

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**GÁZTERMELÉSHEZ KAPCSOLÓDÓ, HIDRÁT MENTESÍTÉSRE
SZOLGÁLÓ DIGITÁLIS IRÁNYÍTÁSI MEGOLDÁSOK**

PhD értekezés

KÉSZÍTETTE

BÖLKÉNY ILDIKÓ
okleveles gépészmérnök

HATVANY JÓZSEF INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
TERMELÉSINFORMATIKA TÉMATERÜLET
MÉRÉS- ÉS IRÁNYÍTÁSTECHNIKAI INFORMÁCIÓS RENDSZEREK TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐ

Dr. Szigeti Jenő
a matematika tudományok doktora (CSc)

TUDOMÁNYOS VEZETŐ

Dr. Czap László
doktori (PhD)

Miskolc, 2019

TARTALOMJEGYZÉK

Nyilatkozat.....	iii
A témavezető ajánlása.....	iv
Köszönetnyilvánítás.....	vi
Jelölések jegyzéke	vii
Rövidítések jegyzéke	xi
1. Bevezetés	1
1.1. A kutatás célja.....	2
1.2. A dolgozat felépítése.....	2
1.3. A kutatási terület irodalmi áttekintése	4
2. A gázhidrát.....	7
2.1. Gázhidrátok kialakulása.....	7
2.2. Gázhidrátok tulajdonságai.....	10
2.3. Védekezés a gázhidrátok ellen.....	15
3. A hidrátmentesítés	17
3.1. Hidrátgátló készítmények.....	17
3.2. Inhibitor adagoló rendszerek.....	19
4. A hidrátosodási nyomás	23
4.1. A fázishatárgörbe meghatározása.....	23
4.2. Az LSQ modell	32
4.3. Összegzés.....	38
4.3.1. Tézis I.....	39
4.3.2. Újdonság és érvényesség.....	39
4.3.3. Kapcsolódó publikációk	39
5. Hidrát-képződés detektálás.....	40

5.1. A mérőrendszer	41
5.2. A mérések	48
5.3. Neurális hálózatok	53
5.4. A detektáló rendszer	63
5.5. Összegzés	71
5.5.1. Tézis II	72
5.5.2. Újdonság és érvényesség	72
5.5.3. Kapcsolódó publikációk	72
6. Terepi hidrát-jelenlét észlelése	73
6.1. A korszerű adagolórendszer	74
6.2. A mérések	80
6.3. Hidrát-detektálás terepen	84
6.4. Összegzés	89
6.4.1. Tézis III	90
6.4.2. Újdonság és érvényesség	90
6.4.3. Kapcsolódó publikációk	90
7. Összefoglalás	91
8. Summary	93
Irodalomjegyzék	1
Saját publikációk az értekezés témakörében	7
Mellékletek	11

NYILATKOZAT

Alulírott, **Bölkény Ildikó** kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem és abban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2019. március 31.

.....*Bölkény Ildikó*.....

A dolgozat bírálatai és a védésről készült jegyzőkönyv megtekinthető a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Dékáni Hivatalában.

A TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA

BÖLKÉNY ILDIKÓ

**„GÁZTERMELÉSHEZ KAPCSOLÓDÓ, HIDRÁT MENTESÍTÉSRE SZOLGÁLÓ
DIGITÁLIS IRÁNYÍTÁSI MEGOLDÁSOK” című PhD értekezéséhez**

Bölkény Ildikó a Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet Műszerfejlesztési és Informatikai Osztályán főleg az olaj- és gázipari, illetve energetikai szegmensekhez kapcsolódó kutatási feladatokat végzett, egyrészt irányítástechnikai másrészt a kapcsolódó – gépészeti villamos, mechatronikai kutatási tevékenységeket. Jelenleg a Miskolci Egyetem Korszerű Anyagok és Intelligens Technológiák Felsőoktatási és Ipari Együttműködési Központ Elektronikai és Informatikai Kutatóintézet munkatársa. Az AFKI Műszerfejlesztési és Informatikai Osztályon több éve művelt, a gázhidrátok hatékony gátlására irányuló kutatási feladatok végzésébe kapcsolódott be. A kutatási határterületet lefedő feladatokat a jelölt sikeresen oldotta meg, és ezekről hazai és nemzetközi konferenciákon magyar illetve angol nyelvű kiadványokban publikált. Legutóbbi kiemelkedő publikációi a Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences (Q3) folyóiratban jelent meg. Az értekezés Bölkény Ildikó saját eredményeit tartalmazza, amely alapján a jelölt számára a Ph.D. cím odaítélését messzemenően támogatom és javaslom.

Miskolc, 2020. március 31.



.....

Dr. Czap László
egyetemi docens

*Az értekezést édesapám,
Bölkény László emlékének ajánlom.*

„Two paradoxes are better than one; they may even suggest a solution.”

Teller Ede

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik támogatásukkal hozzájárultak az értekezés elkészítéséhez, különös tekintettel tudományos vezetőmnek, Dr. Czap Lászlónak és nyugalmazott tudományos vezetőmnek, Dr. Jónap Károlynak, akik segítőkész munkájukkal és támogatásukkal nélkülözhetetlen segítséget nyújtottak kutatómunkámhoz. Szakmai segítségükért és támogatásukért külön köszönet illeti Dr. Füvesi Viktort, Dr. Lakatos Istvánt és Rónai Lászlót. Szeretnék köszönetet mondani a régi kollektívámnak Godó Lacinak, Konyha Józsinak, Subert Józsinak, Szopkó Szilinek és Vörös Csabának munkám támogatásáért. Köszönöm továbbá a Miskolci Egyetem Hatvany József Informatikai Tudományok Doktori Iskola vezetőinek és tanárainak, valamint az Elektronikai és Informatikai Kutatóintézet munkatársainak, hogy lehetőséget biztosítottak az értekezés elkészítéséhez, benyújtásához. Ezúton szeretnék köszönetet mondani édesanyámnak Borának, édesapámnak Lacinak, bátyámnak Lacinak és családjának, hogy feltétel nélkül támogattak, hittek bennem és elviseltek, ami tudjuk, hogy nem mindig egyszerű :). És végül, de nem utolsó sorban szeretnék köszönetet mondani barátaimnak erkölcsi támogatásukért, a vidám pillanatokért és a közös stresszoldásokért :).

„A kutatómunka a Miskolci Egyetemen működő Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet GINOP-2.3.2-15-2016-00010 jelű „Földi energiaforrások hasznosításához kapcsolódó hatékonyság növelő mérnöki eljárások fejlesztése” projektjének részeként – a Széchenyi 2020 program keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Strukturális és Beruházási Alapok társfinanszírozásával valósult meg.”

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Å	Ångström – a hosszúság mértékegysége ($1 \text{ Å} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}$)
a	Kihara módszer kísérleti úton meghatározott paramétere
a	Peng-Robinson féle paraméter
Ah	amperóra - az elektromos töltés mértékegysége
a_i	Peng-Robinson féle paraméter i komponens esetén
a_j	Peng-Robinson féle paraméter j komponens esetén
a_v	vízaktivitás
b	Peng-Robinson féle paraméter elegyre definiálva
bar	a nyomás mértékegysége ($1 \text{ bar} \approx 100\,000 \text{ Pa}$)
barg	a relatív nyomás mértékegysége
b_i	Peng-Robinson féle paraméter i komponens esetén
°C	a hőmérséklet mértékegysége
c_{ji}	Langmuir konstans
cm³	köbcentiméter - a térfogat mértékegysége ($1 \text{ cm}^3 = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$)
c_p	a hőkapacitás nyomáson vett értéke
db	darab
f	a fugacitás jele
f_i^f	a fugacitás a folyadékfázisban i komponensre nézve
f_i^g	a fugacitás a gázfázisban i komponensre nézve
f_i^h	a fugacitás a hidrát-fázisban i komponensre nézve
f_j	a j vendég molekula fugacitása
f_k	a k vendég molekula fugacitása
f(s)	aktivációs függvény (neurális hálózat)
Gm³	gigaköbméter - a térfogat mértékegysége ($1 \text{ Gm}^3 = 1 \times 10^{27} \text{ m}^3$)
g/m³	a tömegkoncentráció mértékegysége
g/mól	a moláris tömeg mértékegysége
H₀	entalpia, 273,15 K referencia hőmérséklet, illetve a 0 atmoszféra nyomás esetén
Hz	Hertz – a frekvencia SI mértékegysége

J/mól	a párolgáshő mértékegysége
k	Boltzmann állandó
k_{ij}	iterációs konstans
kJ/mól	a párolgáshő mértékegysége (1 kJ/mól = 1 x 10 ³ J/mól)
K_{vs}	gőz-szilárd egyensúlyi állandó
kW	kilowatt, a teljesítmény mértékegysége (1 kW= 1 x 10 ³ W)
l/h	áramlási sebesség
N	Kihara módszer egy paramétere (N=4, 5, 10, 11)
n_i	a hálózat bemeneti késleltető láncainak száma
nl/min	áramlási sebesség
nm	nanométer - a hosszúság mértékegysége (1 nm = 1 x 10 ⁻⁹ m)
n_o	a NOE hálózat kimeneti késleltető láncainak száma
n_{ro}	a NARX hálózat kimeneti késleltető láncainak száma
m	méter – hosszúság mértékegysége
m³	köbméter - a térfogat mértékegysége
ml/h	a gázáramlás mértékegysége
mm	milliméter – a hosszúság mértékegysége (1 mm = 1 x 10 ⁻³ m)
m/s	sebesség mértékegysége
p	a nyomás jele
p₀	0 atmoszféra nyomás
p_{s1}	az S1 struktúrához tartozó nyomások
p_{s2}	az S2 struktúrához tartozó nyomások
PSI	font per négyzethüvelyk - nyomás mértékegysége
P(x)	a közelítő harmadfokú polinom
r	üregközépponttól való távolság
R	az egyetemes gázállandó jele (R=8,314 J/(mól K))
R_c	szabad üreg sugara
s	szekundum – az idő mértékegysége
T	a hőmérséklet jele
T₀	273,15 K referencia hőmérséklet
T_{hs1}	hidrátképződési hőmérséklet S1 struktúra esetén
T_{hs2}	hidrátképződési hőmérséklet S2 struktúra esetén
V_i	üregszám/víz-molekulaszám az i hidrát-rácsban
V_k	üregszám/víz-molekulaszám az i hidrát-rácsban

V_m	moláris térfogat
W	Watt, a teljesítmény mértékegysége
w_0	az eltolás súlya (neurális hálózat)
w_i	a bemenet súlya (neurális hálózat)
W/m	Watt/méter, teljesítmény
x_i	i komponens móltörtje
x_i	az eredeti tartományban levő skálázandó érték az i. pontban
x_i	skalár bemenetek (neurális hálózat)
x_j	j komponens móltörtje
x_{min}	az eredeti mintakészlet legkisebb értéke
x_{max}	az eredeti mintakészlet legnagyobb értéke
x_s	az i-edik szénhidrogén komponens mól frakciója a szilárd fázisban víz nélkül számítva
$x(t-1)$	a hálózat bemenete a t-1 időpillanatban
$y_{est}(t)$	a hálózat kimenete t időpillanatban
$y_{est}(t-1)$	a hálózat kimenete a t-1 időpillanatban
y_i	az i-edik szénhidrogén komponens mól frakciója gáz fázisban víz nélkül számítva
y_i	a 0 és 1, illetve a 0,1 és 0,9 közötti tartományban keresett új érték
y_{ji}	Langmuir adszorpciós összefüggés
z	üreg koordinációs szám
γ	a fugacitási tényező jele
γ	polinomiális együttható (harmadfokú egyenlet)
δ	polinomiális együttható (harmadfokú egyenlet)
ΔH_m	moláris entalpia különbség
ΔV_m	moláris térfogat különbség
$\Delta \mu_o$	a kémiai potenciálkülönbség, amely 273,15 K referencia hőmérsékletre, illetve a 0 atmoszféra nyomásra vonatkozik
$\Delta \mu_h$	a metastabil üres és a kitöltött hidrát-rácsok kémiai potenciálkülönbsége
$\Delta \mu_v$	a metastabil üres és a vízfázis kémiai potenciálkülönbsége
ε	Kihara módszer kísérleti úton meghatározott paramétere
ε_i	a diszkrét pontok távolsága az x tengelytől
μ	a kémiai potenciál jele

μ	polinomiális együttható (harmadfokú egyenlet)
μ°	a standard kémiai potenciál jele
μ_h	kitöltött hidrát-rács kémiai potenciálja
μ_m	metastabil üres hidrát-rács kémiai potenciálja
μ_v	vízfázis kémiai potenciálja
σ	Kihara módszer kísérleti úton meghatározott paramétere
ω	polinomiális együttható (harmadfokú egyenlet)
$\omega(r)$	Kihara cellapotenciál
Ω	ohm – az ellenállás mértékegysége

RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

8M46H₂O	SI típusú hidrát képlete maximális kitöltöttség mellett
AA	Anti Agglomerant - Anti-agglomeráns
at	A Unix-alapú operációs rendszereken az at parancsot használják különböző utasítások futtatásának időzítéséhez.
C₁, CH₄	metán
C₂, C₂H₆	etán
C₃, C₃H₈	propán
C₄, C₄H₁₀	bután
C₅, C₅H₁₂	pentán
C₆, C₆H₁₄	hexán
C₇, C₇H₁₆	heptán
C₈, C₈H₁₈	oktán
CLI	Command Line Interface – parancssoros felhasználói felület
CO₂	szén-dioxid (karbon dioxid)
CRC	Cyclic Redundancy Check - a digitális adatátvitel vagy adattárolás hibátlanságának ellenőrzését segítő módszer
DEG	Diethylene Glycol - Dietilén-glikol
EU	Európai Unió
EX	Explosive Safety - Robbanásbiztos
FS-01	Fűtőszál (1) tervjele a modellberendezésen
GOP	Gazdaságfejlesztési Operatív Program
GPRS	General Packet Radio Service - egy csomagkapcsolt, IP-alapú mobil adatátviteli technológia
GPU	Graphics Processing Unit - grafikai feldolgozó egység
GT	Gáztartály tervjele a modellberendezésen
H₂	dihidrogén (hidrogéngáz)
H₂O	dihidrogén-monoxid (víz)
H₂S	dihidrogén-szulfid (kén-hidrogén)
HMI	Human Machine Interface - ember-gép kapcsolat
i-C₄	iso bután

i-C₅	iso pentán
KHI	Kinetic Hydrate Inhibitor - Kinetikus hidrát inhibitor
LC-01	Látóüveges cella tervjele a modellberendezésen
LDHI	Low Dosage Hydrate Inhibitor – Kis dózisú hidrát inhibitor
LSQ	Least Squares (legkisebb négyzetek)
N₂	dinitrogén (nitrogéngáz)
NARMAX	Non-linear AutoRegressive Moving Average with eXogenous inputs – a NARX modell bővített változata
NARX	Nonlinear AutoRegressive with eXogenous – nemlineáris külső gerjesztésű autoregresszív modell
NBJ	Nonlinear Box-Jenkins – a NOE-hoz hasonló nemlineáris modell
n-C₄	normál bután
n-C₅	normál pentán
NFIR	Nonlinear Finite Impulse Response – előrecsatolt NN modell
NMR	Nuclear Magnetic Resonance – nukleáris mágneses rezonancia
NN	Neural Network – neurális hálózat
NOE	Nonlinear Output Error – valódi visszacsatolást tartalmazó modell
M	hidrátképző molekula
MatLab	speciális programrendszer, amely numerikus számítások elvégzésére használható
ME AFKI	Miskolci Egyetem Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet
MEG	Mono Ethylene Glycol
MISO	Multi Input Single Output - több bemenetes, egy kimenetes
MSE	Mean Squared Error - a válasz helyességének természetes mértéke
MŰFIO	Műszerfejlesztési és Informatikai Osztály
MVC	Model View Controller - modell-nézet-kontroller/vezérlő
PHP	általános szerveroldali szkriptnyelv dinamikus weblapok készítésére
PT-01	Nyomástávadó (1) tervjele a modellberendezésen
PT-02	Nyomástávadó (2) tervjele a modellberendezésen
PT-03	Nyomáskülönbség távadó (3) tervjele a modellberendezésen
PT-04	Nyomáskülönbség távadó (4) tervjele a modellberendezésen
PT100	platina ellenállás-hőmérséklet érzékelő (0 °C-on 100Ω)

RE	Riasztási eredmény
RTU	Remote Terminal Unit - távoli terminál egység
S1, SI	egyes típusú hidrát struktúra
S2, SII	kettes típusú hidrát struktúra
SciLab	speciális nyílt forráskódú programrendszer, amely numerikus számítások elvégzésére használható
SH, SIII	hármass, vagy H típusú hidrát struktúra
SMS	Short Message Service - rövidüzenet-szolgáltatás
SZ-nn	Szelep (nn=01..10) tervjele a modellberendezésen
SZIV-01	Szivattyú (1) tervjele a modellberendezésen
SZIV-01	Szivattyú (2) tervjele a modellberendezésen
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol - átviteli vezérlő protokoll/internetprotokoll
TDL	Tapped Delay Line – késleltető lánc
TEG	Triethylene Glycol
TE-01	Termosztát tervjele a modellberendezésen
THI	Thermodynamic Hydrate Inhibitor
VPN	Virtual Private Network - virtuális magánhálózat

1. BEVEZETÉS

Disszertációmban a földgáz kutakhoz tartozó csővezetékekben képződő hidrát keletkezésének előrejelzésén alapuló, modellezést használó, hatékony digitális irányítási megoldásokkal foglalkozom.

Földgáznak nevezzük azon gázelegyet, amelyek nagyobb arányban egyszerű parafinokból állnak – metántól egészen a pentánig –, továbbá meglehetősen közkedvelt energiahordozó annak kiváló tüzeléstechnikai tulajdonságai miatt. Magyarország éves gáztermelése 3 Gm³-re tehető, azonban éves földgázigénye elérheti a 15 Gm³ mennyiséget is, vagyis az igények kielégítése végett komoly mennyiségű földgázt importálunk Oroszországból, amit felhasználásig kitermelt földgáz-mezőkben tárolnak. A földgáz szállítását csővezetékek segítségével valósítják meg, a földgázkutaktól a feldolgozóüzemekbe, illetve onnan a fogyasztókhoz [1].

A gázhidrát olyan szilárd halmazállapotú anyag, amely jellegét tekintve szemcsés, és leginkább jégre vagy hóra emlékeztet. A gázhidrát definíciójára Dr. Szilas A. Pál könyvében az alábbi sorokat találjuk:

„A gázhidrátok két- vagy több komponensű olyan kristályos anyagok, amelyekben az egyik komponens molekulái — ez feltétlenül a víz — relatíve nagy üregeket tartalmazó vázszerkezetet képeznek, és ezeket az üregeket foglalják el a többi komponens — egyedi gázok vagy gázelegyek — molekulái.” [2]

A gázhidrátok komoly veszélyt jelentenek a gáztermelő kutakban, a csővezetéki rendszerekben és a gázfeldolgozó technológiákon, mert a gázhidrát kristályok kialakulása a gáztermelési technológia költségét jelentősen megnöveli, továbbá a kristályok agglomerációjának és a méretek növekedésének következtében a csővezeték akár teljes keresztmetszetben eltömődhet. A gázszállító csővezeték megtisztítása és a technológia újraindítása újabb komoly költségnövelő hatású, ezért a gáztermelésnél szükségszerűen használnak a hidrát kialakulását gátló anyagokat –

inhibitorokat – a hidratosodás megakadályozása érdekében. Az inhibitor mennyiség pontos meghatározása nem csak költségkímélő, hanem jelentős környezeti terhelést csökkentő hatású is. [3], [4]

A gázhidrátok kialakulásával, a modellezéssel, a gátlási technikákkal foglalkozó publikációk már több évtizede jelennek meg, de az elmúlt tíz évben az egyik kiemelt kutatási területté vált a gázhidráttal kapcsolatos valamennyi tevékenység. A publikációk jelentős része a kialakulási mechanizmus megismerését, a jelenségek tudományos leírását, a vizsgálati módszerek kialakítását, a modellezést, a különböző matematikai algoritmusokon alapuló előrejelzési módszerek kidolgozását, és nem utolsósorban a hidrát gátló anyagok fejlesztését és a gátlási megoldások fejlesztését tárgyalja, de a korszerű, modellezésen alapuló adagolási eljárásról kevés irodalom található.

1.1. A KUTATÁS CÉLJA

Kutatásom fő célja az volt, hogy a hidrát kialakulással és hidrát-gátlással kapcsolatos, használatban lévő vizsgálati módszerek, megoldások, demonstrációs rendszerek felhasználásával, olyan hatékony digitális megoldások készüljenek el, amelyek a következő években az ipari alkalmazásokba integrálhatók.

1.2. A DOLGOZAT FELÉPÍTÉSE

A disszertáció ezen bevezető fejezetét követően az olaj- és gáziparban a termelési folyamatok során kialakult gázhidrátokkal kapcsolatosan végeztem irodalomkutatást, amely kapcsán bemutatom a gázhidrátot, annak kialakulását, összetételét és alapvető tulajdonságait. Ezt követően a hidrát kialakulásának megelőzésére és kialakulás esetén annak eltávolítására rendelkezésre álló általános megoldásokkal foglalkozom.

A harmadik fejezetben a gázhidrátok kialakulásának megakadályozásával foglalkozom. Ismertetem a tradicionális hidrátgátlási megoldásokat,

valamint a kis mennyiségben adagolt, korszerű vegyszereket. Ezt követően ismertetem a különböző inhibitor adagoló rendszereket.

A bevezető, általános ismereteket tartalmazó fejezetek után három, egymástól független fejezet következik, amelyek nem épülnek egymásra. A fejezetek a témához kapcsolódó digitális megoldásokat tartalmazzák, amelyek tudományos újdonsággal is bírnak, az alábbiakban leírtak szerint.

Disszertációm negyedik fejezetében az inhibitor adagolás szabályozás alapját képző hidratosodási nyomás meghatározásának egy lehetséges módját mutatom be. Ehhez, először a hidratosodás ábrázolására szolgáló fázishatárgörbe matematikai leírását ismertetem. A kapott matematikai modellnek megfelelően felvételre kerül a fázishatárgörbe mind S1, mind pedig S2 struktúrájú hidrát esetén. Ezt követően bemutatom a fázisgörbe matematikai leírását a Gauss féle legkisebb négyzetek módszer segítségével. Az így kapott hidratosodási görbe meghatározáshoz egy szabályozást illesztettem, mellyel a megoldás működőképessége igazolható.

Az ötödik fejezetben a hidrát-képződés detektálásának egy lehetséges módszerét mutatom be laboratóriumi körülmények között. Ehhez, először ismertetek egy dinamikus hidrát vizsgáló berendezést, amivel kisminta rendszerű kialakításának köszönhetően jól modellezhetővé válnak a gázmezőben található, a kúttól a gyűjtőállomásig terjedő csőszakaszban lejátszódó folyamatok. Ezután bemutatom a berendezés segítségével elvégzett méréseket, amelyből több független adatkészlet készült. Végül bemutatom a neurális hálózatokat, illetve több, valódi visszacsatolást tartalmazó neurális hálózat betanítását a független adatkészletekkel, valamint, ismertetem a legjobb hálózat kiválasztását.

Disszertációm hatodik fejezetében a terepi hidrát-jelenlét észlelésének egy lehetséges módszerét mutatom be. Ehhez, először ismeretek egy Füzesgyarmaton lévő Szeghalom-29 kútra telepített kútkörzeti irányítási és vegyszeradagoló berendezést, illetve az azzal rögzíthető paramétereket. A berendezés tesztüzeme alatt készült méréseket és azok kiértékelését is bemutatom. Végül ismertetek egy gépi tanulás alapú detektáló rendszert,

amely nyomásértéken kívül figyelembe veszi a hőmérséklet és az adagolt inhibitor jellegét is.

A dolgozat tudományos újdonságait a negyedik, ötödik és hatodik fejezetek tartalmazzák. Ezen fejezetek vége minden esetben összegzéssel zárul, majd ezt követően a fejezethez kapcsolódó tézist találhatjuk, végül külön alfejezetbe kerültek a tézishez tartozó újdonságtartalmak és érvényességek, valamint a kapcsolódó publikációk.

1.3. A KUTATÁSI TERÜLET IRODALMI ÁTTEKINTÉSE

A kutatási témához magyar nyelvű irodalom nem érhető el. A külföldi szakirodalomban számos kapcsolódó cikk található. Bár a metanol adagolása környezetvédelmi okok miatt nem javallott, mégis található olyan szakirodalom, amely metanolt használ. Így például az International Oil Field Chemistry Symposiumon megjelent előadáson [5] francia és angol kutatók arról számolnak be, hogy az északi-tengernél lévő gázkitermeléshez nem túl környezettudatosan, metanolt adagoltak a vezetékbe a gázhidrátok megelőzéséhez. Az adagolást kezdetben a Karl Fischer eljárással kezelték, ez azonban nem a legmegfelelőbb módszer, mivel az nem veszi figyelembe a sótartalmat. Így kidolgoztak egy új módszert, amely szerint az elektromos vezetőképességet és hang terjedési sebességet is elkezdtek mérni a rendszerhőmérséklet és a nyomás ismerete mellett. A négy paraméterből az általuk kidolgozott módszerrel a metanol adagolása optimumon tartható. Ugyanígy nem túl környezettudatosan a 2013-ban megjelent cikk [6] is ipari folyamatoknál a hidrátképződés megakadályozására adagolt metanol befecskendezésének optimalizálásával foglalkozik. A cikk a gőzfázisú metanol mennyiségének fontosságáról számol be, mivel az nem vesz részt a hidrátképződés blokkolásában. A mennyiség meghatározására két módszert mutatnak be, az első egy matematikai korreláció valós adatokból, a második pedig egy mesterséges neurális hálózat alapú eljárás.

Természetesen nem csak metanol adagolást elősegítő eljárásokról található szakirodalom, így például olyan eljárások is fellelhetők, amelyeket monoetilén-glikol, vagy egyéb inhibitor adagolására dolgoztak ki. Az egyik

ilyen példa a „New tools predict monoethylene glycol injection rate for natural gas hydrate inhibition” című cikk [7], ahol egy „least squares support-vector machine” algoritmussal valósítanak meg gépi tanulást [8]. A kidolgozott módszerrel gázvezetékekben tudják megbecsülni a hidrátok kialakulását, illetve a monoetilén-glikol mennyiségét is meg tudják adni a segítségével, mellyel esetükben a hidrátgátlást megvalósították. A másik ilyen nem metanol alapú hidrátgátló adagoló eljárás az, amely a „Optimal Hydrate Inhibition Policies with the Aid of Neural Networks” című cikkben [9] található. Ez az írás neurális hálózatok fejlesztésével és felhasználásával foglalkozik a hidrátképződés blokkolásának optimalizálásával kapcsolatosan. A modell validálására kísérleti adatokat használtak, amelyek tartalma a hidrátképződések körülménye, a gáz összetétele, a blokkoló összetétele, a rendszernyomás és a fajsúly. A modell figyelembe veszi a blokkoló párolgása miatti veszteséget. Az eljárás a különböző összetételű gázokhoz ajánl inhibitor adagolást.

Számos szakirodalom foglalkozik a hidrátosodási hőmérséklet prognosztizálásával. Az egyik ilyen egy meglehetősen friss cikk, amely 2017-ben jelent meg. A [10] szakirodalmi hivatkozás a „least squares support vector-machine” algoritmus használatával kidolgozott eljárásról számol be, amely a hidrátképződési hőmérséklet becslésére alkalmas, különböző összetételű földgázokban. Szakirodalomból válogattak adatokat, amelyekből különböző gázösszetételekre lebontva alkottak adathalmazokat a gépi tanuláshoz. Ez a modell, összehasonlítva más modellekkel, pontosabb H₂S tartalmú gázok esetén. Ezt megelőzően a Gas Processing Journalban 2013-ban megjelent [11] cikkben mutattak be egy empirikus korrelációt a hőmérséklet, gáznyomás és fajsúly között, amivel megmondható a hidrátképződési hőmérséklet. Ezt a módszert tovább finomították nagy mennyiségű mérési adat statisztikai elemzésével, amelyből készült adatkészletekkel egy neurális hálózatot tanítottak be. A végeredmény a cikk tanúsága szerint pontos módszert ad. Egy 2009-ben az Energy Conversion and Managementben megjelent cikk [12] két eljárást mutat be a hidrátképződési hőmérséklet becslésére. Az első eljárás két korrelációból áll, egy 11 és egy 18 paraméteresből. A paramétereket kísérleti mérési pontokból, valamint a szakirodalomból vették. Az adatokból

statisztikai szoftver segítségével emelték ki a szükséges paramétereket. A második eljárás mesterséges neurális hálózatokat használ, a korábbi eljárás adatainak felhasználásával, ahol az adatok 70%-át tanításra, a maradék 30%-ot pedig tesztelésre használták. Ettől korábban is jelent már meg cikk a témában. Az iráni kutató-hármas 2006-os cikkében [13] mesterséges neurális hálózatot használnak, hogy mérési pontokból (hőmérséklet, nyomás, fajsúly), egy predikciót adjanak a hidrát kialakulási hőmérsékletre. Az adatok döntő részével betanították az algoritmust, a maradékot pedig ellenőrzésre használták. Eredményül 3%-os hibát kaptak, amit összevetve a Sloan modellel, jónak lehet mondani. [14], [15]

Természetesen egyéb kapcsolódó szakirodalommal is találkozhatunk, így például a 2016-ban megjelent *Petroleum Science and Technology* folyóiratban olvashatunk „Prediction of hydrate formation temperature based on an improved empirical correlation by imperialist competitive algorithm” címmel egy cikket [16], amely a gázhidrátok keletkezésének problémájára hívja fel a figyelmet, illetve, hogy kulcsfontosságú a kialakulási körülmények jó becslése. Ehhez használható a Katz gáz gravitációs eljárás, amelyhez a legelterjedtebb korreláció a Ghiasi [17]. A cikkben ezt a Ghiasi modellt az „imperialist competitive” algoritmusmal futtatják a Katz eljárás adataiból kiindulva. Egy 2015-ös malajziai munkában [18] mesterséges neurális hálózatot használtak, hogy meghatározzanak egy kinetikus modellt a metán gázhidrátok kialakulásának becslésére. Megpróbálták meghatározni a jó mesterséges neurális hálózat rétegeinek és rejtett neuronjainak számát. A NN alapú modell bemenetei a hőmérséklet és nyomás, a kimenete pedig a hidrát növekedési sebesség. A 2017-es „Developing a simple-to-use predictive model for prediction of hydrate formation temperature” című cikk [19] két módszer összehasonlítását írja le a gázhidrátok kialakulási körülményeinek ellehetetlenítésére. Az első egy mesterséges neurális hálózat, a második pedig egy NN, amit az „imperialist competitive” algoritmusmal optimalizáltak. A hálózatokba szakirodalmi adatokat tápláltak, majd összehasonlították azokat. A várakozással ellentétben a sima neurális hálózat eredményei jobbak, mint az optimalizáltak. [20], [21]

2. A GÁZHIDRÁT

Az olaj és gáziparban a termelési folyamatok során a termeléshez tartozó nyomáson és hőmérsékleten gázhidrátok alakulhatnak ki, és ezek a gázhidrátok a csővezetéki rendszerben megakadályozzák a fluidum áramlást. Az alábbi fejezetben bemutatásra kerül a gázhidrát, annak kialakulása, összetétele és alapvető tulajdonságai. Valamint, röviden bemutatásra kerülnek a hidrát kialakulásának megelőzésére és kialakulás esetén annak eltávolítására rendelkezésre álló általános megoldások.

2.1. GÁZHIDRÁTOK KIALAKULÁSA

A gázhidrát összetételét tekintve vízből, illetve úgynevezett hidrátképző gázból áll. Ezen gázmolekulák kémiai kötés nélkül épülnek be a kristályrácsba. Ahhoz, hogy gázhidrát kialakulhasson, fontos, hogy a primer kiváltó okok teljesüljenek. Ez egyrészt az, hogy szabadvíznek jelen kell lennie, másrészt a hőmérsékleti feltételeknek is adottnak kell lennie, vagyis a szabadvíznek a gáz harmatpont, vagy annál kisebb hőmérsékletűnek kell lennie, míg a gázhőmérsékletnek a hidrátosodás határhőmérsékletnél kell kisebbnek lennie. Mindez persze, csak adott gáznyomás és gázösszetétel mellett érvényes. Szekunder kiváló tényezőket is számon tartunk, amely lehet a magas áramlási sebesség, turbulencia, keveredés, nyomáspulzálás, valamint a kristályképződést segítő szilárd szemcsék megléte. Ezen szekunder kiváltó okokat szokás katalizáló tényezőnek is nevezni [2], [22].

A [22] referenciának megfelelően kijelenthetem tehát, hogy a gázhidrát kialakulásához és fennmaradásához az alábbi feltételeknek kell teljesülnie:

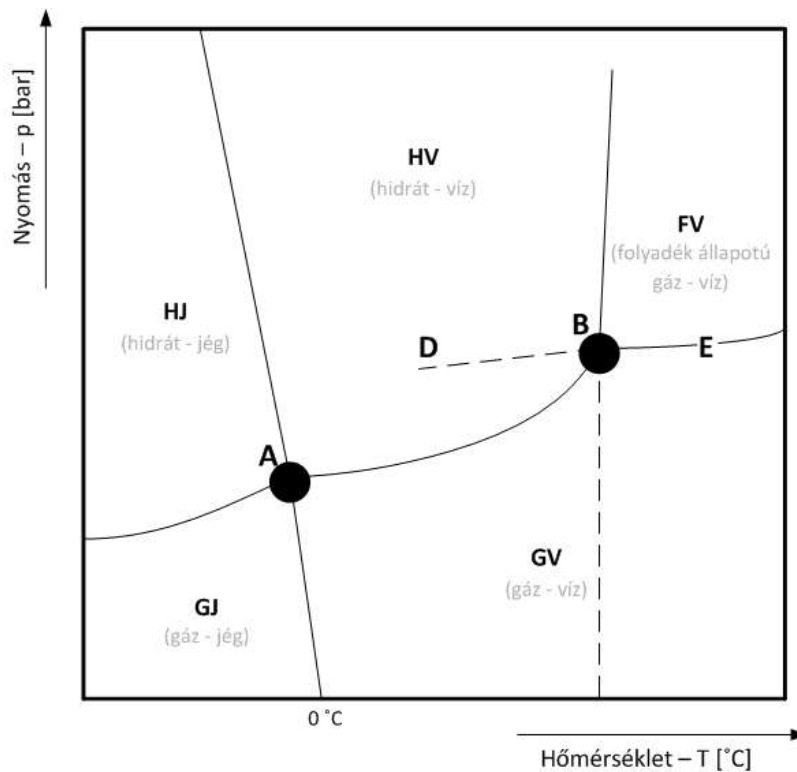
↳ kellőképpen magas nyomás és alacsony hőmérséklet,

- ⇒ a hidrát képződésekor a gáz mellett víz is található a rendszerben, amelynek halmazállapota cseppfolyós,
- ⇒ kovalens kötés van a hidrátot képző gáz molekulái közt, és azok mérete nem nagyobb, mint $8 \text{ \AA}$ ($8 \times 10^{-10} \text{ m}$), valamint a vízzel nem elegyedik cseppfolyós állapotában,
- ⇒ a gázhidrát molekulái közt Van der Waals erők nem lépnek fel.



1. ábra Gázhidrát [23]

Az 1. ábrán láthatunk példát a gázhidrátra, amely kialakulása közben a víz molekulái relatíve nagyüregű vázszerkezetet képeznek, az egyedi gáz vagy gázelegy molekulák pedig ezen üregeket elfoglalják. Vagy más szemszögből nézve, a folyékony víz, jég, esetleg túltelített vízgőz úgynevezett gazda rácsszerkezetet képeznek, a vendég gáz, vagy gázelegy molekulák köré. A gazda és vendég molekulák között csupán gyenge interakcióval járó fizikai bekerítési folyamat megy végbe. A gazdarács üregeiben elhelyezkedő vendégmolekulák, csak a kristályrács felbomlása esetén szabadulnak ki. Vagyis a gázkomponensek és a vízmolekulák nem kötődnek egymáshoz közvetlenül, így a gázmolekulák a szerkezet geometriai sajátosságai miatt nem tudnak kiszabadulni a hidrogénkötésekkel kialakult vázszerkezet szétbomlása nélkül [22], [24].



2. ábra Fázishatár görbe [25]

A [25] irodalom szerint kihangsúlyozandó a szénhidrogént és vizet egyaránt tartalmazó rendszerek fázisviselkedésének és egyensúlyának jelentősége. Ezen rendszerek termodinamikai egyensúlya jellemezhető egyrészt azok egyensúlyi konstansaival, másrészt az egyes rendszerek fázisdiagramjaival, amely rendszerek az olaj-víz, a gáz-víz és a gáz-olaj-víz. Alapvetően gyakorlati szempontból elhanyagolható a víz és az olaj kölcsönös oldhatósága, továbbá mivel jelen dolgozat gázhidrátokkal foglalkozik, így a továbbiakban a szénhidrogéngáz és víz alkotta rendszerre szorítkozom. A 2. ábrán láthatjuk az alacsony hőmérsékleti tartományban vett szénhidrogéngáz-víz rendszerek fázisábráját. Az ábrán alapvetően öt különböző fázist különböztethetünk meg, amelyek a gáz (G), a hidrát (H), a folyékony állapotú gáz (F), a jég (J) és a víz (V). Az egyes tartományokban két fázis van egyensúlyban. Az A, illetve B úgynevezett négyes pontokban négy fázis van jelen egyensúlyi állapotban. Az A pont esetén a gáz, a víz, a hidrát és a jég van egyensúlyban, míg a B pont esetén a hidrát, a gáz, a víz és a folyékony állapotú gáz. A határgörbék mentén játszódnak le az egyes fázisátalakulások, így az A – B szakasz mutatja a gáz fázis hidrát fázissá

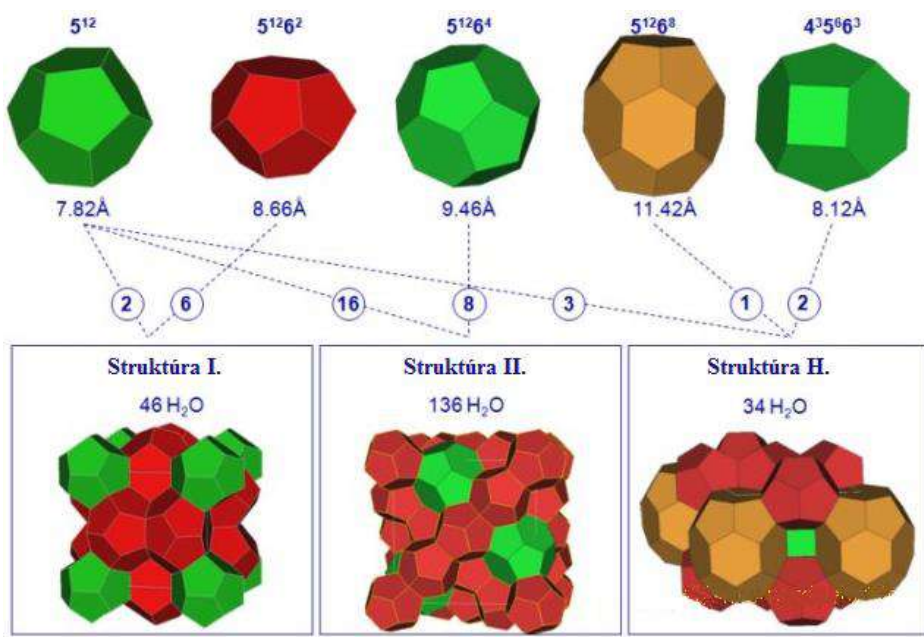
alakulását, vagyis a hidrátképződést. Fontos megjegyezni, hogy a vizet és hidrátot tartalmazó rendszerek gőznyomásai egymástól eltérnek, amelynek következtében a kialakult hidrát megszüntetéséhez tartozó hőmérséklet 1-7 °C-al magasabb, mint a hidrátképződési hőmérséklet. A gáz harmatponti görbáját a DBE szakasz jelöli ki [25], [26].

