

Szád-horony karima szivárgásának vizsgálata végeelem analízissel

Finite element analysis of leakage in tongue-groove type flange

KULCSÁR Benedek¹, DR. PETRIK Máté², PUSZTAI-SPISÁK Bernadett³

¹MSc hallgató, ²adjunktus, ³tanársegéd

^{1,2,3}: Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros, +36 (46) 565 111, <https://www.uni-miskolc.hu/>

Abstract

In industrial applications, with particular emphasis on the chemical industry, including the handling of hazardous substances, the leak-tightness of the flange joints is a basic requirement. Flange joints of the tongue and groove design are often used, but there is limited information in the literature on the analysis of finite element simulation, and thus the paper presents an investigation of the finite element simulation of the sealing of this design flange using MSC Marc[®] software.

Keywords: flange, leakage, simulation, gasket contact stress, combined loading

Kivonat

Az ipari alkalmazások során - kiemelt tekintettel a vegyiparra, azon belül is a veszélyes anyagok kezelésére – a karima kötések szivárgásmentessége alapkövetelmény. A szád-horony kialakítású karimás kötések gyakran alkalmaznak, azonban a szakirodalomban kevés információ található a végeelem szimulációval történő elemzéséről, ezáltal a cikkben ezen kialakítású karima végeelem szimulációval történő tömítettségének a vizsgálata kerül bemutatásra az MSC Marc[®] szoftver alkalmazásával.

Kulcsszavak: karima, szivárgás, végeelem szimuláció, tömítés összenyomó feszültség, összetett terhelés

1. Bevezetés

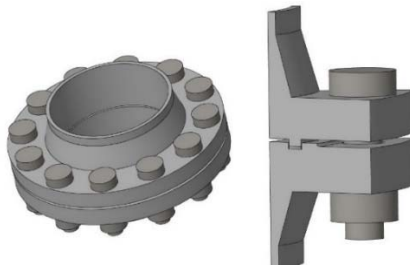
A karimás kötések alkalmazása széles körben elterjedt az ipar minden területén. A velük szemben támasztott szilárdsági elvárások mellett meg kell felelniük biztonsági követelményeknek is. A múlt század műszaki gyakorlatában a kötés megfelelőségének ellenőrzésére szolgáló analitikus megoldó módszerek, vagyis a szabványi számítások voltak meghatározóak. Ezek a módszerek azonban tartalmaznak elhanyagolásokat és hiányosságokat, amelyek a biztonság elvárásának növekvő szerepével kevésbé megengedhetőek. A problémára szabványi számítások pontosítása mellett a számítógéppel segített szimulációk is megoldást nyújthatnak, így a két módszer együttes alkalmazása elősegíti a biztonságos üzemelést.

Az ellenőrzési folyamat fejlődésével az elmúlt két évtizedben jelentősen megnőtt a témával foglalkozó tudományos cikkek száma. H. Estrada egy tengelyszimmetrikus végeelem modell segítségével vizsgálta a vonatkozó amerikai szabvány (ASME VIII) számításait [1][2]. Eredményében kimutatta, hogy a szabvány számításai megfelelő csavarerőt biztosítanak a biztonságos üzemeléshez. Egy másik kutatás során P. Lošák és kutatócsoportja szintén végeelemes módszerekkel vizsgálta a karimás kötések szivárgásának főbb okait, különös figyelmet fordítva az elégtelen tömítőerő hatására [3]. A kutatásukból kiderült, hogy az általuk vizsgált hőerőműben fellépő szivárgási problémák sok más faktor mellett a nem megfelelő összeszerelési módszerre vezethetőek vissza. Háromdimenziós modellen végzett szimulációt M. Murali Krishna és társai, amelyekhez a különböző tömítések anyagtulajdonságait mérésrel határozták meg [4]. Összegzésükben az ASME szabvány néhány pontjával kapcsolatos észrevételeiket, valamint az egyes tömítések sajátosságait fejtették ki.

