

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

A termikus komfort előrejelezhetőségének vizsgálata az ECMWF determinisztikus modell felhasználásával

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Lupták Dóra

Meteorológus MSc

Időjárás-előrejelző szakirány

Témavezetők:

Németh Ákos

Országos Meteorológiai Szolgálat

Büki Richárd

MH Geoinformációs Szolgálat

Tanszéki konzulens:

Dr. Pongrácz Rita

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Az emberi test hőháztartása.....	5
2.1. A szervezet hőszabályozása.....	5
2.2. A szervezet energia-egyenlege.....	7
3. Bioklíma indexek.....	10
3.1. Empirikus indexek.....	11
3.1.1. ET – Effektív hőmérséklet.....	11
3.1.2. WBGT – Nedves gömb hőmérséklet.....	11
3.1.3. KH – Komfort hőmérséklet.....	13
3.1.3.1. A KH hőérzeti tartományainak meghatározása.....	13
3.1.4. THI – Termohigrometrikus index.....	15
3.1.5. HI – Hőség index.....	15
3.1.6. WCT – Szél csípősségi hőmérséklet.....	16
3.2. Racionális indexek.....	16
3.2.1. PET – Fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet.....	17
3.2.2. UTCI – Univerzális termikus klíma index.....	17
4. Adatok és vizsgálati módszerek.....	20
4.1. A felhasznált ECMWF determinisztikus modell.....	21
4.1.1. Az ECMWF MARS adatbázisa.....	22
4.2. A RayMan Pro modell.....	22
4.3. Verifikációs módszerek.....	24
5. Eredmények.....	29
5.1. KH – Komfort hőmérséklet.....	29
5.2. THI – Termohigrometrikus index.....	35
5.3. PET – Fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet.....	41
5.4. UTCI – Univerzális termikus klíma index.....	47
6. Összefoglalás.....	53
Köszönetnyilvánítás.....	55
Irodalomjegyzék.....	57
Függelék.....	60

1. Bevezetés

Az atmoszférikus környezet, melyben élünk, számos módon fejt ki hatását életünkre, a folyamatosan gyorsuló és változó klímájú világban fokozottabb kihívások elé állítva szervezetünket. Ezen összefüggés léte ugyan már az ókor óta ismert, pontosabb feltérképezése azonban – részben a humán bioklimatológia tudományterületének fejlődésének köszönhetően – csak az utóbbi száz évben kezdődött meg. Hamar világossá vált, hogy a testünk környezethez való viszonyát kifejező hőérzet komplex mennyiség, mely nem jellemezhető pusztán egyetlen paraméternek, mint például a léghőmérsékletnek a figyelembevételével. Megállapították, hogy a levegő páratartalma, a szél sebessége és a hőhatású sugárzás mértéke is jelentős befolyásoló hatással bír, de a szervezet fiziológiai tulajdonságai sem elhanyagolhatók. Annak érdekében, hogy az ember termikus környezethez való viszonya minél jobban meghatározható legyen, az előzőekben felsorolt tényezők felhasználásával már száznál is több mérőszámot alkottak meg.

Napjainkban hazánkban a humán komforttal kapcsolatos kutatások széles tárháza áll a rendelkezésünkre. Számos kiváló tanulmány foglalkozik többek között annak városklimatológiai vonatkozásával (pl. *Unger*, 1998; *Gulyás et al.*, 2010; *Égerházi és Kántor*, 2011), turisztikai kötődésével (pl. *Németh*, 2013), klímaváltozás okozta módosulásával (pl. *Németh*, 2011), de a katonákat érő fokozottabb környezeti megterhelést vizsgálókból sincs hiány (pl. *Kohut*, 2008a; *Kállai*, 2010; *Lupták*, 2013). A napjainkban rendelkezésünkre álló hatalmas adatmennyiségnek köszönhetően a termikus komfort múltbeli alakulásáról könnyen képet kaphatunk, jövőbeli viselkedése azonban további tényezők függvénye. Magyarországon a humán komfort előrejelzésében rejlő lehetőségek ellenére ez a téma mindeddig kevés figyelmet kapott – pedig az igény rá mind polgári, mind katonai részről megvan. Ezért is tűztük ki célul e szakterület jobb megismerését és kutatását, bízva abban, hogy munkánkat a szabadidős és a munkaköri tevékenységek megtervezésénél is kamatoztatni lehet.

Vizsgálataink kezdeti fázisában tudományos diákköri munkám során (*Lupták*, 2014) három bioklíma index előrejelzett értékét állítottuk elő hat magyarországi állomásra vonatkozóan, melyek megbízhatóságát különböző verifikációs módszerek segítségével vettük szemügyre. A prognózisok alapját az ECMWF¹ determinisztikus modell 00 UTC-s és 12 UTC-s kezdeti meteorológiai mezőkből kiinduló futtatásai szolgáltatták. Ezen munka eredményeként megállapítást nyert, hogy a humán komfort a termikus mérőszámokban rejlő

¹ ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ

különbségek következtében változó sikerrel jelezhető előre, olykor ezzel látszólag értelmetlenné téve erre irányuló törekvéseinket. Az operatív gyakorlatba állításra legalkalmasabb bioklíma index kiválasztása ebből adódóan csak a vizsgálatba bevont mérőszámok körének jelentős bővítésével érhető el. Jelen dolgozat elsődleges célja tehát, hogy a munkánk további szakaszában szemügyre vett nyolc különféle komfortindex előrejelezhetőségének összevetésével választ találjunk kutatásunk legnagyobb kérdésére, vagyis a hőérzetet legpontosabban előrejelző bioklíma index megnevezésére.

Az időjárás emberi szervezetre gyakorolt hatásának megértéséhez elengedhetetlen, hogy tisztában legyünk a szervezet hőháztartásával, melynek bemutatására a második fejezetben kerül sor. Azt követően a különféle bioklíma indexeket jellemezzük, különös tekintettel a vizsgálatunkba bevont paraméterekre. A negyedik fejezetben a humán komfort előrejelzések elkészítésének módját és az azok során használt modelleket ismertetjük, valamint az alkalmazott verifikációs módszerekről is részletes leírást adunk. Ezt követi az ötödik fejezetben az eredményeink bemutatása a vizsgálatba bevont bioklíma indexenként külön-külön. Végül a hatodik fejezetben összefoglaljuk elért eredményeinket és tapasztalatainkat, illetve a lehetséges további kilátásokról is szót ejtünk.

2. Az emberi test hőháztartása

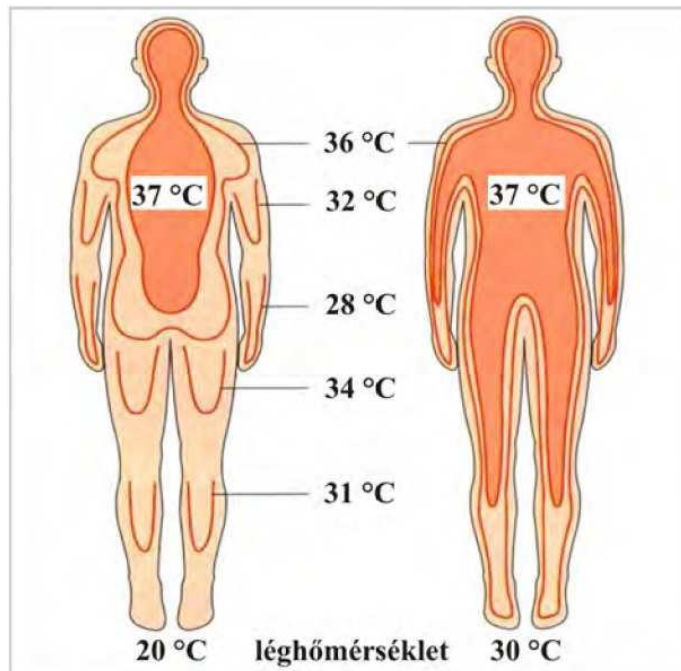
2.1. A szervezet hőszabályozása

Az emberi szervezet optimális működéséhez – lévén egy állandó testhőmérsékletű élőlényről szó – elengedhetetlen a létfontosságú szerveket magában foglaló belső tartomány, az ún. *testmag* hőmérsékletének megközelítően állandó értéken tartása. Ideális esetben ez a 37 °C igen szűk környezetét jelenti, nagysága pedig általában 18 óra körül a legmagasabb, míg alvás közben, a hajnali órákban a legalacsonyabb. Optimális körülmények között ez az ingadozás nem lépi túl az 1 °C-os megváltozást (*Kohut, 2008b*). A maghőmérséklet ezen állandó szinten tartása a hőnyereségi és hőleadási folyamatok megfelelő egyensúlyával érhető el, mely mechanizmust nevezünk *hőszabályozásnak*, más szóval *termoregulációnak*.

Ezen állapot megőrzéséhez testünknek rengeteg energiára van szüksége, melyet az emésztés közben lejátszódó metabolikus folyamatok biztosítanak. A testmag hőmérsékletének megfelelő szinten tartására különleges esetekben (pl. erős szélben, nagy hidegben) az így termelt energia akár 80-90%-a is felhasználódhat. Kevésbé szélsőséges körülmények között természetesen ennél jóval kisebb mennyiség is elegendő az optimális állapot eléréséhez. A maghőmérséklet fenntartására fordítódó legkevesebb energiát igénylő külső környezeti hőmérsékleti tartományt *termoneutrális zónának* nevezük. Ez egy ruhátlan ember esetén 27-29 °C-ot, a ruházat és a különféle izomtevékenységek függvényében pedig alacsonyabb értéket jelent (*Gulyás, 2009*).

A maghőmérséklet állandóságát számos paraméter veszélyezteti, melyek közül a környezeti tényezők hatása a legintenzívebb. Ha értéke ezek befolyására a kedvező tartományon kívülre esik, akkor működésbe lépnek szervezetünk azon válaszméchanizmusai, melyek továbbra is a testünk számára lehető legideálisabb állapotot hivatottak fenntartani.

Az akaratunktól független hőszabályozás egyik legfontosabb ilyen reakciója a testfelszíni ereken átáramoltatott vér mennyiségének változtatása. Ekkor a bőrfelszín közeli véregek összehúzódásával és elernyedésével csökkenthető vagy növelhető a környezet felé leadott hő mennyisége. Ennek következményeképpen a testen belül a közel állandó hőmérsékletű *testmag* és a szervezet perifériás részeit tartalmazó, tág hőmérsékleti tartományon belül mozgó *testköpeny* különböztethető meg. Az utóbbi vastagsága a külső hőmérséklet függvényében kevesebb, mint 1 cm-től néhány centiméterig változhat (*1. ábra*).



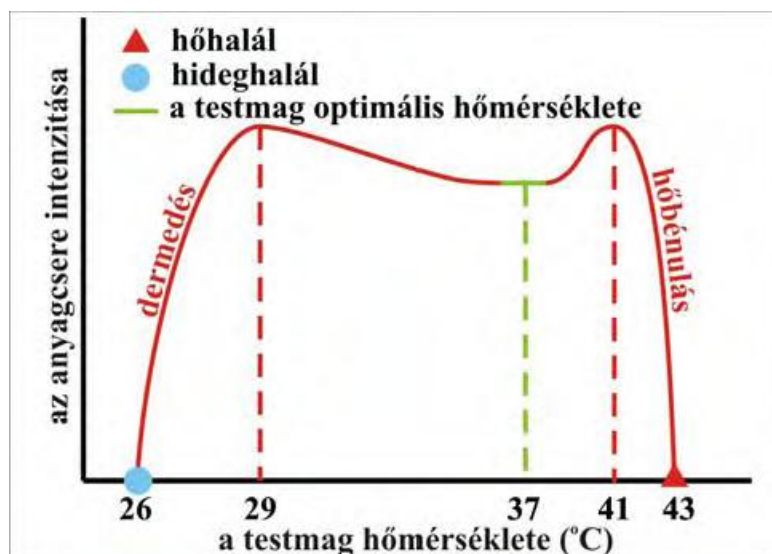
1. ábra – A testmag és a testköpeny hőmérsékletének változása hideg és meleg környezetben (*Gulyás, 2009*)

A maghőmérséklet termoneutrális zóna fölé emelkedése vagy az alá esése további egymással ellentétes célú reakciókat vált ki a szervezetben. Az emberi test hőmérsékletének csökkenése miatt beinduló reszketés a különböző izomcsoportok összehúzódásával próbál elegendő hőt termelni a megfelelő állapot visszaállítására. Ezzel szemben a magas léghőmérséklet vagy az izomtevékenység miatt elvesztett hőmennyiség pótlása céljából sorra aktivizálódnak a verejtékmirigyek, beindul az izzadás. Ennek során a verejték bőrre kerülve elpárolog, és hűti annak felszínét.

A fentiekén túlmenően természetesen akaratlagos mozgásformákkal is segíthetjük a testhőmérséklet közel állandó szinten tartását. Nagy melegben kerülhetjük a napot és a mozgást, több folyadékot fogyaszthatunk, hidegben pedig vastagabb ruházatot választhatunk és aktívabban mozoghatunk.

Az ember ezen hőszabályozó mechanizmusai azonban – mint ahogyan a *2. ábrán* is látható – nem mindig eredményesek. Megfigyelhető, hogy testünk tűrőképessége valamivel nagyobb a hideggel, mint a meleggel szemben. A maghőmérséklet 4 °C-os emelkedése már károkat okozhat a központi idegrendszerben, az ideális szintet 6 °C-kal túllépve pedig keringési zavarok lépnek fel, melyek a legtöbbször halálos végkimenetelűek. Ezzel szemben értékének csökkenése csak 8 °C-os esés után jelent az emberi életre nézve kockázatot, viszont ekkorra a hideg által jobban érintett testrészek (pl. fül, orr, ujjak) már maradandó károsodást szenvednek. Ennél nagyobb mértékű lehűlés mellett drasztikusan romlik a szervezet

hőszabályozó mechanizmusának működése, hanyatlik az anyagcsere intenzitása, és a mintegy 11 °C-os csökkenés már az életjelek megszűnésével jár.



2. ábra – Az emberi test anyagcserejének intenzitása a testmag hőmérsékletének függvényében (Gulyás, 2009)

2.2. A szervezet energia-egyenlege

Az emberi szervezetre ható környezeti hőterhelés számszerűsítéséhez nélkülözhetetlen azoknak a folyamatoknak az ismerete, melyek a test és a környezet közötti összeköttetést meghatározzák. Ezek közül a leglényegesebbek a test által kibocsátott és a testet érő sugárzások, hőáramok, melyeknek egymással egyensúlyt kell tartaniuk.

A test és környezete közötti hőcsere több formában mehet végbe. Történhet *sugárzás (radiáció)* útján, mikor a körülöttünk lévő testhőmérsékletünknel melegebb tárgyak hőt adnak át szervezetünknek. A testtel érintkező változatlan közeg felé történő hő közlésekor *vezetékes (kondukciós)* hőcseréről, a minket körülvevő környezet felmelegedése miatti elmozdulásakor pedig *áramlásos (konvekciós)* hőcseréről beszélünk. Végül lejátszódhat *párolgással (evaporációval)* is a különböző meteorológiai állapotokatározók (pl. hőmérséklet, légmozgás, relatív páratartalom) által befolyásolt mennyiségű bőrfelszínről elpárolgott víz okozta látens hővesztésként (Detre, 2010).

A hőszabályozási folyamatok segítségével a testmag közel állandó hőmérsékletét kialakító áramlások ismeretében már felírható az emberi test energia-egyenlege, mely a következő formát ölti:

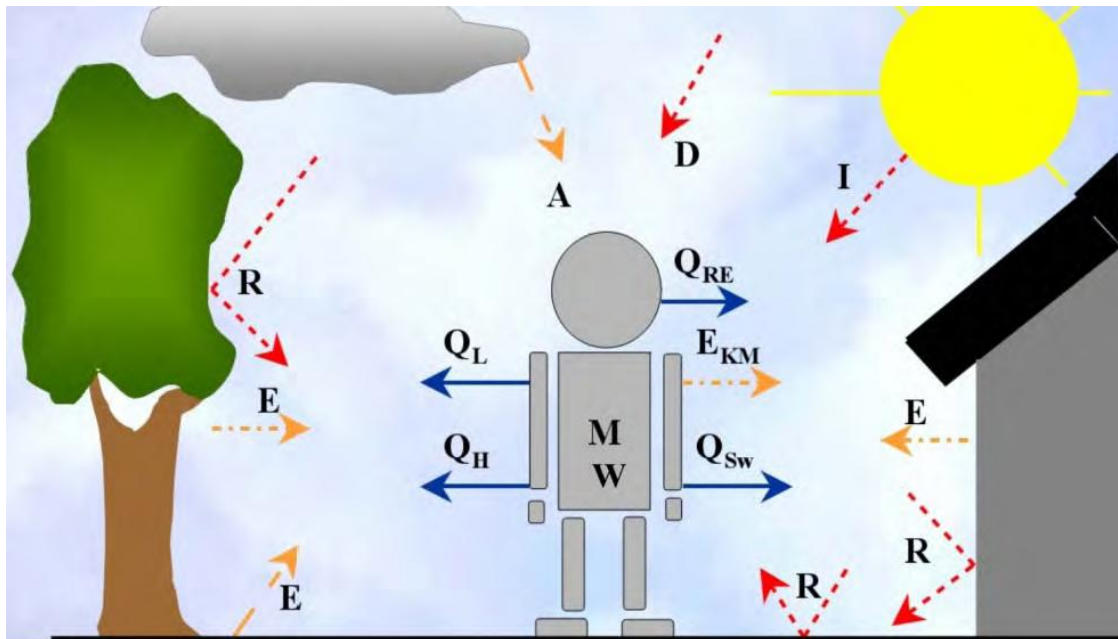
$$M+W+Q^*+Q_H+Q_L+Q_{SW}+Q_{RE}=\Delta S \quad (1)$$

Az (1) egyenletben M a metabolikus hő, ami a test belső energiatermelését jelöli, W pedig a fizikai aktivitás révén ebből felhasznált energia. Q_H a szenzibilis hőáramlás, Q_L a bőrön keresztüldiffundált víz párolgása miatti, Q_{SW} a verejték párolgása okozta látens hőfelszabadulás, Q_{RE} pedig a lélegzés által történő látens és szenzibilis hőcsere. Az egyenletben szerepel még a ΔS , ami a test hőtartalmának teljes megváltozása, valamint a testre vonatkozó teljes sugárzási mérleget jelölő Q^* , ami a következő alakban írható fel (Gulyás, 2009):

$$Q^* = I + D + R + A + E + E_{KM} \quad (2)$$

A (2) egyenletben az I a Napból érkező közvetlen rövidhullámú sugárzás, D a diffúz rövidhullámú sugárzás, R ennek a tereptárgyak által visszavert rövidhullámú sugárzása, A a légköri hosszuhullámú sugárzás, E a környező felületek, E_{KM} pedig a test hosszuhullámú sugárzása.

Az előbbieken bemutatott testet érő és az általa kibocsátott áramlásokat összefoglalva a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra – Az emberi test és annak környezete közötti áramlások (Gulyás, 2009)

A képletekben szereplő tagok pozitív és negatív előjelűek is lehetnek attól függően, hogy a test számára energiabevételt vagy energiavesztést jelentenek. Ennek megfelelően M mindig pozitív, a W , Q_L , Q_{SW} és Q_{RE} negatívak, Q_H és Q^* pedig mindkettő lehet.

Az energia-egyenleg összetevőire számos tényező fejti ki hatását, melyek következtében a test hőtárolása, azaz a ΔS értéke megemelkedhet vagy éppen lecsökkenhet. Ezek közül is a

legfontosabbak az egyes meteorológiai állapothatározók. A léghőmérséklet nagymértékben befolyásolja a Q_H -t és Q_{RE} -t, a szélesebbesség a Q_H -t, Q_L -t és Q_{SW} -t, a légnedvesség a Q_L -t, Q_{SW} -t és Q_{RE} -t, valamint az átlagos sugárzási hőmérséklet a Q^* -t (Kántor, 2012). A testben lévő hőmennyiség így a kis légmozgás, a 33 °C-nál nagyobb hőmérséklet, az erős direkt sugárzás, valamint a túl magas páratartalom miatt megnövekedhet, míg a túl alacsony külső hőmérséklet és az erős szél befolyására lecsökkenhet.

A meteorológiai paramétereken kívül jelentős hatást gyakorolnak még a test hőtárolására az egyéni tulajdonságok is (pl. kor, nem, bőrszín, edzettségi és egészségi állapot), továbbá nem hanyagolható el a ruházat hő- és nedvességszigetelő képessége sem. Ezeknek a tényezőknek a megfelelő figyelembevételével és kombinálásával születtek meg az első bioklíma indexek, melyekről részletesebben a következő fejezetben lesz szó.

3. Bioklíma indexek

A termikus komfort egyike azon tényezőknek, melyek alapvetően meghatározzák mindennapjainkat. Hatása nem csak az egészségi állapotunkon keresztül mutatkozik meg, hanem az egyes tevékenységek elvégzéséhez fűződő kedélyállapotunkat is nagymértékben befolyásolja. Ebből adódik, hogy a termikus komfortérzet pszichológiai leírásakor egy olyan állapotot feltételezünk, mikor az ember az őt körülvevő környezettel mentálisan teljesen elégedett, sem melegebbet, sem pedig hidegebbet nem kíván (ASHRAE, 1966, 2001). Mivel ez az érzet szubjektív, ezért a személyekben rejlő számtalan különbség miatt többnyire a tesztalányok 80%-a által elfogadhatónak ítélt értékek alapján határozható meg a termikus komfort zónája. Ez nyáron a 23-27 °C-os, míg a téli hónapokban a 20-25 °C-os hőmérsékleti tartományt jelenti, mely intervallumok – szemben az elvárásokkal – a korrrel és nemmel csak kis mértékben változnak (Fanger, 1973).

Más definíciók a komfort fogalmát az energia-forgalomhoz kötik, s azt a lehető legkisebb energiát igénylő állapotot nevezik termikusan kényelmesnek, mikor még a test által nyert és leadott energiák egyensúlyban tarthatók (Fanger, 1972). Az egyensúly felborulásával diszkomfort érzet alakul ki, mely a test hőtárolásának függvényében lehet hideg (ΔS negatív), vagy meleg (ΔS pozitív).

Minden ember számára különösen fontos, hogy a körülötte lévő környezetben kényelmesen érezze magát. A hőérzet azonban – a szervezet hőháztartásának bonyolult voltából adódóan – egy komplex mennyiség, melyet számos külső és belső tényező befolyásol. Ezek közé sorolható maga az atmoszférikus környezet is, melyben az egyes meteorológiai állapotváltozók egymással kölcsönhatásban állva fejtik ki hatásukat az emberi test termoregulációs folyamataira. A humán bioklimatológia a szervezetet ily módon befolyásoló tényezőket, azaz a léghőmérséklet, a szélesebesség, a légnedvesség és a hőhatású sugárzás együttesét ún. *termikus komplexnek* nevezi (Jendritzky, 1993).

Az utóbbi időben a termikus komplex leírására száznál is több különféle index látott napvilágot. Bár első ránézésre nehéz bármiféle rendszert találni köztük, voltaképpen két nagy csoportra oszthatók: az *empirikus* és a *racionális indexekre*. A továbbiakban e két csoportot mutatjuk be, különös figyelmet szentelve a vizsgálatainkba bevont indexekre: a munkavédelmi előírásoknál hazánkban is figyelembe vett ET^2 , a katonai körökben leginkább

² ET: Effective Temperature – Effektív hőmérséklet

elterjedt WBGT³, a Magyar Honvédség által használt KH⁴, az egyszerűsége miatt közkedvelt THI⁵, a meleg, illetve hideg környezet okozta hőterhelés számszerűsítésére gyakran alkalmazott HI⁶ és WCT⁷, a világon legszélesebb körben elterjedt PET⁸, és a közelmúltban kifejlesztett UTCI⁹ indexekre.

3.1. Empirikus indexek

Az empirikus indexek a termikus komfortindexek első nemzedékéhez sorolhatók. A racionális indexekhez képest jóval egyszerűbbek és könnyebben számíthatók. Többnyire csak zárt térben fennálló viszonyokra fejlesztették ki őket, és csupán egy-egy meteorológiai állapothatározót (pl. hőmérsékletet, légnedvességet, szelet) dolgoznak fel. Ebből adódik egyben legnagyobb hátrányuk, hogy a termikus komfortérzet szempontjából alapvető számos tényező (pl. átlagos sugárzási hőmérséklet, emberi izomtevékenység mértéke, ruházat, személyes tulajdonságok) figyelmen kívül hagyása miatt alkalmatlanok a test fontosabb termofiziológiai paramétereinek meghatározására.

3.1.1. ET – Effektív hőmérséklet

A hőérzetet a léghőmérséklet és a légnedvesség segítségével kifejező bioklíma index kifejlesztése *Houghton és Yaglou* (1923) nevéhez köthető. Értéke annak a nyugalomban lévő telített levegőnek a hőmérsékletét adja meg, mely az emberi szervezetből az aktuális környezetnek megfelelő komfortérzetet váltja ki. Számítása az alábbi képlettel lehetséges:

$$ET = T_a - 0,4 \cdot (T_a - 10) \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (3)$$

ahol T_a a °C-ban kifejezett léghőmérséklet, RH pedig a relatív páratartalom %-ban megadott értéke.

3.1.2. WBGT – Nedves gömb hőmérséklet

A meleg környezet okozta hőterhelés számszerűsítésére használható legszélesebb körben elterjedt index a világon. Számos ország hadseregében értékéhez kötve kerül

³ WBGT: Wet Bulb Globe Temperature – Nedves gömb hőmérséklet

⁴ KH: Komfort hőmérséklet

⁵ THI: Thermohigrometric Index – Termohigrometrikus index

⁶ HI: Heat Index – Hőség index

⁷ WCT: Wind Chill Temperature – Szél csípősségi hőmérséklet

⁸ PET: Physiologically Equivalent Temperature – Fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet

⁹ UTCI: Universal Thermal Climate Index – Univerzális termikus klíma index

meghatározásra az az időtartam, mely a különböző nehézségű feladatok elvégzésére maximálisan fordítható. Kidolgozása az Amerikai Egyesült Államok tengerészgyalogságánál történt hősérülések miatt szükségesnek tartott kutatásoknak köszönhető (*Yaglou és Minard, 1957*). Értéke az alábbi képlet alapján számítható:

$$WBGT=0,7\cdot T_w+0,1\cdot T_a+0,2\cdot T_g \quad (4)$$

ahol T_w a nedves hőmérő hőmérséklete, melyet a hőmérő tartályának nedves ruhadarabbal való beborítása után mérnek, T_a a száraz hőmérő hőmérséklete, T_g pedig egy matt feketére festett vékony rézgömb belsejében mért hőmérséklet.

Beltéri környezetben a száraz hőmérséklet és a gömb hőmérséklet egyenlősége miatt a (4) egyenlet a következő alakot ölti:

$$WBGT=0,7\cdot T_w+0,3\cdot T_a \quad (5)$$

Népszerűségétől függetlenül a WBGT alkalmazásának számos hátránya van. Egyrészt az index nem tesz különbséget a különféle nehézségű munkák között és a személyes tulajdonságokat is figyelmen kívül hagyja. Másrészt a mérésére szolgáló berendezések rendkívül drágák, a pontos működéshez állandó karbantartást igényelnek, továbbá a gömb hőmérséklet meghatározása sokszor nehézkes, avagy lehetetlen. Ezen problémák kiküszöböléséül számos, a WBGT index értékét jól közelítő egyenlet látott már napvilágot (*Lemke és Kjellstrom, 2012*). Kitűzött vizsgálataink megvalósítása érdekében számunkra is szükséges volt az index ilyen jellegű számítása. Ehhez a (4) egyenlet T_w és T_g tagját leíró további két egyenletet használtuk fel (*Błażejczyk et al., 2014*):

$$T_w=-9,27522+0,70196\cdot T_a+0,30338\cdot vp+0,07823\cdot RH \quad (6)$$

ahol vp a vízgőznyomás hPa-ban, RH pedig a relatív páratartalom %-ban kifejezve. Valamint:

$$T_g=2,098-2,561\cdot v+0,5957\cdot T_a+0,4017\cdot T_{mrt} \quad (7)$$

ahol v a szélesebbesség m/s-ban, T_{mrt} pedig az átlagos sugárzási hőmérséklet °C-ban megadott értéke.

3.1.3. KH – Komfort hőmérséklet

A Magyar Honvédség által már a '80-as évek óta a katonákat érő környezeti hőterhelés számszerűsítésére használt index. Kiszámítása a következő egyenlettel történik:

$$KH = T_a - \left(\frac{100 - RH}{10} + \frac{v}{2} \right) \quad (8)$$

ahol T_a a száraz levegő hőmérséklete °C-ban, RH a relatív páratartalom %-ban, v pedig a szélsébség m/s-ban megadott értéke. Az előírások alapján a katonák tevékenységének korlátozását hazánkban a komfort hőmérséklet ily módon előállított értékének 25 °C fölé emelkedésekor rendelik el.

A különféle bioklíma indexek kialakításakor mindig fontos feladat, hogy azok eltérő értékét az emberi szervezethez kiváltott hőérzet alapján tartományokba sorolják. Mivel azonban a komfort hőmérséklet esetében ez nem lehetséges, ezért a kategóriák létrehozását mi végeztük el. Ennek módját a 3.1.3.1. fejezetben részletesen ismertetjük.

3.1.3.1. A KH hőérzeti tartományainak meghatározása

A bioklíma indexek értékeinek hőérzeti tartományokba sorolása a gyakorlatban kétféle módon történhet: a lakosság körében kérdőívek segítségével az aktuális időpontban a kérdeztettek által vélt hőérzet és a valóban mért értékek összevetésével, vagy regresszió analízissel egy másik bioklíma index korábban már kialakított hőérzeti tartományainak felhasználásával. Mivel előbbi esetében a megfelelő mintaszám elérése egy rendkívül időigényes folyamat, így a KH kategóriáinak kijelölésénél a regresszió analízis jelentett megoldást.

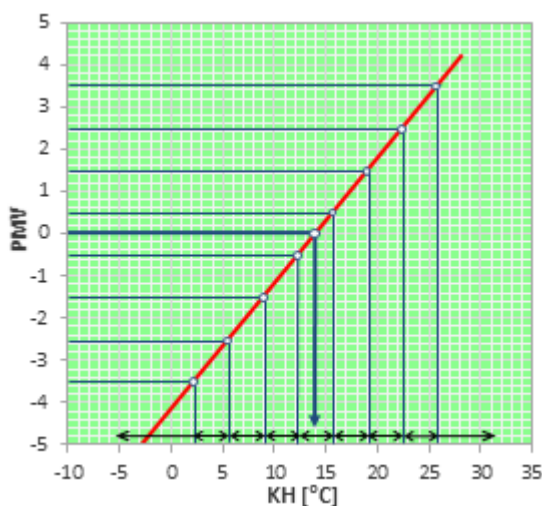
A regresszió analízis során a KH hőérzeti tartományait a *Fanger* (1972) által kialakított PMV¹⁰ kategóriái alapján határoztuk meg. Választásunkat az indokolta, hogy ezen index kísérleti úton, több mint 1000 alany bevonásával kialakított 9 fokozatos (-4-től +4-ig terjedő) skálája szabályos beosztású, és a környezetnek az ember energia-egyensúlyára kifejtett hatását kellően jól tükrözi. Az index negatív értékei a hideg stressz, pozitív értékei a meleg stressz tartományait jelölik ki, a 0 pedig a termikus komfortot jelenti. A PMV különböző értékéhez tartozó hőérzeti tartományait az 1. táblázatban tüntettük fel.

A szélsőértékek meghatározhatósága érdekében a regresszió analízis elvégzéséhez a PMV és KH tekintetében megfelelő hosszúságú adatsorok voltak szükségesek. Ezeket

¹⁰ PMV: Predicted Mean Vote – Jóérzés-index

Debrecen 1961-től 2010-ig terjedő időszakának adatai biztosították. Az erre vonatkozó PMV, illetve a KH előállításához nélkülözhetetlen léghőmérséklet, relatív páratartalom és szélsősebesség értékeket az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) bocsátotta rendelkezésünkre.

A KH különböző értékéhez tartozó hőérzeti tartományok kialakításának kulcsát ezt követően a két index egymáshoz való kapcsolatát jellemző regressziós egyenes jelentette. Mivel ez esetünkben lineárisnak adódott, ezért a KH komfortos hőmérsékletét a regressziós egyenesnek a PMV 0 vonalával vett metszéspontja jelölte ki. A továbbiakban a hőérzeti tartományok határai ehhez hasonló módon a PMV skálája alapján már könnyen meghatározhatók voltak. Az előbbieken bemutatott eljárás szemléletes képe a 4. ábrán látható, ahol a piros vonal a regressziós egyenest jelöli.



4. ábra – A KH hőérzeti tartományainak kijelölése

A KH ilyen módon meghatározott hőérzeti tartományai a PMV kategóriái mellett szintén a 1. táblázatban láthatók.

1. táblázat – A KH és a PMV indexek értékeinek tartományai
(Matzarakis és Mayer, 1996)

KH (°C)	Hőérzet	PMV
> 24,7	nagyon forró	> 3,5
21,6 – 24,7	forró	2,5 – 3,5
18,4 – 21,6	meleg	1,5 – 2,5
15,2 – 18,4	kissé meleg	0,5 – 1,5
12 – 15,2	komfortos	-0,5 – 0,5
8,9 – 12	kissé hűvös	-1,5 – -0,5
5,7 – 8,9	hűvös	-2,5 – -1,5
2,6 – 5,7	hideg	-3,5 – -2,5
< 2,6	nagyon hideg	< -3,5

3.1.4. THI – Termohigrometrikus index

A 3.1.1 fejezetben bemutatott ET továbbfejlesztéseként megalkotott index a tényleges hőmérsékletet az aktuális környezet léghőmérséklet és légnedvesség értékének lineáris átlagolásával adja meg (Thom, 1959). Habár használata elsősorban a zoobiometeorológián belül terjedt el, egyszerűsége miatt a humán bioklimatológiai kutatásokban is előszeretettel alkalmazzák. Számítása eredetileg az alábbi képlettel történik:

$$THI=0,4\cdot(T_a+T_w)+15 \quad (9)$$

ahol T_a a száraz hőmérséklet, T_w pedig a nedves hőmérséklet °F-ban kifejezett értéke. A következő egyenlettel ugyanakkor lehetőség van ennél egyszerűbb módon is, már °C-ban az index előállítására:

$$THI=T_a-(0,55-0,0055\cdot RH)\cdot(T_a-14,5) \quad (10)$$

ahol T_a a levegő hőmérséklete °C-ban, RH pedig a relatív páratartalom %-ban megadott értéke (Unger, 1999).

A THI értékei az általuk kiváltott hőérzet alapján kategóriákba sorolhatók, melyek a 2. táblázatban láthatók.

2. táblázat – A THI értékeinek tartományai (Kyle, 1994)

THI (°C)	Hőérzet
> 30	forró
26,5 – 30	nagyon meleg
20 – 26,5	meleg
15 – 20	komfortos
13 – 15	hűvös
-1,8 – 13	hideg
-10 – -1,8	nagyon hideg
-20 – -10	fagyos

3.1.5. HI – Hőség index

Az emberi szervezet számára a magas léghőmérséklet és relatív páratartalom együttes fennállása a termikus környezet egyik legnehezebben tolerálható állapota. A testmag hőmérsékletének állandóságát melegben biztosító izzadság nedvesebb, telítettebb levegő hatására ugyanis a bőrfelszínről csak lassabb párolgásra képes, kevésbé töltve be ezáltal hűtő funkcióját. Az Egyesült Államok Nemzeti Meteorológiai Szolgálatával által kifejlesztett HI az

emberi szervezetet ilyen körülmények között érő kockázat nagyságát hivatott megadni. Értéke az alábbi egyenlettel számítható:

$$\begin{aligned}
 HI = & -42,379 + 2,04901523 \cdot T_a + 10,14333127 \cdot RH - 0,22475541 \cdot T_a \cdot RH - \\
 & -6,83783 \cdot 10^{-3} \cdot T_a^2 - 5,481717 \cdot 10^{-2} \cdot RH^2 + 1,22874 \cdot 10^{-3} \cdot T_a^2 \cdot RH + \\
 & + 8,5282 \cdot 10^{-4} \cdot T_a \cdot RH^2 - 1,99 \cdot 10^{-6} \cdot T_a^2 \cdot RH^2
 \end{aligned} \quad (11)$$

ahol T_a a léghőmérséklet °F-ban megadott értéke, RH pedig a %-ban kifejezett relatív páratartalom (Rothfus, 1990).

3.1.6. WCT – Szél csípősségi hőmérséklet

A WCT a hideg környezetben fennálló szél bőrhőmérsékletre, és így a hőérzetre gyakorolt hűtő hatását kifejező mérőszám. Értéke annak a szélcsendes környezetnek a hőmérsékletét fejezi ki, mely a vizsgált környezet szél és hőmérséklet viszonyai által kiváltott hőérzetnek megfelelőt eredményez. Az index első felírása bár Siple és Passel (1945) nevéhez köthető, azóta már számos – a különböző országok termikus viszonyaihoz jobban igazodó – változata is ismertté vált. Kiszámítása Kanadában például a következő egyenlettel történik:

$$WCT = 13,12 + 0,6215 \cdot T_a - 11,37 \cdot v^{0,16} + 0,3965 \cdot T_a \cdot v^{0,16} \quad (12)$$

ahol T_a a léghőmérséklet °C-ban, v pedig a szélesség m/s-ban kifejezve (Kusch et al., 2004).

3.2. Racionális indexek

A számítógépek megjelenése új távlatokat nyitott a termikus komfortindexek világában, lehetővé téve az addig elhanyagolt tényezők figyelembevételével vagy azok pontosabb leírásával a környezeti hőterhelés precízebb számítását. E fejlődésnek köszönhetően születtek meg a bonyolult műveleteket végző energia-egyenleg alapú modellek, valamint a belőlük levezethető racionális indexek. Ezek egy része a már meglévő empirikus társaikból lettek tovább fejlesztve (pl. ET*¹¹, SET*¹²), de természetesen újonnan létrehozottak is akadnak köztük.

¹¹ ET*: new Effective Temperature – új effektív hőmérséklet

¹² SET*: new Standard Effective Temperature – új standard effektív hőmérséklet

3.2.1. PET – Fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet

A napjaink egyik leggyakrabban alkalmazott bioklíma indexe a '80-as években *Mayer és Höppe* (1987) munkásságának eredményeképpen látott napvilágot. A kifejezetten kültéri termikus viszonyokra kifejlesztett index egy olyan, a belső tér referenciaértékeit reprezentáló közeg hőmérsékletét adja meg egy fiziológiailag szintén standardizált paraméterekkel rendelkező személyre vonatkozóan, mely a szervezetből a valós, kültéri körülményekkel megegyező bőr- és maghőmérsékleteket váltja ki (*Höppe*, 1999). Az említett referencia értékek a környezetre vonatkozóan a következők:

- az átlagos sugárzási hőmérséklet a léghőmérséklettel egyenlő,
- a szél sebessége 0,1 m/s,
- a vízgőznyomás 12 hPa.

A személyre vonatkozó standardizált paraméterek pedig:

- 35 éves, 75 kg tömegű, 1,8 m magas férfi,
- az aktivitás mértéke 80 W (könnyű ülő munkának megfelelő),
- a ruházat hőszigetelése 0,9 clo (vékony öltönynek megfelelő).

A PET index kiszámítása az ún. *MEMI*¹³ energia-egyensúlyi modell segítségével lehetséges (*Höppe*, 1984). A modell a testmag, a bőrfelszín, illetve a ruházat elkülönítésével – az empirikus indexekkel szemben – lehetőséget nyújt a szervezet hőháztartásának szempontjából lényeges hőáramok meghatározására.

A fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet értékei a testből kiváltott élettani hatások alapján tartományokba sorolhatók. Vizsgálataink során a *Matzarakis és Mayer* (1996) által felállított határokat használtuk, kiegészítve a hideg oldal végét a hazai gyakorlatban gyakran alkalmazott további két hőérzeti kategóriával (3. táblázat). Ezen tartományok azonban a Föld eltérő klimatikus viszonyai miatt világszerte nem használhatók, így a határok ennek megfelelően módosítandók (*Lin és Matzarakis*, 2008).

3.2.2. UTCI – Univerzális termikus klíma index

A kutatók számára napjainkban rendelkezésre álló számtalan bioklíma index elsöre bár előnyösnek tűnik, mégis egyben jelentős hátrányt jelentenek a különböző tanulmányok eredményeinek egymással való párhuzamba állításakor. Ezen mérőszámok közös tulajdonsága, hogy a '70-es években Povl Ole Fanger által az emberi szervezetre felállított

¹³ MEMI: Munich Energy-balance Model for Individuals – müncheni egyénre vonatkozó energia-egyensúlyi modell

energiaegyenleten alapulnak, más hasonlóság azonban nem található köztük. Ezen okból kifolyólag felmerült az igény egy új – klímától, napszaktól, évszaktól független, bármely skálán alkalmazható – index kidolgozására, melyet a COST¹⁴-730 program keretén belül 2009 februárjára sikeresen teljesítettek (*Jendritzky et al.*, 2009). Az ily módon megalkotott UTCI annak a kültéri referencia környezetnek a hőmérsékletét fejezi ki, mely az emberi szervezetből az aktuális környezetnek megfelelő válaszreakciókat váltja ki (*Blażejczyk et al.*, 2010). A referencia környezet a következő tulajdonságokkal rendelkezik (*Jendritzky et al.*, 2009; *Bröde et al.*, 2012):

- a szél sebessége 10 m-es magasságban 0,5 m/s,
- az átlagos sugárzási hőmérséklet a léghőmérséklettel megegyező,
- a levegő páratartalma 29 °C-os léghőmérséklet alatt 50%, egyébként pedig a 20 hPa-os vízgőznyomásnak megfelelő,
- a fizikai aktivitás mértéke egy 4 km/h sebességgel sétáló emberével egyenértékű, mely 135 W/m²-es metabolikus rátát produkál.

Az index *Fialat et al.* (2001) többcsomópontos, ún. multi-node fiziológiai modelljével számítható. A modell az emberi szervezetet két részre osztja: (i) a központi idegrendszer hőszabályozó mechanizmusát szimuláló irányító aktív, illetve (ii) a testrészek anatómiai és fiziológiai tulajdonságait a szervezet belsejében és felszínén végbemenő hőátadási jelenségek leírásánál figyelembevevő irányított passzív rendszerre. Utóbbi rendkívüli részletességgel követi nyomon a szervezet termofiziológiai jellegzetességeit, továbbá képes a testrészek bőrhőmérsékletét külön is számszerűsíteni.

Az UTCI értékei a PET indexhez hasonlóan hőérzeti kategóriákba sorolhatók, melyek a hozzájuk tartozó emberi szervezetből kiváltott fiziológiai hatásokkal együtt szintén a 3. táblázatban láthatók. A két index skálájának összevetésekor szembevető lehet azok különbözősége, melyre az eltérő referencia környezetek mellett az UTCI számításánál figyelembe vett alany alkalmazkodóképességét reprezentáló ruházati modell beiktatása szolgál magyarázatul (*Kántor*, 2012).