2.2. GÁZHIDRÁTOK TULAJDONSÁGAI

A szilárd halmazállapotú gázhidrátok 0 - 30 °C hőmérséklettartományon keletkeznek, abban az esetben, ha a hidrátosodást elősegítő nyomás mellett gáz vízfázissal érintkezik. Ahogy azt a gázhidrátok kialakulásánál már említettem, külső megjelenését tekintve az leginkább tömör hóra emlékeztet, amely szabad levegőn, a külső hőmérséklet függvényében olvadásnak indul. Szabad levegőn a hidrát éghető, amely meglehetősen lassú folyamatot követően, csupán némi víznyomot hagy maga után, amely nem egyenlő azon vízmennyiséggel, amelyet a gázhidrát tartalmazott, hiszen az égés során a víz egy része gőz formájában távozik, a [25] referenciának megfelelően. A gázhidrátok kristályos szerkezetűek, amelyeket három típusra tudjuk osztani. A [27] referenciának megfelelően a három különböző struktúrából először az egyes és kettes, vagyis az SI és SII struktúrákat fedezte fel az 1950-es években Stackelberg és kollégái, úgy, hogy röntgensugaras diffrakcióval vizsgálták a hidrátok kristálméreteit. Kijelenthető, hogy ez a két struktúra a gyakoribb, míg a [28] referenciának megfelelően, harmadik struktúra, amely SIII, vagy SH névvel azonosítják, jóval ritkábban fordul elő.

A 3. ábrán a három különböző hidrát struktúrát láthatjuk. Az ábrán a legfelső szám a rács típusára utal, ahol is a szám a felület jellegét mutatja meg, amely lehet négyzetes, pentagonális, illetve hexagonális, míg a kitévő az egyes felületek darabszámát adja meg. A rács jellegét bemutató alakzatok alatt az egy rácsméret átlagos átmérőjét olvashatjuk le. A körben jelölt szám az egységnyi cellában található rácsszámot jelöli. A három különböző struktúrát a négyzetekben láthatjuk, ahol feltüntetésre került az egységnyi cellát tartalmazó vízmolekulák száma. Fontos megjegyezni, hogy míg az SI

és SII struktúrák szabályos kockák, addig az SH struktúra hexagonális [29], [30], [S4].



3. ábra Hidrát struktúrák [31]

A [2] irodalom alapján, gázhidrát-képzésre az alábbi tulajdonságokkal rendelkező anyagok képesek:

- ↪ a molekuláinak mérete és formája illeszkedik a víz-gazdarács üregeibe,
- ↪ vízben kicsi az oldhatóságuk,
- ↪ kellőképpen illékonyak,
- ↪ homopoláris természetűek,
- ↪ a molekulák Van der Waals ereje kicsi,
- ↪ párolgáshője kisebb, mint 31,4 kJ/mól,
- ↪ forráspontja alacsonyabb, mint 60 °C,
- ↪ forráspontja kettős hidrátok esetén alacsonyabb, mint 115 °C,
- ↪ végezetül, a hidrátképző nem tartalmazhat olyan hidrogénatomot, amely újabb hidrogénkötést hozna létre.

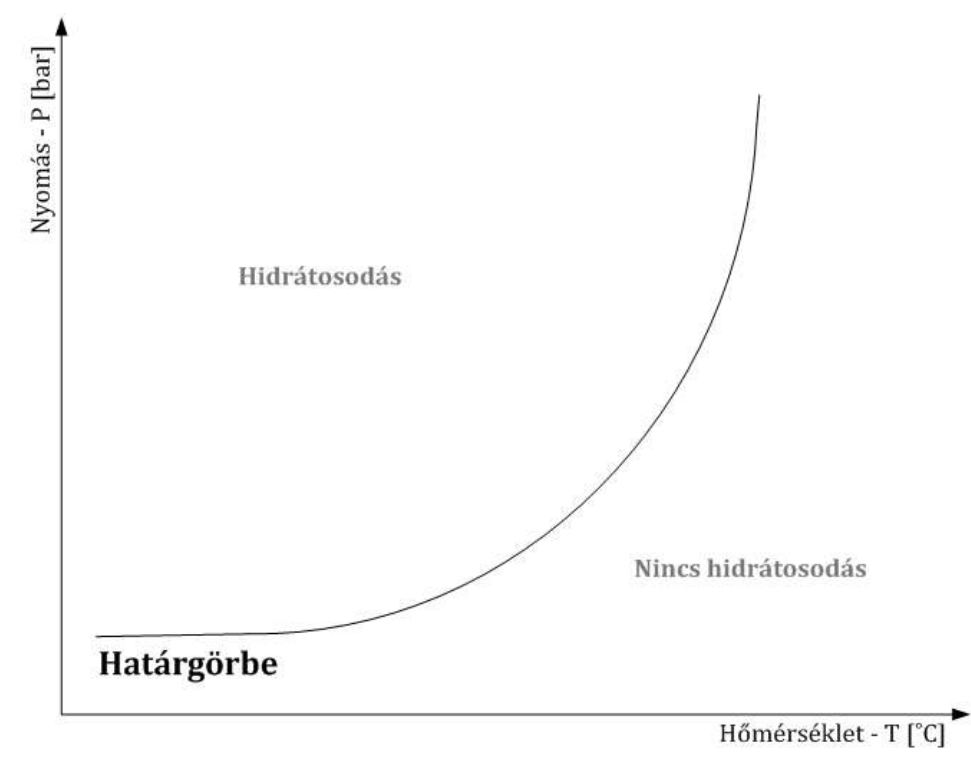
Mivel az olaj- és gáziparban az SI és SII struktúra fordul elő, így a továbbiakban csak azokkal, illetve az azokat alkotó molekulákkal foglalkozom. Az SI-es hidrát-kristályokat gázok alkotják, míg az SII-es hidrát-kristályokat illékony folyadékok, valamint a propán. Mint láthattuk, a hidrát típusát a hidrátképző elemek méretei határozzák meg. Mivel vízmolekulák alkotják a hidrát fő vázát, így azok hézagterei maximum 0,58 nm méretűek, amelyeket a hidrátképző gáz, illetve folyadékmolekulák töltenek ki. A hidrát képzésben részt vevő víz- és szénhidrogén-molekulák effektív, Van der Waals szerinti méreteit az 1. táblázat tartalmazza. Az [2] és [25] irodalmak alapján kimondhatjuk, hogy az SI hidrát-kristályokat alkotó gázok mérete nem nagyobb, mint 5,9 Å, az SII esetén pedig 5,9 Å és 6,9 Å közé esik, ami a hidrát kristály üregek belső átmérőjéből adódik. Így például, ha az SI típust vizsgáljuk meg a 3. ábrát is szem előtt tartva láthatjuk, hogy az 46 darab vízmolekulából áll, amelyek által alkotta vázban hat darab közepes, valamint két darab kis méretű üreg található. Amennyiben a váz minden ürege kitöltött akkor a hidrátot az alábbi képlettel tudjuk leírni: $8M46H_2O$. Le kell azonban szögezni, hogy a valóságban nem egyedi gázok hidrát-képződései a jellemzőek, hanem sokkal inkább gázelegyek alkotnak hidrátot [32], [33].

1. táblázat A hidrátképzők effektív méretei Van der Waals szerint [25]

Hidrátképző	Méret [Å]
vízmolekula	2,8
metán	4,1
etán	5,5
propán	6,28
i-bután	6,28
n-bután	7,4

A gázelegy alkotói lehetnek a parafin, a CO_2 , a H_2 , a N_2 vagy a H_2S . A különböző gázelegyek keverék hidrátot alkotnak, amelyek összetétele erősen nyomásfüggő. Ezeket a keverék hidrátokat szokás vegyes hidrátoknak is nevezni a [25] referencia alapján. Fontos megjegyezni, hogy csupán azon alkotók képezhetnek hidrátot, amelyek méretei miatt be tudnak épülni a

hidrátvázba. Vagyis a korábbi [2] és [25] irodalmat erősíti meg a [22], amely alapján a metán, az etán, a propán, a bután, a szén- dioxid és a kénhidrogén alkotók lehetnek csak hidrátképzők, a többi komponens nem képez hidrátot. Amennyiben egy adott gázelegyen azon komponensek mennyisége, amelyek hidrát képzésére nem alkalmasak meghaladja az 50 térfogat-százalékot, akkor a gáz hidrátot alkotni nem képes. A hidrátképződés fontos feltétele az, hogy vízgőzzel telített legyen a gázáram, és a vízgőz cseppfolyós vízzé kondenzálódjon, legalább minimális mennyiségben. Vízgőzben telítetlen gázok hidrátképződésre nem hajlamosak [26], [34].



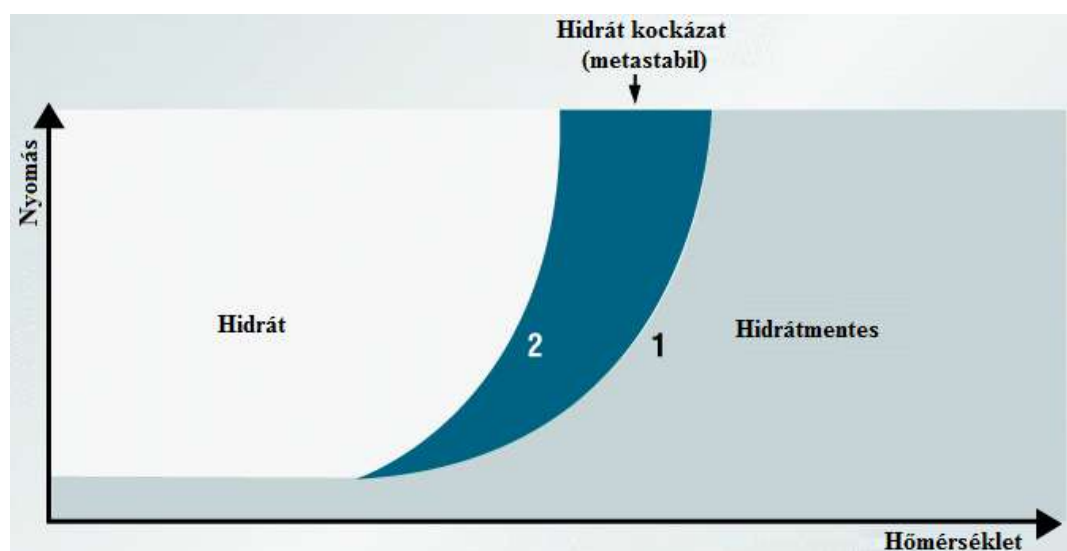
4. ábra Egyensúlyi görbe [25]

Ahogy azt korábban már tárgyaltam, a hidrátképződés elsődleges feltételei a most említett telítettségi vízgőzmennyiségen túl, a megfelelő nyomás, hőmérséklet és gázösszetétel. Ezen három jellemző az alapja a hidrát fázisgörbének, amelynek jellegére a 4. ábra mutat példát. Az egyensúlyi görbét a nyomás és a hőmérséklet függvényében ábrázoljuk, és a gázösszetétel alapján vesszük fel az [2] referenciának megfelelően.

2. táblázat A hidrátképződés felső hőmérséklethatára [25]

Komponens	Max. hőmérséklet [°C]	Nyomás [bar]
metán	>30	≥300
etán	14,6	≥40
propán	5,7	≥6
izo-bután	0,6	≥1
széndioxid	9,9	≥49
kénhidrogén	29,5	≥23

A [25] referencia alapján a hidrátképződési egyensúlyi görbe, valamint az összetevők gőznyomás görbéjének metszéspontja adja azt a kritikus hőmérsékletet, amely felett hidrátképződés már nem alakul ki. Az egyes komponensek esetét a hidrátképződés maximális hőmérsékletét, illetve az ahhoz tartozó nyomástartományt a 2. táblázat foglalja össze. A táblázatban látható, hogy a kénhidrogén meglehetősen magas hőmérséklet mellett is aktív hidrátképző anyag. Vagyis, amennyiben a földgáz rendelkezik kénhidrogén tartalommal, úgy a hidrátképződés valószínűsége sokkal magasabb, mint azon földgáz esetén, amely nem tartalmaz kénhidrogént [3].



5. ábra Hidrátosodási zónák [35]

A [35] referencia alapján fontos megemlíteni, hogy a hidrátosodási zónákat az irodalom – a 4. ábrának is megfelelően – az egyensúlyi görbe alapján csak két részre osztja. Ez a két terület a határgörbe egyik oldalán a hidrátosodási

zóna, még a másik oldalán a hidrát mentes zóna. A gyakorlatban azonban három zónáról beszélhetünk az 5. ábrának megfelelően. Ahogy az az ábrán is látszik, létezik egy késleltetés a hidrátképződésben, amely fennáll mindaddig, míg egy alacsonyabb hőmérsékletet, vagy egy magasabb nyomást el nem érünk. Ez a késleltetés a harmadik zóna, ahol a hidrátképződés már megindul, de az még nincs egyensúlyi állapotban [35].

2.3. VÉDEKEZÉS A GÁZHIDRÁTOK ELLEN

A [22] referencia előrevetíti a hidrátok olyan tulajdonságait is, amelyek elősegíthetik a hidrát kialakulás megelőzését. Így például a folyékony szénhidrogének a földgázban lecsökkentik a hidrátképződési hőmérsékletet, vagyis a hidrátok kialakulását egyértelműen gátolják. A másik ilyen tény, hogy a glikol oldatok inhibíthatják a hidrátképződést. Ugyanakkor fontos megemlíteni, hogy a glikol oldatok és a folyékony szénhidrogének előbb említett tulajdonságaik szerinti egyesített hatása sajnos nem additív. Az additivitást abban az esetben közelíti meg, ha a gáz-olaj arány csökken. A hidrátképződés helyének és feltételeinek ismeretében a zavartalan üzemeltetés fenntartható. Ennek hiányában a rendellenes nyomásadatok alapján is meghatározható a hidrátképződés. Az eddigiek alapján hidrátképződés megelőzésének az alábbi lehetőségei ismeretesek:

- ↪ A relatív nedvesség tartalmának csökkentése a gáz megfelelő szárításával.
- ↪ A gáz hőmérsékletének emelése, úgy, hogy az magasabb legyen, mint a hidrátképződési érték.
- ↪ Olyan kémiai reagensek megfelelő mértékű beadagolása, amelyek a hidrátok kialakulását gátolják.
- ↪ Olyan nyomáscsökkentő eszközök használata, amelyek nem teszik lehetővé a hidrátok kialakulását.
- ↪ A hidrátveszélyes helyeken mellőzni kell a hidrátképződést másodlagosan kiváltó okokat előidéző megoldásokat.
- ↪ Csökkenteni kell a hőveszteségeket.

☞ A hidrátveszélyes helyeken szükség szerint egyedi nyomásszabályozókat kell alkalmazni. [22], [3]

Meg kell jegyezni, hogy a hidrát kialakulásának megelőzésére az egyik legegyszerűbb módszer a csővezeték lehűlésének megakadályozása, amit meg lehet oldani megfelelő szigeteléssel, fűtőkábel alkalmazásával, vagy esetleg meleg víz felhasználásával. A másik egyszerű megoldás lehet a nyomás értékének alacsonyan tartása, vagy a víz eltávolítása a gázból, amely megoldások a szeparátor állomásokon megvalósíthatók. Ezek a technikák azonban egy pár ritka, kivételes esettől eltekintve nem terjedtek el, aminek alapvetően az az oka, hogy rendkívül költséges megoldások. Leginkább a kémiai reagensekkel történő kezelés terjedt el, mellyel részletesebben a következő alfejezet foglalkozik.

Mivel a kialakult hidrát dugó megszüntetése komoly erőfeszítéseket igényel, általában nagyon költséges módszerek alkalmazását követeli meg, ezért annak kialakulását a termelési folyamatban el kell kerülni. Amennyiben mégsem járunk sikerrel a hidrátosodás megelőzésével, fontos, hogy felismerjük annak kialakulását, amelynek számos intő jele lehet. Előfordulhat részleges dugulás, amelyet a dugulás helyén jelentkező sívító hang mellett az áramlás csökkenése is jellemez, illetve az ennél súlyosabb a teljes vezeték-dugulás, amit az áramlás teljes megszűnése jelez. A nyomás hirtelen megemelkedése utalhat egy hidrát dugó kialakulására, illetve az indokolatlan nyomáshullámok okozója lehet a kialakult, tömör hidrát dugó megindulása. Intő jel lehet továbbá a folyamatos harmatpontméréskor annak indokolatlan és viszonylag gyors csökkenése. [36], [37]

A már kialakult hidrát dugó stabilis állapotú, vagyis az önmagától nem szűnik meg, annak megszüntetésére több lehetőségünk van. Az egyik ilyen lehetőség az adott szakasz felmelegítése a hidrát képződési hőmérséklet felé. A másik lehetőség a vegyszeres kezelés, amely úgymond katalizálja a hidrát elbontási folyamatát. Szokás továbbá mechanikai tisztítás útján eltávolítani a már kialakult hidrát dugót.

3. A HIDRÁTMENTESÍTÉS

Az olaj és gáztermelési technológiákon a kezdetektől fogva ismertek azok a módszerek, amelyek segítségével ezeknek a gázhidrátoknak a kialakulását vagy a kialakult gázhidrátoknak az agglomerációját megakadályozzák. A következő fejezet az ilyen hidrát mentesítési megoldásokat foglalja össze, kitérve az alkalmazott hidrátgátló készítményekre és azok adagolására.

3.1. HIDRÁTGÁTLÓ KÉSZÍTMÉNYEK

A tradicionális hidrátgátlási megoldások közé tartozik a termodinamikus (THI - Thermodynamic Hydrate Inhibitor) módszer alkalmazása, ami a metanol [38], a monoetilén glikol (MEG - Mono Ethylene Glycol) és a dietilén glikol (DEG – Diethylene Glycol) használatát jelenti [39]. Napjainkban, a hazai termelésben még mindig a leggyakrabban alkalmazott hidrát gátlási megoldás a metanolozás. A glikolok kiszorulásának legfontosabb oka, hogy bár a monoetilén glikol és a dietilén glikol magas viszkozitású és $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet alatt a leghatékonyabb készítmény, de ezeknek az ára a metanolhoz képest jóval magasabb. A trietilén glikol (TEG – Triethylene Glycol) használatának akadálya pedig a készítmény túlságosan alacsony gőznyomása, amely adagolás esetében nem kedvező paraméter [40]. Azonban a metanolozásnak, mint módszernek, a veszélyes anyagnak minősülő kemikália alkalmazása mellett a legnagyobb hátránya, hogy a metanol nem maradhat a gázban, ezért mindenképpen szükséges a metanol visszanyerésére metanol regeneráló alkalmazása, ami jelentősen megnöveli a kitermeléshez tartozó technológia költségeit [41], [42], [S23], [S24].

Az elmúlt mintegy harminc évben a kis mennyiségben adagolt, korszerű vegyszerek alkalmazása terjedt el, ezeket a megoldásokat hívjuk összefoglaló néven LDHIs – Low Dosage Hydrate Inhibitors – technológiának. Meg kell jegyezni, hogy az LDHIs készítmények lényegesen

drágábbak, mint a termodinamikus inhibitorok, de a kis koncentráció miatt a megoldás mégis költséghatékonyabb, nem beszélve arról a nem elhanyagolható tényről, hogy a környezet terhelése lényegesen csökkenthető a kis koncentráció alkalmazása miatt. Az LDHs technológia keretében számtalan megoldás született, de a két elterjedt az alábbi:

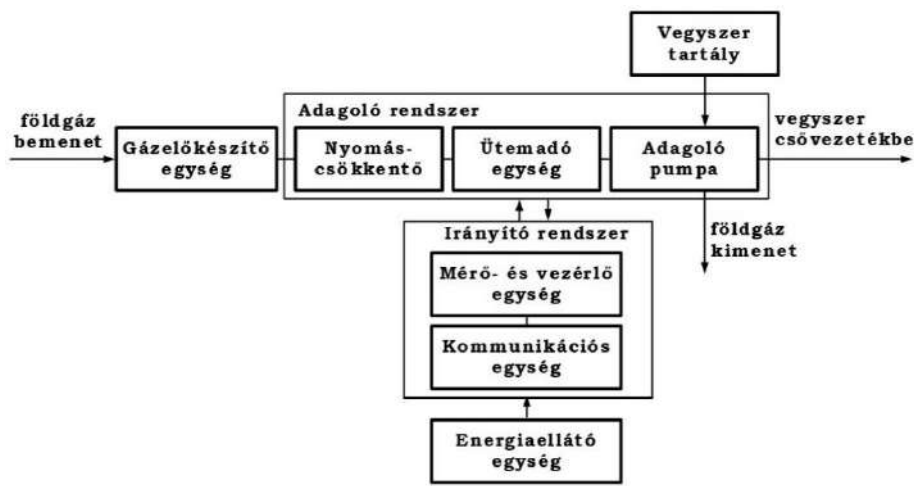
- ↳ Kinetikus inhibitorok (KHIs – Kinetic Hydrate Inhibitors)
- ↳ Antiagglomerációs készítmények (AAs – Antiagglomerants)

A [43] referenciának megfelelően, a KHIs megoldás lényege, hogy az alkalmazott készítmény késlelteti a gáz hidrát kristály növekedését, így ez a megoldás elég időt biztosít ahhoz, hogy a gáz a csővezetéki rendszerben hidrát képződés nélkül elérjen a fogadó állomásra. A KHIs készítmények általában vízdoldható polimer alapra készülnek. Magas túlhűtés esetében ez a megoldás eléggé kritikus lehet. A KHIs készítmények használatának legnagyobb előnye, hogy a hatékony gátláshoz nem szükséges sem vizet, sem szénhidrogént alkalmazni. A [44] referencia alapján az AAs megoldás lényege, hogy ezek a készítmények meggátolják a hidrát gócek összeállását, így biztosítva a nagyméretű agglomerátum kialakulását. Az AAs készítmények alapvetően a folyékony szénhidrogén fázisban fejtik ki hatásukat, ezért ezeknek a készítményeknek a hatékonyságát jelentősen lehet növelni pl. gázolin adagolással. Az AAs készítmények alkalmazása mintegy húsz év óta ismeretes, de a kutatási eredményeknek köszönhetően nagyon dinamikus növekedésnek indult az AAs készítmények használata [45]. Az AAs készítmények jelentős része polimer és úgynevezett zwitterionos felületaktív készítményekből áll [46]. Mind az AAs, mind a KHIs készítmények igen alacsony koncentrációban kerülnek ipari alkalmazásra, tipikusan 0,1-1,0 térfogatszázalék közötti tartományban [44]. Ha ezt az értéket összehasonlítjuk a termodinamikus inhibitoroknál használatos 10-50 térfogatszázalékkal, meg kell állapítani, hogy igen jelentős megtakarítás érhető el ezeknek a készítményeknek az alkalmazásával. A kutatásoknak köszönhetően számos hidrátgátló alapkészítményt vizsgáltak meg, így például a [47] referencia szerint felhasználásra javasolják az alkil-kaprolaktám-etanoátok, az alkil-kaprolaktám-etanamidok, a dimetil-alkilamidok, a dietil-akrilamidok és az alkil éterek csoportját. Ezen

alapkészítmények a kereskedelmi megoldásokat gyártó cégek termék választékában, mint hatóanyag is megjelentek [48], [49], [50], [51], [S25].

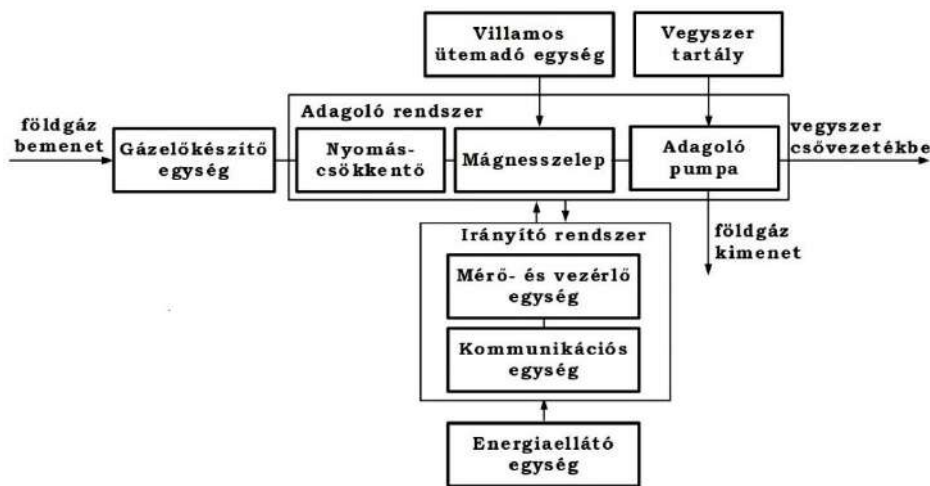
3.2. INHIBITOR ADAGOLÓ RENDSZEREK

A gáztermeléshez kapcsolódóan a vegyszeradagolók nem csak a hidrát gátló folyadékok bevitelénél, hanem más területen, például a korrózió megakadályozását biztosító készítményeknél is használatosak. Az elmúlt években a gáztermelés és elosztás megváltozásának és nem utolsósorban a költségtakarékosságnak köszönhetően kialakultak az új vegyszer adagolási technikák, amelyek egyre kifinomultabbak lettek, és szolgáltatásukkal egyre szélesebb területet fednek le. A hidrát gátlását biztosító vegyszerek adagolására a leggyakrabban a csővezetékben lévő gáz energiáját használták, illetve használják fel. Ennek a módszernek a legnagyobb előnye, hogy a gáz mindig rendelkezésre áll, vagyis adagolás esetén nem szükséges külön energiaforrást biztosítani a berendezés számára. A vegyszeradagolók általános felépítését mutatja a 6. ábra. Az ábrán látható, hogy a működtető gáz egy gázelőkészítő egységen keresztül jut az adagolóba. Ebben a gázelőkészítő egységben jellemzően metanol van elhelyezve, így lehet biztosítani, hogy a gáz megfelelően száraz legyen, vagyis, hogy ne zavarja meg a gázban lévő víz az adagoló működését, amely alacsony hőmérséklet hatására megfagyhat. A gáz a metanolon keresztül buborékolva a víztartalmának jelentős részét elveszíti. A technológia kezeléséhez hozzátartozik, hogy a metanolt megfelelő időközönként cserélni szükséges. Az adagoló rendszerben elhelyezett nyomáscsökkentő egység biztosítja a működtetéshez szükséges nyomást. Az ütemadó feladata a technológiai igényeknek megfelelő ütemezés biztosítása, vagyis, hogy az igénynek megfelelő számú lökettel üzemeljen az adagoló pumpa. A pneumatikus adagoló pumpa a kapott ütemnek megfelelő léptékben adagolja a vegyszert, amelyet annak dugattyújába juttatnak. A pneumatikus adagoló rendszerben természetesen egyéb, a működéshez szükséges kiegészítő elemek szükségesek, ilyen lehet például egy visszacsapó szelep. A vegyszertartályban kerül elhelyezésre a hidrát gátlására szolgáló készítmény. [S26], [S27]



6. ábra Pneumatikus vegyszeradagoló

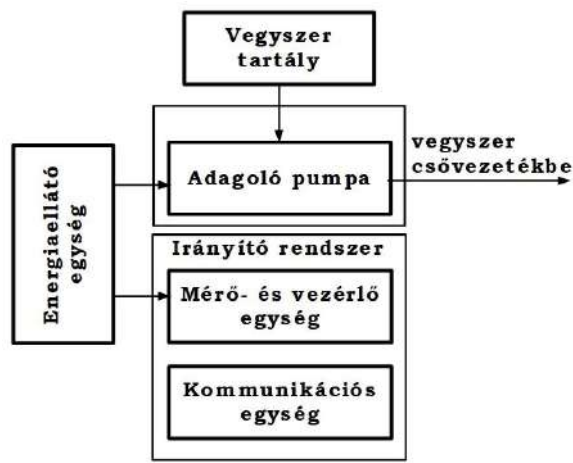
Az irányító rendszer feladata az adagoló rendszer felügyelete, amely a megfelelő működéshez szükséges nyomást, folyadékszintet és környezeti hőmérsékletet érzékeli, valamint a vegyszer csővezetékbe való bejutását is monitorozza. Mivel a kútkörzetben általában nem áll rendelkezésre villamos energia, így az irányító rendszer működéséhez valamilyen energia ellátás biztosítása szükséges, amely jellemzően napelemes. [S20], [S21]



7. ábra Villamos ütemvezérelt pneumatikus vegyszeradagoló

Azokon a technológiákon, amelyeknél villamos energiaforrás áll rendelkezésre, a vegyszeradagolónak az ütemezését általában villamos energiával biztosítják, ahogy azt a 7. ábrán látható blokkvázlat mutatja. Természetesen megfelelő mennyiségű napelemmel, olyan rendszer is kiépíthető, ahol mind az irányító rendszer, mind pedig a villamos ütemadó

egység napelemes energiával táplált. Amint az a 7. ábrán látható, a berendezés felépítése abban különbözik a 6. ábrán látható teljesen pneumatikus működtetésű rendszertől, hogy ennek a berendezésnek az adagolását biztosító ütemadót nem pneumatika mozgatja, hanem mágnes szelepen keresztül lehet az adagoló pumpára jutó nyomást szabályozni. Ennek a megoldásnak az előnye, hogy a működtetést sokkal finomabban és általában jobb ismétlőképességgel lehet biztosítani, mivel a tápnyomásnak a hőmérséklet függéséből adódó hiba nem jelentkezik. A teljes egészében villamos energia biztosította rendszerek azért nem terjedtek el a kűtkörzeti alkalmazásokban, mert a gázkutaknál általában nem áll rendelkezésre villamos energia, kivéve azokat a körzeteket, amelyeknél a kút viszonylag nincsen nagy távolságban a feldolgozó rendszertől. A villamos vegyszeradagolók jelentős része térfogat-kiszorítás elvén működő adagoló pumpákra épül. Ezek az adagoló pumpák képesek nagy nyomáson, széles tartományban állítható sebességgel, és esetenként különböző dugattyú térfogattal biztosítani a vegyszer adagolását. A villamos működtetésű vegyszeradagolók felépítését mutatja a 8. ábra. [S17], [S19], [S28]



8. ábra Villamos működtetésű vegyszeradagolók

Amint az ábrán látható, a villamos adagoló felépítése viszonylag kevés egységet tartalmaz, de nem lehet figyelmen kívül hagyni, hogy a villamos adagoló pumpa nem csupán egy motorral vezérelt dugattyút tartalmaz, hanem a rendszer fontos része a frekvenciaváltós hajtás, a kiszolgáló elektronikával együtt. A tisztán villamos működtetésű adagoló esetén a mérő- és vezérlőegység, valamint a kommunikációs egység, vagyis a teljes

irányítási rendszeren kívül a frekvenciaváltós hajtás és a hozzá tartozó elektronika is villamos megtagplálású. Ennek megfelelően célszerű az összes villamosenergiát igénylő rendszert egy helyről megtagplálni. Ez lehet hálózati megtagplálás, abban az esetben, ha a kútkörzet közelében az rendelkezésre áll. Lehetőség van továbbá napelemes rendszer használatára is, amelyet méretezni szükséges a felhasznált villamosenergiaigényhez mérten. A vegyszeradagolókkal szemben támasztott legfontosabb követelmények az alábbiak:

- ✦ Legyenek képesek széles mennyiség tartományban adagolásra
- ✦ Legyenek alkalmasak agresszív folyadékok adagolására is
- ✦ Segédenergia nélkül, vagy megújuló energiával működjenek
- ✦ Kis energiafogyasztással rendelkezzenek
- ✦ Az adagolás mennyisége legyen állítható
- ✦ Az adagolás működjön széles hőmérséklet- és nyomástartományban
- ✦ Az adagolásról és az adagoló működéséről legyen kommunikációs kapcsolaton keresztül megfelelő információ
- ✦ Az adagoló rendszer kezelése legyen egyszerű
- ✦ Az adagoló rendszer karbantartása ne igényeljen különleges szakértelmet
- ✦ Az adagoló rendszer illeszkedjen a kútkörzeti műszerezéshez, lehetőség szerint rendelkezzen jól integrálható megoldással
- ✦ Az adagoló rendszer felépítése tegye lehetővé, hogy mobil módon bármikor elhelyezhető legyen más kútkörzetben
- ✦ Az adagoló rendszer a legkorszerűbb elemek és egységek felhasználásával készüljön
- ✦ Az adagoló ne legyen költséges

Látható tehát, hogy a vegyszeradagoló rendkívül komplex rendszer, amely mind hardveres, mind pedig szoftveres oldalról különleges követelményeket állít a fejlesztőkkel szemben. [52], [53], [S22]

4. A HIDRÁTOSODÁSI NYOMÁS

Az adott hőmérséklethez tartozó hidratosodási nyomásérték meghatározása szükséges ahhoz, hogy a hidratosodás megakadályozó inhibitor hatékony adagolása megvalósuljon. A fejezetben először ismertetem a hidratosodási görbe matematikai modelljét, majd a legkisebb négyzetek módszerét, amely segítségével a diszkrét hőmérsékleti értékekre felvett egyensúlyi görbe matematikailag leírható. Ezt követően bemutatok egy szabályozást, amely egy szimulációs szoftverrel lett létrehozva és a nyomásmeghatározás helyességét igazolja.

4.1. A FÁZISHATÁRGÖRBE MEGHATÁROZÁSA

A fázishatárgörbe felvételéhez meg kell határozni a hidratosodási nyomást diszkrét hőmérsékleti értékekre, amelyet a gázösszetétel alapján fogom elvégezni. Ehhez először meghatározom az egyes fázisok fugacitását, amely mennyiség magyarázatra szorul. A kémiai potenciálra vonatkozó összefüggéseket, amelyeket az ideális gázok definiálására használok formálisan a reális gázokra is felírhatjuk. Fontos azonban megjegyezni a [54] és [55] referenciának megfelelően, hogy magas nyomáson az ideális gázoktól eltérő viselkedés figyelhető meg, így Gilbert Newton Lewis javaslatára 1901-ben bevezetett fugacitás, mint termodinamikai segédfüggvény alkalmazása szükséges. A fugacitást Dr. Zrínyi Miklós az alábbiak szerint definiálja:

„olyan korrigált nyomás, amelyet ha a tökéletes gázokra kidolgozott termodinamikai elméletekben a nyomás helyébe írunk, akkor a reális gáz tulajdonságait kapjuk meg” [54]

Ennek megfelelően a kémiai potenciál meghatározásához a nyomást egy nyomás dimenziójú fiktív mennyiségre cserélem, amelyre fennáll az alábbi egyenlet:

$$\mu(T, p) = \mu^o + R \cdot T \cdot \ln \frac{f}{p^o}, \quad f \rightarrow p \ (f|p \rightarrow 1), \text{ ha } p \rightarrow 0 \quad (1)$$

ahol,

- μ a kémiai potenciál jele
- T a hőmérséklet jele
- p a nyomás jele
- μ^o a standard kémiai potenciál jele
- R az egyetemes gázállandó jele ($R=8,314 \text{ J}/(\text{mol K})$)
- f a fugacitás jele
- p^o a standard nyomás jele

A fugacitás szokás a nyomás és egy fugacitási tényező szorzataként is felírni, az alábbiak szerint:

$$f = \gamma \cdot p \quad (2)$$

ahol,

- p a nyomás jele
- f a fugacitás jele
- γ a fugacitási tényező jele

Legyen a kiindulási feltételünk, hogy az egyes fázisokban – gáz (g), folyadék (f), hidrát (h) – egyensúly esetén az egyes komponensek kémiai potenciája megegyező. Így a fugacitások segítségével egy adott i komponensre nézve felírható, hogy:

$$f_i^g = f_i^f = f_i^h \quad (3)$$

A számítások során a Peng-Robinson féle állapotegyenletet használom, amely a [56] referenciának megfelelően alkánokra és elegyekre lett kidolgozva, amely meglehetősen jól írja le a gőznyomást és a kritikus pont körüli viselkedést. A köbös állapotegyenlet a [57] referenciának megfelelően:

$$p = \frac{R \cdot T}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2 + 2bV_m - b^2} \quad (4)$$

ahol,

- p a nyomás jele
- R az egyetemes gázállandó jele ($R=8,314 \text{ J}/(\text{mol K})$)
- T a hőmérséklet jele
- V_m moláris térfogat
- b Peng-Robinson féle paraméter elegyre definiálva
- a Peng-Robinson féle paraméter

A (4). egyenletben látható a , illetve b koefficiensek függnek az anyagösszetételtől. Elegyek esetén a fugacitás meghatározásához különböző keverési szabályok alkalmazhatók, mint például a Wang-Sandler, a Van der Waals, vagy a Danesh. Esetünkben, - a gyakorlatnak megfelelően - a Van der Waals-féle keverési szabály kerül felhasználásra, amely szerint az a , és b koefficiensek az alábbiak szerint számíthatók:

$$a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i \cdot x_j \cdot \sqrt{a_i \cdot a_j} \cdot (1 - k_{ij}) \quad (5)$$

$$b = \sum_{i=1}^n x_i \cdot b_i \quad (6)$$

ahol,

- a Peng-Robinson féle paraméter
- x_i i komponens móltörtje
- x_j j komponens móltörtje
- a_i Peng-Robinson féle paraméter i komponens esetén
- a_j Peng-Robinson féle paraméter j komponens esetén
- k_{ij} iterációs konstans
- b Peng-Robinson féle paraméter elegyre definiálva
- b_i Peng-Robinson féle paraméter i komponens esetén

Az (5). egyenletben egy iterációs konstanst jelöl a k_{ij} , amelynek értékére a mellékletben található M1. táblázat mutat példát. Ugyan a [57] hivatkozás jó eredményt ad a fázishatárgörbére, a gázhidrátok termodinamikai

modellezésére általában egy másik megoldást alkalmaznak. Ezt Van der Waals Platteeuw modellnek nevezik, amelyet 1959-ben fejlesztettek ki. A [58] referenciának megfelelően, ez a modell a hidrátfázis és a vízfázis – amely lehet szilárd, folyékony vagy vegyes halmazállapotú – kémiai potenciál egyensúlyán alapul, amit az alábbi egyenlőség fejez ki:

$$\Delta\mu_h = \mu_m - \mu_h = \mu_m - \mu_v = \Delta\mu_v \quad (7)$$

ahol,

- $\Delta\mu_h$ a metastabil üres és a kitöltött hidrát-rácsok kémiai potenciálkülönbsége
- μ_m metastabil üres hidrát-rács kémiai potenciálja
- μ_h kitöltött hidrát-rács kémiai potenciálja
- μ_v vízfázis kémiai potenciálja
- $\Delta\mu_h$ a metastabil üres és a kitöltött hidrát-rácsok kémiai potenciálkülönbsége

A metastabil üres hidrát-rács hipotetikus, csak a számítások gyakorlati alkalmazásának megkönnyítésére használom. Ennek megfelelően a metastabil üres és a kitöltött hidrát-rácsok kémiai potenciálkülönbségét az alábbiak szerint számíthatjuk:

$$\Delta\mu_h = -R \cdot T \sum_{i=1}^n V_i \cdot \ln(1 - \sum_{j=1}^n y_{ji}) \quad (8)$$

ahol,

- $\Delta\mu_h$ a metastabil üres és a kitöltött hidrát-rácsok kémiai potenciálkülönbsége
- R az egyetemes gázállandó jele ($R=8,314 \text{ J}/(\text{mol K})$)
- T a hőmérséklet jele
- V_i üregszám/víz-molekulaszám az i hidrát-rácsban
- y_{ji} Langmuir adszorpciós összefüggés

A V_i szám azt jelöli, hogy az adott rács hány darab vízmolekulájára jut, mennyi darab kis vagy nagy üreg. Ehhez tudnunk kell a két gyakori hidrát típus alapvető tulajdonságait, amelyeket a 3. táblázat foglal össze. A táblázatban a mennyiségek egy cellán belül értendők.

