

1949

ÚJ TÍPUSÚ SZÁLOPTIKAI ÉRZÉKELŐK FEJLESZTÉSE ÉS ALKALMAZÁSA A NAGYENERGIÁS FIZIKÁBAN

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Makovec Alajos

Témavezető: Dr. Molnár József

Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori Tanács Fizikai Tudományok Doktori Iskolája Debrecen, 2017.

Készült

a Debreceni Egyetem Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának Magfizika programja keretében az MTA Atommagkutató intézetben

A disszertáció elkészítését az alábbi projektek támogatták: Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok – OTKA, 109803. Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal – VKSZ_14-1-2015-0021. Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori Tanács Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának Magfizika programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából. Nyilatkozom arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Debrecen, 2017.

Makovec Alajos jelölt

Tanúsítom, hogy Makovec Alajos doktorjelölt 2011 - 2017 között a fent megnevezett doktori iskola Magfizika programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét. Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 2017.

Dr. Molnár József témavezető

ÚJ TÍPUSÚ SZÁLOPTIKAI ÉRZÉKELŐK FEJLESZTÉSE ÉS ALKALMAZÁSA A NAGYENERGIÁS FIZIKÁBAN

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében a fizika tudományágban

Írta: Makovec Alajos okleveles fizikus Készült a Debreceni Egyetem Fizika Tudományok Doktori Iskolájának Magfizika programja keretében Témavezető: Dr. Molnár József

A doktori szigorlati bizottság:

elnök:	Dr. Angeli István	
tagok:	Dr. Sükösd Csaba	
	Dr. Timár János	

A doktori szigorlat időpontja: 2017. 02. 15.

Az értekezés bírálói:

	Dr	
	Dr	
A bírálóbizottság:		
elnök:	Dr	
tagok:	Dr	

Az értekezés védésének időpontja: 20...

Tartalomjegyzék

1.	Beve	zetés	1
2.	Iroda	lmi előzmények	5
	2.1	A levegő relatív páratartalmának mérése	5
	2.2	FBG-alapú érzékelők működése	8
	2.3	Relatív páratartalom mérése FBG-alapú érzékelőkkel	12
	2.4	LPG-alapú érzékelők működése	13
3.	Anya	g és módszer/Kísérleti rész	17
	3.1	FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése	17
	3.2	LPG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése	24
	3.3	LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálata	29
4.	Ered	nények	33
	4.1	FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése	33
	4.1.1	Kalibrációs mérések	33
	4.1.2	FBG-alapú kombinált szenzorok sugárzásállósági vizsgálata	37
	4.1.3	FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztéséhez kapcsolódó	
	ered	nényeim	41
	4.1.4	Fejezet-összefoglaló	53
	4.2	LPG-alapú páratartalom-érzékelő fejlesztése	56
	4.2.1	Fejezet-összefoglaló	73
	4.3	LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálata	74
	4.3.1	Fejezet-összefoglaló	81
5.	Össz	efoglalás	83
6.	Sum	nary	89
7.	Iroda	lomjegyzék	95
	7.1	A doktori értekezéshez kapcsolódó impaktfaktoros közlemények	98
	7.2	A doktori értekezéshez kapcsolódó közlemények	99

8.	8. Köszönetnyilvánítás 103		
	7.5	Egyéb konferencia előadások	101
	7.4	Egyéb közlemények	101
	7.3	A doktori értekezéshez kapcsolódó konferencia előadások	100

A doktori értekezésben használt jelölések és rövidítések

Α	aktivitás
CERN	Európai Nukleáris Kutatási Szervezet
CMS	Kompakt Müon Szolenoid (Compact Muon Solenoid)
CMS-DSC	a CMS Detektor Szabályozó Rendszere (CMS Detector Control System)
d	Bragg-rács rácsállandója
D'	dózisteljesítmény
dBm	decibelmilliwatt (decibel-miliwatts)
d_{film}	filmdoziméter vastagsága
DP	harmatponti hőmérséklet (Dew Point temperature)
D _{TOT}	teljes elnyelt dózis (Total Absorbed Dose)
EP-DT	a CERN-i Kísérleti Fizika Osztály Detektor Technológiák részlege (Experimental Physics Department – Detector Technologies)
FBG	száloptikai Bragg-rács (Fiber Bragg Grating)
FFT	gyors Fourier-transzformáció (Fast Fourier Transformation)
GPIB	általános célú eszköz busz, (General Purpose Instrumentation Bus)
H _{abs}	abszolút páratartalom
HEP	nagyenergiás fizika (High Energy Physics)
H_s	telítési páratartalom
L_{FBG}	Bragg-rács hossza
LHC	Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider)
L_{LPG}	hosszú periódusú száloptikai rács (LPG) hossza
LPG	hosszú periódusú száloptikai rács (Long Period Fiber Grating)
LS1	első hosszú leállás (First Long Shut down), LHC
m	a V térfogatban lévő vízgőz tömege / tömeg
$m_0(T)$	a telítési páratartalom eléréséhez szükséges vízgőz tömege adott hőmérséklet esetén, egységnyi térfogatban
М	mólsúly
n _e	effektív törésmutató
n _{eco}	magmód effektív törésmutatója, LPG
n^i_{ecla}	i-edik köpenymód effektív törésmutatója, LPG

N^i	mért RH-értékek referenciától való négyzetesközép-eltérése az i-edik módszer esetén, LPG
N_{TOT}^i	i-edik módszer teljes mérési bizonytalansága, LPG
p	a vízgőz parciális nyomása
$p_0(T)$	vízgőz adott hőmérséklethez tartozó telítési nyomása
Ρ'	egy milliwattra vonatkoztatott teljesítmény, decibel skálán, FBG- és LPG-spektrumok esetén
P' _{ConConH}	rezonancia-völgy nagyobb λ -hoz tartozó konvex-konkáv átmeneti pontján mért P' , LPG
P' _{ConConL}	rezonancia-völgy kisebb λ -hoz tartozó konvex-konkáv átmeneti pontján mért P' , LPG
P'_i	diszkrét LPG-spektrum i-edik mért P'-értéke
P'_{max}	rezonancia-völgy maximumán mért P', LPG
P' _{maxH}	LPG-spektrum maximuma a rezonancia-völgy nagyobb λ -hoz tartozó oldalán
P'_{maxL}	LPG-spektrum maximuma a rezonancia-völgy kisebb λ -hoz tartozó oldalán
P'_{min}	rezonancia-völgy minimumánál mért P', LPG
P'_{TH}	aktuális küszöbszint, LPG
P _{air}	légnyomás
P_{ε}	feszültségoptikai együttható
R	általános gázállandó
REF	a CMS-be telepített, ideiglenesen üzemelő elektronikus érzékelők hőmérséklet (T _{REF}) és páratartalom (RH _{REF}) mérése
RH	relatív páratartalom (Relative Humidity)
RH_{kh}	kerekítési hiba, Felszínmódszer
RH_T	hőmérsékletmérési bizonytalanságból adódó páratartalommérési bizonytalanság FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetén
RUN2	az LHC első hosszú leállását követő működési ciklusa
S	a Tömegközéppont-módszernél alkalmazott, küszöbszintet meghatározó paraméter, LPG
S_D	elnyeltdózis-érzékenység
SD ⁱ	i-edik módszer szórásértékeinek átlaga páratartalom-mérésnél, LPG
S _{RH}	FBG-alapú páratartalom-érzékelő relatív páratartalomra vonatkozó érzékenysége
SRI	környezeti törésmutató (Surrounding Refractive Index), LPG

S_T	FBG-alapú páratartalom-érzékelő hőmérsékleti érzékenysége
Т	hőmérséklet
TDM	időosztásos multiplexelés (Time Division Multiplexing)
Tkp.	Tömegközéppont (-módszer)
TH	küszöb (Threshold)
USC	Földalatti Szervízbarlang (Underground Service Cavern)
V	vizsgált levegő térfogata (H_{abs} számításakor) / térfogat
WDM	hullámhosszosztásos multiplexelés (Wavelength Division Multiplexing)
W _i	a Tömegközéppont-módszereknél alkalmazott, a rezonancia-völgy i-edik pontjához tartozó súly, LPG
α _a	hőtágulási együttható
α _n	hőoptikai együttható
Δ_n	törésmutató perturbációja, FBG / LPG
Δ_{lpha}	hullámhossz-eltolódás
$\Delta\lambda_D$	ionizáló sugárzás hatására fellépő hullámhossz-eltolódás
Е	feszítés (relatív megnyúlás)
λ	hullámhossz
Λ	rácsállandó, LPG
λ_B	Bragg-hullámhossz
λ_{res}	rezonancia-hullámhossz, LPG

1. BEVEZETÉS

A száloptikai érzékelők alkalmazása napjainkban dinamikusan fejlődő terület. Az egyik legnépszerűbb és széles körben alkalmazott változat egy optikai szál magjában kialakított Bragg-rácsot (Fiber Bragg Grating, FBG) tartalmaz [ALWIS L. et al. 2013]. Az FBG-alapú eszközöket az utóbbi évtizedek során sikeresen alkalmazták az energiaiparban, a gyógyszerészetben, a gáz és olajiparban, bányák, hidak. gátak esetében és a tömegközlekedésben [GHOLAMZADEH B., NABOVATI H. 2008]. Az egyre növekvő érdeklődés hátterében az áll, hogy ezek az érzékelők kis méretűek, könnyűek, érzéketlenek az elektromágneses interferenciákra, időtállók és több száz fokos hőmérsékleti tartományban alkalmazhatók [TAM H. Y. et al. 2005]. A kedvező tulajdonságok rendkívül értékessé teszik a Bragg-rácsokkal készült érzékelőket olyan környezetben, ahol az eszközök zord körülményeknek vannak kitéve. Az utóbbi években alkalmazásuk megjelent a nagyenergiás fizikában (High Energy Physics, HEP) is. A 0 °C alatti hőmérséklet és a különböző részecskék alkotta sugárzási háttér azonban megköveteli az innovatív, specializált érzékelők fejlesztését.

Dolgozatomban ismertetem az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet (a továbbiakban CERN) Kompakt Müon Szolenoid detektorába (Compact Muon Solenoid, CMS) telepített FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése során elért eredményeket.

 Célom volt munkámmal hozzájárulni a CMS számára fejlesztett FBG-alapú páratartalom-érzékelők, valamint a működésükhöz szükséges (kereskedelemben kapható) FBG-alapú hőmérők klímakamrában történő kalibrálásához és hitelesítéséhez. Valamennyi a CMS-be telepített érzékelőnek üzemelnie kell a Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) következő, 2018-ig tartó működési ciklusának végéig. A várható nagyintenzitású sugárzási környezet hosszantartó hatásának felderítése végett fontos volt vizsgálni az FBG-alapú páratartalom-érzékelők és FBG-alapú hőmérők sugárzásállóságát.

2. Célul tűztem ki az FBG-alapú szenzorok által szolgáltatott adatok analízisének megtervezését és az ehhez szükséges szoftverek elkészítését. Az összesen 160 db érzékelő kalibrációja időigényes feladatnak ígérkezett, ezért terveim között szerepelt a mérési adatok automatizált feldolgozását lehetővé tevő programcsomag megírása.

Meghatározó szerepet vállaltam új típusú, hosszú periódusú száloptikai rács (Long Period Fiber Grating, LPG) felhasználásával készült páratartalom-érzékelők fejlesztésében.

- Szándékomban állt részt venni az LPG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztésében. Ennek során az előzetes mérési eredmények rámutattak, hogy az FBG-alapú érzékelőknél bevált jelfeldolgozó algoritmus nem alkalmas az LPG-spektrumok értelmezésére. Emiatt terveztem egy erre megfelelő matematikai módszer kidolgozását.
- 2. Az LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálatát az MTA Atomki ⁶⁰Co radioizotópos nagy intenzitású gamma-foton forrásával kívántuk elvégezni. Ez lehetőséget biztosít a száloptikai érzékelők besugárzás alatti viselkedésének tanulmányozására. LPG-alapú páratartalom-érzékelők esetén egy ilyen vizsgálat az irodalomban példa nélküli. Szándékomban állt elkészíteni a fenti ⁶⁰Co forrásnak és a besugárzó helyiségnek egy nagy pontosságú geometriai modelljét. Ez input fájlként használható FLUKA-szimulációk során, amelyekkel (többek között) a száloptikai érzékelőkön végzendő besugárzások tervezhetők.

 A modell hitelesítése érdekében terveztem a FLUKA-szimulációkból származó dózisteljesítmény-becslések dozimetriai mérésekkel történő validálását.

Az értekezésem 2. fejezetében ismertetem az irodalmi előzményeket. Ezután a 3. fejezet a felhasznált eszközökről és módszerekről ad számot. A CMS-ben alkalmazott FBG-alapú érzékelők fejlesztése során elért eredményeket és az ehhez kapcsolódó feladataimat, majd az LPG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztéséhez kapcsolódó eredményeimet ismertetem a 4. fejezetben.

2. IRODALMI ELŐZMÉNYEK

Ebben a fejezetben ismertetem a levegő nedvességtartalmának méréséhez kapcsolódó legfontosabb ismereteket és összefüggéseket. Ezután rövid áttekintést adok az elterjedt mérési módszerekről. Szintén ebben a fejezetben ismertetem a munkám során alkalmazott FBG- és LPG-alapú érzékelők felépítését és működését.

2.1 A levegő relatív páratartalmának mérése

A levegő páratartalmának egyik jellemzője az abszolút páratartalom (H_{abs}) , amely az egységnyi térfogatra eső vízgőz tömegét adja meg [WYER S. S. 1906].

$$H_{abs} = \frac{m}{V} \tag{1}$$

Az (1) egyenletben V a vizsgált levegő térfogata, m pedig a V térfogatban lévő vízgőz tömege. A levegő adott hőmérséklet esetén csak egy határértékig képes vízgőzt felvenni. Ha a páratartalom eléri a telítési páratartalmat (H_s), akkor a levegőben lévő vízgőz termodinamikai egyensúlyban van a folyadék fázissal. Adott hőmérséklet esetén az egységnyi térfogatban $m_0(T)$ tömegű vízgőz szükséges a telítési páratartalom eléréséhez, (2) egyenlet.

$$H_s(T) = \frac{m_0(T)}{V} \tag{2}$$

A telítési páratartalom azonban hőmérsékletfüggő, ezért célszerű bevezetni az abszolút páratartalom és az adott hőmérséklethez tartozó telítési páratartalom hányadosaként definiált relatív páratartalmat (Relative Humidity, RH), (3) egyenlet.

$$RH(T) = \frac{H_{abs}}{H_s(T)} = \frac{m}{m_0(T)}$$
(3)

A vízgőz parciális nyomása (p) a telítésig jól közelíthető az általános gáztörvénnyel.

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \tag{4}$$

A (4) egyenletben V a térfogat, m a tömeg, M a mólsúly, R az általános gázállandó és T a hőmérséklet.

$$p \sim \frac{m}{V} = H_{abs} \tag{5}$$

Az (5) egyenlet alapján látható, hogy a vízgőz parciális nyomása egyenesen arányos az abszolút páratartalommal. A relatív páratartalom ezért kifejezhető a parciális vízgőznyomás és az adott hőmérséklethez tartozó telítési nyomás (adott hőmérsékleten a vízgőz által elérhető legnagyobb nyomás), $p_0(T)$ segítségével.

$$RH(T) = \frac{m}{m_0(T)} = \frac{p}{p_0(T)}$$
(6)

A telítési gőznyomás, $p_0(T)$ megadható a Magnus-Tetens tapasztalati formula felhasználásával.

$$p_0(T) = 6,11 \cdot 10^{\frac{a \cdot T}{b+T}} \tag{7}$$

A (7)-egyenletben a és b paraméterek értékei:

- a(vizfelszin felett) = 7,5,
- a(jégfelszín felett) = 9,5,
- b(vizfelszin felett) = 237,3 °C,
- $b(jégfelszín felett) = 265,5 \,^{\circ}C.$

A (7) egyenletből látható, hogy adott légnyomás (P_{air}) esetén a hőmérséklet (T) ismerete önmagában nem elegendő a relatív páratartalom meghatározásához. Érdemes bevezetni a harmatponti hőmérséklet (Dew Point temperature, DP) fogalmát, amely az a hőmérséklet, amelyre a levegőt állandó nyomás mellet lehűtve az telítetté válik. Ha a (7) egyenletbe T helyett a harmatponti hőmérsékletet írjuk, akkor eredményül a parciális vízgőznyomást kapjuk, (8) egyenlet.

$$p = 6.11 \cdot 10^{\frac{a \cdot DP}{b + DP}} \tag{8}$$

A (6), (7) és (8) egyenleteket felhasználva adott nyomáson T és DP mérésével a relatív páratartalom meghatározható.

A levegő nedvességtartalmának mérésére számos módszert alkalmaznak [WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION 2008]:

- Abszolút pátatartalom mérésére ismert térfogatú levegőt áramoltatnak át nedvszívó anyagon, amely megköti a levegőben lévő vízpárát. A nedvszívó anyag tömegváltozásából az (1) egyenlet segítségével az abszolút páratartalom meghatározható.
- A kondenzációs módszer esetén egy tükröt hűtenek, ami bepárásodik, amikor annak hőmérséklete eléri a harmatponti hőmérsékletet. Ekkor megváltozik a tükör fényvisszaverő képessége, amely például fényforrás és fotocella alkalmazásával detektálható. A mért *DP* értékéből a relatív páratartalom meghatározható [LIDE D. 2005]. A harmatponti hőmérsékletet elérve a tükröt fűtik, így annak felületéről elpárolog a víz. Ezt követően a fenti mérési ciklus újra elvégezhető.
- Pszichrometrikus mérési módszernél azt használják ki, hogy a párolgás sebessége függ a páratartalomtól. Ha a levegőáramba helyezett két hőmérő közül az egyiket nedvesített textil veszi körül, akkor az a párolgás miatt gyorsabban hűl. Az így kialakuló hőmérséklet-különbség függ a levegő nedvességtartalmától.
- A nedvszívó anyagok mechanikus módszerek esetében is használhatók. Például az emberi hajszál hossza – megfelelő előkészítést követően – a relatív páratartalom függvényében változik. Ez a méretváltozás mérhető, amelyből *RH* meghatározható.

2.2 FBG-alapú érzékelők működése

Egy, az optikai szál magjában kialakított Bragg-rács a mag tengelyére merőleges, periodikusan váltakozó törésmutatójú szeletek sorozata. Legelőször Ken Hill készített ilyen eszközt 1978-ban. Gerry Meltz és kollégái 1989-ben kidolgoztak egy eljárást, melynek során egy holografikus technológiát alkalmaztak az FBG-rács előállítására, ahol a megvilágító UV-fényt interferáltatva érik el a periodikus fényintenzitás-eloszlást [MOREY W. W. et al. 1990]. Ma leggyakrabban egy megfelelően kialakított maszkot tesznek az UV-fényforrás és a szál közé [TAM H. Y. et al. 2005].



1. ábra. FBG-alapú érzékelő működése. A szálba vezetett fényt a rács egy keskeny hullámhossztartományban visszaveri, így az átviteli spektrumból ez a rész hiányzik.

Egy FBG-alapú érzékelő hullámhossz-szelektív tükörként viselkedik. Ha az optikai szálba számos hullámhosszkomponenst magában foglaló fénnyel világítunk bele annak egyik végén, akkor a Bragg-rács egy meghatározott hullámhosszkomponenst tükörként ver vissza, miközben a többit átengedi, **1. ábra**. A visszavert hullámhossz neve Bragg-hullámhossz (λ_B). A **2. ábra** egy, az FGB-alapú érzékelőkre jellemző visszaszórt spektrumot mutat. A teljesítményt (*P*) rendszerint 1 milliwattra vonatkoztatva, decibel skálán tűntetik fel, ami egy abszolút skála, (9) egyenlet. Az így meghatározott dimenziótlan mennyiséget (P') ezért elterjedten használják a száloptikás és a mikrohullámú kommunikációban.



2. ábra. Egy optikai szálon kialakított 36 darab FBG-alapú hőmérő visszaszórt spektruma. A függőleges tengelyen a teljesítmény 1 mW-ra vonatkoztatva van feltűntetve.

A decibelmilliwatt (decibel-miliwatts) elfogadott jelölése a dBm (és nem a dBmW).

$$P' = 10 \cdot \log_{10} \frac{P}{1 \, mW} \tag{9}$$

A Bragg-hullámhossz az n_e effektív törésmutatótól és a d rácsállandótól függ, a (10) egyenletnek megfelelően. Az, hogy λ_B a rácsállandó függvénye, lehetővé teszi eltérő Bragg-hullámhosszúságú rácsok készítését, **3. ábra**.

$$\lambda_B = 2 \cdot n_e \cdot d \tag{10}$$

Száloptikai Bragg-rács esetén a legfontosabb paraméterek jellemző értékei a következők:

- $n_e = 1,45$: effektív törésmutató (a rács hossza mentén a törésmutatók átlaga),
- $\Delta n = 10^{-4}$: törésmutató perturbációja,

- d = 500 nm: rácsállandó,
- $L_{FBG} = 10 mm$: rács hossza.



3. ábra. FBG-rács felépítése. Egy optikai szál mentén annak magjában több, különböző rácsállandóval készült (egyidejűleg kiolvasható) Bragg-rácsot is kialakíthatnak.