¹⁴ COST: Cooperation in Science and Technical Development – együttműködés a tudományos és technikai fejlesztési tevékenységek területén

3. táblázat – A PET index és az UTCI tartományai (*Matzarakis és Mayer, 1996; Blázejczyk et al., 2010* alapján kiegészítve)

PET (°C)	UTCI (°C)	Fiziológiai hatás	Hőérzet
> 41	> 46	extrém meleg stressz	nagyon forró
-----	38 – 46	nagyon erős meleg stressz	erősen forró
35 – 41	32 – 38	erős meleg stressz	forró
29 – 35	26 – 32	közepes meleg stressz	meleg
23 – 29	-----	gyenge meleg stressz	kissé meleg
18 – 23	9 – 26	nincs stressz	komfortos
13 – 18	0 – 9	gyenge hideg stressz	kissé hűvös
8 – 13	-13 – 0	közepes hideg stressz	hűvös
4 – 8	-27 – -13	erős hideg stressz	hideg
-----	-40 – -27	nagyon erős hideg stressz	erősen hideg
0 – 4	< -40	extrém hideg stressz	nagyon hideg
-10 – 0		extrém hideg stressz	fagyos
< -10		extrém hideg stressz	nagyon fagyos

4. Adatok és vizsgálati módszerek

A humán komfort előrejelezhetőségének vizsgálatakor – mint minden ilyen jellegű feladat esetében – kulcsfontosságú kritérium maguknak az előrejelzéseknek a megléte. Kutatásunk hazai viszonylatban teljesen újszerű voltából adódóan azonban ezek teljes hiányával kellett szembenéznünk. Mivel a bioklíma indexek kiszámításához szükséges meteorológiai változókat ma már a legtöbb időjárás-előrejelző modell előállítja, ezért mindenekelőtt egy olyan modellre volt szükségünk, melyből viszonylag hosszabb időszakra visszamenőleg is kinyerhetők ezen információk. Felmérve lehetőségeinket, választásunk végül az ECMWF determinisztikus modellre esett. Ennek oka egyrészt, hogy az ECMWF az európai régió egyik legnagyobb, középtávú globális előrejelzéseket operatíván előállító központja (Götz, 2001), s így különféle produktumait az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársai is előszeretettel alkalmazzák. Másrészt az ECMWF MARS¹⁵ adatbázisa lehetőséget biztosít az adatok viszonylag egyszerű módon történő visszamenőleges lekérésére. Mivel az ECMWF naponta kétszer futtat 00 UTC-s és 12 UTC-s kezdeti meteorológiai mezőkből kiinduló determinisztikus előrejelzést, így egyúttal prognózisaink megbízhatóságának rövid időbeli fejlődéséről is képet kaphatunk.

Az ECMWF MARS adatbázisból való lekérés két, futtatásonként megírt rövid program segítségével történt. Az így kapott fájlok mindegyike egy adott meteorológiai állomást reprezentáló rácspont 2013. január 1-től 2014. december 31-ig terjedő időszakának 9 UTC-s és 15 UTC-s időpontja közé eső meghatározott meteorológiai változóit tartalmazták, melyek a következők:

- 2 m-es hőmérséklet és harmatpont kelvinben megadott értéke,
- 10 m-re előrejelzett horizontális és meridionális szélkomponensek m/s-ban kifejezve,
- felhőborítottság 0-1 közötti skálán két tizedes pontossággal megadva.

Ezek felhasználásával már könnyűszerrel kiszámíthatók voltak az előrejelzendő bioklíma indexek input adatait szolgáltató meteorológiai állapotváltozók, azaz a °C-ban kifejezett léghőmérséklet, a relatív páratartalom %-os értéke, a szélesség m/s-ban, valamint a felhőborítottság oktában megadva. Mivel vizsgálataink során megállapítottuk, hogy az egyes komfortindexek előrejelezhetőségét a szélre vonatkozó prognózisok jósága nagymértékben befolyásolja, ezért míg a többi meteorológiai változó esetében a 12 UTC-s

¹⁵ MARS: Meteorological Archival and Retrieval System – Meteorológiai Archiváló és Visszakereső Rendszer

adatokkal, addig a jobb eredmények elérésének reményében a szélre vonatkozóan a 9 UTC-től 15 UTC-ig terjedő időszak átlagértékével számoltunk. A vizsgálatunkat hat hazai meteorológiai állomásra vonatkozóan végeztük el, melyek – Magyarország különböző tájegységeiről kiválasztva – a következők: Budapest (É.sz. 47°26', K.h. 19°11', tszf.m.: 138 m), Győr (É.sz. 47°43', K.h. 17°41', tszf.m.: 116 m), Szombathely (É.sz. 47°12', K.h. 16°39', tszf.m.: 200 m), Pécs (É.sz. 46°00', K.h. 18°14', tszf.m.: 202 m), Szeged (É.sz. 46°15', K.h. 20°06', tszf.m.: 81 m) és Debrecen (É.sz. 47°29', K.h. 21°36', tszf.m.: 107 m).

Az előrejelzendő bioklíma indexek egy részének előállítása a *RayMan Pro modellel* (Matzarakis et al., 2010) történt. A modell előnye, hogy kimeneti adatként az UTCI és PET index mellett a WBGT indexhez szükséges átlagos sugárzási hőmérsékletet is közli, így a továbbiakban már semmi sem akadályozta a prognózisok minden indexre kiterjedő elkészítését.

Az előrejelzések verifikációjához elengedhetetlen mért bioklíma indexek előállítására szintén használtuk a *RayMan Pro modellt*. Az ezekhez szükséges meteorológiai paramétereket az OMSZ bocsátotta rendelkezésünkre. Az indexek kiszámításának kritikus pontja az adatsorok folytonossága, melynek csak Szombathely felhőzeti értékei nem tettek maradéktalanul eleget. Ebben az esetben az OMSZ-nál bevett gyakorlatot követve a szinoptikus helyzetet elemezve próbáltuk a szomszédos órák adataival a hiányosságokat reprodukálni. Ezek száma azonban elhanyagolható volt, így jelentősebb hibát nem okoztak.

4.1. A felhasznált ECMWF determinisztikus modell

A nagy-britanniai, readingi székhelyű Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ (ECMWF) 1975-ben 18 ország összefogásának eredményeként jött létre (Woods, 2005). Magyarország 1994 óta társult tagországgként vesz részt a munkában (Kaba, 1995).

A központ középtávú (10 napos) determinisztikus előrejelzést operatíván 1979 óta készít. A modell kezdeti $1,875^\circ \times 1,875^\circ$ -os (200 km \times 200 km-es) horizontális rácsfelbontása és 15 vertikális szintre való kiterjedése a számítástechnikai fejlődésnek köszönhetően mára már jelentősen finomodott, így jelenleg a $0,125^\circ$ -os (16 km-es) horizontális térbeli rácsfelbontással és a 136 vertikális szintű kiterjedéssel jellemezhető. Az előrejelzéshez használt numerikus modell a stabilitás megőrzésére a szemi-implicit és szemi-Lagrange sémát alkalmazza.

A modell az előrejelzés készítésekor a felszíni meteorológiai állomások adatain túl a magaslégköri, a repülőgépes, a tengeri úszóbójás és a műholdas megfigyeléseket is

figyelembe veszi. Ezekből a kezdeti feltételeket napjaink legmodernebb adatasszimilációs technikájával, a négydimenziós variációs analízis (4D-VAR) módszerrel állítja elő (*Persson és Grazzini, 2007*). Mindezekkel együtt jelenleg egy 10 napos előrejelzés kivitelezése kb. 2,4 óra alatt lehetséges (*Mozdzynski, 2009*).

Az ECMWF a determinisztikus előrejelzések mellett 1992 óta ún. *EPS*¹⁶ valószínűségi előrejelzéseket is készít (*Molteni et al., 1996*). A belőlük kapott előrejelzések együttesével így már lehetővé vált a prognózisokban lévő hibaforrások (pl. mérések pontatlansága, numerikus modell hibái) kezelése, jövőbeli bizonytalanságuk felmérése. Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy a determinisztikus modell az előrejelzési periódus negyedik napjától kezdve már kevésbé megbízható, így onnantól a valószínűségi előrejelzésekből számított ensemble átlagot célszerű figyelembe venni (*Fehér et al., 2011*).

4.1.1. Az ECMWF MARS adatbázisa

A Meteorológiai Archiváló és Visszakereső Rendszer (MARS) az ECMWF legfontosabb meteorológiai adatbázisa, mely 1985 januárjában a tudóstársadalom folyamatosan növekvő igényének kielégítésére jött létre. Az archívum nagy előnye, hogy 1987 óta a tagországok felhasználói számára ingyenesen is hozzáférhető, továbbá az adatok lekérésére szolgáló felhasználóbarát webes felület megalkotása óta könnyebben elérhető. Az adatbázisban tárolt adatok mennyisége mára már több petabájtot tesz ki, melyet többek közt meteorológiai megfigyelések, analízis és előrejelzési mezők, kutatási eredmények és speciális projekt adatok alkotnak (*Woods, 2005*). Ezeket az információkat az adatbázis típusuktól függően *GRIB*, *BUFR* és *ODB* formátumban bocsátja a felhasználók rendelkezésére.

A MARS fontos részét képezik az éghajlat változékonyságának elemzésére alkalmasabb reanalízis adatbázisok. Ilyen az *ERA-15*, mely az 1979-1993 közötti időszakról szolgáltat információt. Korszerűbb adatasszimilációs módszert alkalmaz már az 1957 és 2002 közötti időszakot lefedő *ERA-40* adatbázis. A ma elérhető legmodernebb eljárásokon alapuló és a korábbiakhoz képest minőségi javulást hozó adatbázis pedig az *ERA Interim*, mely 1979-től napjainkig tartalmaz adatokat (*Uppala et al., 2008*).

4.2. A RayMan Pro modell

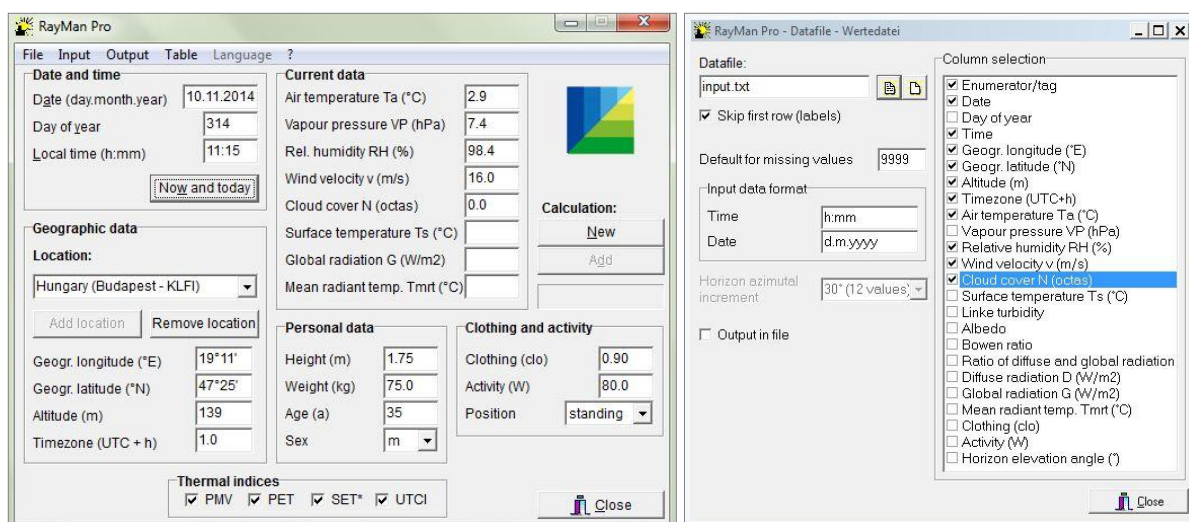
A *RayMan Pro* sugárzási és bioklíma modell napjaink legtöbb humán bioklimatológiai kutatásának képző szerves részét. Létrehozása a németországi Freiburgi Egyetem

¹⁶ EPS: Ensemble Prediction System – sokasági előrejelzési rendszer

Meteorológiai Intézetéhez köthető, ahol fejlesztése a VDI¹⁷ irányelvei alapján ma is folyik (VDI, 1994, 1998). Munkánk során a szoftver legfrissebb, 2.1-es verzióját használtuk.

A modellt elsősorban a sugárzási fluxus, s így az emberi szervezet energia egyensúlyát leginkább befolyásoló átlagos sugárzási hőmérséklet leírására fejlesztették ki, lehetővé téve ezzel a termikus komfortindexek viszonylag gyors előállítását. A szoftver legnagyobb előnye azonban a városi környezet sugárzasmódosító hatásának a figyelembevételében rejlik, megbízható információkat szolgáltatva annak mikroklimatikus vonatkozásáról az építészek, a várostervezés és a humán komfort városklimatológiai kutatása számára (Matzarakis *et al.*, 2007, 2010).

A *RayMan* jelenlegi verziója kimeneti adatként négy termikus mérőszámot bocsát a felhasználók rendelkezésére: az UTCI, a PET, a SET* és a PMV¹⁸ bioklíma indexeket. Az ezekhez szükséges bemeneti adatokon, azaz az időn, a földrajzi adatokon és a meteorológiai állapothatározókon túl a modell lehetőséget ad a vizsgálati alany fiziológiai tulajdonságainak megváltoztatására (5. ábra). Mivel hosszabb időszakot lefedő vizsgálatok esetén az adatok egyesével történő bevitele túl időigényes lenne, ezért alternatív megoldásként azok egy fájlban belüli betáplálása is biztosított.



5. ábra – A RayMan humán bioklíma modell input ablakai

A *RayMan* modell nyújtotta átlagos sugárzási hőmérséklet, illetve ezen keresztül a termikus komfortindexek megbízhatóságát Matzarakis és társai (2010) többféle városi környezetben is megvizsgálták. Mivel a mért és szimulált értékek közötti korreláció minden esetben erősnek bizonyult ($r = 0,95-0,96$), ezért a modellt alkalmasnak találták feladatának

¹⁷ VDI: Verein Deutscher Ingenieure – Német Mérnöki Kamara

¹⁸ PMV: Predicted Mean Vote – prediktált hőérzet index

teljesítésére. Más vizsgálatok (pl. *Thorsson et al.*, 2007) azonban rátapintottak a *RayMan* gyenge pontjára, miszerint alacsony napállások esetén az átlagos sugárzási hőmérséklet értékét erősen alulbecsli. Ez leginkább a magasabb földrajzi szélességeken jelent problémát, ahol szinte egész évben számolni kell ezzel a hibával.

4.3. Verifikációs módszerek

A korábban ismertetett módon elkészített prognózisainkat két szempont alapján verifikáltuk: képet szeretnénk volna kapni azok konkrét számértékeinek megbízhatóságáról, valamint a bioklíma indexeknek megfelelő hőérzeti, illetve kockázati kategóriák előrejelzésének jóságáról. Mivel utóbbi humán bioklimatológia szempontból nagyobb jelentőségű, és a célközönség által is könnyebben értelmezhető, ezért vizsgálatainkban hangsúlyosabb szerepet érdemeltek.

A folytonos eloszlású változók – esetünkben a bioklíma indexek konkrét értékei – verifikációjának elvégzéséhez nagy mennyiségű számszerű információ áll a tudóstársadalom rendelkezésére. Az előrejelzések jóságáról azonban ezek külön-külön nem képesek pontos képet nyújtani (*Jolliffe és Stephenson*, 2003), így vizsgálatainkba három, a gyakorlatban előszeretettel használt hibastatisztikát vontunk be: a *Bias* (más néven ME^{19}), a MAE^{20} és az $RMSE^{21}$ hibastatisztikákat. Ezek kiszámítási módja a 4. táblázatban látható.

4. táblázat – Verifikációs hibastatisztikák (*Nurmi*, 2003)

Hibastatisztika	Kiszámítási mód
Szisztematikus hiba	$Bias = \frac{1}{n} \sum (f_i - o_i)$
Átlagos abszolút hiba	$MAE = \frac{1}{n} \sum f_i - o_i $
Átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (f_i - o_i)^2}$

A képletekben f_i minden esetben az i -edik előrejelzést, o_i az ahhoz tartozó megfigyelést, n pedig az adatok számát jelöli. Az előrejelzések szempontjából mindhárom mérőszám esetén a nulla körüli érték az optimális, azzal való egyezéskor pedig tökéletes prognózisokról beszélünk. A vizsgált időszakról részletesebb képet alkotva kiszámoltuk és ábráztuk a MAE

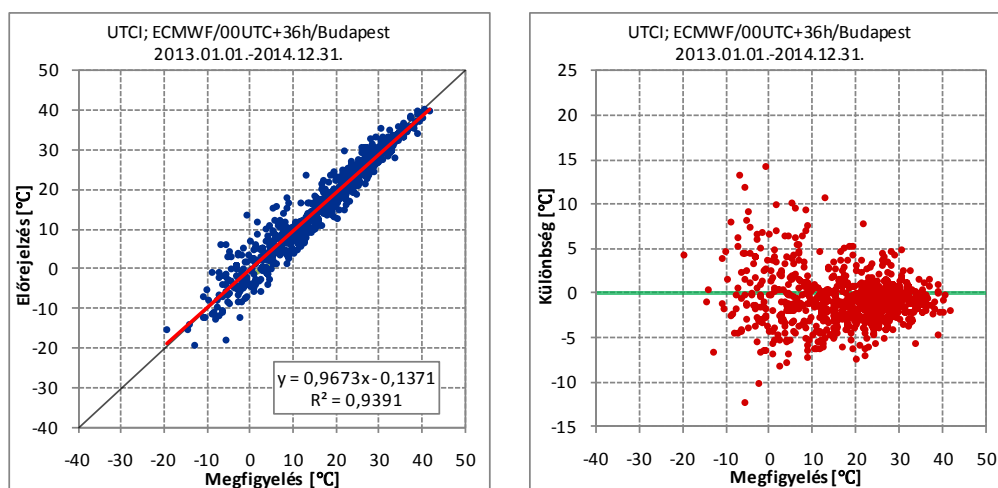
¹⁹ ME: Mean Error – szisztematikus hiba

²⁰ MAE: Mean Absolute Error – átlagos abszolút hiba

²¹ RMSE: Root Mean Squared Error – átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke

értékeinek dekádonkénti átlagát, melyek a *Függelékben* megtekinthetők (F25–F28. ábra). A hibastatisztikák eredményül kapott értékeinek ismertetésére pedig a 00 UTC-s és 12 UTC-s futtatás összehasonlításának céljából az 5. fejezetben, az eredmények terén jobban kifejtett bioklíma indexenként külön kerül sor.

A megfigyelések és előrejelzések közötti kapcsolat ábrázolására minden esetben elkészítettük azok eloszlás diagramjait (erre példaként a 6. ábra szolgál). Ezen ábrázolás előnye, hogy segítségével láthatóvá válnak a kiugró értékek és különbségek, megállapíthatók az alul-, illetve fölülbecslések, továbbá a termikus komfortindexek mért és előrejelzett értékeinek kapcsolatáról is közvetlen információt nyújt. A számítások elvégzésére és az ábrák elkészítésére a *Microsoft Excel* programot használtuk.



6. ábra – Az eloszlás diagramok: baloldalon a megfigyelés és előrejelzés párok, jobboldalon a megfigyelés és a megfigyelés és előrejelzés eltéréseinek párojai

A hőérzeti, illetve kockázati kategóriák verifikációi az eddigiekhez képest bonyolultabb eljárásokon alapulnak. A vizsgálatok megkezdéséhez az indexek értékeinek kategóriákba sorolása *Fortran* nyelven íródott programmal történt. Ezt követően tanulmányozásukat kétféleképpen tettük meg: a kategóriás verifikációk körében széles körben elterjedt kontingencia táblázatokat alapul véve, valamint az előrejelzett és megfigyelt kategóriák közötti eltérések éves eloszlását szemrevételezve. A továbbiakban e két eljárás részletesebb ismertetésére kerül sor.

A meteorológiai előrejelzések körében számos olyan jelenség van, melyek későbbi verifikációjakor célszerűbb azok bizonyos kategóriákba sorolt értékeit vizsgálni. Ilyen például az eső, a hóesés és a köd, melyek prognosztizálásakor két lehetséges kimenettel számolhatunk: lesz vagy nem lesz. A gyakorlatban ezen kívül rendszeresen bukkanhatunk ennél több állapotot is felvevő képződményre (pl. felhőzet, látástávolság), melyek

beválásának vizsgálata már a többkategóriás verifikáció részét képezi. Ez utóbbiba sorolhatók a vizsgálatunk alapjául szolgáló bioklíma indexek is.

A kategóriás verifikáció az előrejelzések és a hozzájuk tartozó megfigyelések viszonyát kifejező kontingencia táblázaton alapul (5. táblázat). A prognózisok megbízhatóságának vizsgálata a táblázat értékeit különféle módon felhasználó verifikációs mérőszámokkal (ún. *score*-okkal és *skill score*-okkal) lehetséges.

5. táblázat – $n \times n$ -es kontingencia táblázat (Nurmi, 2003 nyomán)

Előrejelzés	Megfigyelés					Σf
	o_1	o_2	o_3	\dots	o_n	
f_1	a	b	c	\dots	e	Σf_1
f_2	f	g	h	\dots	j	Σf_2
f_3	k	l	m	\dots	q	Σf_3
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\dots	\vdots	\vdots
f_n	s	t	v	\dots	w	Σf_n
Σo	Σo_1	Σo_2	Σo_3	\dots	Σo_n	Σ

Munkánk során – a kontingencia táblázatok méretére (WBGT esetében 4×4 -es, HI esetében 5×5 -ös, WCT esetében 6×6 -os, THI és UTCI esetében 8×8 ²²-as, KH esetében 9×9 -es, ET és PET esetében 11×11 -es) való tekintettel – az előrejelzések jóságát egyetlen számként reprezentáló beválási mutatókat részesítettük előnyben. Ilyen tulajdonságokkal rendelkeznek a helyes előrejelzések arányát megadó *Proportion Correct (PC)* és a véletlenszerű eseményektől nem függő *Heidke Skill Score (HSS)* verifikációs mérőszámok, melyek kiszámítási módja az 6. táblázatban látható.

6. táblázat – Verifikációs mérőszámok (Nurmi, 2003)

Verifikációs mérőszám	Kiszámítási mód
Helyes előrejelzések aránya	$PC = \sum p(f_i, o_i)$
Heidke Skill Score	$HSS = \frac{\sum p(f_i, o_i) - \sum p(f_i)p(o_i)}{1 - \sum p(f_i)p(o_i)}$

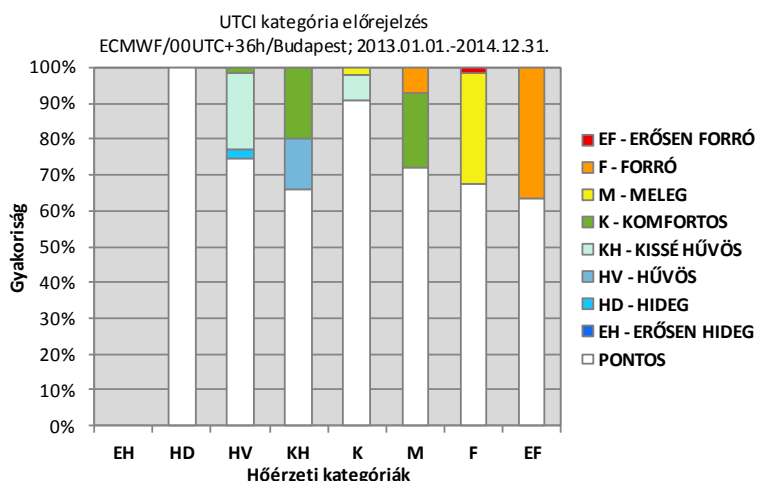
A képletekben i a táblázat dimenzióját, $p(f_i, o_i)$ az előrejelzések és megfigyelések együttes eloszlását, $p(f_i)$ és $p(o_i)$ pedig az előrejelzések és megfigyelések peremeloszlását jelöli. Tökéletes előrejelzésekkor mindkét beválási mutató értéke egyet vesz fel, de míg PC 0 és +1 közötti, addig HSS $-\infty$ -tól +1-ig terjedő skálán mozoghat. HSS pozitív értéke a helyes

²² Az UTCI esetében a táblázat eredeti mérete 10×10 -es lett volna, de mivel a vizsgált időszak alatt nagyon forró és nagyon hideg kategóriákra nem volt példa, ezért ezektől számításainkban eltekintettünk.

előrejelzések helytelenekhez viszonyított nagyobb arányát jelenti, nullával egyenlő *HSS* pedig a prognózisok valós információ tartalmának hiányát fejezi ki.

A humán komfort előrejelzések részletesebb tanulmányozása céljából mind a nyolc bioklíma index beválási mutatóinak évszakos értékét is előállítottuk. Az ezekhez szükséges kontingencia táblázatok elkészítése *Fortran* nyelvű programok segítségével történt. Az ily módon kiszámolt verifikációs mérőszámok értékei az eredmények terén bővebben részletezett indexekre vonatkozóan az 5. fejezetben olvashatók.

A kontingencai táblázatok elkészítése – a *PC* és a *HSS* értékeinek előállíthatóvá tételén túl – más rendkívüli előnnyel is járt: képet kaphattunk minden egyes hőérzeti és kockázati kategória előrejelezhetőségéről. A táblázat értékeinek felhasználásával ugyanis lehetőségünk nyílt az előrejelzett kategóriák megfigyelt kategóriánkénti relatív gyakoriságának kiszámítására, a 7. ábrának megfelelő diagramokat megalkotva általuk.

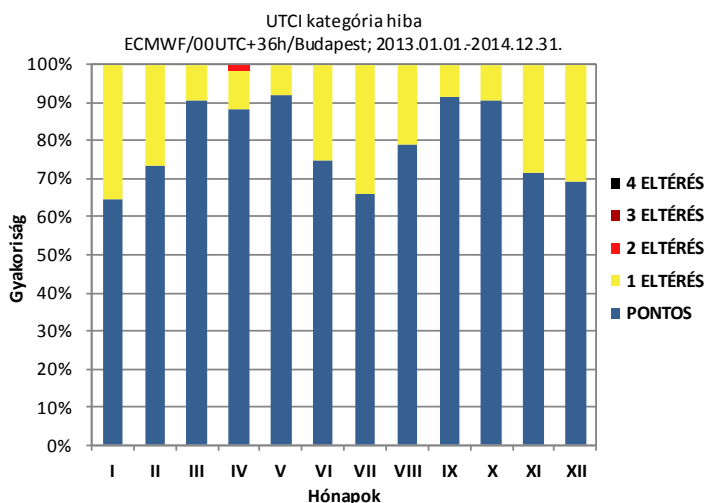


7. ábra – A kategóriás verifikáció ábrázolása

Az ábra vízszintes tengelyén a megfigyelt kategóriák, függőleges tengelyén pedig az azokra előrejelzett tartományok relatív gyakorisága szerepel – fehér színnel kitüntetve a tökéletes prognózisok többihez viszonyított arányát. Ily módon leolvashatóvá válnak az alul- illetve fölülbecslések, továbbá még az is felmérhető, hogy a különböző bioklíma indexek mely kategóriáinál kell a prognózisokra kritikusabb szemmel tekinteni.

Bár a humán komfort előrejelzések megbízhatóságáról már így is hatalmas mennyiségű adat és információ áll a rendelkezésünkre, éven belüli viselkedéséről még mit sem tudunk. Mivel azonban mind katonai, mind polgári használatra való alkalmasságát ez határozza meg leginkább, ismerete alapvető fontosságú lenne. E feladatnak eleget téve egy, a korábitól eltérő nézőpont alapján vettük a komfort előrejelzéseket górcső alá: eltekintettünk azok

kategorikus voltától, és kizárólag a megfigyelt tartományoktól vett eltérésekre fókuszáltunk. Ennek eredményeként alkottuk meg a 8. ábrának megfelelő diagramokat.



8. ábra – A bioklíma indexek kategória eltéréseinek ábrázolása

Az ábra vízszintes tengelyén így már a hónapok, függőleges tengelyén pedig az előrejelzett kategóriák megfigyelthez viszonyított eltéréseinek a relatív gyakorisága szerepel.

Összességében a humán komfort kategóriás verifikációjának körében mindkét eljárás rendkívül hasznos és különféle információval szolgál a bioklíma indexek előrejelzéseinek bevalásáról. Meg kell azonban jegyezni, hogy mégis utóbbi az, ami az egyes indexek előrejelezhetősége között tapasztalt hatalmas különbségeket igazán szemléletessé, használatukat indokolttá, esetleg indokolatlanná teszi.

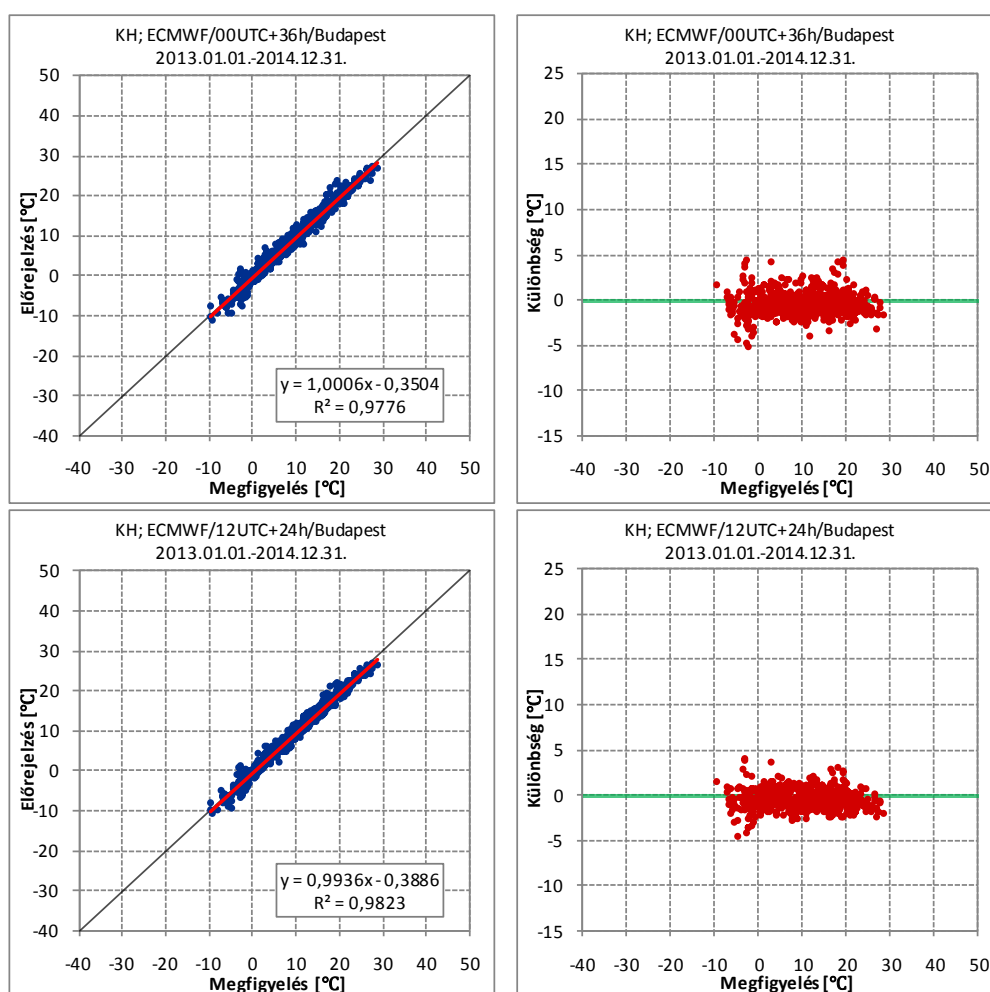
Ezen fejezetben bemutatott ábrák közül az eredmények ismertetése során minden esetben a fővárosra, azaz a Budapestre vonatkozókat láthatók majd, míg a többi állomáshoz kapcsolódók a *Függelékben* tekinthetők meg. A dolgozatban ugyanakkor a terjedelemre való tekintettel csak az arra érdemesebbnek tartott KH, THI, PET és UTCI eredményeit fejtjük ki részletesen, az ilyen szempontok szerint kimaradt indexekhez kapcsolódó diagramok a *Függelékben* láthatók.

5. Eredmények

5.1. KH – Komfort hőmérséklet

A számszerű előrejelzések verifikációjának eredményei

A KH előrejelezhetőségének vizsgálata során kapott eredményeink ismertetését – a későbbiekben a THI, a PET és az UTCI indexeknél hasonló módon eljárva – a konkrét számelőrejelzésnél tapasztaltakkal kezdjük. Az erre vonatkozó eloszlás diagramok a 9. ábrán, illetve a *Függelék F1., F2. és F3. ábráján* láthatók.



9. ábra – A KH 00 UTC-s (fent) és 12 UTC-s (lent) modellfuttatásból készített eloszlás diagramjai Budapestre vonatkozóan

A diagramok alapján első pillantásra is szembetűnő, hogy az előrejelzett és megfigyelt adatok között rendkívül szoros kapcsolat áll fenn, mely csak a hidegebb értékeknél tűnik némely állomáson gyengébbnek. Ennek hatása leginkább Győrnél mutatkozik meg, ahol a

korrelációs együtthatók mindkét futtatás során a legkisebbnek adódtak. A legerősebb kapcsolat ugyanakkor minden esetben Debrecennél figyelhető meg. Összességében kiemelendő, hogy a 12 UTC-s futtatásból készített előrejelzések e téren mindegyik állomás esetén jobbnak bizonyultak.

Az ábrák alapján talán kevésbé, de az erre vonatkozó számításaink segítségével már könnyen megállapítható, hogy az előrejelzések a legtöbb esetben a valóság fölülbecslését adják. Ez legfőképp Szeged esetében igaz, ahol a 00 UTC-s futtatás alapján a prognózisok a vizsgált időszak 70%-ában, a 12 UTC-s futtatás alapján pedig a 68%-ában vártak a méréseknél magasabb értéket. Kivételt képez ez alól mindkét modellfuttatás során Budapest és Szombathely, illetve a 12 UTC-s futtatás esetében Pécs, ahol a többitől eltérően alulbecslés figyelhető meg.

A komfort hőmérséklet rendkívül jó számszerű előrejelezhetőségét támasztják alá az eloszlás diagramok megfigyelés-különbség párokat ábrázoló részei. Megállapítható ugyanis, hogy a vizsgált időszak alatt gyakorlatilag csak elvétve fordultak elő az előrejelzések és megfigyelések között 5 °C-nál nagyobb eltérések. A prognózisok a valódi értékeket 2 °C-os pontossággal Budapesten és Szombathelyen közelítették meg leggyakrabban, ahol ez a 00 UTC-s futtatás alapján mindkét helyen az időszak 91%-ában, a 12 UTC-s futtatás alapján pedig Szombathelyen már a 92%-ában, Budapesten, sőt ez esetben már Pécsen is a 93%-ában teljesült. Ilyen tekintetben a Szegedre készített előrejelzések teljesítettek a legrosszabbul, ahol ugyanez a 00 UTC-s futtatás során 84%-nak adódott. Az előrejelzett időpont közeledte viszont már ennek is a 89%-ra való emelkedését eredményezte.

A verifikációs hibastatisztikák értékei (7. táblázat) alapján – az eddigiekhez hasonlóan – szintén a determinisztikus modell 12 UTC-s futtatásával készült előrejelzések tekinthetők jobbnak. A táblázatban – a továbbiakban mindenhol ugyanilyen módon – a vastagon kiemelt számok az előrejelzés szempontjából kedvezőbb értékeket jelölik.

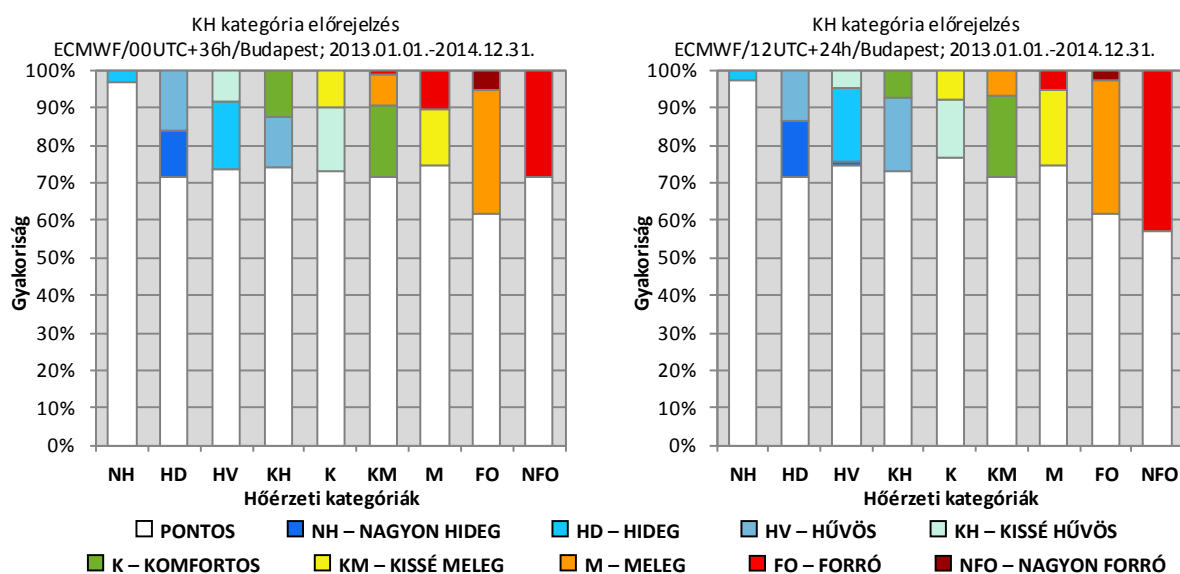
7. táblázat – A KH indexre vonatkozó verifikációs hibastatisztikák a 00 UTC-s és a 12 UTC-s modellfuttatások alapján

Állomás	Modellfuttatás: 00 UTC			Modellfuttatás: 12 UTC		
	<i>Bias</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>Bias</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>
Budapest	-0,344	0,984	1,279	-0,453	0,931	1,175
Győr	0,275	1,024	1,370	0,196	0,927	1,231
Szombathely	-0,117	0,977	1,298	-0,238	0,912	1,186
Pécs	0,199	0,976	1,298	0,059	0,834	1,116
Szeged	0,675	1,122	1,492	0,581	0,997	1,315
Debrecen	0,503	0,948	1,285	0,411	0,852	1,153

Évszakos szinten leggyakrabban télen, esetleg tavasszal figyelhetők meg a MAE KH indexre vonatkozó legnagyobb értékei, míg legkisebbnek rendre nyáron és ősszel adódtak (lásd *Függelék F25. és F26. ábra*).

Kontingencia táblázatokon alapuló verifikáció eredményei

A KH kategória előrejelzéseinek jóságára vonatkozó eredményeink alapvetően kedvező képet adnak az index ilyen célokra való felhasználhatóságáról. A vizsgálatba bevont állomásokra és futtatásokra elkészített kategóriás verifikáció diagramok (*10. ábra, Függelék F29. ábra*) alapján ugyanis látható, hogy a különböző hőérzeti tartományok prognosztizálása modelfuttatásoktól függetlenül a vizsgált időszak 75-80%-ában teljesen megbízható volt. Ez alól csak Szeged 00 UTC-s prognózisai képeznek kivételt, melyeknek ezt a pontosságát csak az előrejelzett időpont közeledte hozta meg. Bár az előrejelzések ilyen mértékű jósága elsöre kevésbé tűnhet megfelelőnek, az index esetében tekintettel kell lennünk arra is, hogy a kilenc előrejelezhető kategória már eleve nagyobb bizonytalansági tényezőt jelent.



10. ábra – A KH index kategóriás verifikáció diagramjai Budapestre vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) futtatások alapján

Az ábrákon megfigyelhető, hogy a különböző hőérzeti kategóriák előrejelezhetősége nagy hasonlóságot mutat. Mégis kiemelhető közülük a *nagyon hideg* kategória, melynek az előrejelzése minden állomáson a legmegbízhatóbb volt. Sajnálatos módon ezzel szemben a legrosszabbul előrejelzett kategória leggyakrabban a *forró, nagyon forró* kategóriák közül került ki, ami negatívan befolyásolja az index gyakorlati használatra való alkalmasságát. Alul- és felülbecslések terén a hibás előrejelzések jellemzően a *kissé meleg, meleg* kategóriáig a

megfigyeltek felül-, míg onnantól inkább alulbecslését adták. Ez a megállapítás csak Budapest és Szombathely KH előrejelzéseire nem érvényesül, mely állomásokon alulbecslés már a *hideg*, illetve a *hűvös* tartományoktól is észrevehető.

Arra a kérdésre, hogy a 00 UTC-s vagy a 12 UTC-s futtatásból készített előrejelzések közül melyik tekinthető jobbnak, már nehezebb válaszolni. A kategóriás verifikáció diagramok segítségével megállapítható, hogy míg az előrejelzett időpont közeledtével a *hideg*, *hűvös* és *komfortos* kategóriák prognosztizálása minden állomáson tovább javult, addig a *forró*, *nagyon forró* kategóriákat az előrejelzett időpont közeledtével csak nagyobb hibával sikerült előrejelezni. Mivel a többi kategóriára vonatkozóan már nem lehet ilyen egyértelmű megállapításokat tenni, ezért a kérdés megválaszolása érdekében segítségül hívhatók a kiszámolt *PC* és *HSS* verifikációs mérőszámok. Ezek teljes időszakra vonatkozó értékeit a 8. táblázatban foglaljuk össze.

8. táblázat – A KH index teljes időszakra vonatkozó verifikációs mérőszámai

Állomás	TELJES IDŐSZAK			
	00 UTC		12 UTC	
	<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>
Budapest	0,773	0,652	0,775	0,653
Győr	0,767	0,616	0,788	0,654
Szombathely	0,751	0,685	0,778	0,712
Pécs	0,752	0,622	0,789	0,663
Szeged	0,741	0,641	0,756	0,661
Debrecen	0,755	0,666	0,797	0,673
Országos	0,756	0,647	0,781	0,670

A táblázat adatai alapján megfigyelhető, hogy bár a determinisztikus modell 12 UTC-s futtatása a különböző kategóriákra vonatkozó prognózisok jóságát eltérő mértékben befolyásolta, összességében mégis minden állomáson az előrejelzések megbízhatóbbá válását idézte elő.

A verifikációs mérőszámok évszakos értékeire ehhez hasonló eredmények születtek (9. táblázat). Minden évszakban látható ugyanis, hogy az előrejelzett időpont közeledte az előrejelzések jóságára nézve többnyire kedvező hatással volt. Érdekes ugyanakkor, hogy Budapesten, Győrött és Szombathelyen az éven belül előfordult olyan időszak, mikor a korábbiakkal ellentétben a 00 UTC-s modellfuttatás használata hozott jobb eredményt.

