

Második hulladékégető mű optimalizált integrálása Budapest távhőellátásába

Gépészet I. Szekció

Kocsis Kende

MSc hallgató

Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszékesetén)

Témavezető neve: Dr. Bokor Balázs adjunktus

Gépészmérnöki Kar, Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnikai Tanszék

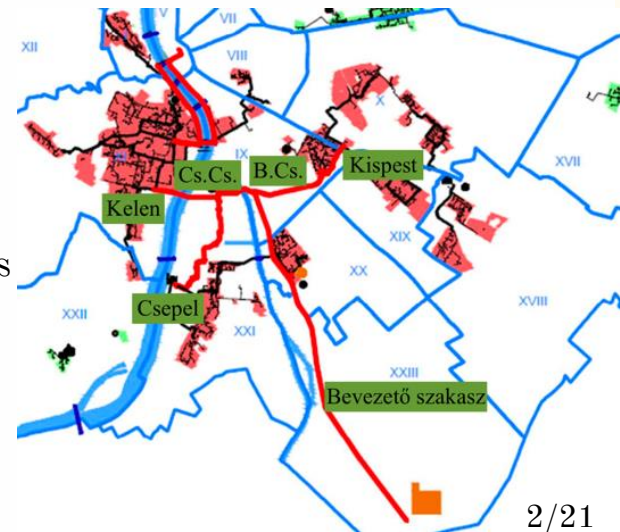
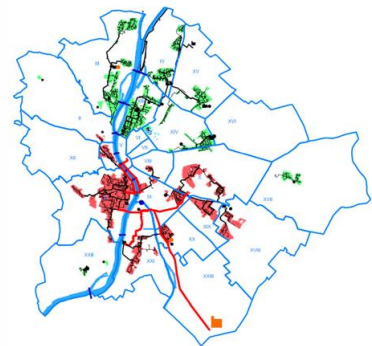


Az előadás tartalma

1. Célkitűzések és kezdeti adatok
2. Hővesztések meghatározása
3. Optimális távhőcsatlakozás
4. Hőigény előrejelzés szerepe
5. Felhasznált adatok és feldolgozásuk
6. Eredmények és teljesítések

Célkitűzések

- HUHA 2 az Ócsai út – M0 keresztezésnél
- Dél-budapesti távhőkörzetek → **optimális csatlakozás**
 - Kelenföld, Csepel és Kispest
- 15,5 km összekötő távhővezeték szakasz → nagy szabályozási holtidő
- Főtáv empirikus lineáris hőteljesítmény előrejelzés → 26-28% átlagos abszolút hiba
- **Pontosabb időjárás alapú hőteljesítmény-igény előrejelző rendszer → gépi tanulás alapú predikció**
 - Pontos hőteljesítmény szabályzás a HUHA 2 távolsága esetén is
 - Redukált tüzelési teljesítmény igény
 - Csökkentett visszatérő hőmérséklet → magasabb hatásfok
 - Kisebb hőveszteségek
 - Felhasználó igények pontos lekövetése → magasabb komfort



Kezdeti adatok

- A tanulmányt a Főtvár Zrt. által szolgáltatott adatokra alapoztuk
 - Historikus hőveszteségi adatok
 - Nyomvonalhosszak átmérő, fektetési és szigetelési mód szerint
 - Fajlagos hőveszteségi adatok átmérő és szigetelés szerint
 - Hőteljesítmény, előremenő- és visszatérő hőmérséklet, illetve tömegáram adatok órás intervallumban négy évre → 2019-2022
- Időjárás adatok a Meteostat adatbázisból órás intervallumban
- Talajhőmérséklet adatok havi intervallumban



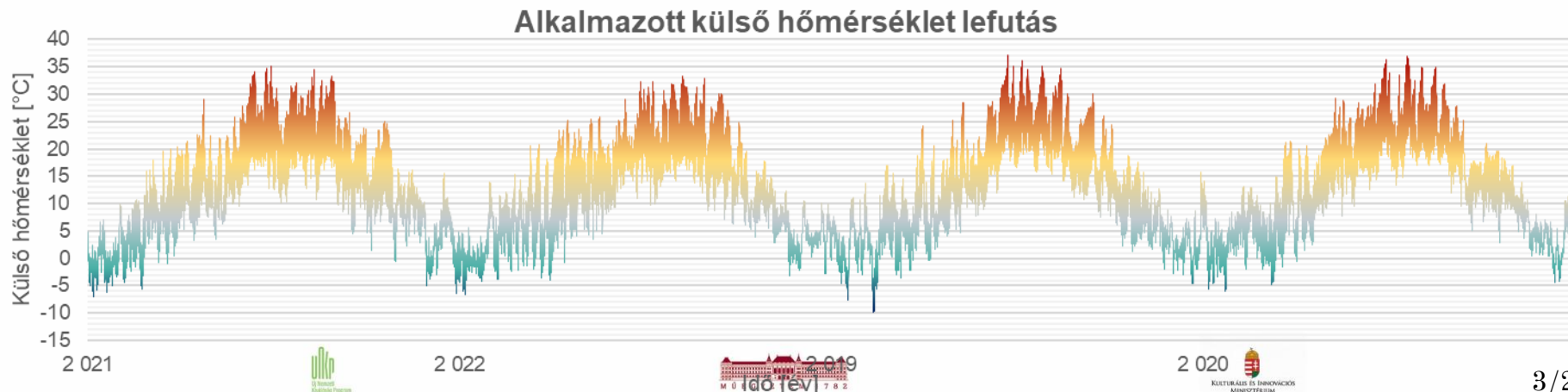
FŐTÁV

Kezdeti adatok

- A tanulmányt a Főtv Zrt. által szolgáltatott adatokra alapoztuk
 - Historikus hőveszteségi adatok
 - Nyomvonalhosszak átmérő, fektetési és szigetelési mód szerint
 - Fajlagos hőveszteségi adatok átmérő és szigetelés szerint
 - Hőteljesítmény, előremenő- és visszatérő hőmérséklet, illetve tömegáram adatok órás intervallumban négy évre → 2019-2022
- Időjárás adatok a Meteostat adatbázisból órás intervallumban
- Talajhőmérséklet adatok havi intervallumban



FŐTÁV



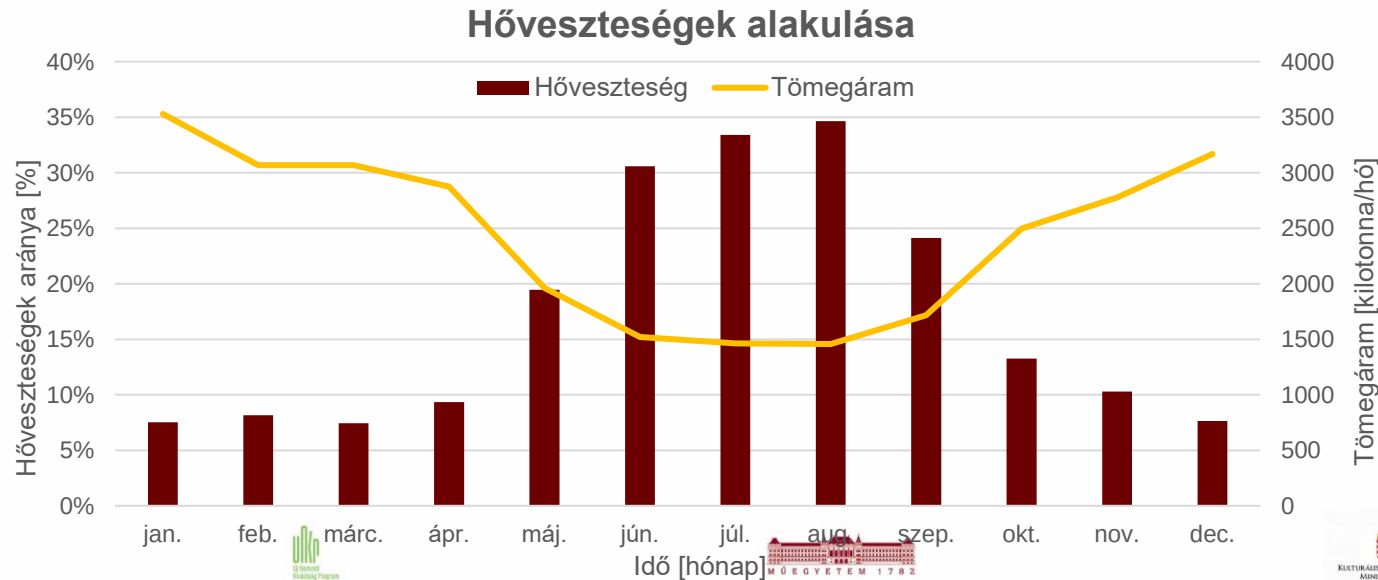
Hővesztések meghatározása

- Ismert hőátbocsátási tényező és vezeték hossz adatok → hőkörzetre jellemző hővesztési érték meghatározása
- Az adott hőkörzetben tapasztalható veszteségek meghatározása

Összegző tábla	
Hőkörzet	$U \cdot l$ [W/K]
Füredi	43 474,67
Kispest	108 600,81
Rákoskeresztúri	12 116,51
Újpalota	28 504,37
Bimbó utca	-
Donáti utca	-
Észak-budai	100 386,41
Észak-pest	143 805,29
Keleti K. utca	-
Pincszer utca	-
Toboz utca	-
Budafok	-
Csepel	54 301,13
Kelenföld	162 339,46
Rózsakert	2 535,90