Mivel a szálon alkalmazott feszítés és a hőmérséklet megváltozása is a rácsállandó és a törésmutató változását okozzák, ennek megfelelően változik a visszavert fény hullámhossza. A relatív megnyúlás és hőmérséklet okozta hullámhossz-eltolódás ($\Delta\lambda$) közelítőleg a (11) egyenlettel írható le.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_B} = (1 - P_{\varepsilon}) \cdot \varepsilon + (\alpha_a + \alpha_n) \cdot \Delta T$$
(11)

Az összeg első tagja a relatív megnyúlás miatt fellépő hullámhossz-eltolódást írja le, ahol P_{ε} a feszültségoptikai együttható, ε pedig a relatív megnyúlás. A második tagra a hullámhossz-eltolódás hőmérsékletfüggése miatt van szükség. Itt α_a a hőtágulási, α_n pedig a hőoptikai együttható. A hőmérséklet-változás következtében kétféleképpen is változik a visszavert hullámhossz: α_n használatát a törésmutató-változás, α_a használatát pedig a rács hőtágulása indokolja. Mivel egy száloptikai Bragg-rács a feszítésre és a hőmérséklet megváltozására is érzékeny, ezért elengedhetetlen, hogy a két hatást egymástól meg lehessen különböztetni.

Ha csak hőmérsékletet szeretnénk mérni, akkor az FBG-alapú érzékelőket úgy kell elhelyezni, hogy ne léphessenek fel rajta húzó-, nyomófeszültségek, hajlítások és csavaró hatások. Mivel az üveg α_a hőtágulási együtthatója gyakorlatilag elhanyagolható, így a fellépő hullámhossz-eltolódást a szál törésmutatójának megváltozása okozza. Ezzel szemben, ha feszítést szeretnénk mérni, akkor a feszítés és a hőmérséklet-változás hatása együttesen jelentkezik a mért hullámhossz-eltolódásban. Utóbbira korrigálni kell: a korrekciós tag meghatározható egy, a relatív megnyúlás mérésére szánt szenzorral termikus kontaktusban elhelyezett, de csak hőmérsékletmérésre alkalmas FBG-alapú érzékelő segítségével, (11) egyenlet.

Az FBG-alapú szenzorok kiolvasására alkalmazott rendszerek működésük szerint két csoportba sorolhatók, [GHOLAMZADEH B., NABOVATI H. 2008, TAM H. Y. et al. 2005, IADICICCO A. et al. 2008]:

- Időosztásos multiplexelés esetében (Time Division Multiplexing, TDM) az optikai szálon azonos rácsállandóval és alacsony fényvisszaverő képességgel rendelkező Bragg-rácsokat alkalmaznak. A kiolvasást fényimpulzusok segítségével végzik. Ennek során az egyes szenzorok az alapján azonosíthatók, hogy mennyi idő telt el az impulzus kibocsátása és a visszavert fény detektálása között. A módszer hátránya, hogy a visszavert impulzusoknak alacsony a fényintenzitása.
- 2. Hullámhosszosztásos multiplexelésnél (Wavelength Division Multiplexing, WDM) eltérő rácsállandóval készített Bragg-rácsok sorakoznak az optikai szál mentén. Különböző hullámhosszúságú komponensekből álló fényt vezetve a szálba, ezek más-más hullámhosszúságú fényt tükröznek vissza. Itt nem jelentkezik az időosztásos multiplexelésre jellemző intenzitás-csökkenés. A párhuzamosan kiolvasható érzékelők számát az alkalmazott WDM-rendszer által lefedett hullámhossztartomány (rendszerint 60-80 nm) és az egyes szenzorok működési tartománya limitálja.

2.3 Relatív páratartalom mérése FBG-alapú érzékelőkkel

Egy FBG-alapú érzékelő önmagában nem érzékeny a relatív páratartalomra. Alkalmazható azonban olyan nedvszívó bevonat a szálakon, az FBG-rácsok körül, amely a levegő páratartalmának megváltozására méretváltozással reagál [MITSCHKE F. 1989]. Ilyen anyag a poliimid [DING F. et al. 2010]. A poliimidek imid monomerekből, vagyis imid csoportot tartalmazó vegyületek polimereiből álló műanyagok [GHOSH M. K., MITTAL K. L. 1996]. A hosszú láncokká kapcsolódott imidmolekulákból felépülő lineáris poliimidek mellett aromás, heterocikluosos poliimidek is léteznek. Utóbbi csoportba tartozik például a Kapton márkanévvel ellátott műanyag. A polimiidek:

- nagy szilárdsággal rendelkeznek széles hőmérsékleti tartományban (-230 - +370 °C),
- jól ellenállnak a nagyenergiájú gamma sugárzásnak,
- lángállók,
- vegyileg ellenállók,
- jó elektromos szigetelők [YOUNG P. R., ESCOTT R. 1990].

Az FBG-alapú páratartalom-érzékelőknél alkalmazott nedvszívó poliimid bevonat kitágul a levegőben lévő vízgőz megkötésekor. Ennek következtében a bevonat megnyújtja a Bragg-rácsot, megváltoztatva ezzel a rácsállandót és a feszültségoptikai együtthatót, ezáltal a visszavert hullámhossz értékét. Ennek az eszköznek a válaszát a relatív páratartalom- és a hőmérsékletváltozás hatására az irodalom a két hatás lineáris szuperpozíciójaként írja le [KRONENBERG P. et al. 2002, YEO T. L. et al. 2005b]. Az érzékelőn alkalmazott ΔRH páratartalom- és ΔT hőmérsékletváltozás lineáris közelítésben a (12) egyenletnek megfelelő hullámhossz-eltolódást eredményez.

$$\Delta\lambda(\Delta RH \cdot \Delta T) = S_{RH} \cdot \Delta RH + S_T \cdot \Delta T \tag{12}$$

A (12) kifejezésben szereplő S_{RH} és S_T rendre a szenzor relatív páratartalomra és hőmérsékletre vonatkozó érzékenysége. A poliimiddel bevont

FBG-alapú érzékelők S_{RH} -ja és válaszideje a bevonat vastagságának függvénye [YEO T. L. et al. 2005b]. Mivel egy páratartalom-érzékelő a hőmérsékletre is érzékeny, az ebből származó járulékot le kell vonni a (12) egyenletnek megfelelően. Ez elvégezhető a relatívpáratartalom-mérővel termikus kontaktusban elhelyezett, bevonat nélküli FBG-alapú hőmérő segítségével, amely éppen a hőmérséklet megváltozása által okozott járulékot adja. Poliimid bevonattal készült FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetén átlagosnak mondható, hogy az 1 °C hőmérséklet-különbség okozta hullámhossz-eltolódás azonos nagyságú a 10% relatívpáratartalom-megváltozás következtében jelentkezővel [BERRUTI G. et al. 2013]. Ezért a hőmérsékleti korrekció elvégzése lényeges feladat, ami egy nagy pontosságú, párhuzamos hőmérsékletmérést követel meg. Belátható, hogy a páratartalommérési bizonytalanság csak akkor kisebb, mint $\pm 3\%$, ha a hőmérsékletmérés pontossága jobb, mint ± 0.3 °C.

2.4 LPG-alapú érzékelők működése

Optikai szálak alkalmazásánál általában a szál magját használjuk fel a fény továbbítására. A mag törésmutatóját az azt körülvevő köpenyénél nagyobbra választják, így a teljes visszaverődés miatt a fény nem jut ki a köpenybe. A fény ekkor az ún. magmódusban terjed. Ha valamilyen módon a fény mégis a köpenybe jut, akkor abban szintén képes az optikai szál mentén haladni. A köpenymódus során szintén teljes visszaverődés történik, ekkor a köpeny és az azt körülvevő, kisebb törésmutatójú anyag, például levegő határán. A köpeny jeltovábbító közegként való alkalmazása nem kívánatos az optikai szálak telekommunikációban történő felhasználása során. A köpenyt ezért gyakran valamilyen külső, nagyobb törésmutatójú bevonattal látják el.

Az LPG-alapú érzékelőknél ugyanakkor éppen azt használjuk ki, hogy bizonyos feltételek mellett a szálba vezetett fény egy része a köpenybe szóródik, [VENGSARKAR A. M. et al. 1995, ALWIS L. et al. 2013]. Egy ilyen eszköz készülhet egymódusú optikai szálból. A mag anyagában, a szál mentén periodikusan váltakozó törésmutatójú szeleteket alakítanak ki. Ezek gyakran nem merőlegesek a mag tengelyére, hanem azzal szöget zárnak be. A hosszú periódusú száloptikai rács hossza (L_{LPG}) 3-5 cm, jellemző rácsállandója pedig 100-500 mikrométer. Ez a perturbáció lehetővé teszi, hogy a fény a magból a köpenybe jusson olyan hullámhosszak esetén, ahol a rezonanciafeltétel kielégítése teljesül, (13) egyenlet.

$$\frac{2 \cdot \pi}{\Lambda} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda_{res}} \cdot \left(n_{eco} - n_{ecla}^i \right) \tag{13}$$

A (13) egyenletben n_{eco} a magmódus, n_{ecla}^i pedig az i-edik köpenymódus effektív törésmutatója, A a rácsállandó és λ_{res} a rezonancia-hullámhossz. A fenti, móduscsatolásnak nevezett folyamat következtében az átviteli spektrumból a rezonancia-hullámhosszak hiányoznak. A Bragg-rácsokkal ellentétben itt nem a visszaszórt, hanem az átviteli spektrumot kell vizsgálni, ahol a fenti rezonancia-hullámhosszak negatív csúcsok (völgyek) formájában jelentkeznek. Ennek részletes matematikai leírása megtalálható a [VASILIEV S. A. et al. 1997] és a [ERDOGAN T. 1997] művekben. A **4. ábra** egy LPG-alapú érzékelő átviteli spektrumát mutatja.

A köpenymódus effektív törésmutatója és ezáltal λ_{res} függ a köpenyt körülvevő anyag fizikai és kémiai tulajdonságaitól. Ezek közül a legjelentősebb hatással a környezeti törésmutató (Surrounding Refractive Index, SRI) rendelkezik, [DEL VILLAR I. et al. 2005, CUSANO A. et al. 2006]. Megfelelően megválasztott bevonattal számos kémiai és biológiai mérésre sikeresen alkalmaztak LPG-alapú érzékelőket [DAVIES E. et al. 2008]. A lehetséges felhasználási területeket szélesíti, hogy a környezeti törésmutatóra való érzékenység a bevonat vastagságának és egyéb tulajdonságainak függvénye [VENUGOPALAN T. et al. 2008a]. Az irodalomban több példa is található LPG-alapú páratartalom-érzékelőkre. Ezek rendszerint az alkalmazott külső bevonat anyagában különböznek:

- polimer [VENUGOPALAN T. et al. 2008a, VENUGOPALAN T. et al. 2008b],
- hidrogél [LIU Y. et al. 2007],
- zselatin [TAN K. M. et al. 2005],
- CoCl₂ alapú anyagok [KONSTANTAKI M. et al. 2006],
- SiO₂ nanogömböcskék [VIEGAS D. et al. 2009].



4. ábra. LPG-alapú érzékelőkre jellemző átviteli spektrum. A száloptikai Bragg-rácsokkal ellentétben itt az átviteli spektrum tartalmazza a hasznos információt. A bemenő spektrumhoz képest ebből hiányoznak az LPG-rács által kiszórt rezonancia-hullámhosszak.

A fenti anyagok nedvességre érzékenyek: a levegő relatív páratartalmának függvényében változik törésmutatójuk és sokszor vastagságuk is. Az LPG-alapú érzékelő SRI-függése miatt ezek a változások az átviteli spektrum völgyeinek frekvenciabéli, vagy intenzitásbéli változását okozzák.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER/KÍSÉRLETI RÉSZ

Ez a fejezet ismerteti a dolgozatomban bemutatott munkám motivációját, leírja a CMS számára fejlesztett FBG-alapú páratartalom-érzékelők és a nagyenergiás fizikai alkalmazásokhoz fejlesztett LPG-alapú páratartalom-érzékelők során alkalmazott mérési elrendezést. Szintén itt ismertetem az LPG-alapú relatívpáratartalom-mérők sugárzásállósági vizsgálatához alkalmazott kísérleti elrendezést.

3.1 FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése



5. ábra. A CMS felépítése (a). Szilícium csíkdetektorok (b). Forrás: https://cmsinfo.web.cern.ch/cmsinfo/Media/Images/Detector/

A CMS a CERN-ben üzemelő LHC-gyűrű két nagyobb detektorának egyike [THE LHC STUDY GROUP 1995], **5. (a) ábra**. A CMS hengeres alakú, 21 méter hosszú, 16 méter átmérőjű és 14000 tonna tömegű. Elnevezésében a szolenoid szó az elektromágnes alakjára vonatkozik, amely 3,8 T mágneses teret állít elő [THE CMS COLLABORATION 1994, THE CMS COLLABORATION 2008]. A CMS legbelső eleme a nyomkövető detektor [THE CMS COLLABORATION 2007], amely hozzávetőlegesen 16000 szilícium pixel- és csíkdetektorból áll, és a töltött részecskék nyomát detektálja az ütközési ponthoz (vertex) közel, nagy pontossággal, **5. (b) ábra**.

Az LHC működése során fellépő, különböző részecskék alkotta sugárzási háttér a szilícium érzékelők teljesítményének romlásához vezet, megnövelve a pixel- és csíkdetektorok jelében háttérként jelentkező és hőt fejlesztő kúszóáramot. Ennek nagysága azonban a hőmérséklet csökkentésével mérsékelhető, ezért az érzékelők élettartama növelése érdekében működés közben a nyomkövető detektort hűteni kell [DAGUIN J. et al. 2012]. Az LHC első leállását (First Long Shut-down, LS1) követően, a második működési ciklus során (RUN2) elvárás, hogy a nyomkövető detektort felépítő szilícium érzékelők felszíni hőmérséklete nem haladhatja meg a -10 °C-ot. A feltétel kielégítése végett a detektor hűtőrendszerében olyan hűtőfolyadékot áramoltatnak, amelynek hőmérséklete -20 és -25 °C között van. Ilyen körülmények mellett fennáll a veszélye a levegőben lévő vízpára hideg felületen történő lecsapódásának, ami a nehezen hozzáférhető és drága elektronikus alkatrészek meghibásodásához vezet. Egy ilyen esemény percek alatt nagy károkat okozhatna, amelyek kijavítása az LHC leállítását és a CMS szétnyitását tenné szükségessé, ami több évre visszavetné a nagyenergiás fizikai kutatásokat. A páralecsapódás elkerülése végett a nyomkövető detektor teljes térfogatában a levegő páratartalmát alacsony értéken kell tartani. A detektor belső térfogatában biztosítani tudják a páratartalom minimális értéken tartását, mert ezt a térrészt hermetikusan lezárják az összeszerelés során. Ezzel szemben a nyomkövető detektor külső környezete nincs elszigetelve, a levegő nedvességtartalmát nagy mennyiségű száraz gáz befújásával tudják csak szabályozni. További nehézséget jelent az is, hogy a hűtőcsövek szigetelése nem ideális, mert ehhez minimális a

rendelkezésre álló térfogat és speciális geometriai megoldásokat kellett alkalmazni.

A fent ismertetett okok miatt így elengedhetetlen a nyomkövető detektort körülvevő levegő hőmérsékletének és páratartalmának térben elosztott, több ponton történő, folyamatos mérése. Ugyanakkor a detektor térfogatában elhelyezett páratartalom-érzékelő számos működési kritériumnak kell, hogy megfeleljen:

- sugárzásállónak kell lennie a nagyintenzitású sugárzási környezet miatt,
- érzéketlennek kell lennie a CMS 3,8 T erősségű mágneses terére,
- megbízhatóan kell üzemelnie, mivel a detektor tervezett élettartama nagyságrendileg 10 év, s ez idő alatt karbantartás céljából történő hozzáférésre gyakorlatilag nincs lehetőség,
- kisméretű és tömegű kialakításra van szükség, minimális kábelhasználat mellett,
- továbbá az eszköznek -10 +40 °C hőmérsékleti tartományban kell relatív páratartalmat mérnie.

A kereskedelemben kapható relatívpáratartalom-mérők jelentős hányada kapacitív eszköz. Ezekben egy vékony polimert alkalmaznak, amelynek relatív permittivitása függ a környező levegő relatív páratartalmától. Elenyésző hányadban rezisztív eszközök is elérhetők, amelyeket rendszerint magas hőmérsékletű környezetben alkalmaznak. A fenti, elektronikus érzékelők azonban számos hátrányos tulajdonsággal rendelkeznek: többszálas kiolvasást igényelnek, érzékenyek az elektromágneses interferenciákra, nem sugárzásállók és csak néhány rendelkezik ±3%-nál jobb mérési pontossággal [FOSSA M., PETAGNA P. 2003].

Erre a feladatra ugyanakkor kiválóan alkalmasak a száloptikai érzékelők: az optikai szál képes ionizáló sugárzások nagy dózisánaknak ellenállni [BERGHMANS F., GUSAROV A. 2011]; a szálban terjedő jel érzéketlen a mágneses térre és az elektromágneses zajra; valamint az érzékelők nagy távolságból is kiolvashatók. Mindemellett csökkenti a többpontos méréshez szükséges kábelek számát az a tény, hogy egy szál mentén nagyságrendileg 100 darab FBG-alapú érzékelő is kialakítható, amelyek egyidejűleg kiolvashatók. A CMS-nél már sikeresen alkalmaztak hőmérő és feszültségmérő FBG-alapú érzékelőket [SZILLASI Z. et al. 2012] és 2002-től az irodalomban több publikáció is beszámol nedvességre érzékeny polimerrel bevont FBG-alapú páratartalom-érzékelőkről [KRONENBERG P. et al. 2002, YEO T. L. et al. 2005a]. Jól irányított körülmények között, speciálisan kialakított FBG-alapú érzékelőkkel a CERN-ben végzett korábbi kísérletek megmutatták, hogy ezek az eszközök igen stabilak és megbízhatók alacsony hőmérsékleten is, valamint képesek az ionizáló sugárzásnak ellenállni 10 kGy elnyelt dózisig [BERRUTI G. et al. 2013]. Később más csoportok igazolták, hogy kevésbé kontrollált és gazdaságosabb előállítási mód alkalmazásával is készíthető FBG-alapú páratartalom-érzékelő, amely használható a nagyenergiás fizikában is [CAPONERO M. A. et al. 2013].

A CMS-ben történő hőmérséklet- és páratartalom-mérésre 2011-ben a CERN-i Kísérleti Fizika Osztály Detektor Technológiák részlegének (Experimental Physics Department – Detector Technologies) egyik csoportja (PH-DT Cooling) két FBG-alapú érzékelőből álló kombinált szenzort (thermo-hygrometer) javasolt. A csoport munkájához 2012. augusztusában csatlakoztam, amikorra a fenti javaslatot elfogadták és megtervezték a CMS-be telepítendő érzékelőket. Összesen 80 darab FBG-alapú kombinált szenzort gyártottak le, amelyek egyenként két elemből álltak:

 A relatív páratartalom mérésére egyénileg tervezett FBG-alapú érzékelőket alkalmazunk. A kiválasztott, szabványos telekommunikációs, SMF-28-típusú SiO₂ szálakban egy külső cég alakította ki a Bragg-rácsokat. A szálakat az FBG-rácsok körül 10±2 μm vastag poliimid bevonattal látták el. Más polimerekkel összevetve ennek kisebb a relatív méretváltozása nedvesség hatására, viszont annak mértéke lineárisan arányos a relatív páratartalommal. Csoportunk a gyártást követően 17 érzékelőből álló mintán minőségellenőrzést végzett. A mérések kimutatták, hogy a vizsgált érzékelők 12%-a esetén 2 μm-nél nagyobb az eltérés a 10 μm-es bevonati vastagságtól [PhDJ01]. Ezeknél a megfigyelt vékonyabb bevonat miatt kisebb relatív páratartalomra vonatkozó érzékenység várható. Az érzékelőket csak a CMS nyitott állapotában lehetett telepíteni, így az LS1 szűkös ütemterve miatt csoportunk az összes legyártott eszköz felhasználása mellett döntött. Biztosítani kellett azt is, hogy az FBG-alapú páratartalom-érzékelők ne vegyenek fel deformációkat (például a rögzítésükkor). Erre a célra egy megfelelően kialakított, fémből készült tokozást alkalmazunk.

A fent ismertetett hőmérsékleti korrekció elvégzésére a páratartalom-mérők számával azonos mennyiségű FBG-alapú hőmérőre is szükség volt. Az elterjedt ipari alkalmazások miatt ilyen eszközöket kereskedelemben is lehetett kapni. Csoportunk a Micron Optics OS-4310-típusú hőmérők beszerzése mellett döntött azok jó mérési paraméterei és megbízhatósága miatt. A 6. ábrán látható az FBG-alapú kombinált szenzor sematikus rajza, valamint egy fénykép a kész eszközről.

Célunk volt valamennyi szenzor kalibrációjának elvégzése. A páratartalom-érzékelők esetén a poliimid bevonat minősége nagyban befolyásolja az érzékelő működését. Ha a bevonat kialakítása nem homogén a szál Bragg-rácsot tartalmazó részén, akkor a szál mentén jelentkező relatív megnyúlás sem lesz homogén eloszlású. Ilyen esetben a rács egyes részei más hatásnak lesznek kitéve, ami akár az eszköz instabilitásához és hibás méréshez is vezethet. A kalibrációs mérések során meggyőződhetünk az egyes szenzorok

megfelelő működéséről. Az irodalom számot ad továbbá az FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetén a bevonat öregedéséről. A vízmolekulák váltakozó adszorpciója és deszorpciója a poliimid kémiai összetételének megváltozását okozhatja, ami a szenzor hosszú távú megbízhatóságát rontja [BUNCICK M. C., DENTON D. D. 1992]. A korábban már ismertetett összehasonlítás alapján belátható, hogy ha a hőmérő kalibrációja 0,1 °C pontossággal lett megadva, az hozzávetőlegesen 1% mérési bizonytalanságot jelent a páratartalom-mérésben. A kereskedelemben kapható száloptikai hőmérők ugyan rendelkeznek gyári kalibrációval (harmadfokú polinomiális függvény), de azt rendszerint -40 és +120 °C közötti tartományra adják meg. Mivel esetünkben ennél kisebb tartomány az, ahol a szenzorok működését biztosítani kell (-20 - +20 °C), a mérési bizonytalanság csökkentése végett szükséges volt a hőmérőket újrakalibrálni.



