

## Az APR vizsgálati eljárás alkalmazhatósága atomerőművi gőzfejlesztő csövek esetében

Applicability of APR testing method in case of heat exchanger tubes of steam generators

Takács Csaba<sup>a</sup>, Spisák Bernadett<sup>b</sup>, Szávai Szabolcs<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Bay Zoltán Alkalmazott Kutási Közhasznú Nonprofit Kft., tudományos munkatárs, csaba.takacs@bayzoltan.hu

<sup>b</sup>Bay Zoltán Alkalmazott Kutási Közhasznú Nonprofit Kft., tudományos munkatárs, bernadett.spisak@bayzoltan.hu

<sup>c</sup>Bay Zoltán Alkalmazott Kutási Közhasznú Nonprofit Kft., osztályvezető, szabolcs.szavai@bayzoltan.hu

### Kulcsszavak

hőcserélő csövek,  
APR eljárás,  
gőzfejlesztő,  
roncsolásmentes vizsgálat,  
vizsgálati idő

### Keywords

pipes of heat exchangers,  
APR method,  
steam generator,  
non-destructive testing,  
testing time

### Absztrakt

Az ipari hőcserélők csövei jellemzően hosszú, vékony, kis falvastagságú csővezetékek, valamint a külső és a belső oldalán egyaránt érintkeznek valamilyen technológiai közeggel, amely a korróziós hatása révén károsíthatja őket. A hőcserélők csöveiben esetlegesen kialakuló lerakódások és eldugulások ronthatják a hőátadási folyamatokat, a korróziós folyamatok pedig a csővezeték átlukadásához is vezethetnek. Ennek elkerülése érdekében kiemelten fontos a hőcserélők integritásának ellenőrzése és megőrzése. A közelmúltban kifejlesztésre került az APR (Acoustic Pulsed Reflectometry - Akusztikus Válaszviszhang Módszer) roncsolásmentes vizsgálati eljárás, amely módszerrel a hőcserélők csővezetékeinek vizsgálata nagyon rövid időn belül nagy biztonsággal elvégezhető.

### Abstract

The tubes of industrial heat exchangers are typically long, thin, thin-walled tubes, and they are in contact with a process medium on both the outside and the inside, which can damage them through corrosion. Possible deposits and blockages in the tubes of heat exchangers can impair heat transfer processes, and corrosion processes can lead to pipeline perforation. To avoid this, it is of crucial importance to maintain the integrity of heat exchangers. Recently, APR (Acoustic Pulsed Reflectometry) non-destructive testing method has been developed, in order to inspect pipes of heat exchangers with reliable results in short time.

## 1. Bevezetés

A hőcserélők az eltérő technológiai közegek hűtése és előmelegítése következtében jelentős szerepet töltenek be a különböző iparterületeken, így a nukleáris iparban is. A hőátadó felület maximalizálása és az optimális hőátadási viszonyok elérése érdekében az ipari hőcserélők jellemzően nagy számú, külön-külön kis átmérőjű és falvastagságú, nagy hosszúságú csövekből állnak. Ennek következtében a hőcserélő csövek eltömődésre, valamint külső és belső korróziós károsodásra egyaránt hajlamosak, integritásuk megőrzése kiemelt fontosságú. A nukleáris iparban a primer- és szekunderköri technológiai víz közötti hőcsere a gőzfejlesztőkben történik, ennek következtében a gőzfejlesztők is hőcserélőnek tekintendők. A gőzfejlesztők hőcserélő csöveinek örvényáramos vizsgálata az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. (továbbiakban: Paksi Atomerőmű) esetében időszakosan megtörténik, amelynek során a csővezetékek 50%-a kerül vizsgálatra. Az örvényáramos vizsgálat jól alkalmazható roncsolásmentes vizsgálati eljárás a gőzfejlesztő csöveinek vizsgálatára, azonban nagy szakértelmet igényel, valamint időigényes vizsgálat, ennek következtében a hőcserélők csöveinek vizsgálatának időtartalma is jelentősen csökkenthető, amennyiben az örvényáramos vizsgálatok kiválthatók vagy kiegészíthetők más fajta roncsolásmentes vizsgálati eljárással, továbbá ez a vizsgálati eljárás szintén képes nagy biztonsággal, rövidebb vizsgálati idő mellett kimutatni a hőcserélő csövek esetleges anomáliáit.

A közelmúltban kifejlesztésre került az APR vizsgálati eljárás, amelynek során a vizsgáló készülék magas frekvenciatarományba tartozó hangok gerjesztésével és elemzésével dolgozik. A módszert kifejezetten a kis átmérőjű csővezetékek állapotának meghatározására, így a hőcserélő csövek vizsgálatára fejlesztették ki. A hőcserélő csövekbe helyezett szonda tartalmaz egy hanggenerátort és egy hangérzékelő egységet (mikrofont). A hanggenerátor

által gerjesztett hang a cső hosszától, átmérőjétől, és a benne lévő közeg anyagától (leürített állapotban levegő) függően változhat. A csőben kialakul egy nyomóhullám, melynek hullámhosszát, frekvenciáját, valamint felharmónikusainak tulajdonságait elemzi a készülék. A frekvencia annak függvényében változik, hogy milyen hosszúságban tud a csővezetékben kialakulni a nyomóhullám. Az állandó hosszúságú hőcserélő csővezeték esetében pedig az abban kialakuló nyomóhullám hossza és frekvenciája is állandó, csak abban az esetben változik, ha valamilyen anomália van a csővezetéken.

A vizsgálati technikát jelenleg is alkalmazzák különböző ipari hőcserélők időszakos ellenőrzésére. Annak eldöntése érdekében, hogy a módszer alkalmazható-e a nukleáris ipari gőzfejlesztők csöveinek vizsgálatára, demonstrációs vizsgálatot végeztünk a Paksi Atomerőmű Karbantartási Gyakorló Központban található gőzfejlesztő primerköri csővezetékein, jelen cikkben az említett vizsgálat eredményei kerülnek bemutatásra az eljárás részletesebb ismertetése mellett.