Hővesztések meghatározása

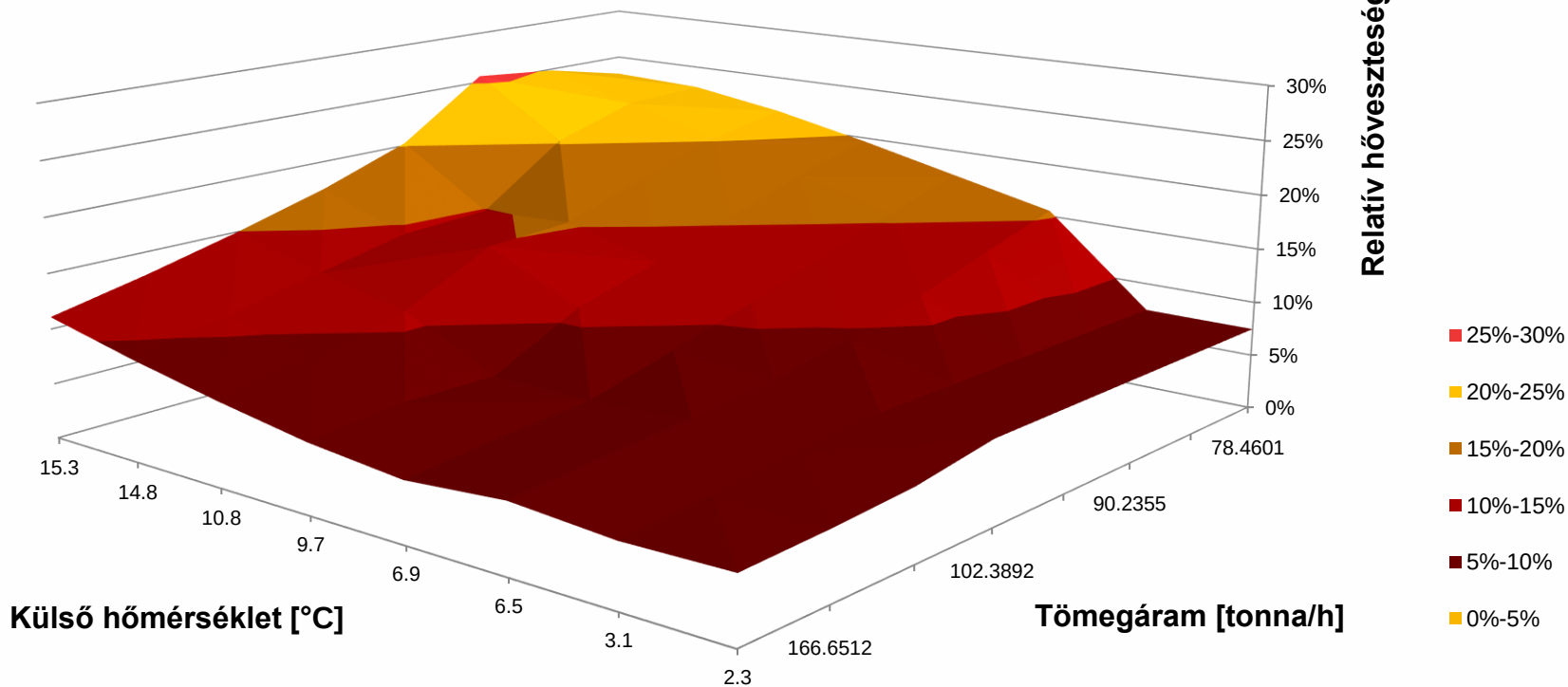
- Ismert hőátbocsátási tényező és vezeték hossz adatok → hőkörzetre jellemző hővesztési érték meghatározása
- Az adott hőkörzetben tapasztalható veszteségek meghatározása
- A hőmérsékleten kívül megfigyelhető függés a tömegáramtól



Összegző tábla	
Hőkörzet	U*I [W/K]
Füredi	43 474,67
Kispest	108 600,81
Rákoskeresztúri	12 116,51
Újpalota	28 504,37
Bimbó utca	-
Donáti utca	-
Észak-budai	100 386,41
Észak-pest	143 805,29
Keleti K. utca	-
Pincseszer utca	-
Toboz utca	-
Budafok	-
Csepel	54 301,13
Kelenföld	162 339,46
Rózsakert	2 535,90

Hővesztések meghatározása

A hővesztés hőmérséklet és tömegáram függvényében



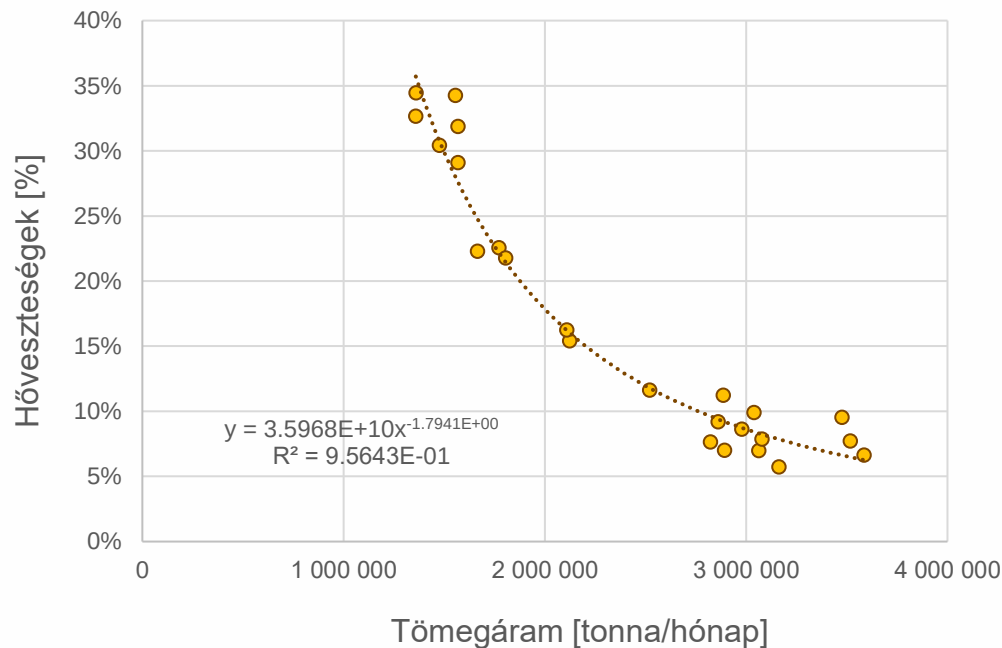
Hővesztések meghatározása

- Tömegáram-hővesztési arányossági tényező létrehozása

$$f_{x,i} = \dot{m}_i \cdot \gamma$$

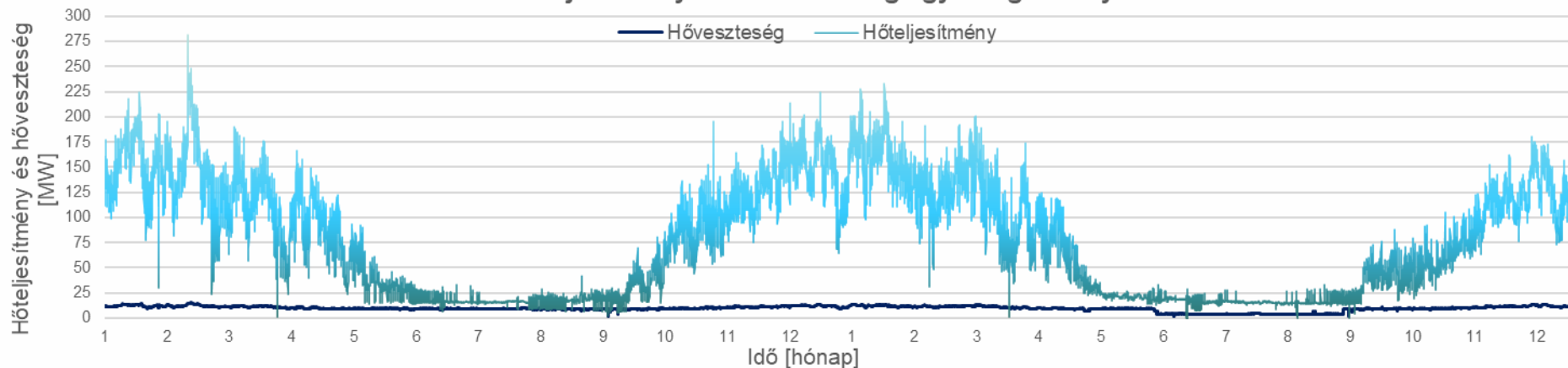
$$\dot{Q}'_{ker,i} = U \cdot l \cdot \left(\frac{T_{e,i} - T_{v,i}}{2} - T_{talaj,i} \right) \cdot (1 + f_x)$$

