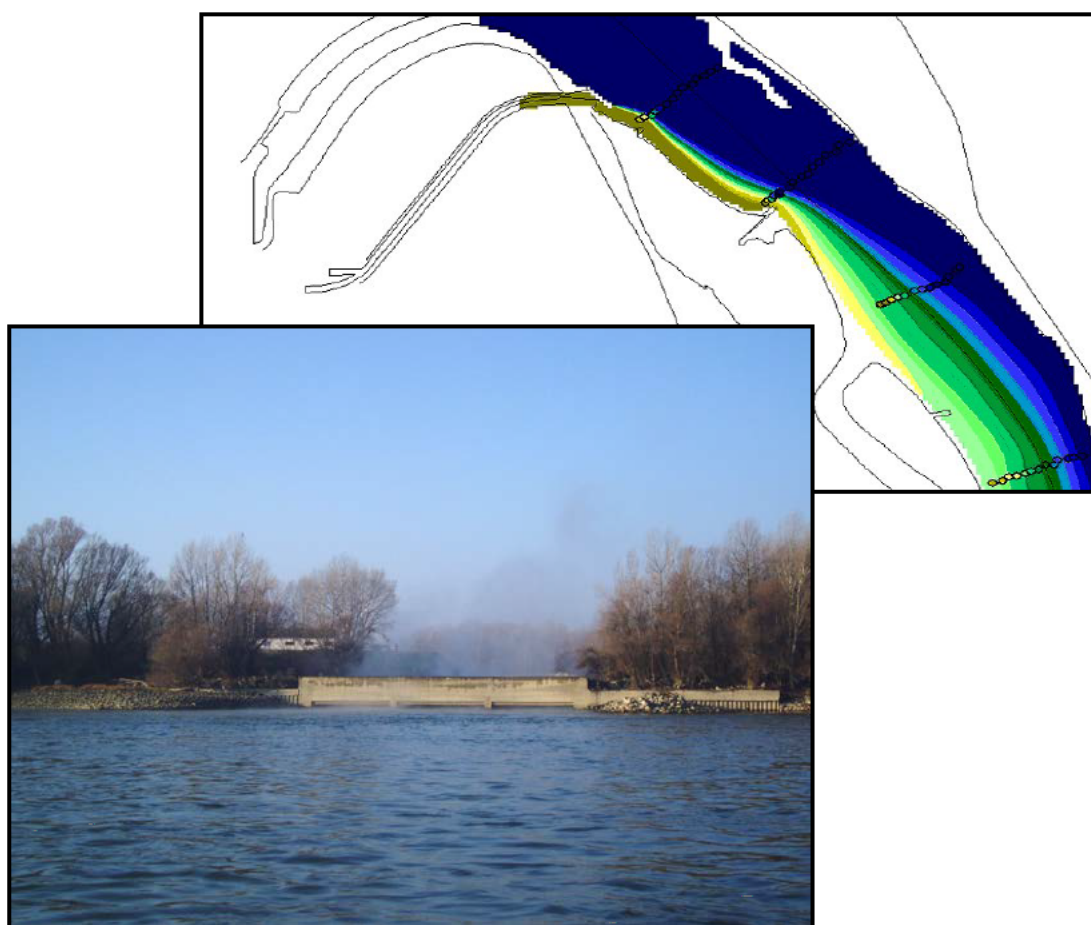




A Paksi Atomerőmű hőterheléséhez kapcsolódó üzemviteli rendszer továbbfejlesztése és az elkeveredés javításának vizsgálata



Készült a Paksi Atomerőmű Zrt. megbízásából

Budapest, 2010. szeptember

**A Paksi Atomerőmű hőterheléséhez kapcsolódó üzemviteli
rendszer továbbfejlesztése és az elkeveredés javításának
vizsgálata**

Előrehaladási jelentés

**Megbízó:
Paksi Atomerőmű Zrt.**

Témafelelős:

Somlyódy László
egyetemi tanár,
az MTA r. tagja

Közreműködtek:

Karches Tamás

Koncsos László

Kozma Zsolt

Pfenninberger Ákos és munkatársai (VITUKI Kht.)

Budapest, 2010. szeptember

A Paksi Atomerőmű hőterheléséhez kapcsolódó üzemviteli rendszer továbbfejlesztése és az elkeveredés javításának vizsgálata

ELŐREHALADÁSI JELENTÉS 2010

1. BEVEZETÉS

A Paksi Atomerőmű Zrt. és a BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék (BME VKKT) közötti, időrendben második „A Paksi Atomerőmű hőterheléséhez kapcsolódó üzemviteli rendszer továbbfejlesztése és az elkeveredés javításának vizsgálata” c. K+F szerződés keretében három problémakör vizsgálata kezdődött meg 2009-ben. A szerződés szerinti (2.1) „A döntéstámogató rendszer input adatainak automatikus előállítására és bevitelére szolgáló algoritmus kidolgozása” (és tesztelése) és (2.4) „Az elkészített üzemviteli döntéstámogató rendszer beüzemelése, betanítása, működtetése” c. munkarészek eredményei a korábbi, 2009. decemberi előrehaladási jelentésünkben találhatóak meg.

