

A második hulladékhasznosító erőmű integrálása Budapest távhőellátásába

Kocsis Kende – Dr. Bokor Balázs

Absztrakt

A hulladékgazdálkodás sürgős kérdés Magyarországon és a fókuszunkban lévő városban, Budapesten is. A fővárosban évente 680 - 700 000 tonna települési szilárd hulladék keletkezik, amelynek kevesebb, mint kétharmadát hasznosítják újra vagy hasznosítják energetikai célokra, a többi a hulladéklerakóban végzi. Ez ösztönzi további hulladékhasznosító erőművek telepítését, amelyhez ideális helyszínt választottunk a város déli határában. Ennek a potenciális jövőbeli projektnek az elősegítése érdekében meg kell határozni az optimális távhőcsatlakozási struktúrát, amely a három potenciálisan ellátott távhőközrhez vezet: Kelenföld, Csepel és Kispest. Mivel a zónák hőigénye mind méretkülönbségük, mind pedig az év során mért külső hőmérséklet miatt nagymértékben eltérő, döntő fontosságú annak meghatározása, hogy az összesített hőveszteségek, a tömegáram értékek, az R1 energiahatékonysági képlet, az erőművek hatékonysága és a gazdasági tényezők figyelembevételével melyik ellátási zónakombinációt kell megvalósítani. Az eredmények alapján a 14 hónapos megtérülési idővel a Kispest + Csepel kombinált kapcsolási sémát lehetett kiemelni, mint a legkedvezőbb lehetőséget.

Keywords: hulladék energetikai hasznosítása, hőveszteségszámítás, távfűtés, fenntarthatóság

Abstract

Waste management is an urgent matter both in Hungary and in the city in our focus: Budapest. The city produces 680-700 000 tonnes of municipal solid waste annually, of which less than 2/3 is being recycled or used for energetic purposes, the rest ends up in a landfill. This encourages the instalment of further Waste-to-Energy powerplants for which the ideal place has been chosen in the southern border of the city. To facilitate this potential upcoming project, the optimal connection structure is needed to be determined leading to the three potentially supplied district heating zones: Kelenföld, Csepel and Kispest. As the zones have highly varying heat demands both due to their size difference and the outside temperature throughout the year it is crucial to determine which zone combination should be implemented with the aggregated heat losses, mass

flow values, the R1 energy efficiency formula, powerplant efficiency and economic factors taken into consideration. The results were able to highlight a 14 month return period for the Kispest + Csepel combined connection scheme as the superior option.

Keywords: Waste-to-Energy, heat loss calculation, district heating, sustainability

1. Bevezetés

Budapest kiterjedt távhőellátó rendszerrel rendelkezik, közel 240 ezer lakás hőellátásáért felelős, amely lakások száma a közeljövőben a közigazgatásban megfogalmazott tervek szerint tovább fog növekedni. A modern távhőszolgáltatás alkalmazása több szempontból is jelentős előnyökkel járhat a társadalomnak mind egyéni, mind pedig társadalmi szempontból nézve. Egyéni szempontból nézve a lakossági fogyasztók számára szolgáltatott hőár sokkal kedvezőbb lehet, mint amelyet a földgáz alapú egyedi kazánokkal el lehet érni a rezsicsökkentés figyelembevételével. Természetesen a 2020 óta fennálló európai geopolitikai helyzet által előidézett instabil fosszilis energiahordozó ellátásbiztonság és a megemelkedett árak miatt nem biztosított a rezsicsökkentett ár fenntartása, ezáltal tovább növelve a távhő helyzetelőnyét. Társadalmi szempontból előnyös a távhőrendszerek által nyújtott centralizált energiatermelés, amely magasabb hatásfokot, illetve jelentős mértékben csökkentett légszennyezést biztosít a városi lakóövezetek számára.

A távhőrendszerek harmadik nagy előnye, hogy az őket ellátó erőművek által alkalmazott tüzelőanyagok anyagi minősége nagymértékben változhat az erőmű típusának függvényében. Jelenleg a város távhőrendszerének több mint 80%-át földgáz alapú erőművekkel látják el, ami a fentebb említett problémák fényében jelentős mértékben megemeli a szolgáltatási költséget, lévén, hogy a lakossági fogyasztóknak szolgáltatott, rendszerileg befagyasztott távhőárakon generált veszteségeket a szolgáltató kénytelen a nem-lakossági fogyasztókra ráterhelni. E probléma kézenfekvő megoldása a hulladékégető kombinált ciklusú, villamos- és hőenergiát egyaránt előállító erőművek integrálása a hálózatba. Már több évtizede léteznek tervek a HUHA 2 második budapesti hulladékhasznosító mű létesítésére, amely megvalósulásával évi további 230 000 tonna települési szilárd hulladékot (TSZH) lenne képes energetikailag hasznosítani, ezáltal megoldást nyújtva a távhőrendszer problémáira, miközben az Európai Unió által meghatározott – a hulladéklerakást megelőzni igyekvő – irányelveknek megfelel. [1]



Kocsis Kende



Dr. Bokor Balázs

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Gépészmérnöki Kar,
Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék
kende.kocsis@gmail.com bokor@epgep.bme.hu

2. A kutatás alapjául szolgáló adatstruktúra

A tanulmány alapját képző adatok nagy részét a Főtáv Zrt. szolgáltatta. Ezen információ csomagok három évnnyi mérési adatot tartalmaznak a három vizsgált hőkörizet mindegyikére. A mért értékek az alábbiak voltak: előremenő hőmérséklet ($T_{e,i}$) és visszatérő hőmérséklet ($T_{v,i}$) a hőkörizetek minden ágában, továbbá tömegáram ($\dot{m}_i$) és hőteljesítmény értékek ($\dot{Q}_i$) az összes ág esetén mindhárom körzetben. A mérési intervallum órás volt, amely így a négy év esetében 35 040 adatsort jelent. Az adatokat a termelés helyszínén, az erőművekben, avagy fűtőművekben mérték. Ezen felül rendelkezésünkre bocsátották a jelenleg használatban lévő vezetékhalózat egyes elemeinek korát, szigeteltségi állapotát, átmérőit és átmérőfüggő hőveszteségét. Ezen felül ismerjük a vezetékek fektetési hosszát a fektetés és szigetelés módját az átmérő függvényében is.

Továbbá lényeges bemenő információ az aggregált hálózati veszteségek százalékos ismerete havi bontásban.