3. táblázat A két gyakori hidrat-típus tulajdonságai [59]

Tulajdonság	S1 típusú hidrat	S2 típusú hidrat
Víz molekulák száma [db]	46	136
Kis üregek száma [db]	2	16
Nagy üregek száma [db]	6	8
Kis átmérő [Å]	7,82	7,82
Nagy átmérő [Å]	8,66	9,46
Potenciális vendég molekulák (kis üreg)	C ₁ , CO ₂ , N ₂ , H ₂ S	C ₁ , C ₂ , CO ₂ , N ₂ , H ₂ S
Potenciális vendég molekulák (nagy üreg)	C ₁ , CO ₂ , N ₂ , H ₂ S	C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄ , i-C ₄ , CO ₂ , N ₂ , H ₂ S

Azt, hogy az egyes rácsokat a vendégmolekulák milyen mértékben foglalják el a Langmuir adszorpció összefüggés adja meg:

$$y_{ji} = \frac{c_{ji} f_j}{1 + \sum_{k=1}^n c_{ki} f_k} \quad (9)$$

ahol,

- y_{ji} Langmuir adszorpció összefüggés
- c_{ji} Langmuir konstans
- f_j a j vendég molekula fugacitása
- c_{ki} Langmuir konstans
- f_k a k vendég molekula fugacitása

A [58] referencia alapján a modellünk egyszerűsíthető úgy, hogy tartalmazza dupla kitöltés hatását nagy üregek esetén, amely szerint a (8). egyenlet az alábbiak szerint módosul:

$$\Delta\mu_h = R \cdot T \sum_{k=1}^{n_{\text{üreg}}} V_k \cdot \ln\left(1 + \sum_{j=1}^n c_{jk} \cdot f_j\right) \quad (10)$$

ahol,

- $\Delta\mu_h$ a metastabil üres és a kitöltött hidrat-rácsok kémiai potenciálkülönbsége
- R az egyetemes gázállandó jele ($R=8,314 \text{ J}/(\text{mol K})$)
- T a hőmérséklet jele

- V_k üregszám/víz-molekulaszám az i hidrát-rácsban
- c_{ji} Langmuir konstans
- f_j a j vendég molekula fugacitása

A c_{ji} Langmuir konstans értékét a Lennard-Jones-Devonshire cellamodell segítségével határozom meg az alábbiak szerint:

$$c_{ji} = \frac{4 \cdot \pi}{k \cdot T} \int_0^{R_c} \exp\left(-\frac{\omega(r)}{k \cdot T}\right) r^2 dr \quad (11)$$

ahol,

- c_{ji} Langmuir konstans
- k Boltzmann állandó
- T a hőmérséklet jele
- $\omega(r)$ Kihara cellapotenciál
- r üregközepptől való távolság

Ez a modell alkalmas arra, hogy a vendégmolekulák és a vízmolekulák kölcsönhatását leíró potenciált megbecsülje. Minél alacsonyabb a potenciál értéke, annál nagyobb egy pozíció megtalálásának valószínűsége. A potenciál kiszámítását leggyakrabban a Kihara módszer segítségével valósítják meg, az alábbi két egyenlet segítségével:

$$\omega(r) = 2 \cdot z \cdot \varepsilon \cdot \left[\frac{\sigma^{12}}{R^{11} \cdot r} \left(\delta^{10} + \frac{a}{R} \delta^{11} \right) - \frac{\sigma^4}{R^5 \cdot r} \left(\delta^4 + \frac{a}{R} \delta^5 \right) \right] \quad (12)$$

$$\delta^N = \frac{1}{N} \left[\left(1 - \frac{r}{R} - \frac{a}{R} \right)^{-N} - \left(1 + \frac{r}{R} - \frac{a}{R} \right)^{-N} \right] \quad (13)$$

Ahol ω a Kihara potenciál, r az üregközepptől való távolság, R a szabad üreg sugara, z az üreg koordinációs száma, N értéke pedig 4, 5, 10, 11 és 12 értékeket vehet fel a (12). egyenletnek megfelelően. A σ , a és ε kísérleti útján meghatározott paraméterek, amelyek minden vendégmolekula esetén egyedileg, értékük a melléklet M2. táblázatban található [60].

A teljes kémiai potenciálegyenletet az alábbi formátumban szokás általánosságban felírni:

$$\frac{\Delta\mu_h}{R \cdot T} = \frac{\Delta\mu_0}{R \cdot T_0} - \int_{T_0}^T \left(\frac{\Delta H_m}{R \cdot T^2} \right) dT + \int_{p_0}^p \frac{\Delta V_m}{R \cdot T} dp + \ln a_v \quad (14)$$

ahol,

- $\Delta\mu_h$ a metastabil üres és a kitöltött hidrát-rácsok kémiai potenciálkülönbsége
- R az egyetemes gázállandó jele ($R=8,314 \text{ J}/(\text{mol K})$)
- T a hőmérséklet jele
- $\Delta\mu_0$ a kémiai potenciálkülönbség, amely 273,15 K referencia hőmérsékletre, illetve a 0 atmoszféra nyomásra vonatkozik
- T_0 273,15 K referencia hőmérséklet
- ΔH_m moláris entalpia különbség
- ΔV_m moláris térfogat különbség
- a_v vízaktivitás

Egy egyszerű átalakítással, és a Van der Waals Platteeuw modell beillesztésével az alábbi összefüggést kapjuk:

$$\frac{\Delta\mu_0}{RT_0} - \int_{T_0}^T \left(\frac{\Delta H_m}{RT^2} \right) dT + \int_{p_0}^p \frac{\Delta V_m}{RT} dp - \sum_{k=1}^n V_k \cdot \ln \left(1 + \sum_{j=1}^n C_{jk} \cdot f_j \right) - \ln a_v = 0 \quad (15)$$

ahol,

- $\Delta\mu_0$ a kémiai potenciálkülönbség, amely 273,15 K referencia hőmérsékletre, illetve a 0 atmoszféra nyomásra vonatkozik
- R az egyetemes gázállandó jele ($R=8,314 \text{ J}/(\text{mol K})$)
- T_0 273,15 K referencia hőmérséklet
- ΔH_m moláris entalpia különbség
- T a hőmérséklet jele
- ΔV_m moláris térfogat különbség
- V_k üregszám/víz-molekulaszám az i hidrát-rácsban
- c_{ji} Langmuir konstans
- f_j a j vendég molekula fugacitása
- a_v vízaktivitás

A moláris entalpia különbség az alábbi egyenlettel definiálható:

$$\Delta H_m = H_0 + \int_{T_0}^T c_p dT \quad (16)$$

ahol,

- ΔH_m moláris entalpia különbség
- H_0 entalpia, 273,15 K referencia hőmérséklet, illetve a 0 atmoszféra nyomás esetén
- c_p a hőkapacitás nyomáson vett értéke
- T a hőmérséklet jele

A (15). egyenlet segítségével adott hőmérsékletre meghatározható a hidratosodási nyomás, illetve természetesen az adott nyomáshoz tartozó gáz-hidrát formációs hőmérsékletet is meg lehet határozni. Az eddigiekben ismertetett fázisgörbe meghatározási módszer megfelel az olaj- és gáziparban gyakran alkalmazott Petroleum Experts PVTP program számítási módszerének, amellyel a hidratosodási nyomásértékeket diszkrét hőmérsékleti intervallumra meghatározza.

4. táblázat A szeghalmi gázminta összetétele

Komponens	Moláris százalék [%]	Moláris tömeg [g/mól]	Tömeg- koncentráció [g/m ³]
C₁	61,941	16,04	421,69
CO₂	22,655	44,01	423,10
N₂	5,683	28,01	67,63
C₂	5,322	30,1	67,91
C₃	2,278	44,1	42,63
n-C₄	0,768	58,1	18,94
i-C₄	0,615	58,1	15,17
i-C₅	0,274	72,2	8,39
n-C₅	0,222	72,2	6,80
C₆	0,163	86,2	5,96
C₇	0,063	99,5	2,68
C₈	0,016	112	0,79

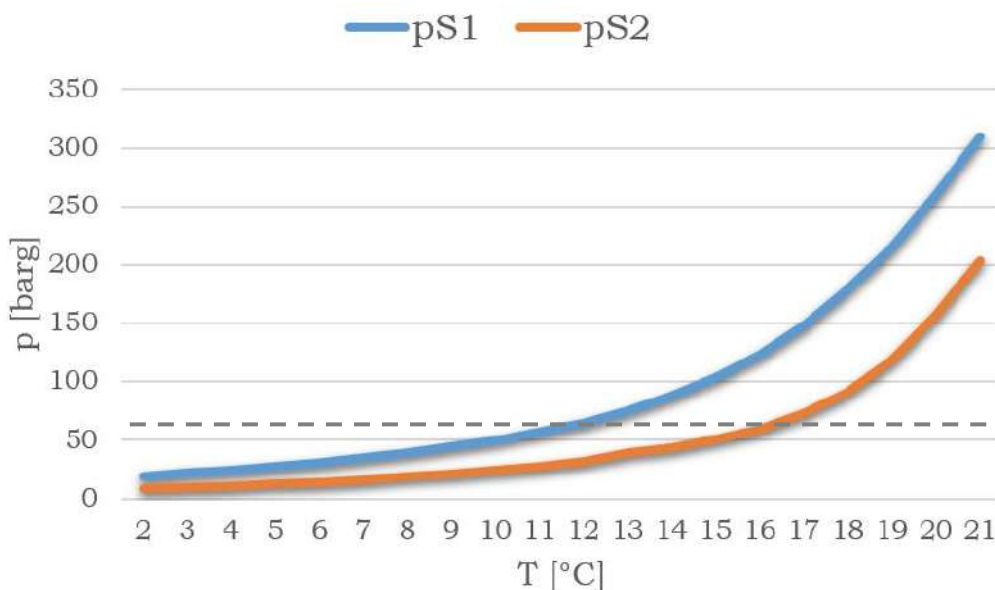
A gázösszetétel ismeretében és a fentebb ismertetett összefüggéssel, vagy a PVTP programmal a fázishatárgörbét meghatározom. A felhasznált gázminta a szeghalmi 29. számú gázkútból származik, amelyeket a MOL Nyrt. hajdúszoboszlói laboratóriumában elemeztek és összetételét gázkromatográf használatával határozták meg. A gázösszetételt a 4. táblázat foglalja össze, amely tartalmazza az egyes komponensek moláris százalékát, és az ahhoz tartozó moláris tömeget és tömegkoncentrációt. [S9], [S10]

A hidrát kialakulásához rétegvíz is szükséges, amelynek mennyiségét korábbi tapasztalatainkra hagyatkozva 10%-ban határozom meg. A hidratosodási nyomásértékeket az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat Hidratosodási nyomásértékek

T [°C]	ps1 [barg]	ps2 [barg]	T [°C]	ps1 [barg]	ps2 [barg]
2	19,7	8,36	12	65,29	32,44
3	22,02	9,6	13	75,48	39,14
4	24,65	11	14	88,02	43,19
5	27,6	12,54	15	103,8	50,54
6	30,9	14,34	16	123,45	60
7	34,76	16,39	17	148,65	72,78
8	39,13	18,74	18	179,36	91,1
9	44,18	21,34	19	215,78	118,91
10	50,05	24,44	20	259,82	156,84
11	56,98	28,04	21	309,61	203,19

A táblázatban 2 és 21°C hőmérséklet (T) tartományban kerültek felvételre a nyomásértékek S1 (ps1) és S2 (ps2) struktúra esetén. A nyomásértékek a légköri nyomáshoz képest relatíve adtam meg (bar gauge). Az eredményeket a 9. ábrán grafikusán is ábrázoltam, ahol kék színnel jelöltem az S1 struktúrához, míg narancssárga színnel az S2 struktúrához tartozó egyensúlyi görbét. Az ábrán jól látható, hogy az S2 hidrát-szerkezet kialakulásához alacsonyabb nyomás is elegendő.



9. ábra A fázishatárgörbék S1 és S2 struktúra esetén

A kútkörzetek üzemi gáznyomása tipikusan 60 bar körüli érték. Ez azt jelenti, hogy a S1 struktúra kialakulása esetén 11,5 °C elegendő a hidratosodáshoz, azonban S2 struktúra esetén már körülbelül 16 °C is kritikus lehet.

4.2. AZ LSQ MODELL

A hidrat kialakulásának megelőzésekor törekedni kell arra, hogy az inhibitor mennyiségét optimumon tartsuk, ezért szabályoznunk kell az adagolást. Ehhez a korábban kapott fázishatárgörbét fogom leképezni, úgy, hogy a diszkrét hőmérsékletértékekre egy határnyomást kapjak. A fázishatárgörbe matematikai leírását a Gauss által kidolgozott legkisebb négyzetek (LSQ) módszerével fogom meghatározni. Ezzel a matematikai módszerrel az egyes pontok legjobb illeszkedését tudjuk meghatározni egy egyenesre, vagyis az egyenes és az arra illesztendő pontok távolságát minimalizálja [61].

A [62] referenciának megfelelően, első lépésként meghatározom a diszkrét pontok és a közelítő görbe közötti különbséget, az alábbi egyenlet segítségével:

$$\Delta = \sum_{i=1}^{20} [yx\varepsilon_i - (P(x_i))]^2 \quad (17)$$

A (17). egyenletben ε_i a diszkrét pontok távolsága az x tengelytől. A $P(x)$ pedig a közelítő harmadfokú polinom, amely az alábbiak szerint adható meg:

$$P(x) = \gamma x^3 + \delta x^2 + \omega x + \mu. \quad (18)$$

A (18). egyenletben látható γ , δ , ω és μ kifejezések a polinomiális együtthatók. Fontos megjegyezni, hogy minél nagyobb a polinom foka a közelítő görbe annál jobban illeszkedik a diszkrét pontokra. Ezek alapján a minimumok négyzetösszege az alábbiak szerint írható fel:

$$\frac{\partial}{\partial \gamma(\delta, \omega, \mu)} \left(\sum_{i=1}^{20} [yx\varepsilon_i - (P(x_i))]^2 \right) = 0 \quad (19)$$

ahol,

- γ polinomiális együttható
- δ polinomiális együttható
- ω polinomiális együttható
- μ polinomiális együttható
- ε_i a diszkrét pontok távolsága az x tengelytől
- $P(x)$ a közelítő harmadfokú polinom

A parciális deriválás elvégzése és kisebb átalakítások után az alábbi négy egyenletet kapom:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{20} (x_i^3 \varepsilon_i) &= \gamma \sum_{i=1}^{20} (x_i^6) + \delta \sum_{i=1}^{20} (x_i^5) + \omega \sum_{i=1}^{20} (x_i^4) + \mu \sum_{i=1}^{20} (x_i^3), \\ \sum_{i=1}^{20} (x_i^2 \varepsilon_i) &= \gamma \sum_{i=1}^{20} (x_i^5) + \delta \sum_{i=1}^{20} (x_i^4) + \omega \sum_{i=1}^{20} (x_i^3) + \mu \sum_{i=1}^{20} (x_i^2), \\ \sum_{i=1}^{20} (x_i \varepsilon_i) &= \gamma \sum_{i=1}^{20} (x_i^4) + \delta \sum_{i=1}^{20} (x_i^3) + \omega \sum_{i=1}^{20} (x_i^2) + \mu \sum_{i=1}^{20} (x_i), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\sum_{i=1}^{20} (\varepsilon_i) = \gamma \sum_{i=1}^{20} (x_i^3) + \delta \sum_{i=1}^{20} (x_i^2) + \omega \sum_{i=1}^{20} (x_i) + \mu.$$

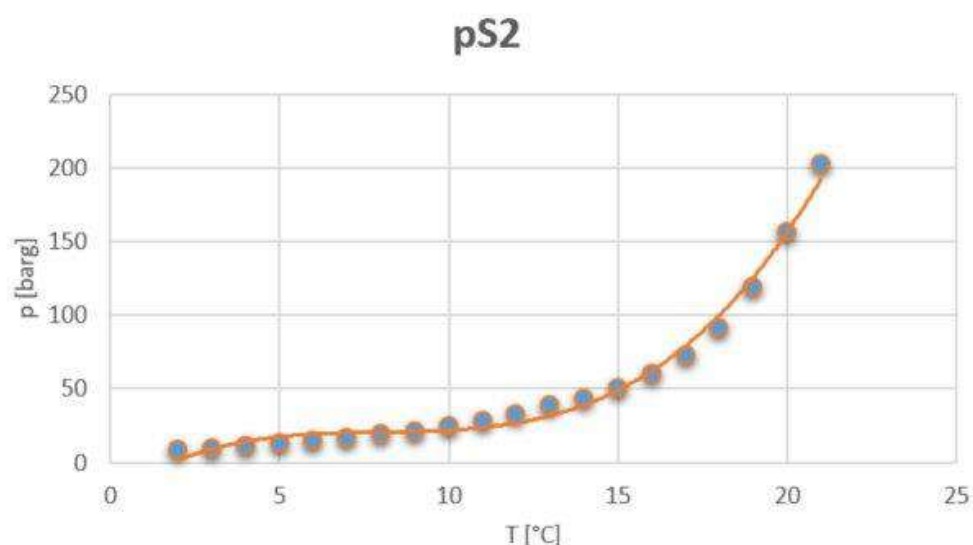
Az egyenletrendszer megoldásához azt mátrixalakban írom fel:

$$\hat{X} \cdot \begin{bmatrix} \gamma \\ \delta \\ \omega \\ \mu \end{bmatrix} = \hat{y} \quad (21)$$

A (20). egyenletrendszer alapján a (21). egyenlet az alábbiak szerint fog kinézni az S2 struktúra adatait felhasználva:

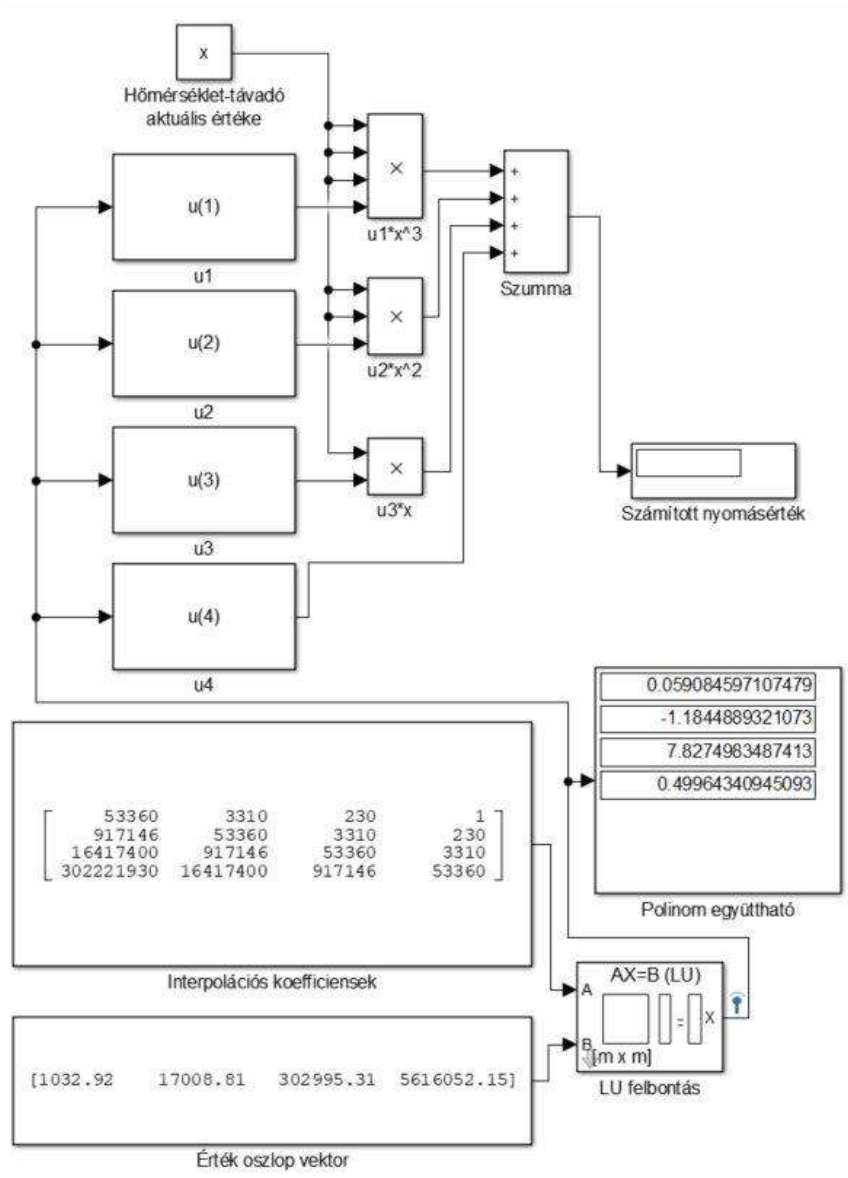
$$\begin{bmatrix} 53360 & 3310 & 230 & 1 \\ 917146 & 53360 & 3310 & 230 \\ 16417400 & 917146 & 53360 & 3310 \\ 302221930 & 16417400 & 917146 & 53360 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{S2} \\ \delta_{S2} \\ \omega_{S2} \\ \mu_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1032,92 \\ 17008,81 \\ 302995,31 \\ 5616052,15 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Az S1-es struktúra adataival behelyettesített egyenlet a mellékletben található (M3). Az egyenletekből a polinomiális együtthatók az S1 és S2 struktúra esetén is számíthatók, amelyek a mellékletben találhatók (M4). A 10. ábrán láthatjuk a különbséget az eredeti pontok és a legkisebb négyzetek módszerével létrehozott görbe között. A különbség az egyes pontoknál $\pm 1,02$. [63], [61], [S15]



10. ábra A pontok illesztése S2 struktúra esetén

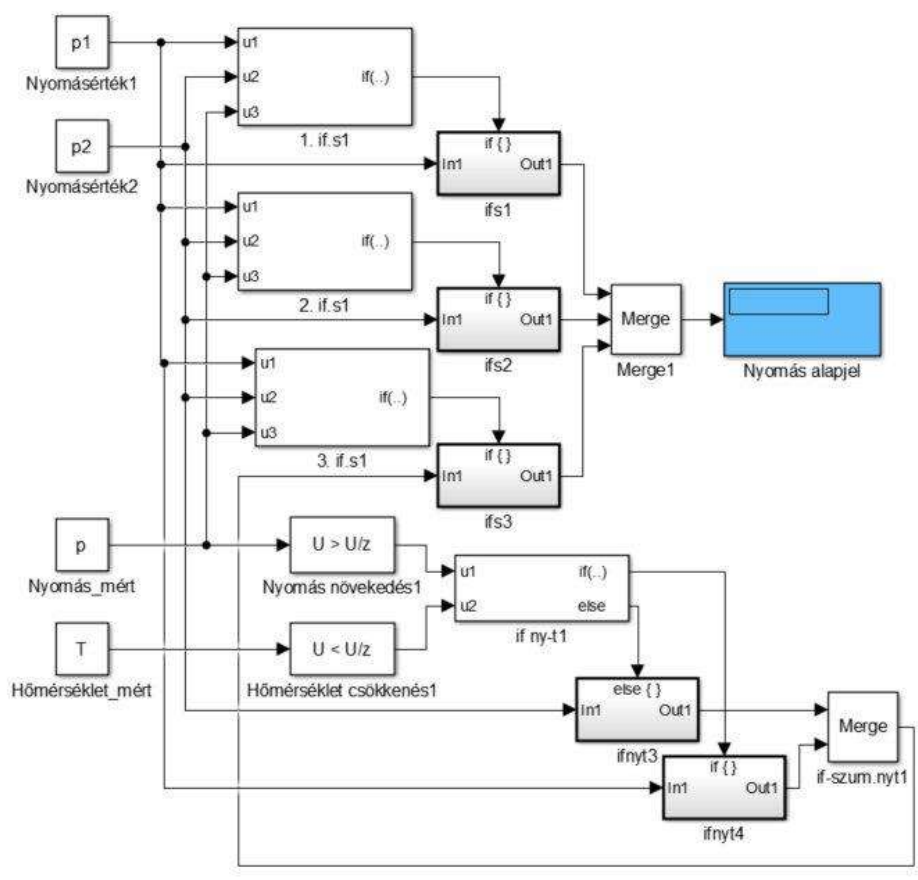
További pontossági igény esetén a használt polinom fokszáma növelhető, így az eredmény pontosabbá válik. Az S1 struktúra összehasonlító diagramja a mellékletben található (M5). A (22). egyenlet birtokában a diszkrét hőmérséklethez tartozó nyomásérték egy szimulációs modell segítségével is előállítható, amelyet a 11. ábrán láthatunk.



11. ábra Nyomásérték meghatározó modell

Az ábrán látható modell MatLab szoftverrel készült. A teljes modell két nyomásérték meghatározására alkalmas egységet tartalmaz, hiszen S1 és S2 struktúra esetén is figyelembe vesszük a nyomás alakulását. Azt, hogy

végül a szabályozás alapjelét, amely nyomásérték szolgáltatja egy a modellbe épített feltételrendszer határozza meg, ez a 12. ábrán látható.



12. ábra Nyomásválasztó feltételrendszer

Adott üzemi nyomáson az S2 struktúra a kritikusabb, mivel ezen struktúra hidrátképződési hőmérséklete T_{hs2} magasabb, mint az S1 struktúra esetén a T_{hs1} . Általánosságban kimondható tehát, hogy adott nyomáson T_{hs2} hőmérséklet felett nem kell tartanunk a hidratosodástól, illetve T_{hs1} hőmérséklet esetén, pedig bizonyosak lehetünk afelől, hogy a hidrátképződés megkezdődött. Ennek megfelelően a feltételrendszert adott nyomáson a T_{hs1} és T_{hs2} hidrátképződési hőmérsékletek közötti intervallumra szükséges kidolgozni. Ennek megfelelően itt a feltételrendszer figyelembe veszi az aktuális hőmérséklet és nyomás mért értékét, amelynek változásából becsüli meg, hogy S1 vagy S2 struktúra szerinti legyen a nyomásalapjel. Azért, hogy az így kialakított teljes modell hatékonysága kipróbálható legyen, készült egy szabályozó algoritmus is, amely a mellékletben megtalálható (M6). [65], [66]

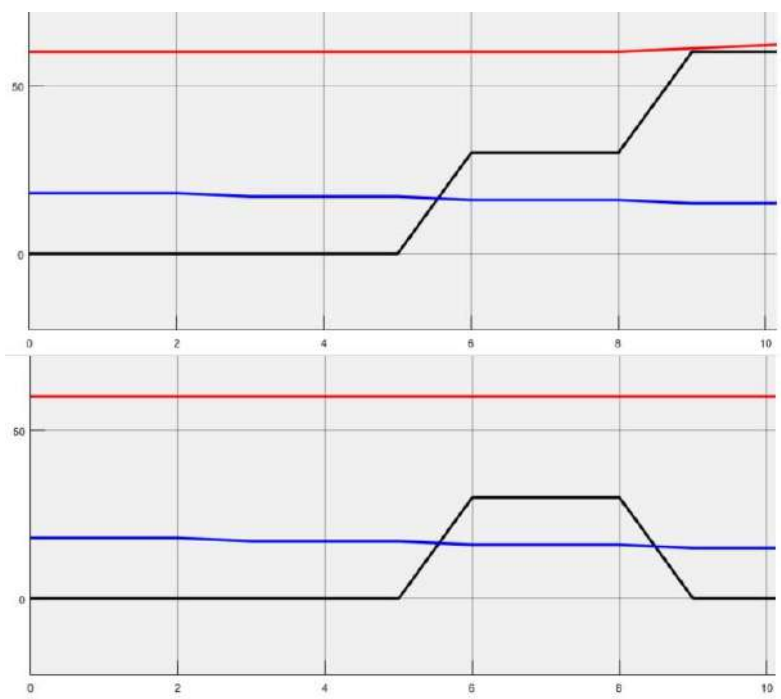
A fázishatárgörbe matematikai leírásának pontatlansága miatt szükséges, hogy bevezetésre kerüljön egy nyomáshiba, mellyel a határnyomás korrigálásra kerül. Ezt követően egy nagyon egyszerű szabályozást csatolok a rendszerhez, amelyet három szegmensre osztok, az alábbiak szerint:

- ✎ Ha az aktuális mért nyomás nagyobb, mint a számított nyomásunk, akkor a kimenetre a maximális értéket adjuk. Vagyis a frekvenciaváltó 60 Hz-el fog üzemelni.
- ✎ Ha az aktuális mért nyomás kisebb, mint a hibával korrigált számított nyomás, akkor a kimenetre a minimális értéket adjuk. Vagyis a frekvenciaváltó 0 Hz-el fog üzemelni.
- ✎ Ha az aktuális mért nyomás a számított nyomás, valamint a hibával korrigált számított nyomás közötti értéket veszi fel, akkor a kimenetre a maximális érték felét adjuk. Vagyis a frekvenciaváltó 30 Hz-el fog üzemelni.

A három feltétel összesítését követően figyelembe vettem az esetleges zavarójeleket, amelyek káros hatása ronthatja a frekvenciaértéket, ezért egy PID elem került beépítésre, valamint egy direktbe kötött negatív visszacsatolás, amely csökkenti a hibát.

A modell hatékonyságát kútkörzeti adatok segítségével vizsgáltam. Az adatok közül adott volt a nyomás, valamint a hőmérséklet értékek, illetve a várt beavatkozás, tehát, hogy adott hőmérséklet és nyomás mellett szükséges-e inhibitort adagolni. A MOL Nyrt. Fűzesgyarmaton található Szeghalom-29-es kútján rögzített értékekkel dolgoztam. Az adatbázist a kútra telepített kútkörzeti irányítási és vegyszeradagoló berendezés által mentett adatok adták, amelyből 100 mintát használtam fel. A vizsgálatok során az S1 és az S2 struktúrához tartozó egyensúlyi görbét, a szabályozás alapjelét és a beavatkozó jelet rögzítettem. Vizsgálataim alapján a tényleges beavatkozás 96%-ban megfelelt a vártnak. A szabályozás működésének vizsgálatára mutat példát a 13. ábra, ahol két esetet is szemléltetek generált adatok alapján. Ahogy az az ábrán látható a hőmérsékletet (kék), mindkét esetben folyamatosan csökkentettük. A nyomás (piros) az egyik esetben állandó 60 bar, a másik esetben adott hőmérsékletet követően fokozatosan

növeltük azt. Látható, hogy a beavatkozó jel (fekete), annak függvényében is változik, hogy a nyomás értéke a hőmérséklethez képest, hogyan alakul. Állandósult nyomás esetén a beavatkozó jel csökken, míg növekedő nyomás esetén a beavatkozó jel nő.



13. ábra A szabályozás működés közben

A teljes rendszer működéséről készült diagramot a melléklet M7. ábrán láthatjuk.

4.3. ÖSSZEGZÉS

Irodalomkutatót végeztem a hidratosodás ábrázolására szolgáló fázishatárgörbe matematikai leírásával kapcsolatosan. A munkám során tanulmányoztam az egyes fázisok fugacitását, azok kémiai potenciálját, a Peng-Robinson féle állapotegyenletet és a Van der Waals Platteeuw modellt. A kapott matematikai modellnek megfelelően felvettem a fázishatárgörbét, úgy, hogy meghatároztam a hidratosodási nyomást diszkrét hőmérsékleti értékekre a gázösszetétel alapján. A fázishatárgörbét mind S1 struktúrájú, mind pedig S2 struktúrájú hidrát esetén felvettem. Elvégeztem a két

struktúra összehasonlítását. Irodalomkutatást végeztem a görbék matematikai leírását illetően. Elvégeztem a fázisgörbe matematikai leírását az LSQ módszer és egy harmadfokú polinom segítségével. A matematikai leírást mind S1 struktúrájú, mind pedig S2 struktúrájú hidrátra elvégeztem. A matematikai leírás megadásához a fázisgörbe, vagy annak minimum négy-öt pontjának ismerete szükséges. A fázisgörbe a gázösszetétel ismeretében kiszámítható. A minimálisan szükséges 4-5 fázisgörbe pont mérésével meghatározható. A matematikai leírást alapul véve a MatLab Simulink programjának segítségével létrehoztam egy modellt, amely segítségével a nyomásalapjel becsülhető. Elkészítettem egy szabályozó algoritmust, amely alkalmas az inhibitor optimális adagolására, és a fázishatárgörbe matematikai leírása képezi az alapját.

4.3.1. TÉZIS I

Kidolgoztam egy LSQ alapú modellt, amely alkalmas diszkrét hőmérsékletértékhez tartozó hidrátosodási nyomásérték meghatározására, mindkét struktúrájú (S1 és S2) hidrátosodás jellemzőit figyelembe véve. Létrehoztam egy szabályozó algoritmust, amely segítségével igazoltam, hogy a kidolgozott modell alkalmas arra, hogy a struktúrafüggő hidrátosodási nyomásértéket megbecsülje az inhibitor adagolásához.

4.3.2. ÚJDONSÁG ÉS ÉRVÉNYESSÉG

Nincs a szakirodalomban olyan cikk, ahol LSQ alapú modellt alkalmaztak az inhibitor adagolásához.

A modell használatához a hidrátosodási fázisgörbe, vagy annak minimum négy-öt pontjának ismerete szükséges. A fázisgörbe a gázösszetétel ismeretében kiszámítható. A minimálisan szükséges 4-5 fázisgörbe pont mérésével meghatározható.

4.3.3. KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

[S4], [S9], [S10], [S15]

5. HIDRÁT-KÉPZŐDÉS DETEKTÁLÁS

A hidrát kialakulás detektálását a [67] irodalom alapján négy csoportba szokás sorolni. Az egyik ezek közül a Katz módszer. Ezen esetben a hidrát képződésnek a gőz-szilárd egyensúlyi állandóhoz tartozó hőmérséklet és nyomás értékeit használják (Carson és Katz, 1942). Az iteratív és konvergáló számítást mindaddig kell végezni, amíg az alábbi nem teljesül:

$$\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{K_{vs}} = 1.0 \text{ és } K_{vs} = \frac{y_i}{x_s} \quad (23)$$

ahol y_i – az i -edik szénhidrogén komponens mól frakciója gáz fázisban víz nélkül számítva, K_{vs} – gőz-szilárd egyensúlyi állandó, és x_s – az i -edik szénhidrogén komponens mól frakciója a szilárd fázisban víz nélkül számítva. A számításban a nitrogén és az összes molekula túlságosan nagy a hidrát képződéshez, ezért ezek végtelen K értékkel rendelkeznek. Katz számítási módszere nem ajánlott 1000-1500 PSI, vagyis kb. 103 bar érték felett, illetve függ az összetételtől. Hidrát keletkezés előre jelzéséhez Katz módszerétől eltérő megoldást javasol Sloan (1989) magasabb nyomáson, ahol az alternatív K_{vs} gáz összetételfüggő, így a képlet használható mintegy 4000 PSI, vagyis kb. 275 bar értékig.

A második a négy csoport közül a Gas gravity plots módszer, ezt Katz 1945-ben jelentette meg. Ezt a gáz gravitációs diagram szerkesztést kétféle módon lehet elvégezni:

- először a hidrát kialakulásához tartozó nyomáson és hőmérsékleten a gáz gravitációs súlyának a számításával,
- másodszor a földgázban a hidrát keletkezéséhez tartozó grafikon felhasználásával.

Ezek a módszerek egyszerű grafikus technikák, amelyeket például szelepek és más eszközök tervezésénél lehetett használni. Sloan 1948-ban

statisztikai elemzéssel igazolta, hogy ezek a módszerek nem elég pontosak a hidrát kiválásának előre jelzéséhez.

A harmadik a négy csoport közül a becslésen alapuló korreláció. Az empirikus korreláció kifejlesztését Makogan 1981-ben, illetve Holoder és társai 1988-ban publikálták, ami a különböző jellemzők megváltozásából készített becslést jelenti.

Végül az utolsó a termodinamikai megközelítés. A statisztikus termodinamikai közelítési módszert Van der Waals és Platteeuw 1959-ben publikálta. Ez a megközelítés a gázmolekulák és a vízmolekulák közötti, a kristályrácsban megjelenő kölcsönhatásokat magyarázza meg.

Az alábbi fejezetben az eddigiektől eltérő gépi-tanulás alapú detektáló rendszer kerül bemutatásra. A rendszer betanításához nagy mennyiségű adat szükséges, ennek megfelelően először egy mérőrendszert ismertetek, illetve az azzal elvégzett méréseket és azok feldolgozását. Ezt követően bemutatásra kerülnek a neurális hálózatok, végül a kidolgozott detektáló rendszer.

5.1. A MÉRŐRENDSZER

A hidrát fázis meghatározására szolgáló kvantitatív mérések közül a legelterjedtebb technikák és jelenleg is a leggyakoribb módszerként használatosak a következők:

- Diffrakciós technika: A kristály struktúra meghatározása a neutron diffrakciós eljárás alkalmazásával rendkívül kifinomult, de viszonylag költséges módszer. [68]
- Raman spektroszkópia: A korszerű lézer és optikai szálak technológiát alkalmazza a hidrát kristály meghatározására úgy, hogy a mérés során a molekula vibrációját mérik. Ezzel a módszerrel 1000 bar nyomásérték felett is nagy pontosságú mérést lehet elvégezni. [69]

-
- NMR spektroszkópia: A National Research Council of Canada intézet munkatársai által kifejlesztett, mágneses rezonancia elven működő (Nuclear Magnetic Resonance – NMR) berendezés felhasználásával hidrát vizsgálatok végezhetőek el. [70], [71]

A fenti módszerek természetesen kombinációs eljárásban is alkalmazhatók, sőt egyéb, hagyományos módszerekkel – beleértve a mikroszkopikus módszert is – kiegészítve még hatékonyabb hidrát meghatározás végezhető el. A hidrát vizsgálatokkal kapcsolatban a különböző kutatóhelyeken különböző berendezéssel, módszerrel vizsgálják a gázhidrátok kialakulását, a termodinamikai összefüggéseket, kristályok struktúráját, a gátlási megoldásokat, és minden, a témához kapcsolódó jelenséget. Alapvetően megkülönböztetünk statikus és dinamikus berendezéseket. A gázhidrátok laboratóriumi vizsgálatát a legtöbb kutatóhelyen statikus körülmények között végzik, aminek a legnagyobb előnye, hogy a formációk kialakulását, a termodinamikai jellemzőket jól reprodukálható módon lehet meghatározni. Az alábbiakban a statikus berendezésekre sorolok fel példákat a teljesség igénye nélkül:

- Az University of Stavanger vizsgáló berendezése egy úgynevezett zafírcellás kísérleti berendezés, amely LDHI készítmények vizsgálatára is alkalmas. A kisméretű cellában elhelyezett zafír cső mágneses keverőn, termosztálható térben van elhelyezve. A hidrát kialakulását a zafír cellában a mágneses keverő fordulatszámának állandó értéken tartása mellett, a nyomaték megváltozásával lehet meghatározni [72].
- A Semnan University kísérleti berendezése hidrát formációk kinetikus vizsgálataira alkalmas, amellyel a [73] és [74] irodalomnak megfelelően végeztek kísérleteket iráni kutatók. A berendezés fő része az 500 cm³ térfogatú Pyrex üvegből készült reaktor, amelyet hűtött köpeny vesz körül. A reaktorban a homogén fázis viszonyokat mágneses keverő biztosítja. A közeg hőmérsékletét Pt100 ellenállás hőmérővel mérik a reaktorban és a hűtőköpenyben egyaránt. A berendezés csak atmoszférikus körülmények közötti vizsgálatokra alkalmas.