Jelen munkafázis célja a szerződés szerinti (2.2) és (2.3) elvégzése volt, melyek a következők:

- 2.2 A megelőző K+F munka keretében a 30 °C-os környezeti korlát ellenőrzését biztosító monitoring tervre tett javaslatok tesztelése. A mozgó mérőhajóval történő hőmérséklet-észlelést a +500 m-es határérték szelvényben, kritikus állapotban a Megbízó munkatársai végzik a VITUKI és a Megbízott szakembereinek támogatásával. Az adatok statisztikai alapú értékelése a korábban ajánlott módszertan szerint a Megbízott feladata
- 2.3 Az üzemirányítási rendszer által jelzett kritikus időszakokban szükséges expedíciós mérésekre vonatkozó előírások kidolgozása a 2.2 pont eredményeire támaszkodva. A determinisztikus, illetve meghaladási valószínűségek formájában meghatározott hőmérsékleti korlát betartását ellenőrző terepi eljárások pontos dokumentálása.

2. LEHETSÉGES MONITORING VÁLTOZATOK

A Paksi Atomerőműre a 15/2001. KöM rendelet előírása értelmében a felszíni vizek hőterhelés elleni védelme érdekében (a) a kibocsátásra kerülő és a befogadó víz hőmérséklete közötti különbség 11 °C-nál, illetve +4 °C alatti befogadó víz hőmérséklet esetén 14 °C-nál nem lehet nagyobb; (b) a kibocsátási ponttól folyásirányban számított 500 m-en lévő szelvény bármely pontján a befogadó víz hőmérséklete nem haladhatja meg a 30 °C-ot.

A fenti korlát betartásának ellenőrzése két ok miatt problematikus:

- (a) a kérdéses – egyébként rosszul definiált (sekély, iszapos, a vízállástól függően változó partélú) - +500 m szelvényben nincsenek kiépített mérési helyek, amelyek lehetővé tennék a vízhozam függvényében változó helyen jelentkező csúcs-hőmérséklet egyértelmű detektálását, és

- (b) vizsgálataink alapján egyértelmű, hogy a hőmérséklet statisztikai változó, így kérdéses, a fenti felső határ hogyan is értelmezendő. Megemlítendő, hogy a nemzetközi tendencia is a statisztikai értékelés fontosságát húzza alá, mivel a környezetet ért hatások a legtöbb esetben valószínűségi jellegűek.

Ilyen körülmények között, kutatási eredményeinket is figyelembe véve, különböző monitoring javaslatok tehetők, amelyek modell számítások és mérések együttes használatán alapulnak. A hőmérséklet eloszlás folyamatos (vagy a kritikus időszakokban történő) számítását mindegyik esetben a két-dimenziós hidrodinamikai-hőtranszport modellel végezzük el, célszerűen rövid távú előrejelzéssel összekapcsolva. Ezzel rendelkezésre áll a +500 m-es szelvény (mélység menti átlag) hőmérséklet maximumának közelítő értéke és keresztirányú eloszlása.

3. A MONITORING TERVRE TETT JAVASLAT TESZTELÉSE

3.1 A mérés ismertetése

Az erőmű hőterhelését szabályozó környezeti korlátra és annak ellenőrzésére vonatkozó ajánlásokat a 2008-as évi zárójelentés 4.1 alfejezete foglalja össze. A modell számítások mellett a monitoring javaslatok meghatározó eleme a terepi észlelés. A javasolt ellenőrző mérések megvalósíthatósága és a módszertan kapcsán több kérdés is felvetődött. A megelőző projektben nem volt lehetséges ezek teljes körű tisztázása, ezért szükséges volt újabb mérési program kidolgozása és végrehajtása, majd ezen eredményeken alapuló monitoring terv tesztelése.

A vizsgált eljárás szerint az ellenőrzés a határértékszelvényben, mérőhajóról elvégzett alkalmankénti észlelés keretében történik. A mérést kijelölt pálya mentén folyamatosan végzik, oly módon, hogy az a mélység menti és keresztirányú változásokat, valamint a turbulens ingadozásokat is figyelembe veszi. Az értékelés arra a feltevésre alapul, hogy az adatok azonos statisztikai sokasághoz tartozónak tekinthetők. A minta eloszlásából levezethető a környezeti előírásban rögzítendő konfidenciaszinthez tartozó dunai hőmérséklet (illetve a hőmérsékleti korlát megengedett túllépési gyakorisága). Határérték túllépés akkor történik, ha ez az érték meghaladja az adott hőmérsékleti korlátot (30 °C).

Fontos kérdés, hogy az értékelés a csóva mely tartományára terjedjen ki. Előző jelentéseink alapján két lehetőség adódik:

- (a) Csak a maximumok környezetét vesszük figyelembe, mintegy 15-20 m szélességben. Ebben az esetben a határértéket/határértékhez tartozó megengedett meghaladási valószínűséget kellően magasnak kell megválasztani.
- (b) A vizsgálatot a teljes csóvára végezzük. Az így adódó minta jelentős részét a maximumnál lényegesen kisebb hőmérsékletek teszik ki. Ez megfelelően alacsony határérték/határértékhez tartozó megengedett meghaladási valószínűség megadásával vehető figyelembe.