6. ábra. Kereskedelemben kapható Micron Optics OS-4310-típusú száloptikai hőmérő (fent) és a speciálisan erre a feladatra gyártott és poliimid bevonattal ellátott FBG-alapú páratartalom-érzékelő (lent) sematikus rajza (balra) és fényképe (jobbra). <u>Készítette: G. Berruti</u>

A kalibrációs méréseket egy speciálisan kialakított klímakamrában végeztük el CERN-ben. Ez a kamra lehetővé teszi a belső légtér hőmérsékletének digitálisan vezérelt, nagy pontosságú szabályozását. A kamra belsejében a relatív páratartalmat külső szelepek segítségével lehet változtatni. Ezek határozzák meg, hogy milyen arányban keverjük össze és milyen sebességgel áramoltatjuk át a kamrán a két forrásból érkező gázokat. Az egyik forrás száraz levegőt biztosít, amelynek egyedüli áramoltatása mellett a legkisebb elérhető relatív páratartalom 0,2%. A másik forrás nedves levegő, amit úgy kapunk, hogy a száraz levegőt – a kamrába történő bevezetést megelőzően – desztillált vízen áramoltatjuk keresztül egy buborékoltatóban. A kalibrációs méréseket -20 és +20 °C között és 0,2% < RH < 60% tartományon végeztük el. A **7. ábra** a klímakamrát és a mérési elrendezés sematikus rajzát mutatja.



 7. ábra. A mérések során alkalmazott klímakamra (a) és a kalibrációs kísérleti elrendezés sematikus rajza (b).
<u>Fotózta és készítette: G. Berruti</u>

A kamrában több pt100-típusú referencia hőmérőt helyeztünk el és az általuk mért értékek átlagát használtuk fel referencia hőmérsékletként. A pt100-as hőmérők kalibrálása és működése nem teszi lehetővé, hogy velük 0,1 °C pontossággal abszolút módon kalibrálhassunk. Könnyen belátható azonban, hogy számunka elegendő volt a száloptikai hőmérőket a pt100-as referencia szenzorokhoz kalibrálni. Mivel az FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetén ugyanezeket a referencia hőmérőket alkalmaztuk, a kombinált szenzorokban mind a páratartalom-, mind pedig a hőmérők hőmérsékleti kalibrációja azonos, így a hőmérsékleti korrekció nagy pontossággal elvégezhető.

A klímakamra belsejében a levegő relatív páratartalmának mérésére egy nagy pontosságú harmatpont-mérőt (Chilled Mirror Dew Point Hygrometer) alkalmaztunk. A kamra levegőjét egy rendszer segítségével folyamatosan áramoltattuk át a harmatpont-mérőn, ami egy fűthető-hűthető tükröt tartalmaz. A tükör hőmérsékletét változtatva az eszköz nagy pontossággal meg tudja mérni a harmatponti hőmérsékletet azáltal, hogy ezen a hőmérsékleten a levegőben lévő vízpára a tükörre lecsapódik, megváltoztatva annak optikai tulajdonságait. Az így mért harmatponti hőmérsékletből, a kamra hőmérsékletének ismeretében, a belső levegő relatív páratartalma kiszámolható, 2.1 alfejezet. Kevésbé pontos, Honeywell HIH-4000-típusú elektronikus relatívpáratartalom-mérőket is alkalmaztunk. Ezekből többet is elhelyeztünk a kamrában, így igazolva azt, hogy annak belső terében a levegő páratartalma homogén eloszlású. A száloptikai érzékelők kiolvasására egy négycsatornás Micron-Optic SM125-500-típusú optikai interrogátort alkalmaztunk. Ennek fényforrása egy hangolható lézer, ami 80 nanométeres tartományt pásztáz végig. Közben a Bragg-rácsokról visszaverődő intenzitását fotodetektor fény egy méri. А lokális intenzitásmaximumok helyzete az egyes szenzorok Bragg-hullámhosszának felel meg. A nagy fényintenzitásnak köszönhetően ez a megoldás magas jel-zaj viszonyt biztosít. Optikai interrogátorral hozzávetőlegesen 1 pikométeres hullámhosszfeloldás érhető el. Ez egy tipikus FBG-alapú érzékelő esetében 1,2 µm/m relatív megnyúlásnak, vagy 0,1 °C hőmérséklet-változásnak felel meg.

3.2 LPG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése

Ahogyan azt a 3.1 alfejezetben láttuk, különböző részecskék alkotta sugárzási háttér jelenlétében, vagy nagy mágneses tér esetén az FBG-alapú szenzorok jó alternatívát jelentenek az elektronikus érzékelőkkel szemben. Ugyanakkor a páratartalomra vonatkozó érzékenységük, S_{RH} rendszerint 1,0-1,5 pm/% [VENUGOPALAN T. et al. 2008a, VENUGOPALAN T. et al. 2008b]. Figyelembe véve, hogy az S_T értéke hozzávetőlegesen 10 pm/°C,
ezeknél az eszközöknél elengedhetetlen а párhuzamos és pontos hőmérsékletmérés. Ennek feloldására csoportunk egy önállóan is alkalmazható száloptikai páratartalom-érzékelő fejlesztését tűzte ki célul. Ez megvalósítható az S_{RH} több nagyságrenddel történő növelése mellett. Ehhez vizsgáltuk ~100 nm-es titán-dioxid (TiO₂) és ~300 nm-es ón-dioxid (SnO₂) bevonattal ellátott LPG-alapú érzékelők tulajdonságait [PhDJ04]. Titán-dioxidot nedvességre érzékeny bevonatként elsőként csoportunk alkalmazta nagy érzékenységű száloptikai páratartalom-érzékelők esetén [PhDJ03]. Azért a fenti anyagokra esett a választás, mert ezekre nem jellemző a polimer bevonatoknál rendszerint fellépő öregedési folyamat [MONTESPERELLI G. et al. 1995], (3.1 alfejezet). Célunk volt vizsgálni, hogy az alkalmazott (homogén vastagságban és jó optikai tulajdonságokkal felvitt) bevonatok közül melyikkel érhető el nagyobb vonatkozó páratartalomra érzékenység. Ezt az LPG-alapú kalibrációs méréseinek elvégzésével kívántuk páratartalom-érzékelők meghatározni.

A legyártott prototípus LPG-alapú páratartalom-érzékelők kalibrációs méréseit CERN-ben végeztük el a 3.1 alfejezetben ismertetett klímakamra felhasználásával. Az ebbe telepített pt100-típusú hőmérőket referenciaként alkalmaztuk. A klímakamra levegőjének relatív páratartalmát nagy pontosságú harmatpontmérő segítségével határoztuk meg. A kamra több pontján elhelyezett Honeywell HIH-4000-típusú elektronikus relatívpáratartalom-mérőkkel igazoltuk, hogy a klímakamrában a levegő páratartalma homogén eloszlású. A 7. (b) ábrán ismertetett kísérleti elrendezéshez képest az egyetlen különbség az volt, hogy ebben az esetben LPG-alapú érzékelőket vizsgáltunk FBG-alapú szenzorok helyett. Az egyik ilyen LPG-alapú páratartalom-érzékelő prototípusa látható a 8 (a) ábrán. Esetünkben az LPG-rács hossza hozzávetőlegesen 5 cm. A páratartalmon és a hőmérsékleten kívül ez az eszköz azonban érzékeny az optikai szálon alkalmazott hajlításra, csavarásra és megnyúlásra. A deformációk elkerülése végett az LPG-alapú érzékelőket egy-egy U-alakú mintatartóba rögzítették permanens módon. A **8 (b) ábrán** látható, hogy a klímakamra egyidejűleg két LPG-alapú szenzor befogadására képes.



 8. ábra. Egy LPG-alapú páratartalom-érzékelő rögzítve az alkalmazott U-alakú mintatartóban (a). Az érzékelő klímakamrába történő felemelését megelőzően készült kép (b). <u>Fényképezte: G. Berruti</u>

A száloptikai érzékelők kiolvasására egy négycsatornás Micron Optic sm125-500-típusú optikai interrogátort használtunk fel. Ez az eszköz az 1510 és 1590 nm közötti hullámhossztartományon tud mérést végezni. A gyárilag hozzá adott szoftver (Enlight) kétféle mérési módot támogat:

 Lehetőség van optikai spektrumok mentésére, ahol a kimeneti fájl a fenti hullámhossztartományon, 16001 mérési pontban, tehát 5 pm-es feloldással tartalmazza a visszavert fény teljesítményét decibelmilliwatt egységekben. Minden mérés időbélyeggel van ellátva és egy csatorna adatait egy sorba menti a rendszer.

 Emellett rendelkezésre áll egy beépített csúcskereső algoritmus is. Ez általánosan alkalmazott az FBG-alapú érzékelőknél arra, hogy a mért visszaszórt spektrumon megjelenő csúcsokhoz egy-egy, a csúcsok helyzetére jellemző hullámhossz-értéket rendeljünk. A másik kimeneti fájltípus ennélfogva a mért Bragg-hullámhosszak és a megfelelő időbélyegek listája.

Mivel az Enlight szoftver képes a spektrumon megjelenő csúcsok helyett völgyek detektálására is, így első körben ezt a módszert választottuk az LPG-alapú érzékelőknél. Az előzetes mérések azonban felfedték, hogy a vizsgált rezonancia-völgyek esetében nem csak azok hullámhossz tengelyen elfoglalt helyzete, de félértékszélességük és alakjuk (szimmetria tulajdonságuk, mélységük) is függ a relatív páratartalomtól és (kis mértékben) a hőmérséklettől.



LPG-pektrum RH-függése

9. ábra. Az LPG_{RH1} relatívpáratartaom-mérő átviteli spektruma eltérő RH-értékek mellett.

A 9. ábra az egyik prototípus LPG-alapú páratartalom-érzékelő (a továbbiakban LPG_{RH1}) átviteli spektrumát mutatja különböző *RH*-értékek mellett. Az FBG-spektrumoknál használt jelfeldolgozó algoritmus ilyen jelalakok mellett nem alkalmas az LPG-alapú érzékelők vizsgálatára. Ennek megértéséhez érdemes megnézni miként is változik egy FBG-alapú hőmérő esetén a visszaszórt spektrumon megfigyelhető csúcs helyzete és alakja a hőmérséklet függvényében. Ahogyan a 10. ábra mutatja, a jelalak ezeknél gyakorlatilag változatlan, csak a csúcsok hullámhossz-tengelyen elfoglalt helyzete változik.



10. ábra. Egy FBG-alapú hőmérő visszaszórt spektrumának releváns része eltérő RH-értékek mellett.

Az Enlight szoftver egy csúcshoz tömegközéppont módszerrel rendel Bragg-hullámhosszat. Az éppen vizsgált csúcs maximális teljesítményértékéhez viszonyítva a relatív küszöb értékével kisebb szinten vágást végez. Az aktuális küszöbszint feletti pontok hullámhossz-tengelyen elfoglalt helyeinek teljesítményértékekkel súlyozott átlaga adja a Bragg-hullámhosszat. A relatív küszöb értékét általában 3 dBm-nek választják. A **10. ábrán** látható, hogy ez ideális választás FBG-alapú érzékelőknél, mert a csúcsok magassága itt nem, vagy csak kis mértékben változik, azok számításhoz felhasznált része pedig jó közelítéssel szimmetrikusnak mondható.

A 9. ábra azonban azt mutatja, hogy a vizsgált LPG-alapú páratartalom-érzékelők esetén a rezonancia-völgy mélysége drasztikusan változik RH függvényében. Ha a relatív küszöb értékét 3 dBm-nek választjuk, akkor a páratartalom növekedése mellett a völgy egyre nagyobb része kerül felhasználásra a Bragg-hullámhossz meghatározása során. Ennél a szenzornál hozzávetőlegesen RH = 30%-nál elérjük azt a pontot, amikor már a völgy egészét használni kell. Ennél nagyobb páratartalom mellett romlik a mérés pontossága, hiszen a 3 dBm-nél sekélyebb völgyek esetén egyre kisebb súlyok kerülnek felhasználásra (amelyek relatív aránya így kisebb). Fontos azt is észrevenni, hogy a rezonancia-völgyek alakja nem szimmetrikus, 9. ábra. A 0,2% RH-nál mért völgy erős aszimmetriát mutat. Ennek mértéke csökken növekvő páratartalommal, de az még a piros görbén (RH = 9%) is észrevehető. volna célszerű а 0,2% Nyilvánvalóan nem páratartalomnál mért rezonancia-völgy esetén az aktuális küszöbértéket -12 dBm-nek választani, hiszen a völgy jobb oldalának kiszélesedése ekkor mesterségesen növelné a Bragg-hullámhossz értékét. Hasonlóan, konstans relatív küszöb alkalmazása (igaz kisebb mértékben, de) mesterséges hullámhossz-eltolódást okoz növekvő RH mellett, ahol a völgy egyre nagyobb részén történik a tömegközéppont meghatározása.

A vizsgált LPG-alapú páratartalom-érzékelők válaszfüggvényének fenti tulajdonságai miatt csoportunk célul tűzte ki egy új módszer kifejlesztését, amely a rezonancia-völgy alakjától függetlenül, általánosan alkalmazható ezeknél a szenzoroknál. Ezt a feladatot én kaptam.

3.3 LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálata

Bár az irodalomban találtunk információt bevonat nélküli LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálatairól [KHER S. et al. 2013,

HOEFFGEN S. K. **GUSAROVAND** A., 2013], LPG-alapú páratartalom-érzékelők érzékenységének dózisfüggését elsőként csoportunk vizsgálta [PhDJ03]. A fejlesztett LPG-alapú páratartalom-érzékelők esetén célunk volt a sugárzásállósági vizsgálatokat az MTA Atomki ⁶⁰Co radioizotópos nagy intenzitású gamma-foton forrásával (a továbbiakban forrás) elvégezni, mivel az ott rendelkezésre álló infrastruktúra segítségével lehetőség nyílik a szenzorok besugárzás alatti online kiolvasására. Ez az ionizáló sugárzás LPG-alapú érzékelőkre gyakorolt hatásának olyan tanulmányozását teszi lehetővé, amely az irodalomban példa nélküli. A gamma fotonokat emittáló forrás legfőbb paraméterei:

- $T_{1/2} = 1925,20 \text{ d} \pm 0,25 \text{ d},$
- $A_{ref} = 28,7 \text{ TBq},$
- $T_{ref} = 25/03/2014 \ 12:00 \ UTC.$

A forrás dokumentációja [IZOTÓP BUDAPEST 2013] szintén megadja, az A = 31,7 TBq aktivitáshoz tartozó, a forrástól 1 méterre, levegőben mérhető dózisteljesítmény értékét, D' = 11,3 Gy/h. Ez pontforrás esetére lett meghatározva és a forrás és céltárgy között vákuumot feltételez. Könnyen kiszámolható, hogy egy méterre a forrástól 100 kGy elnyelt dózis eléréséhez közel 369 napos expozíciós idő szükséges. A dózisteljesítmény a távolság négyzetével fordítottan arányos. Ha az LPG-alapú érzékelőket egy méter helyett 20 cm-re helyezzük el a forrástól, akkor az expozíciós idő 15 napra csökken.

A szükséges nagy dózisok eléréséhez (több száz kGy) így azt a megoldást választottuk, hogy a vizsgálni kívánt LPG-alapú érzékelőket a forráshoz közel, attól kevesebb, mint 30 centiméterre helyezzük el. Ilyen távolságokban azonban:

 a lineáris méretét tekintve hozzávetőlegesen 2 cm-es forrás a bevonattal is csak pár száz mikrométer átmérőjű optikai szál szempontjából már nem tekinthető pontforrásnak,

- a besugárzó berendezésen szórt gamma fotonok járuléka már nem elhanyagolható,
- a forrásból emittált elektronok járuléka jelentős lehet (hatótávolságuk levegőben néhány 100 cm).

A fenti gondolatmenet alapján elmondható, hogy az LPG-alapú páratartalom-érzékelők sugárzásállósági tesztjeihez hasznos a besugárzások szimulációval támogatott tervezése.

4. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben ismertetem az FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése során elért eredményeimet. Szintén itt jelennek meg a nagyenergiás fizikai alkalmazásokhoz fejlesztett LPG-alapú páratartalom-érzékelőkhöz és ezek sugárzásállósági vizsgálatához kapcsolódó eredményeim.

4.1 FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztése

4.1.1 Kalibrációs mérések

A 3.1 alfejezetben ismertetett klímakamrában, egymástól függetlenül végeztük el az FBG-alapú hőmérők és páratartalom-érzékelők kalibrációs méréseit. A kamra limitált befogadóképessége miatt abban ezekből egyszerre csak hozzávetőlegesen 8-12 darabot lehetett tesztelni. A folyamat emiatt – és mert az érzékelők hosszútávú megbízhatóságát is vizsgáltuk – több hónapot vett igénybe. A klímakamrában a szálak belső tartóoszlopok körüli rögzítésénél elegendő hézagot hagytunk az egyes menetek közt ahhoz, hogy azokon a levegő viszonylag szabadon átáramolhasson. Figyeltünk arra is, hogy a Bragg-rácsokon ne alkalmazzunk hajlítást, feszítést. Az érzékelők mérésre történő előkészítése átlagosan néhány órás feladat volt. A nem használt optikai szálakat alkalmas méretű hengerekre tekercseltük fel, s azokat olyan körülmények között tároltuk, hogy minimális fizikai hatás érje őket. A kalibrációs mérések előkészítésében és kivitelezésében hozzávetőlegesen 20% szerepet vállaltam. Ennek két oka volt: egyrészt az elnyert ösztöndíjak segítségével csak részben tudtam CERN-ben tartózkodni, másfelől pedig a csoport munkájához főként más feladatokkal járultam hozzá, amelyeket a későbbi alfejezetekben ismertetek. A kalibrációs mérések jelentős részét egy CERN-es doktorandusz kollégám, G. Berruti végezte el.



11. ábra. FBG-alapú hőmérők kalibrációjának ellenőrzése. Az
 FBG-alapú és a referencia érzékelők által az egyik teszt során mért értékek (a). Az egyensúlyi állapotok során mért referencia értékektől való eltérés kisebb, mint ±0,2 °C (b).
 Forrás: [PhDJ04]

Mivel az FBG-alapú hőmérők érzéketlenek a relatív páratartalomra, ezért a hőmérséklet kalibrációs tesztek során csak a hőmérsékletet változtattuk -20 és +20 °C között, lépcsőzetesen. Az egyes "lépcsőfokokat" elérve elegendő időt hagytunk arra, hogy a kamra belsejében elhelvezett eszközök termikus egyensúlyba kerüljenek egymással. Valamennyi FBG-alapú hőmérő kalibrációját harmadfokú polinomiális függvény segítségével adtuk meg a vizsgált hőmérséklettartományra (általánosan alkalmazott módszer). A kalibráció ellenőrzésére automatizált hőmérsékleti ciklusokat indítottunk. Egy ilven mérést mutat a 11. (a) ábra. Az "MO1" azonosítóval jelzett szálon található 8 darab FBG-alapú hőmérő által mért értékek referenciától való eltérései láthatók a 11. (b) ábrán. Az átmeneti szakaszokban megjelenő, hol nagy pozitív, hol pedig nagy negatív értékek (a továbbiakban tüskék) a referencia és az FBG-alapú hőmérő eltérő termalizációs sebességére utalnak. A tüskék irányából következik, (11. (a) és (b) ábrák), hogy azonos körülmények között a referenciaként alkalmazott eszközök hőmérsékletének egységnyi értékkel történő megváltoztatásához kevesebb idő szükséges, mint az FBG-alapú hőmérők esetén.

A **11. (b) ábrán** látszik, hogy egyensúlyi állapotban, ahol a rendszer hőmérséklete huzamosabb ideig állandó értéken marad, a referenciától való eltérés kisebb, mint ± 0.2 °C.



12. ábra. Az egyik vizsgált FBG-alapú páratartalom-érzékelő által regisztrált Bragg-hullámhossz értékek a relatív páratartalom és (színkód segítségével) a hőmérséklet függvényében. Forrás: [PhDJ04]

Mivel az FBG-alapú páratartalom-érzékelők hőmérsékletre és relatív páratartalomra is érzékenyek, ezeknél a szenzoroknál összetett kalibrációt kellett végeznünk. Minden érzékelőt négy hőmérsékleten vizsgáltunk (20, 10, 0 és -5 °C). A klímakamra fenti bemutatása alapján látható (3.1 alfejezet), hogy a rendelkezésre álló szabályozó megoldásokkal egy adott hőmérsékleten csak az arra jellemző minimális és maximális relatív páratartalom értékek közt lehet mérést végezni. A kalibrációs mérések alatt lépcsőzetesen változtattuk a kamra levegőjének relatív páratartalmát. A folyamat során a szelepek állítását követően 2 - 6 órát kellett várni arra, hogy a kamrában a páratartalom egy állandó értékre beálljon (annak változása elhanyagolhatóan kismértékű legyen). Az ehhez szükséges idő nagyban függött az alkalmazott hőmérséklettől. A **12. ábra** az egyik FBG-alapú páratartalom-érzékelő Bragg-hullámhosszát mutatja a relatív páratartalom és (színkód segítségével) a hőmérséklet függvényében. Látszik,

hogy a kamra levegőjének relatív páratartalmát növelve a Bragg-hullámhossz értékek vöröseltolódást szenvednek. (Az irodalom az angol "red shift" és "blue shift" kifejezéseket használja rendre a hullámhossz növekedésének vagy csökkenésének leírására.) Ez összhangban van azzal a feltételezéssel, hogy a vízmolekulák adszorpciója révén a poliimid mérete, s így az FBG-rácson jelentkező relatív megnyúlás is nő. Az adott hőmérsékleten mért értékek egyenessel illeszthetők. Az illesztett görbék meredeksége a vizsgált hőmérséklethez tartozó S_{RH} értékét adja, 13. (a) ábra. Fontos azonban észrevenni, hogy az érzékelő relatív páratartalomra vonatkozó érzékenysége hőmérsékletfüggést mutat. A legkisebb és legnagyobb mért érzékenység értékek különbsége a vizsgált -5 - +20 °C tartományon hozzávetőlegesen 4 pm hullámhossz-eltolódásnak, 4% relatív páratartalommérési vagy bizonytalanságnak felel meg.