A kutatás során a komplexitása miatt kevésbé alkalmazott MSZ EN 13445-3 G mellékletének szabványi számításai kerültek összehasonlításra háromdimenziós végeelemes modellen végzett szimulációk eredményeivel [5]. Ezek a vizsgálatok főleg a tömítés felületén, illetve a csavarokban ébredő feszültségekre összpontosultak, ahol a feszültség lefutásokat radiális és tangenciális irányban is elemeztük.

2. A vizsgált kötés

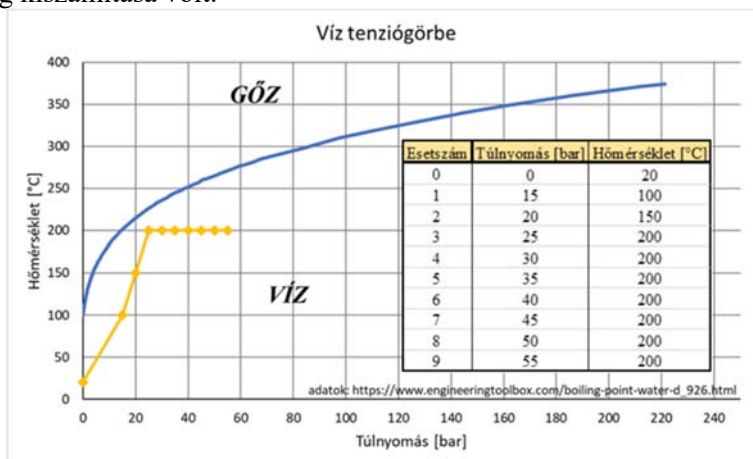
A vizsgált kötés egy szád-horony csatlakozófelületű hegtoldatos karimapár volt, amely DN 200-as mérettel, és PN 40-es nyomásfokozattal rendelkezik. A kötésre ható hőterhelés 200°C volt. A belső nyomás felépítése lépésekben történt meg, így meg lehetett vizsgálni azt, hogy mennyire tartja meg a kötés a tömítettségét a belső nyomás növekedésével. A szimulációk a Marc Mentat[®] vége-selemes szimulációs szoftverrel készültek.



1. ábra. A vizsgált kötés

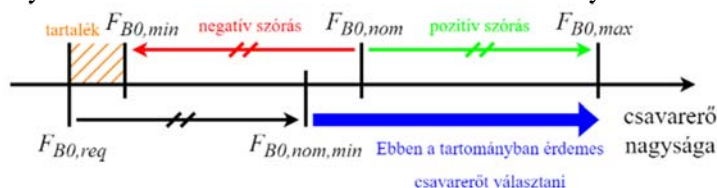
3. számítások

A szabványi számítások az MSZ EN 13445-3 szabvány G melléklete alapján lettek elvégezve, amely előnyös volt a hőmérsékleti terhelés figyelembevétele miatt [5]. Cél a 2. ábrán feltüntetett terhelési esetekhez megfelelő szükséges csavarerő meghatározása, valamint az ebből fakadó, tömítés felületén létrejövő összenyomó feszültség kiszámítása volt.



2. ábra. A vizsgált terhelési esetek a víz tenziógörbéjének függvényében

A szabvány felépítése 6 részből áll: karima paraméterek; csavar paraméterek; tömítés paraméterek; a kötés megfelelősége; tömítéshez szükséges összeszorító erők; összeszereléskor fellépő erők. Kiegészítésként felhasználásra került az acél karimák méreteire vonatkozó MSZ EN 1092-1 szabvány [6], valamint a tömítések méreteit tartalmazó MSZ EN 1514-1 szabvány [7], amelyek egyedi megközelítést alkalmaznak a csavarerők tekintetében. Ez abban nyilvánul meg, hogy az első lépésben számított minimálisan szükséges összeszorító erő értékét ($F_{B0,req}$) egy meghúzási bizonytalanságból adódó konstanssal megszorozva kapható meg a minimálisan ajánlott csavarerő ($F_{B0,nom,min}$) értéke. Emellett az előírásokban a minimálisan ajánlott csavarerő értékénél ($F_{B0,nom,min}$) nagyobb csavarerő választását javasolják. Mivel a tömítettséget már a minimálisan szükséges csavarerő alkalmazásával is biztosítani lehet, sok összehasonlításhoz ez a csavarerő érték került felhasználásra. A szabvány által számított összeszorító erő értékek viszonyai a 3. ábrán figyelhetőek meg.



