

**NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM
KATONAI MŰSZAKI DOKTORI ISKOLA**

Csuka Antal

**A lézerfény terjedésének vizsgálata a katonai lézertechnikai
eszközök alkalmazásának tükrében**

Doktori (PhD) értekezés

Témavezető:

**Dr. habil. Ványa László ezredes, (PhD)
egyetemi docens**

.....

BUDAPEST, 2014

TARTALOMJEGYZÉK

A TUDOMÁNYOS PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA	8
KUTATÁSI HIPOTÉZISEK	9
KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK	10
KUTATÁSI MÓDSZEREK.....	10
AZ ÉRTEKEZÉS FELÉPÍTÉSE	11
1. FEJEZET	
LÉZERFORRÁSOK FEJLŐDÉSE ÉS ALKALMAZÁSUK KÉRDÉSEI.....	13
1.1 Nagyteljesítményű lézerek fegyvercélú alkalmazása	15
1.2 A félvezető lézerek felépítése és működése.....	19
1.3 A lézerfény tulajdonságai	22
1.4 Következtetések	25
2. FEJEZET	
A FÉNY TERJEDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ LÉGKÖRI FOLYAMATOK	
2.1 A légkör fényátbocsátását befolyásoló tényezők	26
2.1.1 A fényhullám és a gáz-halmazállapotú közeg kölcsönhatása.....	27
2.1.2 A légkör termikus folyamatai	31
2.1.3 Az aeroszolok spektrális abszorpciója	33
2.1.4 A szén-dioxid hatása a fény terjedésre.....	35
2.1.5 A levegő páratartalma	37
2.2 A fény légköri refrakciója	40
2.3 Következtetések	45
3. FEJEZET	
A LÉGKÖRI FOLYAMATOK ÖSSZEFÜGGÉSEI ÉS VIZSGÁLATÁNAK MÓDSZEREI	
3.1 A közegethatár komplex értelmezése és dualitása	50
3.1.1 A közegethatár értelmezése hullámegyenletekre alapozottan	54
3.1.2 A közegethatár értelmezése a közeg anyagi szerkezetére alapozottan..	55
3.2 A fényterjedést befolyásoló másodlagos tényezők, rendellenes hullám	57
3.3 Az atomok és molekulák kölcsönhatásainak modellje.....	59
3.4 Következtetések	65

4. FEJEZET

A LEVEGŐ TÖRÉSMUTATÓJÁNAK LEÍRÁSA, EMPIRIKUS KIFEJEZÉSEK ÁTTEKINTÉSE	66
4.1 Korrekciós tényezők bevezetésének feltételei	70
4.2 A fényterjedés vizsgálata tapasztalati összefüggésekre alapozottan	73
4.3 Következtetések	81

5. FEJEZET

A LÉZERFÉNY TERJEDÉSÉNEK SZABADTÉRI VIZSGÁLATA.....	82
5.1 A mérés elve és eszközei.....	83
5.2 Távolság meghatározása méréssel.....	89
5.3 Mikroklimatikus tényezők hatása	90
5.4 A lézerforrás átalakítása, kiegészítése.....	99
5.5 Modulált lézerefény előállítása	102
5.6 A lézerforrás rögzítésének és beállításának elemei.....	105
5.7 Következtetések	108

6. FEJEZET

A FÉNY LÉGKÖRI REFRAKCIÓJÁNAK VIZSGÁLATA	109
6.1 Optikai érzékelő CCD sorkamerával	112
6.2 A mérővevő és adatgyűjtő felépítése, működése	114
6.3 A hengerlencse méretezése és beállítása.....	119
6.3.1 A hengerlencse anyagának és törésmutatójának meghatározása.....	120
6.4 Következtetések.....	127

7. FEJEZET

A MIKROVEZÉRLŐ PROGRAMJA.....	128
7.1 Az adatkeret felépítése, szerkezete	132
7.2 A mérési adatok kiértékelése és feldolgozása	134
7.2.1 Az eltolódás mértékének meghatározása	136
7.2.2 Mérési eredmények feldolgozásának statisztikai eszközei	137
7.3 Következtetések.....	141
ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK	141
ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	142
AJÁNLÁSOK	143
LEKTORÁLT PUBLIKÁCIÓIM JEGYZÉKE	144

FELHASZNÁLT IRODALOM	147
RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE	167
ÁBRAJEGYZÉK	168
KÉPEK JEGYZÉKE	169
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE	169
MELLÉKETEK	170

BEVEZETÉS

A haderő fő feladata a háborús fenyegetések elhárítása. Ilyen értelemben a tudomány szerepe a stabilitás megteremtésében az ókorban sem volt ismeretlen. Flaviustól származik az a mondás, hogy: „*Aki békét akar, készüljön a háborúra; aki győzelmet kíván, gondosan képezze katonáit; aki kedvező kimenetelt óhajt, tudományal harcoljon és ne bizza magát az esetlegességekre.*” [1] A tudomány vélhetően akkor nem ugyanazt jelentette, mint amit ma értünk ez alatt. Legyen szó technikai eszközökről, vagy taktikai, stratégiai képességekről egyik is és másik is meghatározott célok eléréséhez szükséges szellemi teljesítményt fejezi ki. Az ember szerény fizikai teljesítményét meghaladó szellemi teljesítménye hozta létre azokat az eszközöket, amelyekre nap, mint nap szüksége van. Lehet az egy egyszerű békés hétköznapi eszköz, de lehet a fegyver is, amely kiszolgáltatott helyzetében a védelmét szolgálja, vagy nagyraavagyó törekvéseinek elérésében segíti.

A harci cselekmények ma elképzelhetetlenek a műszaki és technológiai fejlesztések élvonalába tartozó technikai eszközök nélkül. A fegyverek korszerűsítése és fejlesztése válaszlépés a folyamatosan változó világrend változó kihívásaira, veszélyeire és fenyegetéseire. A fenyegetéseknek és kihívások jelentős szerepük van a célok elérésében és ösztönző tényezőként hatnak a műszaki- technológiai fejlesztésekre. A célok elérése ma már nem kizárólag a hagyományos hadviselés eszközeire, hanem egyre nagyobb mértékben az úgynevezett nem-hagyományos fegyverekre és fegyverrendszerekre támaszkodik. A fenyegetések és kockázatok nagyságának, „erejének” és idejének elemzésével dolgozhatók ki azok a biztonsági és védelmi intézkedések, amelyek a közvetlen fegyveres védelmet ellátó katonai erők feladatát, struktúráját, felszerelését, kiképzésének meghatározását és megszervezését foglalják magukba. [2]

A fegyverekkel megvívott csaták a gazdaság- politikai „hadszintér ütközeteivel” kiegészülve, a gazdasági erőviszonyok jelentős átalakulásához vezettek. Ennek eredményeképpen a múlt század második felére a technikai és technológiai fejlesztések terén a nagyhatalmak behozhatatlan előnyökre tettek szert. Az előnynek köszönhetően a kinetikus hatáson alapuló fegyverek mára olyan csúcstechnikát képviselő új fegyverekkel egészültek ki, mint; az *irányított energiájú fegyverek*.¹ [3]

Az irányított energiájú fegyverek négy jelentősebb eszközcsoportha sorolhatók:

¹ DEW (Directed Energy Weapons)

- akusztikus fegyverek; [4]
- mikrohullámú fegyverek; [5]
- részecske fegyverek; [6]
- lézerfegyverek. [7][8]

A felsoroltak mindegyikét külön- külön is nagyszámú, különböző rendeltetésű, felépítésű és egyben eltérő fizikai elvek szerint működő fegyverek alkotják. Néhány kivételtől eltekintve a megnevezésük alapján következtetni lehet az energia továbbításában kulcsszerepet játszó energiahordozóra. Elektromágneses hullám előállítására valamint a célfelületre továbbítására alkalmas a mikrohullámú és a lézerfegyver, nagy energiájú töltött részecskék állíthatók elő a részecskefegyverekkel, míg az akusztikus fegyverek rugalmas közegben - mint amilyen a levegő is-, terjedő mechanikai hullám előállítására alkalmasak.

Az irányított energiájú fegyverek célfelületen kifejtett szokatlan hatásuk miatt, ami minden tekintetben eltér a hagyományos, „kinetikus energiát” használó fegyverekétől, előnyösen használhatók védekezésnél és támadásnál egyaránt. Ezekről a ma még újdonságnak számító fegyverektől a hadmérnökök a harci cselekmények során a technikai fölény megszerzését és megtartását várják. Az alkalmazási szempontból fontos előnyökre vonatkozó elképzelések meglepően nagy nyilvánosságot kaptak az utóbbi időben, a különféle kiadványokban, a nyomtatott sajtóban és a világhálón. Az irányított energiájú fegyverek szárazföldi (katonai páncélozott), légi járművekre telepített változatait bemutató, szabad források útján is hozzáférhető dokumentumok, képek, videofilmek tömege igyekszik ma az elrettentő hatásukat bemutatni, azzal együtt, hogy ma még futurisztikus és szokatlan képet festenek a jövő hadszíntereiről. [9] Az új fegyverek bevezetésének tervezett idejét, időtartamát és formáját a fenyegetésekre adandó válaszcsoomagok tartalmazzák, amelyeket a szakemberek a tudományos- technikai előrehaladás lehetőségeivel összhangban fogalmazznak meg.

A lézerek és ehhez kapcsolódóan a *lézerfegyverek*, amelyek fizikájával a továbbiakban részletesebben is foglalkozom, alkalmasak a fegyverirányító rendszerek optikai eszközeinek vakítására, megbénítására, megtévesztésére, nagyteljesítményű változataik ballisztikus rakéták és tüzérségi lövedékek levegőben történő megsemmisí-

tésére. Kisteljesítményű lézerek a kézi fegyverek célzó eszközeiben és a kommunikációs eszközökben jó ideje megtalálhatók.

A TUDOMÁNYOS PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA

Az értekezésemben az irányított energiájú fegyverek tárgykörébe tartozó, különböző tudományterületek eredményeinek ismertetésére és kutatására belátható módon nem vállalkozhattam, ezért a korábbi kutatásaim és tapasztalataimat felhasználva, a kutatási területemet a *lézerfény* továbbításának vizsgálatára szűkítem le. [10]

Olyan optikai közeg nem ismert, amelyik a fényterjedést valamilyen formában ne befolyásolná. Termikusan stabilizált és csökkentett nyomású térben (vákumban) feltételezhető, hogy a fény egyenes vonalban terjed, de más esetben nem. A vákuumkamrát az interferométerek referencia ágaként, vagy karjaként használják a fény interferenciáján alapuló, összehasonlító, nagy pontosságú méréseknél. Az interferométerek speciális „zárttéri” berendezések, amelyekről a továbbiakban még lesz szó röviden, de nem képezik az értekezésem tárgyát. [10]

Az előbbieket alapján következik, hogy akár kisteljesítményű szabadtéri optikai, vagy lézertechnikai eszközökről, akár MW teljesítményű lézerfegyverekről legyen szó, a légkör fényterjedést befolyásoló hatása még, ha egyik és másik esetben eltérő formában és mértékben is, de minden esetben érvényesül. Azt, hogy milyen mértékben kell foglalkozni a légkör fényterjedést befolyásoló hatásával, azt mindig az adott alkalmazástól, vagy eszköztől elvárt pontosság határozza meg. A közös ebben az, hogy akár szabadtéri adat- és információ-továbbításról, akár ballisztikus rakéták és tüzérségi lövedékek levegőben történő megsemmisítéséről beszélünk, az energiaátvitel minden esetben ugyanazzal a monokromatikus, koherens elektromágneses sugárzással történik, amit ma lézereknek nevezünk. Eszköz-, és alkalmazásfejlesztések elképzelhetetlenek a lézerfény és a légkör kölcsönhatásának vizsgálata nélkül. A légkör összetételének folyamatos változása miatt a több évtizeddel ezelőtti eredmények használhatósága és érvényessége ma már megkérdőjelezhető.

Ahhoz, hogy a hiányosságokat felszámolhassuk, a fény terjedésével kapcsolatos jelenségek folyamatos felülvizsgálatára és az ismert összefüggések pontosítására van szükség. A monokromatikus sugárzás, így a lézerfény esetében is vizsgálni kell az összefüggések érvényességét és érvényességének korlátait. Az említett jelenség mély-

rehatóbb vizsgálata, elemzése és részletesebb bemutatása a kutatás céljára alkalmas eszközök beszerzésével, ennek hiányában egyedi fejlesztésű eszközök megtervezésével és megépítésével lehetséges.

KUTATÁSI HIPOTÉZISEK

- A légkör állapotjelzőinek és a gázösszetevők koncentrációjának megváltozása felelős a szabadtéri lézeres mérések pontatlanságáért és instabilitásáért, a jelenség mélyrehatóbb megismerésével, előrelátó eszköztelepítéssel és a kompenzálás módjának kidolgozásával a hibák aránya csökkenthető.
- Fluidumok belsejében a koncentráció és összetételbeli különbségek eredményeképpen kialakuló inhomogenitások a klasszikus értelemben vett közeghatártól eltérő tulajdonságokat mutatnak, ezért ennek a fogalmának újraértelmezésére és új matematikai modell kidolgozására van szükség.
- Differenciálgeometriai eszközök felhasználásával a lineáris inhomogén, anizotrop gáz-halmazállapotú közegben az elméleti közeghatárt átlépő elemi fénysugár elhajlását kifejező differenciál függvény levezetését követően következtetni lehet a fénysugár pályájának alakjára és a terjedés irányváltozását meghatározó állapotjelzők szerepére.
- A Föld légkörében jelen levő gázok százalékos arányának folyamatos növekedése miatt, a 60-as és 90-es évek közt, a fény légköri refrakciójának meghatározására kidolgozott tapasztalati, más szóval empirikus összefüggések pontossága és megbízhatósága ma már megkérdőjelezhető, ezért újabb összefüggések és korrekciós tényezők kidolgozására van szükség.
- A félvezetőlézerek, mint kis nyílásszögű koncentrált fénynyalábot előállító sugárzók, felhasználhatók nehezebben felderíthető közép-hatótávolságú pont-pont összeköttetésű, szélessávú szabadtéri optikai adatátviteli rendszerek kiépítésére.
- Kisebb átalakításokkal és kiegészítésekkel a mutató-eszközként használt félvezető lézerforrások alkalmassá tehetők a lézerefény légköri refrakciójának szabadtéri mérésére.
- Érzékeny, nagyfelbontású CCD sorkamera felhasználásával, olyan felügyeletet nem igénylő, nagy érzékenységgű processzoros mérő- vevő és adatgyűjtő tervez-

hető és építhető, amelynek segítségével a légköri refrakció vizsgálatára alkalmas adatok nyerhetők.

KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK

1. Elemezni a fényhullám és a levegőt alkotó gázok mikro-, és makroszkopikus rendszeren belüli kölcsönhatásokat és értelmezni a fényterjedés mechanizmusát.
2. Megvizsgálni a lézerforrások és ezen belül is a félvezetőlézerek felépítését, működését és megvizsgálni a mérés technikai felhasználásuk lehetőségeit.
3. Megalkotni a gáz-halmazállapotú közeg mikro-szerkezetét alkotó elemek elektrosztatikus kölcsönhatásának modelljét, amely lehetővé teszi, hogy a mikroszkopikus rendszer szintjén is értelmezhető legyen a közeghatár és a fény refrakciója.
4. Kidolgozni egy olyan mérési elvet, amely lehetővé teszi a fény légköri refrakciójának vizsgálatát egyszerű lézertechnikai eszközökkel.
5. Megtervezni a mérés forrás és vevő oldali eszközeit, valamint azok elhelyezését és telepítését.
6. Megoldani az adatok továbbítását olyan helyre, ahol biztonságosan tárolhatók és feldolgozhatók.
7. Megtervezni és elkészíteni az adatfeldolgozás program-eszközeit.
8. Javaslatot megfogalmazni a mérések során gyűjtött adatok részleges kiértékelésével az adatfeldolgozás statisztikai eszközeire vonatkozóan.

KUTATÁSI MÓDSZEREK

- A kutatási témával kapcsolatban megjelent szakirodalmi források felkutatása, rendszerezése, az eddigi eredmények tanulmányozása, a jelen témához kapcsolódó kutatási eredmények megismerése.
- Meghatározni a nagytávolságú mérések céljára alkalmas félvezetőlézerek kiválasztásának szempontjait.
- Értelmezni gáz-halmazállapotú közeg esetében a fény terjedésének irányváltásával és refrakciójával összefüggésbe hozható közeghatár és határréteg fogalmát;
- Igazolni differenciálgeometriai eszközökkel és levezetéssel, hogy a lézerefény terjedésének iránya inhomogén közegben megváltozik.

- Megtervezni és kivitelezni a légkörben terjedő lézerfény irányváltozásának kimutatására alkalmas mérőeszközt.
- Mérési eredmények felhasználásával megvizsgálni a légkör állapotjelzőinek megváltozása és a lézerfény terjedési irányának megváltozása közti összefüggéseket és javaslatot fogalmazni meg a szükséges korrekciós tényezők bevezetésére.
- A forrásirodalomban megjelent kutatási eredmények, leírások és konstrukciók kritikai elemzése.
- A mérés-, és eszköztervezéshez szükséges elméleti és gyakorlati számítások elvégzése.

AZ ÉRTEKEZÉS FELÉPÍTÉSE

Az értekezésem bevezetőből, hét fejezetből, a kutatási eredmények összefoglalásából, valamint mellékletekből áll. A kitűzött célok elérése érdekében értekezésemet az alábbi fejezetek szerint építettem fel:

Első fejezet

Ismertetem röviden a lézerforrások fejlődését, összehasonlítást végzek a típusválaszték és az előállított sugárzás hullámhosszának függvényében. Foglalkozom a lézerek általános és fegyvertechnikai alkalmazásának kérdésével és vizsgálom a félvezető lézer felépítését és az előállított lézerfény tulajdonságait.

Második fejezet

Megvizsgálom azokat a mikroszkopikus és makroszkopikus kölcsönhatásokat, amelyek a fényterjedést befolyásolják. Sorra veszem az egyes tényezőket és vizsgálom hatásukat a fény hullámhosszának függvényében, végül s a fény légköri refrakciójának jelenségével.

Harmadik fejezet

Elemzem a sztochasztikus rendszer vizsgálatának matematikai módszereit, a közeghatár fogalmát olyan ismert összefüggésekre alapozottan, mint az elektromágneses hullámok egyenlete és a közeg anyagi szerkezete. Javaslatot fogalmazok meg a

fluidumok belsejében kialakuló refrakció megértését szolgáló, a mikrorészecskék sztatikus kölcsönhatásaira alapozott modell megalkotására.

Negyedik fejezet

Ismertetem a fényhullám terjedését leíró parciális differenciálegyenlet levezetését. A fejezet végén összefoglalom a fény törésmutatóját leíró ismertebb tapasztalati összefüggéseket és egy kritikai elemzés keretében, levezetéssel bizonyítom, hogy a megfogalmazott kijelentések nem mindegyike helytálló.

Ötödik fejezet

Ismertetem a fényterjedés vizsgálatának elvét és az optikai mérés forrásoldali eszközeit. Részletesen kitérek a mérési helyszín kiválasztásának szempontjaira és az eszközelhelyezés megtervezésére. Foglalkozom érintőlegesen a lézerforrás átalakításával, az ehhez szükséges kiegészítő mérésekkel és számításokkal.

Hatodik fejezet

Ismertetem a mérővevő és adatgyűjtő felépítését, az adatok továbbításának eszközeit. A fejezetben kitérek néhány kiegészítő mérésre és számításra, amelyek a szokásostól eltérő megoldásokat tartalmaznak, mint például ismeretlen anyag törésmutatójának a meghatározása, abban az esetben, ha cél-mérőműszer nem áll rendelkezésre.

Hetedik fejezet

A fejezeten belül foglalkozom a mérőprogram felépítésével, a továbbított adatcsomag szerkezetével, az utolsó alfejezetben összefoglalom a mérési eredményeket és javaslatot fogalmazok meg az adatfeldolgozás eszközeire.

1. FEJEZET

LÉZERFORRÁSOK FEJLŐDÉSE ÉS ALKALMAZÁSUK KÉRDÉSEI

Az első működőképes rubinlézer megépítésének éve (1960) úgy rögzült a technikatörténetben, mint az egyik legjelentősebb dátum az emberiség műszaki értelemben vett fejlődéstörténetében. [11] Az elmúlt alig több mint öt évtized, ami alatt a lézerforrások mai ismert formájukat és jellemző paramétereiket elnyerték, nagyon rövid időnek számít, következésképpen egy példátlanul dinamikus fejlődésről beszélhetünk. A lézer megjelenése nagymértékben hozzájárult a technikai eszközeink bővüléséhez és gyors fejlődéséhez.

A legismertebb lézerek néhány fontosabb jellemzőjét a *1. táblázatban* foglaltam össze. [12]

1. táblázat: *A lézerek típusai és hullámhosszuk.* [13][14]

Hullám-hossz [nm]	Típus	Hullám-hossz [nm]	Típus	Hullám-hossz [nm]	Típus
157,5	Fluor	437,1	Argon	628,0	Arany
157,6	Fluor	441,6	Hélium-Kadmium	632,8	Hélium-Neon
173,6	Rubin (4x)	454,5	Argon	647,1	Kripton
193	Argon-fluorid	457,7	Kripton	657,0	Kripton
213	Nd:YAG (5x)	457,9	Argon	676,5	Kripton
222	Kripton-klorid	461,9	Kripton	680	GaAlIn-foszfid
231,4	Rubin (3x)	463,4	Kripton	687,1	Kripton
244	Argon (2x)	465,8	Argon	694,3	Rubin
248	Kripton-fluorid	468,0	Kripton	722,9	Ólom
257,2	Argon (2x)	472,7	Argon	752,5	Kripton
263	Nd:YLF (4x)	476,2	Kripton	799,3	Kripton
266	Nd:YAG (4x)	476,5	Argon	852,4	Kalcium
275,4	Argon	476,6	Kripton	866,2	Kalcium
305,5	Argon	482,5	Kripton	904	Gallium-Arzenid
308	Xenon-klorid	484,7	Kripton	1053	Nd:YLF

A lézerefény terjedésének vizsgálata a katonai lézertechnikai eszközök alkalmazásának tükrében

312,0	Arany	488,0	Argon	1060	Nd:Üveg
325	Hélium-Kadmium	495,6	Xenon	1060	Szén-dioxid ² (CO ₂)
333,6	Argon	496,5	Argon	1064	Nd:YAG
337,1	Nitrogén	501,7	Argon	1092,3	Argon
347,2	Rubin (2x)	510,5	Réz	1130,0	Bárium
350,7	Kripton	514,5	Argon	1152,3	Hélium-Neon
351	Nd:YLF (3x)	520,8	Kripton	1290,0	Mangán
351	Xenon-fluorid	527	Nd:YLF (2x)	1300	InGaAsfoszfid
351,1	Argon	528,7	Argon	1313	Nd:YLF
0	Jód	530,9	Kripton	1315	Jód
355	Nd:YAG (3x)	532	Nd:YAG (2x)	1319AG	Nd:YAG
356,4	Kripton	534,0	Mangán	1500	InGaAsfoszfid
363,8	Argon	539,5	Xenon	1523	Hélium – Neon
406,7	Kripton	543,5	Hélium-Neon	2396	Hélium – Neon
413,1	Kripton	568,2	Kripton	2940	Er:YAG
415,4	Kripton	578,2	Réz	3391	Hélium-Neon
428	Nitrogén	595,6	Xenon	3508	Hélium-Xenon

Különböző méretű és teljesítményű lézerforrások a hétköznapi eszközeinkben is megtalálhatók. Felhasználásukat röviden az alábbiak szerint foglaltam össze:

- energiaátvitel, átalakítás és továbbítás, pl. lézerhajtómű; [15][16]
- anyagmegmunkálás, fém és nemfém anyagok, a gépgyártástól a mikroelektronikáig; [17][18]
- robottechnika, AGV³;
- „Reverse engineering” folyamatok támogatása;
- lézerszkenner;
- analitikai alkalmazás, vegyi folyamatok irányítása;
- gépgyártás és minőség ellenőrzés műszerei és gépi berendezései;

² A szén-dioxid lézereknek van 960nm hullámhosszon működő változata is.

³ Automatic Guide Vehicle kezdőbetűkből alkotott mozaikszó, ami robotnak minősülő programvezérlésű és vezető nélküli szállítóeszköz.

- környezetvédelemi mérések és mérőműszerei, levegő, vízvizelés, stb.;
- mérés-technika (gáz-, félvezető lézerek);
- szennyezőanyag tartalom vizsgálat és mérés; [19][20]
- optikai adatátviteli-, és kommunikációs rendszerek, szabadtéri és vezetékes összeköttetések; [21][22]
- számítástechnika, adatrögzítés, tárolás és az információfeldolgozás eszközei, stb.;
- biztonságtechnika, lézer-radar, optikai sorompók, stb.;
- gépjármű-technikai fejlesztések; [23][24]
- szórakoztató elektronika;
- orvosi műszerek és berendezések, gyógyászati segédeszközök; [25]
- interaktív oktatási célú eszközök, képmegjelenítők, mutató-eszközök (szilárdtest lézerek);
- speciális alkalmazások, pl. lézeres hűtés; [26][27][28]
- plazma előállítás, indukálás, stb. (gázlézerek). [29] [30]

Az alkalmazások köre természetesen nem korlátozódik a fent említett néhány példára. A lézerek megkülönböztethetők felépítésük, működési elvük, adott alkalmazásban betöltött szerepük, funkciójuk és teljesítményük szerint. Léteznek egy adott hullámhosszon működő lézerek, de vannak olyanok is, amelyek különböző módon „hangolhatók”⁴. [31]

1.1 Nagyteljesítményű lézerek fegyvercélú alkalmazása

A korábban említett alkalmazások mindegyike közvetlenül, vagy közvetve a fegyvertechnikai kutatásokat és fejlesztéseket is szolgálja. A lézerek kimondottan katonai célú felhasználásai a következők:

- műholdak közti adat-, és információcsere biztosító eszközök (szilárdtest lézerek);
- lézer-radar (LIDAR); [32]
- analitikai berendezések (gázlézerek);
- rakéták navigációs berendezései;

⁴ Ilyenek döntő többségében a festéklézerek, de félvezető lézerek is készülnek hangolható kivitelben.

- biztonsági berendezések (szilárdtest lézer);
- ellenség- barát felismerő rendszerek; [33]
- lézer-giroszkóp (szilárdtest lézer); [34]
- terepi mérő és ballisztikai rendszerek (gázlézerek);
- célmegjelölő és célzó-irányzó eszközök (szilárdtest és félvezető lézerek);
- lézerfegyverek (gázlézerek és szilárdtest lézerek), stb. [35][36][37][38][39]

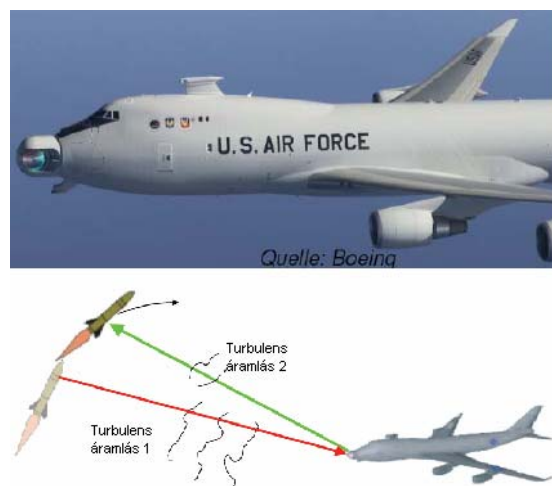
A felsorolt alkalmazások csaknem mindegyike más és más teljesítményű-, és hullámhosszon működő lézerforrást használ. A téma szakirodalma terjengős, mondhatni kimeríthetetlen. A komolyabb források több ezer oldal terjedelemben, minden részletet érintően tárgyalják a lézerek működését és felhasználását, kezdve a kvantummechanikai alapoktól a fegyvercélú alkalmazásokig. A felsorolt alkalmazások mindegyikével kapcsolatos kérdések feltárására nem vállalkozhattam, ezért a nagyteljesítményű lézerek szabadtéri fegyvercélú felhasználásának néhány kulcsfontosságú kérdését emeltem ki. Ilyen mindenekelőtt a légkör, fényterjedést befolyásoló hatása, és a nemkívánatos jelenségek következményeinek ismertetése.

Katonai lézereszközök témakörében léteznek olyan összefoglaló munkák, amelyek feleslegessé tették a téma ismételt elemzését, a fegyvercélú lézerek felsorolását, alkalmazásának áttekintését. [40] Én csak néhány olyan részlettel egészítem ki mindazt, ami reményeim szerint közelebb visz a lézerfény légkörben való terjedését kísérő jelenségek megismeréséhez és megértéséhez.

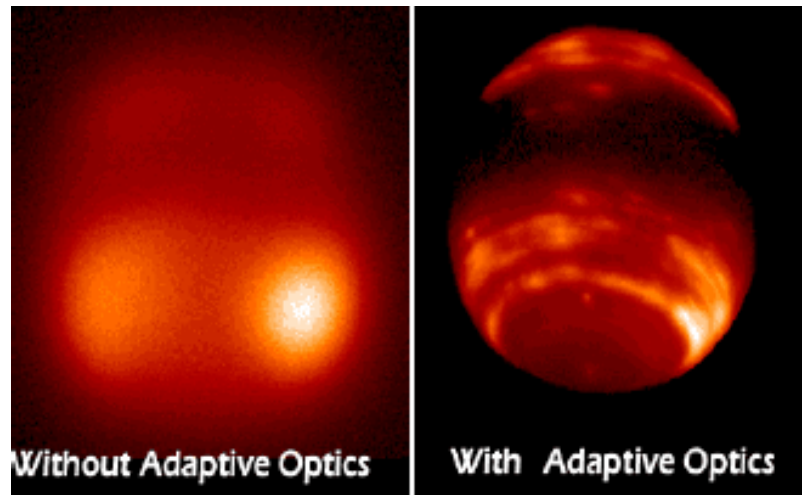
Az Egyesült Államok 1998 óta több mint 4,3 milliárd dollárt fektetett a repülőgép fedélzeti nagyteljesítményű fegyvercélú lézerek fejlesztésébe⁵. Ez a pénzösszeg jól kifejezi a program fontosságát. A fejlesztések célja egy példanélküli és hatásos rakétavédelmi pajzs kiépítése volt, amely képes lett volna elhárítani és megsemmisíteni az Egyesült Államokat fenyegető ballisztikus és interkontinentális rakétákat. Az eszközfejlesztések természetesen nem álltak le, a kutatások folytatódnak, csak a védelmi rendszer működtetésére és üzemben tartásának forrásai apadtak el, 2008-2009-ben. Ez idő alatt több figyelemre méltó fejlesztés vált ismertté. Ilyen az alkalmazott, folyamatos üzemű, nagyteljesítményű jód-oxigén lézer (teljesítménye ≈ 3 MW), de ilyen a fényterjedés kompenzálásának néhány műszaki technológiai megoldása is. [41]

⁵ ABL- Airborne Laser program

Az 1. ábrán felül a YAL-1A lézerprogram céljára kifejlesztett BOEING-737 típusú átalakított teherszállító repülőgép látható, amelynek teljes belső terét a gázlézer és kiegészítő berendezései foglalják el. Az irodalmi források egy részében ennél részletesebb képek is megtalálhatók. Az 1,5 m átmérőjű belső tükörről visszaverődő lézervény az orrészben elhelyezett forgatható lencsére kerül, amely 270° -ban forgatható, dönthető és állítható. Anélkül, hogy a repülőgép manővereket hajtana végre a levegőben, a lézersugár adott kúpszögön belül bármilyen irányban kisugározható. A nagyteljesítményű jód-oxigén lézer kiegészült kereső célú szén-dioxid lézerrel, amelynek segítségével a 350÷400 km távolságra lévő, röppályára állt ballisztikus rakéta befogható. A szén-dioxid lézerrel a lézerfegyver kiegészítő berendezései elvégzik a nagyteljesítményű lézer üzembe helyezését megelőző méréseket. A mérések során a fedélzeti számítógép meghatározza a céltárgy távolságát, sebességét és vizsgálja a légkör fényátbocsátó képességét, adott hullámhosszon. Az utóbbira azért van szükség, mert a légkör állapotváltozásai, a légkörben található aeroszolok és a levegő törésmutatójának megváltozása jelentős fényteljesítmény veszteséget eredményez. A deformálható tükör segítségével a légköri refrakció, szóródás okozta teljesítményveszteségek kompenzálása történik meg. A homorú, osztott, több elemből álló tükör minden egyes elemét munkahengerek mozgatják, amelyeket fedélzeti számítógép, vagy számítógépek vezérelnek.



1. ábra
A YAL-1A program lézerfegyvere
(Forrás: [42])



1. kép
Az adaptív optika korrekciós hatása
(Forrás: [42])

Az „adaptív optika” lényege a tükör fókusz távolságának megváltoztatása. Egy ilyen optikával végzett kísérlet eredménye a *1. képen* látható. Segítségével a termikus fluktuációk és más zavaró tényezők többé-kevésbé eredményesen kiküszöbölhetők.

A lézerfegyver hatásfokát döntően a céltárgy felületének fényvisszaverő képessége és mozgása határozza meg. A felsoroltak azok a technikai megoldások, amelyekkel kisebb- nagyobb sikerrel védekezni lehet a nagyenergiájú lézerfegyverekkel szemben. A felület fényvisszaverő képessége csak megmunkálás kérdése, ami nem jelenthet problémát a rakétagyártók számára. A köpeny általában fehér színű, 90 % fényvisszaverő képességgel, vastagsága 2 mm, anyaga magnézium és alumínium ötvözet. A védekezés egy másik formája az, hogy a rakétatest a hossz tengelye körül forog, akár csak a huzagolt löfegyver csövét elhagyó lövedék. Ennek a megoldásnak az eredményességét a szakirodalmi források nem tárgyalják, ezért feltételezhető, hogy a körfordulás sebességét a tervezők úgy határozták meg, hogy lézerfegyver által felhevített köpeny egy körfordulás alatt lehetőség leadja az általa felvett hőt, vagy annak egy részét. A köpeny felmelegedéséhez a fényvisszaverő képességétől függően, nem kevés időre van szükség.

1.2 A félvezető lézerek felépítése és működése

A lézerforrások közül méreteit tekintve a legkisebb, a legkönnyebben és a legolcsóbban beszerezhető a *félvezető lézer*. A félvezető lézer felépítése, működése és az általa előállított lézerefény tulajdonságai, geometriája és energia eloszlása, sok tekintetben más, mint a többi lézer esetében. Ezeknek, a részleteknek az ismerete elengedhetetlenül szükséges a helyes kezelésükhöz és megfelelő használatukhoz.

A szilárdtest lézerektől felépítését és működését tekintve is eltérő félvezető lézer kevesebb, mint egy évtizeddel ezelőtt került először kereskedelmi forgalomba, azt követően, hogy az optikai adattárolók széles körben elterjedtek és ismerté váltak. A félvezetőlézer működését tekintve azért más, mint a többi lézer, mert „nem individuális anyagi részecskék, atomok, ionok, molekulák vagy szilárdtestben lévő adalékrészecskék, energiaállapotai közötti átmeneteken működnek, hanem a félvezető anyag kollektív elektronállapotai, sáv-sáv között.” [43] A félvezetőlézerek hetero-átmenet⁶ kialakítására alkalmas, direkt sávú félvezetőanyagokból készülnek,⁷ planár technológiával. Ezzel a ma elérhető hatásfok teljesítményüktől függően hozzávetőleg 30 %. A félvezető lézer teljesítmény/áram karakterisztikája jóval meredekebb, mint a LED⁸ diódáké. A meredekséget az adatlapok adják meg. [44][45]

A legolcsóbb félvezető lézerek mutató-eszközök, „pointerek” formájában kerülnek kereskedelmi forgalomba. Gyors elterjedésük főként a kis méreteiknek és alacsony áruknak köszönhető. A félvezetőlézerek néhány mW-os, de akár a néhány W teljesítményű változatai is könnyen beszerezhetők. A 20÷50 mW teljesítményű „pointerek”⁹ nem tekinthetők mutató-eszközöknek, hiszen az általuk előállított lézerefény erőssége messze meghaladja azt az igényt, ami az ilyen eszközökkel szemben az esetek többségében megfogalmazódik, mi több, az ilyen teljesítményű mutató-eszközök komoly veszélyt jelenthetnek az ember testi épségére. [46] A lézer mutatóeszközöknek természetesen elképzelhető olyan felhasználása is, amelyben a nagy teljesítmény alapvető követelmény. Ilyen a csillagászat. [47]

⁶ Különböző tiltott sávszélességgel rendelkező félvezetőanyagokból kialakított félvezető átmenet.

⁷ A vegyérték sáv teteje és a vezetési sáv alja ugyanazon az elektron szinten található.

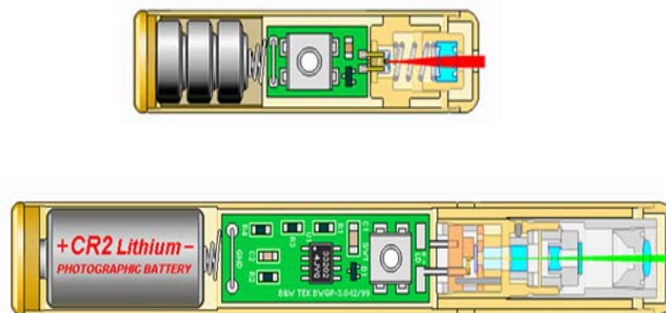
⁸ Fénykibocsátó dióda megnevezése a Light Emitting Diode kezdőbetűiből alkotott mozaikszó.

⁹ A mutató-eszköz angol megfelelője.

A kereskedelemben viszonylag olcsón beszerezhető lézerforrások teljesítménye között jelentős különbségek lehetnek. Teljesítményük alapján a következőképpen osztályozhatók:

- **I. osztály** - Nagyon kis teljesítményű, úgynevezett beépített lézerek;
- **II. osztály** - Kisteljesítményű lézerek, amelyek fényteliességük kisebb, mint 1 mW;
- **III. a. osztály** - Közép-kisteljesítményű félvezető lézerek; (1 mW÷5 mW);
- **III. b. osztály** - Közép-nagyteljesítményű félvezető lézerek; (5 mW÷500 mW), amely a szemre nagyon veszélyes;
- **IV. osztály** - Nagy teljesítményű félvezető lézerek, amelyek fényteliességük meghaladja az 500 mW-ot, bőrre és szemre egyaránt veszélyes.

A leggyakoribb mutató-eszközök felépítése a 2. ábrán látható. [48]



2. ábra

Lézer mutató-eszközök (pointerek) felépítése
(Forrás:[49])

A 2. ábrán felül a mutató- eszközök egyszerűbb és egyben olcsóbb változata látható, amely 680 nm hullámhosszon működő GaAlIn-foszfid alapanyagú vörös fényű félvezetőlézer. Ebben a típusban a lézerforrás úgynevezett „direkt sávú” félvezetőből készült. Az alsó képen az optikai rezonátorral felépített, valamivel bonyolultabb, ugyanakkor nagyobb teljesítményű változat látható, amely egy 532 nm-es hullámhosszon működő, Nd:YAG, frekvencia-kétszerezett zöld lézer. Ennek a szabályzó áramköre lényegesen bonyolultabb. [49] A szabályzó áramkör feladata az, hogy egy fotodióda segítségével folyamatosan mérje az optikai rezonátorból kilépő fényteliességét és a gerjesztő forrásának áramerősségével szabályozza a gerjesztés mértékét. A lézer-

dióda öregedése során a csökkenő fényteljesítményt a szabályzóáramkör a gerjesztő kör forrásáramának növelésével ellensúlyozza. A kilépő fény intenzitását természetesen csak addig képes állandó értéken tartani, ameddig a lézerforrás működőképes. Ez az élettartam meghosszabbításának egy olyan formája, amelynek során a fokozódó igénybevétel valójában a félvezetőlézer gyorsuló tönkremeneteléhez vezet. A lézer élettartamát több más tényező is befolyásolhatja, úgymint a tápfeszültség-, a hőmérsékletingadozás, a mechanikai igénybevételek, statikus töltések, stb. [50] Az áramkörlemezen található trimer potenciométerrel a forrás gerjesztő-árama és a lézer fényteljesítménye szabályozható (2. kép). [51][52] Az optikai rezonátorból kilépő fény kollimáló lencserendszeren halad át, aminek feladata az asztigmatikus fénynyaláb formálása.



2. kép

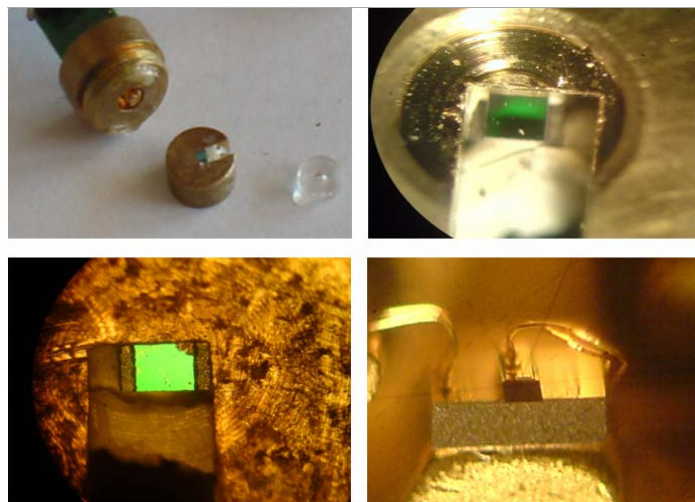
*A lézerdióda forrásáramának szabályozása smd¹⁰ szabályzó eleme
(A szerző felvétele)*

Az optikai rezonátort is tartalmazó szétbontott lézerről készítettem néhány felvételt, amelyek a 3. képen láthatók. A lézerforrás felépítését annak okán vizsgáltam, hogy a tervezett átalakításokat elvégezhessem rajta. Modulált lézerfény előállításához csatlakozót illesztettem hozzá (5. fejezet, 13. kép) A szétbontott lézerről leválasztott műanyag kollimáló lencse a 3. kép bal felső részén, a Nd:YAG kristályból készült optikai rezonátor a jobb felső és bal alsó képeken a „pumpáló” fényforrás pedig a jobb alsó képen látható. [53] A lézer optikájának minden más lencséje üvegből készült és a 2. képen látható sárgaréz hengeres alkatrészbe vannak beépítve.

A félvezetőlézer felépítését a törésmutató meghatározásánál is használt műhelymikroszkóppal vizsgáltam.¹¹ (6. fejezet, 22. kép) [54][55]

¹⁰ Surface Mounted Device mozaikszó, jelentése; felületszerelt alkatrész.

A kristály és a tükör felületén, főként nagyobb nagyítás mellett több olyan sérülés és hiba is megfigyelhető, amelyek nem a lézer szétbontása során keletkeztek, hanem „gyári” hibáknak tekinthetők. Elképzelhetőnek tartom, hogy a 12. képen látható feltűnően egyenlőtlen fénysűrűség eloszlás, ami az 4. ábrán látható normál eloszlástól minden tekintetben eltér, ezekkel a felületi hibákkal is összefüggésbe hozhatók. A lézer által előállított fény tulajdonságai a további felhasználásának szempontjából fontosak, ezért erre a továbbiakban még visszatérek.



3. kép

*A félvezetőlézer gerjesztő forrása és optikai rezonátora
(A szerző felvételei, nagyítás 1: 50, 1: 75)*

1.3 A lézerfény tulajdonságai

A félvezető lézerek által előállított fény fontosabb tulajdonságai a következők:

- kollimált, azaz párhuzamos „elemi” fénysugarakból álló fénynyaláb;
- monokromatikus; [56]
- koherens térben és időben, ami azt jelenti, hogy a forrás által előállított fénysugarak fázisa azonos;¹² [57]
- alkalmas nagyon rövid impulzusok előállítására;¹³ [58]
- egyedi fénynyaláb profil állítható elő a terjedés irányában. (4. sz. melléklet)

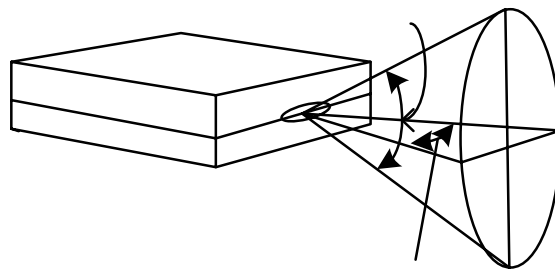
A lézerfény divergenciájának szöge általában különbözik az átmenettel párhuzamos az arra merőleges tengelyekre, mint ahogy az a 3. ábrán is látható. [59][60][61]

¹¹ A mikroszkóp pontossága hossz mérésnél; 0,01 mm, szög mérésnél; 1 ívperc (1/60°).

¹² Beszélhetünk térbeli és időbeli koherenciáról.

¹³ Atto szekundum; 10^{-15} s, Femto szekundum; 10^{-18} s.

A félvezetőlézerek úgynevezett elliptikus, asztigmatikus, Gauss fénynyalábot állítanak elő, amely megfelelően méretezett lencserendszerrel körkörösé és szimmetrikussá formálható. [62] Az aszimmetriának oka részben az, hogy a félvezetőkristály a félvezető átmenettel párhuzamos-, és rá merőleges geometriai méretei között különbség van. A fénysugár körkörösé és divergensé tétele a félvezetőlézerek esetében valamilyen bonyolultabb, mint más lézerek esetében. Az asztigmatizmusra vonatkozó adatok, típustól függőek és a gyártók katalógusaiban megtalálhatók. [63]



3. ábra

*A félvezetőlézer fénysugarának geometriája
(A szerző rajza)*

A félvezetőlézer által előállított fény intenzitás-eloszlása, ha nem is tökéletesen, de jól közelíti az 4. ábra szerinti normál eloszlást. Az energia térbeli eloszlása a 4. sz. melléklet, 1. ábráján látható. Az eloszlás az alábbi függvénnyel adható meg [62]:

$$I(r) = I_0 e^{-\frac{2r^2}{w^2}} = \frac{2P}{\pi w^2} e^{-\frac{2r^2}{w^2}}, \quad (1)$$

ahol: $w = w(z)$ - a fénysugár átmérője;

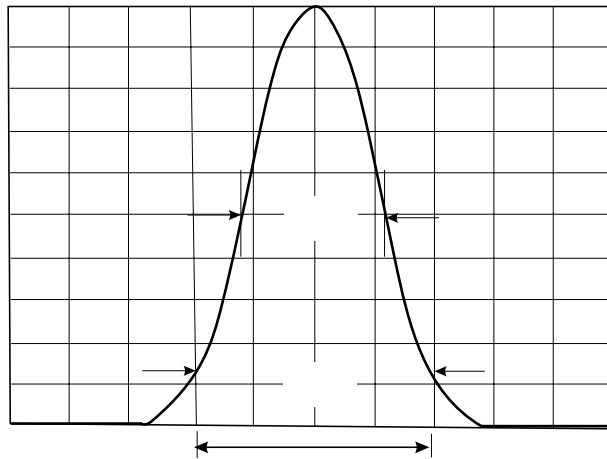
P - a fénysűrűség, amennyiben a fényterjedés irányába fényteljesítmény változás nem következik be;

I_0 - a fényintenzitás;

r - a sugár.

A különböző lézerek eltérő térbeli fényenergia eloszlással jellemezhetők, aminek eredményeképpen különböző profilú fénynyalábot állítanak elő. Mivel a lézer mérés-technikai alkalmazása szempontjából a fényenergia eloszlás rendkívül fontos, szük-

ségesnek tartom az ismertebb lézerforrások fényenergia eloszlása közti különbségeket bemutatni. (4. sz. melléklet).



4. ábra

*A lézerfény intenzitásának normál eloszlása
(A szerző rajza)[62]*

Gázlézerek esetében, mint például az Argon–Ion és HeNe¹⁴ lézer a fényerő térbeli eloszlása jól követi az ideális Gauss-féle eloszlást,¹⁵ minden más esetben, így a félvezetőlézerek esetében is, a fényerő eloszlás ettől kisebb, vagy nagyobb mértékben eltérhet. Az eltérést az $(M^2)^{16}$ tényező fejezi ki. Kollimált, TEM₀₀ módusú félvezető lézerek esetében, az M^2 tényező értéke típustól függően 1,1 és 1,7 között változhat.¹⁷ Az eloszlást megvizsgálva látható az, hogy a legnagyobb fényerőváltozás 60 %-a a sugár 1/6-a és 5/6-a között mérhető. A lézerfény légköri refrakciójának mérésére kidolgozott mérési elv, amelyet a későbbiekben részletesen ismertetek, a fényerő egyenlőtlen, normál eloszlásán alapul.

¹⁴ A HeNe lézereknek van 543,5 nm-en és 632,8 nm-en sugárzó változata is (2. táblázat).

¹⁵ A Gauss és a Bessel függvény által megadott Airy féle eloszlás nem sokban különbözik egymástól. Az utóbbinál a fókusz síkban figyelembe vehető eloszlás átmérője; $2,44\lambda$.

¹⁶ Az ideális normál eloszlás esetén; $M^2=1$, a valós profil; $M^2 > 1$.

¹⁷ Nagyteljesítményű, több-módusú lézerek esetében; $M^2 = (3 \div 4)$.

1.4 Következtetések

A lézerek száma és változatossága zavarba ejtően nagy. Alkalmazástervezésnél ez megkönnyítheti, de meg is nehezítheti a fejlesztő dolgát.

Méréstechnikai célokra általában gázlézereket, ezen belül is főként a He-Ne lézer használatát javasolják a gyártók. A lényegesen olcsóbb és könnyebben beszerezhető félvezető lézer, ha nem is minden esetben, de esetenként helyettesíthetik a gázlézereket. A félvezetőlézer mérés technikai alkalmazását megelőzően fel kell tárnai az előállított fény tulajdonságait. Mindemellett vizsgálni kell a felépítésükben mutatkozó különbségeket is, amelyek esetenként jelentősek lehetnek és befolyásolhatják a fénysűrűség eloszlását. A lézerfény tulajdonságai meghatározzák a légkört alkotó mikrorészecskékkel való kölcsönhatásukat és a fényterjedés vizsgálatának módszerét.

2. FEJEZET

A FÉNY TERJEDÉSÉT BEFOLYÁSOLÓ LÉGKÖRI FOLYAMATOK

A múlt század második felétől kezdődően a lézer elterjedésével, azoknak az alkalmazásoknak a köre is folyamatosan bővült, amelyek esetében a Földünk légköre energiatovábbító közegként kerül szóba. A tudományos világ ma kritika nélkül elfogadja és felhasználja azokat a fényterjedéssel kapcsolatos eredményeket, amelyek jóval a lézerek megjelenését megelőzően születtek annak ellenére, hogy minden kétséget kizáróan ismertek azok a környezeti hatások, amelyek felelősek a levegő minőségének romlásáért és optikai tulajdonságainak megváltozásáért. Tény, hogy alkalmazástól függően a fényterjedéssel összefüggő jelenségek egy része nincs lényeges hatással az egyes eszközök működésére, vagy éppen a hullámterjedéssel összefüggő más jelenségek kompenzálják azt, de minden más esetben jóval több figyelmet érdemelnek. Ilyen kísérő jelenségek *a lézerfény terjedésében bekövetkező változások* akkor, amikor a hullám továbbításának közege a Földünk légköre.

