

Miskolci Egyetem

Műszaki Földtudományi Kar

Kőolaj és Földgáz Intézet

Gázszállító vezetékek lefűtésének vizsgálata

Tudományos Diákköri Dolgozat

Készítette: Rosta Balázs

Tanszéki konzulens: Prof. Dr. Tihanyi László, Egyetemi Tanár

Ipari konzulens: Bozó János, Üzemviteli irányító mérnök

Miskolc, 2014. április 28.

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	1
1. Modellkészítés a FLARE szoftver segítségével	3
2. A lefúvató fáklya hőhatás övezetének számítása	4
3. A „lefogyasztásra” és fáklyázásra kerülő gázmennyiségének számítása	11
4. A vizsgált változatok.....	15
4.1. Első változat.....	16
4.1.1. Első szakasz.....	17
4.1.2. Második szakasz.....	20
4.1.3 A két szakasz egyesítése.....	25
4.2. Második változat.....	27
4.3. Harmadik változat.....	31
5. Összegzés	37
Irodalomjegyzék	40
Köszönetnyilvánítás.....	41

Bevezetés

A földgáz a jelenkor egyik legkörnyezetbarátabb energiahordozója, mely nélkül a modern életünk szinte elképzelhetetlennek tűnik. Színtelen, szagtalan, mégis nélkülözhetetlen a mai modern társadalom számára. Szállítása könnyű, kevés veszteséggel jár, és nagy távolságokra is gazdaságosan megvalósítható. A transzport legnagyobb hányada csővezetékeken keresztül történik, melyek folyamatos üzemeltetése, felügyelete, karbantartása minden felhasználó ország számára nemzetgazdasági érdek.

Dolgozatomban egy vezetékszakas lefűvátásának vizsgálatát végzem el, melyen keresztül szeretném bemutatni, hogy egy lefűvátás előtervezésekor az egyes paraméterek változtatásának milyen hatása van az egész folyamatra.

A szimulációk elkészítéséhez a FLARE programot használtam, melyet az FGSZ Zrt. és a Miskolci Egyetem Kőolaj és Földgáz Intézete közösen fejlesztett ki a fent említett üzemviteli munkafolyamat előtervezésének megkönnyítésére. Három változatot elkészítve bemutatom, hogy különböző indítóértékek beállításával hogyan változik az adott művelet időigénye, valamint milyen hatással van a lefűvátás során kialakuló áramlás különböző paramétereire.

Az elkövetkezendő fejezetekben bemutatott leürítési műveleteket egy végrehajtott fáklyázás szimulációjaként készítettem el. A lefűvátandó vezetékszakas közel 10 km hosszúságú, DN 200-as átmérőjű, melynek leágazó vezetéke rövid, 3 m hosszú, és a szabályozószeleptől 79 m hosszúságú fáklyavezetékekkel kapcsolódik a fáklyakéményhez. A fáklyázás végrehajtása közben méréseket végeztem annubar szondával, hogy a művelet közben mérhető paraméterek összehasonlíthatók legyenek a szoftver által számított értékekkel.

A dolgozatban 3 fáklyázási műveletvariációt mutatok be, mindegyiket a fent leírt vezetékszakasról készítettem el. Mindhárom változatban azonosnak állítottam be az indítónyomást, és a gázhozamot, a különbségek a fojtószelep beállításában figyelhetők meg.

A hidraulikai vizsgálatok előtt bemutatom a fáklyázás során kialakuló veszélyes hőhatás övezet számítását, melyre a művelet biztonságossága miatti előkészületeknél van szükség, illetve a lefűvátott és „lefogyasztott” gázmennyiségeket kiszámítva gazdaságossági elemzést is készítek.

Az első variáns a művelet tényleges végrehajtását reprezentálja, ahol a fáklyázás nagy fojtással kezdődött, majd a művelet közepén a fojtást megszüntetve fejeztük be a lefűvátást.

A második változatban azt az esetet vizsgálom, hogy mi történne abban az esetben, ha a fáklyázás teljes időtartama alatt nagy fojtással menne végig a leürítés.

A harmadik változatban azt a lehetőséget ismertetem, hogy változnának a művelet paraméterei, ha a teljesen nyitott szelepállapothoz tartozó C_v értéket beállítva folya le a fáklyázás.

Ezeket követően a dolgozat összefoglalásaként összegzem tapasztalataim, következtetéseket vonok le belőlük.

1. Modellkészítés a FLARE szoftver segítségével

A FLARE az FGSZ Zrt. és a Miskolci Egyetem Kőolaj és Földgáz Intézetének együttműködéseként került megalkotásra, a fáklyázási munkálatok előtervezésének megkönnyítése érdekében. A szoftver elkészítése óta folyamatos fejlesztés alatt áll, a jelenleg aktuális verzió már a rendszer 6.0-ás változata.

A program távvezetési csőszakaszok lefűtési folyamatát szimulálja, melynek segítségével a vezetékek leürítésekor kialakuló, komplex áramlástanai modellek elemzése válik lehetővé különböző kezdőparaméterek beállítása mellett. A vezetékek leürítésének sajátossága, hogy a normál üzemmenettől eltérő, nagy sebességű áramlások alakulhatnak ki, melynek vizsgálata összetett, és nehezen rekonstruálható. A hidraulikai számítások alapvető célja a lefűtési idő meghatározása, míg a hőtani kalkulációk a szükséges biztonsági óvintézkedések előtervezhetőségét teszik lehetővé. A szoftver a szükséges paraméterek megfelelő beállítása mellett pontos eredmények számítását teszi lehetővé, ezáltal megkönnyítve az üzemviteli munkákat valamint a lefűtások előkészítését.

A következő fejezetekben 3 változatot ismertetek, melyek egy adott vezetékszakaszh lefűtésének folyamatát ismertetik. A vázolt modelleket részletesen elemezni fogom, a leürítés során kialakuló áramlástanai viszonyokat értelmezem. A tervezetek ismertetése után a kapott eredményeket összehasonlítom, értékelem. A szimulációkat ugyanarról a vezetékszakaszhról fogom elkészíteni, hogy az eredmények reprezentatívak és egymáshoz viszonyíthatóak legyenek. Mivel az adatokat titkosan kezelem, ezért a vizsgált vezetékszakaszh fiktív végponti nevek alapján adom meg, melyek legyenek Település1 és Település2.

2. A lefúvató fáklya hőhatás övezetének számítása

A termodinamikai számításoknak általában két célja lehet. Az egyik egy adott lefúvatósi gázáram meghatározott hőintenzitásra vonatkozó hőhatás övezetének számítása, a másik annak meghatározása, hogy egy adott sugarú biztonsági övezet kialakítása mellett mekkora fáklyázási gázáram alkalmazható.

Abban az esetben, ha egy előre meghatározott sugáron (ez gyakran lehet a biztonsági övezet sugara) belül akarjuk tartani a veszélyes hőhatást, meg kell vizsgálnunk, hogy az adott sugarú hőhatás övezet mekkora kiáramlási térfogatáram mellett keletkezik. Ezek az értékek mindig egy adott hőintenzitásra vonatkoznak. Legtöbbször az emberi tartózkodás szempontjából veszélyes, illetve a fáklya környezetében található növényzet begyulladás szempontjából kritikus hőintenzitást szokás alapul venni.

Érdemes megvizsgálni, hogy ha a fáklyázás kezdetén rögtön teljesen kinyitnánk a szelepet, a lefúvató rendszer geometriája mekkora térfogatáramot tudna biztosítani az adott kezdeti primer nyomás mellett. Ennél nagyobb térfogatáram adott indítónyomás mellett nem érhető el. A kapott térfogatáramnak megvizsgálható a hőhatás övezete, és ha a nagysága az általunk megadott sugáron belül található, az időtakarékoság miatt érdemes már ilyen módszerrel véghezvinni a műveletet. Ez nagyon elterjedt módja a vezetékek leürítésének.

Ha a hőhatás övezet nagyobb az általunk megadott sugárnál (vagy a biztonsági övezet sugaránál), a szelep segítségével nagyobb fojtás alkalmazásával a térfogatáram addig csökkenthető, míg a kívánt távolságon belül nem esik annak hőhatása.

Az általam vizsgált esetekben a fáklyázás indítónyomása 13.3 bar volt. (A rendszer geometriai adatai a 4.3-as ábrán láthatók). A FLARE segítségével kiszámítható, hogy a szelep kezdeti nyitásával a rendszergeometria milyen mértékű fáklyázási gázáramot tud biztosítani. Ez az általam vizsgált lefúvató rendszer esetében $27600 \text{ m}^3/\text{h}$. (A számítás úgy végezhető el, hogy kezdeti gázáramnak egy irreálisan nagy értéket adunk meg, melyet a szoftver a futtatás után automatikusan a geometriából adódó legnagyobb gázáramra csökkent.)

A szoftver számítása alapján az emberre veszélyes (1350 W/m^2 hőintenzitás) hőhatás övezet sugara ebben az esetben már közel 40 méter, illetve vizsgálható az is, hogy valamilyen egyéb szempontból fontos hőintenzitás (pl. az esetleges növényzet gyulladása szempontjából veszélyes) mekkora sugarú körben fordul elő.

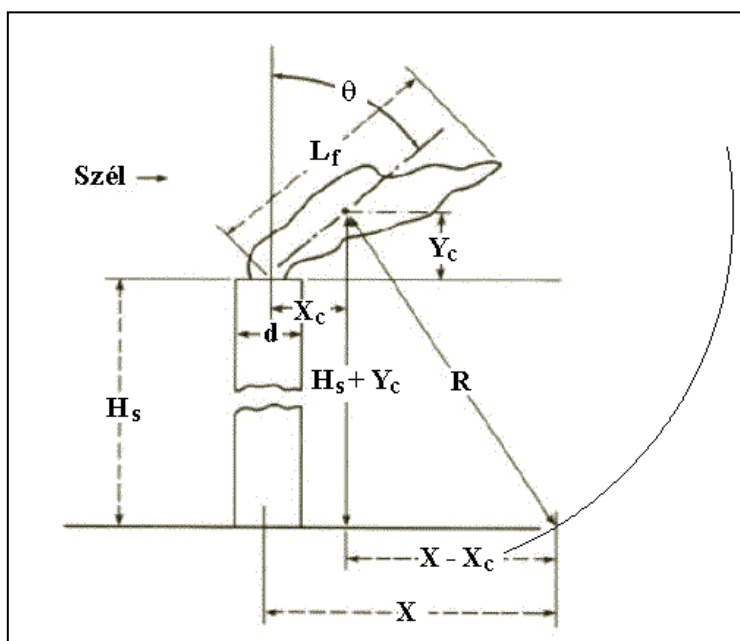
Meghatározhatjuk azt is, hogy az emberi tartózkodás szempontjából veszélyes hősugárzás különböző távolságok mellett milyen kiáramlási gázáramok mellett léphet fel. Például 30

méter sugarú körben $17500 \text{ m}^3/\text{h}$ -ás gázkiáramlás mellett lép fel a kritikus hőterhelés, 25 méteres sugár esetében pedig $13300 \text{ m}^3/\text{h}$ -ás a gázáram.

Az így kapott értékek figyelembe vételével előtervezhető, hogy a személyzetnek a tervezett lefűtési gázáram mellett legalább milyen távolságban kell elhelyezkedniük, vagy például megadható, hogy milyen sugárban célszerű a fáklya környékét beszántani az esetleges tüzesetek elkerülésének érdekében.

A lefűtő fáklya hőhatás övezetének meghatározására vonatkozó nemzetközi előírásokat a GPSA Engineering Data Book, illetve az API Guide RP 521 foglalja össze. A GPSA EDB ajánlást tesz a kiáramló gázsebesség nagyságának korlátozására, ezek alapján a lefűtás során a kiáramlási keresztmetszetre vonatkozó Mach-szám nagysága még a rövid ideig tartó biztonsági fáklyázás során se legyen nagyobb 0,5-ös értéknél, tartós fáklyázás során pedig 0,2-es érték fenntartása ajánlott.

A hőhatás övezet számításakor figyelembe vett paramétereket az alábbi ábra szemlélteti:



2-1. ábra: Hőhatás számítás során figyelembe vett tényezők
(Forrás: GPSA Engineering Data Book)

A fáklyázás végrehajtását célszerű szélcsendes időben végrehajtani, mivel ebben az esetben a lángoszlop függőleges helyzetű. Szeles időben a lángcsóva „lehajlik”, a gömb középpontja eltolódik, melynek következtében a széliránnyal ellentétes oldalon a veszélyes hőhatás övezete megnő, a szélirányú oldalon értelemszerűen csökken.

