

A hidrogéntartalom hatása a földgázz szállító hálózaton átszállítható energiátartalomra vonatkozóan

The effect of hydrogen content on the energy content that can be transferred through the natural gas transmission network

GALYAS ANNA BELLA

okl. olaj- és gázmérnök, egyetemi tanársegéd,
Miskolci Egyetem, Bányászat és Energia Intézet



Napjaink egyik legsürgetőbb problémája az éghajlatváltozás megfékezése, amelynek egyik jelentős forrása az energiafelhasználáshoz köthető üvegházhatású gázok légkörbe jutása. Európai szinten is erősödik az igény egy olyan megújuló forrásból származó energiahordozóra, amely a hagyományos fosszilis tüzelőanyagok helyettesítésére részben vagy teljesen alkalmas lehet. A hidrogén erre a célra megfelelőnek ígérkezik. A megújuló forrásból származó hidrogén egyik legnagyobb előnye a jelenleg alkalmazott fosszilis tüzelőanyagokkal szemben, hogy eltűzése során vízgőz keletkezik, ezzel jelentősen csökkentve a légkörbe kerülő CO₂-kibocsátás mértékét. Viszont a hidrogén egységnyi térfogatra vetített energiátartalma jelentősen elmarad a földgázétól. Emiatt jelentős kérdésként vetődik fel, hogy a hidrogén földgázhoz való bekeverése, milyen mértékben módosítja a gázvezetéken átvihető energiátartalmat. Ennek számszerűsítéséhez bevezetésre került a KF konverziós faktor. Ez megmutatja, hogy milyen mértékű átszállítható energiátartalombeli csökkenés jelentkezik egy adott vezetéksz szakaszon a tiszta metántartalomhoz viszonyítva, állandó nyomásvesztés mellett, amennyiben a földgázt alkotó fő komponenshez hidrogént kevernek be.

Kulcsszavak: hidrogénbekeverés, energiátartalom, KF konverziós tényező

One of the most urgent problems today is taming the climate change. The most significant sources of the problem are the release of energy use associated greenhouse gases of the atmosphere. There is also a growing demand at European level for renewable energy sources that can partially or fully replace traditional fossil fuels. Hydrogen promises to be suitable for this purpose. One of the biggest advantages of renewable hydrogen over current fossil fuels is that it produces water vapour when combusted, significantly reducing CO₂ emissions into the atmosphere. However, the energy content of hydrogen per unit volume is significantly lower than for natural gas. This raises a significant question of the extent to which the blending of hydrogen with natural gas modifies the energy content that can be transferred through the pipeline. To quantify this, the KF conversion factor has been introduced, which shows the amount of transferable energy content reduction that occurs on a given pipeline section compared to pure methane content with constant pressure loss when hydrogen is already mixed into the main component of natural gas.

Keywords: hydrogen content, energy content, KF conversion factor

Bevezetés

A hidrogén földgáz hálózati megjelenése számos kutatás témájaként jelenik meg nemcsak Európában, hanem Magyarországon is. A hazai egybefüggő földgáz-ellátó hálózatot üzemeltető engedélyesek esetében a hidrogén betáplálása jelentős előkészületeket követel

meg, amely a megfelelő műszaki háttér mellett a hidrogén okozta hatásokra való felkészülést is magában foglalja. Jelen cikkben bemutatjuk, hogy a hidrogén földgázz szállító hálózaton való megjelenésével hogyan változik a vezetékben lévő gáz energiátartalma abban az esetben, ha a rendszerben az üzemeltetési nyomások nem változnak.

A csővezetéki gázáramlás viszonyainak leírása

Az átszállítható energiataralom-változás előrejelzésének vizsgálatához a csővezetéki gázáramlást leíró egyenletet használtam fel. Az összefüggés alapjául az elemi hosszúságú csőszakasz esetén érvényes egységnyi mennyiségű gázra felírható súrlódásos Bernoulli-energiaegyenlet szolgál [1]:

$$\frac{dp}{\rho} + wdw + g \sin \alpha dl + \lambda \frac{w^2}{2d} dl = 0, \quad (1)$$

ahol

$\frac{dp}{\rho}$ – nyomásenergia;

$w dw$ – mozgási energia;

$g \sin \alpha dl$ – helyzeti energia;

$\lambda \frac{w^2}{2d} dl$ – súrlódási veszteség.

A csővezetéki gázáramlás alapegyenlete vízszintes vezeték esetében érvényes, valamint a hazai terepviszonyok mellett elmondható, hogy a gázok esetében a magasságkülönbség okozta gázostatikusság nyomástöbblet elhanyagolható mértékű (a kisnyomású esetektől eltekintve). Emiatt a helyzeti energia tag elhagyható az egyenletből [2]. A mozgási energia tényező szintén figyelmen kívül hagyható, mivel ez nagyságrendileg jelentősen kisebb a többihez viszonyítva, továbbá a nyomási energia kevesebb, mint 1%-a a gázok kis sűrűsége miatt.

Ennek következtében az (1) egyenlet már csak a nyomási energia összetevőből, valamint a súrlódási veszteségből épül fel az alábbi formában:

$$\frac{dp}{\rho} + \lambda \frac{w^2}{2d} dl = 0. \quad (2)$$

A gázok szempontjából nem elhanyagolható azok sűrűségének, valamint áramlási sebességének nyomásfüggése. Emiatt az egyenletbe behelyettesítjük az ezeket leíró összefüggéseket, amelyek alapjául az általános gáztörvény, illetve a kontinuitás törvénye szolgálnak. A különböző behelyettesítések és matematikai műveletek elvégzése után kialakul a karakterisztikus egyenlet, amely a gázok csővezetékben megvalósuló stacioner áramlását írja le [1, 2]:

$$p_1^2 - p_2^2 = \left(\frac{p_n}{T_n} \right)^2 \frac{M_{\text{lev}}}{(\pi/4)^2 R_u} \lambda \frac{M_{\text{kev}}}{M_{\text{lev}}} T z \frac{L}{d_b^5} q_n^2, \quad (3)$$

ahol

p_n – fizikai normálnyomás [101 325 Pa(a)];

T_n – fizikai normálhőmérséklet [273,15 K];

M_{lev} – standard összetételű száraz levegő moláris tömege (MSZ ISO 6976 szerint);

R_u – egyetemes gázállandó;

p_1 – kezdőponti nyomás [Pa(a)];

p_2 – végponti nyomás [Pa(a)];

λ – csősúrlódási tényező [–];

M_{kev} – gázelegy moláris tömege;

T – gázelegy hőmérséklete [K];

z – gáz kompresszibilitási tényezője [–];

L – vezeték szakasz hossza [m];

d_b – csővezeték belső átmérője [m];

q_n – fizikai normálállapotra vonatkoztatott gázáram.

