

Szezonális hőtároló rendszer lehűlési folyamatának számítógépes modellezése

HORVÁTH Tibor¹, PÁSZTORY Zoltán¹

¹ NymE FMK Innovációs Központ

Kivonat

E tanulmányban elvégeztük egy virtuális, lakáscélú passzívházban elhelyezett szezonális, szenzibilis hőtároló rendszer lehűlési folyamatának számítógépes modellezését. A hőtömbnek elnevezett rendszer hőtani jellemzőinek számítása és elemzése (pl. az átlaghőmérséklet és a hőveszteség időbeli változása, a teljes hőveszteség nagysága) végelem módszerrel történt, megadott feltételek mellett. Kiszámítottuk és grafikonon ábrázoltuk az épület fűtését fedező tömbből kinyert hőenergia, valamint a konvektív felületi és lefelé irányuló hőveszteségek nagyságát és arányát. Megállapítottuk a modell elméleti korlátait és a hőtároló tömb alkalmazhatóságának körülményeit. A fűtési időszakban rendelkezésre álló napenergia felhasználásával, a vizsgált hőtároló rendszer alkalmas lehet egy passzív lakóépület fűtési energia igényeinek fedezésére.

Kulcsszavak: passzívház, hőtömb, szezonális hőtároló, szenzibilis hőtároló, TES, végelem módszer

Computer modeling of the cooling process of a seasonal heat storage system

Abstract

In this study, the cooling process of a seasonal, sensible thermal energy storage (TES) system placed in a virtual passive home was computer-modeled. With given conditions, the thermal characteristics (e.g. change of average temperature and heat loss over time, overall heat loss) of the TES system called the "heat container" were computed and analyzed, using finite element method. Quantity and the ratio of recovered heat for heating the building to the heat losses over the convective surface and through the base were calculated and plotted. The limitations of the model, and the circumstances of the applicability of the heat container were discussed. Utilizing solar energy available in the heating period, the examined thermal energy storage system may be able to cover the heating demands of a passive house.

Key words: passive house, heat container, seasonal heat storage system, sensible heat container, thermal energy storage, finite element method

Bevezetés

Napjainkban az épületek tervezésekor figyelembe vett tényezők közül egyre nagyobb hangsúlyt kap az üzemszerű működést jellemző energiamérleg becslése, számítása. Ennek létjogosultsága nem vitatható, tekintve, hogy az épületek éves energiafogyasztása általában jelentős részét teszi ki egy ország teljes energiafelhasználásának (Gordon és Holness 2008). Az Európai Unióban ezt az értéket 40%-ra becsülik, emellett az éves szén-dioxid kibocsátás 30%-át is az épületekhez kötik (European Commission 2005). Az elsődleges energiafelhasz-

nálást jelenleg döntően a fosszilis tüzelőanyagok fedezik (Fantazzini et al. 2011), melyekből számos fejlett ország jelentős importra szorul, s nem hanyagolható el a fejlődő országok növekvő igénye sem (Nuttall és Manz 2008). Ugyanakkor a fosszilis tüzelőanyagok hosszú távú elérhetősége erősen kérdéses (Nashawi et al. 2010), sőt egyes tanulmányok szerint a fosszilis tüzelőanyagok jelentős részét adó olaj kitermelésének üteme 2004-ben elérte a maximumát (Fantazzini et al. 2011). Mindeközben hosszú távon az energiaárak folyamatos emelkedése figyelhető meg, mely tendencia a jövőben várhatóan

még kedvezőtlenebbül alakul majd (Shafiee és Topal 2010). Nem elhanyagolható a fosszilis tüzelőanyagok elégetése során a légkörbe kerülő szén-dioxid üvegházhatást fokozó szerepe sem, melynek korlátozása egyik alapvető szempontja a fenntartható fejlődésnek. A felmerülő problémákra megoldást jelenthet a megújuló energiaforrások kiaknázása, bár ezek szerepe az energiaiparban még alacsonynak mondható (Fantazzini et al. 2011).