13. ábra. A vizsgált szenzor relatív páratartalomra vonatkozó érzékenysége hőmérsékletfüggést mutat, $S_{RH}(T)$, (a). Hasonlóan a hőmérsékletre vonatkozó érzékenység függ a relatív páratartalomtól, $S_T(RH)$, (b). <u>Forrás: [PhDJ04]</u>

A **12. ábra** segítségével meghatározhatjuk az FBG-alapú páratartalom-érzékelők hőmérsékletre vonatkozó érzékenységét is. Ehhez első lépésben az illesztett egyenesek 0, 30 és 60% relatív páratartalomnál felvett értékeit kell meghatározni, majd ezeket a hőmérséklet függvényében felrajzolni.

Az így nyert pontokra illesztett egyenes meredeksége éppen S_T -t adja a fenti páratartalom értékek mindegyikénél (külön-külön). A **13. (b) ábrán** látható, hogy a vizsgált érzékelő esetén S_T értéke függ a relatív páratartalomtól. A legkisebb és legnagyobb mért értékek közti különbség a páratartalommérési tartományon (0 és 60%) hozzávetőlegesen 14 pm hullámhossz-eltolódásnak, vagy 14% relatív páratartalommérési bizonytalanságnak felel meg.

A fenti eredmények fontos következménye, hogy a páratartalom-mérés pontosságának növeléséhez hőmérsékletfüggő $S_{RH}(T)$ és relatívpáratartalom-függő $S_T(RH)$ alkalmazására van szükség. Ebben az esetben azonban már nem alkalmazható a (12) egyenlet szerinti lineáris közelítés. A fenti keresztfüggéseket valamennyi vizsgált FBG-alapú páratartalom-érzékelőnél megfigyeltük, ezért célul tűztük ki a lineáris közelítésnél pontosabb kalibrációs módszert alkalmazását. Az általam kidolgozott eljárást a 4.1.3 alfejezetben ismertetem, mert annak működése a későbbiekben tárgyalt eredményekre is épít.

4.1.2 FBG-alapú kombinált szenzorok sugárzásállósági vizsgálata

A CMS-be telepítendő, környezeti paramétereket mérő eszközökkel szemben támasztott elvárások egyike az volt, hogy azok sugárzásállók legyenek. Az FBG-alapú páratartalom-érzékelők és hőmérők sugárzásállósági vizsgálatát két mérési sorozat keretén belül végeztük el. Ezek során a szenzorokat ⁶⁰Co radioizotóp által kibocsátott gamma fotonokkal sugároztuk be.

Az FBG-alapú hőmérők esetén összesen négy darab érzékelőt vizsgáltunk, amelyek két mintából származtak. Ezek mindegyikén elvégeztük a 4.1.1 alfejezetben ismertetett hőmérséklet kalibrációs méréseket, még az első besugárzást megelőzően. A szenzorok besugárzását ezután egy külső, élelmiszer-besugárzással foglalkozó cég végezte el. Első lépésben az érzékelők 10 kGy (±10%) elnyelt dózist kaptak. Az irodalom számot ad az ionizáló sugárzásnak kitett FBG-alapú érzékelők relaxációs folyamatairól [BERGHMANS F., GUSAROV A. 2011]. Annak érdekében, hogy a mintákban

végbemenő relaxációs mechanizmusok ne befolyásolják az eredményeket, a besugárzást követően a szenzorokat legalább három napig szobahőmérsékleten pihentettük. Ezt követően újra elvégeztük a kalibrációs mérést. A fenti lépéseket 210 kGy teljes elnyelt dózis (Total Absorbed Dose, D_{TOT}) értékig ismételtük.

A 14. ábra az egyik vizsgált szenzor hullámhossz-eltolódását mutatja a hőmérséklet és (színkód segítségével) az elnyelt dózis függvényében. Minden besugárzás után a λ értékek vöröseltolódása figyelhető meg. Annak mértéke nagyságrendileg azonos mind a négy vizsgált szenzor esetén. Az egyes besugárzásokhoz tartozó pontokra illesztett egyenes meredeksége a szenzor adott dózishoz tartozó S_T értékét adja. Elmondható, hogy az alkalmazott FBG-alapú hőmérők hőmérsékletre vonatkozó érzékenysége nem függ az elnyelt dózistól. A korábban elvégzett kalibráció így érvényben marad, ha а mért hullámhossz-értékeket az elnyeltdózis-függő vöröseltolódásra korrigáljuk.



14. ábra. FBG-alapú hőmérő Bragg-hullámhossza a hőmérséklet és (színkód segítségével) az elnyelt dózis függvényében. <u>Forrás: [PhDJ04]</u>

A. 15. (a) ábrán látható, hogy a mért vöröseltolódás, $\Delta \lambda_D$ logaritmikus elnyeltdózis-függést mutat. Az illesztett görbe deriváltja megadja a vizsgált érzékelő elnyelt dózisra vonatkozó érzékenységét, amely függ attól, hogy megelőzően az érzékelő mekkora dózist nyelt el, $S_D(D_{TOT})$, 15. (b) ábra. $D_{TOT} = 10 \text{ kGy}$ esetén S_D értéke hozzávetőlegesen 1,9 pm/kGy. 150 kGy teljes elnyelt dózisnál további 1 kGy hatására már csak kisebb, mint 0,2 pm-es vöröseltolódás mérhető. Csoportunk az eredmények fényében úgy döntött, hogy még a CMS-be történő telepítést megelőzően valamennyi FBG-alapú hőmérőt gamma fotonokkal kell besugározni $D_{TOT} = 210 \text{ kGy}$ értékig. Ekkor minden szenzorra megmérhető az ionizáló sugárzás által indukált vöröseltolódás mértéke, amellyel korrigálható a besugárzást megelőzően felvett kalibráció. Emellett az érzékelők olyan állapotba kerülnek, ahol az előzetes besugárzástól mentes változathoz képest egy nagyságrenddel kisebb vöröseltolódást szenved a Bragg-hullámhosszuk ugyanakkora elnyelt dózis hatására. Ezzel a megoldással csökken a vöröseltolódás üzemeltetés idejére becsült értéke. A CMS-en belül, az szenzorok tervezett helyein mérhető dózisteljesítmény értékek egyes hozzáférhetők voltak (FLUKA-szimulációs eredmények). Az üzemeltetés következtében jelentkező ionizáló sugárzás okozta vöröseltolódás korrigálható valamennyi FBG-alapú hőmérő esetén a dózisteljesítmény fenti becslése és a vöröseltolódás elnyeltdózis-függése (15. (b) ábra) alapján.



15. ábra. A mért vöröseltolódás elnyeltdózis-függése, (a). A vizsgált szenzor elnyelt dózisra vonatkozó érzékenysége függ attól, hogy megelőzően az érzékelő mekkora elnyelt dózist kapott, S_D(D_{TOT}), (b). <u>Forrás: [PhDJ04]</u>

Külön vizsgáltuk az FBG-alapú páratartalom-érzékelők sugárzásállóságát, mert összetett szerkezetük miatt feltételeztük, hogy a

hőmérőktől eltérő viselkedést mutatnak. Összesen négy darab érzékelőn végeztünk besugárzást, viszont ebben az esetben ezek mindegyike azonos mintából származott. A vizsgálat menete az FBG-alapú hőmérőknél ismertetett módszerhez hasonlóan zajlott. Az első besugárzást megelőzően elvégeztük a 4.1.1 alfejezetben részletezett kalibrációs mérést, amit rendre megismételtünk az egyes besugárzásokat követően (10, 10, 30, 40, 60 és 60 kGy). A fejlesztett FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetén is megfigyeltünk az ionizáló sugárzás következtében fellépő hullámhossz-eltolódást, $\Delta \lambda_D$ -t. Ennek mértéke azonban szenzoronként eltérőnek bizonyult. Mi több, a vöröseltolódás mellett kékeltolódást is mértünk. A fenti, az FBG-alapú hőmérőktől eltérő viselkedés az optikai szálon alkalmazott poliimid bevonattal magyarázható. Bevonat nélküli FBG-alapú érzékelőknél ionizáló sugárzás hatására a Bragg-hullámhossz vöröseltolódása várható. A gamma sugárzás poliimidre gyakorolt hatása miatt a bevonat megváltozása ezzel közel azonos mértékű, de ellentétes irányú változást (kékeltolódás) okoz. Ha а jelentkező vörösés kékeltolódások elnyeltdózis-függése különböző, az magyarázatot ad arra, hogy miért mérhető egyazon szenzornál hol vörös-, hol pedig kékeltolódás az egyes besugárzásokat követően. A szenzoronként eltérő érték oka pedig az, hogy az alkalmazott nedvszívó réteg vastagsága érzékelőnként eltérő (3.1. alfejezet).

A vörös- és kékeltolódásra történő korrekció elvégzését követően, a kalibrációs mérések során mért hullámhossz-eltolódások *RH*-függése azonos különböző D_{TOT} esetén, **16. (a) ábra**. Ezek alapján elmondható, hogy a fejlesztett FBG-alapú páratartalom-érzékelők S_{RH} -ja nem függ az elnyelt dózistól, **16. (b) ábra**. Az elnyelt dózisra vonatkozó érzékenység, $S_D (D_{TOT})$ csökkentése érdekében csoportunk az FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetében is azok gamma fotonokkal történő előzetes besugárzása mellett döntött. A választott érték ebben az esetben is $D_{TOT} = 210$ kGy volt. A besugárzást megelőzően felvett

kalibrációt valamennyi érzékelő esetén korrigálni kell a fellépő vörös-, vagy kékeltolódás mértékének megfelelően.



16. ábra. FBG-alapú páratartalom-érzékelő vörös-, és kékeltolódásra korrigált $\Delta\lambda$ értékei a relatív páratartalom és (színkód segítségével) az elnyelt dózis függvényében, (**a**). Az érzékelő S_{RH}-ja nem változik meg ionizáló sugárzás hatására, (**b**). Forrás: [PhDJ04]

4.1.3 FBG-alapú páratartalom-érzékelők fejlesztéséhez kapcsolódó eredményeim

Az FBG-alapú kombinált szenzorok telepítése két lépésben zajlott. Először 2013. decemberében 56-56, majd 2015. januárjában és február elején darab 16 száloptikai hőmérőt további és ugyanennyi FBG-alapú páratartalom-érzékelőt szereltünk fel a CMS-re. A teljes folyamat során a 144 érzékelő telepítése összesen tíz napot vett igénybe. Ezalatt az éppen felszerelés alatt álló érzékelőket folyamatosan kiolvasunk. Így valós időben látszott, ha valami (például kis görbületi sugár, vagy csavarodás) miatt nagy veszteség jelentkezett az optikai szálakban. Az első telepítési ciklusban (hozzávetőlegesen 6 nap) az én feladatom volt az érzékelők online megfigyelése, valamint az adatok offline kiértékelése. Utóbbi segítségével igazoltuk, hogy az egyes érzékelők megfelelően lettek elhelyezve. Az FBG-alapú kombinált szenzorok CMS-beli helyzetét mutatja a 17. ábra. Valamennyi optikai kábelt a Földalatti Szervízbarlangba (Underground Service Cavern, USC) vezettük el. Itt az érzékelők kiolvasása egy sm041-típusú optikaicsatornaszám-növelővel ellátott, Micron Optic sm125 optikai interrogátorral történik. A hálózati adatforgalom csökkentése érdekében az interrogátor (TCP/IP protokoll segítségével) a kiolvasó számítógép által definiált helyi hálózatba csatlakozik. Ez a számítógép végzi az adatgyűjtést, valamint az adatok feltöltését a CMS Detektor Szabályozó Rendszere (CMS Detector Control System, CMS-DSC) számára [SZILLASI Z. et al. 2012].



17. ábra. FBG-alapú kombinált szenzorok CMS-beli helyzete. A
 Tracker Bulkhead régióján belülre (a, b) és a Bulkhead külső oldalára
 (c, d) telepített érzékelők a Z- (a, c) és a Z+ oldalon (b, d).
 <u>Forrás: [PhDJ01]</u>

A relatív páratartalom mérésének fontosságát hangsúlyozza az a tény is, hogy a CMS-ben a száloptikai megoldás mellett még két, egymástól független rendszert alkalmaznak erre a célra:

- 1. A detektor néhány pontján folyamatosan levegőmintát vételeznek (sniffers), amit a Földalatti Szervízbarlangban elhelyezett, Vaisala DMT242-típusú harmatpontmérőkhöz továbbítanak [SCHWERIN M. et al. 2005, LOESCHNER M. et al. 2012]. Ezek pontos, megbízható mérést tesznek lehetővé, de a hozzávetőlegesen egy nagyságrenddel kevesebb mérési pont miatt az elérhető térbeli feloldás rosszabb, mint az FBG-alapú kombinált szenzorok esetén. További hátránya ennek a megoldásnak, hogy lassabb, mint az optikai mérés (levegő áramlási sebessége a mintákat továbbító csövekben). Ez növeli a reakcióidőt a szárítórendszer esetleges meghibásodása esetén. Néhány ponton, például a 17. (a, b) ábrák 1-es és a 17. (c, d) ábrák 2-es szenzorhelyein közvetlenül a levegőminták vételezési pontjaihoz rögzítettük a megfelelő FBG-alapú kombinált szenzorokat. Ezáltal lehetővé válik az adott pontokon a két mérés összehasonlítása, valamint a száloptikai érzékelők megbízhatóságának hosszú távú vizsgálata.
- 2. Egy független csoport, az LS1 alatt kidolgozta egy alternatív mérőrendszer koncepcióját. Ennek célja a kísérlet bizonyos pontjain a más rendszerek esetén elérhetőnél részletesebb hőtérkép szolgáltatása. Miután a tervet elfogadták, a rendszert alkotó kapacitív, Honeywell HIH-4030-típusú relatívpáratartalom-mérőket és Dallas DS2438-típusú félvezető hőmérőket az LHC RUN2 ciklusa előtt telepítették. Fontos észrevenni, hogy ezek az érzékelők nem sugárzásállók, az LHC üzemeltetése mellett várható élettartamuk egy-két év. A továbbiakban az így mért hőmérséklet és RH_{REF}),

az érzékelőket pedig referencia érzékelőkként fogom hivatkozni. Ezt azért tehetem meg, mert az FBG-alapú kombinált szenzorokat közvetlenül a referencia érzékelők mellett helyeztük el, amennyiben azok elérhetők voltak az adott mérési helyen, **17. (a, b) ábrák** mérési pontjai.

A 4.1.2 alfejezetben láttuk, hogy az FBG-alapú páratartalom-érzékelők és hőmérők esetén az előzetes besugárzás következtében jelentkező vörös- és kékeltolódás értékekre korrigálni kell a mért hullámhossz-eltolódásokat. A 4.1.1 alfejezetben ismertetett kalibrációs mérések valamennyi érzékelőn történő újbóli elvégzése azonban rendkívül időigényes lett volna. Hogy a szenzorokat még az LS1-ciklus során telepíteni tudjuk a CMS-be, csoportunk egy alternatív megoldás mellett döntött. Mivel a Tracker Bulkhead régióján belül elhelyezett FBG-alapú kombinált szenzorok esetén négy kivételével minden mérési ponton elérhető referencia érzékelő is, ezért itt a korrekciót a CMS-ben egyidejűleg mért száloptikai és a referencia mérés összehasonlításával kívántuk elvégezni. A Tracker Bulkhead külső oldalán elhelyezett FBG-alapú érzékelők esetében csak két helyen érhető el referencia mérés (a **17. (c, d) ábrák** 2-es helyein), így ebben az esetben a korrekciót a 4.1.1 alfejezet kalibrációs méréseinek megfelelően végeztük el. A Z- és Z+ oldalon, a fenti 2-es helyeken elérhető referencia adatok alkalmasak a telepítést követő ellenőrzés elvégzésére.

A 2013. decemberében telepített 56 db FBG-alapú kombinált szenzor esetén a vörös- és kékeltolódásra történő korrekció elvégzéséhez szükséges volt a rendelkezésre álló adatok megfelelő kezelése. Az ehhez nélkülözhetetlen offline adatgyűjtő rendszert én készítettem el. A szoftvercsomag az alábbi lépéseket végzi:

 Az FBG-alapú érzékelők mérési adatait a kiolvasó számítógépen futó, csoportunk által Java nyelven írt szoftver automatikusan létrehozott, ASCII-típusú kimeneti fájlokba is elmenti. Ezeket az általam írt szoftver INPUT elnevezésű mappájába kell másolni.

- Az éppen feldolgozni kívánt fájl neve, a legutóbbi feldolgozás időpontja és a fájl legutolsó módosításának ideje bemeneti paraméterként szolgálnak.
- 3. A szoftver a fenti adatok ismeretében automatikusan elkészíti a szükséges query-ket, amelyek segítségével lekéri a független online adatbázisból a megadott időablakba eső referencia mérési adatokat. Ezeket a szoftver olyan formátumba rendezve írja ASCII állományokba, amelyek a csoport SQLite alapú, offline adatbázisa bemenetként értelmez. Ennek az adatbázisnak adminisztrátora vagyok.
- Hasonló ASCII állományok készülnek a száloptikai mérésből származó adatok esetén is. Biztonsági megfontolásokat követve ebben a lépésben egy csúcskövető algoritmust is alkalmazok.
- 5. A szoftver ezután létrehoz egy, az SQLite által értelmezhető script-et. Ennek beolvasásával történik meg az adatok feltöltése az adatbázisba. Az indexelt adatbázis előnyeit kihasználva szintén ebben a lépésben készülnek el a kimeneti fájlok, FBG-alapú kombinált szenzoronként egy. Ezek időbélyeggel ellátva tartalmazzák az új mérési adatokat.
- 6. Az adatbázis kimeneti fájljait felhasználva a szoftver ezután teljesen automatikusan elvégzi az új adatok interpolálását szenzorcsoportonként. Ezt követően a program hozzáfűzi a száloptikai méréshez tartozó időbélyegeket, az FBG-alapú érzékelők által mért RH-, T- és a referencia T_{REF}- és RH_{REF}- értékeket a korábbi adatokat tartalmazó fájlokhoz.

A szoftvercsomag végeredményben minden FBG-alapú kombinált szenzorhoz elkészít egy ASCII-típusú fájlt, amely tartalmazza a vörös- és kékeltolódásra való korrekció elvégzéséhez szükséges összes adatot. Mivel ezeket a fájlokat mindig csak az újonnan mért értékekkel kell frissíteni, így ez a módszer gyors hozzáférést biztosít az adatokhoz.

Az adatgyűjtést követően lehetővé vált az FBG-alapú hőmérők vöröseltolódásra vonatkozó korrekciójának elvégzése. A száloptikai hőmérők által mért értékek referenciától való eltérése alapján, az eredeti kalibráció segítségével megadható, az ionizáló sugárzás hatására bekövetkezett hullámhossz-eltolódás mértéke. A mért hullámhossz-értékekből az így meghatározott $\Delta\lambda_D$ -t levonva az eredeti kalibráció használható.



18. ábra. A klímakamrában mért hőmérséklet a regisztrált hullámhossz-eltolódás és (színkód alkalmazásával) a relatív páratartalom függvényében.

Ahogyan azt a 4.1.1 alfejezetben láttuk, az FBG-alapú páratartalom-érzékelőknél a hőmérsékletre és a relatív páratartalomra vonatkozó érzékenységek keresztfüggést mutattak. Ezekhez az érzékelőkhöz ezért kidolgoztam egy módszert, amely a lineáris közelítésnél pontosabb kalibrációt tesz lehetővé. A "Felszínmódszert" a **17. (a) ábrán** 15-ös jelzésű helyre telepített FBG-alapú kombinált szenzor segítségével mutatom be. Első lépésként a klímakamrában mért hőmérsékletet a regisztrált hullámhossz-eltolódás és (színkód alkalmazásával) a relatív páratartalom függvényében rajzoltam fel, **18.**

ábra. A kevés mérési pont miatt a mért értékeket 1% méretű relatívpáratartalom-dobozokba rendeztem. A későbbiekben ennek hatását $RH_{kh} = \pm 0,5\%$ kerekítési hibaként veszem figyelembe. A **18. ábrán** látható, hogy az azonos páratartalom értékekhez tartozó pontok egyenessel illeszthetők. Az illesztett görbe paraméterei, a(RH) és b(RH) azonban függnek a relatív páratartalomtól, (14) egyenlet.

$$\Delta T(\Delta \lambda, RH) = \frac{a(RH) \cdot \Delta \lambda + b(RH)}{10},$$

$$\Delta T = T - T_0, \quad \Delta \lambda = \lambda_B - \lambda_0$$
(14)

Ennél az FBG-alapú páratartalom-érzékelőnél a $T_0 = -10.4 \,^{\circ}C$ és $\lambda_0 = 1515,456 \, nm$ értékeket választottam. Vizsgálhatjuk az a és b paraméterek relatívpáratartalom-függését. A 19. (a) ábrán látható, hogy a vizsgált tartományon az a paraméter értéke mindössze 4%-ot változik az átlagos értékhez viszonvítva. Ez а paraméter éppen а 18. ábra adott páratartalom-dobozába eső pontokra illesztett görbe meredeksége. Az elhanyagolható mértékű páratartalom-függés arra utal, hogy ezek a görbék egymással párhuzamosak. A 19. (a) ábra pontjainak egyenessel történő illesztése révén megadható az a paraméter relatívpáratartalom-függése, (15) egyenlet.

$$a(RH) = a_1 \cdot RH + a_2 \tag{15}$$

Az illesztésből nyert paraméterek értékei a következők:

• $a_1 = 3,89 \cdot 10^{-4} \pm 2,41 \cdot 10^{-4} \ ^{\circ}C/pm \cdot RH$ • $a_2 = 1,00057 \pm 6,853 \cdot 10^{-3} \ ^{\circ}C/pm$

A *b* paraméter relatívpáratartalom-függése is lineáris, **19. (b) ábrán**.

$$b(RH) = b_1 \cdot RH + b_2 \tag{16}$$

A (16) egyenletből nyert illesztési paraméterek:

- $b_1 = -1,26581 \pm 7,9109 \cdot 10^{-2} \ ^{\circ}C/_{RH}$
- $b_2 = -15,2717 \pm 2,24804$ °C.