Az egyenletben számos egyszerűsítő feltevést tettünk, mivel nem létezik sztochasztikus megoldása az áramlástan problémának. A vizsgálat során izotermikus áramlást feltételezünk, vagyis nem vesszük figyelembe azt, hogy a csővezetékben való áramlás során a gáz hőmérséklete változik a vezeték hossza mentén. A vezeték szakasz vízszintes, vagyis az összefüggés eltekint a kezdő- és végpont közötti magasságkülönbség okozta hatásoktól. A vizsgált modell állandó keresztmetszetű vezeték szakaszból áll, amelyen a kezdő- és a végpont között nincs közbelső elvétel, azaz az időegység alatt átáramló gáz tömege állandó [2].

Az átszállítható energiataralom változására vonatkozó vizsgálat során alkalmazott peremfeltételek

A bemutatott vizsgálat a hazai földgázellátó hálózatba történő hidrogén betáplálást feltételez, megvizsgálva azt, miként alakul az egyre növekvő mértékű hidrogéntartalom hatására a hálózatba betáplált energiataralom. A vizsgálat pontos lehatárolása érdekében számos peremfeltételt vettem figyelembe.

A vizsgálat során az egyik legfőbb peremfeltétel, hogy a kezdő- és végponti nyomás értéke állandó, vagyis a vezetéken jelentkező nyomáskülönbség állandónak tekinthető bármely gázösszetétel csővezetéki áramlása során. Az elemzés során eltekintek a magasabb rendű szénhidrogén-, valamint az inerttartalomtól, a minta gázelegy kizárólag metánt és hidrogént tartalmaz abból a megfontolásból, hogy a formula általánosan alkalmazható legyen.

Ahhoz, hogy a tiszta metán, valamint a metán-hidrogén gázelegy csővezetéki áramlására vonatkozó átszállítható energiataralom változása leírhatóvá váljon – állandó nyomásvesztéssel feltételezve – felírtam a már hidrogént is tartalmazó, kétkomponensű gázelegy esetén érvényes, valamint a kizárólag CH₄-tartalmú gázra rögzített, az áramlási viszonyokat kifejező összefüggést. Az átszállítható energiataralom-változás meghatározásának alapját tehát a metán-hidrogén gázelegyre felírható, valamint a tiszta metántartalom mellett érvényes karakterisztikus egyenletek hányadosa adja. Az összefüggés az alábbiakban látható.

$$p_1^2 - p_2^2 = \left(\frac{p_n}{T_n} \right)^2 \frac{M_{\text{lev}}}{(\pi/4)^2 R_u} \times \frac{\overline{\lambda}_{\text{kev}}}{M_{\text{lev}}} \frac{\overline{T}_{\text{kev}}}{z_{\text{kev}}} \frac{L}{d_b^5} q_{n \text{ kev}}^2, \quad (4)$$

$$p_1^2 - p_2^2 = \left(\frac{p_n}{T_n} \right)^2 \frac{M_{\text{lev}}}{(\pi/4)^2 R_u} \times \frac{\overline{M}_{\text{CH}_4}}{M_{\text{lev}}} \frac{\overline{T}_{\text{CH}_4}}{z_{\text{CH}_4}} \frac{L}{d_b^5} q_{n \text{ CH}_4}^2, \quad (5)$$

ahol

$\overline{\lambda}_{\text{kev}}$ – a gázelegy esetén jelentkező átlagos súrlódási tényező [-];

$\overline{\lambda}_{\text{CH}_4}$ – a metán esetén jelentkező átlagos súrlódási tényező [-];

$\overline{T}_{\text{kev}}$ – a gázelegy átlagos hőmérséklete [K];

$\overline{T}_{\text{CH}_4}$ – a metán átlagos hőmérséklete [K];

z_{kev} – a gázelegy átlagos kompresszibilitási tényezője [-];

z_{CH_4} – a metán átlagos kompresszibilitási tényezője [-];

$q_{n \text{ kev}}$ – a gázelegy fizikai normálállapotról vonatkoztatott gázárama [nm^3/s];

$q_{n \text{ CH}_4}$ – a metán fizikai normálállapotról vonatkoztatott gázárama [nm^3/s].

Mivel a vizsgálatok során peremfeltételként vettem figyelembe a kezdő- és végponti nyomáskülönbségek állandóságát, így a baloldal egyenlősége miatt – a matematika törvényszerűségei következtében – az összefüggések jobb oldalai is egyenlők egymással. Az így keletkezett hányados esetében egy sor egyszerűsítő feltételezést alkalmaztam. A csősúrlódási tényező értékét a földgázellátó rendszeren a belső csőfal relatív érdessége határozza meg az áramlást jellemző Reynolds-számok nagyságrendje miatt. A gázelegy összetétele elhanyagolható mértékben befolyásolja a súrlódási tényezőt, aminek következtében az átlag λ értékek azonosak, ezáltal az összefüggés tovább egyszerűsíthető. A gázösszetétel hatása a hőmérséklet-eloszlásra gyakorlatilag jelentéktelen, értéke 1,5% alatt marad [3, 4]. Az eltérő gázelegyek vizsgálata során természetesen a csővezeték geometriája, valamint a gáz hőmérséklete is azonos. E peremfeltételek mellett összefüggés áll fenn, amely szerint a tiszta metántartalomhoz viszonyított térfogatáram-változást a hidrogéntartalom gázelegyben történő megjelenése jelenti. Ennek értéke láthatóan a relatív sűrűség – amely a standard összetételű száraz levegő és a gáz moláris tömegeinek hányadosaként adódik –, és ezt a kompresszibilitási tényező befolyásolja.

$$\frac{q_{n \text{ kev}}}{q_{n \text{ CH}_4}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{rel CH}_4} z_{\text{CH}_4}}{\rho_{\text{rel kev}} z_{\text{kev}}}}, \quad (6)$$

ahol

$\rho_{\text{rel CH}_4}$ – a metán relatív sűrűsége [-];

$\rho_{\text{rel kev}}$ – a gázelegy relatív sűrűsége [-].