Mivel a hőhatás övezetet előre meg kell tervezni, célszerű a biztonság érdekében valamilyen mértékű széllel számolni, ezek következtében a láng dőlésszögét 20° -os értékkel veszem számításba. A hősugárzás földfelszínen mérhető sugarát egy adott intenzitási értékre vonatkozóan a következő összefüggésekkel lehet meghatározni:

$$X_c = \left(\frac{L_f}{3}\right) \sin \theta$$

$$Y_c = \left(\frac{L_f}{3}\right) \cos \theta$$

$$R = \sqrt{\frac{\varepsilon * q_g * H_{gn}}{4 * \pi * I}}$$

$$X = X_c + \sqrt{R^2 - (H_s + Y_c)^2}$$

ahol:

- X_c a fáklyacső tengelyének és a lángoszlop középpontjának vízszintes távolsága, [m]
- Y_c a fáklyacső tengelyének és a lángoszlop középpontjának függőleges távolsága, [m]
- L_f a lángoszlop hossza [m]
- θ a Lángoszlop függőlegeshez viszonyított dőlésszöge $[\circ]$
- R a láng középpontjának távolsága valamely I hőterjedésű ponttól [m]
- q_g fáklyázási gázáram $[m^3/s]$
- H_{gn} az elfáklyázott gáz fűtőértéke $[J/m^3]$
- I hősugárzási intenzitás, melynek értékére az adott hőhatás övezetünket meghatározzuk $[W/m^2]$
- ε emissziós tényező, a kisugárzott hőhányadot jellemző paraméter [-]

Az égetés során felszabaduló energia sugárzó hányadát kifejező ε paraméter a már korábban említett GPSA EDB előírása alapján adható meg:

Anyag neve	ε értéke
Szén-monoxid	0,075
Hidrogén	0,075
Kén-hidrogén	0,07
Ammónia	0,07
Metán	0,1
Propán	0,11
Bután	0,12
Etilén	0,12
Propilén	0,13

2-1. táblázat: Emissziós tényezők értéke egyes anyagokra
(Forrás GPSA Engineering Data Book)

A korábban felírt összefüggésekből már csak a lángoszlop hossza ismeretlen, melyet tapasztalati úton nyert képletek alapján a következő módokon lehet kiszámítani:

A GPSA EDB összefüggése a lángcsóva hosszára:

$$L_f = 0,12 * d * \sqrt{\frac{\Delta P_w}{1400}}$$

ahol:

- **d** a fáklyacső belső átmérője [m],

és:

$$\Delta P_w = \frac{\rho * v^2}{19,62}$$

ahol:

- **ρ** a gáz sűrűsége a kiáramlási keresztmetszetben [kg/m³]
- **v** a gáz sebessége a fáklyából kilépve [m/s]

Az API Guide RP 521 összefüggése szintén a lángoszlop hosszának számítására:

$$L_f = 2,14 * (Q_r * 10^{-6})^{0,474}$$

ahol:

- **Q_r** az égés során felszabaduló hőteljesítmény [W]

A lángcsóva hosszúságának megállapításához az API Guide RP 521 által javasolt összefüggést használom, melyhez szükség van az elfáklyázott gáz összetételére, mivel enélkül nem tudjuk meghatározni az égés során felszabaduló hőteljesítményt. A lefűvatott gáz összetételét és jellemzőit az 2-2. ábra szemlélteti:

A szállított gáz összetételének megadása

Komponens kiválasztása		Gázösszetétel		Mól %
C1		C1		95.000
Relatív sűrűség	0.582	C2		3.000
Moláris tömeg	16.86 kg/kmol	N2		1.000
Din. viszkozitás	0.11E-04 Pas	CO2		1.000
Égéshő	37.86 MJ/m3			
Fűtőérték	34.14 MJ/m3			
Wobbe-szám	49.62 MJ/m3			

Komponens hozzáadása

Komponens törlése

Gázösszetétel számítás

Komponensek száma 4

Súgó Módosítások elfogadása Visszalépés

2-2. ábra: A fáklyázott gáz összetétele és jellemzői
(Forrás: FLARE szoftver)

A felállított modellek mindegyikében ugyanazt az indító gázáramot használok, melynek értéke $11000 \text{ m}^3/\text{h}$. A fenti táblázatból leolvasható a gázkeverék fűtőértéke, mely $34,14 \text{ MJ/m}^3$ -nek felel meg. A két értékből számítható az égési hőteljesítmény a következő módon:

$$Q_r = \frac{11000 \text{ m}^3}{3600 \text{ s}} * 34,14 * 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3} = 10,4317 * 10^7 \text{ W}$$

Ez alapján a lángcsóva hossza:

$$L_f = 2,14 * (10,4317 * 10^7 * 10^{-6})^{0,474} = 12,98 \approx 13 \text{ m}$$

A lángcsóva hossza, illetve a szél esetleges lángfektetési hatása miatt biztonsági okokból 20° -os lángoszlopdőlést feltételezve:

$$X_c = \left(\frac{13}{3}\right) \sin 20^\circ = 1,48 \text{ m}$$

$$Y_c = \left(\frac{13}{3}\right) \cos 20^\circ = 4,07 \text{ m}$$

A hőszugárzás gömbsugarának számításakor a hazai gyakorlat szerint alkalmazott, az emberre veszélyes 1350 W/m^2 -es hőintenzitást, illetve a metánra jellemző 0,1-es emissziós tényezőt veszem figyelembe:

$$R = \sqrt{\frac{0,1 * \frac{11000}{3600} * 34,14 * 10^6}{4 * \pi * 1350}} = 24,79 \text{ m}$$

A talajszinten mérhető biztonságos távolság meghatározására- a vizsgált hőhatás mellett- szükségünk van a fáklyacső magasságára. A lefűtató rendszer geometriai adatait az 2-3. ábrán láthatjuk. Ebből leolvasható a fáklyacső magassága, mely jelen esetben 11 m.

Lefűtatórendszer adatai

Láng függőlegessel bezárt szöge: 20.00 fok

Hőszugárzás intenzitása a fáklyánál: 3000.0 W/m²

A fáklya helye: Település

A szabályozószelep típusa:

A szabályozószelep technológiai száma:

Állandó emberi tartózkodási hely távolsága a fáklyától: 150.0 m

Egyéb szempontból veszélyes anyag távolsága a fáklyától: 100.0 m

Leágazó szakasz		Lefűtató szakasz		Fáklya (állványcső)	
Hossza	2.8 m	Hossza	79.0 m	Magassága (bővítés nélkül)	11.0 m
Külső átmérő	108.00 mm	Külső átmérő	108.00 mm	Külső átmérője	108.00 mm
Falvastagság	6.30 mm	Falvastagság	6.30 mm	Falvastagság	4.50 mm
Belső átmérő	95.40 mm	Belső átmérő	95.40 mm	Belső átmérője	99.00 mm
Érdesség	0.030 mm	Érdesség	0.030 mm	Érdesség	0.030 mm
Leágazó szakasz részletezése		Lefűtató szakasz részletezése			

Fáklya (állványcső) bővítés:

☐ Van/Nincs

Bővítés hossza: 2.00 m

Bővítés belső átmérője: 180.80 mm

Súgó

Visszalépés

2-3. ábra: Lefűtató rendszer geometriai adatai
(Forrás: FLARE szoftver)

Ezek alapján a fáklya adott hőintenzitásra vonatkozó hőhatás övezete a talajszinten:

$$X = 1,48 + \sqrt{24,79^2 - (11 + 4,07)^2} = 21,16 \text{ m.}$$

A kapott 21,16 m természetesen csak a talajszinten érvényes, a 4-1. ábra alapján könnyen belátható, hogy a talajszinttől egyre magasabbra haladva ez a sugár növekszik, egészen $H_s + Y_c$ magasságáig, ahol a veszélyes hőhatás övezetének sugara megegyezik R-rel. Ezt figyelembe kell venni minden olyan esetben, ha a fáklya környékén valamilyen magasabb objektum (fa, épület) található a kritikus távolság közelében.

A számítás elvégzésére lehetőségünk van a FLARE szoftveren belül is, az esetleges eltérések abból adódhatnak, hogy a szoftver a lángcsóva hosszát a két fentebb ismertetett szakirodalom által javasolt módszerek eredményének számtani átlagaként számolja. A modellalkotás során a szoftver által kiszámolt hőhatás övezet távolsága a fáklyától 21,68 m-re adódott. A két érték közti különbséget- az eltérés jelentőségének figyelembevételével- elhanyagolhatónak tekintem.

3. A „lefogyasztásra” és fáklyázásra kerülő gázmennyiségének számítása

Fontos tudni, hogy a szállítórendszert üzemeltető cég gázátadó állomásonként évente egyszer, összesen 48 órára állíthat le. A gázátadó állomáson tervezett összes karbantartási, üzemviteli munkát ez idő alatt kell elvégezni. Mivel a vezeték leürítése után általában további munkákat is végeznek a lefáklyázott csőszakaszon, ezért célszerű a lehetőségekhez mérten időtakarékos megoldást alkalmazni.

A szállítóvezetékek üzemnyomása akár 63 bar is lehet. Egyrészt, ha erről a nyomásról kezdenénk meg a fáklyázást, rengeteg gázt égetnénk el, mely nem kerülne értékesítésre, ezáltal a lefűtési költség rendkívül magas lenne. Másrészt a magas nyomás miatt a vezetékben lévő nagymennyiségű gáz fáklyázási ideje rendkívül hosszú lenne, ami ellentétes a célokkal.

A fent említett problémák egyik megoldása lehet, hogy már a gázátadó állomás leállítása előtt a leürítendő vezetékét kiszakaszolják, melynek következtében nem kap gázutánpótlást a szállítórendszerből. A gázátadón az elvétel emellett nem áll le, melynek következtében a vezetékszakaszunkban csökken a gáz mennyisége, ezáltal a vezetéknyomás is. A korábbi fogyasztási adatokból következtetni lehet arra, hogy a leürítésre kerülő vezetékszakaszt mennyi idővel a fáklyázás megkezdése előtt szükséges kizárni annak érdekében, hogy a nyomás a lefűtás kezdetére az általunk kalkulált értékre csökkenjen. A kizárás utáni, puffertérfogatból történő ellátást lefogyasztásnak is szokás nevezni (a felhasználók gyakorlatilag lefogyasztják a vezetékben lévő gázt).

Problémát okozhat, ha a gázvételező az adott gázátadó állomáson a szokványosnál (~ 6 bar) nagyobb nyomáson igényli a szolgáltatott gázt (akár 20 bar is lehet). Ilyen esetben a leállítás előtti szakaszolás nehezebben valósítható meg, mivel a gázátadó működése alatt a megkívánt (és szerződésben is rögzített) nyomáson kell a gázt átadni. Ez esetben jellemzően magasabb nyomásról kerül lefáklyázásra a vezeték.

A lefogyasztásra került gáz mennyiségét az általános gáztörvény segítségével könnyen meghatározhatjuk. Ennek a módszere a következő:

- Első lépésként leolvassuk, hogy mekkora volt a nyomás a vezetékszakasz kizárásának és a gázátadó kizárásának pillanatában. A két mennyiség különbségeként keletkezik egy nyomásérték, melyre meghatározzuk a vezetékünkben lévő gáz normálállapotra vonatkoztatott térfogatát.

- A fenti módszert alapul véve könnyen meghatározhatjuk azt is, mennyi gáz kerül a fáklyára. A gázátadó leállításakor számított vezetéktérfogat (mely egyenlő a fáklyázás kezdeti nyomásán vett vezetéktérfogattal), és a fáklyázandó vezetékszakasz víztérfogatának különbsége megadja, hogy hány normál m^3 gáz kerül lefáklyázásra. (A fáklyázás csak addig tart, míg a vezeték nyomása és a légköri nyomás ki nem egyenlítődik, ezért a fáklyázás befejezésekor a vezetékben még légköri nyomású, és a csőtérfogattal megegyező mennyiségű gáz marad, melyet majd légkompresszor segítségével kell eltávolítani a biztonságos munkavégzés érdekében.)

A számítás elvégzésének érdekében szükség van a vizsgált vezetékszakasz geometriai adataira, melyeket az alábbi kép mutat be:

Lefúvatandó vezetékszakaszok részletes adatai

A lefúvatandó szakasz kezdőpontjának helye:

A lefúvatandó szakasz végpontjának helye:

Vezetékszakasz		Hossza m	Külső átmérő mm	Falvastagság mm	Belső átmérő mm	Hőátbocsátási együttható W/m ² .K
kezdőpont sorszám	végpont sorszám					
1	2	9650.0	219.00	5.00	209.00	3.00

A lefúvatandó vezeték szakaszainak száma:

3-1. ábra: A Lefúvatandó vezetékszakasz geometriai adatai
(Forrás: FLARE szoftver)

A megadott paraméterekből számítható a vezetékszakasz csőtérfogata:

$$V_{cső} = \frac{D_b^2}{4} * \pi * L$$

ahol:

- $V_{cső}$ a vizsgált vezetékszakasz csőtérfogata [m^3]
- D_b a vezeték belső átmérője [m]
- L a vezetékszakasz hossza [m]

Ezek alapján:

$$V_{cső} = \frac{0,209^2}{4} * \pi * 9650 = 331,062 \text{ m}^3$$

Az általam vizsgált modellnél a szakasz kizárásakor fennálló vezetéknyomás 39,6 bar volt. A fáklyázás kezdetén fennálló nyomás 13,3 bar, a kettő közti különbség 26,3 bar (a nyomásértékek túlnyomások). Erre a nyomásértékre határozzuk meg a gáz normáltérfogatát. A gáz hőmérsékletét egyezményesen a talajhőmérséklettel megegyezőnek tekintjük, melyet 277,13 K értékben határozok meg.