3. ábra. A különböző csavarerő definíciók értelmezése

A számítások végén az alábbi 1. táblázatban szereplő értékek lettek meghatározva, amelyek a szimuláció kezdeti paramétereit biztosítják.

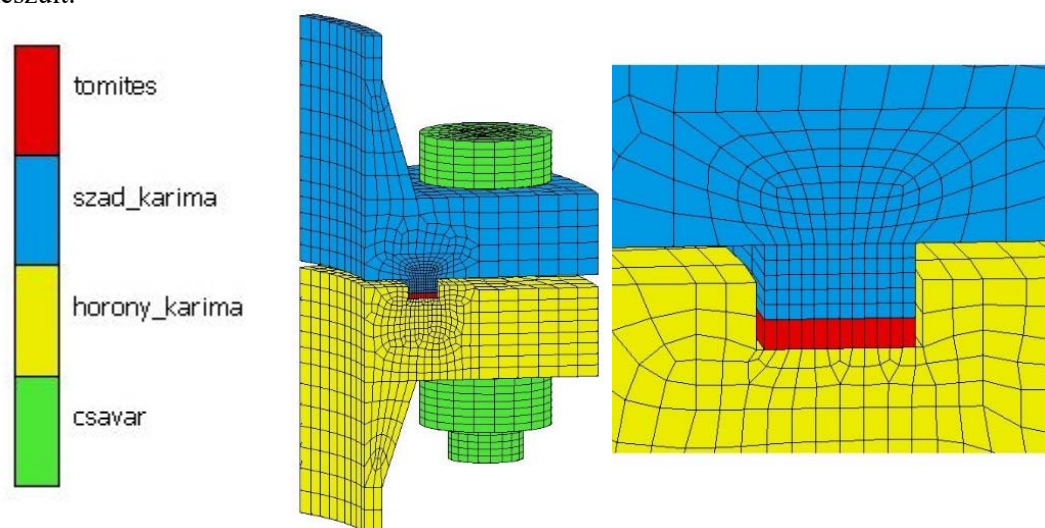
A szimuláció bemenő értékei

1. táblázat

Belső nyomás [MPa]	Hőmérséklet [K]	Axiális erő a nyomásból [MPa]	FB _{0,req} [N]	Csavarerő egy csavarra [N] FB _{0,req}	FB _{0,nom,min} [N]	Csavarerő egy csavarra [N] FB _{0,nom,min}	Tömítés felületén szükséges feszültség [MPa]
2,5	473,15	19,88	140236,19	11686,35	152315,75	12692,98	17,93
3		23,86	168501,06	14041,76	183015,29	15251,27	21,54
3,5		27,83	196765,93	16397,16	213714,82	17809,57	25,15
4		31,81	225030,81	18752,57	244414,35	20367,86	28,77

4. Végeelem modell

A vizsgált karimakötés 1/12-ed részének modellezése elegendő volt a szimulációk elvégzésére a megfelelő peremfeltételek definiálása mellett, mivel a karima csavarkörén 12 csavar helyezkedik el. A szerkezet terheléseit a hőterhelés és a nyomásterhelés adta. A geometria egyszerűsítése érdekében a csavarok nem lettek részletesen modellezve, így a szimulációban a menetek kirajzolására nem került sor, hanem egy, a szoftverben alkalmazható csavarok szimulációjához készített peremfeltétel segítségével lettek a csavarerők ráhelyezve a kötésre. Összesen 4 kontakt test került definiálásra (horony karima; szád karima; tömítés; csavar), amelyek között a súrlódási tényezőnek 0,8-as érték volt beállítva. Ez az érték az irodalomkutatás alapján került megválasztásra [1]. Az így kapott modell hálózott verziója a 4. ábrán tekinthető meg, amely az MSC Apex[©] programban készült.