Bevezetve az egységnyi energiatartalmat kifejező hőértéket a térfogatáram-változást leíró egyenletbe, a kapott összefüggés segítségével meghatározhatóvá válik a hidrogéntartalom hatására bekövetkező, a csővezetéken átszállítható energiatartalom-változás, mely állandó nyomásvesztéséget feltételezve:

$$\text{KF} = \frac{E_{\text{kev}}}{E_{\text{CH}_4}} = \frac{H_{a \text{ kev}}}{H_{a \text{ CH}_4}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{rel CH}_4} z_{\text{CH}_4}}{\rho_{\text{rel kev}} z_{\text{kev}}}}, \quad (7)$$

ahol

KF – konverziós faktor [-];

E_{kev} – a gázelegy alsó hőértéke [kWh/m^3];

E_{CH_4} – a metán alsó hőértéke [kWh/m^3];

$H_{a \text{ kev}}$ – a gázelegy energiatartalma [kWh/m^3];

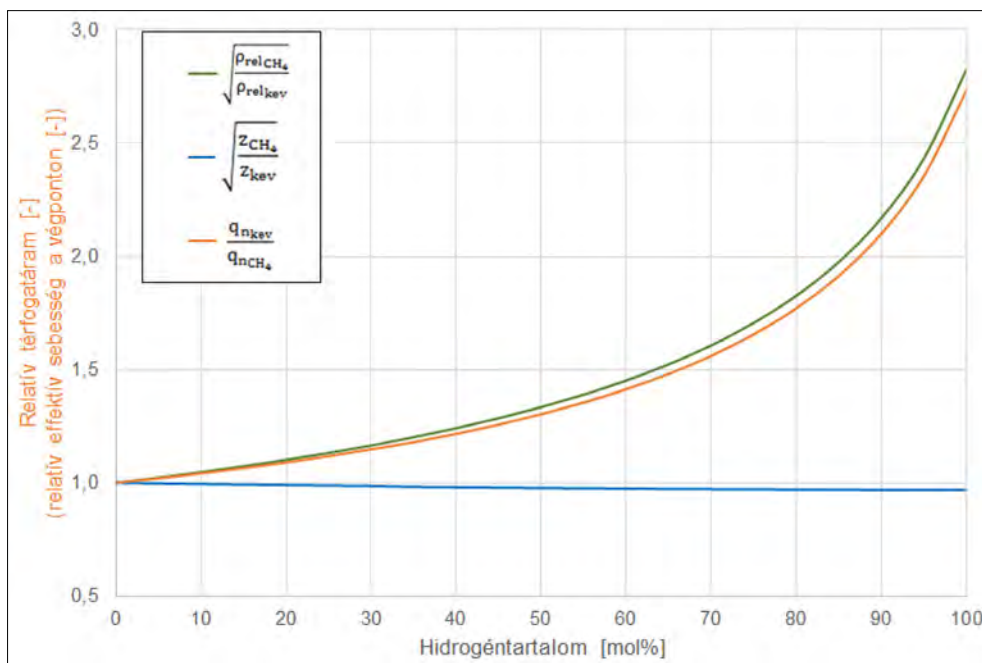
$H_{a \text{ CH}_4}$ – a metán energiatartalma [kWh/m^3].

A számítások során a metán, a hidrogén, valamint az ezekből alkotott gázelegy relatív sűrűsége, valamint alsó hőértéke az MSZ ISO 6976:1997 Földgáz. A hőértéket, a sűrűség, a relatív sűrűség és a „Wobbe-szám számítása a gázösszetételből” c. szabvány alkalmazásával számítottam ki.

Bevezetve a KF konverziós faktort az előzőleg bemutatott egyenletbe, a kapott mutatószám kifejezi, hogy a tiszta metántartalomhoz viszonyítva a hidrogéntartalom megjelenésével hogyan változik a gázvezetéken átszállítható gázmennyiség energiatartalma, amennyiben a vezetéken jelentkező nyomásvesztés állandó. Az egyenletből egyértelműen látható, hogy a földgázszállító hálózati gázmennyiségek energiatartalom-változását jellemző konverziós faktor a nyomás, a hőmérséklet, valamint a hidrogéntartalom függvényében határozható meg.

A kapott egyenlet alapján a csővezetékben áramló gáztérfogat csak a relatív sűrűség, valamint a kompresszibilitási tényező függvénye. A továbbiakban az így nyert összefüggés alapján számított, a csővezetéken átszállítható energiatartalom-változás kerül bemutatásra a magyar földgázelosztó-, illetve szállítóhálózaton érvényes jellegzetességeket figyelembe véve.

A karakterisztikus egyenletek hányadosából képzett egyenlet alapján ábrázolom a normál térfogatáram-változást a hidrogéntartalom szállítóhálózati megjelenése során, amelyet az 1. ábra szemléltet. A növekvő hidrogéntartalom mellett jelentkező relatív normál térfogatáram-változás vizsgálata során az egyenlet tagjait külön-külön ábrázoljuk.

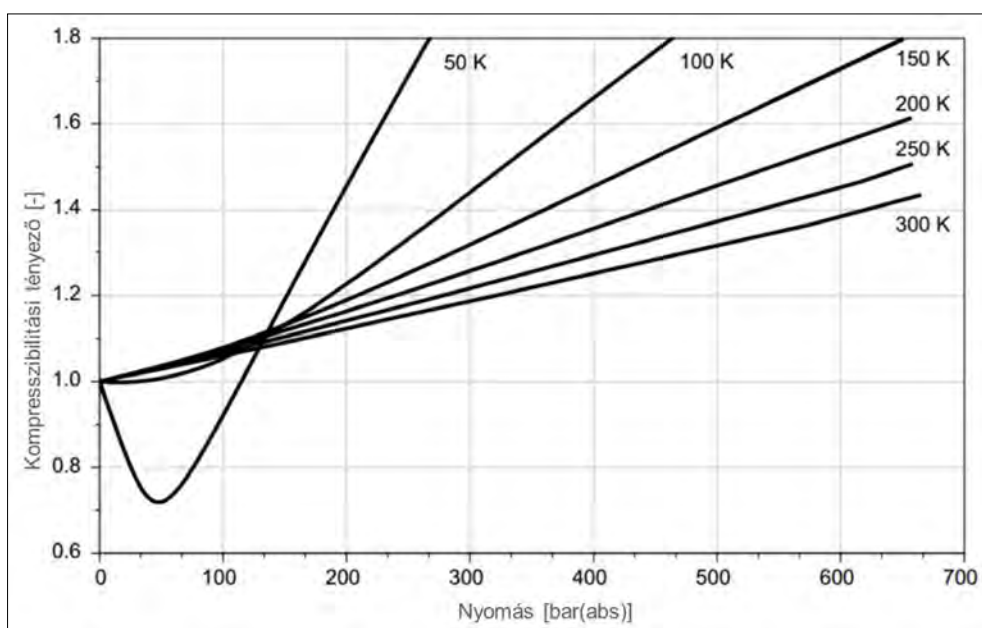


1. ábra. A relatív normál térfogatáram és relatív áramlási sebesség alakulása a végponton