19. ábra. Az a(RH) és b(RH) paraméterek relatívpáratartalom-függése, rendre (**a**) és (**b**).

A (14) egyenlet kifejthető a (15) és (16) egyenletek segítségével. Az így nyert alakot mutatja a (17) egyenlet.

$$\Delta T(\Delta\lambda, RH) = \frac{(a_1 \cdot RH + a_2) \cdot \Delta\lambda + b_1 \cdot RH + b_2}{10},$$

$$\Delta T = T - T_0, \ \Delta\lambda = \lambda_B - \lambda_0$$
(17)

A 19. (a) ábra alapján az *a* paraméter relatívpáratartalom-függése elhanyagolható, ezért a(RH) helyett bevezethető a (18) egyenlet alapján számolt a_c paramétert.

$$a_c = \frac{1}{n} \sum_{n=RH_{min}}^{RH_{max}} a_n (RH_n)$$
(18)

Az a_c segítségével a (17) egyenlet egyszerűbb alakot ölt. Az így nyert (19) egyenlet következménye, hogy a **18. ábra** illesztett egyenesei egymással párhuzamosak.

$$\Delta T(\Delta \lambda, RH) = \frac{a_c \cdot \Delta \lambda + b_1 \cdot RH + b_2}{10},$$

$$\Delta T = T - T_0, \quad \Delta \lambda = \lambda_B - \lambda_0$$
(19)

Egy FBG-alapú páratartalom-érzékelő által regisztrált Bragg-hullámhossz és a vele termikus kontaktusban lévő száloptikai hőmérő által mért hőmérséklet alapján a relatív páratartalom a (20) egyenlettel meghatározható.

$$RH = \frac{\Delta T(\Delta\lambda, RH) \cdot 10 - a_c \cdot \Delta\lambda - b_2}{b_1},$$

$$\Delta T = T - T_0, \quad \Delta\lambda = \lambda_B - \lambda_0$$
(20)

A fenti kifejezés segítségével grafikusan is ábrázolható egy adott érzékelő Felszínmódszerrel nyert kalibrációs felszíne, **20. ábra**. A módszer neve éppen arra a felszínre utal, amelyet a hőmérséklet és a Bragg-hullámhossz függvényében ábrázolt relatív páratartalom értékek rajzolnak ki.



20. ábra. A szövegben vizsgált FBG-alapú páratartalom-érzékelő kalibrációs felülete. A színkód a páratartalom értékeket mutatja [%] egységekben.

Következő lépésként az ionizáló sugárzás hatására jelentkező hullámhossz-eltolódást kell megmérni valamennyi szenzor esetén. A (19) egyenletből kifejezhető a hullámhossz-eltolódás ($\Delta \lambda_{sz}$). Ez azonban a kalibráció által adott érték, amely nem tartalmazza az ionizáló sugárzás hatását. Ugyanakkor az így nyert kifejezésbe *RH* helyére a referencia mért értéket írva, a mért és a számolt hullámhossz-eltolódás értékek különbsége éppen a vörös-, vagy kékeltolódás mértékét, $\Delta\lambda_D$ -t adja, (21) egyenlet.

$$\Delta \lambda_D = \Delta \lambda - \Delta \lambda_{sz},$$

$$\Delta \lambda_{sz} = \frac{\Delta T(\Delta \lambda, RH) \cdot 10 - b_1 \cdot RH_{ref} - b_2}{a_c},$$

$$\Delta T = T - T_0, \ \Delta \lambda = \lambda_B - \lambda_0$$

(21)

A részletes analízis azt a nem várt eredményt hozta, hogy a vizsgált, poliimiddel bevont FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetén az ionizáló sugárzás hatására jelentkező hullámhossz-eltolódás hőmérsékletfüggést mutat $(\Delta \lambda_D(RH))$, **21. ábra**.



21. ábra. Ionizáló sugárzás okozta hullámhossz-eltolódás hőmérsékletfüggése a szövegben vizsgált FBG-alapú páratartalom-érzékelő esetén. Az ábrán piros görbe jelöli az alkalmazott másodfokú polinomiális illesztést. Az ettől való 2 pm-es eltérést szaggatott vonalak szemléltetik, l. a szövegben.

A vizsgált érzékelők esetén a $\Delta\lambda_D$ értékek szenzoronként eltérő hőmérsékletfüggést mutattak, de a mért értékek valamennyi esetben leírhatók voltak a (22) egyenlet szerinti, másodfokú polinomiális görbével, ahol a szenzoronként eltérő p_1 , p_2 és p_3 paramétereket görbeillesztéssel határoztam meg.

$$\Delta \lambda_D = p_1 \cdot T^2 + p_2 \cdot T + p_3 \tag{22}$$

A fenti érzékelőre az illesztési paraméterek az alábbi értékeket veszik fel:

- $p_1 = -7.4 \cdot 10^{-4} \pm 3.17 \cdot 10^{-3} \ pm/_{\circ C^2},$
- $p_2 = 1,8629 \cdot 10^{-1} \pm 1,4571 \cdot 10^{-1} \ pm/_{\circ C}$
- $p_3 = -5,5864 \cdot 10^1 \pm 1,6268 \ pm.$

A **21. ábrán** szaggatott vonalak jelölik a $\Delta \lambda_D$ görbétől való ±2 pm-es eltérést. Ez megfelel а 4.1.1 alfejezetben mért ±0,2 °C-os hőmérsékletmérési bizonytalanságnak. Mivel a 21. ábra valamennyi mérési pontja a szaggatott vonalak között található. így az illesztett görbe használata a relatívpáratartalom-mérésben egy $RH_T = \pm 2\%$ mérési bizonytalanságot okoz.

Az FBG-alapú kombinált szenzorok kalibrációja ellenőrizhető a száloptikai és a referencia mérés eredményeinek összehasonlítása révén. A hőmérsékletmérések összevetése látható a 22. (a) ábrán. Az FBG-alapú hőmérő esetén jelölve van a kalibrációból származó ±0,2 °C-os mérési bizonytalanság, azonban ez az adat nem állt rendelkezésemre a referencia érzékelőknél. A 22. (b) ábra a fenti, Felszínmódszerrel kalibrált FBG-alapú páratartalom-érzékelő által regisztrált relatív páratartalmat mutatja. A teljes mérési bizonytalanság RH_{kh} és RH_T összegeként áll elő: $\pm 2,5\%$. Látható, hogy valamennyi mért érték hibahatáron belül megegyezik a referencia adattal. Az FBG-alapú érzékelőkkel mért legalacsonyabb relatív páratartalom, amit hitelesnek fogadunk el, 0,1%. Észre kell venni, hogy a referencia érték számos esetben 0,0%, ami arra utal, hogy az adott szakaszon a referencia érzékelő a mérési tartományának határán üzemel. Annak érdekében, hogy a CMS belsejében fennálló környezeti viszonyokról egy szemléletes képet kaphassunk, a harmatponti hőmérsékletet (DP) is meg kell határozni. Erre a célra egy, az irodalomban általánosan alkalmazott, közelítő formulát használtam fel, (23) egyenlet [HARDY B. 1998].

$$DP = \frac{243,12 \cdot H}{17,62 - H},$$

$$H = \frac{\log_{10} RH - 2}{0,4343} + \frac{17,62 \cdot T}{243,12 + T}$$
(23)

A *DP* értékek összevetése látható a **22.** (c) ábrán. Elmondható, hogy a száloptikai mérés $DP = -40^{\circ}C$ felett, hibahatáron belül megegyezik a referenciával. Fontos észrevenni azonban, hogy a harmatponti hőmérséklet meghatározására használt (23) egyenlet logaritmikus páratartalom-függést ír le. Emiatt alacsony *RH* esetén kis relatívpáratartalom-változás is nagy harmatpontihőmérséklet-változásnak felelnek meg. Ennek megfelelően *DP* csökkenésével nő a mérési bizonytalanság is. Ettől függetlenül, vagy inkább ennek ellenére, a **22. ábra** tovább igazolja az FBG-alapú kombinált szenzorok és az alkalmazott Felületmódszer sikerét. A harmatponti hőmérséklet ugyanis azt a hőmérséklet jelöli, ahol a levegőben lévő vízpára lecsapódik. Ha a mért hőmérséklet értéke kisebb, mint *DP*, akkor a mérési helyen nem várható a CMS-re nézve végzetes következményekkel járó, vízpára-lecsapódás. A **22. (a)** és (b) ábrák alapján bizonyosan állítható, hogy a fenti feltétel a vizsgált időintervallumban fennáll.

2014 során valamennyi már telepített FBG-alapú kombinált szenzor a Felszínmódszerrel kalibrálva szolgáltatott mérési eredményeket. Az LHC indítását megelőzően ugyanakkor a CMS-ben mért hőmérséklet- és páratartalom-tartományok lehetővé tették számos szenzor esetén, hogy azokat a referencia méréshez kalibráljuk. Ehhez továbbra is a fent ismertetett offline adatgyűjtő rendszert alkalmaztuk. Az új, második kalibráció előnye a szükséges paraméterek számának csökkenése, hiszen az ionizáló sugárzás hatására jelentkező hullámhossz-eltolódás hőmérsékletfüggésével így nem kell foglalkozni.



22. ábra. A szövegben vizsgált FBG-alapú kombinált szenzor és a kapcsolódó referencia által mért hőmérséklet (a), relatív páratartalom (b) és harmatponti hőmérséklet (c).

4.1.4 Fejezet-összefoglaló

A CMS legbelső eleme a nyomkövető detektor, amelyet élettartama növelése végett hűtenek. A levegő páratartalmának lecsapódása a nehezen hozzáférhető és drága elektronikus alkatrészek meghibásodásához vezet. Ennek elkerülésére a nyomkövető detektort körülvevő térrészben fontos a hőmérséklet és a relatív páratartalom folyamatos mérése. Erre a célra csoportunk két FBG-alapú érzékelőből álló kombinált szenzort (thermo-hygrometer) fejlesztett ki. Ennek egyik eleme egy poliimiddel bevont Bragg-rács, míg a másik a páratartalom-érzékelővel termikus kontaktusban elhelyezett száloptikai hőmérő.

A mérési pontosság növeléséhez megadtuk a kereskedelemben kapható FGB-alapú hőmérők ± 2 °C pontossággal érvényes kalibrációját a -20 és +20 °C közötti hőmérséklet-tartományra. A speciálisan erre a célra tervezett és gyártott FBG-alapú páratartalom-érzékelők kalibrációs méréseit szintén klímakamrában végeztük el 0 és 60% közötti relatívpáratartalom-tartományon. Méréseinkkel először mutattuk ki, hogy az irodalom által használt lineáris összefüggés nem írja le pontosan a poliimid bevonattal ellátott FBG-alapú páratartalom-érzékelők viselkedését. A szenzorok relatív páratartalomra és hőmérsékletre vonatkozó érzékenységei ugyanis keresztfüggést mutattak, rendre $S_{RH}(T)$ és $S_T(RH)$.

Az alkalmazott, FBG-alapú kombinált érzékelők sugárzásállóságát ⁶⁰Co radioizotóp által kibocsájtott gamma fotonokkal vizsgáltuk 210 kGy elnyelt dózisig. Azt tapasztaltuk, hogy a száloptikai hőmérők kalibrációja érvényben marad az ionizáló sugárzás hatására bekövetkező hullámhossz-növekedésre (vöröseltolódásra) történő korrekció elvégzését követően. Az FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetében is hasonló eredményt kaptunk. Valamennyi szenzorra igaz, hogy a teljes elnyelt dózis növekedésével azok további elnyelt dózisra vonatkozó érzékenysége csökken. Az eredmények alapján csoportunk a felhasznált FBG-alapú érzékelők előzetes besugárzása mellett döntött ($D_{TOT} = 210$ kGy), ami egy nagyságrenddel csökkenti az ionizáló sugárzás mérésre gyakorolt hatását.

2013 óta összesen 72 darab FBG-alapú kombinált szenzort telepítettünk a CMS-be. A mérési eredményeket a CMS Detektor Szabályozó Rendszerébe feltöltve tesszük elérhetővé [SZILLASI Z. et al. 2012]. A környezeti paraméterek mérésének fontosságát hangsúlyozza az a tény is, hogy a CMS-ben a száloptikai megoldás mellett még két, egymástól független rendszert alkalmaznak erre a célra: a detektor néhány pontjáról vett mintákat pontos, megbízható mérést lehetővé tevő harmatpontmérőkkel figyelik; emellett nem sugárzásálló, ezért rövid élettartamú elektronikus hőmérőket és páratartalom-érzékelőket is felszereltek. Ahol erre lehetőség volt, ott az FBG-alapú kombinált szenzorokat közvetlenül ez utóbbi érzékelők mellé telepítettük, így azok referenciaként alkalmazhatók.

A fejlesztett FBG-alapú kombinált szenzorokon az előzetes besugárzás következtében jelentkező hullámhossz-eltolódásokra korrigálni kell. A kalibrációs mérések újbóli elvégzésére a szűkös időkeret miatt nem volt lehetőség, ezért elkészítettem a csoportunk által használt offline adatgyűjtő és kalibrációs szoftvercsomagot, ami lehetővé tette a kombinált érzékelőknek az LS1 ciklusa során történő telepítését. Az FBG-alapú páratartalom-érzékelők előzetes besugárzást követő vörös- és kékeltolódásra vonatkozó korrekcióját ennek segítségével ugyanis az érzékelők CMS-be történő telepítése után is el lehetett végezni (automatizálva), a hosszadalmas kalibrációs mérések megismétlése nélkül. A számításokhoz a fenti referencia eszközök által mért értékeket használtam fel.

A csoportunk által fejlesztett, poliimid bevonattal készült FBG-alapú páratartalom-érzékelők kalibrációjához kidolgoztam egy modellt. Az irodalomban használt lineáris megközelítés helyett ez a módszer figyelembe veszi, hogy az FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetén a hőmérsékletre vonatkozó érzékenység (S_T) függ a relatív páratartalomtól és azt is, hogy a relatív páratartalomra vonatkozó érzékenység (S_{RH}) pedig a hőmérséklet függvénye. A lineáris összefüggés alkalmazásához viszonyítva a modell segítségével a fejlesztett FBG-alapú páratartalom-érzékelők mérési bizonytalanságát közel egy nagyságrenddel, ±18,0%-ról ±2,5%-ra csökkentettem. A részletes analízis

kimutatta, hogy a fejlesztett, poliimiddel bevont FBG-alapú páratartalom-érzékelők esetén az ionizáló sugárzás hatására jelentkező hullámhossz-eltolódás hőmérsékletfüggést mutat, $\Delta\lambda_D(RH)$. Az erre vonatkozó korrekciót másodfokú polinomiális görbével történő illesztés alapján adtam meg. Az így nyert paraméterek szenzoronként eltérőnek bizonyultak.

Az FBG-alapú hőmérők és páratartalom-mérők által szolgáltatott adatok jó egyezést mutatnak a CMS-be telepített egyéb mérőműszerek által mért értékekkel [PhDJ01]. A kitűzött célok sikeres teljesítését igazolja az is, hogy csoportunkat felkérték egy hasonló rendszer kiépítésére az LHC másik nagy kísérlete, az ATLAS-detektor számára. A CMS-ben gyűjtött tapasztalatok azt mutatják, hogy üzemi körülmények között – ahol a vízpára lecsapódásának veszélye fennáll – a levegő relatív páratartalma 10% alatt van. A kereskedelemben kapható érzékelők mérési bizonytalansága nő csökkenő RH mellett. Távlati célként csoportunk ezért olyan száloptikai páratartalom-érzékelő fejlesztését tűzte ki célul, amely a 0-10% RH-tartományon pontos mérést tesz lehetővé.

4.2 LPG-alapú páratartalom-érzékelő fejlesztése

3.2 А alfejezetben láttuk. hogy а fejlesztett LPG-alapú páratartalom-érzékelők átviteli spektrumán az FBG-érzékelőknél általánosan alkalmazott jelfeldolgozó algoritmus nem használható. Ennek feloldására célom volt egy olyan matematikai módszer kidolgozása, amely a mért rezonancia-völgy alakjától (pontosabban annak változásától) függetlenül képes а Bragg-hullámhossz meghatározására. Ehhez a kalibrációs mérések során mentett spektrumokat kívántam felhasználni. Csoportunk azért döntött az offline adatfeldolgozás mellett, mert az lehetővé tette a mérések folytatását a jelfeldolgozó algoritmus fejlesztésének ideje alatt is.

A Bragg-hullámhossz meghatározására alkalmas matematikai eljárás számos kritériumnak kellett, hogy eleget tegyen:

- 1. A rezonancia-völgyből származtatott λ_B csak az aktuális spektrumtól függhet. Az előző mérések eredményei nem befolyásolhatják annak értékét. Ez azt is jelenti, hogy a völgykereső algoritmus sem támaszkodhat korábban mért értékekre.
- Gyors módszerre van szükség. Egy-egy spektrum elemzéséhez (tehát csatornánként és mérésenként) 16001 teljesítményérték feldolgozása szükséges. A kalibrációs mérések 9-12 óráig is eltarthatnak, így percenként kétszer mentve a négy csatornához tartozó spektrumokat, 0,7-0,9 milliárd mért érték feldolgozására van szükség.

Első lépésként egy triviális megközelítést választottam. Vizsgáltam azt, spektrum abszolút minimumához tartozó hullámhossz-érték hogy a felhasználható-e Bragg-hullámhosszként. A 23. (a) ábra az LPG_{RH1} elnevezésű érzékelő 1-2% RH-tartományon mért rezonancia-völgyeit mutatja erős nagyításban, közel a völgy aljához. Jól látható, hogy az egyes görbék nem csak makroskálán, de mikroskálán is eltérnek (nem úgy, mint a 10. ábrán ismertetett FBG-csúcsok). Ezen felül a görbék zajosak, a pillanatnyi minimum helyzetét a zaj (tüskék) és nem a görbe menete határozza meg. A tüskék (számunkra) véletlen helyen történő megjelenésének mérésre gyakorolt hatása a nanométeres nagyságrendbe esik. Ez több nagyságrenddel nagyobb érték, mint az interrogátor feloldóképessége, ami 5 pm spektrumok mentésekor. A 10 pontra történő átlagolással történő simítás eredményét mutatja a 23. (b) ábra. Látható, hogy még az így nyert görbék is zajosak. Tapasztalat szerint kellően sima függvénymenet csak hozzávetőlegesen 500 pontra történő átlagolás mellett kapható. Ez azonban még mozgóátlag alkalmazása mellet sem kielégítő megoldás: egyrészt ekkor már 2,5 nanométeres tartományra terjed ki az átlagolás, ami az esetleges aszimmetriák figyelembevételét okozhatja; másrészt ekkor 1,5 nm-rel csökken a mérési tartomány mind alacsony, mind pedig magas hullámhosszaknál. Ez fontos, mert ahogyan azt már a 9. ábrán is láttuk, magas páratartalom értékek esetén a völgy megközelíti a mérési tartomány szélét.



LPG-pektrum RH-függése (1% - 2%)

23. ábra. Az LPG_{RH1} elnevezésű érzékelő rezonancia-völgye erős nagyításban különböző RH-értékek mellett (**a**). A görbék 10 pontra történő átlagolást követően is zajosak (**b**).

Az átviteli spektrum abszolút minimumának helyzete a fenti eredmények alapján nem alkalmas az LPG-alapú érzékelők válaszfüggvényének jellemzésére. A továbbiakban olyan módszereket kerestem, amelyek figyelembe veszik a rezonancia-völgyek alakját (mélység, szimmetria) és ennek megfelelően alkalmasak a spektrum hasznos részének beazonosítására. Végül négy eltérő módszert dolgoztam ki. Ezek közül az egyiknél egy paraméter három lehetséges értékére is elvégeztem a később tárgyalt vizsgálatokat. Ennek megfelelően összesen 6-féle eljárást vetettem össze:

1. Spektrum minimuma.

Ez a módszer – a fenti gondolatmenet alapján – a mozgóátlaggal simított spektrum minimumához tartozó hullámhossz-értéket fogadja el Bragg-hullámhosszként. A 300 pontra történő átlagszámítás minden pontban 1,5 nm-es tartományban mért értékek átlagát adja. A függvénymenet így csak alacsony páratartalmaknál sima, ami magas RH-értékeknél várhatóan a mérési pontosság romlását okozza. Ugyanakkor a módszer nem, vagy csak kis mértékben veszi figyelembe a rezonancia-völgy szimmetriatulajdonságait.

2. FFT-minimum.

Diszkrét pontokkal megadott spektrum simítására egy másik általánosan alkalmazott módszer a gyors Fourier-transzformáció (Fast Fourier Transformation, FFT). A függvénymenet sajátosságai miatt esetünkben a spektrum numerikus deriváltján kell FFT-simítást végezni. Ebből a simított spektrum, majd annak minimuma meghatározható. Az utóbbihoz tartozó hullámhossz-érték adja λ_B -t. A numerikus derivált számítása az 1. pontban ismertetett mozgóátlagolt spektrum felhasználásával történik. A továbbiakban

ezért figyelembe kell venni, hogy az 1. módszerhez hasonlóan a rezonancia-völgy aszimmetriája kis mértékben itt is befolyással lehet az eredményre.