4. ábra. Kontakt testek a háromdimenziós modellen

A tömítés szimulálásához egy eltérő elemtípus alkalmazása szükséges. Annak érdekében, hogy a szimulációt a szoftver megfelelően végezze el, a tömítés vastagsága mentén egy elem került kialakításra, amelyhez megadható volt a tömítés felterhelési és leterhelési görbéje is. Ezen felül minden anyag mechanikai és termikus tulajdonsága hőmérsékletfüggő volt. A nyomásból adódó csavarodás okozta tömítőfelület csökkenése is figyelembe lett véve. Ennek során a tömítés és a karima felülete elválhat egymástól, amely kontaktvesztéshez vezethet. Ez a tömítés és a horonnyal ellátott karima közötti érintkező felületeken megadott egyedi nyomás segítségével szimulálható, amelynek a nagysága megegyezik a belső nyomás értékével, viszont csak kontaktvesztés esetén fejt ki hatását. A modellt alkotó csomópontok és elemek számát a 2. táblázat tartalmazza.

A modellt felépítő elemek és csomópontok száma

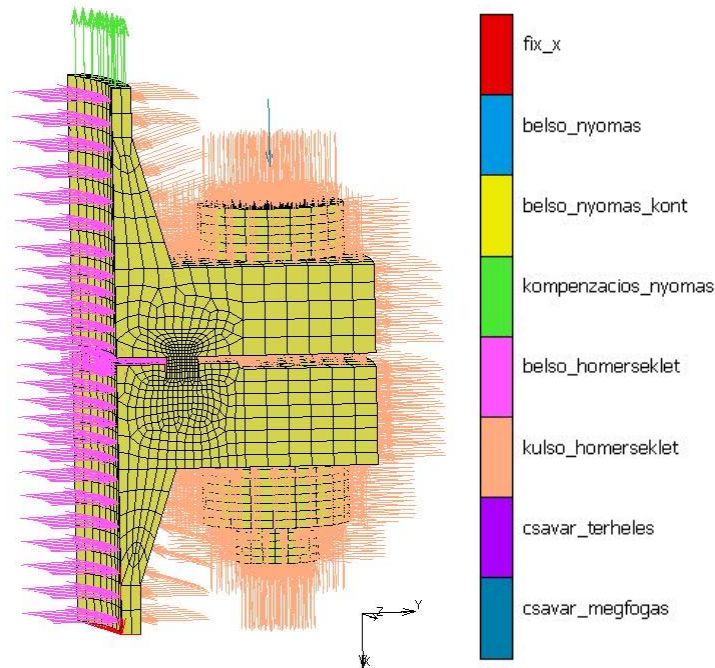
2. táblázat

	Szád karima	Horony karima	Csavar	Tömítés	Összesen
Elemszám [db]	2484	2914	3635	108	9141
Csomópontszám [db]	1280	1496	1232	260	4268