A csőtérfogat kiszámítása, illetve a nyomás és hőmérséklet paramétereinek definiálása után kiszámolhatjuk a lefogyasztott gáz normáltérfogatát.

$$V_{gn} = V_{cső} * \frac{P_v * T_n * z_n}{P_n * T_v * z}$$

ahol:

- V_{gn} a vezetékben lévő gáz normáltérfogata adott hőmérsékleten és nyomáson [m^3]
- P_v a nyomás, amelyen meg akarjuk határozni a gáz térfogatát [bar]
- T_n gáztechnikai normálhőmérséklet, $T_n=288,13 \text{ K}$
- z_n normálállapotú gáz eltérési tényezője, $z_n=1$
- P_n gáztechnikai normálnyomás $P_n=1,013 \text{ bar}$
- T_v a gáz hőmérséklete [K]
- z a gázeltérési tényezője, tapasztalati képlet alapján: $z = 1 - 0,002 * P_v$

$z = [-]$, és $P_v = [\text{bar}]$ (A FLARE az eltérési tényező számításához a Peng-Robinson állapotegyenletet használja, de jó közelítést ad az előbb említett empirikus összefüggés is, ezért a továbbiakban ez kerül alkalmazásra a tényező meghatározásakor)

A fentiek alapján a lefogyasztott gázmennyiség:

$$z = 1 - 0,002 * 26,3 = 0,9474$$

$$V_{gn} = 331,062 * \frac{27,313 * 288,13 * 1}{1,013 * 277,13 * 0,9474} = 9795,82 \text{ m}^3$$

A lefogyasztás során tehát közel 10000 m^3 gáz kerül értékesítésre, mely jelentős megtakarítást jelent a fáklyázással szemben. (Ez a gázmennyiség 4 átlagos magyar háztartás éves fogyasztásával egyezik meg.)

Hasonlóan a lefogyasztáshoz, az elfáklyázott gázmennyiséget is meghatározhatjuk (Itt a nyomást 13.3 bar-os értékkel veszem figyelembe):

$$z = 1 - 0,002 * 13.3 = 0,9734$$

$$V_{gn} = 331,062 * \frac{13,3 * 288,13 * 1}{1,013 * 277,13 * 0,9734} = 4642,64 \text{ m}^3$$

Ehhez a mennyiséghez hozzá kell adni a lefűvátás után a vezetékben maradó 331,06 m³-es mennyiséget, melyet a fáklyázás segítségével nem lehet eltávolítani. Ilyenkor légkompresszorok segítségével kerül teljes leürítésre a csőtér. Ezáltal megkapjuk a lefűvátáskor „elhasznált”, és emiatt értékesítésre nem kerülő gáz mennyiségét, mely **4973,7 m³**.

Az üzemeltető érdeke, hogy az értékesítésre nem kerülő lefűvátott gáz mennyisége a lehetőségekhez képest minimális legyen. A fenti számításból látható, hogy jelentős mennyiségű gáz, és ezen keresztül pénz takarítható meg a lefogyasztásos módszer alkalmazásával.

4. A vizsgált változatok

A veszélyes hőhatás övezet, és a gázmennyiségek meghatározása után, 3, általam készített variációt ismertetek a fáklyázás végrehajtására:

- Az első változatot egy olyan fáklyázási művelet alapján állítottam össze, melyen méréseket is végeztem. Az így nyert adatokat feldolgozva összehasonlíthatók a modell segítségével számított, illetve a valóságban ténylegesen végbemenő folyamatok és állapotváltozások. Ebben az esetben azt vizsgálom, hogy mi történik akkor, ha egy nagy fojtással induló fáklyázás során a folyamat közben beavatkozunk, és a fojtást megszüntetjük.
- A második variánsban azt vizsgálom, hogy ha a kezdeti fojtást nem változtatom meg a lefűvátás alatt, akkor miként módosulna a lefűvátás időszükséglete, illetve a vizsgált paraméterek alakulása milyen mértékben változik.
- A harmadik változatban egy olyan esetet elemzek, amelyben azonos indítási paraméterekkel, de jóval kisebb fojtással kezdjük meg a lefűvátást.

Az első variációban említett méréseket annubar szondával végeztem, mely a torlócsövek elvén működő, benyúló áramlásmérő eszköz. A szonda méri a gáz hőmérsékletét, bemeneti oldalán a gáz statikus nyomását, valamint a szondán keletkező nyomáscsökkenést. A rögzített adatokat digitális jelként egy hosszabbító kábel segítségével továbbítja a számlálóműnek, mely az átáramló gázmennyiséget közvetett módon, a szondán keletkező nyomáskülönbségből határozza meg.



4-1. ábra: Annubar szondafej menetes csatlakozóval
(Forrás: Saját készítésű kép)

A mérőrendszert egy menetes csompon kell csatlakoztatni a lefűtő rendszer szekunder oldalára, a szabályozó szelep után. A számítómű a kalkulált gázáramot egy digitális kijelzőn jeleníti meg, valamint PCMCIA csatlakozóval számítógéphez is kapcsolható, ahol a megfelelő szoftveres háttérrel további adatok és paraméterek lekérdezhetők, illetve módosíthatók.



4-2. ábra: Beépített annubar szonda a lefűtő vezetéken
(Forrás: Saját készítésű kép)

4.1. Első változat

A szimuláció a leírt módon, a fent említett fáklyázás előtervezéseként került megalkotásra.

A fáklyázás során annubar szonda segítségével mértem az aktuális gázáramot, valamint rögzítettem a primer és szekunder oldali nyomást. A FLARE szoftver rendelkezik olyan opcióval, hogy miután a mért adatokat bevittük a programba, az előtervezés összehasonlíthatóvá válik a fáklyázás során ténylegesen kialakuló állapotváltozásokkal. A futtatás alapparaméterei a következők:

- Indítónyomás: 13,3 bar
- Kezdeti gázáram: 11000 m³/h

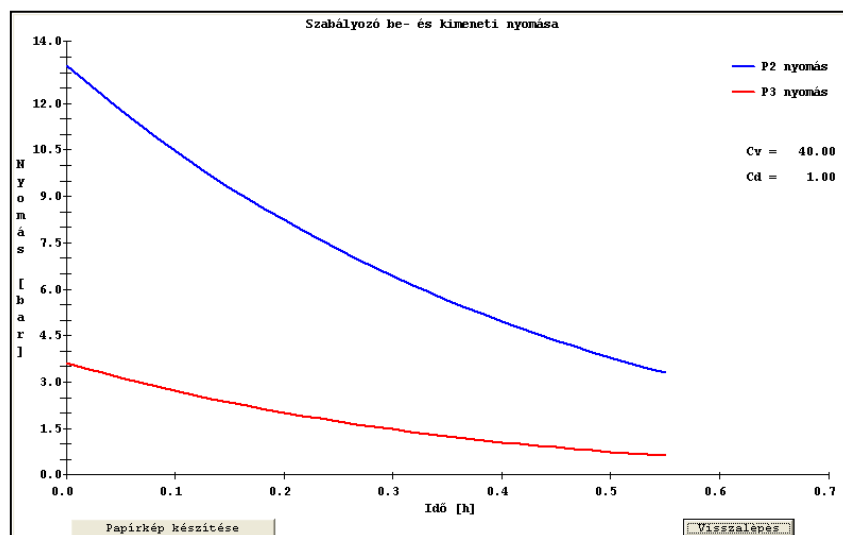
- A fáklyázást nagy fojtással, $C_v=40$ -es értékkel kezdtük, majd miután a vezetéknomás 3,3 bar-ra esik, a szabályozószelepet teljesen kinyitottuk, melynek következtében megszűnik a fojtás.

Külön kell tárgyalni a szabályozó nyitása előtti és utáni szakaszt, mivel a szabályozószelep kinyitása után a fojtás megszűnik, így a FLARE-ben is új C_v értéket kell figyelembe venni. Ez a módosítás lehetetlenné teszi a művelet egyetlen lefúvatásban történő megoldását.

Ennek tükrében a folyamat modellezését két szimuláció elkészítésében oldottam meg, melyek közül az első a szelepnitás pillanatáig írja le az eseményeket, a második pedig a nyitás után.

4.1.1. Első szakasz

A fojtás mértékét leíró C_v értékének meghatározását a következőképpen végeztem: a szoftver a szelep átmérője alapján generál egy C_v értéket, mely esetünkben 250. Figyelembe vettem, hogy a lefúvatás során a szabályozószelep mintegy 20%-os nyitottsági állapotban van, ezzel fojtást képezve. A számítás során tehát a szoftver által generált 250-es értéket is körülbelül a 20%-ára csökkentettem. Az ezzel a módszerrel kapott $C_v=40$ -es értékkel számított szelep karakterisztika görbe jó egyezést adott a fáklyázás során mért adatokkal.

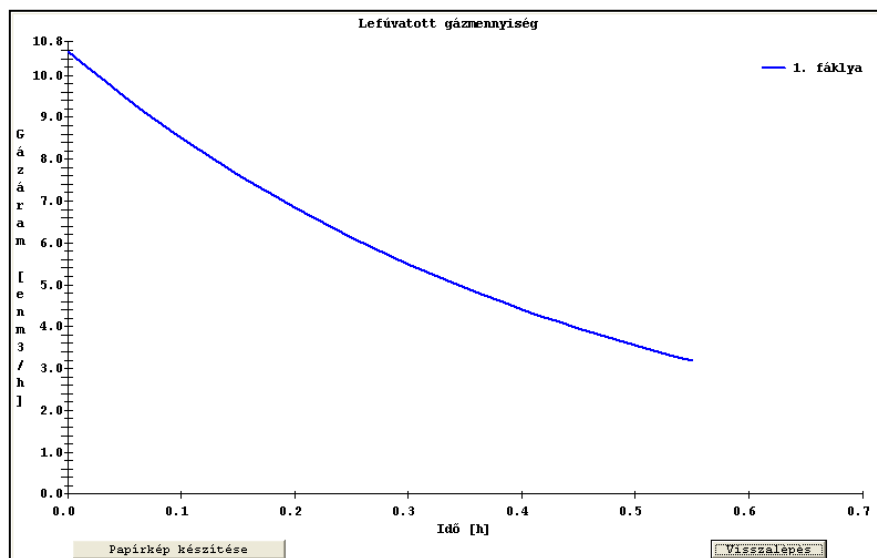


4.1.1-1 ábra: A Primer és szekunder oldali nyomás változása az idő függvényében
(Forrás: FLARE szoftver)

Az első rész szimulációját lefuttatva elmondható: a szoftver számítása alapján 33 perc szükséges, hogy a primer oldali vezetéknomás 3,3 bar-ra essen. A primer és a szekunder oldali nyomás változását a 4.1.1-1. ábrán látható grafikon szemlélteti.

A diagramon látható, hogy a szekunder oldali nyomás a fáklyázás megkezdésékor 3,5 bar körüli értékre emelkedik, majd viszonylag egyenletes ütemben a primer oldali nyomással szinkronban csökken. A szabályozószelep nyitásának pillanatában a szekunder oldalon 0,6 bar körüli nyomás volt mérhető.

A gázáram változása a folyamat során a 4.1.1-2 ábrán látható:

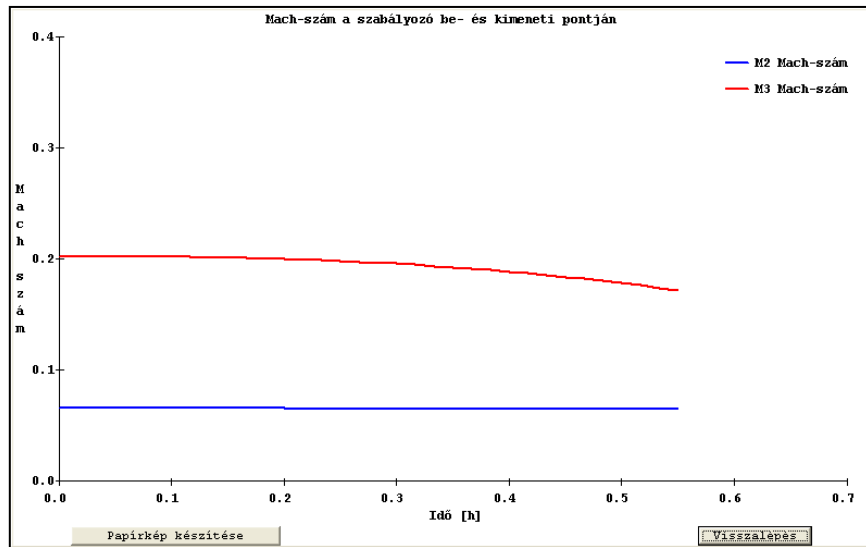


4.1.1-2. ábra: A lefúvatási gázáram az idő függvényében
(Forrás: FLARE szoftver)

Megfigyelhető, hogy a térfogatáram nagysága folytonosan, de egyre kisebb intenzitással csökken. A térfogatáram a szelepnitítés előtt a kezdeti érték mintegy harmada, kb. $3000 \text{ m}^3/\text{h}$. A görbe meredekségének folyamatos esése arra enged következtetni, hogy ilyen mértékű fojtással végigengedve a fáklyázást, a lefúvatási idő meglehetősen hosszú lenne.