A Föld felszínét övező atmoszféra jellemzően inhomogén és anizotrop közeg, amelynek összetétele, állapotjelzői térben és időben látszólag kiszámíthatatlanul változnak. Mivel minden ilyen esetben összetett folyamatokról van szó, nem kétséges, hogy a jelenségek megértéséhez bonyolult összefüggések feltárására van szükség. Az ok-okozati összefüggések tisztázásával a megengedhető határig alkalmazott egyszerűsítésekkel, ebben a témában tapasztalható hiányosságok megszüntethetők és felszámolhatók. A Föld légkörének fényterjedésre gyakorolt hatását a kutatók nagyon régóta vizsgálják. Kellőképpen jól dokumentált kutatási eredmények találhatók a szakirodalomban, de ezek csaknem mindegyike több mint 50÷ 60 éves. Az utóbbi három-négy évtized lézer-technikai fejlesztései nyomán egyre több olyan korszerű lézerforrást használó eszköz jelent meg, amelyekkel a lézerfény és a légkör kölcsönhatásai vizsgálhatók.

2.1 A légkör fényátbocsátását befolyásoló tényezők

A különféle gázösszetevők, aeroszolok, vízgőz, szerves anyagok, jég, stb. jelentős abszorpciót és szóródást eredményeznek a levegőben. [64] A levegőt alkotó gá-

zok molekulái a rajtuk áthaladó fény egy részét elnyelik és szórják. A fény szóródásában és a fényhullám energiájának a csökkenésében az aeroszoloknak van a legnagyobb szerepük. Az aeroszokok a spektrális abszorpcióhoz hasonlóan a fényt elnyelik, átengedik, vagy szórják. A fényátbocsátási képesség nagymértékben függ az aeroszokok méretétől és felületének alakjától. A spektrális abszorpciójával a továbbiakban még részletesebben foglalkozok, de azt megelőzően szükségesnek tartom áttekinteni a légekört alkotó mikrorészecskék és a fényhullám kölcsönhatását.

2.1.1 A fényhullám és a gáz-halmazállapotú közeg kölcsönhatása

A kvantummechanika eredményei sokban hozzájárultak ahhoz, hogy a lézerefény és anyag kölcsönhatásának részletei tisztázódjanak. A kvantumelmélet szerint a lézerefényt mindaddig hullámnak kell tekinteni, ameddig az elektromágneses hullámra jellemző tulajdonságokat mutat, jelenségeket eredményez, úgymint a diffrakció és refrakció és nem lép kölcsönhatásba az anyaggal. Amint kölcsönhatásba került az anyaggal, legyen szilárd, folyékony, vagy gáz-halmazállapotú, az anyagi természetét figyelembe véve $h\nu$ energiájú diszkrét mennyiségekben, úgynevezett kvantumokban nyelődik el, ahol h a Plank állandó¹⁸, ν pedig a fényhullám frekvenciája. A fény hullámhosszának ismeretében könnyen kiszámítható a kvantum elnyelésének megfelelő energia. A Plank állandó kitevője azt jelzi, hogy nagyon kis energiamennyiségekről van szó. A kvantum energiájának meghatározásával sajnos nem jutunk közelebb ahhoz, hogy a lézerefény és az anyag kölcsönhatásából, a lézerefegyver szükséges teljesítményét és hatásfokát meghatározzuk. Ez egyébként azért sem vezetne eredményre, mert a kvantum energiájának elnyelődésének további feltételei is vannak. Ilyen feltétel az, hogy a foton energiája csak akkor nyelődik el, ha pontosan megegyezik az anyag két megengedett energiaállapotának a különbségével.

A gázok másképpen viselkednek a lézerefénnyel szemben, mint a szilárd halmazállapotú anyagok. Ennek oka az, hogy a gázatomok szabadságfoka megnő, amint molekulákat alkotnak. Az egyes szabadságfokok más és más energiaszintnek megfelelő gerjesztést igényelnek, ahhoz, hogy a kvantum (foton) energiája elnyelődhessen. A teljes energiatartomány, amely elnyelődhet a gázban, diszkrét energiaszintekre bontható, amelyben minden energiaszint egy-egy tengely körüli elmozdulásnak, vagy elfor-

¹⁸ $6,63 \cdot 10^{-34}$ Js

dulásnak felel meg. Minden energiaszintnek más és más frekvenciájú hullám, vagy foton energia felel meg. Az energiaszintek energiasávokra szélesednek akkor, ha a gáz nem egynemű, hanem keverék. Ez okozza azt, hogy a gázkeverékekben a fény csak sávokban nyelődik el és olyan hullámsáv tartományokat hoz létre, amely vagy teljes egészében, vagy részben, vagy egyáltalán nem engedi át az adott frekvenciájú hullámokat. A kölcsönhatások eredményeképpen dipólusok jönnek létre. Dipólusok kialakulása és a gerjesztő hullámra való visszahatása jól modellezhető az elektrosztatikából és elektrodinamikából ismert összefüggések segítségével. A kölcsönhatás tapasztalati összefüggéseit az indukált polarizáció fejezi ki. A gázmolekulák indukált polarizációval válaszolnak a külső elektromos térre. [65]

Az olyan gázelegyben, mint amilyen a Földünk légköre, különféle eloszlásban nagyon sokféle molekula megtalálható, ezért az adott válasz csakis egy komplex függvény lehet. Jelöljük a közeg átlagos dipólus momentumát $\langle \vec{p} \rangle$ -vel, az elektromos tér effektív értéke pedig legyen \vec{E}' . Ekkor a $\langle \vec{p} \rangle = \varepsilon_0 \gamma_{mol} \vec{E}'$ összefüggés azt a válaszfüggvényt adja meg, amelyben ε_0 a levegő permittivitása és γ_{mol} a molekulák polarizálhatósága¹⁹ [66]. Ezek az állandók mindegyike függ a gáz összetételétől és a molekulák felépítésétől. [67][68] A makroszkopikus polarizációs vektor legyen \vec{P} , és η a térfogategységben található molekulák száma. Ebben az esetben a makroszkopikus polarizációs vektor a dipólus momentum függvényében a következőképpen fejezhető ki: $\vec{P} = \eta \langle \vec{p} \rangle$. A makroszkopikus polarizáció arányos a dielektromos szuszceptibilitással (χ_e), ami az alábbi összefüggéssel adható meg:

$$\eta \approx \frac{\chi_e}{\gamma_{mol}}, \quad (2)$$

Eltérő tulajdonságú gázmolekulák esetében a makroszkopikus polarizáció egy komplex mennyiség. Az olyan többkomponensű gázok esetében, mint amilyen a levegő a makroszkopikus polarizáció figyelembevétele egy kezelhetetlen, komplex függvényrendszert eredményez, ezért a fény terjedését a légkörben az egyszerűsítések adta lehetőségekkel kell vizsgálni és megfogalmazni. Az egyszerűsítések egy nagyon szélsőséges példája az a megfogalmazás, amely szerint: „*A fény egyenes vonalban ter-*

¹⁹ $\gamma_{mol} = 2,133 \pm 0,032 \cdot 10^{-29} \text{ m}^3$

jed”. Ha nem tesszük hozzá, hogy ez csak az abszolút vákuumra igaz, akkor ez a kijelentés hibás és megalapozatlan. Lássuk be az abszolút szó használatáról a tudományos szakirodalmi források is gyakran megfélekeznek, ami miatt még „a fény egyenes vonalban terjed a vákuumban”, mondat fizikai háttere is vitatható, de mindemellett a vákuum és az abszolút vákuum fogalma is tisztázásra vár, ugyanis ismereteink szerint elképzelhetetlen a fizikai térnek az a formája, amelyet semmi sem tölt ki, és amire a „közeg” kifejezés egyáltalán nem használható. Ha a fotonok, amelyeknek nincsen tömegük, és a teret kitöltő atomok, molekulák kölcsönhatásáról az utóbbi hiánya miatt nem beszélhetünk, akkor az abszolút vákuumban a fény feltehetően egyenes vonalban terjed, de minden más közegben a gázatomok és molekulák indukált polarizációja és a kialakuló kölcsönhatások miatt ettől eltérő.

A rendszer egészére vonatkozó megállapításokat csak akkor tudunk tenni, ha megfigyeléseinket a molekulaszintű makroszkopikus kölcsönhatásokon túlra is kiterjesztjük. A lépték megváltoztatásával az új törvények és törvényszerűségek miatt, az ok-okozati összefüggéseket rendszere is megváltozik. A vizsgálat alá vont térelem és a makroszkopikus világ közti több nagyságrendű különbségek miatt, az ott bekövetkező változások nyomon követése látszólag értelmetlenné válik annak következtében, hogy a tér fizikai méreteinek növelésével behatárolhatóvá és megfigyelhetővé válnak azok a kölcsönhatások, amelyek a makroszkopikus állapotváltozásokért felelősek. Makroszkopikus rendszerre vonatkozó kölcsönhatásokat eredményeznek a vizsgált rendszer határain kívülről érkező sugárzások. A sugárzások, amelyek a Föld légkörén áthaladnak, a teljes hullámtartományt lefedik, kezdve az ionizáló és kozmikus sugárzásoktól a hosszuhullámok legalsó határáig. A napsugárzás annak ellenére, hogy viszonylag széles frekvenciatartományú sugárzás, csak egyike azoknak, amelyek a vizsgált rendszer egészére kiterjeszthető makroszkopikus állapotváltozásokért felelősek. Az állapotváltozások során a gázkeverék hőmérséklete, entalpiája növekszik, és a rendszer *állapotjelzői*²⁰ megváltoznak. A levegőt általában ideális gáznak tekintjük és az ideális gáz állapotegyenleteit használjuk a számításaink elvégzéséhez.

Gáz-halmazállapotú közeg esetében az állapotjelzők megváltozása a mikroszkopikus rendszerben nehezen, vagy egyáltalán nem értelmezhető. Ennek oka az, hogy az atomok és molekulák mérete nem összemérhető a szabad úthosszal,

²⁰ Állapotjelzők, más szóval állapothatározók a gáz; hőmérséklete, nyomása és sűrűsége.

amely a mozgásukhoz rendelkezésükre áll (*1 sz. melléklet 1. táblázat*). Ez szükségessé teszi a rendszer egészére kiterjesztett és a mikrovilágtól független új szemlélet, valamint összefüggések új rendszerének a kialakítását.

A makroszkopikus rendszeren belüli vizsgálat, a jelenségek értelmezése és összefüggéseinek rendszere figyelmen kívül hagyja a mikroszkopikus rendszeren belül értelmezett jelenségek ok –okozati összefüggéseit, elszakad a fény korpuszkuláris értelmezésétől és a hullámtani összefüggések „új” rendszerében vizsgálja a kölcsönhatásokat. Ennek a szemléletnek a kialakításában szerepet kaptak azok a kölcsönhatások, amelyek „új jelenségek” kialakulásáért felelősek. A kiterjedt vizsgálat eredményeképpen és a makroszkopikus rendszerre befolyást gyakorló tényezők nagy száma miatt, az itt értelmezhető jelenségek száma is lényegesen nagyobb, mint a mikro-rendszeren belülieké. A makroszkopikus rendszeren belül a figyelembe vehető tényezők legnagyobb része a fényterjedéssel is összefüggésbe hozhatók. Nem csak a közegjellemzők befolyásolják a fényhullám terjedését, hanem a fényhullám is hatást gyakorol a közegjellemzőkre. A kölcsönhatások e bonyolult rendszerében a hullámforrások közegjellemzőt befolyásoló tulajdonsága nem hagyható figyelmen kívül, amennyiben a fényterjedés mechanizmusának legapróbb, és bizonyos esetekben elsőre lényegtelennek tűnő részleteit is fel szeretnénk tárni. A fizikai háttérrel és tartalommal is jobban kifejező „fényhullám” nehezen összeegyeztethető az „elemi fénysugár” elvont fogalmával. Ennek ellenére mégis az utóbbinak van nagyobb szerepe a fényterjedés elméletének tisztázásában.

A fényterjedéssel kapcsolatos elméleti ismereteink gyakorlatba történő átültetésének egyik eszköze a matematikai és fizikai modellek azonossá, vagy legalábbis hasonlóná tétele. Földünk légköre egy jellemzően *inhomogén* gáz-halmazállapotú közeg, amelynek összetétele, állapotjelzői és az ezekből származtatott fizikai jellemzői, úgymint; sűrűsége, fajtérfogata, törésmutatója, térben és időben folyamatosan változik. A gázkeverék, amit levegőnek hívunk, fizikai, kémiai és optikai tulajdonságokkal rendelkezik. Átlagos összetétele az *1 sz. melléklet a 2. táblázatában* található meg. Állapotjelzőinek megváltozására és optikai tulajdonságaira hatással van az összetétele és a benne található lebegő részecskék, más szóval aeroszolok mennyisége. [69] A kémiai összetétel által befolyásolt fizikai és optikai tulajdonságok komplexitása miatt, a levegőben terjedő fény vizsgálatánál rendszerint eltekintünk a mikroszkopikus rendszer

kölcsönhatásaitól és csak a vizsgált rendszer egészére vonatkozó optikai tulajdonságokat vesszük figyelembe.

A fény terjedését befolyásolják:

- a termikus hatások, a légáramlatok okozta vibrálás, szóródás, stb.;
- a gázösszetevők koncentrációja;
- az aeroszolok jelenléte; [70][71]
- a páratartalom;
- a háttérsugárzás. [72]

2.1.2 A légkör termikus folyamatai

A napfény beesési szögének folyamatos változása miatt, a nap folyamán a légkörön keresztül a földfelszínre elérő napsugárzás intenzitása folyamatosan változik, ami a légkör és a földfelszín energiamérlegére is hatással van. Az energiamérleget befolyásolja:

- a napsugárzás közvetlen elnyelése a földfelszín által;
- a földfelszín és a légkör közötti folyamatos és állandó hőenergia átvitel sebessége;
- a látens hő-átvitel.

A Földet övező légkör felmelegedését és lehűlését közvetlenül befolyásolja:

- a rövidhullámú napsugárzás, ami a „fűtést” eredményezi és amire hatással van;
 - az ultraibolya sugárzás, aminek egy részét a sztratoszférikus ózon nyeli el;
 - az infravörös közeli sugárzás, aminek egy részét a troposzférikus vízgőz és a felhők, valamint a szén-dioxid nyelik el sávokban;
 - az infravöröshöz közeli sugárzások, amelyeket a földfelszín nyel el, vagy visszaverődik az űrbe.
- a hosszuhullámú, infravörös sugárzás, ami a „hűtésért” felelős és:
 - a vízgőz-, szén-dioxid-, és ózonmolekulákról;
 - a felhőkről, valamint;
 - a földfelszínről visszaverődve kerül a levegőbe. [73][74]

A földfelszín övező levegőburok hőmérséklete napszaktól és évszaktól függően eltérő mértékben változik. A légkörhöz képest a földfelszín lényegesen nagyobb mennyiségű hőt nyel el a nap folyamán, mint a levegő. Úgy napközben, mint éjszaka, a tárolt hőmennyiség egy része sugárzás²¹ és hőátadás²² útján kerül ismételt a levegőbe.

A földfelszín hőelnyelő képessége hatással van a globális klíma és a mikroklíma kialakulásáért. Az alacsonyabban levő légrétegek gyorsabban és nagyobb mértékben melegednek fel, mint a magasabban levők. A felmelegedett légrétegekben levő levegő kisebb sűrűsége miatt emelkedni fog és eltávolodik a hő-felvétel helyétől, majd ezt követően lehül. A magasabb légrétegekben levő részecskék keveredése az alacsonyabb légrétegekben levőkkel felszálló áramlatokhoz, légörvények kialakulásához vezet és folyamatos keveredést eredményez. A függőlegesen mért hőmérsékletváltozás a függőleges hőmérsékleti gradienssel fejezhető ki. [75] Ez csak a száraz adiabatikus folyamatokra érvényes²³. A hőmérsékleti gradiens a légkör statikus egyensúlyi differenciál egyenletéből határozható meg [76]:

$$\frac{c_p}{A} \Delta t = -g \Delta z \quad (3)$$

ahol: c_p - a levegő fajhője állandó nyomáson ($1,0003345 \text{ J/g } ^\circ\text{C}$);

A - a termikus egyenérték ($9,99915 \cdot 10^{-4} \text{ Js}^2/\text{cm}^2\text{g}$);

g - a gravitációs gyorsulás ($9,81 \text{ m/s}^2$ Magyarország területén);

Δt - a hőmérsékletkülönbség, [$^\circ\text{C}$]-ban;

Δz - a szintkülönbség, [m]-ben.

A (3) differencia egyenletet megoldva és a szükséges behelyettesítéseket elvégezve, a hőmérséklet gradienst megadó összefüggéshez jutunk (4)[77]:

$$\frac{\Delta t}{\Delta z} = -\frac{A \cdot g}{c_p} = -\frac{2,389 \cdot 10^{-4} \cdot 9,81}{0,239} = -0,974 \cdot 10^{-2} \text{ } ^\circ\text{C/m}^2 \quad (4)$$

²¹ radiáció.

²² konvekció.

²³ A meteorológia használja a nedves adiabatikus hőmérsékletváltozási tényezőt is.

²⁴ A múlt század első felében figyelembe vett érték; grad t = -0,3 $^\circ\text{C/m}$. Ugyanez, a század második felére -0,67 $^\circ\text{C/m}$ -re csökkent.

A hőmérsékleti gradiens felszálló légáramlatok esetében negatív, dél körül éri el a minimumot. Ez a folyamat a nap 24 órájában kétszer ismétlődik, stabilná napfelkelte előtt néhány órával válik, amikor a földfelszín lehűl. Mivel mértéke függ a Föld légkörének rétegződésétől, a földközeli-, és a magasabb légrétegek hőmérsékleti gradiensét meg kell különböztetnünk egymástól. A hőmérsékleti gradiens folyamatos csökkenése tapasztalható, ami a klímaváltozással és a légszennyezéssel hozható összefüggésbe.

A Föld légkörét alkotó, eltérő sűrűségű légrétegek nem gömbszerű burokként övezik a földfelszínt, hanem az időjárási frontoktól és a helyi mikroklimatikus állapotváltozásoktól, éghajlattól, évszaktól és magasságtól függően, a légkörben foltszerűen fordulnak elő és a helyüket kiszámíthatatlanul változtatják. [78]

A légkör sűrűségének megváltozása hatással van a fényhullám terjedésére, a fényhullám energiájának csökkenése a levegő fényátbocsátási tényezőjével hozható összefüggésbe.

2.1.3 Az aeroszolok spektrális abszorpciója

Amikor a Föld légkörében a fényterjedéssel kapcsolatos jelenségeket vizsgáljuk, ismerni kell a gázösszetevők spektrális abszorpcióját, ami azt mutatja meg, hogy egy adott frekvenciájú fényhullámot milyen mértékben csillapít a gázösszetevő, vagy a gázösszetevőknek egy csoportja. Bizonyos hullámhosszon a levegő fényátbocsátó képessége csökken, vagy éppen teljesen meg is szűnik, ezért a Föld légköre sávszűrőnek tekinthető.

A gáz-halmazállapotú közeg sáváteresztő tulajdonságát az aeroszolok mennyisége és a mérettartománya is meghatározza. Az aeroszolok mérete alapvetően meghatározza a fizikai tulajdonságaikat is, ezért szennyezés mértékét és határértékeit a méreteik alapján határozzák meg. Méret szerint az alábbiak szerint osztályozzák:

- óriási részecskék: átmérőjük $> 1 \mu\text{m}$;
- nagy részecskék: $0,1 \leq \text{részecske átmérő} \leq 1 \mu\text{m}$;
- Aitken részecskék, amelyek átmérője $< 0,1 \mu\text{m}$. [79]

A részecskék tulajdonságaival, úgymint diffúzió, ülepedés, stb., bővebben a levegő kémiája foglalkozik. [80] A levegő szennyezőanyag tartalma nagymértékben

függ a földrajzi helytől, időjárástól, vegetációtól, ipari létesítményektől, széljárástól és az urbanizációtól. A levegőben jelen levő nem ülepedő 1 μm -nél kisebb szennyeződések, úgymint a por, a korom, stb., a sugárzás terjedésének irányát megváltoztatják és a fotonok energiája a szilárd részecskéken elnyelődik. A levegő hullámelnyelő és hullámáteresztő képessége helytől függően változik. Optikai tulajdonságainak meghatározásánál az aeroszoloikat gyakran figyelmen kívül hagyják. Ennek oka az, hogy csak komplex mennyiségekként fejezhetők ki és a számításainkat adott esetben túlzottan bonyolíthatják. Mennyiségét a levegő fénytörési tényezője és fénytörési mutatója; n , viszonylag jól kifejezi.

A törésmutató a fény sebességének a vákuumban,- és adott közegben mért sebességének viszonyaként fejezhetők ki az alábbiak szerint [81];

$$n = \frac{c}{v}, \quad (5)$$

ahol: n - a közeg törésmutatója;

c - a fénycsoporthullám vákuumban mért sebessége;²⁵

v - a vizsgált közegben mért fénysebesség.

Az aeroszoloik fénytörési-mutatója egy komplex mennyiség, amely valós és képzetes résszel írható le, az alábbiak szerint [70];

$$n_a = n_r - j \cdot n_i \quad (6)$$

ahol: n_a - az aeroszoloik fénytörési mutatója;

n_r - valós rész;

n_i - képzetes rész.

Az abszorpciók együtthatóját a (6) egyenletben szereplő törésmutató imaginárius részével kifejezve, kapjuk:

$$\alpha_a = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_i \quad (7)$$

ahol: α_a - abszorpciók együttható 1/m-ben;

λ - monokromatikus sugárzás hullámhossza m-ben kifejezve.

²⁵ A Kerr cella módszer eredményeként a levegő törésmutatója: $n=1,0002868$,

Néhány fontosabb aeroszol fénytörési mutatója a szakirodalmi forrásokban megtalálható [81].

Az aeroszokok okozta szóródást a Fraunhofer-féle eloszlással és a Mie-féle szóródással szokták figyelembe venni. [20] A Mie-szórás²⁶ egy speciális formája a Tyndall-féle szórás, amelyet a levegőbe kerülő kolloidok hoznak létre. [82]

A légrétegek közti hőmérsékletkülönbség a levegőben légáramlatokat és légörvényeket hoz létre. Az emelkedő légáramlatok, más szóval, termikek magukkal ragadják a Föld felszínének közelében lévő lebegő szennyeződések, aminek következtében a levegő fényátbocsátó képessége tovább csökken. A levegő fényátbocsátó képességét a szennyeződések fényszórási tulajdonsága is befolyásolja, amit a fényszórási együtthatóval lehet kifejezni az alábbiak szerint:

$$\beta_a = C_1 \cdot \lambda^{-\delta} \quad (8)$$

ahol: β_a - fényszórási együttható;

C_1 és δ ²⁷ - konstansok, amelyek a meteorológiai értelemben vett láthatóságot fejezik ki:

$$C_1 = \frac{3,91}{V} (0,55)^\delta \quad (9)$$

ahol: V - a távolság m-ben.

A fényszórási együttható a fény hullámhosszával is kifejezhető: [70]

$$\beta_a = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{0,55} \right)^{-\delta} \quad (10)$$

2.1.4 A szén-dioxid hatása a fény terjedésre

A szén-dioxid a levegő egyik legfontosabb összetevője és egyben az egyik olyan antropogén eredetű gáz, amely a legnagyobb koncentrációban fordul elő. Koncentrációja a levegőben év-, és napszaktól függően változik, és jelentős ingadozást

²⁶ A Mie szórás esetében a szórás intenzitása fordítottan arányos a hullámhossz 1,3 hatványával.

²⁷ $\delta=1+1,6$

mutat. A szén-dioxid légköri tartózkodásának ideje 15 év. Légköri mennyisége a földtörténeti ókorban²⁸ és a középkorban²⁹ volt a legnagyobb.

A szén-dioxid légköri koncentrációja évről- évre folyamatosan emelkedik, 2002-ben az átlagos koncentrációja körülbelül 370 ppm volt, miközben az ipari forradalom kezdetén (1890-ben) értéke alig érte el a 280 ppm-et. Jelenleg évi növekedése 1,5 ppm körüli érték. [83]

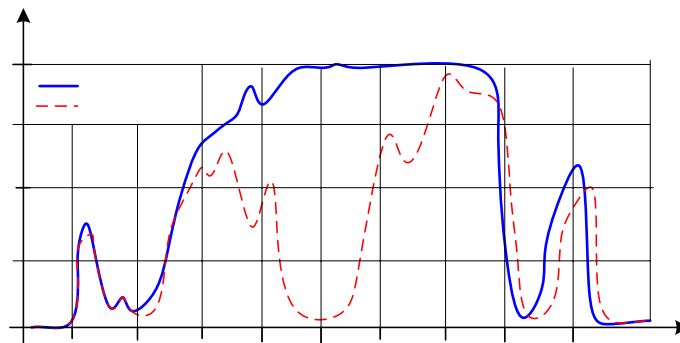
2. táblázat: Az üvegházhatás kialakulásában szerepet játszó gázösszetevők. [80]

Gáz	Koncentráció		Hőmérséklet (+ΔT)
	2000	2100	
CO ₂	370 ppm	720 ppm	3,0
CH ₄	1,7 ppm	3 ppm	0,3
N ₂ O	0,3 ppm	0,5 ppm	0,3
CFC-11	0,2 ppm	2,0 ppb	0,3
CFC-12	0,5 ppb	4,0 ppb	0,7
O ₃ (troposzféra)		kétszeres növekedéssel számolva	0,8

A szén-dioxidot is csakúgy, mint több más jóval kisebb arányban előforduló gázösszetevőt is, az „üvegházhatás” növekedésében szerepet játszó elemek közé sorolják, mivel jelentős hatással van a Föld termikus egyensúlyára, és a földfelszíni hőmérséklet kialakulásra. Átlagos koncentrációja és a hőmérsékletváltozás növekedésében játszott szerepe miatt, a szén-dioxid tartalom változását az ökológiai egyensúly miatt aggódó kutatók folyamatosan figyelemmel kísérik. Az 2. táblázatban megfogalmazott jóslat szerint a következő századfordulón a százalékos aránya megközelítheti az ezredfordulón mért érték kétszeresét. A légköri koncentráció növekedésének hatásai, ha nem is mindig világosan, de azért lassan körvonalazódnak és vélhetően nem eltűntek azok az aggodalmak, amelyek ezzel kapcsolatban megfogalmazódnak. [84][85]

²⁸ ordívícium, karbon, perm.

²⁹ triász, júra, kréta.



5. ábra
A szén-dioxid és a propán spektrális abszorpciója
(Forrás:[73])

A levegőben viszonylag magas arányban jelen lévő szén-dioxidnak főként a fényterjedésre gyakorolt hatását tartom szükségesnek kiemelni. A szén-dioxid a 3-4,5 μm feletti hullám-tartományokban sávozó tulajdonságokkal rendelkezik. (5. ábra) Az ábrán összehasonlításképpen berajzoltam a propán karakterisztikáját is, amelynek éppen 3,5 μm -nél van úgynevezett „ablaka”. Infravörös fényhullám tartományban a spektrális abszorpció teszi lehetővé azt, hogy a szén-dioxidot és más gázösszetevőket ki lehessen mutatni a levegőben, de detektálásának nem ez az egyedüli módja. [86] A levegő vízgőz tartalma a szén-dioxidnál is nagyobb mértékben befolyásolja a levegő fényáteresztő képességét.

2.1.5 A levegő páratartalma

A levegőben lévő vízgőz sugárzás szempontjából egy aktív „nyomgáz”, ami csaknem kizárólag a troposzférában fordul elő. A páratartalom is csakúgy, mint a szén-dioxid, jelentős mértékben befolyásolja a levegő fénytörés-mutatóját, más szóval refrakciós tényezőjét (n) és csakúgy, mint a hőmérséklet esetében, ebben az esetben is beszélhetünk páratartalommal összefüggő gradiensről. A hőmérséklet-gradienshez hasonlóan a páratartalom gradiens is dél körül éri el a minimumát, pozitív előjelű napfelkeltekor és a délelőtt folyamán. A levegő párafellevő-, és megtartó „képessége” függ a hőmérsékletétől. Magasabb hőmérsékletű levegő nagyobb mennyiségű vízgőzt tud magában tartani. A levegő vízgőz fellevő képességét a nedves levegő i - x diagramjai adják meg. [87] A gőzfázis halmazállapot változása és a kondenzáció mérés útján

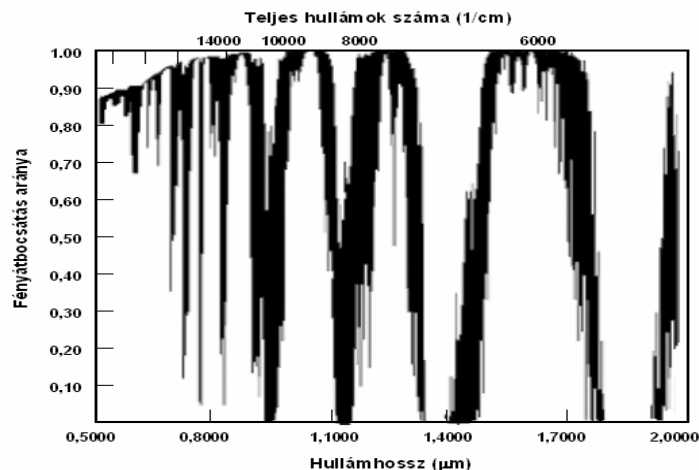
%

100

50

határozható meg, ami a nyomás, a parciális gőznyomás,³⁰ és a hőmérséklet³¹ függvénye. [87][88] Kondenzáció a levegőben mindig „harmatpont” közelében kezd kialakulni.

A levegő vízgőz tartalma a fénytjeljesítmény változás szempontjából, a legtöbb szabadtéri alkalmazás esetében meghatározó. A vízgőz legfontosabb hullámhossz tartományai a következők: $\lambda=2,7 \mu\text{m}$, $\lambda=6,3 \mu\text{m}$, $\lambda > 20 \mu\text{m}$. Szennyező anyagoktól mentes, csak vízgőzt tartalmazó levegő átviteli karakterisztikája a 6. ábrán látható. [71] Megfigyelhető az, hogy a 0,7; 0,8; 0,96; 1,1; 1,38; és 1,9 μm hullámhosszon a légkör sávzáró tulajdonságokkal rendelkezik, míg a hullámhossz növekedésével ez a sávzáró tulajdonság változik és a „tiltott sávok” szélessége növekszik. Az említett tartományban az oxigénnek és a szén-dioxidnak a csillapító hatása, más szóval hullámhossz elnyelő képessége a vízgőzhez képest majdhogynem elhanyagolható.



6. ábra
A levegő sávzáró tulajdonsága
(Forrás:[89])

A levegő vízgőztartalmának változásában és szabályozásában a természeti jelenségeknek és az élőlénynek kiemelkedő szerepük van. A tengerek vize miközben a viszonylag száraz levegőbe párolog, nagy nedvességtartalmú légréteget hoz létre. [77] Vízfelületek felett a légköri összetevők közül a vízgőztartalom változás gradiense a legnagyobb, amit nagyon sok, a fény légköri refrakciójával kapcsolatos jelenség is

³⁰ Az adott hőmérséklethez tartozó gőznyomást a Maxwell –kritérium adja meg.

³¹ Ez a hőmérséklet a gázok kritikus hőmérséklete (T_{krit}), amelyhez egy úgynevezett kritikus nyomás (p_{krit}) is tartozik. Ennek segítségével a gáz Van der Waals konstansai (a és b) kiszámíthatók. A Van der Waals egyenleteket, a Callendar és Mollier féle állapotegyenletek sokkal pontosabban írják le.

igazol. Ezek a jelenségek főként nagy vízfelületek felett, alacsony magasságban figyelhetők meg (2 sz. melléklet, 3. kép). [90][91][92]

A légkör alacsonyabb rétegeiben és a földfelszín közelében a törésmutató megváltozása az alábbi összefüggéssel határozható meg [77]:

$$\text{grad } n = (1/R) \cdot (0,2 + 30 \cdot \text{grad } e - 1,85 \cdot \text{grad } t), \quad (11)$$

ahol: R - a Föld sugara m -ben;³²

$\text{grad } e$ - a vízgőztartalom változási sebessége $\text{millibar}/m$ -ben;

$\text{grad } t$ - a hőmérsékletváltozás sebessége $^{\circ}C/m$ -ben.

A (11)- el jelölt összefüggésben a 0,2 érték egy korrekciós tag úgynevezett adíciós állandó, amelyet a Föld gravitációs tere miatt kell figyelembe venni. Tekintettel arra, hogy a következő értéknek akár a tízszerese is előfordulhat a gyakorlatban, a következők egészen átlagosnak tekinthetők: $\text{grad } e = 1/300 \text{ mb}/m$ és $\text{grad } t = 0,03 \text{ }^{\circ}C/m$.

A légköri páratartalom lézerefényre gyakorolt csillapító hatását bemutató diagram a 7. ábrán látható. A levegőben levő pára csillapító hatása az infravörös tartományban működő lézerek esetében, hullámhossztól függően majdhogynem elhanyagolható. [93][94] Megfigyelhető viszont az, hogy a levegőben lévő vízgőz hullámelnyelő képessége a nagyobb hullámhosszak felé fokozatosan csökken. Ez is alátámasztja azt a feltevést, miszerint infravörös fénytartományban működő lézerforrásokkal stabilabb optikai összeköttetés építhető ki, mint a rövidebb hullámhosszon működőkkel.

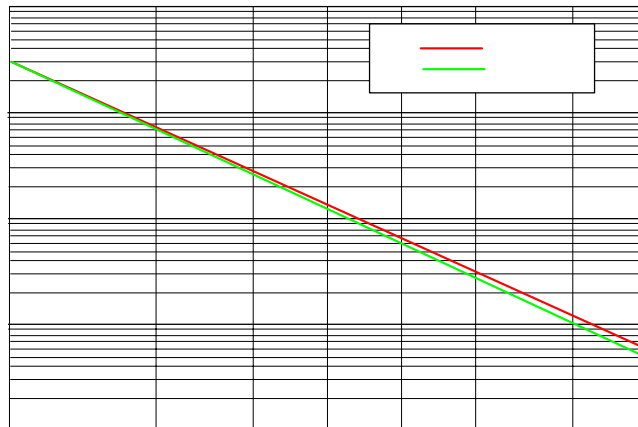
A sztenderdnek tekintett „tisztá időben” a légkörben a látótávolság általában 10, 25 esetenként 50 km, amelyet korrekciós tényezőkkel szokás csökkenteni, aszerint, hogy milyen légköri képződmény zavarja ezt. [95] Tiszta időben a fény légköri csillapítását a Rayleigh szórás³³ csökkenti, aminek értéke: $0,2 \div 1 \text{ dB}/\text{km}$, míg esőben főleg a „geometriai szórás” kell figyelembe venni. Az utóbbi nagyobb mértékben befolyásolja a fényhullám csillapítását. Esőben a látótávolság általában $2 \div 4 \text{ km}$, és a csillapítás mértéke $3 \div 9 \text{ dB}/\text{km}$ körüli érték. Hóesésben ez $1 \div 2 \text{ km}$ -re csökken, és a csillapítás elérheti a $7 \div 12 \text{ dB}/\text{km}$ -t is. Köd és pára esetében főként a Mie-féle szóródásnak van jelentősége. A vízgőzzel telített levegőben a látótávolság $200 \div 500 \text{ m}$ -re is csökkenhet

³² A Föld átlagos sugara: $R = 6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$.

³³ A gáz molekulái okozta szórás. A szórt fény intenzitása fordítottan arányos a hullámhossz negyedik hatványával.

és a csillapítás elérheti a 30÷80 dB/km-t is. Erős ködben a látótávolság 50m alá is csökkenhet és a csillapítás 300 dB/km-t is elérheti. [96]

A korábban vizsgált jelenségek mindegyike csaknem kizárólag a fényenergia csökkenésével hozhatók összefüggésbe, aminek oka az, hogy az aeroszolok fényszórási tulajdonsága egy olyan összetett folyamat eredménye, ami nem teszi lehetővé azt, hogy a fény légköri refrakciójával való kapcsolatát egyszerűen fel lehessen tárni. A fény légköri refrakcióját más összefüggésben, a korábitól teljesen függetlenül kell vizsgálni.



7. ábra

*A légköri pára hatása a lézerefény terjedésére
(Forrás:[94])*

2.2 A fény légköri refrakciója

A geometriai optikából ismert összefüggések és egyenletek alapja az a feltételezés, miszerint a fény nem csak vákuumban terjed egyenes vonalban, hanem minden ettől eltérő közegben is.³⁴ [57][97] Konstans fizikai jellemzőkkel leírható homogén közegben, a fény terjedése jól közelíti ezt a leírásmódot, de látszólag ellentmond annak, hogy a Földet övező különböző vastagságú légrétegekben, „...*a folyton, de ismeretlen törvény szerint változó törésmutató miatt a sugárzás nem egyenes, hanem görbe vonalon halad*”.³⁵ [97] Az egyenes vonalú terjedéstől való eltérést sok esetben azért lehet figyelmen kívül hagyni, mert az optikai eszközeink mérete viszonylag kicsi ah-

³⁴ A szerző a következőképpen fogalmaz: „... a sugárzás mozgása egyenes irányú.”

³⁵ A szerző nevéhez fűződik a Dowe féle prizma főméreteinek meghatározása szerkesztés útján.

hoz az úthosszhoz képest, amit a fény a légkörben, az optikai eszközeinken kívül megtesz, ezért *az eszközön belüli fényterjedés okozta hibák és eltérések nem számottevőek*, ezért gyakran elhanyagolhatóak.

Földünk légköre nem homogén közeg. A fény terjedésére hatással vannak a levegőt alkotó gázok térbeli egyenlőtlen eloszlása-, koncentrációja-, a páratartalom, a légköri nyomás és a hőmérséklet eredményezte inhomogenitások, az aeroszolok, stb. Ebben a jellemzően turbulens, inhomogén és anizotrop közegben *a nagy távolságokat „áthidaló” fényhullámok terjedésében bekövetkező eltérések okozta változások egyes esetekben számottevőek lehetnek, ezért azok nem minden esetben hanyagolhatók el.* Amennyiben a fényterjedés irányának a megváltozásával számolnunk kell, az ezzel kapcsolatos eddigi ismereteink-, a geometriai optikából ismert egyszerűsítéseink-, és összefüggéseink egy részének újragondolására és átértékelésére kényszerülünk. A fény eltérő törésmutatójú közegek határán bekövetkező refrakciója az optikai eszközeink fejlesztésének az alapja. A jelenség ismerete és felhasználása nélkül ma nem lennének lencsék, tükrök és ezekből összeállított optikai eszközök. A fény refrakciója következőképpen egy hasznos jelenség, *de csak az optikai eszközeinken belül* és az azokat határoló felületek mentén ott, ahol a környezettől elszigetelt belső térben a közeg jellemzői részben, vagy egészében tetszés szerint beállíthatók. Felületekkel határolt zárt térben elhelyezett optikai elemek esetében az aeroszolok bejutása könnyen megakadályozható. [97][98] Az elhatárolt belső térben lévő közeggel ellentétben, a külső tér optikai jellemzői instabilak és csak kevésbé,³⁶ vagy egyáltalán nem befolyásolhatók, aminek következtében az optikai eszközeinken kívüli, fényterjedésben mutatkozó eltérések, irányváltozások és hibák előfordulásának valószínűsége is jóval nagyobb.

Mivel a fény az optikai eszközeinken kívül nagyságrendekkel hosszabb utat tesz meg, mint azokon belül, a fényterjedésében jól mérhető eltérések mutathatók ki. Az optikai közeg törésmutatójának lokális és egyben szélsőséges megváltozását kísérő optikai jelenségek esetenként jól megfigyelhetők, és nagyon szemléletesek tudnak lenni. Egy részük könnyen, másik részük egyáltalán nem, vagy csak kiegészítő eszközökkel rögzíthetők digitális kamerákkal, vagy fotólemezre.

Az 4. képen a repülőgép hajtóművéből kilépő magas hőmérsékletű gázok (600÷800 °C) hatására a levegő törésmutatójának helyi megváltozása figyelhető meg.

³⁶ Ezüstjodid felhőkbe történő juttatásával, kondenzációs magok, és eső hozható létre.

[99] A magas hőmérsékletű égéstermék sűrűsége jóval kisebb, mint a környező levegőé, ezért a háttérből a képrögzítőbe érkező fénysugarak a sűrű és kevésbé sűrű közegeket tartalmazó térrészek határán irányváltozást szenvednek. Magas hőmérsékleten a turbulens áramlások a gázelegyet inhomogénná teszik, aminek a következtében az onnan kilépő elemi fénysugarak nem maradnak párhuzamosak. [100][101] A gáz fénytároló képessége, más szóval transzparenciája csökken és a háttérkép elmosódottá válik.



4. kép
A fény légköri refrakciója
(Forrás:[102])

Ennél jóval alacsonyabb hőmérsékletű hősugárzó testek környezetében, úgy mint gázkéményből kiáramló égéstermék esetében is megfigyelhető ez a jelenség. Ilyen esetben viszonylag kis térfogaton belül a levegő, vagy a gáz állapotjelzőinek nagymértékű lokális megváltozása következik be. [103]

A fény légköri refrakciójával kapcsolatos optikai jelenségek a természetben is gyakran megfigyelhetők. Ezek egyike a délibáb, más szóval; „fata-morgana”. [104] Az említett jelenséget a légköri refrakció és teljes visszaverődés külön-külön, de együttesen is létrehozhatja. Délibáb a szárazföld, vagy nagy kiterjedésű vízfelület felett figyelhető meg erős napsütésben akkor, amikor az alsó légrétegek felmelegednek és ritkábbakká válnak, mint a felettük levők. Ilyenkor nagyon távoli épületek, tájak, tájrészek, objektumok fordított képét láthatja a távolban a megfigyelő. Hazánkban főként a Hortobágyon figyelhető meg a délibáb. Ennél valamivel gyakoribb jelenség a fény teljes reflexiója, amit nyáron autózvezetés közben figyelhetünk meg a felmelegedett asz-

faltút felett. A távolban a napsütötte országút bizonyos szakaszait úgy látjuk, mintha nedves lenne, fel lenne locsolva és rövid időre nagyon messze levő autó, vagy gyalogos tükörképe is megjelenhet benne. Tovább haladva a kép eltűnik, majd az út másik szakaszán újra láthatóvá válik. A 2 sz. mellékletben, a fény természetben is megfigyelhető refrakcióját bemutató néhány kép látható. [90][91][92] A fény légköri refrakciójának a jelensége a törésmutató exponenciális görbe szerinti változásával magyarázható. [105]

Fénytöréssel kapcsolatos jelenségek akkor figyelhetők meg, ha meghatározott irányból érkező fénysugarak különböző sűrűségű, hőmérsékletű és összetételű levegőrétegeken haladnak át. A fény a levegőrétegek határán megtörik és a beesési szögtől függően eltérő szögben folytatja az útját. Attól függően, hogy honnan érkezik, a részleges visszaverődés és tükröződés következtében a megszokottól eltérő képet továbbít a szemünkbe és ott valójában nem is létező tereptárgyak képe jelenik meg. A fénytörés jelensége akkor is jól megfigyelhető, ha nyári estéken a felhőtlen csillagos égboltot szemléljük. Tapasztalhatjuk, hogy egyes égitestek által visszavert fény erőssége szabálytalan időközökben megváltozik, időnként fényesebbeknek, máskor pedig halványabbaknak tűnnek. Ez annak a következménye, hogy a fény különböző sűrűségű és törésmutatóval jellemezhető légrétegen halad át.

Amikor a légköri refrakció jelensége állóvizek, tengerek felett figyelhető meg, az „égi jelenségek” rendszerint más formát öltenek. Ennek oka az, hogy a hőátadás következtében előbb a vízfelület, majd a mélyebb rétegek melegednek fel és a levegőbe kerülő nagymennyiségű vízgőz csillapító, refrakciót előidéző hatása jelentős mértékben befolyásolja a fény légköri terjedését. A hőátadás, más szóval termikus konvekció sebessége hatással van a viszkozitásra, ugyanakkor a törésmutató értékét is jelentős mértékben befolyásolja. A felszíni rétegek sűrűségének a megváltozása az alábbi összefüggéssel adható meg [76]:

$$j_p = -\eta \frac{\partial v_y}{\partial x}, \quad (12)$$

ahol: j_p - a sűrűség;

η - a viszkozitás;

$\frac{\partial v_y}{\partial x}$ - a hőátadás sebességének gradiense.

A vízrétegek és a természetes állóvizek felszínének éves hőmérsékletváltozását diagramokkal adják meg. Ezek a diagramok a szakirodalomban megtalálhatók. [76] A sűrűségváltozás a hőátadás sebességének gradiensevel arányos, még hozzá negatív előjellel, ami azért is figyelemre méltó, mert csaknem teljesen megegyezik a molekulák diffúzióját leíró Fick törvénnyel, vagy a Fourier féle hővezetés kalorikus differenciálegyenletével. [87] A hőátadás sebességét a földrajzi hely, évszak és napszak egyaránt befolyásolja.

A fény refrakciójának jelensége a Föld légkörén kívül is megfigyelhető és sok kutatásnak és tanulmánynak volt eddig is a témája. Segítségével következtetni lehet a kozmikus tér összetételére. Sok figyelemreméltó és érdekes eredmény született, amelyeket korábban kizárólag megfigyelésekre és elméleti számításokra alapozottan végeztek a kutatók. [106] Ilyen mérések egyike a légkörön kívüli fényterjedés, optikai kapcsolat stabilitásának a vizsgálata műholdak felhasználásával. [107][108] Az „űr-korszakot” megelőző mérések úttörőjének számított K. Exner, aki az űrben található források fényének elhajlásával kapcsolatos mérései során azt találta, hogy a világűrből hozzánk érkező fényhullámok görbületének sugara a 4000 m-t is eléri. Ez úgy vélem egy meglepően kis érték, ami önmagában is több kérdést felvet, úgymint: [97][109][110][111] *Amit a távolban látunk, az valóban ott van, vagy csak érzéki (optikai) csalódás az egész?*

Minden eddig említett jelenség azt látszik igazolni, hogy a fény egyenestől eltérő, görbe vonalú légköri terjedésének következtében minden megfigyelés csupán optikai csalódás. Fontosnak tartom hangsúlyozni, hogy különbséget kell tennünk az asztromómiai léptékű, földfelszínre merőleges és a földfelszín különböző pontjai között végzett megfigyeléseink között, annak ellenére, hogy egyik és másik esetben is eltérő hőmérsékletű, sűrűségű és összetételű légrétegeken haladhat át a fény. Pályájának görbülete mindig attól függ, hogy sűrűbb közegből érkezik a ritkábbba a fény, vagy pedig fordítva. Egyik esetben a pálya homorú, a másik esetben pedig domború. A kétféle pályamodellből következik az, hogy nagy távolságok áthidalása esetén, jelentős eltérésekkel kell számolnunk. A légköri csillapításból adódó teljesítménycsökkenés és a légköri refrakció fényterjedést befolyásoló hatása az optikai eszközeink pontosságát és megbízhatóságát is csökkentik és fejlesztésük tekintetében is számos korlátot jelenthetnek. A lézerforrásokat használó pont-pont összeköttetésű optikai adat-, és informá-

cióátviteli eszközök, mérőműszerek, lézerefegyverek, célzó berendezések pontosságának növelése csak akkor képzelhető el, ha a fény légköri refrakció okozta hibák kompenzálásához szükséges automatikus és adaptív szabályozások hatékonysága tovább növelhető. Ilyen szabályozások egyike az 1.1 alfejezetben említett ABL³⁷ rendszerek adaptív optikája, amelyet a nagyteljesítményű oxigén-jód lézerefegyverek esetében a légköri csillapítás és refrakció okozta hibák kompenzálására alkalmaznak. [7][8] Kis teljesítményű lézerforrások esetében is szükség van adaptív szabályozások kidolgozására. Ez azonban csak akkor lehetséges, ha a fény légköri terjedésével kapcsolatos jelenségek kompenzálásához szükséges módszerek tapasztalati és analitikus összefüggései ki vannak dolgozva.

2.3 Következtetések

A légkör termikus folyamatai, páratartalma és összetételének változása a fény légköri terjedésében csillapító és sávszűrő hatásként vehető figyelembe. Szabadtéri alkalmazások esetében kiemelt figyelmet kell fordítani a lézerforrás hullámhosszának és teljesítményének helyes megválasztására. Utalva az előző fejezetben foglaltakra, hangolható lézerforrások használata, adaptív autonóm rendszerekkel kombinálva optimális megoldást jelenthetnek a hullámhossz beállítására. Az optimális értékek meghatározása történhet ismert és jól dokumentált összesített sávdiagramok alapján, amennyiben a levegő összetétele és annak időbeli változása ismert, vagy nyomon követhető. Az állapotváltozások nyomon követése feltételezi azt, hogy a légkörben zajló folyamatok jellege meghatározható, a determinisztikus és sztochasztikus folyamatok egymástól megkülönböztethetők. Ehhez vizsgálni kell a folyamatok rendszerének ok-okozati összefüggéseit.

³⁷ ABL (Air Borne Laser) – teher szállító repülőgép fedélzetén elhelyezett lézerefegyver.

3. FEJEZET

A LÉGKÖRI FOLYAMATOK ÖSSZEFÜGGÉSEI ÉS VIZSGÁLTÁNAK MÓDSZEREI

A tapasztalati világ eseményei, a természet-, és alkalmazott tudományok eredményeire alapozottan fogalmazhatók meg, mivel ma kizárólag ezek biztosítják azokat a módszereket és eszközöket, amelyekkel a még kérdéses összefüggések feltárhatók és megismerhetők. Eszközeink megválasztásán következésképpen nagyon sok múlik, főként az, hogy a későbbi eredmények felhasználhatók lesznek-e és hozzájárulnak-e az ismereteink bővítéséhez, vagy sem.

A természetben előforduló jelenségek két nagy csoportját különböztetjük meg: Egyik részük szigorú törvényeket követ, ezek a szükségszerű, más szóval *determinisztikus* jelenségek, míg a másik részük nem követ semmilyen szabályrendszert, ezek az úgynevezett *sztochasztikus*, vagy véletlen jelenségek. A valószínűség-számítás eszközeinek felhasználásával a környezetünkben zajló sztochasztikus folyamatok megismerhetők és eredményük, kimenetük valamilyen objektív mértékszámval, más szóval valószínűséggel megadható. Figyelembe véve azt, hogy a szükségszerű jelenségek eredménye mást jelent, mint a véletlenszerű eseményeké, az utóbbiak kiértékelése során akkor járunk el helyesen, ha sem többre, sem kevesebbre nem következtetünk, mint amit azok kifejeznek.

