárgyalja az endoreverzibilis Carnot-ciklus leírását.

Ahhoz, hogy a két hőtartályos hőerőgépek a gyakorlatban működhessenek, azaz a körfolyamat véges idő alatt menjen végbe, a hőfelvétel és a hőleadás során a munkaközeg hőmérséklete nem lehet azonos a megfelelő hőtartály hőmérsékletével.

A valós folyamatban a munkaközeg hőmérséklete a hőfelvétel során alacsonyabb ($T_h > t_h$) illetve hőleadás során magasabb ($t_m > T_m$) mint a megfelelő hőtartályé (4. ábra). Ezek a folyamatok tehát irreverzibilisek. A reverzibilis Carnot-ciklusban a reverzibilitási feltétel ki-

mondja, hogy a körfolyamatban a redukált hő összege zérus (a felvett hő és a meleg hőtartály hőmérsékletének hányadosa megegyezik a leadott hő és a hideg hőtartály hőmérsékletének hányadosával). A módosított körfolya-



3. ábra: A hurrikán által disszipált kinetikus energia

matban ez a feltétel nem teljesül, ha a hőtartályok hőmérsékletét használjuk a redukált hő kiszámításakor. Kézenfekvőnek tűnik, hogy a reverzibilitási feltételt a munkaközeg hőmérsékletével írjuk fel.

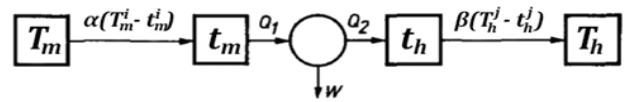
$$\frac{Q_1}{t_m} - \frac{Q_2}{t_h} = 0 \quad (5)$$

Ahogy a 3.ábráról is kiderül, az endoreverzibilis termodinamikai leírás során a hőtartályok és a munkaközeg közötti hőátadás mechanizmusát is meg kell adnunk. Egyszerűsége miatt kézenfekvő a hővezetési törvényt használni, azonban légköri folyamatok során ez nem mindig fedi a valóságot. A 3.ábra univerzális formulát tartalmaz, mellyel De Vos hőcserék leírására vonatkozó gondolatmenetét követhetjük végig.

Nézzünk rá a 3.ábrára, ahol i és j értékei szerint különböző típusú hőcsere lehetőségeket jellemezhetnek (De Vos 1981). Értékeik lehetnek $-1, 0, 1, 2, 3, 4$ és $+\infty$. A légköri modellek esetében plauzibilis feltevés, hogy csak a hővezetés (i vagy $j = 1$) és a hősugárzás (i vagy $j = 4$) jöhet szóba. A hőcsere általános egyenleteiben megjelenő α és β paraméterek értelemszerűen függenek a feltételezett hőcsere típusának választásától. Ezeknek a paramétereknek az együtthatókon (pl. Stefan-Boltzmann együttható) túl a hőcserében szerepet játszó felület nagyságát és a hőcsere időtartamát is tartalmazniuk kell. Megjegyezzük továbbá, hogy az i és $j = +\infty$ esetén visszkapjuk a reverzibilis Carnot-gép működésének leírását. Ez a leírás azonban két új ismeretlent (a munkaközeg hőfelvételi és hőleadási hőmérsékletét) vezet be a folyamat leírásába. Ezeket a változókat önkényesen illeszthetjük a természeti, vagy ipari folyamathoz. Amennyiben pontos illesztést akarunk választani, akkor a folyamat részleteibe kell belemenünk. A folyamat részleteinek ismerete nélkül is találhatunk azonban természetes kritériumot ezekre a hőmérsékletekre, ha a körfolyamat által adott teljesítményt kíván-

juk maximalizálni. A maximális teljesítményhez tartozó hőmérsékleti értékek nem biztos, hogy megvalósíthatók az adott folyamatban, de felső korlátot szabnak a hőerőgép használhatóságára.

Ha definiáljuk a hőcserék típusát, lehetőség nyílik arra, hogy meghatározzuk a maximális teljesítményt, amivel megbecsülhető az egy ciklus alatti munka. E cikk szerzői feltették, hogy a tengerfelszín és a fölötte áramló levegő



4. ábra: Az endoreverzibilis Carnot-gép sematikus képe, ahol T_m és T_h a hőtartályok, míg t_m és t_h a munkaközeg hőmérséklete amikor érintkezik a megfelelő hőtartállyal.

hőmérséklete jó közelítéssel azonos, azonban a hideg hőtartály és az adott hőmérsékleten hőt leadó légréteg közötti hőcsere hőmérsékleti sugárzás útján jön létre. Ez a fentiek értelmében ekvivalens azzal, hogy $i = +\infty$ és $j = 4$. E feltételek mellett, ha az óceán 300 K hőmérsékletű, azt kaptuk, hogy a ciklus alatti maximális munka akkor maximális, ha a magasban kisugárzó levegő hőmérséklete körülbelül 228 K . Ez az eredmény egy újabb, feltehetőleg valóságosabb becslést ad a hatásfokra, ami kb. $1/4$.

Összefoglalás. Ebben az írásban ismertettük a hurrikánok termodinamikájának elméleti leírását, kiemelt figyelmet szentelve a Carnot-ciklussal történő leírásnak. Az egy ciklus alatt termelt kinetikus energia becslése több ponton problémásnak bizonyult, Makarieva és Emanuel között érdekes vita zajlott, melynek főbb részleteiről beszámoltunk. A vitából okulva végül új javaslatot tettünk az idealizált hurrikán által egy ciklus alatt termelt maximális kinetikus energia becslésére.

Irodalom

- Bister, M. and Emanuel, K. A., 1998: Dissipative heating and hurricane intensity. *Meteor. Atmos. Phys.* 50, 233–240
- Bister, M., Renno N., Pauluis O. and Emanuel. K. A., 2011: Comment on Makarieva et al. 'A critique of some modern applications of the Carnot heat engine concept: the dissipative heat engine cannot exist'. *Proc. R. Soc. A.* 467, 1–6
- Budó, Á., 1977: Kísérleti fizika I. Tankönyvkiadó, Budapest.
- De Vos, A. 1981: Efficiency of some heat engines at maximum-power conditions. *Am. J. Phys.* 53, 570–573.
- Emanuel, K. A., 1986: An air–sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady- state maintenance. *J. Atmos. Sci.*, 43, 585–605.
- Emanuel, K. A., 1989: The finite-amplitude nature of tropical cyclogenesis. *J. Atmos. Sci.* 46, 3431–56
- Emanuel, K. A., 1991: The theory of hurricanes. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 23, 179–196
- Makarieva, A. M., Gorshkov, V. G., Li, B.-L. and Nobre, A. D., 2010: A critique of some modern applications of the Carnot heat engine concept: the dissipative heat engine cannot exist. *Proc. R. Soc. A* 466, 1893–1902.
- Ooyama, K., 1969: Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones. *J. Atmos. Sci.* 26, 3–40