További kérdést jelent a mérőhajó pontos pályájának kijelölése. Az (a) változat esetén felmerül, hogy az észlelést elegendő a part közeli „homogén” hőmérsékletű sávban („plató”) elvégezni. Gyakorlati problémát jelent azonban, hogy a kérdéses zóna pontos szélessége a

mindenkori hidraulikai és keveredési viszonyok függvénye. Kézenfekvő megoldást jelent még a csóva teljes szélességében végzett észlelés (a csóvahatár beazonosítása a homogén sáv lehatárolásánál lényegesen egyszerűbb), majd szükség esetén a maximumok tartományának utólagos lehatárolása.

Az eljárás alapjául szolgáló gondolatmenet fontos eleme a tér- és időbeli ingadozásoknak kitett hőmérsékletmező véletlenszerű – reprezentatív – mintavételezése. Erre technikai szempontból a vizsgált tartomány szélei között állandó sebességgel bejárt, köztes fordulótól mentes pálya jelenti a legegyszerűbb és legmegbízhatóbb megoldást.

A tesztelés alapjául szolgáló mérést 2009. szeptember 1-jén végeztük el a környezeti előírásban kijelölt +500 m-es keresztaszvénnyben, $Q=2100\text{ m}^3/\text{s}$ -os vízhozamnál. A mérőhajó a part és a csóvahatár között közel egyenes – átlagosan 0.5 m/s – sebességgel mozgott oda-vissza, miközben a hőmérséklet detektálása állandó vízmélységben folyamatosan zajlott. A mérési időalap 5 másodperc volt. Ezzel a módszerrel a felszíntől számított $0,5\text{ m}$ -es mélységben hat, a felszíntől számított $1,5\text{ m}$ -es mélységben öt part-csóvahatár-part sorozatot végeztünk el.

A mérési pálya fordulópontjainak meghatározását a tényleges észlelések előtt a következő módon végeztük el: (1) a part esetében annak a legközelebbi pontnak a koordinátáit rögzítettük, ahol a megfordulás a 1.5 m mélyre leeresztett szondával még biztonságosan elvégezhető; (2) a csóvahatár szelvényen belüli helyzetét – a dunai háttér hőmérsékletéhez képesti 0.5 °C -os ráhagyással – kézi hőmérő segítségével határoztuk meg.

3.2 A mért adatok elsődleges értékelése

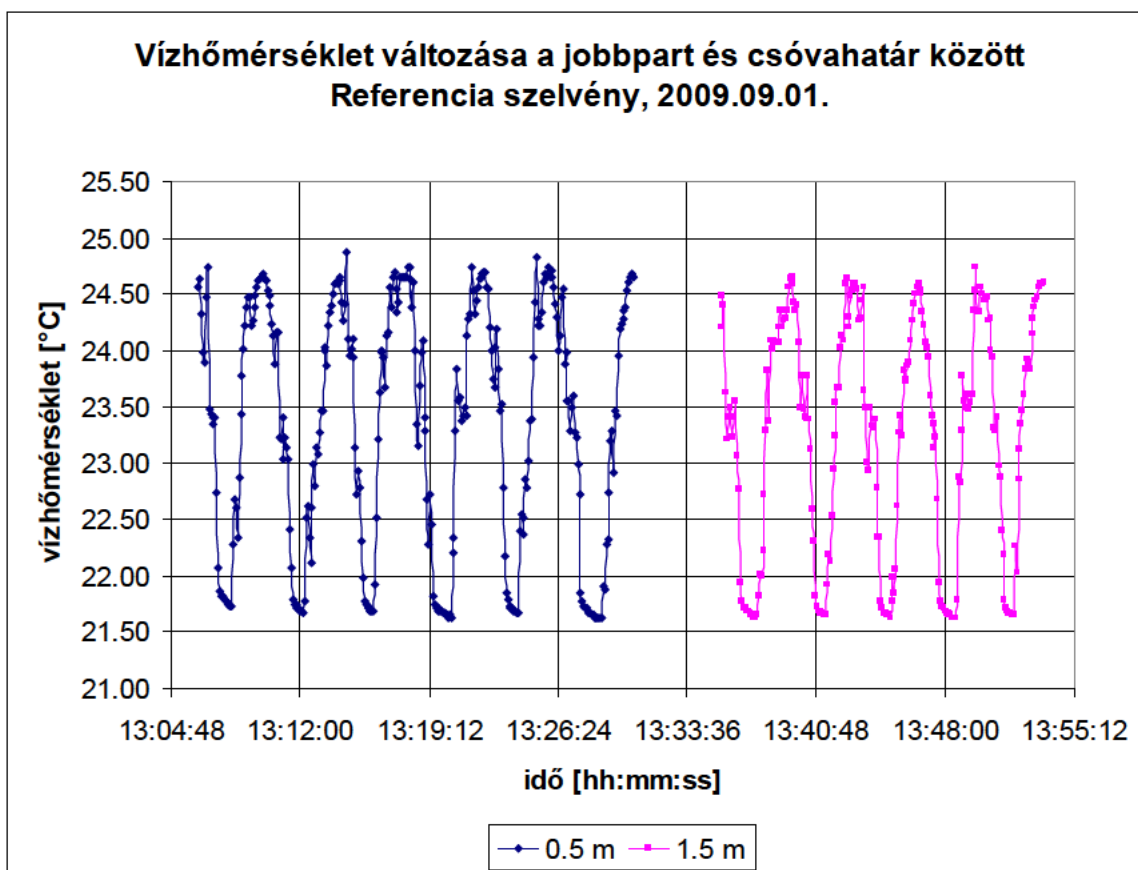
Az észlelt hőmérséklet-idősort (3.1 ábra) statisztikai eszközökkel dolgoztuk fel. Az egyes sorozatokra, mint független mintákra vonatkozó alapmennyiségek – mintaelemek átlaga, szórása, szélsőértékei a csóva teljes szélességére – az 3.1 és 3.2 táblázatokban találhatóak.