A Főtáv adatsorain kívül szükségünk volt az elemzések elvégzéséhez egy – az azonos időtávra vonatkozó pontos, órás osztású – meteorológiai adatsorra, amely lehetőleg tartalmazza az összes olyan paramétert az időjárással kapcsolatban, amely hatással lehet a fűtési igényekre és a vezetékszakaszok hőveszteségére. Ezen adatokat a Meteostat weboldaláról kértük le, ahol órás osztásban rendelkezésre álltak ezek az információk. [2] Ezen adatokon felül meghatároztuk a talajhőmérsékletet fél méteres mélységben – ami megfelel a vezetékek fektetési mélységének – egy átlagos év során. [3]

3. A távhőcsatlakozás alternatíváinak értékelése

3.1. Hőveszteségek

Az „Adatstruktúra” fejezetben foglaltak szerint a hőveszteségi elemzés alapjául a Főtáv Zrt. által szolgáltatott adatrendszer szolgált, amely megadta az egyes vezetékszakaszok átmérőjét, fektetési módját (földben fektetett vagy szabadon vezetett), szigetelési fajtáját, illetve a vezetékszakaszok hosszát.

Ezen adatokon felül meghatároztuk az egyes vezetékek hőátbocsátási tényezőjét az átmérő függvényében 1”-os mérettől DN1000-es átmérőig [4]. Ennek struktúrájára az **1. táblázat** ad példát.

A táblázatban foglalt, előszigetetlen csövek hőátbocsátási tényezőit a **2. táblázat** értékei szerint arányosítás alapján határoztuk meg. A táblázat a területi követelmények betartásának érdekében az adatok részletét tartalmazza csak.

$$U_{\text{előszig. nélküli}} = U_{\text{előszigetelt}} \cdot a$$

Ahol:

$U_{\text{előszig. nélküli}}$ – előszigetelés nélküli vezeték hőveszteségi tényezője [W/m²K]

$U_{\text{előszigetelt}}$ – előszigetelt vezetékek hőveszteségi tényezője [W/m²K]

a – arányossági tényező a 2. táblázat értékei alapján [1]

2. táblázat. Fajlagos hőveszteség-értékek és arányszámuk, részlet

Fajlagos hőveszteség			
	Hagyományos	Előszigetelt	Arányszám
DN	kWh/nyvm/év	kWh/nyvm/év	[1]
DN 20	266,28	115,94	2,30
DN 25	286,63	143,60	2,00
DN 32	314,66	146,88	2,14
DN 40	346,23	169,40	2,04
DN 50	376,96	189,74	1,99
DN 63	405,49	207,15	1,96
DN 65	434,02	224,56	1,93
DN 75	448,48	228,14	1,97
DN 80	462,95	231,72	2,00
DN 90	486,98	238,43	2,04
DN 100	511,003	245,142	2,085

1. táblázat. A vezetékek hőátbocsátási tényezője az átmérő és a szigeteltség függvényében, részlet [4]

	Előszigetelt		Előszigetelés nélkül	
	Szabadon vezetett	Földben vezetett	Szabadon vezetett	Földben vezetett
Átmérő	U [W/mK]	U [W/mK]	U [W/mK]	U [W/mK]
DN 20	0,1285	0,1337	0,2951	0,3071
DN 25	0,1550	0,1625	0,3094	0,3244
DN 32	0,1597	0,1661	0,3421	0,3558
DN 40	0,1820	0,1904	0,3720	0,3891
DN 50	0,2030	0,2122	0,4033	0,4216
DN 63	0,2203	0,2306	0,4312	0,4513
DN 65	0,2376	0,2489	0,4592	0,4811
DN 75	0,2419	0,2534	0,4755	0,4981
DN 80	0,2462	0,2579	0,4919	0,5152
DN 90	0,2525	0,2639	0,5156	0,5390

Az ismertetett adatok segítségével meghatároztuk az összes hőkörzetben található vezetékek számára az $U \cdot l$ értéket, amely az adott vezetékszakaszhőátbocsátási tényezőjének és a vezeték hosszának szorzata. Ez a lépés azért volt szükséges, mert így a szorzat additív lett, ami nem mondható el a hőátbocsátási tényezőről. Ezek alapján meghatároztuk az összes hőkörzetben található $\Sigma U \cdot l$ értéket. A kapott adatok a **3. táblázatban** láthatók összegezve, a számunkra lényeges körzetek adatai sárga színnel kiemelten láthatók.

$$U \cdot l = \sum_1^n U_n \cdot l_n$$

Ahol:

$U \cdot l$ – az adott hőkörzetre jellemző hőveszteség-érték [W/m]

U_n – az „n”-edik vezetékszakaszhőátbocsátási tényezője [W/m²K]

l_n – az „n”-edik vezetékszakaszhossza [m]

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	–
Pincészer utca	–
Toboz utca	–
Budafok	–
Csepel	54 301,13
Kelenföld	162 339,46
Rózsakert	2 535,90

3. táblázat. Az egyes hőkörzetek $U \cdot l$ értékei

Az egyes körzetekre jellemző értékek felhasználásával meghatározható az adott körzetben található összes távhővezeték hővesztesége:

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

Ahol:

$\dot{Q}'_{ker,i}$ – az adott kerületben tapasztalt hőtéljesítményveszteség [W]

$T_{e,i}$ – távhő előremenő hőmérséklet [°C]

$T_{v,i}$ – távhő visszatérő hőmérséklet [°C]

$T_{talaj,i}$ – talajhőmérséklet [°C]

3.1.1. A hőveszteség tömegáram függése

Észrevehető, hogy a számítás alapját képező hőveszteség képlet nem veszi figyelembe a tömegáram értékét, ennek folytán a képlet nem tükrözi a valóságban tapasztalható működést. A modernebb távhőrendszerek mind frekvenciaváltós főköri szivattyúkkal vannak felszerelve, amely lehetővé és elvárt üzemállapottá teszi a változó tömegáramú hőszolgáltatást. Ez jelentős előnyt jelent mind energetikailag, mind gazdaságilag, azonban ezzel az üzemállapottal együtt jár a kisebb hőigényű időszakokban – névlegesen a nyári évszakban – tapasztalható alacsony tömegáram. Ez a tömegáram csökkenés nagymértékben megnöveli a relatív hőveszteségek értékét, mivel a hőveszteségek csak kismértékben csökkennek le, ellenben a szállított és kiadott hőmennyiség sok esetben töredékére esik. Ezt a jelenséget alátámasztja a **4. táblázatban** foglalt adatsor, amelyeket 2020-ban határoztak meg az egész éves mérések alapján.