-
- A [75] irodalomban található nagynyomású hidrát kristályosító berendezést az indiai és malajziai kutatók alkalmazták. A berendezés fő része az 500 cm³ térfogatú kristályosító tartály, amelybe a mérési jellemzők meghatározására szolgáló nyomás és hőmérsékletérzékelők is elhelyezésre kerültek. A kísérleti nyomás értéke 0 - 100 bar tartományban állítható. A tartály belseje hűthető azért, hogy a kristálymagnak és a környezetének eltérő kristályosodási folyamatát egyenlő szintre hozzák. A gázáramlás szabályozó biztosítja a kívánt 0 - 5 ml/h értéknek megfelelően.
 - A [76] és [77] irodalmak tanúsága szerint amerikai kutatók használták munkájuk során az akusztikus hidrát vizsgáló berendezést. A hidrát vizsgálatokat akusztikus hangterjedésen alapuló mérésekkel végezték. A kísérletek során a hidrát képződést egy boroszilikát üvegben vizsgálják. A folyamatos hűtést a hűtő-termosztát biztosítja a kísérletek elvégzéséhez egészen - 20 °C értékig. A kísérleti fluidum homogenizálásához szükséges keverést az üveg reaktor tetején elhelyezett keverő biztosítja. A reaktor alján elhelyezett, gumival tömített rezonátor által szolgáltatott jel a vizsgált közegen keresztülhaladva az akusztikus érzékelőre jut. Az érzékelő által létrehozott jelminta akusztikus spektrumának meghatározásával lehet információt nyerni a hidrátosodás mértékéről, illetve a gátlási hatékonyságról.

A statikus hidrátvizsgáló berendezések alapvetően a hidrát képződés kialakulására, termodinamikai egyensúlyi állapotok meghatározására, modellezésre és kisebb mértékben a hidrátgátló anyagok hatékonyságának meghatározására szolgálnak. Ezen berendezések általában atmoszférikus vagy kis nyomáson működnek – ezek rendszerint üvegcellás eszközöket használnak. A statikus hidrát vizsgálati eszközökkel végzett vizsgálatok eredményeit felhasználva készültek el az első dinamikus, illetve kvázi dinamikus vizsgálatokra alkalmas berendezések. Ezek rendszerint úgy épülnek fel, hogy hidrátképződésre alkalmas gázokat, rendszerint nagytisztaságú metánt, széndioxidot, vagy természetes, valódi gázmezőből kivett földgázt áramoltatnak egy, a kísérlethez megfelelően kialakított cellán

keresztül. Az áramlási sebességet általában a kismintának megfelelően alakítják ki és a legtöbb esetben a mezőnek megfelelő nyomást alkalmazzák a vizsgálatok esetében. Az alábbiak a dinamikus berendezésekre sorolok néhány példát a teljesség igénye nélkül:

- A [78] és [79] irodalomban található hosszúcsöves modellberendezés az olaj- és gázvezetékben kialakuló hidrátosodás vizsgálatára alkalmas, amelyben a kísérleti közeg dízelolaj vagy kondenzátum és víz elegyű diszperz rendszer, és az áramlási vizsgálatok, és a hidrát gátlás elvégzését teszi lehetővé. A vizsgáló berendezés legfontosabb része a hidrát kialakulásának tanulmányozására alkalmas csővezeték. A hosszú szakaszba került beépítésre a vizuális megfigyelésre alkalmas cella. A kísérleteknél használt maximális nyomás 100 bar. A folyadék megfelelő áramoltatását egy centrifugál szivattyú végzi, az áramlási sebesség maximális értéke 3000 l/h.
- A [80] irodalomban található Statoil Norway dinamikus hidrát vizsgáló berendezést a szerzők az offshore kutaknál jelentkező hidrátképződés megakadályozása érdekében végzett kísérletekhez használták. A különleges berendezésnél egy kör alakúra hajlított vascsőben történik a vizsgálat, amin két ablak van elhelyezve. A két ablak közül az egyikre kamerát szereltek a vizuális megfigyelés céljából. A hajlított vascsőben maximálisan 100 bar nyomásig lehet kísérleti méréseket végezni. A gáz és a hidrátgátló folyadék elegye a változó sebességgel mozgatható kerékbe kerül – így szimulálva a valódi csőben áramló közeget – és a nyomatékváltozás arányos lesz a kialakult hidrát mértékével. A motor mozgását frekvenciaváltó biztosítja, 0,3...5 m/s sebesség tartományban.

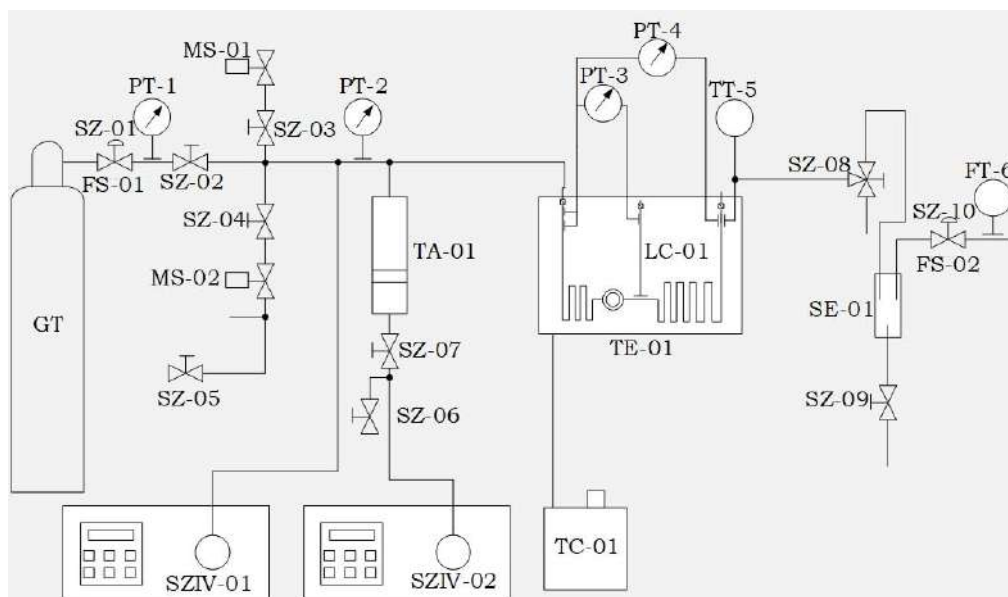
A bemutatott berendezések csővezetéki körülmények közötti áramlás modellezésére szolgálnak, de közetmagon végzett vizsgálatra, kútkörzeti szimulációra is készültek berendezések. Az általam használt berendezés is egy dinamikus hidrát vizsgáló berendezés, amelyet az ME AFKI Műszerfejlesztési és Informatikai Osztály munkatársai az egyik vezető magyarországi gáz- és olajipari vállalatának szakértőivel közösen dolgoztak ki. A mérőberendezés megtervezésekor alapvető szempont volt, hogy a hazai

gázkutak gázhozamának és áramlási sebességének, valamint a kútvezetékek keresztmetszetének megfelelő kisminta tesztrendszerben végezhesük a tesztek. A kisminta rendszer megalkotásánál az alábbi tervezési paraméterekkel számoltunk:

- 2 mm-es belső csőátmérő
- szénacél anyagminőségű cső
- 6, illetve 12 m csőhossz
- 60 bar gáznyomás
- 4 nl/min gáz-áramlási sebesség

A fenti paraméterekkel épített kisminta rendszerrel jól modellezhetővé váltak a gázmezőben található kúttól a gyűjtőállomásig terjedő csőszakaszban lejátszódó folyamatok. A kialakított tesztrendszerbe a gáz-betáplálási oldalon a - beállított gáznyomású és áramlási sebességű - mintagázhoz rétegvizet és igény esetén hidrátgátló inhibitort adagoltam, amit aztán - a mérésre jellemző hőmérsékletű - folyadék-termosztátba helyezett vizsgáló csőszakaszon keresztül áramoltattam. A mérő-csőszakaszban kialakuló áramlási ellenállás miatt a mérési pontokon nyomáskülönbséget mérhetünk, amely szignifikánsan jelzi a hidrát dugó kialakulását. A berendezést 2014-ben az akkori kívánalmaknak megfelelően átalakítottuk, és a maximális vizsgálati nyomást az addigi nyomásérték duplájára, azaz 60 bar-ról 120 bar-ra emeltük. Ekkor az új nyomásérték alkalmazása miatt a tesztberendezés szükséges elemeit, az új nyomásértéknek megfelelőre cseréltünk, így például cserére szorultak a nyomásmérők, a nyomásszabályozó, a szelepek. További fejlesztés volt, hogy egy gáz-előhűtő egység került beépítésre a mérőrendszerbe, amely feladata a szobahőmérsékletű minta-gáz hőmérsékletének beállítása a méréshez szükséges értékre – már a mérő csőszakaszba való belépés előtt. Az előhűtő egység egy szabályozható hőmérsékletű folyadék-termosztátból, egy hőszigetelt tárolóból, az abba elhelyezett hűtőcsövekből, hőmérséklet távadóból, valamint a hűtő-csőre épített differenciál nyomásmérőből áll. A jelenleg is üzemképes csővezetéki áramlásokat szimuláló

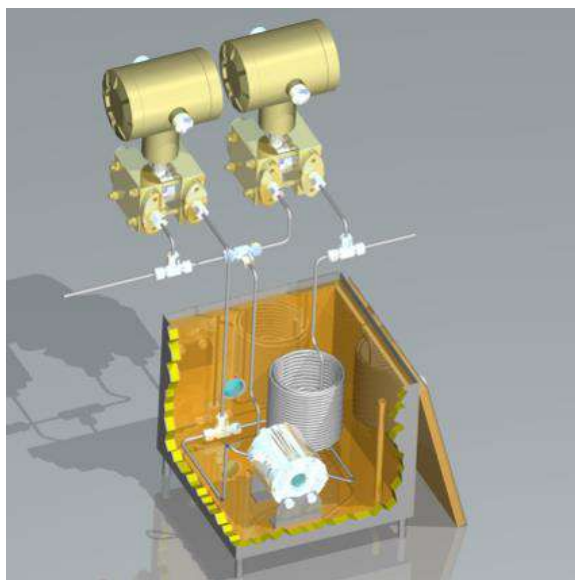
modellberendezéssel a terepi körülményekhez hasonló, $-20...+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet tartományban lehet vizsgálatokat elvégezni, a gáz- és olajiparban használatos nyomásviszonyok mellett. Az áramlási értékeket a modellezési alapelveknek megfelelően 1-10 nl/min tartományban lehet állítani a berendezésben. A berendezés sematikus rajza a 14. ábrán látható. Az ábra jelöléseivel tartozó megnevezéseket és azok tulajdonságait a melléklet M10. táblázatban találhatjuk.



14. ábra A modellberendezés sematikus rajza

Középen látható a TE-01 elnevezésű szigetelt edény, amelyben helyet kapott a mérőcső és az LC-01 jelű látóüveges cella. A termosztát edény egy jól szigetelt kettősfalú, rézből készült folyadéktartály. A két darab nyomáskülönbség távadóval lehet megfigyelni a hidrát keletkezését. A két nyomáskülönbség távadó közül a PT-3 a csőszakasz első 6 méterén, míg a PT-4 távadó a csőszakasz teljes hosszán, vagyis 18 méteren méri a nyomáskülönbséget. Ennek megfelelően a nyomástávadók segítségével az is megmondható, hogy az első 6, vagy pedig az azt követő 12 méteren keletkezett e hidrát a rendszerben. A kísérleti berendezés egyik legfontosabb része a látóüveges cella, amely segítségével a kísérletek során meg lehet vizsgálni a kristály kialakulását és annak szerkezetét. A mérőcella 3D-s látványterve a 15. ábrán látható. Az ábrán két nyomáskülönbség távadó is megfigyelhető, ahogy a csőszakaszra csatlakoznak, illetve a kapilláris

mérőcella, valamint a hűtőedény. A rendszer tartalmaz két adagoló szivattyút, amelyek közül a SZIV-01 rétegvíz, a SZIV-02 pedig szükség esetén az inhibitor adagolását biztosítja. A bemeneti gáznyomás szabályozó nyomáscsökkentő/reduktor (SZ-01) feladata a GT jelű gáztartályból érkező gáz nyomásának szabályozása a méréshez szükséges értékre. A szabályozó egyenletes működéséhez azt az FS-01 jelű fűtőszállal fűtjük.



15. ábra A kapilláris mérőcella és a hűtőedény látványrajza

A modellberendezésről készült képet a 16. ábrán láthatjuk. A képen láthatjuk balra a gáztartályt, alul a két adagoló szivattyút, felül a két nyomáskülönbség távadót, és egy nyomástávadót, középen pedig az alábbiakban részletezésre kerülő szelepeket. Az SZ-02 és SZ-03 szelepek kétállásúak, előző feladata a mérőrendszer leválasztása, míg a második a sűrített levegő bevezetéséről gondoskodik a rendszer tisztításakor. Az SZ-04 és SZ-05 szelepek a mosóvíz bevezetéséről gondoskodnak a rendszer tisztításakor. Az SZ-06 pedig az inhibitor nyomásának leengedésére, az SZ-07 pedig az inhibitor beadagolásának engedélyezésére szolgáló szelep. Az SZ-08 egy háromállású szelep, amely a mérés és a rendszer leeresztésére szolgál. Az SZ-09 csapadékvíz leeresztésére lett beépítve. Az SZ-10 a kimeneti szabályozószelep, amely feladata a megfelelő áramlási sebesség biztosítása. PT-1 nyomásmérő a belépő nyomás mérésére szolgál.



16. ábra A modellberendezés

A berendezésben a szükséges mérőeszközök – nyomás, hőmérséklet, áramlás, nyomáskülönbség – által szolgáltatott villamos jeleket számítógépes feldolgozórendszer kezeli.

5.2. A MÉRÉSEK

Az ME AFKI Műszerfejlesztési és Informatikai Osztály munkatársai ezernél is több mérést végeztek el különböző magyarországi kútkörzetekből származó mintákkal. A [81] irodalom szerint a termelői és tárolói kútkörzetből származó gázt is tisztítási eljárásnak kell alávetni. Ekkor a földgázt előkészítik szállításra, ami a mezők közelébe telepített gázfeldolgozóknak valósítanak meg az alábbiak szerint:

- a víz leválasztása szeparátorok segítségével
- a szilárd szennyeződések leválasztása elektrosztatikus leválasztók segítségével
- a nehezebb szénhidrogének (gazolin) leválasztás a gazolin üzemben
- a vízgőz leválasztása hűtéssel vagy szárítással
- hidrogéngáz leválasztása hűtéssel

- szén-dioxid és kén-hidrogén leválasztása abszorbenszekkel

Láthatjuk, hogy a kitermelt földgáz több komponensből áll, amelyeket tisztítási eljárás során tudunk szétválasztani. Megkülönböztetünk egyrészt száraz földgázt, amely alapvetően metánból (80-99%) és etánból (1-15%) áll. A száraz földgáz a számunkra hasznos gáz, amely szállítása leginkább csővezetékeken keresztül történik. A másik megkülönböztetett komponens a nedves földgáz vagy gazolin, amelynek értékes alkotóelemei a propán és a bután. Ezeket olajmosási technológiával nyerik ki, amelyet keverék PB, propán vagy bután palackokba, vagy tartályba töltenek nagynyomású cseppfolyósítást követően. A harmadik megkülönböztetett és fontos komponens pedig a rétegvíz, mivel a természetes kialakítású tárolóközet vizet tartalmaz a pórusai között.

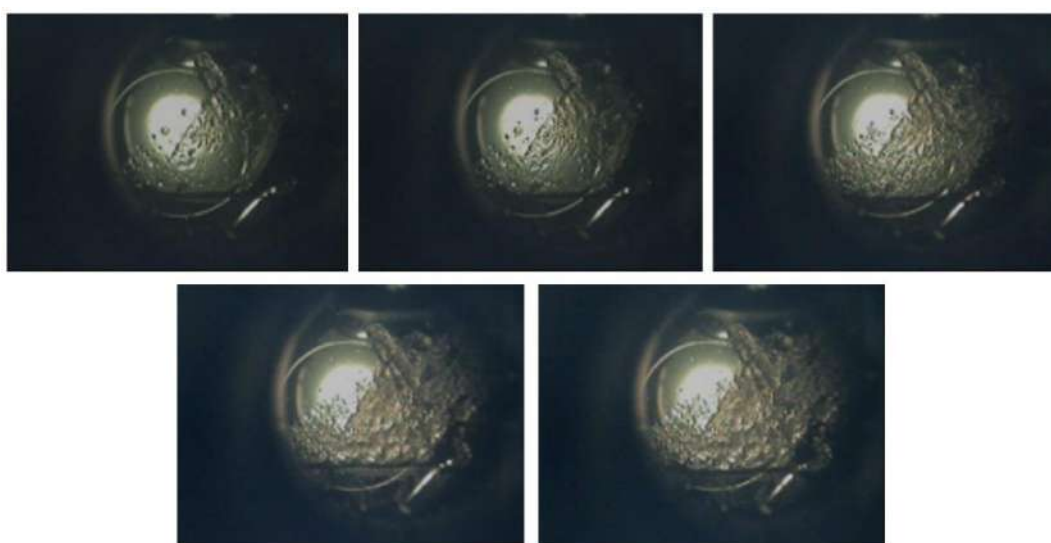
Vagyis méréseink során is figyelembe kell venni, hogy a gáz mellett, rétegvizet, és esetlegesen gazolint is adagolni kell a gázminta előállításakor. Vagyis a gázminta összetételétől függően a modellberendezéssel lehetőségünk nyílik többféle mérést elvégezni a 6. táblázatnak megfelelően.

6. táblázat Mérési típusok

Megnevezés	Komponensek			Inhibitor
	gáz	gazolin	rétegvíz	
Vak mérés	+	-	+	-
Valóságghű vak mérés	+	+	+	-
Mintás mérés	+	-	+	+
Valóságghű mintás mérés	+	+	+	+

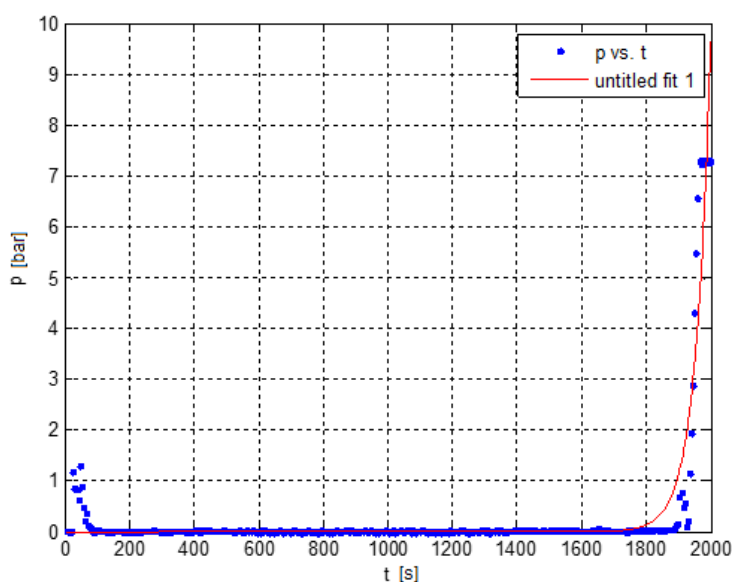
Ahogy az a táblázatban látható a gázmintához mindenképpen kevertem rétegvizet, azonban gazolint nem minden esetben adagoltam. Az inhibitor adagolás függvényében beszélhetünk vak vagy mintás mérésről. Az inhibitor nélküli mérések az alapértelmezett mérések, hiszen ebből tudjuk megállapítani, hogy az adott gázminta milyen hőmérsékleten fog hidratódni, továbbá referenciaként is szolgál a későbbi inhibitoros mérésekhez. A méréseket mindig megelőzi egy előkészületi fázis, amikor a

működéshez szükséges alapvető beállításokat elvégezzük. Ekkor például levegőt biztosítunk a rendszer számára, illetve a szelepek beállítását követően kilevegőztetjük azt. Feltöltjük a termosztátot hűtőfolyadékkal, illetve bekapcsoljuk a termosztát hűtés-keringetés funkcióját, valamint elindítjuk a számítógépes mérőprogramot. A mérés során beállítjuk a szelepeket. Attól függően, hogy inhibitor vagy inhibitor nélküli mérést végzünk, kell beállítani az inhibitor beadagolásának engedélyezésére szolgáló szelepet. Az inhibitor beadagolásáról a SZIV-02 adagolószivattyú gondoskodik, ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a gázolin adagolását is ez az eszköz végzi. Vagyis abban az esetben, ha mind inhibitor, mind pedig gázolin kerül adagolásra, azaz a valósághű mintás mérés esetén az adagolószivattyú tulajdonképpen egy elegyet juttat a gázmintához. A szelepek beállítását követően beállítjuk az inhibitor, illetve gázolin adagolószivattyú nyomását, megnyitjuk a gázmintát tartalmazó gázpalackot úgy, hogy a rendszernyomást beállítjuk a nyomásszabályozószelep segítségével. Ezt követően beállítjuk az áramlási sebességet, illetve elindítjuk a rétegvíz és az inhibitor adagoló pumpákat. A mérés addig tart, amíg a hidrát ki nem alakul. A hidrát kialakulásának folyamatára láthatunk példát a 17. ábrán. Az öt egymást követő kép (balról jobbra, fentről lefelé) egymást követő 5 időpillanatban készült. Látható, ahogy a hidrát szemcsék növekednek. A képeket a látóüveges cellán keresztül készítettük kamera segítségével. [S9], [S11]



17. ábra Hidrátszemcsék kialakulása

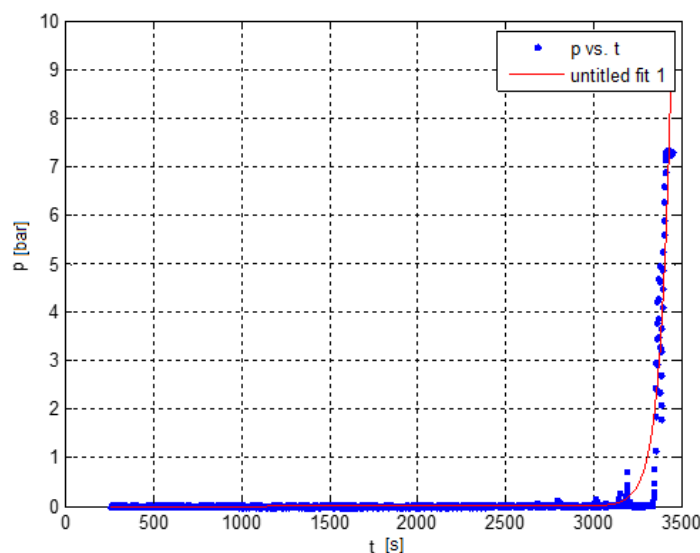
A hidrát kialakulását a nyomáskülönbség távadó által mért érték ugrásszerű megnövekedéséből láthatjuk. Ekkor értelemszerűen leállítjuk a mérőrendszert a protokollnak megfelelően. A mérés során a két nyomáskülönbség távadó által mért értéken kívül több nyomásértéket, több hőmérsékletértéket, valamint az áramlás sebességértékét is rögzíti a rendszer, illetve természetesen időbélyeggel látja el az adatsorokat. Mivel számomra a nyomáskülönbség a legfontosabb adat, így azt jelenítem meg az idő függvényében, ahogy azt a 18. ábrán is láthatjuk. A grafikonon egy vak mérés eredményét dolgoztam fel. A mérés során a gázmintához csak rétegvizet adagoltam.



18. ábra Vak mérés

A grafikon MatLab szoftverrel készült. Kék pontokkal jelöltük az eredeti adatpontokat és pirossal látható a pontokra illesztett görbe. A görbeillesztést a curve fitting algoritmus segítségével végeztem el. A grafikonon vízszintesen az időt ($t[s]$), illetve függőlegesen a nyomáskülönbség távadó által mért nyomást ($p[\text{bar}]$) ábrázoltam. A nyomáskülönbség távadó mérési tartománya 0-7 bar. Jól látható, hogy az inhibitor nélküli mérésnél a hidratosodás 30 perc (1800s) elteltével kezdődik, amely rövid idő alatt kialakul. A 19. ábrán egy mintás mérést láthatunk, vagyis ebben az esetben a gázmintához a rétegvízen kívül inhibitort is adagoltam. Az ábra hasonló az előző vak mérésről készülthöz,

azzal a különbséggel, hogy itt a hidrátképződés jóval később következik be. Itt a hidrátosodás ugyanis 55 perc (3300s) elteltével kezdődik meg, amely rövid idő alatt itt is kialakul. [S12], [S13]



19. ábra Mintás mérés

Munkám során a 6. táblázatba foglalt méréseket végeztük el, egyenlő arányban, különböző gázok és inhibitorok felhasználásával. Közel 150 mérés összesen több mint 15000 adatpontjának felhasználásával készítettem több, egymástól független adatkészletet, amelyek segítségével a későbbiekben a neurális hálózat betanítható. A kiválasztott, nyers adatok előfeldolgozáson estek át. Az előfeldolgozást SciLab szoftver segítségével valósítottam meg. A [82] irodalomnak megfelelően az előfeldolgozás széles skálán mozoghat az egyszerű transzformációtól egy bonyolult algoritmusig. Esetünkben a nyers adatok először is szűrésen estek át, ahol csökkentettem a mérési hibából eredő eltéréseket. Ezt egy alul-áteresztő, vagyis felül vágó szűrő segítségével valósítottam meg, amely eljárással a hibák jelről való leválasztása megtörtént. Ezt követően az adatok normalizálását végeztem el. A normalizálás az előfeldolgozás egyik legelterjedtebb formája, ahol a bemeneti adatokat lineárisan skálázzuk. Ez különösen abban az esetben fontos, ha a bemeneti adatok eltérő jellegűek és értékeik akár több nagyságrendben különbözhetnek egymástól. Fontos azonban megjegyezni, hogy a normalizálást akkor is el kell végezni, amennyiben a bemeneti adatok azonos nagyságrendűek, de a bemeneti értéktartomány nem megfelelő. A

bemeneti adatok normalizálásakor valamennyi összetevő minimális, illetve maximális értékét úgy választjuk meg, hogy az a neurális hálózatok értékkészletét, valamint értelmezési tartományát fedje. Ez az intervallum tipikusan $[0; 1]$ valamint $[-1; 1]$. Esetemben a $[0; 1]$ intervallumot választottam a normalizáláshoz, amely esetén az alábbi lineáris transzformáció alkalmazása szükséges:

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (24)$$

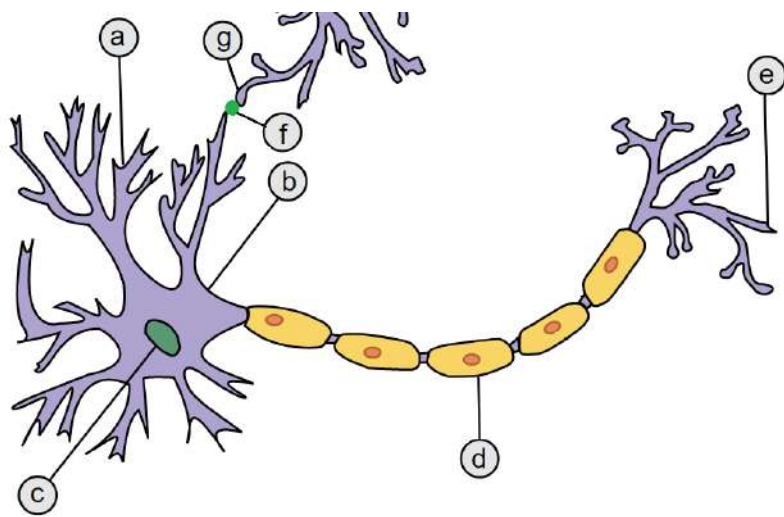
A [83] és [84] irodalom a $[0; 1]$ intervallumot egy ennél szűkebb $[0,1; 0,9]$ intervallumra cseréli, amely jobb konvergenciát biztosít. Ezen szűkebb intervallum esetén az alábbi lineáris transzformáció alkalmazása szükséges:

$$y_i = 0,1 + (x_i - x_{\min}) \frac{0,9 - 0,1}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (25)$$

A (24). és (25). egyenleteknél az y_i a 0 és 1, illetve a 0,1 és 0,9 közötti tartományban keresett új érték, x_i az eredeti tartományban levő skálázandó érték az i . pontban, $x_{\min}$ az eredeti mintakészlet legkisebb értéke, $x_{\max}$ az eredeti mintakészlet legnagyobb értéke. [85] (M8. ábrák)

5.3. NEURÁLIS HÁLÓZATOK

Az idegtudomány (neuroscience) az a tudomány, amely elsősorban az idegrendszer felépítésével és működésével foglalkozik, ezen belül is kiemelten foglalkozik az agy sajátosságaival. A 20. ábrán egy neuront, vagy más néven idegsejtet láthatunk. A [86] irodalomnak megfelelően az ábrán láthatjuk, hogy a neuronok sejttestből (b), vagy más néven szómából és sejttagból (c) állnak. A sejttestből több dendrit (a) és egy axon (d) ágazik el. A dendritek rövidebbek, míg az axon hosszabb, így az jóval messzebbre is képes elnyúlni. Az axon végén elágazások találhatóak, amelyet axonvégeknek (e) nevezünk. A neuronok egymáshoz úgynevezett szinapszisokkal (f) csatlakoznak. Az ábrán látható, ahogy a neuron dendritje (a) egy másik távoli neuron axon végéhez (g) csatlakozik.



20. ábra Idegsejt [87]

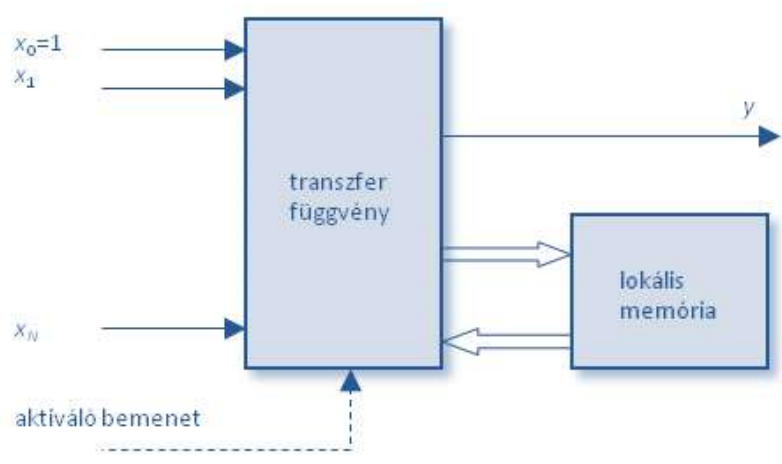
A neuron akár százezer szinapszissal is rendelkezhet, amelyek összetett elektrokémiai reakcióval juttatják a jeleket egyik neuronról a másikra. Ezen jelek rövidtávon az agyi aktivitásért, hosszútávon pedig a neuron helyzetéért és kapcsolódási rendszeréért felelősek. Ez a komplex mechanizmus az alapja az agyi tanulásnak. A neuronok és a szinapszisok egyszerre aktívak, így az agy meglehetősen gyors feladatmegoldásra képes, amellyel a korszerű processzorok sem tudják felvenni a versenyt, mert annak ellenére, hogy lényegesen nagyobb számítási sebességgel, vagy tárolási kapacitással rendelkeznek, a párhuzamosságot napjainkban is maximum néhány száz processzor esetén valósítják meg. Ez a működés inspirálta a neurális hálózatok megalkotását is. Warren McCulloch és Walter Pitts már 1943-ban javasolt egy mesterséges neuron modellt, amelyben a neuronok kétállapotúak, és az állapotok közötti váltást a szomszédos neuronok stimulálják. Kísérleteikből kimutatták, hogy az összekapcsolt neuronhálózat alkalmas arra, hogy minden kiszámítható függvényt előállítsanak. A [88] irodalomban a szerző az alábbiak szerint írja le a mesterséges neurális hálózatokat:

„A neurális hálózat nem más, mint egymással összekötött neuronok összessége. A neuron (idegsejt) egy információ feldolgozó egység, a neurális hálózat alapegysége. A legegyszerűbb neurális hálózat egyetlen neuronból áll.”

A [82] irodalom alapján a neurális hálózat párhuzamos, elosztott működésre alkalmas információfeldolgozó eszköz, amely megvalósítás alapján lehet szoftver vagy hardver, és az alábbi fontosabb tulajdonságokkal rendelkezik:

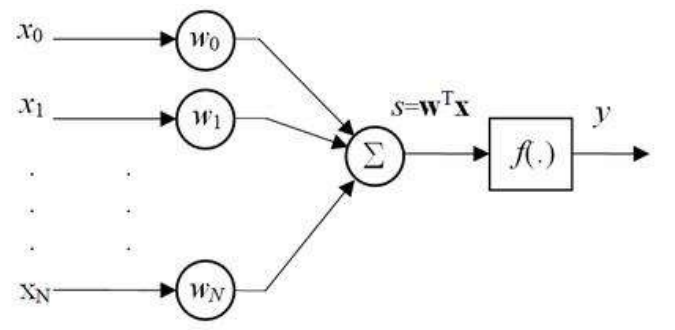
- Rendezett topológiájú neuronok összekapcsolt rendszeréből áll. A neuronok helyi feldolgozást végző műveleti elemek, amelyek többnyire azonos, vagy legalább hasonló típusúak.
- Tanulási algoritmussal rendelkeznek, amely meghatározza az információfeldolgozás módját.
- Előhívási algoritmussal rendelkeznek, amellyel a megtanult információ felhasználható.

A neurális hálózat alapvető eleme a neuron, amely több bemenettel és egyetlen kimenettel rendelkezik, feladata a bemenetek és a kimenet közti leképezés. Ahogy az a [82] irodalomban is olvasható, helyi memóriája is lehet ezen processzáló elemeknek, amelyek alkalmasak állapotinformáció, valamint be- és kimeneti értékek tárolására. A kimeneti értéket a transzfer függvény segítségével hozza létre, amely tipikusan nemlineáris. A neuronokat szokás még csomópontnak, vagy feldolgozó elemnek nevezni, míg a transzfer függvényre gyakran aktiváló vagy aktivációs függvényként hivatkoznak az irodalmak.



21. ábra Neuron elvi felépítése [82]

A neuron elvi felépítését a 21. ábrán láthatjuk. Ahogy azt az ábra is szemlélteti változó vagy állandó érték is kerülhet a neuron bemenetére. A változó bemenet lehet egy hálózati bemenet, vagy akár egy másik neuron kimeneti értéke. Az ábrán látható aktiváló bemenet a hálózat ütemezését vezérelő diszkrét idejű működésnél. A 22. ábrán a neuron matematikai modelljét láthatjuk. Ezt a leginkább elterjedt, memória nélküli egyenrangú bemenetekkel rendelkező neuront a [89] irodalom szerint Frank Rosenblatt perceptron, míg a [90] irodalom szerint Bernard Widrow adaline néven használja. A két irodalomban leírt modell az alkalmazott tanítási eljárást leszámítva azonos.



22. ábra Neuron matematikai modell [91]

A neurális hálózatokban a neuronokat irányított kapcsolatok, vagy úgynevezett linkek kötik össze, amit a fenti ábra jól szemléltet. A bemeneti oldalt tekintve, az x_i skalár bemenetek, ahol $i=0...N$. Az egyes bemenetekhez numerikus súlyt rendelnek, amelyek az erősséget, valamint előjelet határozzák meg. A w_i az i bemenet súlya, ahol $i=0..N$. Fontos, abban az esetben, ha x_0 egy rögzített értékű bemenet, akkor w_0 az eltolás súlya. A 0. eltolás bemenet célja a hálózat konvergenciájának felgyorsítása a kezdőértékadással. A bemeneti kapcsolatok felhasználásával a bemeneti függvényt, vagyis a neuron bemeneteinek súlyozott összegét, az alábbiak szerint lehet kiszámítani:

$$s = \sum_{i=0}^N w_i \cdot x_i = \mathbf{w}^T \cdot \mathbf{x} \quad (26)$$

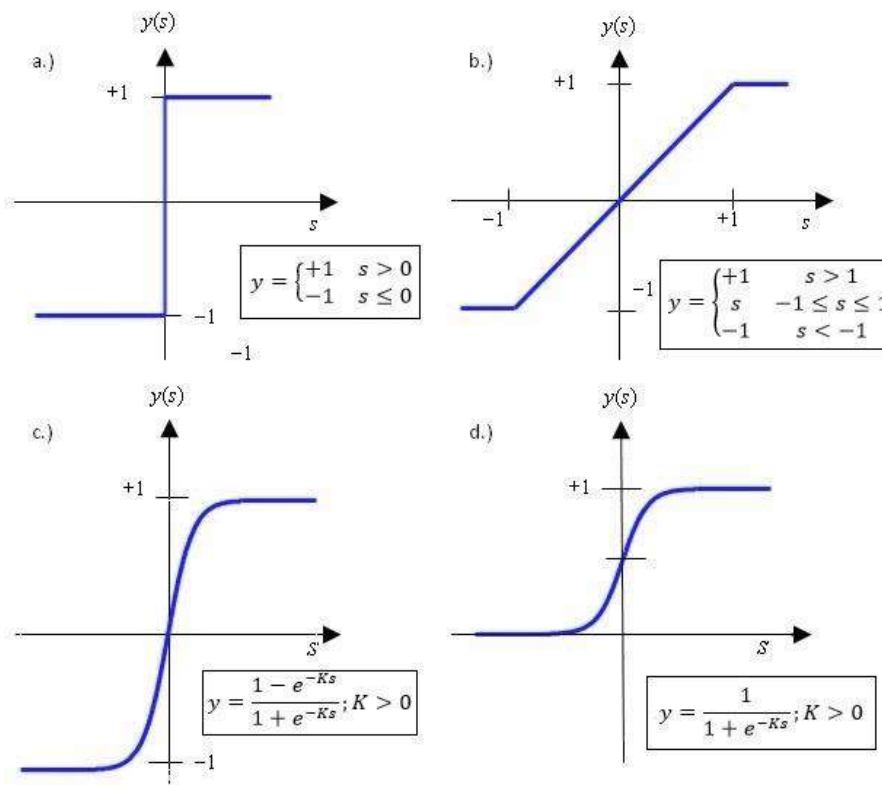
A bemeneti függvényt felhasználva, illetve alkalmazva az f aktivációs függvényt, a kimenetet is megkapjuk:

$$y = f(s) = f\left(\sum_{i=0}^N w_i \cdot x_i\right) \quad (27)$$

Ahogy azt a (27). egyenlet mutatja a bemeneti jelek súlyozott összege, amelyet szokás ingernek is nevezni azonos a kimeneti jellel, amit válasznak, vagy aktivációnak is neveznek. Abban az esetben, ha eltolást is alkalmazunk az egyenlet az alábbiak szerint módosul:

$$y = f(s) = f\left(w_0 + \sum_{i=0}^N w_i \cdot x_i\right) \quad (28)$$

Fontos, hogy az aktivációs függvénynek nemlineáris függvénynek kell lennie, ellenkező esetben neurális hálózatunk egy egyszerű lineáris leképzéssé alakul át [92], [93].