Az épületek üzemeltetése okozta „ökológiai lábnyom” csökkentése érdekében törekednünk kell az épületek energiahatékonyságának növelésére. Az Európai Unió 2010/31/EU 2010 direktívája szerint 2020 végéig el kell érni, hogy minden új épület nagyon alacsony vagy közel zéró energiaigényű legyen. Európában – ahol a lakóépületek fűtési és melegvíz-előállításra célú energiafogyasztása azok teljes energiafelhasználásának 82%-át is kiteheti (Linder és Bhar 2007) – az energiamérleg javításának az egyik legelterjedtebb és leghatékonyabb módja az épületszigetelés javítása. E téren napjainkban is számos kutatást végeznek, például a konvekció hatásának csökkentése (Al-Hazmy 2010, Baïri 2008), illetve a reflektív szigetelőanyagok használata tekintetében (Saber 2012).

Az épületek fűtéséhez szükséges energia előállítására hosszú távon célszerűnek tűnik a megújuló energiaforrások (nap- és szélenergia, geotermikus energia) használata. Ezek közül Magyarországon a napenergia többnyire megfelelő mennyiségben áll rendelkezésre, azonban az év során eltérő mértékben: nyáron általában nagyobb, télen kisebb a besugárzás nagysága. Ugyanakkor, mint közismert, a fűtési igény az utóbbi időszakban jelentkezik fokozottan, s az ekkor hasznosítható napenergia sok esetben nem fedezi a fűtési energiaigényt. A nyáron jelentkező energiátöbblet fűtési időszakban történő hasznosításához szükséges tehát valamilyen hőtároló mechanizmus alkalmazása, mely biztosítja az elérhető napenergia lehető legteljesebb mértékű kihasználását. Az 1940-es évektől kezdve számos próbálkozás történt ilyen szezonális hőtároló (thermal energy storage, röviden TES) rendszerek kifejlesztésére. A témának jelentős szakirodalma van, több összefoglaló jellegű művel (Dincer és Rosen 2011, Agyenim et al. 2010, Pinel et al. 2011). E rendszerek csoportosítása általában az energiátárolás elve alapján történik: megkülönböztetnek (termo-) kémiai, látens és szenzibilis hőtároló rendszereket (Dincer 2002). Az első esetben a hőtárolás

egy adott, irányított kémiai folyamathoz kötődő energiaváltozásra támaszkodva valósul meg. A második esetben valamilyen fázisváltó anyag halmazállapot-változását kísérő hő elnyelődésén illetve felszabadulásán alapszik a hőtárolás. A szenzibilis hőtárolókban a rendszer hőmérsékletének emelésével érhető el a többlet energia tárolása. A három típus közül a szenzibilis hőtárolók a legolcsóbbak, mivel tároló közegük általában víz vagy kő, ugyanakkor ezeknél érhető el a legkisebb energiasűrűség. A viszonylag nagy működési hőmérséklet-tartományok miatt, az elérhető legkisebb felület-térfogat arány mellett, a lehető legjobb szigetelés kialakítására is ügyelni kell, így minimalizálva a nem kívánt hővesztéséget (Pinel et al. 2011). A hőtároló rendszerek méretezését napjainkban jelentősen megkönnyíti a számítógépes modellezés lehetősége, mely olyan előnyökkel bír, mint az ismételhetőség, a paraméterezhetőség és az alacsony költségvonzat. E tanulmány célja egy szezonális, szenzibilis hőtároló rendszer – a továbbiakban: hőtömb – energiavesztésének számítógépes modellezése a fűtési időszakra vonatkozóan, adott feltételek mellett, s annak megállapítása, hogy milyen körülmények között van létjogosultsága a rendszer alkalmazásának.

Modellezés és módszer

A modellezés során egy 120 m²-es passzív házból indultunk ki, két különböző fűtési energiaigénnyel: 12 és 6 kWh/m²/év értékkel. Ebből következően, a teljes épület fűtési energiaigénye 1440 illetve 720 kWh/év, melynek biztosítását teljes mértékben a szezonális hőtároló rendszerre bíztuk. A fűtési idény hosszát 150 napnak vettük, és az épület éves fűtési energiaigényét kizárólag erre az időszakra vetítettük. Feltételeztük, hogy a fűtési idény során, a hőtömbből egyenletes mértékű hőkinyerés történik, ebből következőleg az energia kivétel nagysága folyamatosan 400, illetve 200 W volt.