Hővesztések tömegáram függése
Kelenföld



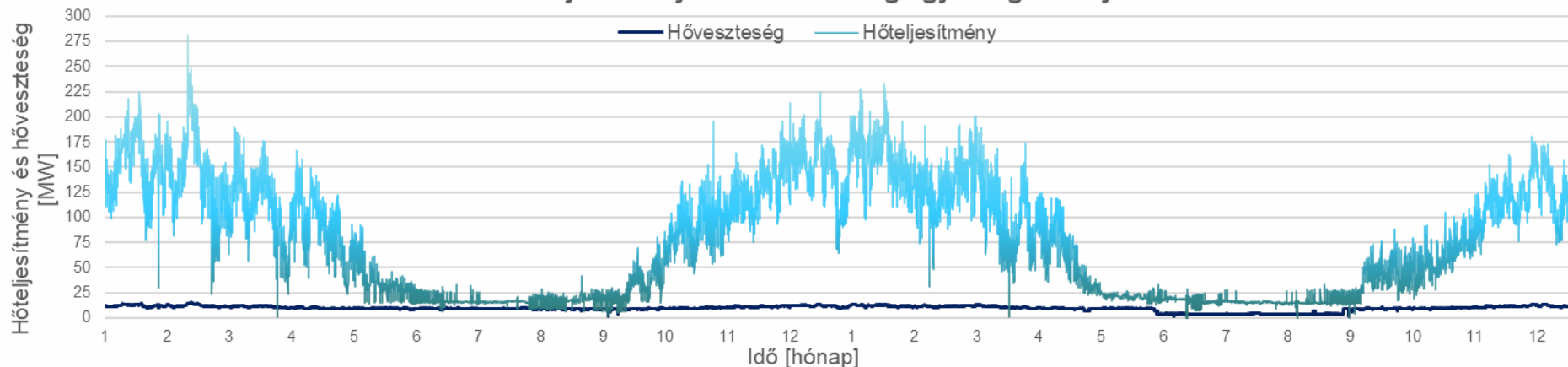
Hővesztések meghatározása

Hőteljesítmény és hővesztés egy átlag év folyamán

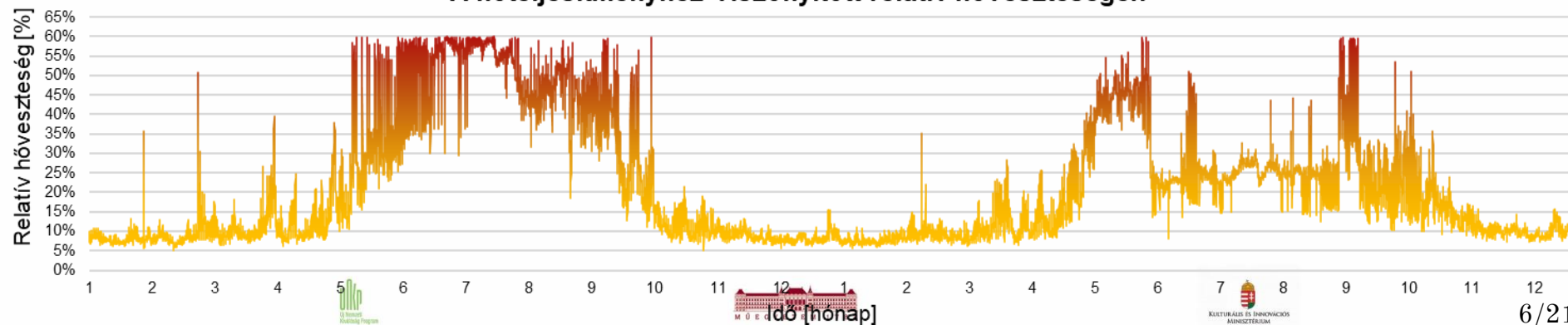


Hővesztések meghatározása

Hőteljesítmény és hővesztés egy átlag év folyamán



A hőteljesítményhez viszonyított relatív hővesztések

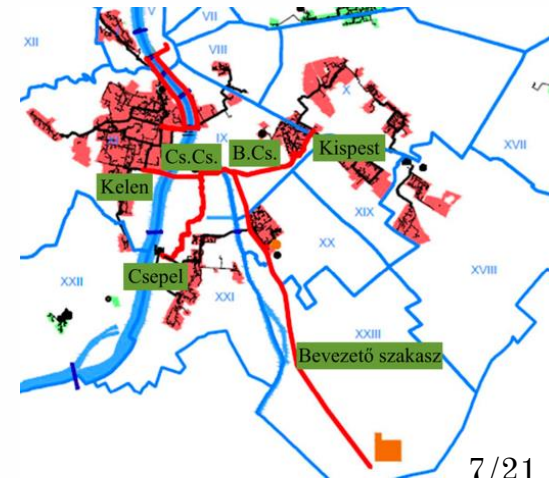
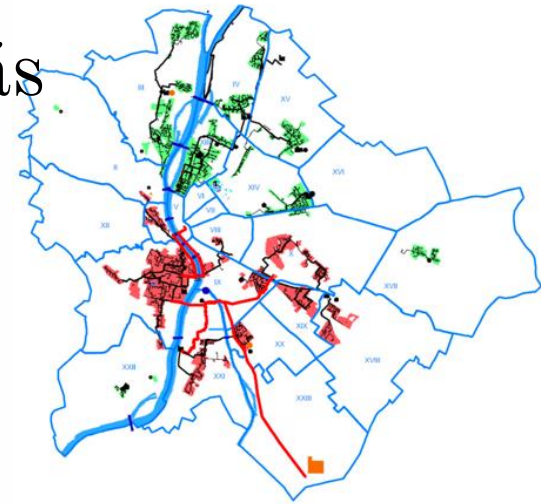


Optimális távhőcsatlakozás

- Hat vizsgált konstrukció:
 - Kelenföld, Csepel és Kispest külön-külön
 - Kelenföld + Csepel
 - Csepel + Kispest
 - Kelenföld + Csepel + Kispest
- Átlagos éves konstrukció hőigény és hőveszteség

$$\dot{Q}_{ker,i} = \sum_1^n \left(\frac{\sum_1^m \dot{Q}_{ker,i}}{m} \right)_n \quad \dot{Q}'_{ker,i} = \sum_1^n \left(\frac{\sum_1^m \dot{Q}'_{ker,i}}{m} \right)_n$$

- HUHA 2 hőteljesítmények rögzítése a hőkörzetek aktuális igényéhez



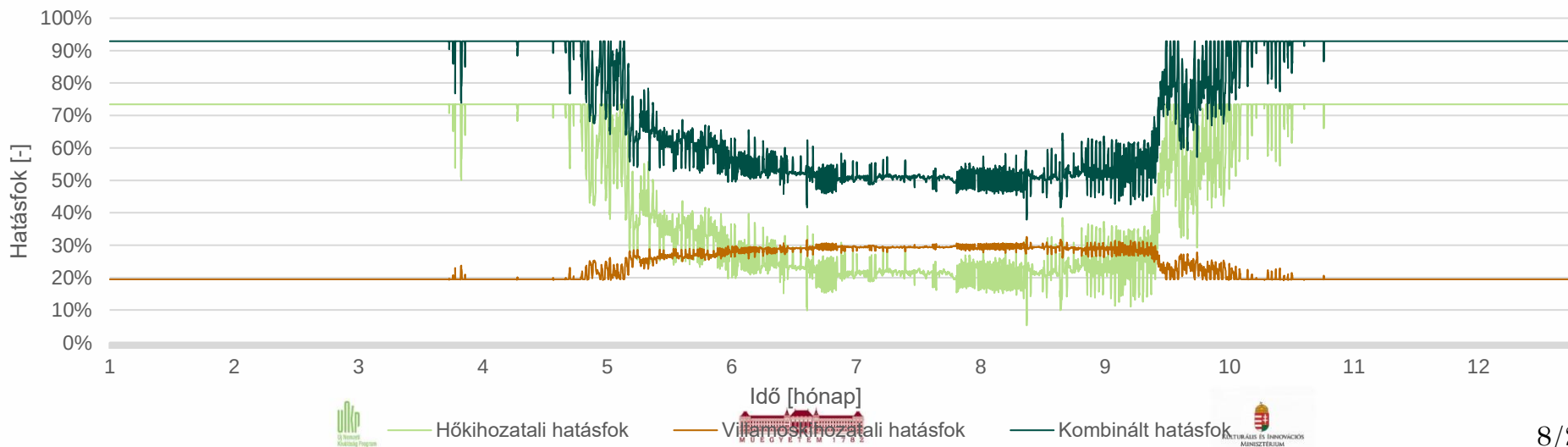
Optimális távhőcsatlakozás

- Összesített hőveszteségek meghatározása

$$\dot{Q}'_{\text{össz},i} = \frac{\dot{Q}_{HUHA,i} - \dot{Q}'_{vez,i}}{\dot{Q}_{ker,i}} \cdot \dot{Q}'_{ker,i} + \dot{Q}'_{vez,i}$$

- Hatásfokok meghatározása → hőtéljesítmény függés

Hatásfokok alakulása az év során Kelenföldön

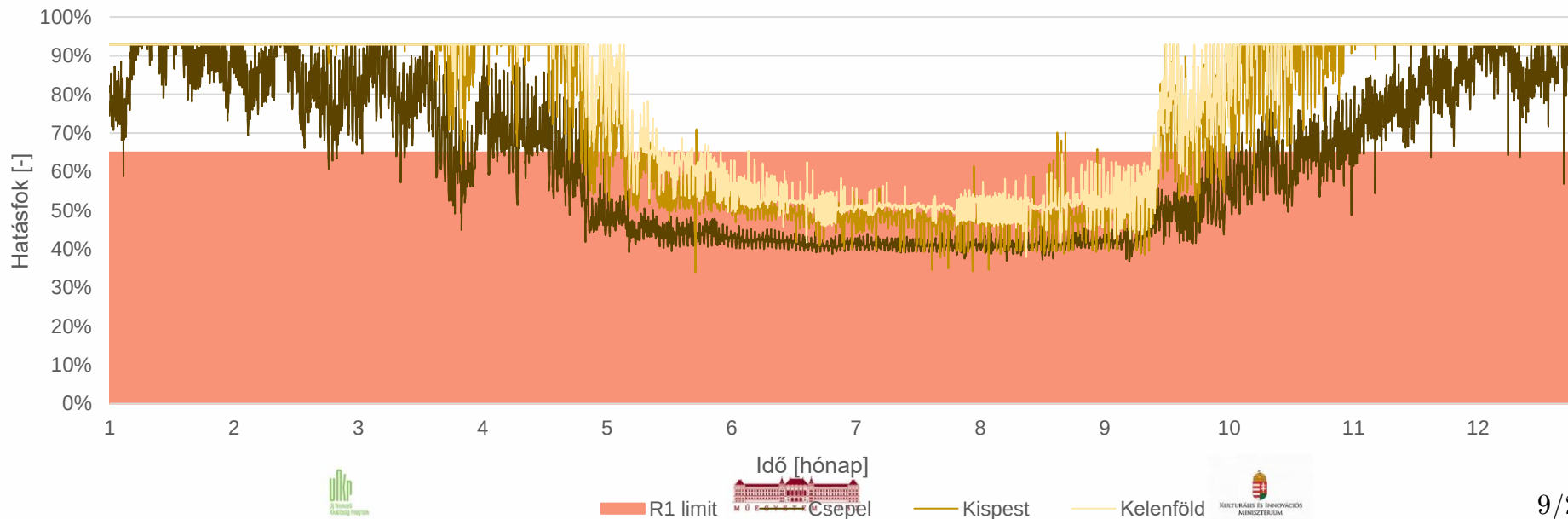


Optimális távhőcsatlakozás

- R1 energy efficiency formula kritériuma: $R1 = 0,65$

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i))}{(0,97 \cdot (E_w + E_f))}$$

A kelenföldi, csepeli és kisésti hőkörzet kombinált hatásfokai

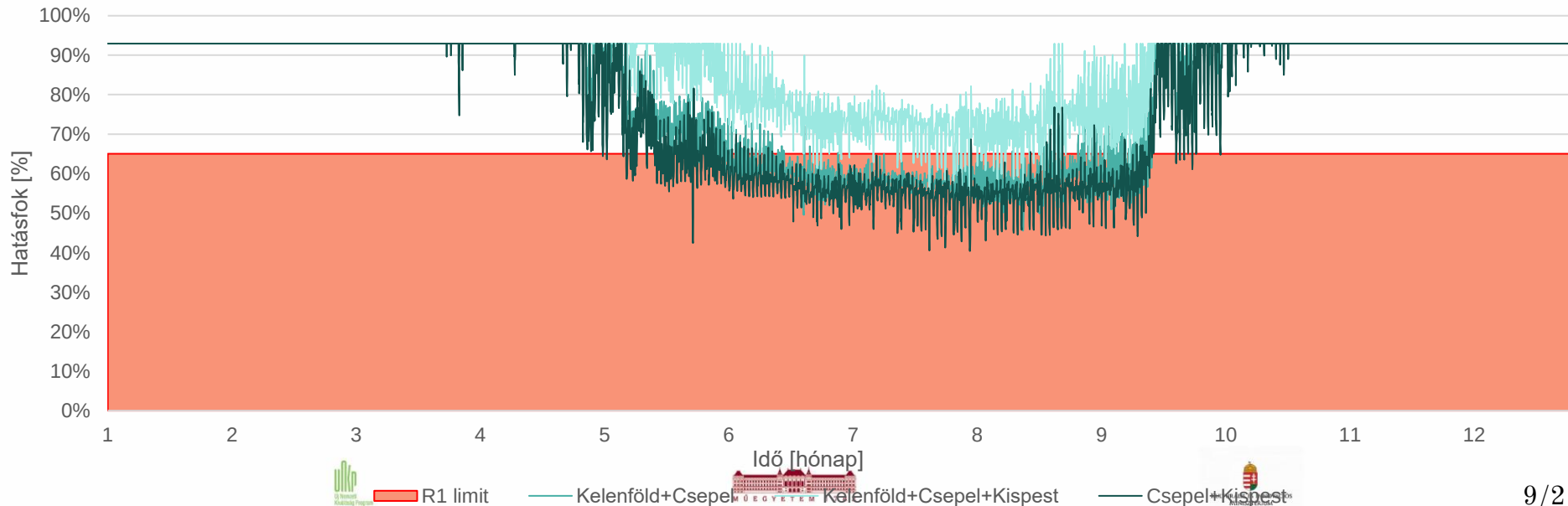


Optimális távhőcsatlakozás

- R1 energy efficiency formula kritériuma: $R1 = 0,65$

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i))}{(0,97 \cdot (E_w + E_f))}$$