9. táblázat – A KH index évszakokra vonatkozó verifikációs mérőszámai

TAVASZ					NYÁR				
Állomás	00 UTC		12 UTC		Állomás	00 UTC		12 UTC	
	PC	HSS	PC	HSS		PC	HSS	PC	HSS
Budapest	0,804	0,766	0,799	0,759	Budapest	0,685	0,594	0,701	0,614
Győr	0,728	0,674	0,777	0,732	Győr	0,707	0,632	0,728	0,659
Szombathely	0,799	0,756	0,842	0,809	Szombathely	0,745	0,675	0,739	0,669
Pécs	0,788	0,746	0,804	0,765	Pécs	0,690	0,600	0,728	0,647
Szeged	0,690	0,633	0,717	0,664	Szeged	0,712	0,625	0,717	0,633
Debrecen	0,701	0,647	0,783	0,743	Debrecen	0,745	0,666	0,766	0,695
Országos	0,752	0,704	0,787	0,745	Országos	0,714	0,632	0,730	0,653

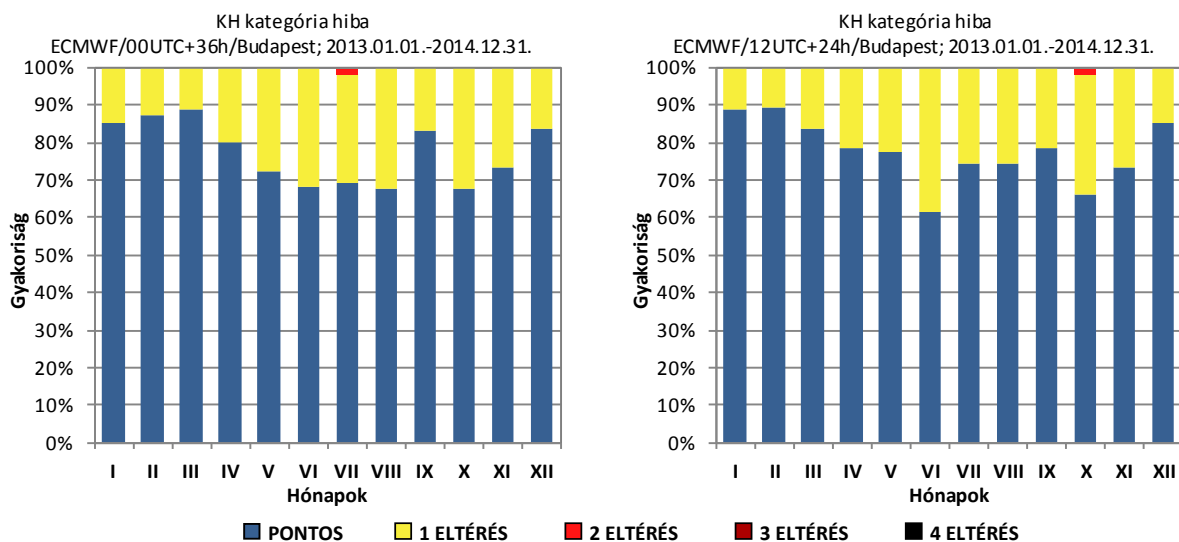
ŐSZ					TÉL				
Állomás	00 UTC		12 UTC		Állomás	00 UTC		12 UTC	
	PC	HSS	PC	HSS		PC	HSS	PC	HSS
Budapest	0,747	0,694	0,725	0,668	Budapest	0,856	0,717	0,878	0,760
Győr	0,791	0,750	0,802	0,762	Győr	0,844	0,689	0,844	0,682
Szombathely	0,692	0,630	0,720	0,662	Szombathely	0,767	0,523	0,811	0,619
Pécs	0,736	0,680	0,769	0,720	Pécs	0,794	0,644	0,856	0,750
Szeged	0,753	0,703	0,747	0,696	Szeged	0,811	0,685	0,844	0,742
Debrecen	0,720	0,660	0,775	0,727	Debrecen	0,856	0,731	0,867	0,753
Országos	0,740	0,686	0,756	0,706	Országos	0,821	0,665	0,850	0,717

Kategória eltéréseken alapuló verifikáció eredményei

A komfort hőmérséklet kategória eloszlásai alapján készített diagramok a 11. ábrán és a Függelék F37. ábráján láthatók. Ezek alapján megfigyelhető, hogy az eltérések minden állomás esetében hasonló módon alakultak: januártól júniusig, esetleg júliusig többnyire növekvő, az év hátralevő részében pedig inkább csökkenő tendenciával jelentkeztek. Ezen jellegzetesség az egyes hőérzeti tartományok előrejelezhetőségénél tapasztaltakkal könnyen magyarázható. A téli hónapokban gyakrabban előforduló hidegebb kategóriák kimagaslóan jó, míg inkább a nyári évszakban jelentkező melegebb kategóriák kevésbé megbízható prognosztizálása ugyanis e jelenségen keresztül kiválóan tükröződni látszik. Mindezek mellett az előrejelzésekről elmondható, hogy a vizsgált időszak 20-26%-ában tévesztettek kategóriát. Kedvezőnek tekinthető, hogy ennek túlnyomó részét a megfigyeltektől csupán egy kategóriával eltérő prognózisok teszik ki, annál nagyobb hibák csak ritkán fordultak elő. E szempontok alapján kiemelhető azonban Szeged, ahol a 00 UTC-s modellfuttatás során a három kategóriát tévedő előrejelzésre is volt példa.

Az előrejelzett időpont közeledte a prognózisok megbízhatóságára többnyire pozitív hatással volt. Ez különösen a februári és májusi hónapokra igaz, mely időszakokban a prognózisok minden állomáson tovább javultak. Hasonlóan pontosabbá váltak a legtöbb

helyen a januári, márciusi és júniusi előrejelzések is, míg a fennmaradó időszakban már kevésbé érzékelhető a prognózisok megbízhatóságának ilyen irányú változása. Mindezek mellett a 12 UTC-s modellfuttatás az egynél nagyobb eltérések relatív gyakoriságának csökkenését is meghozta, kettőt meghaladó kategória tévesztés pedig már sehol sem következett be.



11. ábra – A KH index kategória eltéréseinek diagramjai Budapestre vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) futtatások alapján

5.2. THI – Termohigrometrikus index

A számszerű előrejelzések verifikációjának eredményei

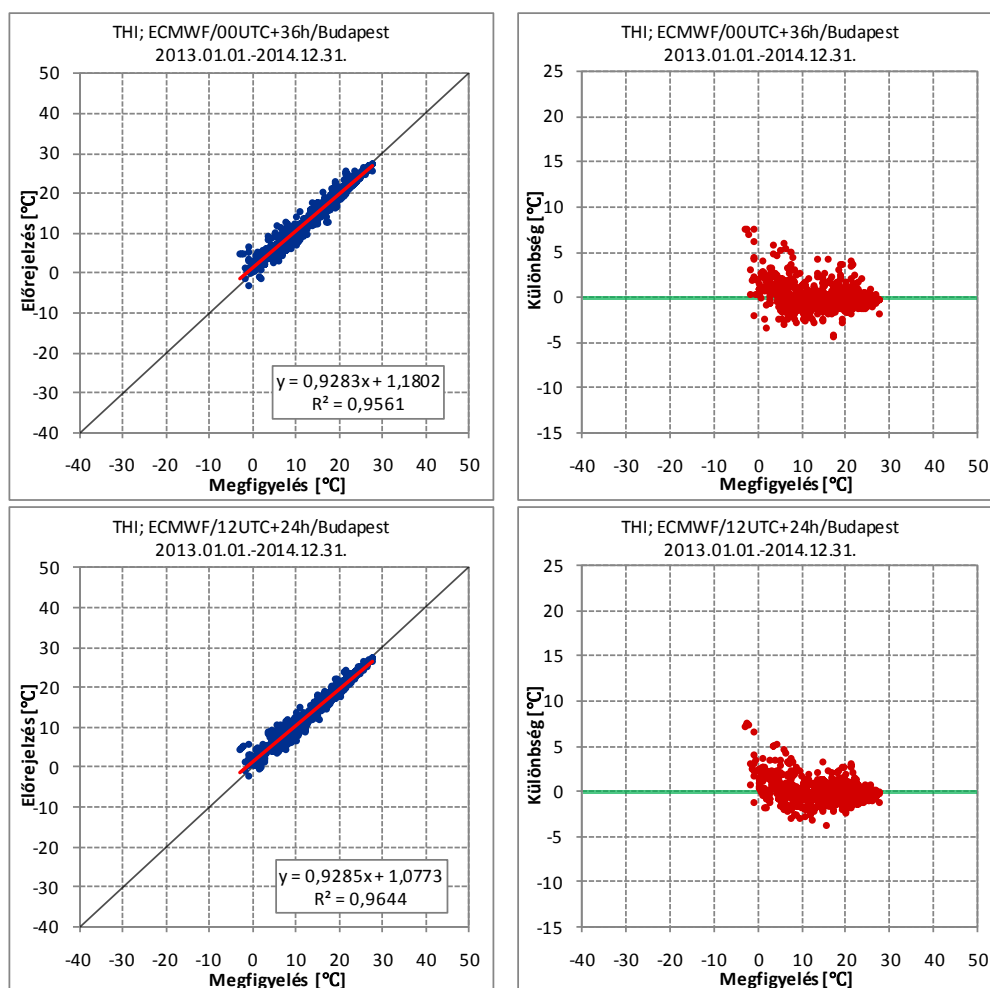
A termohigrometrikus index számszerű előrejelezhetőségéről képet adó eloszlás diagramok (12. ábra, Függelék F4–F6. ábra) nagyfokú hasonlóságot mutatnak a KH indexnél látottakkal. A THI esetében is megfigyelhető, hogy az előrejelzett és valós értékek rendkívül szoros kapcsolatban állnak egymással, továbbá az adatok alacsonyabb hőmérsékleteknél jelentkező nagyobb szóródása is minden állomáson határozottan kirajzolódik. A korrelációs együtthatók – különösen az előrejelzett időponthoz közeledve – az adatsorok már korábban említett erős kapcsolatát hűen tükrözik. Ugyanakkor, míg ez a 00 UTC-s modellfuttatás alapján Győrnél a legkiemelkedőbb, addig 12 órával később ez már inkább Pécsre teljesül. A megfigyelt és előrejelzett értékek között a leggyengébb korreláció mindkét modellfuttatás alapján Szombathelyen adódott.

A hibás előrejelzések megfigyelésekhez való viszonyáról összességében elmondható, hogy különösen a 00 UTC-s modellfuttatás során az esetek többségében a bekövetkezettnél magasabb értéket vártak. Ez legfőképpen Győrnél mutatható ki, ahol az előrejelzett időpont előtt 36 órával készített prognózisok az időszak 67%-ában, a 12 UTC-s futtatás esetében pedig 62%-ában közelítették felülről a méréseket. Budapesten ugyanakkor a determinisztikus modell mindkét futtatása alapján, az előrejelzett időponthoz közelebb pedig már Pécsen és Szombathelyen is a valódi értékek alulbecslése következett be.

A THI eloszlás diagramjainak megfigyelés-előrejelzés párokat ábrázoló részei kifejezetten kedvező képet festenek annak előrejelezhetőségéről. Megfigyelhető, hogy már a 00 UTC-s modellfuttatás során is csak elvétve, leginkább a hidegebb értékeknél fordult elő a prognózisokban 5 °C-ot meghaladó hiba, ugyanakkor ezek száma az előrejelzett időpont közeledtével csak még tovább csökkent. A komfort előrejelzések 2 °C-os pontosságát a 00 UTC-s futtatás alapján leggyakrabban Pécsen, a vizsgált időszak 86%-ában sikerült elérni. A 12 UTC-s futtatás használata a prognózisok jóságára nézve e tekintetben szintén kedvező hatással járt, mivel a Pécsre vonatkozó előrejelzések mellett ekkor már a Budapestre készített 88%-a is a 2 °C-os hibatarományon belülre esett. A legkevésbé megbízható prognózisok mindkét modellfuttatás során Győrött fordultak elő leggyakrabban, ahol ez az érték csak 80%-nak adódott.

Az előrejelzett időpont közeledtével a prognózisokban bekövetkező javulás a különböző verifikációs hibastatisztikák értékében szintén jól látszódik (10. táblázat). A MAE

dekádonkénti átlagértékei alapján azt is kimutattuk, hogy kivétel nélkül minden állomáson a téli évszakban készült előrejelzések a legkevésbé megbízhatók, míg a legpontosabb előrejelzések rendre nyáron készültek (lásd *Függelék F25. és F26. ábra*).



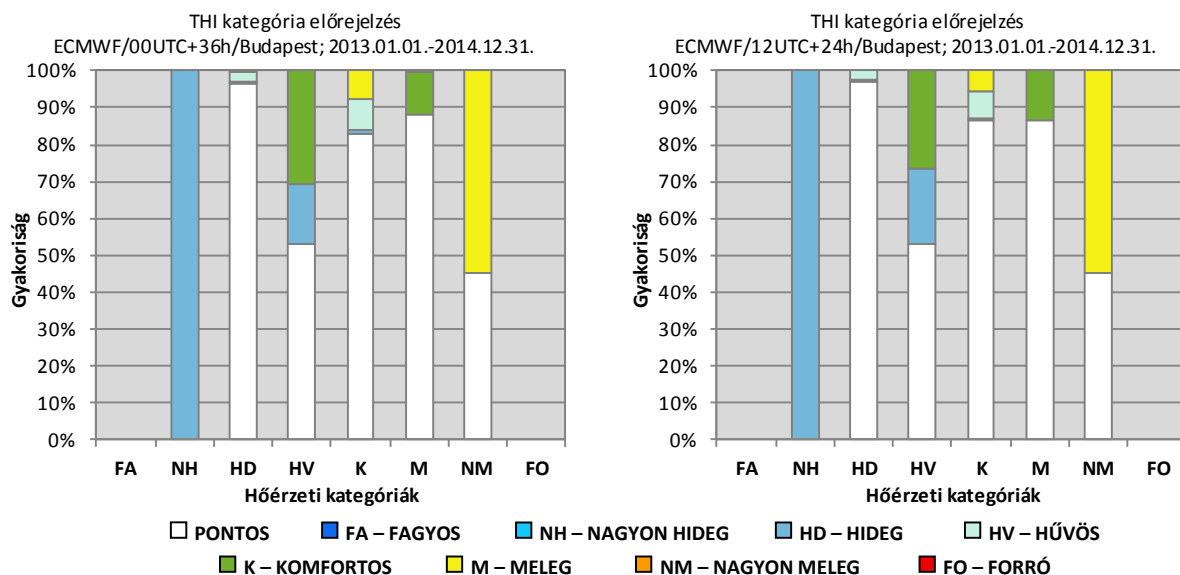
12. ábra – A THI 00 UTC-s (fent) és 12 UTC-s (lent) modellfuttatásból készített eloszlás diagramjai Budapestre vonatkozóan

10. táblázat – A THI-re vonatkozó verifikációs hibastatisztikák a 00 UTC-s és a 12 UTC-s modellfuttatások alapján

Állomás	Modellfuttatás: 00 UTC			Modellfuttatás: 12 UTC		
	<i>Bias</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>Bias</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>
Budapest	0,143	1,075	1,547	0,042	0,990	1,401
Győr	0,744	1,205	1,737	0,673	1,134	1,637
Szombathely	0,394	1,157	1,717	0,286	1,085	1,571
Pécs	0,419	1,121	1,640	0,251	1,012	1,464
Szeged	0,572	1,130	1,646	0,497	1,050	1,526
Debrecen	0,424	1,072	1,616	0,333	1,005	1,475

Kontingencia táblázatokon alapuló verifikáció eredményei

A THI hőérzeti tartományainak előrejelzése – mint ahogyan az arra vonatkozó verifikációs diagramok alapján látható (13. ábra, Függelék F30. ábra) – minden állomáson hasonló eredménnyel lehetséges. A *komfortos*, *meleg* és legfőképpen a *hideg* kategóriák esetében tapasztalható kiugróan jó prognózisok mellett kivétel nélkül mindenhol észrevehető, hogy a többi kategóriára készített előrejelzések lényegesen nagyobb hibával terheltek. Ez kiváltképp a *nagyon hideg* kategóriára teljesül, melyet csak ritkán sikerült jól prognosztizálni. Megjegyzendő ugyanakkor, hogy a vizsgált időszak alatt *fagyos* és *forró* kategória előfordulására egyszer sem volt példa, így ezek előrejelezhetőségéről egyelőre nem rendelkezünk információval. Hibátlan THI előrejelzések általánosságban véve a vizsgált időszak 85-88%-ában készültek, Győrött és Pécsen a 12 UTC-s futtatás során viszont már a 90%-os megbízhatóságot is sikerült elérni. A helytelen prognózisokról mindazonáltal elmondható, hogy leggyakrabban a *komfortos* kategóriáig a megfigyelt felülbecslését, a melegebb hőérzeti tartományokra vonatkozóan pedig inkább már azok alulbecslését adták. Ez alól csak a Budapestre és Pécsre vonatkozó előrejelzések képeznek kivételt, mely állomásokon a valódi kategóriák alulbecslése csak a *hűvös* tartományig jellemző.



13. ábra – A THI kategóriás verifikáció diagramjai Budapestre vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) futtatások alapján

A 12 UTC-s modellfuttatás a THI kategóriáinak előrejelezhetőségét többnyire pozitívan befolyásolta. Ez leghatározottabban a *komfortos* tartománynál mutatható ki, mivel az erre vonatkozó prognózisok csak Szegeden nem váltak megbízhatóbbá. Az előrejelzett időpont közeledte ehhez hasonló, de már kevesebb helyen tapasztalható változást hozott a *hűvös* és

nagyon meleg kategóriák előrejelezhetőségében is, míg sajnálatos módon az emberi szervezet számára fokozottabb megterheléssel járó *nagyon hideg* kategória prognosztizálása csak Győrött és Pécsen javult. A 00 UTC-s és 12 UTC-s futtatások prognózisainak bevételei közötti különbségek pontos megállapítása így a teljes időszakra (11. táblázat) és az egyes évszakokra (12. táblázat) kiszámított verifikációs mérőszámok segítségével lehetséges.

11. táblázat – A THI teljes időszakra vonatkozó verifikációs mérőszámai

TELJES IDŐSZAK				
Állomás	00 UTC		12 UTC	
	<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>
Budapest	0,866	0,809	0,874	0,820
Győr	0,867	0,812	0,896	0,852
Szombathely	0,863	0,804	0,881	0,829
Pécs	0,881	0,830	0,899	0,855
Szeged	0,864	0,810	0,871	0,819
Debrecen	0,853	0,793	0,881	0,832
Országos	0,866	0,810	0,884	0,835

12. táblázat – A THI évszakokra vonatkozó verifikációs mérőszámai

TAVASZ					NYÁR				
Állomás	00 UTC		12 UTC		Állomás	00 UTC		12 UTC	
	<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>		<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>
Budapest	0,832	0,754	0,848	0,776	Budapest	0,880	0,714	0,886	0,734
Győr	0,826	0,747	0,875	0,817	Győr	0,880	0,747	0,891	0,771
Szombathely	0,826	0,740	0,891	0,837	Szombathely	0,870	0,740	0,864	0,728
Pécs	0,842	0,769	0,864	0,803	Pécs	0,897	0,748	0,913	0,798
Szeged	0,821	0,743	0,815	0,737	Szeged	0,908	0,717	0,924	0,774
Debrecen	0,788	0,704	0,821	0,750	Debrecen	0,864	0,596	0,924	0,792
Országos	0,822	0,743	0,852	0,787	Országos	0,883	0,710	0,900	0,766

ŐSZ					TÉL				
Állomás	00 UTC		12 UTC		Állomás	00 UTC		12 UTC	
	<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>		<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>
Budapest	0,780	0,683	0,791	0,699	Budapest	0,972	-0,009	0,972	-0,009
Győr	0,824	0,744	0,868	0,806	Győr	0,939	0,452	0,950	0,452
Szombathely	0,813	0,726	0,824	0,738	Szombathely	0,944	0,262	0,944	0,262
Pécs	0,857	0,789	0,879	0,818	Pécs	0,928	0,453	0,939	0,500
Szeged	0,813	0,733	0,813	0,731	Szeged	0,917	0,470	0,933	0,495
Debrecen	0,819	0,731	0,841	0,763	Debrecen	0,944	0,357	0,939	0,249
Országos	0,818	0,734	0,836	0,759	Országos	0,941	0,331	0,946	0,325

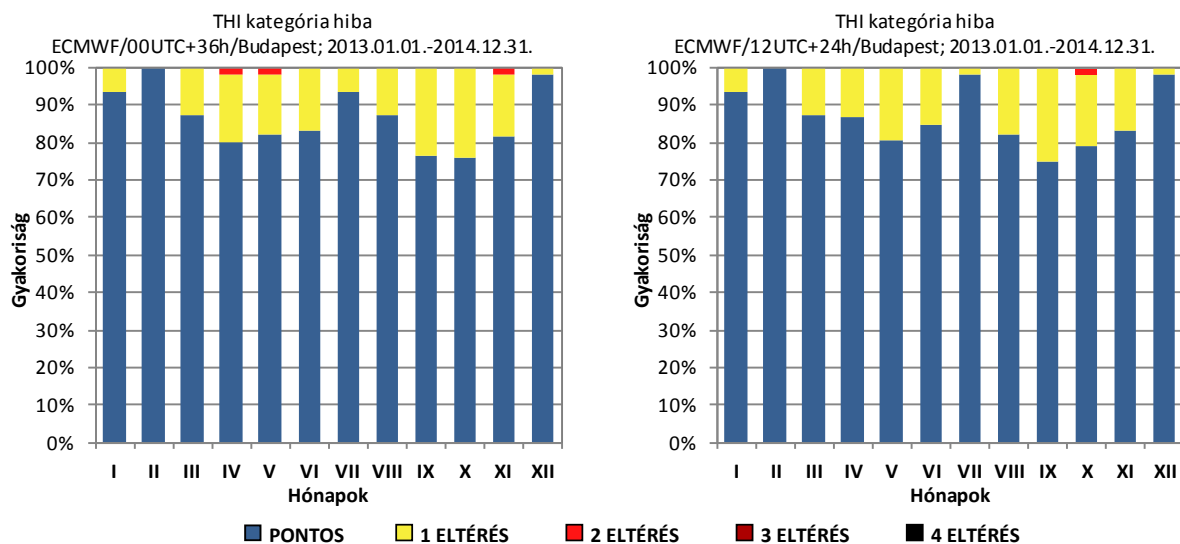
A *PC* és *HSS* verifikációs mérőszámok teljes időszakra kapott értékeit szemlélve észrevehető, hogy az előrejelzett időponthoz közelebb minden állomáson kedvezőbb beválási mutatók születtek. A legnagyobb időbeli fejlődés a Debrecenre vonatkozó előrejelzésekben következett be, ahol mindegyik hőérzeti tartomány nagyobb sikerrel került prognosztizálásra.

Az előrejelzett időpont közeledténél pozitív hatását a verifikációs mérőszámok évszakokra vonatkozó értékei már árnyaltabbá teszik. Az év minden időszakában előfordult ugyanis olyan állomás – leggyakrabban Szeged és Szombathely –, ahol a 00 UTC-s futtatással megbízhatóbb előrejelzések készültek. Télen mindemellett ez az eset olyan gyakori, hogy még országos szinten sem lehet egyértelmű megállapítást tenni egyik, vagy másik futtatás kedvezőbb voltáról. Ugyancsak télen figyelhető meg a HSS legérdekesebb értéke: a nullától csak igen kicsivel eltérő negatív szám. Ennek oka, hogy a vizsgált időszakban Budapesten a négy rosszul előrejelzett *nagyon hideg* időpont mellett csak és kizárólag a szinte tökéletesen prognosztizált *hideg* kategória fordult elő, így az előrejelzések rendkívül ritkán, és akkor is hibásan hordoztak információt.

Kategória eltéréseken alapuló verifikáció eredményei

A THI előrejelzésében bekövetkező hibák éven belüli eloszlását ábrázoló kategória eltérés diagramok (14. ábra, Függelék F38. ábra) alátámasztják az index kiváló előrejelezhetőségét. Segítségükkel könnyen megállapítható, hogy az előrejelzések minden állomáson az emberi szervezet számára nagyobb veszélyeket tartogató téli és nyári évszakokban a legmegbízhatóbbak, februárban néhol pedig még teljesen tökéletesek is. Az átmeneti évszakokban – különösen májusban – többször jelentkező kategória tévesztések száma ugyanakkor nem kimagasló. Az indexre vonatkozó kategória előrejelzések ezen éven belüli viselkedése a télen rendszeresen előforduló *hideg*, illetve a nyáron gyakori *meleg* kategória többihez képest kiváló előrejelezhetőségével magyarázható. Az előrejelzések összességében a vizsgált időszak 12-15%-ában tévesztettek csupán a megfigyeltékhez képest kategóriát, az előrejelzett időpont előtt 24 órával Győrött és Pécsen pedig ugyanez már csak 10%-nak adódott. A hibás prognózisok túlnyomó része a valóditól mindössze egy kategóriával eltérő előrejelzéseket jelenti, annál nagyobb, maximum két kategóriát tévedő prognózisok bekövetkezésére ritkán, leginkább májusban vagy szeptemberben volt példa.

A 12 UTC-s modellfuttatás az előrejelzések kategória eltéréseinek nagyságára vonatkozóan minden állomáson az egyet meghaladó szemmel látható csökkenését eredményezte. Az előrejelzett időponthoz közeledve a legtöbb helyen szintén kedvező irányba módosultak a márciusi, májusi, júniusi és októberi prognózisokban bekövetkező hibák relatív gyakoriság értékei is. Az év fennmaradó részében – kiváltképp a júliustól szeptemberig terjedő időszakban – az előrejelzések ilyen jellegű javulása már kevésbé érzékelhető.



14. ábra – A THI kategória eltéréseinek diagramjai Budapestre vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) futtatások alapján

5.3. PET – Fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet

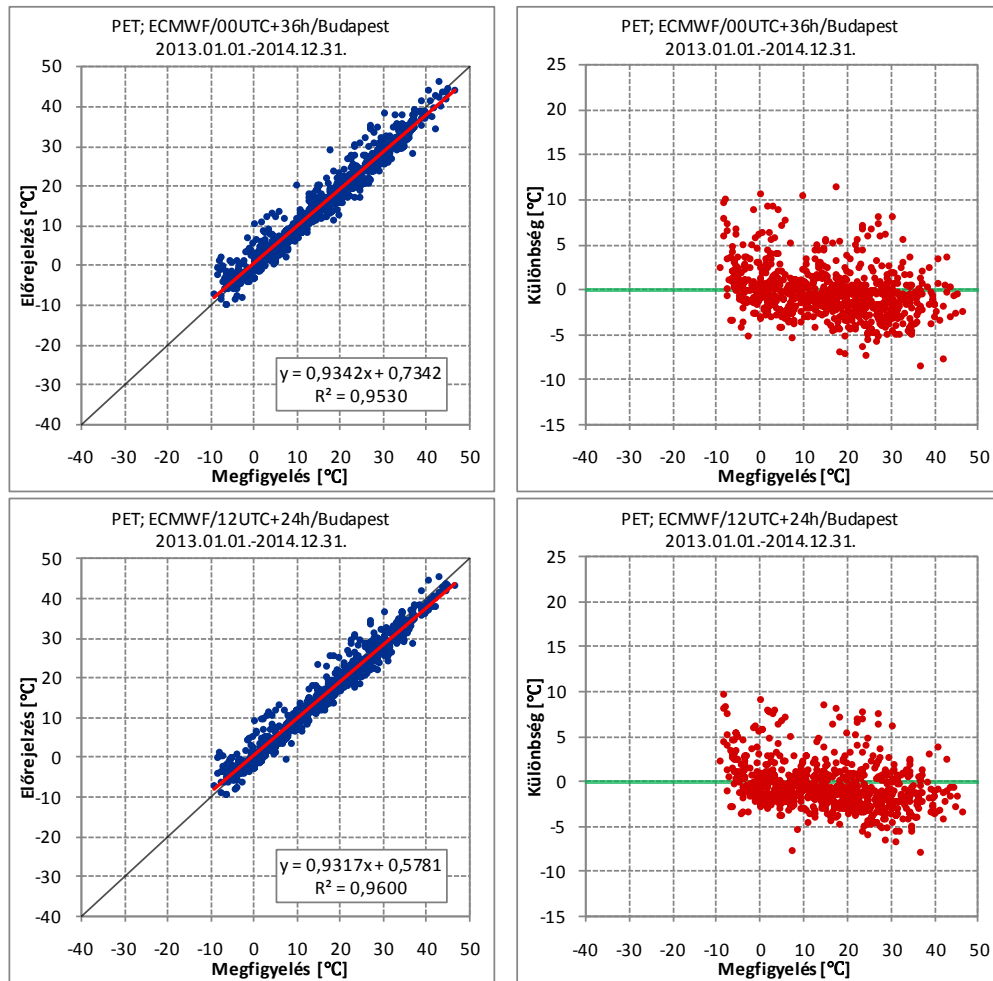
A számszerű előrejelzések verifikációjának eredményei

A fiziológiailag ekvivalens hőmérséklet számszerű előrejelzéseinek megbízhatóságáról információt nyújtó eloszlás diagramok (15. ábra és Függelék F7–F9. ábra) a KH és THI indexeknél látottaktól lényegesen eltérő képet mutatnak. Megfigyelhető, hogy a PET index esetében a prognosztizált és mért értékek már egy szélesebb hőmérsékleti tartományt fednek le, szóródásuk is – különösen a melegebb értékek felé haladva – jelentősebb. A korrelációs együtthatók viszont továbbra is minden állomáson a két adatsor szoros kapcsolatáról ($>0,9$) árulkodnak, melyek a 12 UTC-s futtatás során mindenhol tovább erősödtek. Ezek közül is kiemelkednek valamelyest mindkét kiindulási időpont alapján a Debrecenre vonatkozó korrelációs együtthatók, míg a leggyengébb összefüggés minden esetben Pécssett adódott.

A determinisztikus modell futtatásaitól függetlenül a legtöbb vizsgálatba bevont állomáson az előrejelzések fölülbecslést adnak a megfigyelésekre. Ez legjelentősebben Szegednél látható, ahol a prognózisok a 00 UTC-s futtatás esetében az időszak 72%-ában, a 12 UTC-s futtatás esetében pedig 70%-ában közelítették felülről a mért indexek értékét. Ettől eltérően Szombathelyen, és még inkább Budapesten alulbecslés vehető észre.

A grafikonok megfigyelés-különbség párokat ábrázoló pontdiagramjai megerősítést adnak az adatok nagyobb szóródására. Megállapítható, hogy a PET index esetében az előrejelzésekben nem ritkák már az 5 °C-nál nagyobb hibák, de akár a 15 °C-ot meghaladó eltérések is előfordulnak. A megfigyeléseket 2 °C-os pontossággal a 00 UTC-s futtatás alapján Szombathelyen, a 12 órával később készített prognózisok esetében pedig még Pécssett sikerült a komfort előrejelzéseknek legtöbbször megközelíteniük, ahol ez a vizsgált időszak 67%-ában teljesült. Ilyen szempontok szerint a prognózisok a 00 UTC-s futtatás során Győrött voltak a legkevésbé megbízhatók, ahol ez 56%-nak adódott. Az előrejelzett időpont közeledte azonban mindenhol, így ezen az állomáson is jobb eredményt hozott.

A PET előrejelzések jóságáról információt adó verifikációs hibastatisztikák a 13. táblázatban láthatók. Megállapítható, hogy minden állomáson – különösen Pécssett és Szegeden – a 12 UTC-s futtatásból készített prognózisok tekinthetők jobbnak, ami megfelel az elvárásainknak. A legpontatlanabb előrejelzések minden állomáson a téli hónapokban készültek leggyakrabban, míg a MAE értéke általában tavasszal és ősszel volt a legkisebb (lásd Függelék F25. és F26. ábra).



15. ábra – A PET index 00 UTC-s (fent) és 12 UTC-s (lent) modellfuttatásból készített eloszlás diagramjai Budapestre vonatkozóan

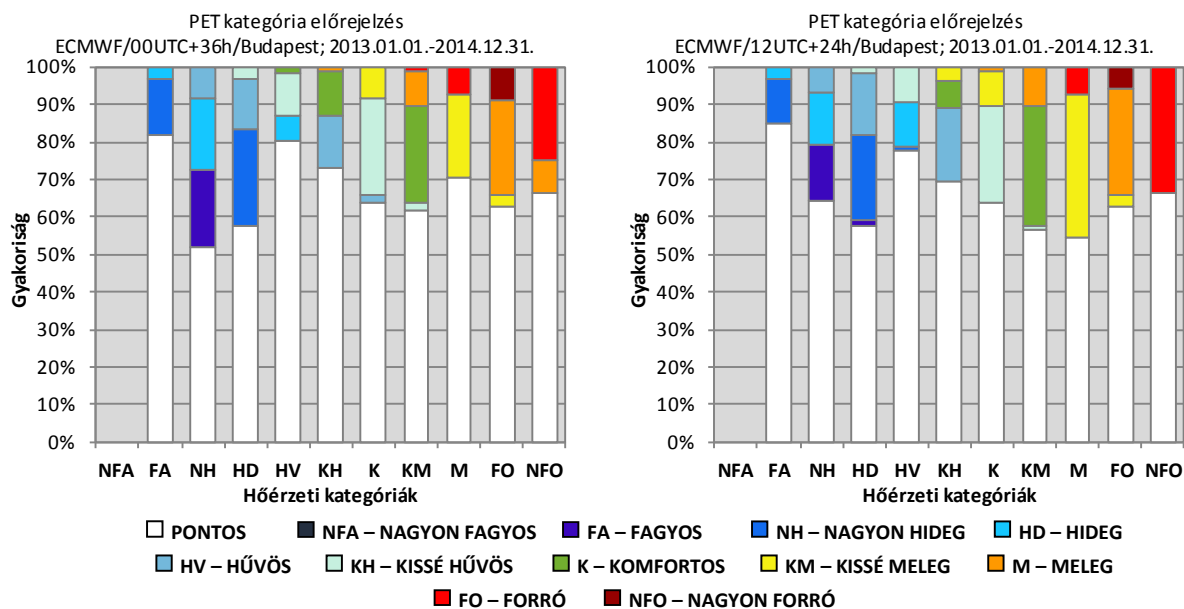
13. táblázat – A PET indexre vonatkozó verifikációs hibastatisztikák a 00 UTC-s és a 12 UTC-s modellfuttatások alapján

Állomás	Modellfuttatás: 00 UTC			Modellfuttatás: 12 UTC		
	<i>Bias</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>Bias</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>
Budapest	-0,305	2,119	2,822	-0,501	2,055	2,653
Győr	0,794	2,230	2,969	0,709	2,065	2,788
Szombathely	0,349	1,992	2,820	0,233	1,889	2,680
Pécs	0,990	2,186	3,087	0,770	1,983	2,817
Szeged	1,646	2,360	3,354	1,441	2,108	3,025
Debrecen	1,420	2,162	3,083	1,259	2,008	2,817

Kontingencia táblázatokon alapuló verifikáció eredményei

A PET hőérzeti tartományainak előrejelezhetőségéről információt adó kategóriás verifikáció diagramok a 16. ábrán és a Függelék F31. ábráján láthatók. Ezek alapján megállapítható, hogy átlagosan modellfuttatásoktól függetlenül a prognózisok a teljes időszak

64-68%-ában voltak csak teljesen megbízhatók, mely értékeket Szeged esetében mindössze a 12 UTC-s futtatás során sikerült elérni. Ilyen tekintetben a Szombathelyre vonatkozó előrejelzések kiemelkednek a többi állomásra készítették közül, mivel az előrejelzett időpont előtt 24 órával 69%-os pontosságot értek el. A diagramokat figyelve ugyanakkor szembetűnő, hogy az egyes tartományok előrejelezhetősége között jelentős különbségek adódnak. Megállapítható, hogy a legtöbb állomás esetében a hidegebb hőérzeti kategóriák közül a *hideg* és *nagyon hideg* tartományokat, a melegebb hőérzeti kategóriák közül pedig leggyakrabban a *meleg* és *forró* tartományokat nem sikerült jól prognosztizálni. Kedvezőtlen továbbá, hogy a prognózisok pontosságában sok esetben a *komfortos* tartomány előrejelzésekor is visszaesés tapasztalható. A PET esetében ugyanakkor előnyös, hogy legtöbbször az emberi szervezet számára extrém fiziológiai hatással járó tartományok – különösen a *nagyon forró* hőérzeti kategória – előrejelzése a legmegbízhatóbb. Mindezek mellett az ábrák alapján megállapítható, hogy a hibás prognózisok jellemzően a *nagyon fagyostól* a *kissé hideg*, *komfortos* tartományokig felülbecslést, míg onnantól kezdve inkább alulbecslést adnak a megfigyelt kategóriákra. Ez alól a Budapestre vonatkozó előrejelzések képeznek kivételt, ahol felülbecslés a 00 UTC-s futtatás alapján csak a *nagyon hideg* és *hűvös*, a 12 UTC-s futtatás során pedig csak a *fagyos* és *nagyon hideg* tartományoknál figyelhető meg.



16. ábra – A PET index kategóriás verifikáció diagramjai Budapestre vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) futtatások alapján

Az előrejelzett időpont közeledtével a kategória előrejelzések megbízhatóságában különböző irányú változások jelentkeznek. A legkedvezőbb módosulás a *fagyos* kategória esetében figyelhető meg, mely majdnem minden állomáson nagyobb sikerrel került

prognosztizálásra. Hasonlóan jó irányba változott a legtöbb helyen a *kissé hűvös* kategória előrejelzése is, míg a fennmaradó tartományok esetében már ritkábban figyelhető meg ilyen tendencia. Megjegyzendő ugyanakkor, hogy a *kissé meleg* és a *meleg* tartományok előrejelzése szinte mindenhol nagyobb hibával történt. A 00 UTC-s és a 12 UTC-s futtatásból készített prognózisok közötti különbség egyértelmű megállapítását így a verifikációs mérőszámok használata teszi lehetővé. Értékeik a teljes vizsgált időszakra vonatkozóan a 14. táblázatban, évszakos bontásban pedig a 15. táblázatban láthatók.

14. táblázat – A PET index teljes időszakra vonatkozó verifikációs mérőszámai

TELJES IDŐSZAK				
Állomás	00 UTC		12 UTC	
	<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>
Budapest	0,677	0,635	0,660	0,616
Győr	0,647	0,601	0,655	0,610
Szombathely	0,659	0,612	0,692	0,649
Pécs	0,644	0,597	0,662	0,617
Szeged	0,612	0,564	0,645	0,601
Debrecen	0,640	0,593	0,678	0,637
Országos	0,646	0,600	0,665	0,622

15. táblázat – A PET index évszakokra vonatkozó verifikációs mérőszámai

TAVASZ					NYÁR				
Állomás	00 UTC		12 UTC		Állomás	00 UTC		12 UTC	
	<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>		<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>
Budapest	0,696	0,631	0,636	0,559	Budapest	0,690	0,591	0,641	0,529
Győr	0,658	0,585	0,652	0,578	Győr	0,652	0,556	0,663	0,572
Szombathely	0,712	0,650	0,739	0,682	Szombathely	0,679	0,584	0,734	0,655
Pécs	0,614	0,536	0,625	0,548	Pécs	0,663	0,555	0,641	0,530
Szeged	0,641	0,572	0,652	0,584	Szeged	0,625	0,501	0,658	0,547
Debrecen	0,636	0,566	0,707	0,650	Debrecen	0,674	0,558	0,690	0,582
Országos	0,659	0,590	0,668	0,600	Országos	0,664	0,558	0,671	0,569

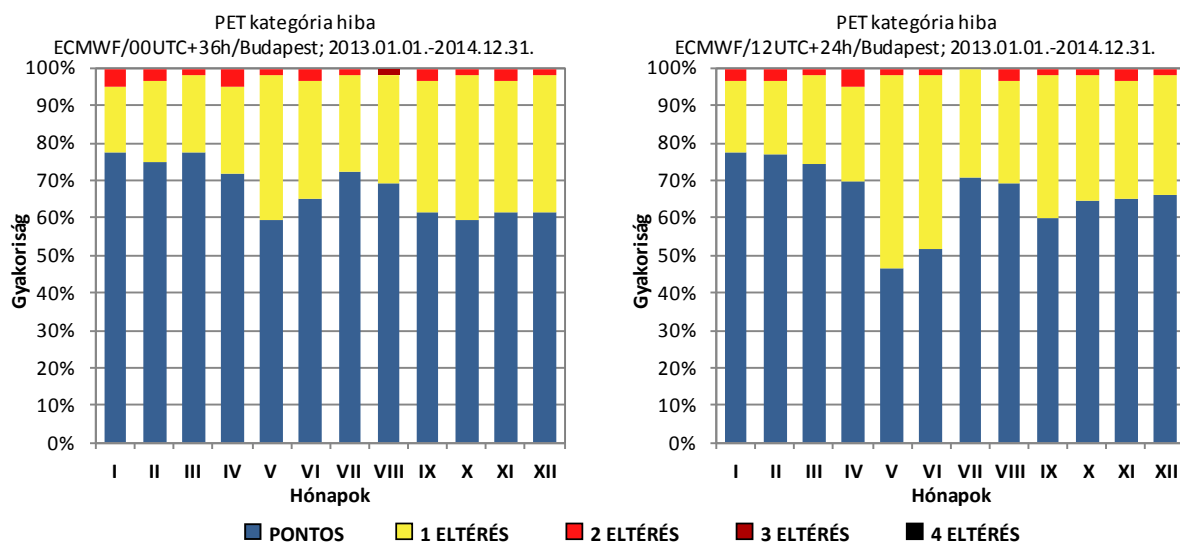
ŐSZ					TÉL				
Állomás	00 UTC		12 UTC		Állomás	00 UTC		12 UTC	
	<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>		<i>PC</i>	<i>HSS</i>	<i>PC</i>	<i>HSS</i>
Budapest	0,610	0,534	0,632	0,560	Budapest	0,711	0,585	0,733	0,614
Győr	0,610	0,535	0,637	0,566	Győr	0,667	0,527	0,667	0,524
Szombathely	0,643	0,570	0,648	0,575	Szombathely	0,600	0,426	0,644	0,487
Pécs	0,643	0,571	0,698	0,636	Pécs	0,656	0,540	0,683	0,572
Szeged	0,637	0,564	0,648	0,578	Szeged	0,544	0,399	0,622	0,499
Debrecen	0,599	0,518	0,648	0,578	Debrecen	0,650	0,523	0,667	0,542
Országos	0,624	0,549	0,652	0,582	Országos	0,638	0,500	0,669	0,540

A két futtatás *PC* és *HSS* verifikációs mérőszámainak összehasonlításakor kitűnik, hogy a vizsgált időszak alatt az előrejelzett időpont előtt 24 órával Budapest kivételével mindenhol kedvezőbb értékek születtek. Ezen állomás többitől eltérő viselkedése a legtöbb évszakban

ugyanígy megfigyelhető, továbbá Győrött és Pécsen is időnként jobb eredményt ad a 00 UTC-s futtatás használata. A determinisztikus modell 12 UTC-s futtatásából készített előrejelzések az őszi évszakban hozták a prognózisok legegységesebb javulását, mikor az előrejelzett időpont közeledte mindenhol kedvező kimenetelű volt.

Kategória eltéréseken alapuló verifikáció eredményei

A PET előrejelzések kategória eltérés diagramjai (17. ábra és Függelék F39. ábra) alapján első ránézésre szembevetendő, hogy kisebb-nagyobb különbségektől eltekintve a prognózisok éven belüli jósága az egyes állomásokon viszonylag egységesnek tekinthető. Összességében az előrejelzések rendkívül gyakran (31-39%-ban) tévesztettek kategóriát, melyből már az egynél nagyobb eltérések is minden hónapban jelentős részt képviseltek. Ezek közül is kiemelkedő a téli időszak megbízhatatlansága, mikor a prognózisok modellfuttatásoktól függetlenül átlagosan 4%-os gyakorisággal vétettek kettőnél több kategóriát. A legnagyobb hiba a Szegedre készített előrejelzéseknél mutatkozik, mikor áprilisban a megfigyelttől négy kategóriával is eltérő előrejelzések készültek. Ugyanakkor az eredményeket minden állomásra egyszerre összevetve észrevehető, hogy mindenhol más és más évszak és hónap volt a legjobban, illetve legrosszabbul előrejelezhető, így erre vonatkozóan nem lehet egységes megállapítást tenni.