A hőtömb viselkedésének modellezését a COMSOL Multiphysics 4.0 végelem szoftver segítségével végeztük. A tömb téglalap alakú, szilárd, szilikát alapú hőtároló magja 4,20 m hosszú, 1,40 m széles és 1,95 m magas volt, mely körül egy háromrétegű szigetelőrendszer helyezkedett el. A rétegvastagságok belülről kifelé haladva 0,10 m, 0,28 m és 0,21 m, anyaguk ugyanebben a sorrendben: WDS Ultra, FOAMGLASS, illetve PIR. Az egyes anyagok hőtani jellemzői az 1. táblázatban olvashatók. A legtöbb esetben az anyagjellemzőket állandónak feltételeztük, a FOAMGLASS hő-

vezetési tényezője azonban nagyfokú hőmérsékletfüggést mutat, így ebben az esetben függvényt adtunk meg. A nedvességtartalom anyagtulajdon-ságra és geometriára gyakorolt hatását, valamint a kontakt hőellenállást elhanyagoltuk (tökéletes geometriát és az egyes szerkezeti elemek között tökéletes illeszkedést vettünk figyelembe).

1. táblázat A hőtömb szerkezeti elemeinek hőtani tulajdonságai
Table 1 Thermal properties of the structure elements of the heat container

Szerkezeti elem	ρ [kg/m ³] ^a	C_p [J/kgK] ^b	λ [W/mK] ^c
Hőtömb magja	2285	810	1,5
1. szigetelőréteg (WDS Ultra)	230	800	0,020
2. szigetelőréteg (FOAMGLASS)	105	840	$\lambda_F(T)^*$
3. szigetelőréteg (PIR)	30	1400	0,022

^a sűrűség, ^b fajhő, ^c hővezetési tényező

$$* \lambda_F(T) [\text{W/mK}] = 0,04497847 + 1,480487 \cdot 10^{-4} \cdot T [^\circ\text{C}] + 2,273659 \cdot 10^{-7} \cdot (T [^\circ\text{C}])^2$$

A modellben feltételeztük, hogy a hőtömb az épületen belül kerül elhelyezésre. A tömb függőleges oldalain és tetején ennek megfelelő konvektív hűtést számítottunk, 20 °C léghőmérséklettel és 5 W/m²K hőátadási tényezővel (másodfajú peremfeltétel). A sugárzásos hővesztés külön történő modellezésétől eltekintettünk, figyelembe véve, hogy a hatékony szigetelőrendszernek köszönhetően, a hőtároló rendszer felületi hőmérséklete a környezetétől nem tér el jelentősen, valamint a külső szigetelőréteg alacsony emisszivitású bevonattal van ellátva. A hőtömb egy 0,2 m vastagságú alaplemezzel került elhelyezésre, melynek vízszintes méretei minden irányban 0,2 m-rel meghaladták a tömb méreteit. Az alaplemez és a tömb közötti szigetelés ugyan olyan rétegrenddel lett kialakítva, mint a tömb oldalain. Az alaplemez feladata a tömb súlyának egyenletes elosztása az épület alapján. Alsó és oldalsó lapjain állandó 15°C-os hőmérsékletet vettünk figyelembe (elsőfajú peremfeltétel), a felső szegélyén a fent említett konvektív hűtést adtuk meg. A hőtömb és alaplemez között tökéletes illeszkedést feltételeztünk.

Az időben változó modellezéshez szükséges, kiinduló hőmérsékleti állapot megadását stacioner modellezéssel végeztük, melyet nevezhetünk „előfűtésnek”. Ennek során a hőtároló rendszer felfűtését

egy 3,00 m hosszú, 0,70 m széles, 0,05 m vastag vízszintes fűtőlappal valósítottuk meg, melyet 0,075 m-rel a hőtömb magjának vízszintes felezősíkjá fölötte, középen helyeztünk el. Ennek hőmérséklete 200°C volt. A hőtömbben egyensúlyi állapotban kialakult hőmérséklet- és hőáram-mező jelentette az időben változó modell kiindulási állapotát.