Ezen információk ismeretében egyértelműen látszik, hogy jelen esetben a tömegáram értékének figyelmen kívül hagyása nagymértékben rontja a hőveszteség-számítás pontosságát. Ennek kompenzálására kidolgoztunk egy arányossági módszert, amely segítségével figyelembe tudjuk venni a tömegáram változásokat is. A rendelkezésünkre álló éves adatokból meghatároztuk a havi összes tömegáram értéket, amelyet utána hozzárendeltünk az adott körzet százalékos hőveszteségeihez ugyanabban az évben. Ennek ábrázolása látható a következő oldalon lévő **1. a) ábrán**. Az értékek egymáshoz való rendelkezése egyenes arányossággal nem lenne megoldható, lévén, hogy nem-lineáris kapcsolat tapasztalható köztük, továbbá szükséges kiszűrni az esetleges mérési hibákat az adatsorokban. Ennek megoldására egy függvényt alkottunk az adatpárokból, amely alapján meghatároztuk a pontthalmazra legjobban illő, a tömegáram-hőveszteség függőség fizikai jellegét hűen visszaadó trendvonalat. Ezen trendvonal egyenletének meghatározását követően felhasználható az egyenlet az arányosított hőveszteségi értékek meghatározására minden tömegáram adat esetén. Ennek számítási módját az alább látható egyenletben

4. táblázat. A 2020-as év hőveszteségi értékei a kelenföldi távhőrendszerre

Mértéke.	Okt.	Nov.	Dec.	Összesen
GJ	200 268	317 003	374 262	2 389 916
GJ	175 484	287 084	345 752	2 121 191
GJ	24 784	29 919	28 511	268 726
%	12,38%	9,4%	7,62%	11,24%

Megnevezés	Mértéke.	Jan.	Feb.	Márc.	Ápr.	Máj.	Jún.	Júl.	Aug.	Szept.
Hálózatba betáplált hő	GJ	454 080	312 449	283 713	157 224	83 260	52 806	47 516	45 261	62 056
Hálózatból fogyasztónak kiadott hő	GJ	424 741	282 257	261 130	138 514	65 612	35 798	31 383	28 493	44 943
Hálózati veszteség	GJ	29 339	30 211	22 582	18 710	17 648	17 008	16 133	16 768	17 113
Hálózati veszteség betáplált hőre	%	6,46%	9,67%	7,96%	11,90%	21,20%	32,21%	33,95%	37,05%	27,58%

mutatjuk be. Az eredményeket az 1. a) ábra tartalmazza.

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

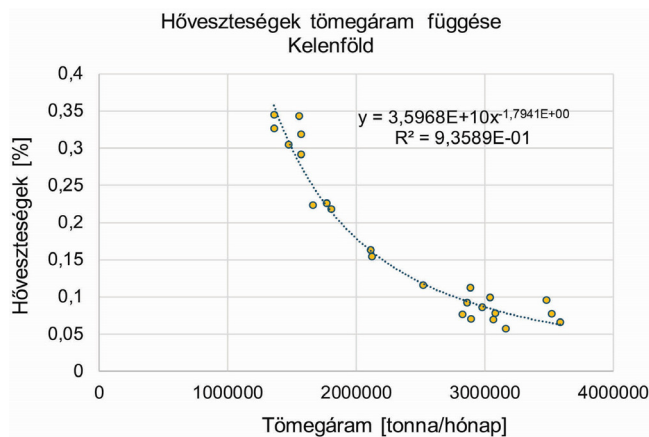
Ahol:

$f_{x,i}$ – tömegáram-hővesztességi arányossági tényező [%]

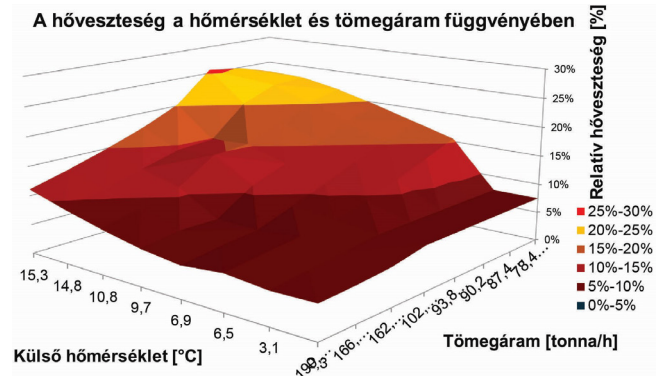
$\dot{m}_i$ – a havi átlagos tömegáram érték [tonna/h]

y – függvénykapcsolat egyenlete

	Hónapok	Tömegáram, t/h	Hővesztesség	f_x [-]
2021	1	3 475 355	9,52%	6,62%
	2	3 062 037	6,98%	8,31%
	3	2 977 767	8,62%	8,73%
	4	2 860 531	9,17%	9,38%
	5	2 122 227	15,41%	16,03%
	6	1 567 809	29,10%	27,60%
	7	1 567 809	31,88%	27,60%
	8	1 555 204	34,27%	28,00%
	9	1 770 718	22,56%	22,19%
	10	2 886 349	11,22%	9,23%
	11	3 037 824	9,89%	8,42%
	12	3 516 233	7,70%	6,48%
2022	1	3 585 258	6,62%	6,26%
	2	3 078 817	7,85%	8,22%
	3	3 162 690	5,72%	7,84%
	4	2 892 580	7,00%	9,20%
	5	1 804 931	21,76%	21,44%
	6	1 475 042	30,44%	30,79%
	7	1 359 095	34,44%	35,67%
	8	1 358 294	32,66%	35,70%
	9	1 664 014	22,30%	24,80%
	10	2 108 426	16,24%	16,22%
	11	2 520 633	11,61%	11,78%
	12	2 822 878	7,65%	9,61%



Az 1. b) ábrán látható az illesztett trendvonal, illetve a hozzá tartozó egyenlet, amely hiperbola függvényjellegűt vesz fel. Az adatpontok trendvonalra való illeszkedésének mértékét az R^2 determinációs együttható adja meg, amely estünkben 0,956 értéket vett fel, ami elfogadható mértékű egyezést jelent. A távhővezetékek hővesztességének hőmérséklet- és tömegáram-függése a 2. ábrán látható.



A fent bemutatott táblázatban foglalt függvénykapcsolati értékek segítségével arányosítani lehet az adott órai hővesztességet az adott hónapra jellemző kiszámított tömegáram-hővesztesség arányossági tényezővel, így egy közeli becslést kapunk a valódi veszteségek mértékéről. Ezen számítások alapján a korábban felírt hővesztességi képlet a következőképpen módosul:

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

Ezeket a számításokat mindhárom vizsgált hőkörzet esetén elvégeztük, az eredményt a következő oldalon látható 3.a) ábra és a 3.b) ábra mutatja be.