A felhasznált anyagok anyagi jellemzői

3. táblázat

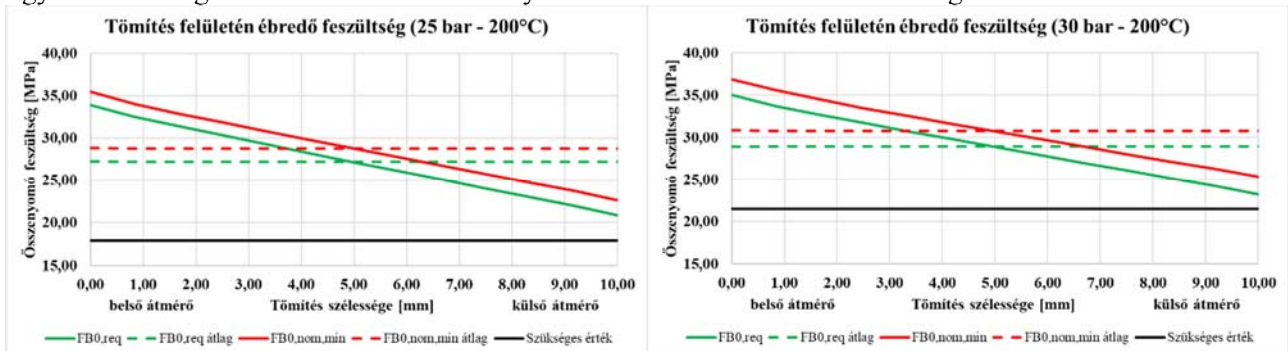
	KARIMA: 1.7218 acél			CSAVAR: 1.7218 acél		
	20°C	100°C	200°C	20°C	100°C	200°C
Sűrűség [t/mm ³]	7,9·10 ⁻⁹	7,9·10 ⁻⁹	7,9·10 ⁻⁹	7,85·10 ⁻⁹	7,85·10 ⁻⁹	7,85·10 ⁻⁹
Húzó rugalmassági modulusz [GPa]	200	194	186	205	205	184,5
Poisson tényező [-]	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Hővezetési tényező [t·mm/s ³ /K]	15	16,3	17,5	41	42,7	42,8
Fajlagos hőkapacitás [mm ² /s ² /K]	5·10 ⁸	5,05·10 ⁸	5,1·10 ⁸	4,61·10 ⁸	4,77·10 ⁸	4,99·10 ⁸
Emissziós tényező [-]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Lineáris hőtágulási együttható [1/K]	16,16·10 ⁻⁶	16,16·10 ⁻⁶	16,16·10 ⁻⁶	11,3·10 ⁻⁶	11,3·10 ⁻⁶	11,3·10 ⁻⁶



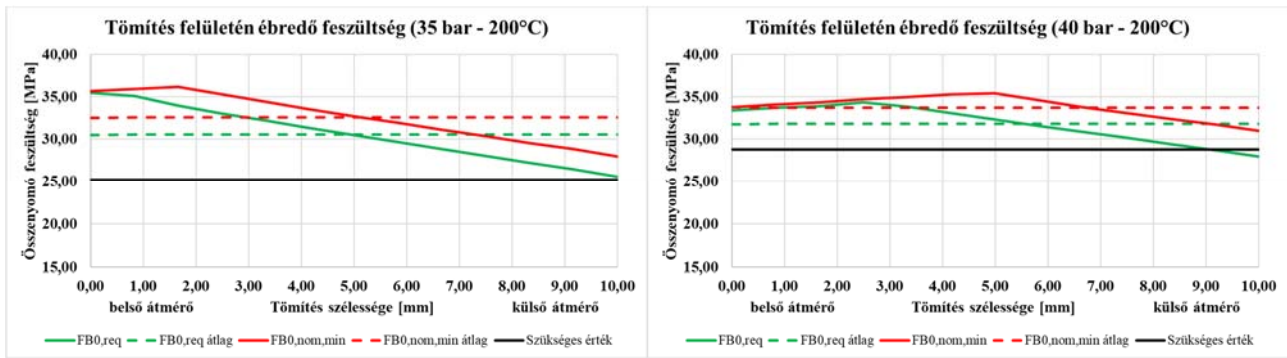
5. ábra. A peremfeltételek elhelyezkedése a vizsgált modellen

5. eredmények összehasonlítása

Az eredmények összehasonlítása előtt szükséges volt megbizonyosodni arról, hogy a hőmérsékleti mező állandósult, amelyet a hőmérsékleti terhelés utolsó két lépcsője alátámasztott. A kötés felterhelése során a karimák csavarodásából adódóan folyamatosan változott a tömítés felületén ébredő feszültségek maximum értékének helye. Az alábbi 6. és 7. ábrán feltüntetett diagramokon a felületen ébredő feszültség lefutás görbék figyelhetőek meg összehasonlítva a szabvány által számított minimálisan szükséges értékekkel.