Vízmélység = 0.5 m							
Sorozat	[#]	1	2	3	4	5	6
Átlag	[°C]	23.56	23.44	23.67	23.61	23.58	23.60
Relatív szórás	[%]	4.30	3.95	4.00	3.91	3.80	3.73
Minimum	[°C]	21.77	21.75	21.75	21.71	21.79	21.77
Maximum	[°C]	24.74	24.68	24.87	24.74	24.83	24.72

3.1 táblázat A 0.5 m mélységben rögzített mérési sorozatok statisztikai jellemzői

Vízmélység = 1.5 m						
Sorozat	[#]	7	8	9	10	11
Átlag	[°C]	23.53	23.46	23.60	23.54	23.64
Relatív szórás	[%]	3.64	3.57	3.65	3.31	3.19
Minimum	[°C]	21.77	21.82	21.77	21.77	22.03
Maximum	[°C]	24.64	24.66	24.64	24.57	24.51

3.2 táblázat A 1.5 m mélységben rögzített mérési sorozatok statisztikai jellemzői



3.1 ábra A határértékszelvényben mozgó mérőhajóval rögzített víz hőmérséklet időszora

Megfigyelhető, hogy a mérés időtartama alatt a hőmérséklet sorozatonkénti átlaga és szélsőértékei csekély változást mutatnak. Továbbá a minimumok és maximumok helyzete – a várakozásoknak megfelelően - egyértelműen a fordulópontokhoz köthető. Ezek alapján a csóva kiterjedése – a mérési tartományon kívül eső csóvalengést leszámítva – hosszabb időn át viszonylag stabilnak tekinthető. Összehasonlítva a 2008. évi zárójelentés 3. Függelékében leírt ugyanilyen célú mérés idősorával, egyezést tapasztalunk, vagyis a monitoring tesztmérések alapján a hőmérséklet eloszlások plató jellege csak mérsékeltten figyelhető meg. Ez majd nehézséget jelent a maximum értékek elkülönítésében

A rögzített idősorban megfigyelhető lokális szélsőértékek jól tükrözik a hőmérsékletmezőben tapasztalható tér- és időbeli ingadozásokat. A vízhőfok 0.3-0.6 C° körüli hirtelen változásai jellemzően 5-15 másodperc alatt következnek be. Ez a mérőhajó átlagsebességét figyelembe véve 2.5-7.5 méteres távolságnak felel meg.

3.3 Statisztikai feldolgozás

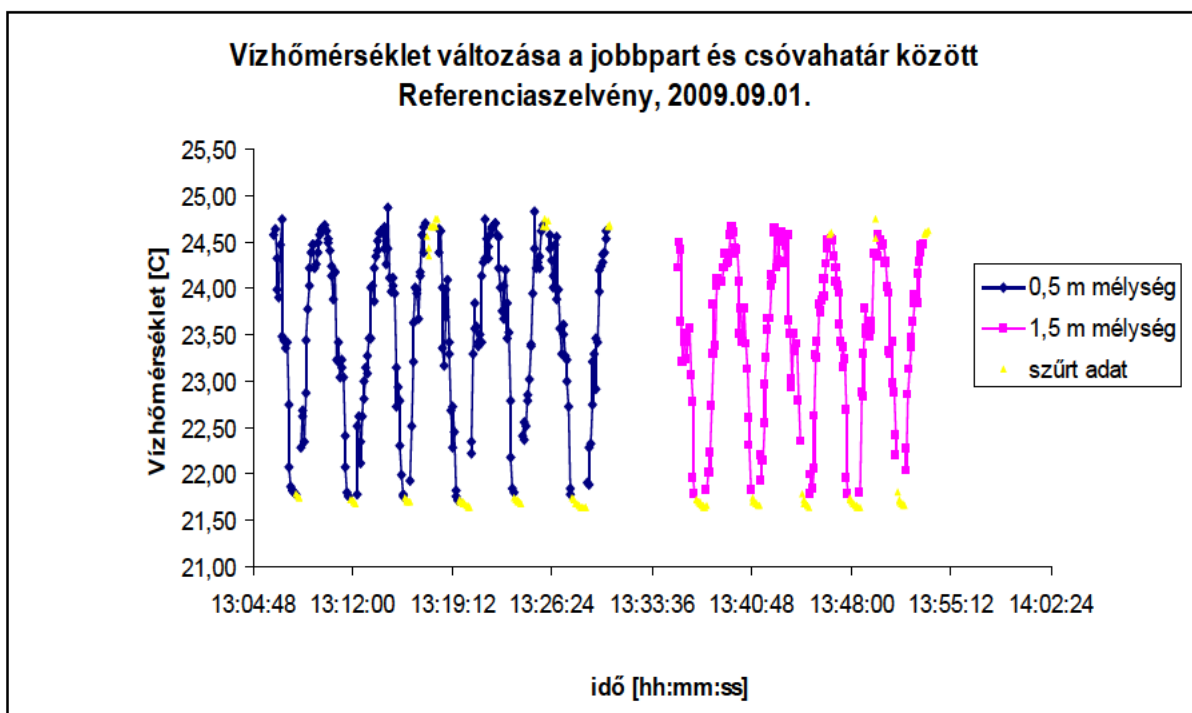
Az adatok statisztikai értékelését két esetre végeztük el, egyrészt a csóva teljes szélességében, valamint csak a part mentén kijelölt sáv – a maximumok feltételezett helyének – figyelembe vételével.