17. ábra – A PET index kategória eltéréseinek diagramjai Budapestre vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) futtatások alapján

Az előrejelzett időpont közeledte a prognózisok jóságára nézve különböző hatással járt. Egyrészt a 12 UTC-s futtatás során minden állomáson nőtt a decemberre vonatkozó előrejelzések megbízhatósága, valamint novemberben is csak Szombathelyen nem váltak a

prognózisok pontosabbá. Ugyanez már nem mondható el azonban az augusztus hónapról, mikor az előrejelzett időpont közeledte csak a Győrre készített előrejelzésekre volt kedvező hatással. Másrészt mindezek mellett a 00 UTC-s futtatáshoz képest többnyire kedvező irányba módosultak az eltérések relatív gyakoriság értékei is. Kevésbé ideális viszont, hogy háromnál nagyobb kategóriatévesztésre Szegeden még ekkor is volt példa.

5.4. UTCI – Univerzális termikus klíma index

A számszerű előrejelzések verifikációjának eredményei

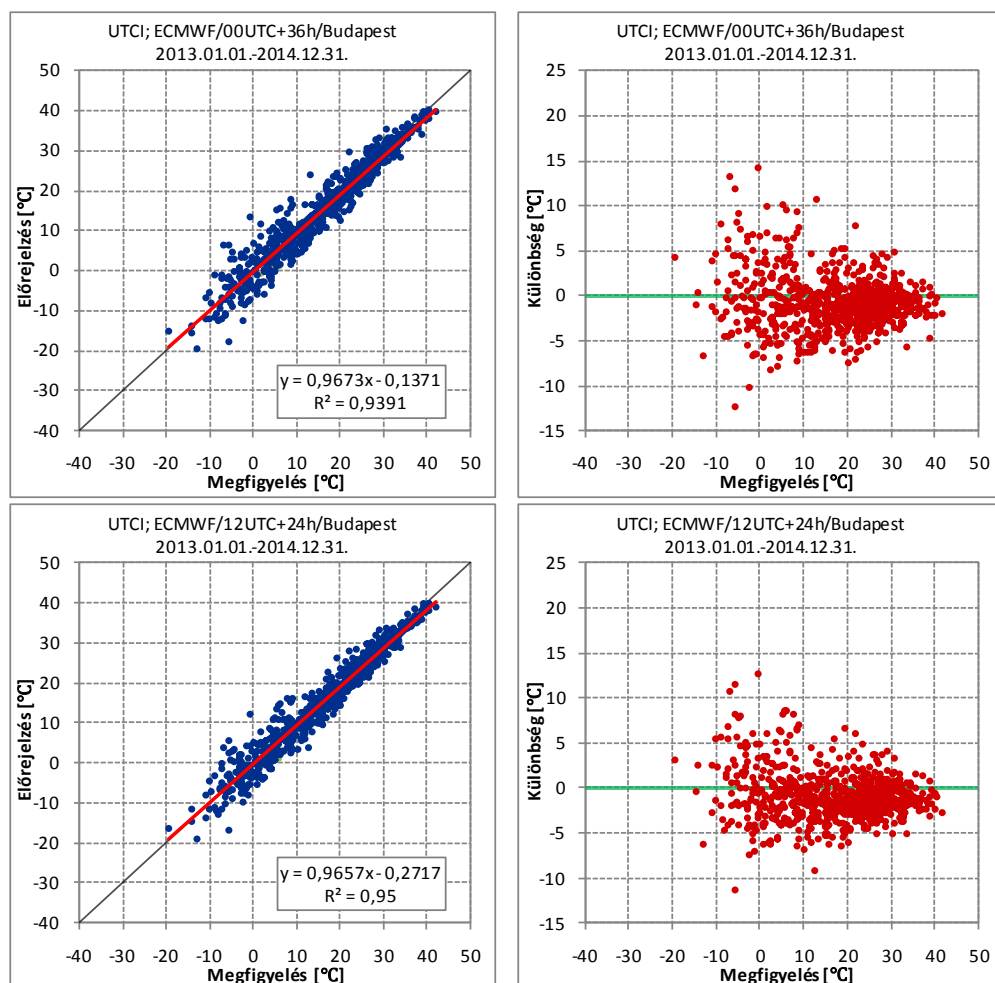
Az univerzális termikus klíma index számszerű előrejelzéseinek megbízhatóságáról képet adó eloszlás diagramok a 18. ábrán és a Függelék F10–F12. ábráján láthatók. Ezeket szemlélve észrevehető, hogy a különböző hőmérsékleti tartományokra előrejelzett és megfigyelt értékek kapcsolatának szorossága között jelentős eltérések adódnak. Minden állomás esetén megfigyelhető ugyanis, hogy míg a bioklíma index magasabb értékeit a prognózisok rendkívül jól közelítik, addig az alacsonyabb tartományok felé haladva az adatok szóródása fokozatosan nő. Ennek hatása a korrelációs együtthatókban azonban nem tükröződik, mivel minden állomáson a valós és előrejelzett értékek igen közeli kapcsolatáról, az előrejelzett időpont közeledtével pedig ezek további erősödéséről árulkodnak. A két adatsor legszorosabban mind a 00 UTC-s, mind a 12 UTC-s modellfuttatás során Debrecennél, leggyengébben pedig Pécsen, illetve az előrejelzett időponthoz közelebb még Győrött függött össze.

Az UTCI előrejelzések alul- és fölübecsléseit vizsgálva a diagramok alapján elmondható, hogy az állomásokon leginkább az utóbbi volt jellemző. Különösen igaz ez a Szegedre készített előrejelzésekre, melyek a 00 UTC-s futtatás során a vizsgált időszak 78%-ában, a 12 UTC-s futtatás során pedig a 76%-ában várták az index valódinál magasabb értékét. Ezzel szemben Budapesten és Szombathelyen a prognózisok többsége alulról közelítette a megfigyeléseket.

A vizsgált időszak alatt a mért és előrejelzett értékek közötti különbségek rendkívül tág határok között változtak. Az eloszlás diagramok erre vonatkozó részei alapján látható, hogy nem tekinthetők ritkának a 10 °C-nál nagyobb eltérések, de a 20 °C-ot meghaladó differencia sem példanélküli. A megfigyelt értékeket 2 °C-os pontossággal a 00 UTC-s futtatás alapján Szombathelyen, a 12 UTC-s futtatás során pedig Pécsen közelítették meg leggyakrabban a prognózisok, mely mindkét állomás esetében az előrejelzések 62%-át jelentette. Ugyanez Győrre vonatkozóan azonban az előrejelzett időpont előtt 36 órával készített prognózisok mindössze 49%-ára, a 12 órával későbbieknek pedig 52%-ára volt csak igaz.

Az UTCI előrejelzésére vonatkozó verifikációs hibastatisztikák (16. táblázat) jól mutatják a prognózisok jóságának időbeli javulását. A MAE értékeinek dekádonkénti átlagaiból arra is fény derül, hogy minden állomáson a nyári évszak előrejelzései voltak a

legpontosabbak, míg a téli időszakban a legnagyobb hibával terheltek (lásd *Függelék F25. és F26. ábra*).



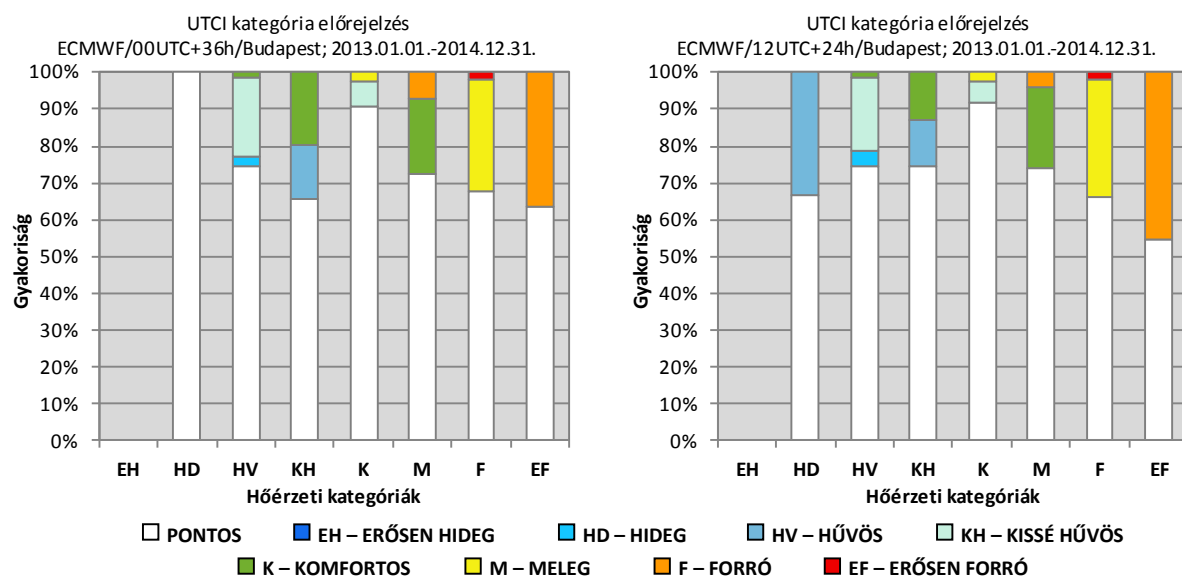
18. ábra – Az UTCI 00 UTC-s (fent) és 12 UTC-s (lent) modellfuttatásból készített eloszlás diagramjai Budapestre vonatkozóan

16. táblázat – Az UTCI-re vonatkozó verifikációs hibastatisztikák a 00 UTC-s és a 12 UTC-s modellfuttatások alapján

Állomás	Modellfuttatás: 00 UTC			Modellfuttatás: 12 UTC		
	<i>Bias</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>Bias</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>
Budapest	-0,694	2,303	3,103	-0,855	2,188	2,858
Győr	1,062	2,888	4,000	0,990	2,734	3,824
Szombathely	0,014	2,335	3,339	-0,136	2,243	3,233
Pécs	1,340	2,623	3,884	1,152	2,403	3,586
Szeged	2,388	2,940	4,191	2,204	2,712	3,885
Debrecen	1,943	2,548	3,620	1,778	2,365	3,333

Kontingencia táblázatokon alapuló verifikáció eredményei

Az UTCI hőérzeti tartományainak előrejelzése – mint ahogyan az ezt ábrázoló kategóriás verifikáció diagramok (19. ábra és Függelék F32. ábra) alapján látható – az előzőektől eltérő eredménnyel lehetséges. A legtöbb állomás esetében megfigyelhető ugyanis, hogy míg a *komfortostól* az *erősen forró* tartományokig a prognózisok alapvetően megbízhatónak tekinthetők, addig a *komfortostól* a hidegebb kategóriák felé haladva ez a megbízhatóság egyre inkább csökken. Ebből adódóan nem meglepő, hogy a legrosszabbul előrejelzett kategória rendszerint az *erősen hideg* vagy a *hideg* tartományok közül kerül ki. Ettől némiképp eltérő képet mutatnak a Budapestre és Szombathelyre elkészített diagramok, ahol érdekes módon a hideg stresszel járó kategóriák prognosztizálása sem tekinthető kifejezetten rossznak. Az összes állomásra ugyanakkor egységesen jellemző, hogy a *komfortos* kategória előrejelzése kiemelkedően jó, sok esetben pedig a legpontosabb is. Általánosságban elmondható, hogy az UTCI előrejelzések többnyire a vizsgált időszak 74-79%-ában voltak teljesen helyesek. Megjegyzendő viszont, hogy míg ezt a Szegedre vonatkozó prognózisok csak a 12 UTC-s futtatás során valósították meg, addig a Budapestre és Szombathelyre készített előrejelzések a 81%-os pontosságot is elérték. A téves előrejelzések jellemzőit vizsgálva megállapítható, hogy leggyakrabban az *erősen hidegtől* a *komfortos*, esetenként a *meleg* kategóriákig a megfigyeltet fölülbecslését, míg onnantól inkább az alulbecslését adták. Kivételt képez ez alól Budapest, ahol alulbecslés mindkét modellfuttatás alapján már a *komfortos* kategóriától is észrevehető.



19. ábra – Az UTCI kategóriás verifikáció diagramjai Budapestre vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) futtatások alapján

Az előrejelzett időpont közeledte a legtöbb hőérzeti kategória nagyobb sikerrel történő előrejelzését eredményezte. Különösen igaz ez a *kissé hűvös, komfortos és meleg* tartományokra, melyek csak egy-egy állomáson lettek rosszabbul prognosztizálva. Ugyancsak a vizsgált helyszínek többségén megbízhatóbbá vált a *forró* kategória előrejelzése is, míg sajnálatos módon az emberi szervezet számára nagyon erős megterheléssel járó tartományok prognózisai nem, vagy inkább csak rosszabb irányba módosultak. A két futtatás egzakt összehasonlítása céljából célszerű a verifikációs mérőszámok modellfuttatásonkénti értékeire is pillantást vetni. Ezek a teljes időszakra vonatkozóan a 17. táblázatban, évszakokra bontva pedig a 18. táblázatban láthatók.

17. táblázat – Az UTCI teljes időszakra vonatkozó verifikációs mérőszámai

TELJES IDŐSZAK				
Állomás	00 UTC		12 UTC	
	PC	HSS	PC	HSS
Budapest	0,793	0,711	0,811	0,736
Győr	0,742	0,643	0,748	0,652
Szombathely	0,805	0,721	0,804	0,718
Pécs	0,747	0,638	0,782	0,690
Szeged	0,733	0,634	0,741	0,644
Debrecen	0,766	0,678	0,782	0,701
Országos	0,764	0,671	0,778	0,690

18. táblázat – Az UTCI évszakokra vonatkozó verifikációs mérőszámai

TAVASZ					NYÁR				
Állomás	00 UTC		12 UTC		Állomás	00 UTC		12 UTC	
	PC	HSS	PC	HSS		PC	HSS	PC	HSS
Budapest	0,902	0,796	0,902	0,789	Budapest	0,734	0,605	0,761	0,645
Győr	0,804	0,613	0,793	0,586	Győr	0,755	0,646	0,761	0,653
Szombathely	0,908	0,792	0,908	0,791	Szombathely	0,783	0,667	0,783	0,670
Pécs	0,853	0,696	0,864	0,713	Pécs	0,717	0,565	0,755	0,627
Szeged	0,761	0,552	0,772	0,575	Szeged	0,777	0,660	0,783	0,668
Debrecen	0,750	0,554	0,804	0,648	Debrecen	0,832	0,737	0,832	0,736
Országos	0,830	0,667	0,841	0,684	Országos	0,766	0,647	0,779	0,667

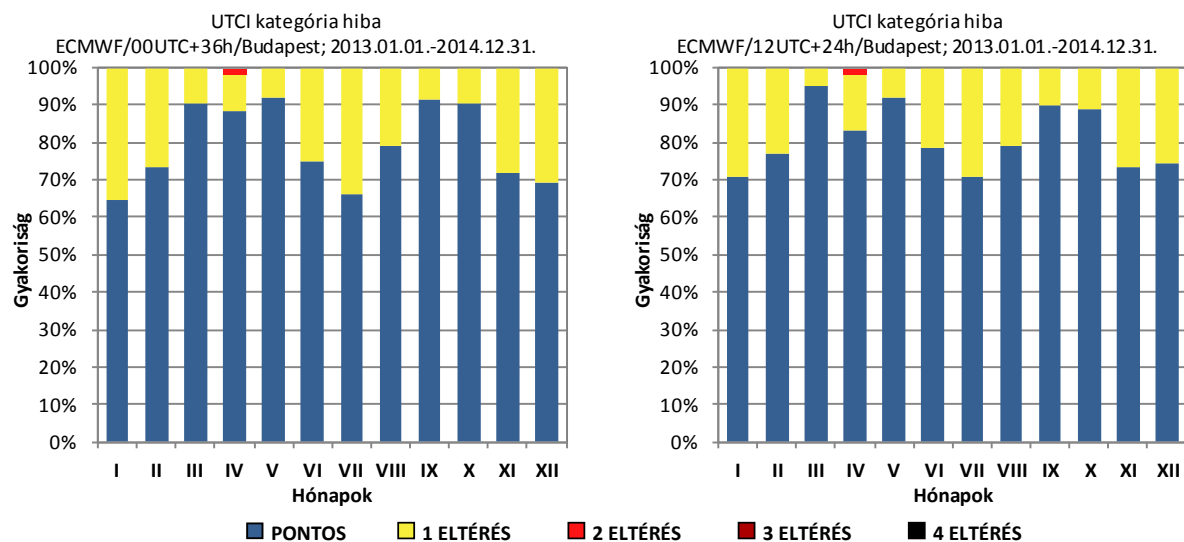
ŐSZ					TÉL				
Állomás	00 UTC		12 UTC		Állomás	00 UTC		12 UTC	
	PC	HSS	PC	HSS		PC	HSS	PC	HSS
Budapest	0,846	0,668	0,841	0,670	Budapest	0,689	0,517	0,739	0,586
Győr	0,835	0,671	0,824	0,657	Győr	0,572	0,363	0,611	0,421
Szombathely	0,841	0,663	0,824	0,636	Szombathely	0,689	0,515	0,700	0,537
Pécs	0,786	0,546	0,830	0,646	Pécs	0,628	0,457	0,678	0,527
Szeged	0,797	0,588	0,819	0,634	Szeged	0,594	0,396	0,589	0,394
Debrecen	0,852	0,685	0,852	0,688	Debrecen	0,628	0,467	0,639	0,479
Országos	0,826	0,637	0,832	0,655	Országos	0,633	0,453	0,659	0,491

A *PC* és a *HSS* értékei alapján megállapítható, hogy a teljes időszak alatt a 12 UTC-s futtatás során csak a Szombathelyre vonatkozó UTCI előrejelzések nem váltak pontosabbá. A beválási mutatók évszakos értékei szerint a 12 UTC-s futtatás használata csak Pécs esetében járt egyöntetűen jobb eredménnyel. Látható az is, hogy az előrejelzett időpont közeledte tavasszal és télen hozta az előrejelzések legegységesebb javulását. Országos átlagban ugyanakkor egyik évszakban sem kétséges a prognózisok 12 UTC-s modellfuttatás okozta javulása, bár némely állomáson még e két beválási mutató segítségével sem hozható döntés a két futtatás eredményesebb használata mellett.

Kategória eltéréseken alapuló verifikáció eredményei

Az UTCI kategória eltérés diagramjait szemlélve (20. ábra és Függelék F40. ábra) az előrejelzések éven belüli jóságának egy jellegzetes képe tárul a szemünk elé. Az összes állomás esetében megfigyelhető ugyanis, hogy a tökéletes prognózisok gyakorisága mindenhol kettős – jellemzően tavaszi és őszi – maximummal rendelkezik. Ennek oka vélhetően a hőérzeti kategóriák típusában keresendő, mivel minden esetben ezen időszakok az időjárás szempontjából a legkomfortosabbak, mely tartományt – mint már korábban említettük – a prognózisok kifejezetten jól jeleznek előre. Ebből kiindulva már nem okoz meglepetést a téli évszakban, azon belül is leggyakrabban a januárban megfigyelt hőérzetek kevésbé megbízható előrejelzettsége sem. A prognózisokról mindezeket túl elmondható, hogy a vizsgált időszak 19-27%-ában tévesztettek kategóriát. Megállapítható ugyanakkor, hogy ennek túlnyomó része a megfigyelttől egy kategóriával eltérő előrejelzéseket jelenti, az annál nagyobb hibák lényegesen kisebb gyakorisággal, és inkább csak a téli hónapokban mutatkoznak. Ez alól képeznek valamelyest kivételt a Pécsre és Szegedre vonatkozó előrejelzések, melyek az év folyamán gyakrabban vétettek egynél nagyobb kategóriát. Meg kell emellett jegyezni, hogy kettőt meghaladó eltérésre egyik állomáson sem volt példa.

A determinisztikus modell különböző futtatásából készített komfort előrejelzések összehasonlításakor szabad szemmel is észrevehető, hogy az előrejelzett időponthoz közeledve majdnem minden állomáson csökkent az egynél nagyobb kategóriatévesztések relatív gyakorisága. Ezzel párhuzamosan egyöntetűen kedvező irányba módosult a decemberi napokra vonatkozó prognózisok megbízhatósága is, valamint a tavasz és a tél többi hónapjánál is az ehhez hasonló változások mutathatók ki nagyobb gyakorisággal. Mindezzel szemben az év fennmaradó részében már kevésbé érzékelhető az előrejelzések ilyen jellegű javulása, sok esetben pedig inkább annak ellenkezője figyelhető meg.



20. ábra – Az UTCI kategória eltéréseinek diagramjai Budapestre vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) futtatások alapján

6. Összefoglalás

Munkánk során a humán bioklimatológia magyarországi viszonylatban még feltáratlan területével, a humán komfort rendszeres rövidtávú előrejelezhetőségének lehetőségével foglalkoztunk. Vizsgálatunkat a jelenlegi dolgozatban nyolc bioklíma indexre (ET, WBGT, KH, THI, HI, WCT, PET, UTCI) terjesztettük ki, melyeknek előállítottuk az elmúlt két év 12 UTC-s időpontjára előrejelzett értékét hat különböző földrajzi fekvésű hazai meteorológiai állomásra (Budapest, Győr, Szombathely, Pécs, Szeged, Debrecen) vonatkozóan. Az ezekhez szükséges meteorológiai állapotthatározókat az ECMWF determinisztikus modell szolgáltatta, melynek egyúttal – a prognózisok időbeli változásának felmérése céljából – a 00 UTC-s és a 12 UTC-s kezdeti mezőkből indított futtatását is felhasználtuk. A komfort előrejelzések jóságát leginkább befolyásoló szél esetében ugyanakkor – a jobb eredmények elérésének reményében – a 12 UTC-s adatok helyett annak 9 UTC és 15 UTC közötti átlagértékével számoltunk. Legfontosabb feladatunk mindazonáltal az ily módon rendelkezésünkre álló előrejelzések verifikációjának elvégzése volt. Mivel alapvető céljaink között szerepelt, hogy a vizsgálatunk a lehetőségekhez mérten mindenre kiterjedő legyen, ezért ezt a számszerű prognosztizált értékeken túl az azoknak megfelelő hőérzeti, illetve kockázati kategóriákra vonatkozóan is végrehajtottuk. Előbbi megvalósítása érdekében minden állomásra modellfuttatásonkénti *eloszlás diagramokat* készítettünk, valamint több verifikációs hibastatisztikát is kiszámítottunk, esetenként megjelenítettünk. A hőérzeti, illetve kockázati kategória előrejelzések jóságának vizsgálatokor különböző módszerek alapján jártunk el. Egyrészt létrehoztuk a teljes időszakra, valamint az évszakokra vonatkozó ún. kategóriás verifikáció során alkalmazott *kontingencia táblázatokat*, melyekből kiszámítottuk a *Heidke Skill Score (HSS)* és a *Proportion Correct (PC)* verifikációs mérőszámokat, valamint kidolgoztuk a táblázatok egyfajta ábrázolását is. Másrészt szemügyre vettük a kategória előrejelzések hibáinak éven belül eloszlását, megalkotva belőlük a *kategória eltérés diagramokat*.

Összességében – a dolgozatban bővebben kifejtett KH, THI, PET és UTCI indexek eredményeinek ismeretében – a humán komfort számszerű előrejelezhetőségével kapcsolatosan a következő tézisszerű megállapítások tehetők:

- A THI, és még inkább a KH index előrejelezhetősége a másik két bioklíma indexéhez képest kimagaslóan jó. A legrosszabb eredmények rendszerint az UTCI előrejelzésénél tapasztalhatók.

- A Pécsre vonatkozó előrejelzések mind a négy, a Szombathelyre készítették pedig a THI kivételével mindegyik bioklíma index alapján a legmegbízhatóbbak közé sorolhatók. A prognózisok ezzel szemben rendszerint Szegeden és Győrött a legpontatlanabbak.
- Az előrejelzésekben egyértelműen fölübecslés tapasztalható nagyobb gyakorisággal, mely Szegeden érzékelhető leginkább. Budapesten és Szombathelyen azonban kivétel nélkül alulbecslés figyelhető meg.
- A legjobban előrejelezhető évszak leggyakrabban a nyár, míg a legrosszabb eredmények egyértelműen télen születnek.
- A determinisztikus modell 12 UTC-s futtatása mindegyik vizsgálatba bevont állomáson az előrejelzések megbízhatóbbá válását eredményezi.

A bioklíma indexek kategóriáinak előrejelzése során tapasztaltak a következő pontokban foglalhatók össze:

- A THI hőérzeti tartományainak előrejelzése minden szempontból kiemelkedően jó, míg a prognózisok a PET index esetében a legkevésbé megbízhatók.
- Mindegyik bioklíma index alapján a Szegedre vonatkozó hőérzeti kategóriák előrejelzései a legnagyobb hibával terheltek, míg a legpontosabb prognózisok leggyakoribb előfordulási helyszíne nem egységes.
- A termikus komfortindexek téves kategória előrejelzéseiben inkább felülbecsülés tapasztalható, alulbecslés csak Budapesten jellemző.
- A legmegbízhatóbb és legpontatlanabb előrejelzések bioklíma indexenként más-más évszakban jelentkeznek nagyobb gyakorisággal, így e téren nem lehet egységes megállapítást tenni.
- A 12 UTC-s modellfuttatás a teljes időszakra vonatkozó verifikációs mérőszámok alapján az empirikus indexek előrejelzésében egyértelműen érzékelhető, a racionális indexek esetében pedig csak kisebb mértékben kimutatható javulást hoz. Mindemelllett az előrejelzett időponthoz közeledve a nagyobb kategória eltérések száma rendszerint csökken.

Ezen sorokat áttekintve egy érdekes különbség fedezhető fel a számszerű és a kategóriás előrejelzések eredményei között. Látható ugyanis, hogy míg az előbbi esetében a legkevésbé megbízható prognózisok az UTCI-nél tapasztalhatók, addig az utóbbinál ugyanez már a PET indexre teljesül. Ennek háttérében a két index eltérő skálafelbontása állhat, ezért a jövőben az előrejelzéseket célszerű lenne a PET-re vonatkozóan egy, kifejezetten a közép-európai viszonyokra kialakított értéktartományra tesztelni.

A KH indexről – kiemelkedő eredményeinek láttán – úgy gondoljuk, hogy a magyar katonákra váró környezeti hőterhelés előrejelzésére jól használható, tehát a Magyar Honvédségen belül e célra már napjainkban is alkalmazott index lecserélése nem szükségszerű. E – mindezidáig kevésbé ismert – bioklíma index ilyen kedvező tulajdonsága ugyanakkor jó indokul szolgál arra nézve, hogy a rá vonatkozó tudásunkat a jövőben tovább szélesíteni igyekezzünk.

Végezetül eredményeink teljes áttekintése után a humán komfortot legjobban előrejelző mérőszámnak a THI bioklíma indexet találjuk, így javasoljuk annak operatív alkalmazásba állítását, az általános prognózis részeként a hétköznapi emberek számára is elérhető közreadását. A jövőben ezen indexet kutatásunk középpontjába állítva már elkezdhetjük vizsgálatunk középtávra való kiterjesztését, illetve a térképes megjelenítés kidolgozása mellett a mérőszám valószínűségi előrejelzését.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt köszönetemet szeretném kifejezni *Németh Ákosnak*, aki támogatásáról mindvégig biztosított, tanácsaival és rám szánt idejével pedig lehetővé tette a dolgozat létrejöttét.

Köszönet illeti *Büki Richárdot* érdeklődő hozzáállásáért és a téma katonai vonatkozásához szükséges információk megszerzéséért, valamint *Dr. Pongrácz Ritát* a dolgozat szövegének véglegesítésében nyújtott segítségéért.

Köszönettel tartozom *Ihász Istvánnak* az ECMWF modellel kapcsolatos ismereteim bővítéséért, mindenkori segítőkészségéért, illetve az adatok lekérését szolgáló programok megírásáért, melyek nélkül e dolgozat nem valósulhatott volna meg.

Hálával tartozom végül *családomnak* és *barátaimnak* is, akik egyetemi tanulmányaim alatt mindvégig mellettem álltak, a dolgozat írása alatt pedig roppant megértéssel tettek tanúbizonyosságot.

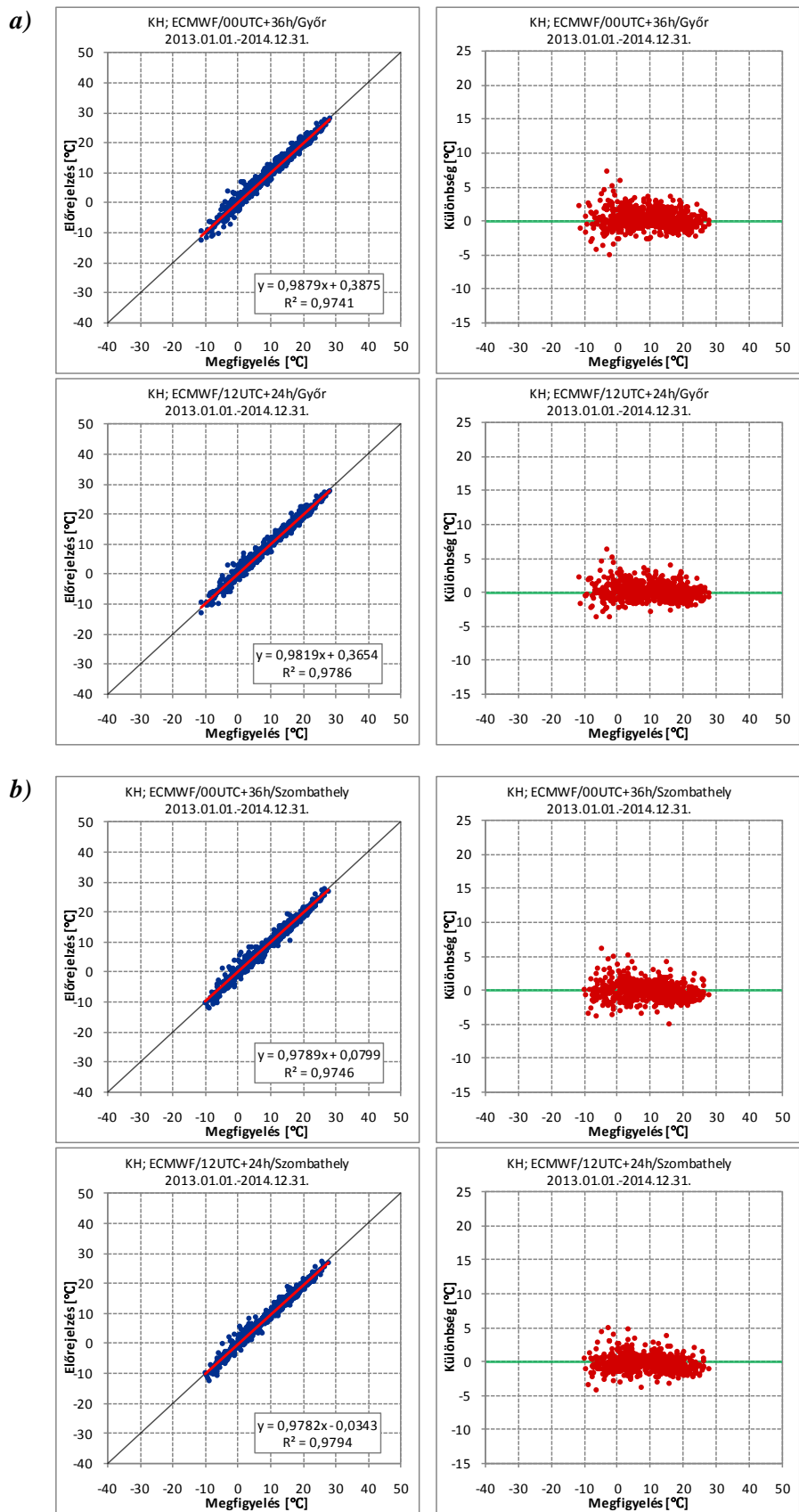
Irodalomjegyzék

- ASHRAE, 1966: Thermal comfort conditions. *ASHRAE standard 55.66*, New York.
- ASHRAE, 2001: Chapter 13 – Measurements and instruments. In: Asimakopoulos, D. N., Assimakopoulos, V. D., Chrisomallidou, N. and Klitsikas, N. D., (eds): *Handbook of Fundamentals. American Society for Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta*, 13.26–13.27.
- Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Kunert, A., 2010: Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in european scale. *Miscellanea Geographica* 14, 91–102.
- Błażejczyk, K., Baranowski, J., Błażejczyk, A., 2014: Heat stress and occupational health and safety – spatial and temporal differentiation. *Miscellanea Geographica – Regional Studies on Development* 18(1), 61–67.
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., Havenith, G., 2012: Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol* 56, 481–494.
- Detre, Z., 2010: A megszokottól eltérő környezet hatása az emberi szervezetre, különös tekintettel a hőmérséklet változásaira. *Bolyai Szemle XIX (1)*, 209–228.
- Égerházi, L., Kántor, N., 2011: Area usage of two outdoor public places with regard to the thermal conditions–observation - based human thermal comfort study in the centre of Szeged. *Acta Climatol Chorol Univ Szegediensis* 44–45, 73–81.
- Fanger, P. O., 1972: Thermal comfort. *McGraw-Hill, New York*, 244 p.
- Fanger, P. O., 1973: Assessment of man's thermal comfort in practice. *Br J Ind Med* 30, 313–324.
- Fehér, B., Kiss, G., Pátkai, Zs., 2011: Az IEO-n 2010-ben készült előrejelzések verifikációja. *Országos Meteorológiai Szolgálat*, 35 p.
- Fiala, D., Lomas, K. J., Stohrer, M., 2001: Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *Int J Biometeorol* 45, 143–159.
- Götz, G., 2001: Káosz és prognosztika. *Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest*, 490 p.
- Gulyás, Á. 2009: Humán bioklimatológiai értékelések különböző léptékű megközelítésben. *Doktori (PhD) értekezés, Szegedi Tudományegyetem*, 115 p.
- Gulyás, Á., Matzarakis, A., Unger, J., 2010: Comparison of the urban - rural comfort sensation in a city with warm continental climate. *Berichte des Meteorologischen Institus de Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Nr.20*, 473–478.
- Houghton, F. C., Yaglou, C. P., 1923: Determining lines of equal comfort. *ASHVE Trans* 29, 63–176.
- Höppe, P., 1984: Die Energiebilanz des Menschen. Dissertation. *Wissenschaftlicher Mitteilung Nr. 49. Universität München*, 171 p.
- Höppe, P., 1999: The physiological equivalent temperature – a universal index for the Biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol* 43, 71–75.
- Jendritzky, G., 1993: The atmospheric environment - an introduction. *Experientia* 49, 733–738.

- Jendritzky, G., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E. (eds.), 2009: Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being. *Final Report COST Action 730*, 26.
- Jolliffe, I. T., Stephenson, D. B., 2003: Forecast verification. A practitioner's guide in Atmospheric Science. *John Wiley & Sons Ltd., Chichester*, 240 p.
- Kaba, M., 1995: Csatlakozásunk a Középtávú Időjárás Előrejelzések Európai Központjához (ECMWF). *Légekör* 40(2), 34.
- Kállai, E., 2010: A környezeti hőterhelés mérésének lehetőségei a Magyar Honvédségben. *Hadtudományi Szemle* 3. évf. 1: 71–80.
- Kántor, N., 2012: Városi közterületek termikus komfortviszonyainak értékelése Szeged példáján különös tekintettel a látogatók szubjektív reakcióira. *Doktori (PhD) értekezés, Szegedi Tudományegyetem*, 173 p.
- Kohut, L., 2008a: Stress tolerance of military personnel during exercise in hot, dry climates: The physiology. *Academic and Applied Research in Military Science* 7(1), 35–45.
- Kohut, L., 2008b: Extrém fizikai terhelésnek kitett katonai állomány keringési és élettani vizsgálata. *Doktori (PhD) értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, Budapest*, 114 p.
- Kusch, W., Fong, H. Y., Jendritzky, G., Jacobsen, I., 2014: Guidelines on biometeorology and air quality forecasts. *WMO/TD No. 1184*, 35 p.
- Kyle, W. J., 1994: The human bioclimate of Hong Kong. In: *Brazdil, R., Kolar, M., (eds): Proceedings of the Contemporary Climatology Conference, Brno. TISK LITERA, Brno*, 345–350.
- Lemke, B., Kjellstrom, T., 2012: Calculating workplace WBGT from meteorological data. A tool for climate change assessment. *Industrial Health* 50, 267–278.
- Lin, T. P., Matzarakis, A., 2008: Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan. *Int J Biometeorol* 52, 281–290.
- Lupták, D., 2013: Katonák környezeti hőterhelésének figyelembevétele külföldi missziók tervezésénél. *Szakkoloztat. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Budapest*, 55 p.
- Lupták, D., 2014: A humán komfort előrejelezhetőségének vizsgálata az ECMWF determinisztikus modell felhasználásával. *Tudományos diákköri dolgozat. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Budapest*, 65 p.
- Matzarakis, A., Mayer, H., 1996: Another kind of environmental stress: thermal stress. *WHO Newsletter* 18, 7–10.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2007: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 51, 323–334.
- Matzarakis, A., Rutz, F., Mayer, H., 2010: Modelling Radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. *Int J Biometeorol* 54, 131–139.
- Mayer, H., Höppe, P., 1987: Thermal comfort of a man in different urban environments. *Theo and Ap Clim* 38, 43–49.
- Molteni, F. R., Buizza, T. N., Palmer, T. N., Petroliage, T., 1996: The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 122, 37–119.
- Mozdzynski, G., 2009: Concepts of Parallel Computing. *ECMWF, Reading*, 2009. (http://www.ecmwf.int/services/computing/training/material_2009/hpcf/Para_concepts.pdf)

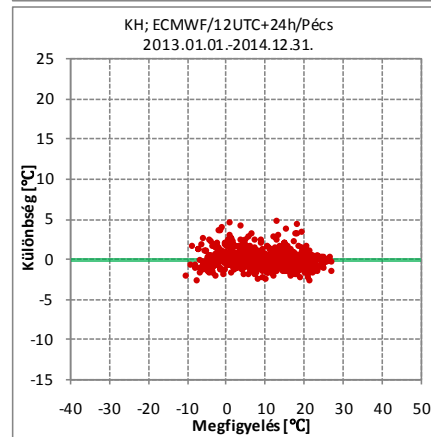
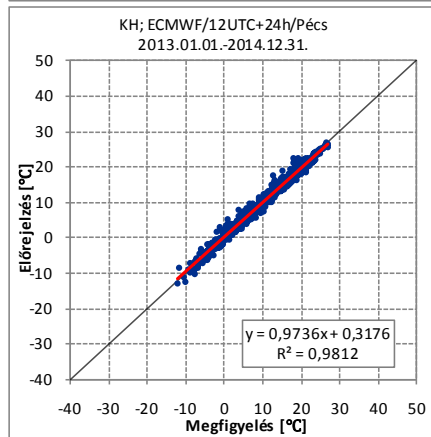
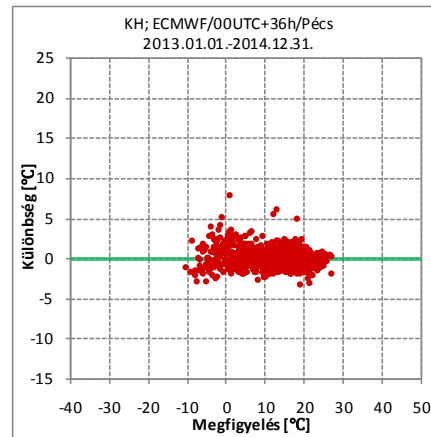
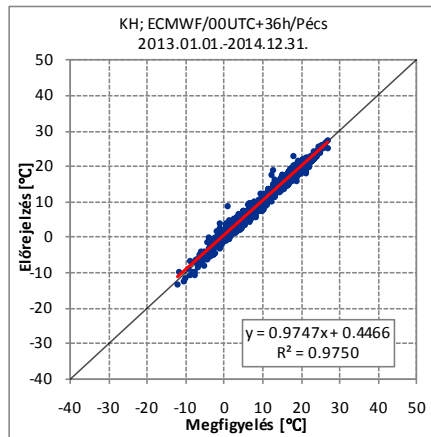
- Németh, Á., 2011: Changing thermal bioclimate in some Hungarian cities. *Acta Climatologica et Chorologica, Tomus 44-45*, 93–101.
- Németh, Á., 2013: Estimation of tourism climate in the Lake Balaton Region, Hungary. *J Env Geo* 6(1-2), 49–55.
- Nurmi, P., 2003: Recommendations on the verification of local weather forecasts. *ECMWF Technical Memoranda 430*, 19 p.
- Persson, A., Grazzini, F., 2007: User Guide to ECMWF forecast products. *ECMWF, Reading*, 123 p.
- Rothfus, L. P., 1990: The heat index „equation” (or more than you ever wanted to know about the heat index). *Fort Worth, TX: NWS Southern region Headquarters. NWS Technical attachment SR90-23*.
- Siple, P. A., Passel, C. F., 1945: Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Wilderness and Environmental Medicine* 10, 176–182.
- Thom, E. C., 1959: The discomfort index. *Weatherwise* 12, 57–60.
- Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I., Holmer, B., 2007: Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *Int J Climatol* 27, 1983–1993.
- Unger, J., 1998: Urban influence on human comfort (on the example of Szeged). *Acta Univ Lodziensis, Folia Geographica Physica* 3, 539–546.
- Unger, J., 1999: Comparison of urban and rural bioclimatological conditions in the case of a Central-European city. *Int J Biometeorol*, 43, 139–144.
- Uppala, S., Dee, D., Kobayashi, S., Simmons, A., 2008. Evolution of reanalysis at ECMWF. *In: Proceedings of the Third WCRP International Conference on Reanalysis, 28 January – 1 February 2008. Tokyo, Japan*.
- VDI 3789, 1994: Environmental meteorology, interactions between atmosphere and surface; calculation of short- and long wave radiation. *Part I: Climate. VDI 3789, Part 2. Beuth, Berlin*, 52 p.
- VDI 3787, 1998: Methods for the human-biometeorological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning. *Part I: Climate. VDI 3787, Part 2. Beuth, Berlin*, 29 p.
- Woods, A., 2005: Medium-Range Weather Prediction: The European Approach. *Springer*, 270 p.
- Yaglou, C. P., Minard, D., 1957: Control of heat casualties at military training centers. *AMA Arch Ind Health*, 16(4), 302–316.