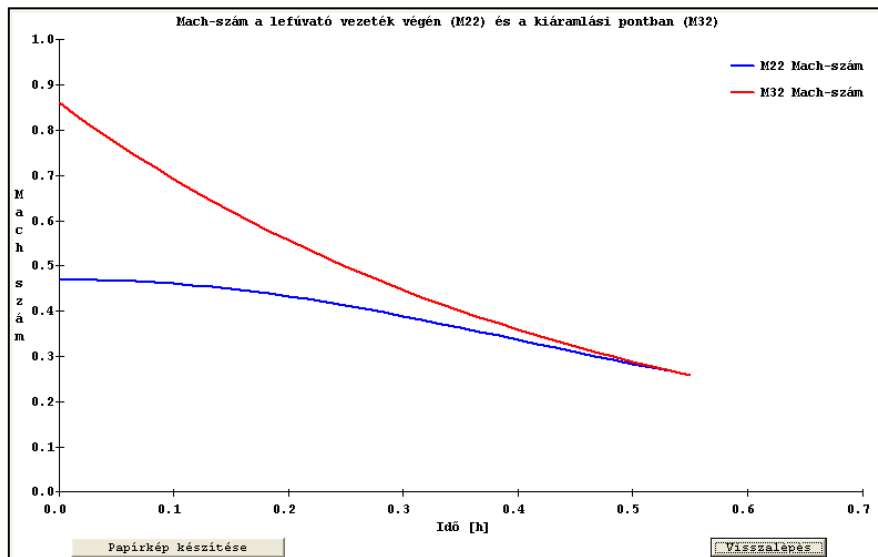
Érdeemes megvizsgálni a rendszerben kialakuló, áramlási sebességet jellemző Mach-számok változását.

A 4.1.1-3. ábrán láthatjuk, hogy a szabályzó szelep előtt és után is egy viszonylag kiegyensúlyozott, alacsony Mach-számú áramlás alakul ki. A bemeneti ponton 0,06-os értéket tart, míg az áramlás sebessége a szabályozószelepből kilépve kissé megemelkedik, 0,2 körüli Mach-szám értéket tartva.



4.1.1-3. ábra: Mach-számok változása az idő függvényében a szabályozószelep be- és kimeneti pontján
(Forrás: FLARE szoftver)

Változatosabb képet láthatunk, ha részletesen megnézzük a lefűvató rendszer utolsó szakaszában, a lefűvató vezeték végpontjában, és a fáklyacső kiáramlási keresztmetszetében a sebességviszonyokat.



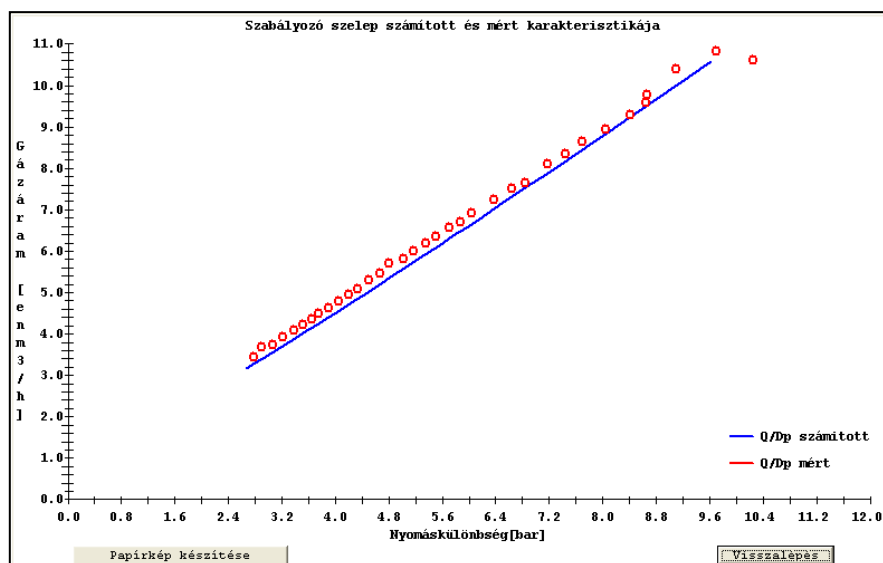
4.1.1-4. ábra: Mach-számok változása az idő függvényében a lefűvató vezeték és a fáklyakémény kilépési keresztmetszetében
(Forrás: FLARE szoftver)

A gáz áramlása szempontjából ezeket a pontokat tekinthetjük kritikus pontoknak, mivel ezekben a pontokban a legkisebb a nyomás, éppen ezért itt a legnagyobb a gáz sebessége.

Az 4.1.1-4-es ábrán látható, hogy a rövid lefűvató vezetéken jelentős sebességnövekedés figyelhető meg, mely a fáklyacsőben tovább fokozódik. A szabályozó szelep kilépési

pontjától a fáklyakémény kilépési pontjáig a gáz sebessége folyamatosan emelkedik, mely a kiáramlási keresztmetszetben a fáklya indításakor a 0,85-ös Mach-számot is meghaladja. Ezen a ponton tehát hangsebesség közeli áramlásról beszélhetünk. A gázáram fokozatos csökkenésével a gáz sebessége is visszaesik; a fojtás következtében a magas kiáramlási sebesség nem tud állandósulni. A vizsgált pontok közti sebességkülönbség folyamatosan csökken, és a szabályozószelep nyitásának pillanatában közel azonos. Ebben az időpillanatban tehát elmondható, hogy a gáz a fáklyacsőben már nem képes növelni sebességét.

Ha megvizsgáljuk a térfogatáram, illetve a primer és szekunder oldal közötti nyomáskülönbség kapcsolatát, jól látható, hogy a csökkenő nyomáskülönbséggel arányosan visszaesik a gáz térfogatárama is. A két érték viszonyát szokás szelep karakterisztikának is nevezni.



4.1.1-5. ábra: Szabályozó szelep számított és mért karakterisztikája
(Forrás: FLARE szoftver)

A 4.1.1-5-ös diagramon látható piros körök a mérés során rögzített adatok. Az ábra alapján elmondható, hogy a mért értékek viszonylag jól illeszkednek a szoftver által előjelzett nyomás és hozamváltozásokhoz, következésképpen a modellben felvett C_v érték megfelelő.

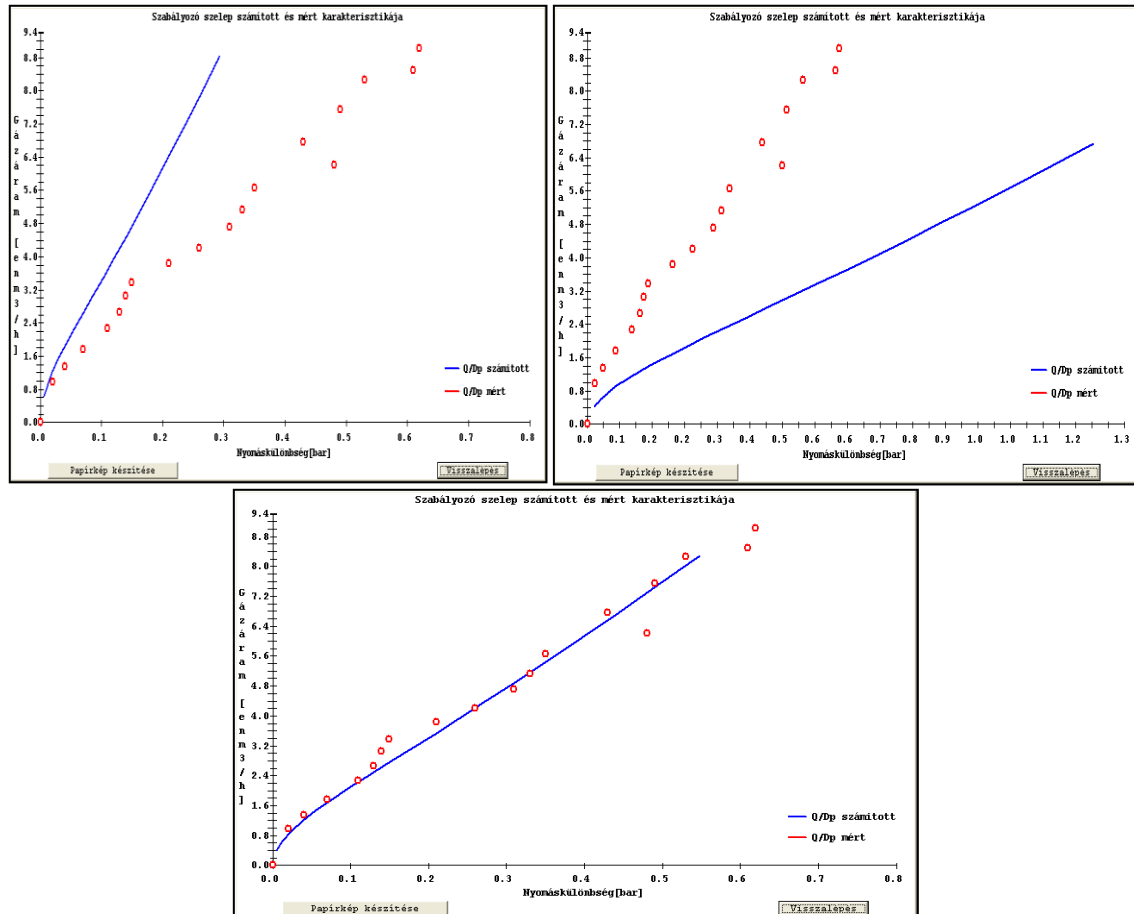
4.1.2. Második szakasz

A szabályozó szelep nyitásáig történt folyamatok vizsgálata után nézzük, hogyan változnak az egyes paraméterek a fojtás megszüntetése után.

Ennek a szakasznak a kezdetén csekély, 3,3-bar-os nyomás uralkodik a vezetékben. A fojtás megszüntetésével az első szakaszban alkalmazott C_v értéke már nem megfelelő, ennél nagyobb értéket kell figyelembe venni. A mérési eredményekkel legjobb egyezés a $C_v=175$ -

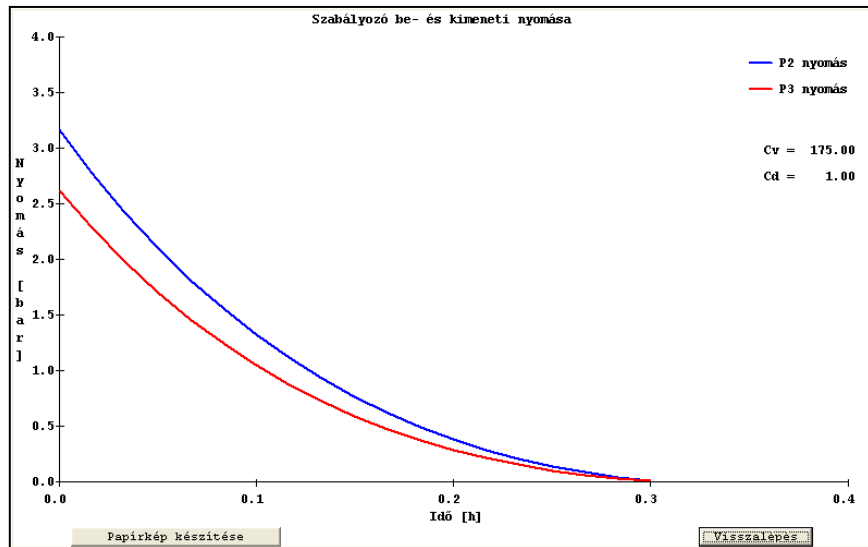
ős értékkel mutatkozik. (Az előtervezés során több C_v értékkel is elvégeztem a szakasz szimulációját, hogy előre lehessen kalkulálni a fáklyázás során várhatóan bekövetkező változásokat).

A választott C_v értéknél kisebb és nagyobb értékek alapján alakuló szelepkarakterisztika görbék a következő ábrákon láthatók:



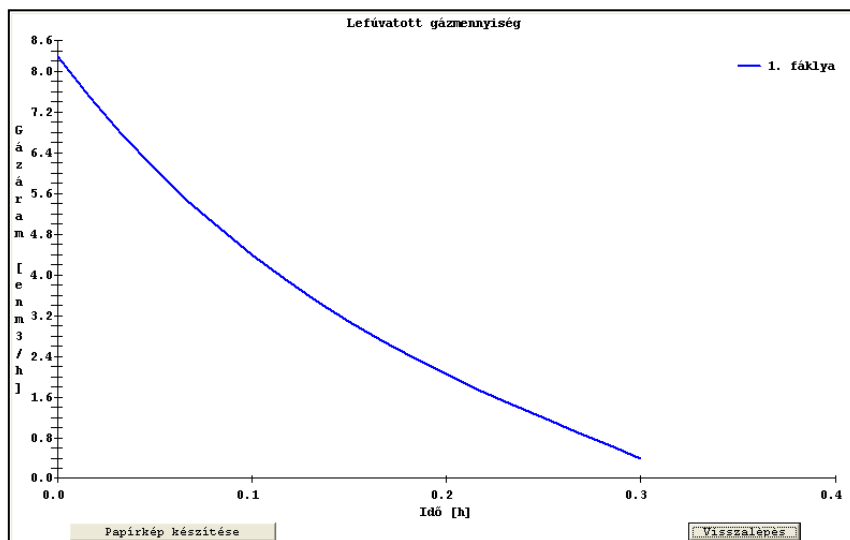
4.1.2-1. ábra: $C_v=250$ (bal), $C_v=100$ (jobb) és $C_v=175$ (alsó) fojtási értékekkel számított- és mért szelep karakterisztika összehasonlítása
(Forrás: FLARE szoftver)

A grafikonokból jól kivehető, ha a $C_v=175$ -ös értéknél nagyobb beállítással végezzük a számítást, a szelepkarakterisztika görbe meredekebb lesz a mért adatok által kirajzolódó eredményosznál, míg ha a 175-ös értéknél kisebb értékkel végezzük el a kalkulációt, a szoftver által számított görbe laposabb lesz a mért értékeknél.