A mintaelemekre tett feltevés – azonos statisztikai sokasághoz tartozónak tekinthetőek, így egyazon minta elemeiként értékelhetőek – ellenőrzésére a ténylegesen kimért idősort

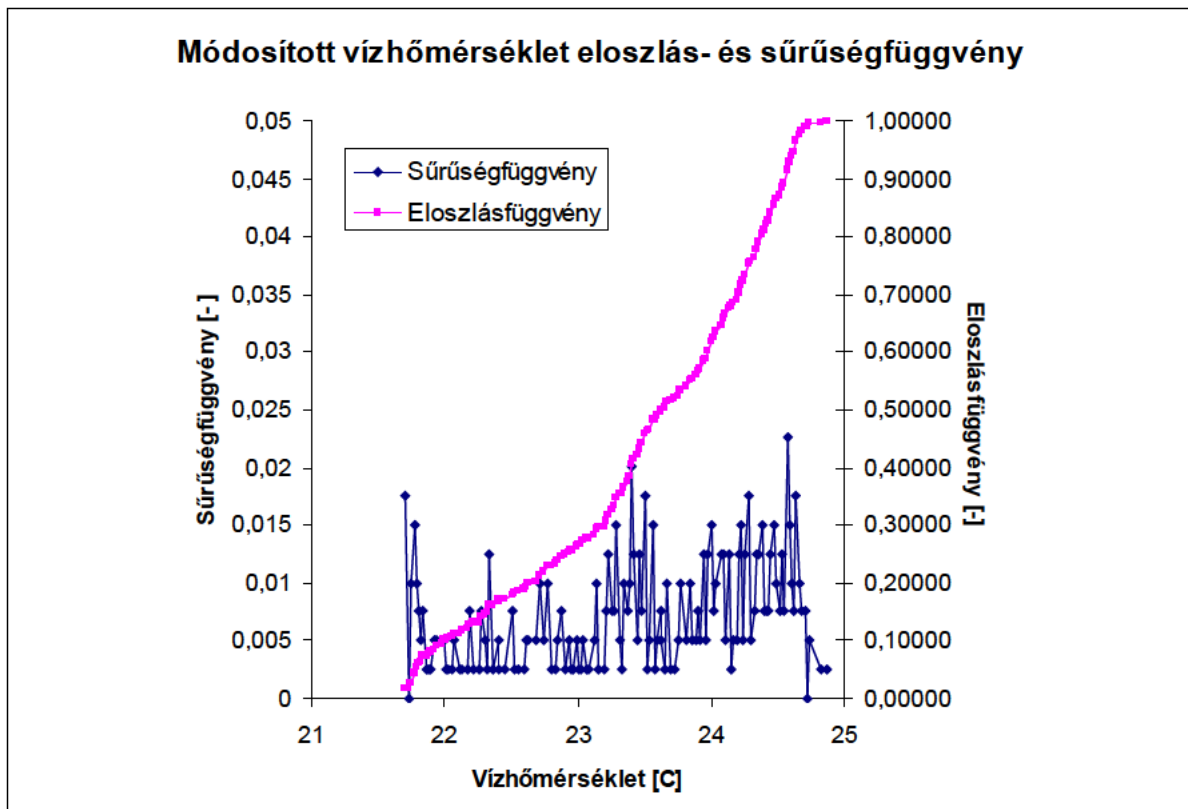
statisztikai próbáknak – (1) homogenitás- és (2) illeszkedésvizsgálat – vetettük alá. Ezek célja annak meghatározása, hogy (1) a minta elemei azonos eloszlású sokaságból származnak-e, és ha igen, akkor (2) ez az eloszlás milyen típusú.

A Student-féle statisztikai próba egyértelműen megmondja, hogy a nyers adatok nem tekinthetők homogénnek, vagyis a minta elemei nem ugyanazon eloszlás sokaságához tartoznak. Ennek a magyarázata, mint már a korábbi mérésből is látszott, az, hogy a mérőhajó a fordulópontok közelében hosszabb ideig tartózkodik, mint a csóva többi részén. A megelőző mérések tanulsága alapján a mostani, 2009. szept.1. mérésnél a mérőhajó a fordulókkal jobban „megbirkózott”, ezért a torzítást okozó kiszűrendő pontok száma is kevesebbre adódott (ezért is fontos, hogy a megfigyeléseket gyakorlott mérőcsoport végezze). Ezzel szemben a hőmérsékleti minimumok gyakorisága megnő, ahogy a 3.1 ábra pontsokaságából is látszik, amire a magyarázat, hogy a csóván kilépve a Dunai háttér jelentkezik.