23. ábra Tipikus nemlineáris függvények [82]

A 23. ábrán a nemlineáris aktivációs függvényre kapunk példákat. Az egyik gyakran használt függvény a küszöbfüggvény jellegű leképzés. Ezen függvények értelmezési tartománya a valós számok halmaza, míg az

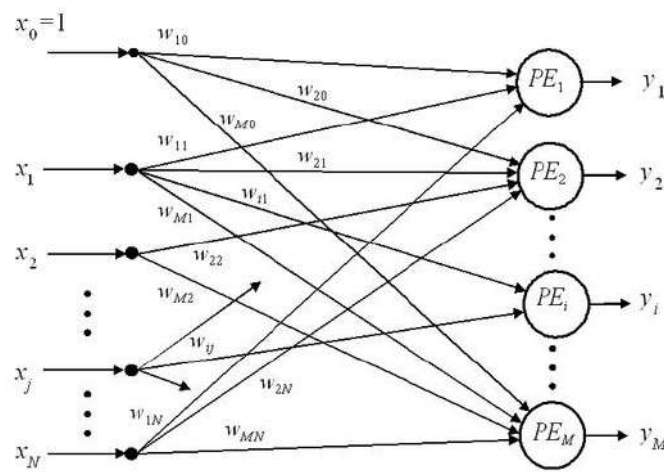
értékkészlete korlátos részhalmaza a valós számoknak. A küszöbfüggvény lehet például lépcsős, vagy más néven ugrásfüggvény (a), illetve telítéses lineáris függvény (b). A másik gyakran használt nemlineáris függvénytípusok a szigmoid függvények, amelyek folytonosan, monoton növekvő, telítődő jellegű leképezések. A szigmoid függvény lehet például a tangens-hiperbolikus függvény (c; $K=2$ -nél), vagy a logisztikus függvény (d). A szigmoid függvény nagy előnye, hogy differenciálható, amely tulajdonság meglehetősen fontos a súlytanulási algoritmus szempontjából. A neuronok összeköttetési rendszerét, illetve a hálózat be- és kimeneteinek helyét együttesen hálózati topológiának nevezzük, amelyet gráffal szokás leírni a [82] irodalomnak megfelelően. A gráfon belül a csomópontokat a neuronok, a be- és kimenetek közötti kapcsolatokat pedig a gráfélek reprezentálják. Az egyes gráfélekhez súlytényezők rendelhetők. A gráfon belül az egyes csomópontok nincsenek kapcsolatban az összes többi csomópont egész halmazával, csak egy részhalmazával, amely tulajdonság alapján a neuronok az alábbiak szerint csoportosíthatók:

- Bemeneti neuronok
- Kimeneti neuronok
- Rejtett neuronok

A bemeneti neuronok bemenete egyben a hálózat bemenete is, míg a kimenete egy másik neuron bemenete. Ez a típus különbözik a másik kettőtől, ugyanis ezek puffer jellegűek, amelyeknek jelfeldolgozó feladatuk nincs, feladatuk csak a hálózat bemeneteinek a következő réteg bemeneteihez való eljuttatása. A kimeneti neuronoknak ezzel szemben típus tekintetében nem különböznek a többi neurontól, viszont azok kimenete a hálózat kimenete is egyben, vagyis közvetlenül a környezet felé továbbítja az információt. Végül a rejtett neuronok, amelyek mind a ki-, mind pedig a bemeneteikkel szigorúan másik neuronhoz csatlakozhatnak. A hálózaton belül a neuronokat rétegekbe szokás rendezni, ahol a hasonló típusú neuronok azonos rétegbe kerülnek. Természetesen az azonos rétegbe szervezett neuronok kapcsolatai is hasonlóak, vagyis ez alapján beszélhetünk:

- a bemeneti rétegről, amely réteg bemenetei egyben a teljes neurális hálózat bemenetei, a kimenetei pedig egy másik réteg bemeneteihez csatlakoznak,
- a kimeneti rétegről, amely réteg kimenetei egyben a teljes hálózat kimenetei is, a bemeneteit pedig egy másik réteg kimenetei képzik, végül pedig
- a rejtett rétegről, amely a bemeneteit egy másik réteg kimenetei képzik, a kimenetei pedig egy másik réteg bemeneteihez csatlakoznak.

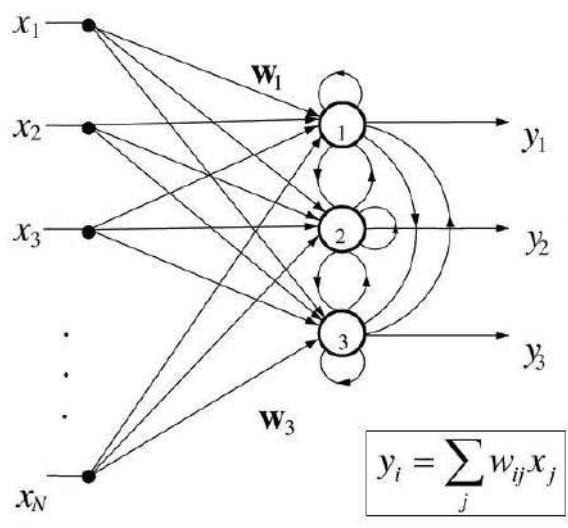
A rétegekbe szervezett hálózatnak minimum két réteggel kell rendelkezni, amelyből az egyik természetesen egy információfeldolgozást nem végző bemeneti réteg, illetve egy kimeneti réteg. A két réteg között elméletileg szabadon választható számú rejtett réteg elhelyezése lehetséges. A rétegek mennyiségét rétegszámmal szokás megadni, ami a processzáló rétegek száma. A struktúra szempontjából alapvetően két típust különböztetünk meg, ezek az előrecsatolt és a visszacsatolt hálózatok. Az előrecsatolt, vagy más néven hurokmentes hálózatokra az a jellemző, hogy maguk a súlyok a belső állapot, vagyis a pillanatnyi bemenet függvényét reprezentálják.



24. ábra Előrecsatolt hálózat [82]

A 24. ábrán láthatunk példát egy egyszerű egyrétegű előrecsatolt hálózatra. Ezzel szemben a visszacsatolt, vagy más néven a rekurrens hálózat esetén, az aktivációs szintek dinamikus rendszert alkotnak, állapota elérheti a

stabilitást, de oszcilláció vagy akár kaotikus állapotokat is felvehet, továbbá a hálózat válasza egy adott bemenetre függ a kezdeti állapottól. Mindezen tulajdonságai annak tulajdoníthatók, hogy a kimeneteit visszacsatolja a bemeneteire. A 25. ábrán láthatunk példát egy egyrétegű visszacsatolt hálózatra.

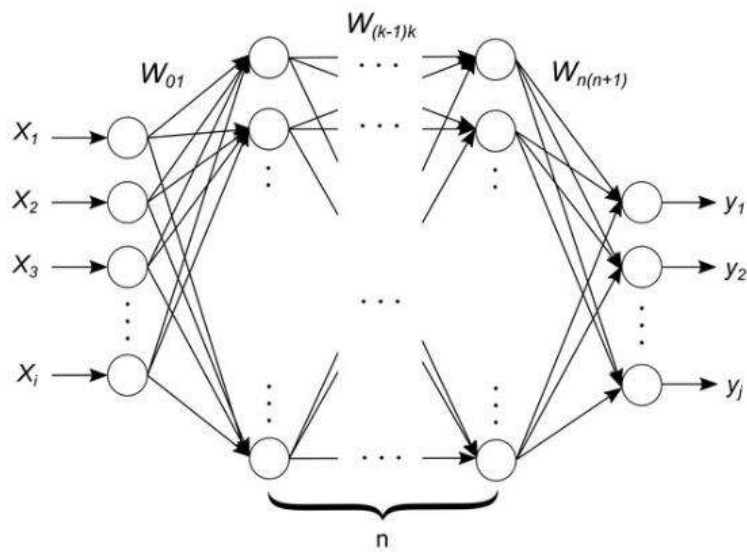


25. ábra Visszacsatolt hálózat [91]

A visszacsatolt hálózatok esetén beszélhetünk globális és lokális visszacsatolásról is. Lokális visszacsatolás esetén további három esetről beszélhetünk. A legegyszerűbb az elemi visszacsatolás, amely esetben a neuron kimenete saját bemenetére van visszacsatolva. A másik eset az úgynevezett laterális visszacsatolás, amely esetben a neuron kimenete egy rétegen belüli neuron bemenetére van visszacsatolva. Erre a két esetre a 25. ábrán több példát is láthatunk. A harmadik eset a rétegek közötti visszacsatolás, amely esetben egy neuron kimenete, egy másik réteg neuronjának bemenetére van visszacsatolva.

Az eddigiekből láthattuk a neurális hálózatok alapvető felépítését. Fontos azonban kiemelni, hogy a többrétegű perceptron (MPL – Multi Layer Perceptron) a leginkább elterjedt, legismertebb hálózat. A többrétegű hálózat egy bemeneti rétegből, egy kimeneti rétegből és elméletileg tetszőleges számú rejtett rétegből áll. A 26. ábrán láthatunk egy példát egy n darab rejtett hálózatot tartalmazó neurális hálózatra. Ahogy az az ábrán

is látható, az előrecsatolt hálózaton a bemeneti jel előrefele halad rétegről rétegre, végül a kimeneti rétegen megkapjuk a kimeneti jelet.



26. ábra n rétegű perceptron [88]

A többrétegű neurális hálózat tanítsa a [88] referencia alapján az alábbi pontokba szedhető:

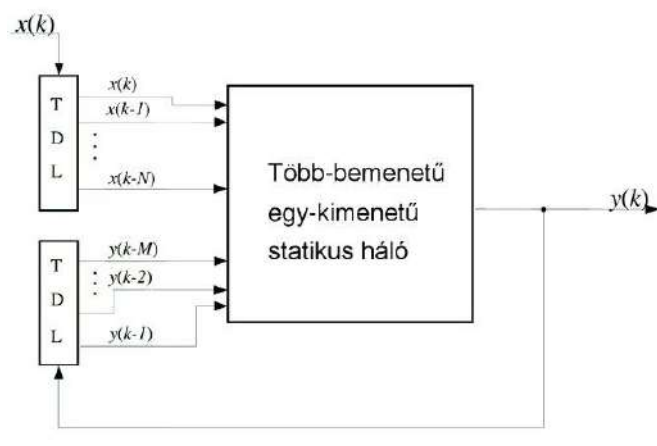
- a kezdeti súlyok megadása,
- a tanító pont végig küldése a teljes neurális hálózaton a súlyok változtatása nélkül,
- a kapott kimeneti jel és a tényleges kimeneti jel összehasonlítása,
- kapott hibát visszaáramoltatjuk a neurális hálózaton, és a súlyokat a hiba csökkentéséhez megváltoztatjuk.

Általában nem érhető el a hiba teljes kiküszöbölése, és mivel a tanító algoritmus hosszú futása is problémát okoz, így a megállítási szabályra különösen oda kell figyelni. A tanításra többféle megoldást dolgoztak ki, amelyet az adott feladatra kell kiválasztani. Ilyen módszer a konjugált gradiens módszer, amelynek több variánsa létezik például a Fletcher-Reeves-formula, vagy a Polak-Ribière-formula. A Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno-formula a leggyakrabban használt a kvázi Newton módszerek közül, de gyakran használják a Levenberg-Marquardt-eljárást

is. A statikus hálózatok mellett fontos megemlíteni a dinamikus hálózatokat is, mivel a statikus hálózat gyakran nem megfelelő egyes feladatok megoldására, ilyenek például azon feladatok, amelyek időfüggők, vagyis a bemeneti jel és a kimeneti jel közti kapcsolat az adatok sorrendjétől is függ. Ezek alapvetően olyan irányítási, előrejelzési feladatok, ahol egy folyamat korábbi viselkedésének ismeretében a jövőbeli viselkedését próbálunk megbecsülni. Ezen időfüggő rendszerek alapvetően nemlineáris dinamikus viselkedést mutatnak, így rendszermodelljük a [88] referencia alapján az alábbi struktúra-osztályokba sorolható:

- NFIR modell, amely esetén a korábbi bemeneteket tartalmazza csupán a regresszor. Ezen előrecsatolt modellek a bemeneteik korábbi értékeinek tárolására használják a memóriát.
- NARX modell, amely esetén mind a korábbi bemeneteket, mind a korábbi rendszer kimeneteket magába foglalja a regresszor. Ez a modell meglehetősen elterjedt, amely a nemlineáris megfelelője a lineáris külső gerjesztésű autoregresszív modellnek. Előrecsatolt modell, annak ellenére, hogy a korábbi kimeneti értékei is szerepelnek a bemenetein.
- NOE modell, amely esetén a korábbi be- és kimeneteket is tartalmazza a regresszor. Ez a rendszer már valóban egy visszacsatolt hálózat, mivel a kimenet korábbi értékei is felhasználásra kerülnek a kimenet pillanatnyi értékének meghatározásához.
- NARMAX modell, amely a NARX modell bővített változata, ahol a modellezési hiba korábbi értékeit is tartalmazza a regresszor. Ez a modell is valódi visszacsatolt hálózat, annak dacára, hogy a modell korábbi kimeneti értékei bementként nem szerepelnek.
- NBJ modell, a NOE-hez hasonló, de felhasználja kétfajta hiba korábbi értékeit is.

Egy általános időfüggő hálózatot láthatunk a 27. ábrán, amely többdimenziós bemenettel és egydimenziós kimenettel rendelkezik.



27. ábra Időfüggő hálózat [91]

Egy triviális módja az időfüggés kialakításának az, ha a hálózati bemenetek számát megnövelem, illetve a tényleges be-, valamint kimenetek jelét késleltetve adjuk a bemenetekre egy úgynevezett TDL, vagyis késleltető láncon keresztül. Az ábrán egy NOE modell struktúráját láthatjuk, de fontos megjegyezni, hogy ez egy olyan alapfelépítés, amelyből kis átalakítással a többi modell is könnyen származtatható. [94], [95]

5.4. A DETEKTÁLÓ RENDSZER

Közel 150 mérés összesen több mint 15000 adatpontjának felhasználásával készítettem a hálózat tanításához, több egymástól független adatkészletet. A kiválasztott, nyers adatok skálázáson, normalizáláson estek át, amit egy korábbi alfejezetben már tárgyaltam [96]. Az adatkészletek kialakítása nagyon fontos, mivel erősen befolyásolja az eredményességet. Az eredményekből három adatkészletet hoztam létre, amelyek a tanító, a validáló, valamint a tesztelő készletek, amelyek segítségével a későbbiekben a rendszert betanítottam. A tanító és validáló készletet használtam fel a hálózat tanítási eljárása során [97]. A tanító mintákat a tényleges tanítás során használok fel, míg a validáló mintakészleten a hálózat általánosító-képességét mérhetem. A tanítókészletbe nem tartozó tesztkészlet segítségével ellenőrizhetem a neurális hálózat eredményességét. A három adatkészlet paramétereit a 7. táblázat foglalja össze [98], [99].

7. táblázat Az adathalmaz alap paraméterei

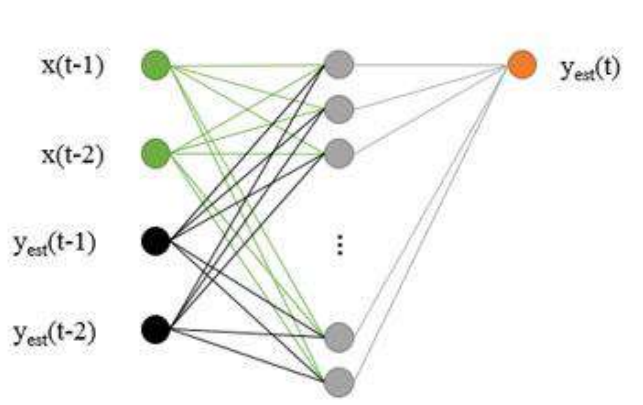
Adatkészlet	Mérések száma [db]	Adatpontok száma [db]
Tanító adatkészlet	78	7722
Validáló adatkészlet	36	3204
Teszt adatkészlet	30	3240

Munkám során, egy pontos, stabil neurális hálózat alapú struktúra kialakítása volt a cél, amelyhez több hálózati struktúra is megvizsgálásra került. Végül a NNOE (Neural Network Output Error) és a NNARX (Neural Network AutoRegressive with eXogenous inputs) struktúrákat választottam ki.

A NNOE egy valós visszacsatolást tartalmazó hálózat. A hálózat átviteli függvénye:

$$y_{est}(t) = f[x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n_i), y_{est}(t-1), \dots, y_{est}(t-n_o)] \quad (28)$$

Ahol $y_{est}(t)$ – a hálózat kimenete t időpillanatban, $x(t-1)$ – a hálózat bemenete a $t-1$ időpillanatban, $y_{est}(t-1)$ – a hálózat kimenete a $t-1$ időpillanatban, n_i – a bemeneti késleltető láncok (TDL) száma és n_o – a kimeneti késleltető láncok (TDL) száma. A NNOE hálózatra egy példát a 28. ábrán láthatunk.

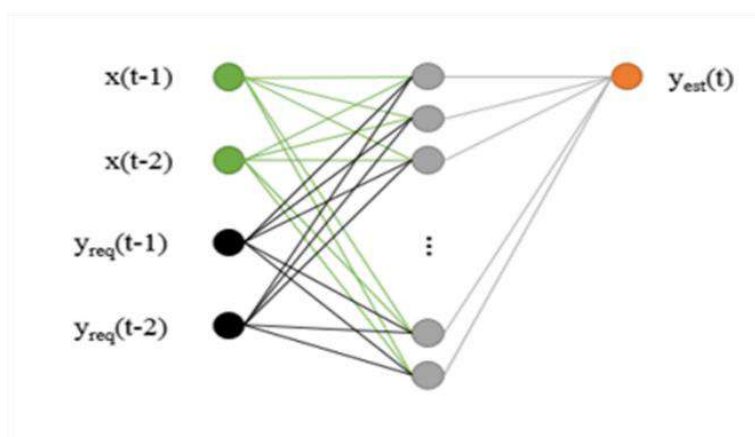


28. ábra NNOE modell

A NNARX a bementén a megkívánt kimenet időben korábbi értékeit használja fel. A hálózat átviteli függvénye:

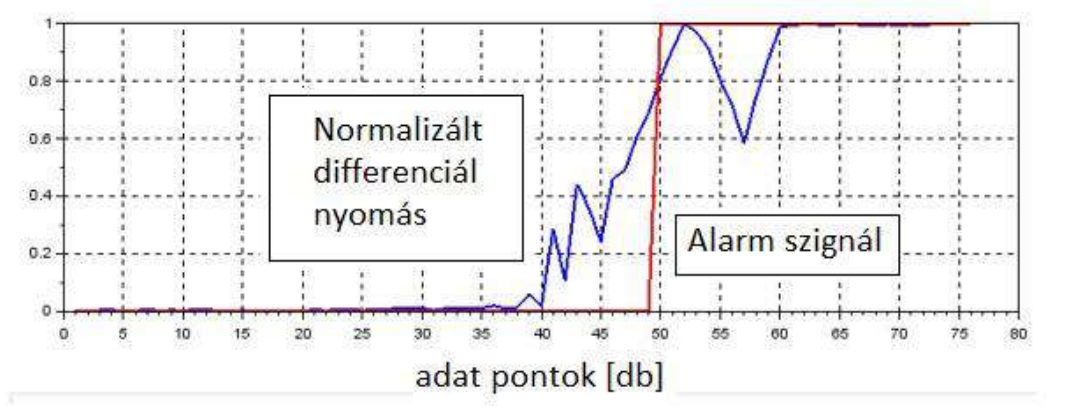
$$y_{est}(t) = f[x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n_i), y_{req}(t-1), \dots, y_{req}(t-n_{ro})] \quad (28)$$

Ahol $y_{est}(t)$ – a hálózat kimenete t időpillanatban, $x(t-1)$ – a hálózat bemenete a $t-1$ időpillanatban, $y_{req}(t-1)$ – megkívánt kimenet a hálózattól a $t-1$ időpontban, n_i – a bemeneti késleltető láncok száma és n_{ro} – a kimeneti késleltető láncok száma. A NNARX hálózatot a 29. ábrán láthatjuk. [S7]



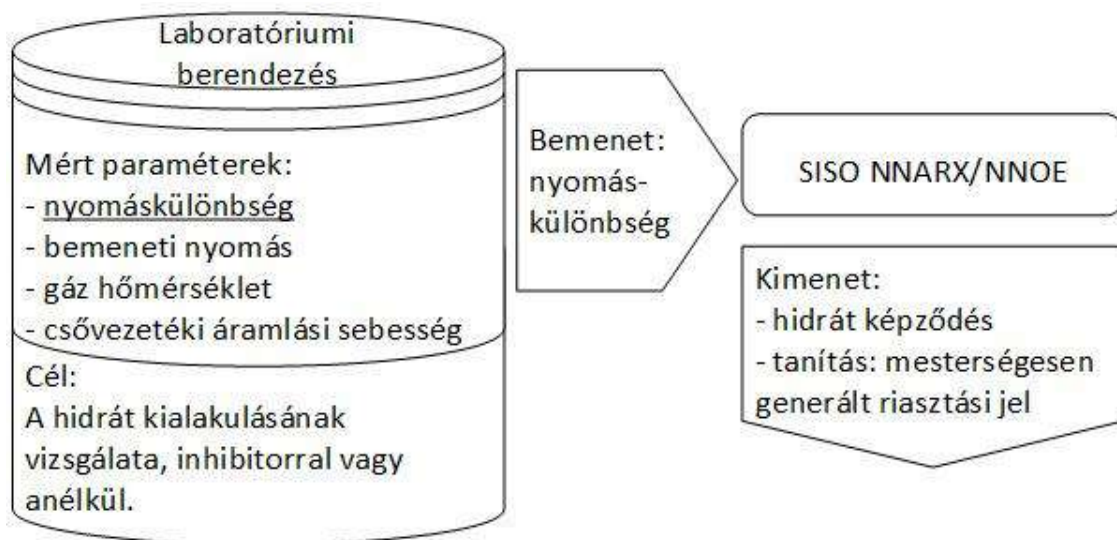
29. ábra NNARX modell

A kimeneteken mesterségesen előállított riasztási mintákat hoztam létre a maximális érték 75%-a és 99%-a között. Tapasztalataim alapján a 75%-os lett megfelelő. Ennek felhasználásával a kimenetek előállíthatók és felhasználhatók a tanításhoz. A riasztási szint beállítását a 30. ábrán láthatjuk. (M9. ábrák)



30. ábra Riasztási szint – 75%

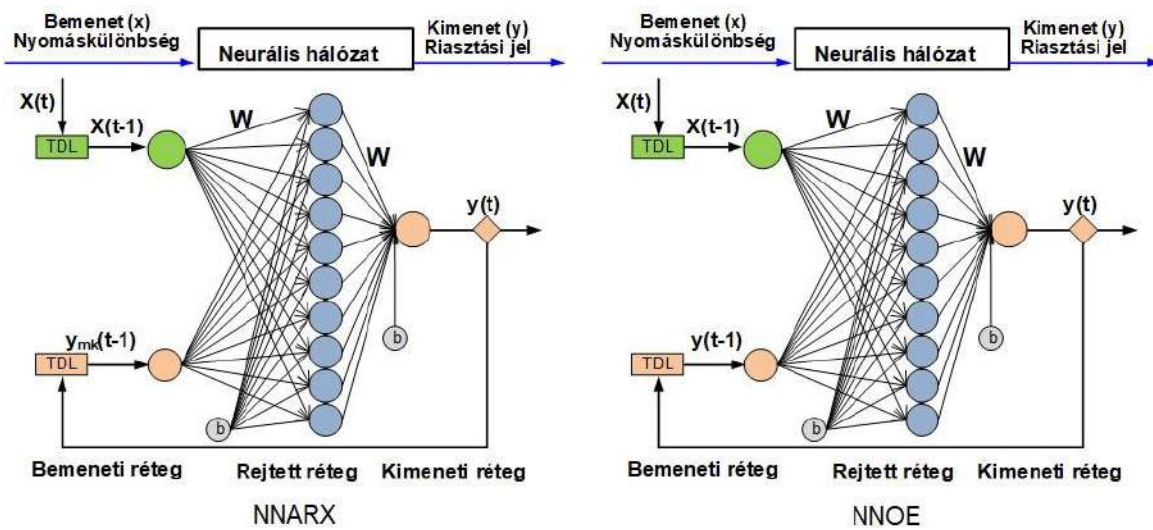
A rendszerről készült összesítőt a 31. ábrán láthatjuk, ahol jól elkülönülnek a méréseim során rögzített adatok, és a felhasznált bemeneti és kimeneti adatok [S6].



31. ábra Rendszerösszesítő

Összegezve tehát, méréseimet egy hidrátvizsgáló laboratóriumi berendezés segítségével végeztem el, amely berendezés elsődleges célja a hidrát kialakulásának vizsgálata volt, amely vizsgálatok inhibitor hozzáadásával és hozzáadása nélkül is elvégeztem. A mérések során négy paramétert is rögzítettem, azonban a neurális hálózatok tanításakor csak egy paramétert a nyomáskülönbséget használtam fel bementként. Ennek az az oka, hogy a hidrát kialakulása a nyomás változásából megállapítható. Kimenatként egy mesterségesen előállított riasztási jelet használtam a tanítás során. A kimenet a hidrát kialakulása. Munkám során a korábban bemutatott NNOE (Neural Network Output Error) és NNARX (Neural Network Autoregressive with eXogenous inputs) hálózatok is betanításra kerültek azonos adathalmazzal.

A NNOE és NNARX hálózatok struktúrája látható a 32. ábrán. Az ábrán jól elkülönülnek a bementi, a rejtett és a kimeneti rétegek [S6].



32. ábra Neurális hálózatok

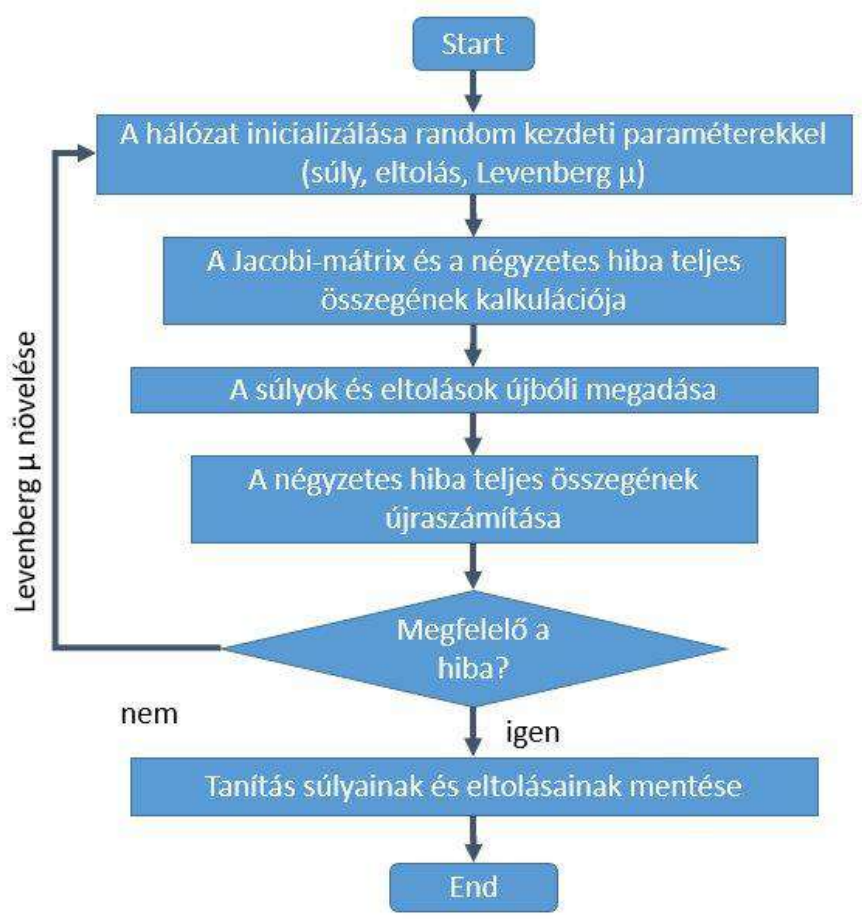
Ahol $y(t)$ – a hálózat kimenete t időpillanatban, $y(t-1)$ a hálózat kimenete $t-1$ időpillanatban, $x(t)$ – a hálózat bemenete t időpillanatban, $x(t-1)$ – a hálózat bemenete a $t-1$ időpillanatban, $y_{mk}(t-1)$ – megkívánt kimenet a hálózattól a $t-1$ időpontban, TDL – a késleltető láncok, W – súlymátrix és b – az eltolósúly-vektor [S6].

A 8. táblázat összesíti a két neurális hálózat legfontosabb paramétereit.

8. táblázat A hálózatok legfontosabb paramétereit

	NNARX	NNOE
Struktúra	1-N-1	1-N-1
Rejtett hálózat [db]	1	1
Bemenetek száma [db]	1	1
Neuronok száma [db]	10, 12, 14, 16	10, 12, 14, 16
Bementi késleltető láncok száma [db]	1, 2	1,2
Kimenti késleltető láncok száma [db]	1, 2	1, 2
Adathalmazok [db]	144	144
Adatpontok száma [db]	~100	~100
Max. iteráció [db]	1000	1000
Betanítási idő [h]	~1,1	~1,0

A neurális hálózatok tanítását a kezdeti paraméterek erősen befolyásolják, így a hálózat kezdeti súlya és az egyes neuronok eltolás értéke. A kezdeti értékek beállítására nincs matematikai leírás, azok megfelelő megválasztását csak ökölszabályok segítik. Esetemben a Levenberg–Marquardt eljárás használtam, amelynek folyamatábráját a 33. ábrán láthatjuk.



33. ábra Levenberg–Marquardt eljárás [88]

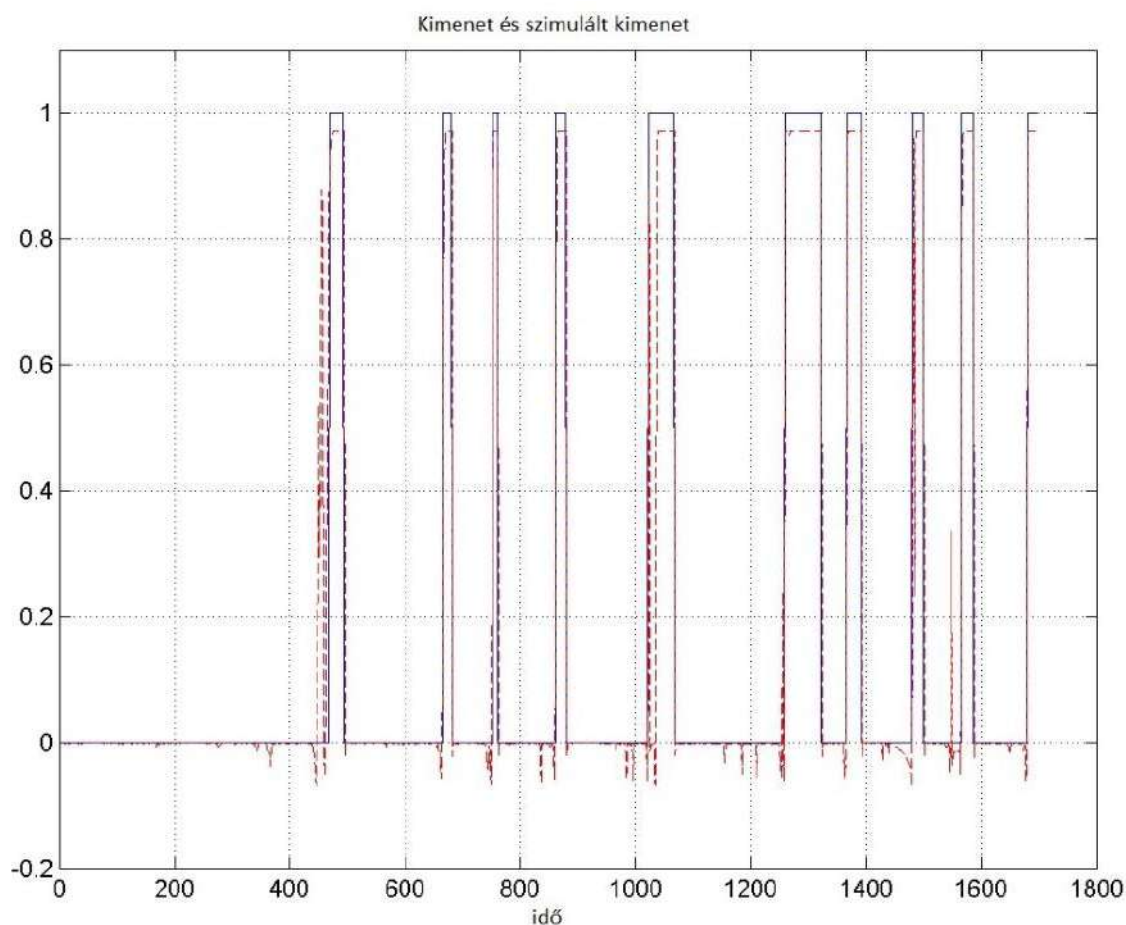
Több hálózatot is betanítottam, amely során a rejtett réteg neuronjainak száma, a korábbi bemenetek és kimenetek száma került változtatásra. Ahhoz hogy elkerüljem a túltanulást minden tanítás ott lett leállítva, ahol annak a kiértékelő készletre vett MSE értéke a legjobb volt, de maximum 1000. Az MSE (Mean Squared Error) a válasz helyességének természetes mértéke, a tanuló rendszer leképzése és a regressziós függvény kimenete közötti eltérés átlagos négyzetes értéke. A tanítással elért eredményeket az 9. táblázat foglalja magába [100], [101], [102].

9. táblázat Az eredmények összesítése

NN struktúra	Regresszor	Rejtett neuron [db]	Tanító adatkészlet		Validáló adatkészlet		Teszt adatkészlet	
			MSE	RE [%]	MSE	RE [%]	MSE	RE [%]
NARX	$n_i=1$ $n_{ro}=1$	10	0,0083	96,2	0,0065	100,0	0,0146	90,0
		12	0,0081	96,2	0,0064	100,0	0,0146	90,0
		14	0,0083	96,2	0,0142	90,0	0,0166	80,0
		16	0,0081	96,2	0,0143	90,0	0,0168	80,0
	$n_i=1$ $n_{ro}=2$	10	0,0209	73,1	0,0184	70,0	0,0227	70,0
		12	0,0202	73,1	0,0177	80,0	0,0203	90,0
		14	0,0358	69,2	0,0174	80,0	0,0211	80,0
		16	0,0361	69,2	0,0176	80,0	0,0214	80,0
	$n_i=2$ $n_{ro}=2$	10	0,0223	73,1	0,0186	90,0	0,0259	70,0
		12	0,0388	69,2	0,0350	50,0	0,0316	60,0
		14	0,0373	69,2	0,0347	50,0	0,0301	60,0
		16	0,0391	69,2	0,0382	50,0	0,0319	60,0
NOE	$n_i=1$ $n_o=1$	10	0,086	100,0	0,0062	100,0	0,0157	90,0
		12	0,058	96,2	0,0048	100,0	0,0127	90,0
		14	0,061	96,2	0,0111	90,0	0,0131	90,0
		16	0,056	96,2	0,0109	90,0	0,0122	90,0
	$n_i=1$ $n_o=2$	10	0,0284	76,9	0,0253	60,0	0,0326	60,0
		12	0,0265	65,4	0,0236	70,0	0,0278	50,0
		14	0,0251	65,4	0,0234	70,0	0,0270	50,0
		16	0,0273	76,9	0,0259	60,0	0,0319	60,0
	$n_i=2$ $n_o=2$	10	0,0269	69,2	0,0252	70,0	0,0183	60,0
		12	0,0347	53,8	0,0325	50,0	0,0321	30,0
		14	0,0362	53,8	0,0341	50,0	0,0319	30,0
		16	0,0342	53,8	0,0329	50,0	0,0311	30,0

Akkor jó a hálózat teljesítménye, ha az elvárt kimenetben és a hálózat tényleges kimenetében a lépcsőszerű ugrás fedi egymást. Erről az MSE nem ad érdemi információt. Ezért éldetektálással határoztam meg a

mintakészletekben fellelhető élek számát és összehasonlítottam azokat. Ha az élek fedték egymást, akkor mondható, hogy az adott riasztás időben történt. Az időben bekövetkező riasztásokból százalékos érték számítható (RE). Ezeket az értékeket is tartalmazza a táblázat. Ez alapján egy valódi visszacsatolást tartalmazó (NNOE), viszonylag kisméretű hálózat ($n_i=1$, $n_o=1$, rejtett neuronok száma 10) produkálta a legjobb eredményt. Ennek eredményét láthatjuk a 34. ábrán [103], [S3], [S8].



34. ábra Kimenet tesztelése

A grafikus feldolgozó egységek (GPU) felhasználásával a neurális hálózatok felgyorsíthatók. A GPU-alapú számítások a GPU architektúrák párhuzamosságának kihasználásával teszi lehetővé az intenzív számítástechnikai műveletek végrehajtását [104], [105].

5.5. ÖSSZEGZÉS

Részletesen tanulmányoztam és bemutattam egy dinamikus hidrátvizsgáló berendezést, amely maximum 60 bar nyomás és maximum 4 nl/min gáz áramlási sebesség mellett képes a hidrátosodás kialakulását vizsgálni. A tesztrendszerben a gáz-betáplálási oldalon a mintagázhoz rétegvizet és igény esetén hidrátgátló inhibitort is adagolhattam, amit aztán - a mérésre jellemző hőmérsékletű folyadék-termosztátba - helyezett vizsgáló csőszakaszon keresztül áramoltathattam. A berendezés megismerését követően elsajátítottam a berendezés működtetését az egyes mérési típusoknak megfelelően. Közel 150 mérést végeztem el, különböző gázminták és inhibitorok felhasználásával. Összesen több mint 15000 adatpontjának felhasználásával készítettem több egymástól független adatkészletet. A minták előfeldolgozáson estek keresztül, amit SciLab szoftver segítségével valósítottam meg. A nyers adatok először is szűrésen esnek át, ahol csökkentettem a mérési hibából eredő eltéréseket, amit egy alul-áteresztő szűrő segítségével valósítottam meg. Ezt követően az adatok normalizálását végeztem el. A normalizálás az előfeldolgozás egyik legelterjedtebb formája, ahol a bemeneti adatokat lineárisan skálázzuk. Ez különösen abban az esetben fontos, ha a bemeneti adatok eltérő jellegűek és értékeik akár több nagyságrendben különbözhetnek egymástól. A berendezés által elvégzett mérések adatait felhasználva több független adatkészletet generáltam. Kimenetként, mesterségesen előállított riasztási mintákat hoztam létre. Riasztás ott volt, ahol nyomásérték eléri annak maximális értékének 75%-át. A tanítást a Levenberg–Marquardt eljárás segítségével valósítottam meg. Több hálózat is betanításra került, ahol mind a neurális hálózat architektúrája és egyéb paraméterei is változtak. Végül éldetektálással választottam ki a legjobb hálózatot. Egy valódi visszacsatolást tartalmazó, viszonylag kisméretű hálózat ($n_i=1$, $n_o=1$, rejtett neuronok száma 10) produkálta a legjobb eredményt. Vagyis bemutatásra került egy neurális hálózat alapú prediktív módszer, amely segítségével a hidrát kialakulása detektálható. Mind a betanítást, mind az éldetektálást MatLab szoftver segítségével végeztem el.