Az 1. ábrán látható, hogy a metán- és a hidrogéntartalmú gázelegy adott nyomáson és hőmérsékleten érvényes kompresszibilitási tényezőiből képzett hányados négyzetgyöke az 1,0-es értéktől még 100 mol% hidrogéntartalom esetében is kismértékben tér el. A térfogatáram-változást jelentősebb mértékben határozza meg a relatív sűrűségek hányadosának négyzetgyöke, aminek oka a metán és a hidrogén sűrűségkülönbségében keresendő, mivel a hidrogén közel nyolcszor kisebb sűrűséggel rendelkezik a földgázokat alkotó legfőbb komponensnél. A két görbe eredője adja a relatív térfogatáram görbét, amely megmutatja, hogy a növekvő hidrogéntartalom mellett milyen

mértékben növekszik a térfogatáram a csővezetékben. Az 1. ábrán is megfigyelhető, 10 mol% H₂-tartalmú gázelegy esetében 4,1%-kal, 20 mol% mellett megközelítőleg 9,0%-kal növekszik a metánhoz viszonyított normál térfogatáram. Tiszta hidrogéngáz csővezetékben történő szállítása esetében (a narancssárga görbe) 2,7-szer nagyobb normál térfogatáram lép fel, mintha az kizárólag metán molekulákból épülne fel.

A hazai és nemzetközi gyakorlatban a szállítói engedélyek 10 m/s értéken maximalizálják a hálózaton jelentkező áramlási sebességeket. A kontinuitási törvényből eredően a gázáram egyenes arányban változik a végponton jelentkező effektív áramlási sebes-



2. ábra. A hidrogén kompresszibilitási tényezője a nyomás és hőmérséklet függvényében [5]

séggel. Ebből következően a térfogatáram változását leíró görbe megegyezik a vezeték végpontján kialakuló effektív áramlási sebesség görbéjével.

A kompresszibilitási tényező alakulása metán–hidrogén gázelegy esetén a gázszállító hálózaton jelentkező nyomástartományon

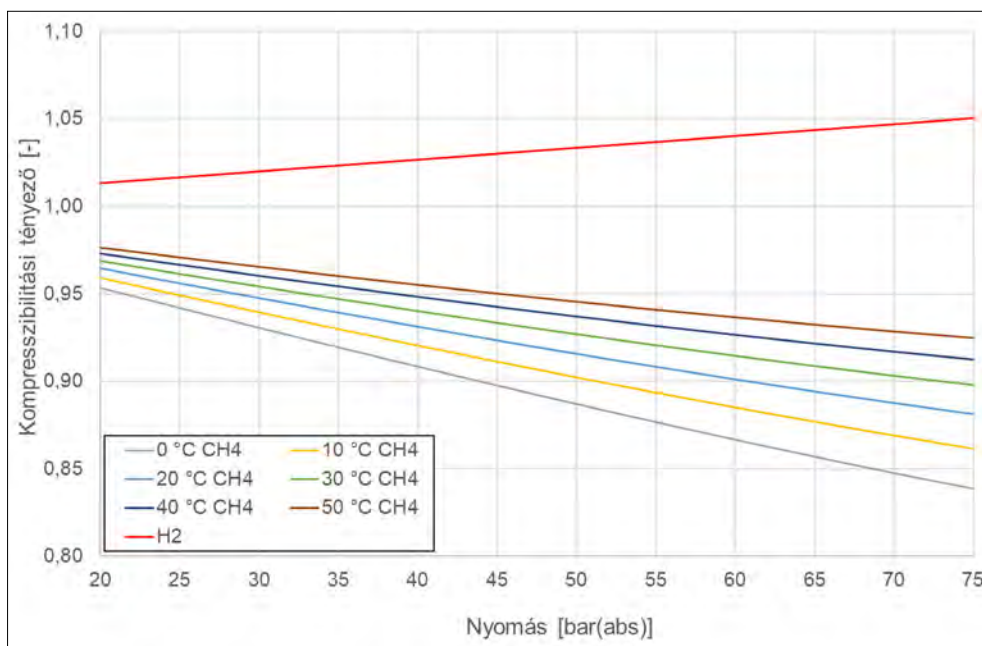
A hazai földgázszállító rendszer jellemző névleges nyomása 64 bar, a belső engedélyezési túlnyomások nagyságrendileg 40–75 bar tartományban van. Vizsgálataimat ettől szélesebb, 20–75 bar(a) nyomástartományban végeztem el, 5 bar nyomáslépcsőt alkalmazva. A hőmérséklettartományt 0–50 °C között határoztam meg 10 °C hőmérsékletlépcsővel, a hidrogéntartalmat pedig 0–100 mol% között vizsgáltam.

A földgázszállítás során jelentkező, a hidrogéntartalom bekeverésének hatására végbemenő, állandó nyomásvesztéséget feltételező, csővezetéken átszállítható, energiatartalom-változást kifejező konverziós faktor meghatározásában jelentős szerepet játszik a kompresszibilitási tényező, emiatt ennek részletes vizsgálatától nem lehet eltekinteni. A kompresszibilitási tényező görbéinek alakulását az olaj- és gáziparban széles körben alkalmazott Aspen HYSYS szimulációs szoftver segítségével határoztam meg. A szimuláció során használt állapotegyenlet kiválasztásához a szakirodalomban fellelhető, a hidrogén kompresszibilitási tényezőjét leíró görbéire történő illeszkedést vizsgáltam (2. ábra). Számos futtatás eredményeként megállapítottam, hogy a legjobb illeszkedés a Soave–Redlich–Kwong (SRK) állapotegyenlet alkalmazásával érhető el, főként a vizsgálatok szempontjából jelentős 300 K hőmérsékletre tartozó görbe esetén.