A hőtároló rendszer kihűlésének modellezésekor feltételeztük, hogy a hőtömbbe nem történik energia utánpótlás, hanem kizárólag abból a hőmennyiségből próbáljuk meg fedezni az épület fűtési energia igényét, amit az „előfűtéskor” a tömbbe juttattunk. A hőkivétel a tömb magjának a felső részén, a mag és a szigetelés közötti határfelület mentén, egyenletes eloszlással történt, a korábban említett állandó 400, illetve 200 W teljesítménnyel. A szimulációt addig futtattuk, míg a tömb magjának átlaghőmérséklete el nem érte az általunk még elfogadhatónak ítélt 30°C-os küszöbértéket.

A végelem-modellezés részét képező hálógenerálás során kvadratikus, tetraéder térfogatelemeket alkalmaztunk. A hálófelbontást addig növeltük, míg a stacioner modellezés során, a hőtömb felületén fellépő konvektív hővesztés nagyságában a relatív eltérés (két különböző hálózás eredménye között) 0,001-re nem csökkent (0,1%-os eltérés).

Eredmények

A modellezés során vizsgáltuk a hőtömb magjára számított átlaghőmérséklet alakulását és a hőtároló rendszer hőenergia-vesztését az idő függvényében. Utóbbi három formában jelentkezik:

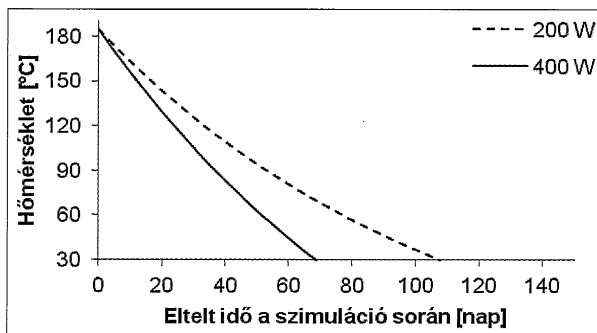
- az épület fűtési energiaigényét fedező *kinyert hő*,
- a hőtömb szabad felületén fellépő konvektív *hővesztés*,
- a tömb alján az alaplemez irányába távozó *talapzati hővesztés*.

A szimuláció alapján megállapítható, hogy 400 W teljesítményű hőkivétel mellett 69 napig, míg 200 W esetén 108 napig biztosítja a hőtömb az épület fűtési energia igényét, mielőtt a hőtároló mag átlaghőmérséklete eléri a küszöbértéket (1. ábra).

A hőtömb alaplemezzel érintkező alsó felületén, valamint a levegővel határos szabad felületén fellépő talapzati, illetve konvektív hőáram nagyságának időbeli változása a 2. ábrán követhető nyomon. Kezdetben a konvektív és talapzati hővesztés aránya 4,12, ami nincs messze a hőtömb konvektív felületének és alsó lapjának felszínarányától (4,59). Az idő előre haladtával, a tömb hűlése miatt, a talapzati és konvektív hőáramok nagysága egyaránt

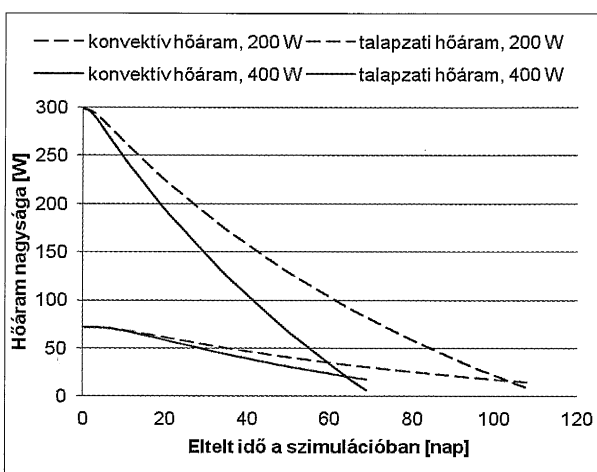
csökken, azonban az utóbbi nagyobb ütemben. Ez annak tudható be, hogy a hőkivétel a tömb felső részén történik, mely így gyorsabban hűl le, mint az alsó, és tekintve a hőtömb magjának alacsony hővezetési tényezőjét, a hőkiegyenlítődési folyamat túl lassú. A szimuláció végén a konvektív és talpazati hőáramok aránya, 400 W teljesítményű hőkivétel mellett 0,38, 200 W esetén 0,62.