## 2. Az APR vizsgálati eljárás ismertetése

Az APR vizsgálat célja olyan hibák felderítése, lokalizálása és azonosítása, mint például a falon áthaladó lyukak, a lyukadás és/vagy erózió miatti belső falveszteség, valamint a cső teljes vagy részleges eltömődése. A vizsgálati technika nem feltétlenül hatékony a szűk határokkal rendelkező repedések felderítésében.

A hőcserélők vagy kazáncsővek APR eljárással történő ellenőrzéséhez 3 komponensre van szükség: az akusztikus impulzusok forrására (adó), az akusztikus hullámok vevőjére (vevő) és az ellenőrizendő elemre (cső). A vizsgálati technológia a hanghullámokat a vizsgált csőben lévő levegőn keresztül generálja, majd érzékeli a diszkontinuitások és/vagy elzáródások által keltett visszaverődéseket. A kezdeti fázis (pozitív vagy negatív) és a visszavert

akusztikus hullám alakjának elemzése a visszaverődést okozó indikáció típusának azonosítására szolgál. Ha megfelelő jel- és adatelemzési módszereket dolgoznak ki, az APR-technológia alkalmazható a hiba/elzáródás jelzések méretezésére. A belső átmérő keresztmetszetének ilyen változásait okozhatják a csőben lévő akadályok, a cső belső átmérőjének megnövekedése belső korróziós falvesztés következtében, az átmenő falyukak, de akár a csőben bekövetkező szerkezeti eltérések is, mint például az U-ív, a cső csőlemezre való hengerlése, a cső vége, stb.

A keletkező visszaverődések mérhetőek és elemezhetőek, és a jelek értelmezéséből megállapítható, hogy a cső belső átmérőjének keresztmetszeti egységében vannak-e folytonossági zavarok, továbbá meghatározhatók ezek típusa, helyzete és mérete.

## 2.1 Az APR eljárás fizikai alapjai

A levegőben az akusztikus hullámok longitudinális irányban terjednek, tehát a részecskék sebessége párhuzamos a hullám terjedési irányával. A szabad térben az akusztikus hullámok minden irányban terjedhetnek, azonban egy zárt térben, például egy csőben, amelynek keresztirányú méretei a minimális hullámhosszhoz képest kicsik, az ilyen hullámok kizárólag a cső tengelye mentén terjednek.

Egy bizonyos "határfrekvenciáig" a csőben terjedő hullám síkhullámnak tekinthető, azaz a hullámfrontok laposak, és a nyomásingadozás egyenletes a cső keresztmetszetében. Ez a fajta hullám a legkönnyebben mérhető hullám, mivel elegendő a keresztmetszet egy pontján mérni. A határfrekvencia felett magasabb rendű terjedési módok gerjesztődnek. Ezek a módok eltérő hullámsebességgel rendelkeznek, ráadásul létrejöttük hatására a nyomás már nem lesz egyenletes a keresztmetszetben. Ezeket a módokat már nehéz szabályozható módon gerjeszteni és mérni, ezért az APR-rendszerekben általában kerülni szokták őket. A síkhullám terjedési módot a legalacsonyabb rendű módnak is nevezik. Az első magasabb rendű mód határfrekvenciáját az (1)-es egyenlet adja meg:

$$1,84 \cdot \frac{c}{\pi \cdot d}, \quad (1)$$

ahol  $c$  a levegőben történő hangsebesség, és  $d$  a cső belső átmérője. Ebből jól látható, hogy ezt a frekvenciát a cső átmérője és a hangsebesség határozza meg, és a cső szélesedésével egyre alacsonyabb lesz. A magasabb rendű módok okozta nehézségek elkerülése érdekében az APR-rendszereket általában úgy tervezik, hogy olyan gerjesztő jelet hozzanak létre, amely maximális frekvenciája e határérték alatt van.

A csőben terjedő akusztikus hullámok a cső falán fellépő súrlódás miatt csillapodnak. A Kirchoff [1] által felfedezett, majd később Keefe [2] által matematikailag jobban kezelhető közelítésben megfogalmazott csillapítási egyenletek szerint a csillapítás elsősorban a hullámhossz és a csőátmérő arányától függ. A csillapítás a frekvenciával nő, ezért a cső egyik végén gerjesztett széles sávú impulzus fokozatosan elveszíti magas frekvenciájú tartalmát, és idővel

fokozatosan ellaposodik.

Az akusztikus hullámok egy egyenes csőben végighaladnak a csövön, és csak a korábban leírt fokozatos csillapítást érzékelik. A cső keresztmetszetének bármilyen belső változása azonban a hullámot két komponensre osztja: egy visszavert és egy áteresztett komponensre. Többféle keresztmetszet változás fordulhat elő: a keresztmetszet növekedése a falvesztés, vagy a falon áthaladó lyuk miatt, és a keresztmetszet csökkenése a teljes vagy részleges eltömődés miatt. Ha a legalacsonyabb rendű móddal foglalkozunk, csak a teljes keresztmetszet változása van hatással a visszavert és az áteresztett hullámra, az indikáció alakjától nem függ. Lyukadás esetében például a lyuk területe határozza meg a tükröződést, és lényegtelen, hogy kerek vagy hosszúka alakú. Ugyanez érvényes a keresztmetszet csökkenésére is - nincs jelentősége annak, hogy az lokalizált vagy egyenesen oszlik el a cső kerületén.

A keresztmetszet hirtelen változása által okozott reflexió és transzmisszió könnyen modellezhető a reflexió és transzmissziós együtthatókon keresztül. Adott egy hullám, amely egy  $S_1$  keresztmetszetű csőben terjed, majd egy  $S_2$  keresztmetszetű csővel találkozik, az  $R$  visszaverődési együttható ebben az esetben a következőképpen határozható meg [3]:

$$R = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} \quad (2)$$

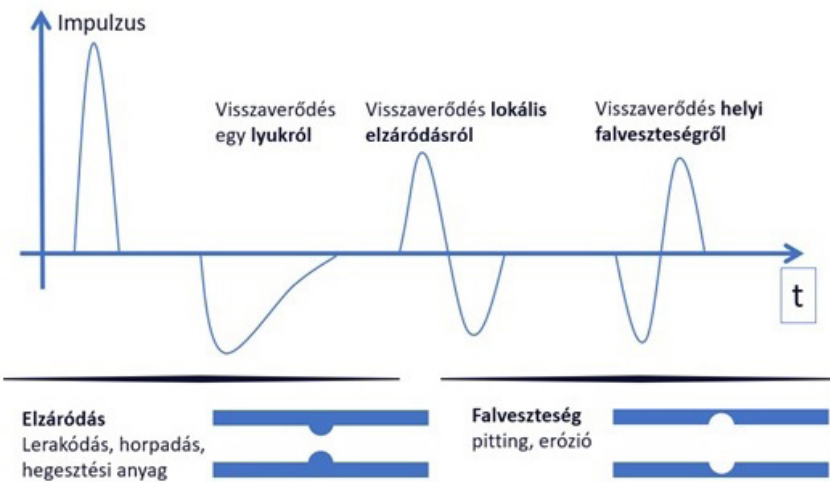
és az átviteli együttható  $T$ :

$$T = \frac{2 \cdot S_1}{S_1 + S_2}. \quad (3)$$

A (2)-es egyenletből látható, hogy a keresztmetszet növekedése ( $S_2 > S_1$ ) negatív, míg a keresztmetszet csökkenése ( $S_2 < S_1$ ) pozitív visszaverődést okoz. A hőcserélő csövekben az olyan tipikus hibák, mint az eltömődések és a falvesztések a keresztmetszet lokális változásait okozzák. Egy tipikus eltömődés két egymást követő szakadástól áll: (a) a keresztmetszet csökkenése az eltömődés kezdeténél és (b) a névleges keresztmetszethez való visszatérés ott, ahol az eltömődés véget ér. A falvesztéses hiba ennek az ellenkezője: a keresztmetszet növekedése, majd csökkenése. Továbbá a visszavert impulzus amplitúdóját az  $R$  reflexió együttható értéke határozza meg, így az  $S_2$  meghatározására is használható, ha  $S_1$  ismert. E hibák elméleti jeleit az 1. ábra mutatja be.

A (2)-es egyenletből arra lehet következtetni, hogy az eltömődés és a falvesztés hibáiból származó visszaverődések tipikus jelekkel rendelkeznek. Feltételezve, hogy egy pozitív impulzust bocsátunk ki a csőbe, amikor az elzáródással találkozik, először pozitív visszaverődést okoz, amelyet negatív követ, míg a falvesztés hibája ennek ellenkezőjét okozza: negatív impulzust, amelyet pozitív követ.

Az 1. ábrán látható impulzusok a gerjesztő impulzus sematikus képét mutatja. Az APR-rendszer axiális felbontásának növelése érdekében az ideális impulzus a lehető legkeskenyebb kellene, hogy legyen. Ennek oka, hogy



1. ábra: A leggyakoribb hibák elméleti jellemzői [4]

meg kell különböztetni a közeli hibákból származó visszaverődéseket. Ha például az impulzus túl széles, akkor az eltömődés elejéről származó pozitív visszaverődés összeolvadhat az eltömődés végéről származó negatív visszaverődéssel, és így gyakorlatilag nagy részben kioltják egymást. Az alapvető Fourier-elmélet szerint ahhoz, hogy az időtartományban keskeny impulzust kapjunk, annak spektrumának a lehető legszélesebbnek kell lennie. A sáv szélesség tényleges korlátját az impulzust létrehozó fej és az (1)-es egyenletben szereplő első határfrekvencia határozza meg. A vizsgálatokhoz a Sonic V APR mérőberendezést alkalmaztuk. Ennek a rendszerében az impulzus spektruma körülbelül 8 kHz-ig terjed, amely azt jelenti, hogy a 2 cm-nél kisebb távolságban lévő hibák nem különböztethetők meg egymástól. Ezenkívül a felbontás a csillapítás miatt fokozatosan csökken a csőben haladva, mivel a magasabb frekvenciák gyorsabban lecsengenek, mint az alacsonyabb frekvenciák. Így a távolabbi hibák visszaverődései az időtartományban ellaposodnak.

## 2.2 A gerjesztő impulzus optimalizálása

Egy gyakorlati APR-rendszerben, mint minden fizikai rendszerben, mindig jelen van a háttérzaj. A zaj által okozott zavarok számszerűsítésére szolgáló általános mérőszám az SNR (Signal to Noise Ratio – jel és zaj aránya), amely egyszerűen a jel RMS (Root Mean Square, négyzetes közép) értéke osztva a zaj RMS értékével. Mivel sok jelnek nagyon széles a dinamik tartománya, a jeleket gyakran logaritmikus decibel skálával fejezik ki. A jel és a zaj decibelben (dB) a következőképpen fejezhető ki:

$$\text{SNR}[\text{dB}] = 20 \cdot \log\left(\frac{A_s}{A_n}\right), \quad (4)$$

ahol  $A_s$  a jel (signal),  $A_n$  a zaj (noise) nagyságát jelöli. A 0 dB-nél nagyobb vagy 1:1-nél nagyobb arány szintén több jelet jelent, mint zajt. Az SNR növelése érdekében az átlagos jelamplitúdót a lehető legnagyobb mértékben növelni kell, bár az elérhető értéknek gyakorlati korlátjai vannak. Az impulzusszélesség növelése az egyik

lehetőség, azonban mint fentebb láttuk, ez hátrányosan hat a felbontásra. Egy másik lehetőség az impulzusmagasság növelése, bár az erősítő és a vizsgálófej képességei ezt a lehetőséget is korlátozzák.

A gőzfejlesztő hőcserélő csöveihez használt Sonic V vizsgáló berendezés egy másik módszert alkalmaz, amely egyesíti a mérés többszöri megismétlésének előnyeit, mégis néhány másodpercre csökkenti a mérési időt. Ez a módszer egy "maximális hosszúságú szekvenciának" (MLS – Maximal Length Sequence) nevezett jel használatán alapul, amely egyfajta álzaj, s mely kizárólag +1 vagy -1 értékekből áll [5]. Az MLS-szekvenciák elmélete jól ismert, és más alkalmazásokban is használják. Egy MLS sorozat mindig  $2N-1$  hosszúságú, ahol  $N$

egy egész szám. Például, ha  $N=10$ , akkor a szekvencia 1023 minta hosszúságú lesz, és egy tipikus 48 kHz-es mintavételi frekvencia mellett mindössze 23 ezredmásodpercet vesz igénybe az átvitel.  $N=14$  esetén a szekvencia 16384 minta hosszúságú lesz, és az átvitel körülbelül 1/3 másodpercet vesz igénybe. Az  $N$  értéke a Sonic V rendszerben szoftveresen kiválasztható. Az alapbeállításban  $N$  13-mal egyenlő, a mérés többszöri megismétléssel is a teljes mérési idő pár másodperc.