5.5.1. TÉZIS II

Kidolgoztam egy neurális hálózaton alapuló hidrát detektáló rendszert. A detektáló rendszer a nyomás változásából képes előre jelezni a hidrát esetleges kialakulását. Kidolgoztam egy éldetektáló rendszert, amely alkalmas a hidrát detektáló rendszer tesztelésére. Éldetektálással határoztam meg a mintakészletekben fellelhető élek számát, amely alapján összehasonlíthattam azokat.

5.5.2. ÚJDONSÁG ÉS ÉRVÉNYESSÉG

A szakirodalomban található olyan megoldás, ahol neurális hálózat felhasználásával a hidrát kialakulását prognosztizálják. Ilyen például az [13] és [11] irodalmakban található megoldások különböző paraméterek (hőmérséklet, nyomás, fajsúly) mérési pontjaiból jelzi elő a hidrátosodási hőmérsékletet, az [18] irodalomban található pedig a hőmérséklet és a nyomás értékekből a hidrát növekedési sebességre ad becslést. Olyan megoldást azonban, amely csak a nyomás értékéből előre jelzi a hidrát kialakulást nincs.

Az NN alapú hidrát detektáló eljárás kialakításakor az összes tanításhoz és teszteléshez használt adatkészlet alapját magyarországi gázkutakból származó minták adják. A felhasznált adatok tartománya: nyomás 50-80 bar; hőmérséklet 0-30 °C. A hidrát kialakulása függ a gázösszetételtől. Eltérő lokáció esetén a tanítás megismétlése javasolt a helyre jellemző adatkészletek segítségével.

5.5.3. KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

[S3], [S5], [S6], [S7], [S9], [S11], [S12], [S13]

6. TEREPI HIDRÁT-JELENLÉT ÉSZLELÉSE

A „Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrát gátló technológia kutatása és fejlesztése” c. GOP 1.1.1 EU pályázatban a Miskolci Egyetem MŰFIO kollektívája a SCADA Kft. oldalán tevékenykedett. Ennek a GOP projektnek a fő célkitűzése az volt, hogy olyan vizsgálati módszerek, megoldások, demonstrációs rendszerek készüljenek el, amelyek alapján a következő években a legújabb technológiát alkalmazva hatékony hidrát gátlást lehet megvalósítani. A Füzesgyarmaton lévő Szeghalom-29 kútra lett telepítve egy kútkörzeti irányítási és vegyszeradagoló berendezés, amely működéséhez szükséges energiát egy napelemes rendszer biztosítja. A 35. ábrán a kútkörzetet láthatjuk a napelemes rendszer telepítése közben.



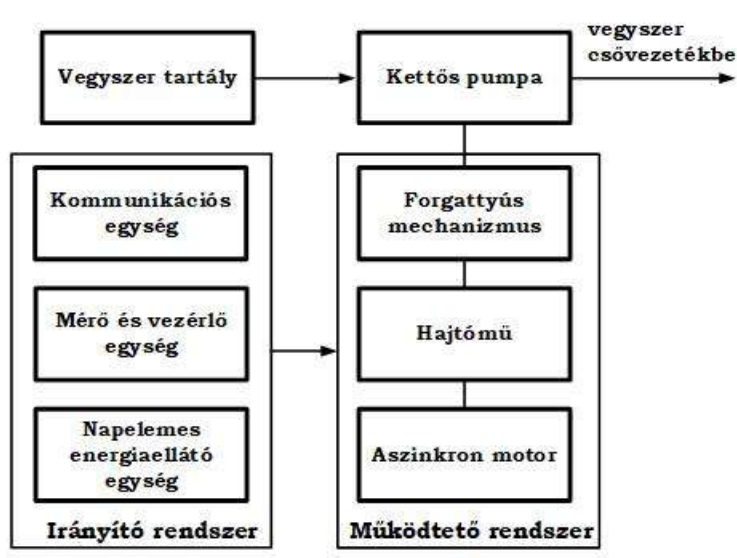
35. ábra Szeghalom 29

Az adagolás szabályozásához egy ScadaPack PLC-s rendszert alkalmaztam. A rendszerben számos távadó található, amelyek jeleit a ScadaPack analóg és digitális modulokon keresztül fogadja. A rendszer átfogó monitorozásához telepítésre kerültek szint-távadók, hőmérséklet távadók és nyomástávadók. A távfelügyelet GSM modul segítségével lehetséges. Az Ex-es motort egy OMRON V1000-es frekvenciaváltó segítségével hajtjuk meg. A villamos motoros vegyszeradagoló és kútkörzeti irányítási rendszer alkalmazásának legfontosabb célkitűzése, hogy a terepi teszteket követően valós technológián végezzük el azokat a vizsgálatokat, amelyek alapján a

jövőben a kijelölt gázkutakon a rendszereket be lehet üzemelni. Az alábbi fejezetben bemutatásra kerül a telepített rendszer, mind hardveres, mind szoftveres tekintetben. Ezt követően a célkitűzéssel összhangban ismertetem a valóságos technológián, a valóságos körülmények között rögzített méréseket, illetve azok elemzését, kiértékelését. Végül bemutatásra kerül egy gépi-tanulás alapú, hidrát jelenlét észlelésére alkalmas rendszer.

6.1. A KORSZERŰ ADAGOLÓRENDSZER

A Füzesgyarmaton lévő Szeghalom-29 kútra telepített hidrát mentesítő rendszer alapvetően két részből épül fel, amely a kútkörzeti irányítási és vegyszeradagoló berendezés, amelynek a blokkvázlatát a 36. ábrán láthatjuk.



36. ábra A vegyszeradagoló blokkvázlatos felépítése és kútkörzeti irányítás

Az ábrán látható működtető rendszer alapvetően négy fő egységből áll, az alábbiak szerint:

- Az aszinkron motor, amely a rendszer működtetéséhez szükséges. Fontos megjegyezni, hogy bár a teljes injektálási feladat megvalósításához elegendő lenne egy 30W teljesítményű motor is, azonban szélsőséges környezeti hőmérsékleten üzemelő Ex minősítésű

motor csak ennél magasabb névleges teljesítményű kivitelben kapható kereskedelmi forgalomban.

- A hajtómű, amely egy Nord gyártmányú spirális hajtómű.
- A forgattyús mechanizmus, amely feladata a forgó mozgás alternáló mozgássá való átalakítása. A rendszer boxermotor elrendezésű, egyszeres működésű, két hengeres (duplex) kivitel.
- Az adagoló pumpa, amely egy térfogat kiszorítás elvén működő egység. Nagy nyomás ellenében sajtolja be az inhibitor anyagot.

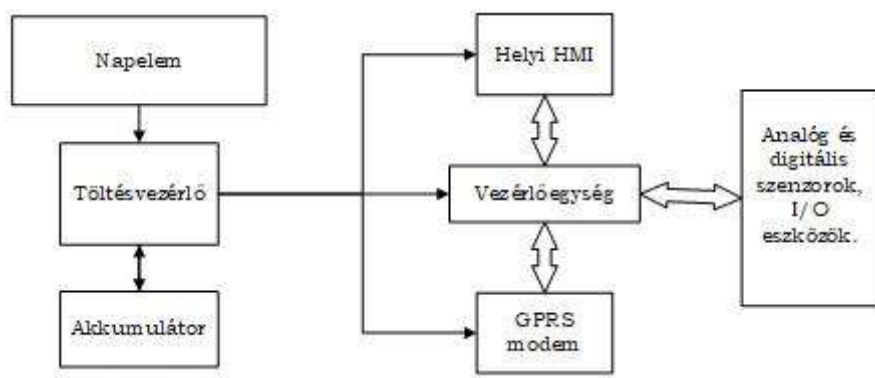
Az adagoló irányító rendszere az ábrának megfelelően három fő egységre bontható. Az adagoló irányító rendszerének egyik legfontosabb eleme az energiaellátó egység, amely a napelemekből, akkumulátorokból és egy vezérlő egységből áll. A téli napszegény időszak miatt a napelemes rendszert túlméreteztük, így nyolc darab monokristályos napelem modult használtunk, amelyek kapacitása összesen 2 kW. Kereskedelmi forgalomban kapható összesen 800 Ah kapacitású savas akkumulátort használtunk a rendszerhez, amit a napelemek által árnyékolt területre a földbe süllyesztett műanyag tartályban helyeztünk el. A napelemes rendszer vezérlésről egy Steca Tarom 235 egység gondoskodik, amely az irányítási rendszer további részeitől elszeparáltan működik. [S30], [S31]



37. ábra A napelemes rendszer

A napelemek vezérlő egységét egy Rittal szekrényben helyeztük el, amely mellett helyet kapott egy háttal szembefordított másik Rittal szekrény is, ebben az irányítástechnikai vezérlő egységek kaptak helyet, ahogyan az a 37. ábrán is látható. A képen jól látható a napelem, a két vezérlőszekrény és a földbe süllyesztett akkumulátor tárolására szolgáló műanyag tartály fedele. [106], [S5], [S14]

A telepített irányítástechnikai rendszer felelős az adatgyűjtésért és az inhibitor mennyiségének szabályozásáért. A beérkezett adatokat az RTU (távoli terminál egység) a központi rendszerbe küldi.



38. ábra A napelemes rendszer

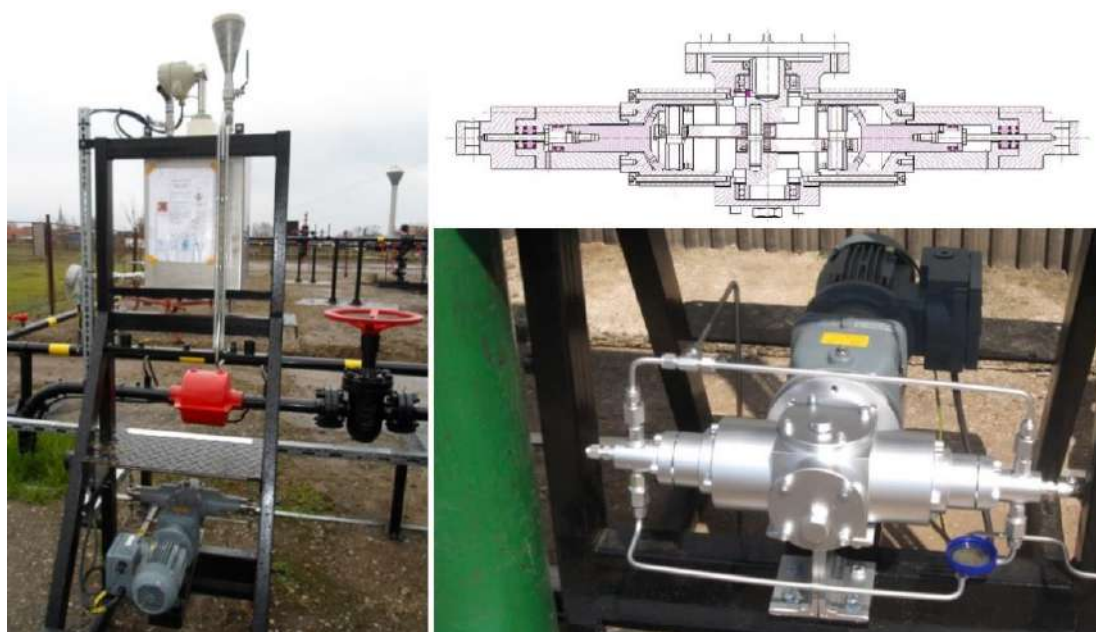
Amint az a 38. ábrán látható, a terepen telepített rendszer a következő részekből áll:

- az áramellátásért felelős részek: napelem, napkollektoros vezérlő és akkumulátor;
- a funkciókért felelős részek: PLC, GPRS modem, helyi HMI (ember-gép kapcsolat) és érzékelők.

Az adatok vezérléséhez és beszerzéséhez egy ScadaPack 350 PLC-t (Programmable Logic Control) használtam, amely szélsőséges környezeti hőmérsékleten is üzemképes. A vezérlőt analóg bemeneti és digitális kimeneti modullal bővítettük (a kiosztás a mellékletben – M11). A központi vezérlőegységhez RS-232 soros kommunikációs csatornán van csatlakoztatva a rendszer távoli eléréséért felelős egysége, amely egy CAP AG által gyártott CT63 GPRS modem, amit a szerverrel való

kommunikációhoz használtam. A vezérlő és a modem közötti kommunikáció AT parancsokon alapul. A vezérlőre csatlakoztatott eszközök listáját a melléklet M1 1. ábráján láthatjuk. A teljes villamos vezérlő rendszer a gyűjtőszikramentes övezeten kívül, egy külön erre a célra készített beton alapzatra került, a napelemekkel együtt. [S29], [S33]

Az aszinkron motor meghajtásához OMRON V1000 frekvenciaváltót használtam. A vezérlőhöz csatlakoztatott frekvenciaváltó alapjelét RS-485 soros kommunikációs csatornán állíthatjuk be, amellyel a motor, végsősoron az adagolás vezérelhető. Az adagolót a 39. ábrán láthatjuk. [S16]

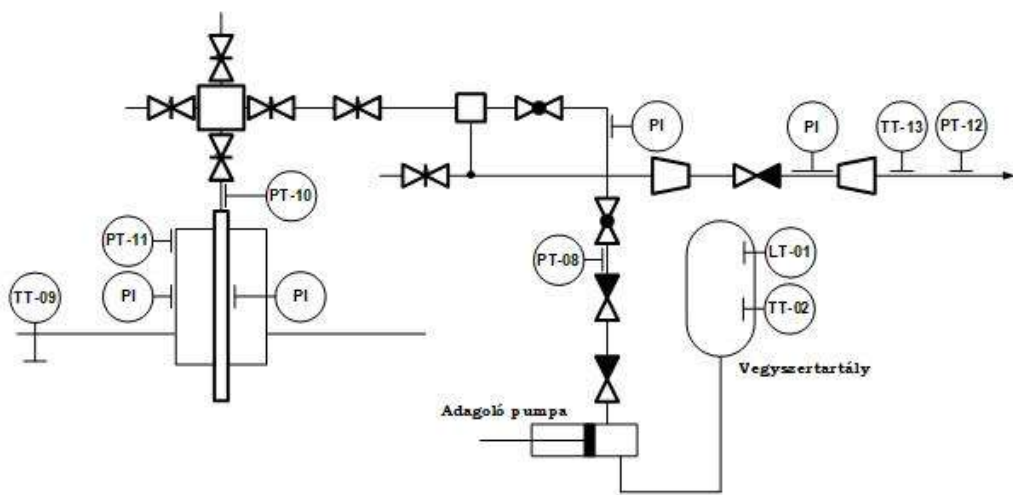


39. ábra Az adagoló

A mérő és vezérlő rendszer központi egységéhez csatlakozó analóg távadók adják többnyire a kútkörzet műszerezettségét, amit a 40. ábrán láthatunk. Az ábrán a kútkörzet sematikus ábráján kerültek feltüntetésre a használt műszerek, amelyek az alábbi paramétereket mérik:

- Inhibitor folyadékszintje (LT-01)
- Inhibitor folyadék hőmérséklete (TT-02)
- Adagoló vezeték nyomása (PT-08)

- Béléscső nyomása (PT-10)
- Légzőcső-köz nyomása (PT-11)
- Kútvezeték nyomása (PT-12)
- Kútvezeték hőmérséklete (TT-13)
- Talaj hőmérséklet (TT-09)

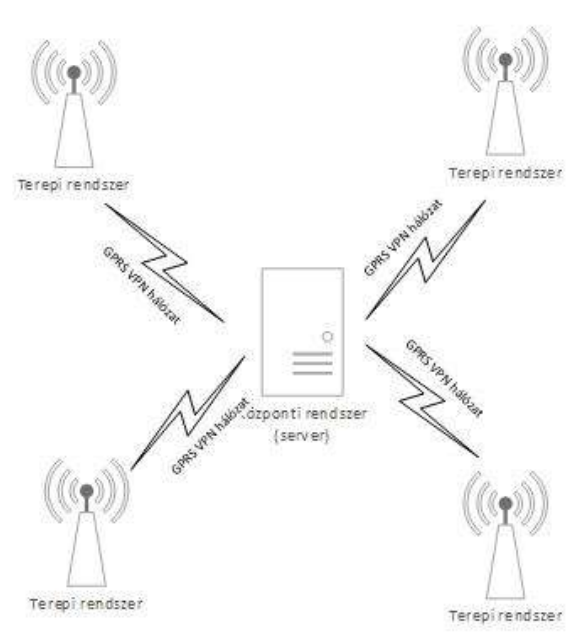


40. ábra A kútkörzeti műszerezettség

A távadók jelölése, megnevezése, és azok méréstartománya a mellékletben található (M12. táblázat). Fontos megjegyezni, hogy az ábrán PI jelölésű műszerek helyszíni kijelzők, amelyek kommunikációs egységgel nem rendelkeznek, így azok mért adatot nem továbbítanak, csupán biztonsági okokból kerültek elhelyezésre. [107], [S5]

Az eddigiekben ismertetett terepi telepítésű, elektromosan vezérelt injektáló rendszer prototípusát egy telemetria megoldással telepítettük. A telemetria rendszer kétféle egységből áll: a központi rendszerből és a távoli rendszerekből, ahogy az a 41. ábrán is látható. A rendszer két egysége egy virtuális magánhálózaton (VPN) keresztül kommunikál GPRS-en. A VPN-ek lehetővé teszik a magánadatok titkosítását és biztonságos továbbítását a nyilvános hálózatokon. A VPN olyan hálózat, amely a távoli fiókok közötti kapcsolatokat vagy a mobil felhasználók távoli hozzáférését terjeszti ki a megosztott infrastruktúrán keresztül [108]. A rendszer a kliens-szerver

modellt használja, ahol a terepen telepített rendszerek a kliensek, a központi rendszer pedig a szerver. A központi egység egy nagy teljesítményű kiszolgáló számítógép, amelyen speciális szoftver felelős a kliensek kezeléséért. Egy kiszolgáló több klienst is képes kezelni. A kiszolgáló-kliens kommunikáció TCP / IP protokollon alapul. A központi szerveren a bejövő adatokat egy CLI PHP parancsfile fogadja és feldolgozza. A feldolgozás során ellenőrzésre kerül a CRC kódja, hogy azok megfelelőek-e. Ezt követően ellenőrzésre kerül, hogy a csomag milyen típusú. Amennyiben az adatcsomag, amely az érzékelők által mért adatokból áll, akkor az adatbázisban tárolódik. Abban az esetben, ha riasztási csomag, a feldolgozó figyelmeztető e-maileket és SMS-eket küld a felhasználóknak az adatok tárolása előtt [109], [110], [S4].



41. ábra Rendszer architektúra [S35]

Az adatbázisban tárolt adatok egy webes megjelenítő felület segítségével lehívhatók, illetve ezen a felületen keresztül bizonyos paraméterek megadhatók, módosíthatók. A megjelenítő felület a Kohana MVC alapú PHP keretrendszerre épül. A felület fejlesztése során felhasznált javascript technológiák: jQuery, HighStock, DatePicker, JSON. Általánosan jellemző a weboldal lapjaira, hogy az alap oldal betöltése után, AJAX kérésekkel JSON

objektumok formájában kérjük le és jelenítjük meg az adatok. A megjelenítő webes felületről láthatunk egy képet a 42. ábrán. [S34], [S36], [S37]

SCADA

Ipari Folyamatirányítási,
Mérnöki, Szolgáltató
és Kereskedelmi Kft.

Miskolci Egyetem
Alkalmazott Földtudományi Kutatóintézet
Műszerfejlesztési és Informatikai Osztály

SZÉCHENYI TERV

Szeghalom-29

Kijelentkezés

Szeghalom-29

Technológiai rajz

Mért adatok

Diagramok

Események

Konfiguráció

AK3 webfelület

Frissítés

sor:

1-100

101-200

201-300

301-400

401-500

501-

IDŐBÉLYEG	ÜZENET
2013-03-18 14:57:31	Az A688080 azonosítójú vezérlő egyik csatormáján sem keletkezett semmi.
2013-03-18 13:55:23	Az A688080 azonosítójú vezérlő egyik csatormáján sem keletkezett semmi.
2013-03-18 12:43:21	Az A688080 azonosítójú vezérlő egyik csatormáján sem keletkezett semmi.
2013-03-18 09:41:14	Az A688080 azonosítójú vezérlő egyik csatormáján sem keletkezett semmi.
2013-03-16 17:39:29	Az A688080 azonosítójú vezérlő MOD_AI_5 csatormáján LO/LO riasztás keletkezett.
2013-03-15 16:00:00	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_5 csatormáján HI figyelmeztetés keletkezett.
2013-03-14 11:09:00	Az A688080 azonosítójú vezérlő MOD_AI_5 csatormáján LO/LO riasztás keletkezett.
2013-03-13 17:47:54	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_1 csatormáján LO figyelmeztetés keletkezett.
2013-03-12 15:36:04	Az A688080 azonosítójú vezérlő MOD_AI_4 csatormáján a LO/LO állapot megszűnt.
2013-03-12 15:18:30	Az A688080 azonosítójú vezérlő MOD_AI_5 csatormáján LO figyelmeztetés keletkezett.
2013-03-10 23:56:40	Az A688080 azonosítójú vezérlő DI_1 csatormáján felfutó él keletkezett.
2013-03-10 20:54:35	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_1 csatormáján LO figyelmeztetés keletkezett.
2013-03-10 07:16:22	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_0 csatormáján LO figyelmeztetés keletkezett.
2013-03-09 10:19:36	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_5 csatormáján a HI állapot megszűnt.
2013-03-09 10:04:36	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_5 csatormáján a HI állapot megszűnt.
2013-03-08 11:48:25	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_5 csatormáján a HI állapot megszűnt.
2013-03-08 11:48:23	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_5 csatormáján HI figyelmeztetés keletkezett.
2013-03-08 11:32:14	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_5 csatormáján a HI állapot megszűnt.
2013-03-08 11:32:13	Az A688080 azonosítójú vezérlő AI_5 csatormáján HI figyelmeztetés keletkezett.

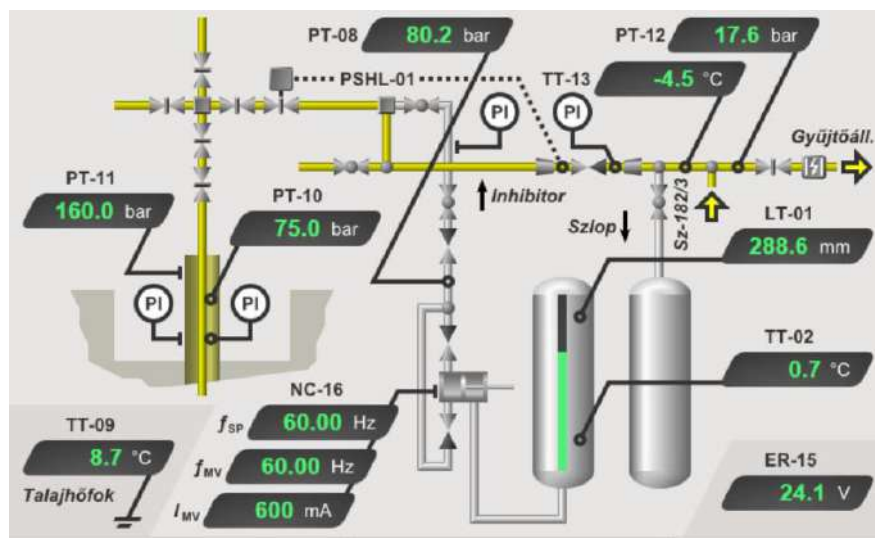
42. ábra Webfelület

A megjelenítő site oldalsó menüjéből több funkció elérhető. Így például a technológiáról kaphatunk képet a rajta elhelyezett távadókkal, és azok értékeivel. A mért adatokat megnézhetjük táblázatosan, vagy a könnyebb olvashatóság végett diagramos változatban. Illetve, megtalálhatóak a különböző időbélyeggel ellátott események, és egy konfigurációs felület az oldalon. Az ábrán a kútkörzeti felső szint esemény képernyőjét láthatjuk. [111], [110], [112]

6.2. A MÉRÉSEK

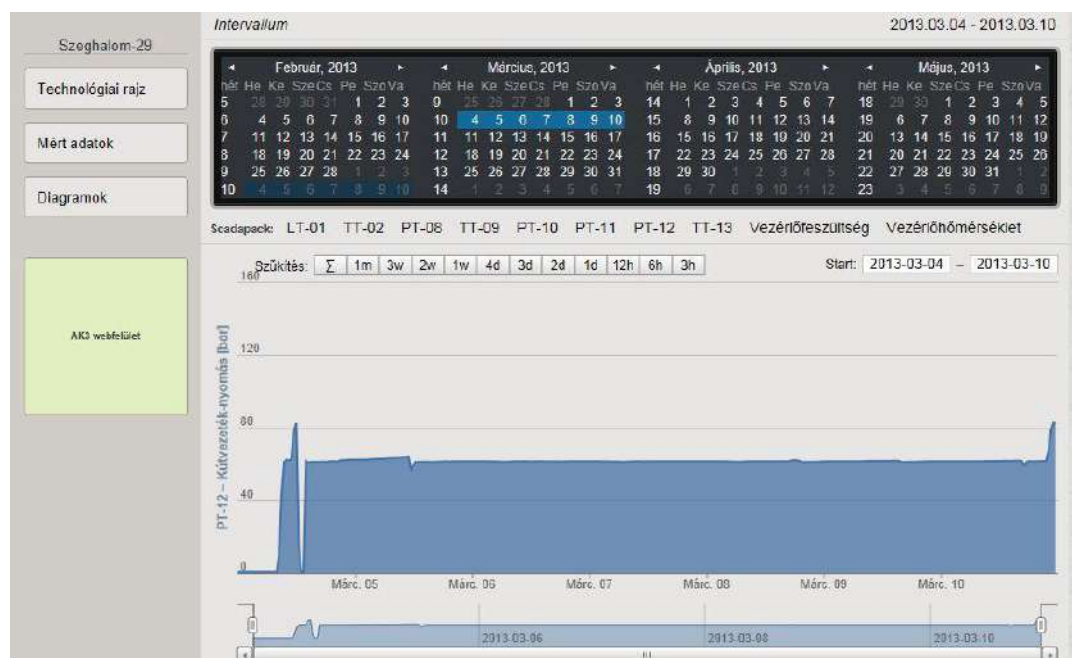
Az előzőleg bemutatott motoros vegyszeradagoló berendezést és a kútkörzeti műszerezéshez tartozó egységeket telepítésüket és üzembe helyezésüket követően tesztüzemben indítottuk el. A teszteket 2012 októberében kezdtem el és a teljes téli évszakban folytattam, egészen májusig, vagyis addig, amíg szükség volt a hidrát gátló inhibitor adagolására. A tesztek kiértékelése egy 29 hetes periódust ölelt át. A mérési adatokat a terepi tesztekhez

kifejlesztett programmal, illetve ennek módosított változatával rögzítettem, amely kezdőoldalán egy technológiai rajz látható a 43. ábrának megfelelően.



43. ábra Webfelület

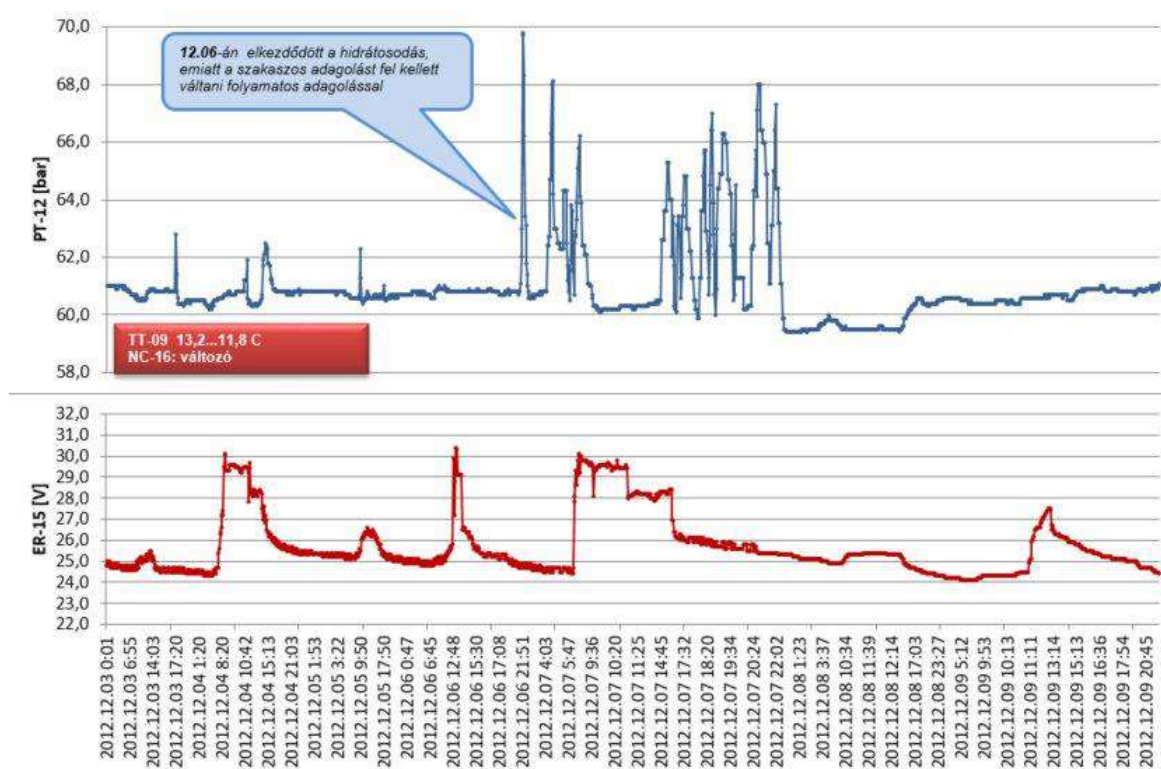
Az ábra megfelel a kútkörzeti műszerezettségnek, a fontosabb adatok, illetve riasztások egy helyen szerepelnek. A mért adatokat természetesen lehetőség van grafikusan is megjeleníteni, ahogy azt a 44. ábrán is láthatjuk. [S18]



44. ábra Adatok megjelenítése

Az adatok szerveren lévő adatbázisból, egyben vagy akár részleteiben is lekérhetők a könnyebb feldolgozás végett. A tesztek kiértékelése során a mérési adatokat heti bontásban dolgoztam fel, hogy könnyebben áttekinthetők legyenek. A projekt értékelések folyamán a legfontosabb adatok az alábbiak: talajhőmérséklet, környezeti hőmérséklet, napsugárzás mértéke, kútvezeték nyomás, adagolási frekvencia, adagolt inhibitor készítmény típus és akkumulátor feszültség. [S38], [S39], [S40]

Fontos megjegyezni, hogy a környezeti hőmérséklet és napsugárzás mértékét külső adatbázisból dolgoztam fel. A napsugárzás mértéke és az akkumulátor feszültség szintje a napelemek megfelelő működését ellenőrző információ. Az adatokat több szempontból értékeltük, így például a napelemek megfelelő működésén túlmenően, az inhibitor adagolására is nagy figyelmet fordítottam, ami a későbbi tudományos munkát megkönnyítette. Az adatok kiértékelésére látunk példát a 45. ábrán.



45. ábra Adatok kiértékelése [S39]

Az inhibitor adagolási dózisát adagolási frekvenciával állítottam. A frekvenciát alapvetően 10 Hz-enként állítottam, ami 0,12 l/h mennyiségnek felelt meg. A rendszert 30 Hz alatt nem üzemeltettük.

Ahogy azt az előzőekben olvashattuk, számos paraméter került mérésre, de ezek közül számunkra három mért és egy jegyzett paraméter fontos, amelyek:

- Adagoló vezérlő frekvenciája (NC-16)
- Kútvezeték nyomása (PT-12)
- Az adagolt inhibitor készítmény típusa
- Kútvezeték hőmérséklete (TT-13)

A négy paraméterből három mért érték, amely egyértelműen befolyásolja a hidratosodás kialakulását. A negyedik paraméter, amely az adagolt inhibitor készítmény típusa, amely az inhibitor tartályba történő helyezésekor került feljegyzésre. Annak bizonyítása, hogy az egyes vegyszerek mennyire hatásosak a hidratosodás gátlásában az 5.1-es fejezetben leírt berendezéssel történt. A hidratosodási mérések alapvetően 6500s-ig tartanak. Annak megállapítása, hogy az egyes inhibitor hatásos-e vagy sem, a 10. táblázat alapján történik. [S32]

10. táblázat Inhibitor hatásossága

Hidratosodási időintervallum [s]	Minősítés	Minősítőszám
0-2500	nem gátol	1
2501-4000	gyengén gátol	2
4001-5500	közepesen gátol	3
5501-6500	erősen gátol	4

Munkám során a 29 teszthét által generált adatokat használtam fel, amelyekből az adatok elemzése után, manuálisan választottam ki a 44 adatkészletet, amelynek közel 4500 adatpontja van. Ezen adatkészletek segítségével tanítható be a későbbiekben a neurális hálózatunk. Az

előfeldolgozást SciLab szoftver segítségével valósítottam meg. Az előzőkhöz hasonlóan az adatok szűrésen, normalizáláson és skálázáson estek keresztül.

6.3. HIDRÁT-DETEKTÁLÁS TEREPEEN

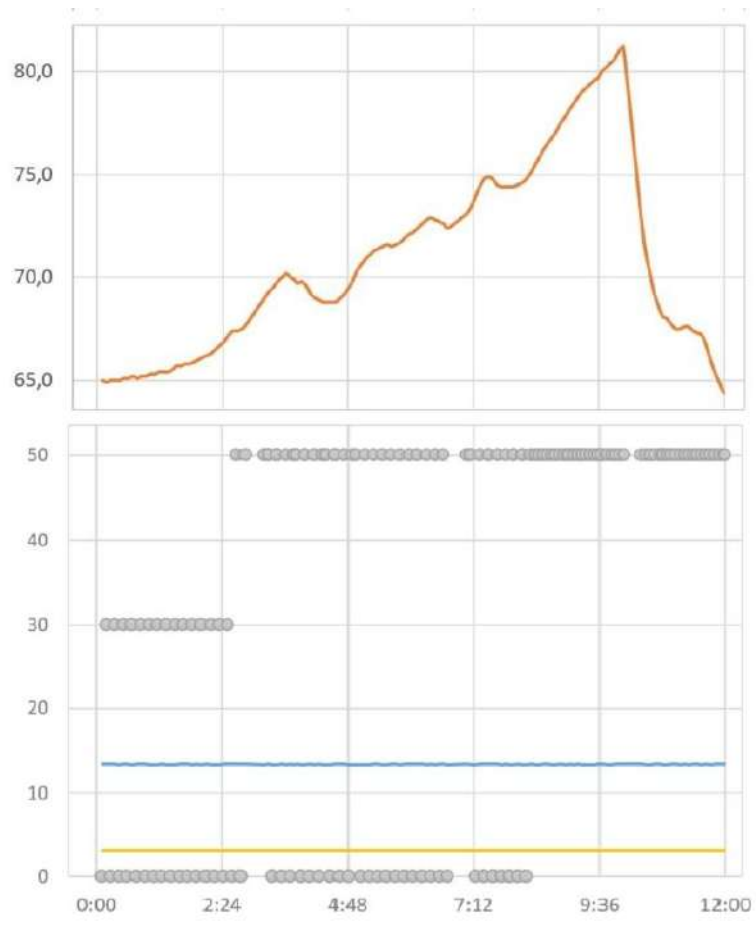
A 44 elkészült adatkészlet megfelelő csoportosítása nagyon fontos, mivel erősen befolyásolják az eredményességet. Ennek megfelelően összesen három adatkészletet hoztam létre, amelyek a tanító, a validáló valamint a tesztelő készletek, ezek segítségével a későbbiekben a rendszert betanítottam. Az adatkészletek tulajdonságait a 11. táblázat foglalja össze.

11. táblázat Az adathalmaz alap paraméterei

Adatkészlet	Mérések száma [ydb]	Adatpontok száma [ydb]
Tanító adatkészlet	22	2178
Validáló adatkészlet	12	1068
Teszt adatkészlet	10	1080

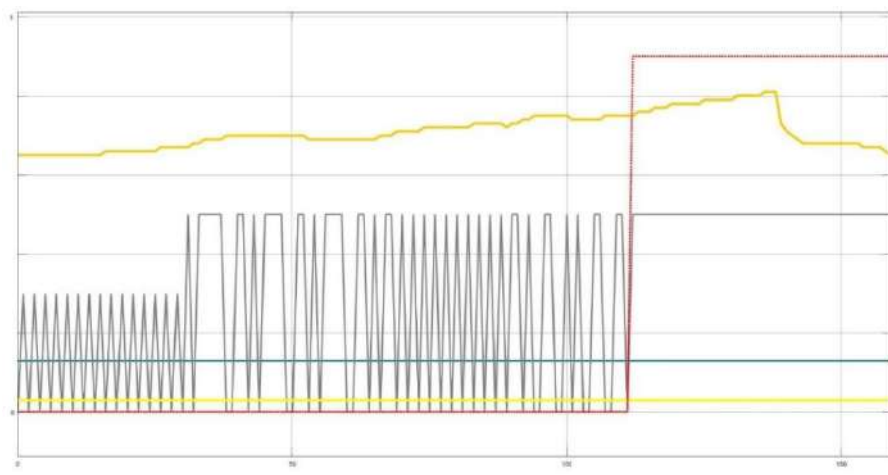
Egy adathalmazt láthatunk a 46. ábrán, ahol feltüntetésre került a nyomás, a hőmérséklet, illetve az inhibitor adagolásának mennyiségét és minőségét jelölő tényezők az idő függvényében.

Az ábrán kék színnel láthatjuk a kútvezeték hőmérsékletét (TT-13), amely körülbelül 13 °C volt az egész mérés alatt. Az ábrán sárga színnel láthatjuk az inhibitor hatásosságát, amely ebben az esetben közepesen gátol. Szürke pontok jelzik az inhibitor adagolást. Láthatjuk, hogy kezdetben 30 Hz-el, majd a nyomás növekedése miatt 50 Hz-el adagolta szakaszosan (0 értékek, az ábrán), majd 50 Hz-el adagolta folyamatosan. Narancssárga színnel látjuk a kútvezetés nyomását (PT12). Látható, hogy az inhibitor kifejti hatását.