Az egyesített hőközetek kombinált hatásfokai



Optimális távhőcsatlakozás

- R1 energy efficiency formula kritériuma: $R1 = 0,65$

$$R1 = \frac{E_p - (E_f + E_i))}{(0,97 \cdot (E_w + E_f))}$$

- Adott információ: a kistérségi hőkörzet csatlakoztatása
 - 15,5 km távhővezeték
 - 14 260 millió Ft
- Óránkénti bevételek meghatározása → gazdasági megtérülés
 - Hőértékesítési díj alapján
 - Konstrukció beruházási költsége alapján

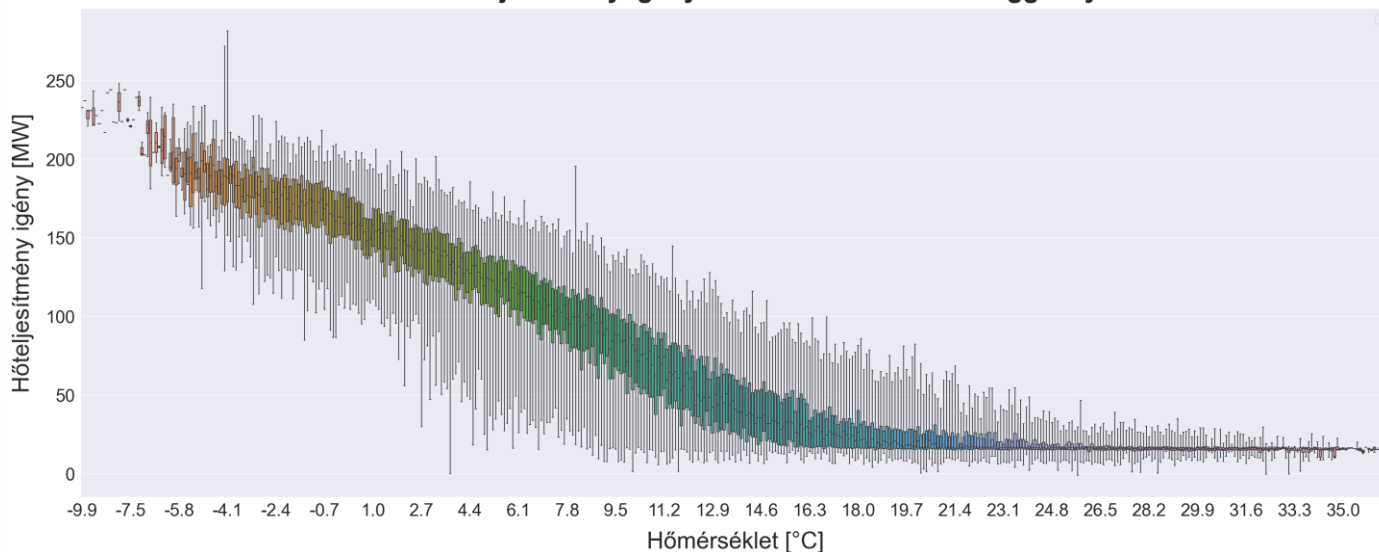
$$p_{bevétel,i} = (p_{gáz} - p_{HUHA}) \cdot (\dot{Q}_{HUHA,i} - \dot{Q}'_{össz,i})$$

$$NPV = \sum_n \frac{\Sigma_i p_{bevétel,i}}{(1 + r)^n} - C_{beruházás}$$

Hőteljesítmény-igény előrejelzés szerepe

- Akár 15,5 km összekötő vezetékszakas → nagy holtidő → pontos előrejelzés kell
- Változó hőigények
 - Körzeteken belül az év során
 - Körzetek között
- Több befolyásoló tényező (externális és internális) → nem-lineáris jelleg

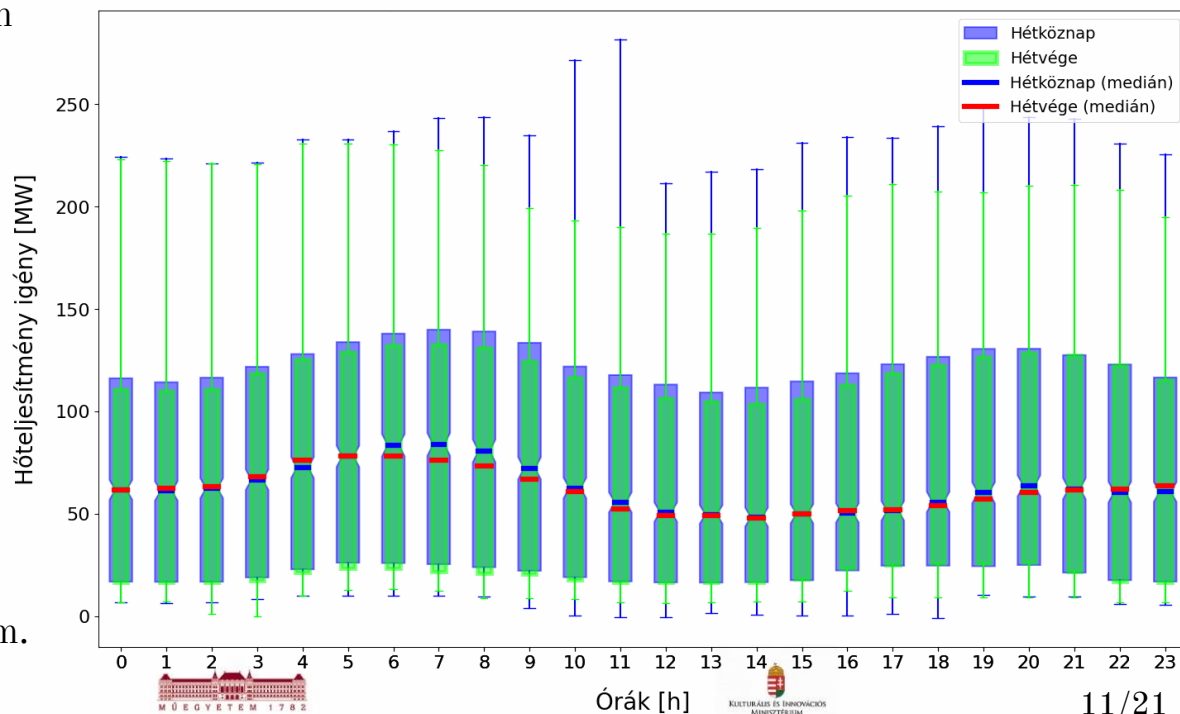
Kelenföld hőteljesítmény igénye a külső hőmérséklet függvényében



Hőteljesítmény-igény előrejelzés szerepe

- Akár 15,5 km összekötő vezetékszakas → nagy holtidő → pontos előrejelzés kell
- Változó hőigények
 - Körzeteken belül az év során
 - Körzetek között
- Több befolyásoló tényező
 - Külső hőmérséklet
 - Szélesebesség
 - Időjárás, stb.
- Fogyasztói szokások
 - Hétköznap-hétvége
 - A nap órája
- Internális adatok
 - Tömegáram
 - Előremenő és visszatérő hőm.
 - Hőteljesítmény

Hőteljesítmény igény a hétköznap és hétvégén



Hőteljesítmény-igény előrejelzés szerepe

- Akár 15,5 km összekötő vezetékszakas → nagy holtidő → pontos előrejelzés kell
- Változó hőigények
 - Körzeteken belül az év során
 - Körzetek között
- Több befolyásoló tényező
 - Külső hőmérséklet
 - Szélsebesség
 - Időjárás, stb.
- Fogyasztói szokások
 - Hétköznapi-hétféje
 - A nap órája
- Internális adatok
 - Tömegáram
 - Előre-, és visszatérő hőmérséklet
 - Hőteljesítmény

Komplex előrejelző rendszer szükséges

Hőteljesítmény-igény előrejelzés szerepe

- Akár 15,5 km összekötő vezetékszakas → nagy holtidő → pontos előrejelzés kell
- Változó hőigények
 - Körzeteken belül az év során
 - Körzetek között
- Több befolyásoló tényező
 - Külső hőmérséklet
 - Szélsebesség
 - Időjárás, stb.
- Fogyasztói szokások
 - Hétköznapi-hétféje
 - A nap órája
- Historikus adatok
 - Tömegáram
 - Előre-, és visszatérő hőmérséklet
 - Hőteljesítmény

Komplex előrejelző rendszer szükséges



Gépi tanulás alapú modell

Forward vs. adat alapú előrejelzés

- „Forward” előrejelzés → épületgépészetben gyakran alkalmazott
 - Épületek minél pontosabb szimulációs modellezése
 - Az aprólékos modell alapján predikció
 - Pl.: TRNSYS, EnergyPlus
 - Hátrányok: pontos információk szükségesek, időigényes, és rosszabb előrejelzési pontosság
- Adat alapú előrejelzés → gépi tanulás
 - Historikus adatok alkalmazása
 - A bemeneti adatok alapján megtanulja az összefüggéseket és a háttérben húzódó trendeket
 - Tartalmazzák a fogyasztói szokásokat
 - Hátrány: hatalmas mennyiségű, majdnem hibátlan adat szükséges