Az átlagos hőáramsűrűségek tekintetében, a szimuláció végén még nagyobb eltéréseket kapunk. Kezdetben, a hőtömb konvektív felületére számított átlagos hőáramsűrűség ($4,68 \text{ W/m}^2$) és a tömb alsó felületére számított átlagos talpazati hőáramsűrűség ($5,22 \text{ W/m}^2$) aránya 0,90. A szimuláció végén, 400 W teljesítményű hőkivétel mellett a konvektív ($0,11 \text{ W/m}^2$) és talpazati ($1,29 \text{ W/m}^2$) átlagos hőáramsűrűség aránya 0,09. Amennyiben 200 W teljesítményű hőkivétel tör-



1. ábra A hőtömb magjának átlaghőmérséklete a szimuláció idejének függvényében

Figure 1 Average temperature of the core of heat container during the simulation period



2. ábra A talpazati és a konvektív hőáram nagyságának változása az idő függvényében 200 és 400 W teljesítményű hőkivétel mellett

Figure 2 Base and convective heat transfer change over time for a heat recover rate of 200 and 400 W

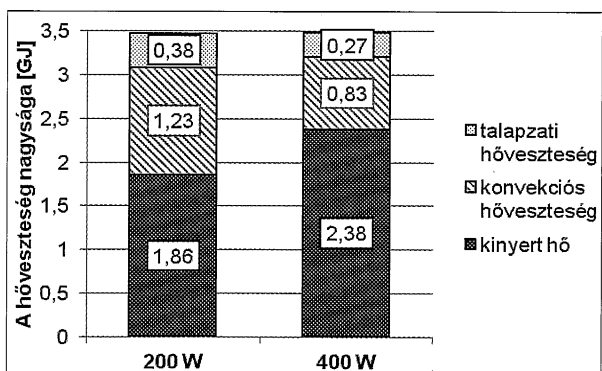
ténik, a konvektív ($0,14 \text{ W/m}^2$) és talpazati ($1,05 \text{ W/m}^2$) átlagos hőáramsűrűség aránya 0,13-ra csökken a modellezés végére.

Ha összehasonlítjuk a 400 W és 200 W teljesítményű hőkivétel során fellépő hőveszteségeket, azt látjuk, hogy mindkét esetben megközelítőleg ugyanakkora mennyiségű hőenergia távozik a hőtömbből a szimuláció végére, vagyis amikor a tömb magjának átlaghőmérséklete eléri a 30°C -ot (3. ábra). Az eltérés a kinyert és a veszteségként jelentkező hő arányában mutatkozik: az intenzívebb hőkivétel összességében nagyobb arányú hasznos hőt jelent. 400 W esetén a teljes hőveszteség 68,4%-a, 200 W mellett 53,6%-a a kinyert hő, a többi a tömb felületén távozik. Ugyanakkor nagyobb mértékű hőkivételkor a hőtömb rövidebb ideig képes biztosítani az épület fűtési energia szükségletét.

Következtetések

A modellezés szerint, a vizsgált nagyságú hőkivételeket tekintve, a hőtömb a tervezett 150 napnál kevesebb ideig képes fedezni az épület fűtési hőigényét, a megadott feltételekkel. Emellett a szimulációban feltételezett állandó teljesítményű hőenergia-kivétel valós körülmények között nehezen kivitelezhető, mivel a folyamat hajtóerejét jelentő hőmérséklet-különbség az idő során csökken. Így várhatóan a kinyert és a veszteség-hő aránya a számítottnál valamivel kisebb. Felhívjuk azonban a figyelmet, hogy a modell nem számolt a kontakt hőellenállással, mely a hőtároló rendszer szerkezeti elemei között fellép, s csökkenti a nem kívánt hőveszteséget.