A hővesztességek kiadott hőteljesítményfüggését jól ábrázolja a 4. ábra és az 5. ábra, amelyeken jól megfigyelhető a nyári és téli időszakokban tapasztalható hővesztesség arány különbsége.

Az 5. ábrán látható relatív hővesztesség a hővesztességek és a kiadott hőmennyiség hányadosával meghatározott fizikai mennyiség. A téli üzemállapotban 10% alatti értéket vesz fel, ám a nyári állapot esetén helyenként az 50%-ot is meghaladó értéket tapasztalunk. A kapott adatok számos esetben tartalmaztak hamis mérési adatokat, amelyek szűrés módszerét a későbbi fejezetekben részletezzük. Jelen esetben az adatsor elemzése során a 60% feletti veszteségi értékeket helyettesítettünk a következő 20 órás veszteségi adatok átlagértékével, mivel ezek valótlanságokat mutattak volna. Ezen logikai rendszer matematikai megfogalmazása az alábbi képletben látható:

$$x_{hoveszt,i} = HA \left(\frac{\dot{Q}'_{ker,i}}{\dot{Q}_{ker,i}} > 0,6; \sum_{i=1}^{i+20} \frac{\dot{Q}'_{ker,i}}{\dot{Q}_{ker,i}}; \frac{\dot{Q}'_{ker,i}}{\dot{Q}_{ker,i}} \right)$$

Ahol:

$x_{\text{hőveszt},i}$ – a hővesztés aránya a kiadott hőmennyiséghez képest [–]

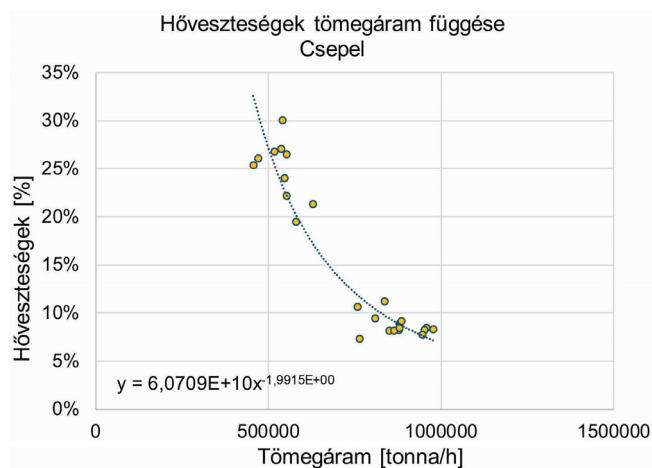
$\dot{Q}_{\text{ker},i}$ – a terület hőteljesítmény igénye [W]

A fent látható egyenlet a pár sorral feljebb leírt logikai vizsgálat elvégzéséért felel, az első szekcióban a vizsgált feltétel van, a másodikban az igaz vizsgálat esetén alkalmazandó érték, a harmadikban pedig a hamis vizsgálat esetén alkalmazandó képlet.

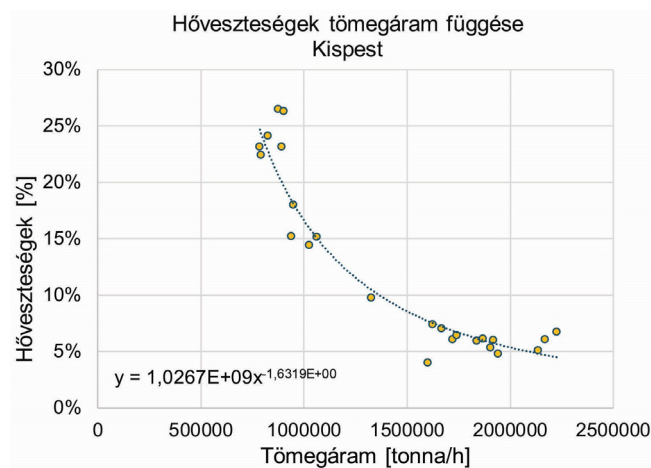
3.2. A távhővezetékek fektetése

Az egyes távhőközrzetekre való csatlakozás elemzése során a HUHA 2 hulladékégető mű létesítését vizsgáló, 2017-ben a Főtáv Zrt. által készített műszaki tanulmányra támaszkodtunk. [5]

A távhőcsatlakozások nyomvonalevezetéséhez és ezek beruházási költségeinek meghatározásához a műszaki tanulmány adatait alkalmaztuk, a Dél-budapesti (Kelenföld, Csepel és Kispest) hőközrzetekhez vezető vezetékek nyomvonala a következő oldalon lévő **6. ábrán** látható. Az ábrán pirossal jelöltük a számunkra releváns hőközrzeteket.

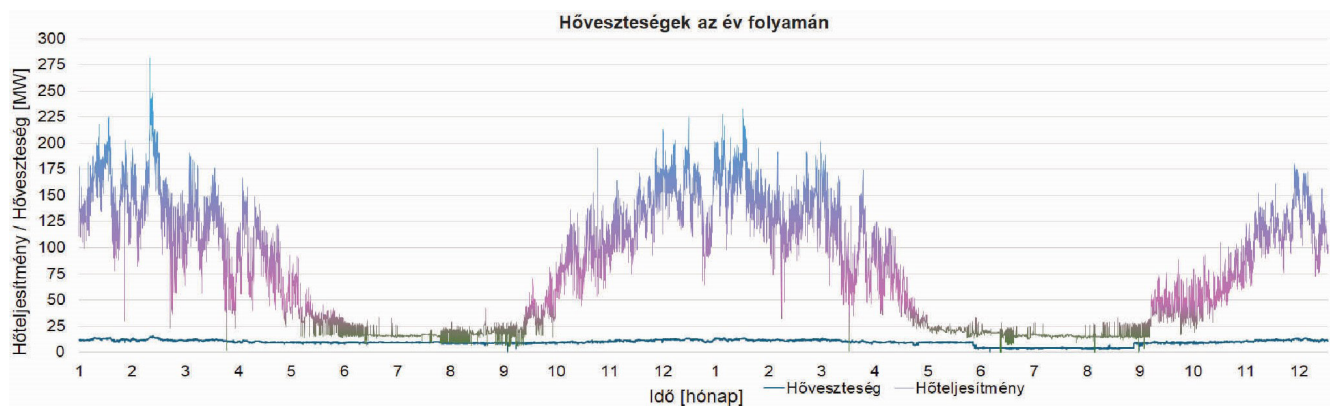


a)