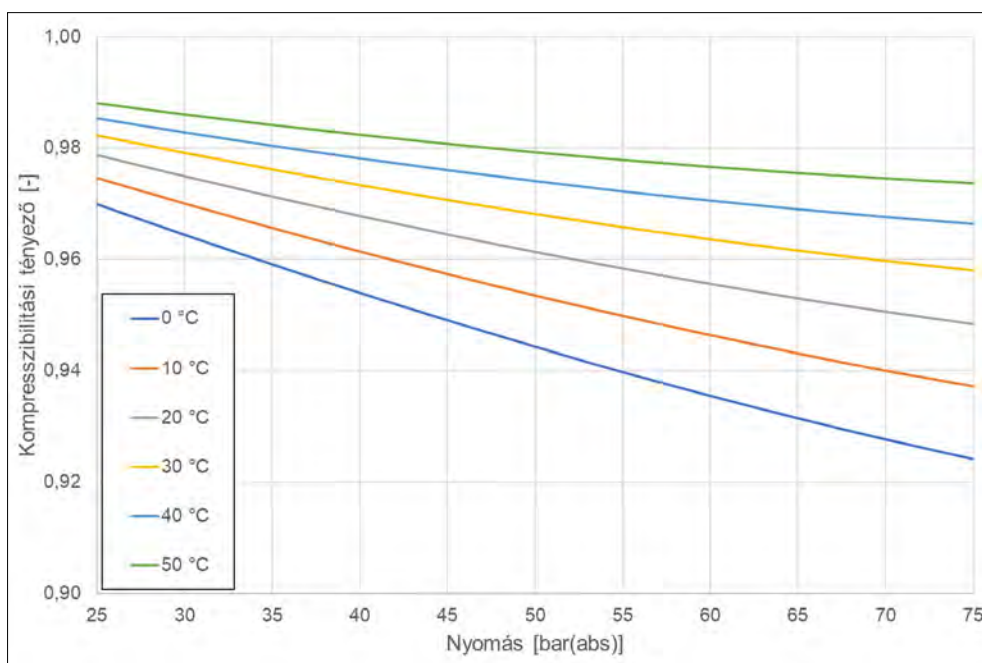
Elsőként a metán és a hidrogén kompresszibilitási tényezőjét vizsgáltam. A számítás eredményeit a 3. ábra szemlélteti. A metán esetében a nyomás növekedésével az eltérő hőmérsékletekhez tartozó kompresszibilitási tényező görbéi egyre inkább elkülönülnek egymástól. A metán eltérési tényezője a legkisebb értéket a vizsgált legalacsonyabb hőmérsékleten és legnagyobb nyomáson veszi fel. Szembetűnő különbség, hogy míg a metán kompresszibilitási tényezője a nyomás növekedésével csökken, addig a hidrogén esetében növekedés tapasztalható, vagyis a metán–hidrogén gázelegy kompresszibilitási tényezőjének alakulására a két komponens viselkedése ellentétesen hat. A másik jelentős eltérés, hogy a hidrogén kompresszibilitási tényezője a hőmérséklettől szinte független, a különböző hőmérsékletre tartozó görbék egybeesnek, emiatt a 3. ábrán csak egyetlen, piros színnel jelölt görbét ábrázoltam.

A 4. ábra a 20 mol% H₂-tartalmú metán–hidrogén gázelegy kompresszibilitási tényező menetét mutatja be 20–75 bar abszolút nyomás- és 0–50 °C hőmérséklet-tartományt vizsgálva. Az ábrán megfigyelhető, hogy a gázelegy kompresszibilitási tényezője a nyomás növekedésével csökken, a csökkenés kisebb hőmérsékleten szignifikánsabb. A hőmérséklet emelkedésével a kompresszibilitási tényező értéke láthatóan növekszik, illetve az is megfigyelhető, hogy a hőmérséklet növekedésével a görbék meredeksége csökken.

A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a hidrogén a földgázt legnagyobb arányban alkotó metánnal ellentétesen hat a gázelegy kompresszibilitási tényezőjének alakulására. Ahogyan nő a hidrogéntartalom a gázelegyben, úgy közelít az eltérési tényező a hidrogén adott nyomáson érvényes eltérési tényezőjéhez.



3. ábra. A metán és a hidrogén kompresszibilitási tényezőjének alakulása eltérő nyomás- és hőmérsékletértékeken



4. ábra. A 20 mol% H_2 -tartalmú metán-hidrogén gázelegy kompresszibilitási tényező görbéi a nyomás és hőmérséklet függvényében

A konverziós faktor a földgázz szállító hálózaton jelentkező nyomás- és hőmérséklet-tartomány esetében

A nyomás és hőmérséklet mint paraméterek függvényében meghatároztam a különböző hidrogéntartalmú gázelegyek esetében jelentkező konverziós faktor alakulását, amelyek közül az 5 mol% H_2 -tartalommal rendelkező gázelegy KF konverziós faktorát az 5. ábra mutatja.

A konverziós faktorok lefutását szemléltető 5. ábra szerint a görbék egyenessel jól közelíthetők, ezt szaggatott vonallal tüntettem fel. Ennek alapján a

vizsgált nyomás- és hőmérséklettartományokban az eltérő összetételű metán-hidrogén gázelegyek konverziós faktora a (8) összefüggéssel határozható meg, amit lineáris regresszió segítségével írtam le:

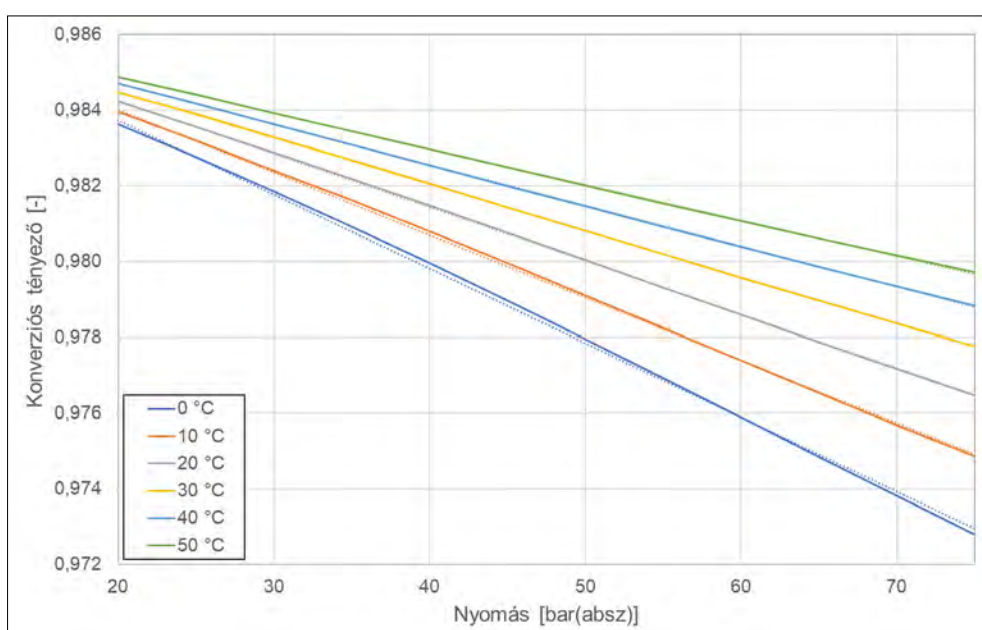
$$KF = \alpha p + \beta, \quad (8)$$

ahol

p – átlagnyomás [bar(a)];

α, β – paraméterek [-].

Az egyenlet alkalmazása során célszerű behelyettesíteni a vezetéken jelentkező átlagnyomást a vezeték



5. ábra. A konverziós faktor 5 mol% H_2 -tartalom esetén a nyomás és hőmérséklet függvényében

hossza mentén érvényes átlagértékeinek figyelembe vétele érdekében. Ez az alábbi összefüggés alapján határozható meg [6]:

$$p_{\text{átl}} = \frac{2}{3} \left(p_1 + \frac{p_2^2}{p_1 + p_2} \right), \quad (9)$$

ahol

$p_{\text{átl}}$ – átlagnyomás [bar(a)];

p_1 – kezdőponti nyomás [bar(a)];

p_2 – végponti nyomás [bar(a)].

Az α paraméter változását a hőmérséklet függvényében a 6. ábra szemlélteti, amely szerint az együttartó értéke mind a hőmérséklettől, mind pedig a gáz-elegy hidrogéntartalmától jelentősen függ.

A 6. ábra görbéi másodfokú polinommal jól leírhatók, így az α paraméter változásának hőmérséklet-függése az alábbi egyenlettel fejezhető ki:

$$\alpha = \gamma T^2 + \delta T + \varepsilon, \quad (10)$$

ahol

$\gamma, \delta, \varepsilon$ – hőmérsékletfüggést kifejező paraméterek [-];

T – hőmérséklet [°C].

A hőmérsékletfüggést leíró paraméterek hidrogéntartalomtól függő további vizsgálata is szükséges, a paraméterek hidrogéntartalomtól függő viselkedését a 7. ábra mutatja.

A kapott viselkedés harmadfokú polinommal kellő pontossággal leírható, amely alapján a paraméterek a következő összefüggésekkel definiálhatók:

$$\gamma = \gamma_1 (H_2)^3 + \gamma_2 (H_2)^2 + \gamma_3 (H_2) + \gamma_4, \quad (11)$$

$$\delta = \delta_1 (H_2)^3 + \delta_2 (H_2)^2 + \delta_3 (H_2) + \delta_4, \quad (12)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 (H_2)^3 + \varepsilon_2 (H_2)^2 + \varepsilon_3 (H_2) + \varepsilon_4, \quad (13)$$

ahol

$\gamma_i, \delta_i, \varepsilon_i$ ($i = 1-4$) – hidrogéntartalmat kifejező paraméterek [-];

H_2 – hidrogéntartalom [mol%].

A görbékre jól illeszkedő harmadfokú polinomok alapján az 1. táblázatban feltüntetett értékeket veszik fel az együtthatók:

Az előző egyenletekbe behelyettesítve a paraméterek pontos értékeit, megkaphatóak az alábbi összefüggések:

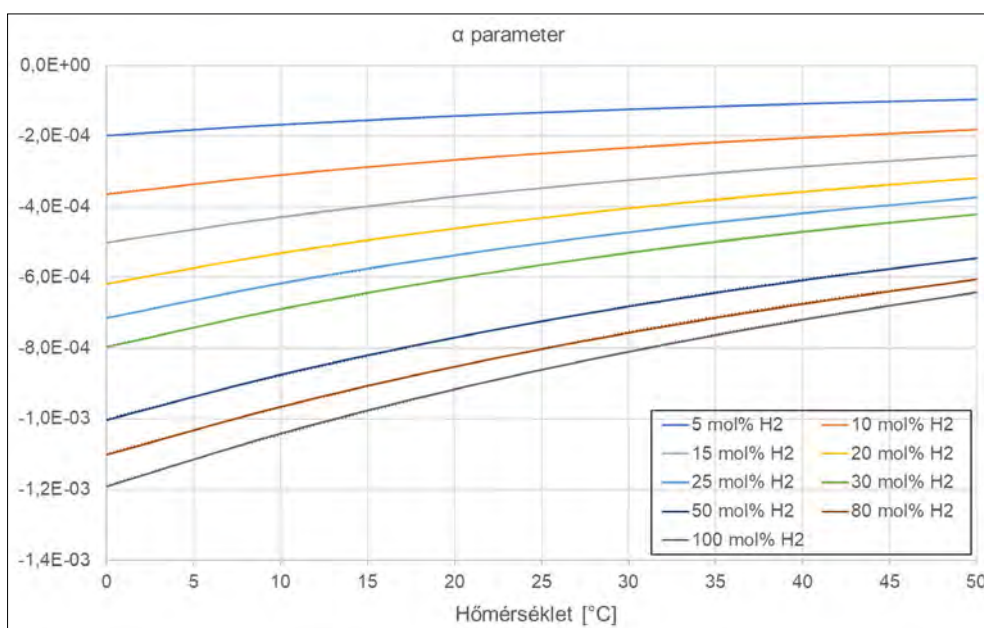
$$\gamma = -2,847 \cdot 10^{-13} (H_2)^3 + 5,601 \cdot 10^{-11} (H_2)^2 - 3,576 \cdot 10^{-9} (H_2) - 7,357 \cdot 10^{-9}, \quad (14)$$

$$\delta = -3,932 \cdot 10^{-11} (H_2)^3 - 7,951 \cdot 10^{-9} (H_2)^2 - 5,485 \cdot 10^{-7} (H_2) - 7,216 \cdot 10^{-7}, \quad (15)$$