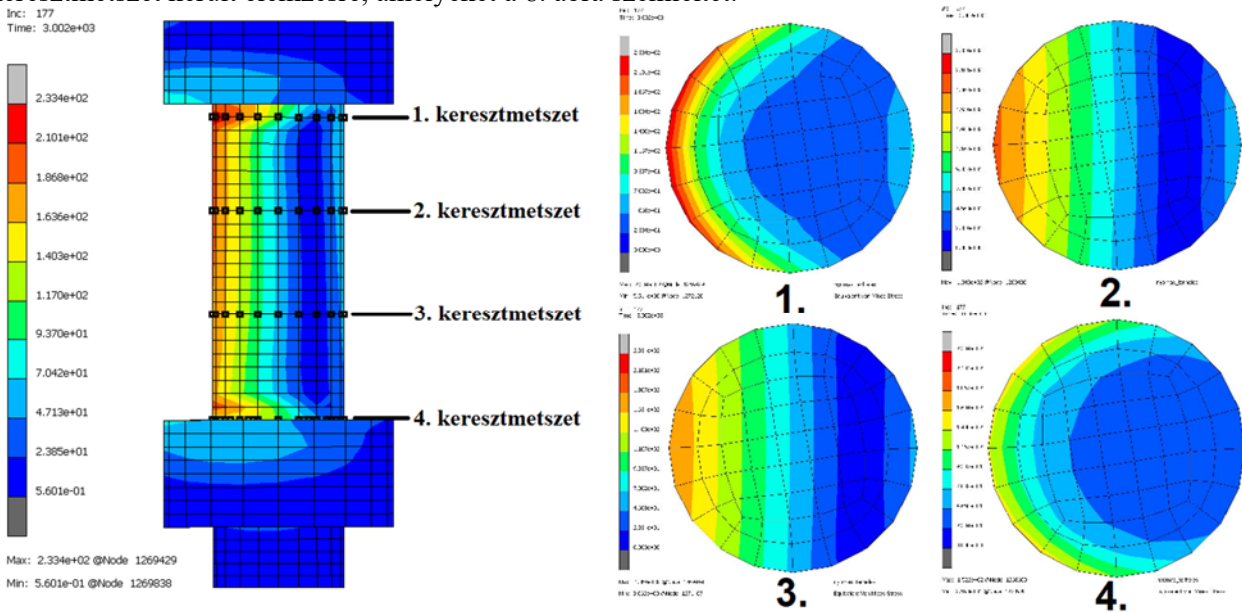
6. ábra. Feszültség lefutás görbék 25 bar és 30 bar terhelési esetekben



7. ábra. Feszültség lefutás görbék 35 bar és 40 bar terhelési esetekben

A diagramokon megfigyelhető, hogy a tömítés felületén ébredő összenyomó feszültség értékek a tömítés egy pontján sem csökkennek a szabvány által számított, a szivárgásmentes üzemeléshez szükséges értékek alá. A véglegesen kialakult üzemi állapotban a feszültségek legnagyobb értékei minden esetben a tömítés belső átmérőjén helyezkednek el. Ez a jelenség a karimák lineáris hőtágulásának gátolt alakváltozásából adódik. Emellett megfigyelhető, hogy a magasabb nyomású és így nagyobb csavarerővel terhelt esetekben a görbék ellaposodnak, mivel a tömítés anyaga megfolyt a nagyobb összenyomó erők hatására. Minden a következőkben bemutatott ábra és diagram a 200°C fokok és 40 bar-os terhelési eset minimálisan szükséges csavarerővel terhelt állapotának az eredményeit szemlélteti.

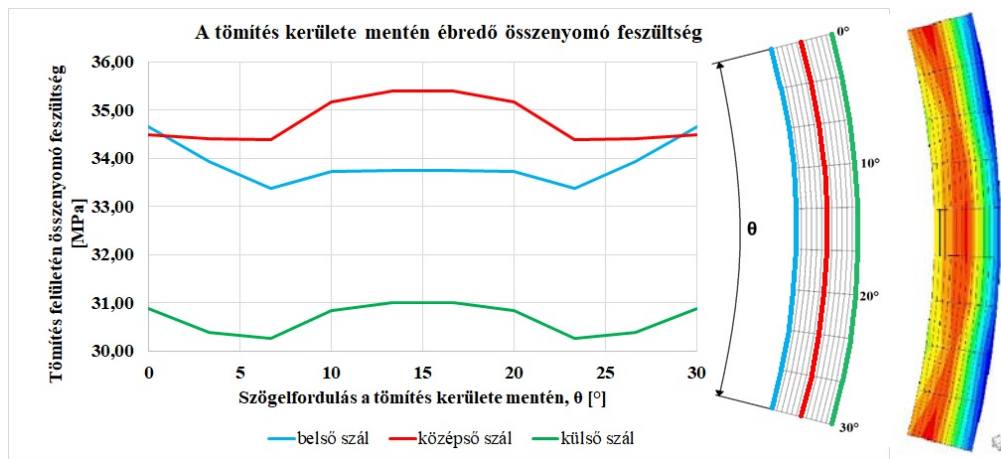
Következő lépésben a csavarokban kialakuló feszültségállapotot vizsgáltuk meg. A csavaron 4 keresztmetszet került elemzésre, amelyeket a 8. ábra szemléltet.