A valószínűség-számításra alapozott predikciós elméletek mára kiforrottnak és letisztultnak látszanak. Elméleti alapjainak megszilárdításához nagyon sokan hozzájárultak. Csak néhány nevet említve; C. Dellacherie, C. S Chou, F.B. Knight a térszemléletű leírásukkal, Chapman és Kolmogorov a feltételes valószínűség bevezetésével, Doob a dekompozíciós eljárásával, R. K Getoor az adaptív függvényelméletével, Lévy és Markov az axiómáikkal, stb. [112]

Az axiómarendszereiket felhasználva, ezekre az elméletekre alapozottan az időfüggő események jól modellezhetők. A számítástechnika rohamos fejlődésével és eszköztárának bővülésével a végeselem számítási módszereket használó számítógépes programok megjelenése figyelemreméltó előrelépést jelentett a számítógépes modellezés és szimuláció terén. Az olyan inhomogén rendszerek komplex folyamatainak a

modellezése, mint amilyenek a fluidumok³⁸ állapotváltozásai, különféle célszoftverekkel rövid idő alatt elvégezhető, az eredmények esetenként nagyon szemléletesek és meggyőzőek. Szimulációs programjaink sajnos ma még nem képesek eseményfüggő valószínűségi változók kezelésére és a részesemények bekövetkezésének egzakt meghatározására prediktív módszerekkel. A programok által megjelenített eredmények behatárolt hely-, és időfüggő részfolyamatok eredményei, amelyek többnyire a minket érdeklő, kiragadott események bekövetkezésének valószínűségét tükrözik és nem minden esetben a tényleges valós folyamatot.³⁹ [113][114]

A Föld légkörében zajló események egyfelől véletlenszerűek, sztochasztikus jellegűek, aminek következtében lefolyásuk iránya és részeseményeik bekövetkezésének ideje és helye csak részben, vagy egyáltalán nem meghatározható, ezért ezeket az események általában a „véletlen tömegjelenségek” közé soroljuk. Másfelől ugyan ezeknek a jelenségeknek egy része determinálható, azaz bekövetkezésüknek helye és ideje előre meghatározható. A véletlen tömegjelenségek jellemzője az, hogy természetük miatt a figyelembe vehető körülmények nem határozzák meg tisztán és világosan az események kimenetét, vizsgálatukat úgynevezett kauzális és sztochasztikus modellekre alapozottan is el kell végezni, míg a tapasztalati jelenségek elemzése során általában a Bernoulli⁴⁰, Laplace, vagy a Csebisev-féle eloszlást szokás figyelembe venni.⁴¹ [115]

Minden olyan folyamat kauzalitása megfogalmazható, amely determinisztikusnak tekinthető, hiszen az ok- okozati összefüggések egyszerűen feltárhatók. Az összefüggések feltárásánál azonban figyelembe kell venni a következőket: Az eseményeket befolyásoló tényezők egyik része globálisan fejtik ki hatásukat, például az időjárásfrontok hatására megváltozik a légnyomás, hőmérséklet, stb., míg másik részük csak lokálisan hat. Ilyenek a *mikro-klimatikus tényezők*. A globális és lokális tényezők hatása helytől és időtől függően nagyon különbözőek lehetnek. A globális tényezők főként a determinisztikus folyamatokkal hozhatók összefüggésbe, míg a lokális tényezők ál-

³⁸ *Gázok és folyadékok*

³⁹ Ennek oka a természetes (instabilis, dinamikus) peremfeltételek szükségszerű használata. Az eredmény függ egyrészt a véges elem képzés választott módszertől (Galjorkin, Ritz, stb.), másrészt a tértől (Hilbert, Szoboljev, stb).

⁴⁰ Jakobus Bernoulli: „Ars conjectandi” (A sejtés művészete- 1713)

⁴¹ A tapasztalati jelenségeket leíró összefüggések nem szükségszerűen tapasztalati, más szóval; empirikus összefüggések!

talában a sztochasztikus elemi folyamatokért felelősek. Az állapotjelzők, a hőmérséklet, a sűrűség és nyomás kis térrészben történő megváltozása több olyan tényezőtől is függhet, amelyek prediktív módszerekkel meghatározhatók. Példa erre a helyi magas szén-dioxid⁴² koncentráció egy fákkal sűrűn benőtt területen a reggeli órákban, vagy a szikes talaj miatt elpusztult növényzettel fedett terület, esetleg érett gabonatóbla, stb., amelynek nagyobb a reflektanciája, más szóval albedója. Az ilyen talajfelszín közeli légrétegek általában gyorsabban melegednek fel a nyári napsütésben. [116][117][118] A helyi tényezők hatása, aminek következtében a felhőtakaró vélhetően felszakadozik, és a napsugárzás kifejti a hatását egy adott helyen, csak valószínűsíthető, még akkor is, ha a szélirány ismert, vagy meghatározható. A növényzet elpusztulása, vagy a gabonatóbla érése nyomán, annak színének megváltozása nemcsak prognosztizálható, hanem meghatározható.

Gáz-halmazállapotú közeg esetében nincs más lehetőség, mint a térész átalakítása, méreteinek megváltoztatása, linearizálása és ezáltal olyan térelemek előállítás, amelyekben a végbemenő elemi folyamatok igazolhatóan determinisztikus folyamatok. A független változók száma még így is nagyon nagy lehet, ami miatt előfordulhat, hogy a rendszert leíró differenciálegyenletek megoldásai csak közelítő megoldások lesznek és úgynevezett izoklínákkal adhatók meg.

A vizsgálat alá vont térrész és méreteinek megváltoztatása hatással lesz a benne zajló folyamatok kimenetére, mint ahogy ilyen értelemben a méretei is meghatározóak. A sztochasztikus folyamatokban általában meghatározhatók és behatárolhatók azok a determinisztikus részfolyamatok, amelyek egyszerűbben kezelhetők, de mondhatjuk azt is, hogy *a sztochasztikus folyamatokból kiválaszthatók azok a részfolyamatok, amelyek determinisztikussá tehetők. Nem minden esemény determinisztikussá tehető eredményre,* még akkor sem, ha a globális tényezők hatását részben sikerül figyelembe venni. A Föld légkörében zajló folyamatok helytől és időtől függőek. Helytől való függésük azt jelenti, hogy az eseményekhez mindig hozzárendelhető az a tér, amelyben zajlanak. Részfolyamatok kiválasztása a térelem méreteinek csökkentésével érhető el, oly módon, hogy az abban lejátszódó folyamatok determinisztikusak legyenek. *Determinisztikusnak akkor tekinthetünk egy folyamatot, ha azt kellően kis tér-*

⁴² „Gas sylvestre”: A levegőtől különböző gáz (szén-dioxid) létezését, mint a fermentáció melléktermékét, J.B. Van Helmont (1577-1644), flamand kémikus és filozófus mutatta ki elsőként.

részben vizsgáljuk ahhoz, hogy minden kétséget kizáróan ki lehessen jelenteni azt, hogy a térész jellemzői-, és a benne zajló részfolyamatok iránya ismert, meghatározható és valamilyen mértékszámokkal kifejezhető. Az események jellegének meghatározását nehezíti az, hogy az egyes tényezők egymástól függetlenül is kifejthetik hatásukat, miközben együttes hatásuk áttekinthetetlen láncolata azt is eredményezheti, hogy a számunkra fontos részfolyamatok nehezen, vagy egyáltalán nem ismerhetők fel benne. Amennyiben nem dönthető el, hogy sztochasztikus, vagy determinisztikus eseményről van-e szó, azt általában a „kétséges” eseménynek körébe soroljuk. „Kétséges eseményekről és jelenségekről meg lehet állapítani, hogy azok véletlen jelenségek-e, vagy csak annak látszatát keltik, mintha azok lennének. A kétséges események vizsgálatával több kutató is foglalkozott. Szluckij és Romanovszkij megállapította azt, hogy sok jelenségnél, amikor látszólagos periodicitás mutatkozik, tulajdonképpen véletlen ingadozásokról van szó, amely „a periodicitást imitálja”. [115]

A meteorológiában a mai olyan korszerű eszközöknek köszönhetően, mint amilyenek a műholdak, automata mérésadatgyűjtők, stb. nagyon pontos mérések végezhetők. Egy adott régió időjárását meghatározó tényezők közti összefüggések a mérési eredmények feltárhatók és többé-kevésbé megbízható prognózis állítható össze. Mondhatjuk azt is, hogy; „...voltaképpen nincs véletlen jelenség, mert az ismereteink bővülése egy korábban véletlennek hitt jelenséget szükségszerű, determinisztikus jelenséggé változtatja, vagy fordítva...”. [119]

Fluidumok, gázok és folyadékok esetében, a vizsgálat tárgyát képező térrész, vagy *térfogatelem méretei csak a makro szerkezet határáig csökkenthetők,*⁴³ ellenkező esetben újabb problémákkal szembesülünk: „...sok olyan jelenség van, amelyet ha néhány feltétellel adunk meg, akkor akár determinisztikusnak is tekinthetjük, de ha a jelenség vizsgálatakor a mikro-szerkezetet tekintjük, akkor a jelenség sztochasztikusnak bizonyul”. [87][119] Erre legjobb példa; a fizikából ismert nyomás. A nyomás determinisztikus folyamat eredménye akkor, amikor egységnyi felületre ható erőként értelmezzük, ha viszont a kinetikai gázelmélet alapján a közeg mikro-szerkezetét vizsgáljuk és a nyomást, a molekulák és a térrészt határoló felület közti ütközésként értel-

⁴³ „A térfogat elemet természetesen nem szabad olyan kicsire venni, hogy a molekuláris méretekből fellépő ingadozások az állapotjelző fajlagos értékét befolyásolják”

mezzük,⁴⁴ akkor egy jellemzően sztochasztikus folyamatról beszélünk.[115][87] Ebből az következik, hogy a vizsgálat módszere minden esetben meghatározza annak eszkörendszerét, és fordítva.

3.1 A közeghatár komplex értelmezése és dualitása

A Föld légkörének fényterjedésre gyakorolt hatása nagyon sok kutatásnak tárgya volt az elmúlt több mint egy évszázadban. Az ezzel kapcsolatos jelenségek egy része még középiskolai tankönyvekből is ismert, gondoljunk itt a fény sebességének megváltozására, vagy a „fénytöréssel” kapcsolatos Snellius- Descartes törvényre. [120]

A fényterjedéssel kapcsolatos jelenségek gyors és demonstratív bemutatásához, rendszerint nagyobb sűrűségű közeget is használunk, mint a gázok. Ilyenek a folyadékok, vagy szilárd halmazállapotú anyagok, például az üveg. Kombinációjukból alkotott optikai rendszerekkel a fény terjedése viszonylag egyszerűen tanulmányozható. A geometriai optikából ismert egyszerűsítéseink mellett a statikus mérések elvégzésének alapfeltétele az volt, hogy a fény terjedését ne befolyásolja a közeg mozgása, vagy áramlása. Ilyen statikus rendszerek esetében következésképpen mindig ott van a vizsgálható és jól meghatározható stabil *közeghatár*, amelyen a fény áthaladt. Egyszerűsítéseink eredményeképpen a közeghatár szélességét általában zérusnak tekintjük és a közeg összetételétől függetlenül feltételezzük azt, hogy a fény egyenes vonalban terjed. Ez a leírásmód abból az egyszerű igényből fakadt, hogy a jelenségek értelmezését, leírását minél inkább leegyszerűsítsük. Amikor a jelenség mélyrehatóbb vizsgálatára kényszerültünk, nem lehetünk ennyire nagyvonalúak. Ennek oka az, hogy a közeghatár környezetében lejátszódó folyamatok, amelyek a fény terjedését befolyásolják nem hagyhatjuk figyelmen kívül. Ilyen folyamatok a folyadékok párolgása, a gőz és gázfázisú anyag keveredése és inhomogén eloszlása a gravitáció hatására a folyadékfelszín közvetlen közelében, vagy az áramló fluidumok esetében kialakuló egyenlőtlen sebességeloszlás a határfelület közelében. A víz és levegő esetében a vízgőzzel telített felszíni réteg vastagsága függ a vízgőz parciális nyomásától és hőmérsékletétől. Az eloszlását nagymértékben befolyásolja a gáz nyomása, hőmérsékleti gradiense a folyadékrétegek közti nyomás és viszkozitás különbség, stb. Ezek mind- mind olyan ténye-

⁴⁴ „Steinhaus kimutatta, hogy bizonyos modelleknél megadva a molekulák kezdő helyzetét és kezdő sebességét, elegendő idő múlva a molekulák a statisztikus elmélet által meghatározott egyenletes eloszlással bírnak.” Ezt az eredményt Egerváry Jenő és Turán Pál általánosította különféle modellekre.

zók, amelyeket korábban figyelmen kívül lehetett hagyni, annak érdekében, hogy a számításainkhoz szükséges egyenletek minél egyszerűbbek legyenek. Határréteg kialakulását eredményezhetik a viszkozitást befolyásoló termikus jelenségek, mint például a termikus konvekció. Hosszasan lehetne sorolni azokat a jelenségeket, amelyek mind azt igazolják, hogy *szigorúan vett éles közegethatárról még a szilárd halmazállapotú közeg és a folyadék,- vagy gázok találkozásának helyén sem beszélhetünk*. Hirtelen átmenetről nem beszélhetünk, csak és kizárólag *határrétegről*, amelynek a vastagsága mindig különbözik a zérustól.

Különböző halmazállapotú (folyadék-gáz, gáz-szilárd és folyadék-szilárd) közegek kombinációjaként előállított „stabil” közegethatár létrehozása nem különösebben nehéz. Nem így van ez a gáz-gáz halmazállapotú közegek esetében. A gázok nem alaktartó fizikai tulajdonságai miatt, szilárd határoló felületek hiányában nem alkotnak stabil és statikus rendszert. Belsejükben, ha az elméleti határréteg rövid időre ki is alakul, a gázmolekulák mozgékonyasága miatt alakja azt követően rögtön megváltozik és fenntartása csaknem lehetetlen. A közegethatár és határfelület stabilizálásának és fenntartásának technikai módszerei nagyon különbözőek, mindegyik megoldásnak megvannak a maga hátrányai és előnytelen tulajdonságai, ami miatt példa értékű megoldásként egyik sem jöhet szóba.

Fluidumok belsejében a sűrűség-, és nyomáskülönbség hatására kialakuló *közegethatár* az áramlási vonalak mentén figyelhető meg a legegyszerűbben. A jelenség, amelyen néhány mérési eljárás alapul, sok tekintetben hasonlít a természetben is megfigyelhető, fény refrakciójával összefüggő jelenségekre. Ilyen az előző fejezetben ismertetett, 3. képen látható, repülőgép hajtóművéből kiáramló magas hőmérsékletű gáz által eredményezett inhomogenitás is. Áramló közegben sűrűségváltozás lokális nyomásváltozással hozható létre, ami a határréteg kialakulását és megfigyelését teszi lehetővé az áramló közeg belsejében. A határréteg gázdinamikai mérésekre alkalmas, bonyolult mérőberendezéseken belül, a közeg folyamatos kényszeráramoltatásával tartható fenn. Ilyen mérőberendezés a holografikus interferométer. [121][122]

Ha a teret kisebb térelemekre bontjuk és feltételezzük azt, hogy a térelemek egymástól el vannak szigetelve, azaz izoláltak, a kisebb térrészekre történő bontás a korábban említett okok miatt csak addig a határig folytatható, ameddig az elemi térrész a számunkra még fontos tulajdonságokkal rendelkezik és a benne zajló folyama-

tok determinisztikusnak tekinthetők. A térelem térfogatának felső határa az a véges érték, amelynél a határfelület még értelmezhető és tulajdonságai megadhatók. A közeg inhomogenitása mellett a rendszer nem-linearitásával is számolni kell, ami tovább bonyolíthatja a számításainkat, megnehezítve a feladat megoldását, esetenként még annak megfogalmazását is. Tekintsünk el a rendszer nem-linearitásától és tekintsük a kölcsönhatásokat megszünteknek, ezzel az *időtényező kiküszöbölhető*.⁴⁵ Ezáltal olyan stacionárius állapotban levő lineáris rendszerhez jutunk, amely lehet a továbbiakban is *inhomogén*. [123] Erre alapozottan a fény terjedése a gyakorlatban is vizsgálható.

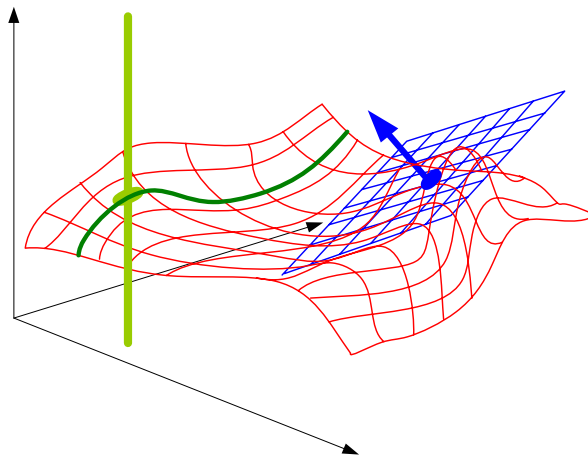
A térelemeket határoló szabályos határfelületeken belül értelmezni kell a közeget, amely két eltérő tulajdonságú közeget választ el egymástól. Geometriai modellel a képzeletbeli határfelület akkor adható meg a legegyszerűbben, ha az egymástól eltérő közegek határán nincs semmilyen folyamatos átmenet, úgynevezett határréteg. Átmenet nélküli határréteg a gázhalmazállapotú közeg esetében nemcsak, hogy nehezen képzelhető el, de még ennél is nehezebben állítható elő, mivel a gázokat alkotó molekulák⁴⁶ nem helyhez kötöttek. A gázhalmazállapotú közeg matematikai modelljét a továbbiakban csak statikus rendszerekre értelmezem.

Ha a véges térelemben két eltérő törésmutatójú közeg határfelületét ábrázolni kell, akkor azt a 8. ábrán látható alakatlan felületként kell elképzelni. A felület alakját kizárólag az atomok, molekulák egymás közti kölcsönhatása, dinamikai tulajdonságai, a gázösszetevők eloszlása és a külső hatások határozzák meg. A határfelület képi megjelenítésének és ábrázolásának ez a formája vélhetően minden más szabályos felületű alakzatnál jobban követi a valós gázok szerkezetét és belső állapotváltozásait, de mivel ilyen felületek csak többváltozós függvényekkel írhatók le, alkalmazása inkább bonyolítja a számításainkat, mintsem egyszerűsíti. Figyelembe véve azt, hogy nem a rendszer egészére, hanem csak annak egy részére vonatkozóan kell következtetéseket megfogalmazni, elegendő az *elemi fénysugár*⁴⁷ áthaladását vizsgálni a véges térrészen belül.

⁴⁵ Optikai rendszerekben a nemlinearitás csökkentésével az intermodulációs torzítások (IMD) megszüntethetők.

⁴⁶ A gázok 1cm^3 -ében, 1 atm nyomáson, 0°C hőmérsékleten $27 \cdot 10^{18}$, azaz 27 trillió molekula van.

⁴⁷ A fizikailag értelmezhetetlen elemi fénysugár, egy matematikai absztrakció, aminek alkalmazásának vannak igazolható korlátai.



8. ábra
A közeghatár hálómodellje
(A szerző rajza)

Amennyiben a felület alakja ismert, akkor nem nehéz olyan matematikai eszközöket találni, amelyek segítségével a fény terjedése vizsgálható. A felület alakjának meghatározására több módszer is létezik:

- Érintősíkok helyzetének, ill. az érintkezési pont környezetében a metszésvonalak meglétének, vagy hiányának a vizsgálata;
- Felületre, vagy felületelemre rajzolt háromszög szögeinek és összegüknek (negatív, vagy pozitív a felület), stb. [124]

Legyen a 8. ábrán látható elemi fénysugár, amely az n_0 törésmutatójú közegből az n_1 törésmutatójú közegbe a D „dőfpontban” lép át. Az \bar{n} normálvektor P -vel jelölt talppontja essen egybe képzeletben a D ponttal, és a piros színű hálóval jelölt közeghatár teljes felülete legyen A_H . $A_H = \sum_{i=1}^n A_i$, ahol A_i a felület egy elemi kis darabja.

Amennyiben a közeg homogén, elméleti közeghatárról és belépési szögről elvileg nem is beszélhetünk. A Föld légköre azonban nem izotrop és még kevésbé nem homogén közeg, ezért a határfelületet tekintsük értelmezhetőnek. Az állapotváltozásokat leíró állapotjelzők, nyomás, hőmérséklet megváltozása, energiatranszfer útján más származtatott mennyiségek megváltozását vonja maga után. Ilyen a sűrűség, fajtérfogat, stb. Ezek együttesen, de külön-külön is, hatással vannak a közeg optikai tulajdon-

ságaira és törésmutatójára. A törésmutató megváltozása bonyolult kölcsönhatások eredményeképpen, a fény sebességének megváltozását eredményezi és fordítva, a fény hullámhossza is hatással van a közeg törésmutatójára, mint ahogy erről korábban is volt szó. [125] A kölcsönhatások bonyolult rendszerében, a térelembe foglalt közeg fényterjedésre, és a fényterjedés közegjellemzőkre gyakorolt kölcsönös hatása miatt akkor járunk el helyesen, ha az inhomogén gázhalmazállapotú közegben a közeghatárt *hullámtani megfogalmazásban és a közeg anyagi szerkezetére alapozottan is vizsgáljuk*. A fényterjedés kettőssége, avagy dualitása alatt a továbbiakban nem a fény részecske és hullámtermészetét-, hanem a *fényhullám és a közeg felépítő molekulák kölcsönhatásának kétféle értelmezését*, vizsgálatának eltérő módszereit és eszközeit értem. A matematikai modell előállítható a fény, mint elektromágneses hullám Maxwell egyenleteire és a közeg anyagi szerkezetére alapozottan is.

3.1.1 A közeghatár értelmezése hullámegyenletekre alapozottan

Az optika nem vizsgálja a rádióhullámok terjedését leíró egyenletek érvényességét, holott a szakirodalmi források a fényhullámokat és a rádióhullámokat csak a frekvenciatartományuk alapján különbözteti meg. A hullámterjedéssel összefüggő érvényességi korlátok hiánya azt jelenti, hogy az optikai jelenségek leírásához és megfogalmazásához az elektromágneses hullámegyenletek minden további nélkül felhasználhatók. A fényáramot alkotó fotonok úgynevezett hullámkvantumok formájában terjednek a térben, miközben a folyamatos energiaáramlást hullámegyenletek írják le. A tér jellemzői és az elektromágneses hullám közti kapcsolatot a dielektromos eltolás fejezi ki,

a következők szerint: $\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}$, ahol \vec{D} a dielektromos eltolás vektora, \vec{E} az elektromágneses hullám elektromos terének vektora, ϵ pedig a közeg és tér dielektromos állandója, más szóval; permittivitása. Legyen a $\rho = \rho(x, y, z)$ egy vektorfüggvény,

amely előállítható a \vec{D} (eltolás) vektor divergenciájaként;

$$\text{div} \vec{D} = \rho, \quad (13)$$

Ez az elektromágneses hullámok térbeli terjedését leíró első Maxwell egyenlet.[77]

Általánosítva írhatjuk azt, hogy a \vec{D} vektor potenciál terében, az $u(x, y, z)$ potenciál-függvény kielégíti a;

$$\Delta u \equiv \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \rho(x, y, z), \quad (14)$$

úgynevezett Poisson egyenletet, ahol: $u=u(x,y,z)$ egy folytonos és differenciálható függvény, amelynek léteznek a parciális deriváltjai. [126]

A 8. ábrán a vektortérben értelmezett felület normálvektorának (n) irányát a gradiens fejezi ki. A $\text{grad } u$ az $u=u(x, y, z)$ skalár függvény gradiense:

$$\text{gradu} = \nabla u = \left(i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot u = i \frac{\partial u}{\partial x} + j \frac{\partial u}{\partial y} + k \frac{\partial u}{\partial z}, \quad (15)$$

A zárójelben levő kifejezés, a ∇ -val jelölt Hamilton (Nabla) operátor.⁴⁸ Amennyiben a $\text{grad } u$ megadja a közeghatárként értelmezhető felületi normális irányát, akkor az elektromágneses hullámegyenletekből kiindulva, a felületi normális irány alapján értelmezhetővé válik maga a felületi normális is. Amennyiben a felületi normális térbeli helyzete ismert, akkor a P pontban felvett felületelem a teljes felület egy kis darabjaként fogható fel. Több ilyen felületelemből végső soron a teljes felület is felépíthető, de ha az elemi fénysugár terjedését vizsgáljuk, a refrakció vizsgálatánál elegendő a dőféspont helyén vizsgálni a felületelem helyzetét.

3.1.2 A közeghatár értelmezése a közeg anyagi szerkezetére alapozot-tan

Minden valóságos és kiterjedéssel rendelkező gáz egymással kölcsönhatásban álló molekulákból épül fel. A molekuláknak van saját térfogatuk, amellyel csökkentik a mozgásukhoz szükséges teret, mindemellett köztük, úgynevezett *kohéziós erők* is hatnak. A hő-, és áramlástanból ismert egyszerűsítéseink eredményeképpen, a kohéziós erőket minden olyan esetben figyelmen kívül hagytuk, amikor az lehetséges volt csakúgy, mint több más tényezőt is, amelyek az ideális gázokat a valóságos gázoktól megkülönböztették. Az ideális és valós gázok közti különbséget az a és b , úgynevezett korrekciós tényezőkkel, más szóval Van der Waals állandókkal lehet figyelembe ven-

⁴⁸ A Hamilton operátornak van egy nagyon fontos tulajdonsága; rendelkezik differenciál és vektor tulajdonságokkal is, aminek köszönhetően a vektortér differenciál eszközökkel leírható. Az operátor nem vektor!

ni.⁴⁹ Az a állandó a közeg minőségétől függ, míg b a molekulák saját térfogata miatt figyelembe vehető állandó. [87]

A gázokra ható nyomás növekedésével a gáz fajtérfogata megváltozik, ami a molekulák közti távolság csökkenéséhez-, és egyúttal a kohéziós erők növekedéséhez vezet. Az egyenletes eloszlásra törekvő gáZRészecskék közt ható erők a gáz belsejében kiegyenlítik egymást, míg a felszínen⁵⁰ levők esetében ezek az erők csak egy oldalon hatnak. A kiegyenlítettlen erők a felszínen levő molekulákat a gáz belseje felé vonzzák, és csökkentik a felszíni nyomás értékét. A gáz belsejében és a felszínen mérhető nyomás közti különbséget az $\frac{a}{v^2}$, úgynevezett arányossági tényezővel lehet figyelembe venni, de csak a mikroszkopikus rendszert leíró egyenletek érvényességének határain belül.⁵¹ [87]

A belső erők hatásából következően a kohéziós erők nem csak a felszíni rétegekben hoznak létre kisebb nyomást, más szóval felületi feszültséget és ezáltal „felületet”, hanem a vizsgált térfogaton belül is, amennyiben valamilyen belső lokális nyomásváltozás, dinamikai hatás, sugárzás, stb. hatására a molekulák egy része közelebb kerül egymáshoz. A határréteg kialakulásában és fenntartásában a kohéziós erőknek nagyon fontos szerepük van. Amennyiben a vizsgált térrész térfogatát és a benne található gázmolekulák számát állandónak tekintjük, a gázmolekulák egy részének közeledése, másoktól való eltávolodással jár együtt figyelembe véve azt, hogy a gáz a rendelkezésére álló teret kitölti. Következésképpen a kohéziós erők a molekulák egy részénél növekszik, a másik részüknél pedig csökken. A külső hatás hirtelen megszűnésével a molekulák térfogaton belüli egyenlőtlen eloszlása nem vezet azonnali visszarendeződéshez, mivel a kohéziós erők, amely korábban lokális sűrűségváltozást eredményeztek a gáz belsejében, éppen ez ellen hatnak. Figyelembe véve azt, hogy nem izolált molekulacsoportokról és közülük ható erőkről van szó, hanem külső erőkről és hatásokról, amelyek az említett erőkkel ellentétesen hatnak éles átmenetről, „kontrasztos” határfelületről semmiképpen sem beszélhetünk, csak és kizárólag folyamatos

⁴⁹ Nagy fajtérfogatok esetén, amikor $v \gg b$ és $v^2 \gg a$ az állapotegyenlet átmegy az ideális gázok állapotegyenletébe.

⁵⁰ A korábbi feltételezésre alapozottan, a „felszín” létezik.

⁵¹ A technikai gyakorlat szempontjából rendkívül fontos vízgőz viselkedését a van der Waals egyenletek nem írják le kellő pontossággal, ezért bevezetésre kerültek a Callendar és Mollier féle állapotegyenletek, amelyekben az állandókat függvények helyettesítik.

átmenettel jellemezhető úgynevezett *határrétegről*. A határréteg vastagságát az előbb említett *a* és *b* együtthatók nagymértékben befolyásolják.

Az együtthatók anyagi jellemzők, amiből következik az, hogy a határréteg vastagsága függ a gáz anyagi minőségétől. Az anyagi jellemzőkkel összefüggő Van der Waals állandóknak jelentős szerepük van a közegethatár kialakulásában és fennmaradásában. A nyomásváltozás hatására bekövetkező sűrűségváltozás teszi lehetővé azt, hogy a fény refrakcióját vizsgálni lehessen a gázok belsejében is. Mivel a belső zavart eredményező külső hatás megszűnését követően a belső kohéziós erők egy idő után kiegyenlítődnek és az inhomogenitás magától megszűnik, fenntartása csak különleges mérőberendezésekben, gázdinamikai vizsgálatok során lehetséges. Ezt a belső zavart nem csak mechanikai hullám, hanem termikus expanzió is kiválthatja.

3.2 A fényterjedést befolyásoló másodlagos tényezők, rendellenes hullám

A fény és a rádióhullámok esetében egyaránt ismertek azok a légköri képződmények, amelyeknek jelentős szerepük van a rádióhullámok továbbításában, vagy éppen terjedésük megakadályozásában.⁵² Az elektromágneses hullámok frekvenciájának növekedésével, a rádióhullámok terjedésének iránya a légkörben megváltozik. [77][127]

A fényhullám ionizáló hatása régóta ismert és viszonylag egyszerű eszközökkel kimutatható. A természetben több olyan jelenség is megfigyelhető, amelyek az említett jelenséggel összefüggésbe hozhatók.⁵³ Szabad elektronok nem csak ionizált légrétegekben fordulnak elő, hanem bárhol.⁵⁴ Az elektromágneses hullámok és az ionizált részecskék kölcsönhatásait régóta vizsgálják a kutatók. A kölcsönhatások eredményeképpen; „*A Föld mágneses terének hatására, a beeső hullám egy rendes és egy*

⁵² A szuperrefrakció, vagy alagúthatás („Duct”) az optikából ismert teljes visszaverődésnek rádióhullámokra vonatkoztatott megfelelője. Ha a rádióhullámok elhajlásának görbülete;

$K = \frac{d\Theta}{ds} \geq 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ rad} / m$, akkor „a sugár körülhajlik a földön, az „alagútban” való terjedésnek

köszönhetően. A Föld sugara; $6,4 \cdot 10^6 \text{ m}$. A könyv szerzője nem említi, hogy a számítások az 50km feletti melyik ionizált légrétegekre vonatkoznak (D réteg; 60÷90 km, E réteg: 110÷120 km)

⁵³ Sarki fény.

⁵⁴ Heaviside és Kennelly a múlt század elején igazolták, hogy a napsugárzás a felső légréteget ionizálja.

rendellenes sugárra bomlik". „*A rendellenes sugár polarizációja merőleges az eredetire*". „*Ennek oka az, hogy az elektronok a mágneses tér jelenléte miatt, nem a hullám elektromos terének irányába, hanem ahhoz képest valamilyen szögben terjednek*".⁵⁵

[77] Az ionizált részecskék által létrehozott ionizált rétegek befolyásolják az elektromágneses hullámok és a fény terjedését. Az ionizált rétegben előforduló részecskék száma alapvetően meghatározza a réteg „optikai” tulajdonságait. Ionizált részecskék, esetenként nagyon nagy számban, alacsonyabb légrétegekben is előfordulnak. Ilyen részecskéket természetes források is létrehozhatnak, úgymint a villámlás, de más mesterséges források is. Utóbbira példa a katódsugárcsőves képmegjelenítő, a mikrohullámú sütő, a fénymásoló, a radioaktív anyagokat felhasználó gépi berendezések és több más ionizáló sugárforrás is.

A fényhullám frekvenciájától és energiájától függően ionizált részecskéket a *lézerforrások* is létrehozhatnak. Elsődlegesnek tekintett légköri hatások mellett a gravitációs tér fényterjedésre gyakorolt hatását sem lehet figyelmen kívül hagyni. A fény terjedését vizsgálva a Föld légkörében, óhatatlanul felmerül a kérdés: elképzelhető-e valamilyen kölcsönhatás a Föld gravitációs tere és az elektromágneses hullámok között? A gravitációnak a fényhullámra gyakorolt közvetlen hatása nem ismert, de nem is értelmezhető a klasszikus newtoni fizika segítségével, amennyiben a fényt olyan foton-áramnak tekintjük, amelyben a „részecskéknek” nincs tömegük. Ha a fotonnak nincs tömege, akkor a Föld gravitációs tere a fényhullámra közvetlenül nem hathat, ellenben a gravitációnak a levegő törésmutatójára gyakorolt hatását mégsem lehet figyelmen kívül hagyni, hiszen közvetett hatásról mégiscsak beszélhetünk.

A légkör inhomogenitásának elsődleges forrása a gravitáció által előidézett, magasságtól függő, légköri nyomásváltozás. A Föld légkörét alkotó gázmolekuláknak van tömegük (*1 sz. melléklet, 3. táblázat*), aminek következtében, azokra olyan súlyerő hat, amelynek a vektora a Föld középpontjának irányába mutat, amennyiben a Föld forgásától eltekintünk. A súlyerővel szemben, a kohéziós erőket kiegyenlítő, gázmolekulák közti taszítóerő tart egyensúlyt. A gáz-halmazállapotú közeg belső statikus egyensúlyát a következő egyenlet írja le [88]:

$$\mathbf{K} - \text{grad } p = 0, \quad (16)$$

ahol: \mathbf{K} - a térfogategységre vonatkoztatott tömegerő;

⁵⁵ A szerző nem említi olyan kitételt, ami a fényhullámra való alkalmazását korlátozná.

p - légköri nyomás.

A légköri nyomást az úgynevezett „barometrikus formula” adja meg [88]:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0}{p_0}gz}, \quad (17)$$

ahol: p, p_0 - meghatározott magassághoz tartozó nyomás;

ρ_0 - a p_0 nyomáshoz tartozó légköri sűrűség;

g - gravitációs gyorsulás;

z - magasság.

Figyelembe véve azt, hogy a barometrikus képlet levezetésénél a Boyle-Mariotte törvény került felhasználásra, a fenti összefüggés csak állandó hőmérsékleten érvényes. A Föld légkörének szerkezetét egy hőmérsékleti profil is jellemzi, amely megadja a hőmérséklet változását a magasság függvényében. A hőmérséklet, nyomás és gázsűrűség változás a magasság függvényében a 3 sz. melléklet 1. ábráján látható. Zavartalan légkörben az egyenlő magasságban levő molekulákra elvileg ugyanakkora súlyerő hat, azért alakult ki az a kép, hogy a Földet több héjszerű burok övezi, amelyet „szféra” toldalékszóval egészítették ki. Nemcsak a szilárd kéreggel határolt földfelszín, hanem az azt övező légkör tulajdonságai is leírhatók különféle modellekkel. Kézenfekvő tehát, hogy a légkör szerkezetének és modelljének megalkotásakor használjuk a részecskék gyakori képi ábrázolását, a gömböt. Matematikai modell létrehozható az atomok jól meghatározott térfogatára-, fizikai modell pedig olyan fizikai tulajdonságaira alapozottan, mint amilyen a tömegük.

3.3 Az atomok és molekulák kölcsönhatásainak modellje

A modellnek és modellalkotásnak kiemelkedő szerepe van az elméleti ismeretek gyakorlatba történő átültetésében és megalapozásában. A gáz-halmazállapotú közeg matematikai modelljének lényege a fény és az anyagi közeg kölcsönhatásainak a feltárása oly módon, hogy abból a fény térelemen belüli terjedésére vonatkozó általános következtetéseket lehessen levonni.

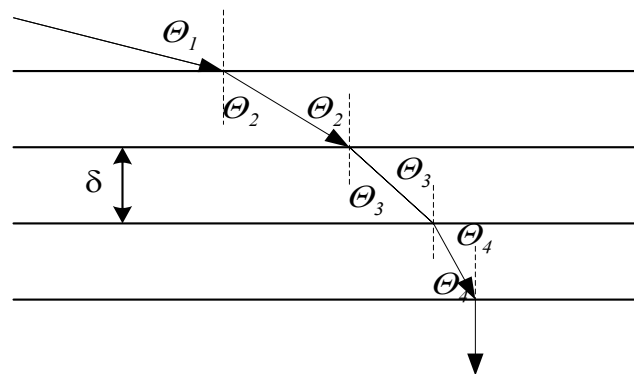
A fény refrakciója a Huygens- Fresnel⁵⁶ elvvel magyarázható. [124] Ez az elv, a Fermat elvvel összhangban azt mondja ki, hogy a fénysugár mindig olyan pályán halad, hogy két pont közti távolságot minél rövidebb idő alatt fussa be. Az alábbi egyenletek a Snellius-Descartes törvények általánosításai [76]:

$$\begin{aligned} n_1 \cdot \sin \Theta_1 &= n_2 \cdot \sin \Theta_2 \\ n_2 \cdot \sin \Theta_2 &= n_3 \cdot \sin \Theta_3 \\ &\dots \\ n_{r-1} \cdot \sin \Theta_{r-1} &= n_r \cdot \sin \Theta_r \end{aligned} \quad (18)$$

Általánosabb formában ugyanez a következőképpen írható:

$$n(y) \cdot \sin \Theta = \text{állandó} \quad (19)$$

Megfigyelhető az, hogy az általánosítás eredményeképpen felírt egyenletek, valamint a fény terjedését bemutató képi ábrázolás (9. ábra) nem tud elszakadni a közeg rétegzett megjelenítésétől és a terjedési út - geometriai optikából ismert törtvonalas ábrázolásától, annak ellenére, hogy a tudomány a Cassini-modell létezését régóta cáfolja.



9. ábra
Közegmodell rétegzett vonalas ábrája
(A szerző rajza)

A rétegzett szerkezet lehetőséget ad arra, hogy a fény terjedését a geometriai optikában megszokott módon, egyszerű egyenletekkel vizsgáljuk, de ennek a kénye-

⁵⁶ Augustin Fresnel (1788-1827), Christian Huygens (1629-1695), Huygens holland fizikus volt, aki Newton elméletét megcáfolva, máig helytálló és elfogadható magyarázatot adott az eltérő törésmutatójú közegek határán bekövetkező „fénytörésre”.

lemnek ára van. Minél durvább a figyelembe vehető rétegvonalas szerkezet egy egyenletes eloszlású inhomogén közegen belül, annál nagyobb lesz a számításunk százalékos hibája. Fluidumok esetében ez az ábrázolási forma elsősorban azért tűnik elfogadhatatlannak, mert az anyagi szerkezet alkotóelemei az atomok és molekulák mobilitása nagyon nagy, ami a közeghatár kialakulását látszólag gátolja. Láttuk azt, hogy a fény refrakciója gázok esetében is megfigyelhető, ami egy *matematikai modell* megalkotásának szükségességét alátámasztja.

Legyen a vizsgált térfogat egységnyi, amelyben a rétegvastagság ($0 < \delta \leq 1$) tartományon belül vesz fel értékeket. (9. ábra) Ekkor $k \cdot \delta = 1$, ahol k a térfogaton belüli rétegek száma. [128] A rétegzett szerkezetet a következők szerint finomítható: A rendszer inhomogenitásának feltétele: $n_1 \neq n_2 \neq n_3 \neq \dots \neq n_k$. Ha minden határon túl növeljük a (k) rétegek számát, akkor a $\delta = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k}$, ($k \cdot \delta = \text{állandó}$) határértéknek megfelelően a δ rétegvastagság tart a nullához. A $\delta = 0$ viszont azt jelenti, hogy nem beszélhetünk sem határrétegről, sem pedig rétegen belüli fényterjedésről. Ha nem beszélhetünk rétegen belüli fényterjedésről, akkor a geometriai optikából megismert egyszerűsítéseink sem vezetnek eredményre, hiszen a Θ_2 közegen belüli szöveget a 10. ábrán a továbbiakban nem tudjuk értelmezni. Ha a rétegvastagságok zérusok és azokat megszüntetnek tekintjük, akkor a vizsgálat tárgyát képező közeg sem létezik, amelyen a fénysugár áthaladhat, ami viszont ellentmondást sejtet. A $\Theta_1 = \Theta_{k+1}$ feltétel kielégíti az egyenleteket, de az előbbi feltételezés alapján az $\frac{n_1}{n_2} = 1$, azaz $n_1 = n_2 = n$, csak

nem létező közeghatárra igaz. Ragaszkodva az előbb említett minden határon túli finomításhoz, két elvi akadállyal szembesülünk;

1. a vizsgálat tárgyát képező közeg megszűnik létezni;
2. közeghatár nélkül, a fény refrakcióját leíró Snellius- Descartes törvények és a Fermat elv érvényét veszti, gáz-halmazállapotú közegek esetében.

A rendszer fizikai modellje akkor áll legközelebb a valós inhomogén modell-

hez, ha a finomítás során teljesül a következő feltétel: $\delta = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{k}$, amennyiben $\delta \neq 0$.

$k < \infty$

Ha $\delta \rightarrow 0$, akkor $\Delta\Theta \rightarrow 0$ csak akkor igaz, ha $\Theta_1 \cong \Theta_2$. A rétegvastagság csökkentése tehát, ahhoz a különleges esethez vezet, ami a Snellius- Descartes törvényben is megfogalmazódik: Amennyiben a fénysugár merőlegesen érkezik a felületre, akkor a közeg törésmutatójától függetlenül mindig merőlegesen lép ki onnan, azaz teljesül a; $\Theta_1 = 0 \Leftrightarrow \Theta_2 \Leftrightarrow \Theta_2 = 0$ feltétel. A $\Theta_1 = \Theta_2$ feltételt eddig csak homogén és a közeghatárra merőlegesen érkező fénysugárra értelmeztük. A Θ_2 szög figyelmen kívül hagyásával a valós fizikai közeghez közelebb álló, vagy azzal megegyező inhomogén rendszer modelljét kaptuk.

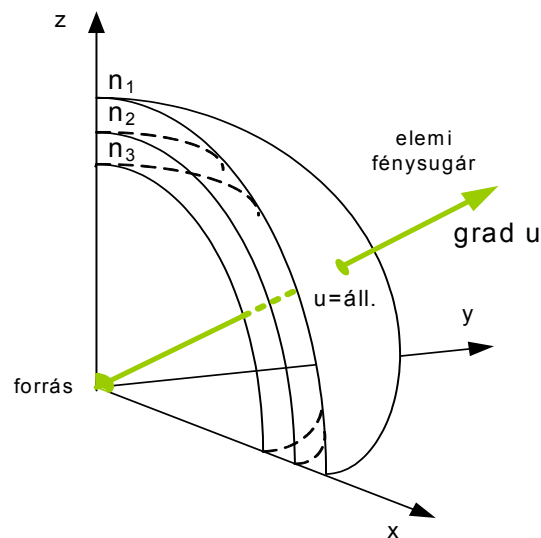
Az inhomogén közeg rétegzett modelljében, amelynek értelmében a rétegvastagsága a nullához tart, a fentiek egy olyan absztrakciót jelentenek, amelynek értelmében a képzeletbeli közeghatár mindig olyan helyzetet vesz fel, hogy a beeső fénysugár, függetlenül attól, hogy milyen szögben érkezik, mindig merőlegesen haladjon át rajta. Ez mindaddig ellentmondás gondolatát veti fel, ameddig az inhomogén közeg izotrop, vagy anizotrop⁵⁷ tulajdonságait figyelmen kívül hagyjuk. Az izotrop és inhomogén tulajdonságok együttes megléte csak akkor képzelhető el, ha vagy a teret ábrázoljuk ortogonális görbült koordinátákkal, vagy az euklideszi térben elhelyezett közeghatár matematikai modelljét ábrázoljuk görbült felületekkel. Görbült koordináták bevezetésének ezúttal nincs értelme, hiszen a modell kis térelemben egyszerű térbeli alakzattal is megadható.

Gáz-halmazállapotú inhomogén, izotrop közeg matematikai modellje következőképpen egy olyan alakzattal közelíthető, amelyben a fénytérjedés irányvektora a képzeletbeli felületekre mindig merőleges marad. Az említett feltételeknek csak egy térbeli alakzat felel meg; **a gömb.** (10. ábra) Az ábrán látható alakzat felületén a fénysugár akkor halad át merőlegesen a felületi normális irányába, ha a képzeletbeli forrás a gömb középpontjában helyezkedik el. Az egyszerűbb szemléltetés és szimmetria megkívánja azt, hogy a koordinátarendszer origója a gömb középpontjával egybeessen. Az ábrán a közeget szimbolizáló koncentrikus gömbfelületek mindegyike más és más törésmutatójú közegnek felel meg:

$$n_1 = n_2 \pm dn, n_2 = n_3 \pm dn, \dots n_k = n_{k+1} \pm dn. \quad (20)$$

⁵⁷ Izotrop közeg: A tér minden irányába ugyanolyan (fizikai) tulajdonságokkal rendelkezik.

Amennyiben $dn=\text{állandó}$, akkor közeget inhomogének és lineárisnak-, ha pedig $dn=f(x,y,z,t)$ akkor inhomogének és nemlineárisnak tekintjük. A határfelületek egy olyan környezetét kiválasztva, amelynek egyik és másik oldalán a fényterjedést befolyásoló tényezők hatása még érvényesül és kifejezhető az állapotjelzők, vagy a törésmutató megváltozásával, lehetővé válik a térelemen belül a fénysugár terjedésének vizsgálata differenciálgeometriai eszközökkel. A térgeometriai modellből előállítható a részletesebb vizsgálathoz szükséges síkgeometriai alakzat is.

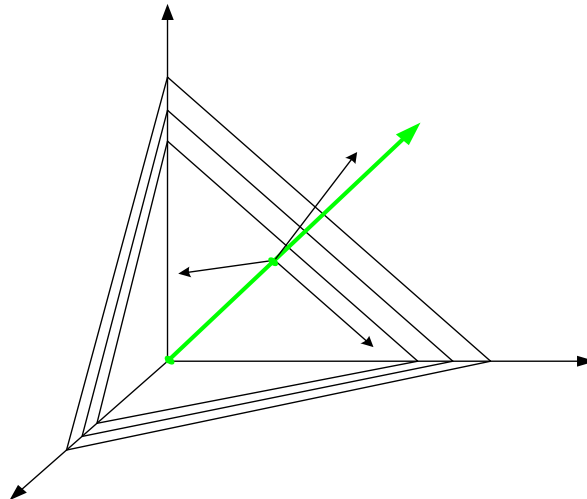


10. ábra
Gömbfelületekkel határolt inhomogén, izotrop közeg modellje
(A szerző rajza)

A fény terjedését elegendő a térrész egy elemi térfogatában vizsgálni ahhoz, hogy későbbiekben a matematikai modell alapján következtetéseket lehessen levonni. A kis térrészben történő vizsgálat lehetővé teszi azt, hogy a közeg izotrop tulajdonságait figyelmen kívül hagyjuk, és anizotropnak tekintsük. Az anizotrop, inhomogén közeg modellje a 10. ábrán látható.

Ha a fénysugár fizikai méreteit figyelmen kívül hagyjuk és az ábrán jelölt fénysugarat elemi fénysugárnak tekintjük, akkor a továbbiakban a környezetét szükségtelen vizsgálni, amiből következik az, hogy a közeghatár alakja a továbbiakban nem meghatározó és akár síkfelületnek is tekinthető. A síkfelületekből felépített anizotrop inhomogén közeg modellje a 11. ábrán látható. Az x , y és z tengelyekkel jelölt koordináta rendszerben a k , l és m koordinátákkal jelölt ortogonális térben vizsgálom a

továbbiakban a fény terjedését. A tengelyek egymáshoz viszonyított helyzete és elforgatásának mértéke éppen csak annyi, hogy két eltérő törésmutatójú közeg határára a fénysugár merőlegesen érkezzon.



11. ábra
Egyszerűsített rétegzett síkmodell
(A szerző rajza)

Ha a fényterjedés síkvetületét vesszük alapul, a k , l , m tengelyekkel jelölt ortogonális térben és a térrészt az m tengely irányából vizsgáljuk, a feladat egy egyszerű síkgeometriai feladattá egyszerűsíthető. Tételeken belüli folyamatok egy, vagy több érintősík térbeli helyzetével megadhatók, következésképpen a fény tételeken belüli terjedése és az állapotváltozások közti összefüggések differenciálgeometriai eszközökkel leírhatók. A törésmutató k tengely menti megváltozása a törésmutató gradiensevel adható meg:

$$\text{grad}n = -\frac{dn}{dk}, \quad (21)$$

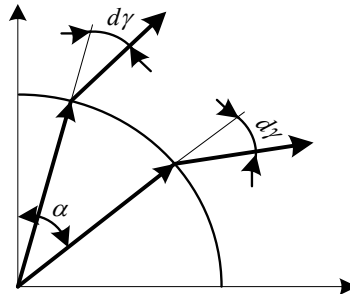
ahol, az említett változás kifejezhető a tér dielektromos tényezőjének relatív megváltozásával a következők szerint: [77]

$$\frac{dn}{dk} = \frac{dn_2}{n_1 dk} \cong \frac{d\varepsilon_2}{2\varepsilon_1 dk}, \quad (22)$$

figyelembe véve azt, hogy $\varepsilon \approx n^2$.

Két eltérő homogenitású közeg határfelületén áthaladó fénysugár refrakciójának vizsgálata a 12. ábra alapján is elvégezhető. A síkmértani modell ábráján feltün-

tettem a képzeletbeli határfelület két tengely menti síkmetszetét, és a belépő fénysugarakat két különböző esetben.



12. ábra
Fényterjedés a határrétegben
(A szerző rajza)

A kétdimenziós modell felhasználásával igazolható az a korábbi feltételezés, miszerint a közeghatárról kilépő elemi fénysugár irányváltozása független a belépés szögétől (α).

3.4 Következtetések

A légkör állapotváltozásainak ok-okozati összefüggéseinek feltárásával, a folyamatok iránya és jellege közelítően meghatározható. A sztochasztikus állapotváltozásokhoz csaknem minden esetben társulnak determinisztikus folyamatok is, amelyek a vizsgált térelem méreteitől függően közelítően mindig meghatározzák a látszólag véletlenszerű folyamatok kimenetét. Az összefüggések feltárásával és tisztázásával a véletlen jelenségek gyakran cáfolhatók. Az összefüggések tisztázására akkor is szükség van, amikor értelmezni kell a közeghatárt és a határréteget. A közeghatár létezése, amely a fény légköri refrakció következtében a légkör esetében is kimutatható, a mikrovilág atom-, és molekulaszintű kölcsönhatásai alapján igazolható. A fluidumok tulajdonságai különféle modellek megalkotására adnak lehetőséget. Az inhomogenitások következtében kialakuló közeghatár alakja és a mikrovilág képi ábrázolása közt meglepően nagy a hasonlóság. Ez a hasonlóság lehetőséget biztosít arra, hogy a fény légköri terjedésének vizsgálatánál az ismert egyszerűsítéseket alkalmazzuk és erre alapozott analitikus módszereket dolgozzunk ki.