Az impulzusválasz kinyerése a mért MLS-jelből korrelációs számítást igényel. Matematikailag ez egy lineáris művelet, és így a rendszerben bármilyen nemlineáris torzítás hamis csúcsokat hoz létre az eredményül kapott jelben, amelyeket hibaként lehet félreértelmezni. Ebből adódóan nagyon fontos, hogy a nemlineáris torzításokat a lehető legkisebbre csökkentsük. Az ilyen torzításokra legérzékenyebb komponens a vizsgálófejben lévő adó, amely nagy amplitúdók esetén nemlineáris válik. Ezért a gerjesztő jellel szemben két ellentétes követelmény áll fenn: egyrészt előnyös a jel amplitúdójának növelése az SNR növelése érdekében, másrészt azonban a túl nagy mértékű növelése nemlineáris torzításokhoz vezet. Az optimális amplitúdó az, amelynél a nemlineáris zaj és a háttérzaj egyensúlyban van, ezáltal az SNR optimális értéke érhető el.

## 3. A Sonic V vizsgáló eszköz bemutatása

A demonstrációs vizsgálat során a Sound Wave Inspection Systems által kifejlesztett Sonic V rendszert alkalmaztuk az APR vizsgálatok elvégésére, amely rendszer egy innovatív, nem traverzáló technológiát alkalmaz a csövek belső átmérőjének az ellenőrzésére. Célja, hogy rendkívül gyors és pontos eredményeket szolgáltatson a mai kihívást jelentő üzemeltetési munkákhoz az olaj- és gázipar, az vegyipar, az energiatermelés és más szomszédos iparágak számára. Az APR módszerrel működő rendszert úgy tervezték, hogy csőformától és anyagtól függetlenül minden csőtípusban az összes belső felületi hibát érzékelni tudja. A Sonic V egy fejlett, mégis könnyen kezelhető eszköz, amely sokkal kevesebb kezelői



követelményt és minimális képzést igényel a rendkívül hatékony ellenőrzés érdekében. Az eszköz könnyű, kis mérete miatt jól hordozható, akkumulátorral működik, továbbá mivel nem rendelkezik kábelekkel és kalibráló csövekkel, a Sonic V egyszerűen kezelhető. Ha szükséges, akkor akár egy teljes csőrendszer rövid idő alatt ellenőrizhető, mivel rendkívül gyors az eszköz adatgyűjtése.

A termék magában foglalja a 2. ábra által szemléltetett elemeket, ide sorolható maga a Sonic V mérőberendezés, a két Li-ion akkumulátor és a hozzájuk tartozó külső töltő, a hálózati töltő, amely tápegységként (akkumulátorral/akku nélkül) vagy külső töltőként is használható, illetve az adapterek.



2. ábra: Sonic V részei [6]

A csomag összesen 13db különböző méretű adaptert tartalmaz, amelyek segítségével 6mm-től 52mm belső átmérőig minden csőméret vizsgálható. Ezek kialakítását a 3. ábra mutatja be.

A berendezés működési elvét a 4. ábra szemlélteti. Erről jól leolvasható, hogy a mérőeszköz adaptere egyszerre két feladatot lát el, az adó és a vevő szerepét. Első lépésben megtörténik az akusztikus impulzus jel bejuttatása a



3. ábra: Adapter méretváltózatok [6]



4. ábra: Sonic V működési elve [4]

csőbe. A hibákról visszaverődött jeleket a vevő detektálja és rögzíti, a későbbiekben pedig algoritmusok segítségével a belső átmérőn található hibák helye, típusa és mérete meghatározható.

### 3.1 A Sonic V vizsgáló berendezés előnyei és korlátjai

Ideális esetben egy csőellenőrzési technikának több kulcsfontosságú tulajdonsággal kell rendelkeznie: rendkívül fontos a nagy érzékenység és pontosság, ugyanakkor a kezelőtől függetlenül magas szintű konzisztenciát kell biztosítani. A rendszer kialakításának lehetővé kell tennie a rövid vizsgálati időt, miközben objektív és rendkívül következetes adatértelmezési kritériumokat kell biztosítani, és a csőanyagok és -méretek széles skálájára alkalmazhatónak kell lennie. Végezetül a rendszer megfelelő és következetes alkalmazásához minimális műszaki ismeretekre és tapasztalatra van szükség.

Ezeknek megfelelően a Sonic V APR-rendszer kifejlesztése során számos alapelvet figyelembe vettek a technológiai döntéseknél:

1. Nem szükséges a csővezeték belsejében szondával végighaladni
2. Csőenkénti rövid vizsgálati idő
3. A hőcserélők csőveiben jellemzően előforduló összes belső felületi hiba felderítése
4. Minimális érzékenység a cső anyagára, méreteire és konfigurációjára
5. Minimális függés a kezelő megítélésétől

Ezen berendezés számos előnnyel rendelkezik:

- Nagy sebességű vizsgálat:
  - A csőenként 10 másodperces vizsgálat 100%-os lefedettséget tesz lehetővé a mintavételezéssel szemben ugyanannyi rendelkezésre álló vizsgálati idő alatt
  - A leggyorsabb szivárgásérzékelő eszköz például vészleállások során
- Számos cső típusra alkalmazható:
  - Nem függ az anyagtól: APR-rel bármilyen anyag vizsgálható (ferromágnes, nem ferromágnes, grafit, műanyag)
  - Nem függ a cső alakjától (beleértve az egyenes, az U-alakú, a spirál-, lamellás ventilátorcsöveket stb.)
  - Nagy átmérőjű csövek, például kazánok is vizsgálhatók vele (maximum 52mm-ig)
  - Bonyolult geometriák esetén is alkalmazható
- Nagyon érzékeny a lyukakra és az elzáródásokra (a lyukaknak és a falvesztésnek külön jelei vannak), ezáltal könnyen kimutatja ezen hibákat. Képes érzékelni a különböző falvesztési hibákat (erózió, korrózió, pitting)
- Könnyű használat:
  - Az adatgyűjtés elvégezhető egy minimális képzéssel rendelkező kezelő által
  - Következetes, megismételhető eredmények
  - Automatikus csőlemez-térképezés
  - Automatizált mérési folyamat, nem függ a kezelőtől