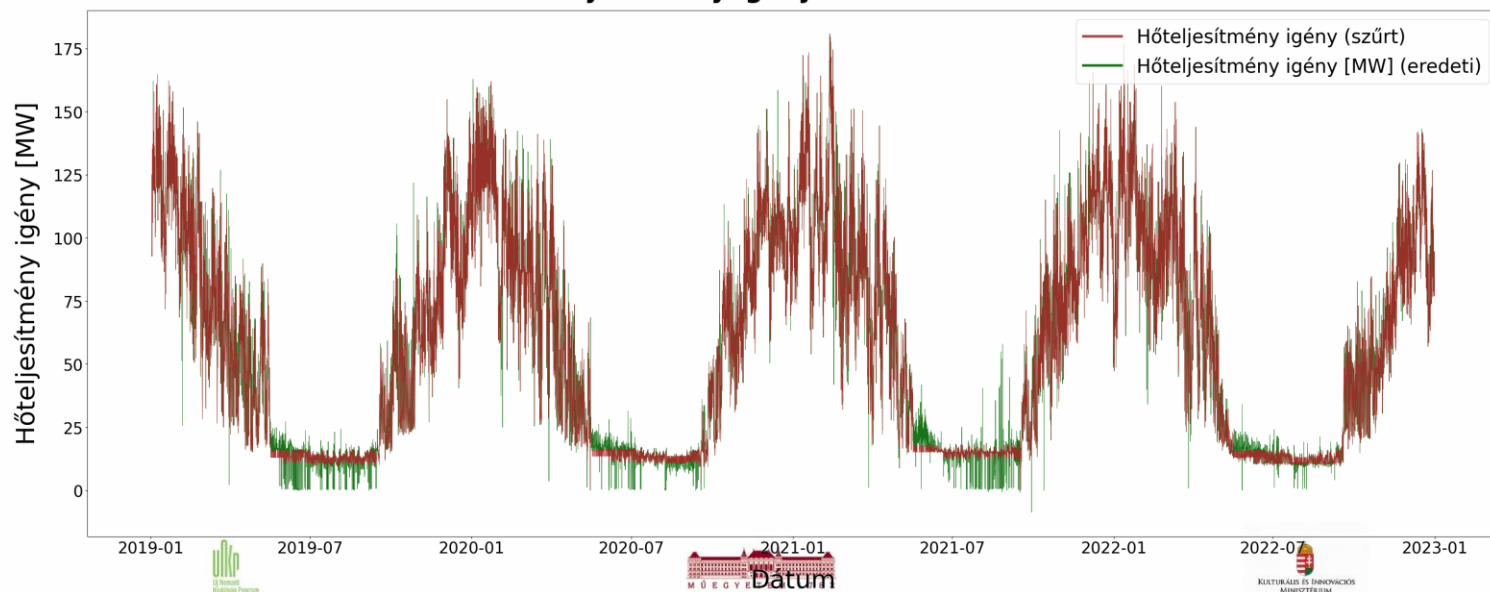
Felhasznált adatok és előfeldolgozásuk

- Hiányzó adatok pótlása
- Hibás adatok kiszűrése két lépésben
 - Egész éves szűrés → finomabb
 - Nyári időszakok szűrése → durvább

Felhasznált adatok és előfeldolgozásuk

- Hiányzó adatok pótlása
- Hibás adatok kiszűrése két lépésben
 - Egész éves szűrés → finomabb
 - Nyári időszakok szűrése → durvább

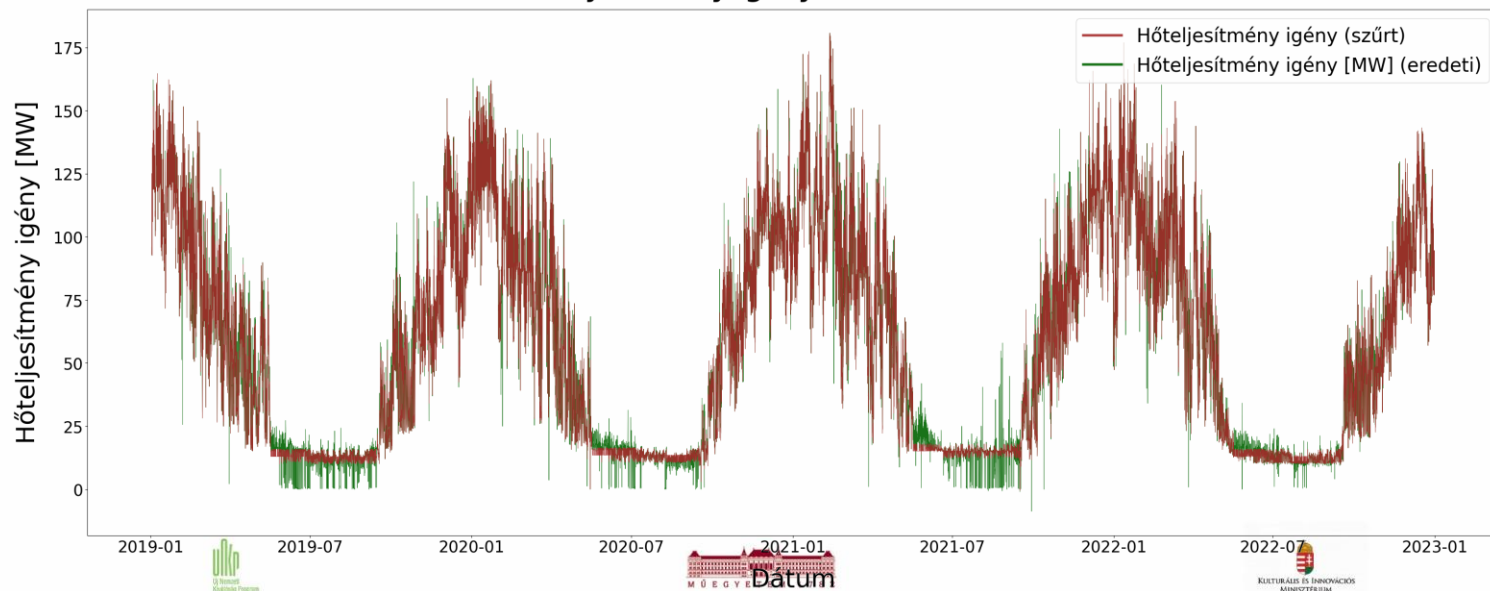
Kelenföld hőteljesítmény igénye eredeti és szűrt adatokkal



Felhasznált adatok és előfeldolgozásuk

- Hiányzó adatok pótlása
- Hibás adatok kiszűrése két lépésben
 - Egész éves szűrés → finomabb
 - Nyári időszakok szűrése → durvább
- Tanulás és tesztelés
 - Adatok felbontása 75-25% arányban
 - 36 havi tanuló és 12 havi tesztadat

Kelenföld hőteljesítmény igénye eredeti és szűrt adatokkal



Felhasznált adatok és előfeldolgozásuk

- Időpont adatok:
 - Hónap
 - Hónap napja (DoM)
 - Hét napja (DoW)
 - Nap órája (HoD)
- Externális adatok:
 - Időjárás adatok (hőmérséklet, harmatpont, páratartalom, szélesség, szélirány, légnyomás)
- Internális adatok: 6, illetve 24 órás elcsúsztatás bevezetése
 - Előremenő hőmérséklet, illetve az előremenő és visszatérő deltája
 - Tömegáram
 - Hőtéljesítmény-igények

Paraméter szettek	Bemeneti paraméterek																	
	Idő				Externális						Internális adatok							
	Month	DoM	DoW	HoD	$T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}$	$\varphi_{k\ddot{u}ls\ddot{o}}$	T_{harmat}	w_{dir}	$v_{sz\ddot{e}l}$	p	$T_{e, t-6}$	$T_{e, t-24}$	ΔT_{t-6}	ΔT_{t-24}	m_{t-6}	m_{t-24}	Q_{t-6}	Q_{t-24}
Teljes szett	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
24 órás szett	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗
Externális szett	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Felhasznált adatok és előfeldolgozásuk

- Adatok szettekre bontása
 - Különböző bemeneti adatesoportok → más előrejelzési táv
 - Különböző pontosság
- Teljes szett: minden adat → 6 órás előrejelzési képesség
- 24 órás szett: kivett 6 órával elcsúsztatott adatok → 24 órás előrejelzési képesség
- Externális szett: kivett internális adatok → "végtelen" előrejelzési képesség
 - Csak az időjárás előrejelzés pontosságától és elérhetőségétől függ
 - De kevesebb bemeneti adat → nagyobb hibaszázalék
- Adatok évszakonkénti bontása → tovább növelt predikciós pontosság

Paraméter szettek	Bemeneti paraméterek																	
	Idő				Externális						Internális adatok							
	Month	DoM	DoW	HoD	$T_{\text{külső}}$	$\varphi_{\text{külső}}$	T_{harmat}	w_{dir}	$v_{\text{szél}}$	p	$T_{e, t-6}$	$T_{e, t-24}$	ΔT_{t-6}	ΔT_{t-24}	m_{t-6}	m_{t-24}	Q_{t-6}	Q_{t-24}
Teljes szett	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
24 órás szett	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗
Externális szett	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Alkalmazott algoritmusok

- Öt különböző, időbeliséget figyelembe nem vevő gépi tanulási módszert alkalmaztunk
 - Random Forest Regressor (RF)
 - Support Vector Regressor (SVR)
 - AdaBoost (K Nearest Neighbours alappal)
 - Multilayer Perceptron Regressor (MLP)
 - Voting Regressor (Voting)
- Időbeliséget figyelembe vevő algoritmus
 - Long Short-Term Memory (LSTM)
- Minden algoritmus saját kezdeti paraméterekkel (=hiperparaméterek) rendelkezik
- Legkedvezőbb kezdeti paraméterek meghatározása → **hiperparam. optimalizáció**
 - Nagyon időigényes folyamat

Hibaértékelő módszerek

- Négyzetes középhiba (RMSE)
- Átlagos abszolút hiba (MAE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - y_t)^2}{n}}$$

$$MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |\hat{y}_t - y_t|}{n}$$

- Átlagos abszolút százalékos hiba (MAPE) → általunk alkalmazott metrika

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{\hat{y}_t} \right|$$

Átlagos abszolút százalékos hiba (MAPE)	Előrejelzés erőssége
<10%	Kiemelkedően pontos előrejelzés
10~20%	Jó előrejelzés
20~50%	Elfogadható előrejelzés
>50%	Gyenge és pontatlan előrejelzés

Eredmények

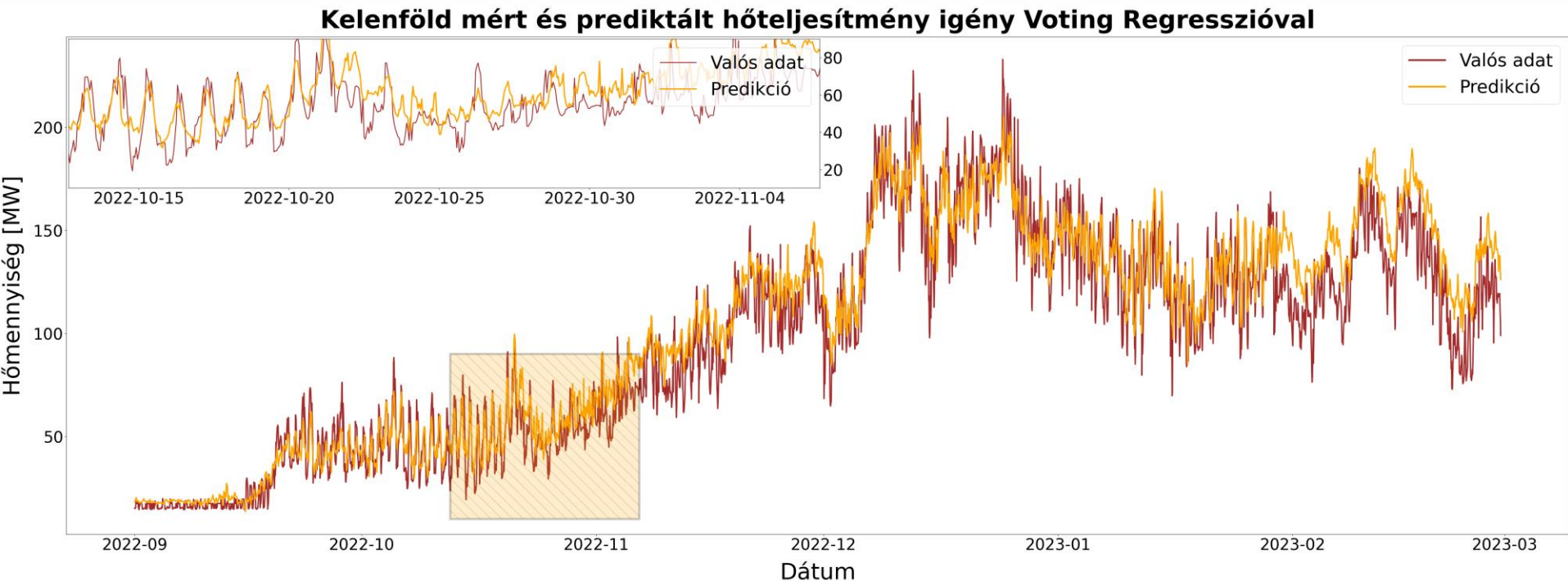
- Optimális távhőcsatlakozás meghatározása