Bár a peremfeltételek felállításakor úgy tekintettük, hogy a hőtömb az épületen belül kerül elhelye-



3. ábra A hőtömb energiavesztesége a szimuláció végére a vizsgált esetekben

Figure 3 Total energy loss of heat container by the end of the simulation for the examined cases

zésre, ezt a szempontot a hasznos hő számításakor figyelmen kívül hagytuk. Ugyanakkor a tömb szabad felületén fellépő konvektív hőveszteség is közvetlenül az épületben hasznosul, így valódi veszteségként csak a talapzati hőveszteség jelentkezik. Ez kezdetben kisebb, az idő előre haladtával azonban a konvektív hőveszteséghez viszonyítva számottevővé válik, és összességében sem elhanyagolható nagyságú: a tömb teljes hőveszteségének – beleértve a kinyert hőt is – 11%-a, illetve 7,8%-a (200 W, illetve 400 W hőkinyerés esetén). A konvektív hőveszteség figyelembe vételével a hőtömbből történő hőkinyerés mértéke csökkenthető (az épület fűtési energia igényének változatlan biztosítása mellett), így a rendszer a számítottnál hosszabb ideig képes a fűtési energia igényt fedezni. Tekintetbe kell azonban azt is vennünk, hogy egy 200 W fűtési energia igényű épület esetén a konvektív hőveszteség nagysága az első 27 napban meghaladja az épület energiaigényét (közel 300 W-ról indul, ahogy az a 2. ábráról leolvasható), így ezt valamilyen módon ellensúlyozni kell a túlmelegedés elkerülése miatt. Ennek érdekében a hőtömböt az épülettől hőtechnikailag el kell választani, például a tömbnek az épület föld alatti helyiségében való elhelyezésével vagy kiszellőztetésével.

A modellezés során egy „előfűtött”, de a téli időszakban ráfűtés nélkül üzemelő hőtömb segítségével próbáltuk biztosítani a virtuális épület fűtési energia igényét. A modellezést egyenletes hőigény mellett végeztük el, és figyelmen kívül hagytuk az időjárás ingadozásából származó hőigény ingadozásokat. Ezen felül nem számoltunk az épületen belüli esetlegesen tervezett hőmérsékleti beállítások változásaival és a fűtési időnyben a környezetből kinyerhető energia mennyiségével sem. E két utóbbi tényező figyelembe vétele feltehetően kedvezőbbé teheti a hőtároló céljának elérését. A rendszer működésének modellszerű meghatározásához további tényezők figyelembe vétele is szükséges, melyeket későbbi publikációkban adunk majd közre.

Összefoglalva a modellezés eredményét megállapíthatjuk, hogy passzívházak esetén a megújuló energiaforrások alkalmazása szezonális hőtárolással kombinálva elméleti alternatívát kínál a téli hőigény kielégítésére.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Környezettudatos energia hatékony épület című, TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-

2012-0068 számú projekt támogatásával az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék

- Agyenim F., Hewitt N., Eames P., Smyth M. (2010) A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2): 615-628.
- Al-Hazmy MM. (2010) Numerical investigation on using inclined partitions to reduce natural convection inside the cavities of hollow bricks. *International Journal of Thermal Sciences* 49(11): 2201-2210.
- Baïri A. (2008) Nusselt-Rayleigh correlations for design of industrial elements: Experimental and numerical investigation of natural convection in tilted square air filled enclosures. *Energy Conversion and Management* 49: 771-782.
- Dincer I. (2002) On thermal energy storage systems and applications in buildings. *Energy and Buildings*, 34(4): 377-388.
- Dincer I., Rosen MA. (2011) *Thermal Energy Storage: Systems and Applications*. Wiley, Second Edition, ISBN 978-0-470-74706-3.
- Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32010L0031:EN:NOT>, megtekintve: 2012. november 22.)
- European Commission (2005) *Report on the Green Paper on Energy or Doing More With Less*. Brussels.
- Fantazzini D, Höök M, Angelantoni A (2011) Global oil risks in the early 21st century. *Energy Policy* 39(12): 7865-7873.
- Gordon VR., Holness RE. (2008) Improving Energy Efficiency in Existing Buildings. *ASHRAE Journal*, 50: 12-26.
- Linder S., Bhar R. (2007) Space conditioning in the residential sector in Europe. Deliverable 1, Ground Reach EU project, Ecofys.
- Nashawi IS., Malallah A., Al-Bisharah M. (2010) Forecasting World Crude Oil Production Using Multicyclic Hubbert Model. *Energy & Fuels* 24(3): 1788-1800.
- Nuttall WJ., Manz DL. (2008) A new energy security paradigm for the twenty-first century.