3. Tömegközéppont-módszer.

Ez a módszer – hasonlóan az FBG-alapú érzékelőkre jellemző csúcsoknál alkalmazott eljáráshoz – a relatív küszöb alá eső pontok hullámhossz-tengelyen elfoglalt helyeinek teljesítményértékekkel súlyozott átlagaként számítja a Bragg-hullámhosszat. A rezonancia-völgy minimumának (P'_{min}) beazonosítását követően (lásd később) attól "balra" és "jobbra", tehát a kisebb és a nagyobb hullámhosszak irányában is megadható a spektrum maximuma, rendre P'_{maxL} és P'_{maxH} . Ezek közül minden esetben a kisebb értéket fogadjuk el, P'_{max} . Az aktuális küszöbszint (P'_{TH}) a (24) egyenlet alapján számolható. Ennek a módszernek az előnye, hogy a rezonancia-völgy mélységének százalékos arányban megadott része kerül csak felhasználásra a Bragg-hullámhossz számításakor. Ha a völgy mélysége változik, ennek megfelelően emelkedik, vagy süllyed a P'_{TH} küszöbszint is. A súlyuk számítása a $W_i = P'_{TH} - P'_i$ képlettel történik, ahol *i* a spektrum értékes részét képező pontjainak indexe.

• <u>Tömegközéppont (Rel. Küszöb: 25%).</u>

A küszöbszintet meghatározó *S* paraméter értéke ebben az esetben 0,25.

• <u>Tömegközéppont (Rel. Küszöb: 50%).</u>

Az *S* paraméter értéke itt 0,5. A völgy nagyobb részének felhasználása csökkenti a spektrumon mért zaj hatását. Ugyanakkor, ha a rezonancia-völgy mélysége mellett annak szimmetria-tulajdonságai is változnak, az nagyobb mértékben hat a Bragg-hullámhossz értékére, mint S = 0,25 esetén.

 <u>Tömegközéppont (Rel. Küszöb: 75%).</u> Ebben az esetben az S paraméter értéke 0,75. Észre kell venni, hogy S további növelésére nincs mód, mert 9. ábrán szemléltetett, 0,2% páratartalomhoz tartozó görbe esetén az aktuális küszöbszint már eléri a völgy jobb oldali, kiszélesedő részét. Ha a szimmetria-tulajdonság páratartalom-függő,
annak hatása egy a völgy helyzetétől független, további *RH*-függő hullámhossz-eltolódási tag.

4. Tömegközéppont (Rel. Küszöb: ConCon).

Egy rezonancia-völgy alján ülve a spektrumon az alacsonyabb és magasabb hullámhosszak irányába elindulva is azt tapasztaljuk, hogy (simítást követően) a függvény menete előbb konvex, ami egy adott ponton konkávba vált át. Mivel ez a tulajdonság a görbe érintőjével van kapcsolatban, vizsgáltam az átviteli spektrum numerikus deriváltját. Ahogyan az a 24. (a) és (b) ábrákon látható, a konvex-konkáv átmeneti pontoknak az FFT-simított derivált görbén egy-egy lokális minimum és maximum felel meg, rendre a völgy alacsony és magas hullámhosszúságú oldalán. A spektrum ezeken a helyeken felvett P'_{ConConL} és P'_{ConConH} teljesítményértékei közül a kisebbet fogadjuk el küszöbszintként (P'_{conCon}). A P'_{conCon} alá eső hullámhossz-tengelyen elfoglalt pontok helyeinek teljesítményértékekkel ($W_i = P'_{ConCon} - P'_i$) súlyozott átlaga adja a Bragg-hullámhosszat.

E módszer előnye, hogy a választott küszöbérték a rezonancia-völgy alakjától függ. A **24. (a) és (b) ábrák** összevetésével látható, hogy ez az algoritmus eredendően figyelmen kívül hagyja a völgy jobb oldali, kiszélesedő részét.

$$P'_{TH} = P'_{min} + (S \cdot P'_{max} - P'_{min})$$
(24)

A fenti völgykereső algoritmusok mindegyike teljesíti a korábban ismertetett elvárásokat: egymástól függetlenül dolgozzák fel a spektrumokat, az alkalmazott matematikai eljárások pedig gyors számítást tesznek lehetővé. Mivel azonban működésük eltérő, egyazon spektrum esetén mindegyik más-más Bragg-hullámhosszat számol. Egy páratartalom kalibrációs mérés során mentett átviteli spektrumokból, a fent ismertetett módszerekkel meghatározott λ_B -k időbeli változása látható a **25. ábrán**.



24. ábra. Az LPG_{RHI} átviteli spektruma (a). A spektrum numerikus deriváltján megjelenő globális minimum és maximum helyek a rezonancia-völgyet leíró görbe konvex-konkáv átmenetének helyeit adják (b).

A különböző módszerekhez tartozó görbék az elvárásoknak megfelelően nem esnek egybe. A függvénymeneteken felfedezhető közel vízszintes tartományok ("lépcsők") rendre a 0,2; 5,1; 7,6 és 8,9% páratartalom értékekhez tartoznak. Látható, hogy a Spektrum minimuma módszer a többihez képest kimagaslóan zajos eredményt biztosít. A görbék eltérő mértékű fluktuációjától eltekintve kijelenthető, hogy az FFT-minimum, a Tkp. (Rel. Küszöb 25%) és Tkp. (Rel. Küszöb: Con-Con) módszerek a minimumhoz közel azonos eredményt szolgáltatnak. Az ettől való eltérés nő a 3. módszer esetén az *S* paraméter növelésével. Ez összhangban van azzal, hogy a **9. ábrán** ismertetett rezonancia-völgyek nem szimmetrikusak: a 0,2% *RH*-hoz tartozó görbén jól kivehető a völgy jobb oldalának kiszélesedése.



25. ábra. Az szövegben ismertetett algoritmusokkal meghatározott Bragg-hullámhossz értékek időbeli változása egy páratartalom kalibrációs mérés során.

A különböző matematikai algoritmusok összevetésére meghatároztam az FFT-minimum és a többi módszer által számolt Bragg-hullámhosszak különbségét, **26. ábra**. Elmondható, hogy a Spektrum minimumaként és az FFT-simított spektrum minimumaként meghatározott λ_B értékek egybeesnek (a fekete görbe $\Delta \lambda = 0$ nm körül fluktuál). Ezekhez képest a mélységfüggő relatív küszöböt használó Tömegközéppont-módszer a páratartalom növelésével növekvő eltérést mutat. Itt a legkisebb *S* paraméter mellett a legkisebb a mért eltérés, míg a legnagyobb eltérést az *S* = 0,75 adja. Az alakfüggő küszöbszintet biztosító 4. módszernél a legkisebb mért páratartalom-lépcső után közel azonos eltérések mérhetők.



Különféle módszerel meghatározott λ-értékek eltérései

26. ábra. Az szövegben ismertetett völgykereső algoritmusok által meghatározott Bragg-hullámhosszak eltérései az FFT-minimum módszer eredményeitől.

A fenti összevetésből látszik, hogy a minimum helyzete jelentősen terhelt a spektrumon mért zajtól, a többi módszer ezzel ellentétben kisebb mértékű fluktuációt mutat. A völgykereső algoritmusok közül ki kellett választani egyet. Ehhez vizsgáltam a kidolgozott matematikai módszerek pontosságát: azt, hogy az egyes eljárásokhoz tartozó kalibrációk közül melyik az, amelyik a legkisebb mérési bizonytalanságot szolgáltatja.

Első lépésként az analízishez készítettem egy szoftvert. A páratartalom kalibrációs mérések során az 3.1 alfejezetben ismertetett klímakamrában lépcsőzetesen változtattuk a páratartalmat. Ez lehetővé tette, hogy csak a stacionárius állapotban mért hullámhosszakat és *RH*-értékeket használjuk fel a kalibráció során. (Hasonlóan jártunk el a hőmérséklet kalibrációs teszteknél is.) Minden "lépcsőnél" elegendő időt hagytunk arra, hogy a kamra levegőjének relatív páratartalma egy állandósult értékre beálljon. Ezt követően csak további 10-20 perc elteltével változtattuk meg a beáramló nedves levegő arányát. Ez a

mérési mód lehetővé teszi egy automatizált program használatát: a stacionárius szakaszok után bekövetkező gyors változás az *RH*-idő görbe numerikus deriváltján csúcsokat eredményez, **27. (a) és (b) ábrák**.



27. ábra. Az első páratartalom kalibrációs mérés során regisztrált RH-idő görbe (a) és ennek numerikus deriváltja (b).

Ezek helyzetéből megadható, hogy a teszt során mikor volt időben állandó a kamra levegőjének relatív páratartalma. A meghatározott időintervallumokban az általam írt analízis szoftver egy-egy 10 perces szakaszon kiszámolja az átlagos Bragg-hullámhosszat, az átlagos RH- és T-értékeket, **28.** (a) és (b) ábrák. Emellett a program meghatározza az előbbi értékekhez tartozó véletlen hiba nagyságát (szórást).



28. ábra. Az első páratartalom kalibrációs mérés során regisztrált páratartalom (**a**) és hőmérséklet értékek (**b**) időfüggése. A stacionárius állapotok során mért értékeket piros pontok jelölik.

A fenti módon meghatározott értékek segítségével már megadható a vizsgált LPG_{RH1} nevű páratartalom-érzékelő kalibrációja. A 29. (a), (b), (c), (d), ábrák fent ismertetett módszerekkel meghatározott **(e)** és (f) a hullámhossz-értékeket mutatják referencia páratartalom, а RH(ref) függvényében az első négy mérésre. Látható, hogy a vizsgált érzékelő hullámhossz-eltolódása (az FBG-alapú páratartalom-érzékelőkétől) eltérően nem lineárisan függ a páratartalomtól. Az RH = 0% és RH = 5% között mért $\Delta\lambda$ hozzávetőlegesen a felét teszi ki a teljes mérési tartományon (0-50%) regisztrált hullámhossz-eltolódásnak. A kalibrációt a (25) egyenletnek megfelelő exponenciális görbe illesztésével végeztem el.

$$RH = e^{p_1^i + \lambda \cdot p_2^i} \tag{25}$$

A p_1^i és p_2^i paraméterek esetén *i* index – a később ismertetett **32. ábra** szerinti számozásnak megfelelően – az egyes völgykereső módszerekre utal.



29. ábra. Az LPG_{RH1} páratartalom kalibrációs mérései során a szövegben vizsgált völgykereső algoritmusok által meghatározott Bragg-hullámhosszak RH-fügése.

A 29. (a), (b), (c), (d), (e) és (f) ábrák alapján elmondható, hogy a vizsgált LPG-alapú szenzor páratartalomra vonatkozó érzékenysége (különösen 10 % *RH* alatt) jelentősen nagyobb, mint a 4.1. alfejezetben ismertetett FBG-alapú páratartalom-érzékelőké. Erre szükség is van az önállóan, tehát hőmérsékleti korrekció nélkül is használható száloptikai páratartalom-érzékelőknél,

ugyanakkor a megfigyelt nagyobb érzékenység a kisebb mérési bizonytalanság elérésének szükséges feltétele is egyben. Az illesztésből nyert p_1^i paraméterek értékei a következők:

- $p_1^1 = 199.453584$,
- $p_1^2 = 210.326747$,
- $p_1^3 = 196.414922$,
- $p_1^4 = 190.540072$,
- $p_1^5 = 180.707790$,
- $p_1^6 = 196.667065.$



30. ábra. Az LPG_{RH1} által mért páratartalom-értékek a referencia függvényében.

A p_2^i paraméterekre az alábbi értékeket kaptam:

- $p_2^1 = -0.129074 \ 1/_{nm}$,
- $p_2^2 = -0.136220 \ ^1/_{nm}$,
- $p_2^3 = -0.127071 \ \frac{1}{nm}$,
- $p_2^4 = -0.123193 \ ^1/_{nm}$,
- $p_2^5 = -0.116707 \ ^1/_{nm}$,

• $p_2^6 = -0.127232 \ \frac{1}{nm}$.

A 29. (a), (b), (c), (d), (e) és (f) ábrák összevetésével a kidolgozott matematikai módszerek közt mérhető eltérések csak nehezen azonosíthatók a felrajzolt több, mint 40 nm-es mérési tartomány miatt. Ahhoz, hogy következtetéseket lehessen levonni az egyes módszerek pontosságáról, ábrázoltam a vizsgált LPG-alapú páratartalom-érzékelő által mért páratartalom értékeket a referencia *RH*-k függvényében, **30. (a) ábra**. A referenciától való eltéréseket mutatja a **31. ábra**. Az itt megjelenő mérési bizonytalanság a kalibráció során nyert szórások értékekével egyenlő. Látható, hogy ez a Spektrum minimuma módszernél kimagaslóan nagy, ami alapján elmondtató, hogy ez a módszer pontos mérésre nem alkalmas. Fontos észrevenni azonban azt, hogy a többi völgykereső algoritmus esetén a referencia értékektől való eltérések meghaladják a szórás mértékét. Emellett a grafikon jelzi, hogy az alkalmazott kalibrációs módszer valamennyi esetben szisztematikusan alacsonyabb értéket ad 40% *RH* felett.



Eltérések módszerfüggése

31. ábra. Az LPG_{RH1} által mért értékek referenciától való eltérése a RH(Ref) függvényében.

A fenti eredmények átláthatóbb formába hozhatók. A **31. ábra** pontjai alapján számítható a referenciától való négyzetesközép-eltérés valamennyi

vizsgált esetre (N^i). Szintén megadható egy-egy hibaérték a **31. ábrán** szereplő szórásértékek átlagaként (SD^i). Így valamennyi vizsgált módszer jellemezhető a fenti két mennyiséggel. A **32. ábra** alapján elmondható, hogy a két legjobb eredményt biztosító módszer a Tkp. (Rel. Küszöb: 75%) és a Tkp. (Rel. Küszöb: ConCon). Definiálhatjuk a teljes mérési bizonytalanságot a (26) egyenlet szerinti formában.

$$N_{TOT}^i = N^i + SD^i \tag{26}$$

 N_{TOT}^5 értéke 1,422%, míg N_{TOT}^5 1,442%-kal egyenlő. A két, közel azonos érték alapján nem lehetett egyértelmű döntést hozni arról, hogy a kettő közül melyik módszert érdemes használni.



32. ábra. A szövegben ismertetett módszerek jellemzésére alkalmazott négyzetesközép-eltérések. A hiba az egyes eljárásokhoz tartozó kalibrációkból származó szórásértékek átlagaként lett megadva.

Következő lépésként ezért összevetettem a fejlesztett LPG-alapú páratartalom-érzékelők mérési eredményeit a referencia páratartalom-méréssel, **33. (a) ábra**. A referenciától való eltéréseket mutatja a **33. (b) ábra**. Itt a pontok 0%-tól való távolsága az N^i értékével van összefüggésben, míg a felrajzolt hiba mértéke SD^i -t jelöli. A Tkp. (Rel. Küszöb: ConCon) módszer az esetek többségében kisebb eltéréseket ad, mint a Tkp. (Rel. Küszöb: 75%). A mérési

bizonytalanság mind a két esetben azonosnak mondható. Ez arra utal, hogy az LPG-alapú érzékelőknél általánosan alkalmazható völgykereső-algoritmus kiválasztásánál azt kell figyelembe venni, hogy melyik módszerhez tartozik a legkisebb négyzetesközép-eltérés, **32. ábra**. Ennek alapján végül a Tömegközéppont (Rel. Küszöb: ConCon) módszer alkalmazását javasoltam.



33. ábra. Az LPG_{RHI} elnevezésű érzékelővel mért és a referencia páratartalom értékek összevetése (a). A legkisebb eltérést a Tkp. (Rel. Küszöb: ConCon) módszer adja (b).

A kiválasztott matematikai algoritmussal ezután becslést adtam az LPG_{RH1} elnevezésű érzékelő S_T értékére. Ehhez az első hőmérséklet kalibrációs

mérést használtam fel és a korábban ismertetett analízis szoftverrel határoztam meg a stacionárius állapotokhoz tartozó értékeket. A **34. ábrán** a referencia hőmérsékletet ábrázoltam a mért hullámhosszak függvényében. A kevés mérési pont miatt azokat a (27) egyenlet szerinti egyenessel illesztettem meg.

$$T = c_1 + c_2 \cdot \lambda \tag{27}$$

Az illesztési paraméterek értékei a következők:

- $c_1 = -12440.700350 \,^{\circ}C$,
- $c_2 = 8.195493 \ ^{\circ}C/_{nm}$.

 S_T a c_2 paraméter reciprokaként adódik, értéke pedig 0,122 nm/°C. Az átlagos S_{RH} a vizsgált LPG-alapú páratartalom-érzékelőnél 10% *RH* alatt hozzávetőlegesen 2,4 nm/%, míg a teljes mérési tartományon (0,2-49,2%) 0,8 nm/%. Ennek fényében elmondható, hogy a prototípus LPG-alapú páratartalom-érzékelők a nagyenergiás fizikai alkalmazásokra jellemző hőmérséklet (<20°C) és páratartalom (<10%) értékek esetén önállóan, hőmérsékleti korrekció nélkül is alkalmazhatók.



34. ábra. Az LPG_{RH1}-szenzor első hőmérséklet kalibrációs tesztje során mért értékek. Az illesztett lineáris görbe meredekségének reciproka a szenzor hőmérsékletre vonatkozó érzékenységét adja.

Az LPG-alapú páratartalom-érzékelők átviteli spektrumához általam írt jelfeldolgozó algoritmus lehetővé tette a TiO₂ és SnO₂ bevonattal ellátott szenzorok kalibrációs méréseinek elvégzését [PhDP02]. Az eredmények igazolták, hogy mind a két vizsgált anyag alkalmazható hosszú periódusú száloptikai rácsokhoz nedvességre érzékeny bevonatként. A titán-dioxid ugyanakkor nagyobb páratartalomra vonatkozó érzékenységet biztosít, mint az ón-dioxid [PhDJ04]. Minél nagyobb S_{RH} értéke, annál kevésbé szükséges a mért hullámhossz-eltolódás hőmérsékleti tagjára korrigálni. Az önállóan is alkalmazható LPG-alapú páratartalom-érzékelőkhöz ezért csoportunk a TiO₂-ot választotta a sorozatgyártásban készülő szenzorok bevonatául.

4.2.1 Fejezet-összefoglaló

Az FBG-alapú érzékelők páratartalomra vonatkozó érzékenysége, S_{RH} rendszerint 1,0-1,5 pm/% [VENUGOPALAN T. et al. 2008a, VENUGOPALAN T. et al. 2008b]. Figyelembe véve, hogy ezeknél a szenzoroknál az S_T értéke hozzávetőlegesen 10 pm/°C, elengedhetetlen a párhuzamos és pontos hőmérsékletmérés. Ennek feloldására csoportunk egy önállóan is alkalmazható száloptikai páratartalom-érzékelő fejlesztésébe kezdett. Ehhez vizsgáltuk a titán-dioxid (TiO₂) és az ón-dioxid (SnO₂) nedvességre érzékeny bevonatként történő alkalmazásának lehetőségeit hosszú periódusú száloptikai rácsoknál [PhDJ04].

A fejlesztett, LPG-alapú érzékelők kalibrációs méréseit CERN-ben végeztük el. Az előzetes mérések felfedték, hogy a vizsgált LPG-alapú szenzorok rezonancia-völgyeinek nem csak a hullámhossz tengelyen elfoglalt helyzete, de azok félértékszélessége és alakja (szimmetria tulajdonság, mélység) is függ a relatív páratartalomtól és (kis mértékben) a hőmérséklettől. Az FBG-spektrumoknál használt jelfeldolgozó algoritmus emiatt nem alkalmas az LPG-alapú érzékelők vizsgálatára. A mérések elvégzéséhez ezért előbb egy olyan matematikai módszert kellett kidolgozni, amely a mért rezonancia-völgy

alakjától függetlenül képes a Bragg-hullámhossz meghatározására. Ehhez a kalibrációs mérések során mentett spektrumokat használtam fel. Összesen négy eltérő matematikai algoritmust készítettem és megmutattam, hogy azok mindegyike alkalmas az LPG-spektrumok értelmezésére, gyors és automatizálható.

Vizsgáltam a kidolgozott matematikai módszerek pontosságát: azt, hogy az egyes eljárásokhoz tartozó kalibrációk közül melyik az, amelyik a legkisebb mérési bizonytalanságot adja. Igazoltam, hogy a legjobb eredményt a Tömegközéppont (Rel. Küszöb: ConCon)-módszer (részletes leírása található a 4.2 alfejezetben) szolgáltatja. Ez a spektrum numerikus deriváltját használja (FFT-simítást követően) a rezonancia-völgy hasznos részének beazonosítására, aminek a tömegközéppontja adja a mért hullámhosszat. Az eljárás jelentősen csökkenti a spektrumon mért zaj hatását.

Az LPG-alapú szenzorok átviteli spektrumához általam írt jelfeldolgozó lehetővé tette а TiO₂ és SnO₂ bevonattal algoritmus ellátott páratartalom-érzékelők kalibrációs méréseinek elvégzését [PhDP02]. Az eredmények igazolták, hogy mind a két vizsgált anyag alkalmazható hosszú periódusú száloptikai rácsokhoz nedvességre érzékeny bevonatként. A titán-dioxid ugyanakkor nagyobb páratartalomra vonatkozó érzékenységet biztosít, mint az ón-dioxid [PhDJ04]. Minél nagyobb az S_{RH} értéke, annál kevésbé szükséges a mért hullámhossz-eltolódás hőmérsékleti tagjára korrigálni. Az önállóan is alkalmazható LPG-alapú páratartalom-érzékelőkhöz ezért csoportunk a TiO₂-ot választotta a sorozatgyártásban készülő szenzorok bevonatául.

4.3 LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálata

A 3.3 alfejezetben láttuk, hogy csoportunk célul tűzte ki az LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálatainak az MTA Atomki ⁶⁰Co radioizotópos nagy intenzitású gamma-foton forrásával történő elvégzését. Az ott rendelkezésre álló infrastruktúra ugyanis lehetőséget biztosít az érzékelők besugárzás alatti online kiolvasására. Mivel az LPG-alapú érzékelőket a forrástól kevesebb, mint 30 cm-re kívántuk elhelyezni (3.3. alfejezet), ezért hasznos a besugárzások szimulációval támogatott tervezése. Ehhez elkészítettem az MTA Atomki ⁶⁰Co radioizotópos nagy intenzitású gamma-foton forrásának és a besugárzó helyiségnek egy nagy pontosságú geometriai modelljét, **35. ábra**.