4. FEJEZET

A LEVEGŐ TÖRÉSMUTATÓJÁNAK LEÍRÁSA, EMPIRIKUS KIFEJEZÉSEK ÁTTEKINTÉSE

Az előző fejezetben ismertetett egyszerűsített közegmodell lehetővé teszi azt, hogy az eltérő törésmutatójú közegek határán áthaladó elemi fénysugár refrakciója vizsgálhatóvá váljon. A továbbiakban ismertetem a fénytérjedés irányváltozásának levezetését differenciálgeometriai eszközök felhasználásával.

A Biot –Arago –Lorenz féle törvényben, az $n = f(p, v, t, \rho)$ explicit formában megadott függvény, a közeg törésmutatója és állapotjelzői közti függvénykapcsolatot fejezi ki [122].

$$\frac{n_2 - 1}{n_1 - 1} = \frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad (23)$$

ahol: n_1, n_2 - a fluidum törésmutatója;

p_1, p_2 - a nyomása;

T_1, T_2 - a hőmérséklete;

ρ_1, ρ_2 - a sűrűsége.

A Föld légkörének magasság szerinti hőmérséklet, nyomás és sűrűség eloszlásának egyik-másik szakasza jól követi ezt a törvényt (3 sz. melléklet, 1. ábra) és a törésmutató is arányosan változik a magassággal. A (23) átrendezésével [122]:

$$n_2 - 1 = (n_1 - 1) \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad (24)$$

ahol: ρ_1 - a normál állapotú gáz sűrűsége.

A normálállapotú levegő jellemzőiről a 2.1 alfejezetben korábban volt szó. Levegőre, $\lambda \cong 560 \text{ nm}$ hullámhosszúságú zöld fény esetében: $n_1 - 1 = 294 \cdot 10^{-6}$. [122]

$$n_2 = 1 + 0,000294 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad (25)$$

A törésmutató és a térfogat kapcsolatát a következő függvény írja le: [122]

$$n = \frac{V_v}{V} = 1 + 0,000294 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (26)$$

Legyen a 14. ábrán látható elemi fénysugár, amely a koordinátarendszer *IV. térfegyedéből* érkezik az origóba, azaz az n_1 és n_2 törésmutatójú, tökéletes homogén, lineáris és izotrop közegek határára. A geometriai optika Snellius-Descartes törvényét felhasználva, ami az elektromágneses hullám terjedését írja le két homogén, és lineáris közeg határán [81]:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}, \quad (27)$$

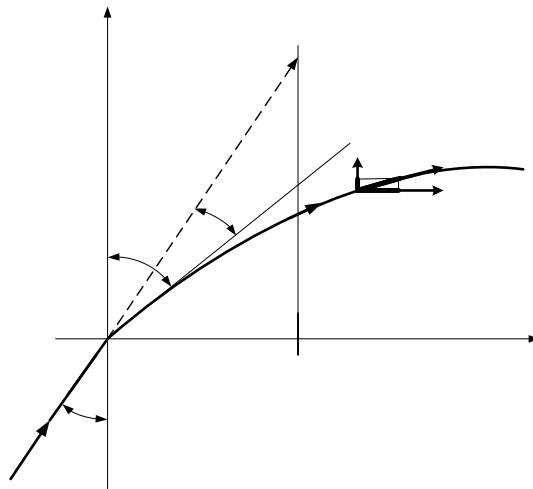
ahol: α és β - a belépő és kilépő sugár a határfelület normálisával bezárt szöge.

A (27) átrendezésével:

$$\sin\alpha = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin\beta. \quad (28)$$

A két képzeletbeli közeg határán, az onnan kilépő hullám terjedésének irányváltozását $d\gamma$ -val jelölve, a 13. ábra alapján:

$$\beta = \alpha + d\gamma. \quad (29)$$



13. ábra

*Az elemi fénysugár refrakciója két eltérő törésmutatójú közeg határán
(A szerző rajza)*

A $\sin(\alpha + d\gamma) = \sin\alpha \cdot \cos d\gamma + \sin d\gamma \cdot \cos\alpha$, trigonometriai azonosság felhasználásával, figyelembe véve azt, hogy: $\cos d\gamma = 1$ és $\sin d\gamma = d\gamma$, $\sin\beta$ -ra a következő kifejezést kaptam:[129]

$$\sin\beta = \sin\alpha + d\gamma \cdot \cos\alpha. \quad (30)$$

A (30)-at, (28)-ba helyettesítve, kaptam:

$$\sin \alpha = \frac{n_2}{n_1} (\sin \alpha + d\gamma \cdot \cos \alpha), \quad (31)$$

A (31)-ből kifejeztem $d\gamma \cdot \cos \alpha$ -t:

$$d\gamma \cdot \cos \alpha = \frac{\sin \alpha - \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \alpha}{\frac{n_2}{n_1}} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \cdot \sin \alpha, \quad (32)$$

A (32)-ből $d\gamma$ -t kifejezve és további trigonometriai azonosságok felhasználásával:

$$d\gamma = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (33)$$

A törésmutató megváltozásának parciális differenciálegyenlete a 13. ábra jelöléseivel:

$$n_1 - n_2 = \frac{\partial n}{\partial l} \cdot dl. \quad (34)$$

A (34)-et (33)-ba helyettesítve, az elemi fénysugár irányszögének megváltozása az l -el jelölt tengely mentén:

$$d\gamma = \frac{\partial n}{\partial l} \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{l}{n_2} \cdot dl, \quad (35)$$

A törésmutató megváltozása a k tengely mentén, a láncszabály felhasználásával [130]:

$$\frac{\partial n}{\partial k} = \frac{\partial n}{\partial l} \cdot \frac{\partial l}{\partial k}, \quad (36)$$

A 13. ábra alapján az elemi ívhosszak megváltozását felírva a két tengely mentén és a szinusz és koszinusz szögfüggvények segítségével kifejezve: [131]

$$dk = ds \cdot \sin \alpha, \quad (37)$$

$$dl = ds \cdot \cos \alpha, \quad (38)$$

Az így kapott két összefüggést egymással elosztva:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dk}{dl}, \quad (39)$$

A (39)-es függvény folytonos, ezért differenciálható. Ha a pont elég kicsiny környezetben vizsgáljuk, akkor a függvény megváltozása jó közelítéssel helyettesíthető a

megváltozás differenciáljával: $\frac{dk}{dl} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{\cos^2 \alpha}$. Felhasználásával a törésmutató

megváltozása a k tengely mentén:

$$\frac{\partial n}{\partial k} = \frac{\partial n}{\partial l} \cdot \cos^2 \alpha, \quad (40)$$

$$\frac{\partial n}{\partial l} = \frac{\partial n}{\partial k} \cdot \frac{l}{\cos^2 \alpha}, \quad (41)$$

Az (41)- et, a (35)- be helyettesítve, az elemi fénysugár terjedésének irányváltozása a k tengely mentén:

$$d\gamma = \frac{\partial n}{\partial k} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot \frac{l}{n_2} \cdot dl, \quad (42)$$

Mivel $\cos(1^\circ) \approx \cos^3(0,5^\circ)$, $\frac{l}{\cos^3 \alpha} \cong 1$ egészen $\alpha = 1^\circ$ -ig. A (42) egyszerűbb formában is írható:

$$d\gamma = \frac{\partial n}{\partial k} \cdot \frac{l}{n_2} \cdot \sin \alpha \cdot dl, \quad (43)$$

A két közeg határáról kilépő elemi fénysugár γ irányszögének megváltozását általános esetben az (35) és (43) parciális differenciál függvények írják le. Izotrop közegre a két összefüggés csak abban az esetben értelmezett, ha a törésmutató megváltozása, azaz gradiense a két tengely irányába, az alábbiak szerint megegyezik:

$$\frac{\partial n}{\partial l} = \frac{\partial n}{\partial k}, \quad (44)$$

A (44)- ben megfogalmazott feltétel (40), vagy (41) alapján szigorúan csak $\alpha = 0^\circ$ -ra teljesül. Ez nagyon kis szögek esetén akár el is fogadható, mi több összhangban van a 3.3 alfejezetben megfogalmazottakkal, miszerint két eltérő tulajdonságú, eltérő törésmutatójú közeget elválasztó határfelületre merőlegesen érkező fénysugár onnan merőlegesen lép ki. Normál állapotú gáz törésmutatóját az alábbi összefüggés adja meg: [132]

$$n_2 - 1 = (n_1 - 1) \frac{\rho_2}{3\rho_1} \left[1 - \frac{2}{3} (n_1 - 1) \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right], \quad (45)$$

ahol: n_1, n_2 - a közeg törésmutatója;

ρ_1, ρ_2 - a gáz sűrűsége.

A (45) átrendezésével, és a (43)- ba helyettesítésével, a (38)-at felhasználva, a kapott összefüggés parciális differenciálásával, az elemi fénysugár irányváltozása a k tengely irányába: [104]

$$\frac{d\gamma}{dl} = \frac{\left(\frac{n_1 - 1}{3\rho_1} \cdot \frac{\partial\rho}{\partial k} - \frac{2 \cdot (n_1 - 1)^2}{9\rho_1} \cdot \frac{\partial\rho}{\partial k} + \frac{2 \cdot (n_1 - 1)^2}{9 \cdot \rho_1} \cdot \frac{\partial\rho^2}{\partial k} \right) \cdot \sin\alpha \cdot \cos^{-3}\alpha}{1 + (n_1 - 1) \cdot \frac{\rho_2}{3\rho_1} \left[1 - \frac{2}{3}(n_1 - 1) \cdot \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right]}, \quad (46)$$

Ez a differenciál függvény megadja a gáz-halmazállapotú közeg térelemének elméleti határfelületről kilépő fénysugár irányváltozását. A (46) számlálójában három függvényelem parciális differenciálhányadosa található. Mind a három külön – külön is a sűrűség megváltozását írja le a k tengely mentén. Megfigyelhető, hogy a zárójelben azonos együtthatójú, de ellentétes előjelű tagok szerepelnek. A pozitív előjelű tag számlálója négyzetes, ami azt jelenti, hogy gyorsabban nő, mint az előtte levő, ugyanolyan együtthatójú, de negatív előjelű tag számlálója. A γ szög megváltozását a k tengely irányába egyedül a sűrűség befolyásolja. A szög dl -től, mint függő változótól függően, négyzetes, parabolikus függvény szerint változik, mint ahogy azt a 13. ábrán vastag vonallal jelöltem. A (46)-ban néhány egyszerűsítés adta lehetőséget kihasználva és figyelembe véve azt, hogy kis szögek esetén; $\sin\alpha \approx \alpha$, a parciális differenciál-függvény az alábbiak szerint egyszerűbb alakra is hozható:

$$\frac{d\gamma}{dl} \approx \frac{(n_1 - 1) \left[1 + \frac{2(n_1 - 1)}{3\rho_1} \cdot (2\rho_2 - \rho_1) \right] \cdot \frac{\partial\rho}{\partial k}}{3\rho_1 + (n_1 - 1)\rho_2 \left[1 - \frac{2}{3}(n_1 - 1) \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right]} \cdot \alpha \cdot dl \approx \frac{n_1 - 1}{3\rho_1} \left[1 + \frac{2(n_1 - 1)}{3\rho_1} \cdot (2\rho_2 - \rho_1) \right] \cdot \frac{\partial\rho}{\partial k} \cdot \alpha, \quad (47)$$

Az így kapott differenciál függvényt az $n = 1 + 0,000294 \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1}$ Biot–Arago–Lorenz törvényben megfogalmazott összefüggéssel összehasonlítva látható, hogy a k tengely mentén viszonylag nagy sűrűségváltozások ($\frac{\partial\rho}{\partial k}$ - sűrűség gradiens) csak nagyon kis γ , irányváltozást eredményeznek a fény terjedésében.

4.1 Korrekciós tényezők bevezetésének feltételei

Amennyiben a 3. fejezetben vázolt modellek alkalmazásának feltételei adottak, a fényterjedés irányváltozását a (46) parciális differenciálfüggvény adja meg. Megfigyelhető az, hogy a fényterjedés irányváltozása csak a közeg törésmutatójától (n_1), a sűrűségétől (ρ) és a belépés szögétől (α) függ. Kis szögek esetén, $\cos\alpha \approx 1$, ponto-

sabban $\alpha \in (0 \div 10^0)$ szögtartományon belüli megváltozása esetén $\cos \alpha \in (1 \div 0,984)$ értékhatárok közt változik. A differenciál függvényben nem nehéz felismerni a Fermat elvvel egyező törvényszerűséget, miszerint két különböző törésmutatójú közeg határára merőlegesen érkező fénysugár nem szenved „fénytörést”. Ez gázok, folyadékok és szilárd halmazállapotú közegek kombinációjából alkotott optikai rendszerek esetében eddig is ismert volt. Amennyiben $\alpha = 0$, akkor a tört számlálója nulla, amiből következik, hogy $d\gamma = 0$, azaz a k tengely irányából a határfelületre érkező fénysugár a képzeletbeli térelemből úgy lép ki, hogy a felület normálisával nem zár be szöget. Elemi fénysugarat feltételezve, inhomogén, turbulens gáz-halmazállapotú közegben az előbbi feltétel csak végtelen kis térfogatú térelem esetén képzelhető el.

A Biot- Arago- Lorenz törvényben megfogalmazott arányosság, ami a fénytérjedéssel összefüggő törtvonalas ábrázolásnak felel meg, jelentős eltérést mutat a (45), (46) differenciálfüggvényekben megfogalmazottakhoz képest, ami miatt *korrekciós tényezők bevezetésére van szükség*. A korrekciós tényezők az egyszerűsítésekből adódó hibák kiküszöbölését szolgálják.

A (46) parciális differenciálfüggvény két elemét megvizsgálva, $\alpha \neq 0$ feltétel esetén, kis szögtartományon belül, amennyiben a $0 < \alpha \leq 8^0$:

$$1 < \frac{1}{\cos^3 \alpha} \leq 1,03109. \quad (48)$$

Feltételezve azt, hogy a törésmutató $1 < n_2 \leq 1,0003109$ elméleti határokon belül vesz fel értékeket⁵⁸, a 3 sz. mellékletben a 2. ábra alapján a (45) –ben szereplő $\frac{\rho_2}{\rho_1}$ viszony

kiszámításánál figyelembe vett $n_2 = 1,0003$ törésmutató érték a Michelson féle kísérletben meghatározott és elfogadott értéktől egészen pontosan 33,33 % -al tér el. [133]

A (48)-ban feltételezett maximum ($n_2 = 1,0003109$) tizedes tört részének százalékos eltérése pedig a Michelson féle kísérletben meghatározottól +38,17%-al tér el. Amennyiben az alábbi feltétel teljesül:

⁵⁸ Fehér fényvel végzett kísérletekben a Kerr cella módszer esetében a törésmutató: $n_K = 1,0002868$, a Michelson féle kísérletben pedig $n_M = 1,000225$.

$$\frac{1}{\frac{\cos^3 \alpha}{n_2 \cdot \xi}} = 1, \quad (49)$$

akkor a (46) parciális differenciálfüggvény az alábbiak szerint, egyszerűbb formában is írható;

$$d\gamma = \left[\frac{1}{3} \cdot \frac{n_1 - 1}{\rho_1} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial k} - \frac{2}{9} \cdot \frac{(n_1 - 1)^2}{\rho_1} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial k} + \frac{2}{9} \cdot \frac{(n_1 - 1)^2}{\rho_1^2} \cdot \frac{\partial \rho^2}{\partial k} \right] \cdot \xi \cdot \sin \alpha \cdot dl, \quad (50)$$

A (49)-ből a korrekciós tényező értéke; $\xi = 1,030769$ - re adódik. A jobb oldali egyenlőtlenségében a szélsőértéket figyelembe véve $\frac{1}{\cos^3 \alpha} = 1,03109$, aminek tizedes része

éppen két nagyságrenddel nagyobb, mint a korábban meghatározott $n_2 = 1,0003109$ törésmutató érték. Az említett feltétel csak akkor teljesül, ha az (50) –ben a törésmutató és a sűrűség a belépési szögtől függetlenül olyan szélsőséges értékeket vesz fel, hogy a tört számlálója annak nevezőjével megegyezzen. A feltételnek megfelelően felírhatók az alábbi egyenletek:

$$(n_1 - 1) \frac{\rho_2}{3\rho_1} \left[1 - \frac{2}{3} (n_1 - 1) \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right] = \frac{1}{\cos^3 \alpha} - 1 = (n_2 - 1) \cdot 10^2, \quad (51)$$

$$\frac{\frac{1}{\cos^3 \alpha}}{1 + (n_1 - 1) \frac{\rho_2}{3\rho_1} \left[1 - \frac{2}{3} (n_1 - 1) \cdot \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right]} = 1, \quad (52)$$

Az $n_2 - 1 \neq 0$ feltételt alapul véve, az alábbi egyenlőtlenséghez jutunk:

$$0 \leq \frac{\rho_2}{3\rho_1} \left[1 - \frac{2}{3} (n_1 - 1) \left(1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right] \leq 10^2, \quad (53)$$

Az (53) –ban a jobb oldali egyenlőtlenség alapján a következő közelítő feltételnek kell teljesülnie: $0,03109 \cong (n_1 - 1) \cdot 10^2$, amiből n_2 -re, az $1,0003109$ elméleti felső határ adódik. A 3 sz. mellékletben a 2. ábrán a $\xi = 1,030769$ szorzótényezőhöz tartozó $n_2 = 1,0003109$ törésmutató érték, levegő esetében, a $270 \div 300$ nm hullámhosszon sugárzó forrásokra teljesül.

A fenti gondolatmenetet követve, a lézerforrás hullámhosszából kiindulva, bármilyen hullámhosszon működő lézerforrás esetében kiszámítható a szükséges korrekciós tényezők értéke.

4.2 A fényterjedés vizsgálata tapasztalati összefüggésekre alapozottan

A fény terjedésére vonatkozó alaposnak tekinthető kutatások eredményei az első mézerek megépítésének évében és az azt megelőző időszakban, az 50-es, 60-as években születtek. A mai fényterjedéssel kapcsolatos ismereteink és következtetéseink javarészt az említett korai eredményekre támaszkodnak, miközben köztudott, hogy a környezetünk így a Földet övező légkör összetétele is, komplex, részben, vagy teljes egészében ismert folyamatok eredményeképpen időközben jelentős mértékben megváltozott. A változások csak akkor követhetők nyomon, ha a matematika eszközeit felhasználva minél pontosabb összefüggések feltárására törekszünk.

A matematikai statisztika-, és valószínűség-számítás eszközeivel, mint például a regresszió analízissel meghatározhatók azok a konfidencia és predikciós határok, amelyekben belül az inhomogén és anizotrop közegben terjedő fény útvonala meghatározható. Ilyen határok figyelembevétele sajnos nem mindig vezet a mérnöki gyakorlatban megszokott és várt eredményekre. [134]

Ott, ahol az analitikus módszerek nem teszik lehetővé a rendszerjellemezők és azok összefüggéseinek feltárását, más módszerek alkalmazására van szükség. Astatikus és kvázi-statisztikus rendszerek matematikai modelljének megalkotásában és a számítások elvégzésében egyre nagyobb szerepet kapnak az *empirikus*, más szóval *tapasztalati összefüggések*. A tapasztalati összefüggések használata általánosan elfogadott és gyakorinak mondható a mérnöki gyakorlatban minden olyan esetben, amikor a vizsgált rendszer dinamikája vagy nem-linearitása megnehezíti, vagy éppen lehetetlenné teszi a rendszert leíró differenciálegyenletek megoldását.⁵⁹ A műszaki hő-, és áramlástanban, atomfizikában, kémiában és az optikában gyakoriak az olyan egyenletek, amelyek analitikus úton nem megoldhatók, gondoljunk például a műszaki hőtanból ismert hőátadási tényező meghatározására. Statikus állapotok és rendszerjellemezők

⁵⁹ Differenciálegyenletekkel bármilyen folyamatot le tudunk írni, azonban ezeknek, az egyenleteknek csak töredéke oldható meg. A szak-, és tankönyvek rendszerint csak olyan példákat emelnek ki, amelyek esetében a leíró differenciálegyenletek megoldhatók, egy kicsit hamis elképzelést ébreszt, ezáltal az olvasóban.

esetében, amikor a peremfeltételek ismertek, a differenciálegyenleteknek csak a leg-egyszerűbb esetben, például síklap menti áramlás és lamináris csőáramlás esetén van megoldásuk. A gyakorlati igények és a fejlesztés minden esetben megköveteli a konkrét, számszerű értékek meghatározását, ezért azt a hiányt és űrt, amelyet a megoldhatatlan differenciálegyenletek hagynak maguk után, kísérleti eredményekkel kell, és lehet betölteni.

A kísérleti eredmények útján előállított tapasztalati összefüggések, függvények általánosítása és univerzálissá tétele nem egyszerű feladat. Ezek az eredmények csak akkor fogadhatók el, ha a hasonlóság⁶⁰ feltételeit teljesítik.

Hasonlóságról matematikai értelemben akkor beszélünk, ha a valós és kísérleti feltételek hasonlóak, geometriailag hasonló rendszerekben zajlanak és a differenciálegyenletek kezdeti és peremfeltételei azonosak. Ilyen hasonlóságot kifejező hasonlósági kritériumok például a Reynolds szám, amely az áramlás jellegére vonatkozóan ad felvilágosítást (lamináris, vagy turbulens), összehasonlítva az inercia és viszkózus erőket, a Peclet szám, amely egy olyan hasonlósági kritérium, amely azt mutatja meg, hogy a hőtani folyamatban az áramlás, vagy a hővezetés-e a meghatározó. A Nusselt szám a hőátadás hasonlósági kritériuma, a Grashof szám pedig a természetes áramlás sebesség mezőjének hasonlósági kritériuma, stb.

A hasonlósági kritériumokat leíró összefüggések közti kapcsolatokat rendszerint dimenzió nélküli számok jellemzik, amelyeket a megalkotójukról nevezték el, úgymint a Prandtl szám, Stanton szám, stb.⁶¹ Rajtuk kívül még nagyon sokan készítettek jól használható hasonlósági kritériumokat teljesítő tapasztalati összefüggéseket.⁶² A tapasztalati összefüggések általában egyszerűek és hasznosak, viszont felhasználásukkor nagyon körültekintően kell eljárni. Felhasználásuk alapfeltétele az, hogy a feltételek és a körülmények minél jobban hasonlítsanak a kísérleti, még inkább a valós körülményekhez. Zárt és izolált rendszerek esetében ezek a szigorú feltételek általában teljesülnek, de olyan nyitott rendszerek esetében, mint amilyen a Föld légköre is, csak ritkán, vagy nagyon ritkán. Az összefüggések, amelyek nagyon sok kísérlet és munka

⁶⁰ A hasonlósági kritériumokban saját lépték szerint megválasztott peremfeltételeket és a kísérletileg kapott mért értékek szerepelnek.

⁶¹ Az eredményeket M. A. Mihejev foglalta össze, vízszintes lemezek hőátadását M. Fischenden és O. A. Saunders pontosította.

⁶² A. Eagle, L. Graetz, M. Ferguson, E. N. Sieder, L. Schiller, K. Elser, R.C. Martinelli és még sokan mások.

eredményét ötvözik, „...csak egy-egy részterület eredményeit foglalják magukba és a vizsgált változók szűkebb tartománya miatt az eredmények megbízhatósága korlátozott.” [135] „Ezektől, az egyenletektől nem várhatjuk az elméleti ismereteink bővülését, mivel nem jut bennük kifejezésre a leírt összefüggés fizikai háttere. Ezekből az egyenletekből nem ismerhetők fel a valóságos közegeknek az ideális gázok állapot-egyenletétől eltérő viselkedésének okai.” [87]

A fenti két idézet úgy vélem kifejezően és tömören fogalmaz, de mindettől függetlenül a tapasztalati összefüggéseknek a nagy száma azt igazolja, hogy a kísérletek útján nyert eredményeknek megvan a maguk helyük az alkalmazott tudományokban. Az optika és az áramlástan ilyen értelemben is nagyon hasonlóak. A tapasztalati összefüggések a normálállapotú gázok törésmutatójának a megváltozását közelítően jól leírják, de sok esetben ennél pontosabb összefüggésekre is szükség lehet. Ilyen például az, amikor a légköri refrakció okozta optikai hibákat kell kiküszöbölni és a *távolságmérők mérési pontosságát kell növelni*. Ehhez rendszerint *korrekciós tényezők* meghatározására van szükség. A fény hullámhosszán alapuló optikai mérések, úgy mint spektroszkópiás-, interferenciás és diffrakciós mérések, csak akkor végezhetőek el, ha a törésmutató kellően pontos értéke ismert.⁶³ Ennek elérésén a múlt század közepe óta dolgoznak a kutatók. A több kötetet is kitevő munkásságuk minden részletének ismertetésére nem vállalkozhattam, de néhány fontosabb eredményt időrendi sorrendben kiemeltem: [133]

- (1953): A régi három elemből álló Edlén-féle összefüggés. Ezt mind a mai napig nagyon sok kritikával illetik. Megbocsáthatatlannak tartják, hogy több év-tizeddel később maga Edlén tette ismételten közzé az eredményeit, az „*Allen's Astrophysical Quantities*”, 4. kiadásában, annak ellenére, hogy ismerté váltak a hiányosságai és hibái. Ezekről az összefüggésekről sokan még ma is úgy nyilatkoznak, hogy használhatatlanok. [136]
- (1960)-ban Edlén felismerte, hogy a korábbi összefüggései pontatlanok, és *új együtthatók* bevezetésére tett javaslatot. [136]
- (1966): Az új Edlén-féle „légköri diszperziós” képlet.

⁶³ Az elvárt pontosság (10^{-8})

- (1967) Owens: Ismerteti a légköri törésmutató változását a légköri nyomás, hőmérséklet és gázösszetétel függvényében. Owens elsőként alkotta meg azokat a tapasztalati összefüggéseket, amelyeket mindmáig felhasználnak a kutatók, a kísérleti eredményeik értékelése során.
- Owens, Sears és Barell nyomdokaiba lépve a törésmutatót a szén-dioxid tartalomtól függetlenül is vizsgálja. Owens az ideális gázoktól eltérően vizsgálja a légkör állapotváltozásait és figyelembe veszi a légköri nyomás hatását. [137]
- (1972) Peck és Reeder: Igazolják, hogy az Edlén féle összefüggések pontossága nem megfelelő az infravörös hullámtartományban és a Sellmeier féle összefüggés is hibás, mivel a felhasznált öt független változó helyett négy használata is elegendő. [138]
- (1981) Johns: Figyelembe veszi a valós gázok állapotváltozásait és a korábbi eredmények hibaanalízisében is szerepet vállal. Felülvizsgálta Peck és Reeder eredményeit és a látható fénytartományra érvényes kellően pontos összefüggéseket állított elő. [139]
- (1982) Matsumoto: Tanulmányozta a légköri pára törésmutatót befolyásoló hatását és infravörös hullámtartományban kimutatta a szelektív abszorpciót. [140]
- (1988) Birch és Downs: A vízgőz eredményezte hibák feltárásában vettek részt és vizsgálták a szén-dioxid hatását a levegőben. [141][142]
- (1988) Beers és Doiron: igazolták Birch és Downs eredményeit. [143][144]
- (1996) Ciddor: A légköri refrakció meghatározásának ma ismert, legmegbízhatóbb eredményeként tartja számon a tudományos közvélemény. Eredményei új sztenderdként rögzítésre kerültek a Nemzetközi Földtani Egyesület szabványrendszerében.⁶⁴[145]
- (1998) Bönsch és Potulski: Az új Edlén-féle képletből kiindulva, laboratóriumi körülmények közt vizsgálták a vízgőz és a szén-dioxid hatását 20°C hőmérséklet, és 400 ppm szén-dioxid tartalom mellett. Annak ellenére, hogy a kísérletek körülményei majdnem azonosak voltak a normálállapotú légkörrel⁶⁵, fontosnak

⁶⁴ International Association of Geodesy (IAG)

⁶⁵ Az ICAO (International Civil Aviation Organization), valamint a DIN 5450 szabvány rögzíti (3. sz. melléklet)

tartom megjegyezni, hogy az általuk kidolgozott tapasztalati összefüggések mégsem általánosíthatók. [146]

- (2004) Mathar, Colavita, Swain, Akesson, Koresko és Hill: Gyakran publikációjuk címétől eltérően a 250 nm hullámhossz feletti tartományra is érvényes összefüggéseket dolgoznak ki, amelyekben elsőként veszik figyelembe a vízgőz hullámsávzáró és áteresztő tulajdonságait. [147][148][149]

Az új Edlén féle tapasztalati összefüggések a fény hullámhosszát (λ), illetve annak reciprokát a frekvenciát, a nyomást (P) és a hőmérsékletet (T) veszi figyelembe. Ezekkel az összefüggésekkel végzett számítások pontossága közelíti a $2 \cdot 10^{-6}$ értéket, ami kielégítőnek tekinthető, de még mindig két nagyságrenddel elmarad az elvárt; 10^{-8} értéktől.

A törésmutató a következő összefüggéssel határozható meg:

$$N_{sz} = (n_{sz} - 1) \cdot 10^7 = (776,2 + 4,36 \cdot 10^{-8} \cdot \nu^2) \cdot 10 \cdot P_{sz} / T, \quad (54)$$

ahol: N_{sz}, n_{sz} - a száraz levegő fénytörési együtthatója, illetve fénytörésmutatója;

ν - a fényhullám frekvenciája m^{-1} -ben;

P_{sz} - a száraz levegő nyomása Pa -ban;

T - a levegő hőmérséklete $^{\circ}K$ -ben. [150]

Közel fél évszázada a száraz, szén-dioxid mentes levegő, a vízgőz, és a szén-dioxid törésmutatóját külön-külön határozzák meg, majd a három elem törésmutatóját egy általános, Lorenz-Lorentz által kidolgozott képletbe foglalják. Így a levegő törésmutatója, $0 \div 4 \text{ atm}$ nyomáson, $250 \div 320 \text{ }^{\circ}K$ hőmérsékleten, $0 \div 100\%$ relatív páratartalom és $0 \div 17 \text{ mb}$ CO_2 parciális nyomás esetén $3 \cdot 10^{-6}$ pontossággal határozható meg. A levegő törésmutatójának meghatározására az alábbi tapasztalati összefüggések használhatók:

Általános képlet:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \sum_{i=1}^3 R_i \rho_i, \quad (55)$$

$$R_i = \frac{(n_0)_i^2 - 1}{(n_0)_i^2 + 2} \cdot \frac{1}{(\rho_0)_i}, \quad (56)$$

$$r_i = [(n_0)_i - 1], \quad (57)$$

1. Száraz, szén-dioxid-mentes levegő esetén:

$$r_1 \cdot 10^8 = 8340,78 + \frac{2405640}{130 - \sigma^2} + \frac{15994}{38,9 - \sigma^2}, \quad (58)$$

$$\rho_1 = 348,328 \frac{P_1}{T} \left[1 + P_1 \left(57,90 \cdot 10^{-8} - \frac{9,4581 \cdot 10^{-4}}{T} + \frac{0,25844}{T^2} \right) \right], \quad (59)$$

$$(\rho_0)_1 = \rho_1 (P=1013,25 \text{ mb}, T=288,16 \text{ °K}),$$

Érvényes 2302 ÷ 20586 Å hullámhosszon, 240 °K < T < 330 °K hőmérséklet és 0 < P < 4 atm légnyomás tartományban.

2. Vízgőz figyelembevétele:

$$r_2 \cdot 10^8 = 295,235 + 2,6422 \sigma^2 - 0,032380 \sigma^4 + 0,004028 \sigma^6, \quad (60)$$

$$\rho_2 = 216,582 \cdot \frac{P_2}{T} \left\{ 1 + P_2 \left[1 + (3,7 \cdot 10^{-4}) P_2 \right] \cdot \left[-2,37321 \cdot 10^{-3} + \frac{2,23366}{T} - \frac{710,792}{T^2} + \frac{7,75141 \cdot 10^4}{T^3} \right] \right\} \quad (61)$$

$$(\rho_0)_2 = \rho_2 (P=13,33 \text{ mb}, T=293,16 \text{ °K})$$

Érvényes: 3611 ÷ 6440 Å hullámhosszon, 250 °K < T < 320 °K hőmérséklet és 0 < P < 100 mb légnyomás tartományban.

3. A szén-dioxid figyelembevétele:

$$r_3 \cdot 10^8 = 22822,1 + 117,8 \sigma^2 + \frac{2406030}{130 - \sigma^2} + \frac{15997}{38,9 - \sigma^2}, \quad (62)$$

$$\rho_3 = 529,37 \frac{P_3}{T} \quad (63)$$

$$(\rho_0)_3 = \rho_3 (P=1013,25 \text{ mb}, T=288,16 \text{ °K}),$$

Érvényes 2379 ÷ 6910 Å hullámhosszon, 240 °K < T < 330 °K hőmérséklet, 0 < P < 17 mb légnyomás tartományban. [137]

Mivel a Föld légkörét alkotó főbb összetevők aránya nagyjából állandónak tekinthető, ezért kialakult egy általánosan elfogadott összetétel, amelyről korábban is volt szó és amely az 1 sz. melléklet, 1. táblázatában található. Mivel a levegő több mint 99 %-át az oxigén, nitrogén és az argon teszi ki és a törésmutatóra gyakorolt hatását a szakirodalom nem vizsgálja, ezért feltételezhető, hogy kismértékűnek tekinthető, és megváltozásuk aránya a törésmutatót számottevően nem befolyásolja. [151][152]

A normálállapotú levegő szén-dioxid tartalma $0,03\%$, térfogategységre számítva. Normálállapotúnak tekinthető a levegő, ha a hőmérséklete $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$), hőmérséklet gradiensének értéke $-0,65 \cdot 10^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ és nyomása $101,32472\text{ kPa}$ ⁶⁶. A levegő összetétele a táblázatba foglalt értékektől jelentős mértékben eltérhet, attól függően, hogy hol történik a mérés. Az összetevők aránya más és más lehet lakott területen belül és ipari környezetben, emellett függhet a tengerszint feletti magasságtól és a légnyomás értékétől is. Sűrű aljnövényzettel benőtt erdős területen a levegő szén-dioxid tartalma elérheti a $0,07\%$ -ot (700ppm-et) is. A törésmutató, hőmérséklet, nyomás, páratartalom és a szén-dioxid tartalom közt a következő összefüggés írható:

$$n-1 = \frac{0,0002923}{1+0,00368t} \cdot \frac{B}{101,32472} \cdot 10^{-3} - 0,0004041 \frac{e}{760} + 0,0000016k \frac{B}{101,32472} \cdot 10^{-3}, \quad (64)$$

ahol: n - a levegő fénytörés-mutatója;

t - a levegő hőmérséklete $^{\circ}\text{C}$ -ban;

B - a levegő nyomása Pa -ban;

e - a páratartalom térfogatszázalékban;

k - a szén-dioxid tartalom százalékos aránya. [121]

A **hőmérséklet/páratartalom/szén-dioxid/légnyomás** a következő arányban vesz részt a törésmutató megváltozásában; **100:6:2:1**. [121] A gázösszetevőknek a levegő törésmutatójának megváltozásában betöltött szerepe mellett, a hozzájárulásuk mértékét is ismerni kell, ezért a fenti arányt az alábbi levezetéssel vizsgáltam meg:

A légnyomásra a B helyett p jelölést vezettem be és a (64)-et az alábbiak szerint rendeztem át:

$$n-1 = \frac{p}{101,32472} \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{0,0002923}{1+0,00368 \cdot t} + 0,0000016 \cdot k \right) - 0,0004041 \cdot \frac{e}{760}, \quad (65)$$

Az állapotjelzők törésmutatóra gyakorolt hatását a függvény parciális differenciálásával határoztam meg. A (65)-ből a törésmutató hőmérséklet szerinti parciális deriváltja a következő:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -0,7839 \cdot \frac{p}{t^2} \cdot 10^{-6}, \quad (66)$$

⁶⁶ $1\text{atm} = 101,32472\text{ kPa}$

A törésmutató nyomás szerinti parciális deriváltja:

$$\frac{\partial n}{\partial p} = \left(2,8848 + \frac{783,8858}{t} + 0,0158 \cdot k \right) \cdot 10^{-9}, \quad (67)$$

ahol: p - a levegő nyomása Pa -ban;

t - a levegő hőmérséklete °C -ban;

k - a szén-dioxid tartalom százalékos aránya.

A (66) és (67) parciális differenciál-egyenletek egyenként két-két ismeretlent tartalmaznak. Az első a törésmutató hőmérséklet szerinti, a második a törésmutató légnyomás szerinti megváltozását írja le. A (66)-ban a hőmérséklet inverz, négyzetes tagként szerepel, negatív előjellel és egy olyan szorzótényezővel, amelynek hatványkitevője nagyobb, mint a (67) egyenlőségének a jobb oldalán lévő szorzótényező hatványkitevője. A két egyenletből az egyes tényezők megváltozásának iránya is következik. Mindkettő azt igazolja, hogy a levegő refrakcióját a nedvességtartalomhoz, a szén-dioxid tartalomhoz és a nyomáshoz képest a hőmérséklet megváltozása befolyásolja a legnagyobb mértékben. Ebből következik az, hogy a hőmérséklet négyzetes arányban, míg minden más figyelembe vehető tényező arányosan befolyásolja a levegő törésmutatójának értékét.

A levegő törésmutatója a rajta áthaladó fény hullámhosszának függvényében megváltozik. Az ebből adódó hiba újabb korrekciós tényező bevezetésével vehető figyelembe, vagy küszöbölhető ki. Például a zöld, $\approx 560nm$ -es lézerefény esetében, a normálállapotú és összetételű levegő törésmutatója $n=1,0002938$ körüli érték. A levegő törésmutatójának megváltozása a fény hullámhosszának függvényében, a 3 sz. mellékletben, a 2. ábrán látható.

A levegőben levő pára fénytörés mutatója: $n_v = 1,0002500$, ami a számítások pontosságát jelentős mértékben befolyásolja, ezért Lorentz egy korrekciós tényező bevezetését javasolta, ami a vízgőz esetében $\frac{-4,04 \cdot e}{760} \cdot 10^{-4}$. Figyelembe véve azt, hogy a szén-dioxidnak is van saját fénytörésmutatója, a javasolt korrekciós tényező a következő összefüggés alapján határozható meg:

$\frac{+1,6 \cdot k \cdot B}{101,32472} \cdot 10^{-9}$. Fontosnak tartom megjegyezni, hogy ezek az összefüggések csak

$\lambda = 556 \text{ nm}$ hullámhosszra érvényesek, „*de általánosítva használhatók a fehér fényre is*”. [121] A léghő törésmutatóját a termikus „fluktuáció”⁶⁷ is befolyásolja, aminek következtében *a törésmutató periodikusan változik*⁶⁸ a fénysugár nyomvonala mentén. A jelenséget Karp (1988) figyelte meg és foglalta képletekbe [153];

$$n = 1 + 77,6(1 + 7,52 \cdot 10^{-3} \lambda^{-2}) \frac{P}{T_e} \cdot 10^{-6}, \quad (68)$$

ahol: P - a légköri nyomás *mbar*-ban,

T_e - a hőmérséklet $^{\circ}\text{K}$ -ben kifejezve.

4.3 Következtetések

Differenciálgeometriai eszközök felhasználásával igazolható, hogy az inhomogén gáz-halmazállapotú közegben az elemi fénysugár irányváltozása és a közegjellemzők közt nemlineáris kapcsolat van. A nem-linearitásból következik az, hogy a fény a gyakran alkalmazott törtvonalas ábrázolásától eltérően, négyzetes parabolikus függvény szerinti pályát követ és viszonylag nagy sűrűségváltozások esetén is csak nagyon kis irányszög eltérést mutat, emiatt a fény légköri refrakciójának vizsgálata csak nagyon pontos, nagy érzékenységű és egymástól nagy távolságra elhelyezett optikai adó-vevő párral lehetséges.

A léghő összetételének megváltozása követhető és megadható a törésmutató szélsőséges értékeinek figyelembe vételével és az irányszög változásokhoz szükséges korrekciós tényezők bevezetésével. A törésmutató megváltozását leíró tapasztalati összefüggések felhasználásakor körültekintően kell eljárni, mert egy részük hibás. Használhatatlanságukat esetenként későbbi kutatások eredményei is alátámasztják, de az állapotátározókat jelképező független változók szerinti differenciálásukkal, érvényességük vizsgálható és a hibák okai kimutathatók.

⁶⁷ Hőmérséklet ingadozása.

⁶⁸ A periodicitást a 7. fejezetben ismertetett mérési eredmények alapján sikerült kimutatni.

5. FEJEZET

A LÉZERFÉNY TERJEDÉSÉNEK SZABADTÉRI VIZSGÁLATA

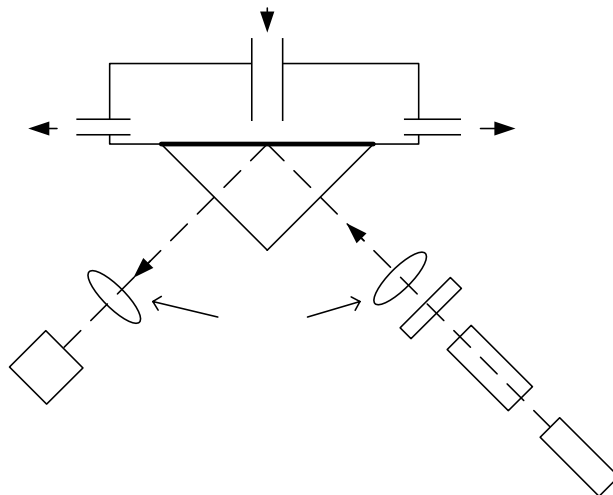
A gázok törésmutatójának meghatározására több módszert, mérési elvet és eszközt dolgoztak ki a kutatók. A levegő törésmutatója ugyanazokkal a mérőeszközökkel határozható meg, mint bármelyik más gáz törésmutatója. Mérőeszközei a refraktométerek és interferométerek. [154] Nagyon pontos mérések csak hűtött CCD képérzékelővel, He-Ne „stabilizált frekvenciájú” gázlézerrel és precíziós érzékelőkkel ellátott mérőműszerekkel végezhetők. [155] A termikus és mechanikai stabilitás az interferométerek egy olyan jellemzője, amelynek alapján nem nehéz megkülönböztetni az interferencia jelenség bemutatására alkalmas demonstratív célú eszközöket a professzionális laboratóriumi mérőeszközöktől. A szakirodalmi forrásokban mindkettő megtalálható. A „zárttéri” mérés elvének ismertetésére terjedelmi okok miatt nincs lehetőségem, de az interferométerek két szélsőséges példáját szükségesnek tartom röviden bemutatni. Az 5. sz. melléklet 1. ábráján egy Köster-féle interferométer látható. Ehhez képest a PHYWE SYSTEME interferométere egy szerény teljesítményű és inkább bemutató jellegű eszközcsomagnak tűnik (5. sz. melléklet 2. ábra), mint professzionális berendezésnek. Ez utóbbi egyébként egy Michelson féle interferométer, amely alkalmas a gázok törésmutatójának meghatározására, legalábbis a gyártó így hirdeti a kiadványaiban. A kettő közti különbség mindemellett szembeűnő.

A Köster féle interferométer a nevét az alkalmazott kettős prizmaról kapta. Megfigyelhető az, hogy egy teljesen zárt és termikusan stabilizált, környezetétől teljesen elszigetelt berendezésről van szó, amelynek záró fedelét vélhetően a felvétel készítésének idejére távolították el. [156]

A levegő törésmutatójának változása akkor követhető, ha a berendezésben folyamatosan áramoltatva van a levegő. Az interferométerek esetében ez nagyon sok problémát eredményezhet, kezdve a páralecsapódástól a termikus egyensúly felborulásáig, ami a mérés pontosságát alapvetően befolyásolhatja. További problémát jelenthetnek a mérőkamrába bekerülő aeroszolok, ami miatt további kiegészítő, levegő előkészítő gépi berendezésekre lehet szükség. Ezek a kiegészítő berendezések gyakran éppen azokat az állapotváltozókat változtatják meg, amelyek a törésmutatót jelentős mértékben befolyásolják. Hivatkozva a 2.1.5 alfejezetben foglaltakra jelentős hibát

eredményez az, ha a levegő előkészítésével egyidejűleg a levegő páratartalma növekszik, vagy csökken.

A refraktométerek olyan speciális mérőműszerek, amelyek esetében megengedett a levegő folyamatos áramoltatása és átmenetet képeznek a zárttéri-, és a szabadtéri mérés eszközei között. A refraktométerek a törésmutató relatív értékének meghatározására és változásainak kimutatására alkalmas mérőműszer. [157] A teljes visszaverődésen alapuló változatának vázlata a 14. ábrán látható. A mérőkamrába belépő levegő, vagy gáz törésmutatójának megváltozása a prizma kamra felőli oldalán megváltoztatja a határréteg optikai tulajdonságait, aminek hatására megváltozik a visszaverődés szöge. A lézerrfény forrása egy He-Ne lézer, az érzékelő pedig CCD kamera, vagy képerzékelő felület.



14. ábra
Teljes visszaverődésen alapuló lézeres refraktométer felépítése
(Forrás:[158])

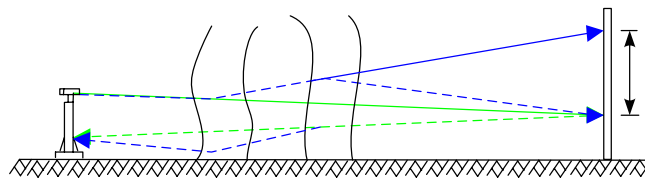
A lézer alapú refrakció mérésnek több alkalmazása ismert. Ezek egyike a csőben áramló gázok összetételének meghatározása, vagy egynemű gázok azonosítása. [159][160] [161]

5.1 A mérés elve és eszközei

A lézerrfény terjedése a légkörben szabadtéri mérések során vizsgálható a legegyszerűbb eszközökkel. A fény légköri refrakciójának kimutatásához, a legegyszerűbb esetben, nincs másra szükség, mint egy fényforrásra és egy ernyőre. (15. ábra)

Amennyiben a forrás és ernyő közti távolság nagy, és a forrás által előállított fényfolt az ernyőn megfigyelhető kell legyen, akkor javasolt valamilyen lézerforrás használata. Egy néhányszor tíz mW teljesítményű félvezetőlézerrel a több száz méter távolságra elhelyezett ernyőn jól kivehető fényfolt állítható elő, amely a fény hullámhosszától függően lehet szabad szemmel látható, amennyiben látható fénytartományban sugárzó lézert használunk, vagy láthatatlan infra-lézer használata esetén.

A fényfolt helyzete az ernyőn egy referenciaponthoz viszonyítva akkor változik meg, távolodik el, vagy toródik el (d) távolságra, ha a forrás és az ernyő közti térben a levegő törésmutatója megváltozik.



15. ábra
A szabadtéri mérés elve
(A szerző rajza)

A fényfolt helyváltoztatása esetenként annyira kicsi lehet, hogy szabad szemmel még akkor sem követhető, ha a forrás és a vevő nagyon nagy távolságra van elhelyezve egymástól. Ennek oka lehet a légköri állapotváltozások kismértékű megváltozása, de eredményezheti ugyanezt a többszörös refrakció is, amit teljesen nem lehet kiküszöbölni, csak a mérést befolyásoló előnytelen hatását lehet csökkenteni a mérési elrendezés megfelelő megválasztásával. Figyelembe véve azt, hogy a fényfolt mérete és az eltolódás mértéke közt nagyon nagy a különbség, a mérés kiértékelését az ernyőn megjelenő fényfolt sugárirányú fényerőváltozása is nehezíti. A sugárirányú fényerőváltozásra alapozottan, amely közelítően normál eloszlást mutat, egy szoftver alapú mérési elvet dolgoztam ki. A látszólag semmilyen törvényszerűséget sem követő, a lézerforrás felépítésére, hibáira, és az előállított fény tulajdonságaira visszavezethető egyenlőtlen fényerőeloszlás az irányítástechnikában ismert mérési zajként, vagy zavaró jellemzőként vehető figyelembe, a mérési adatok feldolgozása során.

A fény légköri refrakciójával kapcsolatba hozható állapotváltozások, amelyekről korábban is volt szó, sűrűség, nyomás, és hőmérséklet a légköri refrakció kimutatásának szükséges, de nem elégséges feltételei. Szükséges ahhoz, hogy a fényterjedés

irányváltása egy adott térrészben bekövetkezzen, de a fényfolt eltolódásának mértékét több hasonló fényterjedést befolyásoló részjelenség hatásának előjelhelyes összege adja. A légköri folyamatok nem csak az arányosságra-, hanem egy előre meghatározott irányhoz viszonyítva, annak előjelére is hatással vannak. A mérési eredmények csak akkor fogadhatók el, ha azok bizonyítottan determinisztikus folyamatok eredményei. Ehhez ismerni kell a fényterjedés pályáját, görbületének irányát. A légköri állapotváltozások esetében ennek meghatározása egyáltalán nem egyszerű.

Az ernyő közti távolság növelésével az eltolódás mértéke és a mérés pontossága elvileg növelhető. Az ábra alapján nem nehéz belátni azt, hogy a fényfolt eltolódásának mértékét az is befolyásolja, hogy a forrást az ernyővel összekötő szakasz mentén hol alakulnak ki azok a légköri képződmények és állapotváltozások, amelyek törésmutatót befolyásolják. Abban az esetben, ha a végpontok nagy távolságra vannak elhelyezve egymástól, akkor a fényfolt nagyobb mértékű eltolódására lehet számítani. Ez a kiértékelést kétségtelenül megkönnyíti, de abban az esetben, ha a fénysugár hosszú utat tesz meg egy olyan jellemzően inhomogén közegben, mint amilyen a Földünk légköre, akkor a légköri turbulenciák és helyi állapotváltozások a fény többszöri irányváltását, refrakcióját eredményezik. A fényterjedés sztochasztikus jellegéből következik az, hogy a fény nem egyenes vonal mentén terjed, hanem a többszörös refrakció eredményeképpen, nagyon leegyszerűsítve, tört vonal mentén, mint ahogy a *15. ábrán* szaggatott vonallal jelöltem. Ennek, a következménye az is lehet, hogy a vétel helyén a fény irányváltása nem lesz kimutatható, de ami még rosszabb, a mérési adatok alapján akár téves következtetések is levonhatók. Ennek egyik esetét a *15. ábrán* kék szaggatott vonallal jelöltem. Könnyen belátható, hogy a távolság növelésével a többszörös refrakció okozta mérési hiba is nő és ez a hiba nem küszöbölhető ki, legfeljebb a mérési eredményekre gyakorolt hatása csökkenthető, az alábbiak szerint:

- a fény terjedését befolyásoló közeg állapotjelzőinek folyamatos vizsgálata és a közegjellemzők megváltoztatása;
- több fényforrás és mérő- vevő egyidejű használata;
- szabadtéri fényinterferencia, vagy holografikus mérési eljárások, alkalmazása.