4.1.2-2. ábra: Primer és szekunder oldali nyomás változása az idő függvényében
(Forrás: FLARE szoftver)

A szoftver számítása alapján a fennmaradó 3,3 bar 18 perc alatt éri el a nullát. A primer és szekunder nyomás változását mutató 4.1.2-2. ábrán kivehető, hogy a fojtás megszüntetése után a szekunder oldali nyomás jelentősen megemelkedik, ezáltal a nyomáskülönbség jelentősen kisebb lesz a fojtott szimulációban tapasztaltaknál. Megfigyelhető, hogy a nyomásgörbék meredeksége nagyobb, mint a fojtással történő lefúvatás alatt, tehát jelentősen intenzívebb a nyomásesés.



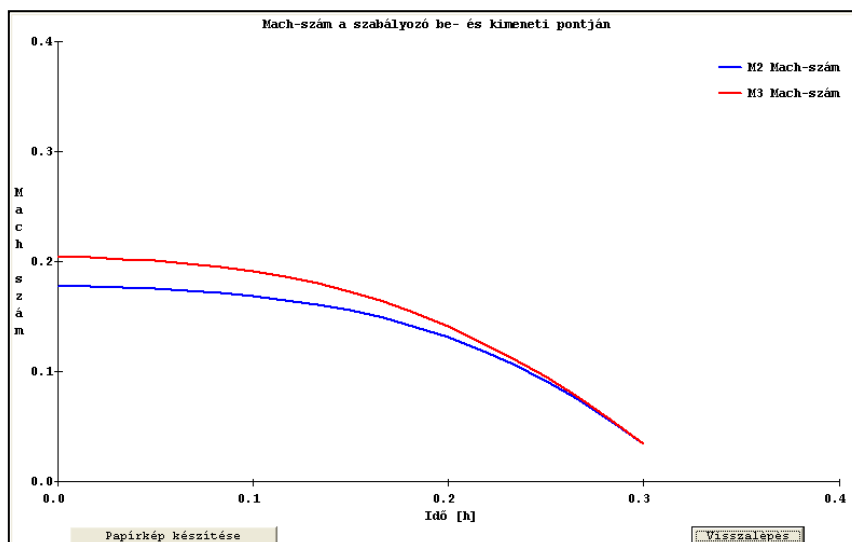
4.1.2-3. ábra: A fáklyázási gázáram változása az idő függvényében
(Forrás: FLARE szoftver)

A 4.1.2-3. ábrán látható a gázáram változásának görbéje, melyről elmondható, hogy a nyomásgörbék meredekségének változását követve, a gázáram is nagyobb meredekséggel

közelít a vízszintes tengelyhez. A folyamat második felében már itt is megfigyelhető egy laposodó tendencia a görbén, ám mértéke kevésbé számottevő.

Érdekességképpen észrevehető, hogy az ábrán a függvény nem éri el a 0 értéket. Ennek egy lehetséges oka lehet, hogy a fojtás megszüntetése miatt a fáklyázás nagy intenzitással történik, és igen rövid idő alatt befejeződik. A szoftver az adatokat percenként jeleníti meg, ezáltal valószínűsíthető, hogy az áramlási sebesség az adott percben már 20 m/s alá csökkent, melynek következtében a program befejezi a műveletet.

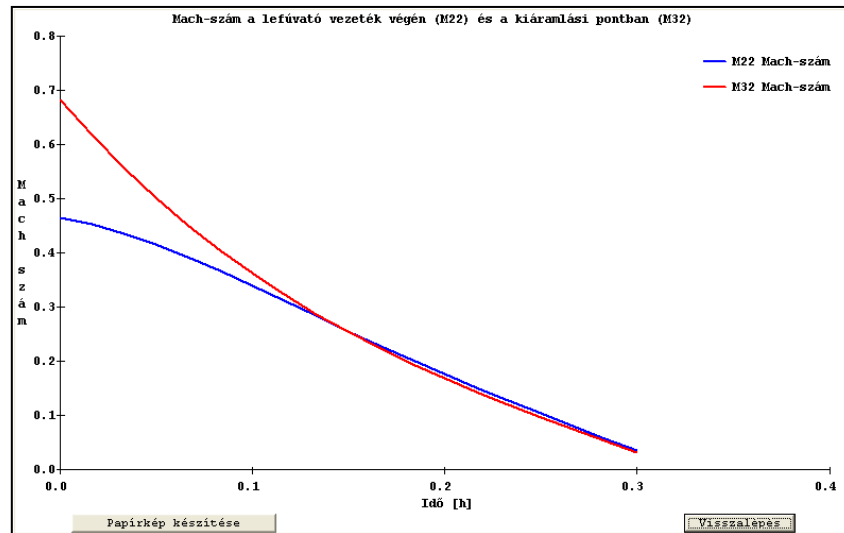
A szelep két oldalán fellépő áramlási sebességviszonyokat mutatja be 4.1.2-4. ábra. A diagramról leolvasható, hogy fojtás megszüntetése után, kezdetben a szelepből kilépő gáz Mach-száma jelentősen nem változik a fojtás alatt megfigyelhető értékekhez képest, ellenben a bemeneti ponton érezhetően megnő az áramlási sebesség, mely majdnem megközelíti a kilépő oldali Mach-számot



4.1.2-4. ábra: A Mach-szám értékének változása az idő függvényében a szabályozó szelep be- és kilépési pontján
(Forrás: FLARE szoftver)

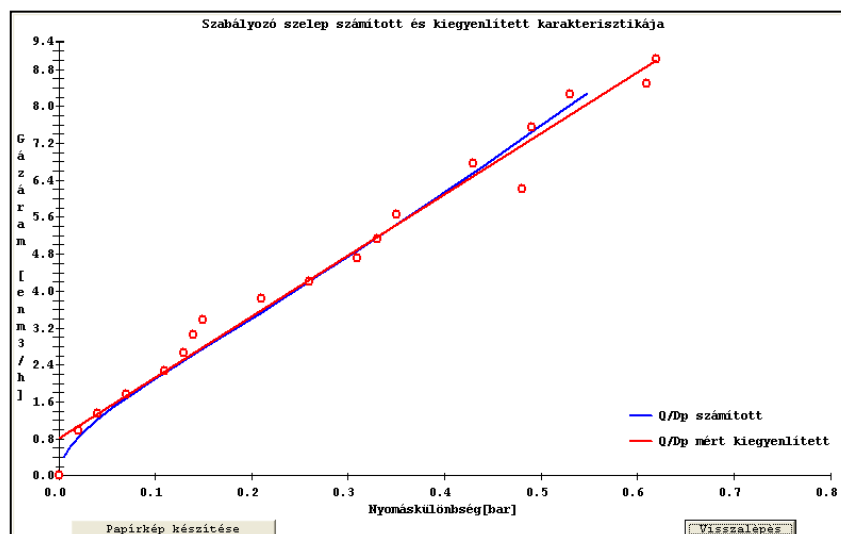
A gázáram csökkenésével egy időben a szelep két oldalán mérhető sebességek is mérséklődnek, de a gázáraméval ellentétes módon, hiszen itt egyre növekvő meredekségről beszélhetünk. A folyamat második harmadától a vizsgált két Mach-szám már közel azonos.

A kritikus pontokon megfigyelhető Mach-számok alakulását a 4.1.2-5. ábra mutatja:



4.1.2-5. ábra: Mach-számok változása az idő függvényében a lefúvató vezeték és a fáklyakémény kilépési keresztmetszetében
(Forrás: FLARE szoftver)

A grafikonból kiolvasható, hogy a fáklyakémény kilépési pontján a maximális Mach-szám csupán 0,7 körüli. Ez annyit jelent, hogy a fojtás megszüntetése után a fáklyacsövön a gáz már nem éri el a hangsebesség közeli Mach-számot. A lefúvató vezeték végén a kezdeti áramlási sebesség hasonló a fojtás alatti értékhez. A két modellrész közti legszembetűnőbb különbség itt is a görbék közti meredekségnél figyelhető meg. A fojtás nélküli szakaszban a Mach-számok értéke jóval nagyobb ütemben kezd el csökkenni, majd a folyamat felénél felvesznek egy közel azonos értéket, majd ez követően együtt tartanak a 0 felé.



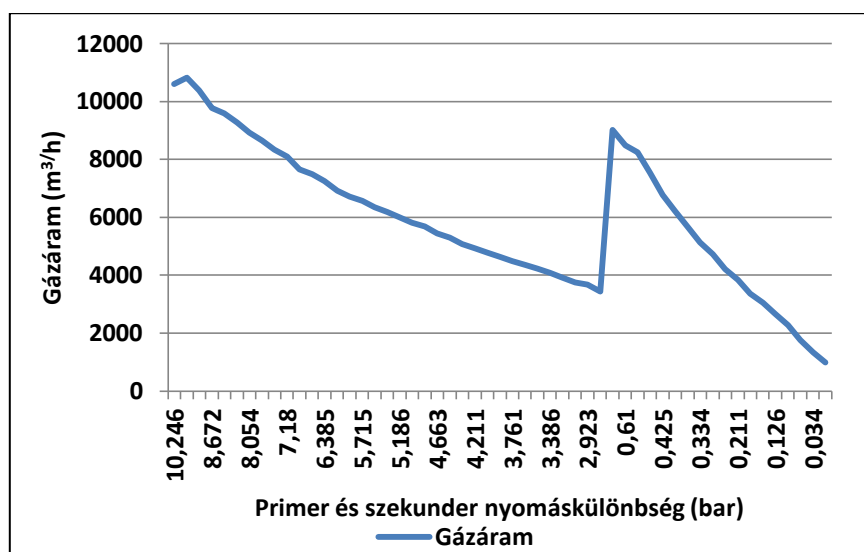
4.1.2-6. ábra: Számított és mért szelep karakterisztika a fojtás megszüntetése után
(Forrás: FLARE szoftver)

A 4.1.2-6. ábrán a mért és számított szelepkarakterisztika görbéjén már nem látható olyan tökéletes egyezés, mint a fojtással vizsgált paramétersornál. Ez az esetleges mérési pontatlansággal, valamint a műszer rendkívüli érzékenységevel magyarázható. Ellenben ha a FLARE segítségével a mért pontjainkra egy lineáris trendvonalat illesztünk, már egészen jó fedést mutat a szoftver által számított értékekkel. A mért értékek alapján tehát elmondható, hogy a teljesen nyitott állapotú szelepnél a $C_v=175$ érték adja a legjobb egyezést. Ez az adott helyszínen beépített, adott szelepre jellemző érték, mely az ő fojtóhatásának mérőszáma teljesen nyitott állapotban. Ezen érték meghatározása gyakorlati szempontból nagyon fontos, mivel a fáklyázások legnagyobb hányada teljesen nyitott szelep beállítása mellett történik, tehát az így kapott eredményre a későbbiekben is szükség lesz. A pontos C_v érték kimérésének felhasználásával a további, ezen a fáklyarendszeren elvégzett fáklyázások előtervezése, szimulációja pontosabbá, megbízhatóbbá válik.

4.1.3 A két szakasz egyesítése

A fáklyázás során mért adatokat összegeztem, és együtt is megvizsgáltam. A folyamat teljes időszükséglete a szoftveres tervezés alapján 51 perc, a tényleges fáklyázáskor 53 perc után aludt ki a fáklya. Tehát ez egy jó közelítésnek mondható.

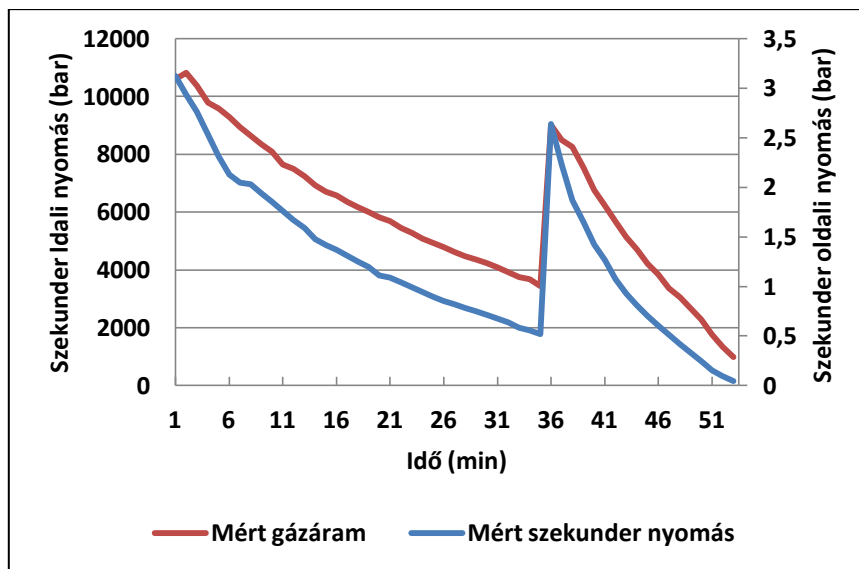
Vessük össze a fáklyázási gázáram alakulását a primer és szekunder nyomáskülönbséggel. A következő ábrán a két tényező viszonya látható:



4.1.3-1. ábra: A gázáram változása a primer és szekunder nyomáskülönbség függvényében
(Forrás: Saját szerkesztésű ábra)