- Képes az eltömődések számszerűsítésére.
- A hanghullámokat "virtuális érzékelőként" használja a nem áthaladó vizsgálatához. Nincsenek olyan alkatrészek, amelyek megakadhatnak, megsérülhetnek, illetve a vizsgált berendezést se károsítja
- Akkumulátorral és hálózatról is működtethető
- Nincs szükség fogyóeszköz készletre vagy etalonokra

A Sonic V érzékelési korlátait az alkalmazott impulzus jellege, elsősorban a legmagasabb frekvenciájú spektrumkomponens határozza meg, amely a rendszer felbontását is megszabja. A Sonic V vizsgáló rendszer esetében ez a felbontás 20 mm és 30 mm között van. Ez azt jelenti, hogy két azonos típusú indikáció közötti tengelytávolságnak nagyobbnak kell lennie, mint a rendszer felbontása ahhoz, hogy ezeket a hibákat különálló indikációként lehessen felismerni. Ellenkező esetben egy indikációként lesznek azonosítva, ahol a keletkező jel mérete a hibaméreték szuperpozíciójaként fog megjelenni. Továbbá, mivel az APR rendszer által használt hullámok lapos frontúak, a rendszer nem rendelkezik kerületirányú felbontással, és nem lehet meghatározni az észlelt indikáció szöghelyzetét. A vizsgáló berendezés további korlátjai a következők:

- Cső hossza:
  - A csövek 20 m-ig ellenőrizhetők
  - Ha a csövek hosszabbak, mindkét oldalról el kell végezni a vizsgálatot
- Nem képes a tisztán külső hibák és repedések észlelésére
- Az összesített vizsgálati eredmény a csövek tisztaságának szintjétől függ
  - Általában az alkalmazástól függően az örvényáramos vizsgálatához elvégzett csőtisztítás megfelelő tisztaságot biztosít
  - Ha a tisztítás idő és/vagy a költség miatt nem megoldható, akkor a csöveket mindenképpen levegővel át kell fúvatni, hogy a lyukakat és az eltömődéseket detektálni lehessen
  - A falvesztési hibák nem kerülnek kimutatásra a szennyezett csövek esetében
- Kisebb pontosság a kis falvesztéses hibák (pitting) méretezésénél
- Nem biztosít kerületirányú felbontást

Az indikációk észlelési korlátait a különböző hibatípusok esetében az 1. táblázat tartalmazza.

**1. táblázat:** APR észlelés korlátjai a hiba típusától függően

Hiba típusa	APR észlelés alsó határai
Falon átmenő lyukak	0,5 mm-nél nagyobb átmérő (egyes esetekben kisebb) észlelhető
Belső falvesztéses	a falvastagság 20 %-ánál nagyobb falvesztéses, ahol a hiba átmérője nagyobb, mint 5 mm
Elzáródások	Belső keresztmetszeti terület nagyobb vagy egyenlő, mint 5 % (egyes esetekben kisebb)

#### 4. A Paksi Atomerőműben végzett demonstrációs vizsgálatok bemutatása

A demonstrációs APR vizsgálatokat a Paksi Atomerőmű Karbantartási Gyakorló Központjában található gőzfejlesztőn végeztük el. Az atomerőművi gőzfejlesztők olyan speciális hőcserélők, ahol a hőátadás az energiát termelő fűtőelemekkel érintkező, radioaktív primerkörü technológiai víz és a turbinák felé áramló, nem radioaktív szekunderkörü víz között történik meg.

A gőzfejlesztő szénacélból készült, fekvő elrendezésű hengeres hőcserélő, „U” alakú hőátadó csőkötegekkel, beépített gőzseparáló szerkezetekkel, tápvízelosztó rendszerrel és gőzkollektorral. A primerkörü bóros víz a hőátadó csöveken belül áramlik, a telített gőz fejlesztése a szekunder oldalon a csövek közötti köpenytérben megy végbe [5].

A gőzfejlesztő hőátadó felülete 5536 db, átlagosan kb. 12,5 m hosszú U-alakú, vízszintesen elhelyezett, 08H18N10T típusú korrózióálló acél csőből áll, amelyeknek külső átmérője Ø16 mm, falvastagsága pedig 1,5 mm. A gőzfejlesztő legfontosabb tervezett üzemi paramétereit a 2. táblázat tartalmazza.

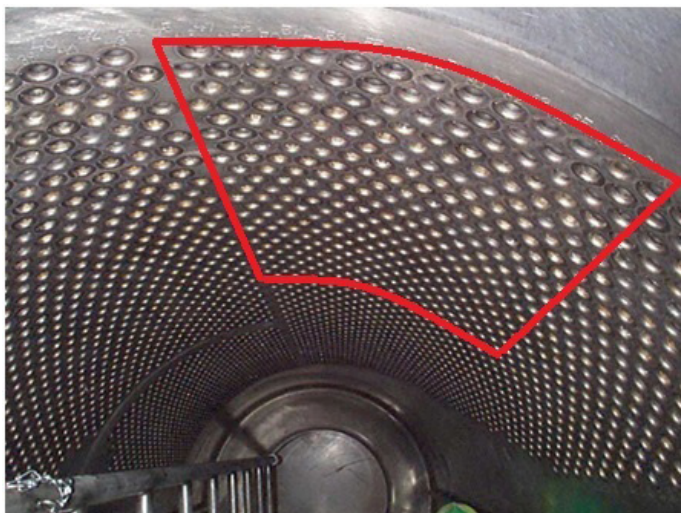
**2. táblázat:** A gőzfejlesztő legfontosabb tervezett paramétereit [6]