Örvényektől mentes optikai közeg állapotjelzőinek és összetételének teljes ellenőrzés alá vonása azt jelenti, hogy minden egyes mérési ciklus alatt, vagy azt követően,

olyan mértékben és irányban kellene a gáz-halmazállapotú közeg állapotjelzőit megváltoztatni, hogy a mérési eredményekből a fény terjedésének irányváltozására, minden kétséget kizáróan következtetni lehessen. Az optikai közeg teljes elszigetelése a környezetétől, csak különleges mérőeszközökben, mérőberendezésekben lehetséges. Ilyen eszközök a korábban említett interferométerek.

A többszörös refrakció okozta hiba több fényforrás és érzékelő egyidejű használatával csökkenthető, amennyiben az ernyőt és a forrást összekötő képzeletbeli szakasz mentén, nem egy, hanem egyidejűleg több helyen mérjük a fény refrakcióját. Kettőnél több eszköz elhelyezésénél számolni kell azzal, hogy minden eszköz, kiterjedésétől, méretétől és elhelyezésétől függően kisebb, vagy nagyobb mértékben befolyásolja a környezetében zajló légköri folyamatokat. Emellett a légtömegek szabad mozgását akadályozó tereptárgyak körül légörvények, turbulenciák alakulhatnak ki, aminek eredménye éppen az lesz, aminek a kiküszöbölése nagyon fontos lenne a többszörös refrakció hatásának csökkentése érdekében.

Figyelembe véve azt, hogy a lézerforrások nagyon széles frekvenciatartományban működnek, segítségükkel az infravörös emissziós, vagy abszorpciós⁶⁹ spektroszkóp⁷⁰ alkalmazó megoldásokkal és eszközökkel távmérések végezhetők. [116][58]

A mérés célkitűzéseit minden részletre kiterjedő méréstervezéssel valósítottam meg. A megoldandó feladatok a következők voltak:

- az eszközelhelyezés megtervezése;
 - a lézerforrás és az érzékelő-vevő közti távolság meghatározása méréssel;
 - helyi, mikroklimatikus tényezők hatásainak feltárása és megismerése;
- a lézerforrás átalakítása;
- a modulált lézerfény előállítására alkalmas elektronikus eszköz megtervezése, megépítése és programozása;

⁶⁹ A felületi hatást jelentő adszorpcióval az abszorpciót nem szabad összetéveszteni.

⁷⁰ Elektromágneses hullám-források segítségével, a légkört alkotó atomok és molekulák gerjesztett állapotba hozhatók. Az elnyelt, majd kisugárzott energia mérésével az optikai közeg összetételének és összetevőinek térbeli eloszlása alapján, vegyelemzés végezhető

- a lézerforrás beállítását és rögzítését szolgáló tartó-, és forgatószerkezet megtervezése és megépítése;
- a mérővevő és mérésadatgyűjtő megtervezése, megépítése és programozása;
- a mérővevő rögzítéséhez szükséges beton alap és tartószerkezetek elkészítése;
- az adatátviteli eszközök illesztése a processzoros rendszerhez;
- az adatfeldolgozás eszközeinek megismerése és szoftvereszközének elkészítése;
- a letöltött adatok kiértékelése.

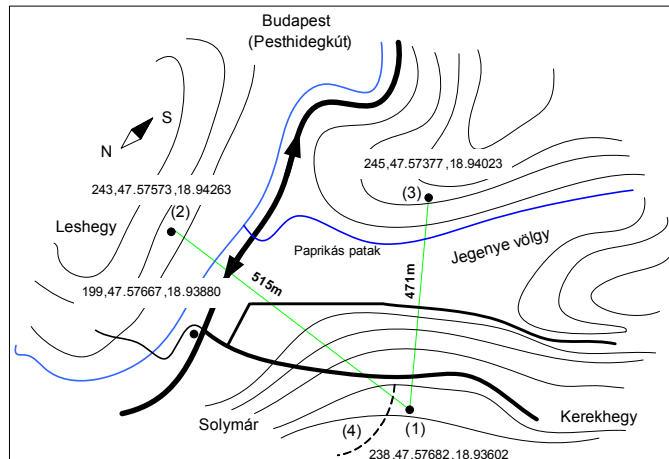
Az év-, és napszakok ismétlődésének eredményeképpen a fény légköri refrakcióját befolyásoló jelenségek bekövetkezésének helye és ideje közelítően meghatározható és behatárolható. Olyan szabadtéri mérések nem végezhetők, amelyek esetében a többszörös refrakció előnytelen, mérési hibát eredményező hatása valamilyen formában ne érvényesülne. Ha az említett jelenséget kiküszöbölni teljesen nem is lehet, hatását előrelátó méréstervezéssel; helyszínekiválasztással és eszközelhelyezéssel, valamelyest csökkenteni lehet. Az eszköztelepítés céljára legalkalmasabb helyszín kiválasztásában sokat segíthet egy-egy földrajzi hely kivételes adottságainak a felismerése.

A mikroklíma kialakulásában szerepe van:

- a földrajzi hely uralkodó széliránynak, páratartalmának és átlaghőmérsékletének;
- a domborzatnak, növényekkel fedett-, és fedetlen területek arányának;
- az építményeknek, ipari létesítményeknek és az urbanizáció mértékének.

A mesterséges környezetnek kiemelt szerepe van a fény terjedését erőteljesen befolyásoló, helyhez kötött légköri képződmények kialakulásában. A légköri szennyezés mértékének növekedése és a globális felmelegedés miatt a légköri folyamatok kialakulásának feltételei folyamatosan változnak. A szabadtéri mérés esetében a mérés körülményeit mindenkor befolyásoló ciklikus légköri állapotváltozások nem teszik lehetővé azt, hogy a mérések ugyanolyan feltételek mellett megismételhetők legyenek, más szóval nem reprodukálhatók. Ez szükségképpen azt eredményezi, hogy a mérés eszközeit úgy kell elhelyezni, hogy azok minél hosszabb ideig egyhelyben maradjanak és amennyiben szükséges, akár több hónapon át tartó folyamatos mérést is lehet

tővé tegyenek. A mérőeszközök elhelyezésétől függően a méréstervezésnél nem lehet figyelmen kívül hagyni az eszköz-, és adatvédelmet sem.



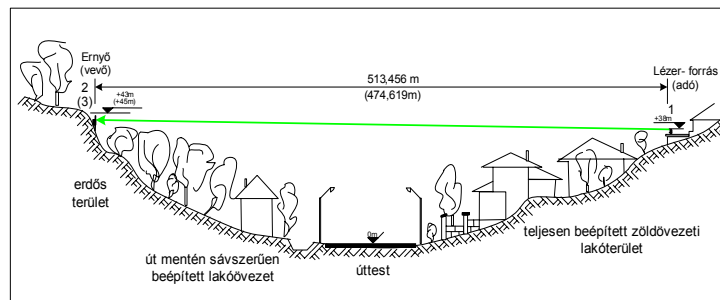
16. ábra
Az eszközelhelyezés helyszínrajza
(A szerző rajza)

Az eszközelhelyezés helyszínének vázlatrajza a 16. ábrán látható. A szintvonalas rajzon feltüntettem azt a három pontot, ahol a mérés eszközeit, a lézerforrást, a mérő-vevőt és az adatgyűjtőt elhelyeztem, és az eszközfelkészítés során rövidebb- hosszabb ideig méréseket végeztem.

Eleinte a lézerforrást az (1)-, a mérő-vevőt a (2)-es ponttal jelölt helyre telepítettem, majd egy rövid mérési periódust követően az utóbbit a (3)- as ponttal jelölt helyre helyeztem át.

Az ábrán vázolt földrajzi helyen dombok és völgyek váltják egymást, sík, vízszintes terület csak a völgyek alján és a dombok tetején található. A viszonylag nagy szintkülönbségeknek köszönhetően a szemben lévő, többnyire erdővel borított domboldalakra a szabad rálátás mindenkor biztosított, aminek köszönhetően megfelelő eszközelhelyezés esetén a folyamatos mérésnek nem volt semmilyen akadálya. Az optikai összeköttetést esetenként csak a sűrű eső, köd, vagy a hóesés zavarta, amely adatvesztést is eredményezett.

A 17. ábrán a völgyszelvény vázlatos rajza látható, amelyet a lézerforrás fénye hidal át. A rajzon az (1)-(2) szakasznak megfelelő metszetet tüntettem fel, ami néhány kisebb részlettől eltekintve csaknem teljesen megegyezik (1)-(3) szakasznak megfelelő völgyszelvényvel.



17. ábra
A völgszelvény vázlata
(A szerző rajza)

Az 17. ábrán látható völgy négy olyan részre tagolható, amelyeken belül változó összetételű és hőmérsékletű légtömegek kialakulásának a feltételei adóttak. A főút bal oldalát rövid szakaszon néhány lakóépület szegélyezi, a domboldalt összefüggő erdő takarja (5. kép, jobb oldalon). Az (1)-el jelölt helyen magántulajdonban lévő telkek és épületek állnak (5. kép, bal oldalon).



5. kép
Az eszközhelyezés megtervezése
(A szerző felvétele)

A fákkal sűrűn benőtt domboldalakon szerencsére akadt néhány foltszerű, fáktól mentes hely és kőomlásos partfal, ahol a mérővevőt sikerült elhelyezni.

5.2 Távolság meghatározása méréssel

A végpontok elhelyezésének felvázolása és az utólagos számítások elvégzése szükségessé tette a forrás és a vevő közti távolság meghatározását⁷¹. Ehhez megismer-

⁷¹ Lézeres távolságmérőt az optikai modulátor hiánya miatt nem építettem.

tem a távolságmérés elvét, eszközeit és a mérési hibák leggyakoribb okait. [55][58][162][163] A vázlatrajzon jelölt két távolságot; (1)-(2) és (1)-(3), először közvetett mérés útján határoztam meg, egy **PAB-2** típusú tűzészeti mérőeszközzel, szögek-, és egy ismert távolságra alapozottan.



6. kép
Távolságmérés Wild Distomat Di4-el
(A szerző felvétele)

Később a mérés és számítás leellenőriztem egy **Geonate-KeyMaze300** típusú műholdas helymeghatározó készülékkel, amennyire annak pontossága ezt lehetővé tette, végül az említett két távolságot egy **Heerbug WildDistomat-Di4** típusú, 2 km hatótávolságú, nagy pontosságú lézeres távolságmérővel ellenőriztem le és pontosítottam. (6. kép)

5.3 Mikroklímatis tényezők hatása

A fénytérjedés vizsgálatára megépített eszköz-pár adó részét, a lézertörést, a déli fekvésű hegyoldalban magántulajdonú telken belül a vázlaton az (1)-el jelölt helyen, a műholdas vevő által jelzett 238 m tengerszint feletti magasságban helyeztem el. A mérővevőnek a szemben levő domboldalon a (2)-vel jelölt pontban találtam helyet, a völgy aljától számított 43m, a (3) ponttal jelölt hely esetében pedig 45m magasságban. A lézertörés fényének nyomvonala, mint ahogy az a 17. ábrán is látható közelítően vízszintes, enyhén emelkedő.

A földrajzi hely adottságait felismerve, megvizsgáltam az eszköztelepítés helyének mikroklimáját és feltártam azokat a jelenségeket, amelyek befolyásolhatják a fény terjedését. A 16. ábrán az (1)-(2)-vel jelölt szakasz egy mindkét végén nyitott, a (2)-(3) –al jelölt szakasz pedig egy részben zárt, öbölszerű völgyet hidal át. Ebben a két völgyben a széliránytól függően nagyon különböző áramlási viszonyok alakulnak ki. Kora reggeli órákban, vagy párás időben, eső után az erdőből felszálló párákód foltok mozgása sokat elárul a légtömegek mozgásáról. Az erdő felett az áramlás lelassul, a ködfoltok mozgása és eloszlásának iránya azt mutatja, hogy a szélirányra merőleges irányú keveredés az áramlás sebességétől függően általában késve kezdődik el, vagy egyáltalán nem jön létre. A fák lombkoronája feletti apró örvényáramlások a felszálló pára mozgását lelassítják, megfogva azt, ami a távolból úgy néz ki, mintha a völgyben magasabb légrétegek esetében a lamináris áramlás kialakulásának feltételei adottak lennének. Az uralkodó szélirány ebben a térségben; ÉNy-DK.

A szemben lévő domboldal eltérő mértékben beépített, és növényzettel fedett. A talajfelszín feletti légrétegek felmelegedését elsősorban a felületek hőelnyelő, fényvisszaverő és emissziós képessége határozza meg. Ezek az értékek a szakirodalmi forrásokban megtalálhatók. [164] A talajfelszín és a hőelnyelő felületek felmelegedésének mértéke és sebessége elsősorban a tájolásuktól függ. A nyugati és déli fekvésű domboldalak talajfelszíne évszaktól és napszaktól függetlenül lényegesen gyorsabban, és jóval nagyobb mértékben melegszik fel, mint a szemben lévő, erdővel fedett északi vagy a keleti fekvésű domboldalaké. (7. képen alul) Télen, amikor az (1) pontból vizsgálva a Nap a (3)-al jelölt hegyoldal gerince felett alacsonyan halad át (11. képen alul) sugarai eltérő szögben érik az egymással szemben lévő domboldalakat, jelentős talajfelszíni hőmérsékletkülönbséget eredményezve a térképvázlaton jelölt pontok között.

Az erdő talajfelszín közeli légrétegeinek hőmérséklete a legmelegebb nyári napokon a 24÷26°C –ot alig érte el. Ennek oka a növényzet és a fák leveleinek magas spektrális reflektanciája. A talajnak is van saját spektrális reflektanciája, amelyet diagramok segítségével adnak meg. [116] A talajfelszín, épületek, stb. által elnyelt, és nagyobb hullámhosszon kisugárzott hő konvekció útján melegíti fel a körülötte lévő levegőt. Az épületek tetőfelülete, a talajfelszín, a patakmeder közelében lévő távvezeték oszlopok, a kőomlásos partfal felszínének hőmérséklete sokat elárul a körülötte levő

levegő hőmérsékletéről. Mivel a levegő fajhője lényegesen kisebb, mint az említett te-reptárgyaké, hőmérséklete az áramlás sebességétől függően változik.



7. kép

*2012. ápr. 02.-án készült eszköz-elhelyezési terv egy részlete⁷²
(A szerző felvétele)*

A mikroklimát és a lézerfény terjedését befolyásoló tényezőnek tekinthető minden intenzív hatás, amely a 7. képen felül és a 8. képen látható épület tetőszerkezete felett alakul ki. A sötét palával és részben bitumenes lemezzel fedett épület a levegő hőmérsékletét, eső után a páratartalmát (8. kép) nyáron erőteljesen megnöveli és rövidebb- hosszabb ideig viszonylag magas értéken tartja, a környező levegő hőmérsékletéhez és páratartalmához képest.

Mivel a lézersugár a 7. képen látható épület tetőgerince felett alig 45÷50 cm-re halad el, a légköri refrakció vizsgálatának szempontjából ez egy különleges adottságú helynek tekinthető a lézerfény nyomvonala mentén, amely külön figyelmet érdemel. Nyáron, napsütéses időben a tetőfelület alacsony reflektanciája miatt a hőmérséklete a +47 °C-ot is eléri és szélcsendes időben a felette lévő levegő olyan stabil, helyhez kötött állapotváltozása következik be, amelynek forrása a légmozgások hatására sem változtatja a helyét. A tetőfelület 6÷8 m-es hossza a teljes (1)-(3) szakasznak nem több

⁷² A képen, zöld vonallal jelölt lézerfény nyomvonal, csak illusztráció.

mint $1/55 \div 1/60$ - ad része, ezért az csaknem pontszerűnek tekinthető. Pontszerű intenzív termikus hatások előnyösen kihasználhatók a fény légköri terjedésének vizsgálatakor főként akkor, amikor ez a hatás a korábban említett többszörös refrakció, mérési hibát eredményező hatását többszörösen meghaladja. Ott, ahol a lézerforrás fényének nyomvonala a tetőfelületet meghaladja, minden más épület tetőfelülete több, mint tíz méter, távolabb még ennél is mélyebben helyezkedik el a völgyben. A nagy szintkülönbség kedvez az eltérő hőmérsékletű légtömegek kialakulásának, szélcsendes időben jelentős hőmérsékletkülönbségeket eredményezve a lézerfény nyomvonala mentén.



8. kép
Erőteljes párolgás a tetőfelület felett
(A szerző felvétele)

Mivel a légköri jelenségek sztochasztikus jellegéhez nem fér kétség, a statisztikai alapú kiértékelés eredményessége érdekében minden olyan tényezőt figyelembe kell venni, amely a fényterjedést befolyásolhatja. A levegő hőmérsékletének közelítő meghatározása a lézerfény nyomvonala mentén lehetőséget ad arra, hogy azt a későbbiekben figyelembe lehessen venni a mérési eredmények kiértékelése során. Ott, ahol megoldható volt, a tereptárgyak, főként épületek tetőfelszínének hőmérsékletét pontról –pontra haladva megmértem, az adatokat a nap végén kigyűjtöttem és táblázatokba foglaltam. A tereptárgyak felszíni hőmérsékletének mérésével olyan többlet információhoz jutottam, amely segített az eszközhelyezésben és a mérés eszközeinek beállításában.

A hőmérséklet mérésére egy Raytek márkájú RAYNGER® II PLUS típusú távhőmérőt használtam (9. kép) [165] A mérési eredményeket a fény légköri refrakcióját értékelő diagramokban vettem figyelembe. A távhőmérő egy 0,9 mW teljesítményű

He-Ne lézerral egybeépített nagy pontosságú mérésadatgyűjtőt tartalmaz, amelynek segítségével a mérési adatok tárolhatók. A háttérsugárzás-, és a felszín emissziós tényező⁷³ helyes beállítása esetén a távhőmérővel 30 m-en belül található tereptárgyak felszínének hőmérséklete $\pm 0,1^\circ\text{C}$ pontossággal megmérhető, amennyiben a távolság és tárgyméret arány megfelelő. Épületek és nagyobb méretű tereptárgyak esetében ez általában mindig teljesült. [164]



9. kép

*Az 1-es pont (10. kép) hőmérsékletének meghatározása távhőméréssel.
(A szerző felvétele)*

Amennyiben a szomszédos tereptárgyak emissziós tényezője és hőmérséklete közt kellőképpen nagy a különbség és a háttérsugárzás értéke nem túl magas, akkor kevésbé pontosan ugyan, de ennél jóval nagyobb távolságra levő tárgyak felszínének a hőmérséklete is megmérhető. Ha mérés közben az emissziós tényező, vagy a háttérsugárzás korrekciójára nincs szükség, a távhőmérővel percenként 38÷40 mérés is végezhető. Ezt a teljesítményt a gyakori helyváltoztatások miatt nekem még nem sikerült elérni, de a nagy szintkülönbségeknek és a szabad rálátásnak köszönhetően olyan tereptárgyak felszínének a hőmérsékletét is sikerült megmérnem, amelyek más tulajdonában levő, bekerített telken belül álltak. Az adatgyűjtést előzetes terv alapján, körzetek,

⁷³ ϵ - emissziós tényező. A távhőmérő kezelési útmutatójában, három különböző hullámhosszra vonatkozóan, több más anyag emissziós tényezőjének értéke is megtalálható.

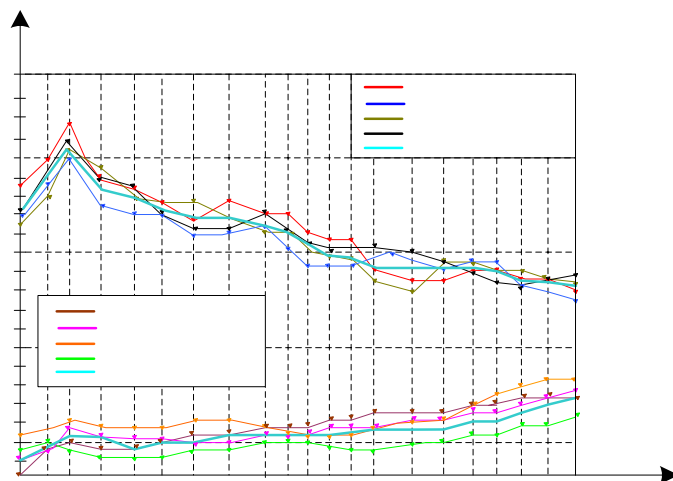
a körzeteken belül a mérési pontok és a mérőműszer helyének kijelölésével végeztem. (10. kép) A mérési helyek pontsorszerűen meghatározott sorrendjét az emissziós tényezők alapján határoztam meg azért, hogy minél kevesebb korrekcióra legyen szükség. A méréseket és az adatrögzítést a lehető legrövidebb idő alatt be kellett fejezennem és csak addig végezhettem, ameddig a mérés feltételei lényegesen nem változtak.



10. kép

*A felszíni hőmérséklet mérésének terve
(Forrás: Google Earth kiegészítve a szerző rajzával)*

A 10. képen az (1)-(3) mérési helyek közti szakaszon meghatározott körzetek, és azon belül kijelölt a mérési pontok láthatók, amelyeken belül a tereptárgyak felszíni hőmérsékletét megmértem.



18. ábra

*Hő-térkép diagramok
(A szerző rajza)*

A 18. ábrán látható grafikon a 2013. július és októberi adatok felhasználásával készült. A grafikonon az 1 pontban felvett hőmérséklet adatok a 7. képen felül és a 8. képen látható épület tetőfelületének a hőmérséklete, míg a 6 pontban az (1)-(3) szakasz végén, az erdős területen felvett hőmérsékleti adatok olvashatók le. Megfigyelhető az, hogy az 1 –el jelölt pont egy kiugróan magas hőmérsékletű hely, ami a lézerefény nyomvonala mentén egy viszonylag alacsony sűrűségű zónát hoz létre. Az épület nagy magassága miatt jelentős hőmérsékletkülönbségeket mértem az épület északi fala és tetőfelülete között. A lézerefény változó hőmérsékletű és sűrűségű légrétegen halad át, amelynek hatására a terjedésének iránya megváltozik. A hőterkép adataiból létrehozott grafikonok alapján következtetni lehet az (1)–(3) szakasz mentén a levegő hőmérsékletének megváltozására. Megfigyelhető az, hogy amikor a tereptárgyak felszínének hőmérséklete lecsökken, például ősszel, a vizsgált szakasz végén (6 pont) a levegő hőmérséklete magasabb, mint a szakasz elején. Nyári időszakban a diagramokon az egyes pontok hőmérséklete balról jobbra haladva csökken, éppen fordítva, mint ősszel. A jelenség vélhetően azzal magyarázható, hogy a szakasz végén a sziklás köves talaj hőkapacitása nagyobb, mint a tereptárgyaké.



11. kép
*A szén-dioxid és a légszennyező anyagok
elsődleges forrása
(A szerző felvétele)*

Amíg a lézerforrás fénye az (1) pontból a (2), vagy a (3) pontban elhelyezett mérővevőhöz ér, különböző hőmérsékletű, összetételű és eltérő mértékben szennyezett légtömegeken halad át. A levegő összetétele és szennyezőanyag tartalma évszaktól és a napszaktól függően változik. A szennyezőanyagok származhatnak az úttesten közlekedő gépjárművekből, a lakóépületek kéményeiből, de szilárd szennyezőanyagokat a légmozgások is magasba emelhetnek. A levegő szén-dioxid, szén-monoxid, stb. tartalmát télen főként a kéményeken keresztül szabadba áramló füstgáz, nyáron kisebb mértékben ugyan, de az erdővel fedett területek nagyon nagy aránya növeli. [19][166] A szén-monoxidon, kén-dioxidon, nitrogén-monoxidon, nitrogén-dioxidon, nitrogén-trioxidon, klóron, ózonon, stb., kívül a füstgázból származó szén-dioxid is szennyezőanyagnak tekinthető, amennyiben az égéstermékekkel távozik és kerül a levegőbe. [167] (11. kép)

A levegő több mint 99%-a nitrogénből és oxigénből áll. A két összetevő nagyon magas részaránya önmagában még nem jelenti azt, hogy ezekre alapozottan ne lehetne vizsgálni a fény légköri refrakcióját, de a kisebb arányban előforduló gázok esetében ez kétségtelenül egyszerűbb. Az összetétel részarányát tekintve, sorrendben a következő az argon, amely a legnagyobb arányban fordul elő a levegőben. (1. sz. melléklet 2. táblázat) A fény légköri refrakciójának vizsgálatakor az argon részarányát sem vizsgálják a szakirodalmi források csakúgy, mint az oxigénét és a nitrogénét sem. Nitrogén és argon, mérésére alkalmas érzékelőt nem találtam, oxigén mérőszonda és érzékelő ellenben könnyen beszerezhető. Az utóbbi savas elektrolit cellák formájában kerül kereskedelmi forgalomba, amelyek élettartama sokkal rövidebb, mint a félvezető alapú érzékelőkké (1÷1,5 év) és ráadásul az árak is jóval magasabb. [168][169]

A fákkal, bokrokkal sűrűn benőtt területeken a reggeli órákban a szén-dioxid tartalom a napközbeni értéknek több mint a kétszerese is lehet, hozzáteszem nyáron. A fény légköri refrakcióját a szén-dioxid tartalom olyan mértékben befolyásolja, hogy ezt a tapasztalati összefüggések esetében a kutatók sem hagyhatták figyelmen kívül. A szén-dioxid hatása akkor vehető figyelembe, ha a fizikai tulajdonságai ismertek a Föld gravitációs terében. Ha nem csak a forrásának helye, hanem a gáz fizikai tulajdonságai is ismertek, akkor következtetni lehet a feldúsulásának a helyére, ami nagymértékben megkönnyíti a mérési eredmények kiértékelését és általános érvényű következtetések levonását.

A szén-dioxid egy két-atomos gáz, amelynek molekulamérete $d=0,460$ nm, nagyobb, mint a nitrogéné ($d=0,316$ nm), vagy oxigéné ($d=0,296$ nm) (1. sz. melléklet 1. táblázat). A molekulák méretbeli különbsége csakúgy, mint a molekulásúly eltérő fizikai tulajdonságokra utal. [170][171] A tiszta gáz viselkedését a gravitációs térben a sűrűsége határozza meg. Minekután a levegővel vegyülve keveréket alkot, felhígulásával a fizikai tulajdonságai is megváltoznak. Az alábbi egyszerű számítás segített abban, hogy következtetni tudjak a tiszta szén-dioxid viselkedésére. A szén-dioxid molekulatömege: $M_{CO_2} = 44,01 \frac{kg}{kmol}$.

Egy köbméter szén-dioxid sűrűsége:

$$\rho_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{V_{CO_2}} = \frac{44,01 \frac{kg}{kmol}}{22,41 \frac{m^3}{kmol}} = 1,963 \frac{kg}{m^3}, \quad (69)$$

Az 1. sz. melléklet 4. táblázatából kiolvasható, hogy a száraz levegő sűrűsége $101,325$ kPa nyomáson és 0 °C- on $1,252 \frac{kg}{m^3}$, $101,325$ kPa nyomáson és 10 °C- on, $1,206 \frac{kg}{m^3}$, $101,325$ kPa nyomáson és 20 °C-on; $1,164 \frac{kg}{m^3}$. Számítás útján is hasonló eredményre lehet jutni. [164]

$$\rho_{lev.} = \frac{M_{lev.}}{V_{lev.}} = \frac{(0,21 \cdot 32 + 0,79 \cdot 28) \frac{kg}{kmol}}{22,41 \frac{m^3}{kmol}} = \frac{28,84 \frac{kg}{kmol}}{22,41 \frac{m^3}{kmol}} = 1,287 \frac{kg}{m^3}, \quad (70)$$

A fenti számításokból következik az, hogy $\rho_{lev.} < \rho_{CO_2}$, azaz a tiszta szén-dioxid egy ülepedő gáz. Ha a szén-dioxid a levegővel 100:1 arányban keveredik (100 rész levegő:1 rész szén-dioxid) a gázkeverék sűrűsége még mindig nagyobb, mint a normál összetételű levegőé. Ez a magyarázata annak, hogy szélcsendes időben a talajfelszín közelben a szén-dioxid koncentrációja jelentős mértékben megnőhet függetlenül attól, hogy azt az éjszakai órákban a növények termelik nagyobb arányban, vagy mesterséges légszennyező forrásokból került a levegőbe.

Az 16. ábrán bemutatott völgyekkel barázdált területen a szél a szilárd légszennyező anyagokat, mint például a port, a magasabb helyekről magával ragadja és a völgyek légterébe sodorja. A por száraz időben a fényterjedést az aeroszoloknál ismertette formában befolyásolja. Az É-D irányú erős légáramlás a szomszédos murvabánya

15÷18 m magas faláról gyakran jelentős mennyiségű kőport ragad magával, ((4)-el jeölt hely). Az aeroszokok fényterjedést befolyásoló hatásával nem számoltam, de az eszköztervezésnél a mérőszondákba és az eszköz belsejébe való bejutásának megakadályozásáról gondoskodtam.

5.4 A lézerforrás átalakítása, kiegészítése

Az emberi szem és a fényérzékelő elemek spektrális relatív érzékenységet karakterisztikákkal adják meg. A szem az 555 nm-es zöld színű fényre a legérzékenyebb. Különbséget kell tenni a nappali, szürkületi és éjszakai spektrális érzékenység között, mert a relatív érték maximuma a fényerő csökkenésével a kisebb hullámhosszak (520÷525 nm) felé eltolódik. [172]

Ma számtalan olyan félvezetőlézer létezik és beszerezhető, amelyek különböző hullámhosszon működnek. A zöld színű félvezetőlézer választását az is indokolta, hogy a mérő-vevőben alkalmazott érzékelő, CCD sorkamera (TCD1201D) válaszfüggvényének maximuma éppen 550 nm-nél van. [173]

A felhasznált félvezetőlézer fényének divergenciája túl nagy volt, ami főként abban mutatkozott meg, hogy a fényfolt átmérője a forrástól négy-ötszáz méterre elhelyezett ernyőn, a 300 mm-t meghaladta. A nagy fényfolt átmérő azért jelentett problémát, mert a mérővevőn és az ernyőn kialakított 10 cm hosszú rés, amelyen keresztül a lézer fénye az érzékelőig eljutott, két vége a fényfolt normál eloszlás szerinti maximumának alsó-, és minimumának felső határát nem érte el. A mérőprogram működése szempontjából ez jelentős érzékenység csökkenéshez és adatvesztéshez vezetett volna.

A rugalmatlan és helyhez kötött eszközelhelyezés miatt, amelynek okát korábban ismertettem, a fényfolt átmérőjét az ernyőn nem tudtam csökkenteni. Több lézerforrás beszerzése és a köztük lévő különbségek feltárása sem vezetett eredményre, ezért a lézer optikájának átalakítása és kiegészítése mellett döntöttem. Az átalakítás szükségessé tette, hogy megismerjem a lézer kollimáló lencserendszerének a felépítését, ezért szétbontottam. (2-3. kép). Az alábbi számításokat 1 mm átmérőjű fénysugárra vonatkoztatva végeztem el, ami nem sokkal tért el a kilépő sugár átmérőjétől.

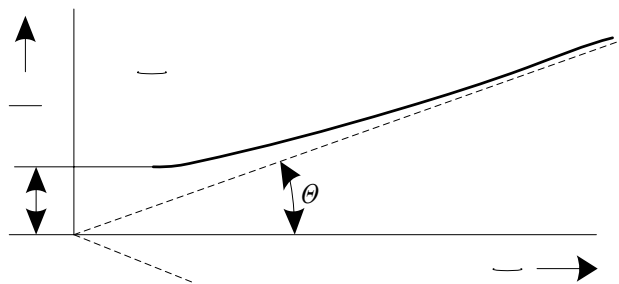
A lézersugár divergenciája a 19. ábra alapján határozható meg:

$$\Theta = \frac{w(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} = \frac{0,000532}{\pi \cdot 0,5} = 3,386 \cdot 10^{-4} \text{ rad}, \quad (71)$$

Aszriptotikus közelítést feltételezve, az 500 m távolságra elhelyezett ernyőn a fényszórtó átmérője közelítően:

$$2 \cdot w(z) = 2 \cdot z \cdot \Theta = 2 \cdot 5 \cdot 10^5 \cdot 3,386 \cdot 10^{-4} = 338,6 \text{ mm}, \quad (72)$$

volt, ami a mérésekkel közelítően megegyezett. Ez 338-szor nagyobb, mint az elméleti kilépő fényszórtó átmérője.



19. ábra
A lézerefény divergenciája [174]
(A szerző rajza)

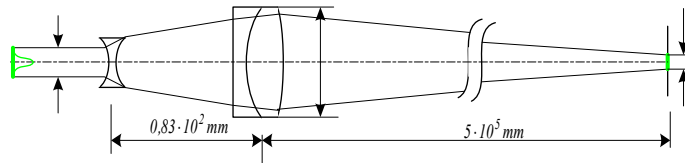
A fényszórtó átmérőjét az ernyőn (12. kép) többféleképpen is lehet csökkenteni, ezek közül a „fényszórtó-tágítóval”, idegen szóval az expanderrel történő kiegészítése tűnt a legegyszerűbbnek, amelynek fókuszpontját tetszőlegesen be lehet állítani. Két típusa ismert a Kepler-, és a Gallilei-féle expander.

Az 532 nm-es lézerefény esetében, a kilépés helyén az 1 mm átmérőjű zöld lézerefény által előállított fényszórtó sugara az 500 m távolságra elhelyezett ernyőn: [174]

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} = 0,5 \cdot \left[1 + \left(\frac{532 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^5}{\pi \cdot (0,5)^2} \right)^2 \right]^{1/2} = 169,34159 \text{ mm}, \quad (73)$$

A Gallilei- típusú fényszórtó-tágító használatával, az optimális sugárátmerő:

$$2 \cdot w_{0(opt)} = 2 \left(\frac{\lambda \cdot z}{\pi} \right)^{1/2} = 2 \left(\frac{532 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^5}{\pi} \right)^{1/2} = 18,4033 \text{ mm}, \quad (74)$$

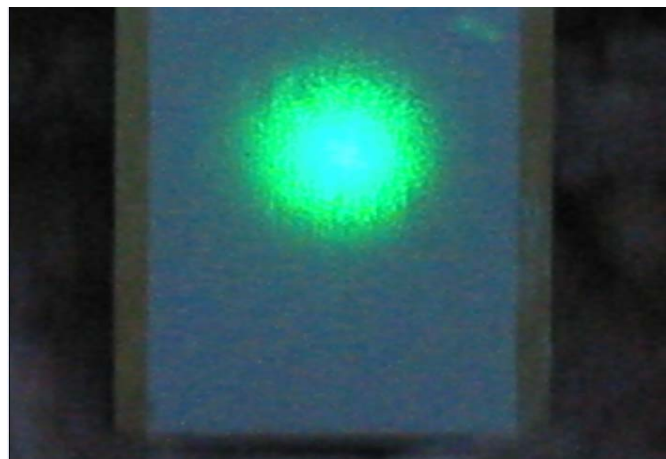


20. ábra

*Fénynyaláb- tágító és fókuszáló lencserendszer felépítése [174]
(A szerző rajza)*

Ez azt jelenti, hogy a 18,4 szorosára tágított lézernyalábot, a távolság felénél fókuszálva a fényfolt átmérője az ernyőn 338,68318 mm-re beállítható.

A 20. ábrán látható Galilei típusú expanderrel, a fényfolt átmérőjét a forrástól 500 m-re elhelyezett ernyőn, 532 nm-es lézerfény esetén, így $\approx 12,16\%$ -kal, ≈ 297 mm-re lehet csökkenteni, ami még mindig több volt, mint a figyelembe vett 250 mm-es maximum, amire ebben az esetben szükségem lett volna. Ha a lencserendszer „szögerősítése” 10 körüli, akkor az átmérőt elvileg $\sqrt{2}$ -ed részére is lehet csökkenteni, ami 239,426 mm-t jelentett volna. Ez minden tekintetben megfelelő lett volna, de megvalósításának több akadálya is volt. Az egyik az volt, hogy a kilépő lézersugárnak az átmérője az 1 mm-t meghaladta, a másik pedig a megfelelő szórólencse és fókusz távolságú vastaglencse hiánya volt.



12. kép

*A lézerforrás fényének eloszlása az ernyőn
(A szerző felvétele)*

A szórólencse helyett egy másik, a kísérletek során üzemképtelenné vált lézerforrás saját korrekciós lencséjét építettem be. Így az aszimmetrikus bikonvex vastaglencse helyett egy szimmetrikus vékony lencse került az expanderbe, ezért a vártnál

kisebb mértékben (kb. 17 %-kal) sikerült csökkenteni a fényfolt átmérőjét az ernyőn. Ennek főként az volt az oka, hogy nem a távolság felénél, hanem annál rövidebb szakaszon sikerült a fókuszpontot beállítani. A CCD sorkamera látászögében kialakított rés két végpontja között a mérések megkezdéséhez szükséges kontrasztarányt sikerült előállítani és ezt követően, az amúgy is nehezen meghatározható fényfolt átmérőnek a továbbiakban nem volt jelentősége.

5.5 Modulált lézerfény előállítása

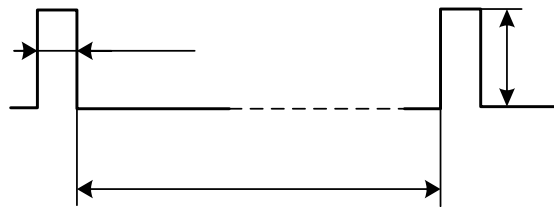
A levegőben lévő por, szennyezőanyagok és vízgőz miatt a folyamatosan működő lézerforrás fényének nyomvonala szabad szemmel is látható a levegőben, főként szürkületkor és sötétedés után. Mivel a lézerfény forgalmas, meredek lejtős utca-, főút-, és lakott településrész felett halad át, a folyamatosan működő forrás nagyon feltűnő lett volna, ezen kívül a hűtéséről is gondoskodni kellett volna, főként azt követően, hogy a fényteljesítményét megnöveltem.⁷⁴ A fokozott hűtés jelentős többletfeladatot jelentett volna, mindamelllett, hogy a lézer élettartamát is nagyobb mértékben csökkentette volna, mint az impulzusüzemű tápfeszültség ellátás. A nagyobb fényteljesítményt a lézerdióda gerjesztő áramának megnövelésével értem el. A lézer hűtését így a szorítóbilincsel ellátott alumínium öv biztosította és mindemelllett szilárdan rögzítette a helyén (15. kép)



13. kép
*Modulált fény előállítására alkalmas átalakított lézerpointerek
(A szerző felvétele)*

⁷⁴ Impulzusüzemben a lézer által felvett teljesítmény a modulált tápfeszültség jelformájának (időfüggvényének) görbe alatti integrálja.

A nagyobb fénytéljesítményre azért volt szükség, hogy a köd, eső és a reggeli ködfoltok kevésbé zavarják az összeköttetést. A lézer fényének a modulálására több technikai megoldás létezik. Ezek közül a legegyszerűbb a ki és bekapcsolás, idegen szóval: OOK (On Off Keying). [175] A lézerforrás fénytéljesítményének növeléséhez és modulálásához tanulmányoztam a vezérlő elektronikájának felépítését, működését és feltártam azokat a lehetőségeket, amelyekkel az említett feladatok megoldhatók. [49] A lézer kereskedelemben kapható mutató eszköz, amelyet céljaimnak megfelelően átalakítottam és csatlakozót építettem rá. (13. kép)



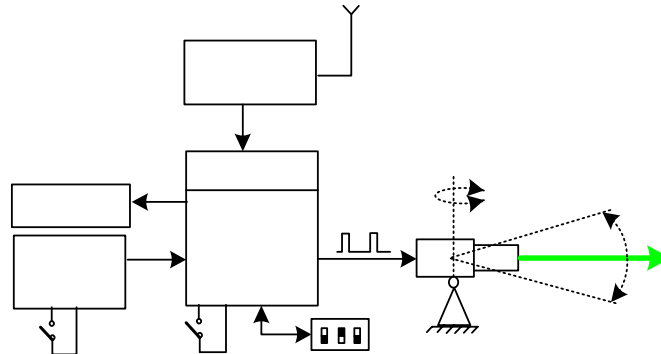
21. ábra
A lézer moduláló jele⁷⁵
(A szerző rajza)

Oszilloszkópos méréssel megmértem a lézervediódá feléledésének idejét, amely a moduláló jel legmagasabb frekvenciáját is behatárolta. Az így kapott 17,3 ms, optikai kimeneten mért jelfelfutási idő alapján meghatároztam a 21. ábrán látható moduláló jel paramétereit. A lézerforrás modulálásához legalább 22÷25 ms időtartamú impulzusok szükségesek, mert legalább ennyi időre van szükség ahhoz, hogy az optikai rezonátorban az állóhullám felépüljön. A kitöltési tényező nagy értékére azért van szükség, hogy a lézerforrás fénye a levegőben ne legyen látható. A lézert hosszú időn keresztül sikerült úgy üzemben tartani, hogy működésével nem hívta fel magára a figyelmet.

A mérőrendszer működésében az impulzusüzemnek más szerepe is van. A mérővevő egy optikai úton távvezérelt mérésadatgyűjtő, amelyben a mérési folyamatot a lézer által továbbított fényimpulzusok indítják el. A nagy relaxációs idő lehetővé teszi azt, hogy ameddig fényimpulzus nem érkezik, a mérő-vevő csak bizonyos funkciói

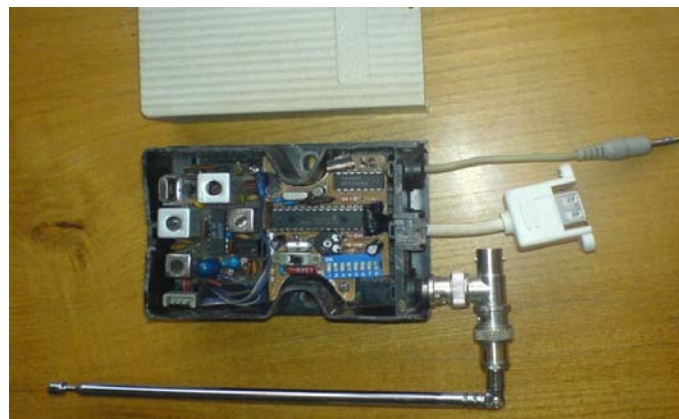
⁷⁵ Az ábrán az oszcillogram idealizált képét ábrázoltam. A valóságban kissé torzított a kapacitív folyamatok eredményeképpen.

működjenek. Ilyen köztes feladatok az érzékelők jeleinek és adatainak feldolgozása és továbbítása.



22. ábra
*A lézervény vezérlő és adatletöltő áramkörének tömbvázlata
(A szerző rajza)*

A moduláló jel előállításához egy PIC18F2550⁷⁶ USB vezérlőt is tartalmazó mikrokontrolleres áramkört terveztem és építettem. A programozott vezérlő előnye az, hogy bizonyos funkcióinak megváltoztatása és kiegészítése esetén, amennyiben a kiépítése lehetővé teszi, akkor csak a program lecserélésére van szükség.



14. kép
*A modulátor és a rövidhullámú rádióvevő
(A szerző felvétele)*

⁷⁶ Programozható integrált áramkör- Mikrokontroller család

Az áramkör tömbvázlata a 22. ábrán látható. Jelenlegi formájában nagyon egyszerű feladatot lát el, ezért csak a legszükségesebb külső perifériákat tartalmazza.

A beviteli perifériák egyike a K3 DIP kapcsolósor, amelynek segítségével három különböző időzítés, más szóval relaxációs idő állítható be; 4 s, 40 s és 400 s. A modulátor dobozában kapott helyet a 27,12 MHz-en működő rövidhullámú rádióvevő (14. kép)

A rádióvevő a használaton kívüli modell távirányítóim egyikének vevőegysége, amelyet a 90-es évek elején terveztem és építettem.⁷⁷ Segítségével valamint a tőle több száz méterre elhelyezett mérésadatgyűjtőhöz illesztett rádióadó segítségével, a mérés során gyűjtött adatok biztonságosan letölthetők. Az adatok egy USB⁷⁸ adattárolóra kerültek (16. képen, a jobb oldalon). Az adatok letöltésének módja beállítható, történhet szakaszosan, vagy folyamatosan. A kétféle üzemmódot a K2 kapcsolóval lehet kiválasztani. Az áramkör tápellátását egy 6 ÷ 9V-os akkumulátorcsomag biztosítja. A lézerforrás a K1 kapcsolóval ki-, és bekapcsolható (22. ábra).

5.6 A lézerforrás rögzítésének és beállításának elemei

A szabadtéri mérés eszközeinek a fejlesztését 2012. február végén kezdtem. Elsőként a lézerforrás elhelyezésére szolgáló tartó-, és beállító szerkezetet készítettem el, azokból az anyagokból és alkatrészekből, amelyek akkor rendelkezésemre álltak. Ehhez a legszükségesebb fémmegmunkáló gépi eszközökkel és nyersanyagokkal rendelkezttem, ezért nem volt különösebb akadály annak, hogy a megtervezett alkatrészeket legyártsam, elkészítsem.

A lézerforrás beállítására és rögzítésére szolgáló forgatható tartószerkezetet egy 3,5 m magas épület, vasbeton födémszerkezetén helyeztem el egy betonból készült talapzaton. (16. kép) A tartóállvány talpa 10 mm vastag acéllemezből készült, amelyen négy furat található. A talplemezt és a ráépített tartószerkezetet a furatokon átmenő, betonba ágyazott négy darab M12-es csavar rögzíti. A tartószerkezet váza 80 mm átmérőjű, 80 cm hosszú 2,5 mm falvastagságú acélcső, amelyet négy oldalról, pillérszerű merevítők erősítenek a talplemezhez. A csöváz tetejére erősítettem a beállító szerkezetet, amelynek a tetején található a lézerforrás.

⁷⁷ RT 1994/3

⁷⁸ Universal Serial Bus; Univerzális soros busz



15. kép
*Beállító rugós szerkezet felépítése
(a szerző felvétele)*

A megtervezett és megépített beállító szerkezet egy rugós mechanikai szerkezet, amelynek segítségével a lézerforrást a vízszinteshez képest legfeljebb 24° -kal meg lehet dönteni és függőleges tengelye körül 360° -kal el lehet forgatni. (15. kép) A szabadságfokok száma így $3+1$, ami megegyezik a gömbcsukló szabadságfokainak számával, amennyiben az kiegészül a függőleges tengely mentén történő elfordulással is. A beállító szerkezet segítségével a térképvázlaton jelölt helyről a lézersugárral a környező dombok bármelyik pontja „célba vehető”. Lehetőség van finombeállításra is, majd ezt követően a lézer helyzete csavarok segítségével szilárdan rögzíthető.

A beállító szerkezet felső részén látható csapágyazott nagyobb méretű hengeres alkatrész-, a rögzítő csavar fellazítása után- a lézerforrást a rögzítő sínnel együtt kézzel, a függőleges tengely mentén könnyen körbe forgatható. Amikor ez az alkatrész az alumíniumöntvényből készült csapágyházhoz rögzítve van egy rögzítő csavarral és a sín előtt található rögzítő csavar fel van lazítva, akkor a sín tárcsaformájú talplemeze a hengeres acélalkatrészhez képest elforgatható a palástfelületből kiálló vízszintes beállító csavar segítségével. Ez a művelet a finom után állítás. A csővázhoz rögzített tárcsa formájú alkatrészen keresztül négy szimmetrikusan elhelyezett, finommenetű ($M10 \times 1,25$) beállító csavar megy át, aminek segítségével az alumínium csapágyházzal összeépített tartólemez térbeli helyzete beállítható. A képen csak a külső előfeszítő

szeleprugók láthatók. A külső rugókkal *14 db* kisebb méretű rugó tart egyensúlyt, amelyek a *15. képen* felül a baloldalon láthatók.



16. kép
*A forrás oldali eszközök elhelyezése
(a szerző felvétele)*

Egy fordított U alakú talpas alkatrész segítségével, a beállító szerkezetre egy prizmás távcsövet szereltem. A távcsőnek a szerepe mindössze csak annyi, hogy megkönnyítse a lézerforrás beállítását. Segítségével a több száz méter távolságra elhelyezett ernyőn, a fényfolt helyzete vizsgálható. Törekedtem a beállítás és megfigyelés eszközeinek lehetőség szerinti egybeépítésére. A lézer beállítását és rögzítését követően, a *16. képen* látható távcső leemelhető a tartószerkezetről. A tartó-, és beállító szerkezet stabil felépítésének köszönhetően a forrás elállítódására nem kellett számítanom.

5.7 Következtetések

A lézerfény légköri refrakciójának vizsgálata történhet egyszerű mérési elv alapján viszonylag egyszerű eszközökkel. A mérési elrendezés megtervezésénél előnyösen kihasználhatók a helyi adottságok, a légkör mikroklimatikus és helyhez kötött állapotváltozásai. Ilyen esetben a lézerforrás rögzítéséhez és beállításához egyedi fejlesztésű mechanikai tartó-, és beállító-szerkezetre van szükség.

A mutatóeszközökből és a mérésautomatizálás korszerű eszközeiből könnyen továbbfejleszthető forrásoldali mérőeszköz és adatletöltő építhető. A félvezető lézer fénye a tápvezetékekre kapcsolt tápfeszültség megszakításával viszonylag egyszerűen modulálható, azonban figyelembe kell venni azt, hogy a félvezetőlézereknek van úgynevezett „feléledési ideje”, amelyet előzetesen vizsgálni és meghatározni szükséges.

A végpontok távolságától függően a fénynyaláb „fókuszálására” alkalmasak expanderek, más szóval fénynyaláb-tágítók, amelyek segítségével a félvezető lézer által előállított fény divergenciája csökkenthető.

6. FEJEZET

A FÉNY LÉGKÖRI REFRAKCIÓJÁNAK VIZSGÁLATA

A fény légköri refrakcióját befolyásoló állapotjelzők esetenként nagyon lassú változása, úgymint a légnyomás, páratartalom, stb. a mérés eszközeinek hosszú időn keresztül egy helyben maradását, más esetben gyors, vagy nagyon gyors folyamatok, mint amilyenek a termikus állapotváltozások egy része, a mérések gyakoriságának növelését teszi szükségessé. Mivel ebben a témában olyan szakirodalmi forrást nem találtam, amelyben annak szerzője a mérési elv-, és eszközfelépítés minden részletét megosztotta volna, saját fejlesztésű automatizált mérővevő és adatgyűjtőt megtervezése és megépítése mellett döntöttem részben meglévő, részben könnyen beszerezhető alkatrészekből.

A fényfolt helyzete a 12. képen látható ernyőn, a nagyon kis elmozdulások és a fényenergia egyenlőtlen eloszlása miatt egyszerű hossz mérő eszközökkel nem vizsgálható, mert a kontúrvonalai annyira elmosódtak, hogy nem lehet kiválasztani azt a referenciapontot, amelyet figyelembe lehetne venni ahhoz, hogy mértékét meg lehessen határozni. Ami elsőre leküzdhetetlen hátránynak tűnt, végül egy olyan mérési módszer kidolgozására adott lehetőséget, amellyel a fényenergia egyenlőtlen eloszlását sikerült előnyösen kihasználni a fényfolt helyváltozásának meghatározásához. Ehhez mindenekelőtt megfelelő optikai érzékelőre és gyors processzoros jelfeldolgozó eszközre valamint programalgoritmusra volt szükség.