8. ábra. A csavar kijelölt keresztmetszeteiben kialakuló feszültségállapot

A csavar oldalnézeti képén a csavar bal oldala mutat a kötés belső pontjába. Ez a belső oldal húzó igénybevételnek, míg a külső oldal nyomó igénybevételnek van kitéve. Az első és negyedik keresztmetszetekben a csavarfej és az anya zavaró hatása látható a csavar közepéből kiemelt két metszethez képest, ahol egytengelyű hajlítás figyelhető meg. A legnagyobb feszültségek a csavar feje alatt ébrednek.

A csavarok által diszkrét pontokon létrehozott összehúzó erő a tömítésben ébredő összenyomó feszültségre is hatással van. Ez a legjobban a tömítés egyes szálainak tangenciális irányú feszültség lefutás görbéin, valamint a tömítés felülnézeti képén vehető észre.



9. ábra. A tömítésben ébredő feszültség felülnézetből

Ahogy az a 9. ábrán látható, a modell közepén (15°-nál) elhelyezkedő csavar vonalában a legmagasabbak a feszültségek. Megfigyelhető a csavar hatásának zónája (~7°-23°), valamint a 40 bar nyomáshoz tartozó csavarerőből származó megfolyás, mivel a tömítés középső átmérőjénél ébrednek a legnagyobb feszültségek.

6. Összegzés

A kutatás eredményei alátámasztják az MSZ EN 13445-3 szabvány G mellékletének számítási elvét [5]. A szabvány alapján számolt minimális csavarerő hatására keletkező összenyomó feszültség elegendő a szivárgásmentes üzemeléshez. Emellett az útmutatások által javasolt, meghúzási módszertől függő ajánlott minimális csavarerő alkalmazása fokozottan elősegíti a megfelelő tömítőerő elérését. A speciális nyomás, amelyet az érintkező felületek között adtunk meg, nem lépett fel, így elmondható, hogy nem jött létre kontaktvesztés a tömítés és a karima között. A hőmérséklet jelentős hatással volt a kialakuló feszültségállapotra.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-nek, hogy biztosította számunkra a szükséges számítástechnikai háttérrel, valamint a Szerkezetintegritási és Gyártástechnológiai Osztály munkatásainak, akik magas szintű szaktudásukkal mindig készségesen segítettek a kutatásunk során.

Irodalmi hivatkozások

- [1] Estrada H., *Analysis of leakage in bolted-flanged joints using contact finite element analysis*. Journal of Mechanics Engineering and Automation. David Publishing Company, 5 (2015), 135-142
- [2] ASME BPVC VIII-1 fejezet, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar Vegyipari Gépészeti Intézet szabványtár, 2021
- [3] Lošák P., Létal T., Buzik J., Nad M., *Leakage-cause analysis of a flange joint designed according to standards*. Materials and technology. Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, 52 (2018) 3, 295-298
- [4] Krishna M. M., Shunmugam M., Prasad N. S., *A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 84 (2007), 349–357
- [5] MSZ EN 13445-3, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar Vegyipari Gépészeti Intézet szabványtár, 2021
- [6] MSZ EN 1092-1, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar Vegyipari Gépészeti Intézet szabványtár, 2002
- [7] MSZ EN 1514-1, Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar Vegyipari Gépészeti Intézet szabványtár, 2000