35. *ábra.* Az MTA Atomki ⁶⁰Co forrása és a besugárzó helyiség nagy pontosságú geometriai modelljének grafikus ábrázolása.

Ez tartalmazza a forrást, a besugárzó berendezést (**36. ábra**) és a sugárvédelmi falakat. A modell input fájlként használható FLUKA-szimulációk [BÖHLEN T. T. et al. 2014, FERRARI A. et al. 2005] során, amelyekkel (többek között) a száloptikai érzékelőkön végzendő besugárzások tervezhetők.

Az előzetes számítások eredményeit felhasználva megterveztem az LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálatához használható, alumínium mintatartót. Ez közvetlenül a besugárzó berendezés kúp alakú ablakához helyezhető. A mintatartó forrással szemben lévő oldalán egy 5-ször 5 cm-es, nyitható-csukható ablak kapott helyett. A prototípus LPG-alapú érzékelők felfogatására egy speciálisan erre a célra kialakított tartószerkezetet terveztem, **37. ábra**. A terveknek megfelelően a mintatartóból egy készült el.



36. ábra. A besugárzó berendezés modellje input fájlként használható FLUKA-szimulációk során.

A modell hitelesítésére két méréssorozatot is végeztem, amelyek során összesen 12 db FWT-60-00-típusú filmdoziméter használtam fel, **38. ábra**. Ezek alkalmasak a nagy dózisteljesítmény-értékek mérésére. A besugárzások során valamennyi filmet az alumínium mintatartóban helyeztem el, különböző helyeken. A dozimetriai mérések eredményeit FLUKA-szimulációból származó dózisteljesítmény-becslésekkel kívántam összevetni. Ehhez a szimulációkhoz egy-egy 0,5 cm sugarú és 0,5 mm magasságú hengerként modelleztem a filmeket. A filmek kiértékelését CERN-ben végezték el. A számított és a mért értékek összevetése látható a **39. ábrán**.



37. ábra. Az LPG-alapú érzékelők felfogatására tervezett tartószerkezet modellje.

Az "A" mérés eredményei nem várt eltéréseket mutattak: a 6 mérésből csak két esetben volt egyezés. Érdekesség, hogy az 5-ös sorszámú filmdoziméter távolabb volt a forrástól, mint a 6-os, mégis a mérés szerint előbbi nagyobb elnyelt dózist kapott, mint utóbbi. A "B" mérés során 2-szer hosszabb expozíciós időt választottam és az 1-es sorszámú dozimétert nem használtam fel. Mivel ez nem vett részt a besugárzásban, így ezt ún. nullás filmként (referenciaként) használhattuk. A nullás filmet a besugárzás kivételével folyamatosan a többivel együtt tartottam. A CERN-ben végzett kiolvasásukhoz a filmeket postai úton továbbítottam, így fennállt annak a lehetősége, hogy a csomagot ionizáló sugárzás segítségével "átvilágítják". Ennek hatása azonban a nullás film felhasználásával figyelembe vehető. Sajnos a második mérés során sem minden filmnél estek egybe a szimulációból származó becslések és a dozimetriai mérések eredményei.



38. ábra. Kettő a felhasznált 12 db filmdoziméterből. A képeken a filmek közvetlenül nem látszanak, csak az alkalmazott külső védőborítás.

Következő lépésben ezért vizsgáltam, hogy mi okozhatta a számított és mért értékek közt jelentkező eltéréseket. A kísérleti elrendezésről készült fényképek újbóli átnézése során kiderült, hogy az "A" mérés 1-es és 2-es sorszámú filmdoziméterei esetén hibásan jegyeztem le azok helyzetét. A képek alapján azonban nem lehetett megállapítani a helyes koordinátákat. Korrekcióként meghatároztam ezekre a filmekre a forrástól mért távolságok (d_{film}) mellett a $d_{film} \pm 10\%$ helyeken becsült dózisteljesítmény-értékeket is. A később tárgyalt **42. ábrán** feltűntetett hibaérték már az így számolt geometriai hibát tartalmazzák.



39. ábra. FLUKA-szimulációs becslések összevetése dozimetriai mérések eredményeivel.

A többi eltérés okát is sikerült megtalálni. Az alumínium mintatartóban az LPG-alapú érzékelők védelme érdekében, azok mögött egy perforált alumínium lemezt rögzítettem (**40. (a) ábra**), némelyik filmet pedig erre ragasztottam fel. Mivel a dozimetriai filmeket külső védőborításban kaptam, azok perforált lemezhez viszonyított helyzete pontosan nem volt ismert. A filmek kiolvasása lézerrel történik, a megvilágításuk pedig úgy, hogy a mért érték csak a filmdoziméter középső tartományától függ. Belátható, hogy ebben az esetben az eredmény függ attól, hogy a film közepe éppen a perforált lemez mögött takarásban, vagy pedig egy lyuk mögött volt.



 40. ábra. Az LPG-alapú érzékelők védelmében felszerelt perforált lemez fényképe (a) és FLUKA-modellje (b). Az "A" mérés 5-ös dozimetriai filmjének fényképe (c).

A feltevés ellenőrzéséhez kiegészítettem a FLUKA-szimulációt a perforált lemez modelljével, **40. (b) ábra**. Az "A" mérés 5-ös dozimetriai filmjéhez tartozó FLUKA-detektor eredményei láthatók a **41. ábrán**. A **40. (b) ábra** jobb oldali rózsaszín korongja mutatja ennek a detektornak a relatív helyzetét a szimulációban. A helyadatok és az elnyelt dózis eloszlásának

összevetéséből látszik, hogy a perforált lemez jelentősen árnyékolja a filmet, kivéve annak lyukak mögötti részeit. A **40. (c) ábrán** a doziméter fényképe látszik. A film közepén azonosítható egy sötétebb, kör alakú tartomány. Felette egy ugyanolyan tartomány alsó metszete látható. A dozimetriai filmeknél a sötétedés mértékéből lehet meghatározni az elnyelt dózis értékét. Ennek megfelelően az ismétlődő kör alakú mintázat egyértelműen igazolja a perforált lemez mérésre gyakorolt hatását.



41. ábra. Az "A" mérés 5-ös sorszámú film doziméterére kapott dózisteljesítmény-becslés térbeli eloszlása (**a**) és a megfelelő statisztikushiba-eloszlás (**b**).

A **42. ábrán** a FLUKA-detektorok térfogatra átlagolt értékei mellett a lyuk mögötti és az árnyékolt helyekhez tartozó értékek is fel lettek tűntetve. Jól látható, hogy az "A" mérés 5-ös filmje esetén mért és a FLUKA-szimuláció megfelelő detektora által becsült értékek hibahatáron belül megegyeznek a film lyuk mögötti részének kiolvasását feltételezve. Viszont a **40. (c) ábra** éppen azt igazolja, hogy ennek a filmnek a középső tartománya a perforált lemez egyik lyuka mögött volt elhelyezve. A "B" mérés eredményei is jó egyezést mutatnak

és az eredmények összevetéséből meg lehet határozni az egyes filmek középső tartományának perforált lemezhez viszonyított helyzetét is. A fenti eredmények igazolták a részletes geometriai modell alkalmazásának fontosságát a vizsgált 25,5 - 41,0 cm forrás-minta távolságokon.



42. ábra. FLUKA-szimulációs becslések összevetése dozimetriai mérések eredményeivel.

4.3.1 Fejezet-összefoglaló

Bár az irodalom számot ad bevonat nélküli LPG-alapú szenzorok sugárzásállósági vizsgálatairól [KHER S. et al. 2013, GUSAROVAND A., HOEFFGEN S. K. 2013], LPG-alapú páratartalom-érzékelők érzékenységének dózisfüggését elsőként csoportunk vizsgálta [PhDJ03]. Az MTA Atomki nagy intenzitású ⁶⁰Co radioizotópos gamma-foton forrásának felhasználásához megterveztem egy mérési elrendezést, amely lehetővé teszi az LPG-alapú érzékelők besugárzás alatti, online kiolvasását. Az előzetes számítások megmutatták, hogy a szükséges nagy dózisok (több száz kGy) belátható időn belüli eléréséhez az optikai szálakat a fenti forrástól kevesebb, mint 30 centiméterre kell elhelyezni. Ez megkövetelte a besugárzások szimulációval támogatott tervezését, amelyhez a FLUKA Monte Carlo szimulációs programcsomagot használtam fel [BÖHLEN T. T. et al. 2014, FERRARI A. et al. 2005].

Elkészítettem az MTA Atomki ⁶⁰Co radioizotópos nagy intenzitású gamma-foton forrásának és a besugárzó helyiségnek egy nagy pontosságú geometriai modelljét. Ez a modell input fájlként használható FLUKA-szimulációk során, amelyekkel (többek között) a fejlesztett LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálatai tervezhetők. A modell segítségével előzetes szimulációkat futtattam és ezek eredményeit felhasználva megterveztem az LPG-alapú érzékelők besugárzásához használható, alumínium mintatartót. A terveknek megfelelően ebből egy készült el.

Hitelesítettem az MTA Atomki ⁶⁰Co forrását és a besugárzó helyiséget magában foglaló geometriai modellt. Ehhez a FLUKA-szimulációkból származó dózisteljesítmény-becsléseket dozimetriai mérések eredményeivel vetettem össze. Összesen két méréssorozatot végeztem, amelyek során 12 db FWT-60-00-típusú filmdozimétert használtam fel. A filmek kiértékelése CERN-ben történt. A mérési eredmények jó egyezést mutattak a szimulációkból származó becslésekkel, emellett igazolták a részletes geometriai modell alkalmazásának fontosságát a vizsgált 25,5 – 41,0 cm forrás-minta távolságokon.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A CERN CMS detektorának legbelső eleme a nyomkövető detektor, amit élettartama növelése érdekében hűtenek. Ez azonban a levegő páratartalmának lecsapódásához, így a nehezen hozzáférhető és drága elektronikus alkatrészek meghibásodásához vezet. Egy ilyen esemény percek alatt nagy károkat okozhatna, amelyek kijavítása az LHC leállítását és a CMS szétnyitását tenné szükségessé, ami több évre vetné vissza a nagyenergiás fizikai kutatásokat. Ennek elkerülése érdekében a nyomkövető detektort körülvevő térrészben fontos a hőmérséklet (T) és a relatív páratartalom (RH) folyamatos mérése. Erre a célra a kereskedelemben kapható érzékelők nem alkalmasak, mert azok nem sugárzásállók és csak elenyésző hányaduk képes elviselni a 3,8 T erősségű mágneses teret. A relatív páratartalom és a hőmérséklet mérésére csoportunk két FBG-alapú érzékelőből álló kombinált szenzort (thermo-hygrometer) fejlesztett. A páratartalom-érzékelő egy poliimid bevonattal ellátott Bragg-rács. Ennek az eszköznek a válaszát a relatív páratartalom- és a hőmérsékletváltozás hatására az irodalom a két hatás lineáris szuperpozíciójaként írja le. Emiatt szükséges volt egy, a páratartalom-érzékelővel termikus kontaktusban elhelyezett FBG-alapú hőmérő alkalmazására is, amellyel a korrekciós tag meghatározható.

A speciálisan a CMS-ben történő mérésekhez tervezett és gyártott FBG-alapú páratartalom-érzékelők kalibrációs méréseit klímakamrában végeztük el CERN-ben 0 és 60% közötti relatívpáratartalom-tartományon. Méréseinkkel először mutattuk ki, hogy az irodalom által használt lineáris összefüggés nem írja le pontosan a poliimid bevonattal ellátott FBG-alapú páratartalom-mérők viselkedését. A szenzorok relatív páratartalomra és hőmérsékletre vonatkozó érzékenységei ugyanis keresztfüggést mutattak, rendre $S_{RH}(T)$ és $S_T(RH)$. A csoportunk által fejlesztett, poliimid bevonattal készült FBG-alapú páratartalom-érzékelők kalibrációjához kidolgoztam egy modellt. Az irodalomban használt lineáris megközelítés helyett ez a módszer figyelembe veszi, hogy az FBG-páratartalom-mérők esetén a hőmérsékletre vonatkozó érzékenység (S_T) függ a relatív páratartalomtól és azt is, hogy a relatív páratartalomra vonatkozó érzékenység (S_{RH}) pedig a hőmérséklet függvénye. A lineáris összefüggés alkalmazásához viszonyítva a modell segítségével a fejlesztett FBG-alapú páratartalom-érzékelők mérési bizonytalanságát közel egy nagyságrenddel, ±18,0%-ról ±2,5%-ra csökkentettem. [PhDJ01, PhDJ02, PhDJ04, PhDP01, PhDP03, PhDP04, PhDP05, PhDP07].

Az FBG-alapú kombinált érzékelők sugárzásállóságát ⁶⁰Co radioizotóp által kibocsájtott gamma fotonokkal vizsgáltuk 210 kGy elnyelt dózisig. Az eredmények szerint a vizsgált érzékelők kalibrációja érvényben marad, ha azokat az ionizáló sugárzás hatására bekövetkező hullámhossz-eltolódásra korrigáljuk. A vizsgálatok rámutattak, hogy a teljes elnyelt dózis növekedésével az érzékelők további elnyelt dózisra vonatkozó érzékenysége csökken, ezért csoportunk a felhasznált FBG-alapú érzékelők előzetes besugárzása mellett döntött $(D_{TOT} = 210 \text{ kGy})$. Elkészítettem a csoportunk által használt offline adatgyűjtő és kalibrációs szoftvercsomagot. Az FBG-alapú kombinált szenzorok kalibrációját korrigálni kell az érzékelőkön az előzetes besugárzás következtében jelentkező hullámhossz-eltolódások értékére. A kalibrációs mérések újbóli elvégzésére a szűkös időkeret miatt nem volt lehetőség. Az általam írt szoftvercsomag azonban lehetővé tette a CMS-be telepített FBG-alapú és független csoportok, ideiglenesen üzemelő (számunkra referencia) érzékelői által mért adatok egyszerű, automatizált összevetését. A szoftverek segítségével a szükséges korrekciókat így a telepítést követően is meghatározhattuk még az LHC első hosszú leállása során gyűjtött adatok alapján. [PhDJ01, PhDJ02, PhDJ04, PhDP01, PhDP03, PhDP04, PhDP05, PhDP07].

Összesen 72 darab FBG-alapú kombinált szenzort telepítettünk a CMS-be. A mérési eredményeket pedig a CMS Detektor Szabályozó Rendszerébe (CMS Detector Control System, CMS-DSC) feltöltve tesszük elérhetővé. Az FBG-alapú hőmérők és páratartalom-érzékelők által szolgáltatott adatok jó egyezést mutatnak a CMS-be telepített egyéb mérőműszerek által mért értékekkel [PhDJ01].

Különböző részecskék alkotta sugárzási háttér jelenlétében, vagy nagy mágneses tér esetén az FBG-alapú szenzorok jó alternatívát jelentenek az elektronikus érzékelőkkel szemben. Ugyanakkor ezeknél az eszközöknél elengedhetetlen a párhuzamos és pontos hőmérsékletmérés. Ennek feloldására csoportunk egy önállóan is alkalmazható száloptikai páratartalom-érzékelő fejlesztését tűzte ki célul. Ehhez vizsgáltuk ~100 nm-es titán-dioxid (TiO₂) és ~300 nm-es ón-dioxid (SnO₂) bevonattal ellátott LPG-ráccsal készült érzékelők tulajdonságait. A titán-dioxidot nedvességre érzékeny bevonatként elsőként csoportunk alkalmazta nagy érzékenységű száloptikai páratartalom-érzékelők esetén.

A fejlesztett szenzorok kalibrációs méréseit CERN-ben végeztük el. Az LPG-alapú érzékelők átviteli spektrumán mért rezonancia-völgyek értelmezésére kidolgoztam négy eltérő matematikai módszert. Az FBG-spektrumoknál általánosan alkalmazott csúcskereső algoritmus a rezonancia-völgy alakjának páratartalom- és hőmérsékletfüggése miatt nem alkalmazható az LPG-alapú érzékelőknél. A módszerek mindegyike alkalmas az LPG-spektrumok értelmezésére és gyors, automatizálható jelfeldolgozást tesz lehetővé. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08]. Vizsgáltam a kidolgozott matematikai módszerek pontosságát is: azt, hogy az egyes eljárásokhoz tartozó kalibrációk közül melyik az, amelyik a legkisebb mérési bizonytalanságot adja. Igazoltam, hogy a legjobb eredményt a Tömegközéppont (Rel. Küszöb: ConCon)-módszer (részletes leírása található a doktori értekezés 4.2 alfejezetében) szolgáltatja. Ez a spektrum hasznos részének beazonosítására, aminek a tömegközéppontja adja a mért hullámhosszat. Az eljárás jelentősen csökkenti a spektrumon mért zaj hatását. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08]

Az LPG-alapú szenzorok átviteli spektrumához általam írt jelfeldolgozó algoritmus lehetővé tette а TiO₂ és SnO₂ bevonattal ellátott páratartalom-érzékelők kalibrációs méréseinek elvégzését [PhDP02]. Az eredmények igazolták, hogy mind a két vizsgált anyag alkalmazható hosszú periódusú száloptikai rácsokhoz nedvességre érzékeny bevonatként. A titán-dioxid ugyanakkor nagyobb páratartalomra vonatkozó érzékenységet mint ón-dioxid ezért biztosít. [PhDJ04], LPG-alapú az az páratartalom-érzékelőkhöz csoportunk a TiO₂-ot választotta a sorozatgyártásban készülő szenzorok bevonatául.

Bár az irodalomban találtunk információt bevonat nélküli LPG-alapú érzékelők sugárzásállósági vizsgálatairól, LPG-alapú páratartalom-érzékelők érzékenységének dózisfüggését elsőként csoportunk vizsgálta [PhDJ03]. Célunk volt a sugárzásállósági teszteket az MTA Atomki ⁶⁰Co radioizotópos nagy intenzitású gamma-foton forrásával elvégezni, mivel az ott rendelkezésre álló infrastruktúra segítségével lehetőség nyílik a szenzorok besugárzás alatti online kiolvasására. Ez az ionizáló sugárzás LPG-alapú érzékelőkre gyakorolt hatásának olyan tanulmányozását teszi lehetővé, amely az irodalomban példa nélküli. Az előzetes számítások megmutatták, hogy a szükséges nagy dózisok (több száz kGy) belátható időn belüli eléréséhez az optikai szálakat a fenti forrástól kevesebb, mint 30 centiméterre kell elhelyezni. Ez megkövetelte a besugárzások szimulációval támogatott tervezését, amelyhez a FLUKA Monte Carlo szimulációs programcsomagot kívántam felhasználni.

Elkészítettem az MTA Atomki ⁶⁰Co radioizotópos nagy intenzitású gamma-foton forrásának és a besugárzó helyiségnek egy nagy pontosságú geometriai modelljét. Ez a modell input fájlként használható FLUKA-szimulációk során, amelyekkel (többek között) a fejlesztett LPG-alapú

érzékelők sugárzásállósági vizsgálatai tervezhetők. A modell segítségével előzetes szimulációkat futtattam és ezek eredményeit felhasználva megterveztem az LPG-alapú érzékelők besugárzásához használható, alumínium mintatartót. A terveknek megfelelően ebből egy készült el. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

Ezt követően hitelesítettem az MTA Atomki ⁶⁰Co forrását és a besugárzó helyiséget magában foglaló geometriai modellt. Ehhez a FLUKA-szimulációkból származó dózisteljesítmény-becsléseket dozimetriai mérések eredményeivel vetettem össze. Összesen két méréssorozatot végeztem, amelyek során 12 db FWT-60-00-típusú filmdozimétert használtam fel. A filmek kiértékelése CERN-ben történ. A mérési eredmények jó egyezést mutattak a szimulációkból származó becslésekkel, emellett igazolták a részletes geometriai modell alkalmazásának fontosságát a vizsgált 25,5 – 41,0 cm forrás-minta távolságokon. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

6. SUMMARY

The Silicon Tracker is the innermost layer of the CMS detector built on the LHC at CERN. To increase its lifetime the Tracker must be kept cold during its operation. This, however, could lead to the condensation of humidity resulting in the failure of almost inaccessible and expensive electronic components. Such an event could cause great damages in minutes, the correction of that would require the shutdown of the LHC and the opening of the CMS, which would set back High Energy Physics (HEP) research for several years. In order to avoid the condensation of water molecules, continuous monitoring of Temperature (T) and Relative Humidity (*RH*) is vital in the area around the Tracker. For this purpose, commercially available sensors are not suitable, because they are not radiation-hardened and only a small number of sensors can operate in a magnetic field of 3.8 T. Our group developed a thermo-hygrometer consisting of two FBG sensors to measure relative humidity and temperature inside the CMS. Literature gives the response of such a sensor as linear superposition of the effects of relative humidity and temperature. Therefore, it was necessary to use an additional FBG thermometer placed in thermal contact with the humidity sensor to determine the temperature contribution of the measurement.

Calibration measurements of the FBG humidity sensors designed and manufactured specifically for CMS were carried out in a climate chamber at CERN in the range of 0 to 60% relative humidity. Our measurements pointed out that the linear approximation used by the literature is not suitable to describe the behaviour of the polyimide coated FBG humidity sensors, because their sensitivity to relative humidity and temperature were cross-linked, $S_{RH}(T)$ and $S_T(RH)$ respectively. I have developed a model for the calibration of polyimide coated FBG sensors. Instead of the linear approach used in the literature, this method takes into account that the temperature sensitivity (S_T) of the FBG humidity sensors depends on relative humidity and also that the sensitivity to relative humidity (S_{RH}) is a function of temperature. Compared to the application of the linear approach, my model reduced the measurement uncertainty of the developed FBG humidity sensors by nearly one order of magnitude, from ±18.0% to ±2.5%. [PhDJ01, PhDJ02, PhDJ04, PhDP01, PhDP03, PhDP04, PhDP05, PhDP07].