Megnevezés	Érték
Gőztermelés [t/h]	~490
A primerkörü hőhordozó hőmérséklete a gőzfejlesztőbe történő belépéskor [°C]	298
A primerkörü hőhordozó hőmérséklete a gőzfejlesztőből való kilépéskor [°C]	270
A primerkörü hőhordozó nyomása [MPa]	12,3
A gőz nedvességtartalma a gőzfejlesztő kimenetén [%, max.]	0,25
A gőzfejlesztő szekunderkörü folyamatos lefűtatásának mennyisége (a gőztermelés %-ban) [%]	0,5
A gőzfejlesztő hőátadó felülete [m <sup>2</sup> ]	2578,6
A tápvíz hőmérséklete [°C]	223
Szekunderkörü tervezési nyomás [MPa]	5,65
Primerkörü tervezési nyomás [MPa]	13,7
Szekunderkörü tervezési hőmérséklet [°C]	270

Ahogy a 2. táblázat szerint is látható, a primerkörü hőhordozó üzemi nyomása jelentősen meghaladja a szekunderkörü víz tervezési nyomását, ennek következtében a csővezetékek átlukadása esetében a radioaktív primerkörü víz a szekunder körbe áramlana, amely az üzemzavari védelmi mechanizmusok elindulásához és nem tervezett blokkálláshoz vezethetne.

Ennek az elkerülése érdekében bizonyos időközönként megtörténik a gőzfejlesztő hőcserélő csöveinek örvényáramos felülvizsgálata, amely azonban időigényes vizsgálati eljárás. Ennek csökkentése érdekében került sor az APR vizsgálatra a gőzfejlesztő 527 db csővezetékéből álló, felső szegmense esetében. A gőzfejlesztő vizsgált szegmensét az 5. ábra mutatja.

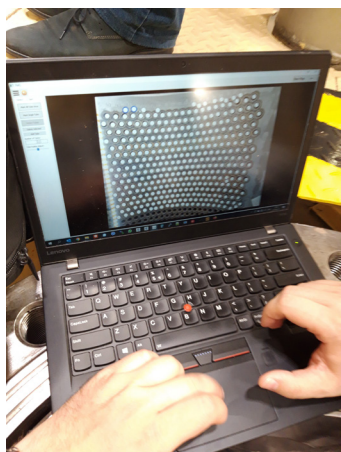




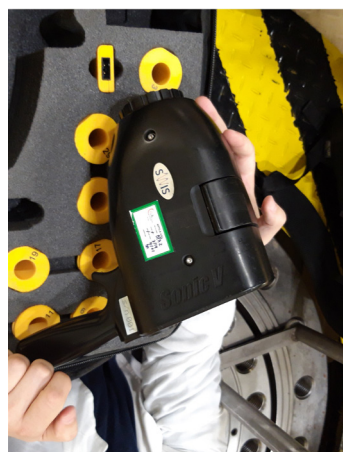
5. ábra: A primerköri gőzfejlesztő kollektor vizsgált szegmense



8. ábra: A gőzfejlesztő hőcserélő csöveinek APR vizsgálata



6. ábra: A térképezés folyamata



7. ábra: Az APR vizsgáló berendezés

## 5. Az elvégzett demonstrációs APR vizsgálatok bemutatása

Az APR vizsgálatot az előzőekben ismertetett gőzfejlesztőn 2022. szeptember 27-én végeztük el a gőzfejlesztő 527 db primerköri csővezetékén, amelyek a gőzfejlesztő felső szegmensén helyezkedtek el, mivel ezeknek a csővezetékeknek az esetében lehetett számítani a legnagyobb valószínűséggel valamilyen fajta, az APR vizsgálati eljárással detektálható károsodásra. Ezen felül ezek a csővezetékek voltak a legkönnyebben hozzáférhetőek is.

Az APR vizsgálat megkezdése előtt a csövekbe beilleszthető tapintós hőmérővel megtörtént a csővezetékek belső hőmérsékletének a meghatározása, mivel a vizsgálati hőmérséklet befolyásoló tényező lehet a vizsgálati eredményére. A csővezetékek belső hőmérséklete a vizsgálatok időtartama alatt 23 °C volt, amely szobahőmérsékletű vizsgálatnak felel meg. Az APR vizsgálatok elvégzése a vizsgált szegmensről készülő térképezéssel, valamint a csővezetékek legfontosabb alapadatainak a megadásával kezdődött. A vizsgálatok elvégzése a SONIC V vizsgáló készülékkel történt, amelynek fontosabb tulajdonságai a korábbiakban már ismertetésre kerültek. A térképezés

laptopon történő elvégzését a 6. ábra, a vizsgáló készüléket, valamint a különböző csőátmérőkhöz tartozó adaptereket a 7. ábra, az APR vizsgálat elvégzését pedig a 8. ábra szemlélteti.

A vizsgálatok elvégzése a következő küszöbértékek mellett történt:

- Dugulásos keresztmetszet csökkenés: 5,0 %,
- Lokális eróziós vagy pitting korróziós falvesztés: 20,0 %.

### 5.1 A vizsgálatok eredményei

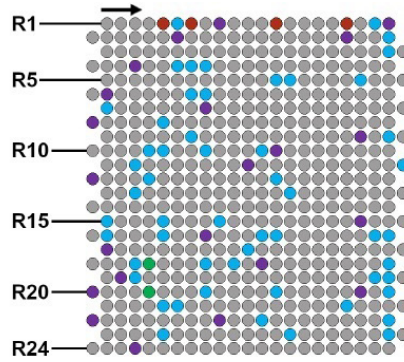
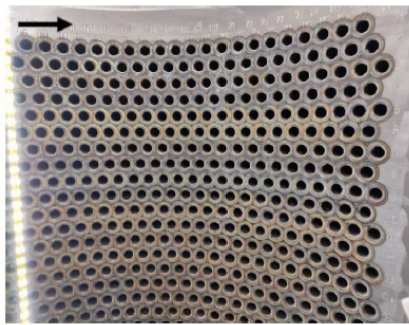
Az elvégzett APR vizsgálatok eredményei alapján a gőzfejlesztő vizsgált szegmensén dugulás 22 csővezeték esetében volt detektálható, amelyek közül 7 esetben a csővezeték teljes eldugulása volt megállapítható. Ezen felül korróziós falvesztés 58 csővezeték esetében volt kimutatható, ezek közül 56 esetben a falfogyás mértéke 20 és 40 % közé, míg 2 csővezetéknel 41 és 60 % közé esett. 4 csővezeték esetében teljes átlukadás volt detektálható.