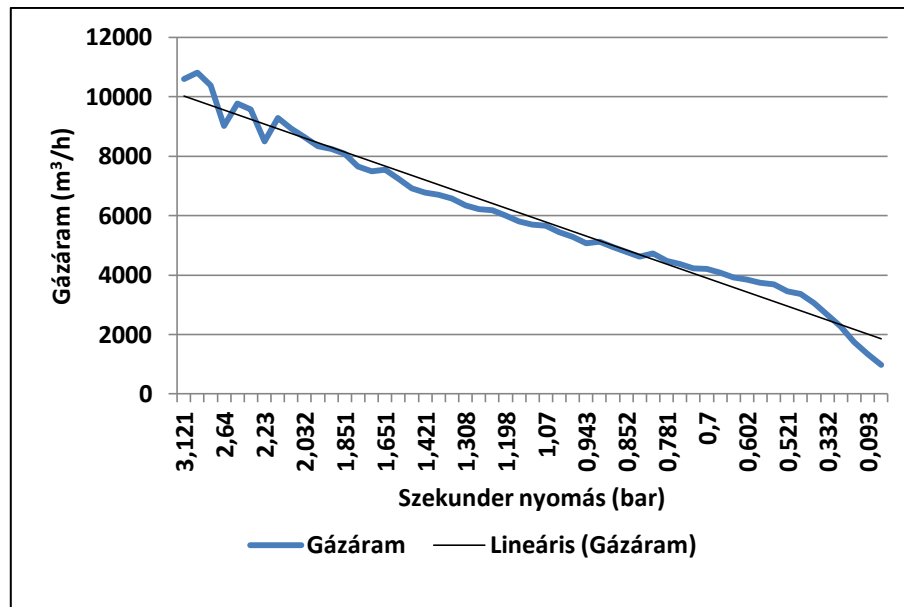
A diagramon jól kivehető a fojtás megszüntetésének pillanata, ahol a nyomáskülönbség hirtelen lecsökken, illetve hirtelen megnövekvő gázáramlás lesz megfigyelhető. Érdekesség, hogy a fenti eredményeket figyelembe véve, a csökkenő nyomáskülönbség mellett növekvő térfogatáram lép fel. Ez természetesen a megváltoztatott fojtóhatásnak tudható be.

Vizsgáljuk meg hasonló módon a szekunder oldali nyomás, valamint a gázáram, és az idő viszonyát:



4.1.3-2. ábra: A gázáram, valamint a szekunder oldali nyomás változása az idő függvényében
(Forrás: Saját szerkesztésű ábra)

A grafikonon jól látható, hogy a lefűvadási idő változásával a vizsgált paraméterek hasonló görbét vesznek fel, és a fojtás megszüntetésekor is egyaránt növelik az értékeiket. Ha a gázáram változását a szekunder oldali nyomás változásának függvényeként írjuk fel, a következő képet kapjuk:



4.1.3-3. ábra: A gázáram változása a szekunder oldali nyomás függvényében
(Forrás: Saját szerkesztésű ábra)

Ha a 4.1.3-3. ábrán látható diagramot vizsgáljuk, akkor megfigyelhetjük, hogy a gázáram változása jó közelítéssel arányos a szekunder oldali nyomás változásával. Az esetleges mérési hibákból adódó ingadozások kiküszöbölésének érdekében egy lineáris trendvonal illesztése után elmondható, hogy a gázáram nagyságát nem a primer és szekunder oldal közti nyomáskülönbség, hanem a szekunder oldali és a légköri nyomás különbsége határozza meg. Mivel a légköri nyomást állandónak vehetjük, így csupán a szekunder oldali nyomás ismeretében is meg tudjuk határozni az aktuális térfogatáramot, melynek gyakorlati haszna igen jelentős. Ha az adott fáklyázási művelet során nem végeznek gázáram mérést valamilyen szonda alkalmazásával, a szekunder oldalon található manométer leolvasásával egy előre elkészített táblázat alapján, nyomon követhető az aktuális gázáram, melynek ismeretében szabályozó szelep kezelése egyszerűbbé válik.

4.2. Második változat

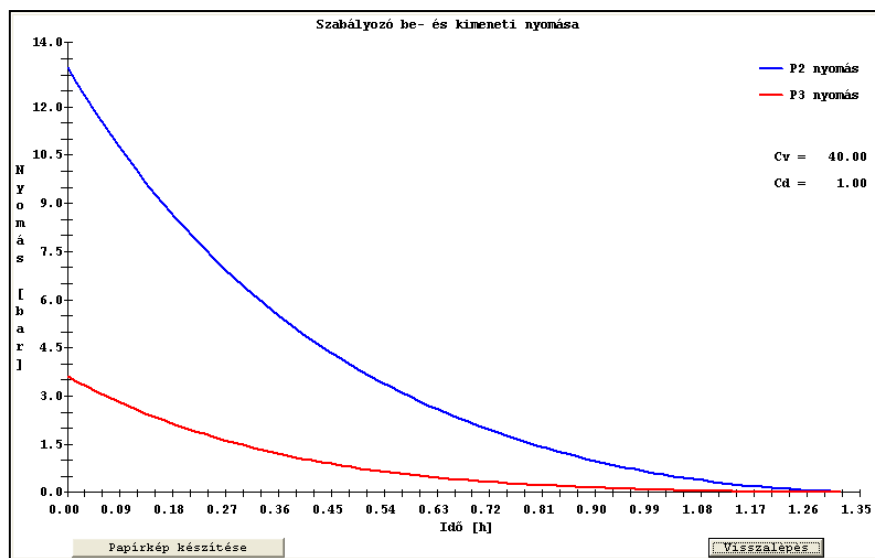
A második változatban azt a lehetőséget vizsgálom, hogy mi történik, ha a fáklyázás alatt a fojtást nem szüntetjük meg, és az egész műveletet az előző modell első részében tárgyalt nagy fojtással engedjük végig. Az alapparaméterek hasonlóak az előző variáció kezdeti értékeihez:

- Indítónyomás: 13,3 bar
- Kezdeti gázáram: 11000 m³/h

- A fáklyázást az előző modell kezdetén alkalmazott nagy fojtással, $C_v=40$ értékkel végezzük. Ebben az esetben nem szüntetjük meg a fojtást, így fut végig az egész művelet.

A szimuláció elvégzése után elmondható, hogy ebben az esetben a lefűvatandó vezeték 1 óra 19 perc alatt ürülne le, és csökkenne a primer nyomás nullára. A művelet során tapasztalható állapotváltozásokról általánosságban elmondható, hogy a folyamat első része gyakorlatilag megegyezik az előző modell első szakaszával. A két eset közti lényegi különbség a fojtás megszüntetésének hiányában a második szakaszban figyelhető meg.

A folyamat során fellépő primer és szekunder oldali nyomásváltozások alakulását mutatja be a 4.2-1. ábra:



4.2-1. ábra: Primer és szekunder nyomások változása a fáklyázás alatt
(Forrás: FLARE szoftver)

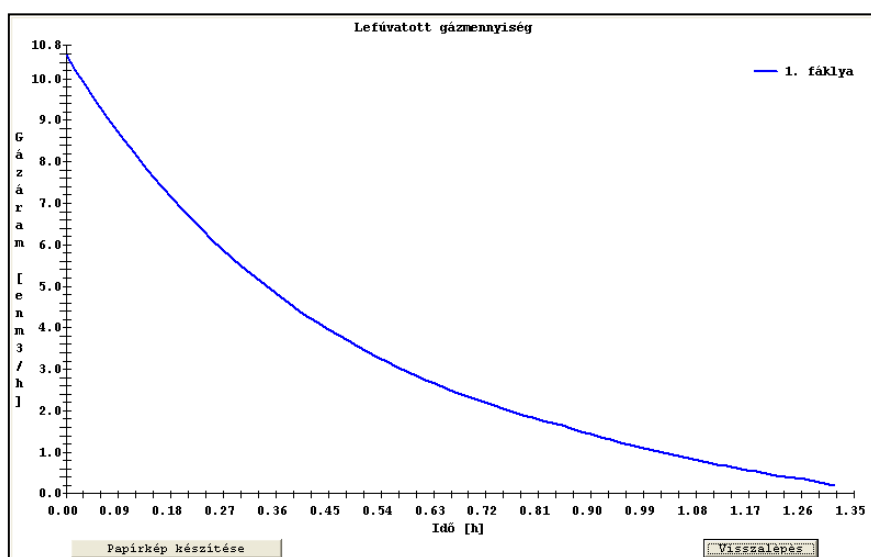
A grafikonon látható, hogy az előző modellben vázolt szelepnnyitás pillanatáig a nyomásgörbéken változás nem tapasztalható, ugyanazok a trendek dominálnak, mint az előző modell első szakaszában.

A fojtás megszüntetésének hiányában a görbék a várt módon folyamatosan laposodva, egyre csökkenő meredekséggel érik el a vízszintes tengelyt. Látható, hogy a szekunder nyomás nem emelkedik, ami a fojtás megszüntetésének tudható be.

Érdekeség, hogy az előző modellt esetében a primer nyomás 33 perc alatt esett 13,3 bar-ról 3,3 bar-ra, és a fojtás megszüntetése után mindössze 18 percre volt szüksége a fennmaradó 3,3 bar-ról nullára eséshez. Ebben az esetben az első szakasz természetesen változatlanul 33 perc alatt telik el, mivel a két rész között nincs különbség. A második szakaszban azonban a

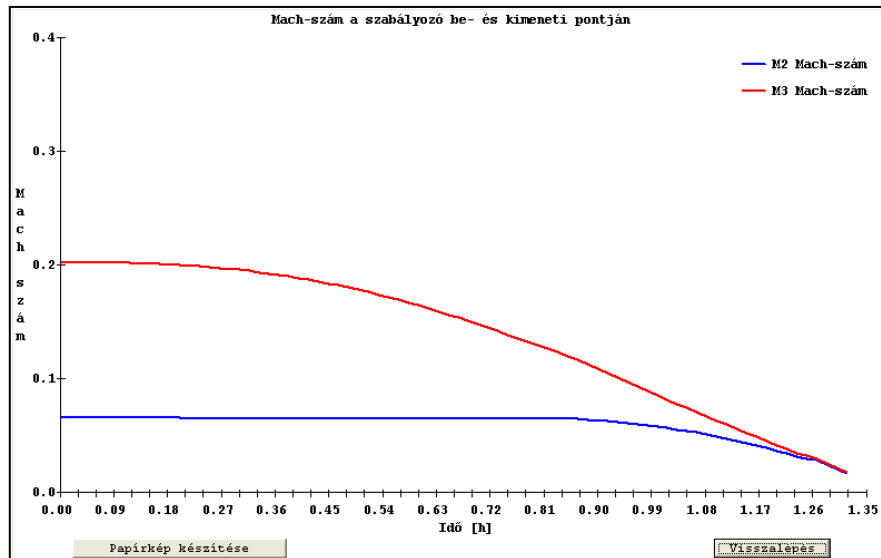
változatlan fojtással a nyomásnak további 45 percre van szüksége ahhoz, hogy 3,3 bar-os értékről nullára essen. Ez a fojtás nélküli idő két és félszerese.

A folyamat során a gáz térfogatáramának változását a 4.2-2-es ábra szemlélteti. A grafikon tanúsága szerint a gázáram változása is szinkronban van az előző modell első szakaszával. Ebben az esetben viszont a görbe második szakaszában nincs hozamemelkedés, a gázáram a nyomásokhoz hasonlóan egyre csökkenő meredekséggel tart a nullához. A leírtakat jól szemlélteti, hogy a gázáram 10000 m³/h-ról 8000 m³/h-ra csökkenéséhez csupán 7 percre volt szükség, míg arra, hogy 2000 m³/h-ról 200 m³/h-ra, 33 perc volt elég.



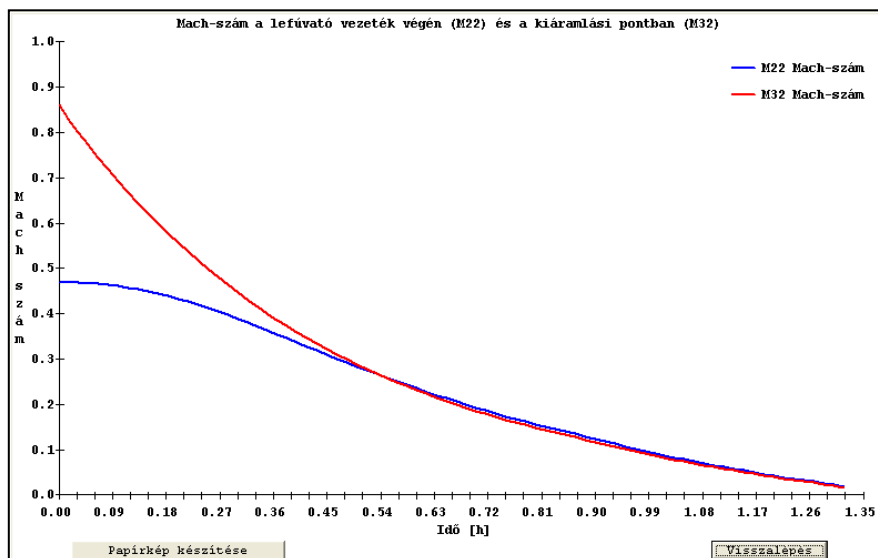
4.2-2. ábra: A fáklyázott gáz térfogatáramának változása az idő függvényében
(Forrás: FLARE szoftver)

A lefúvatás során történő Mach-szám változások is az előbb említett két paraméter változásai szerint módosulnak. A 4.2-3. ábra tanúsága szerint a szabályozó szelep előtti sebességre jellemző Mach-szám a művelet során számottevően nem változik, kizárólag a fáklyázás utolsó negyedében észlelhető minimális csökkenés. A szelep kilépő oldali áramlási sebességéről megállapítható, hogy a rá jellemző Mach-szám a folyamat feléig viszonylag csekély mértékben változik majd viszonylag állandó meredekséggel csökken. A két érték a művelet végére kiegyenlítődik.