Processzoros fejlesztőeszközökből nincs hiány. A legkülönbözőbb processzorokra épülő fejlesztőkészletek kaphatók, rendelhetők, amelyek nem olcsóak, de minden létező periféria kezelésére alkalmasak. Egyik- másik érintőképernyővel is rendelkezik, kameraképek rögzítésére alkalmas és a kártyafoglatba helyezhető memóriakártyájukra adatok menthetők, RF adatátviteli szabvány szerint (xBee) hálózatba köthetők, stb. Ilyen az EMX processzoros fejlesztőkészlet is, amelyre Windows CE alatt futó alkalmazások fejleszthetők. Méreteik esetenként még kisebbek is, mint a továbbiakban bemutatott saját fejlesztésű mérővevő és adatgyűjtő. [176]

A mérővevő és adatgyűjtő nem egy eszköz, hanem egy eszköz pár, ami a korábban ismertetett lézerforrás modulátorból-, a rádióvevőből és abból a mérővevőből épül fel, amelyről a továbbiakban bővebben is szó lesz.

A lézertől 400÷500 m-re mérő-vevő alkalmas arra, hogy gyűjtse, tárolja és továbbítsa a mérés adatait. A mérési adatok feldolgozásához szükség volt az adatcsomagokat azonosító időbélyegre. Ehhez egy a valós időalap generátort (RTC) építettem a mérővevő és adatgyűjtőbe. Az adatok biztonsága szükségessé tette azt, hogy a mérés helyén az adatok csak átmenetileg tároljuk, a végleges gyűjtés és tárolás pedig a lézerforrás telepítésének helyén történjen meg. Így mindkét eszköz részt vesz az adatgyűjtésben és tárolásban.

A 12. képen látható ernyő egy reflektív felület, amelyen a lézerefény „filamentációjának”⁷⁹eredményeképpen kialakuló egyenlőtlen energia-eloszlás miatt olyan fénypontok jönnek létre, amelyek egymástól elkülönülő képpontoknak is tekinthetők. Mivel az ellenkezőjét nem bizonyítottam, feltételeztem azt, hogy a képpontok egymáshoz viszonyított helyzete nem változik. Amennyiben a feltételezésem helytálló, akkor a fénypont eltolódásának mértékére elvileg egy képpont elmozdulására alapozottan is lehetne következtetni, abban az esetben, ha a kiválasztott képpont elmozdulása pontosan nyomon követhető. Az azonosítás szoftveres technikái régóta léteznek és kidolgozottak a mozgásérzékelő biztonsági rendszerek adatrögzítőiben (DVR⁸⁰). Ezek a programok a mozgó objektum kiválasztott képelemeinek a környezetét vizsgálják és így tudják azonosítani és követni a mozgását. A képpont környezetének vizsgálatára alapvetően azért van szükség, mert a CCD kamerák kivétel nélkül diszkrét, egymástól fizikailag is elkülönülő érzékelőelemekből épülnek fel és nem folytonos analóg érzékelő felületek. Az elemi érzékelők sokaságából felépülő képérzékelőkhöz ráadásul elválaszthatatlanul hozzátartozik a diszkrét adatok feldolgozásának mai processzoros eszköze, a számítógép. A képpont követése a környezetében lévő képpontok relatív helyzete alapján határozható meg, mivel egy képpontra alapozott vizsgálat nem vezet eredményre.

A 17. képen a lézerefény fényenergiájának eloszlása látható. A téglalapokon belül a képpontok eloszlása aszerint változik, hogy a képpontokból álló halmaz melyik részét határolják. Elhelyezésüktől függően a téglalap alakú területen belül található

⁷⁹ „Szálásodás”, „szálakra bomlás” idegen megfelelője. Ez felfogható úgy is, mint a forrásból kilépő fénynyaláb elemi fénysugarakra bomlása, de hozzá kell tennem azt, hogy az elemi fénysugár néhány fontos kritériumát nem teljesíti, ezért ez csak az értelmezést megkönnyítő hasonlat és nem analógia.

⁸⁰ Digital Video Recorder: Digitális mozgókép rögzítő.

képpontok eloszlása lehet egyenletes, vagy egyenlőtlen. A behatárolt terület az ernyőn és a mérővevő dobozán kialakított résnek felel meg a továbbiakban.

A képernyő egy kiválasztott területén a fényintenzitás a fénysűrűség függvényében változik. A kettő kapcsolatát a (75) exponenciális függvény írja le.

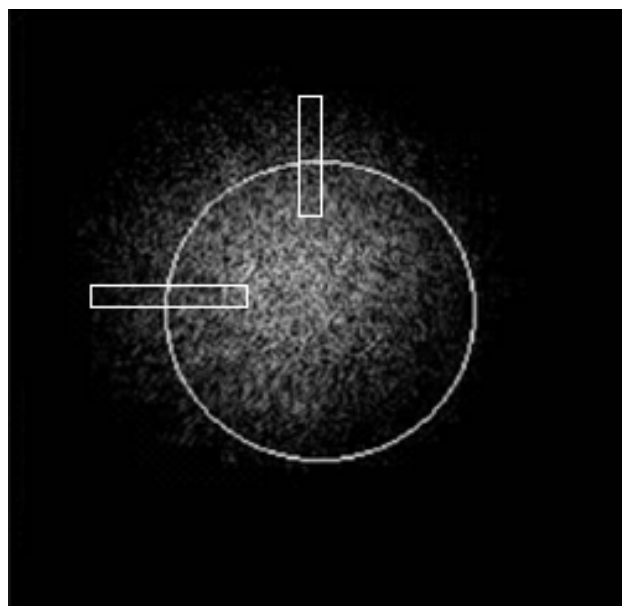
$$P = \frac{I}{2} w^2 \pi \cdot I_0, \quad (75)$$

ahol: $w = w(z)$ - a fénysugár keresztmetszete;

P - a fénysűrűség

I_0 - a fényintenzitás;

A felületen mért fényintenzitás csak akkor egyenletes eloszlású, ha a fényterjedés irányába fénysűrűség változás nem következik be. Amennyiben a $\pi \cdot w^2$ szorzat egy szenzorelem érzékelő felülete, akkor a fényintenzitás a fénysűrűség, más megfogalmazásban, a felületet érő elemi fénysugarak számának a függvénye. A felületét érő, fényintenzitással kifejezett fénysűrűség megváltozás optikai szenzorokkal vizsgálható. Megfigyelhető az, ami egyébként az 4. ábrán látható normál eloszlásból is következik, hogy az ernyő egy megfelelően kiválasztott, helyhez kötött területén a fénypontok átlagsűrűsége aszerint változik meg, hogy a fénypont milyen irányba-, és milyen mértékben mozdult el. (17. kép)



17. kép

*A vizsgált terület behatárolása az energia-eloszlás függvényében
(Forrás: [16])*

A képen látható álló, vagy fekvő téglalappal határolt területen belül, annak hosszabb oldala mentén, a fénypontok átlagos sűrűsége akkor változik a legnagyobb mértékben, ha a fénypont „udvarát”, vagy annak egy részét fogja át. A téglalap és a rés helyzete alapvetően meghatározza azt, hogy milyen irányú elmozdulást lehet ilyen módon vizsgálni. Kétdimenziós érzékelőkkel mindkét tengely irányába vizsgálható a fénypont elmozdulása. Mivel a fénysugár közelítően kör keresztmetszetű és a fénysűrűség eloszlás egyenlőtlen, egyirányú érzékelő-sorral az elmozdulás irányára nem lehet következtetni. Függőleges irányú elmozdulást az egyirányú érzékelő vízszintes irányú elmozdulásként érzékelhet, annak ellenére, hogy az elmozdulás irányvektorának nincs vízszintes irányú összetevője. Egydimenziós érzékelő-sorral csak akkor lehetne minden kétséget kizáróan megállapítani az elmozdulás irányát, ha a fénysugár nem kör-, hanem négyzet keresztmetszetű lenne és azon belül a fénysűrűség sugárirányú eloszlása egyenletes lenne. A körtől eltérő keresztmetszetű fénysugár „profil” elő lehet állítani és alkalmaznak is ilyent, például anyagmegmunkálás céljára, de sajnos az sem felel meg minden tekintetben a fenti követelményeknek.

6.1 Optikai érzékelő CCD sorkamerával

Az optikai adó és vevő távolságától függően a millimétert, vagy ezt meghaladó fénypont helyváltozást eredményező légköri állapotváltozások mellett sokkal gyakoribbak azok, amelyek a milliméter tört részének megfelelő eltolódást eredményeznek. Ezt azokra az előzetes mérésekre alapozottan fogalmaztam meg korábban, amelyeknek célja az volt, hogy az érzékelőelem érzékenységet és felbontását meghatározzam.

Félvezető alapú fényérzékelők, mint amilyenek a fotódiodák, fototranzisztorok és más hasonló diszkrét optikai félvezetők, a fényintenzitás mérésre jól használhatók. A fényintenzitás mérése visszavezethető fényteljesítmény mérésre, de mint korábban is volt szó róla, a fénypont eltolódását egy pont fényerősségének megváltozására alapozottan nem lehet meghatározni. A fénypontok hely szerinti eloszlását és fényintenzitásának a megváltozását elegendő az ernyő egy kisebb területén vizsgálni és az egyes fénypontok fényerősségének átlagértékének figyelembevétele mellett egyébre nincs szükség, mint arra a referenciapontra, amelyhez viszonyítani lehet.

A referenciapont, amelyről korábban is szó volt nem egyéb, mint a rögzített helyzetű fényérzékelő, vagy a korábban említett téglalap alakú rés, amelyen keresztül

a fényérzékelő elemekig eljut a lézerforrás fénye. A mérés pontossága megkövetelte azt, hogy minél nagyobb számú fénypont vizsgálata történjen meg egységnyi felületen, ezért diszkrét áramköri elemek formájában kapható optikai érzékelőkből, megfelelő elemsűrűségű kisméretű érzékelő-mezőt, vagy érzékelő-sort nem lehet összeállítani. Nagyfelbontású Web-kamerák erre a célra egyáltalán nem alkalmasak, mert a fejlesztők a nagy felbontást ma javarészt úgynevezett „szoftveres praktikák” útján valósítják meg és a kamerák dobozán feltüntetett felbontásra vonatkozó számadatoknak egyre kevesebb közülük van a képérzékelő elemek egységnyi felületen lévő számához. A szoftveres megoldások kikerülhetetlenek bizonyultak. Emellett a kétdimenziós CCD képérzékelők processzoros rendszerhez illesztése több tapasztalatot és nagyobb tervezői-, és programozói gyakorlatot igényel.

Az eszközfejlesztés megkezdése előtt mérlegeltem, hogy adott célra milyen áramköri elemek felhasználása gazdaságos, léteznek-e kidolgozott sémák az adott feladatra és felhasználhatóak-e azok közül valamelyik, annak érdekében, hogy az eszköz és programfejlesztéshez szükséges időt lerövidítsem. Ott, ahol ilyent találtam, teszteltem és a fejlesztés céljainak megfelelően felhasználtam. Sajnos csak néhány program-elem felhasználására volt lehetőségem.



18. kép
*A felhasznált CCD sorkamera forrása
(A szerző felvétele)*

Emellett mérlegeltem azt is, hogy hol van az a határ, ahol egy adott technológiát képviselő diszkrét áramköri elem felhasználása még gazdaságos és honnantól kezdve kell más processzorcsaládot választani, vagy készen megvásárolható adott funkciójú mo-

dult beépíteni. Utóbbira nem volt példa, de a beépített, programozott FPGA bizonyos szempontból ilyennek tekinthető.

A fényterjedés irányváltozásának méréséhez érzékelőelemként a CCD kamerák egydimenziós változatát, egy *CCD sorkamerát* használtam fel. [177][178] Néhány nevesebb gyártó sorkamerája különböző kivitelben és méretben ma a legtöbb lapolvasóban⁸¹ megtalálható. A felhasznált sorkamerát az egyik MUSTEK márkájú kézi lapolvasóból szereltem ki. [179]

A mérővevő érzékenységet a CCD sorkamera maximális felbontása határozza meg. A fekete-fehér szöveg és kép beolvasására alkalmas kézi szkennerről leolvasott maximális felbontás 256 dpi⁸² (18. kép). A sorkamera (TCD 1201D) a 14 µm-es érzékelő elemeivel, amelyből 2048 db van benne, 10 cm –es átfogással⁸³ 512 dpi, azaz kétszer nagyobb felbontásra is alkalmas lett volna, ha a gyártó „nem butította volna le”. Az érzékelőelemek fotódiódák, amelyeknek válaszfüggvényének grafikonja az eszköz adatlapjában megtalálható. [173] A fotódiódák érzékenységének maximuma éppen 550 nm-en van⁸⁴. A sorkamera adatlapján megtalálható idődiagramokkal egyező vezérlőjelekkel az ernyő 10 cm –es szakaszán, a sorban elhelyezett képpontok fényerejéhez tartozó adatok viszonylag egyszerűen kinyerhetők.

6.2 A mérővevő és adatgyűjtő felépítése, működése

A mérő-vevő és adatgyűjtő tömbvázlata a 23. ábrán látható. Az áramkör központi egysége egy SAB80C535 típusú 8 bites RISC⁸⁵ processzor. A 8 bites adatfeldolgozás esetén a legkisebb felbontást 256dpi –ben határoztam meg. A kísérleti eszközben a maximális felbontáshoz képest a fele akkora felbontás használatára a következők miatt volt szükség: A 256 dpi felbontás ebben az esetben azt jelenti, hogy egy képpont mérete hozzávetőleg 0,1 mm. Az egytized milliméteres felbontás kielégítőnek tűnt a fejlesztés kezdetén, figyelembe véve azt, hogy a program kisebb módosításával és cseréjével a felbontás bármikor a kétszeresére-, a CCD sorkamera cseréjével (TCD1304AP-re), 3,5 szeresére is növelhető. [180].

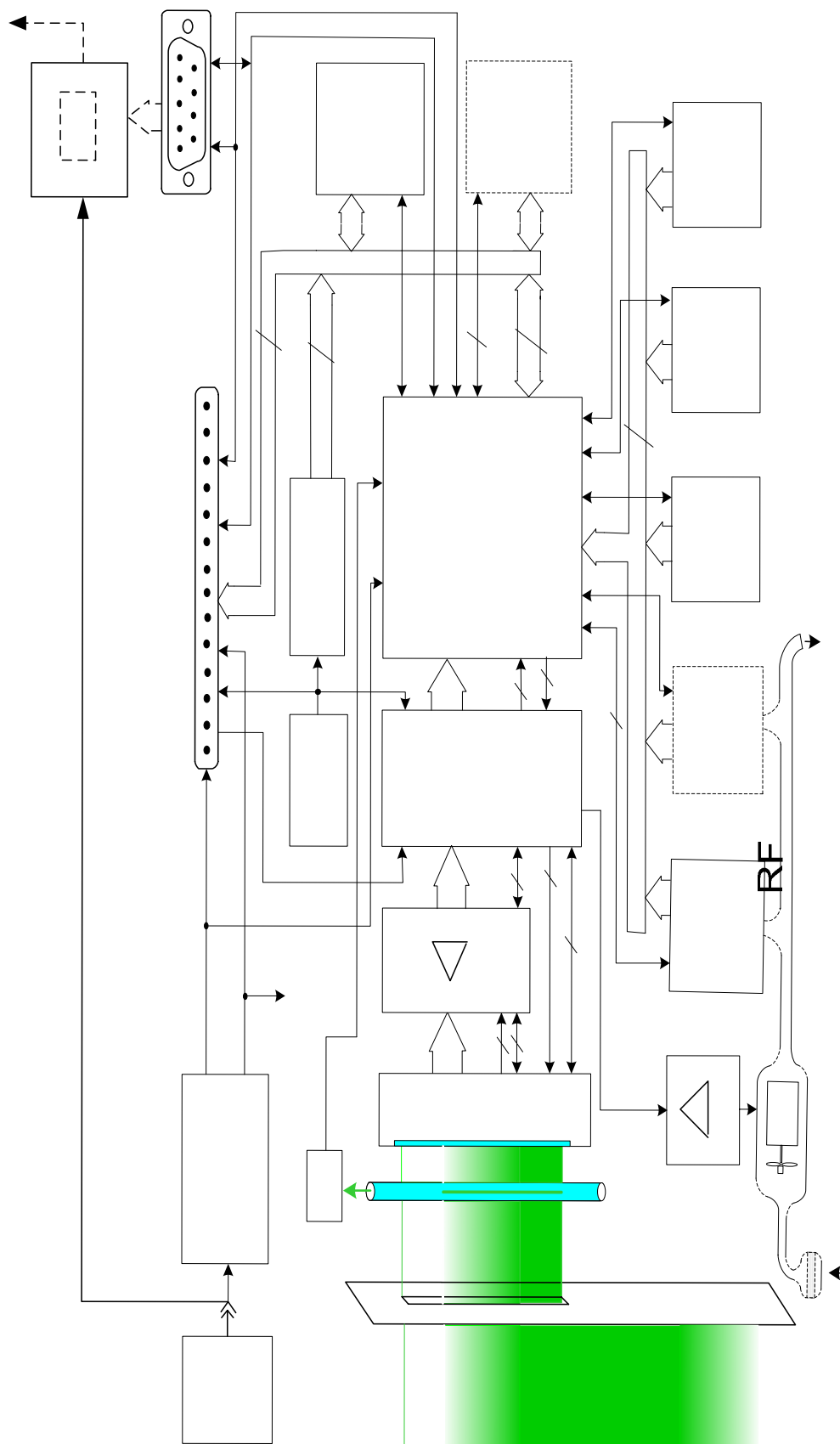
⁸¹ Szkennerekben.

⁸² A **dpi** (dot per inch) az *1 coll (25,4mm)*-en a képpontok számát jelenti jelen esetben.

⁸³ A kézi lapolvasó egyszerű végighúzásával 10cm széles szöveg, vagy kép beolvasására volt alkalmas.

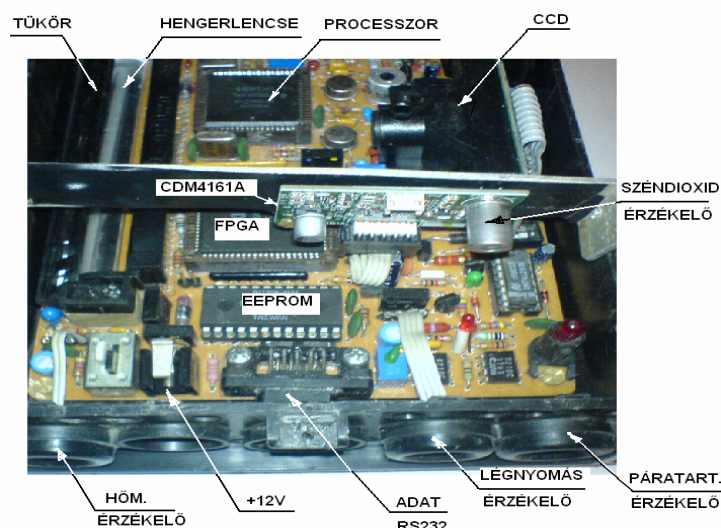
⁸⁴ A kézi lapolvasó a beolvasandó lapfelületet zöld színű fénnel világította meg.

⁸⁵ Reduced Instruction Set Computer: Csökkentett utasítású egy lapkás mikroszámítógép, más szóval mikrovezérlő.



A 18. képen látható kompakt kivitelű, amit a XILINX XC3064 típusú FPGA⁸⁶-nak beépítésével értem el, több diszkrét logikai áramkört is sikerült kiváltani, amelyek a processzor hiányzó belső perifériáit hivatottak helyettesíteni. [181][182]

A mikrokontroller fogadja és feldolgozza a CCD sorkamera, az érzékelők és a valós idejű óra (RTC) jeleit. [183] A mérésadatgyűjtő bővíthető külső programmemóriával is (EP), amennyiben szükség van rá. A külső EEPROM típusú adatmemóriába (ED) kerülnek átmenetileg a kiértékelésre kerülő adatok, amelyeket soros, RS-232 szabvány szerinti porton keresztül kiolvashatók az eszközből, vagy ezen keresztül továbbíthatók. A levegő szén-dioxid tartalmát a mérő-vevő a 19. képen látható CDM4161A típusú előkalibrált széndioxid érzékelő modulja méri, amely úgyszintén a mérésadatgyűjtő dobozában kapott helyet. [184] A levegő szén-dioxid tartalmának ismerete önmagában kevés ahhoz, hogy a fény légköri refrakciójával kapcsolatos összefüggéseket vizsgálni lehessen, ezért a mérésadatgyűjtőt hőmérséklet (TS), páratartalom (HS) és légköri nyomás (PS) mérésére alkalmas érzékelőkkel egészítettem ki.



19. kép
*A mérővevő és adatgyűjtő belső felépítése
(A szerző felvétele)*

⁸⁶ Field Programable Gate Area rövidítése. Ez egy olyan integrált áramkör, amely nagyszámú logikai áramköri funkciót betöltő cellát tartalmaz. A cellák kapcsolatát program segítségével lehet megtervezni és beállítani. Nagyszámú diszkrét logikai áramkör kiváltására kiválóan alkalmas. Kapacitásának a kihasználása csak bonyolult és drága fejlesztőkészletekkel lehetséges, minden más esetben a programozása bonyolult, nehézkes, hosszadalmas és az eredménye egyáltalán nem, vagy csak nehezen ellenőrizhető.

Ezek a doboz előlapi részén kaptak helyet. A hőmérsékletet egy LM 35-, a páratartalmat HS-1100-, a légköri nyomást pedig egy MPXA4100A6U típusú kalibrált szenzor méri. [183][185][186] A ventilátor funkciója (20. kép) az, hogy a külső térből porszűrőn keresztül a doboz belsejében található szén-dioxid érzékelőhöz szállítsa a levegőt, és biztosítsa a dobozon belüli légcserét. A ventilátor a dobozon belül kisebb túlnyomást is előállít, ami megakadályozza a por bejutását.

A 20. képen látható DIP kapcsolósor biztosítja azt, hogy a jelenlegieknél korszerűbb szenzorok is beépíthetők legyenek anélkül, hogy az áramkört újra kelljen tervezni.



20. kép
Felhasználásra kész mérővevő és adatgyűjtő
(A szerző felvétele)

A mérésadatgyűjtőhöz jelenleg egy 9 tűs RS232 csatlakozón keresztül,⁸⁷ egy 27,12 MHz-en működő AM-FM rövidhullámú rádióadó⁸⁸ kapcsolódik, amelynek a feladata az, hogy rádióhullámok útján továbbítsa a dátumból, az időből, a szenzorok által mért, és a fényfolt eltolódásának relatív értékeiből, valamint a tárolt adatokból összeállított 10 bájtos adatsomagot. A kísérleti mérés eszközeibe csak egy sorkamerát építettem be. A program, amelyről a következő alfejezetben röviden még lesz szó, továbbfejlesztése esetén a mérővevő és adatgyűjtő előlapján található RS 232 csatlakozó szinkron soros adatátviteli eszközként beállítható és a későbbiek során használható. A csatlakozón keresztül egy második, külső sorkamera is csatlakoztatható, amely lehetővé teszi a fényfolt elmozdulásának vizsgálatát a függőleges tengely irányába is. A 9

⁸⁷ Az eredetileg soros szinkron adatátvitellel tervezett illesztő-felületből, a többszöri átépítést követően csak a csatlakozó maradt meg.

⁸⁸ RT1994/2

tűs csatlakozóra külső RF modul is csatlakoztatható. A 20. képen látható DIP kapcsolósor előlaphoz közelebb eső első három kapcsolójával a csatlakozó három kivezetésének a funkciója állítható be.

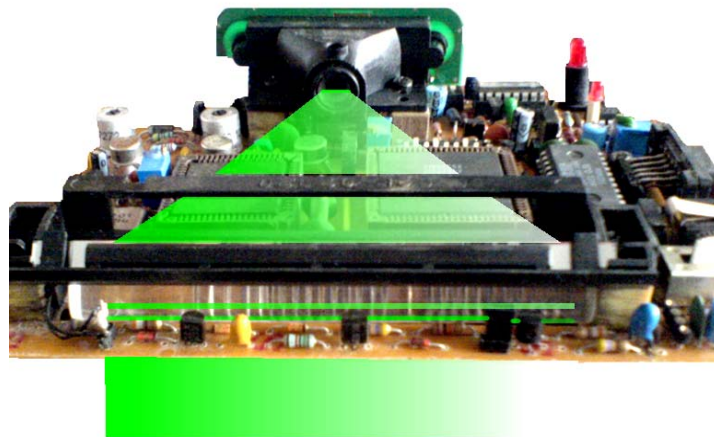
A mérésadatgyűjtő elektromos energiaellátása a (PS) -el jelölt csatlakozón keresztül történik a 2700 mAh kapacitású ceruza akkumulátorokból összeállított 9-12 V-os feszültségforrásból. Az áramkört kifejezetten kültéri használatra készült ezért az időjárás viszontagságainak ellenálló dobozba építettem be.

A hengerlencse (RL) (23. ábra) tengelyének irányába, a tükör-távtartóra ragasztott szilícium alapú fényérzékelő elem (FD) (19 és 21 kép) kimenő jelei indítják a mintavételezés, mérés és adatrögzítés folyamatát, amint a lézerforrás a mérővevő dobozán kialakított ablakot megvilágítja. A fényérzékelő elemnek más funkciója is van, érzékeli a nappali háttérfényt. Az érzékelőelem annak a részben hardver-, részben szoftver úton megvalósított adaptív szabályozásnak része, amely a háttérfénnyel arányos jelt állít elő. Két mérési ciklus között a processzor ennek a jelnek a tárolt állandósult értékét vizsgálja és a lézerefény érzékeléshez szükséges komparálási küszöbszintet aszerint változtatja meg, hogy a külső fény zavaró hatását lehetőség szerint kiküszöbölje. Erős napsütésben, amikor a háttérfény erőssége meghaladja azt a szintet, amelynél a lézerefény intenzitása és a CCD sorkamera spektrális szelektivitásának együttes hatása nem teszi lehetővé a forrás fényének érzékelését „vakítás” következtében a mérési folyamat megszakad.

Ameddig a mérővevőt a keleti domboldalról, az (1) mérőhelyről, a déli fekvésű domboldalra, a (2) mérőhelyre nem helyeztem át (16. ábra) a fent említett jelenség elég gyakran előfordult, főként késő délutáni órákban, napnyugta előtt, amikor a keleti domboldalt merőlegesen érték a napsugarak. Ennek a veszélye a mérés helyszínének bemutatása során ismertetett okok miatt télen nem állt fenn. Az adatvesztés további bizonyítást nyert, és feltételezett okaira a mérési adatok kiértékelésénél még visszatérek. A mérőhely áthelyezésére nem csak az előbb említett okok miatt került sor. A kényszerű és nem elég körültekintően megtervezett eszközelhelyezés kockázataival korábban foglalkoztam.

6.3 A hengerlencse méretezése és beállítása

A lézerforrás fénye az ernyőn és a mérés-adatgyűjtő dobozán kialakított 10 cm hosszú résen keresztül elsőként a *19 és 21.képen* látható hengerlencsét, majd ezen áthaladva, távtartókkal az áramkörlemezre rögzített tükörtartóba foglalt és 45°-ba beállított tükröt éri el. A hengerlencse egy nagyon keskeny vonalszerű képet állít elő, és megakadályozza a fény szóródását azt, hogy a fény a tükör megkerülésével jusson el a sorkamera lencserendszeréig. [187] Ha a doboz belsejébe bejutó fény ellenőrizhetetlenül terjedne, az olyan zavaró hatást eredményezne, hogy értékelhetetlenné tenné az adatokat, és működésképtelenné az eszközt. A tükröt a műanyagból készült tükörtartóval együtt a kézi lapolvasóból szereltem ki (*18 kép*) Mivel a lapolvasóban a fény jól meghatározott úton halad és meghatározott és rögzített fényforrásból származik, valamint a lap felületéről visszaverődve kerül az érzékelőelemekbe, ott hengerlencsére nincs szükség.



21 kép
A fény útja a mérővevőben⁸⁹
(a szerző felvétele)

A kézi lapolvasókban használt CCD kameráknak nagyon pontosan beállított lencserendszere van, amelynek a fókuszpontját a gyártó a bemásolandó lap felületére állította be. A mérővevőben történő felhasználása szükségessé tette volna az újbóli beállítást, viszont a sorkamera, a kiszerezését követően képet a továbbiakban nem szolgáltat, ezért a képességre csak az általa előállított adatsor elemzésével tudtam volna

⁸⁹ A fényterjedés csak illusztráció.

következtetni, amihez képmintára és referencia adatokra lett volna szükség. Ami a kétdimenziós érzékelők esetében egyszerű feladat, képmegjelenítés, szemrevételezés és néhány mozdulattal történő képesség beállítás, az a sorkameráknál tesztkörnyezet és speciális mérőműszerek hiányában megoldhatatlan feladat. A szükséges laborfelszereléssel ugyan rendelkeztem, de sokkal egyszerűbbnek tűnt az, hogy megmérjem a beépítés helyén az objektív fókusz távolságát, majd a hengerlencse fókuszvonalát az ismert fókusz távolságra állítsam be.

A hengerlencse fókusz távolságát számítással határoztam meg. Kiszámításához mindenekelőtt meg kellett határoznom a hengerlencse anyagát és/vagy a törésmutatóját.

A vastag lencsék mátrixából (76), ami translációs; jobb-, és baloldali mátrixokból, valamint a középső refrakciós mátrixból áll, kiszámíthatók a fősíkok helyzete: [188]

$$\begin{pmatrix} 1 & hh \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 + d \cdot P_{12} & d(n_1 / n_2) \\ P & d(n_1 / n_2)P_{23} + n_1 / n_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -h \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (76)$$

A hengerlencsére vonatkozó $(-h)$ és (h) , translációs paraméterek ismeretében meghatározhatók a fősíkok paraméterei, az alábbiak szerint: [188]

$$\begin{aligned} P_{12} &= -(1/r_1)(n_2 - n_1)/n_2; \\ P_{23} &= -(1/r_2)(n_3 - n_2)/n_3; \\ P &= -1/f = P_{23} + dP_{12}P_{23} + (n_2/n_3)P_{12}. \end{aligned} \quad (77)$$

A P_{12} , P_{23} és d paraméterek és a törésmutató ismeretében, a (77) –ből a hengerlencse, mint vastaglencse fókusz távolságát ki lehet számítani. A törésmutató közvetlen mérésen alapuló meghatározására a refraktométer⁹⁰ hiánya miatt nem volt lehetőség. A törésmutató meghatározásához egy közvetett mérési módszert dolgoztam ki.⁹¹

6.3.1 A hengerlencse anyagának és törésmutatójának meghatározása

A hengerlencsénél valamivel nagyobb 30 mm hosszú és vele megegyező anyagú, könnyebben kézbe vehető és megmunkálható végdarabból aszimmetrikus éket dolgoztam ki. A vágás után a felületeket több megmunkálási művelet során csiszol-

⁹⁰ Abbe, Fuess féle refraktométerek. Az utóbbi az Abbe féle refraktométer továbbfejlesztett változata.

⁹¹ Ugyanezzel a módszerrel határoztam annak az ismeretlen anyagnak is a törésmutatóját, amelyből transzmissziós elven működő kompenzátort készítettem a zárttéri mérés eszközeibe, az interferométerbe.

tam, végül políroztam, majd a 21. képen látható műhelymikroszkóppal megmértem a geometriai méreteit.

Az ék szögei a következők voltak: $\gamma = 30^{\circ}48'$, $\delta = 62^{\circ}16'$, $\varepsilon = 86^{\circ}48'$, alapél hossza $k=29,5\text{ mm}$, magassága $h=13,5\text{ mm}$; (22. kép, jobb oldalon).

Mikroszkóp alatt, a tárgylemezre helyezett papírlapon golyóstollal néhány papírróst megfestve, apró pontot rajzoltam. Az éket a legnagyobb oldalhosszához tartozó téglalap alakú felületével úgy helyeztem rá a papírlapon lévő pontra, hogy a 24. ábrán látható A , O és H pontok egybeessenek.



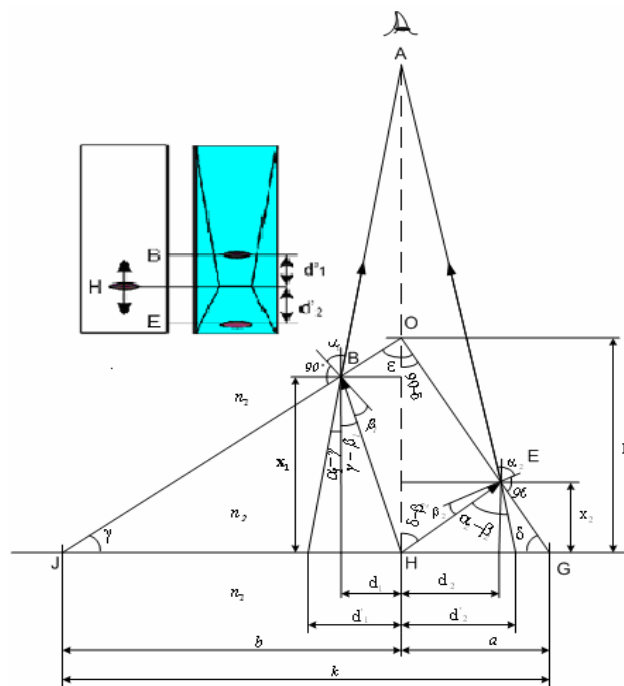
22. kép
Műhelymikroszkóp és a mérés tárgya
(a szerző felvétele)

Az ábrán az A pont a megfigyelés helye. Az O pont az ábrán a megfigyelés helyéhez legközelebb eső él egy pontját jelöli. Ennek az élnek nagyjából a közepére beállítottam a papírlapon lévő, H -val megjelölt pontot. Mivel a pont az ék ráhelyezésekor eltűnik, a ponton keresztül húzott, az O pont helyén található éllel egybeeső segédvonal segített a beállításban.

Az éken keresztül az A pontból vizsgálva a papírlapon lévő pontot, helyette a pont két látszólagos képe jelent meg a B és E -vel jelölt helyeken. Az ék mellett a papírlapon megjelöltem a két látszólagos pont helyét, majd ezt követően leemeltem az éket a papírlapról. A papír síkjával nagyobb szöget bezáró él mentén a pont látszólagos képe nagyobb, (d'_2) távolságra-, míg a kisebb szöget bezáró él mentén a pont másik látszólagos képe kisebb, (d'_1) távolságra került a H ponton átmenő segédvonalától. A két távolságot mérőmikroszkóppal megmérve, két olyan adathoz jutottam, amelyek

segítségével az ék anyagának törésmutatóját ki tudtam számítani. Önmagában az egyik oldalon megjelenő kép is elegendő lett volna a törésmutató kiszámításához, a másodikra csak azért volt szükség, hogy a kettőből képezett átlagértékkel a parallaxisból adódó hibát valamelyest ki tudjam küszöbölni. A parallaxis hibán kívül a mérés pontosságát az is befolyásolta, hogy a megfigyelés helyét nem lehet a végtelenbe helyezni. A pontosságát az ék geometriai méreteinek csökkentésével lehet növelni, ugyanis ekkor a (d_1) és (d_1') távolságok közti különbség csökken, de természetesen ezek a méretek sem lehetnek zérusak.

A számítások további kiinduló adatai a következők voltak: $d_1'=2,37$ mm, $d_2'=3,42$ mm. A törésmutató kiszámításához szükséges összefüggések levezetését a továbbiakban részletesen ismertetem:



24. ábra

*A törésmutató mérésének elve
(A szerző rajza)*

A belső szögek és a törésmutató meghatározásához az alábbi egyenleteket írtam fel: $\beta_1 = f(\delta, d_1, h)$ és $n_2^* = f(\gamma, \delta, d_1, h)$. A 24. ábra jelöléseivel, az OHG \triangleright derékszögű háromszögből az **a** oldal:

$$a = \frac{h}{\operatorname{tg} \delta} = 7,057629444 \text{ mm}; \quad (78)$$

$$b = k - a ; \quad (79)$$

A (78)-at (79)-be behelyettesítve, kapjuk:

$$b = 22,44237056 \text{ mm} . \quad (80)$$

Az OJH \triangleright háromszögben felírható a két háromszög hasonlósága, az alábbiak szerint;

$$\frac{h - x_1}{d_1} = \frac{h}{b} ; \quad (81)$$

A (81)-ből x_1 -et kifejezve:

$$x_1 = \frac{h \cdot (b - d_1)}{b} ; \quad (82)$$

A (82)-be az eddigieket behelyettesítve:

$$x_1 = 12,07434847 \text{ mm} . \quad (83)$$

Felírható továbbá:

$$\operatorname{tg}(\gamma - \beta_1) = \frac{d_1}{x_1} ; \quad (84)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{tg}\alpha \pm \operatorname{tg}\beta}{1 \mp \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}\beta} ; \quad (85)$$

A (85) felhasználásával (84)-ből kifejezhető β_1 , az alábbiak szerint:

$$\beta_1 = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg}\gamma - \frac{d_1}{x_1}}{\frac{d_1}{x_1} \cdot \operatorname{tg}\gamma + 1} \right) ; \quad (86)$$

A behelyettesítés és a számítások elvégzése után kapjuk:

$$\beta_1 = 19,69494152^\circ = 19^\circ 41' ; \quad (87)$$

Ha a korábbiak szerint a megfigyelés helyét, az A pontot képzeletben a ∞ -be helyezzük, akkor $(\alpha_1 - \gamma) \rightarrow 0$, azaz $\alpha_1 \cong \gamma$. Ez könnyen igazolható szerkesztéssel is. Ennek megfelelően: $\alpha_1 = 30,8^\circ$.

A részeredmények ismeretében a Snellius–Descartes törvényből kifejezve n_2^* -t kiszámítható az ismeretlen anyag törésmutatója:

$$n_2^* = \frac{n_1 \cdot \sin \alpha_1}{\sin \beta_1} ; \quad (88)$$

ahol: n_1 a normálállapotú levegő törésmutatója: $n_1=1,000294$, amelyet (90)-be helyettesítve:

$$n_2^* = 1,519807 \quad (89)$$

A d_2 -re vonatkozó egyenletek is felírhatók az alábbi függvénykapcsolatok figyelembevételével: $\beta_2 = f(\delta, d_2, h)$, $n_2^* = f(\gamma, \delta, d_2, h)$.

$$\operatorname{tg}(90 - \delta) = \frac{d_2}{(x_1 - x_2) + (h - x_1)}; \quad (90)$$

$$\operatorname{tg}(\delta - \beta_2) = \frac{d_2}{x_2}; \quad (91)$$

A (90)-ból kifejezve x_2 -t kapjuk:

$$x_2 = h - \frac{d_2}{\operatorname{tg}(90 - \delta)}; \quad (92)$$

A (91)-ből kifejezve d_2 -t és (92)-be helyettesítve, a számítások elvégzése után, kapjuk:

$$x_2 = 6,958143366 \text{ mm}. \quad (93)$$

A (88) ismételt felhasználásával (91)-ből kifejezhető $\operatorname{tg}\beta_2$:

$$\operatorname{tg}\beta_2 = \frac{x_2 \cdot \operatorname{tg}\delta - d_2}{x_2 + d_2 \cdot \operatorname{tg}\delta}; \quad (94)$$

A (94)-ből β_2 -t kifejezve:

$$\beta_2 = \operatorname{arctg} \left\{ \frac{\operatorname{tg}\delta \cdot \left[h - \frac{d_2}{\operatorname{tg}(90 - \delta)} \right] - d_2}{h - \frac{d_2}{\operatorname{tg}(90 - \delta)} + d_2 \cdot \operatorname{tg}\delta} \right\}; \quad (95)$$

A (95)-ba történő behelyettesítések és a számítások elvégzése után:

$$\beta_2 = 36,22540215^\circ = 36^\circ 13'. \quad (96)$$

Ha az A pontot a ∞ -ben képzeljük el, akkor $d_2 \cong d'_2$ és felírható:

$$\operatorname{tg}(\alpha_2 - \beta_2) = \frac{d_2}{x_2} = \frac{d'_2}{x_2}; \quad (97)$$

A (97) –ban a (85) ismételt felhasználásával, a két szög különbségének tangense felírható a szögfüggvények összegével és különbségével, amiből α_2 is kifejezhető:

$$\alpha_2 = \arctg \left(\frac{\frac{d_2}{x_2} + \operatorname{tg} \beta_2}{1 - \frac{d_2}{x_2} \cdot \operatorname{tg} \beta_2} \right); \quad (98)$$

A (98)-be behelyettesítve a (93), (96) és d_2 -t, α_2 -re kapjuk:

$$\alpha_2 = 63,39999998^\circ = 62,4^\circ = 62^\circ 24'. \quad (99)$$

Figyelembe véve azt, hogy; $\alpha_2 \cong \delta$, a Snellius – Descartes törvény ismételt felhasználásával kiszámítható n_2^{**} . Így az ismeretlen anyag törésmutatója:

$$n_2^{**} = \frac{n_1 \cdot \sin \alpha_2}{\sin \beta_2}, \quad (100)$$

A (100)-ba behelyettesítve, n_2^{**} -re kapjuk:

$$n_2^{**} = 1,51348. \quad (101)$$

A törésmutató számtani középértékét a következő összefüggés adja meg:

$$n_2 = \frac{n_2^* + n_2^{**}}{2}; \quad (102)$$

A (89) és (101)-nél kiszámított értékeket behelyettesítve és a számításokat elvégezve, a törésmutató:

$$n_2 = 1,516643. \quad (103)$$

Összehasonlítva néhány ismert műanyag törésmutatójával megállapítottam azt, hogy; $n_{PC} > n_2 > n_{PMMA} > n_{MA}$ ahol: n_{PC} - a polikarbonát törésmutatója, n_{PMMA} - a polimetilmetakrilát, n_{MA} - a metakrilát (MA) törésmutatója. Az egyenlőtlenségben a számított érték a fehér fényre-, minden más az 532 nm-es monokromatikus, zöld fényre vonatkozó törésmutató érték. [189] A polikarbonát kimagaslóan nagy kromatikus diszperziója miatt

($\frac{dn}{d\lambda} = -0,28510 \frac{1}{\mu m}$) a másik kettővel ellentétben: $-0,1207 \frac{1}{\mu m}$ (MA) és $-0,203 \frac{1}{\mu m}$ (PMMA), arra enged következtetni, hogy egy olyan anyagról van szó,

amelynek a törésmutatója a monokromatikus fényre vonatkoztatott polimetilmetakrilát és polikarbonát között van, de a PMMA-hoz valamivel közelebb van, mint a polikarbonáthoz. Fehér fény esetében a PMMA törésmutatója feltehetően jól közelíti a számított értéket és az anyaga valószínűleg polimetil-metakrilát. [190]

A (102)-ben meghatározott törésmutató értéket figyelembe véve, a behelyettesítéseket és számításokat elvégezve, és az egyszerűsítés után a hengerlencse fókusztávolsága: $f = \frac{3,1042}{2} d = 1,5521 \cdot d$ A hengerlencse átmérője 10mm , így a fókusztávolsága: $f = 15,521\text{ mm}$.

A 21. képen látható textilbakelitből készült két távtartó segítségével a CCD sorkamera fókusztávolságát a hengerlencse fókuszcsonkjába állítottam. A mérő-vevő és adatgyűjtő elhelyezése, rögzítése a vétel helyén a 23. képen látható.

Az optikai csatorna vétel oldali eszközei két egymástól is elkülönülő áramköri egységből állnak. A fehér fedelű, fekete színű dobozba építettem be a mérővevőt, a világosszürke dobozba pedig a rövidhullámú rádióadót. (23. képen, a jobb oldalon)

A továbbítandó adatok az RS232 csatlakozón keresztül a rádióadó modulátorába kerülnek. A rádióadó hozzávetőleg 1 W teljesítményű rövidhullámú AM –FM adó⁹². A rádióadó dobozában kapott helyet az akkumulátorcsomag is, amely mindkét egység tápellátását biztosítja. A két áramköri egységet csavarok rögzítik az ábrán látható zártszelvényből készült talpas tartószerkezeten. A tartószerkezetet betonba ágyazott csavarokkal rögzítettem a beton talpazaton. [191] A beállítást megelőzően ugyanerre a tartószerkezetre rögzítettem a 22. kép bal oldalán látható táblát, amely fényviszszaverő fehér festéssel van lefestve. Az ernyőt a beállítás után eltávolítottam és a helyben maradó eszközöket, amennyire megoldható volt, álcáztam.



23. kép
*Telepített mérővevő és adatgyűjtő a vétel helyén
(A szerző felvétele)*

⁹² RT 1994/1-2

6.4 Következtetések

Költség-hatékony, gyors és rugalmas eszközfejlesztés ma kizárólag programvezérelt, mikrovezérlő alapú rendszerekkel képzelhető el.

A mérővevő és mérésadatgyűjtő fejlesztésével sikerült olyan adaptív megoldásokat is magába foglaló, optikai vételoldali és rádiófrekvenciás adóoldali mérőeszközt kifejleszteni, amelynek segítségével a lézerfény légköri refrakciója vizsgálható. Optikai mérésekhez a CCD sorkamerák érzékelőelemként jól használhatók, egyszerű és olcsó megoldást jelentenek, amennyiben az adatfeldolgozás korszerű és gyors eszközeivel egészülnek ki.

A célműszerek hiánya nem mindig jelent áthidalhatatlan akadályt az eszközfejlesztés során. A matematika eszköztára és a megfigyelésen alapuló egyedi módszerek olyan közvetett mérési eljárás kidolgozására adnak lehetőséget, amelynek segítségével ismeretlen szilárd optikai közeg törésmutatója viszonylag egyszerűen és pontosan meghatározható.

7. FEJEZET

A MIKROVEZÉRLŐ PROGRAMJA

A mérésadatgyűjtő hardvereleminek működéséhez és a processzor belső erőforrásainak használatához és rendszerbe illesztéséhez szükség van a programra, más szóval szoftverre. Program nélkül nem valósulhat meg a mérővevő hardverelemeinek összehangolt működése, emellett a korábban ismertetett részegységek teljes, vagy részleges kihasználását is a program biztosítja. A program érintőlegesen ismertetését és működésének rövid áttekintését főként az indokolja, hogy a hardver felépítésének vizsgálata során több olyan részlet is rejtve maradt, amelyek megismeréséhez elengedhetetlenül szükséges a program felépítésének áttekintése.

A mérővevő működését egy könnyen bővíthető, moduláris szerkezetű program biztosítja, amely nagyjából Assembly programnyelven készült. A mikrovezérlő programja a következő funkcionális elemekből épül fel:

1. a fotódetektor állapotát lekérdező programrész;
2. sorkamera kezelő programrész;
3. aritmetikai műveleteket végző programrész;
4. szén-dioxid érzékelőt kezelő programrész;
5. a hőmérséklet mérésére szolgáló programrész;
6. páratartalom vizsgáló programrész;
7. légköri nyomást vizsgáló programrész;
8. az időalap lekérdezését és tárolását végző programrész;
9. a telepfeszültség ellenőrzését végző programrész;
10. a ventilátor részleges kezelését biztosító programrész.

Az egyes programrészek végrehajtásának sorrendje az elágazásokban előírt feltételektől függően a fenti sorrenddel megegyezhet, de attól el is térhet.

1. A fotódetektor állapotát lekérdező programrész

A programrész vizsgálja a fényérzékelő elem (FD) állapotát, beolvassa a fényerősséggel arányos feszültségértéket és a 8 bites A/D átalakítója segítségével az analóg jelet digitális adatokká alakítja és tárolja. Ezeket az adatokat a program a háttérfény

zavaró hatásának kiküszöböléséhez is felhasználja, amely az előző fejezetben is említett adaptív szabályozás által valósul meg.

A fotódetektor jeleit feldolgozó komparátor kimenő jelszintje a változó referenciafeszültségét meghaladó fényerőváltozás hatására akkor változik meg, amikor ez a jelszint a referenciafeszültséget meghaladja. A kimeneti jelszint váltást a processzor a mérést indító (start) jeleként értelmezi.

A programon belül, attól függően, hogy teljesül-e az előírt feltétel, vagy visszatér és a feltétel teljesüléséig ismétli az érzékelő lekérdezését, vagy kilép onnan és a program többi utasítását hajtja végre.

2. Sorkamera kezelő programrész

Feladatai a következők:

- előállítja az adatátvitelhez szükséges ütemező jeleket;
- beolvassa az FPGA-ból a CCD sorkamera bájtos adatait;
- az adatokat az adatmemóriába írja.

A soros adatokat előállító CCD sorkamera egy önálló, a mérésadatgyűjtő többi áramköri egységétől teljesen független áramköri egység. Hibamentes adatátvitel csak akkor lehetséges, ha ezek szinkronban működnek. A szinkronizálás megszakításkezeléssel történik, amiben a CCD sorkamera a legmagasabb prioritású eszköz. A programrész csak az adatátvitelt szabályozó és engedélyező jeleket állítja elő. Amint az FPGA-n keresztül előállított adat rendelkezésre áll és stabil, azt a mikrovezérlő az *A portján* keresztül beolvassa és bájtonként az adatokat a belső adatmemóriájába írja.

A CCD sorkamera minden képpontjához egy bájtnyi adat van hozzárendelve. Egy teljes sor kiolvasását követően 2 KB-nyi adat keletkezik (2048 képpont- 512 dpi felbontás esetén). Amikor a lézerforrás percenként továbbít egy fényimpulzust, akkor 24 óra alatt hozzávetőleg 2,88 MB –nyi adat keletkezik. Megjegyzem, ez az adatmennyiség csak a sorkamerából származik, és nem tartalmazza a dátum, idő, és a többi szenzor adatait. Több hét, vagy hónap alatt könnyen kiszámítható, jelentős adatmennyiség képződhet, még így is. Ilyen adatmennyiség tárolásához egyfelől nagyon nagy tárolókapacitásra lenne szükség, másfelől egy olyan utó-adatfeldolgozásra, amelyeket a mikrokontroller is kényelmesen el tud végezni.

A műveleteket, amelynek eredményeképpen ez az adatmennyiség végül $1,44\text{KB}/24 \text{ óra}$ –ra csökkent, az aritmetikai programrész működésénél valamivel részletesebben ismertetem. A processzor a korábban említett adatmennyiség 2000-szeres csökkentéséhez szükséges műveleteket kényelmesen el tudja végezni és az eltolódás mértékét megadó bájtos adatokat elő tudja állítani. Az eltolódás mértékét megadó adat előállítható:

- egy bájtos egész számként, ahol a bináris egység $0,1 \text{ mm}$ -t jelent. Méréstartomány; $00,0 \div 25,5 \text{ mm}$, pontosság: $0,1 \text{ mm}$.
- fixpontos bájtos adatként, ahol az alsó 4 bit a tizedes részt, a felső 4 bit az egész részt adja. A két négy bites adatcsoportot képzeletbeli tizedes vessző választja el egymástól. A méréstartomány: $00,0000 \div 15,9375 \text{ mm}$, a pontosság: $0,0625 \text{ mm}$.