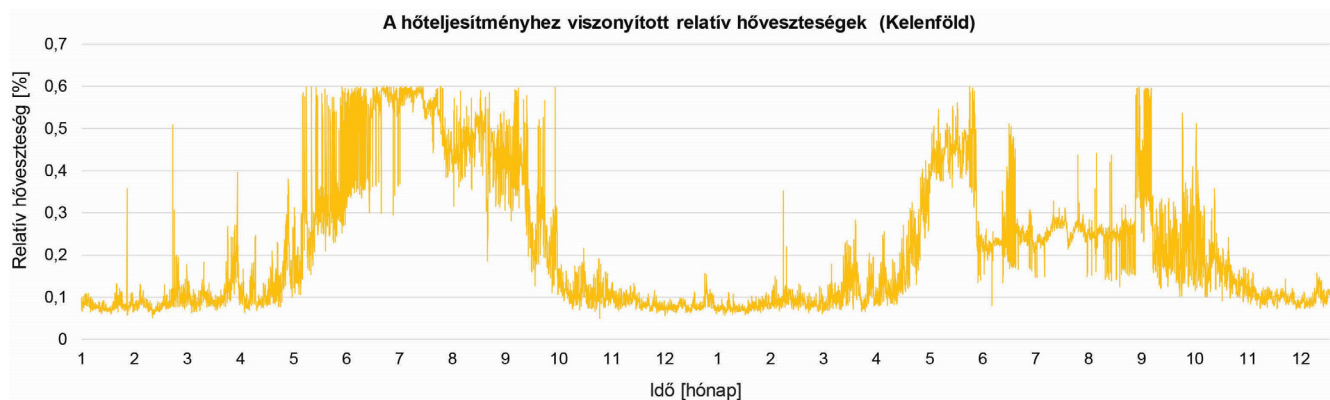


b)

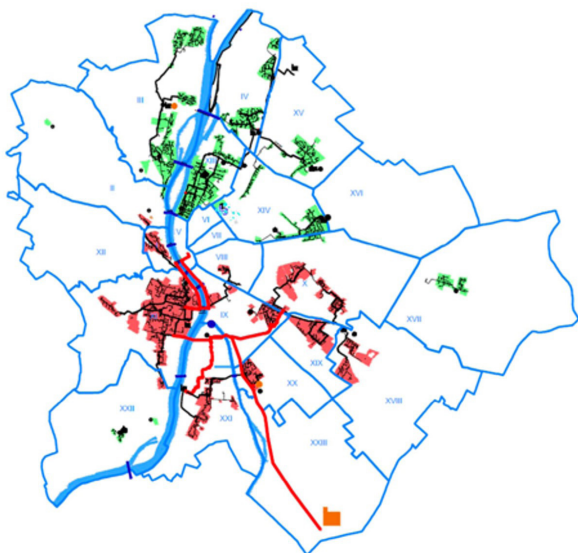
3. ábra. A hővesztések tömegáram függése Csepel a) és Kispest esetén b)



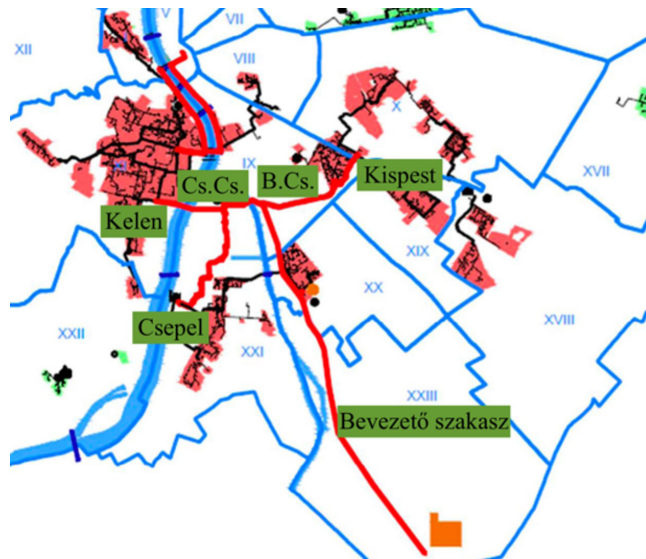
4. ábra. A hővesztések és a hőteljesítmény alakulása két éves időtartamra Kelenföld hőközrzetben



5. ábra. A hőteljesítményhez viszonyított relatív hővesztések Kelenföld hőközrzetben



a)



b)

6. ábra. a) Tervezett vezetékszakaszok az egyesített budapesti távhővezeték létrehozásához és b) az egyes vezeték-szakaszokat határoló csomópontok

A dokumentációban meghatározott adatok, illetve a 6. ábrán jelölt nyomvonalak segítségével meghatároztuk az egyes szakaszok hosszát:

- Bevezető szakasz: 11 500 m
- Bevezető csatlakozás (B.Cs) – Kispeszt : 4 000 m
- Bevezető csatlakozás (B.Cs) – Csepeli csatlakozás (Cs.Cs): 1 100 m
- Csepeli csatlakozás (Cs.Cs) – Kelenföld: 2 500 m
- Csepeli csatlakozás (Cs.Cs) – Csepel: 4 100 m

Ezen adatokon felül rendelkezésünkre állt információ a bevezető szakasz és a kispeshti csatlakozás megépültének költségéről, amely 14 260 millió Ft volt 2017-ben. Ezen adatok segítségével meghatároztuk a vezeték fajlagos beruházási költségét, amely megadta, hogy egységnyi vezeték hossz lefektetése mennyibe kerül:

$$p_{vez} = \frac{C_{beruh,vez}}{l_{vez}}$$

Ahol:

p_{vez} – a vezeték fajlagos beruházási költsége [Ft/m]

$C_{beruh,vez}$ – a vezeték beruházási költsége [Ft]

l_{vez} – vezeték hossz [m]