Függelék

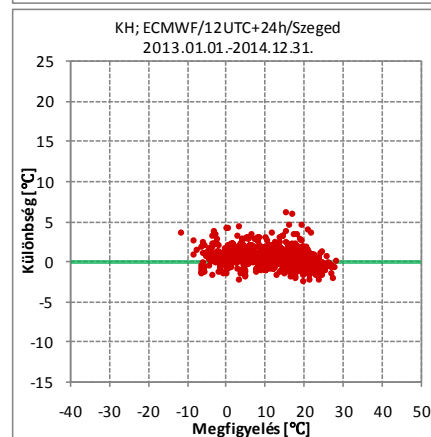
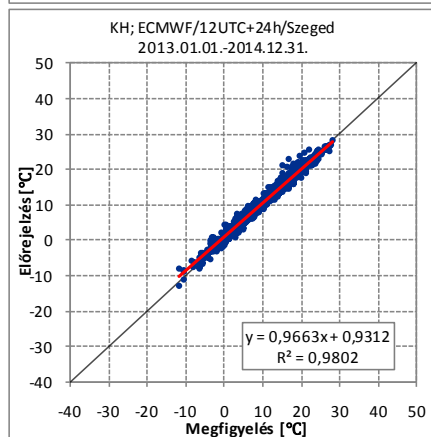
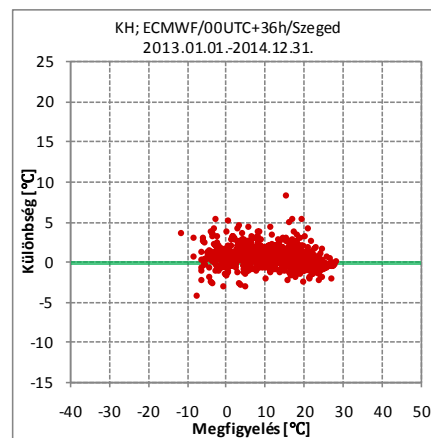
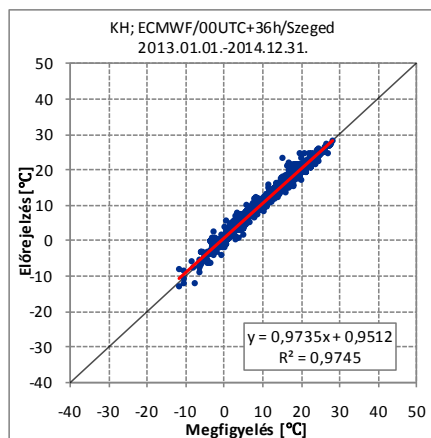


F1. ábra – A KH index Győrre (a) és Szombathelyre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

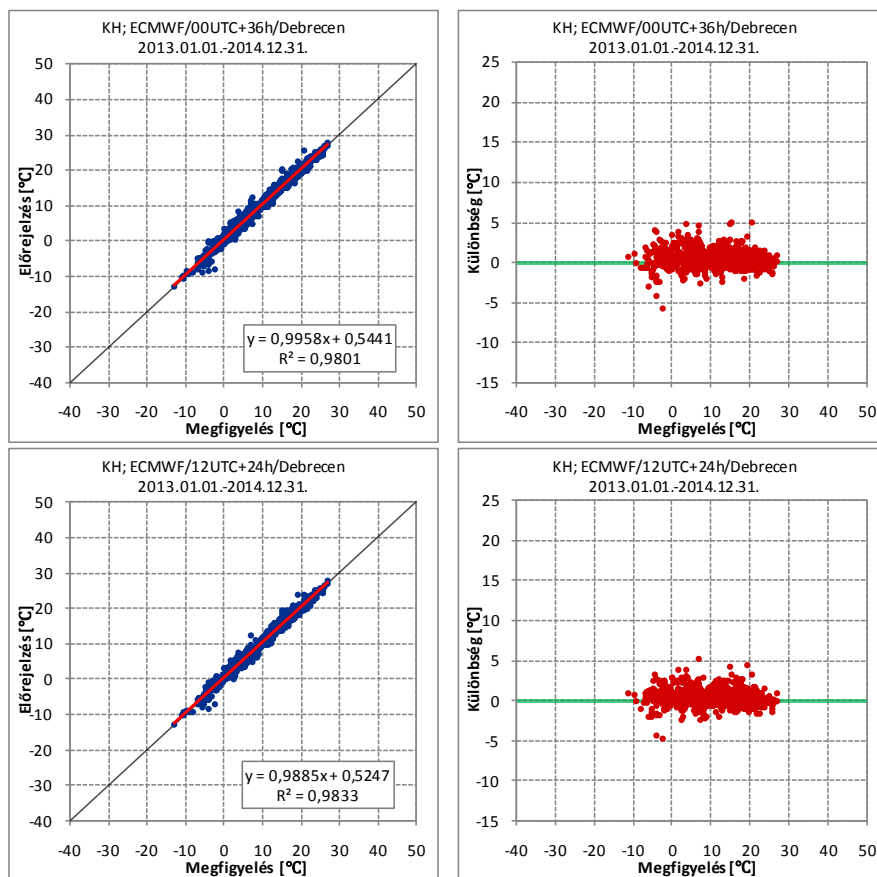
a)



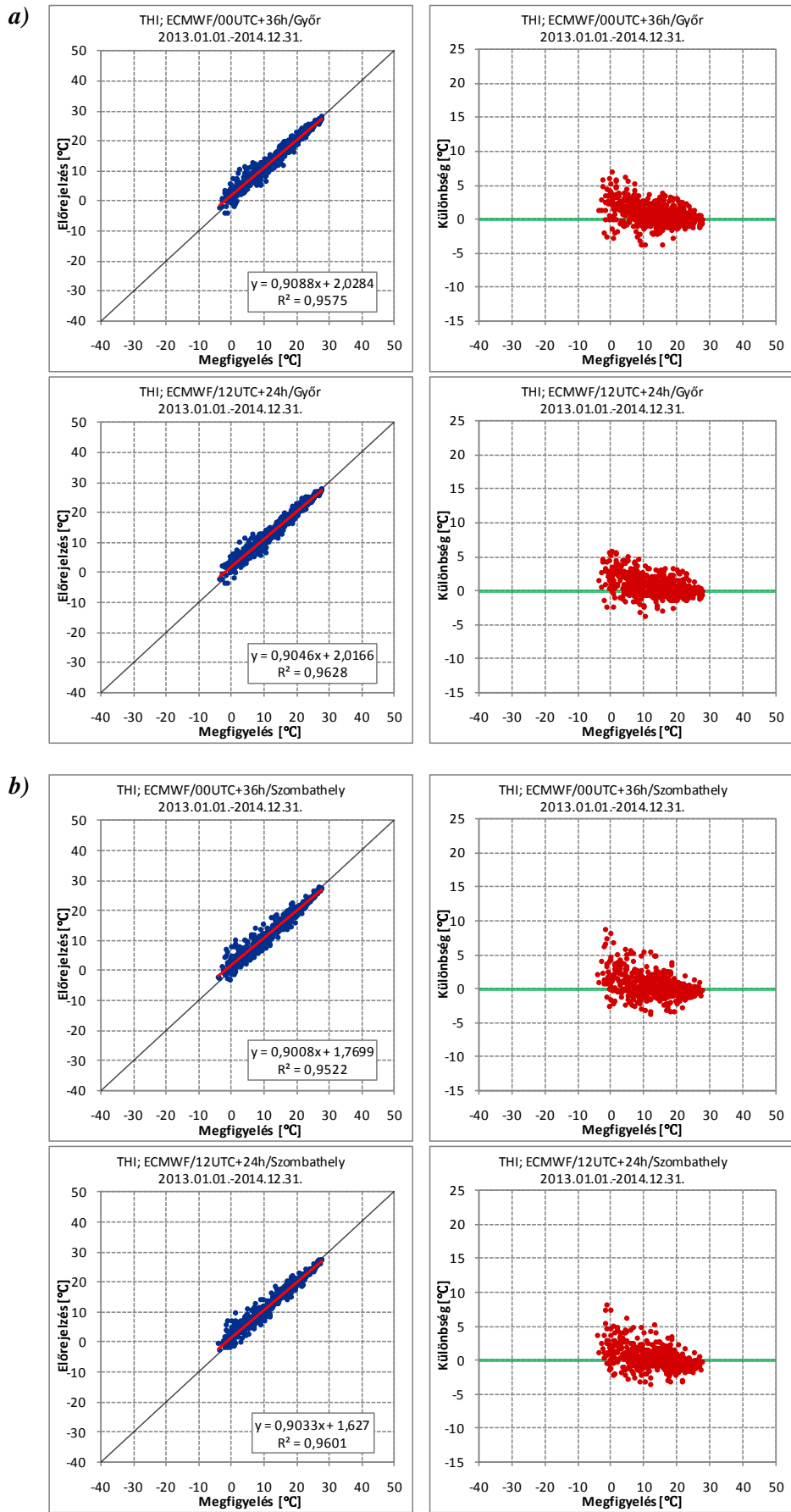
b)



F2. ábra – A KH index Pécsre (a) és Szegedre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

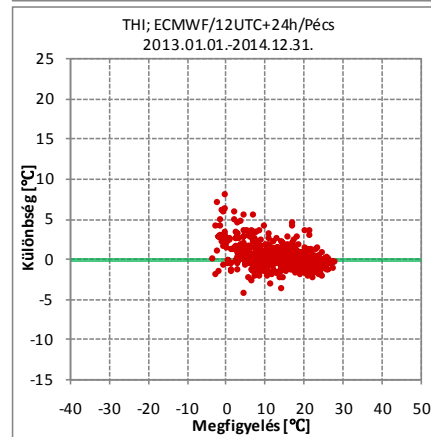
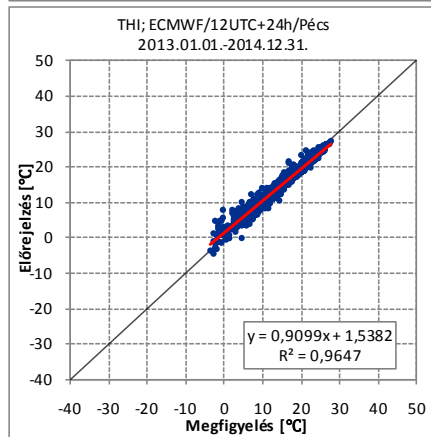
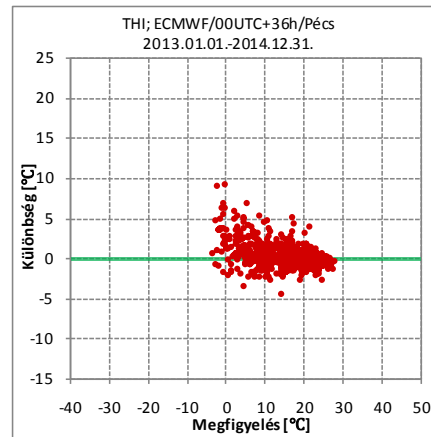
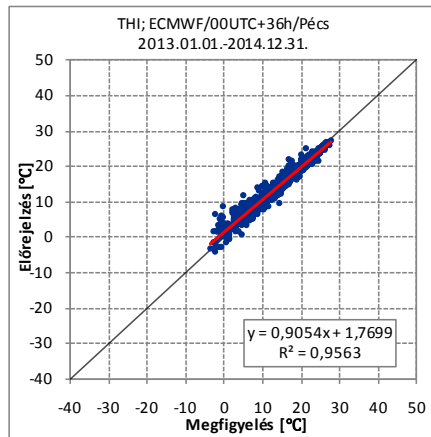


F3. ábra – A KH index Debrecenre vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

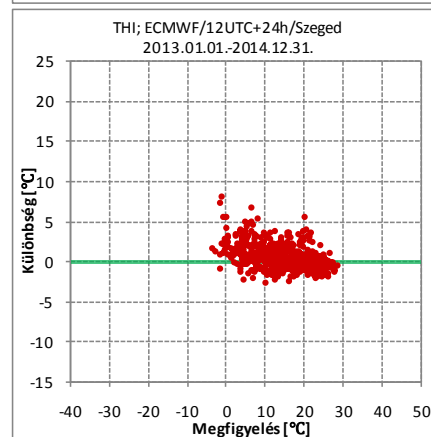
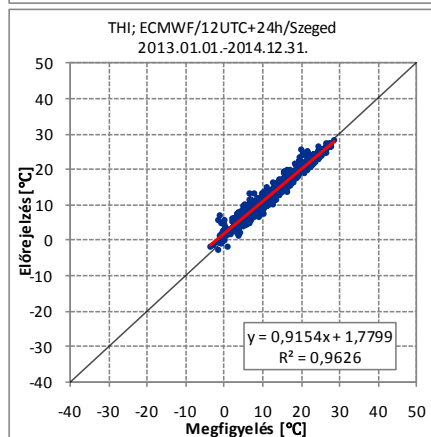
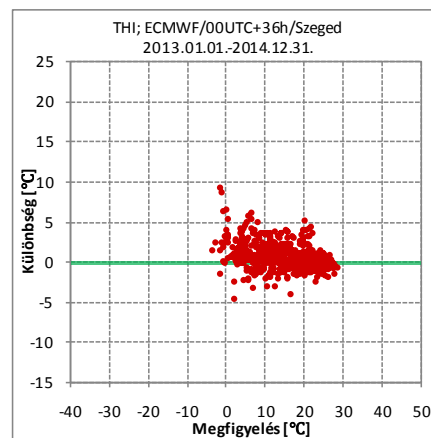
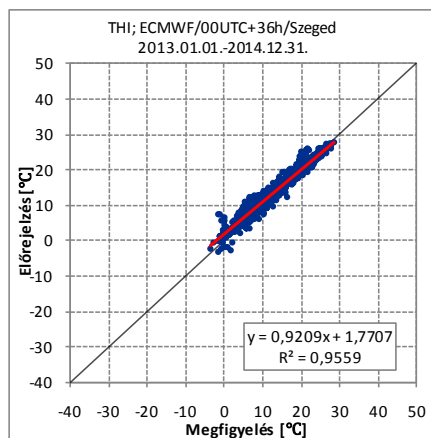


F4. ábra – A THI Győrre (**a**) és Szombathelyre (**b**) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

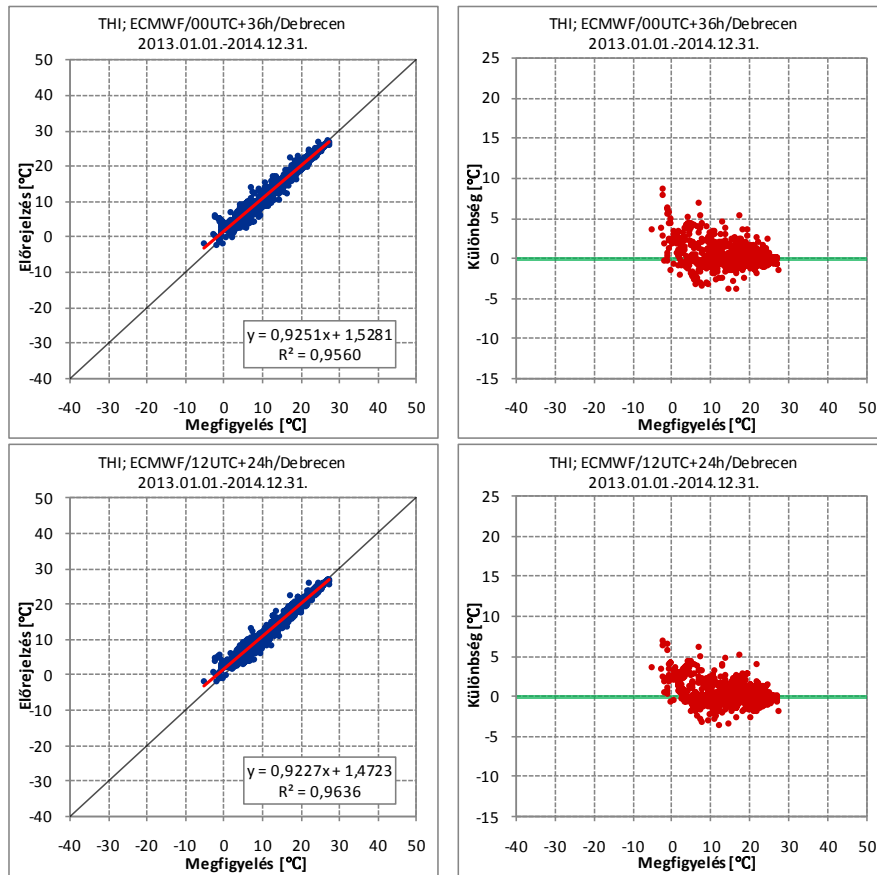
a)



b)

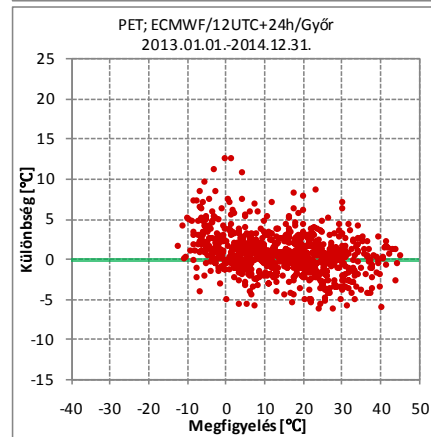
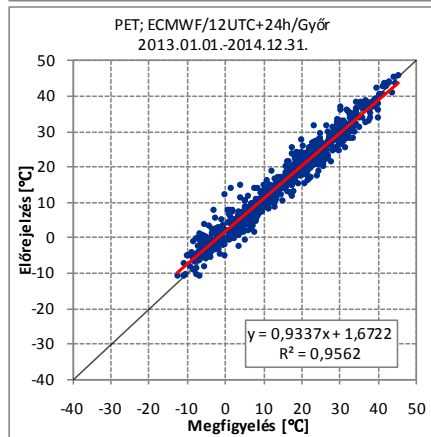
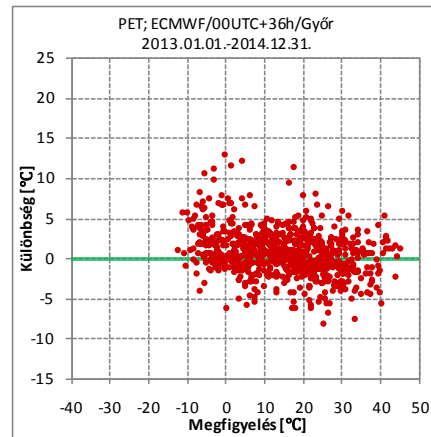
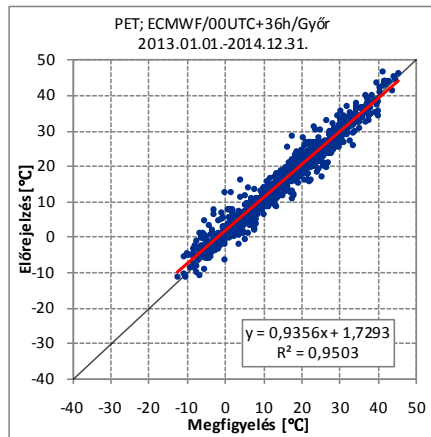


F5. ábra – A THI Pécsre (a) és Szegedre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

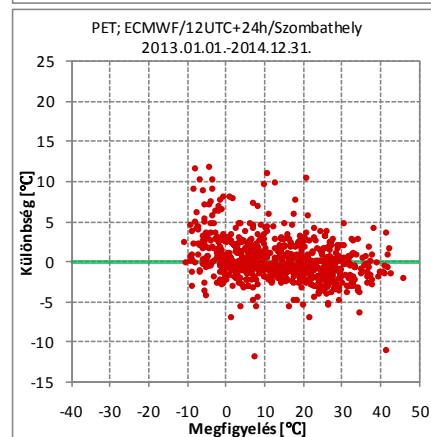
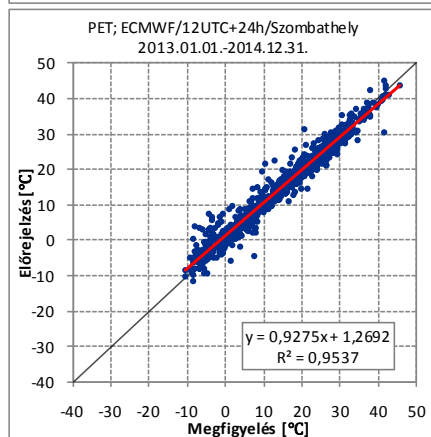
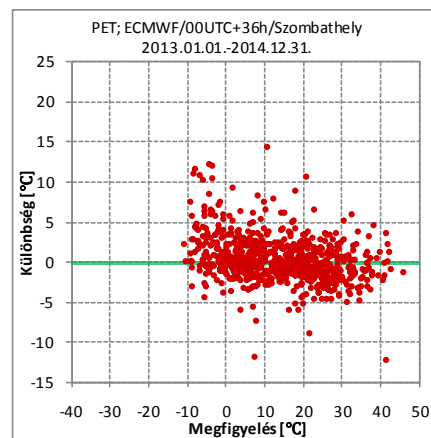
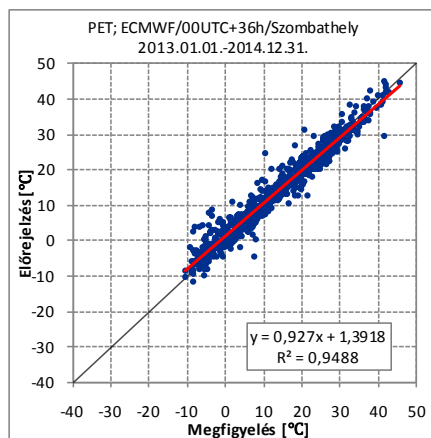


F6. ábra – A THI Debrecenre vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

a)

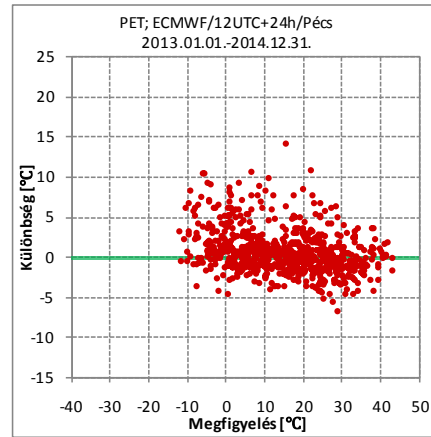
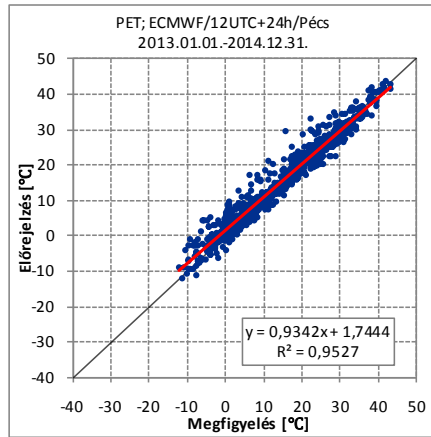
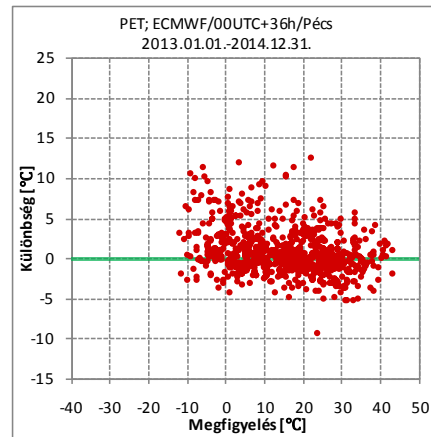
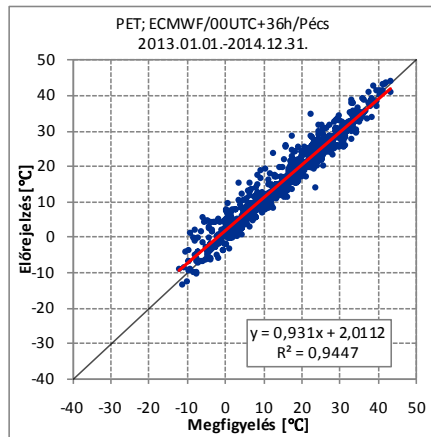


b)

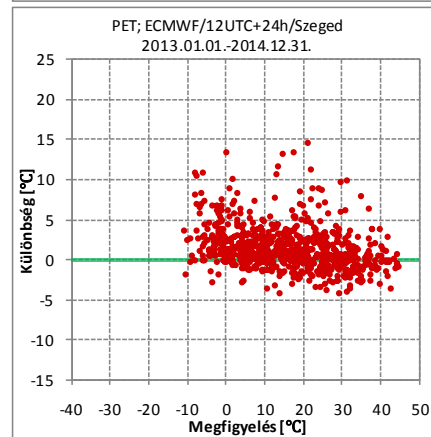
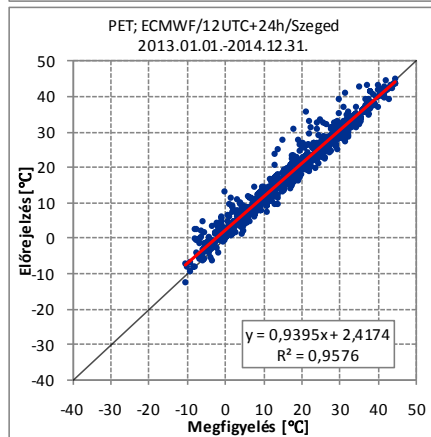
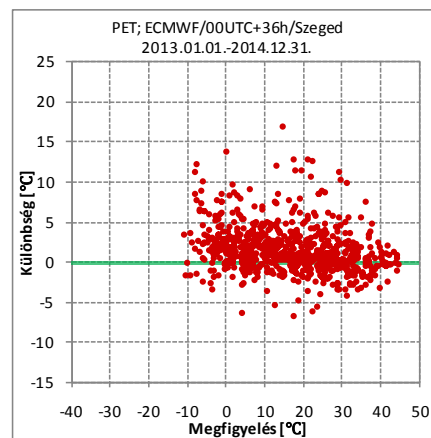
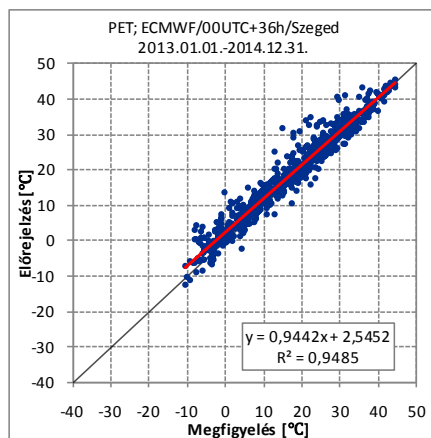


F7. ábra – A PET index Győrre (a) és Szombathelyre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

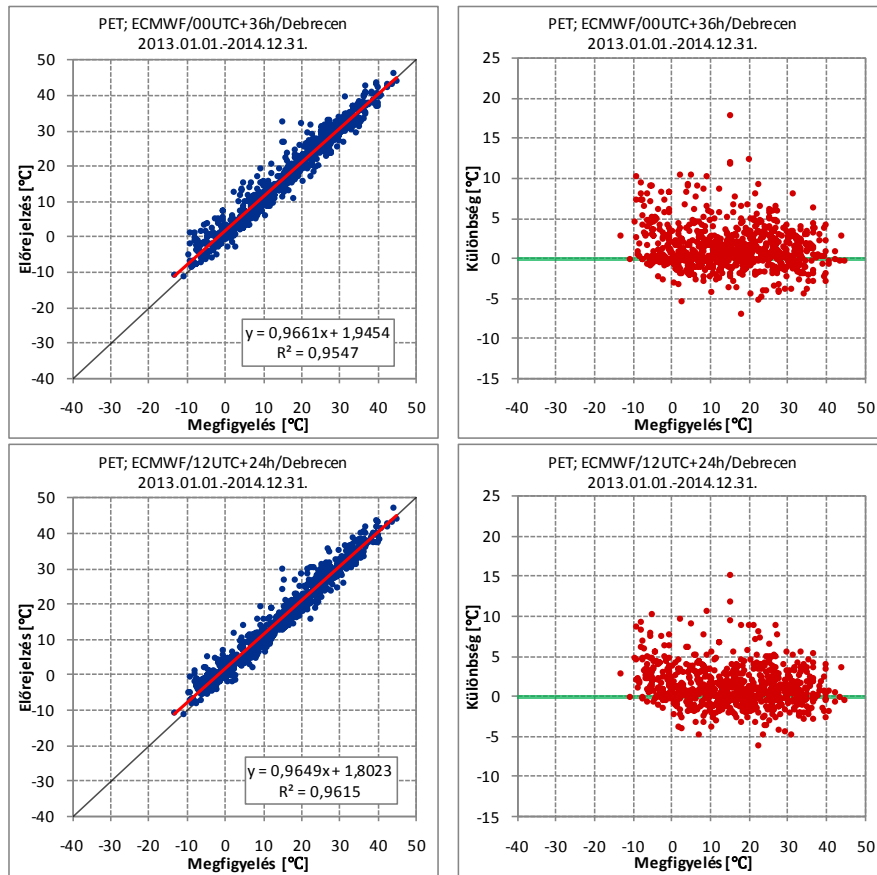
a)



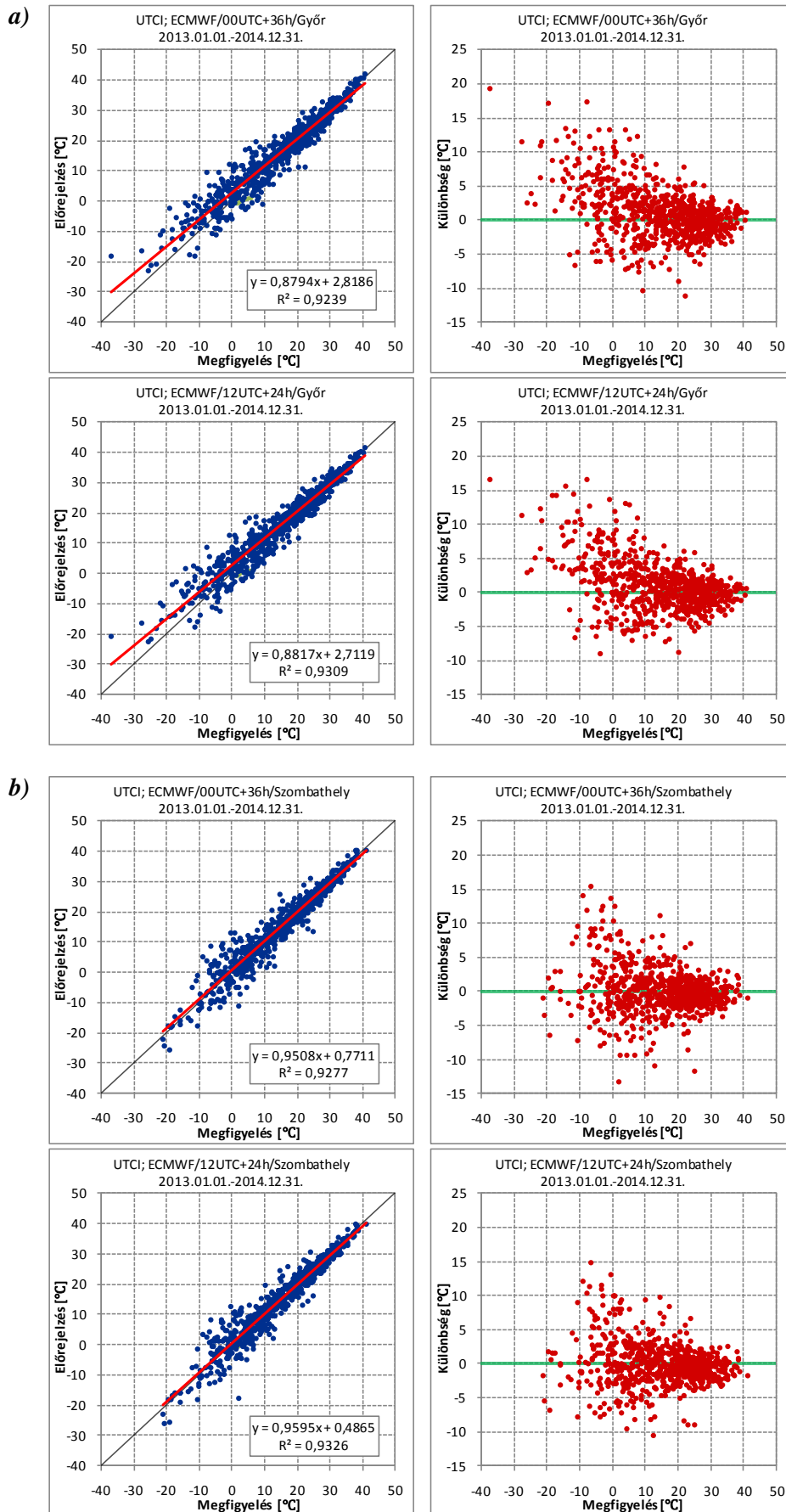
b)



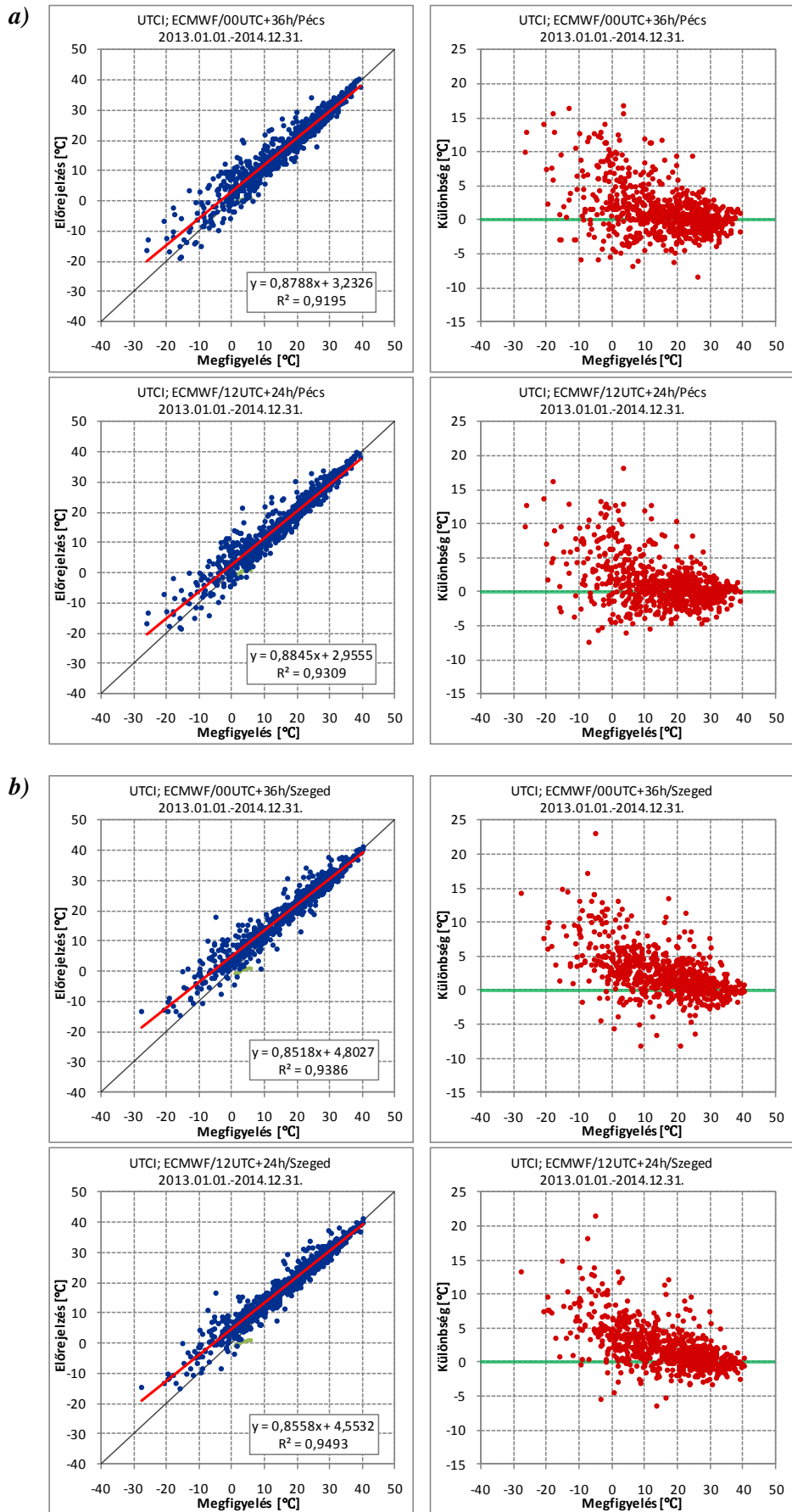
F8. ábra – A PET index Pécsre (a) és Szegedre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján



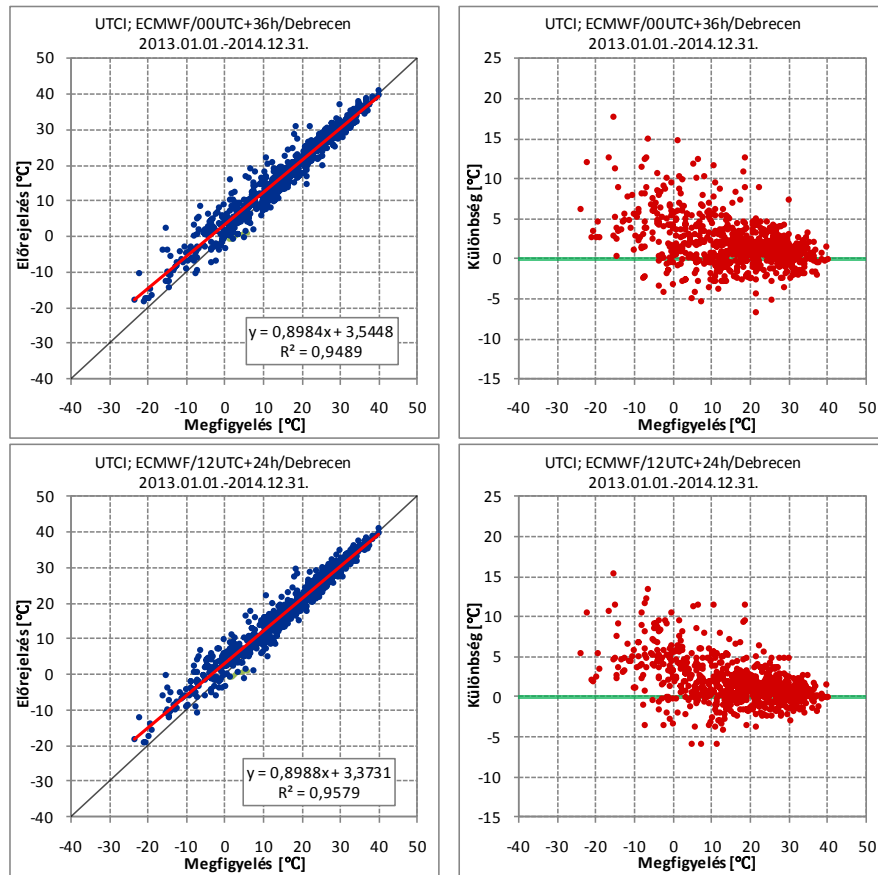
F9. ábra – A PET index Debrecenre vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján



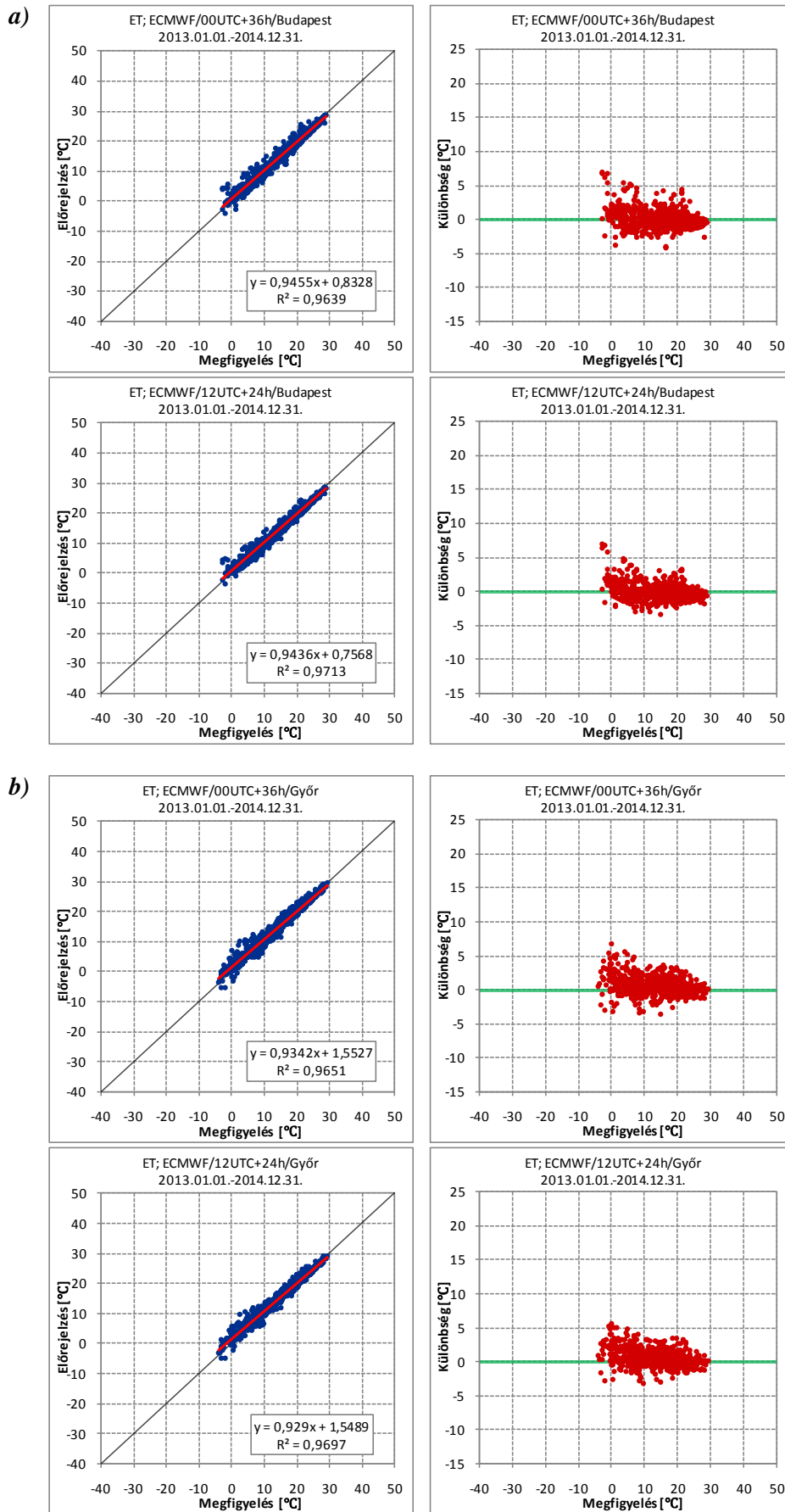
F10. ábra – Az UTCI Győrré (*a*) és Szombathelyre (*b*) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján



F11. ábra – Az UTCI Pécsre (a) és Szegedre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