Ahogy már említettük két esetet vizsgálunk meg, (1) a csóva egészét és (2) maximumok környezetét. Az (1) esetben a minimumok és maximumok környezetében lévő értékeket kiszűrtük, ahogy azt a 3.2 ábra is mutatja. A (2) esetben pedig a 24,5 °C-nál nagyobb értékeket hagytuk meg, hogy a maximumok környezetét vizsgálni tudjuk és ezen határ feletti adatokkal jó közelítést adhassunk valamilyen ráilleszkedő eloszlással. A Dunai háttér 21,6 °C.



3.2 ábra A határértékszelvényben mozgó mérőhajóval rögzített víz hőmérséklet módosított időszora (az illeszkedésvizsgálat során a sárga színnel jelölt értékek nem lettek figyelembe véve)



3.3 ábra A detektált, majd módosított víz hőmérséklet idősor eloszlás- és sűrűségfüggvénye

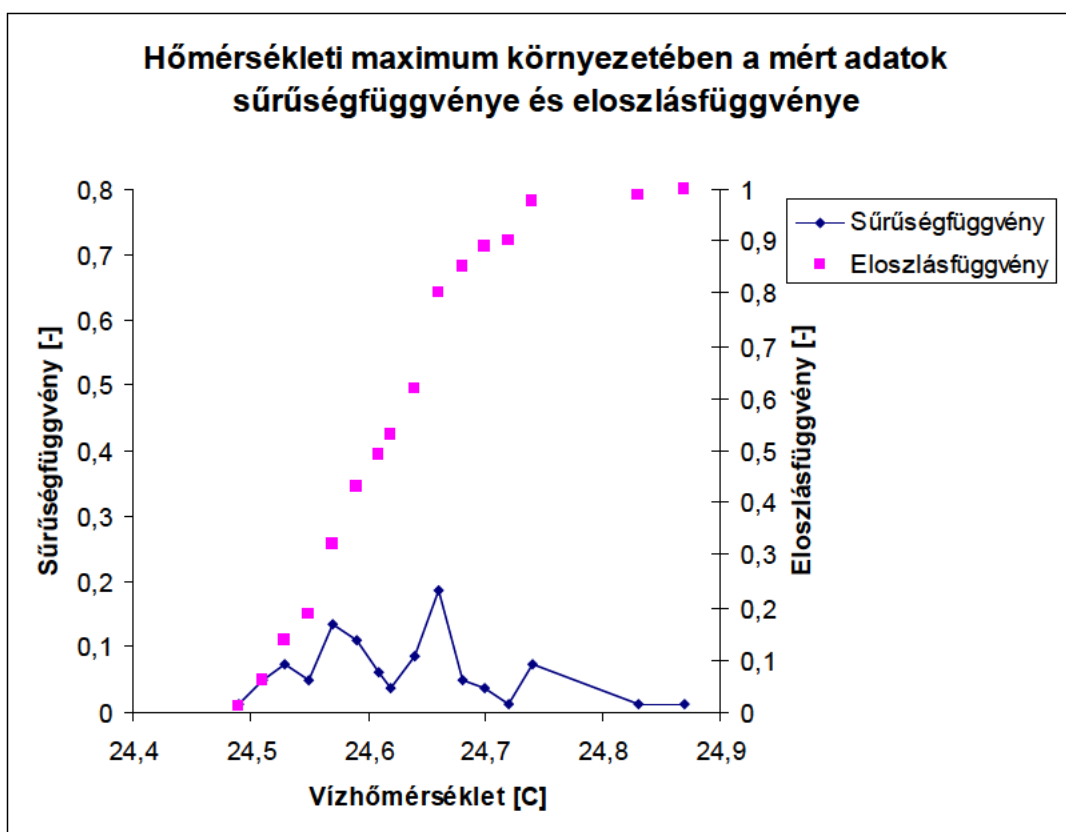
Korábbi tanulmányainkban már bemutatott „plató” jelenség (a part közeli sávban a hőmérséklet alig változik) arra enged következtetni, hogy egyenletes eloszlást feltételezzünk, majd különböző konfidenciaszintekhez határozzuk meg a hőmérsékletet, melyet a 3.3-as táblázat mutat.

T _{minta} [°C]	Konfidenciaszint				
	80%	90%	95%	98%	99%
Egyenletes eloszlás	24.21	24.56	24.71	24.79	24.83

3.3 táblázat A különböző konfidenciaszintek és a minta hozzájuk tartozó értékei (a csóva teljes tartományára)

A táblázatból látszik, hogy a 95 %, 98 % és 99 %-os konfidenciaszintekhez tartozó hőmérsékletek csak csekély mértékben különböznek egymástól.

A (2). esetben a maximumok környezetét vizsgáltuk meg. Ehhez a 24,5 °C-nál (a dunai háttérhőmérséklet 21,6 °C, lásd korábban) nagyobb vagy vele egyenlő hőmérsékleteket vettük ki a mérési sokaságból. A kiszűrt pontok száma mintegy ötödére csökkent. Meghatároztuk az így nyert adathalmazból a sűrűség- majd eloszlásfüggvényt. Az eredményeket a 3.4-es ábra mutatja.