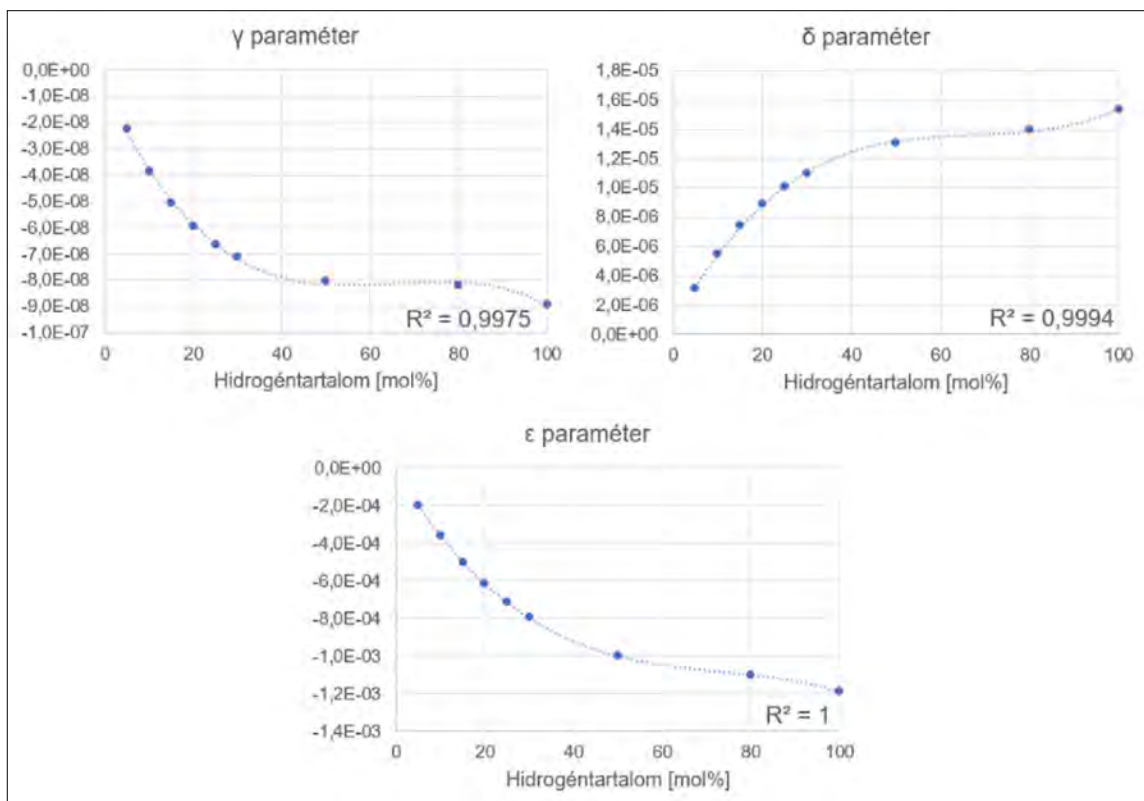
$$\varepsilon = -2,280 \cdot 10^{-9} (H_2)^3 + 5,003 \cdot 10^{-7} (H_2)^2 - 3,894 \cdot 10^{-5} (H_2) - 1,865 \cdot 10^{-5}. \quad (16)$$

1. táblázat. A függvényillesztés alapján kapott egyenletek paramétereinek értékei

γ_1	γ_2	γ_3	γ_4
-2,847E-13	5,601E-11	-3,576E-09	-7,357E-09
δ_1	δ_2	δ_3	δ_4
3,932E-11	-7,951E-09	5,485E-07	7,216E-07
ε_1	ε_2	ε_3	ε_4
-2,280E-09	5,003E-07	-3,894E-05	-1,865E-05



6. ábra. Az α paraméter változása



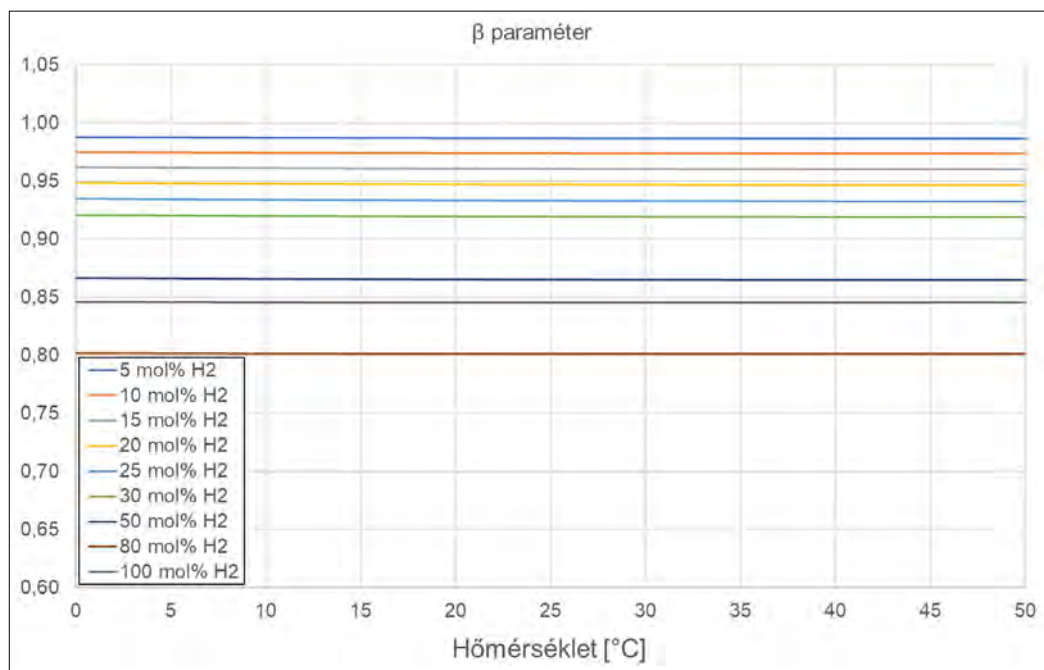
7. ábra. A γ , δ és ϵ hőmérsékletfüggető paraméterek változása a hidrogéntartalommal