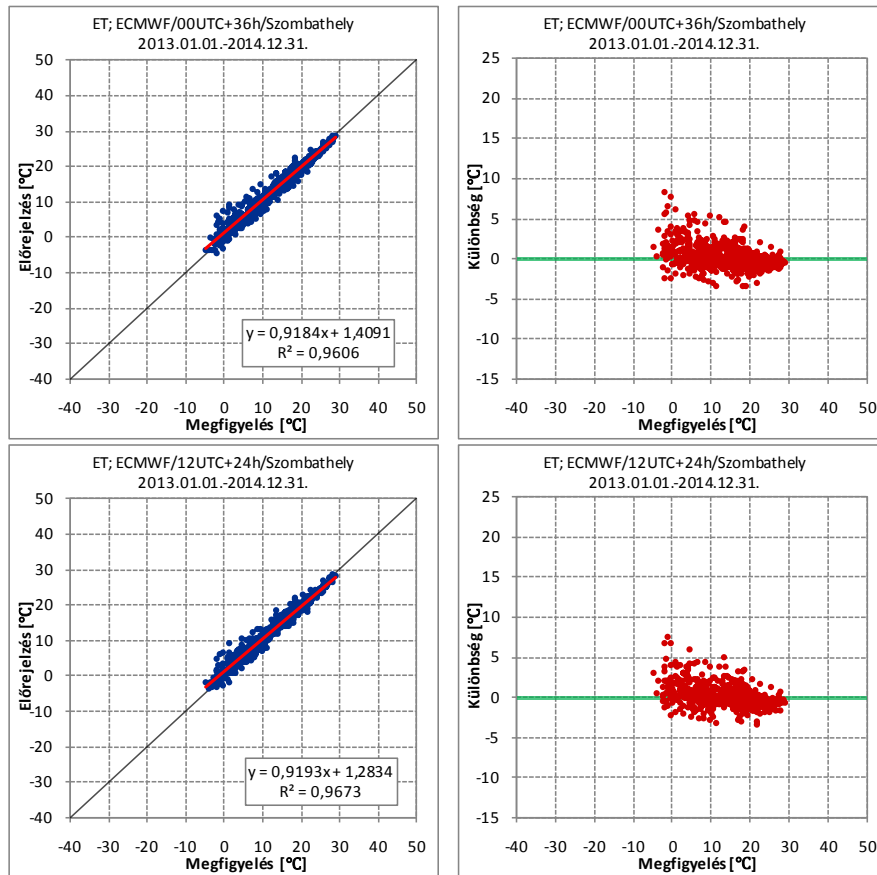


F12. ábra – Az UTCI Debrecenre vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

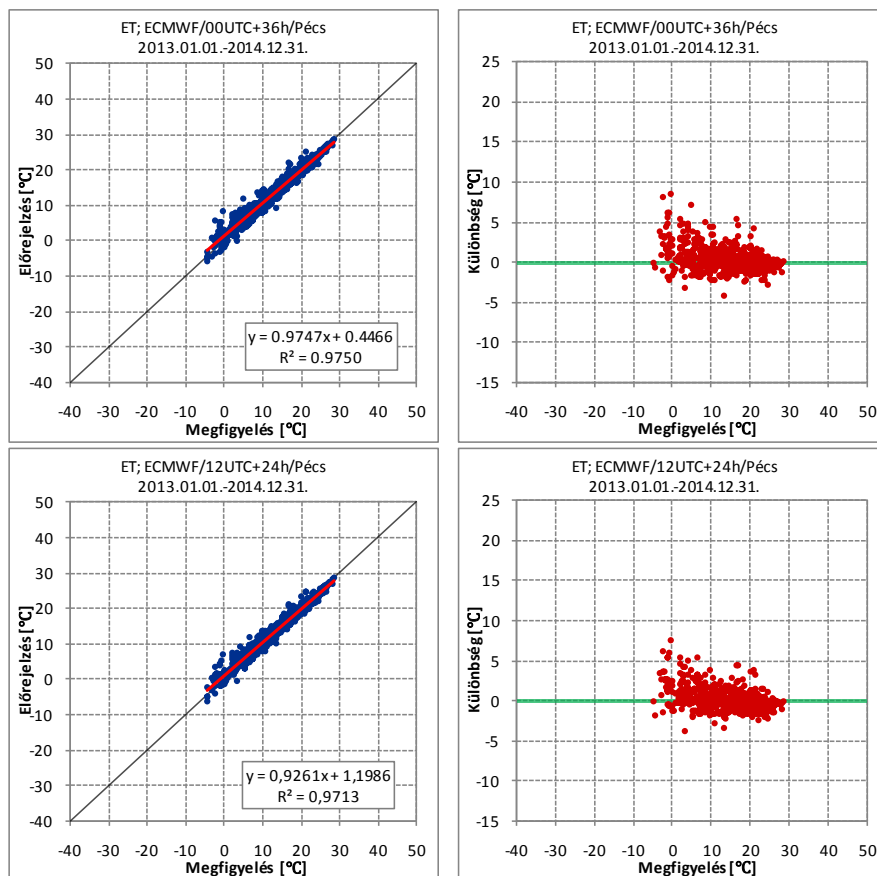


F13. ábra – Az ET index Budapestre (*a*) és Győrré (*b*) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

a)

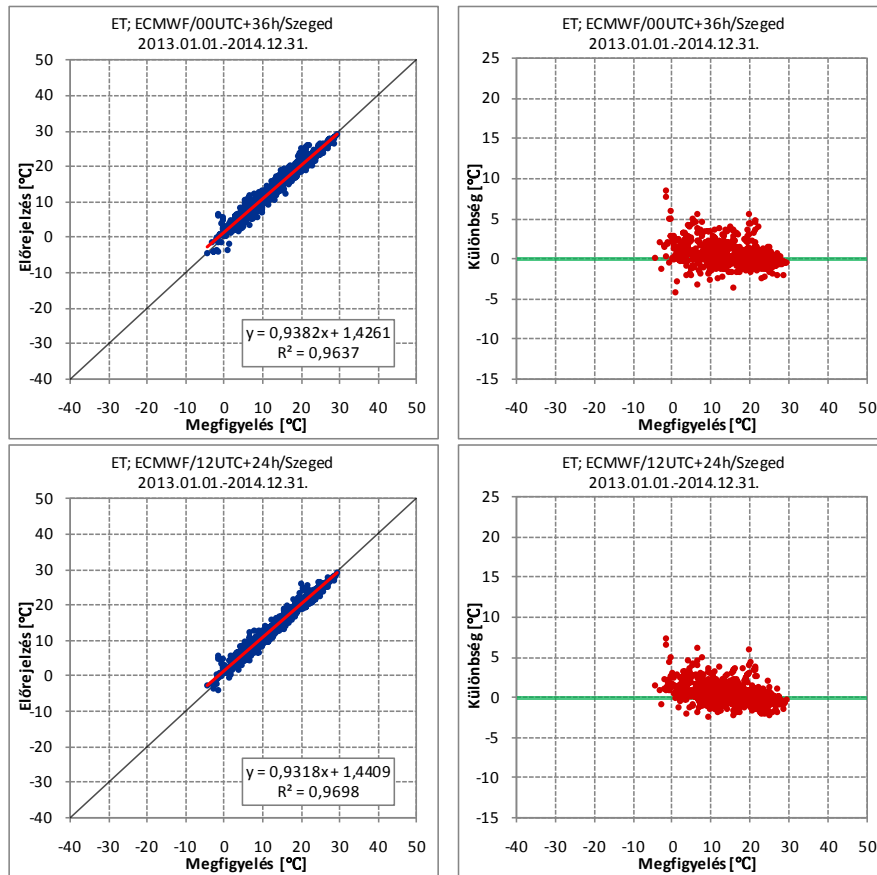


b)

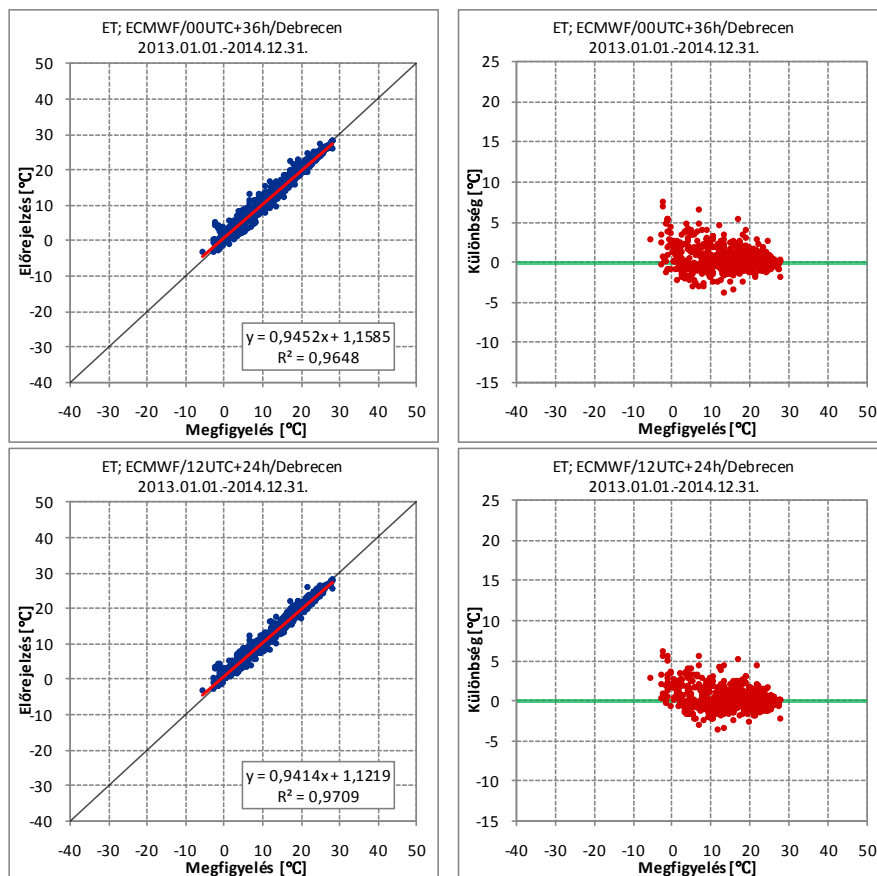


F14. ábra – Az ET index Szombathelyre (a) és Pécsre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

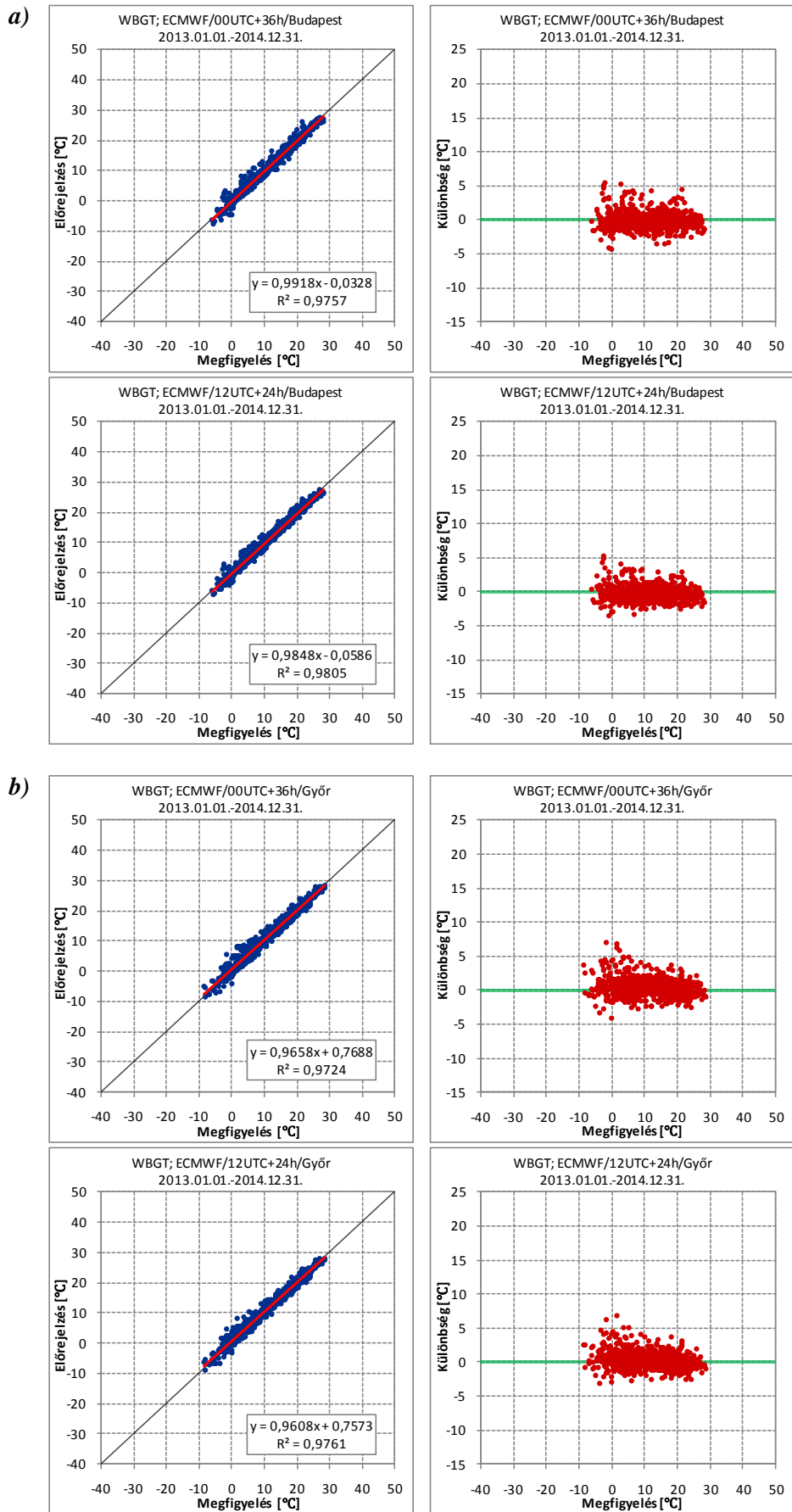
a)



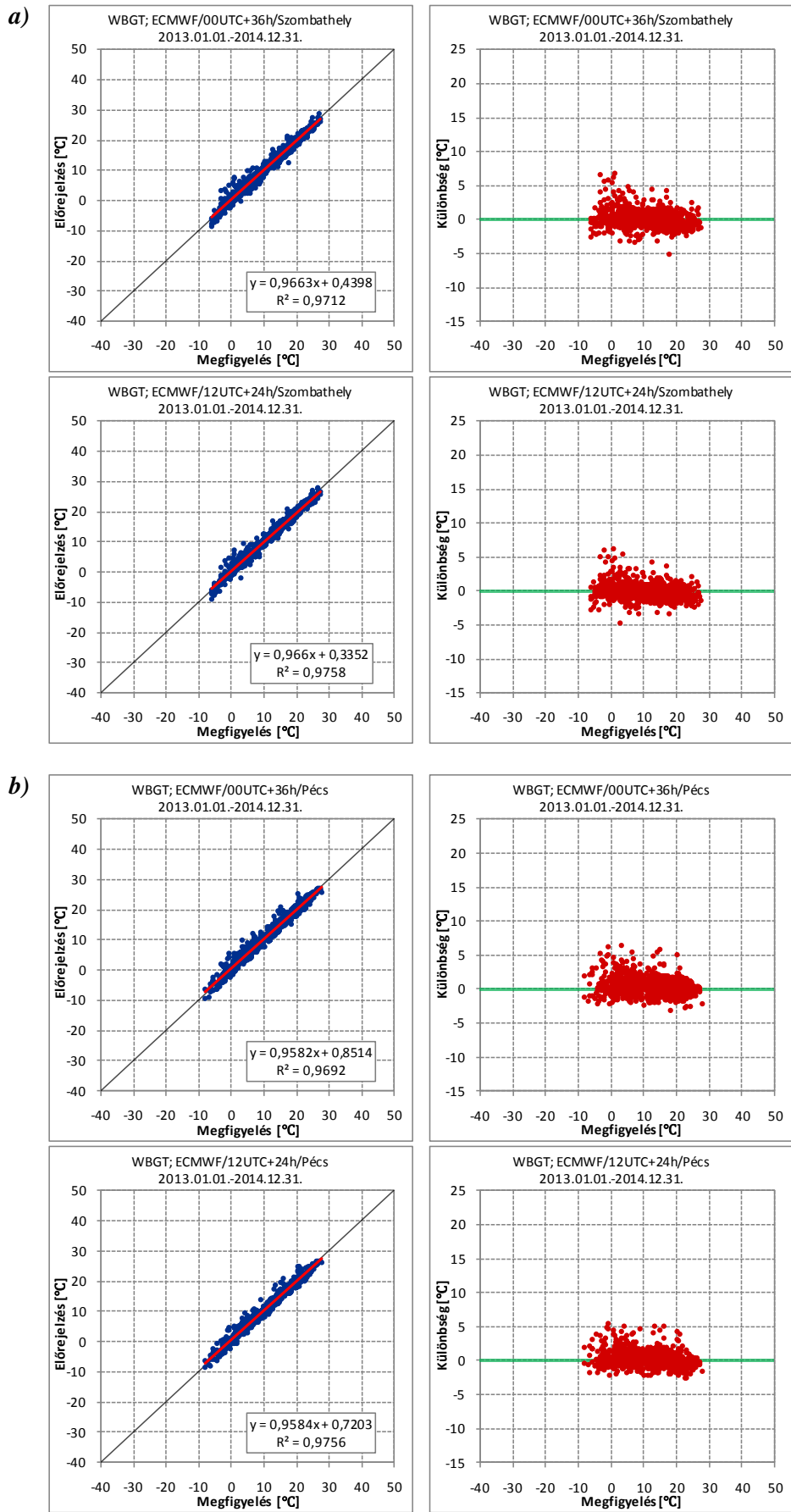
b)



F15. ábra – Az ET index Szegedre (a) és Debrecenre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

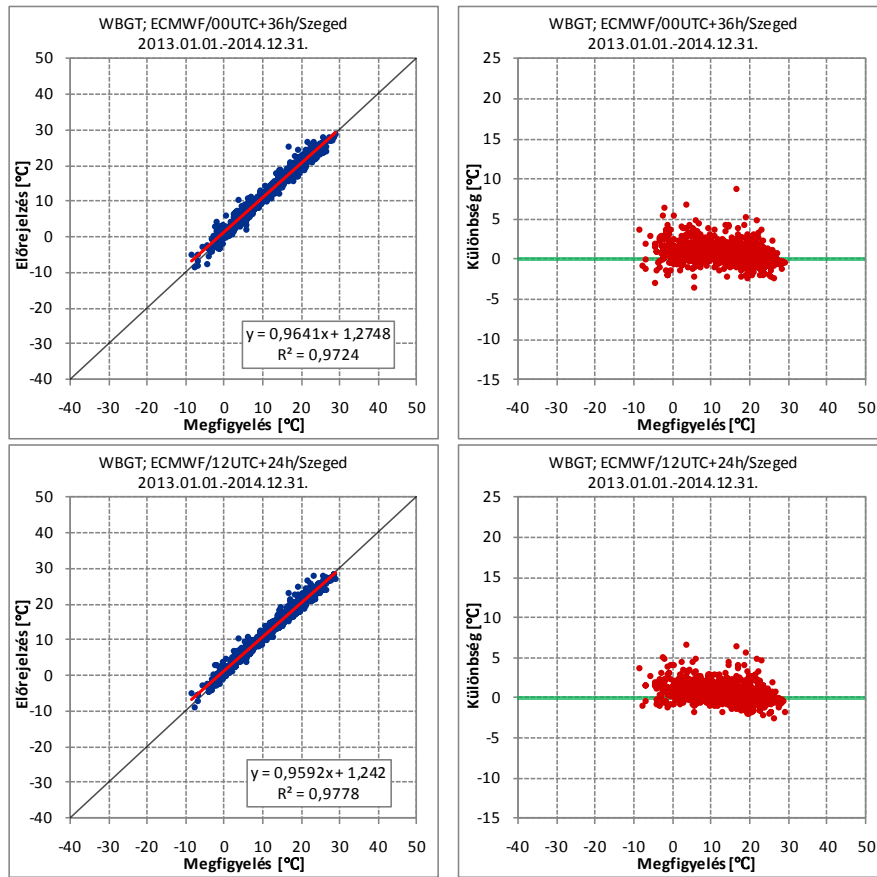


F16. ábra – A WBGT index Budapestre (*a*) és Győrre (*b*) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

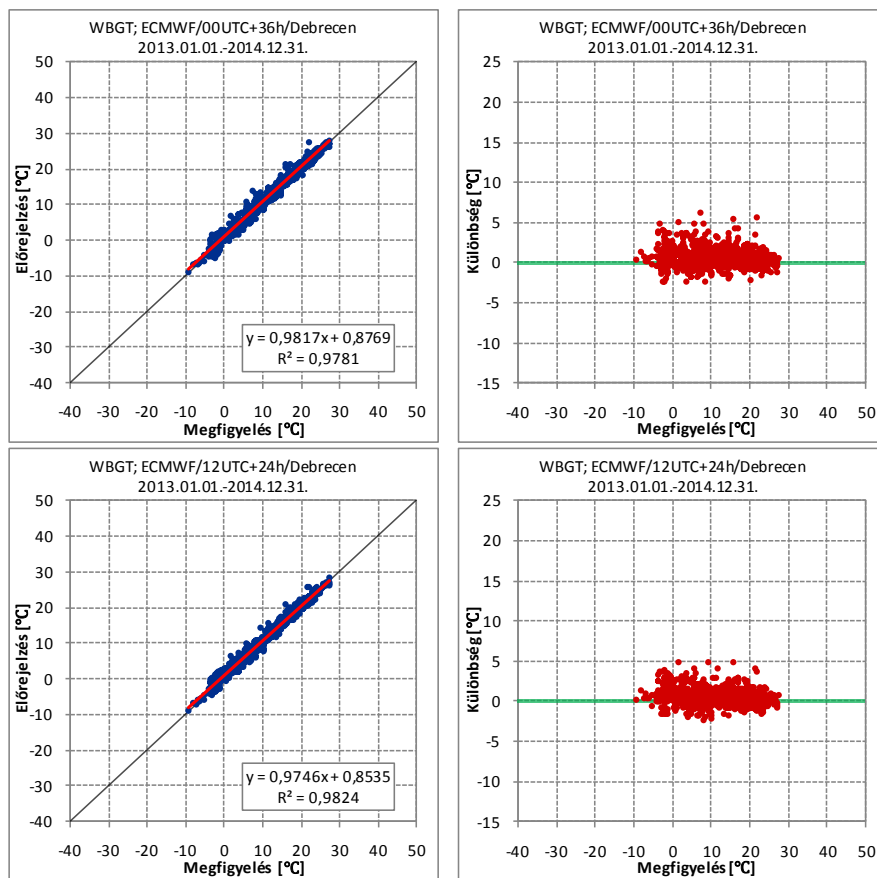


F17. ábra – A WBGT index Szombathelyre (a) és Pécsre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

a)

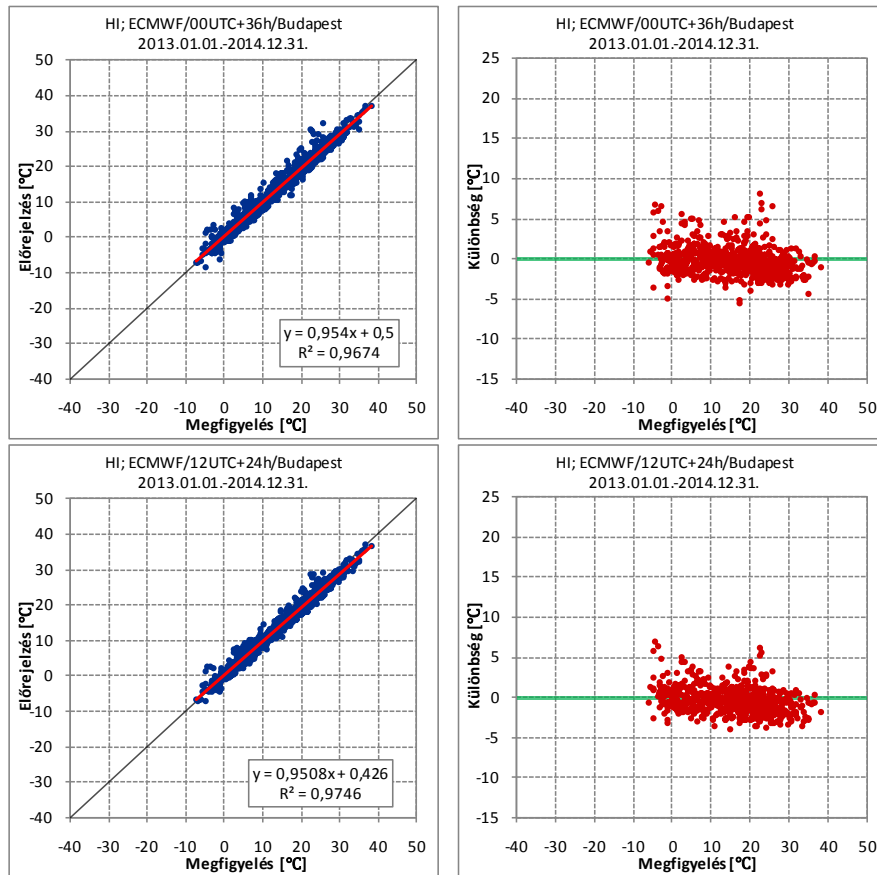


b)

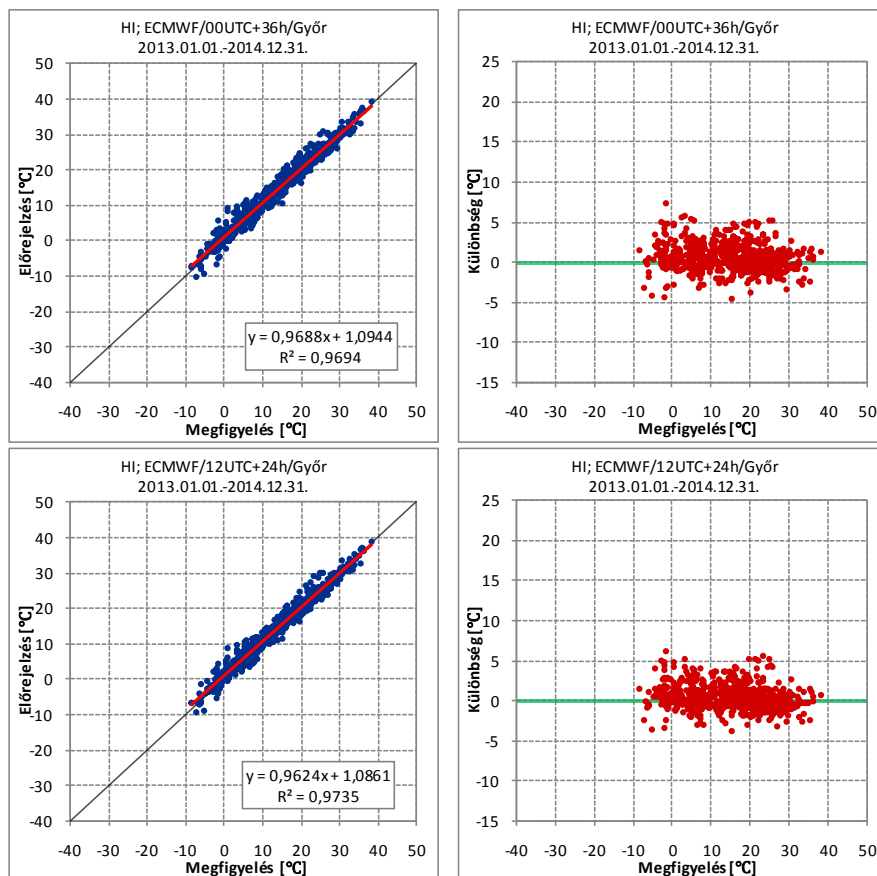


F18. ábra – A WBGT index Szegedre (a) és Debrecenre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

a)

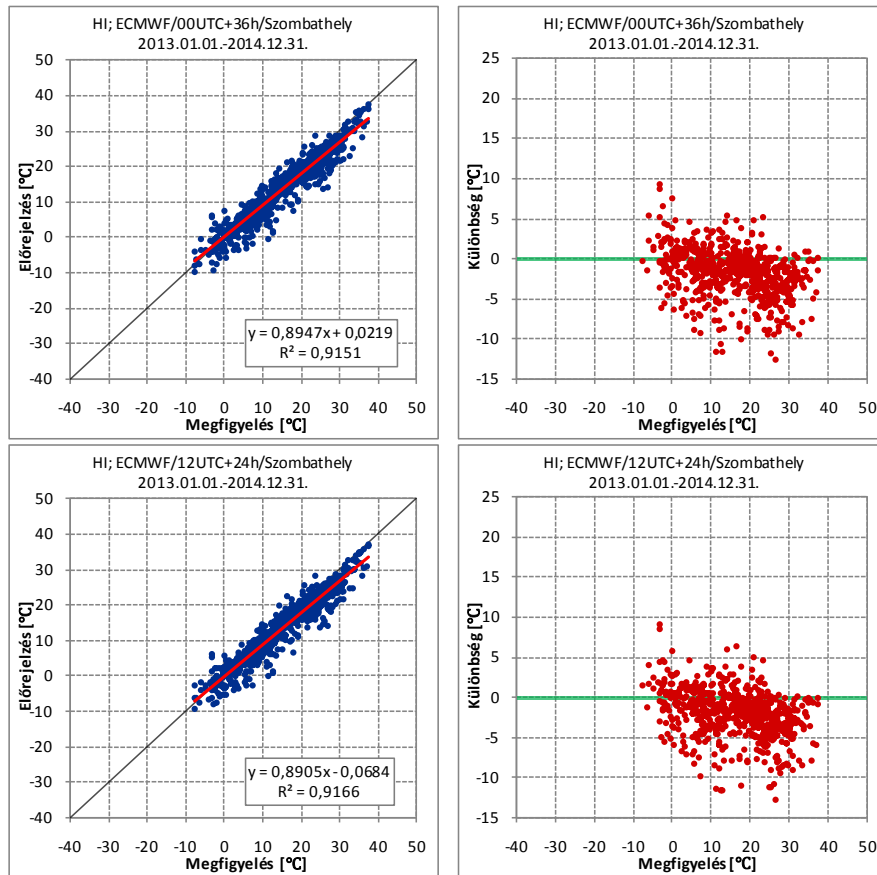


b)

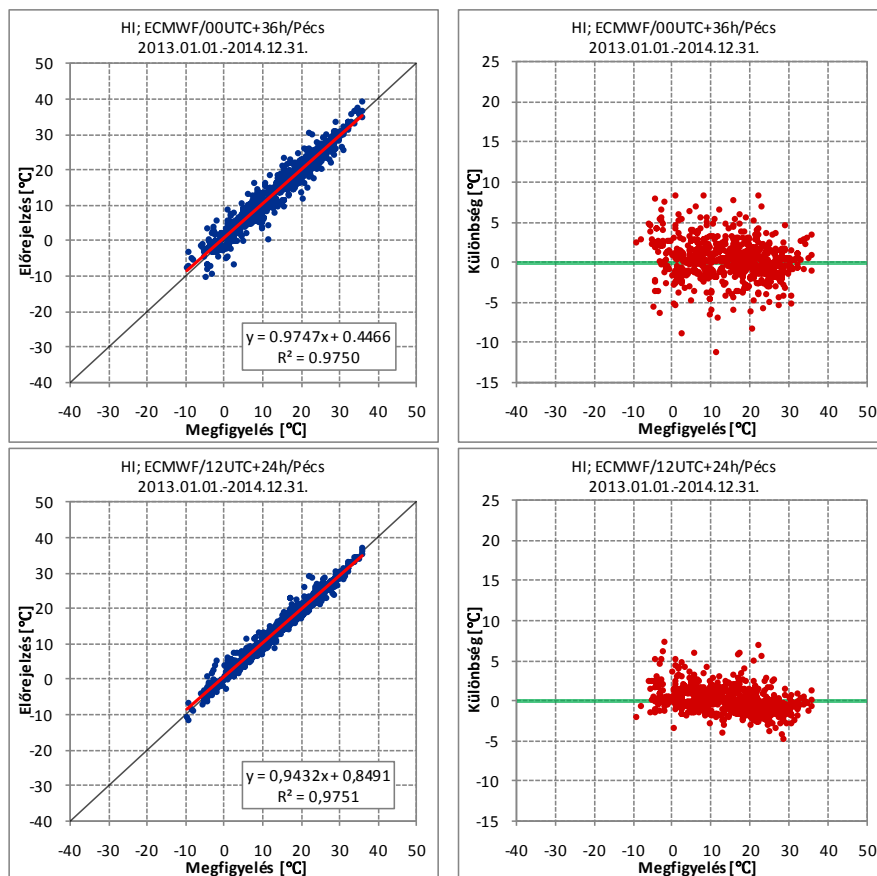


F19. ábra – A HI Budapestre (a) és Győrre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

a)

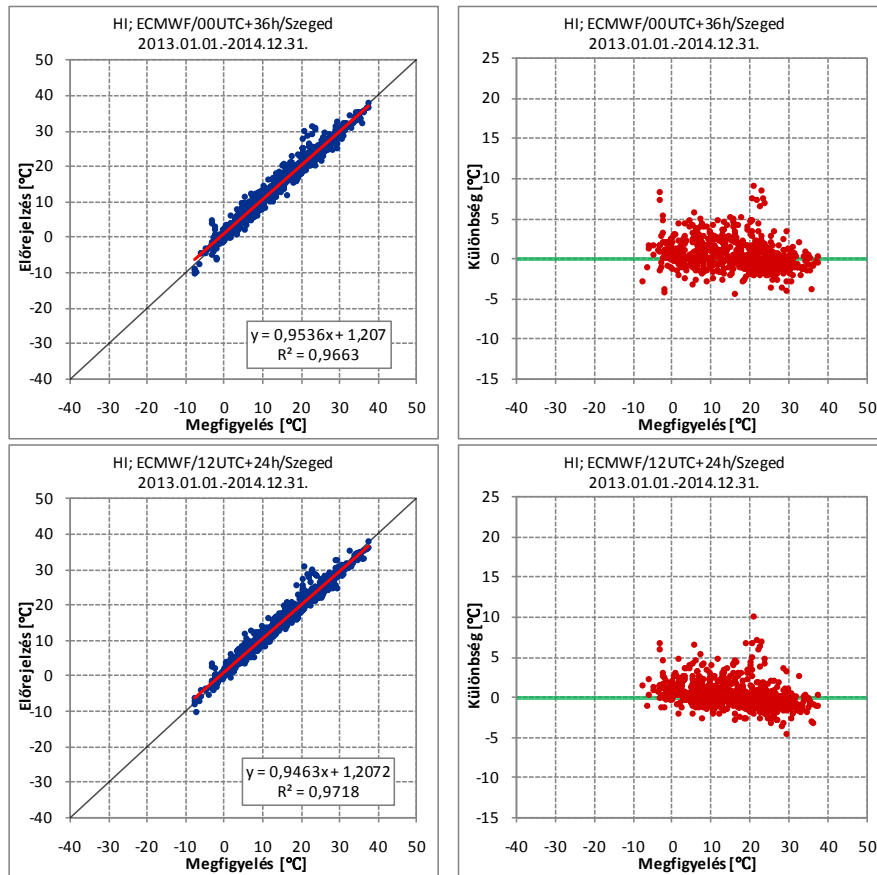


b)

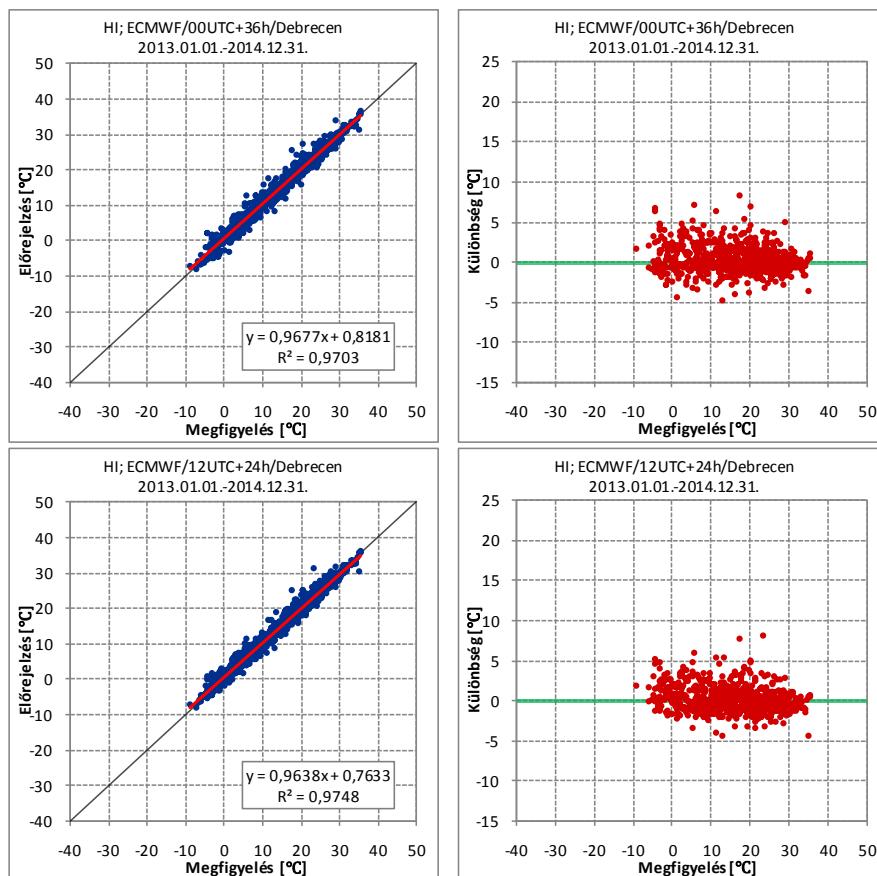


F20. ábra – A HI Szombathelyre (a) és Pécsre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

a)

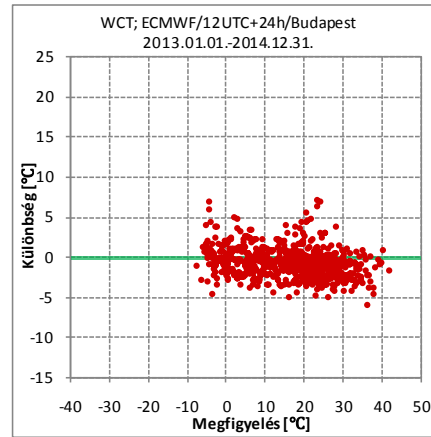
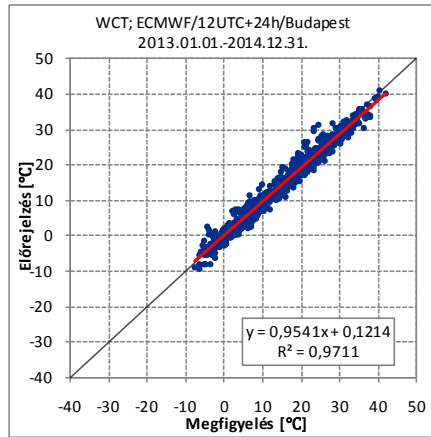
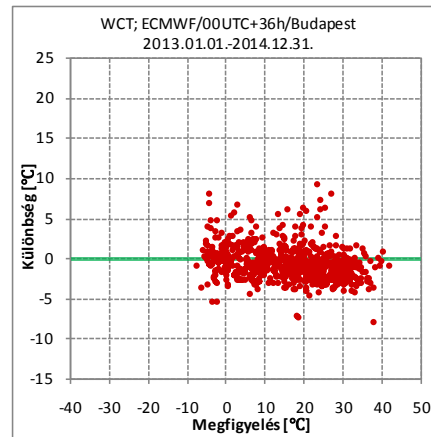
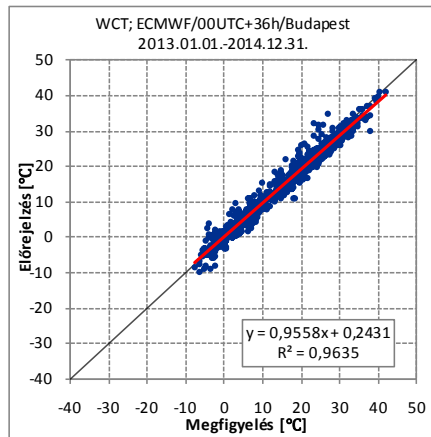


b)

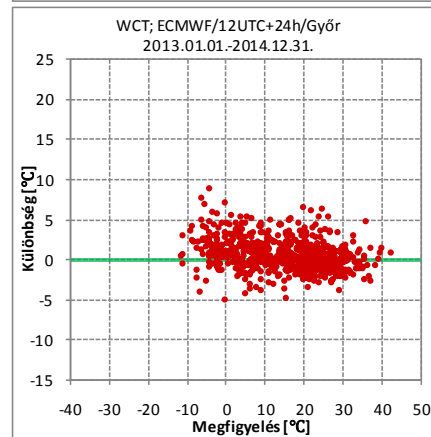
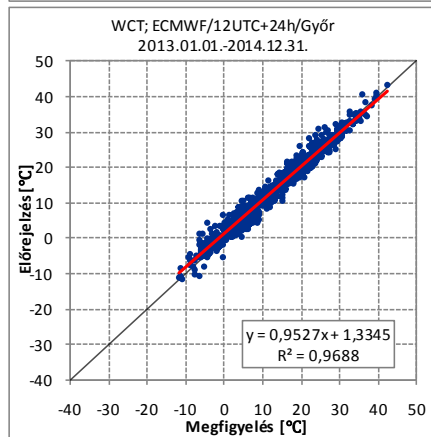
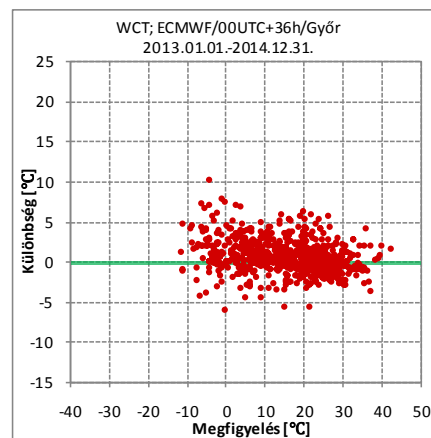
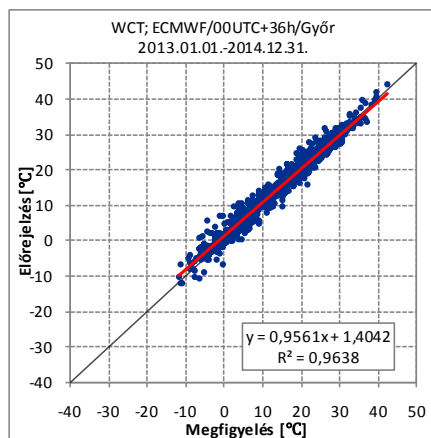


F21. ábra – A HI Szegedre (a) és Debrecenre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

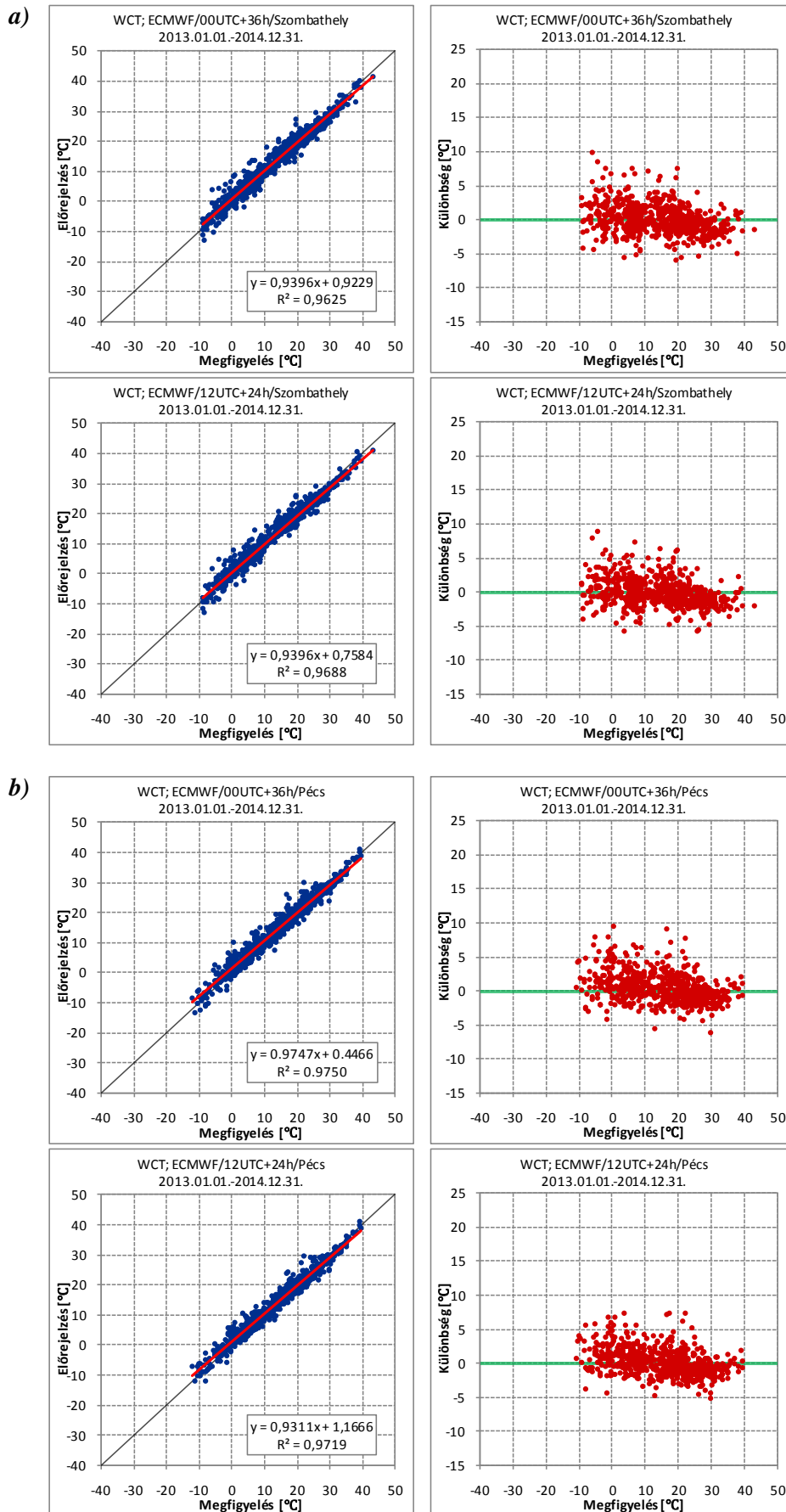
a)



b)

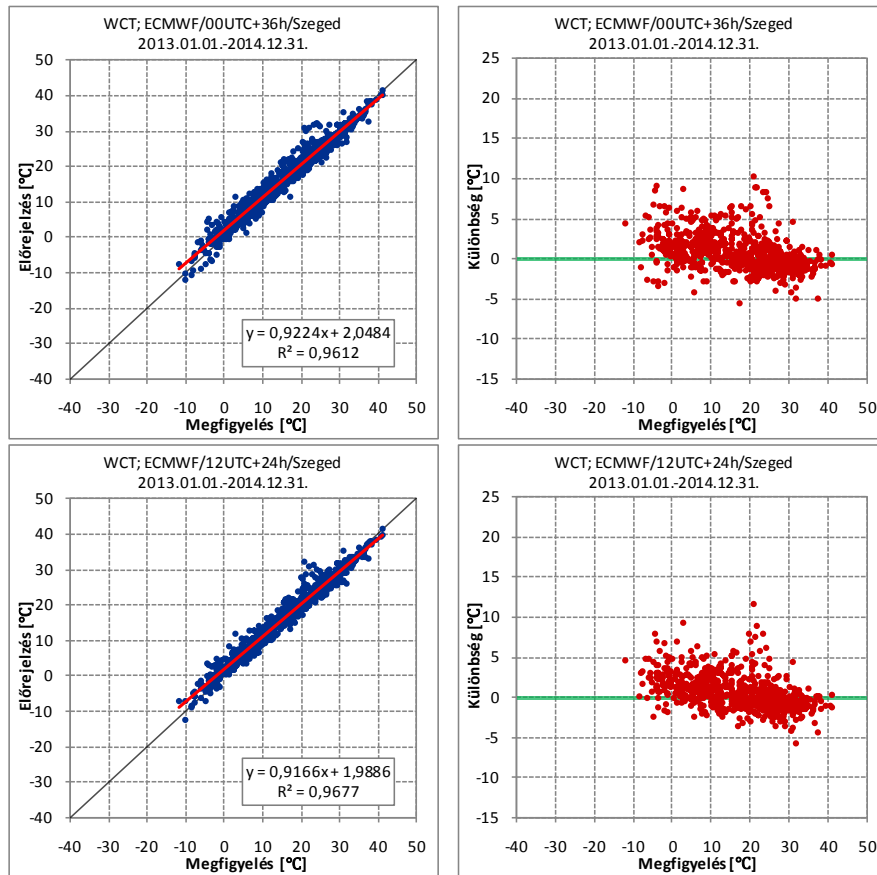


F22. ábra – A WCT index Budapestre (a) és Győrrre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

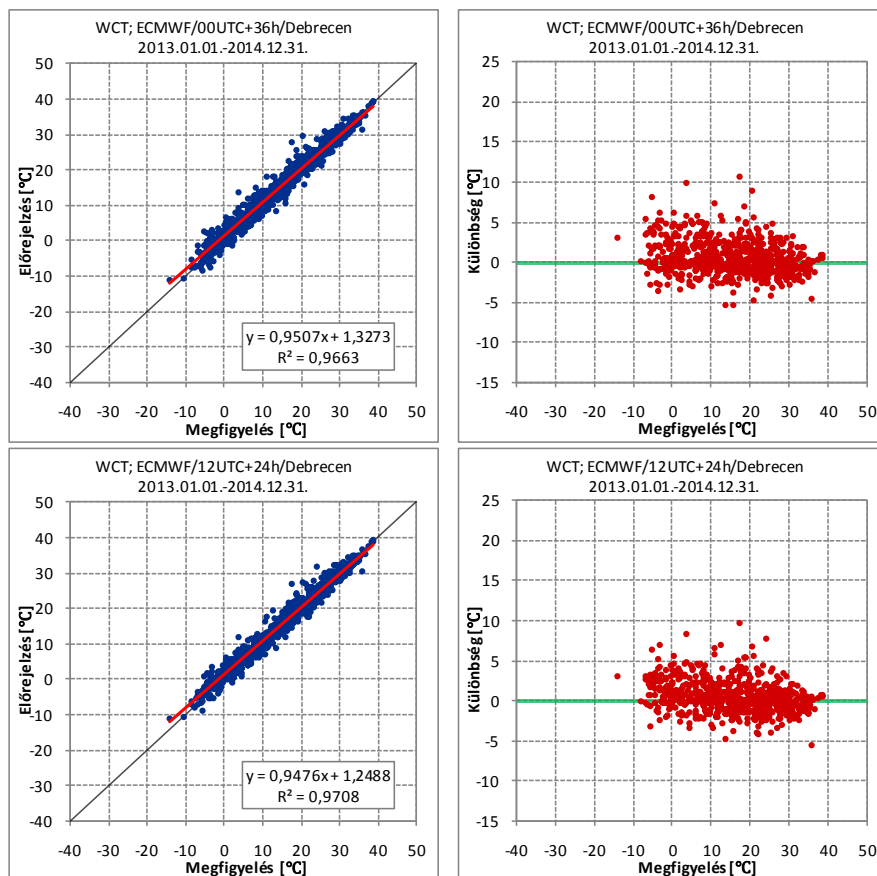


F23. ábra – A WCT index Szombathelyre (*a*) és Pécsre (*b*) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján

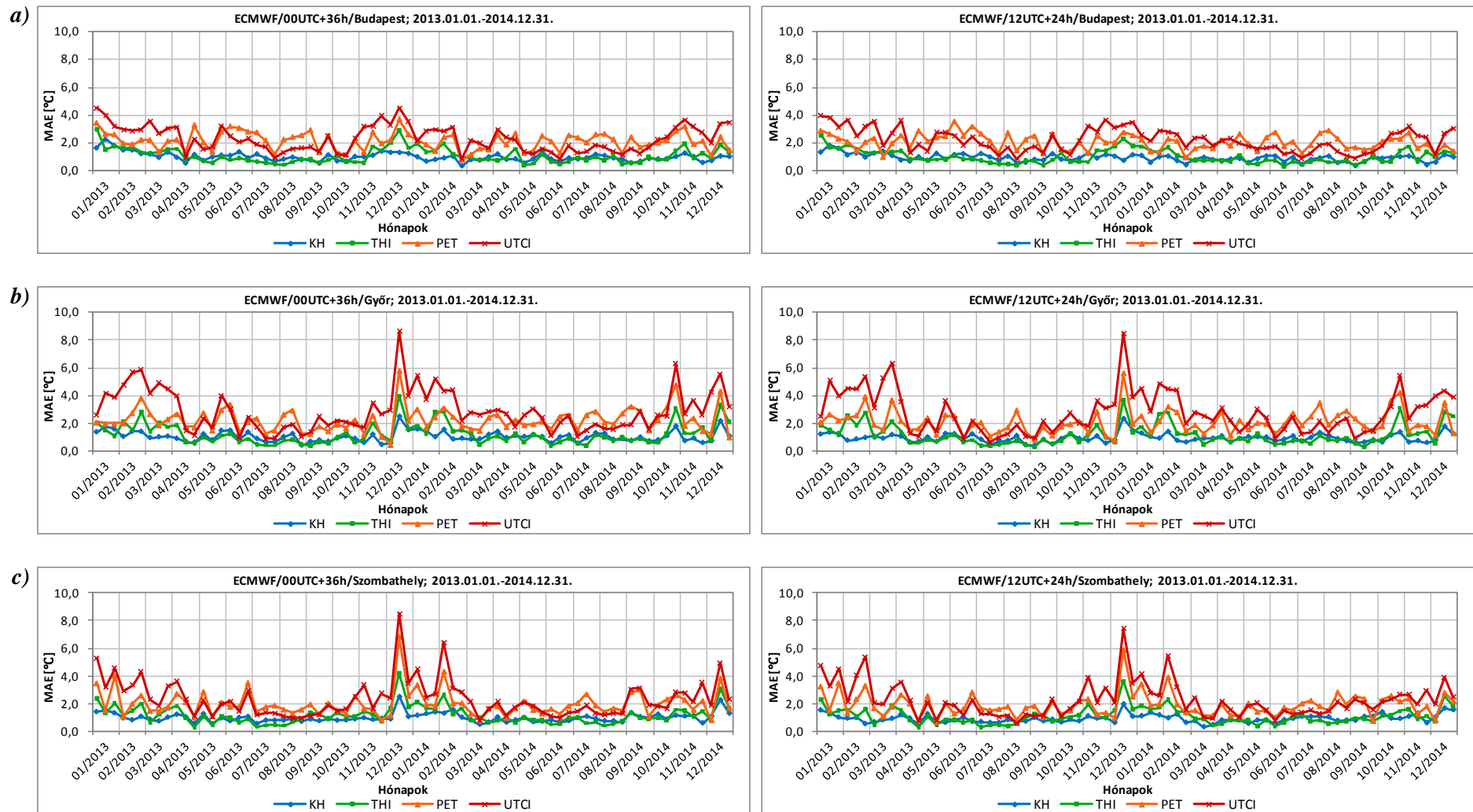
a)



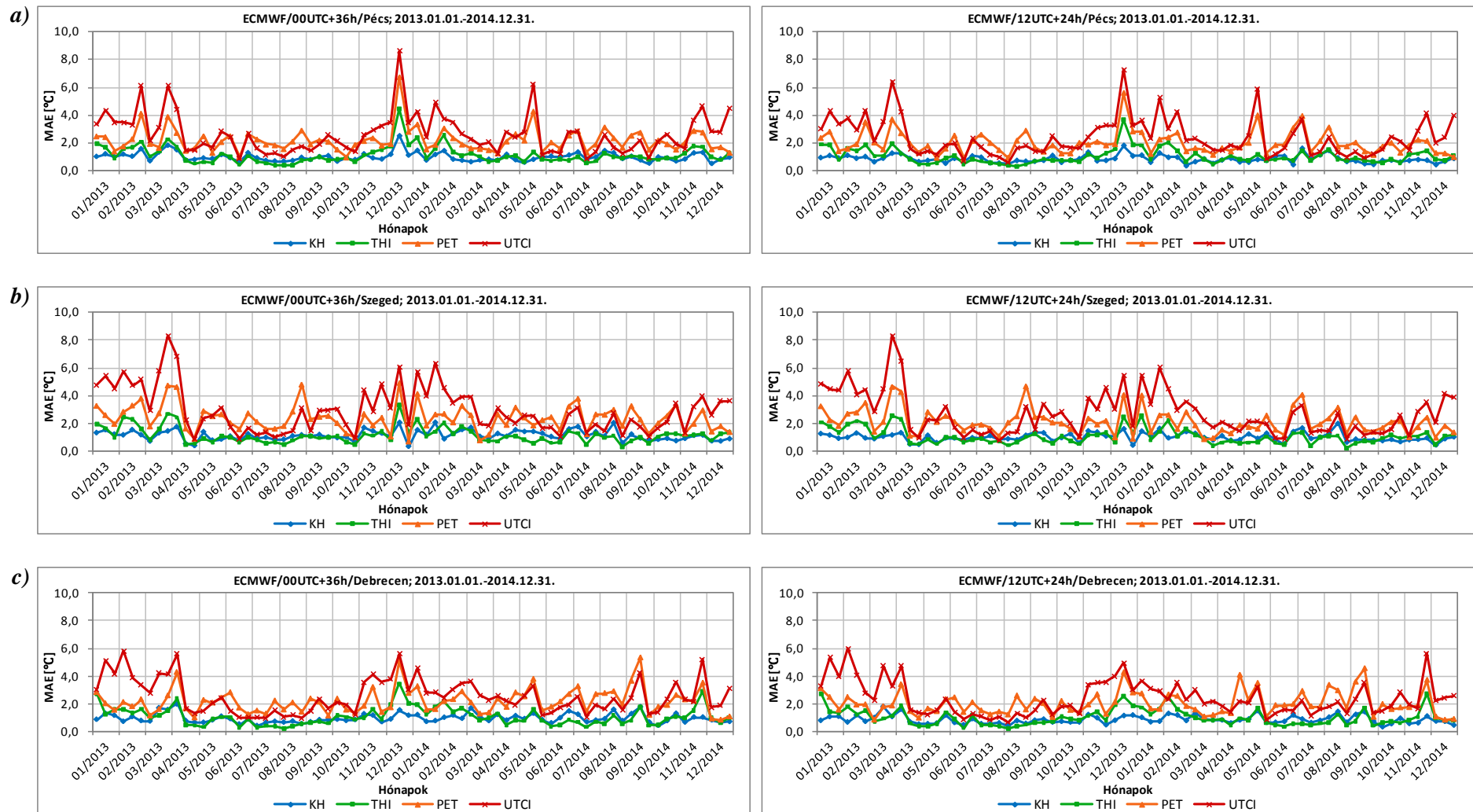
b)



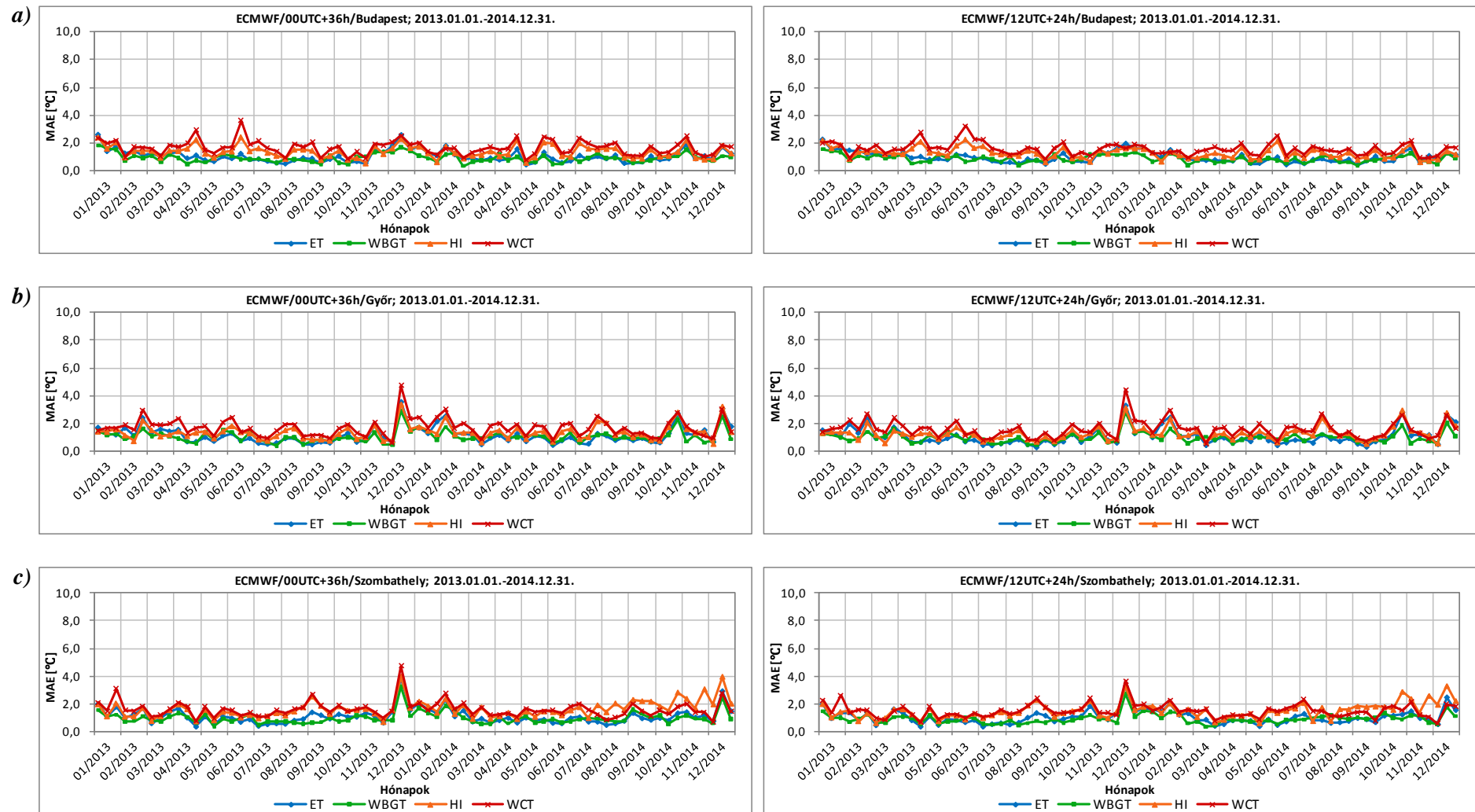
F24. ábra – A WCT index Szegedre (a) és Debrecenre (b) vonatkozó eloszlás diagramjai a 00 UTC-s (fent) és a 12 UTC-s (lent) modellfuttatások alapján



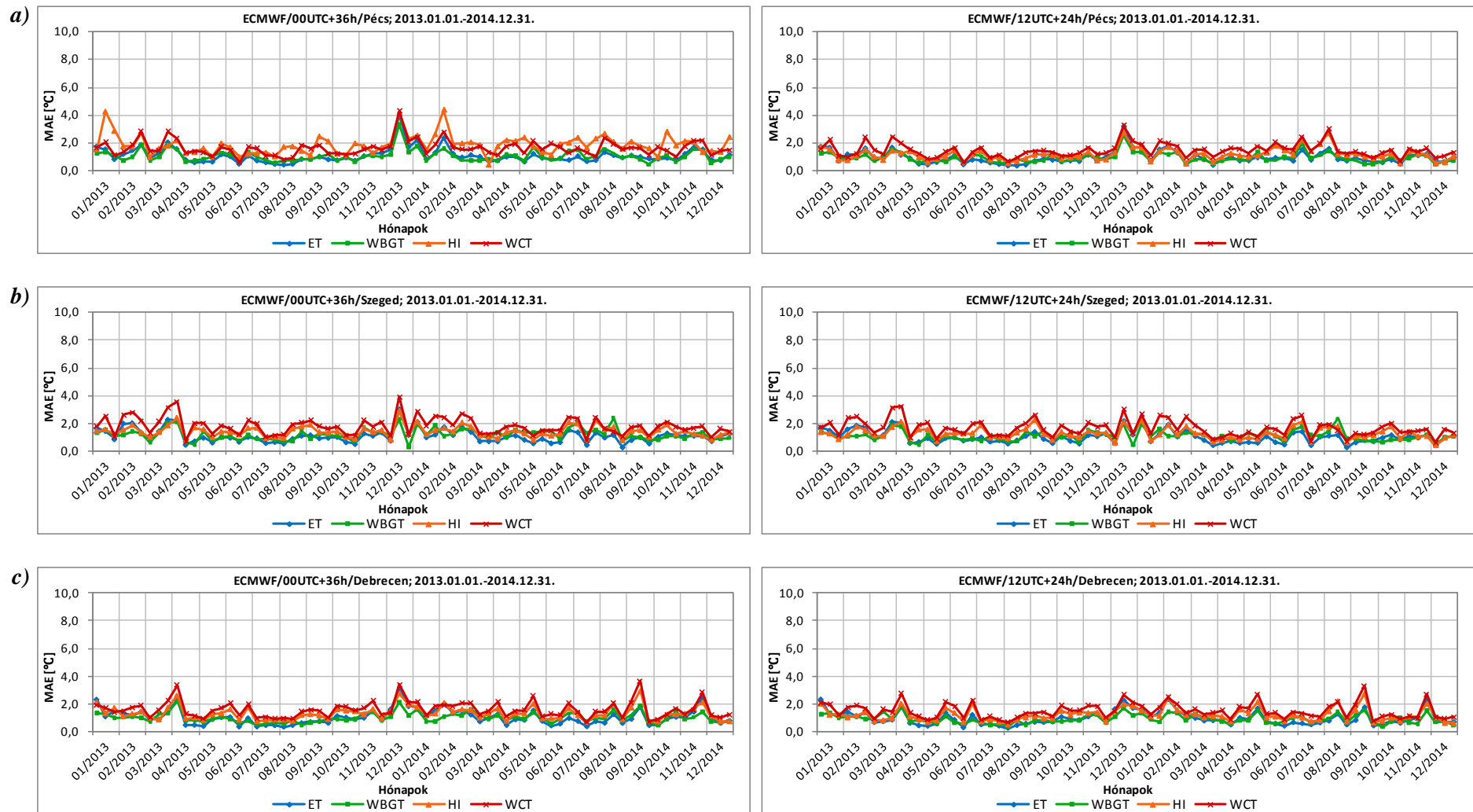
F25. ábra – A MAE dekádonkénti átlaga a KH, THI, PET és UTCI indexekre vonatkozóan Budapesten (a), Győrön (b) és Szombathelyen (c) a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



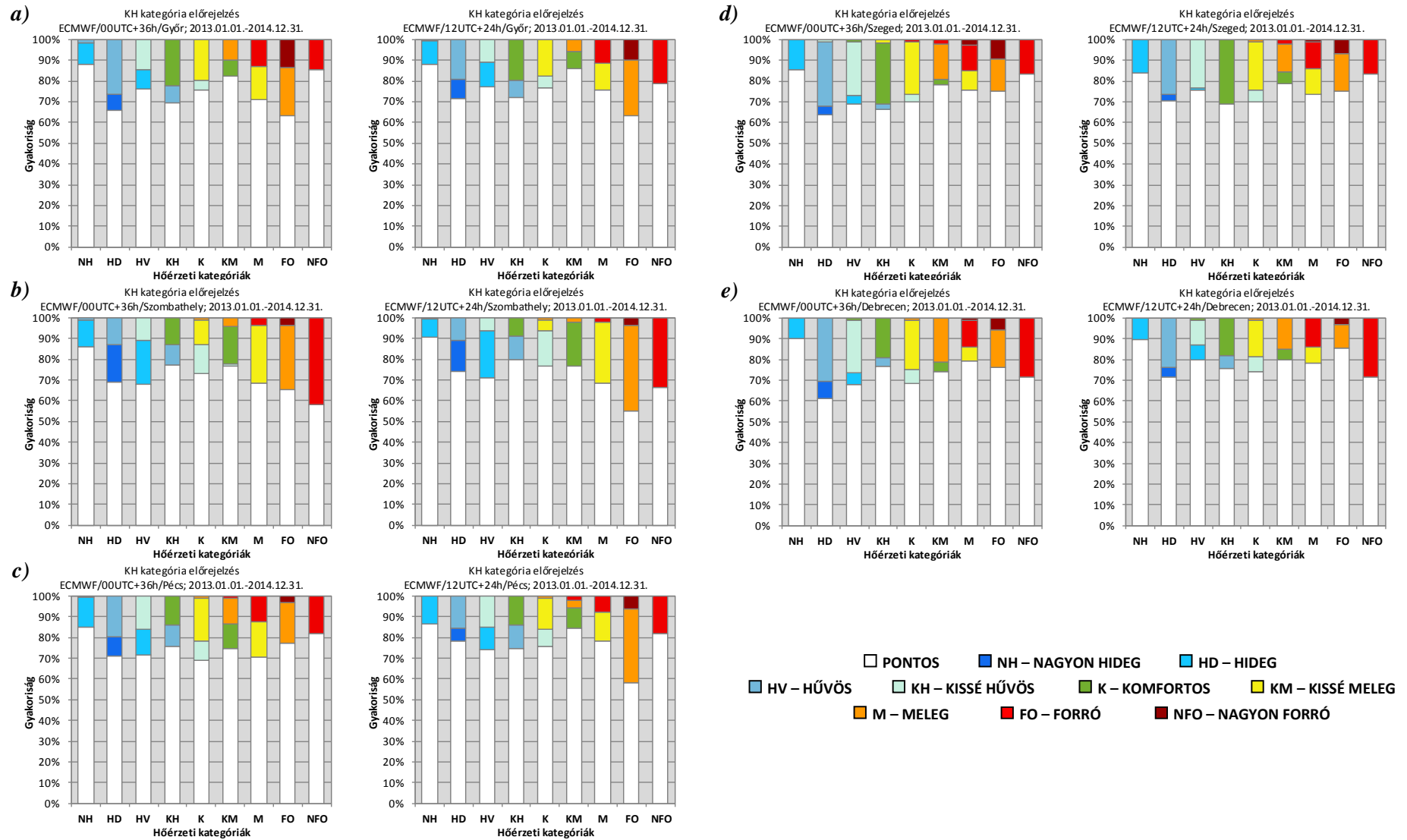
F26. ábra – A MAE dekádonkénti átlaga a KH, THI, PET és UTCI indexekre vonatkozóan Pécsen (a), Szegeden (b) és Debrecenen (c) a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



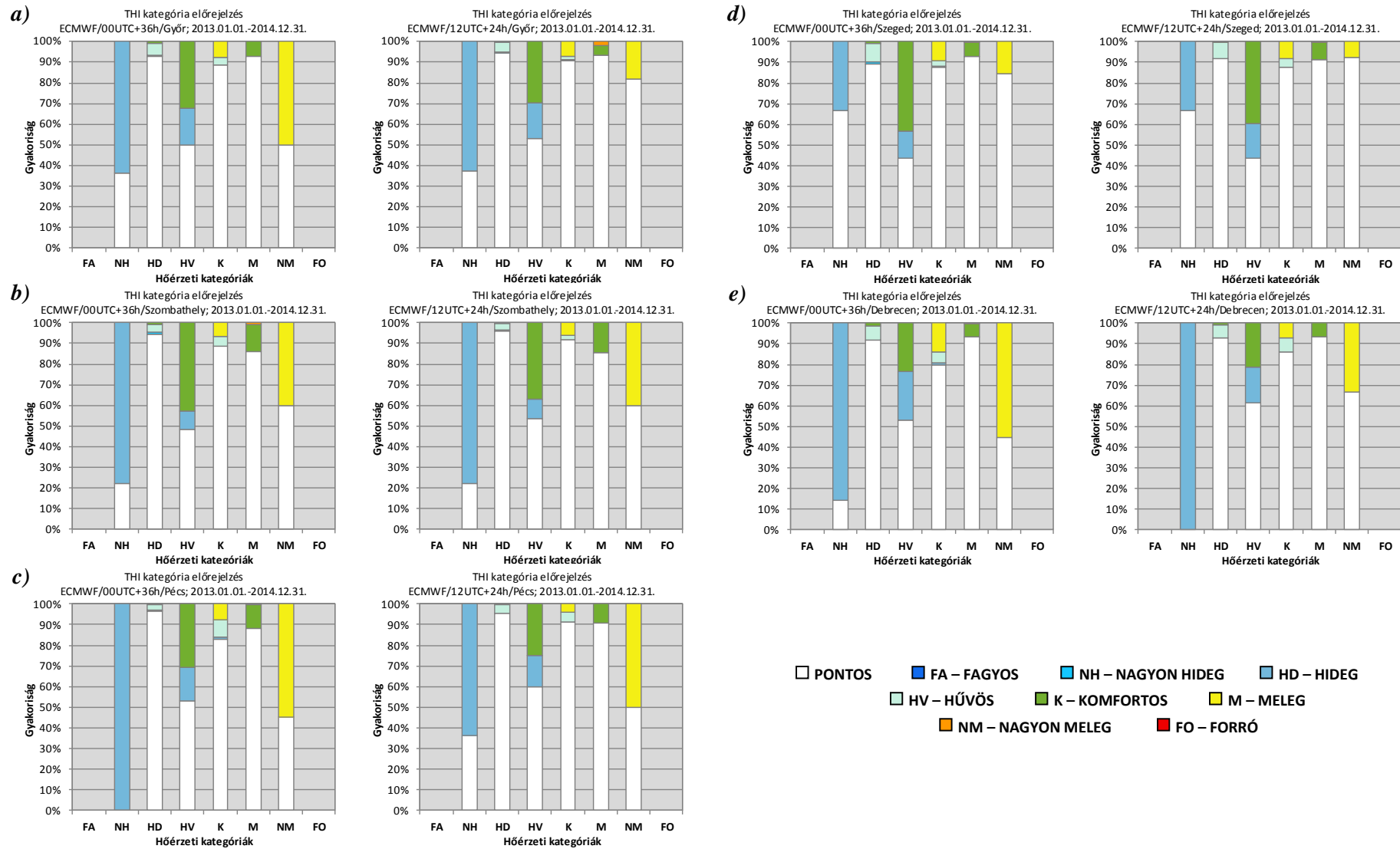
F27. ábra – A MAE dekádonkénti átlaga az ET, WBGT, HI és WCT indexekre vonatkozóan Budapesten (a), Győrön (b) és Szombathelyen (c) a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



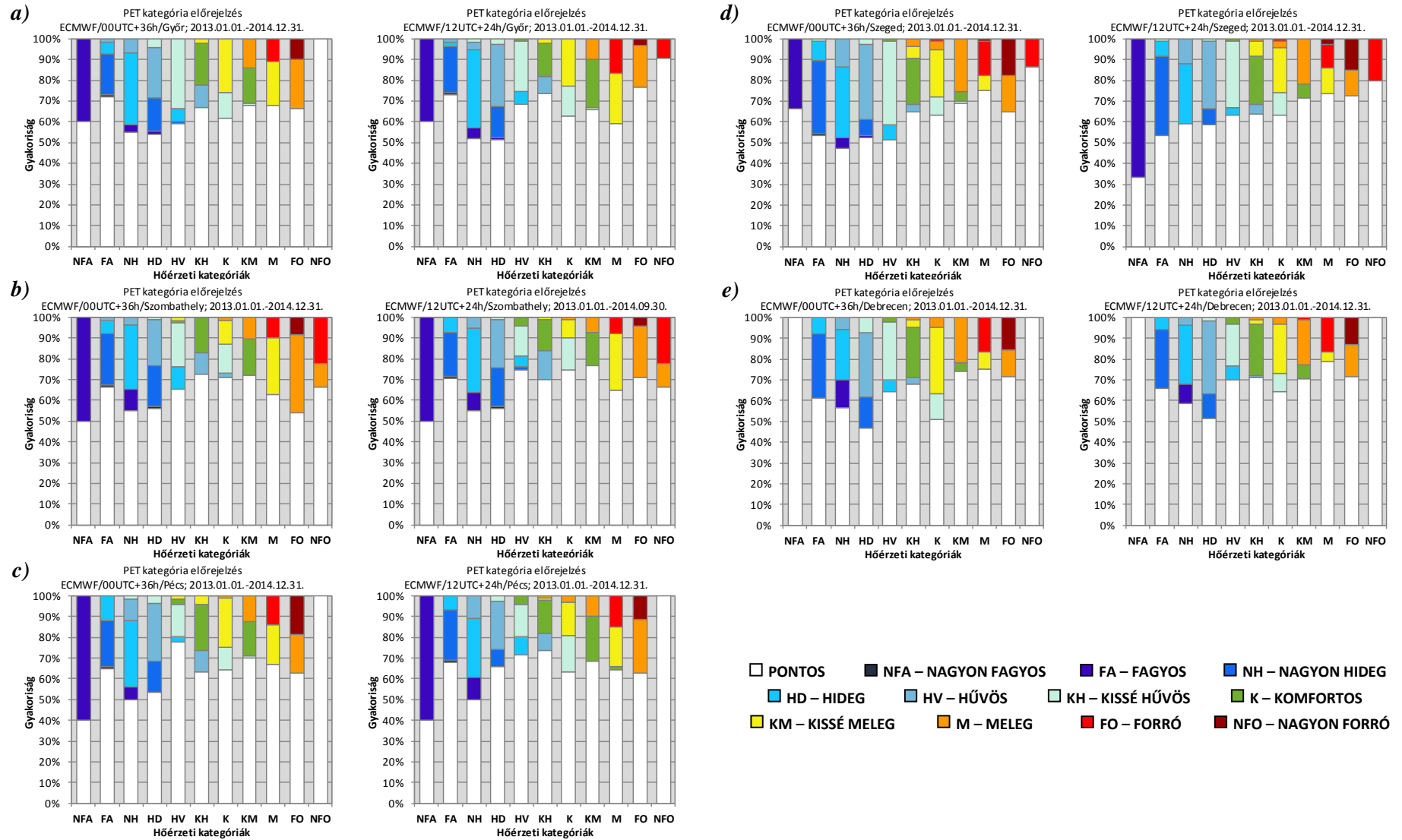
F28. ábra – A MAE dekádonkénti átlaga az ET, WBGT, HI és WCT indexekre vonatkozóan Pécsen (a), Szegeden (b) és Debrecenen (c) a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



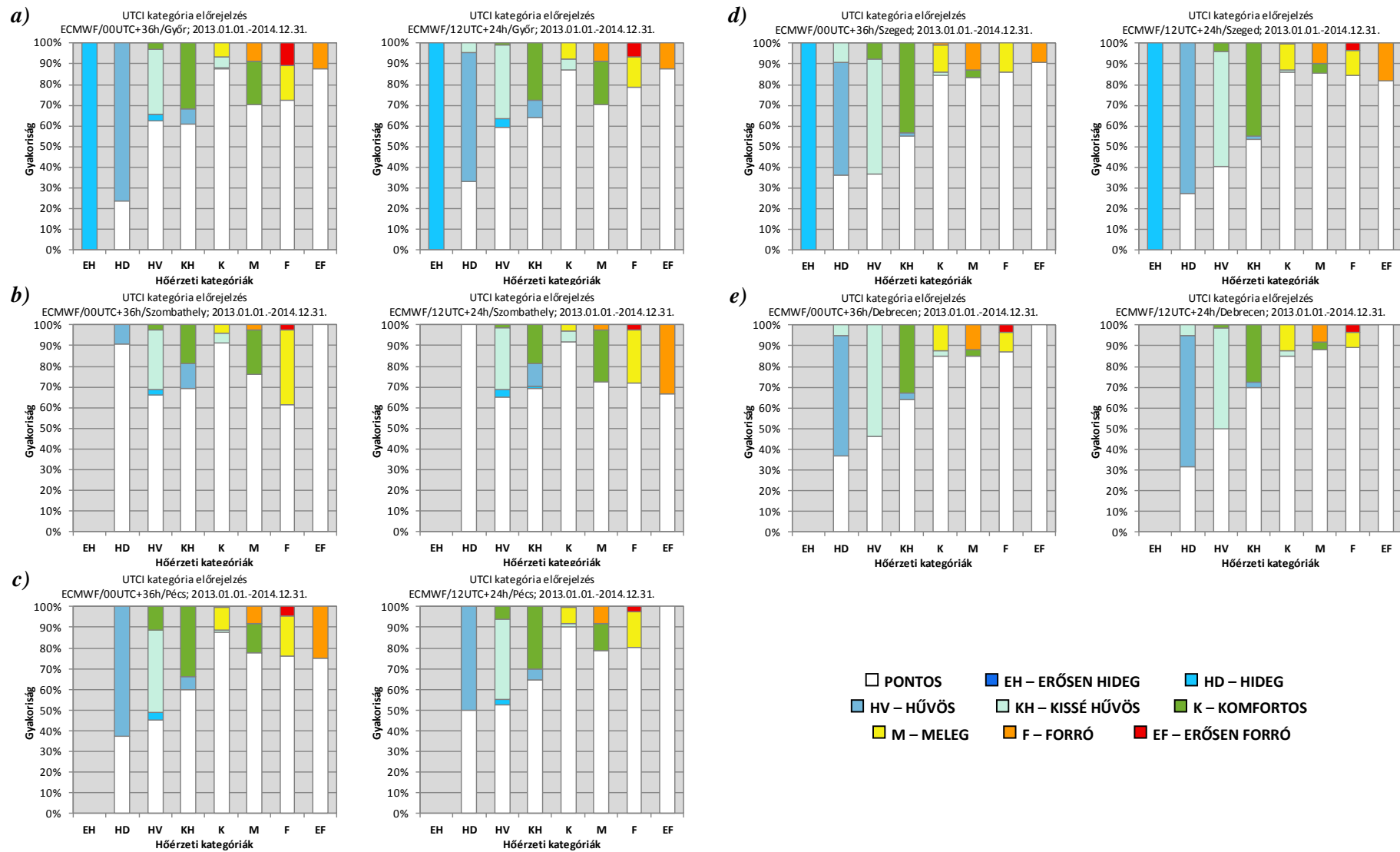
F29. ábra – A KH index kategóriás verifikáció diagramjai Győrre (*a*), Szombathelyre (*b*), Pécsre (*c*), Szegedre (*d*) és Debrecenre (*e*) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



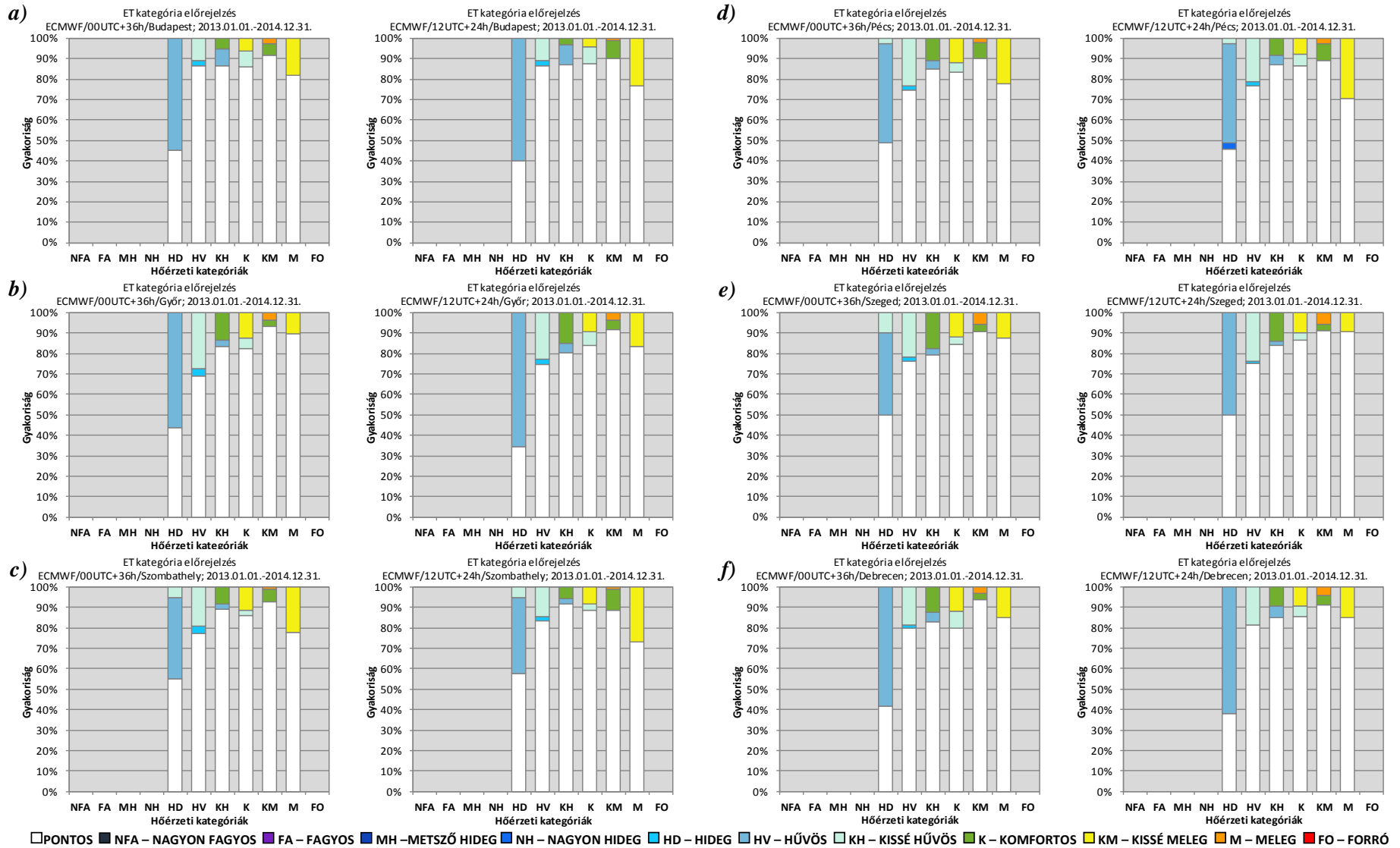
F30. ábra – A THI kategóriás verifikáció diagramjai Győrre (a), Szombathelyre (b), Pécsre (c), Szegedre (d) és Debrecenre (e) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



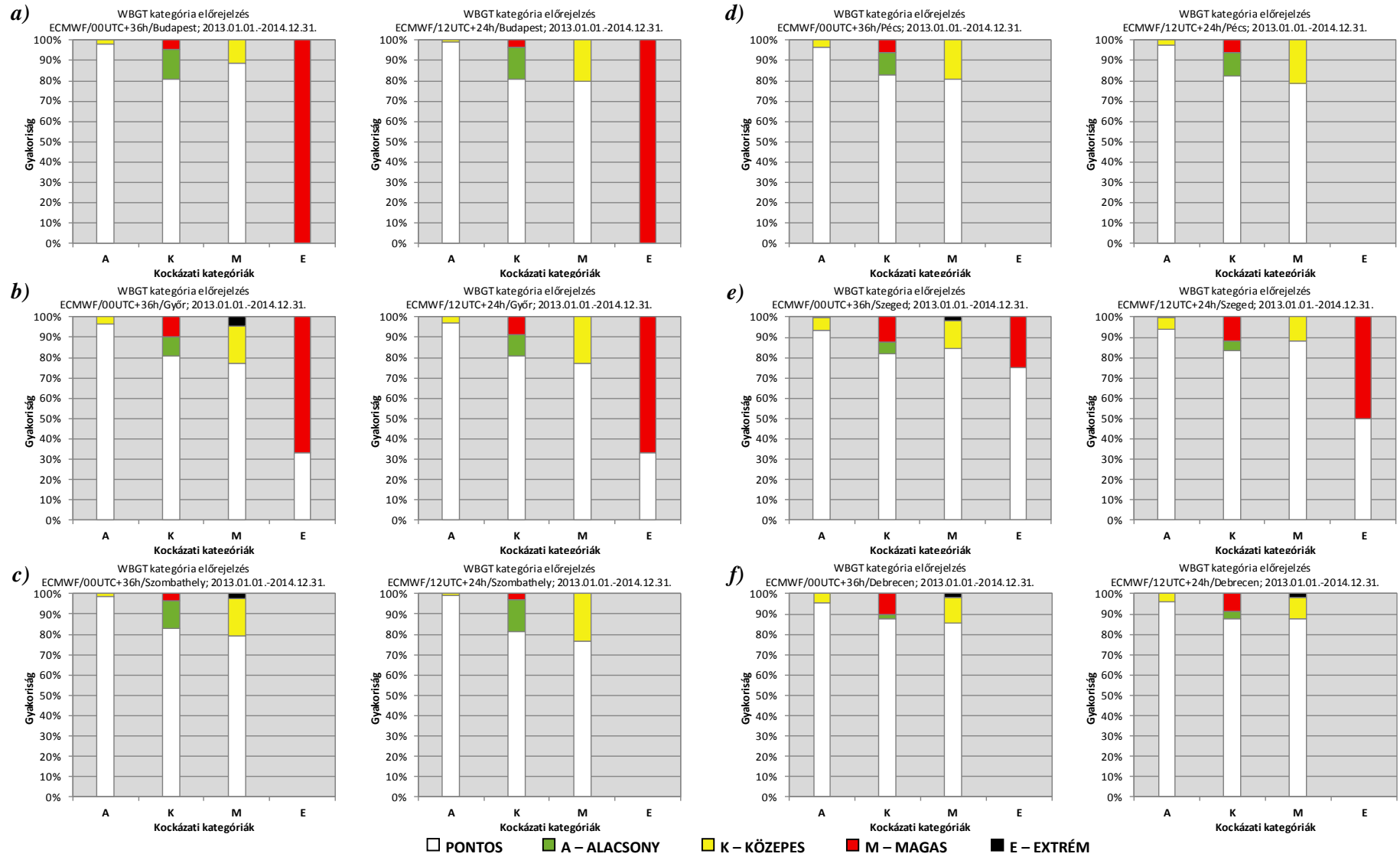
F31. ábra – A PET index kategóriás verifikáció diagramjai Győrre (a), Szombathelyre (b), Pécsre (c), Szegedre (d) és Debrecenre (e) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



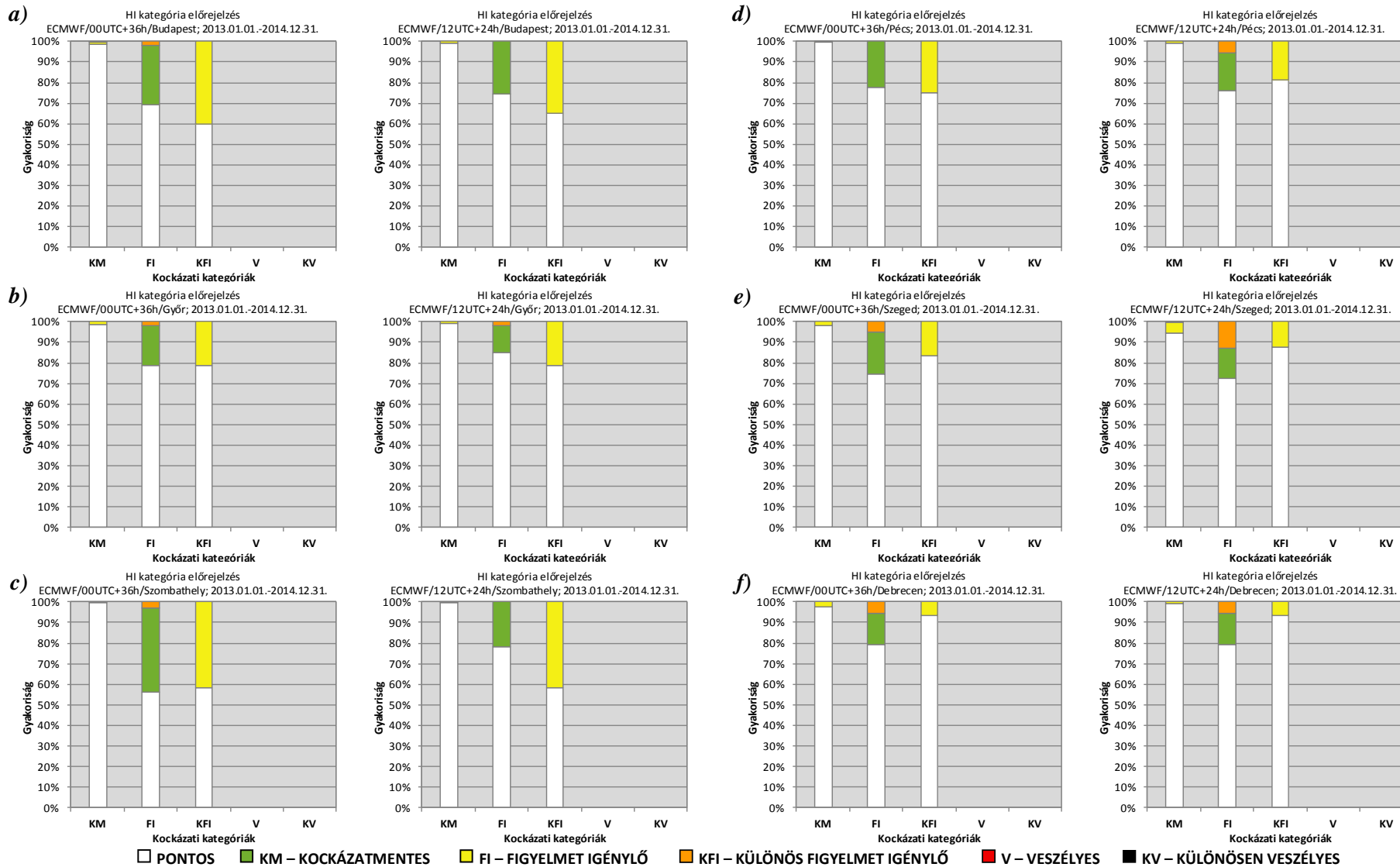
F32. ábra – Az UTCI kategóriás verifikáció diagramjai Győrre (a), Szombathelyre (b), Pécsre (c), Szegedre (d) és Debrecenre (e) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



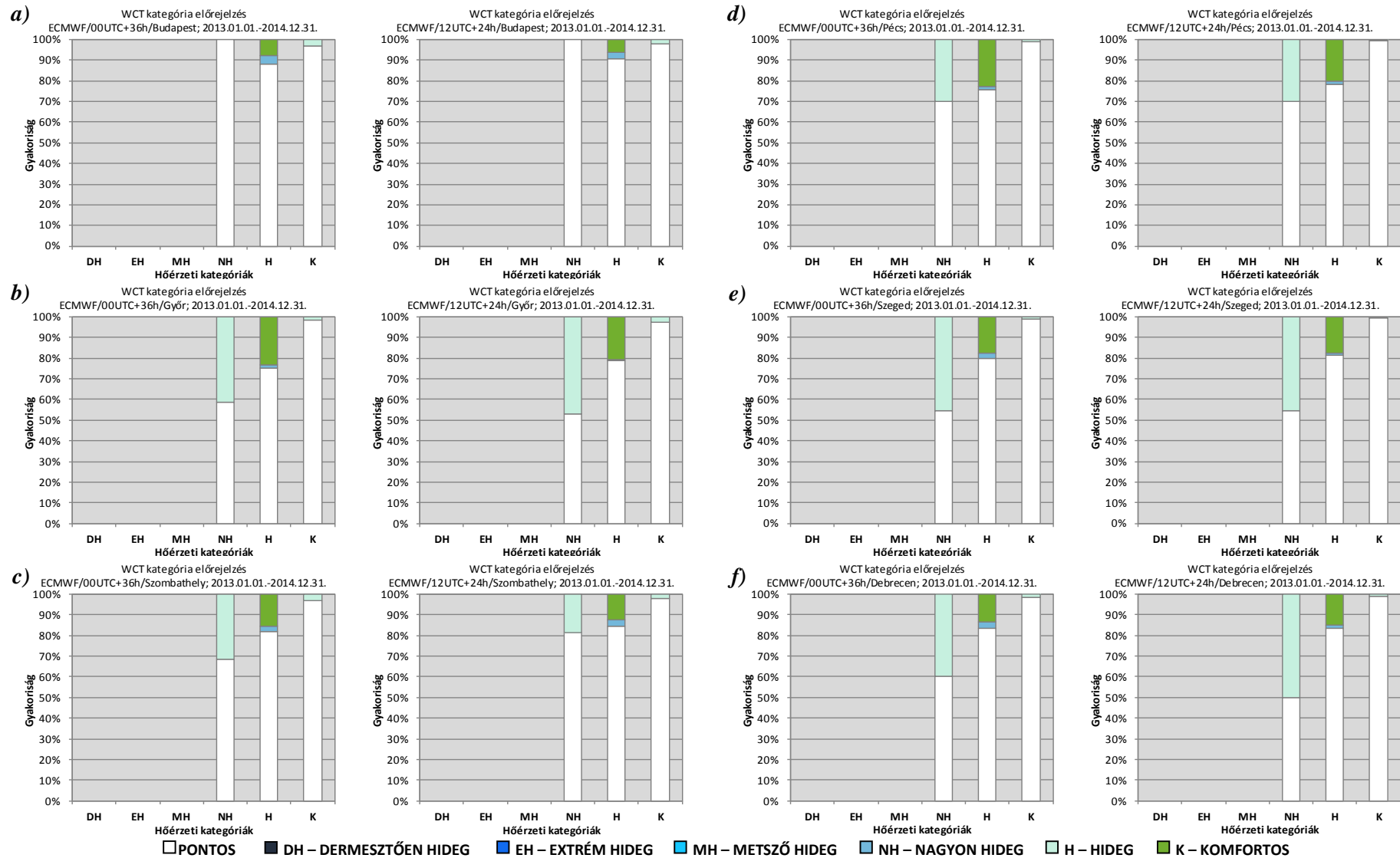
F33. ábra – Az ET index kategóriás verifikáció diagramjai Budapestre (a), Győrre (b), Szombathelyre (c), Pécsre (d), Szegedre (e) és Debrecenre (f) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



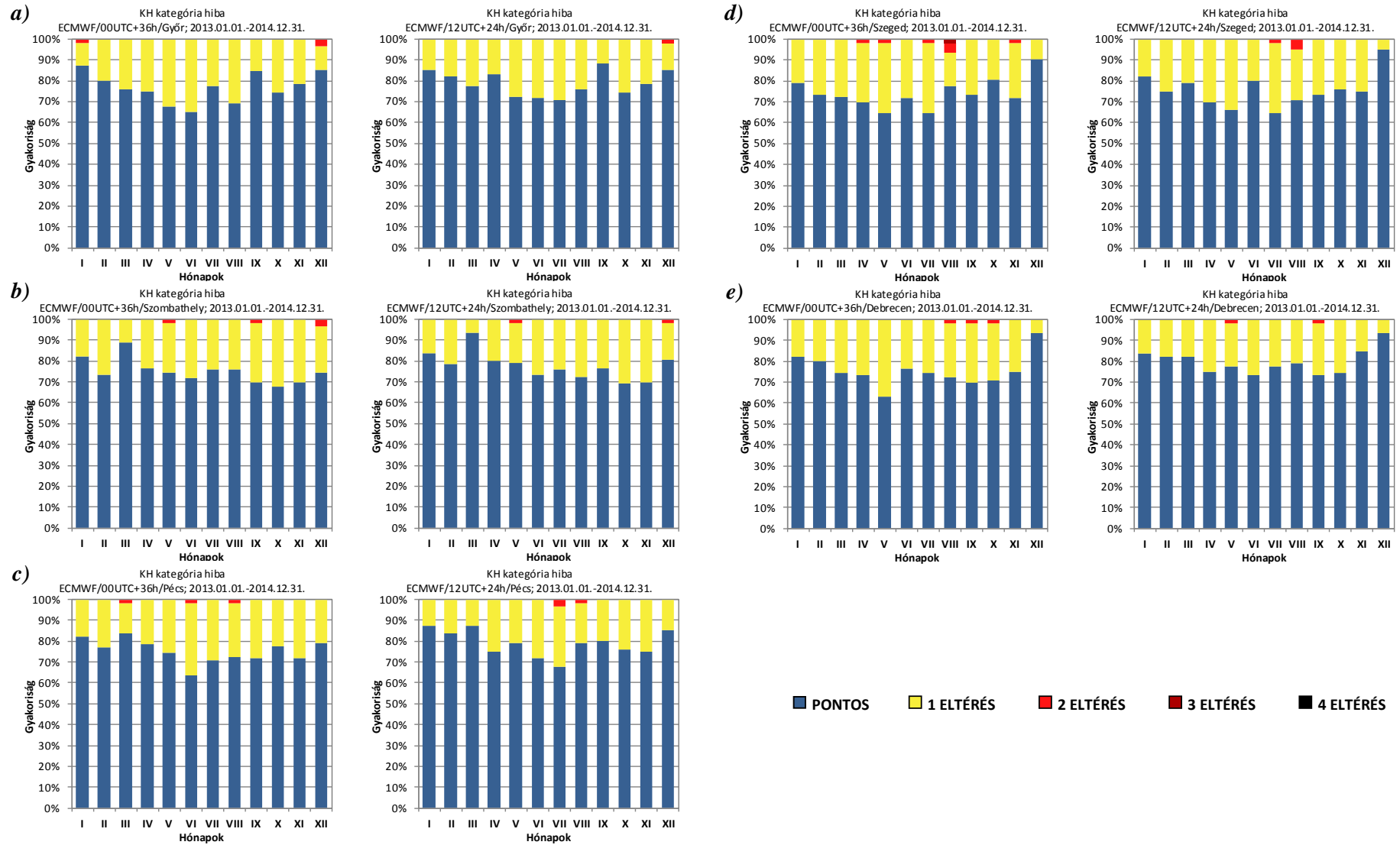
F34. ábra – A WBG index kategóriás verifikáció diagramjai Budapestre (a), Győrre (b), Szombathelyre (c), Pécsre (d), Szegedre (e) és Debrecenre (f) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



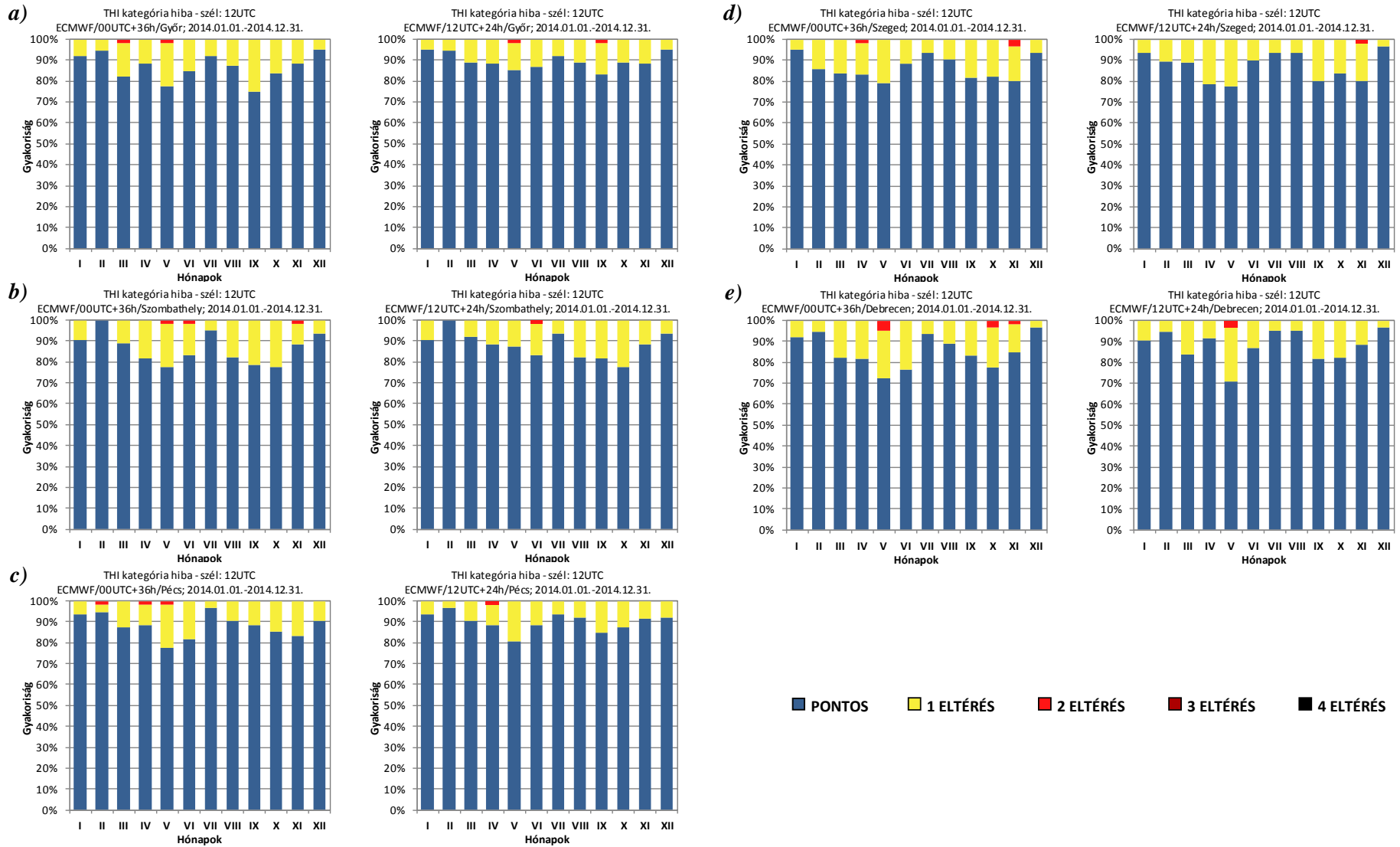
F35. ábra – A HI kategóriás verifikáció diagramjai Budapestre (a), Győrrre (b), Szombathelyre (c), Pécsre (d), Szegedre (e) és Debrecenre (f) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



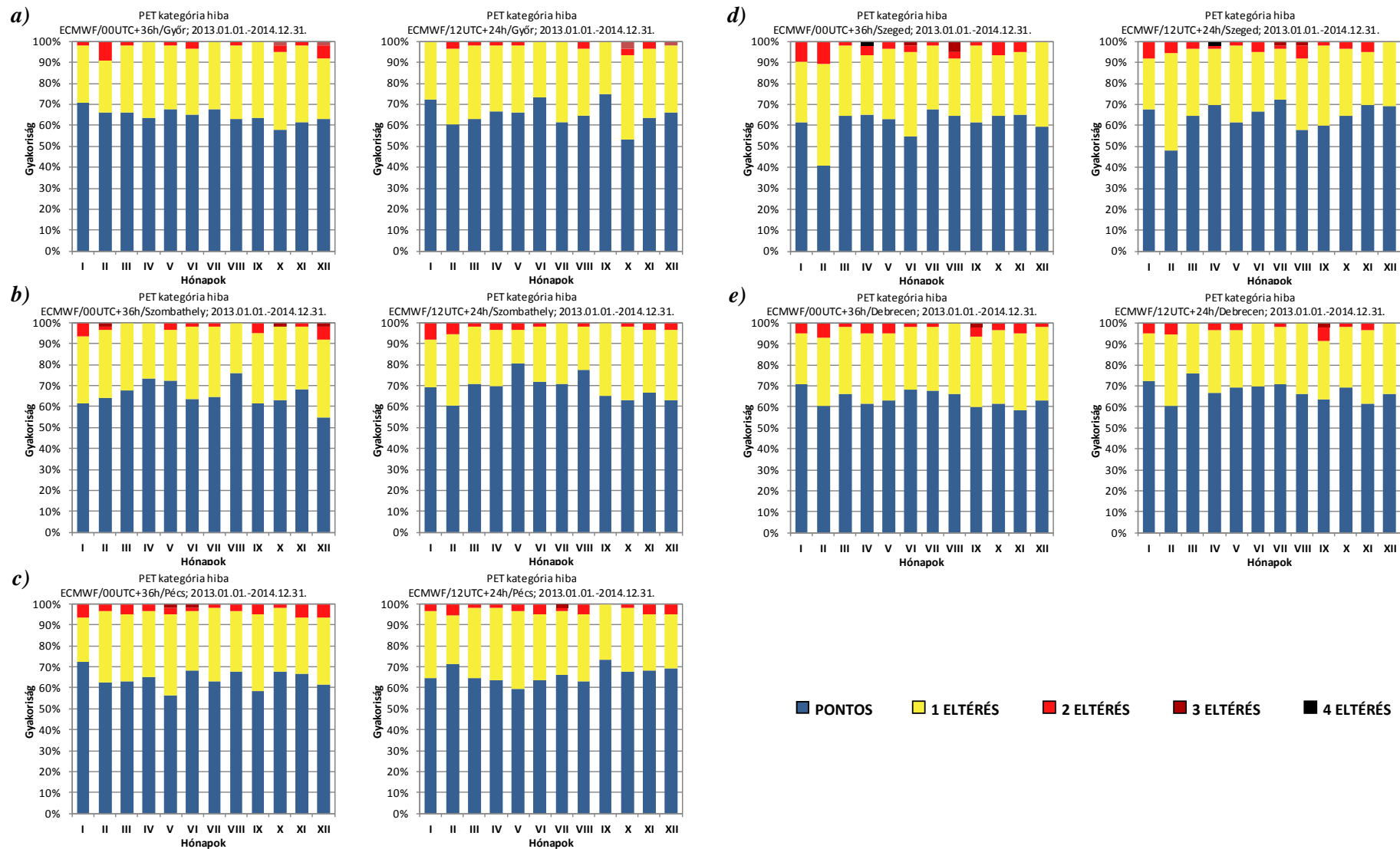
F36. ábra – A WCT index kategóriás verifikáció diagramjai Budapestre (a), Győrrre (b), Szombathelyre (c), Pécsre (d), Szegedre (e) és Debrecenre (f) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



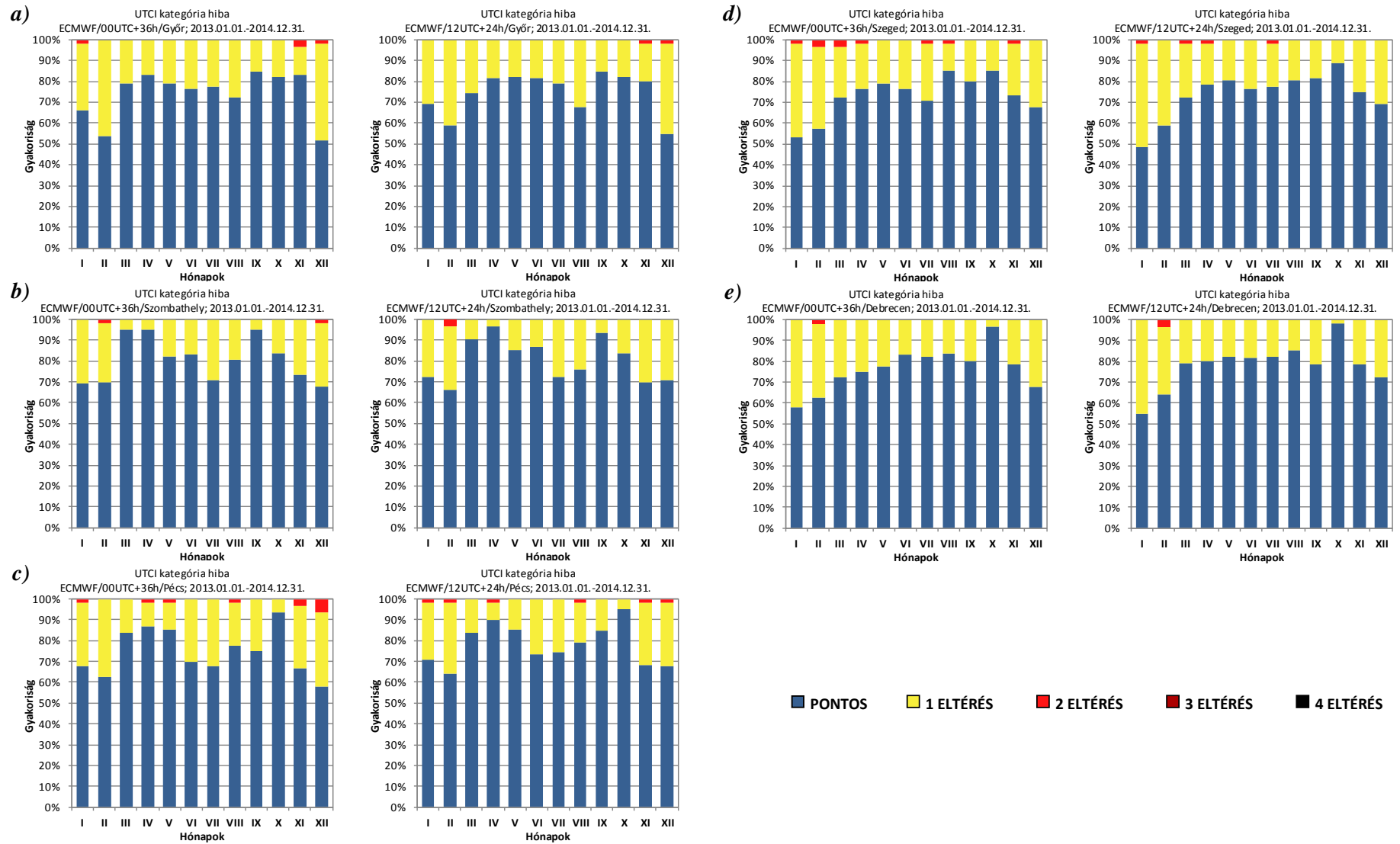
F37. ábra – A KH index kategória eltéréseinek diagramjai Győrre (*a*), Szombathelyre (*b*), Pécsre (*c*), Szegedre (*d*) és Debrecenre (*e*) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



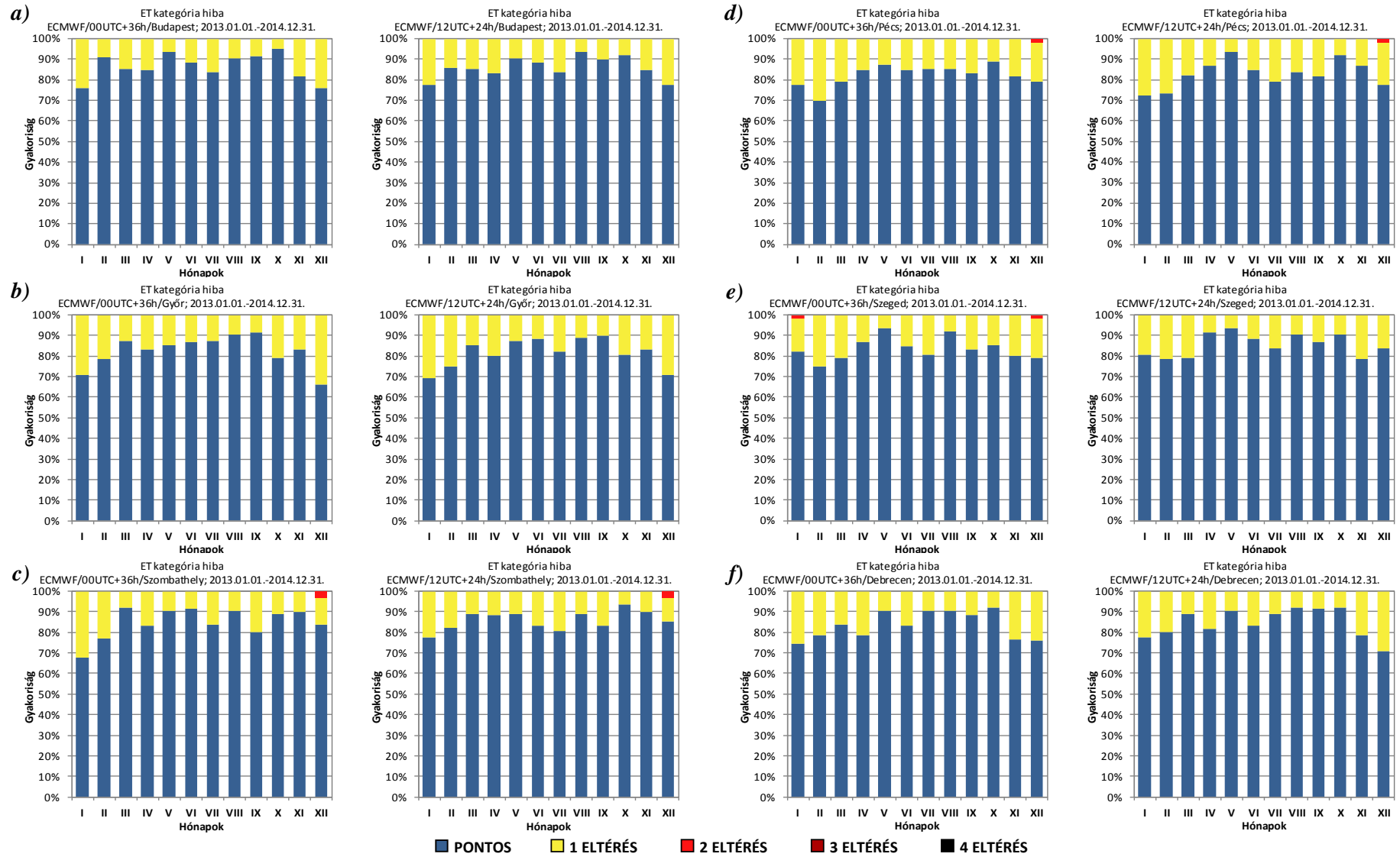
F38. ábra – A THI kategória eltéréseinek diagramjai Győrre (a), Szombathelyre (b), Pécsre (c), Szegedre (d) és Debrecenre (e) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



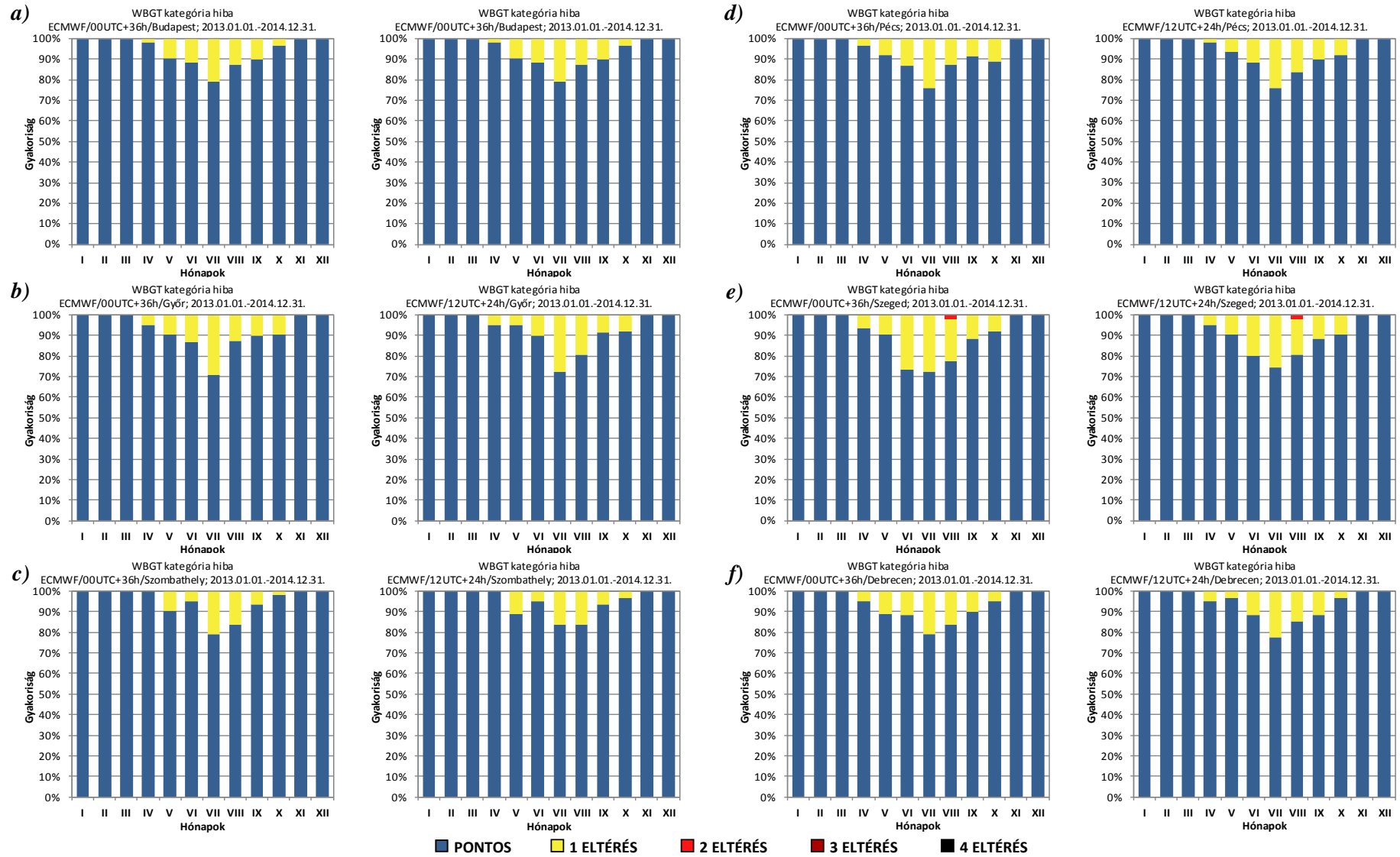
F39. ábra – A PET index kategória eltéréseinek diagramjai Győrre (a), Szombathelyre (b), Pécsre (c), Szegedre (d) és Debrecenre (e) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján

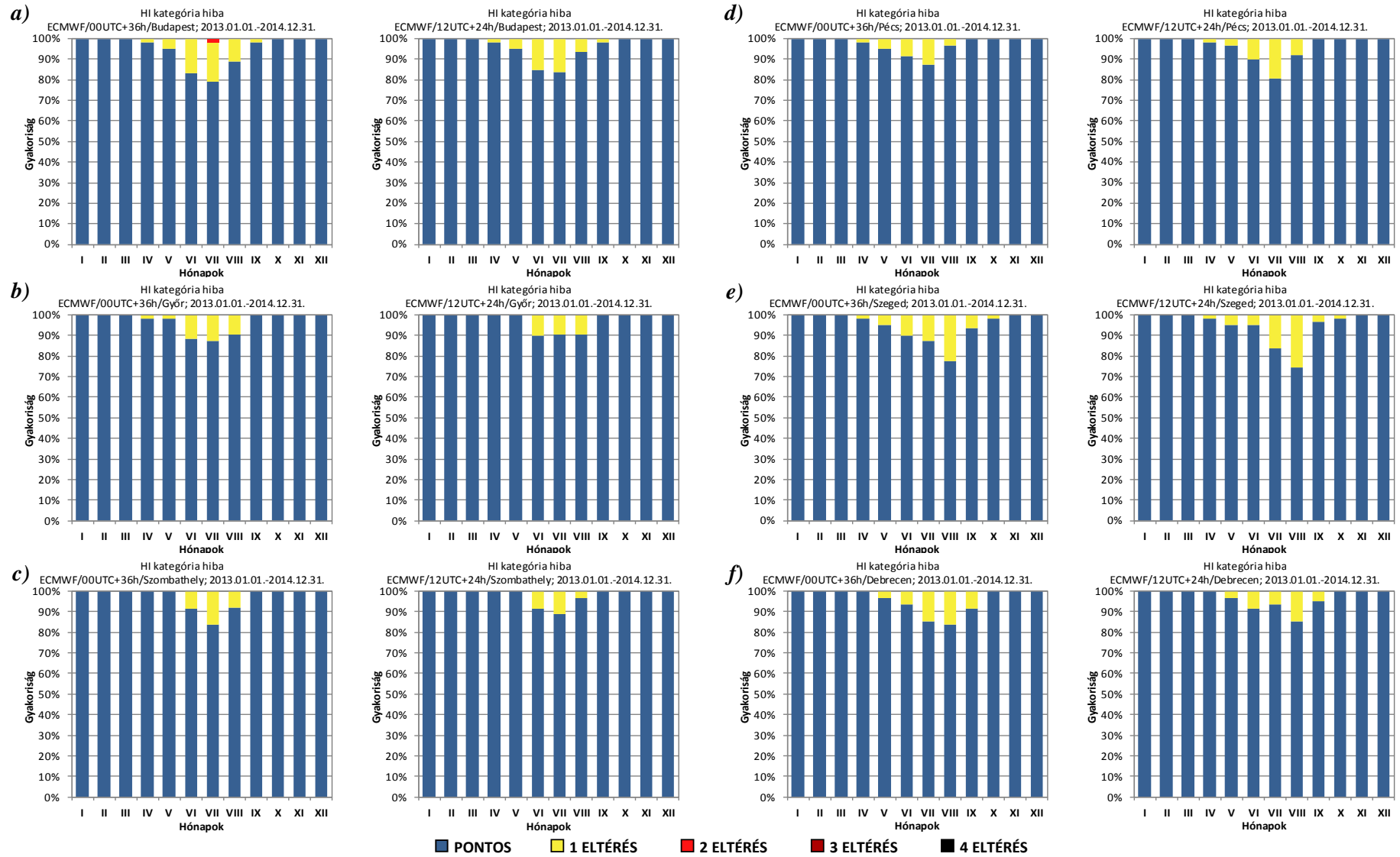


F40. ábra – Az UTCI kategória eltéréseinek diagramjai Győrre (a), Szombathelyre (b), Pécsre (c), Szegedre (d) és Debrecenre (e) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján

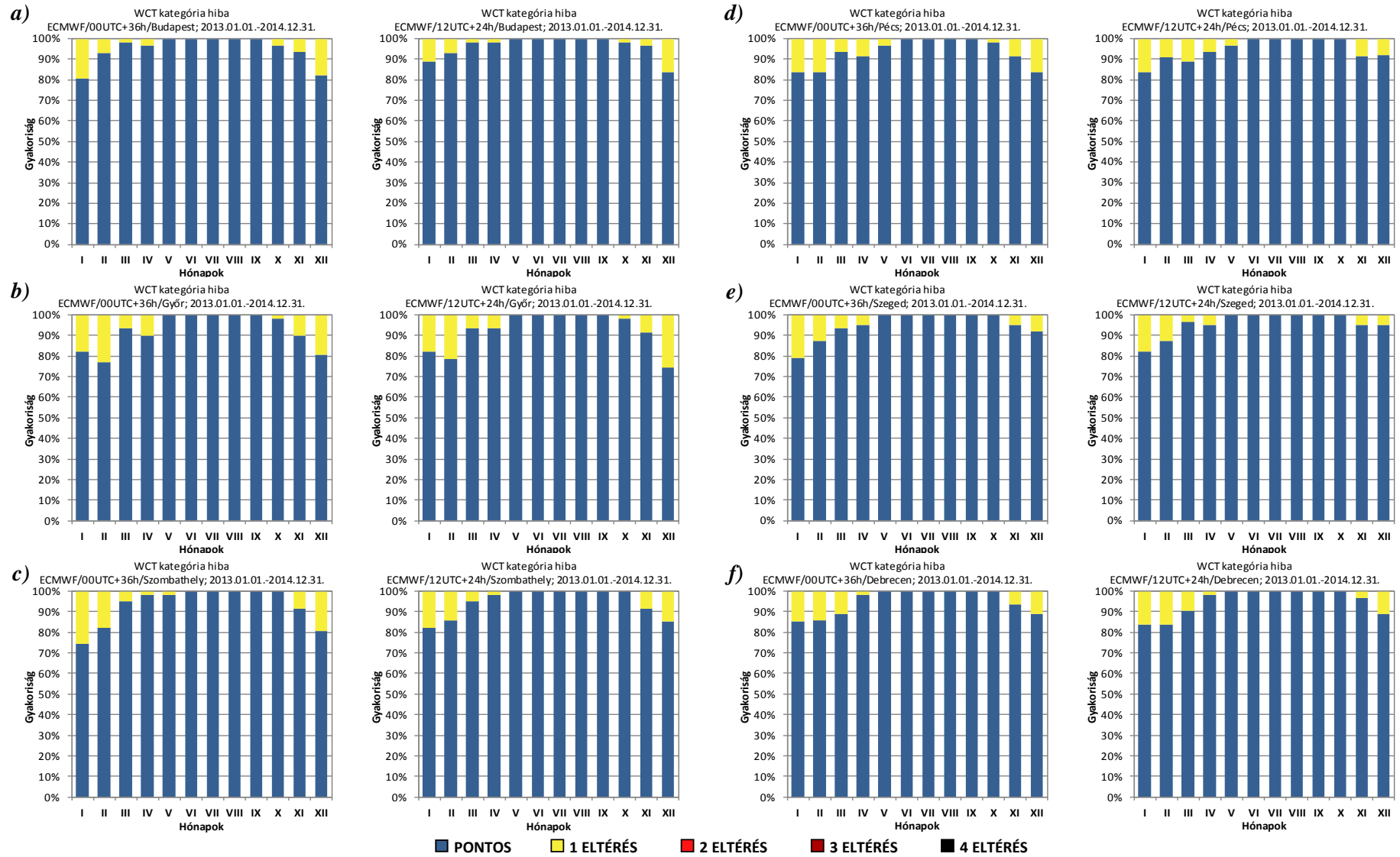


F41. ábra – Az ET index kategória eltéréseinek diagramjai Budapestre (a), Győrrre (b), Szombathelyre (c), Pécsre (d), Szegedre (e) és Debrecenre (f) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján





F43. ábra – A HI kategória eltéréseinek diagramjai Budapestre (a), Győrre (b), Szombathelyre (c), Pécsre (d), Szegedre (e) és Debrecenre (f) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján



F44. ábra – A WCT index kategória eltéréseinek diagramjai Budapestre (a), Győrrre (b), Szombathelyre (c), Pécsre (d), Szegedre (e) és Debrecenre (f) vonatkozóan a 00 UTC-s (bal oldal) és a 12 UTC-s (jobb oldal) modellfuttatások alapján