4.2-3. ábra: A szabályozó szelep be- és kilépési pontján megfigyelhető Mach-számok az idő függvényében
(Forrás: FLARE szoftver)

A lefúvató vezeték kritikus pontjaiban észlelhető Mach számok változását ábrázolja a 4.2-4. ábra

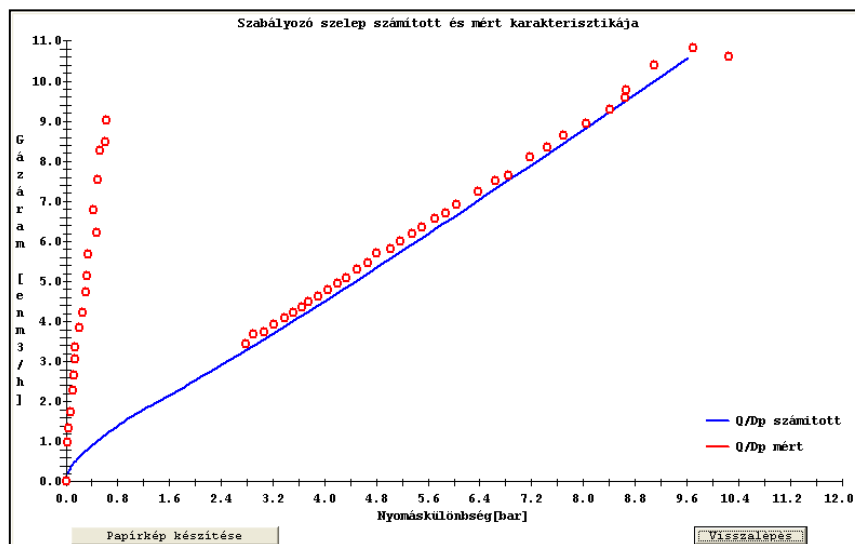


4.2-4. ábra: A szabályozó szelep be- és kilépési pontján megfigyelhető Mach-számok az idő függvényében
(Forrás: FLARE szoftver)

A fenti diagram a kritikus pontokban szintén jóval nagyobb áramlási sebességek alakulnak ki, mint a szelep be- és kilépési pontjain. A folyamat kezdetén a fáklyacső keresztmetszetében ez esetben is hangsebességet megközelítő áramlás jön létre. A folyamat során a sebességet jellemző Mach szám folytonosan, egyre intenzívebben csökken.

A lefúvató vezeték végén, a folyamat kezdetén 0,5 körüli Mach-szám volt jellemző, mely szintén visszaesik a fáklyázás során, ám a folyamat első részében növekvő, majd ezt követően kissé csökkenő meredekséggel.

A lefúvató szelep karakterisztikája a 4.2-5. ábrán látható. A grafikon a vizsgált modell szabályozó szelep két oldalán fellépő nyomáskülönbség, és a gázáram kapcsolatát mutatja be. A piros körrel jelzett értékek a fáklyázás során mért adatok. Látható, hogy a számított karakterisztika görbéje lineárisan, folytonosan csökken egészen a zéruspontig, tehát ebben az esetben a gázáram változása arányos a primer és szekunder nyomáskülönbséggel is.



4.2-5. ábra: A számított szelep karakterisztika, valamint a megvalósult fáklyázás során mért adatok összehasonlítása
(Forrás: FLARE szoftver)

A mért értékekkel összehasonlítva észrevehető, hogy a fojtás megszűnésének pillanatáig a görbe szinkronban van a mért értékekkel, ám a fojtás nélkül mért értékek meredksége számottevően nagyobb; kisebb nyomáskülönbségek esetén is nagyobb gázáramok mérhetők. A fojtással folytatódó modellben azonban a függvény meredksége nem változik, szakadás nélkül tart a zéruspontba.

4.3. Harmadik változat

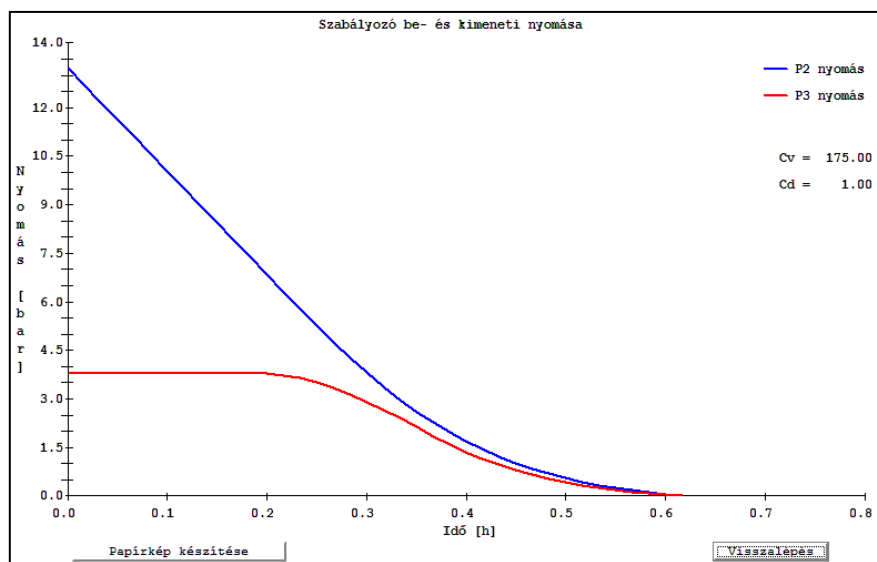
Ebben a variációban az előzőektől kissé eltérően azt vizsgálom meg, hogy a fáklyázás hogyan menne végbe, ha az előzőekben vizsgált nagy fojtástól eltérően egy jelentősen kisebb korlátozást vennék figyelembe. Az alapparaméterek ezúttal is hasonlóak, mindössze a C_v fojtásra egy nagyobb értéket állítok be. Az első modellben ismertetett, a teljesen nyitott

szelepállapotra jellemző $C_v=175$ -ös érték beállítása mellett vizsgálom a paraméterek változását. Az alapadatok a következők:

- Indítónyomás: 13,3 bar
- Kezdeti gázáram: $11000 \text{ m}^3/\text{h}$
- A fojtás beállításánál a $C_v=175$ -es értéket alkalmazom.

A szimuláció elvégzése után elmondható, hogy a fent említett alapbeállítások mellett a fáklyázás 37 percet venne igénybe. Ez jelentősen rövidebb az előző két variációban mérhető időszükségletekhez képest.

A variációról általánosan elmondható, hogy a futtatás után az alapadatokkal elvégzett művelet során olyan áramlási sebességviszonyok alakultak volna ki, melyben a kiáramlási keresztmetszetben észlelhető Mach-szám értéke meghaladta volna a kritikus Mach-szám értéket. A szoftver ezt korlátozó feltételként alkalmazza, ezért ennek tükrében fékezi a gáz térfogatáramát is mindaddig, míg a kiáramlási sebesség nem esik a kritikus érték alá.



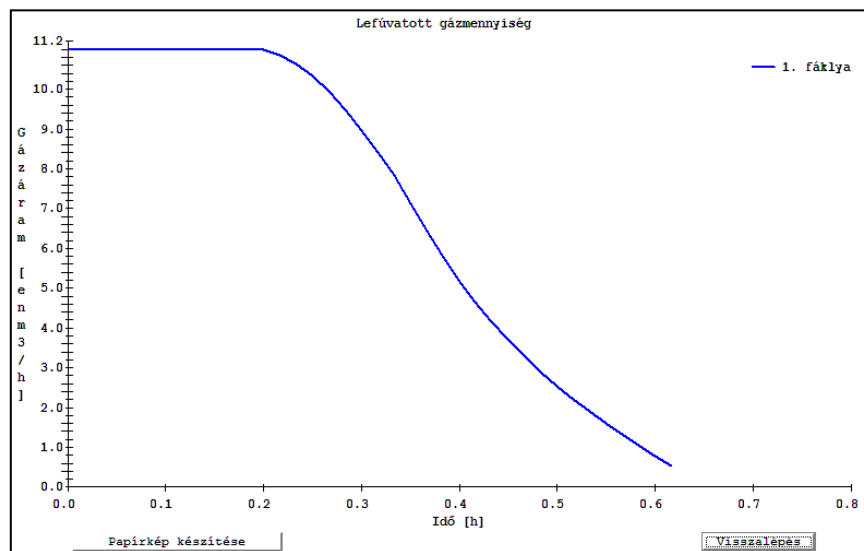
4.3-1. ábra: A Szabályozó szelep két oldalán alakuló nyomások változása a fáklyázás alatt
(Forrás: FLARE szoftver)

Ezek alapján a primer és szekunder oldali nyomás grafikonján (4.3-1. ábra) látható, hogy a szekunder nyomás görbéje a folyamat kezdetén stagnál, majd csak a művelet harmadánál kezd el visszaesni egyre csökkenő meredekséggel. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a beállított kezdeti térfogatáramot, illetve a szekunder nyomást a folyamat kezdetén ezen a stagnáló nyomásértéken kell tartani annak érdekében, hogy a kritikusnál nagyobb Mach-számú áramlási ne jöhessen létre. Ezt lényegében a szelep fokozatos nyitásával lehet biztosítani.

Abban a pontban, ahol a nyomás értéke megkezdje a csökkenést, a szelep eléri teljesen nyitott állapotát. Innentől már a lefúvató rendszer geometriája szabályozza az áramlási viszonyokat.

A primer nyomás emellett a folyamat első felében nagy meredekséggel, megközelítőleg lineárisan csökken, majd a görbe fokozatosan ellaposodva éri el a vízszintes tengelyt. Látható, hogy a folyamat utolsó harmadára a két nyomásérték hozzávetőleg kiegyenlítődik, és egyenlő értéket tartva éri el a zérus tengelyt.

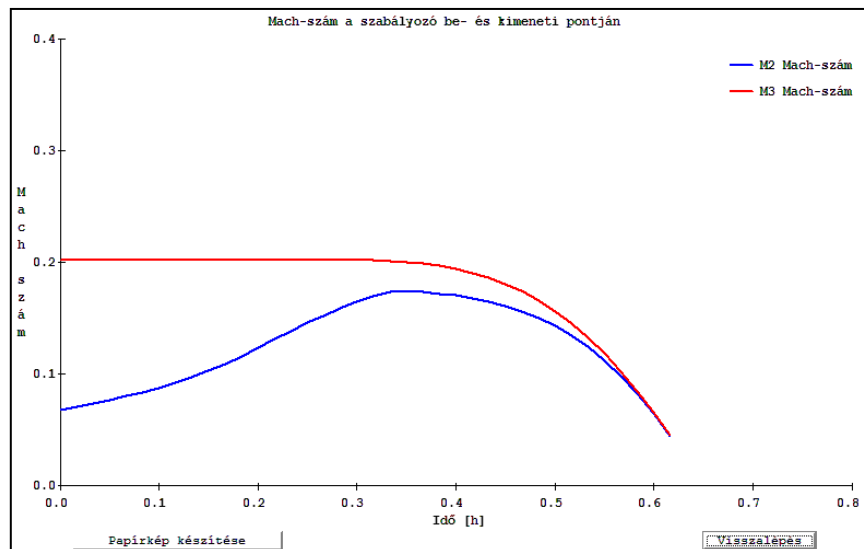
A fáklyázás térfogatáramának változása a 4.3-2 ábra szerint alakul:



4.3-2. ábra: A lefúvatósi gázáram változása a fáklyázás alatt
(Forrás: FLARE szoftver)

A diagramon látható, hogy a szekunder nyomáskorlátozásának következtében a gázáram értéke is stagnál. A fáklyázás 12. percében figyelhetjük meg, hogy a rendszerben már nem áll fenn a kritikus áramlási sebesség veszélye. Ezen időpillanat után a gázáram nagysága is aránylag nagy meredekséggel csökken.

A szabályozó szelep két oldalán fellépő áramlási sebességet jellemző Mach-számok változása a 4.3-3. grafikonon látható:



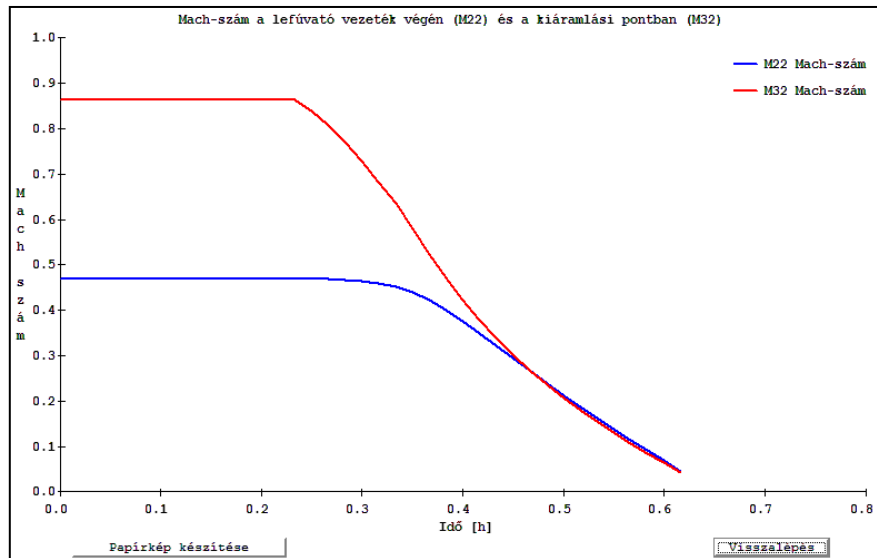
4.3-3. ábra: A Mach számok változása a szabályozó szelep be- és kimeneti pontján
(Forrás: FLARE szoftver)

Az ábrán látható, hogy a szelep kimeneti pontján kialakuló áramlás sebessége a fáklyázás első felében állandó, majd itt is megfigyelhető egy nagymértékű és egyre növekvő meredekségű sebességcsökkenés.