A tizedes vessző a bináris/decimális átalakítást követően kerül elhelyezésre a megfelelő helyi-értéken. Az egy bájtos adatok tagolásán és értelmezésén következtében nagyon sok múlik.

3. Aritmetikai műveletek alprogram:

Feladatai a következők:

- A CCD sorkamera érzékelőelemeit megvilágító, a fény erősségével arányos egy képsornak megfelelő adatcsoporton (2048 bájt) páronként aritmetikai-, és/vagy logikai, összehasonlító műveleteket végez. A műveletek eredményeképpen az 1 bájt adatot a külső adattárolóba írja. Ebben az egy bájtnyi adatban benne van az, hogy milyen mértékben és irányba mozdult el a fényfolt *a korábbi helyzetéhez képest*. A külső adatmemóriából kiolvasott adatok egyik része a mindenkori relatív elmozdulásokat tartalmazza, amelyek a fényerőt leíró adatoktól teljesen függetlenek. Az utóbbiak felülírása a következő mérési ciklusban meg is történik.
- A $0 \div 100 \%$ relatív páratartalom változás hatására az időzítő számláló által előállított; $3B \div 79$ hexadecimális tartományba eső regisztertartalmat a $0 \div 64$ hexadecimális tartományt a $0 \div 100$ decimális értéktartománynak

felelteti meg, más szóval transzformálja. Ez az értéktartomány a $0 \div 100$ % relatív páratartalomnak felel meg. Az eredményt a külső adatmemóriába írja.

4. Szén-dioxid érzékelőt kezelő programrész:

A szén-dioxid érzékelő által előállított $0,4 V \div 4,0 V$ ⁹³ tartományba eső analóg jeleket digitalizálja és a külső adatmemóriába írja. Ez egy csonka 2×8 bit (12 bit). [83]

5. Hőmérséklet mérésére szolgáló programrész,

A hő-érzékelő $10 mV/^\circ C$ kimenő analóg jelét a CA3130A típusú műveleti erősítő erősíti. A digitalizált analóg jeleket a külső adatmemóriába írja. [192]

6. Páratartalom mérésére szolgáló programrész,

A $0 \div 100$ % relatív páratartalom változás hatására az érzékelőelemben $163 \div 200 pF$ kapacitásváltozás jön létre, amelyet egy nagyfrekvenciás oszcillátor $20 MHz$ -es órajelének felhasználásával változó amplitúdójú analóg jelekké alakít át. A jeleket digitalizálja és a 8 bites (7 bites) adatokat a külső adatmemóriába írja.

7. Légköri nyomást kezelő programrész,

A nyomásérzékelő $20 \div 105 kPa$ tartományban $0,3 \div 4,9 V$ egyenfeszültséget állít elő, amelyet a processzor 8 bites A/D⁹⁴ átalakítója alakít át bájtos adatokká. A programrész ezeket az adatokat beolvassa és a külső adatmemóriába írja.

8. Időalap kezelő és tároló programrész,

Feladata a maszkolható megszakítással kezelhető DS12R885 típusú valós idejű óra, (RTC)⁹⁵ párhuzamos, bájtos adatainak fogadása és külső adatmemóriába írása. [193]

9. Telepfeszültség ellenőrző programrész,

⁹³ 400-4000ppm szén-dioxid koncentrációnak felel meg. (1ppm = 10^{-4} %)

⁹⁴ A/D jelentése; analóg- digitális konverter. A processzor belüli, vagy kívüli áramköri egység, amely az analóg jeleket digitális jelekké alakítja. (lásd. a processzor adatlapját)

⁹⁵ A Real Time Clock angol kifejezés kezdőbetűiből alkotott mozaikszó.

Feladata, hogy jelezze azt, ha a $9\div 12$ V-os akkumulátorcsomag kapocsfeszültsége a kritikus $7,6$ V alá csökken. Ez az a küszöbérték, amely alatt a mérést és adattárolást fel kell függeszteni. A telep kapocsfeszültségét a processzor az A/D átalakítón keresztül vizsgálja. Ha az akkumulátor csomag kapocsfeszültsége az említett érték alá csökkent, akkor a *20. képen* látható nagyobb méretű LED világít, jelezve azt, hogy az akkumulátorokat fel kell tölteni, vagy ki kell cserélni.

A riasztást kiváltó programrész, amely a mérő-vevő programcseréjét követően a vészjelzés továbbítására is alkalmas lesz, időben jelzi majd, ha a telepfeszültség közelíti a kritikus küszöbértéket. A fotódetektor (FD) állapotát lekérdező programrészhez hasonlóan egy feltételes elágazásra adódik át a vezérlés, amely feltételtől függően (telepfeszültség kisebb, vagy nagyobb a kritikus értéknél), engedi a mérőprogram futását, vagy tiltja azt és a LED-et felkapcsolja. Későbbi programcserével ennek a programrésznek a prioritása megváltozik.

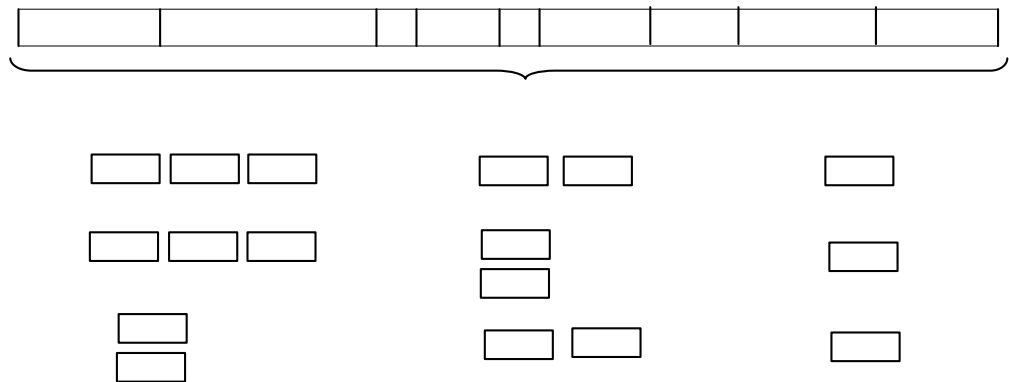
10. Ventilátorkezelő programrész,

A szén-dioxid érzékelő modul válaszidejét figyelembe véve, a levegőt szakszerűen áramoltatni kell a közelében. A processzor a napfény zavaró hatásának csökkentését szolgáló adaptív szabályozás mellett ebben az esetben is egy második adaptív szabályozást valósít meg. A programrész vizsgálja két megvilágítás közt eltelt időt. A következő megvilágítást megelőzően hozzávetőleg tizenkét másodperccel a ventilátort öt másodpercig működteti. Erre energiatakarékossági okok miatt volt szükség, arra az esetre, ha az eszköz hosszú ideig egy helyben marad. A mérővevő és adatgyűjtő viszonylag magas áramfelvétele miatt ez a funkció az eddigiek során, nagyon hasznosnak bizonyult.

7.1 Az adatkeret felépítése, szerkezete

A fényfolt eltolódásának mértékét a mérőprogram fixpontos számként állítja elő nemcsak azért, mert az egy bájtnyi adat pontossága így nagyobb, hanem azért is, mert a sorkamera maximális felbontásának kihasználása esetén (512 dpi) erre az adatformátumra a későbbiekben is szükség lesz. A mérőprogram azt követően, hogy a CCD sorkamera egy adatsorát kiolvasta, az $1kB$ -nyi adatot későbbi műveletvégzés céljából átmenetileg az adattárolóba írja. A következő képpontsor beolvasása után ezen,

és a korábban beolvasott adatokon aritmetikai és logikai műveleteket végez. A műveletek végső eredménye a korábban említett *1 bájtnyi* adat, amely azt adja meg, hogy milyen irányba-, és hány tized milliméterrel tolódott el a fényfolt korábbi helyzetéhez képest.

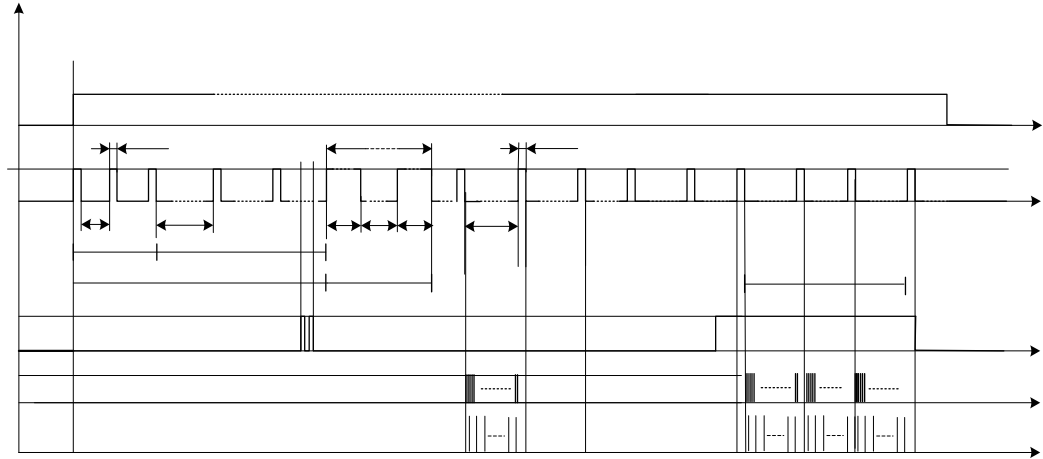


25. ábra
A 10 bájtos adatkeret felépítése
(A szerző rajza)

A mikrovezérlő az érzékelők, az RTC és a sorkamera által előállított adatokat rögzített hosszúságú adatkeretekbe foglalja. Egy sornak megfelelő adatkeret (frame) felépítése a 25. ábrán látható. A sorfolytonos bináris adatok jelenleg aszinkron adatátvitel útján továbbíthatók. Az adatátvitel formáját a későbbiekben kapcsolóval lehet majd kiválasztani. A K1 kapcsoló állásától függően, (26. ábra) a lézerrész által előállított 2×1 s időtartamú fényimpulzus, vagy indítja a mérési periódust követően az adatletöltést, vagy sem. Ha a K2 kapcsoló érintkezői tartósan zárt állapotban vannak, akkor kézi beavatkozásra vár és a mérési periódust követően nem történik meg automatikusan az adatátvitel. Ebben az esetben a K2 kapcsolót 2 s-on belül legalább kétszeri ki és bekapcsolása után megtörténik az adatátvitel. Ezt szerviz üzemmódnak neveztem el. A szerviz üzemmód lehetőséget ad a kézi beavatkozásra és az adattovábbítás ütemezésére. Ennek köszönhetően a fényforrástól távol, a vétel helyén is lehet méréseket és megfigyeléseket végezni. A rádióadó és rádióvevő párral a lézerrész távvezérlésére is van lehetőség. Amennyiben a K2 kapcsoló érintkezői tartósan nyitott ál-

Dátum
13 bit

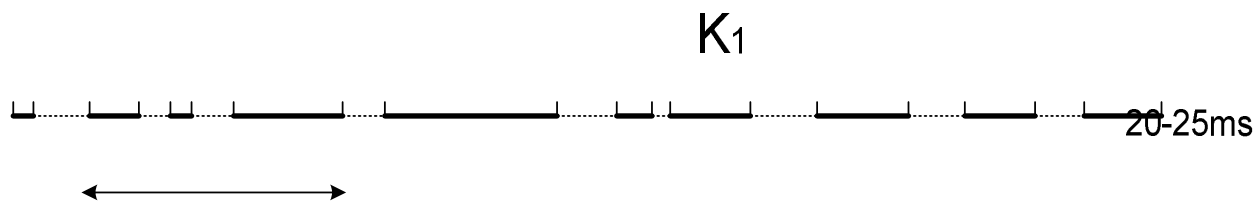
tikusan megtörténik. A továbbított adatok a vétel helyén egy 128 MB-os külső adat-hordozóra kerülnek. (16. kép)



26. ábra
Az adatátvitel szinkronizálása
(A szerző rajza)

7.2 A mérési adatok kiértékelése és feldolgozása

Az eszközfejlesztés első szakaszának befejezését követően, 2012. október- novemberben üzembe helyeztem a mérés eszközeit és elvégeztem az első próbaméréseket. Az adatmentés kezdetleges formája miatt a mérésadatgyűjtő által tárolt adatok csak egy részét sikerült ekkor még tárolni. A 2012. november és 2013. március közötti időszakból, a folyamatos eszközfejlesztés és a gyakori adatvesztések miatt, viszonylag kevés értékelhető adat maradt meg, de azok is alkalmasak voltak arra, hogy a továbbfejlesztés irányát meghatározzák.



27. ábra
Adatgyűjtési periódusok
(A szerző rajza)

4s

Ezt követően a mérésadatgyűjtőt további érzékelőkkel egészítettem ki, ~~K3i 1 0 0~~ mérőprogram gyakori változtatását és cseréjét tette szükségessé. Minden újabb szen-

Mérés

zorral történő bővítés a korábban ismertetett adatformátum átalakításával járt együtt. A mérésadatgyűjtő többszöri átépítése egy időben elhúzódó fejlesztést eredményezett.

Folyamatos méréseket csak 2013. április közepétől kezdődően tudtam végezni. A mérések második szakaszát 2014. január 31.-én fejeztem be. (27. ábra) Ebben a mérési időszakban jelentős mennyiségű adat keletkezett, aminek feldolgozását gépesítenem kellett. A feldolgozás során az adathalmazt tagoltam és elvégeztem a szükséges átalakításokat, mivel az alábbi 80 bit hosszúságú, összefüggő bináris adatsor ebben a formában még nehezen értelmezhető.

```
1101 0111 01101 01100 011000 000101 1 0010 0100 0 010111 1100 0110010 001000000001 00110111111
```

Az adatsorból akkor nyertem értelmezhető információ, amikor tagolttá vált és decimális számalakot öltve kiegészült a szükséges mértékegységekkel, az alábbiak szerint:

- 1101 - *évszám* - a 13 decimális szám megfelelője, ami a 2013 évnek felel meg;
- 0111 - *hónap* - a 7 decimális szám megfelelője, amely a 7. hónapot, azaz júliust jelenti;
- 01101 - *nap* – a 13 decimális számot jelenti, amely az adott hét napja;
- 01100 - *óra* – 12;
- 011000- *perc* – 24;
- 000101- *másodperc* – 5;
- 1 - *eltolódás iránya (előjelbit)* - 1 jelentése *negatív*, azaz balra tolódott el;
- 0010 - *eltolódás mértéke (egész rész)* – jelentése: 2 mm-rel;
- 0100 - *eltolódás mértéke (tört rész)* – jelentése: 0,25 mm, azaz összesen 2,2 mm-rel;
- 0 - *hőmérséklet előjelbit* - 0 jelentése: *pozitív*;
- 010111- *hőmérséklet (egész rész)* - 23°C;
- 1100 - *hőmérséklet (törtrész)* - 0,75°C, azaz összesen 23,7°C;
- 0110010- *relatív páratartalom* - 50 %;
- 001000000001- *szén-dioxid tartalom* - 513 ppm;
- 00110111111 - *légtörési nyomás* - 1014 hPa.

A fenti tagolt adatsor a 2013. július 13.-án 12:24:05 h-kor, egy próbamérés során rögzített adatsor, amely tartalmazza a relatív fényfolt eltolódást, hőmérsékletet, páratartalmat, szén-dioxid tartalmat és relatív légnyomás adatait egy 10 bájtos adatkeret-

be foglalva. Az 6. sz. mellékletben a későbbi, folyamatos mérés során rögzített adatok láthatók, amelyekben eddig tisztázatlan okok miatt elég sok hiba fordul elő. Vélhetően RF interferencia következtében szakadt meg átmenetileg a rádió-kapcsolat. Ez természetesen csak feltételezés részéről, amelyet bizonyítani így utólag nem lehet.

7.2.1 Az eltolódás mértékének meghatározása

Az adatok további feldolgozását Excel táblázatkezelőben végeztem. Egy előfeldolgozást követően, a táblázat függvényei segítségével az adatsorokat a fentiek szerint, tagolt adatsoportokká alakítottam, majd bitekre bontottam. A biteket segédcellákban helyeztem el és a cella csoportok adatain elvégeztem a bináris – decimális átalakítást. (6. sz. melléklet) A segédtábla használatával egyszerűbb és áttekinthetőbb volt a fejlesztés, mint a jóval tömörebb, de jóval nehezebben áttekinthető, összetett függvények használata esetén.

A 6. sz. melléklet, eredménytáblázatába foglalt relatív értékek a következőképpen értelmezhetők:

A 3. táblázatban egy másik periódusra vonatkozó néhány adatot tüntettem fel, amelynek utolsó előtti oszlopában a relatív pozíciót 0-ra állítottam, annak érdekében, hogy a 28. ábra is egyszerűbb legyen. A 28. ábrán látható nyilak a fényfolt 3. táblázat adatainak megfelelő mozgását jelölik. Ezek a koordináta-rendszerben az elmozdulás irányvektorainak is tekinthetők. A kiindulás helye legyen A. A fényfolt a 3. táblázat „Eltol.mért” oszlop adatai alapján a nyilakkal jelölt útvonalat járja be. Az oszlop első cellája tartalmazza bázisviszonyszámot, a további cellák a láncviszonyszámokat.

A táblázat cellái két mérés közti helyváltoztatás vízszintes vetületének abszolút értékeit tartalmazzák. Ezekből az adatokból, a táblázat függvényei a „Rel.eltol” oszlopban, kiszámolják a függőleges tengelyhez viszonyított eltolódás mértékét. A számítás-, és differenciaképzés eredményét a 28. ábrán is feltüntettem. A bázis, amit az ábrán a függőleges tengely jelöl nem egyéb, mint a rögzített CCD sorkamera, vagy az a referencia pont, amelyről korábban is szó volt.

A mérések eredményei azt mutatják, hogy a lézerefény refrakciójának iránya és mértéke kiszámíthatatlanul változik, az eltolódást leíró alapadatok és az állapotjelzők változása közt látszólag semmilyen összefüggés sincs. Ha viszont alaposabban megvizsgáljuk a 6. melléklet 4. táblázatát a „Rel. eltol” oszlopban a különbségképzés mű-

veletének eredményeit, az előjeles bázis adatok alapján nem nehéz felismerni a leggyakoribb törvényszerűséget, ami a sztochasztikus rendszereket jellemzi, egyféle *periodicitást*. A szemléltetés érdekében a cellák kitöltésére különböző színeket használtam. Emellett néhány színárnyalattal megjelöltem a negatív-, és pozitív értékekhez tartozó maximumokat és minimumokat és néhány közbenső értéket. Ezáltal sikerült kiemelni az említett összefüggéseket.

3. táblázat: *A differenciaképzés alapadatai.*

Év.	Hó.	Nap.	Óra.	Perc.	Mp.	Eltol.l.r.	Eltol.mért [mm]	Hőm előjel	Hőmérs. °C	Páratart %	Széndioxid ppm	Légk.nyom hPa	Rel.eltol [mm]	Tetőfel.hőm [°C]
2013	8	11	13	9	12	jobbra	0,0	+	21,4	67	400	1017	0,0	33,1
2013	8	11	13	9	52	jobbra	2,0	+	21,4	67	400	1017	2,0	33,1
2013	8	11	13	10	31	balra	0,4	+	21,4	67	400	1017	1,6	33,1
2013	8	11	13	11	11	jobbra	3,7	+	21,4	67	400	1017	5,3	33,1
2013	8	11	13	11	51	balra	1,9	+	21,2	67	400	1017	3,4	33,1
2013	8	11	13	12	31	balra	5,6	+	21,2	67	400	1017	-2,2	33,1
2013	8	11	13	13	11	jobbra	3,4	+	21,2	67	400	1017	1,2	33,1
2013	8	11	13	13	51	balra	2,3	+	21,2	67	400	1017	-1,1	33,1
2013	8	11	13	14	31	jobbra	2,1	+	21,2	67	400	1017	1,0	33,1

7.2.2 Mérési eredmények feldolgozásának statisztikai eszközei

A mérési eredmények rögzítése a:

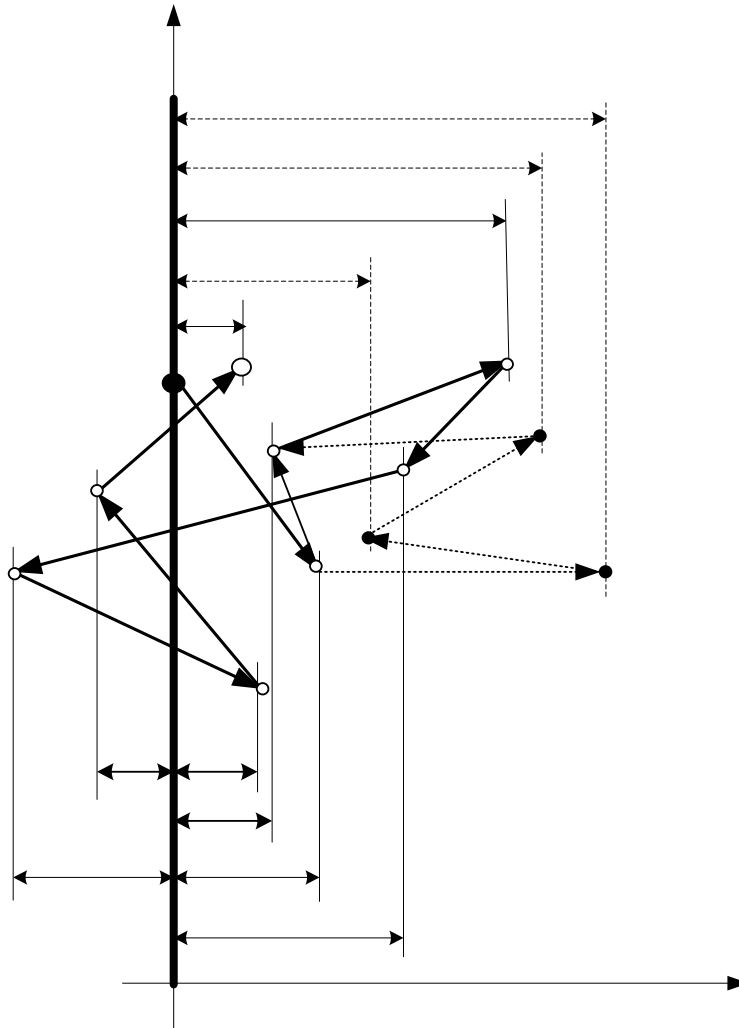
$$0 \leq t_1 < t_2 < t_3 < \dots < t_{n-1} < t_n; \quad (104)$$

diszkrét időpillanatokban, az 5.5 alfejezetben meghatározott gyakorisággal történik.

Két mérés közt nincs adatgyűjtés, ami miatt adatvesztéssel is számolni kell.

Két mérés közben nincs mintavételezés, és az is biztos, hogy eközben a fényterjedés iránya többször is megváltozik. Ezt jelképezik a 28. ábrán levő vektorábrán látható pontozott nyilak. A B₁, B₂ és B₃ azokat a közbenső pontokat jelölik, amelyeket a fényfolt az ernyőn a két mintavétel közt érintett. A bázisponthoz viszonyított relatív értékek kiszámításánál az időközben megtett útnak abszolút nincs jelentősége és sem a mérést, sem pedig a számításokat nem befolyásolja. A mintavételezés gyakoriságának növelésével csak annyi történik, hogy ezek a közbenső relatív elmozdulások is „képhe kerülnek” és mérhetővé válnak. A feldolgozás eredményeképpen kapott relatív értékek szignifikánsnak tekinthetők mivel a különbségek kimutathatók és bár a szórás elég nagy, a különbségek kimutatásához szükséges elemek száma is kellőképpen nagy. A valószínűségelmélet terminológiáját használva a mérés eredményeit figyelembe véve,

minden esemény megtörténtéhez csak egy időpont rendelhető, ami a sztochasztikus folyamatok jellemzője. [194]



28. ábra
A relatív elmozdulások vektorábrája
(A szerző rajza)

Az időpontok függetlensége a Markov-láncok és a Poisson-folyamatok sajátossága. A Markov-láncok és Poisson-folyamatok elemzésének eszközei ebben az esetben is használhatók. Mivel az események rögzítése közti időtartamok; $t_1 - t_0 = t_2 - t_1 = \dots = t_n - t_{n-1}$ állandónak és függetlenek tekinthetők, a 7. sz. melléklet 4. táblázatában a „Rel.eltol.” oszlopa csupa olyan adatot tartalmaz, ami a homogén növekményű eloszlásokra jellemző. Ezeket az adatokat ábrázolva egy ponteloszlást

kapunk. „*Kis valószínűségű események térbeli eloszlását, vagy időbeli lefolyását a Poisson⁹⁶ eloszlás írja le*”. [195] Az eredménytábla alapján további számítások is végezhetők.

A műveletek lényegében időbeli összehasonlítások, amit a statisztika differenciaképzésként határoz meg. Az idősor adatoknak ebben az esetben kötött a sorrendje, hiszen a mintavételezés egy időbeli folytonosságot jelent. Képlete:

$$D_{\tau} = y_{\tau} - y_{\tau-1} \quad (105)$$

Az időbeli összehasonlításoknál, amennyiben több időpont adatai is ismertek, az átlagos, abszolút és relatív változások mutatóit is fel lehet használni. Több olyan statisztikai módszer és eszköz létezik, amelyek segítségével az előállított adatokból a szükséges következtetések levonhatók. Kérdés az, hogy az adathalmazban minden esetben kimutatható-e a periodicitás? A kérdésre akkor kaphatunk kielégítő választ, ha a rendszeranalízis statisztikus módszereit alkalmazva a szabályozáselemélet korrelációanalízisének eszközeit is felhasználjuk. Ehhez korrelációs függvényekre van szükség. A korrelációfüggvények a mérési eredményekből határozhatók meg. Meghatározásukkal csak érintőlegesen foglalkozok, a szakirodalom ezt részletekbe menően tárgyalja. [196] A korrelációanalízist a technológiai folyamatok irányítási feladatainak megoldásánál használják, ahol az irányított jellemző mérése nagyon hasonló eszközöket és módszereket kíván.

A mérési eredmények általában olyan diszkrét jelek sorozata, mint amilyenek rögzítése a mérés során megtörtént. Hogy ezek többértékű, vagy két diszkrét értékkel jellemezhető adatok, annak ma már nincs különösebb jelentősége, hiszen a két állapotú jelek, a legtöbb korszerű irányítástechnikai rendszer sajátossága.⁹⁷ A hasonlóság szembevető, néhány jelentéktelennek tűnő részlettől eltekintve.

A légkörben zajló folyamatok esetében nyilván nem beszélhetünk szabályozott szakaszról, hiszen a légkör állapotjelzőit befolyásolni lehet, de nem ez a jellemző. Ha a korrelációanalízis eszközeit használjuk, akkor mindenképp azt kell figyelembe venni, hogy nem a klasszikus értelemben vett irányítástechnikai feladatról van szó, hanem csak néhány alkalmazott statisztikai módszer felhasználásáról. Míg az irányí-

⁹⁶ A Poisson eloszlást a porosz hadseregben az egy évben lórúgás következtében meghalt katonák számának a becslésére használták elsőként.

⁹⁷ Kettő, vagy többállásos, időszakos működtetésű nem folytonos szabályozások jellemzője.

tástechnikai feladatok esetében a rendszer működését befolyásoló zavaró jellemzők figyelembevételével, általában a beavatkozó jellemzők meghatározása a cél, addig a fényterjedés esetében a korreláció függvények főként a *mintavételezés gyakoriságának* kiszámítására, optimalizálására és a rejtett periodicitás kimutatására használhatók.

A fényterjedést jellemző sztochasztikus folyamat statisztikus jellemzői akkor határozhatók meg, ha a folyamatot sikerül besorolni valamilyen folyamatosztályba. A kísérletek során gyűjtött mérési adatok feldolgozásával a folyamat-osztályba sorolás a későbbiekben pontosítható és a modellt leíró egyenletek elemei is meghatározhatók. A továbbiakban csak a folyamat modelljét leíró egyenletet ismertetem, amelyben több periodikus változást leíró függvényelem is megtalálható.

$$Y(t) = A(t) + P(t) + O(t) + H(t); \quad (106)$$

ahol: $Y(t)$ - a folyamatot leíró időfüggvény;

$A(t)$ - állandó, vagy lassan változó aperiodikus függvény;

$P(t)$ – harmonikus függvény, vagy függvények eredője;

$O(t)$ – a sztochasztikus folyamatot leíró időfüggvény;

$H(t)$ – a mérési folyamatot jellemző hibafüggvény, más szóval mérési zaj.

- Az $A(t)$ függvényelemet jellemzően nagyon lassú változások hozzák létre. Ilyen lehet például egy teljes éves periódusra vonatkoztatva az évszakok változásának eredményeképpen, a hőmérséklet átlagértékének megváltozása. Bizonyos egyszerűsítésekkel élve a 28. ábrán vázolt rész-periódusokon belül ez a függvényelem konstansnak tekinthető. A teljes periódusra vonatkoztatva, amely mind a négy évszakot magába foglalja, nem állandó, több éves időtartamot átfogó vizsgálata esetén is egy periodikus függvény.
- A $P(t)$ egy harmonikus összetevő, amely a napszakok változása következtében a talajfelszín, vagy magasabb légrétegek hőmérséklet ingadozását írja le.
- Az $O(t)$ a napközbeni hőmérséklet, páratartalom, légnyomás, stb. változásokat foglalja magába.
- A $H(t)$ A mérési zaj lehet a mérőeszköz jellemzője, de lehet a folyamat sajátossága is. Így például az egyirányú elmozdulást mérőeszköz esetében a függőleges, nem vizsgált irányba történő elmozdulás, eredményezhet egy hibafügg-

vényt. A másik „zajforrás” lehet a magas hőmérsékletű, páratartalmú, stb. hely, amely befolyásolja a fényterjedést. De ugyanilyen zajnak tekinthető a napfény zavaró hatása, amely az optikai vevőt vakítja, vagy zavarja.

Belátható, hogy amennyiben (106)-ban a függvények valamelyike periodikus, akkor a teljes folyamatot leíró függvény is periodikussá válhat. Ha csak egy periodikus eleme van, akkor periodikus függvénynek tekinthető.

7.3 Következtetések

A mérővevő által gyűjtött adatok utófeldolgozása történhet Excel táblázatkezelővel, annak ellenére, hogy a mérnöki gyakorlatban általában a Matlab, Sci-Lab, stb., használata a megszokott és a gyakoribb.

Figyelembe véve azt, hogy a mérési adatok többnyire sztochasztikus folyamatok eredményei, kiértékelésük és a bennük rejlő törvényszerűségek kimutatása mindezekelőtt a Markov-, és Poisson-folyamatok jellemzőinek felismerését jelenti. Elemzésükre általában ismert statisztikai módszerek alkalmasak, de bizonyos értelemben a „kiforrottabb” matematikai alapokkal jellemezhető korrelációanalízis ismert törvényszerűségek feltárására és kimutatására alkalmasabb.

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

A fény légköri refrakciójának elméletében sok a tisztázatlan kérdés. Egynemű közegek esetében a szakirodalmi források többsége a fény refrakcióját a megszokott egyszerűsítésekkel magyarázzák, és megfelelnek a közeghatár létezéséről, azt gyakran nem említik, és nem magyarázzák.

Az elemi részecskék kölcsönhatásaival és kísérő jelenségeikkel a közeghatár létezése a gázhalmazállapotú közeg esetében is megfogalmazható. Tulajdonságaira alapozottan megadhatók azok a modellek, amelyek segítségével a fény légköri refrakciója értelmezhető és analitikus módszerei differenciálgeometriai eszközökkel levezethetők. A mérés technika fejlődésével az analitikus számítási módszereket többnyire tapasztalati összefüggések pótolják, de nagyon sok ilyen összefüggésről mára bebizonyosodott, hogy használhatatlanok. A tapasztalati összefüggések használhatósága annak okán is megkérdőjelezhető, hogy a kidolgozásuk óta eltelt idő alatt a légkör összetétele jelentős mértékben változott. Korrekciós tényezőkkel meghatározásával az analitikus módszerek és az empirikus függvények használhatósága vizsgálható, hibáik feltárhatók.

Kísérleti eszközökkel pontos mérések végezhetők, segítségükkel a légkör globális változásai nyomon követhetők. A légköri refrakció vizsgálatára és a kérdéses összefüggések feltárására alkalmas mérőeszközök könnyen beszerezhető félvezető lézer-, és CCD sorkamera felhasználásával megépíthetők. Az alkalmazott mérési elv szükségessé teszi a helyhez kötött eszköz elhelyezést, telepítést, a hosszú ideig tartó mérést, méréssorozatok elvégzését. Amennyiben a feltételek adottak a mérések korszerű processzoros eszközökkel, viszonylag könnyen automatizálhatók.

A mérési eredmények kiértékeléséhez, következtetések levonásához a statisztika módszerei, és a korrelációanalízis eszközei felhasználhatók. Ezekkel módszerekkel meghatározhatók a korrelációfüggvények statisztikus jellemzői, periodicitás kritériumai, és kimutathatók az adathalmaz olyan összefüggései, mint például a rejtett periodicitás.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az értekezésemben bemutatott kutató munkám új tudományos eredményeit a következő tézisekbe foglalom össze:

1. Tézis Levezettem a fénytörést leíró függvényt inhomogén gáz-halmazállapotú közegben.
2. Tézis Összehasonlítottam az empirikus fénytörési összefüggéseket és meghatároztam alkalmazhatóságukat.
3. Tézis Megadtam az inhomogén gáz-halmazállapotú közeg esetére a kis térrészre igaz, elméleti közeghatár és határréteg definícióját.
4. Tézis Megterveztem és megépítettem egy kisteljesítményű félvezető lézeres automatizált mérésadatgyűjtőt magába foglaló kísérleti berendezést a légtörő fénytörésének meghatározására és a mérési eredmények alapján meghatároztam az eszköz-, és program-továbbfejlesztés irányát.

AJÁNLÁSOK

Az értekezésemben foglalt fényterjedéssel kapcsolatos elméleti és gyakorlati eredmények közül:

- Ajánlom felhasználni az általam kidolgozott modellt a gáz-halmazállapotú közegben terjedő fény elméletének bővítéséhez;
- ajánlom az ismertett parciális differenciálfüggvény további felhasználását olyan általános érvényű összefüggések kidolgozásához, amelyben további fényterjedést befolyásoló tényezők is figyelembe vehetők;
- ajánlom a mérési elv felhasználását és továbbfejlesztését, figyelembe véve azt, hogy a részeredmények a használhatóságát igazolják.

Az értekezésemben rendszerezett ismereteket és kidolgozott javaslatokat ajánlom felhasználni forrásanyagként az irányított energiájú fegyverek-, szabadtéri információ-, és adatátviteli rendszerek, mérőeszközök-, biztonságtechnikai eszközök fejlesztéséhez, illetve ellenük való védekezéshez;

Az értekezésben foglaltakat ajánlom a polgári és katonai tanintézetekben folyó oktatási tevékenységek jegyzeteinek a kidolgozásához.

Budapest, 2014. augusztus. 12.

Csuka Antal

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Kutatásaimat, amelynek eredményeit a dolgozatom tartalmazza, a PhD. fokozat elérése érdekében 2005-től a Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bolyai János Katonai Műszaki Kar Védelmi elektronika, informatika és kommunikáció tudomány-szakon kezdtem.

Mindenekelőtt köszönetemet fejezem ki témavezetőmnek Dr. habil. Ványa László ezredes úrnak, aki tanulmányaim és a kutatásaim során sok hasznos tanácsal, türelemmel és hozzáértéssel segítette a munkámat.

Köszönöm az opponenseknek és mindazoknak, akik javaslataikkal és észrevételeikkel hozzájárultak az értekezésem jobbá tételéhez.

Ezúton fejezem ki hálámat a családomnak, akik biztos háttérrel és nyugodt légkört biztosítottak számomra.

LEKTORÁLT PUBLIKÁCIÓIM JEGYZÉKE

1. **CSUKA, A.:** Az irányított energiájú fegyverek perspektivikus alkalmazása az amerikai hadseregben; Repüléstudományi Közlemények különszám,

2007. április 20. ISSN 1417-0604
http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2007_cikkek/csuka_antal.pdf
2. **CSUKA, A.:** Impulzusbombák és repülőgép fedélzeti nagyenergiájú impulzuskeltők hatásfokának növelése szupravezetők alkalmazásával, Repüléstudományi Közlemények, Különszám 2008. április 11. ISSN 1789-770X
http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2008_cikkek/Csuka_Antal.pdf
3. **CSUKA, A., ELŐHÁZI, J.:** Irányított energiájú fegyverek és veszélyeik a számítógépes rendszerekre, Hadmérnök III. évf. 3. szám 2008. szeptember, ISSN 1788-1919
http://hadmernok.hu/archivum/2008/3/2008_3_csuka.pdf
4. **CSUKA, A.:** Nagyfeszültségű villamos ív alkalmazása és előállításának feltételei az akusztikus fegyverekben, Bolyai Szemle 2008. XVII. évf. 4. szám, ISSN 1416-1443
http://portal.zmne.hu/download/bjkmk/bsz/bszemle2008/4/09_Csuka_Antal.pdf
5. **CSUKA, A.:** Információvédelem, merre tovább?, ZMNE Kommunikáció 2008, 2008 október 7., ISBN 978-963-7060-57-1
6. **CSUKA, A.:** Irányított energiájú fegyverek hullámjelenségeinek modellezése és számítógépes szimulációja, ZMNE Repüléstudományi Közlemények, CD kiadvány különszám 2009. április 24. ISSN 1789-770X
http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2009_cikkek/Csuka_Antal.pdf
7. **CSUKA, A, KACZUR, S.:** Modeling of microwave interaction with matter, DUF, Magyar Tudomány Napja Konferencia. Dunaújváros, 2009 nov. 13. ISSN 1586-8567
<http://www.duf.hu/tudomanyhete2009/>
8. **CSUKA, A.:** A haditechnikai fejlesztés építőkövei –Irányított energiájú fegyverek, GDF 2009 Informatika, XI. évfolyam 2. szám. ISSN 1419-2527
<http://www.gdf.hu/tudomanyos-elet/informatika-folyoirat/34szam-2009>
9. **CSUKA, A.:** Modeling and Simulation Systems for 21 Century: Informatika, XIII. évf. 2. szám (38.), 2011. június. ISSN 1419-2527
http://www.gdf.hu/sites/default/files/informatika_38_5.pdf

10. **CSUKA, A.:** A Föld légkörének hatása a lézernyaláb terjedésére és a továbbított fényteljesítményre, Szolnoki Tudományos Közlemények XV., 2011. nov. 10. ISSN 2060-3002
http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Csuka_Antal.pdf
11. **CSUKA, A.:** A fény szabadtéri terjedésének elméleti és gyakorlati vizsgálata, Hadmérnök, VII. évf. 4. szám- 2012. december. ISSN 1788-1919
http://hadmernok.hu/2012_4_csuka.pdf
12. **CSUKA, A.:** Inhomogén közegben terjedő fény refrakciójának vizsgálata differenciálgeometriai módszerekkel, Professzorok az Európai Magyarországiért Egyesület IV. PhD konferencia,2012,
http://www.peme.hu/userfiles/file/Alkalmazott%20term_tud_,%20orvosi%20szekci%C3%B3%20.pdf

FELHASZNÁLT IRODALOM

1. **FLAVIUS, V. R.:** A hadtudomány foglalatja. A hadművészet ókori klasszikusai; ZSK, 1963, p.797.
2. **KŐSZEGVÁRI T.:** A biztonságot fenyegető kihívások és veszélyek (Gondolatok egy OKTK- téma kutatása kapcsán), Hadtudomány VI. évf., 1996/3, p.30-31, ISSN 1215-4121.
3. **Sz. i.⁹⁸:** Directed Energy Weapons, December 2007, <http://www.acq.osd.mil/dsb/reports/ADA476320.pdf>, (2014.04.17).
4. **ALTMANN, J.:** Acoustic weapons – A prospective Assessment, Science and Global Security, Volume 9 Taylor and Francis, 2001, p.165-234. <http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs09altmann.pdf>
5. **WALLING, E.:** High Power Microwaves, Strategic and Operational Implications for Warfare, Ocasional paper No. 11, Air University Maxwell, Alabama, February 2008, <http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/cst/csatl11.pdf>, (2014.04.17.)
6. Kirtland AFB, Phyllips Lab. Particle Beam Weapons Research, http://www.thelivingmoon.com/45jack_files/03files/Kirtland_AFB_Labs_01.html (2014.04.17.)
7. **KOPP, C.:** High Energy Laser Directed Energy Weapons, Technical Report APA-TR-2008-0501, May 2008, <http://www.ausairpower.net/APA-DEW-HEL-Analysis.htm> (2014.04.17.)
8. **Sz.i.:** Airborne Laser Testbed (ALTB), Northrop Grumman, <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ChemicalHighEnergyLaser/AirborneLaserTestbed/Pages/default.aspx>, (2014.04.17.)
9. **KIEL, H. D.:** A Vision for Directed Energy and Electric Weapons in the Current and Future Navy, http://www.wired.com/images_blogs/dangerroom/files/asne_paper_a_vision_for_de_weapons.pdf

⁹⁸ Szerző ismeretlen.

10. **CSUKA, A.:** Inhomogén közegben terjedő fény refrakciójának vizsgálata differenciálgeometriai módszerekkel, Professzorok az Európai Magyarországi Egyesület IV. PhD konferencia, 2012,
http://www.peme.hu/userfiles/file/Alkalmazott%20term_tud_,%20orvosi%20szekci%C3%B3%20.pdf (2012.11.21)
11. **WELCH, D. F.:** A brief history of high –power semiconductor lasers, IEEE Journal, Quantum Electronics, Vol.6 No.6. 2000, p.1470-1479,
<http://www.ece.mtu.edu/faculty/ztian/ee5950/scl1.pdf>] (2012.03.29).
12. **Sz.i.:** A lézer története, www.orvosilezer.hu/a-lezer-es-toertenete (2013.04.11.).
13. **SIEGMAN, A.E.:** Lasers, University Science Books, Mill Valley, California, 1986, ISBN 0-935702-11-5, p.34
14. **Sz.i.:** Lézerek,
www.chem.elte.hu/departments/altkem/tarczay/lasersp/lasersp1.ppt (2013.05.13)
15. **Sz.i.:** Laser power beaming fact sheet,
<http://lasermotive.com/wp-content/uploads/2012/03/Laser-Power-Beaming-Fact-Sheet.pdf> (2014.04.18.).
16. **DAVIS, E. W., MEAD, F. B.:** Review of laser lightcraft propulsion system, Air Force Research Laboratory(AFMC), 5th International Symposium on Beamed Energy Propulsion 2007
http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.dtic.mil%2Fdtic%2Ftr%2Ffulltext%2Fu%2Fa475260.pdf&ei=3PZPU_HMNqbMygOHxYHADw&usq=AFQjCNHlgKFHdEQHgehlFRkpwzbzvpDfg (2014.04.18.).
17. **VOLFEREN, H., ABELMANN, L.:** Laser interference lithography, Litography:Principles Processesand Materials, Nova Science Publishers Inc.,2011, ISBN 978-1-61761-837-6, p.133-148,
http://doc.utwente.nl/78097/1/laser_interference_lithography_-_Henk.pdf (2014.04.18.).
18. **NISAR, S., SHEIKH, M. A.:** The effect of laser beam geometry on cut path deviationin diode laser chip-free cutting of glass, Journal of manufacturing

- Science and Engineering, Vol. 132., 2010,
<http://laser.mace.manchester.ac.uk/fileadmin/publications/10.1115-1.4000695.pdf> (2013.10.01)
19. **TERZIC, M., MOZINA, J.:** Using lasers to measure pollutants, Facta Universitatis, Vol.4, No,1, 2006,
<http://facta.junis.ni.ac.rs/phat/pcat2006/pcat2006-07.pdf> (2014.01.05.)
20. **Sz.i.:** Részecskeméret analízis lézerdiffrakcióval, 2010,
http://www.ogyi.hu/dynamic/GYK2010/2_9_31_6_6.pdf (2011.04.06.).
21. **TOYOSHIMA, M.:** Free-space laser communications: The japanese experience, <http://conference.vde.com/ecoc-2009/programs/documents/moriotoyoshima.pdf> (2011.10.01)
22. **STEVENS, M.L.:** Ultra-long distance free space communications, 2007,
<http://ultralaser.iphy.ac.cn/cleo/data/papers/CWM1.pdf> (2012.02.30.)
23. **TITTERTON, D.H.:** Measurement of the Distorsion in a Laser Beam's Characteristics Resulting from Passage through an Engine's Wake
[http://ftp.rta.nato.int/public//PubFullText/RTO/MP/RTO-MP-001///\\$MP-001-42.pdf](http://ftp.rta.nato.int/public//PubFullText/RTO/MP/RTO-MP-001///$MP-001-42.pdf)
(2014.04.18.).
24. **TERNEL, C.:** Contribution au développement de l'allumage par laser pour les moteurs á combustion interne, Thèse, Faculte des sciences de l'universite de Ruen, 2006
https://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC4QFjAA&url=https%3A%2F%2Fwww.coria.fr%2Fspip.php%3Faction%3Ddw2_out%26id%3D344&ei=BPpPU_G5N6v9ygPU8YCQAg&usg=AFQjCNFDrB_-_6HYC81eSS2rrzoOHO7VPQ (2014.04.18.).
25. **NIEMZ, M. H.:** Laser Tissue Interaction, Springer Verlag, 1996,
http://www.me.berkeley.edu/ME212/lec6/d_laser.pdf (2014.04.18.).
26. **PHYLIPS, W. D.:** Laser cooling and trapping of neutral atoms, Atomic Physics, Maryland,
<http://www.phas.ubc.ca/~qdg/resources/AMORReadingList/mot/phillips98.pdf>
(2013.04.16)

26. **SÖRLEI, Zs.:** Atomok lézeres hűtése, csapdázása, Bose-Einstein kondenzációja, KFKI <http://virag.elte.hu/kurti/lezereshutes.pdf> (2014.04.18.).
27. **METCALF, H. J., Van Der STRATEN, P.:** Laser cooling and trapping: Springer-Verlag, New York, 1999, p.17-27
http://books.google.hu/books/about/Laser_Cooling_and_Trapping.html?id=i-40VaXqrj0C&redir_esc=y (2014.04.18.).
29. **GOSH, S.:** Direct numerical simulation of the interaction of laser -induced plasma with isotropic turbulence, Thesis, University of Minesota, 2008.
30. **RIBAK, E. N.:** Can laser self fokusing in air replace interferometer siderostats and delay lines, <http://physics.technion.ac.il/~eribak/SPIE7013-194.pdf> (2012.03.31.).
31. **DUARTE, F.J.:** Tunable laser applications, CRC Press, 2008, ISBN 13:978-1-4200-6009-6, http://icole.mut-es.ac.ir/downloads/Sci_Sec/w12/Tunable%20Laser.pdf (2014.04.18.).
32. **SCHWARZE, C. R., VAILLANCOURT, R.:** Risley- prism based compact laser beam steering for IRCM laser communications, and laser radars, http://www.optra.com/images/TP-Compact_Beam_Steering.pdf (2012.04.02)
33. **KOLESZÁR, B.:** A robohadviselés etikai kérdései II- Katonai erkölcs, Hadmérnök, V. évf. 1. sz., 2010,
<http://www.lib.jgytf.u-szeged.hu/folyoiratok/tiszataj/92-09/pomogats.pdf> (2014.08.19).
34. **BÉKÉSI, B.:** Lézergiroszkópok működési elve, egyenletei és átviteli karakterisztikái, Repüléstudományi közlemények, XI. évf.,28. szám,1999/3, ISSN 1417-0604, p.61-75
www.szrfk.hu/rtk/archiv/RTK_1999_3.pdf (2014.04.18.).
35. **DUNN, R. J.:** Operational implications of laser weapons, http://www.northropgrumman.com/analysis-center/paper/assets/Operational_Implications_of_La.pdf (2012.07.21)
36. **MARK, E. R.:** Lasers in Space, Technological Optionsfor Enhancing US Military Capabilities, <http://www.fas.org/spp/starwars/program/occppr02.htm> (2014.04.18.).

37. **CSUKA, A.:** Az irányított energiájú fegyverek perspektivikus alkalmazása az amerikai hadseregben, Repüléstudományi Közlemények, különszám 2007. április 20. http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2007_cikkek/csuka_antal.pdf (2013.03.16.).
38. **Sz. i.:** MTHel (THEL) Mobile Tactical High Energy Laser (video), <http://www.youtube.com/watch?v=cCBwLJzDJQ&feature=related> (2011.11.08).
39. **CSUKA, A.:** A haditechnikai fejlesztés építőkövei –Irányított energiájú fegyverek, Informatika, XI. évfolyam 2. szám 2009. június, p.14-17.
40. Dr. habil **VÁNYA, L.:** Lézerfegyverek a repülőgépeken és a légi járművek ellen, Repüléstudományi Közlemények, XXVI. évf. 2. szám, 2014, (2014.07.23).
41. Capt. **G.P., PERRAM, Dr. G.D., HAGGER:** The standard chemical Oxigene-Iodine laser kinetics, Air Force Weapons Laboratory, Kirtland Air Force Base, 1988, www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a208643.pdf, (2014.07.23).
42. **JAN, S.:** The airborne laser, Presentation, Conference on Security and Cooperation in South Asia, Berlin, 10. okt. 2010. www.researchgate.net/...Refractive-index_measurement...(2014.07.22).
43. **Sz. i.:** Félvezető lézerek, www.sasovits.hu/cnc/irodalom/lezer1.pdf (2014.04.18.).
44. Laser 2000, Advanced Solutions for Photonics, Alkatrész katalógus, http://www.laser2000.co.uk/pdfs/download/2011/Laser_Catalogue.pdf (2013.03.23.).
45. Lézer termékkatalógus, <http://www.amazing1.com/infrared-lasers.htm> (2013.06.14.).
46. Infrared lasers, a gyártó saját oldala, http://www.cnilaser.com/infrared_laser.htm?gclid=CMuEgJSz16wCFYEhtAoddGmTBQ (2014.04.12.).
47. **Sz.i.:** The use of lasers pointers in astronomy, ASA Factsheet No.22, p.1-4, http://astronomy.swin.edu.au/~smaddiso/download/factsheet_22.pdf (2014.04.12.).