Távhőcsatlakozások eredményei összegezve						
	Kelenföld	Csepel	Kispest	Kelenföld+Csepel	Csepel+Kispest	Kelenföld+Csepel+Kispest
Összekötő vezetékszakas [m]	14800	16700	15500	17800	15000	22900
Beépítési költség [mFt]	17995	20305	18846	21643	18238	27843
Gáz értékesítési díj [mFt/MWh]	0.046	0.032	0.045	0.039	0.038	0.041
HUHA2 értékesítési díj [mFt/MWh]	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Éves bevétel [mFt]	17790	11893	17268	18461	18185	19271
R1 érték	1.222	1.115	1.208	1.252	1.236	1.295
Megtérülési idő [hónap]	21	25	15	17	14	21

- A Csepel + Kispest, illetve a Kispest konstrukció az optimális, de a többi csatlakozási opció is gyors megtérüléssel rendelkezik
- Az R1 formula minden esetben a határérték felett van

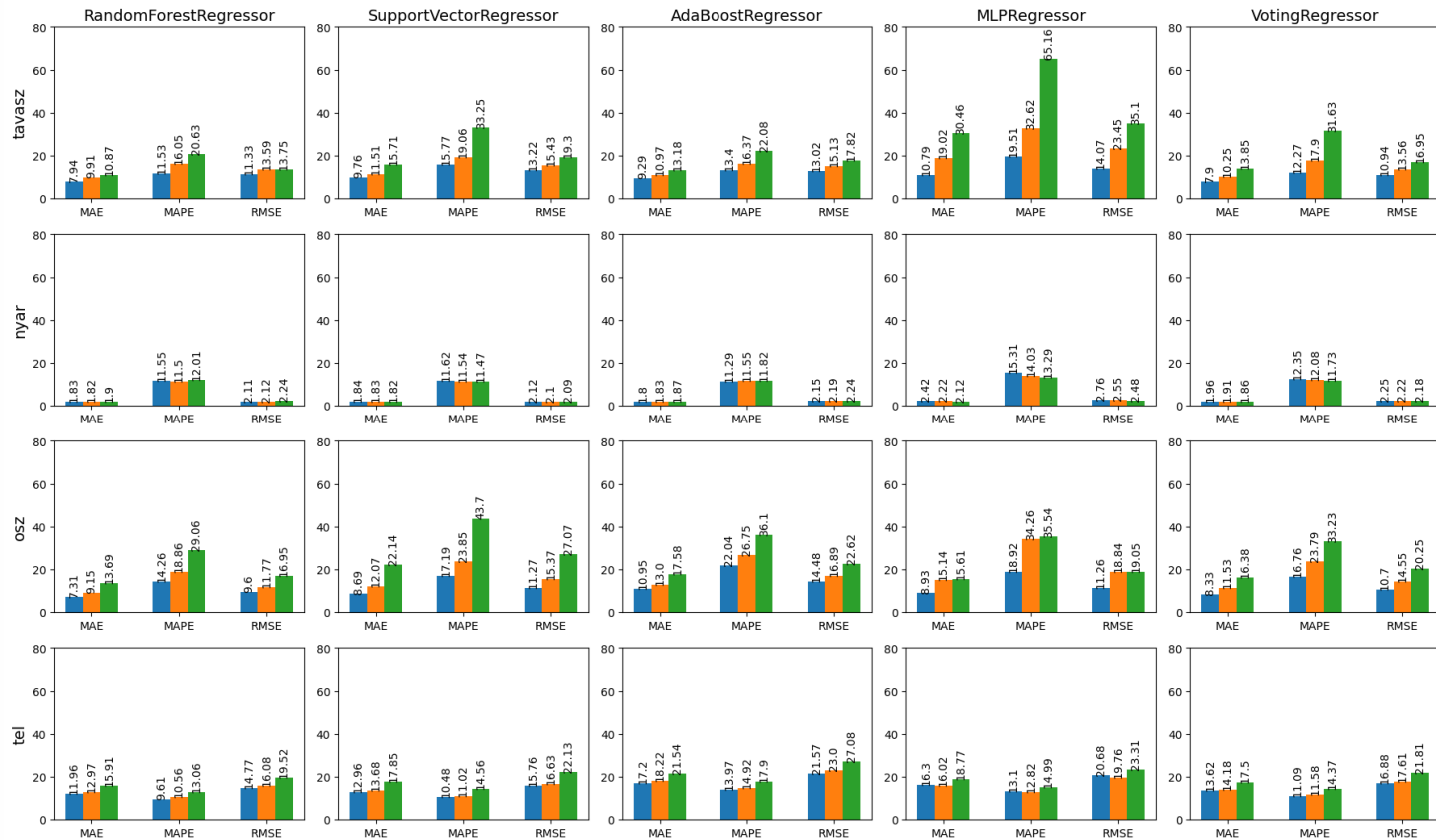
Eredmények

- Hőteljesítmény-igény előrejelzés



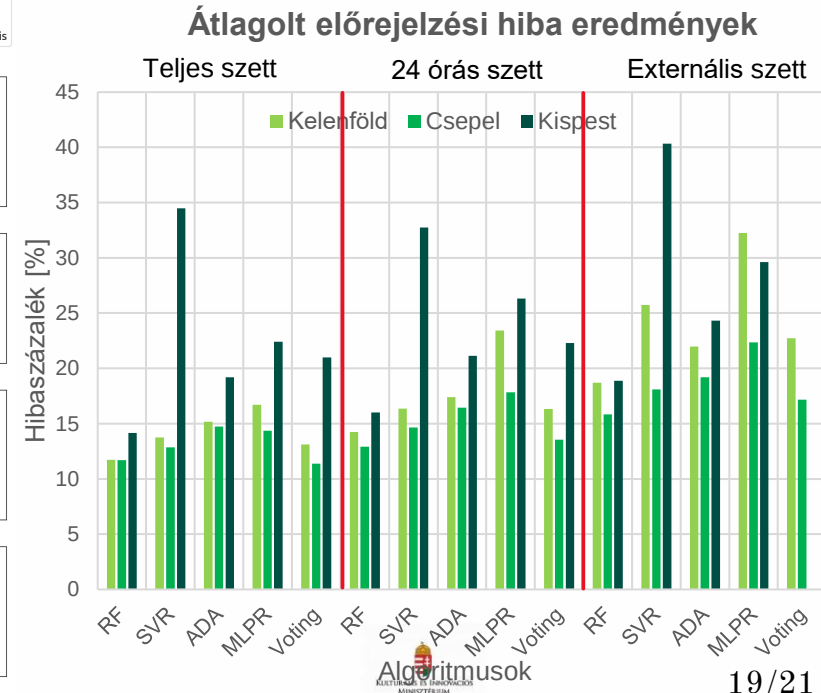
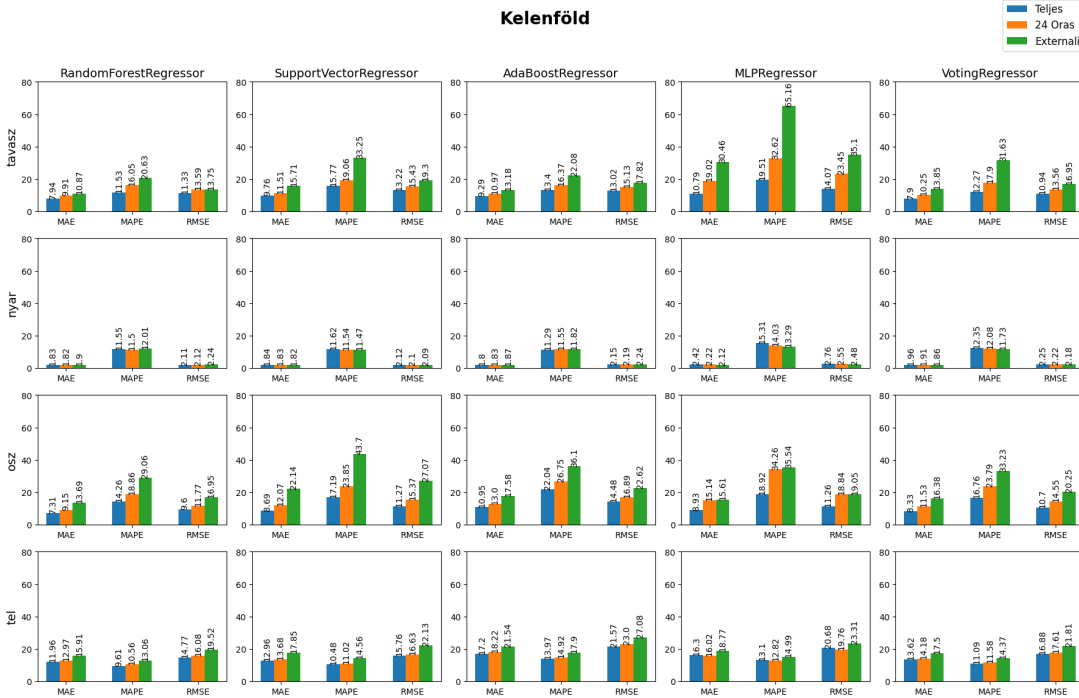
Eredmények