46. ábra Adathalmaz

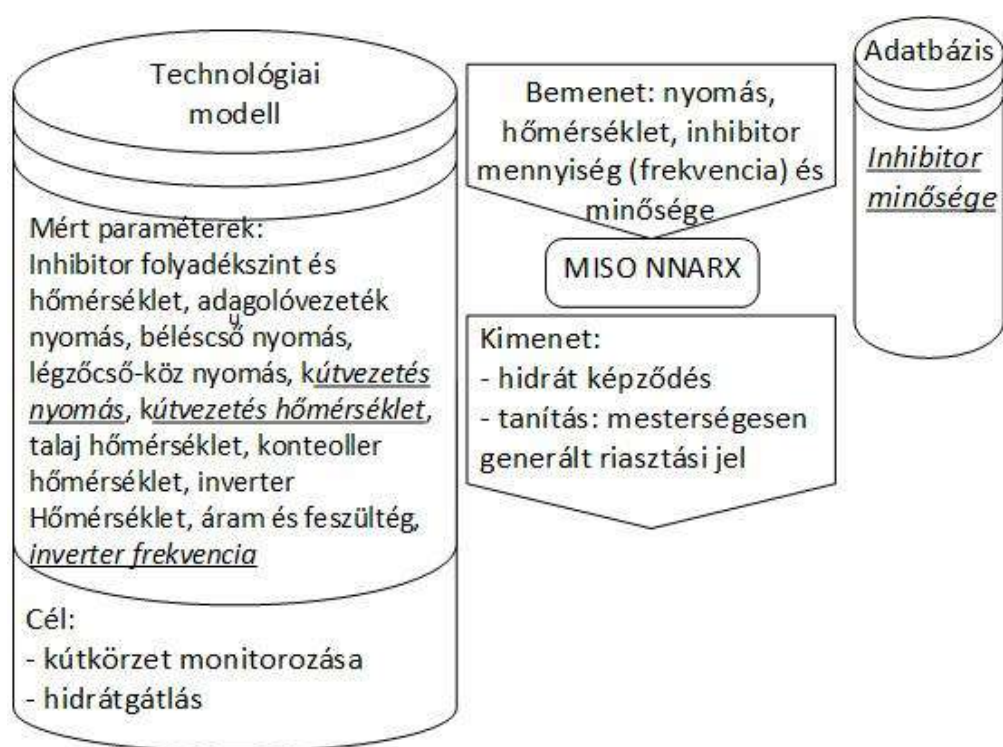
Egy szűrt, normalizált és skálázott adathalmazt látunk adatpontokra leképezve, a 47. ábrán. Egy mesterséges hidrát jelet generáltam a korábbi tapasztalataink alapján 75%-nál.



47. ábra Mesterséges hidrát jel

Korábbi munkám során egy valódi visszacsatolást tartalmazó (NOE) hálózat produkálta a legjobb eredményt, ugyanakkor ha a használt két hálózat a NOE és a NARX összes eredményét hasonlítjuk össze, akkor a NARX jobb eredményt ért el. Ezért ennél a megoldásnál a NARX hálózattal dolgoztam.

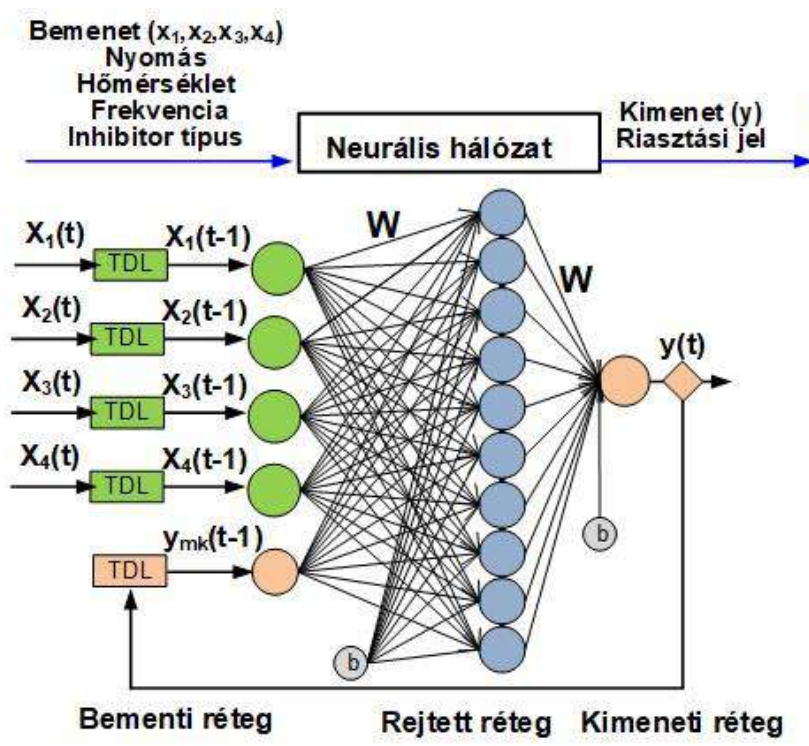
A rendszerről készült összesítőt a 48. ábrán láthatjuk, ahol jól elkülönülnek a méréseim során rögzített adatok, és a felhasznált bemeneti és kimeneti adatok [S6].



48. ábra Rendszerösszesítő

Összegezve tehát, méréseimet egy kútkörzeti monitorozó és inhibitor adagoló rendszer segítségével végeztem el, amely elsődleges célja a kútkörzet állapotának állandó felügyelete és a hidrát dugó kialakulásának meggátolása. A mérések során számos paramétert rögzítettem, ahogy azt a 47. ábra is mutatja, azonban a neurális hálózatok tanításakor csak négy paramétert a nyomást, a hőmérsékletet és az inhibitor mennyiségét és minőségét használtam fel bementként. Kimenatként egy mesterségesen előállított riasztási jelet használtam a tanítás során. A kimenet a hidrát kialakulása. Munkám során a korábban bemutatott NNARX (Neural Network AutoRegressive with eXogenous inputs) hálózat került betanításra.

A NNARX hálózatok struktúrája látható a 49. ábrán. Az ábrán jól elkülönülnek a bementi, a rejtett és a kimeneti rétegek. Ahol $y(t)$ – a hálózat kimenete t időpillanatban, $x(t)$ – a hálózat bemenete t időpillanatban, $x(t-1)$ – a hálózat bemenete a $t-1$ időpillanatban, $y_{mk}(t-1)$ – megkívánt kimenet a hálózattól a $t-1$ időpontban, TDL – a késleltető láncok, W – súlymátrix és b – az eltolósúly-vektor [S1].



49. ábra A neurális hálózat

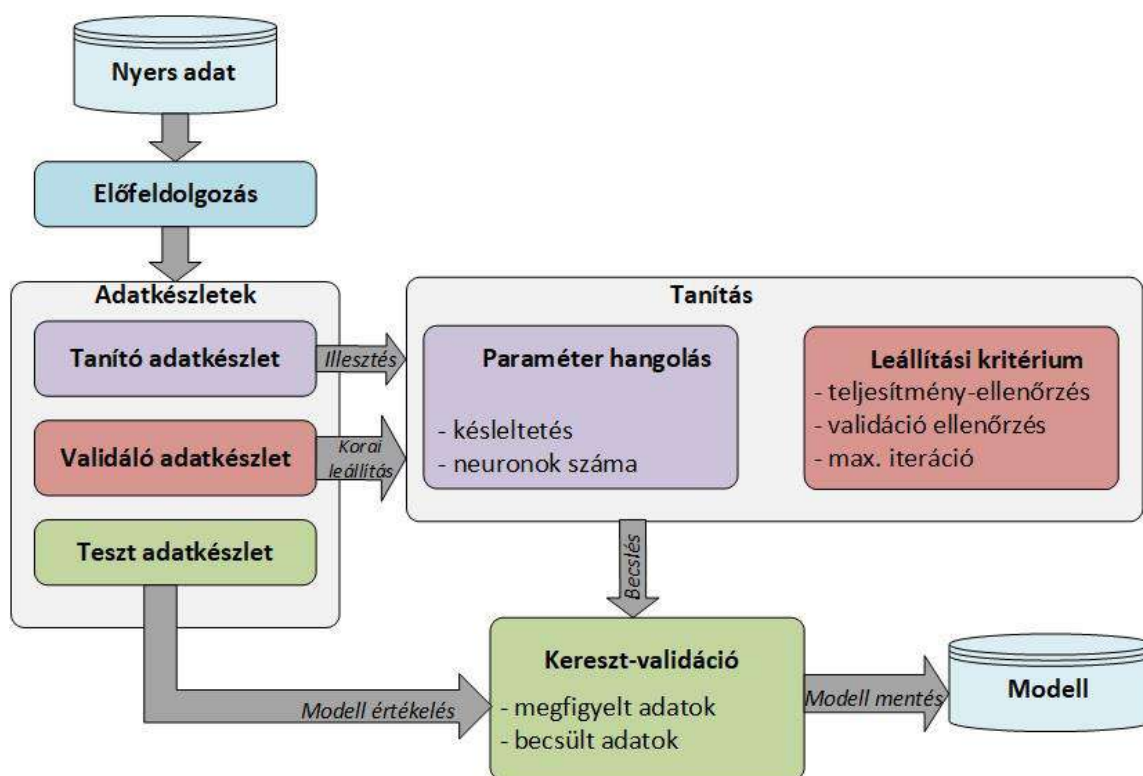
A 12. táblázat összesíti a két neurális hálózat legfontosabb paramétereit.

12. táblázat A hálózatok legfontosabb paramétereit

NARX struktúra	4-N-1
Rejtett hálózat [db]	1
Bemenetek száma [db]	4
Neuronok száma [db]	10, 12, 14, 16
Bementi késleltető láncok száma [db]	1, 2
Kimentő késleltető láncok száma [db]	1, 2

Adathalmazok [db]	44
Adatpontok száma [db]	~100
Max. iteráció [db]	1000
Betanítási idő [h]	~1,3

A neurális hálózatok tanításakor fontos, hogy a hálózat kezdeti súlya és az egyes neuronok eltolás értéke jól legyen megválasztva, amelyhez a Levenberg–Marquardt eljárást használtam. A tanítás általános munkafolyamatát a 49. ábrán láthatjuk [S1].



50. ábra A tanítás munkafolyamata

NARX struktúrájú MISO, vagyis multi-input, single output (több bemenetes, egy kimenetes) neurális hálózat került betanításra.

A hálózat rejtett réteg neuronjaink számát változtattam. Ahhoz hogy elkerüljem a túltanulást minden tanítás ott lett leállítva, ahol annak a kiértékelő készletre vett MSE értéke a legjobb volt, de maximum 1000. A tanítással elért eredményeket az 13. táblázat foglalja magába.

13. táblázat Az eredmények összesítése

NN struktúra	Regresszor	Rejtett neuron [db]	Tanító adatkészlet		Validáló adatkészlet		Teszt adatkészlet	
			MSE	RE [%]	MSE	RE [%]	MSE	RE [%]
NARX	$n_i=1$ $n_{ro}=1$	8	0,0389	68,7	0,0379	50,0	0,0322	60,0
		10	0,0204	72,2	0,0179	80,0	0,0201	90,0
		12	0,0088	95,2	0,0131	90,0	0,0148	90,0
		14	0,0080	96,1	0,0068	100,0	0,0149	90,0
		16	0,0091	95,1	0,0143	90,0	0,0222	70,0

Akkor jó a hálózat teljesítménye, ha a megkívánt és hálózat kimenetében a lépcsőszerű ugrás fedi egymást. Erről az MSE nem ad érdemi információt, csak ha az élek fedték egymást, akkor mondható, hogy az adott riasztás időben történt. Az időben bekövetkező riasztásokból százalékos érték számítható (RE). Ezeket az értékeket is tartalmazza a táblázat. Látható, hogy az RE értékek alapján a 14 rejtett neuront tartalmazó hálózat bizonyult a legjobbnak [S2].

6.4. ÖSSZEGZÉS

Részletesen bemutatam egy korszerű adagoló rendszert, amelynek tervezésében és kivitelezésében magam is részt vettem. A berendezéssel 29 héten keresztül folytattam tesztméréseket. A tesztmérések eredményeiből kiemeltem 44 adathalmazt, amelyek a talajhőmérséklet, a kútvezeték nyomás és az adagoló frekvenciáját tartalmazták. Ehhez hozzáfűztem az adagolt inhibitor készítmény minőségi jellemzőjét. Három egymástól független adatkészletet hoztam létre. A minták előfeldolgozáson estek keresztül, amit SciLab szoftver segítségével valósítottam meg. A nyers adatok először is szűrésen estek át, ahol csökkentettem a mérési hibából eredő eltéréseket, amit egy alul-áteresztő szűrő segítségével valósítottam meg. Ezt követően az adatok normalizálását végeztem el. A normalizálás az

előfeldolgozás egyik legelterjedtebb formája, ahol a bemeneti adatokat lineárisan skálázzuk. A kimeneten mesterséges riasztást hoztam létre, amely alapjául minden esetben korábbi tesztmérések kiértékelése szolgált. Egy több bemenetű, egy kimenetű neurális hálózat került betanításra, több lehetséges paraméterrel. A tanítást a Levenberg–Marquardt eljárás segítségével valósítottam meg. A betanítást MatLab szoftver segítségével valósítottam meg.

6.4.1. TÉZIS III

Kidolgoztam egy neurális hálózaton alapuló terepen használatos jellemzőket is figyelembe vevő hidrát detektáló rendszert. A detektáló rendszer a nyomás, a hőmérséklet változásából képes előre jelezni a hidrát esetleges kialakulását, úgy hogy figyelembe veszi a terepen szokásos már korábban adagolt inhibitor mennyiségét és minősítőszámát.

6.4.2. ÚJDONSÁG ÉS ÉRVÉNYESSÉG

A szakirodalomban található olyan megoldás, ahol neurális hálózat felhasználásával a hidrát kialakulását prognosztizálják, olyan megoldást azonban, amely a nyomáson és a hőmérsékleten felül figyelembe veszi az aktuálisan rendszerhez adagolt hidrátgátló készítmény mennyiségét, illetve annak minősítőszámát is figyelembe veszi, nincs.

Az NN alapú terepi hidrát detektáló eljárás kialakításakor az összes tanításhoz és a teszteléshez használt adatkészlet alapját magyarországi gázkutakból származó minták adják. A felhasznált adatok tartománya: nyomás 50-80 bar; hőmérséklet 0-30 °C. A hidrát kialakulása függ a gázösszetételtől. Eltérő lokáció esetén a tanítás megismétlése javasolt helyre jellemző adatkészletek segítségével.

6.4.3. KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

[S1], [S2], [S3], [S4], [S5], [S6], [S14], [S16]

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Disszertációmiban hidrát keletkezésének előrejelzésén alapuló, modellezést használó, három digitális irányítási megoldással foglalkozom, amely közül egy LSQ módszer kettő pedig neurális hálózat alapú.

Az első megoldás egy hidrát előrejelzést és inhibitor adagolás szabályozást mutat be. A hidrátosodás ábrázolására szolgáló fázishatárgörbét a Gauss féle legkisebb négyzetek módszer segítségével írom le, amely segítségével a hidrát prognosztizálható. Az így kapott hidrátosodási görbe az alapja az általam elkészített és bemutatott szabályozásnak.

A második megoldás a hidrát-képződés detektálása valódi visszacsatolást tartalmazó neurális hálózat felhasználásával. Ehhez közel 150 mérést végeztem el, amelyeket felhasználva több egymástól független adatkészletet hoztam létre, amiket SciLab segítségével előfeldolgoztam (szűrés, skálázás, normalizálás). Kimenetként, mesterségesen előállított riasztási mintákat hoztam létre, a nyomásérték maximumának 75%-ánál. Több hálózat is betanításra került, ahol a neurális hálózat architektúrája és egyéb paraméterei is változtak. Végül éldetektálással választottam ki a legjobb hálózatot.

A harmadik megoldás egy a terepi hidrát-jelenlét észlelésének egy neurális hálózat alapú módszere. Ehhez 44 adathalmazt képeztem egy korszerű adagoló rendszer tesztméréseinek eredményeiből. Ezekből három egymástól független adatkészletet hoztam létre, amiket SciLab segítségével előfeldolgoztam (szűrés, skálázás, normalizálás). A kimeneten mesterséges riasztást hoztam létre, amely alapjául minden esetben korábbi tesztmérések kiértékelése szolgált. Egy több bemenetű, egy kimenetű neurális hálózat került betanításra, több lehetséges paraméterrel.

7.1.1 TÉZIS I

Kidolgoztam egy LSQ alapú modellt, amely alkalmas diszkrét hőmérsékletértékhez tartozó hidratosodási nyomásérték meghatározására, mindkét struktúrájú (S1 és S2) hidratosodás jellemzőit figyelembe véve. Létrehoztam egy szabályozó algoritmust, amely segítségével igazoltam, hogy a kidolgozott modell alkalmas arra, hogy a struktúrafüggő hidratosodási nyomásértéket megbecsülje az inhibitor adagolásához.

7.1.2 TÉZIS II

Kidolgoztam egy neurális hálózaton alapuló hidrát detektáló rendszert. A detektáló rendszer a nyomás változásából képes előre jelezni a hidrát esetleges kialakulását. Kidolgoztam egy éldetektáló rendszert, amely alkalmas a hidrát detektáló rendszer tesztelésére. Éldetektálással határoztam meg a mintakészletekben fellelhető élek számát, amely alapján összehasonlíthattam azokat.

7.1.3 TÉZIS III

Kidolgoztam egy neurális hálózaton alapuló terepen használatos jellemzőket is figyelembe vevő hidrát detektáló rendszert. A detektáló rendszer a nyomás, a hőmérséklet változásából képes előre jelezni a hidrát esetleges kialakulását, úgy hogy figyelembe veszi a terepen szokásos már korábban adagolt inhibitor mennyiségét és minősítőszámát.

8. SUMMARY

In my dissertation I am dealing with three hydrate-formation predicting, modeling based, digital control solutions, one being an LSQ based method, and the two remaining being neural network based methods.

The first solution shows a solution for hydrate-formation prediction and inhibitor injection regulation. To visualise the hydrate-formation I am using a phase boundary curve, with Gauss' least squares method, and with this the hydrate-formation can be predicted. This yields me a hydrate-formation curve, which is the basis of the regulation method I conceived.

The second solution is hydrate-formation detection utilising a a neural network with real feedback. For this about I made about 150 measurements which had been used to create multiple independent data sets, that were pre-processed (filtered, scaled, normalised) using SciLab. As the output I developed artificial alarm patterns at 75% of the maximal pressure. Numerous artificial networks were trained, where both the architecture and various system parameters had been varied. Finally the best network was selected through edge detection.

The third solution is a neural network based field hydrate-presence sensing method. For this I created 44 data sets using the measurement results of a modern injection system. From these sets three independent data pools were made and pre-processed (filetring, scaling, normalising) using SciLab. At the output I set up an artificial alarm, which is based on, at all times, the evaluation of previous test measurements. A multiple input, single output neural network, with multiple possible parameters, had been trained.

8.1.1 THESIS I

I conceived an LSQ based model, which is capable of determining the hydrate-formation pressure at discrete temperature levels, taking into account the characteristic parameters of both S1 and S2 structure types of hydrates. I created a regulation algorithm, utilising which, I was able to show that the model can predict the structure-dependent hydrate-formation pressure with accuracy, to the inhibitor injection.

8.1.2 THESIS II

I conceived a neural network based hydrate detection system. The detection system can, from the change of the pressure, predict the possible formation of hydrates. I devised an edge detecton system, which is capable of testing hydrate detection system. The exact number of edges in the data pools were determined using edge detection and the edges in the data pools were compared.

8.1.3 THESIS III

I conceived a neural network based, field-parameter employing, hydrate detection system. The detetion system can predict, from the change of multiple paramteres, such as pressure and temperature, the posible formation of hydrates while also incorporating in calculations the quality-number and quantity of the previously injected inhibitor.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Szilas, A. P.:** *Kőolaj és földgáz termelése és szállítása, I. Termelés kutakból*; ISBN: 963 05 4058 5; Budapest, 1985.
- [2] **Szilas, A. P.:** *Kőolaj és földgáz termelése és szállítása, II. Gyűjtés, szétválasztás és szállítás*; ISBN: 963 10 5687 2; Budapest, 1984.
- [3] **Hammerschmidt, E. G.:** *Formation of Gas Hydrates in Natural Gas Transmission Lines*; Industrial & Engineering Chemistry; 1934, 26 (8), pp 851–855
- [4] **Makogan, Y.:** *Hydrates of hydrocarbons*, Tulsa, Pennwell Books, 1997.
- [5] **Macpherson, C.; Glenat, P.; Mazloum, S.; Young, I.:** *Successful Deployment of a Novel Hydrate Inhibition Monitoring System in a North Sea Gas Field*, 23rd International Oil Field Chemistry Symposium, 18 – 21 March 2012, Geilo, Norway.
- [6] **Ghiasia, M. M.; Bahadorib, A.; Zendehboudic, S.; Jamilid, A.; Rezaei-Gomari, S.:** *Novel methods predict equilibrium vapor methanol content during gas hydrate inhibition*, Journal of Natural Gas Science and Engineering Volume 15, November 2013, Pages 69-75
- [7] **Kamaria, A.; Bahadorib, A.; Mohammadiac, A. H.; Zendehboudid, S.:** *New tools predict monoethylene glycol injection rate for natural gas hydrate inhibition*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries Volume 33, January 2015, Pages 222-231
- [8] **Suykens, J.A.K.; Vandewalle, J.:** *Least Squares Support Vector Machine Classifiers*, Neural Processing Letters, June 1999, Volume 9, Issue 3, pp 293–300
- [9] **Elgibaly, A.; Elkamel, A.:** *Optimal Hydrate Inhibition Policies with the Aid of Neural Networks*, Energy Fuels 1999, 13, 1, 105-113, November 20, 1998, <https://doi.org/10.1021/ef980129i>
- [10] **Mesbah, M.; Soroush, E.; Rezakazemi, M.:** *Development of a least squares support vector machine model for prediction of natural gas hydrate formation temperature*, Chinese Journal of Chemical Engineering Volume 25, Issue 9, September 2017, Pages 1238-1248
- [11] **Khamehchi, E.; Shamohammadi, E.; Yousefi, S. H.:** *Predicting the Hydrate Formation Temperature by a New Correlation and Neural Network*, Gas Processing Journal, Vol. 1 No. 1, January 2013 ISSN (Print): 2322-3251, PP. 41-50 2013 University of Isfahan
- [12] **Zahedi, G.; Karami, Z.; Yaghoobi, H.:** *Prediction of hydrate formation temperature by both statistical models and artificial neural network approaches*, Energy Conversion and Management Volume 50, Issue 8, August 2009, Pages 2052-2059
- [13] **Heydari, A.; Shayesteh, K.; Kamalzadeh, L.:** *Prediction of hydrate formation temperature for natural gas using artificial neural network*, Oil and Gas Business, 2006
- [14] **Zeinali, N.; Ameri, A.; Saber, M.:** *Comparative analysis of hydrate formation pressure applying cubic Equations of State (EoS), Artificial Neural Network (ANN) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)*, International Journal of Thermodynamics, Year 2012, Volume 15, Issue 2, Pages 91 - 101

- [15] **Moukhtar, A. R.; Hamdy, A. M.; Salem, S. A.:** *Design of a Prediction System for Hydrate Formation in Gas Pipelines using Wireless Sensor Network*, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 7, No. 9, 2016
- [16] **Amin, J. S.; Nejad, S. K. B.; Veiskarami, M.; Bahadori, A.:** *Prediction of hydrate formation temperature based on an improved empirical correlation by imperialist competitive algorithm*, Journal Petroleum Science and Technology Volume 34, 2016 - Issue 2, Pages 162-169
- [17] **Saghafi, H.; Yarveicy, H.:** *Gas hydrate stability conditions: modeling on the basis of gas gravity approach*, Journal Petroleum Science and Technology, Volume 37, 2019 - Issue 17, Pages 1938-1945
- [18] **Rodzep, M. N. B. M.:** *Application of Artificial Neural Network in Prediction of Methane Gas Hydrate Formation Rate*, Universiti Teknologi PETRONAS, 32610, Bandar Seri Iskandar, 2015
- [19] **Hesami, S. M.; Dehghani, M.; Kamali, Z.; Bakyani, A. E.:** *Developing a simple-to-use predictive model for prediction of hydrate formation temperature*, Journal International Journal of Ambient Energy Volume 38, 2017 - Issue 4 Pages 380-388
- [20] **Kolchin, A.:** *Analyze of Hydrate Formation with the use of Neural Network Technology*, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September-2 October, 2013, New Orleans, Louisiana, USA
- [21] **Vajari, S. M.:** *Development of Hydrate Inhibition Monitoring and Initial Formation Detection Techniques*, Heriot-Watt University Institute of Petroleum Engineering, February 2012
- [22] **Vida, M.:** *Gáztechnikai kézikönyv*; ISBN: 963 10 5687 2; Budapest, 1984.
- [23] **GasHydrate LLC. hivatalos honlapja** - <http://www.gashydratellc.com>
Utolsó letöltés: 2019.01.29.
- [24] **Ye, Y.; Liu, C.:** *Natural Gas Hydrates, Experimental Techniques and Their Applications*, Springer-Verlag Berlin, 2013, ISBN: 978-3-642-31100-0
- [25] **Bódi, T.:** *Föld alatti gáztárolás, gáztermelés*, Miskolc, 2003
- [26] **Ersland, G.; Graue, A.:** *Natural gas Hydrates*, University of Bergen, Norway
- [27] **von Stackelberg, M.; Müller, H. M.:** *Zeitschrift für Elektrochemie* 58, (1954)
- [28] **Sloan Jr, E. D.:** *Clathrate hydrates of natural gases*. Second edition, Marcel Dekker Inc.: New York. (1998), ISBN: 0827 99372
- [29] **Berecz, E.; Balla-Achs, M.:** *Gázhidrátok*, Akadémiai Kiadó, 1980, ISBN 963 05 2024 9
- [30] **Carroll, J.:** *Natural Gas Hydrates, A Guide for Engineers (Third Edition)*, Elsevier Inc, 2014, ISBN: 978-0-12-800074-8
- [31] **Desment, A.:** *Clathrate Hydrates: structure and dynamics* - <http://www.hydrate.eu/hydrate.html>
Utolsó letöltés: 2019.01.29.
- [32] **Y. Makogan** - *Hydrates of Natural Gas*, Pennwell, Tulsa, OK, 1981
- [33] **Sloan Jr, E. D.:** *Clathrate hydrates of natural gases*. Second edition, Marcel Dekker Inc.: New York. (1998), ISBN: 0827 99372
- [34] **Sloan, E. D. Jr.; Koh, C.:** *Clathrate Hydrates of Natural Gases*, 2007
- [35] **Szezepanski, R.; Edmonds, B.; Brown, N.; Hamilton, T.:** *Research provides clues to hydrate formation and drilling — hazard solutions*, Oil & Gas Journal (Mar. 9, 1998), pp52—56.

- [36] **Ballard, A. L.; Sloan, E. D. Jr.:** *The Next Generation of Hydrate Prediction: An Overview*, Journal of Supramolecular Chemistry 2 (2002) 385–392
- [37] **Y. F. Makogon:** *Natural gas hydrates – A promising source of energy*, Journal of Natural Gas Science and Engineering 2 (2010) 49–59
- [38] **Anderson, F. E.; Prausnitz, J. M.:** *Inhibition of gas hydrates by methanol*, AIChE Journal, Volume 32, Issue 8, August 1986, Pages 1321–1333
- [39] **Cha, M.; Shin, K.; Kim, J.; Chang, D.; Seo, Y.; Lee, H.; Kang, S-P.:** *Thermodynamic and kinetic hydrate inhibition performance of aqueous ethylene glycol solutions for natural gas*, Chemical Engineering Science, Volume 99, 9 August 2013, Pages 184–190
- [40] **Sloan, E. D.; Subramanian, S.; Matthews, P. N.; Lederhos, J. P.; Khokhar, A. A.:** *Quantifying Hydrate Formation and Kinetic Inhibition*, Industrial & Engineering Chemistry Research 1998 37 (8), pp 3124–3132
- [41] **Boxall, J.; May E.:** *Formation of gas hydrate blockages in under-inhibited conditions*, 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011), Edinburgh, Proceeding, 2011
- [42] **Jónap, K.; Füvesi, V.; Vörös, Cs.; Vágó, Á.; Tornyai, L.:** *Analyses and Field Applications of Gas Hydrate Inhibitors*, Journal “Nafta I Plin” (Oil & Gas), 2015
- [43] **Lederhos, J. P.; Long, J. P.; Sum, A.; Christiansen, R. L.; Sloan Jr, E. D.:** *Effective Kinetic Inhibitors For Natural Gas Hydrates*, Chemical engineering Sciences, Vol. 51., No.8. pp. 1221–1229, 1996
- [44] **Kellanda, M. A.; Svartaas, T. M.; Ovsthus, J.; Tomita, T.; Chosa, J.:** *Studies on some zwitterionic surfactant gas hydrate anti-agglomerants*; Chemical Engineering Science 61 (2006) 4048 – 4059
- [45] **Gao, S.:** *Hydrate Risk Management at High Watercuts with Anti-agglomerant Hydrate Inhibitors*, Energy & Fuels 2009 23 (4), pp 2118–2121
- [46] **Frostman, L.M.:** *Anti-Agglomerant Hydrate Inhibitors for Prevention of Hydrate Plugs in Deepwater Systems*, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, USA, 1–4 October, 2000,
- [47] **Huo, Z.; Freer, E.; Lamaa, M.; Sannigrahi, B.; Knauss, D. M.; Sloan Jr, E. D.:** *Hydrate plug prevention by anti-agglomeration*; Chemical Engineering Science 56 (2001) 4979–4991
- [48] **Talaghat, M. R.; Esmaeilzadeh, F.; Fathikaljahi, J.:** *Experimental and theoretical investigation of simple gas hydrate formation with or without presence of kinetic inhibitors in a flow mini-loop apparatus*, Fluid Phase Equilibria 279 (2009) 28–40
- [49] **Talaghat, M. R.:** *Intensification of the performance of kinetic inhibitors in the presence of polyethylene oxide and polypropylene oxide for simple gas hydrate formation in a flow mini-loop apparatus*, Fluid Phase Equilibria 289 (2010) 129–134
- [50] **Gao, S. Q.:** *Hydrate risk management at high watercuts with anti-agglomerant hydrate inhibitors*, Energy Fuels, 2009, 23, 2118–2121.
- [51] **Kelland, M. A.:** *History of the development of low dosage hydrate inhibitors*, Energy Fuels, 2006, 20, 825–847.
- [52] **Sudduth, K. A.; Borgelt, S. C.; Hou, J.:** *Performance of a Chemical Injection Sprayer System*, American Society of Agricultural Engineers, Vol. 11 (3), 1995, pp 343 – 348.
- [53] **Bai, Y.; Bai, Q.:** *Subsea Pipelines and Risers*, 2005, Pages 357–382

- [54] **Zrínyi, M.:** *A fizikai kémia alapjai*, Semmelweis Kiadó, Budapest, 2015, ISBN 978-963-331-367-1
- [55] **KFKI közlemények - Szabados, L.:** *A difenil-benzol elegy termodinamikai vizsgálata I. Fázisegyensúly*, MTA Központi Fizikai Kutató Intézet Könyvtár- és Kiadói Osztálya, Budapest, 1967
- [56] **Imre, A.:** *Stabilitás és fázisfenetek kondenzált anyagokban*, MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest 2014
- [57] **Karamoddin, M.; Varaminian, F.:** *Prediction of Gas Hydrate Forming Pressures by Using PR Equation of State and Different Mixing Rules*, Iranian Journal of Chemical Engineering, Vol. 8, No. 1 (Winter), 2011, IChE
- [58] **Klauda, J. B.; Sandler, S. I.:** *Phase behavior of clathrate hydrates: a model for single and multiple gas component hydrates*, Chemical Engineering Science 58 (2003) 27 – 41
- [59] **Platteeuw J. C.; Van der Waals, J. H.:** *Thermodynamic Properties of Gas Hydrates II. Phase Equilibrium in the System*, (1959), DOI: 10.1002/recl.19590780208
- [60] **Varaminian, F.:** *Transportation of natural gas by hydrates*, Ph.D thesis, Tehran University, Iran, (2000)
- [61] **Csordásné Marton, M.:** *Matematika példatár 7., Lineáris algebra II.*, (2010) Nyugat-magyarországi Egyetem, Digitális tankönyvtár - <https://www.tankonyvtar.hu/>
Utolsó letöltés: 2019.03.04
- [62] **Mészáros, J.:** *Numerikus módszerek*, (2011), Miskolci Egyetem, Digitális tankönyvtár - <https://www.tankonyvtar.hu/>
Utolsó letöltés: 2019.03.04
- [63] **Charnes, A.; Frome, E. L.; Yu, P. L.:** *The Equivalence of Generalized Least Squares and Maximum Likelihood Estimates in the Exponential Family*, 1976, Journal of the American Statistical Association. 71 (353): 169–171.
- [64] **Aldrich, J.:** *Doing Least Squares: Perspectives from Gauss and Yule*, 1998, International Statistical Review. 66 (1): 61–81.
- [65] **Gisbert, S.:** *MATLAB - Numerikus módszerek, grafika, statisztika, eszköztárak*, 2011, Typotex Kiadó, ISBN: 978-963-2794-40-2
- [66] **Szilágyi, B.:** *MATLAB, Control System Toolbox, Simulink*, 2001, Budapest, Műegyetemi Kiadó
- [67] **Ghavipour, M.; Ghavipour, M.; Chitsazan, M.; Najibi, S. H.; Ghidary, S. S.:** *Experimental study of natural gas hydrates and a novel use of neural network to predict hydrate formation conditions*, Chemical Engineering Research and Design 91 (2013) 264–273
- [68] **Schultz, J. M.:** *Az anyagvizsgálat diffrakciós módszerei*, Műszaki Könyvkiadó, (1987)
- [69] **Mink, J.:** *Atom- és molekulaszpektroszkópia, Az infravörös és Raman spektroszkópia alapjai*, Veszprémi Egyetem, Analitikai Kémiai Tanszék, Egyetemi jegyzet
- [70] **Hore, P. J.:** *Mágneses magrezonancia*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2004.
- [71] **Sohár, P.:** *Mágneses magrezonancia-spektroszkópia*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1976.