48. **CSELE, M.:** Fundamentals of light sources and lasers, John Wiley and Sons, 2004, ISBN 0-471-47660-9, p.77-79.
49. **GOLDWASSER, S. M.:** Diode Laser Power Supplies, <http://www.repairfaq.org/sam/laserdps.htm> (2013.02.09).
50. **AGRAWAL, G. P.:** Optical Communication Systems, (OPT428), Institute of Optics, 2007, <http://www.optics.rochester.edu/users/gpa/opt428a.pdf> (2014.04.12.).
51. **Sz. i.:** Ultra Compact Diode- pumped Q-switched Crystal Lasers, <http://www.crystalaser.com/new/uv-laser.html> (2014.01.24).
52. **GOLDWASSER, M.:** Diode Lasers, <http://www.repairfaq.org/sam/laserdps.htm> (2013.02.09).
53. **Sz.i.:** Shel törvénye, <http://depts.washington.edu/mictech/optics/me557/week1.pdf> (2012.10.21.).
54. **KIRÁLY, O.:** Hossz- és szögmérő műszerek, mérések, Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1990, ISBN 963 10 4784 9, p.77.
55. **DUNAJSZKY, B.:** Finommechanikai elemek és műszerek II., Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976, p.193-202.
56. **DOMOKOS, P.:** A fény mechanikai hatása optikai rezonátorban, Kvantum-elektronika Tavaszi Iskola, Balatonfüred, 2005, http://148.6.26.16/articles/domokos_KETI_2005.pdf (2012.04.05.).
57. **REED, R.:** Refraction of light, <http://interactagram.com/physics/optics/refraction/> (2013.04.11.).
58. **LAUBEREAU, A., SEILMEIER, A.:** Ultrafast Process in spectroscopy, Emil Warburg - Symposium held in Bayreuth, Germany, 7-10 October 1991, IOP Publishing Ltd, Bristol, 1992, ISBN 0-7503-0198-8.
59. **ROUNDY, C. B.:** Current technology of laser beam profile measurement, <http://aries.ucsd.edu/LMI/TUTORIALS/profile-tutorial.pdf> (2012.03.29).
60. **ROUNDY, C. B.:** Propagation factor quantifies laser beam performance”, Laser Focus World, http://www.ophiropt.com/user_files/laser/beamprofilers/propagationfactor.data.pdf, (2012.03.29.).

61. **Sz.i.:** Introduction to Laser Technology,
https://www.cvimellesgriot.com/products/Documents/TechnicalGuide/Propagation_Characteristics_of_Laser_Beams.pdf (2014.04.12.).
62. **ALDA, J.:** Laser and Gaussian beam propagation and transformation,
http://www.ucm.es/info/euoptica/org/pagper/jalda/docs/libr/laserandgaussian_eoe_03.pdf (2012.03.29.).
63. **Sz.i.:** Laser catalogue, http://www.powertechnology.com/blue_violet_uv.asp (2014.04.12.).
64. **Sz. i.:** Raman Scattering of High Power Lasers in Air,
http://www.lle.rochester.edu/media/publications/lle_review/documents/v52/52_05_Raman.pdf (2014.04.12.).
65. **PETIT, S., TALEBPOUR, A.:** Polarization dependence of the propagation of intense laser pulses in air, Optics Communications 175, 2000, Elsevier, p.323-327 <http://144.206.159.178/ft/809/11195/215035.pdf> (2012.11.16.).
66. **MADSEN, M.J., BROWN, D.R., KRUTZ, S.R.:** Measuring the Molecular Polarizability of Air, Physics-Optics, 2009
http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.iontrap.wabash.edu%2Fpublications%2FAJP_79_428_madsen_mol_pol.pdf&ei=DfJPU-n9J-jOygO0yoHYAQ&usg=AFQjCNFQ_pUXGqm7r62B8j-bOXA0hvYbEg (2013.04.11.).
67. **BORN, M., WOLF, E.:** Principles of Optics, 7th ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999), p.92-95.
<http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDAQFjAA&url=http%3A%2F%2F210.72.9.5%3A8080%2Fuploadfiles%2Fpdf%2F2007%2F3%2F%2F144347.pdf&ei=fPJPU-GeH8noywOx94GIBA&usg=AFQjCNGGfiQM5hVZpOi-ISTZgLRObOD3rw> (2013.04.11.).
68. **JACKSON, J. D.:** Classical Electrodynamics, John Wiley & Sons, Inc., New York, New York, 1999, p.159-164.
69. **WEICHEL, H.:** Laser Beam propagation in the atmosphere, Spie, Bellingham, 1990, ISBN 0-8194-0487-X, p.12-13

- http://books.google.hu/books/about/Laser_beam_propagation_in_the_atmosphere.html?id=Di5RAAAAMAAJ&redir_esc=y (2014.04.12.).
70. **HEMMATI, H.:** Deep space optical Communications, Jet Propulsion Laboratory –California Institute of Technology p.142-144, 170-202.
71. **BISWAS, A., PIAZZOLLA, S.:** The Atmospheric Channel, p.198, http://descanso.jpl.nasa.gov/Monograph/series7/Descanso%207_chap03.pdf (2011.09.29).
72. **WILLKE, P. K., DANZMANN, K.:** New concepts and results in laser power stabilization, Appl. Phys. B 102 (3), 515 (2011).
<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00340-011-4399-1#page1> (2014.04.12.).
73. **Sz. i.:** A légkör kémiája, www2.sci.u-szeged.hu/eghajlattan/fofia05.pdf (2014.04.12.).
74. **SCHONFELD, J. F.:** The Theory of Compensated Laser Propagation through Strong Thermal Blooming,
http://www.ll.mit.edu/publications/journal/pdf/vol05_no1/5.1.7.compensatedlaser.pdf (2014.04.12.).
75. **CSUKA, A.:** A Föld légkörének hatása a lézernyaláb terjedésére és a továbbított fényteljesítményre, Szolnoki Tudományos Közlemények XV., 2011. nov. 10.
http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2011/cikkek/Csuka_Antal.pdf, ISSN2060-3002 (2012.07.01.)
76. **ALONSO, M., FINN E.J.:** Physique Générale II., InterÉditions, Paris, 1986, ISBN 2-7296-0136-8, p.445-447, 481-486.
77. **STARR, A.T.:** Rádióhírközlés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1957, p100.
78. **MONKS P.S., GARNIER C.:** Atmospheric Composition Change-Global and regional air quality, Atmospheric Environment, 43, 5268-5350 (2009)
79. **BAJNOCZI, G., KISS, B.:** A Földi atmoszféra kialakulása,
http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:I7CNp1k6S_QJ:www.bmekornyesz.hu/sqlatm/dl.php%3Fdir%3Dsil0%252F0%2BMsc%252F1.%2Bf%25C3%25A9l%25C3%25A9v%252FAlkalmazott%2BK%25C3%25A9mia

- %252F%26a%3Ddl%26id%3D5807%26f%3Dsil0/0%2520Msc/1.%2520f%25C3%25A9l%25C3%25A9v/Alkalmazott%2520K%25C3%25A9mia/k%25C3%25B6rnyezeti%2520k%25C3%25A9mia.doc+&cd=20&hl=hu&ct=clnk&gl=hu (2014.08.18).
80. **MÉSZÁROS, E.:** Levegőkémia,
http://www2.sci.u-szeged.hu/eghajlattan/pdf/Meszáros_E_Levegokemia.pdf
(2013.11.09.)
81. **MÖLLER, K.D.:** Optics, Springer, New Jersey, 2002, ISBN-13: 978-0-387-26168-3, p.5, 54, 58.
82. **HORVÁTH, G.:** Fényszóródás a természetben, A Természet Világa, 6. szám, 1986., <http://www.kfki.hu/~cheminfo/hun/olvaso/feny/fenyszor.html>
(2014.06.12).
83. The Engineering Toolbox, http://www.engineeringtoolbox.com/ppm-d_1039.html (2013.01.30.)
84. **KHARECHA, P.A., HANSEN, J. E.:** Implications of „peak oil” for atmospheric CO₂ and climate, 17. Mar. 2007, <http://arxiv.org/abs/0704.2782>,
(2014.04.12.).
85. **HANSEN, J. E.:** Dangereous Human-Made Interference with Climate, 26 April 2007, http://www.columbia.edu/~jeh1/2007/Testimony_20070426.pdf
(2014.04.12.).
86. **WEBBER, M. J.:** Handbook of Optical Materials, CRC Press, London, 2003, ISBN: 0-8493-3512-4, p.446-497.
87. **JÁSZAY T.:** Műszaki Hőtan- Termodinamika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1966, p6, 68, 162,171-176, 228-240.
88. **GOMBÁS, P., KISDI, D.:** Bevezetés az elméleti fizikába, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1971, p.270-272,599-605.
89. **KAUFMANN, J.:** Free Space Optical Communications: An Overviews of Applications and Technologies,
http://www.buenosearch.com/?q=pdf+John+Kaufmann%3A+Free+Space+Communications&babsrc=HP_ss&s=web&rlz=0&sd=31&as=0&ac=0
(2013.04.11.)

90. Léggöri refrakció, képek, http://web.mit.edu/ytc/www/HLMA/E1370132-Heat_mirage-SPL.jpg (2014.04.12.).
91. Léggöri refrakció, képek, <http://web.mit.edu/ytc/www/HLMA/realoim.jpg>
92. Léggöri refrakció, képek, <http://web.mit.edu/ytc/www/HLMA/superior-mirage.jpg>, (2014.04.12.).
93. **KALASHNIKOVA, O., V.WILLEBRAND, H. A.:** Wavelength and altitude dependence of laser beam propagation in dense fog- Light Pointe Communication, Boulder, <http://lib.semi.ac.cn:8080/tsh/dzzy/wsqr/SPIE/Vol4635/4635-278.pdf> (2014.04.12.).
94. **DYKSTRA, P.:**Free Space Laser Communications, <http://freedownload.is/ppt/free-space-laser-communications-32273.html> (2012.03.29).
95. **Sz. i.:** Electro-Optics Handbook, http://www.phy.davidson.edu/fachome/jny/optics/burle%20electro_optics.pdf (2014.04.12.).
96. **Sz.i.:** Fénytvádközlő rendszerek” (előadás anyag), http://www.mht.bme.hu/~udvary/Fenytavk_rendszer/09_FSO.pdf (2013.07.11.)
97. **Dr. BÁRÁNY, N.:** Optikai műszerek elmélete és gyakorlata I. kötet, Nehézipari Könyv-, és Folyóiratkiadó Vállalat, 1953, p.10,27-28,72-85, 218-220,320.
98. **Dr. BÁRÁNY N.:** Optikai műszerek elmélete és gyakorlata IV. kötet, Nehézipari Könyv és Folyóirat kiadó Vállalat, 1953, p.91-173.
99. **Dr. VASS, S. :** Katonai repülő eszközök túlélési lehetőségei az infravörös ön-irányítású rakéták támadásai ellen, http://www.zmne.hu/hadmernok/kulonszamok/robothadviseles6/vass_rw6.pdf (2014. 04. 12.).
100. **NYOBE, N., PEMHA, E.:** Propagation of laser beam through a plane and free turbulent heated air flow: determination of the stochastic characteristics of the laser beam random direction and some experimental results, Progress In Electromagnetics Research, Pier, 53, p.31-53, 2005, <http://www.jpier.org/PIER/pier53/03.0407301.N.Pemha.pdf> (2014. 04. 12.).

101. **WHITE, W. H.:** The components of atmospheric light extinction: A survey of Ground– Level Budgets, Atmospheric Environment, Vol. 24A, No.10, 1990, p. 2673-2679 <http://capitawiki.wustl.edu/images/9/90/90j4.pdf> (2012.09.25)
102. Légi-bemutató képek, <http://justelite.net/2007/05/09/russian-air-show-2007/1396/5> (2014. 04. 12.).
103. **CSUKA, A.:** A fény szabadtéri terjedésének elméleti és gyakorlati vizsgálata, Hadmérnök, VII. évf. 4. szám, 2012. december.
http://hadmernok.hu/2012_4_csuka.pdf ISSN 1788-1919 (2012. 10. 17.).
104. **CSUKA, A.:** Inhomogén közegben terjedő fény refrakciójának vizsgálata differenciálgeometriai módszerekkel,
http://www.peme.hu/userfiles/file/Alkalmazott%20term_tud_,%20orvosi%20szekci%C3%20.pdf (2013. 07. 11.).
105. **LIPSON, A., LIPSON, S. G.:** Optical Physics, Cambridge University Press, 2010, p.35
<http://www.cambridge.org/us/academic/subjects/physics/optics-optoelectronics-and-photonics/optical-physics-4th-edition?format=HB> (2014. 04. 17.).
106. **HIRT C., GUILLAMUE S.:** Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements,
http://espace.library.curtin.edu.au/webclient/StreamGate?folder_id=0&dvs=1352203644200~19&usePid1=true&usePid2=true, (2012.11.04.)
107. **IGNATENKO, Y.V., YU, I.:** Measurement of anomalous angle of deviation of light during satellite laser ranging, SLR station Katzilevy-1893, Crimea, Ukraine, 2008,
http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw16/docs/presentations/sci_4_Makeyev.pdf (2014. 04. 17.).
108. **LÖSCHER, A.:** Atmospheric influence on a laser beam observed on the OICETS-ARTEMIS communication demonstration link, Atmospheric Measurement Techniques, 3, p.1233-1239, 2010, <http://www.atmos-meas-tech-discuss.net/3/2035/2010/amtd-3-2035-2010.pdf> (2014. 04. 17.).

109. **THOMAS, M. E., JOSEPH, R. I.:** Astronomical refraction, <http://techdigest.jhuapl.edu/TD/td1703/thomas.pdf> (2012.11.04.)
110. **Dr. MARTIN, B.:** Refraction of light in the Earth's atmosphere, <http://www.atm.damtp.cam.ac.uk/people/mgb/refraction.html> (2014.04.15).
111. **CHESTER, T.:** How to Calculate Distances, Azimuths and Elevation Angles of Peaks, <http://tchester.org/sgm/analysis/peaks/refraction.html>, (2014.04.15)
112. **KNIGHT, F. B.:** Essays on the prediction process- Lecture Notes, Shanti S. Gupta Editor- Purdue University, 1981, ISDN 0-940600-00-5, p.50-107.
113. **Dr. POPPER, Gy.:**, KURUTZNÉ Dr. KOVÁCS M.: A véges elem módszer matematikai alapjai, BME jegyz., Budapest, 1984, ISBN 963 431 467 8, p.12-50.
114. **CSUKA, A:** Modeling and Simulation Systems for 21 Century: Informatika, XIII. évf. 2. szám (38.), ISSN 1419-2527, p.18-21
http://www.gdf.hu/sites/default/files/informatika_38_5.pdf -2012.07.01
(2012.12.06.)
115. **TAKÁCS, L., L. ZIERMANN M.:** Valószínűség- számítás, Tankönyvkiadó, Budapest, 1972, p.10,12, 101-109.
116. **VERŐNÉ, W. M.:** Fotointerpretáció és távérzékelés 1., A távérzékelés fizikai alapjai, 2010,
http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027_FO11/ch01s05.html
(2011.02.12.)
117. **HAMPEL, C. A.:** The Encyclopedia of Chemistry, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1973, ISBN: 0-442-23095-8, p.194-197, 558-561
118. Jean Baptiste Van Helmont, <http://archive.is/jSRQ5> (2013.01.02)
119. **SZELEZSÁN, J.:** Valószínűségszámítás és matematikai statisztika, LSI oktatóközpont kiadványa, Budapest, 1999, p.12, ISBN 963 557 247 5.
120. **GYULAI, Z.:** Kísérleti fizika II. rész, Tankönyvkiadó, Budapest, 1954, p.193-216.
121. **HORVÁTH, K.:** Investigation of refraction in the low atmosphere, Periodica Polytechnica, Vol.14, Technical University, Budapest, 1970 p.31-41
122. **Dr. GRUBER, J.:** Ifj. **SZENTMÁRTONY, T.:** Gázdinamika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1952, p.90,91, 102-103.

123. **JOPSON, R. M., DARCIÉ, T.E.:** Semiconductor Laser Amplifiers in High-Bit-Rate and Wavelength – Division-Multiplexed Communication Systems, Coherence, Amplification, and Quantum Effects in Semiconductor Lasers, Wiley- Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1991, ISBN 0-471-51249-4, p.323-366.
124. **GAMOW, G., CLEVELAND, J. M.:** Fizika, Gondolat Könyvkiadó, Budapest 1973, p.292-295, 353-356.
125. **HEIST, P., KRÜGER, J.:** Ultrafast cross-phase modulation, Symp on Ultrafast Processes in Spectroscopy, Bayeruth, 1991, Inst. Phys. Conf. Ser. No 126: Section 11, IOP Publishing Ltd, 1992, p.173-180.] [M.L. Karasnov, A.I. Kiselev, G.I. Makarenko: Vector analysis, MIR publishers, Moscow, 1981, p.140.
126. **KARASNOV, M.L., KISELEV, A.I., MAKARENKO, G.I.:** Vector analysis, MIR publishers, Moscow, 1981, p.140.
127. **Sz.i.:** Hullámterjedés, A Föld légköre és rétegei, http://www.puskas.hu/r_tanfolyam/hullamterjedes.pdf (2011.09.29).
128. **SPIEGEL, M. R.:** Analyse vectorielle, McGraw- Hill Inc., New York, 1973, ISBN: 0-07-060228-X, p.135-144.
129. **EULER:** Foundations of Differential Calculus, Springer Verlag, New-York, 2000, p.116
http://books.google.hu/books?id=RqFc0GC1RhcC&pg=PA116&lpg=PA116&dq=cosdx%3D1&source=bl&ots=gDsaMFpCKe&sig=D_GaDLcMzWyZg3FXS8ogGcW3JgQ&hl=hu&sa=X&ei=4C59UKOtHoWLswbm2oG4Ag&ved=0CGEQ6AEwBQ#v=onepage&q=cosdx%3D1&f=false (2012.08.22.)
130. **FAZEKAS, F.:** Műszaki matematikai gyakorlatok, Tankönyvkiadó, Budapest, 1957, p.50.
131. **BAJCSAY, P., FAZEKAS, F.:** Műszaki matematikai gyakorlatok C.VI, Matematikai összefoglaló, Tankönyvkiadó, Budapest, 1957, p.106.
132. Prof.rer.nat.habil.**BRUNNER, W.:** Wissenspeicher Lasertechnik, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1982, p.28-29.
133. **Sz. i.:** Atmospheric Optics Glossary, http://mintaka.sdsu.edu/GF/glossary.html#astronomical_hor (2012.11.06.)

134. **BOKSZ, G. E. P., STUART, J.:** Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery, Wiley, New York, 2005, ISBN:0-47-1718-130, p.37-164.
135. **JÁSZAY, T.:** Műszaki hőtan- Hőközlés, Tankönyvkiadó, Budapest, 1966, p.219-273
136. **EDLÉN, B.:** The refractive index of air, Metrologia 2, 1966, p.71–80
<http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CDcQFjAB&url=http%3A%2F%2Falexandria.tue.nl%2Frepository%2Ffreearticles%2F606607.pdf> (2013.06.09.)
137. **OWENS, J. C.:** Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition, Appl. Opt. Vol. 6 No.1,1967, p.51–59,
<http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDMQFjAA&url=http%3A%2F%2Fweb.mit.edu%2Fytc%2Fwww%2FHLM%2FRef%2FopticsPaper02.pdf&ei=eBFQU7yCA8jRtQb4jYGIAG&usg=AFQjCNEvoNgLIPqPHEJdiU6p5weYkHikbg> (2013.06.09.)
138. **MACOVEZ, R., MARIANO, M.:** Measurement of the dispersion of air and of refractive index anomalies by wavelength nonlinear inrterferometry, Optical Society of America, 2009,
http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0CGYQFjAF&url=http%3A%2F%2Fwww.icfo.eu%2Fimages%2Fpublications%2FJ09-85.pdf&ei=pBBQU_iFKsfDtQaNkoH4DQ&usg=AFQjCNEfuqz8iD-swT7KankC-myD6adVJg (2013.06.09.)
139. **JONES, F. E.:** The refractivity of air, J. Res. NBS 86, 1981, p.27–32,
http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fnlpubs.nist.gov%2Fnistpubs%2Fjres%2F086%2Fjresv86n1p27_A1b.pdf&ei=wxFQU-L8MMiNtQbY6oFQ&usg=AFQjCNHKAWsiRZMJffl8Hs9rNlSiKdwGg (2013.06.09.)
140. **YANG, Y., MANDEHGAR, M.:** Time domain measurement of the THz refractivityof water vapor, Optical Society of America, 2012,
http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww.opticsinfobase.org%2FDirectPDFAccess%2F67D99437-FF86-19EB-

- CA83517DF24F2DE4_245321%2Foe-20-24-26208.pdf%3Fda%3D1%26id%3D245321%26seq%3D0%26mobile%3Dno&org= (2013.06.09.)
141. **BIRCH, P., DOWNS, M. J.:** The results of a comparison between calculated and measured values of the refractive index of air, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 21, 1988, p.694–695. <http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-28-5-825> (2013.06.09.)
142. **BIRCH, K. P., DOWNS, M. J.:** An updated Edlén equation for the refractive index of air, *Metrologia* 30, 1993, p.155–162, <http://iopscience.iop.org/0026-1394/30/3/004> (2013.06.09.)
143. **BIRCH, K. P., DOWNS, M. J.:** Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air, *Metrologia* 31, 1994, p.315–316, <http://iopscience.iop.org/0026-1394/31/4/006> (2013.06.09.)
144. **BEERS, J., DOIRON, T.:** Verification of revised water vapour correction to the refractive index of air, *Metrologia* 29, 1992, p.315–316, <http://iopscience.iop.org/0026-1394/29/4/008> (2013.06.09.)
145. **CIDDOR, P. E.:** Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Appl. Opt.* 35, 1996, p.1566–1573. http://books.google.hu/books?id=D-eoHAAACAAJ&dq=pdf+P.+E.Ciddor:Refractive+index+of+air:+new+equations+for+the+visible+and+near+infrared&hl=hu&sa=X&ei=chRQU_HdN6StywP1h4DQCA&ved=0CDIQ6AEwAA (2013.06.09.)
146. **CIDDOR, P. E., HILL, R. J.:** Refractive Index of Air. 2. Group Index., *Applied Optics (Lasers, Photonics and Environmental Optics)*, 38, 1999, p.1663–1667, <http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-38-9-1663> (2013.06.09.)
147. **BÖNSCH, G., POTULSKI, E.:** Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae, *Metrologia* 35, 1998, p.133–139, <http://iopscience.iop.org/0026-1394/35/2/8> (2013.06.09.)
148. **MATHAR, R. J.:** Calculated refractivity of water vapor and moist air in the atmospheric window at 10 μm , *Appl. Opt.* 43, 2004, p.928–932

- <http://www.opticsinfobase.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-43-4-928> (2013.06.09.)
149. **COLAVITA, M. M., SWAIN, M. R.:** Effects of atmospheric water vapor on infrared interferometry, *Pub. Astron. Soc. Pacific*, 116, 2004, p.876–885.
150. **MATHAR, R. J.:** Refractive index of humid air in the infrared: Model fits, *J. Optics A: Pure Appl. Opt.* 9, 2007, p.470–476.
151. **THOMAS, M. E., JOSEPS, R. I.:** Astronomical Refraction, *Applied Research, JohnsHopkins Apl. Technical Digest*, Vol. 17. Nr. 3, 1996, p. 279-284
- http://books.google.hu/books?id=nAtBAQAAlAAJ&q=Michael+E.+Thomas,+Rhard+I.+Joseph:+%E2%80%9EAstronomical+Refraction&dq=Michael+E.+Thomas,+Richard+I.+Joseph:+%E2%80%9EAstronomical+Refraction&hl=hu&sa=X&ei=XBZQU7T7HaP_ygOTjoJI&ved=0CEkQ6AEwAw (2013.06.09.)
152. **HEMMATI, H.:** Optical Systems for free-space laser communications, <http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/38461/1/03-1910.pdf> (2012.04.12.).
153. **GHASSEMLOOY, Z., POPOOLA, W.O.:** Terrestrial Free-Space Optical Communications”, http://www.researchgate.net/publication/228985486_Atmospheric_channel_effects_on_terrestrial_free_space_optical_communication_links (2012.03.21.).
154. **CSUKA, A.:** Inhomogén közegben terjedő fény refrakciójának vizsgálata differenciálgeometriai módszerekkel, *Professzorok az Európai Magyarországi Egyesület IV. PhD konferencia, 2012*, http://www.peme.hu/userfiles/file/Alkalmazott%20term_tud_%20orvosi%20szekci%C3%B3%20.pdf (2014.02.15).
155. **J., E., DECKER:** Refractive index of air precision length measurements, *Presentation, Science, Technology and Innovation Division, Vancouver, Canada, 2011*, www.humboldtcanada.com/presentations_air/jennifer.pdf (2014.08.22).
156. **PALONKA, H.:** Zeiss interferométer rendszertechnikai vizsgálata, *Diplomadolgozat, Finommechanikai és Optikai Tanszék, BME, 1986*
157. **G. E. SOMMARGREN:** A new laser measurement system for precision metrology, *Precision Engineering, Dallas, Texas, 1986*

- <http://action.zygo.com/acton/attachment/4246/f-00b0/0/-/-/-/file.pdf>
(2014.08.22).
158. Prof. **S.G. LIPSON**, M..Tordjam: Method for accurate and sensitive Final project's report refractive index measurement,
<http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDIQFjAA&url=http%3A%2F%2Ftx.technion.ac.il%2F~moise%2FA1-Hepublic.pdf&ei=WzfuU6b6PMfm4QTJ64HwAQ&usg=AFQjCNGtlJJBLy5ysl0EPHxvLZzPYZ7fvg> (2014.08.04).
159. **B., SPENCER:** Kinetics of 2,3 Epoxy-1-Propanol Hydrolysis, Journal of Chemical Education, Vol. 65, Nr. 9, Stanford University, CA,
http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fweb.stanford.edu%2Fgroup%2FZarelab%2Fpublinks%2Fzarepub346.pdf&ei=xz3uU7XGJoS8ygOhz4DICg&usg=AFQjCNEI93XQKYplaiF3QCBbxQe_aH3aPgú (2014.08.10).
160. **H., FAKHRUDDIN:** Measuring the refractive index of air, using a vacuum chamber, American Vacuum Society international Symposium, Baltimore, Maryland, 1998,
http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.avso.org%2FAVS%2Ffiles%2Fca%2Fca41cc81-7019-41ba-8f06-1a540fb185c4.pdf&ei=tDfuU6SIrP04QSNtYDgDQ&usg=AFQjCNEox1_dEpzsrjkAFm2bIKzrh0NotA (2014.08.21).
161. **Sz. i.:** Refractive index measurement principle, K-Patents Process Instruments,
http://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.kpatents.com%2Fpdf%2Fdownloads%2Frefractive_i (2014.08.02).
162. **SÁRKÖZY, F., FARKAS, E.:** Instrumental checking of certain instrument errors of physical- geodetic telemeters, Periodica Politechnica Civil XIV/1, Vol.14, Technical University, Budapest, 1970, p.98-104.
163. A Magyar Csillagászati Egyesület CCD-s szaksoportjának honlapja, Távol-ságmérés CCD-vel, <http://ccd.mese.hu/egyb/oc-tavol.html> (2014.04.19.)

164. **MIHEJEV, M.A.:** A hőátadás gyakorlati számításának alapjai, Tankönyvkiadó, Budapest, 1953, p.304-320.
164. Raynger II Plus távhőmérő,
<https://www.google.hu/search?q=Raynger+II&client=firefox-beta&hs=aih&sa=N&rls=org.mozilla:hu:official&channel=np&tbm=isch&tbo=u&source=univ&ei=mLzeUtkvy4DLA-PzgPAH&ved=0CDYQsAQ4FA>
(2013.07.13).
166. **H. C. van de HULST:** Light Scattering by Small Particles, John Wiley & Sons, Inc, 1981, ISBN 0-486- 64228-8, p191-193, 228-223.
167. **ATKINS, P. W.:** Fizikai kémia I. kötet, Nemzeti tankönyvkiadó, Budapest, 1999, p.23
168. KE-25, KE-50 típusú oxigénszenzorok adatlapja:
<http://www.datasheetarchive.com/dl/Scans-003/Scans-0065571.pdf>
(2013.01.09.).
169. Hoeller Kft honlapja, Gázszenzorok fajtái:
<http://hoeller.hu/hu/gazszenzorok/elektrokemiai-gazszenzorok.html>
(2012.05.23.).
170. **CANDEL, S.:** Mécanique des fluides- Cours, Dunod, Paris, 1995, ISBN 2-10-002585-6, p.5, 24,37.
171. **HEY, D.H.:** Kingzett's Chemical Encyclopedia, Bailliére- Tindal and Cassel, London, 1966, p.3, 22-23,172-173.
172. **Dr. Ing. D'ANS, J., Dr.phil LAX, E.:** Taschenbuch für Chemiker und Physicher, Springer Verlag, Berlin, 1949, p.1161-1162
173. TCD1201D CCD sorkamera adatlapja,
<http://www.allcomponents.ru/toshiba/tcd1201d.htm> (2011.09.27).
174. **Sz.i.:** Introduction to Gaussian Beam Optics, www.mellesgriot.com
(2012.15.04).
175. **KIM, I. I., Mc ARTHUR, B., KOREVAAR, E.:** Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications,
http://www.ophiropt.com/user_files/laser/beam_profilers/propagationfactor.dat
a.pdf (2012.04.22.)

176. EMX development system, GHI electronics, www.ghielectronics.com (2014.04.13.).
177. **PETERSON, C.:** How it works: The charged-coupled device, or CCD <http://legacy.jyi.org/volumes/volume3/issue1/features/peterson.html> (2013.03.04).
178. A Magyar Csillagászati Egyesület CCD-s szakcsoportjának honlapja, Távol-ságmérés CCD-vel, <http://ccd.mcse.hu/ccd.html> (2014.04.19.).
179. MUSTEK MATADOR-105 handheld scanner, <http://www.driversimple.net/Scanner/Mustek-Matador-105-Handheld> (2012.12.03.).
180. TCD1304AP CCD sorkamera adatlapja: www.spectronicdevices.com/pdf/TCD1304AP.pdf (2012.12.13).
181. XILINX XC3064 adatlapja, <http://www.datasheetarchive.com/dlmain/Datasheets-40/DSA-799775.pdf> (2012. 03. 17.).
182. XILINX alkalmazási segédletek <http://www.datasheetarchive.com/dlmain/Datasheets-41/DSA-800223.pdf> (2012.03.17.).
183. SAB80C535 adatlapja: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/infineon/1-d80515.pdf> (2012.03.17.).
184. CDM4161A típusú szén-dioxid érzékelő modul adatlapja, http://www.sos.sk/a_info/resource/c/CDM4161A.pdf (2013.02.24).
185. LM35 hőmérséklet érzékelő adatlapja: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf> (2013. 02. 24).
186. HS1100 páratartalom érzékelő adatlapja: <http://ww.parallax.com/sites/default/files/downloads/27920-Humidity-Sensor-Datasheet.pdf> (2013.02.24).
187. **WANG, W. C.:** Optical Methods in Mechanical Analysis, <http://depts.washington.edu/mictech/optics/me557/week1.pdf> (2012.09.12.).
188. **MÖLLER, K. D.:** Optics, Springer, Newark, 2007, ISBN 0-387-95360-4, p.49-58.

189. Refractive index database,
<http://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=polycarbonate&page=Sultanova>
(2014.03.10.).
190. **KASAROVA, S. N., SULTANOVA, N. G.:** Analysis of the dispersion of optical plastic materials, *Optical materials* 29 Science Direct, 2007 p.1481-1490,
www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09253467060024 (2014.04.13.).
191. Cement –Beton Zsebkönyv-2007,
www.sasovits.hu/cnc/irodalom/4594fc87222fa-BETON-.pdf (2015.05.11.).
192. CA3130 adatlapja,
<http://www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/fn81/fn817.pdf>
(2012.12.30.).
193. Időalap generátor adatlapja,
<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS12CR887-DS12R887.pdf>
(2012.01.18.).
194. **BOGNÁR, J.-né, MOGYORÓDI, J.:** Valószínűségi számítás Feladatgyűjtemény,
Tankönyvkiadó, Budapest, 1971, p.135, 144-145, 148-149.
195. **HAVANCSÁK, K.:** Mérési adatok kezelése és értékelése, TÁMOP, ELTE-TTK, 2012, ISBN 978-963-279-548-5, p.126-127.
196. **V.,V., VOLLGRIN, R.,N., KARIMOV:** Korrelációs módszerek az ipari szabályozástechnikában, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984, p.25-35.
197. **Sz.i.:** A légkör szerkezete; www.espere.net (2012.02.06.).
198. **Sz. i.:** Változó sűrűségű közeg statikája, dinamikája
<http://eki.sze.hu/ejegyzet/ejegyzet/hotan/2fejezet.htm>
199. **ROUNDY, C. B.:** Current Technology of Laser Beam Profile Measurements,
<http://aries.ucsd.edu/LMI/TUTORIALS/profile-tutorial.pdf> (2012.10.23.)
200. **D., E., D., ÇUHADAR:** The Köster's interferometer for gauge block length measurements, Dissertation, Ankara University, 2007,
<http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12608987/index.pdf> (2014.08.12).
201. **Sz.i.:** Refraction index of air and CO₂ with Michelson interferometer, PHYWE series publications, Göttingen, Germany,

RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

ABL	Air Borne Laser ~ <i>fedélzeti lézerfegyver.</i>
A/D	Analog to Digital Converter ~ <i>analóg/ digitális jelátalakító áramkör.</i>
AM-FM	Amplitude- Frequency Modulation ~ <i>amplitúdó, ill. frekvenciamoduláció.</i>
CCD	Charge Coupled Device ~ <i>töltéscsatolt (képrögztítő) eszköz.</i>
DIP	Dual In Package ~ <i>kétsoros kivezetéssel ellátott alkatrésztokozás.</i>
DVR	Digital Video Recorder ~ <i>digitális képrögztítő.</i>
EEPROM	Electrical Erasable Programable Read Only Memory ~ <i>újraírható memóriatípus.</i>
FPGA	Field Programable Gate Area ~ <i>programozható kapuáramkörökből felépülő áramkör.</i>
ICAO	International Civil Aviation Organization ~ <i>civil repülés nemzetköziszervezete.</i>
OOK	On Off Keying ~ <i>moduláció ki/be kapcsolás útján.</i>
PIC	Programable Integrated Circuit ~ <i>programozható integrált áramkör (Microchip- mikrokontroller család).</i>
RF	Radio Frequency ~ <i>rádiofrekvenciás.</i> Nd:YAG Neodymium, Yttrium Aluminium Garnet ~ <i>a megjelölt vegyelemekből előállított (gránát) kristály.</i>
RISC	Reduced Instruction Set Computer ~ <i>csökkentett utasításkészletű mikroszámítógép.</i>
RTC	Real Time Clock ~ <i>valós idejű óra.</i>
SMD	Surface Mounted Devices ~ <i>felületszerelt alkatrészek.</i>
USB	Universal Serial Bus ~ <i>soros adatátviteli csatorna.</i>

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra	A YAL-1A lézerefegyvere [42].....	17
2. ábra	Lézer mutató-eszközök (pointerek) felépítése [49]	20
3. ábra	A félvezetőlézer fénysugarának geometriája.....	23
4. ábra	A lézerefény intenzitásának normál eloszlása.....	24
5. ábra	A szén-dioxid és a propán spektrális abszorpciója [73].....	37
6. ábra	A levegő sávozáró tulajdonsága [89].....	38
7. ábra	A légköri pára hatása a lézerefény terjedésére [94].....	40
8. ábra	A közeghatár hálómodellje	53
9. ábra	Közegmodell rétegzett vonalas ábrája.....	60
10. ábra	Gömbfelületekkel határolt inhomogén, izotróp közeg modellje.....	63
11. ábra	Egyszerűsített rétegzett síkmodell.....	64
12. ábra	Fényterjedés a határrétegben	65
13. ábra	Elemi fénysugár refrakciója két eltérő törésmutatójú közeg határán	67
14. ábra	Teljes visszaverődésen alapuló refraktométer felépítése [158].....	83
15. ábra	A szabadtéri mérés elve.....	84
16. ábra	Az eszközelhelyezés helyszínrajza	88
17. ábra	A völgyszelvény vázlata.....	89
18. ábra	Hőtérkép diagramok	95
19. ábra	A lézerefény divergenciája [174]	100
20. ábra	Fénynyaláb tágító és fókuszáló lencserendszer felépítése [174]	101
21. ábra	A lézer moduláló jele.....	103
22. ábra	A lézerforrás vezérlő és adatletöltő áramkörének tömbvázlata	104
23. ábra	A mérővevő és adatgyűjtő felépítése	115
24. ábra	A törésmutató mérésének elve	122
25. ábra	A 10 bájtos adatkeret felépítése	133
26. ábra	Az adatátvitel szinkronizálása	134
27. ábra	Adatgyűjtési periódusok	134
28. ábra	A relatív elmozdulások vektorábrája.....	138

KÉPEK JEGYZÉKE

1. kép	Adaptív optika korrekciós hatása [42]	18
2. kép	A lézerdióda forrásáramának smd szabályozó eleme.....	21
3. kép	A félvezetőlézer gerjesztő forrása és optikai rezonátora	22
4. kép	A fény légköri refrakciója [102]	42
5. kép	Az eszközelhelyezés megtervezése.....	89
6. kép	Távolságmérés Wild Distomat Di4-el	90
7. kép	2012. ápr. 02.-án készült eszköz-elhelyezési terv részlet.....	92
8. kép	Erőteljes párolgás a tetőfelület felett	93
9. kép	Az 1-es pont (10. kép) hőmérsékletének meghatározása távhőméréssel....	94
10. kép	A felszíni hőmérséklet mérésének terve	95
11. kép	A szén-dioxid és a légszennyező anyagok elsődleges forrása	96
12. kép	A lézerforrás fényének eloszlása az ernyőn	101
13. kép	Modulált fény előállítására alkalmas, átalakított lézerpointerek	102
14. kép	A modulátor és a rövidhullámú rádióvevő	104
15. kép	Beállító rugós szerkezet felépítése	106
16. kép	A forrás oldali eszközök elhelyezése	107
17. kép	A vizsgált terület behatárolása az energia-eloszlás függvényében	111
18. kép	A felhasznált CCD sorkamera forrása	113
19. kép	A mérővevő és adatgyűjtő belső felépítése	116
20. kép	Felhasználásra kész mérővevő és adatgyűjtő.....	117
21. kép	A fény útja a mérővevőben	119
22. kép	Műhelymikroszkóp és a mérés tárgya	121
23. kép	Telepített mérővevő és adatgyűjtő a vétel helyén	126

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat	A lézerek típusai és hullámhosszuk [13] [14].....	13
2. táblázat	Az üvegházhatás kialakulásában szerepet játszó gázösszetevők.[80].	36
3. táblázat	A differenciaképzés alapadatai	137

MELLÉKETEK

1. sz. melléklet: *A levegőt alkotó gázok jellemzői.*

1. táblázat: *Gázmolekulák mérete. [170]*

Gáz	Molekula átmérő d (nm)	Közepes szabad úthossz λ (nm)
Hélium	0,200	209
Hidrogén	0,218	176
Nitrogén	0,316	83
Oxigén	0,296	95
Szén-dioxid	0,460	39

1. táblázat: *A Föld légkörét alkotó gázok aránya [70] [171]**

Összetétel	Térfogat százalék (%)	Térfogat százalék (%)
Nitrogén (N ₂)	78,084	
Oxigén (O ₂)	20,95	
Argon (Ar)	0,93	0,94*
Szén-dioxid (CO ₂)	0,03	
Vízgőz (H ₂ O)	0,0044	
Neon (Ne)	0,002	0,00123*
Hélium (He)	0,00052	0,0004*
Metán (CH ₄)	0,00015	
Kripton (Kr)	0,000114	0,00005*
Hidrogén (H ₂)	0,0001	
Nitrogén dioxid (NO ₂)	0,00006	
Szén-monoxid (CO)	0,00002	
Ózon (O ₃)	0,000005	
Xenon (Xe)	0,000009	0,000006*

3. táblázat: Gázok fizikai jellemzői. [170]

Gáz	Vegyjel	M, Molekula- tömeg [kg/kmol]	γ Faj- hő/Hőmérs éklet [298,15 K]	Konstans $r=R/M$ [J/kg K]	c_p , Fajhő [J/kg K]
Levegő	-	28,96	1,400	287,06	1004,00
Argon	Ar	39,94	1,658	208,15	524,61
Szénmon- oxid	CO	28,01	1,398	296,83	1042,50
Szén-dioxid	CO ₂	44,01	1,288	188,92	845,73
Hélium	He	4,00	1,659	2078,20	5233,50
Metán	CH ₄	16,04	1,304	518,25	2223,20
Nitrogén	N ₂	28,01	1,400	296,80	1038,30
Oxigén	O ₂	32,00	1,395	259,82	916,90
Víz (gőz)	H ₂ O	18,01	1,329	461,50	1863,10

1. táblázat: A száraz levegő jellemzői 1 bar légköri nyomáson. [164]

t [C°]	γ [kg/m ³]	Cp [kcal/kg C°]	$10^2\lambda$ [kcal/m ó C°]	$10^2\alpha$ [m ² /ó]	$10^6\mu$ [kg mp/m ²]	$10^6\nu$ [m ² /mp]	Pr
-180	3,685	0,250	0,65	0,705	0,66	1,76	0,900
-150	2,817	0,248	1,00	1,45	0,89	3,10	0,770
-100	1,984	0,244	1,39	2,88	1,20	5,94	0,742
-50	1,534	0,242	1,75	4,73	1,49	9,54	0,726
-20	1,365	0,241	1,94	5,94	1,66	11,93	0,724
0	1,252	0,241	2,04	6,75	1,75	13,70	0,723
10	1,206	0,241	2,11	7,24	1,81	14,70	0,722
20	1,164	0,242	2,17	7,66	1,86	15,70	0,722
30	1,127	0,242	2,22	8,14	1,91	16,61	0,722
40	1,092	0,242	2,28	8,65	1,96	17,60	0,722
50	1,056	0,243	2,34	9,14	2,00	18,60	0,722

2. sz . melléklet: *Légköri refrakció jelensége és megfigyelésének körülményei.*



1. kép
Kettős fénytörés alsó légrétegekben
(Forrás: [90])

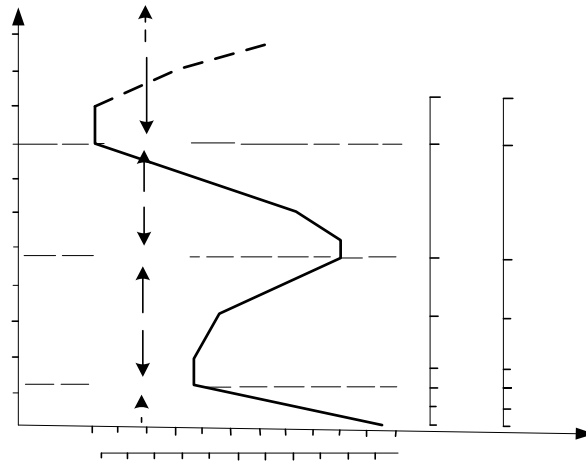


2. kép
Fénytörés jelensége a felső légrétegekben
(Forrás: [91])



3. kép
A fénytörés jelensége nagy vízfelület felett
(Forrás: [92])

3. sz. melléklet: Állapotjelzők és kapcsolatok.



1. ábra

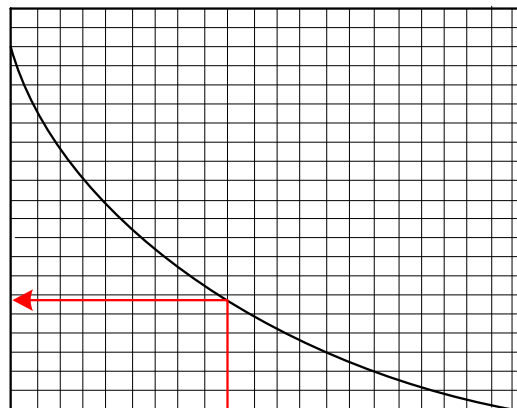
*Hőmérséklet, nyomás és sűrűség profil változás a magasság függvényében
(Forrás:[197])*

A normál atmoszférát az ICAO⁹⁹, valamint a DIN- 5450 szabvány a következő módon állapította meg: A föld felszínén a levegő: nyomása:

$p_0 = 101325 \text{ Pa}$ (1032,25 mbar), hőmérséklete: $T_0 = 288,15 \text{ K}$, sűrűsége:

$\rho_0 = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. A hőmérséklet- gradiens 11 km magasságig: $\frac{dt}{dz} = -0,0065 \frac{\text{K}}{\text{m}}$. A

hőmérséklet 11÷20 km között: $T = 216,5 \text{ K}$ állandó.

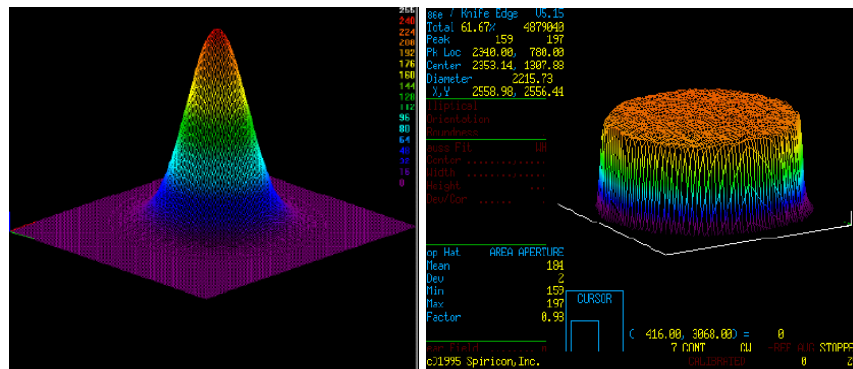


2. ábra

*A levegő törésmutatója a fény hullámhosszának a függvényében
(Forrás:[198])*

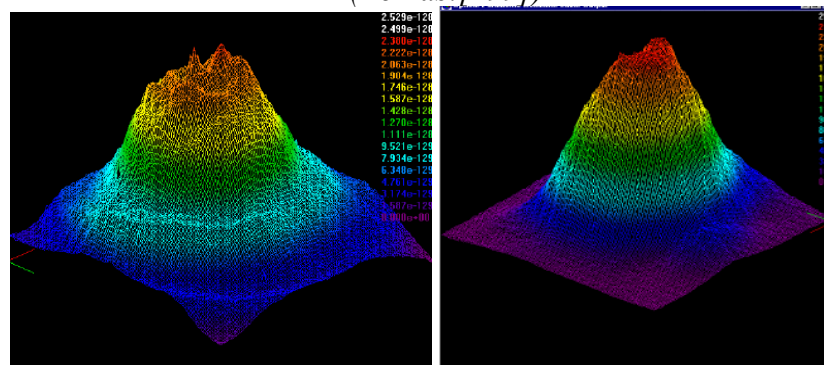
⁹⁹ International Civil Aviation Organization

4. sz. melléklet: Különféle lézerek térbeli energia eloszlásának összehasonlítása.



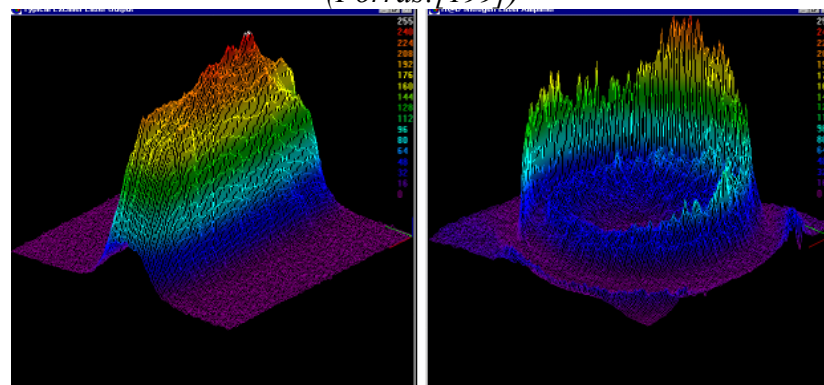
1. ábra

Ideális Gauss fényenergia eloszlás (balra), lapos profil (jobbra)
(Forrás:[199])



2. ábra

CO₂ lézer (balra), HeNe lézer (jobbra)
(Forrás:[199])

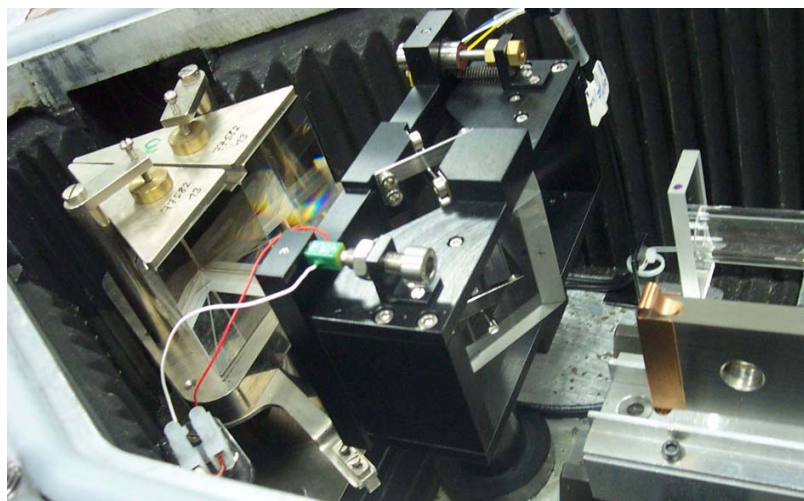


3. ábra

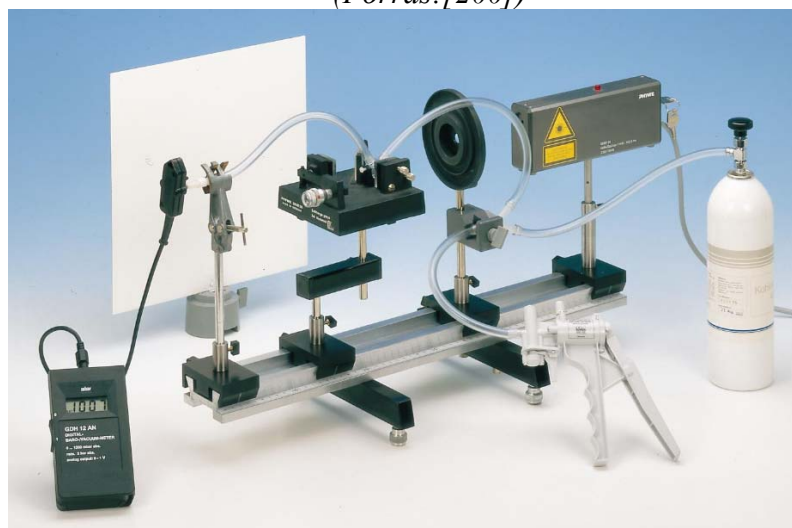
Excimer¹⁰⁰ lézer (balra), N₂ „gyűrű” lézer (jobbra)
(Forrás:[199])

¹⁰⁰ Elektronnyalábbal, vagy elektromos kistüléssel gerjesztett gázlézer, amelyben a foton akkor lép ki, amikor a gerjesztett molekula alacsony energiaszintre kerül és szétesik. Hullámhossza a látható és ultraibolya tartományba esik.

5. sz. melléklet: Interferométerek.



1. kép
Köster-féle interferométer
(Forrás: [200])



2. kép
Michelson interferométer
(Forrás: [201])

6. sz. melléklet: 2013. okt.06.-án rögzített adatsor egy részlete.

```
110110100011001111001
110110100011001111001
110110100011001111001
110110100011001111001
110110100011001111001
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001111010
110110100011001177111010
110110100011001111011
```