A belépő oldalon azonban az eddigi modellektől eltérően változik a Mach-szám. A folyamat első felében egyre növekszik, majd a fáklyázás kétharmadát elérve, fokozatosan a kimeneti nyomásgörbéhez simulva visszaesés veszi kezdetét.

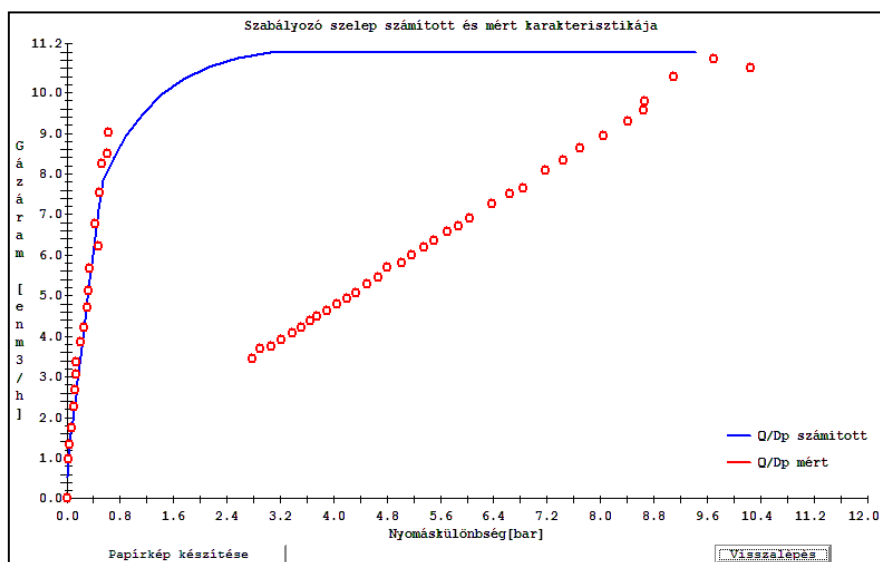
A kritikus pontokban uralkodó Mach-számok változását a 4.3-4. ábra mutatja be. Ez alapján konstátálható, hogy a fáklyakémény kiáramlási keresztmetszetében a művelet kezdetén kialakulhatott volna a kritikus áramlási sebesség, ezért ez korlátozva lett. Ez az érték szabványban rögzített, mely esetén a szoftver korlátozta a kiáramlási sebességet. Megfigyelhető, hogy a Mach-szám értéke csak kis idő múltán, 2 perccel a gázáram, illetve a szekunder nyomás csökkenésének időpillanata után kezdett el süllyedni.

A lefúvató vezeték végén ennél alacsonyabb, de ennek ellenére viszonylag nagynak mondható sebesség állandósul a művelet első felében. A fáklyakéményben tehát huzamos ideig jelentős sebességnövekedés lesz megfigyelhető. A művelet kétharmadától már a két Mach-szám értéke kiegyenlítődve, csökkenő tendenciát mutat egészen a folyamat végéig.



4.3-4. ábra: Mach-számok változása a kritikus pontokban
(Forrás: FLARE szoftver)

A szelepkarakterisztikája a művelet során mért adatokkal összehasonlítva a 4.3-5. ábrán látható.



4.3-5. ábra: A számított szelep karakterisztika, illetve a művelet során mért értékek összehasonlítása
(Forrás: FLARE szoftver)

Az ábra tanúsága szerint a modellben kialakuló szelep karakterisztika inkább a kis nyomáskülönbségeknél mutat egyezést a mért értékekkel. A kis fojtás miatt itt is viszonylag nagy hozamok figyelhetők meg kis nyomáskülönbségek mellett. Ebben a tartományban a függvényre nagy meredekség jellemző.

A nagyobb nyomásdifferencia mellett megfigyelhető konstans hozam a gázáram korlátozása miatt lép fel, melynél látható, hogy a fokozatosan csökkenő primer nyomás ellenére a gázáram állandó lesz mindaddig, míg a szekunder nyomás el nem kezd esni.

5. Összegzés

Dolgozatomban bemutattam egy fáklyázási művelet előtervezése során végrehajtandó legfontosabb számítási illetve szimulációs feladatokat, illetve a kivitelezés során végzett mérési eredmények kiértékelését a szoftver által kalkulált értékek függvényében.

A fáklyázási művelet előtervezésekor kiemelt szempont a költséghatékonyság, ezért elsődleges feladat hőhatás övezet méretének megtervezése, figyelembe véve a fáklyaelőkészítési költségek nagyságát, illetve a művelet időbeli korlátozottságát. A megfelelő kompromisszum megtalálása után megvizsgáljuk, hogy gazdálkodhatunk a rendelkezésre álló hellyel annak érdekében, hogy a lefűvátási időt minimalizáljuk. Erre több változat lefuttatásával megfelelő választ kaptunk. Ezeket szem előtt tartva meghatároztam a fáklya körüli emberi tartózkodás szempontjából veszélyes hőhatás övezetet, melynél többek közt figyelembe vettem a gázhozam nagyságát ($11000 \text{ m}^3/\text{h}$), a gázösszetételből következő fűtőértéket ($34,14 \text{ MJ}/\text{m}^3$), a fáklyakémény magasságát (11 m), illetve az esetleges szél miatti lángdőlés (20°) hatását. Ezek alapján a fáklya körüli veszélyes hőhatás övezet nagysága 21,16 m-re adódott.

A gazdaságossági vizsgálatok során a gázmennyiségek meghatározásánál az általános gáztörvényt használva kiszámoltam, hogy a vezeték fáklyázás előtti kiszakaszolásával, a vezeték lefogyasztásával” közel 10000 m^3 gáz került értékesítésre, mely 4 átlagos magyar háztartás évi gázszükséglete. Ugyanezen elv alapján meghatározható a fáklyázás során elégetett, illetve ezt követően kiszellőztetett gáz mennyisége is, mely 4974 m^3 -re adódott.

Az általam vizsgált művelet lefutása eltér az általánostól, hiszen itt egy nagy fojtású, kis kiáramlási hozamú fáklyázás került bemutatásra, melynél a fáklyarendszer nagyobb indító beállításokat is elbírt volna. A vezeték közel 10 km hosszú, DN 200-as átmérőjű, csőtérfogata 331 m^3 . Erről DN100-as átmérővel 2,9 m hosszú leágazó, és 79 m hosszú lefűvató vezeték viszi a gázt a fáklyakéményre.

A művelet végrehajtása során méréseket végeztem portábilis szonda segítségével, hogy a szoftver számítási adatai a művelet során ténylegesen mérhető értékekkel össze tudjam hasonlítani. A vizsgált változatok mindegyikében azonos indítási nyomást (13,3 bar) és hozamot ($11000 \text{ m}^3/\text{h}$) állítottam be, a különbségek a fojtás beállításaiiban figyelhetők meg.

Az 1. változat a művelet tényleges végrehajtását reprezentálja. Itt feljebb említett indítóparaméterek mellett a fáklyázás nagy fojtással, $C_v=40$ -es érték beállítása mellett kezdődött, majd mikor a vezetéknyomás 3,3 barra csökkent, a fojtást megszüntettük, és nyitott

szelep mellett fejeződött be a lefűvátás. A fáklyázás teljes időtartama 51 perc volt. A fojtás mértékének változtatása miatt a C_v értéke is változott, a nyitott szelep mellett mért értékek a $C_v=175$ -ös értékhez tartozó szelep karakterisztika görbével mutatták a legjobb egyezést. Ezek miatt egyetlen futtatásban nem volt modellezhető a művelet, ezért azt két részre bontottam. Az első szakasz, melyben 10 bart esett a vezeték nyomása 33 perc alatt ért véget, és 3391 m^3 gáz került lefűvátásra. A második szakasz 18 percig tartott, ahol 1052 m^3 gáz elfáklyázására került sor. Az elemzés során bemutatott görbéken látható, hogy a nagy fojtású szakaszban a paraméterek kis meredekséggel, lassan változnak, melyek elnyúló műveletet eredményeznének. A második, fojtás nélküli részben már sokkal meredekebb, gyorsabb lefutású változások figyelhetők meg.

A 2. modell az elsővel azonos indítóparaméterek mellett azt elemeztem, hogyan változna a művelet, ha aközben nem nyitnánk ki a szelepet. A szimuláció alapján elmondható, hogy nagy fojtás tartása mellett a művelet túlságosan elhúzódna, mivel a kis szekunder oldali nyomás miatt csak alacsony volumenű gázáramlás alakulhat ki. A művelet időszükséglete ebben az esetben 1 óra 19 perc lenne. Megfigyelhető, hogy a nagy fojtás tartása mellett ahhoz, hogy a vezetéknyomás 3,3 barról 0-ra csökkenjen, 46 percre van szükség, az első változatban bemutatott 18 perc helyett. Ebből kifolyólag e változat alkalmazása nem célszerű.

A 3. modellben azt az esetet vizsgáltam, hogyan befolyásolná a fáklyázás végbemenetelét, ha a fent megadott indítóparaméterek mellett a C_v értékét a nyitott szeleppállapothoz tartozó 175-ös értéknek állítanám be. A nyitott szelepnak megfelelő C_v érték beállítása miatt a kezdetben megadott $11000 \text{ m}^3/\text{h}$ -ás hozamnál nagyobb gázáram is kialakulhatott volna, ezért ezt a szoftver korlátozó feltételként kezelte, és mindaddig konstans értéken tartotta, míg a rendszer geometriája miatt e peremfeltétel alá nem kerülne az értéke. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a fojtószelep fokozatos nyitásával lehet fenntartani e korlátozott nagyságú hozamot, melyet a szekunder oldali nyomás szinten tartásával tudunk kontrolálni.

A vázolt műveletterv leginkább akkor célravezető, ha a rendelkezésre álló korlátolt hőhatás övezet mellett a lefűvátásra szánt idő is minimális. Az adott hőhatásövezetben ezzel a módszerrel valósítható meg a leggyorsabb leürítés, mely 37 percig tartana.

Az elvégzett mérésnek köszönhetően meghatároztam a nyitott szeleppállapothoz tartozó C_v értéket, mely a korábban említett 175-ös értékre adódott. Ennek gyakorlati haszna jelentős, mivel a fáklyázási műveletek legnagyobb hányada nyitott szeleppállapot mellett történik. Az

ehhez tartozó C_v érték pontos meghatározásával a későbbiekben ezen a fáklyán elvégzendő műveletek előtervezése könnyebbé, pontosabbá válhat.

A hangsebességet megközelítő gázkiáramlás a légtérbe mindegyik modellnél megfigyelhető, igaz, huzamosabb ideig csak a 3. modell esetében áll fenn. Erre esetleges megoldást jelenthetne a fáklyakéményre egy bővítő cső felszerelése, melynél a megnövekedett keresztmetszetnek köszönhetően a bővítmény megnövelt átmérőjének kezdetén a gáz sebessége jelentősen visszaesik, ezen az értéken érve el a levegőbe kiáramlási pontot.

Irodalomjegyzék

- GPSA Engineering Databook, Gas Processors Suppliers Association, 12th edition, SI version, 2004
- Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems API recommended practice 521 4th Edition, API, 1997
- Tihanyi László - Zsuga János: Földgázzállító rendszerek tervezése és üzemeltetése, Miskolci Egyetem, ISBN 978-963-661-999-2, 2012
- Tihanyi L. és Bódi T.: A FLARE 6.0 szimulációs modell leírása, 2012
- VIG-ÜZ-10, Földgázzállító vezetékek és tartozékainak lefűvatása Operatív Szabályzat, FGSZ Zrt.
- Zsíros I.: Portábilis gázmennyiségmérő rendszer, Kezelési utasítás, FGSZ. Zrt.

Köszönetnyilvánítás

A dolgozat megírásához rengeteg segítséget, tanácsot, információt és adatot kaptam, melyekért köszönettel tartozom Prof. Dr. Tihanyi László Egyetemi Tanár Úrnak, valamint Bozó János Üzemviteli Irányító Mérnök Úrnak, akik konzulensként gondozták munkámat, valamint hasznos tanácsokkal láttak el.

Ezen felül köszönettel tartozom a Vecsési és Gellénházi Földgázszállító Üzem üzemviteli csoportjának, valamint Gábris Tibornak, akik munkájuk elvégzése mellett segítették a szükséges adatok feldolgozását, a mérés elvégzését, valamint rengeteg egyéb információval bővítették ismereteimet.