- [72] May, E. F.; Wu, R.; Kelland, M. A.; Aman, Z. M.; Kozielski, K. A.; Hartley, P. G.; Maeda, N.: **Quantitative kinetic inhibitor comparisons and memory effect measurements from hydrate formation probability distributions**, *Chemical Engineering Science* **107** (2014) 1-12
- [73] Naeiji, P.; Arjomandi, A.; Varaminian, F.: *Amino acids as kinetic inhibitors for tetrahydrofuran hydrate formation: Experimental study and kinetic modeling*, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* **21** (2014) 64-70
- [74] Karamoddin, M.; Varaminian, F.: *Study on the growth process of HCFC141b hydrate in isobaric system by a macroscopic kinetic model*, *International Journal of Refrigeration* **44** (2014) 66-72
- [75] Kumar, A.; Sakpal, T.; Linga, P.; Kumar, R.: *Influence of contact medium and surfactants on carbon dioxide clathrate hydrate kinetics*, *Fuel* **105** (2013) 664-671
- [76] Greene, C. A.; Wilson, P. S.; Coffin, R. B.: *Acoustic determination of methane hydrate dissociation pressures*, *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*; Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17-21, 2011
- [77] Wilson, P. S.; Reed, A. H.; Wood, W. T.; Roy, R. A.: *The low-frequency sound speed of fluid-like gas-bearing sediments*, *The Journal of the Acoustical Society of America: Express Letters*, 123:99-104, 2008
- [78] Jun Chen, J.; LeYan, K.; Chen, G-J.; Sun, C-Y.; Liu, B.; Ren, N.; Shen, D. J.; Sum, A. K.: *Insights into the formation mechanism of hydrate plugging in pipelines*, *Chemical Engineering Science* **122** (2015) 284-290
- [79] Yan, K. L.; Sun, C-Y.; Chen, J.; Chen, L-T.; Shen, D-J.; Liu, B.; Jia, M-L.; Niu, M.; Lv, Y-N.; Li, N.; Song, Z-Y.; Niu, S-S.; Chen, G-Y.: *Flow characteristics and rheological properties of natural gas hydrate slurry in the presence of anti-agglomerant in a flow loop apparatus*, *Chemical Engineering Science* **106** (2014) 99-108
- [80] Li, X.; Hemmingsen, P. V.; Kinnari, K.: *Use of under-inhibition in hydrate control strategies*, *Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011)*; Edinburgh, Scotland, United Kingdom, July 17-21, 2011.
- [81] Tóth, P.; Bulla, M.; Nagy, G.: *Energetika*, (2011), Digitális tankönyvtár - <https://www.tankonyvtar.hu/>
Utolsó letöltés: 2019.03.12
- [82] Altrichter, M.; Horváth, G.; Pataki, B.; Strausz, Gy.; Takács, G.; Valyon, J.: *Neurális hálózatok*, 2006 Hungarian Edition Panem Könyvkiadó Kft., Budapest, ISBN: 9-635454-64-3
- [83] Pratiwi, D.; Santika, D. D.; Pardamean, B.: *An Application Of Backpropagation Artificial Neural Network Method for Measuring The Severity of Osteoarthritis*, *International Journal of Engineering & Technology, IJET-IJENS*, Vol. 11, No. 03, pp. 102-105.
- [84] Singh, A.; Panda, R. K.; Pramanik, N.: *Appropriate Data Normalization Range for Daily River Flow Forecasting Using Artificial Neural Network*, *Proc. of Symposium JS. 4 at Joint Convention of 8th IAHS and 37th IAH*, Hyderabad, India, 2009, pp 51-57.
- [85] Füvesi, V.: *Neurális hálózatokon alapuló modellezés és hibadiagnosztika villamos hajtások példáján keresztül*, PhD értekezés, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolc, 2014. DOI: 10.14750/ME.2014.018

- [86] **Russell, S.; Norvig, P.:** *Mesterséges intelligencia, Modern megközelítésben*, Második, átdolgozott, bővített kiadás, Budapest, Panem Kiadó, 2005, ISBN 963-545-411-2
- [87] **Csörgeiné Kurin, K.; Gáspár, V.; Horváth, D.; Orbán, M.; Szalai, I.; Tóth, Á.:** *Nemlineáris dinamika: Önszerveződés kémiai és biológiai rendszerekben*, Szegedi Tudományegyetem, 2013, Digitális tankönyvtár - <https://www.tankonyvtar.hu/> Utolsó letöltés: 2019.03.20.
- [88] **Fazekas I.:** *Neurális hálózatok*, Debrecen, 2013, TÁMOP-4.1.2.A/1-11/1-2011-0103
- [89] **Rosenblatt, F.:** *The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization of the Brain*, Psychol. Rev., Vol. 65. 1958, pp. 386–408.
- [90] **Widrow, B.; Hoff, M. E.:** *Adaptive Switching Circuits*, IRE WESCON Convention Record, 1960, pp. 96–104.
- [91] **Horváth, G.:** *Neurális Hálózatok*, Budapesti Műszaki és Gazdasági Egyetem, Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék, 2011, SlidePlayer - <https://slideplayer.hu/> Utolsó letöltés: 2019.03.20.
- [92] **Horváth G.:** *Neurális hálózatok és műszaki alkalmazásai*, Műszaki Egyetem, 2006, Budapest, ISBN: 9634205771
- [93] **Botzheim, J.:** *Intelligens számítástechnikai modellek identifikációja evolúciós és gradiens alapú tanuló algoritmusokkal*, Ph.D. Értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Távközlési és Médiainformatikai Tanszék, Budapest, 2007.
- [94] **Taylor, M.:** *Make Your Own Neural Network: An In-depth Visual Introduction For Beginners*, Kindle Edition, 2017, ASIN: B075882XCP
- [95] **Rashid, T.:** *Make Your Own Neural Network*, Kindle Edition, 2016, ASIN: B01EER4Z4G
- [96] **Neelekantan, P.; Reddy, A. R. M.:** *Decentralized load balancing in distributed systems*, Pollack Periodica, Vol. 9, No. 2, 2014, pp. 15–28.
- [97] **Bakó, L.; Brassai, S. T.:** *Embedded neural controllers based on spiking neuron models*, Pollack Periodica, Vol. 4, No. 3, 2009, pp. 143–154
- [98] **Nørgaard, M.; Ravn, O.; Poulsen, N. K.; Hansen L. K.:** *Neural networks for Modelling and Control of Dynamic Systems*, Springer-Verlag, London, UK, 2000.
- [99] **Füvesi, V.; Kovács, E.:** *Separation of Faults of Eletromechanical Drive Chain using Artificial Intelligence Methods*, 18th “Building Services, Mechanical and Building Industry days” Int. Conf., Debrecen, Hungary, (2012) pp. 19-27.
- [100] **Norgaard, M.; Ravn, O.; Hansen, L. K.; Poulsen, N. K.:** *The NNSYSID toolbox - A MATLAB toolbox for system identification with neural network*, Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design, Dearborn, MI, 15-18 September 1996, pp. 374–379
- [101] **Kézi, Cs. G.; Szíki G. Á.; Vámosi A.; Vinczéné V. A.:** *Matematikai szoftverek alkalmazása műszaki számításokban*, 2014, Budapest
- [102] **Littlefield, B. L.:** *Mastering Matlab 7*, 2004, PEARSON, I SBN: 0131857142
- [103] **Canny, J.:** *A computational approach to edge detection*, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 8, 6 (Nov. 1986), pp. 679-698

- [104] **Konyha, J.; Bányai T.:** *Approach to accelerate algorithms to solve logistic problems with GPGPU*, Advanced Logistic Systems, Vol. 10, No. 2, 2016, pp. 5–10.
- [105] **Konyha, J.; Bányai T.:** *Sensor networks for smart manufacturing processes*, Solid State Phenomena, Vol. 261, 2017, pp. 456–462.
- [106] **L. Farkas:** *Nemhagyományos villamos energiaátalakítók, mérési útmutató*, BME Villamos Energetikai tanszék, 2004
- [107] **Vörös, Cs.; Füvesi, V.; Pintér, Á.:** *Design of a new chemical injection pump system*, Proceedings of Factory Automation 2013: Factory automation. Veszprém, Magyarország, 2013.05.21-2013.05.22. Veszprém: University of Pannonia, 2013. pp. 124-127.
- [108] **Xenakis, C.; Gazis, E.; Merakos, L.:** *Secure VPN Deployment in GPRS Mobile Networks - The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - PIMRC 2002*, 2002, pp. 1260 - 1265.
- [109] **Bruns, R.; Dunkel, J.; Masbruch, H.; Stipkovic, S.:** *Intelligent M2M: Complex event processing for machine-to-machine communication*, Expert Systems with Applications Volume 42, Issue 3, 15 February 2015, pp. 1235–1246
- [110] **Boquete, L.; Bravo, I.; Barea, R.; Garcia, M. A.:** *Telemetry and control system with GSM communications*, Microprocessors and Microsystems, Volume 27, Issue 1, 1 February 2003, pp. 1-8
- [111] **Natarajan, S.; Srinivasan, R.:** *Multi-model based process condition monitoring of offshore oil and gas production process*, Journal of Chemical Engineering Research and Design 88 (2010) pp. 572 - 591.
- [112] **Kamel, S.; Wahba, K.:** *GPRS security as a QoS in the telecommunication industry case of Vodafone Egypt*, International Journal of Information Management, Volume 24, Issue 1, February 2004, pp. 5-27

SAJÁT PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN

Folyóiratcikkek

- [S1] **Bölkény, I.:** *Neural Network Based Detection of Gas Hydrate Formation* Journal of Electrical and Electronics Engineering 13:2 ID2104. (2020) E-ISSN: 2067-2128, DOI 10.1556/606.2018.13.2.14
- [S2] **Bölkény, I.; Czap, L.:** *AI based detection of gas hydrate formation in the field*, Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences 15:x pp. xx-xx. (2020) ISSN 1788-1994, DOI 10.1556/606.2020.15.x.x;
- [S3] **Bölkény, I.; Füvesi, V.:** *AI based predictive detection system* Pollack Periodica: An International Journal for Engineering and Information Sciences 13:2 pp. 137-146. (2018) ISSN 1788-1994, DOI 10.1556/606.2018.13.2.14
- [S4] **Bölkény, I.; Füvesi, V.; Vörös, Cs.:** *Hydrate discharge on the field* GÉP 2016/5-6., pp. 18-21.(2016), ISSN 0016-8572

- [S5] **Bölkény, I.; Konyha, J.; Jónap, K.; Vörös, Cs.:** – *Hidrátgátlási technológiák, eredmények és jövőbeli lehetőségei az elmúlt 15 év mérései és projektjei alapján*, Műszaki Földtudományi Közlemények 85:(1) pp. 30-40. (2015), HU ISSN 2063-5508

Konferencia kiadványok

- [S6] **Bölkény, I.:** *AI Based Detection of Gas Hydrate Formation*, 17th IMEKO TC 10 and EUROLAB Virtual Conference: “Global Trends in Testing, Diagnostics & Inspection for 2030”, Zagreb, Horvátország, International Measurement Confederation (IMEKO) 2020. pp. 202-207 ISBN: 9789299008461
- [S7] **Bölkény, I.; Konyha, J.; Godó, L.:** *Prediktív, hidrát-képződést detektáló rendszer*, XIX. ENELKO – Energetika-Elektrotechnika és XXVIII. SzámOkt – Számítástechnika és Oktatás Multi-Konferencia, Tusnádfürdő, 2018. 10. 11-14. ISSN 1842-4546
- [S8] **Bölkény, I.; Konyha, J.; Subert, J.; Szopkó, Sz.; Vörös, Cs.:** *MI alapú prediktív detektáló és adagoló rendszer*, XXXI Nemzetközi Olaj- és Gázipari Konferencia, Kiállítás, Siófok, 2017. 10. 4-6.
- [S9] **Bölkény, I.; Konyha, J.; Füvesi, V.; Szopkó, Sz.:** *Digital control algorithms in order to continuous gas production*, Tavaszi Szél 2017 Tanulmánykötet. III. kötet., pp. 15-25. (2017) ISBN 978-615-5586-18-7, DOI: 10.23715/TSZ.2017.3
- [S10] **Bölkény, I.:** *Modell alapú gázhidrát mentesítés*, Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016, pp. 64-70. (2016) ISBN 978-963-7064-33-3
- [S11] **Bölkény, I.; Füvesi, V.:** *Modelling and detection of gas hydrate appearance*, Proceedings of the 2016 17th International Carpathian Control Conference (ICCC). 835 p., 978-1-4673-8605-0
- [S12] **Bölkény, I.; Füvesi, V.; Konyha, J.:** *Analyses of gas hydrate and a detection methode*, MultiScience – XXX. microCAD, Miskolc, 21-22 April 2016, ISBN:978-963-358-113-1
- [S13] **Bölkény, I.:** *Measurement and Analysis of Hydrate Formation*, 16th International Carpathian Control Conference, 2015. május 27-30.
- [S14] **Bölkény, I.; Konyha, J.:** *Prevention of Hydrate Formation on Gas Well*, MultiScience – XXIX. microCAD, Miskolc, 9-10 April 2015, ISBN:978-963-358-061-5
- [S15] **Bölkény, I.; Rónai, L.:** *Regulation of an Inhibitor Dosing System*, MultiScience – XXVIII. microCAD, Miskolc, 10-11 April 2014. ISBN: 978-963-358-051-6
- [S16] **Bölkény, I.; Rónai, L.:** *Hidrát képződés megakadályozása a Szeghalom 29-es gázkútnál*, DCS-19: Folyamatirányító rendszerek XIX. Találkozó, Miskolc; Lillafüred, 2013.10.28 - 30.,
- [S17] **Bölkény, I.; Szabó, G.:** *Olaj- és gáziparban alkalmazott adagoló rendszerek*, microCAD 2013: XXVII. International Scientific Conference. Miskolc, 2013.03.21 – 23 ISBN: 978-963-358-019-9
- [S18] **Bölkény, I.; Vörös, Cs.; Kurucz, Zs.; Papp, Z.:** *Gas and oil well site off-line and on-line data collection technologies*, Distributed Control Systems 18th Meeting. Miskolc; Lillafüred, Magyarország, 2012.10.24 – 26.
- [S19] **Bölkény, I.; Jónap, K.:** *Up-to-date Control Solutions for Gas Storages*, The First Central and Eastern European International Oil and Gas Conference and Exhibition, 2011. szeptember 14-16.

Kutatási jelentések

- [S20] **Vörös, Cs.; Jónap, K.; Bölkény, I.:** Gázhidrátok kialakulása, vizsgálata, modellezése, hidrát gátlási módszerek, Irodalmi összefoglaló; Miskolc, 2014
- [S21] **ME AFKI:** Dinamikus laboratóriumi modellberendezés felújítása - Az originális hidrát kiválást gátló inhibitor az Algyői segédgáz rendszerre történő alkalmazás kiterjesztéséhez - 120 bar nyomáshoz; Miskolc, 2014
- [S22] **SCADA KFT.; ME AFKI:** Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése; GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „0” jelű alprojekt, Megvalósíthatósági tanulmány; Miskolc, 2012
- [S23] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „1” jelű projekt – METAN: Megvalósíthatósági Tanulmány, JEL-01 jelentés - 2013
- [S24] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „2a” jelű projekt – KIV: Kereskedelmi Inhibitorok Vizsgálata, JEL-02 jelentés - 2013
- [S25] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „2b” jelű projekt – PEIV: PE MÜKKI Inhibitorok Vizsgálata, JEL-03 jelentés - 2013
- [S26] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „3b” jelű projekt – VVRT: Villamos Vegyszeradagoló Rendszerterv, JEL-05 jelentés - 2013
- [S27] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „3ba” jelű projekt – MMVTT: Motoros Működtetésű Vegyszeradagoló Terepi Teszt, JEL-06 jelentés - 2013
- [S28] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „3bb” jelű projekt – MVTT: Mágneses Vegyszeradagoló Terepi Teszt, JEL-07 jelentés - 2013
- [S29] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „4a” jelű projekt – RKTm: Rádiós Kommunikáció Terepi Monitorozás, JEL-08 jelentés - 2013
- [S30] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „4b” jelű projekt – IMRT: Ipari Monitoring Rendszer Teszt, JEL-09 jelentés - 2013

- [S31] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „4c” jelű projekt – NHT: Napelem Használhatósági Tanulmány, JEL-10 jelentés – 2013
- [S32] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „4d” jelű projekt – PAMR: Pneumatikus Adagoló Monitoring Rendszer Alkalmazása, JEL-11 jelentés – 2013
- [S33] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „4e” jelű projekt – VVKA: Villamos Vegyszeradagoló Kútkörzeti Alkalmazása, JEL-12 jelentés - 2013
- [S34] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „5a” jelű projekt – SART: Szerver Állomás Rendszerv, JEL-13 jelentés - 2013
- [S35] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „5b” jelű projekt – SAM: Szerver Állomás Megvalósítás, JEL-14 jelentés - 2013
- [S36] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „6a” jelű projekt – ASRT: Adatszolgáltatás Rendszerv, JEL-15 jelentés – 2013
- [S37] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „6b” jelű projekt – ASM: Adatszolgáltatás Megvalósítás, JEL-16 jelentés – 2013
- [S38] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „7a” jelű projekt – GMRE: Gázkutak Monitoring Rendszerének Értékelése, JEL-17 jelentés - 2013
- [S39] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „7b” jelű projekt – VARME: Villamos Adagoló Rendszer Működtetés Értékelése, JEL-18 jelentés - 2013
- [S40] **Jónap, K.; Bölkény, I.; Füvesi, V.; Subert, J.; Vörös, Cs.; Tornyai, L., Papp, Z.:** *Nagy inert tartalmú földgázok kitermelését támogató komplex hidrátgátló technológia kutatása és fejlesztése* GOP 1.1.1-09/1-2010-0114, „8” jelű projekt – TKFPK: Teljes K+F projekt Kiértékelése, JEL-19 jelentés – 2013

MELLÉKLETEK

M1 táblázat.....	XII
M2 táblázat.....	XII
M3 egyenlet.....	XII
M4 egyenlet.....	XII
M5 diagram.....	XIII
M6 diagram.....	XIII
M7 ábra	XIV
M8 ábrák	XIV
M9 ábrák	XV
M10 táblázat.....	XVII
M11 ábra.....	XVIII
M12 táblázat.....	XIX

M1. táblázat – k_{ij} értéke különböző elegyek esetén a Van der Waals keverési szabályhoz [57]

Elegy	k_{ij} értéke
metán-víz	-0,35022
etán-víz	-0,22093
propán-víz	-0,25718
bután-víz	-0,31265
karbon dioxid-víz	-0,14304
kén-hidrogén-víz	-0,02670

M2. táblázat – Kihara potenciál paraméterei [60]

Komponens	a [Å]	σ [Å]	ε/k [1/K]
metán	0,295	3,2512	153,69
etán	0,488	3,4315	183,32
propán	0,73	3,49	189,27
iso bután	0,798	3,6	209,58
normál bután	1,029	3,4	195,36
karbon dioxid	0,753	2,904	171,97
kén-hidrogén	0,717	2,877	210,5

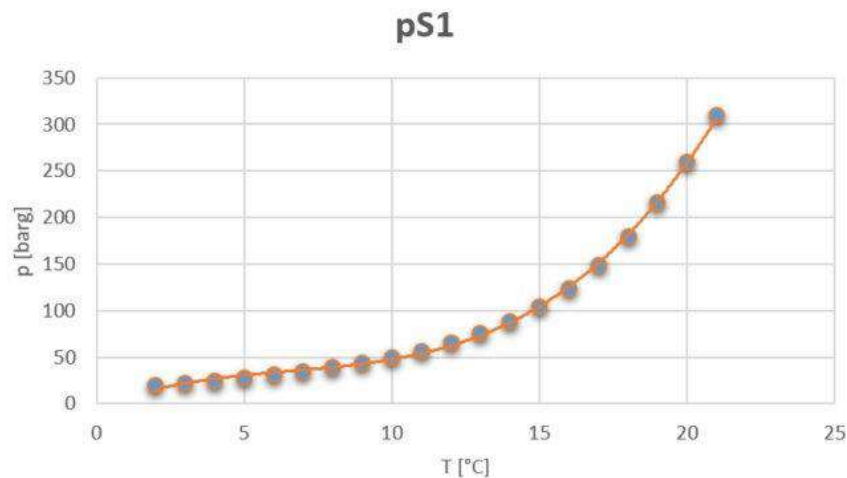
M3. egyenlet – (21) egyenlet az S1 struktúra esetén

$$\begin{bmatrix} 53360 & 3310 & 230 & 1 \\ 917146 & 53360 & 3310 & 230 \\ 16417400 & 917146 & 53360 & 3310 \\ 302221930 & 16417400 & 917146 & 53360 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \gamma_{S1} \\ \delta_{S1} \\ \omega_{S1} \\ \mu_{S1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1919,23 \\ 30691,48 \\ 535962,58 \\ 9780900,94 \end{bmatrix}$$

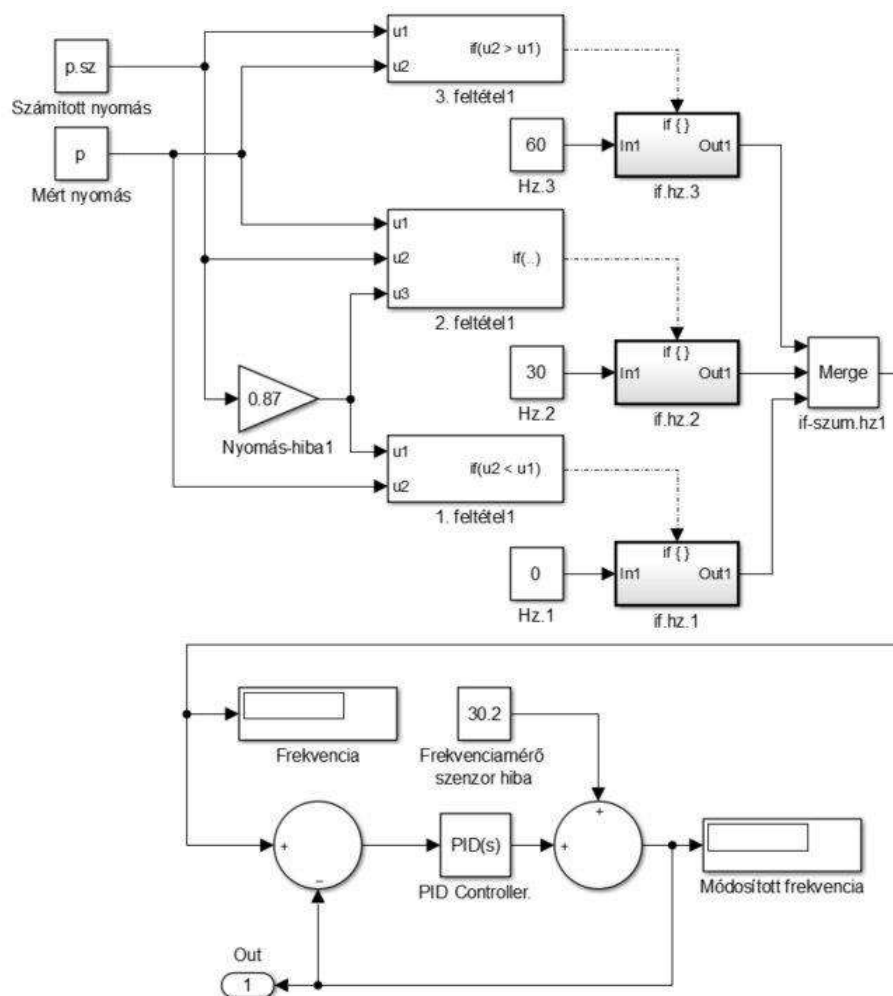
M4. egyenlet – Polinomiális együtthatók a (21) egyenlethez, az S1 és S2 struktúra esetén

$$\begin{bmatrix} \gamma_{S1} \\ \delta_{S1} \\ \omega_{S1} \\ \mu_{S1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,07350255 \\ -1,3830179 \\ 11,1949107 \\ 0,0938854 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \gamma_{S2} \\ \delta_{S2} \\ \omega_{S2} \\ \mu_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0590845 \\ -1,1844889 \\ 7,8274983 \\ 0,4996434 \end{bmatrix}$$

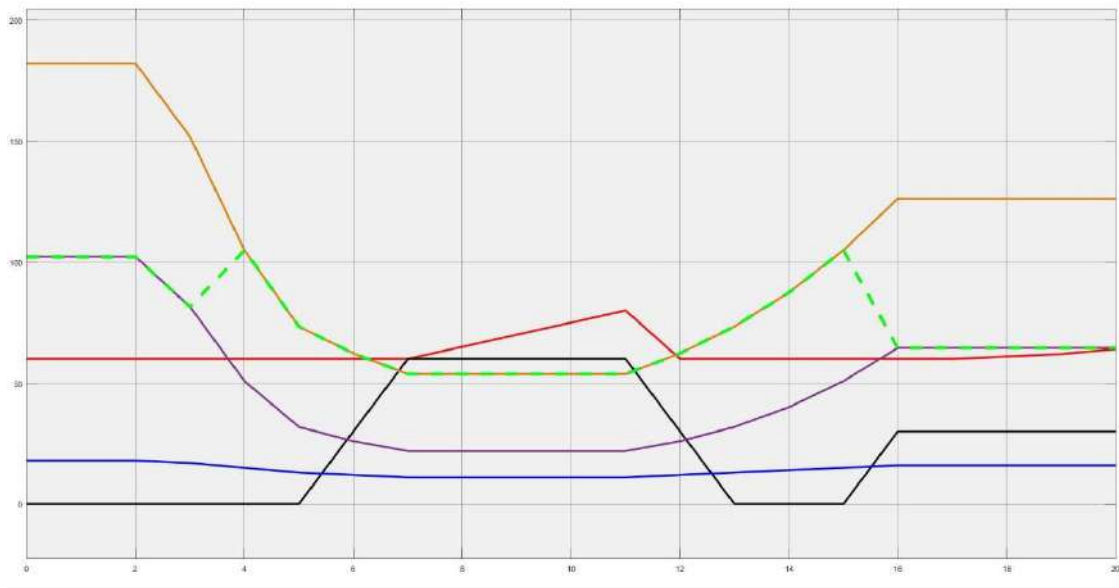
M5. diagram – A pontok illesztése a görbére S1 struktúra esetén



M6. diagram – A szabályozás



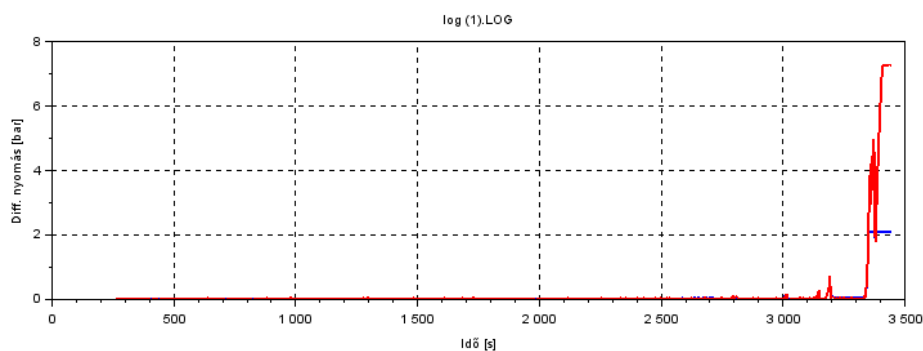
M7. ábra – A teljes szabályozás működés közben

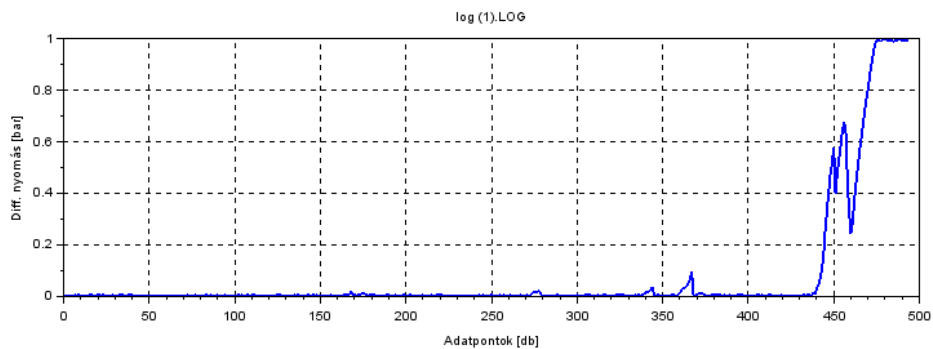
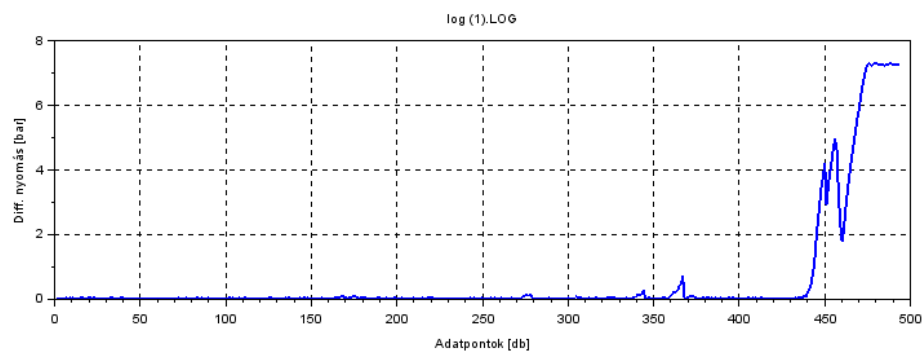
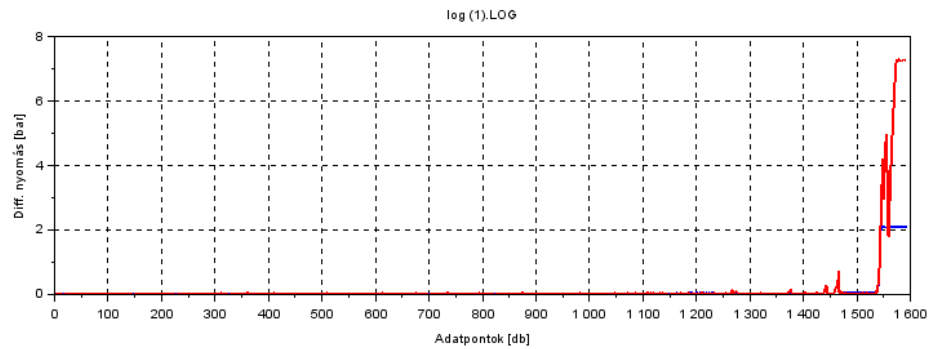


Ahol az egyes színek az alábbiakat jelölik:

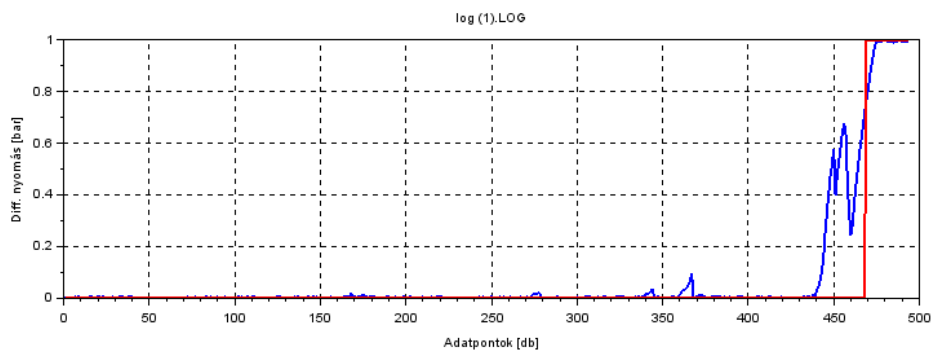
- Narancs – az S1 struktúrához tartozó számított egyensúlyi görbe
- Lila – az S2 struktúrához tartozó számított egyensúlyi görbe
- Piros – nyomás (a jelet ezen ábrához generáltam, így azok a valóságnak nem felelnek meg, azok csak a rendszer megértését segítik elő)
- Kék – hőmérséklet (a jelet ezen ábrához generáltam, így azok a valóságnak nem felelnek meg, azok csak a rendszer megértését segítik elő)
- Világoszöld (szaggatott) – a szabályozás alapját képző nyomás alapjel
- Fekete – beavatkozó jel

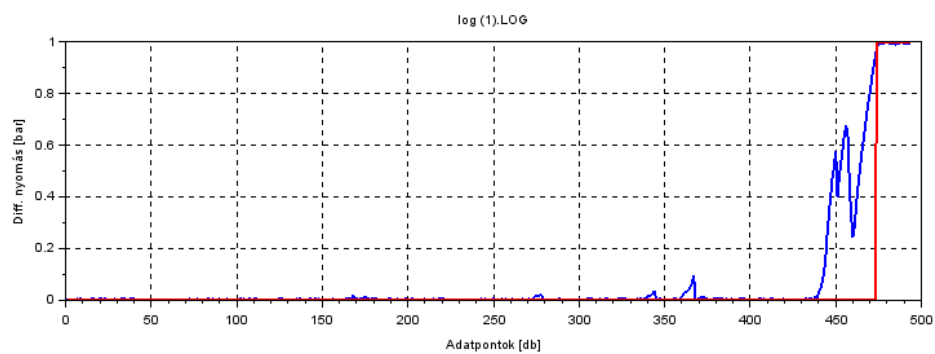
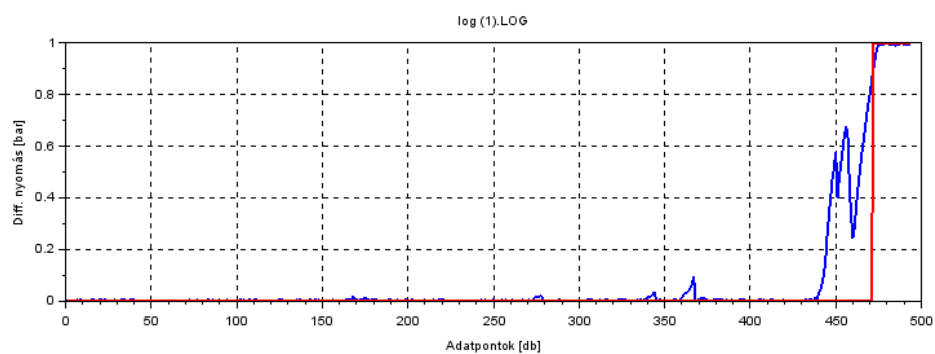
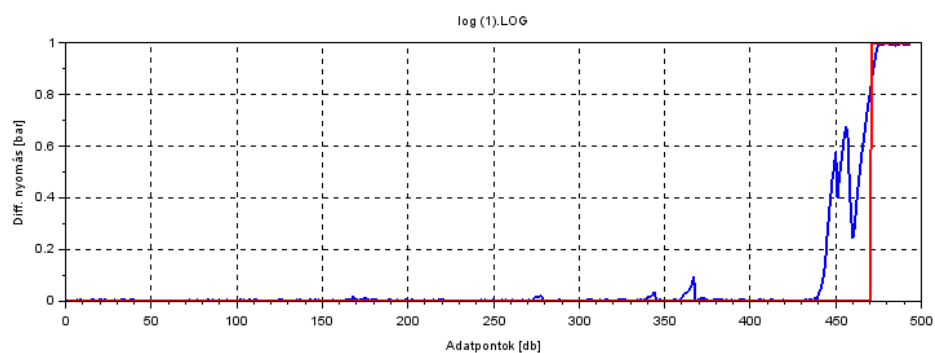
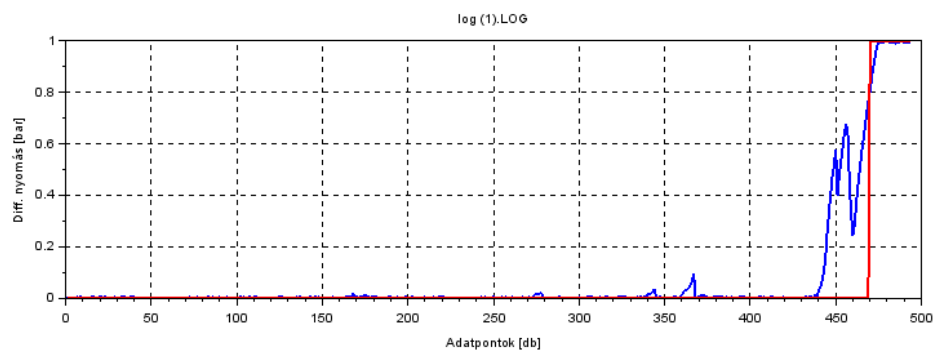
M8. ábrák – Az adatok skálázása

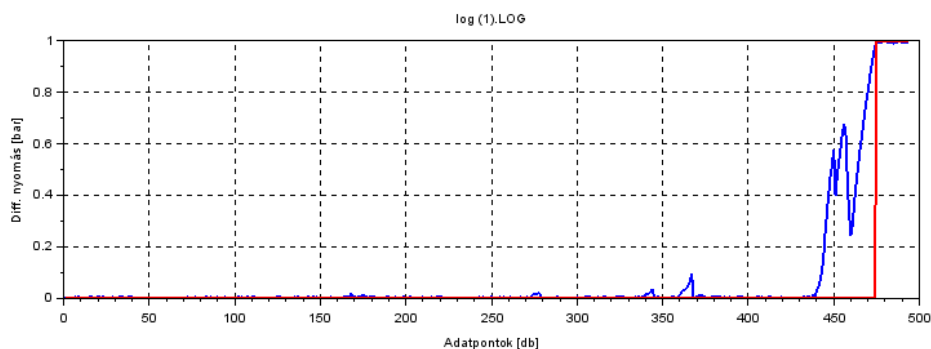




M9. ábrák – Riasztási szintek (75-80-85-90-95-99%)



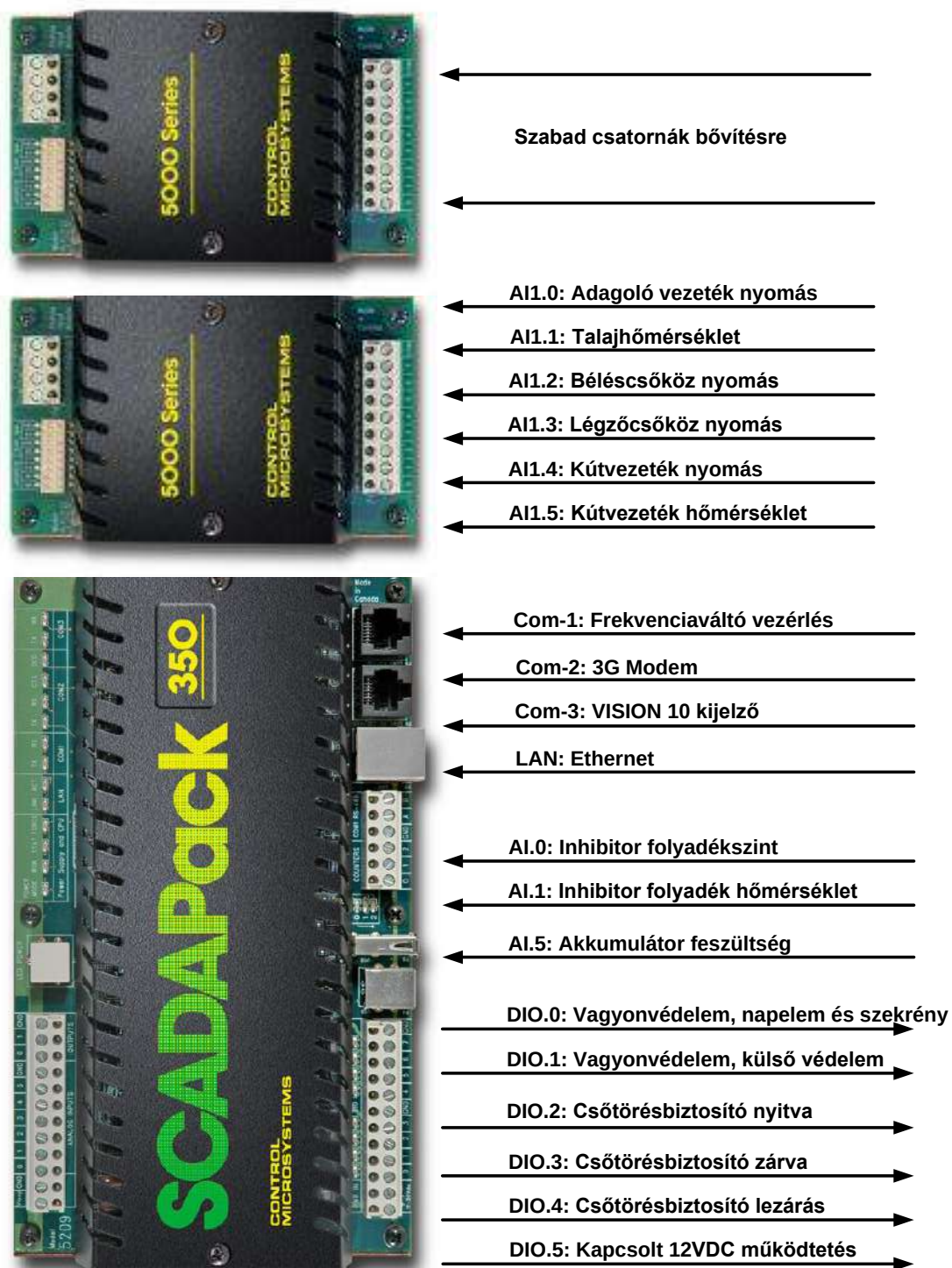




M10. táblázat – A csővezetéki áramlásokat szimuláló modellberendezés elemeinek megnevezése és tulajdonságai

Jelölés	Megnevezés	Tulajdonság
SZ-01	Reduktor (Swagelok)	Max nyomás: 415 bar
SZ-02	On/Off szelep (Swagelok)	Max nyomás: 206 bar
SZ-03	On/Off szelep (Swagelok)	Max nyomás: 206 bar
SZ-04	On/Off szelep (Swagelok)	Max nyomás: 206 bar
SZ-05	On/Off szelep (Swagelok)	Max nyomás: 206 bar
SZ-06	On/Off szelep (Swagelok)	Max nyomás: 206 bar
SZ-07	On/Off szelep (Swagelok)	Max nyomás: 206 bar
SZ-08	On/Off szelep (Swagelok)	Max nyomás: 206 bar
SZ-09	On/Off szelep (Tescom)	Max nyomás: 206 bar
SZ-10	Szabályozó szelep	Max nyomás: 206 bar
SZIV-01	Szivattyú rétegvízhez	Nyomástartomány: 0-200 bar
SZIV-02	Szivattyú inhibitorhoz	Nyomástartomány: 0-200 bar
TC-01	Folyadék termosztát	Hőmérséklettart.: -20-200°C
MS-01	Mágnes-szelep	Teljesítmény: 10 W
MS-02	Mágnes-szelep	Teljesítmény: 10 W
FS-01	Fűtőszál	Teljesítmény: 60 W/m
FS-02	Fűtőszál	Teljesítmény: 60 W/m
TA-01	Lebegődugattyús cella	Maximum 200 bar-ig
TT-5	Hőmérséklet távadó	Hőmérséklettart.: -10-100°C
PT-1	Nyomástávadó	Nyomástartomány: 0-200 bar
PT-2	Nyomástávadó	Nyomástartomány: 0-200 bar
PT-3	Nyomáskülönbség távadó	Nyomástartomány: 0-2 bar
PT-4	Nyomáskülönbség távadó	Nyomástartomány: 0-7 bar
FT-6	Tömegáram távadó	Méréstartomány: 0,3-15 nl/min
GT	Gáztartály	Maximum 150 bar-ig
SE-01	Szeperator cella	Hasznos űrtartalom: 60 cm ³
LC-01	Látóüveges cella	Átmérő: 70 mm
TE-01	Termosztát	Hőmérséklettart.: -10-100°C

M11. ábra – A ScadaPack 350 kiosztása



M12. táblázat – A Szeghalom 29-en elhelyezett berendezés távadóinak megnevezése és tulajdonságai

Jelölés	Megnevezés	Méréstartomány
LT-01	Inhibitor folyadék szint távadó	0,2-1 m
TT-02	Inhibitor folyadék hőmérséklet távadó	-50-150 °C
PT-08	Adagoló vezeték nyomástávadó	0-160 bar
TT-09	Talaj hőmérséklet távadó	-50-150 °C
PT-10	Béléscső nyomástávadó	0-160 bar
PT-11	Légzőcső-köz nyomástávadó	0-160 bar
PT-12	Kútvezeték nyomástávadó	0-160 bar
TT-13	Kútvezeték hőmérséklettávadó	-50-150 °C

„Háborúban halott is van.”



2019