A fajlagos vezeték hossz értéke ezen számítás alapján $p_{vez} = 920\,000$ Ft/m lett, természetesen ez az érték 2017-es adatokkal volt számítva, így ennek kompenzálására a tanulmány készültének időpontjáig vett öt éves időtartam alatt felhalmozódott inflációs értékkel növeltük az értéket. Ez az inflációs érték 32,16%-ra adódott, amely felemelte a fajlagos értéket $p_{vez,inf} = 1\,215\,872$ Ft/m-re, amelyet a további számítások során alkalmaztunk. A beruházási költséget az adott szakasz hosszának függvényében határoztuk meg az alábbi számítási módszer szerint

$$C_{beruh,vez} = l_{vez} \cdot p_{vez,inf}$$

4. A hőközetek energetikai elemzése

A távhőcsatlakozások elemzése során megvizsgáltuk, hogy a három dél-budapesti távhőközet esetén mely hőközetre, vagy azok milyen kombinációjára érdemes csatlakozni leginkább energetikai és gazdasági szempontból. Ennek meghatározásához felvettünk néhány alapadatot, amelyek értékei fixek maradnak az összes közet számítása során. Ezek az adatok a következők voltak:

- csúcskihasználási óraszám (τ_{cs}): 8100 órában határoztuk meg, feltételezve, hogy a HUHA 2 az egész év folyamán maximális kapacitáson üzemel a 230 ezer tonna TSZH semlegesítésének érdekében. Az év során a kiadott hőmennyiség és villamosenergia-mennyiség mértéke változik a hőközetek teljesítményigényének függvényében.
- tüzelési teljesítmény ($P_{tüz}$): 74,93 MW értékben határoztuk meg. Megadja a tüzelőanyag elégetéséből elméletileg kinyerhető maximális teljesítményt a belső hatások figyelembevétele nélkül.

$$P_{tüz} = \frac{m_{TSZH} \cdot F_{TSZH}}{3,6 \cdot \tau_{cs}}$$

Ahol:

$P_{tüz}$ – tüzelési teljesítmény [MW]

m_{TSZH} – az éves elégetett TSZH mennyiség [tonna]

F_{TSZH} – a TSZH fűtőértéke [MJ/kg]

τ_{cs} – csúcskihasználási óraszám [h]

A közetek vizsgálata során hat konstrukciót vizsgáltunk meg: Kelenföld, Csepel, illetve Kispeszt csatlakoztatása egyedüli hőközetként, illetve a Kelenföld-Csepel, Csepel-Kispeszt és a Kelenföld-Csepel-Kispeszt közetek kombinált csatlakoztatása. Az összes esetben meghatároztuk a rendelkezésünkre álló óras adatok segítségével a hőteljesítmény igény-, illetve hőveszteség lefutást az éves adatok átlagolásával és több közet összekapcsolása esetén összegzésével.

$$\dot{Q}_{ker,i} = \sum_1^n \left(\frac{\sum_1^m \dot{Q}_{ker,i}}{2} \right)_n \text{ és } \dot{Q}'_{ker,i} = \sum_1^n \left(\frac{\sum_1^m \dot{Q}'_{ker,i}}{2} \right)_n$$

A lenti összefüggésekben
 $\dot{Q}'_{vez,i}$ – az az összekötő vezeték hővesztése [W]
 $\dot{Q}'_{össz,i}$ – összesített hővesztés [W]

Ahol:

$$\frac{\sum_1^m \dot{Q}_{ker,i}}{2} = \text{a hőteljesítmény igények adott órára vett átlag-értéke [MW]}$$

$$\frac{\sum_1^m \dot{Q}'_{ker,i}}{2} = \text{a hővesztés igények adott órára vett átlag-értéke [MW]}$$

m – az átlagolt évek száma [–]

n – az összegzett körzetek száma [–]

Ezt követően a HUHA 2 hőteljesítmény kiadását rögzítettük az ellátott körzetek mindenkorai hőteljesítmény igényéhez, a villamos-energia termelést pedig a műszaki dokumentációban foglalt adatokra alapozva egy lineáris függvény alapján változtattuk a hőkiadás függvényében.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{HUHA,i} &= HA(\dot{Q}_{ker,i} > \dot{Q}_{HUHA,max}; \dot{Q}_{ker,i} \\ P_{HUHA} &= HA(\dot{Q}_{HUHA} = \dot{Q}_{HUHA,max}; P_{HUHAmin}; \\ &\quad \dot{Q}_{HUHA} \cdot (-0,1972) + 23,2) \end{aligned}$$

Ahol:

$\dot{Q}_{HUHA,i}$ – a HUHA 2 által kiadott pillanatnyi hőteljesítmény [W]

$\dot{Q}_{HUHA,max}$ – a HUHA 2 maximális hőteljesítménye [W]

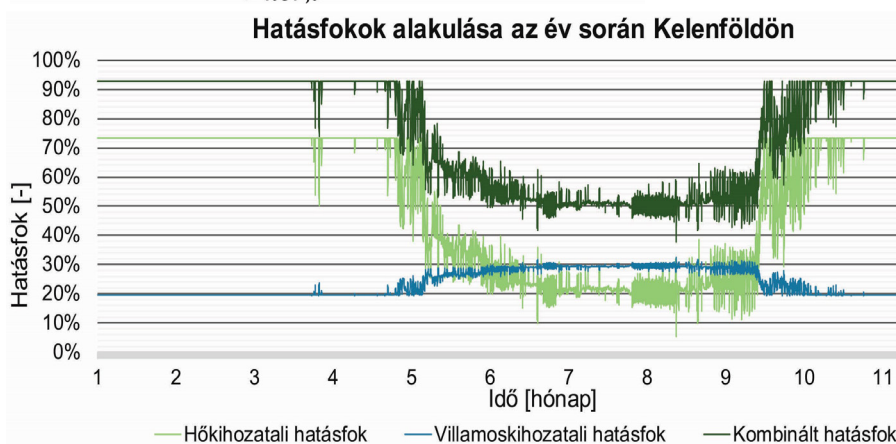
P_{HUHA} – a HUHA 2 által kiadott pillanatnyi villamos teljesítmény [W]

$P_{HUHA,min}$ – a HUHA 2 minimális villamos teljesítménye [W]

A korábbi számítások eredményeképp már birtokában vagyunk az egyes hőkörzetek mindenkorai órák hővesztési adatainak, ám a pontos értékeléshez szükségünk van az ellátott hőkörzet/hőkörzeteket az erőművel összekötő vezetékszakaszk veszteségeinek ismeretére is. Ennek érdekében az összekötő vezetéki hővesztéseket meghatározásuk után összegeztük az alábbi módon:

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

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



7. ábra. A hő- és villamoskihozatali, illetve a kombinált hatásfok alakulása az átlagolt év során Kelenföldön

Ezen számítások alapján meg tudjuk adni a pontos hővesztés-
get az adott csatlakoztatott rendszer függvényében, amely direkt
módon fogja befolyásolni a bevételi értékeket a fogyasztókhoz
valójában eljuttatott hőmennyiség tekintetében.