A gőzfejlesztőn elvégzett vizsgálatok eredményeit a 9. ábra mutatja, ahol a szegmens bal felső sarkában látható nyíl a csővezetékek vizsgálati irányát, az R (Row) a csővezeték sorának a számát, a jelmagyarázatban a bal oldalon szereplő számok pedig az érintett csővezetékek darabszámát jelentik.

### 5.2 Az eredmények értékelése

Ugyan az APR vizsgálat érzékeny a csővezetékek tisztaságára, a vizsgált gőzfejlesztő csövei megfelelő tisztaságúak voltak, a vizsgálat gördülékenyen elvégezhető volt, egy csővezeték esetében sem volt szükség utólagos tisztításra és ezt követően a vizsgálat megismétlésére. Azoknak a csővezetékeknek az esetében, ahol eldugulás volt detektálható, egy konkrét helyről érkezett dugulásra utaló indikáció, míg a nem megfelelő tisztaságú csővezetékek esetében nagy területen lehetne detektálni lerakódást.

A mérések elvégzése előtt a vizsgálatra való felkészülést valamelyest lassította, hogy a csővezetékek pozícióját a berendezéshez tartozó szoftver nem volt képes automatikusan felismerni, mivel a csővezetékek egymáshoz képesti



0	●	Eldugózott	56	●	20% < falvesztés < 40%
0	○	Nem vizsgált	2	●	40% < falvesztés < 60%
445	●	Nem detektált hibát	0	●	60% < falvesztés < 80%
4	●	Lyukadás	0	●	81% < falvesztés ≤ 100%
			22	●	Eldugulás

9. ábra: A gőzfejlesztő vizsgált szegmensének vizsgálati eredménye a szegmens 2D térképén megjelenítve

elhelyezkedése nem felel meg tökéletesen egyik beépített mintázatnak sem. Ennek következtében a térképezést manuálisan kellett elvégezni, egy pár csővezeték esetében a cső koordinátáit külön-külön kellett bevinni, aminek elvégzésére azonban a vizsgáló eszköz lehetőséget biztosít. A térképezés így körülbelül 30 percet vett igénybe.

Egy hőcserélő csővezeték elméleti vizsgálati ideje 2 másodperc, amely alatt a vizsgáló berendezés 10 párhuzamos mérést végez el. A 10 párhuzamos mérés eredménye együttesen kerül értékelésre. A gyakorlatban egy csővezeték vizsgálata az eszköz ki- és behelyezésével együtt átlagosan körülbelül 15 másodpercre adódott, ami alapján rendkívül gyors vizsgálatnak tekinthető.

A vizsgálat operatív része viszonylag monoton, ennek következtében nagyobb az emberi tévesztés lehetősége, a vizsgálatot végző ember eltévesztheti, hogy melyik csövet vizsgálta már meg. Ennek elkerülése érdekében a vizsgáló berendezés a vizsgálat közben folyamatosan követi az előzetesen elkészített csővezeték-térkép alapján a vizsgálatot, és jól észlelhető hangjelzéssel jelzi, amennyiben egy cső kimaradna vagy nem tervezetten többször kerülne megvizsgálásra.

A csővezetékek U-alakú geometriája nem zavarta a vizsgálatot, a csövek görbülete, valamint az alátámasztások nem voltak hatással a vizsgálati eredményekre. A hajlatok és egyéb deformációk okozhatnak indikációkat a vizsgálat során, megfelelő szaktudással azonban ezek a geometriai indikációk megkülönböztethetők a különböző anomáliák okozta indikációktól.

A lerakódások és a korróziós falfogyások üzembiztosan detektálhatóak voltak, és pontos távolságuk is meghatározható volt a hőcserélő csövek kezdőpontjától mérve. A vizsgálati eredmények alapján az eszköz a már 5%-os keresztmetszet-csökkenéssel járó lerakódások detektálására is képes, ezen felül a berendezés képes lenne a lerakódásokat detektálni és üzembiztosan pozicionálni abban

az esetben is, ha egy csővezetéken belül több helyen, egymástól függetlenül is lennének dugulások. A vizsgált szegmensben ilyen módon károsodott hőcserélő csővezetékek nem volt.

Teljes átlukadások a vizsgált szegmens legfelső sorában voltak detektálhatóak, összesen 4 csővezeték esetében, amely károsodásokat a berendezés szintén üzembiztosan képes volt detektálni és megadni a lyukadások pontos pozícióját.

A vizsgálatok közben szerzett tapasztalatok és a gőzfejlesztőn végzett APR vizsgálatok eredményei alapján a vizsgálati módszer alkalmas kimutatni a hőcserélő csövek különböző, belső anomáliáit, és a csővezeték hosszirányú tengelye mentén megfelelő irányban megadni azoknak a távolságát a csövek kezdőpontjától. A hőcserélő csövek külső felületéről induló, átlukadást még nem okozó károsodásokat a vizsgáló berendezés a vizsgálat jellegéből adódóan nem képes detektálni.

## 6. A vizsgálati eljárás alkalmazhatósága a gőzfejlesztő csővezetékei esetében

A vizsgálatok közben szerzett tapasztalatok és a vizsgálati eredmények alapján megtörtént a vizsgálati eljárás alkalmazhatóságának az elemzése a gőzfejlesztő hőcserélő csöveinek vizsgálata esetében. Ugyan az APR vizsgálati technika érzékeny a csővezetékek tisztaságára, a gőzfejlesztők csővezetékeinek megfelelő tisztasága garantálható, mivel az atomerőművek hőátadó közegei jellemzően nagy tisztaságúak. Az APR technika 6-52 mm-es belső átmérő esetében nem igényel a csőátmérőhöz szorosan illeszkedő alkatrészt, a nukleáris iparban alkalmazott hőcserélők csöveinek belső átmérője pedig jellemzően ebbe a tartományba esik. A vizsgálati módszer jól alkalmazható a csővezeték belső anomáliáinak detektálására és pontos helyének megadására a csőhossz mentén, ugyanakkor a külső felületről induló károsodások detektálására nem alkalmas. Az atomerőművi gőzfejlesztők esetében ugyanakkor a primerköri hőcserélők külső károsodásával is számolni kell, mivel a csővezetékek külső felülete érintkezik a szekunderköri hőhordozóval, amely szintén korrodálhatja a hőcserélő csövek külső felületeit.