3.4 ábra A detektált víz hőmérséklet idősor sűrűség- és eloszlásfüggvénye a maximum környékén

Statisztikai próbák alkalmazásával nem lehet egyértelműen meghatározni, hogy a homogénnek tekinthető minta minden konfidenciaszinten a normális eloszlást követné, ezért a kitüntetett hőmérsékletértékeket egyenletes és normális eloszlás mellett is meghatároztuk. (3.4 táblázat)

T _{minta} [°C]	Konfidenciaszint				
	80%	90%	95%	98%	99%
Egyenletes eloszlás	24.69	24.71	24.73	24.74	24.74
Normális eloszlás	24.73	24.78	24.82	24.87	24.9

3.4 táblázat A különböző konfidenciaszintek és a minta hozzájuk tartozó értékei (a maximumok környezetében)

Látható, hogy a kiválasztott sáv minta eloszlására tett feltételezés ebben az esetben csupán 0,07-0,16 °C-os változást okoz az egyes szintek értékei között. Egyenletes eloszlás feltételezésével szinte konstans értékeket kapunk. A 3.4 és 3.3 táblázatot összehasonlítva azt tapasztaljuk, hogy ha a csóva egészét vesszük figyelembe, akkor a különböző konfidenciaszintekhez alacsonyabb hőmérséklet értékek tartoznak, azaz a környezeti határérték betartásához más konfidencia szintet kellene előírni. Ennek az eltérésnek az oka, hogy a magas hőmérsékletű adatok nagyobb súllyal szerepelnek az utóbbi kiértékelésnél.

Ha összehasonlítást végzünk a 2008-as zárójelentés 3. függelékével, akkor láthatjuk, hogy az egymástól független mérések hasonló eredményre vezetnek. A két mérésorozat kiértékelésével a következő megállapításokat lehet tenni:

- Célszerű volt a kiértékelést a melegvízcsóva egészére illetve csak a maximumok környezetére elvégezni.
- A csóva egészére végzett mérésekből ki kell szűrni a szélsőértéket: (a) azokat az értékeket, ami a Duna háttérétől nem sokban különböznek (vagyis már nem tekinthető a csóva részének) és (b) a hajó fordulásából adódó, kis távon belüli többszörös mintavételt. Ez utóbbinál a GPS koordinátákból leolvasható a mintavétel helye, mely az adatok leválogatását és térbeli eloszlásának egyenletességét biztosítja.
- Az előző módon leválogatott mérési adatokból homogenitás és illeszkedésvizsgálat után a csóva egészét egyenletes eloszlásúnak foghatjuk fel és meghatározhatóak a különböző konfidenciaszintekhez a vízhőmérsékletek
- A maximumok környezetét figyelembe véve egyik mérésnél sem tudtuk egyértelműen meghatározni, hogy az eloszlás egyenletes vagy normális eloszlású.
- Mindkét mérési adatsor alapján megállapítható, hogy a csóva teljes egészére történő adott konfidenciaszint átlagosan alacsonyabb, mint a maximumok környezetében.

Az előző megállapításokból kifolyólag azt javasoljuk, hogy az expedíciós mérésből (melynek részleteit a következő fejezet tartalmazza), kísérleti jelleggel *a csóva teljes egészére végezzük el a kiértékelést, egyenletes eloszlás feltételezésével és határozzuk meg a 95 %-os konfidenciaszintet, majd vessük össze a határértékkel.* Ennek magyarázata, hogy a csóva teljes egészére vett adatsor minősége jobb, mint ha csak a bizonytalansággal terhelt maximumokat vennénk figyelembe és eddigi számításainkra alapozva a 95 %-os konfidenciaszinten az egyenletes eloszlást követve megbízható eredményt kapunk.

Összefoglalva, a korszerű statisztikai szemléletű monitoring eljárás alkalmas lehet a meghaladási valószínűség formájában megadott hőmérsékleti korlát betartásának ellenőrzésére, anélkül, hogy egyetlen, ismeretlen helyű, determinisztikus maximumot írna elő. Emellett a viszonylag rövid időt (egy-másfél órát) igénylő eljárás segítségével a maximum helye és hozzávetőleges értéke egyszerűen meghatározható. További előnyt jelent, hogy a határérték-szelvényen belül a mérés pontos helye nincs előre kijelölve, ezért a módszer megoldást jelent a monitoringgal kapcsolatos problémákra, például a vízállástól függően változó, rosszul megközelíthető partszakasz stb.

Az 1. sz. mellékletben két régebbi mérésre is el lett végezve a módszer.

4. KRITIKUS IDŐSZAKBAN VÉGZETT EXPEDÍCIÓS MÉRÉSEKRE VONATKOZÓ ELŐÍRÁSOK

Alapfeltevés, hogy a döntéstámogató rendszer operatívan működik, mely előrejelzi a hőmérséklet viszonyokat a határérték szelvényben. Ha itt fennáll a határérték túllépés veszélye, akkor dönteni kell az expedíciós mérések végrehajtásáról, melyhez az alábbi sorrendet javasoljuk:

1. A határértékszelvényben a víz hőmérsékletének meghatározása expedíciós méréssel (mérőhajó sebessége mintegy 0,5 m/s) két mélységben. (0,5 m és 1,5 m).
2. Mindkét mélységben a part-csóva határ-part sorozatból legalább ötöt végezzünk, hogy megfelelő számú adat álljon rendelkezésre.
3. A mérések helyeinek GPS koordinátákkal történő rögzítése. Az adathalmaz lehetőség szerint térben és időben is minél egyenletesebb legyen (különösen hajófordulóknál).
4. A hajó megfordulásakor, főleg ha sok időt vesz igénybe a hőmérséklet detektálását szüneteltessük.
5. Az összes mérési sorozatot lehetőleg rövid időintervallumon belül végezzük el, azért, hogy a mért értékek közel azonos hőterheléshez, Dunai háttér értékhez és azonos áramlási viszonyokhoz tartozzanak.
6. A mért értékek statisztikai kiértékelését a 3. fejezetben leírtak alapján végezzük el, a csóva egészére, egyenletes eloszlás feltételezésével. Javaslatunk szerint a 95 %-os konfidenciaszintet vetjük össze az előírt határértékkel.
7. Az eredményekről a Paksi Atomerőmű Zrt. tájékoztatja a hatóságot és azt javasoljuk, hogy honlapján keresztül a közvéleményt is

Budapest, 2010-10-01

Koncsos László
egyetemi tanár
tanszékvezető

Somlyódy László
egyetemi tanár
az MTA r. tagja

Melléklet 1

Statisztikai módszer alkalmazása régebbi mérések esetében

Alapja a melegvízcsóva +500 m-es határérték szelvényben végzett hőmérséklet mérései alapján egy egyenletes eloszlással való közelítés, majd a 95 %-os konfidenciaszinthez tartozó hőmérsékletérték meghatározása.

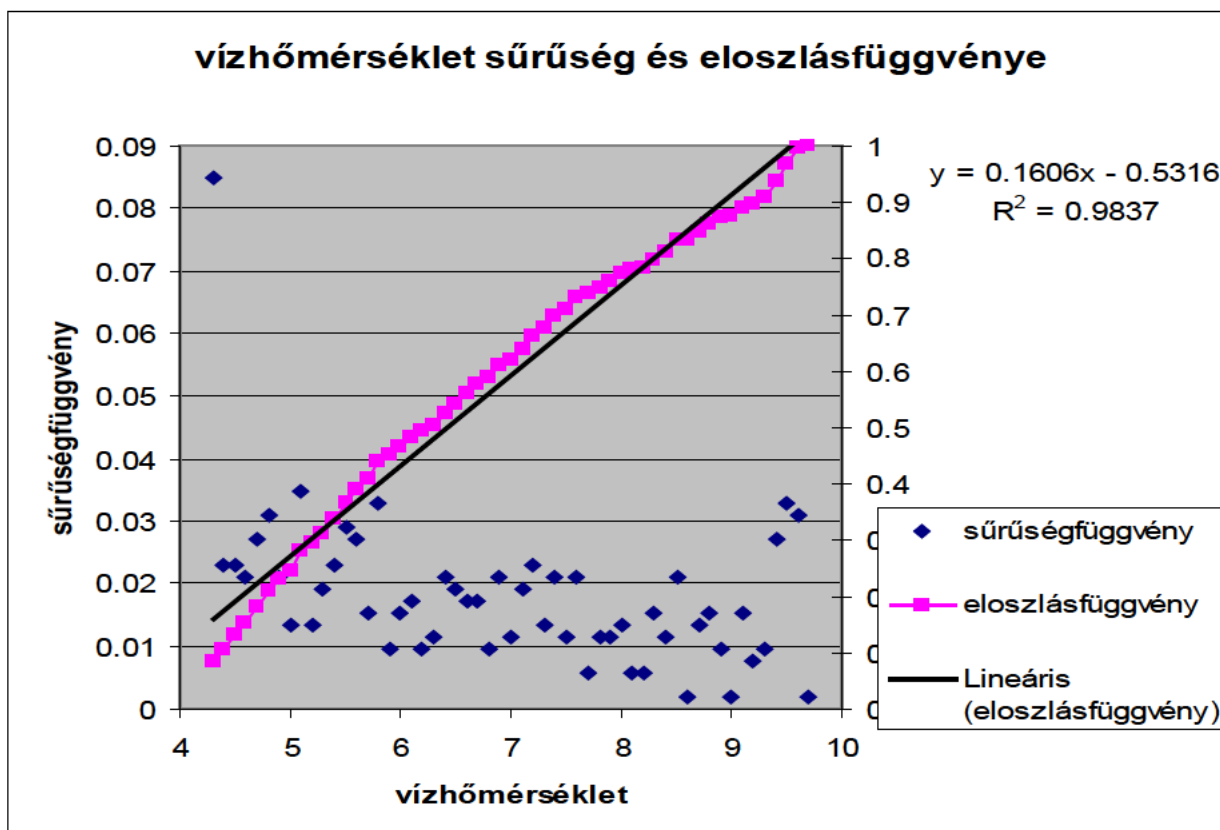
A régebbi mérések a +500 m –es szelvényben 10 függély mentén történtek, felszínen, fenéken és 1.5 m mélységben. A kijelölt függélyek közel egyenlő távolságra helyezkedtek el.

1. mért hőmérséklet adathalmaz sűrűség és eloszlás függvényének meghatározása
2. egyenletes eloszlás (lineáris regresszió) illesztése
3. 95 %-os konfidenciaszinthez tartozó hőmérséklet meghatározása

Gyakorlati szempontok alapján a hőmérsékletértékek tizedes pontossággal kerülnek meghatározásra.

I. 2007.11.29 mérés

95 % konfidenciaszinthez tartozó hőmérséklet: 9.4 °C



II. 2008.09.24. mérés

95 %-os konfidenciaszinthez tartozó hőmérséklet: 18.5 °C