4.1. R1 energy efficiency formula függőség

Az egyes hőkörzetekre való csatlakozás energetikai elemzésén
kívül egy fontos tényezőt figyelembe kell venni, a korábban emlit-
tett R1 energy efficiency formulát. A formula fontossága abban
jelentkezik, hogy a 0,65-ös értéket el nem érő hulladékhasznosít-
ó erőművek nem sorolhatók hulladékhasznosító kategóriába,
hanem hulladékegető kategóriát kapnak. Ennek értelmében alig
lesznek kedvezőbb helyzetben környezetkárosítási, illetve jogi
szempontból, mint egy hulladéklerakó, avagy egy hulladékeget-
ést végző személy. [8]

A formula képlete az alábbi:

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

Ahol:

E_p – hő vagy villamosenergia formájában termelt éves ener-
gia [GJ]. A termelt villamosenergia értékét 2,6-tal, a
hő értékét 1,1-gyel szorozzuk meg

E_f – a támasztó tűz és az indító tüzelés energiaigénye [GJ]

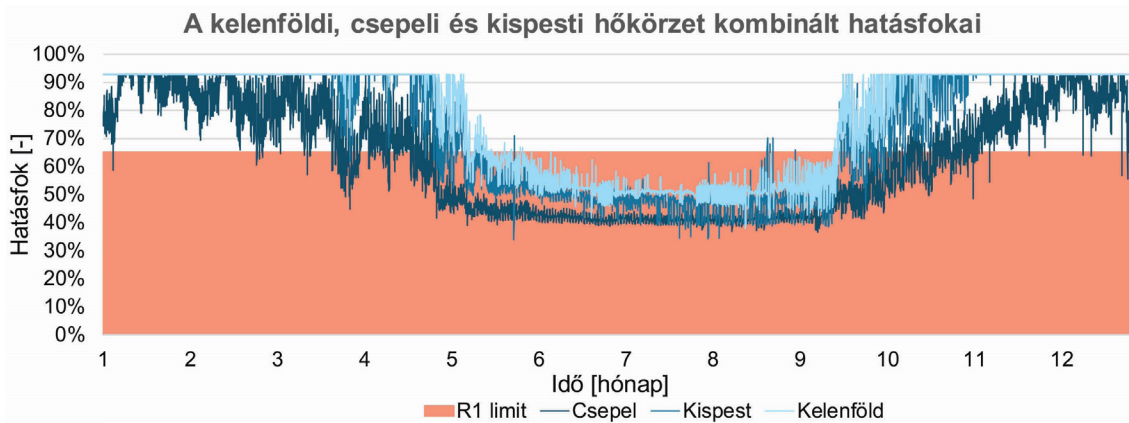
E_w – a tüzelőanyag energiatartalma [GJ]

E_i – az E_f és E_w értékeken kívül bevitt energiamennyiség
[GJ]

Az összes hőkörzet esetén meghatároztuk az R1 formulát. Az
értéken tartása érdekében tanácsos növelni a kiadott hőmennyi-
ségeket, emiatt a kis hőteljesítményű körzetek esetén veszély-
ben lehet a határérték teljesítésének megvalósulása.

Következő lépésként meghatároztuk az erőmű hőkihozatali,
illetve villamosenergia-kihozatali hatásfokát órák bontásban,
továbbá ezek alapján az erőmű kombinált hatásfokát, amelyek
alakulását az alább látható 7. ábrán jelöltük. Megfigyelhető,
hogy az év során a maximális hőteljesítmény igények fennál-
lása mellett konstans értéken marad mindhárom hatásfok, ám

az emelkedő külső hőmér-
séletek mellett a hőkiadás
hatásfoka drasztikusan csök-
kenni kezd, amelyet nem
tud kompenzálni a lassabb
ütemben növekvő villamo-
senergia-kihozatali hatás-
fok. Ennek eredményeképp a
kombinált hatásfok is le fog
csökkenni. Ez a csökkenés
veszélyt jelent az R1 formu-
la által támasztott követelmé-
nyek szempontjából.



8. ábra. A kelenföldi, csepeli és kispesti hőköri kombinált hatásfokainak alakulása az átlagolt év során

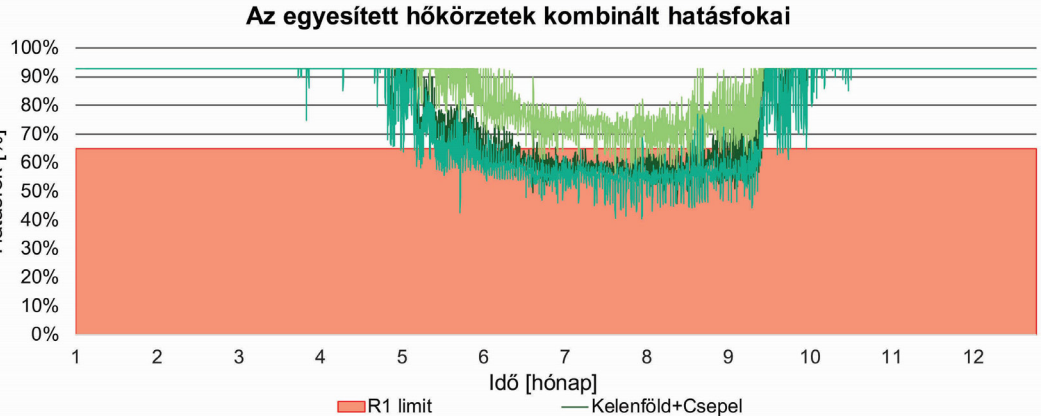
A 8. ábrán, illetve a 9. ábrán látható két diagram tartalmazza az egyes hőköriekre való csatlakozás esetén kialakuló átlagolt hatásfok értékeit, illetve halvány piros színnel jelezve van az R1 formula által felállított határérték alatt található zóna, amely elkerülendő. Látható, hogy a világos színnel jelölt kelenföldi körzet érintette a legkisebb mértékben a „tiltott zónát”, mivel ez a körzet rendelkezik a legnagyobb hőigénnyel.

Érdemes megjegyezni, hogy az R1 formula értéke nagyobb értéket fog felvenni, mint az év során tapasztalt valós átlagos kombinált hatásfok, de a jelleg szemléltetésére tökéletesen alkalmasak ezek a diagramok.

A 9. ábra jól szemlélteti, hogy a nagyobb hőigénnyel rendelkező kapcsolási struktúra kedvezőbb hatásfok értéket fog eredményezni az egész év során, különös tekintettel a nyári időszakra. A világoszöld színnel jelölt kelenföldi, csepeli és kispesti összekapcsolt csatlakozási állapot gyakorlatilag az év teljes szakaszában elkerüli az R1 szempontjából „tiltott zónát”.

5. Eredmények

Az energetikai eredmények fényében meghatároztuk az egyes zónák csatlakoztatásával realizálható órák, illetve ezek alapján az egész éves összegzett bevételt. Ennek kiszámításához figyelembe vettük az egyes, jelenleg üzemelő erőművek értékesítési árának, illetve az alternatívaként kínált HUHA 2 hőértékesítési



9. ábra. A kelenföldi és csepeli, a csepeli és kispesti, illetve mindhárom hőkörzet összekapcsolása során tapasztalt kombinált hatásfok alakulása

árának különbségét, amelyet aztán az eladott hőmennyiség mértékében összegeztünk (5. táblázat). A díjazási értékeket havi rendszerességgel a Magyar Közlönyben közzétett adatok adják meg. A számítás alapján meg tudjuk határozni, hogy a szolgáltató számára mely körzet csatlakoztatásával érhető el a legnagyobb bevétel és ezáltal a leggyorsabb megtérülési érték. Ennek fényében nem az erőmű szémszögéből végezzük a számítást, így a villamos energia értékesítéséből származó bevételt nem számoltuk bele a megtérülési adatokba.

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

Az összefüggésben szereplő jellemzők a következők:

$p_{\text{bevétele}}$ – a mindenkor órák bevétele értéke [Ft]

$p_{\text{gáz}}$ – a csatlakoztatott hőköriet alapból ellátó erő-, avagy fűtőmű hőértékesítési díja [Ft/GJ]

p_{HUHA} – a HUHA 2 hőértékesítési díja [Ft/GJ]

A csepeli hőkörzet esetében egyidejűleg üzemel mind erőmű, mind pedig fűtőmű. Ennek okán a számítás során a két egység árának átlagolt értékesítési árával számoltunk.

5. táblázat. Az egyes körzeteket ellátó erőművek és kazánok értékesítési díjai a 2023. szeptember 29-i Magyar Közlöny adatai alapján [7]

	Kelenföldi erőmű	Csepeli erőmű	Csepeli fűtőmű	Kispesti erőmű
Értékesítési díj [Ft/GJ]	12 871	4 807	12 703	12 580
HUHA 2 értékesítési díj [Ft/GJ]	2 000			

Az óras bevételi adatok összesítésével meghatároztuk az átlagos évre vetített bevételi költségeket, amelyek segítségével kiszámítottuk az egyes beruházások megtérülési idejét. A számítások során 12%-os inflációs rátával számoltunk, mivel a bevételek alapján rövid megtérülési időre lehet számítani, így tanácsos a jelenlegi infláció értékéhez közelebb eső rátát alkalmazni.

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

Ahol:

NPV – nettó jelenérték [Ft]

$\sum_i p_{bevétel,i}$ – éves aggregált bevétel [Ft]

r – infláció [–]

$C_{beruházás}$ – beruházási költség [Ft]

A számítás eredményeit az **6. táblázat** tartalmazza.

6. Összegzés

Látható, hogy az összes beruházás kiemelkedően gyors megtérülési mutatókkal rendelkezik, ezen felül a Csepel + Kispest, illetve a Kispest konstrukció volt a legkedvezőbb gazdasági szempontból, amelyek 14, illetve 15 hónapos dinamikus megtérüléssel rendelkeznek. A korábban említett R1 értéknek minden hőkörizet megfelelt, így elegendő csupán a gazdasági megfontolások alapján döntést hozni a megvalósításról.

A gyors megtérülési idő magyarázata a gázalapú jelenlegi erőművek és fűtőművek által alkalmazott értékesítési árak, illetve a HUHA 2 által nyújtott alacsony, hulladék alapú hőenergia közötti magas különbség. Természetesen a gázárak csökkenésével növekedhet a beruházások megtérülése, ám a jelenlegi Európai Unió környezettudatossági trendek és a fosszilis energiahordozók évtizedek óta tartó emelkedő ár tendenciája mellett ennek alacsony esélye van.

Köszönetnyilvánítás

A kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2-I-BME-278 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

6. táblázat. A távhőcsatlakozások gazdasági értékelése

A távhőcsatlakozások eredményei összegezve						
	Kelenföld	Csepel	Kispest	Kelenföld+Csepel	Csepel + Kispest	Kelenföld+Csepel+Kispest
Összekötő vezetékszakas [m]	14 800	16 700	15 500	17 800	15 000	22 900
Beépítési költség [mFt]	17 995	20 305	18 846	21 643	18 238	27 843
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]	17 790	11 893	17 268	18 461	18 185	19 271
R1 érték	1 222	1 115	1 208	1 252	1 236	1 295
Megtérülési idő [hónap]	21	25	15	17	14	21

Supported by the European Union in the course of the 2023-1-HU01-KA220-HED-000160219 (SHaKE) project called Sharing Heat and Knowledge in Energy Communities. „With funding from the European Union. The information and statements contained herein are those of the authors and do not necessarily reflect the official views of the European Union or the Tempus Public Foundation. Neither the European Union nor the funding authority can be held responsible for them.”



KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL



Funded by
the European Union



Források

- [1] Hulladékkezelés az Európai Unióban <https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20180328STO00751/hulladekkezeles-az-eu-ban-trendek-es-statistikak-infografika>
- [2] Meteostat meteorológiai adatbázis <https://meteostat.net/en/>
- [3] A talaj hőmérséklete az év során https://mersz.hu/hivatkozas/m514aea_10_p1#m514aea_10_p1
- [4] ISOPlus előszigetelt vezetékek hőátbocsátási tényezői https://www.isoplus.hu/fileadmin/data/downloads/documents/hungary/manuals/Merev_csovek.pdf
- [5] HUHA II. Új Iszapégető és Hulladék-hasznosító Erőmű Műszaki Döntéselőkészítő Tanulmány Rev.1.
(S-6 Mérnök Kft, koordinátor: Orbán Tibor, 2017. augusztus)
- [6] European Commission: Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of municipal solid waste according to ANNEX II
- [7] Magyar Közlöny 2023. szeptember 29., 139. szám
- [8] <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/framework/guidance.pdf>
- [9] Kocsis Kende: HUHA 2 hulladékégető mű létesítésének vizsgálata Budapest távhőellátásában, Energiagazdálkodás folyóirat, 64. évfolyam Klenen különszám, 2023. március.