A vizsgálati eljárás a belső korróziós falvesztés 20%-át meghaladó károsodást már képes detektálni, és mivel a hazai atomerőművek 5 éves vizsgálati ciklusideje viszonylag rövid más iparágakhoz képest, ennek következtében a károsodás detektálásának 20%-os küszöbértéke elegendő lehet.

Mivel a gőzfejlesztőknek akár az összes csöve rövid idő alatt megvizsgálható - csövenként legfeljebb 15-20 másodperc jól megközelíthető csövek esetében - majd az eredmények is viszonylag hamar, 24 órán belül kiértékelhetőek, szűrővizsgálatra rendkívül alkalmas a technika. A



szoftver az eredmények alapján képes a teljes hőcserélő összes csövet a feltárt anomáliákkal együtt egy szemléletes csőtérképen is megjeleníteni, ez nagyban segítheti további vizsgálatok vagy egyéb intézkedések felőli döntés meghozatalát.

A nukleáris ipari hőcserélők esetében, mivel külső korróziós károsodásra is számítani lehet, nem javasolt az APR vizsgálati eljárás önálló alkalmazása, ugyanakkor az örvényáramos vizsgálati technika jó kiegészítő vizsgálata lehet. Amíg az örvényáramos vizsgálatokkal a tervezett 5 éves ciklusonként jelenleg a gőzfejlesztők csöveinek 50%-ának a vizsgálata történik meg, addig ez alatt az idő alatt APR vizsgálati eljárással a csővezetékek 100%-ának a vizsgálata elvégezhető.

Mindkét vizsgálati technika képes arra, hogy a feltárt anomáliáknak a vizsgált cső hossz tengelye mentén való elhelyezkedését is megállapítsa. A két módszer azoknak a károsodásoknak az esetében, amelyekre mindkét módszer érzékeny (pl. belső, nagy arányú korróziós falfogyás) validálhatja is egymás eredményeit.

Mivel a gőzfejlesztő csővezetékeinek esetében külső korrózióra is számítani lehet, az APR vizsgálatot örvényáramos vizsgálattal kombinálva javasolt alkalmazni, ebben az esetben javasolt, hogy az örvényáramos eszköz beállításánál a külső korrózió detektálására és méretezésére legyen optimalizálva a vizsgáló berendezés.

Az APR vizsgálati eljárás legfőbb előnye más roncsolásmentes eljárásokkal szemben a vizsgálatok rövid időtartalma. Ezáltal a vizsgálatot végző szakembereknek minimális időt kell a sugárzó térben tölteniük, ugyanakkor üzemben lévő gőzfejlesztők esetében olyan erős helyi sugárzással kell számolni, hogy a teljes gőzfejlesztő vizsgálatának elvégzése kizárólag manipulátorral javasolt, a vizsgáló berendezés lehetőségét is biztosít a megfelelően kialakított manipulátorra való felszerelésre.

Az elvégzett demonstrációs vizsgálat eredményei és a vizsgálati tapasztalatok alapján az APR vizsgálati technikával a gőzfejlesztő csővezetékeinek belső károsodásai üzembiztosan kimutathatóak voltak, a vizsgálati módszer az örvényáramos vizsgálatok jó kiegészítő vizsgálata lehet.

## 7. Összefoglalás

A feldolgozott vonatkozó szakirodalmak, valamint az elvégzett demonstrációs vizsgálatok eredményei alapján a következő megállapítások tehetők:

- Az APR vizsgálati eljárással a hőcserélő csövek belső károsodásai üzembiztosan kimutathatóak.

- A vizsgálati módszer érzékeny a csővezetékek tisztaságára, az atomerőművi gőzfejlesztők esetében azonban ez nem korlátozza a vizsgálatok elvégezhetőségét a nagy tisztaságú hűtőközegek révén.
- A vizsgálat rövid idő alatt elvégezhető és kiértékelhető, így lehetőség van a gőzfejlesztő minden csővezetékeinek vizsgálatára is.
- A gőzfejlesztők csővezetékeinek külső korróziójára is számítani lehet, ennek következtében az APR eljárást az örvényáramos vizsgálat kiegészítő vizsgálatként javasolt alkalmazni.
- A vizsgálati módszer legfőbb előnye más roncsolásmentes vizsgálati technikákkal szemben a vizsgálat rövid időtartalma, így szűrővizsgálatra, valamint az örvényáramos vizsgálat kiegészítő vizsgálatára kiválóan alkalmas eljárás.

## Köszönetnyilvánítás

A TKP2020-NKA-18 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2020-4.1.1-TKP2020 program finanszírozásában valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] G. Kirchhoff: On the influence of heat conduction in a gas on sound propagation, Annual Review of Physical Chemistry. 134,177-193(1868)
- [2] D. H. Keefe: Acoustical wave propagation in cylindrical ducts: Transmission line parameter approximations for isothermal and nonisothermal boundary conditions, Journal of the Acoustical Society of America, 75, 58-62 (1984)
- [3] Omar A. Aldughayem: Acoustic pulse reflectometry for potential industrial applications, Doctoral Thesis (2018)
- [4] Sound Wave Inspection Systems, prezentáció, www.swis.ltd (letöltés ideje: 2022.10.17.)
- [5] J. Borish, J. B. Angell, An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response Using Pseudorandom Noise, J. Audio Eng. Soc., vol. 31, pp. 478-489 (1983)
- [6] A vizsgáló berendezést gyártó Sound Wave Inspection Systems hivatalos honlapja: <https://www.swis.ltd/product> (letöltés ideje: 2022.10.17.)
- [7] Czibula Mihály vezető mérnök Paksi Atomerőmű Zrt. Anyagvizsgálati Osztály előadása, 4. Anyagvizsgálat a Gyakorlatban Szakmai Szeminárium, 2008. Június 4-5 – Aranyhomok Hotel, Kecskemét, <https://slideplayer.hu/slide/1916713/>
- [8] A Paksi Atomerőmű gőzfejlesztőkkel kapcsolatos dokumentált és tacit tudás mentése. MVM ERBE Zrt. 2017. június 20.