The radiation induced change of the RH sensitivity of the developed FBG thermo-hygrometers was tested with gamma photons emitted by ⁶⁰Co radioisotope up to 210 kGy absorbed dose. According to the results, calibrations of the tested sensors remain valid if they are corrected for the wavelength shifts induced by ionizing radiation. The studies showed that the radiation induced change of the RH sensitivity of the sensors to further absorbed doses decreases with the increase of the total dose already absorbed. Therefore our group decided to pre-irradiate all the FBG sensors ($D_{TOT} = 210$ kGy). I have developed the offline data acquisition and calibration software package used by our group. The calibration of the developed FBG thermo-hygrometers must be corrected for the wavelength shifts occurred due to the prior irradiation of the sensors. The calibration measurements, however, could not be repeated due to the tight time frame. My software package allowed a simple and automated comparison of the data measured by our FBG sensors with the data measured by other devices (reference) installed in the CMS and operated by independent groups. With the help of these programs, the necessary corrections could be determined after installation of the sensors using the data collected during the first long shutdown of LHC. [PhDJ01, PhDJ02, PhDJ04, PhDP01, PhDP03, PhDP04, PhDP05, PhDP07].

We have installed a total of 72 FBG thermo-hygrometers in CMS. The collected data are published by uploading them to the CMS Detector Control

System (CMS-DSC). The data provided by FBG sensors show good agreement with the values measured by other devices installed in CMS [PhDJ01].

FBG sensors are good alternatives to electronic devices in radioactive environments or in presence of a high intensity magnetic field. However, applying an FBG humidity sensor requires an accurate and parallel measurement of temperature too. To avoid the need for an additional sensor, our group started to develop a fiber optic sensor capable of measuring relative humidity by itself. Such a sensor can be realized by increasing S_{RH} significantly. For this purpose, we studied the measurement capabilities of LPG sensors with ~100 nm titanium dioxide (TiO₂) and with ~300 nm thin tin dioxide (SnO₂) overlay. TiO₂ was first used by our group as moisture-sensitive coating for high sensitivity fiber optic humidity sensors.

Calibration measurements of the developed LPG sensors were carried out at CERN. I developed four different methods (valley-finder algorithms) for processing the measured transmission spectra of LPG sensors. The peak-finder algorithm commonly used for FBG spectra cannot be applied to LPG sensors because of the humidity and temperature dependence of their response. All of the developed methods allow fast, automated signal processing of LPG spectra. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08]. I also analyzed the accuracy of the developed methods in order to identify the one which gives the smallest measurement uncertainty. I verified that the best result corresponds to the method called Center of Mass (Rel. Threshold: ConCon) (detailed description can be found in subsection 4.2 of the PhD thesis). This uses the numeric derivative of the spectrum (after FFT smoothing) to identify the relevant part of the resonance valley. The Bragg wavelength is then calculated based on the center of mass of this relevant part. The method significantly reduces the effect of noise observed on the spectra. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

The calibration measurements of the LPG sensors coated with TiO_2 and SnO_2 were carried out using the developed signal processing algorithm

[PhDP02]. The results demonstrated that both of the test materials could be used for LPG sensors as moisture-sensitive coating. However, titanium dioxide provides a higher sensitivity to humidity than tin dioxide [PhDJ04]. The higher the value of S_{RH} , the smaller is the relative effect of the temperature contribution to the measurement. Therefore, our group chose TiO₂ as material of the coating for the LPG sensors.

Although in the literature we found information on radiation hardness study for uncoated LPG sensors, the dose dependence of S_{RH} of LPG humidity sensors was first investigated by our group [PhDJ03]. Our goal was to carry out the radiation hardness investigation of LPG sensors using the high intensity ⁶⁰Co source of MTA Atomki (hereinafter referred to as source), because the infrastructure available there enables the online readout of sensors during their irradiations. This allows studying the effect of ionizing radiation on LPG sensors that is unprecedented in the literature. Preliminary calculations have shown that the fiber optic sensors should be positioned less than 30 centimeters from the above mentioned source to reach the required high doses (hundreds of kGy) within reasonable time. This required the use of simulations to design the irradiation campaigns to which I planned to use the FLUKA multi-particle transport code.

I have created a high-precision geometry model of the high intensity ⁶⁰Co source of MTA Atomki and the irradiation vault. This model can be used as an input file for Monte Carlo simulations via the FLUKA code, which can be used for planning the radiation hardness tests of LPG sensors, for instance. I designed an aluminium sample holder for the irradiation tests of LPG sensors based on the results of the FLUKA simulations I performed using the above mentioned model. The sample holder was manufactured according to the design. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08]. I also validated the geometry model of the irradiation facility with the high intensity ⁶⁰Co source of MTA Atomki via comparing the dose rates predicted by the FLUKA simulations and the results of dosimetry measurements.

Two series of measurements were performed using twelve FWT-60-00 dosimetric films. The films were evaluated at CERN. The measured doses were in a good agreement with the predicted values I obtained from FLUKA simulations. The results also demonstrated the importance of applying a detailed geometry model in the FLUKA simulations for the cases when the samples where irradiated at the sample to source distances between 25.5 and 41.0 cm. [PhDJ03, PhDP02, PhDP06, PhDP08].

7. IRODALOMJEGYZÉK

ALWIS L. et al. (2013): Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: Review of recent progress, *Measurement*, 46 (10), 4052-4074 pp.

BERGHMANS F., GUSAROV A. (2011): Fiber Bragg Grating Sensors in Nuclear Environments, 218-237 p. In: CUSANO A., CUTOLO A.: *Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation.* Bentham Science Publishers, 343 p.

BERRUTI G. et al. (2013): Radiation hard humidity sensors for high energy physics applications using polyimide-coated Fiber Bragg Gratings sensors, *Sensor. Actuator. B177*, 94 p.

BÖHLEN T. T. et al. (2014): The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications, *Nuclear Data Sheets*, 120, 211-214 p.

BUNCICK M. C., DENTON D. D. (1992): Effects of aging on polyimide: a study of bulk and interface chemistry, *Journal of Applied Polymer Science*, 46 (2), 271-280 p.

CAPONERO M. A. et al. (2013): Monitoring relative humidity in RPC detectors by use of fiber optic sensors, *Journal of Instrumentation*, 8, T03003.

CUSANO A. et al. (2006): Mode transition in high refractive index coated long period gratings, *Opt. Express*, 14(1), 19–34 pp.

DAGUIN J. et al. (2012): Evaporative CO₂ cooling system for the upgrade of the CMS pixel detector at CERN, 13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 723-731 PP.

DAVIES E. et al. (2008): Sol-gel derived coating applied to long-period gratings for enhanced refractive index sensing properties, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 11 (1), 015501 p.

DEL VILLAR I. et al. (2005): Optimization of sensitivity in Long Period Fiber Gratings with overlay deposition, *Opt. Express*, 13(1), 56–69 pp.

DING F. et al. (2010): Experimental study on humidity sensing using a FBG sensor with polyimide coating, *Proc. SPIE 7990, Optical Sensors and Biophotonics II*, 79900C

ERDOGAN T. (1997): Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters, J. Opt. Soc. Am. A, 14, 1760-1773 pp.

FERRARI A. et al. (2005): FLUKA: a multi-particle transport code, *CERN-2005-10*, INFN/TC_05/11, SLAC-R-773

FOSSA M., PETAGNA P. (2003): Use and Calibration of capacitive RH sensors for Hygrometric control of the CMS tracker, *CMS NOTE 2003/24*.

GHOLAMZADEH B., NABOVATI H. (2008): Fiber Optic Sensors. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, *Electronic and Communication Engineering*, 12 (6), 1107-1117 p.

GHOSH M. K., MITTAL K. L. (1996): Polyimides Fundamentals and Applications, *New York: Marcel Dekker*

GUSAROV A., HOEFFGEN S. K. (2013): Radiation Effects on Fiber Gratings, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 60 (3), 2037-2053 pp.

HARDY B. (1998): ITS-90 formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature, and enhancement factors in the range -100 to +100 C, *The proceedings of the Third International Symposium on Humidity & Moisture*, Teddington, London, England.

IADICICCO A. et al. (2008): Fiber Bragg Grating Sensors - Advancements and Industrial Applications. *Advances in Science and Technology*, 55, 213-222 pp.

IZOTÓP BUDAPEST (2013): Nagyintenzitású besugárzó berendezés telepítése, *Engedélyezési tervdokumentáció*, 01/10/2013.

KHER S. et al. (2013): Measurement of γ -Radiation Induced Refractive Index Changes in B/Ge Doped Fiber Using LPGs, *IEEE Photonics Technology Letters*, 25 (21), 2070-2073 pp.

KONSTANTAKI M. et al. (2006): Optical fiber long-period grating humidity sensor with poly(ethylene oxide)/cobalt chloride coating, *Appl. Optics*, 45 (19), 4567-4571 pp.

KRONENBERG P. et al. (2002): Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings, *Opt. Lett.*, 27 (16), 1385-1387 p.

LIDE D. (2005): CRC Handbook of Chemistry and Physics (85 ed.), CRC Press, 15-34. pp.

LIU Y. et al. (2007): Long-period grating relative humidity sensor with hydrogel coating, *IEEE Photonics Technology Letters*, 19 (12), 880-882 pp.
7. IRODALOMJEGYZÉK

LOESCHNER M. et al. (2012): The Dewpoint sensors at the Tracker bulkheads, *Tech. rep.*, *CMS IN -2012/009*.

MITSCHKE F. (1989): Fiber-optic sensor for humidity, *Optics Letters*, 14 (17), 967-969 pp.

MONTESPERELLI G. et al. (1995): Sol-gel processed TiO₂-based thin films as innovative humidity sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 25 (1-3), 705-709 pp.

MOREY W. W. et al. (1990): Fiber optic Bragg grating sensor. *Proc. SPIE 1169, Fiber Optic and Laser Sensors*, VII, 98 p.

SCHWERIN M. et al. (2005): The humidity sensors for the CMS Tracker, *Tech. rep., CERN CMS NOTE 2005/000.*

SZILLASI Z. et al. (2012): One Year of FOS Measurements in CMS Experiment at CERN, *Physics Procedia*, 37, 79-84 p.

TAM H. Y. et al. (2005): Fiber Bragg grating sensors for structural and railway applications. *Proc. SPIE 5634, Advanced Sensor Systems and Applications*, II, 85 p.

TAN K. M. et al. (2005): High relative humidity measurements using gelatin coated long-period grating sensors, *Sens. Act. B*, 110 (2), 335-341 pp.

THE CMS COLLABORATION (1994): The Compact Muon Solenoid. Technical Proposal, *CERN/LHCC 94-38*, *LHCC/P1*.

THE CMS COLLABORATION (2007): The CMS Tracker. Tech. rep., *CENR/CMS NOTE 2007/000*.

THE CMS COLLABORATION (2008): The CMS experiment at the CERN LHC, *JINST*, 3, S08004.

THE LHC STUDY GROUP (1995): The Large Hadron Collider, Conceptual Design, *CERN/AC/95-05*.

VASILIEV S. A. et al. (1997): Photoinduced in-fibre refractive-index gratings for core-cladding mode coupling, *Quantum Electron.*, 27, 146-149 pp.

VENGSARKAR A. M. et al. (1995): Long-period fiber gratings as band-rejection filters, *OFC'95*, PD4-2

VENUGOPALAN T. et al. (2008a): LPG-Based PVA Coated Sensor for Relative Humidity Measurement, *IEEE Sensors Journal*, 8, 1093-1098 pp.

VENUGOPALAN T. et al. (2008b): Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring, *Sensors and Actuators A*, 148, 57-62 pp.

VIEGAS D. et al. (2009): Sensitivity improvement of a humidity sensor based on silica nanospheres on a long-period fiber grating, Sensors, 9 (1), 519-527 pp.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (2008): Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (Chapter 4 - Measurement of Umidity), *WMO-No.* 8, Geneva

WYER S. S. (1906): A treatise on producer-gas and gas-producers, *The Engineering* and *Mining Journal*, London, 23 p.

YEO T. L. et al. (2005a): Polymer-Coated Fiber Bragg Grating for Relative Humidity Sensing, *IEEE Sens. J.*, 5, 1082 p.

YEO T. L. et al. (2005b): Characterization of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for relative humidity sensing, *Sensors and Actuators B: Chemical 2005*, 110 (1), 148-156 p.

YOUNG P. R., ESCOTT R. (1990): Characterisation of polyimides, 129-157 pp. In: WILSON D. et al.: *Polyimides*. Springer Netherlands

7.1 A doktori értekezéshez kapcsolódó impaktfaktoros közlemények

[PhDJ01]	BERRUTI G. M., PETAGNA P., BUONTEMPO S., MAKOVEC A.,
IF:1.31 (2015)	SZILLASI Z., BENI N., CONSALES M., A. CUSANO (2016): One year of FBG-based thermo-hygrometers in opration in the CMS experiment at CERN, <i>SCI Journal of Instrumentation</i> , 11 (3), P03007
[PhDJ02]	MAKOVEC A., BERRUTI G., CONSALES M., GIORDANO M.,
IF: 1.399	PETAGNA P., BUONTEMPO S., BREGLIO G., SZILLASI Z., BENI B., CUSANO A. (2014): Radiation hard polyimide-coated FBG optical sensors for relative humidity monitoring in the CMS experiment at CERN, <i>Journal of Instrumentation</i> , 9 (3), 3040 p.
[PhDJ03]	CONSALES M., BERRUTI G., BORRIELLO A., GIORDANO M.,
IF: 3.292	BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A. (2014): Nanoscale TiO2-coated LPGs as radiation- tolerant humidity sensors for high-energy physics applications, <i>Optics</i> <i>Letters</i> , 39 (14), 4128-4131 pp.
[PhDJ04]	BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A., GIORDANO M.,
IF: 2.209	BUONTEMPO S., MAKOVEC A., BREGLIO G., PETAGNA P., CUSANO A. (2014): A Comparative Study of Radiation-Tolerant Fiber Optic Sensors for Relative Humidity Monitoring in High-

Radiation Environments at CERN, *IEEE Photonics Journal*, 6 (6), 0601015 p.

7.2 A doktori értekezéshez kapcsolódó közlemények

 [PhDP01] BERRUTI G., CONSALES M., GIORDANO M., BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A. (2014): Radiation tolerant FBG thermo-hygrometers for relative humidity detection in the CMS experiment at CERN, *IEEE Proceedings. New York*, 0, 3 p.

 [PhDP02] BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A., GIORDANO M., IF: - BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A. (2014): Radiation tolerant humidity sensors based on nano-scale TiO2-coated LPGs for high-energy physics applications, IEEE Proceedings. New York, 0, 3 p.

 [PhDP03] BERRUTI G., CONSALES M., CUSANO A., PETAGNA P., BORRIELLO A., GIORDANO M., BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A. (2014): Fiber optic sensors for relative humidity monitoring in high energy physics applications, *IEEE Proceedings*. *New York*, 0, 4 p.

- [PhDP04] BERRUTI G., CONSALES M., CUTOLO A., CUSANO A., BREGLIO G., BUONTEMPO S., GIORDANO M., MAKOVEC A. (2014): Radiation tolerant fiber optic thermo-hygrometers for aerospace applications, *IEEE Proceedings. New York*, 0, 610-615 pp.
- [PhDP05] BERRUTI G., CONSALES M., GIORDANO M., BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A. (2014): Radiation hard fiber optic thermo-hygrometers for relative humidity detection in the CMS experiment at CERN, *Proc. SPIE 9157*, 91579H p.

 [PhDP06] BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A., GIORDANO M., *IF:* - BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A. (2014): High-sensitivity humidity sensors based on TiO2-coated long period fiber grating for high-energy physics applications, *Proc. SPIE 9157*, 91573M p.

 [PhDP07] BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A., GIORDANO M., BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A., PETAGNA P., CUSANO A. (2014): Radiation tolerant fiber optic humidity sensors for high energy physics applications, *Le Cam, Vincent and Mevel, Laurent and Schoefs, Franck. EWSHM*, 1465-1472 pp.

[PhDP08]BERRUTI G., CONSALES M., BORRIELLO A., GIORDANO M.,
BUONTEMPO S., BREGLIO G., MAKOVEC A., PETAGNA P.,
CUSANO A. (2014): High-sensitivity metal oxides-coated long-period

fiber grating sensors for humidity monitoring in high-energy physics applications, *Proc. SPIE 9141*, 914114 p.

7.3 A doktori értekezéshez kapcsolódó konferencia előadások

- [PhDC01] MAKOVEC A., BERRUTI G., PETAGNA P., SZILLASI Z., BENI N. et al. (2013): Radiation hard polyimide-coated FBG optical sensors for relative humidity monitoring in the CMS experiment at CERN, Siena, Italy: 13th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors.
- [PhDC02] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation tolerant FBG thermo-hygrometers for relative humidity detection in the CMS experiment at CERN, *Trani, Italy: 3rd Mediterranean Photonics Conference*.
- [PhDC03] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation tolerant humidity sensors based on nano-scale TiO2-coated LPGs for highenergy physics applications, *Trani, Italy: 3rd Mediterranean Photonics Conference.*
- [PhDC04] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Fiber optic sensors for relative humidity monitoring in high energy physics applications, *Naples, Italy: 2014 Fotonica AEIT - Italian Conference on Photonics Technologies.*
- [PhDC05] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation tolerant fiber optic thermo-hygrometers for aerospace applications, *Benevento, Italy: IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace.*
- [PhDC06] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation hard fiber optic thermo-hygrometers for relative humidity detection in the CMS experiment at CERN, *Santander, Spain: 23rd International Conference* on Optical Fiber Sensors.
- [PhDC07] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): High-sensitivity humidity sensors based on TiO2-coated long period fiber grating for high-energy physics applications, *Santander, Spain: 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors.*
- [PhDC08] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): Radiation tolerant fiber optic humidity sensors for high energy physics applications, *Nantes, France: 7th European Workshop on Structural Health Monitoring.*
- [PhDC09] BERRUTI G., MAKOVEC A. et al. (2014): High-sensitivity metal oxides-coated long-period fiber grating sensors for humidity monitoring in high-energy physics applications, *Brussels, Belgium: SPIE Photonics Europe*.

7.4 Egyéb közlemények

- [J01] ESPOSITO M., BUONTEMPO S., PETRICCIONE A., ZARRELLI
 IF: 1.943 M., BREGLIO G., SACCOMANNO A., SZILLASI Z., MAKOVEC
 A., CUSANO A., CHIUCHIOLO A., BAJKO M., GIORDANO M.
 (2013), Fiber Bragg Grating sensors to measure the coefficient of thermal expansion of polymers at cryogenic temperatures, *Sensors and Actuators A*, Physical 189, 195-203 pp.
- [J02]MAKOVEC A., ERDÉLYI G., BEKE D. L. (2012): Grain boundary
diffusion in thin films with a bimodal grain boundary structure, *Thin*
Solid Films, 520 (6), 2362-2367 pp.
- [J03]LAKATOS A., ERDELYI G., MAKOVEC A., LANGER G. A., CSIKIF: 1.53A., VAD K., BEKE D. L. (2012): Investigation of Diffusional
Intermixing In Si/Co/Ta System By Secondary Neutral Mass
- Spectrometry, Vacuum, 86 (6), 724-728 pp.
- [J04]BEKE D. L., LAKATOS A., ERDÉLYI G., MAKOVECZ A.,
LANGER G. A., DARÓCZI L., VAD K., CSIK A. (2011):
Investigation of grain boundary diffusion in thin films by SNMS
technique, *Defect and Diffusion Forum 312-315*, 1208-1215 pp.
- [J05] MAKOVEC A. (2011): Környezeti jellemzők mérése száloptikai
 IF: - Bragg rácsokkal (The measurement of environmental characteristics with fiber-optic Bragg-gratings), *Diplomamunka*, Témavezető: SZILLASI Z., Debrecen, Debreceni Egyetem Természettudományi Kar MTA Atomki, 43 p.

7.5 Egyéb konferencia előadások

- [C01] MAKOVEC A., SZILLÁSI Z., BÉNI N., MOLNÁR J. et al. (2012): Cryogenic temperature measurement using epoxy and PMMA coated fiber Bragg grating sensors, Balatonfenyves, *Hungary: Fizikus Doktoranduszok Konferenciája*.
- [C02] LAKATOS A., LANGER G. A., ERDÉLYI G., DARÓCZI L., MAKOVEC A., CSIK A., VAD K., BEKE D. L. (2010): Investigation of diffusional intermixing in Si/Co/Ta system by sec-ondary neutral mass spectrometry, *Strbske Pleso, Slovak Republic: 13th Joint Vacuum Conference.*

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, DR. MOLNÁR JÓZSEFNEK a doktori tanulmányaim során tanúsított kitartó támogatásáért.

DR. SZILLÁSI ZOLTÁNNAK és BÉNI NOÉMINEK sokéves támogatásukért és az eredmények kiértékelésében, megértésében nyújtott segítségükért.

PAOLO PETAGNANAK és GAIA BERRUTINAK támogatásukért.

Köszönet illeti továbbá mindazon kedves kollégámat, akik segítségükkel hozzájárultak a doktori értekezésem elkészültéhez.

Az MTA Atomki nagyintenzitású ⁶⁰Co gamma-foton forrását tartalmazó besugárzó berendezés és a besugárzó helyiség együttesére vonatkozó FLUKA-szimulációk részben az MTA Atomki részvételével folyó Nemzeti Nukleáris Kutatási Program (NNKP) keretében folytak. Az NNKP-t a VKSZ_14-1-2015-0021 azonosítójú szerződésben rögzített módon a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal finanszírozza a Széchenyi 2020 Program keretében.