Kelenföld



Eredmények

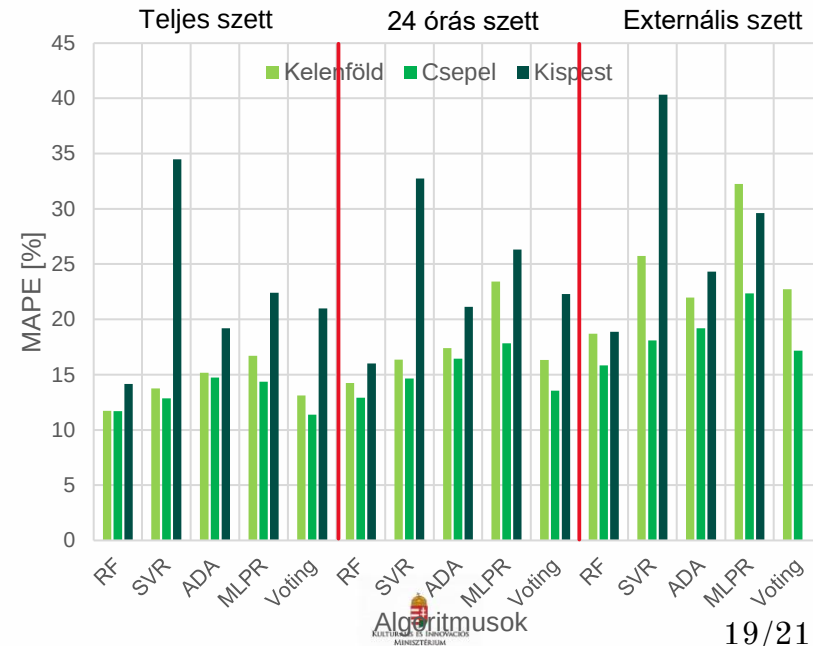
• Hőteljesítmény-igény előrejelzés



Eredmények

- Hőteljesítmény-igény előrejelzés
- Főtv Zrt. által alkalmazott predikciós rendszer hibája:
 - kelenföldi távhőkörizet: 26,5%
 - csepeli távhőkörizet: 28,87%
 - kisésti távhőkörizet: 27,9%

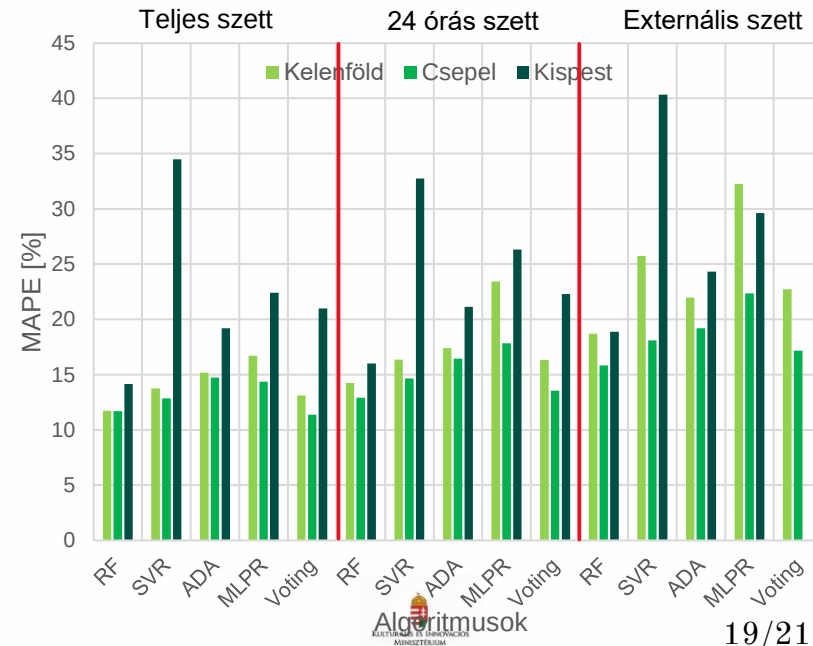
Átlagolt előrejelzési hiba eredmények



Eredmények

- Hőteljesítmény-igény előrejelzés
- Főtáv Zrt. által alkalmazott predikciós rendszer hibája:
 - kelenföldi távhőkörizet: 26,5%
 - csepeli távhőkörizet: 28,87%
 - kispesti távhőkörizet: 27,9%
- Legjobb eredmények:
 - kelenföldi távhőkörizet: 11,74% (RF)
 - csepeli távhőkörizet: 11,39% (Voting)
 - kispesti távhőkörizet: 14,17% (RF)

Átlagolt előrejelzési hiba eredmények



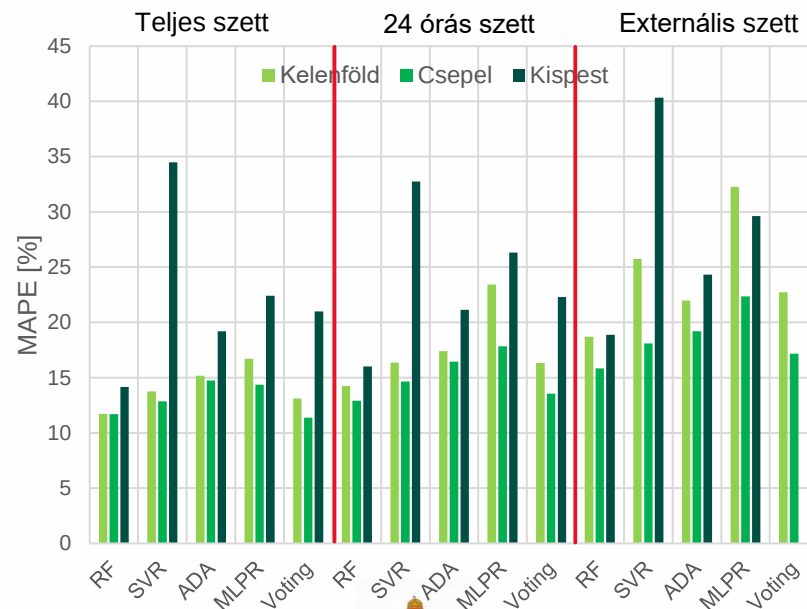
Eredmények

- Hőteljesítmény-igény előrejelzés
- Főtáv Zrt. által alkalmazott predikciós rendszer hibája:
 - kelenföldi távhőkörizet: 26,5%
 - csepeli távhőkörizet: 28,87%
 - kispesti távhőkörizet: 27,9%
- Legjobb eredmények:
 - kelenföldi távhőkörizet: 11,74% (RF)
 - csepeli távhőkörizet: 11,39% (Voting)
 - kispesti távhőkörizet: 14,17% (RF)



50-60%-os hőteljesítmény előrejelzési javulás

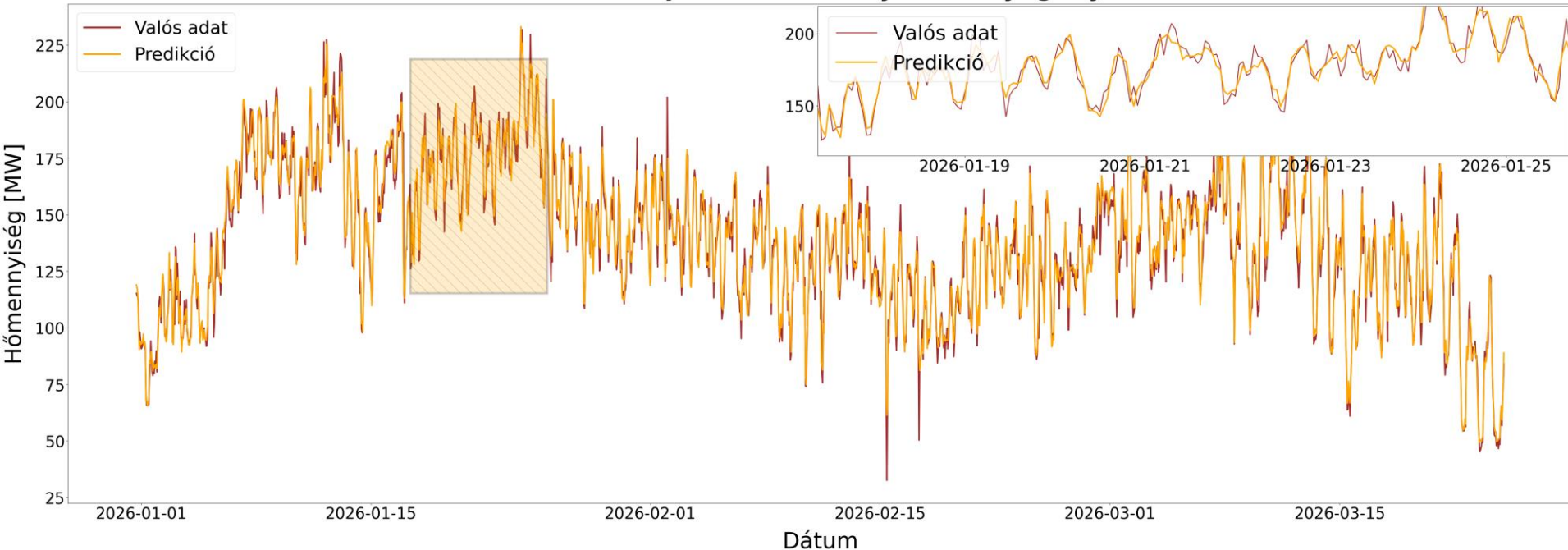
Átlagolt előrejelzési hiba eredmények



Eredmények

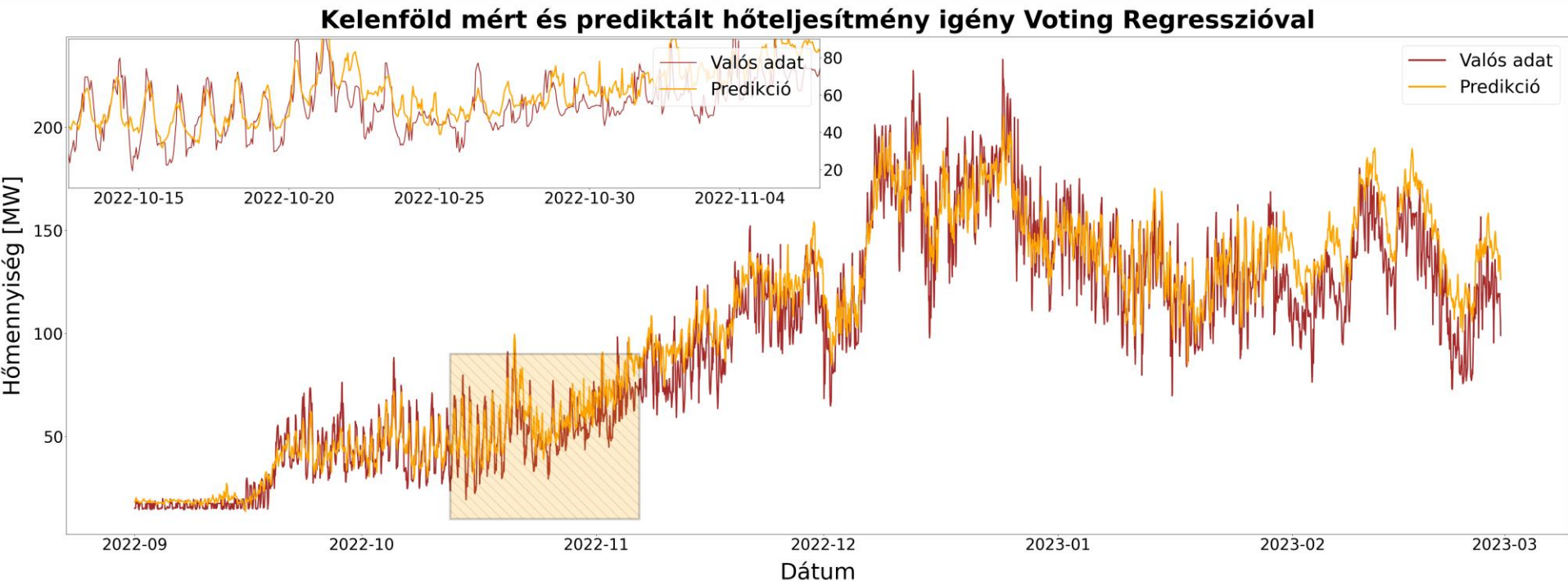
- Kitekintés az LSTM eredményeire
 - Időfüggést figyelembe vevő metódus