A konverziós faktort leíró összefüggés meghatározásához elengedhetetlenül szükséges a paraméter (tengelymetszet) vizsgálata is. A kezdeti egyenletben szereplő paraméter hőmérséklet szerinti ábrázolását a 8. ábra szemlélteti, amely alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a vizsgált paraméter a gázelegy hő-

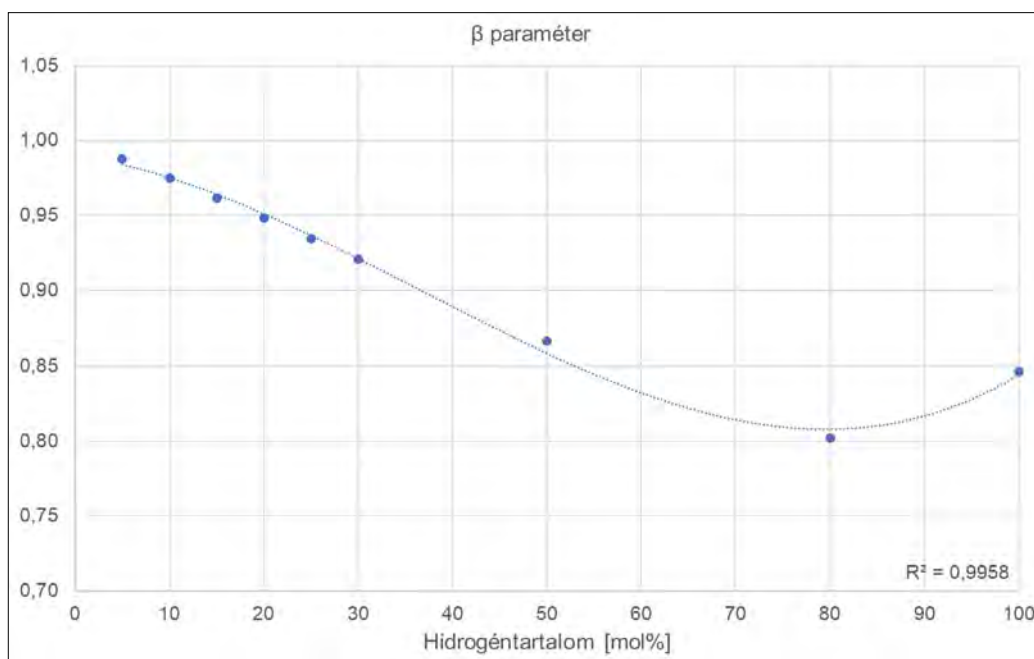
mérsékletétől indifferens, csak a hidrogéntartalmától függ.

Mivel a vizsgált paramétert a hőmérséklet nem befolyásolja, emiatt elegendő a hidrogéntartalomtól való függését vizsgálni, melyet a 9. ábra mutat.

A β paraméter viselkedése, harmadfokú polinommal kellő pontossággal leírható, ennek következtében



8. ábra. A β paraméter változása



9. ábra A β paraméter függése a hidrogéntartalomtól

a paraméter függését a hidrogéntartalomtól a következő összefüggés adja meg:

$$\beta = \beta_1 (H_2)^3 + \beta_2 (H_2)^2 + \beta_3 (H_2) + \beta_4, \quad (17)$$

ahol

β_i ($i = 1-4$) – a hidrogéntartalomtól való függést leíró paraméterek [-];

H_2 – hidrogéntartalom [mol%].

A görbére jól illeszkedő harmadfokú polinom alapján a 3. táblázatban található értékeket veszik fel az együtthatók.

3. táblázat. A függvényillesztés alapján kapott egyenletek paramétereinek értékei

β_1	β_2	β_3	β_4
5,807E-07	-6,361E-05	-9,050E-04	9,900E-01

A (17) egyenletbe behelyettesítve a paraméterek pontos értékeit kapjuk a β paramétert megadó összefüggést:

$$\beta = 5,807 \cdot 10^{-7} (H_2)^3 - 6,361 \cdot 10^{-5} (H_2)^2 - 9,050 \cdot 10^{-4} (H_2) + 9,900 \cdot 10^{-1}. \quad (18)$$

Az egyenlet abszolút hibájának tartománya 20 mol% hidrogéntartalom esetében 0,3–0,5% közötti, legnagyobb eltérés 50 mol% H_2 -tartalom mellett tapasztalható, de nem haladja meg a 0,8% értéket.

Összefoglalás

A KF konverziós faktort megadó összefüggés tehát azt a relatív mutatószámot adja meg, hogy milyen

mértékű átszállítható energiatartalombeli csökkenés jelentkezik egy adott vezetéksz szakaszon, tiszta metántartalomhoz viszonyítva állandó nyomásvesztés mellett, amennyiben a földgázt alkotó fő komponenshez már hidrogén is bekevernek. A földgázz szállító rendszerüzemeltetők számára az egyenlet segítséget nyújthat abban, hogy a jelenlegi üzemeltetési feltételek mellett a hidrogéntartalom földgáz hálózati megjelenése pontosan mekkora energiatartalombeli csökkenést jelent, amelyből a következtetéseket levonva a földgázellátó rendszer üzemeltetésére, a fogyasztók biztonságos ellátására vonatkozóan hozhatnak döntéseket.

IRODALOM

- [1] Bobok E. (1997): Áramlástan. Miskolci Egyetemi Kiadó, pp.128–202. ISBN 963 661 317 6
- [2] Vida M. (főszerk.) (1984): Gáztechnikai kézikönyv. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- [3] Andre J., Auray S., Brac J., De Wolf D., Maisonnier G., Ould-Sidi M.-M., Simonnet A. (2013): Design and dimensioning of hydrogen transmission pipeline networks. European Journal of Operational Research, 229(1), 239–251. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.02.03
- [4] Kuczynski S., Laciak M., Olijnyk A., Szurlej A., Wlodek T. (2019): Thermodynamic and technical issues of hydrogen and methane-hydrogen mixtures pipeline transmission. Energies, 12(3). DOI: 10.3390/en12030569
- [5] Klell M. (2010): Storage of Hydrogen in the Pure Form. Handbook of Hydrogen Storage (pp.1–37) DOI: 10.1002/9783527629800.ch1
- [6] Szilas A. P. (1975): Production and transport of oil and gas. Akadémiai Kiadó, Budapest