Kelenföld mért és prediktált hőteljesítmény igény LSTM -el



Eredmények

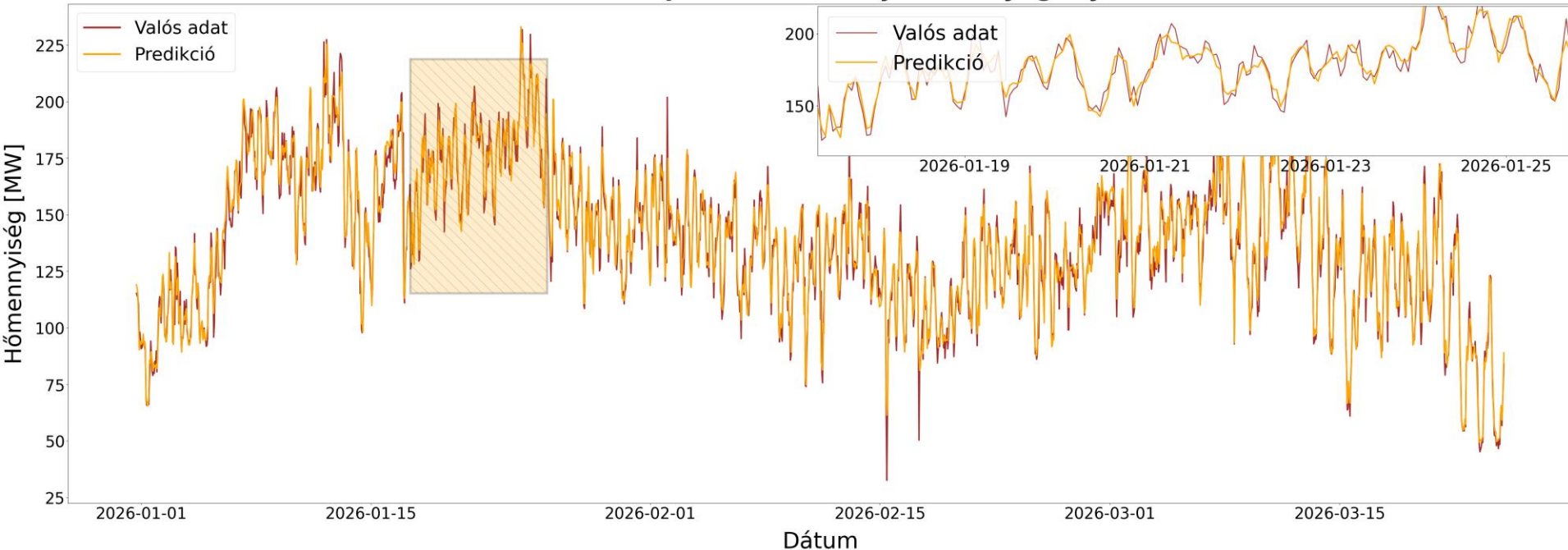
- Hőteljesítmény-igény előrejelzés



Eredmények

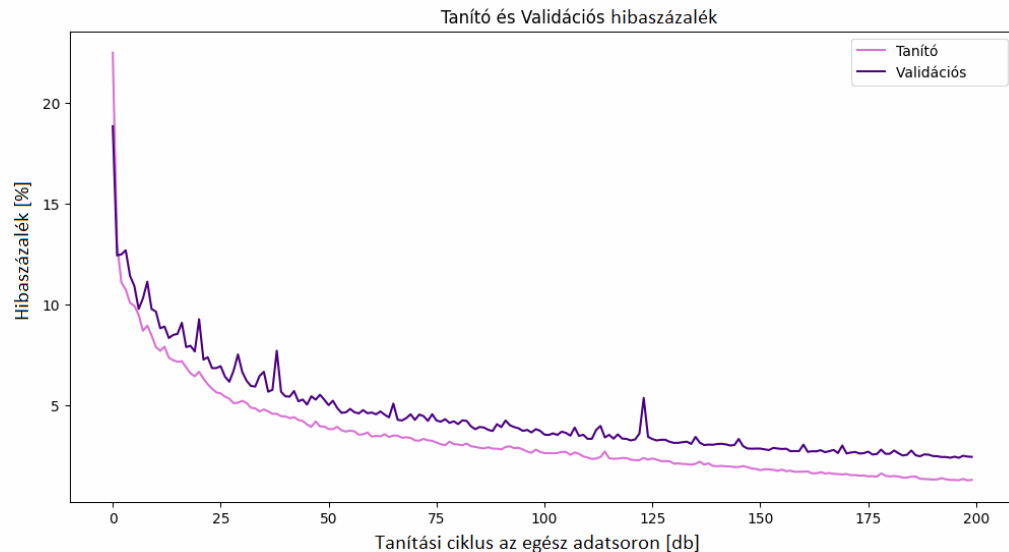
- Kitekintés az LSTM eredményeire
 - Időfüggést figyelembe vevő metódus

Kelenföld mért és prediktált hőteljesítmény igény LSTM -el



Eredmények

- Kitekintés az LSTM eredményeire
 - Időfüggést figyelembe vevő metódus
 - Csak Kelenföldre
 - Csak externális adatok
- Tanulási és validációs fázis alatt tapasztalt hibaértékek
- Eredmények:
 - MAPE: **4,79%** (Főtáv: **26,5%**)

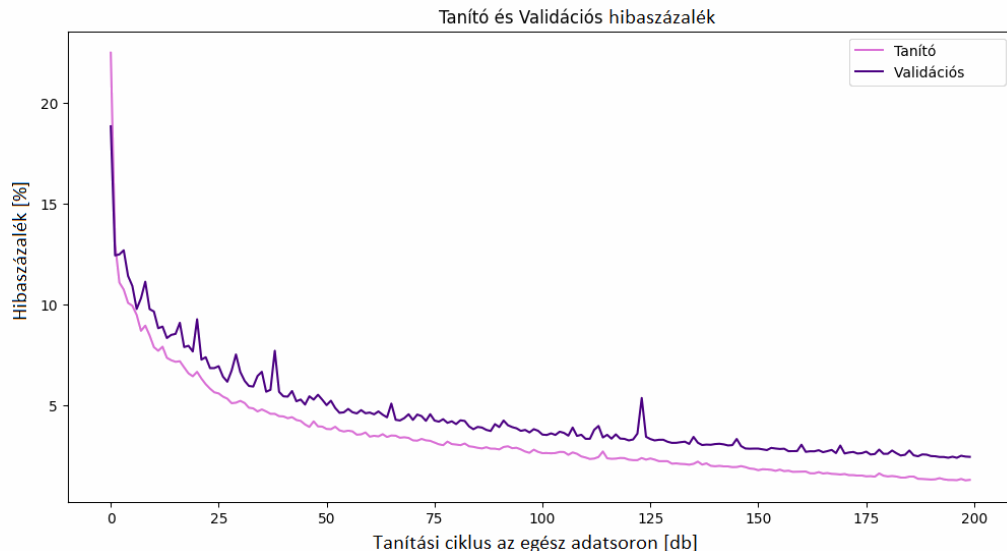


Eredmények

- Kitekintés az LSTM eredményeire
 - Időfüggést figyelembe vevő metódus
 - Csak Kelenföldre
 - Csak externális adatok
- Tanulási és validációs fázis alatt tapasztalt hibaértékek
- Eredmények:
 - MAPE: **4,79%** (Főtáv: **26,5%**)



80,9% előrejelzési hibacsökkenés (jelenlegihez képest) és **40,9%** hibacsökkenés a legjobb időfüggetlen metódushoz képest



Eredmények

- **80,9%** előrejelzési hibacsökkenés (jelenlegihez képest) és **40,9%** hibacsökkenés a legjobb időfüggetlen módszerhez képest



- Pontos hőteljesítmény szabályzás a HUHA 2 távolsága esetén is
- Redukált tüzelési teljesítmény igény
- Csökkentett visszatérő hőmérséklet → magasabb hatásfok
- Kisebb hőveszteségek
- Felhasználó igények pontos lekövetése → magasabb komfort

Energetikai és gazdasági előny

Vállalások teljesítése

Vállalás	Teljesülés
Kutatómunka elvégzése	Folyamatosan teljesült
TDK dolgozat készítése és előadása	Intézményi TDK I. hely
ÚNKP konferencián előadás	Teljesült
Országos Magyar Épületgépészek Napján előadás	Nem teljesült, helyette angol nyelvű előadás a Coimbrai Egyetem Műszaki Karán (2024. május 3.)
Vykurovnie nemzetközi fűtéstechnikai konferencián előadás és konferenciacikk	Teljesült (2024.február 15.)
IYCE'24 nemzetközi energetikai tudományos konferencián előadást és konferenciacikk	A konferencia július 1-én kezdődik, a konferenciacikk jelenleg bírálat alatt van, előadás júliusban
Előadás az Energetikai Szakkollégium tagságának	Teljesült (2024. május 7.)
Angol nyelvű előadás a Trakya Egyetem műszaki karán	Teljesült (2024. március 20.)
Angol nyelvű személyes előadás a Szlovák Műszaki Egyetemen (STU)	Nem teljesült, helyette angol nyelvű előadás a Portói Egyetem Műszaki karán (2024. április 29.)
Folyóíratcikk a Magyar Energetika szaklapban	Szerkesztőséggel való egyeztetés folyamatban
Lektorált folyóíratcikk a Magyar Épületgépészet szaklapban	Szerkesztőséggel való egyeztetés folyamatban
Publikáció benyújtása a Sustainable Cities and Society nemzetközi tudományos folyóiratba (WoS, Q1, IF = 11,7)	Cikk készültsége 90%, benyújtás a záró beszámolóig

Vállalásokon felüli teljesítések

Túlteljesítés

Tudományos Diákköri Konferencia I. helyezés

Energiagazdálkodás folyóiratban cikk publikálása

Előadás tartása a Kairói Egyetem Műszaki Karán

Köszönöm szépen a figyelmet!

unkp.bme.hu

A kulturális és Innovációs Minisztérium **ÚNKP-22-2-I-BME-66** kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL



KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM