



Miskolci Egyetem

Himbás-rudazatos mélyszivattyús berendezések nyomatékoptimalizálása

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Kis László

Okleveles olaj- és gázmérnök

Miskolci Egyetem, Kőolaj és Földgáz Intézet

Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola

A doktori iskola vezetője: Prof. Dr. Szűcs Péter, professor

Folyadéktermelési és szállítási kutatási rész

Szakosztályvezető: Prof. Dr. Tihanyi László professor emeritus

Integrált kőolaj- és földgáztermelő rendszerek témája

Témavezető: Prof. Dr. Takács Gábor, professor emeritus

Témavezető: Prof. Dr. Takács Gábor, professor emeritus

Miskolc, 2021

BEVEZETÉS

A dolgozat kezdeti célja az aszimmetrikus ellensúlykonfiguráció használatának vizsgálata volt a himbás-rudazatos mélyszivattyús egységek kiellensúlyozásában. Az eredő közlőműnyomaték optimalizálást megelőzően a közlőműre ható összes különálló nyomatékkomponens ismeretére szükség van a vizsgált szivattyúegység nyomatékviszonyainak pontos leírásához. Az ebben a munkában bemutatott továbbfejlesztett nyomatékelemzés az elektronikus dinamométer által szolgáltatott adatokon alapul, amely a himbás-rudazatos mélyszivattyús egységek rutinszerűen használt mérőeszköze. Az API Spec 11E (API, 2013) szabvány tanulmányozása után nyilvánvalóvá vált, hogy nem tartalmaz pontos számítási eljárást azokra a himbás-rudas szivattyúegységek esetére, amelyeknek a szivattyúzási ciklusa során változik a forgattyúszög-sebessége.

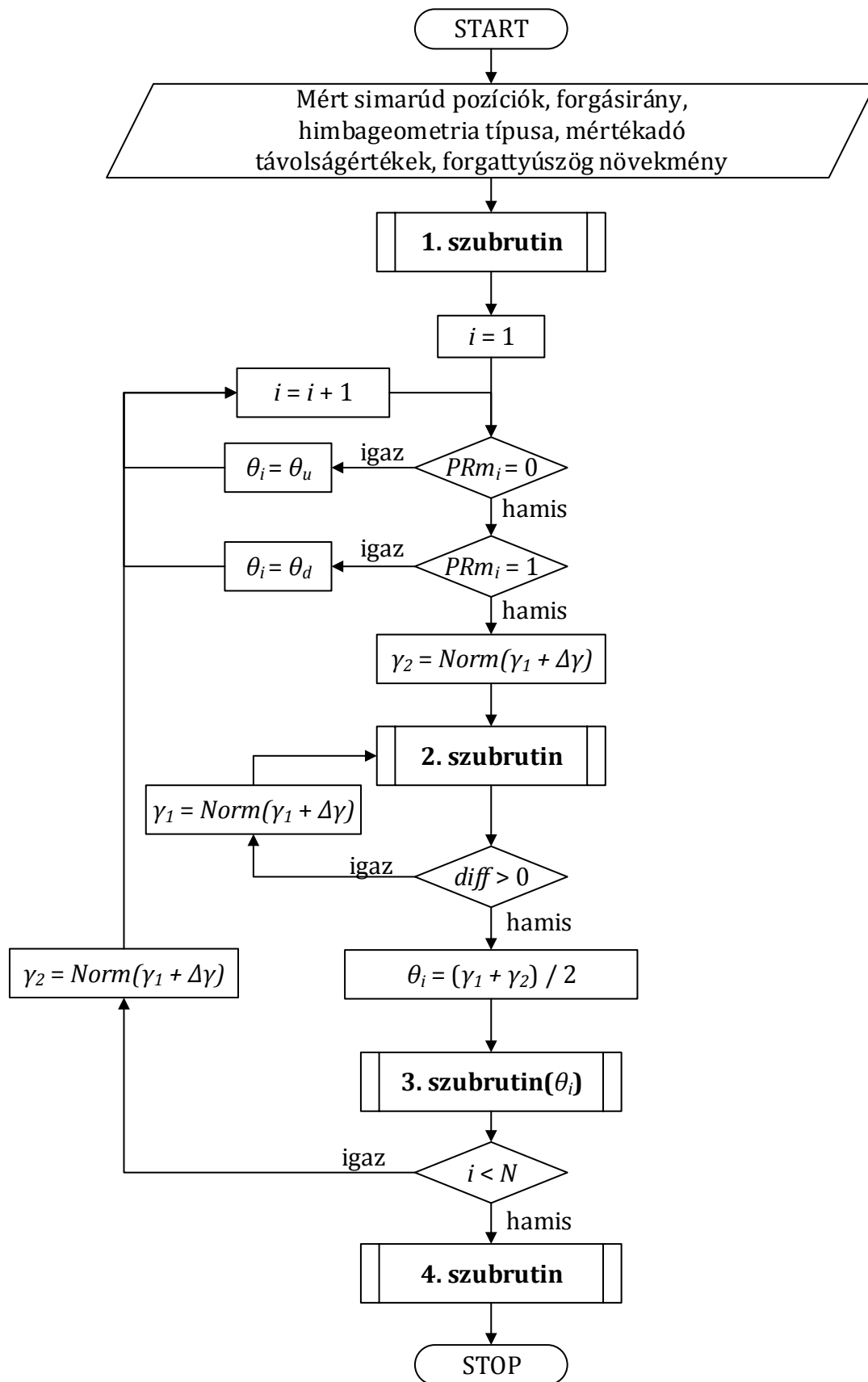
A kutatás második célja egy számítási módszer kidolgozása volt az eredő közlőműnyomaték optimalizálására, valamint a vizsgált himbás-rudazatos szivattyúegység megfelelő ellensúly konfigurációjának meghatározására. Az aszimmetrikusan elhelyezett ellensúlyok hatásának megfelelő figyelembe vételével a független változók száma háromról - szimmetrikus ellensúly konfiguráció esetén - tizenkettőre nő, ami lehetetlenné teszi az ellensúlyok optimális elrendezésének közvetlen meghatározását. Ezért részecskeraj optimalizálási (PSO) algoritmust alkalmaztam a megoldási tér mérete miatt. Az aszimmetrikusan elhelyezett ellensúlyok nemcsak az egyensúlynyomatékokat változtatják meg egy másodlagos fázisszög bevezetésével, hanem módosítják az inerciális nyomatékokat is. Számítógépes programot fejlesztettem ki a dinamométeres mérések értelmezésére és a közlőműnyomaték optimalizálására.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

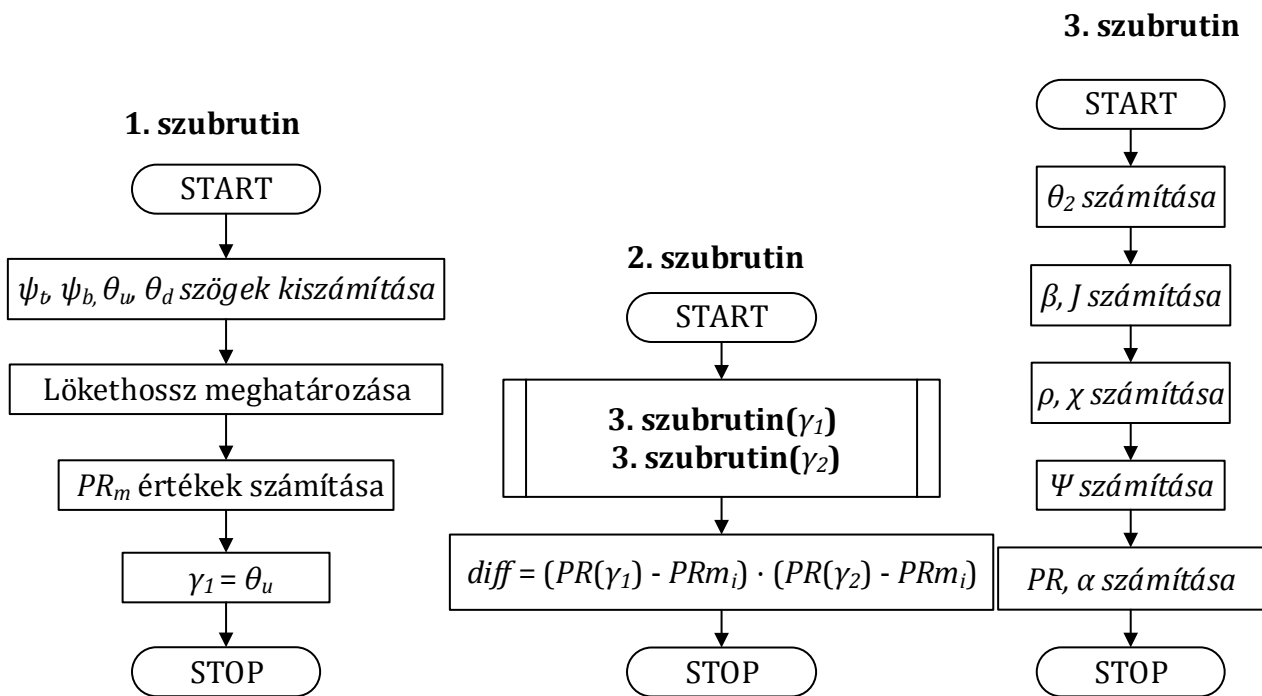
1. Tézis

Egy numerikus eljárást fejlesztettem ki, amely a mért simarúdpozícióknak megfelelő forgattyúszög értékeket a lehető nagyobb pontossággal állítja elő. Mivel a forgattyúszög időbeli változását dinamométeres mérés nem tartalmazza, azt a mért simarúdpozíciók és a himbás-rudazatos szivattyúegység kinematikai paraméterei alapján kell kiszámítani. Az itt kidolgozott számítási eljárásnak nagy jelentősége van, mert a forgattyúszög-idő függvényben szereplő hibák minden más paramétert befolyásolnak a himbás-rudazatos szivattyúegységek nyomatékviszonyainak kiértékelésében. Az első számítási lépés hibájának minimalizálásával javul a nyomatékszámítás pontossága, valamint az ellensúly optimalizálása.

A kidolgozott számítási eljárás folyamatábráját az 1. ábra, alprogramjait a 2. ábra mutatja be. Ennek az eljárásnak a segítségével meghatározhatók a forgattyúszög értékei azokra az esetekre is, amikor a hajtókar változó szögsebességgel forog a szivattyúzási ciklus alatt.



1. ábra A forgattyúszőg értékek meghatározására kifejlesztett numerikus módszer folyamatábrája



2. ábra A forgattyúszög meghatározását elvégző numerikus módszer részprogramjai

2. Tézis

Komplex számítási módszert fejlesztettem ki, amely a szivattyúzási ciklus alatt előállítja a forgattyúszögsebességet, a forgattyúszöggyorsulást és a himbagerenda szöggyorsulását az idő függvényében. A javasolt módszer nagyobb pontossággal rendelkezik az iparban legszélesebb körben használt szoftverekhez képest. A bemutatott numerikus számítási modellek erős validáló eszköznek bizonyultak a bonyolultabb, de nehézkes számítási módszerek eredményeinek igazolásához.

A számítási folyamat Fourier-sorokat használ a numerikusan kiszámított forgattyúszögsebesség értékeken, az eljárás folyamatábráját a 3. ábra mutatja. A nyers adatok transzformációra szorultak az együtthatók meghatározásához az alábbi képletek segítségével.

$$t_{Fi} = \frac{i \cdot T}{N}$$

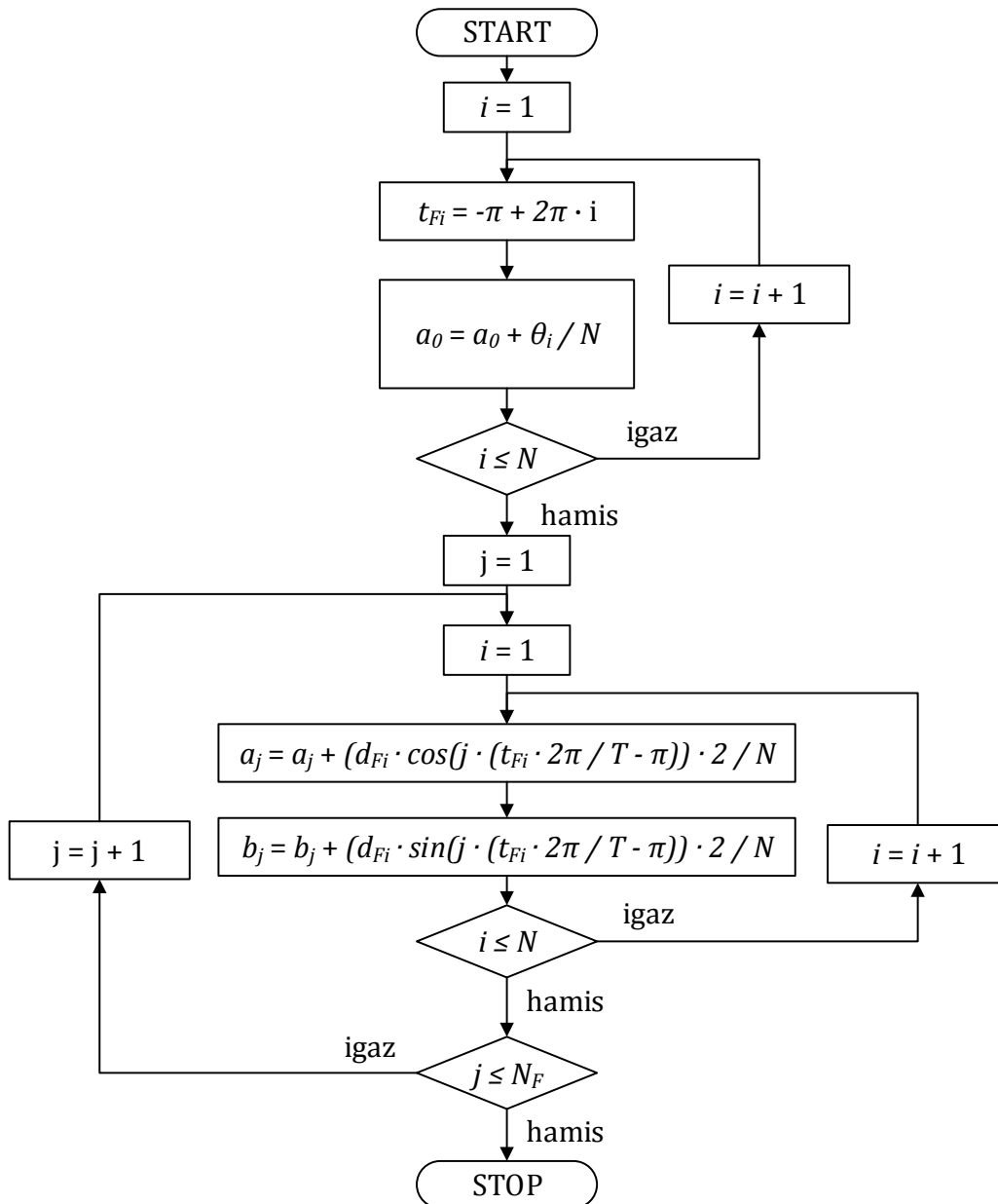
ahol:

t_{Fi} Fourier-idősor i -edik tagja [s],
 i index 0-tól $N-1$ -ig [-], és
 N mért pontok száma [-].

$$d_{Fi} = d_i + (d_i - d_{i-1}) \cdot \frac{t_{Fi} - t_i}{t_i - t_{i-1}}$$

ahol:

d_{Fi} Fourier-input adatsor i -edik tagja [vált.],
 d_i nyers adatsor i -edik tagja [vált.],
 t_{Fi} Fourier-idő adatsor i -edik tagja [s], és
 t_i mért idősor i -edik tagja [s].



3. ábra A Fourier-együtthatók meghatározásának folyamatábrája

Az együtthatók meghatározása után a Fourier sort és annak deriváltjait a következő egyenletek segítségével határoztam meg.

$$F_i = a_0 + \sum_{k=1}^{N_F} a_k \cdot \cos\left(\left(\frac{2\pi \cdot t_i}{T} - \pi\right) \cdot k\right) + b_k \cdot \sin\left(\left(\frac{2\pi \cdot t_i}{T} - \pi\right) \cdot k\right)$$

ahol:

- F_i a Fourier sor értéke az i -edik mért idő esetén [vált.],
- a_0 a Fourier sor konstans együtthatója [-],
- a_k, b_k a Fourier sor k -edik együtthatói [-],
- t_i a mért idősor i -edik tagja [s],
- T periódusidő [s],
- k a Fourier sor együtthatóinak indexe [-], és
- N_F a Fourier sor számításban használt együtthatóinak száma [-].

$$\frac{dF}{dt_i} = \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \sum_{k=1}^{N_F} -a_k \cdot \sin\left(\left(\frac{2\pi \cdot t_i}{T} - \pi\right) \cdot k\right) + b_k \cdot \cos\left(\left(\frac{2\pi \cdot t_i}{T} - \pi\right) \cdot k\right)$$

$$\frac{d^2F}{dt^2_i} = \frac{-4 \cdot \pi^2}{T^2} \cdot \sum_{k=1}^{N_F} a_k \cdot \cos\left(\left(\frac{2\pi \cdot t_i}{T} - \pi\right) \cdot k\right) + b_k \cdot \sin\left(\left(\frac{2\pi \cdot t_i}{T} - \pi\right) \cdot k\right)$$

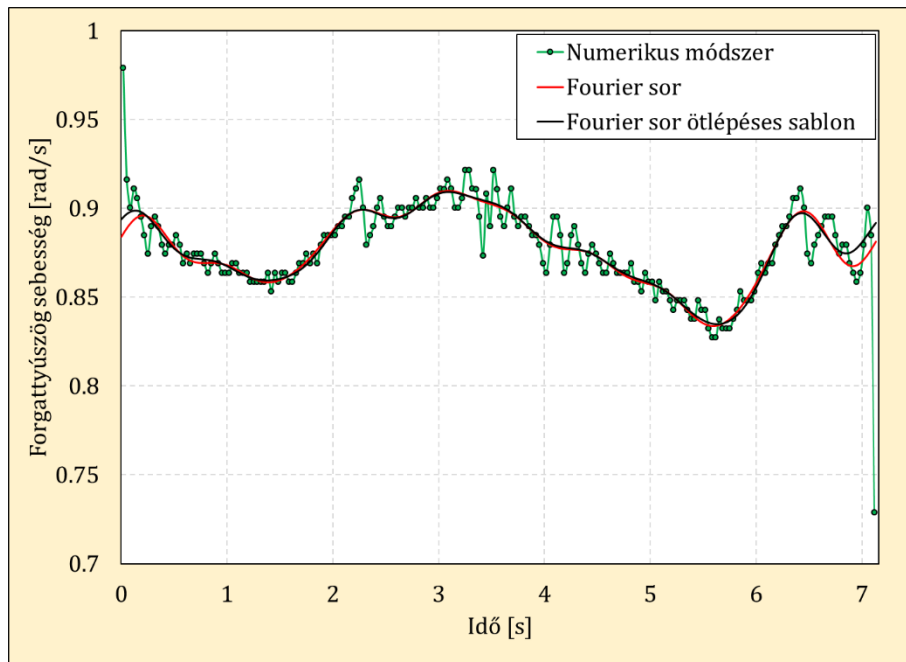
A Fourier-sor nem használható közvetlenül a számított forgattyúszög értékeken, mert a forgattyúszög definíciójából eredően diszkontinuitással rendelkezik, ezért a hajtókar szögsebességének értékét először numerikusan kell meghatározni. A kapott Fourier sor pontosságának javítására komplex numerikus differenciálást használtam, melyet az alábbi egyenletet mutat be.

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t_{num2_i}} = \frac{Norm(-\theta_{i+2} + 8 \cdot \theta_{i+1} - 8 \cdot \theta_{i-1} + \theta_{i-2})}{12 \cdot (t_{i+1} - t_i)}$$

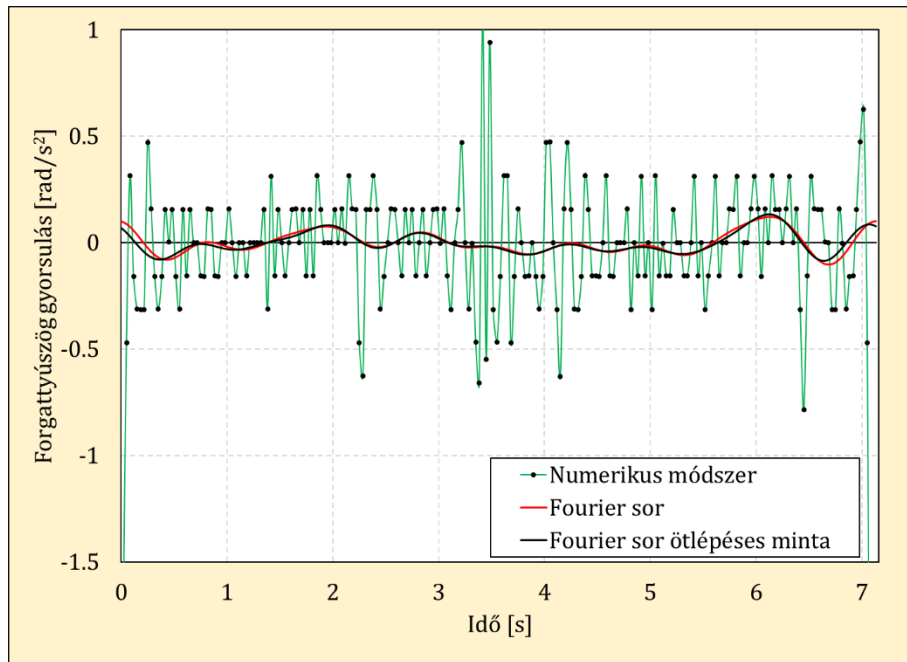
ahol:

- $\frac{\Delta\theta}{\Delta t_{num2_i}}$ az ötlépéses sablon módszerrel kiszámított hajtókar szögsebesség adatsor i-edik tagja [rad/s],
 θ_i a forgattyúszög adatsor i-edik tagja [rad], és
 t_i a mért időadatsor i-edik tagja [s].

A 4. és az 5. ábra a számított forgattyúszögsebesség és a forgattyúszöggyorsulás függvényeit mutatja be az idő függvényében.

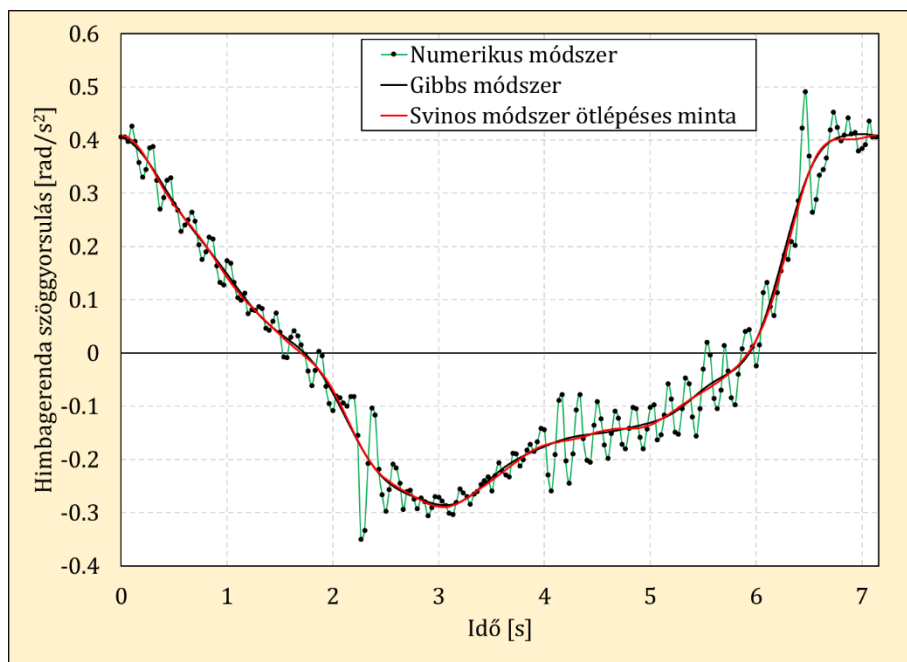


4. ábra A számított forgattyúszögsebesség függvények



5. ábra A számított forgattyú szöggyorsulás függvényei

A himbagerenda szöggyorsulását három különböző módszerrel határoztam meg: numerikus módszerrel, a Svinos-módszerrel és a Gibbs által javasolt eljárással, eredményeiket a 6. ábra mutatja be. (Svinos, 1983) (Gibbs, 1975)



6. ábra A himbagerenda szöggyorsulás számítását végző modellek összehasonlítása

3. Tézis

Megvizsgáltam az aszimmetrikus ellensúly konfigurációk hatásait az ellensúlynyomaték-idő függvényére, mely a szakirodalomban gyakran figyelmen kívül hagyott kiegyensúlyozási mód. Az aszimmetrikus ellensúlykonfiguráció megváltoztatja a közlőmű eredőnyomatékának időbeli változását. Bevezettem a τ' másodlagos fázisszöget, ami meghatározza az ellensúlynyomaték fázisának szimmetrikus esettől való eltérését. A kidolgozott egyenletek lehetővé teszik az inerciális nyomatékok pontos kiszámítását is, melyek beépítésre kerültek a kidolgozott közlőműnyomaték optimalizálási eljárásokba. A következő egyenletek meghatározzák az ellensúlynyomaték függvényt, illetve a másodlagos fázisszöget.

$$T_{CB}(t) = -T_{CBMax} \cdot \sin(\theta(t) + \tau + \tau')$$

ahol:

T_{CBMax}	maximális ellensúlynyomaték [in lb],
$\theta(t)$	forgattyúszög-idő függvény [rad],
τ	fázisszög [rad], és
τ'	másodlagos fázisszög [rad].

$$\tau' = \tan^{-1}\left(\frac{Y}{X}\right)$$

ahol:

Y	a forgattyúkart és az ellensúlyokat tartalmazó rendszer súlypontjának függőleges távolsága a forgattyútengelytől [in], és
X	a forgattyúkart és az ellensúlyokat tartalmazó rendszer súlypontjának vízszintes távolsága a forgattyútengelytől [in].

A következő egyenletek meghatározzák a forgattyúkarokat és az ellensúlyokat tartalmazó rendszer együttes súlypontjának koordinátáit. Ezen értékek felhasználásával meghatározható a másodlagos fázisszög.

$$X = \frac{X_{cr} \cdot m_{cr} + \sum_{i=1}^n \left(X_{cw_i} \cdot \left(m_{cw_i} + \sum_{j=1}^{n_{a_i}} m_{cw_{a_{ij}}} \right) \right)}{m_{cr} + \sum_{i=1}^n \left(m_{cw_i} + \sum_{j=1}^{n_{a_i}} m_{cw_{a_{ij}}} \right)}$$

ahol:

X_{cr}	a forgattyúkar súlypontjának vízszintes távolsága a forgattyútengelytől [in],
m_{cr}	forgattyúkar tömege [lb _m],
X_{cw_i}	az i-ellensúly súlypontjának vízszintes távolsága a forgattyútengelytől [in],
m_{cw_i}	az i-ellensúly tömege [lb _m], és
$m_{cw_{a_{ij}}}$	az i-ellensúlyon elhelyezett j-edik segédellensúly tömege [lb _m].

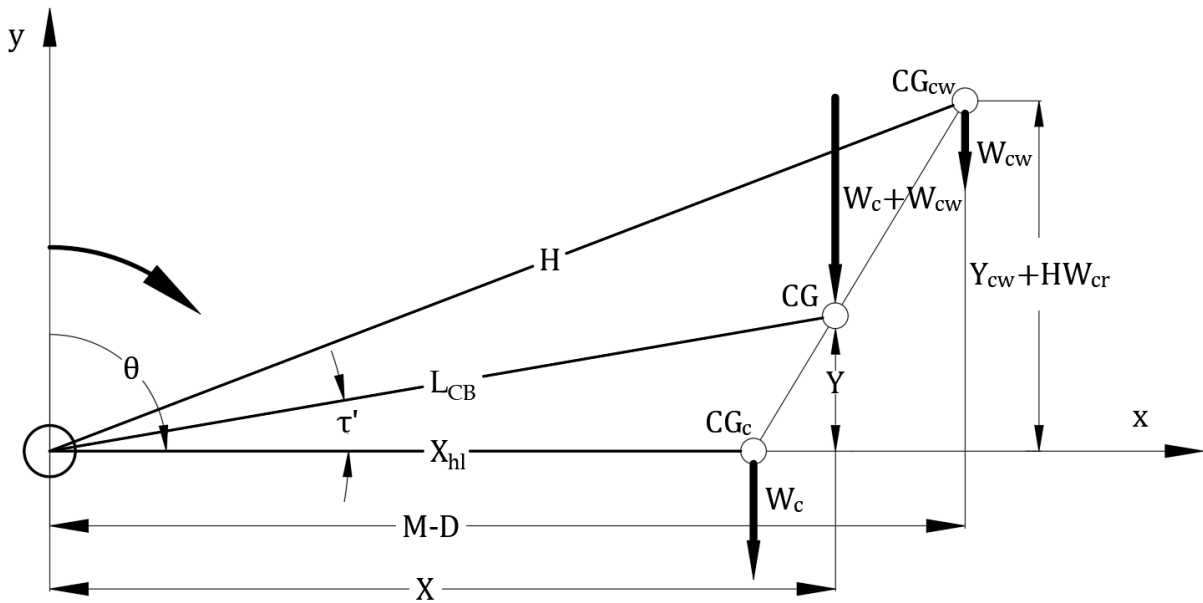
$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n (-1)^n \cdot \left((Y_{cw_i} + HW_{cr}) \cdot \left(m_{cw_i} + \sum_{j=1}^{n_{a_i}} m_{cw_{a_{ij}}} \right) \right)}{m_{cr} + \sum_{i=1}^n \left(m_{cw_i} + \sum_{j=1}^{n_{a_i}} m_{cw_{a_{ij}}} \right)}$$

ahol:

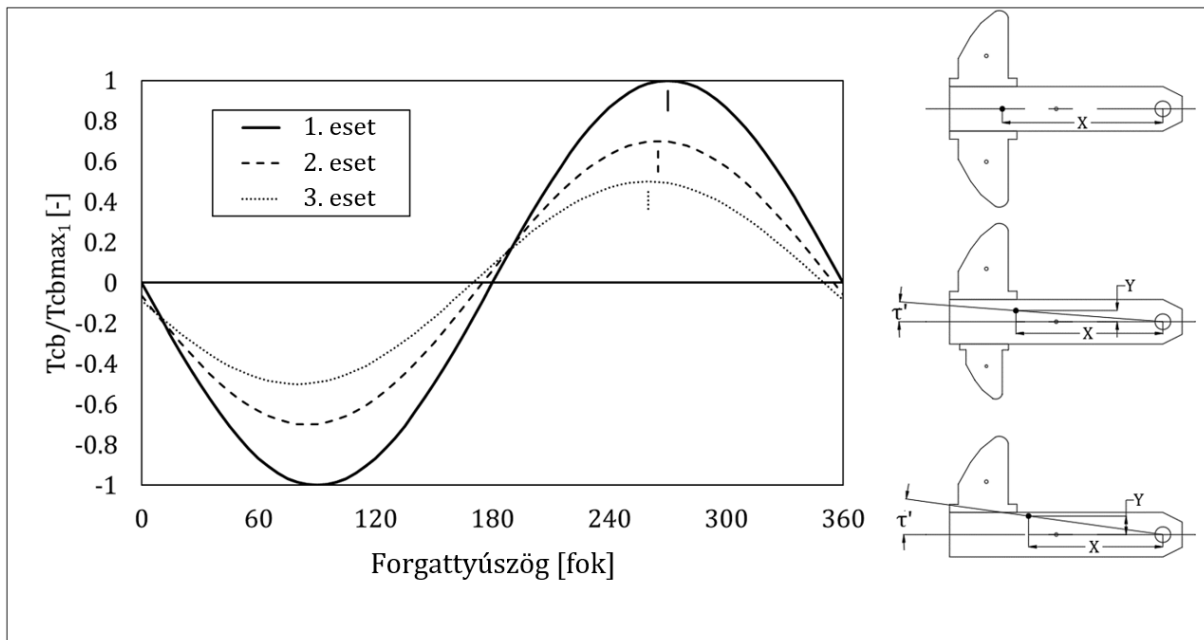
Y_{cw_i} Az i-ellensúly súlypontjának függőleges távolsága az ellensúly alapjától [in].

A 7. ábra az egyesített súlypont és a másodlagos fázisszög közötti kapcsolatot mutatja be az aszimmetrikus ellensúlykonfigurációk esetén.

Különböző ellensúlytípusok használata a forgattyúkar ellentétes oldalain nemcsak az ellensúlynyomaték amplitúdóját változtatja meg, hanem az ellensúlynyomatékot a kapott másodlagos fázisszöggel el is tolja, ezt a 8. ábra mutatja be.



7. ábra A tömegközéppont változása aszimmetrikus ellensúlyozás esetén



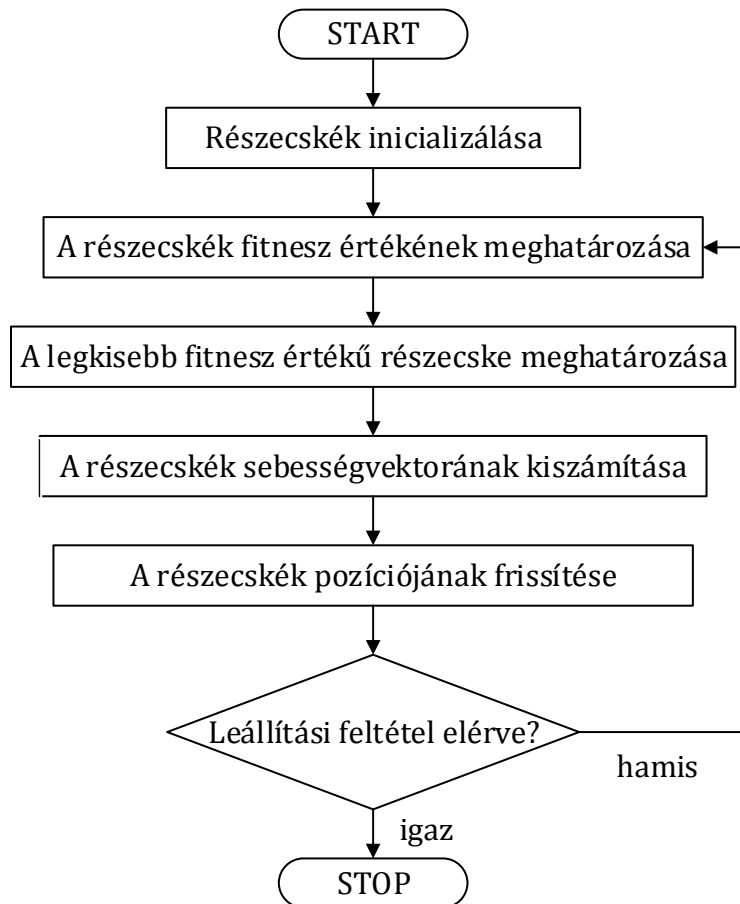
8. ábra A különböző aszimmetrikus ellensúlykonfigurációk hatása az ellensúlynyomaték függvényre

4. Tézis

Egy új technikát fejlesztettem ki a közlőmű nyomatékterhelésének optimalizálására a részecske raj optimalizálási módszer (PSO) alkalmazásával. A számítási eljárás szimmetrikus és aszimmetrikus ellensúlykonfigurációk esetén egyaránt alkalmazható. Optimalizálás különböző kritériumok szerint végezhető el: lehetőség van minimalizálni a maximális eredő közlőműnyomatékot vagy a ciklikus terhelési tényező (CLF) értékekét. Az aszimmetrikusan elhelyezett ellensúlyok használata jelentősen csökkentheti a közlőmű csúcsnyomatékát, amely az iparban figyelmen kívül hagyott gyakorlat.

Előnyös a PSO technika alkalmazása, ha az optimális feltétel közvetlen kiszámítása nem lehetséges, és ha az egyéb többdimenziós optimalizálási algoritmusok nem képesek megtalálni a globális optimumot. Ezt okozhatja a megoldási térben található számos lokális szélsőérték, vagy a fitness függvény nem folytonosan differenciálható jellege. A PSO módszer rugalmassága a legerősebb előnye más algoritmusokhoz képest. Az általános optimalizálási módszer könnyen testre szabható a feladat hatékony megoldásához a számítási eljárás módosításával, vagy a módszerben használt paraméterek megváltoztatásával egy jobb optimalizálási folyamat létrehozása érdekében. (Eberhart & Kennedy, 2001)

A módszer adott számú részecskét használ – együtt részecske rajnak hívják – és minden számítási lépésben javít a helyzetükön a megoldástérben. Minden részecskét egy vektor határoz meg, melyek koordinátái megadják a részecske helyzetét a megoldástér megfelelő dimenzióiban. A szükséges vektor méretét az optimalizálási eljárás során használt független változók száma határozza meg. Az új pozíciók meghatározása a részecskék hibafüggvény értékének minimalizálásával történik. Ennek a lépésenkénti korrekciónak a vizualizálása figyelemre méltó hasonlóságot mutat a madárraj vagy egy halraj mozgásával.



9. ábra A részecskeraj optimalizálási módszer általános folyamatábrája

A 9. ábra az optimális ellensúlyozás meghatározásához használt PSO módszer folyamatábráját mutatja. A bemutatott számítási módszer nagy előnye az optimalizálási cél viszonylag egyszerű módosíthatósága. A módszer metaheurisztikus jellege miatt a globális optimum megtalálása nem garantált, de az elért eredmények jobbak, mint amit bármely más jelenleg használt számítási módszer képes biztosítani. A 10. ábra bemutatja az egyes részecskék fitnesszértékének meghatározását, mely meghatározza, hogy a jelenlegi ellensúlykonfiguráció jobb-e, mint az előzőleg vizsgált esetek.

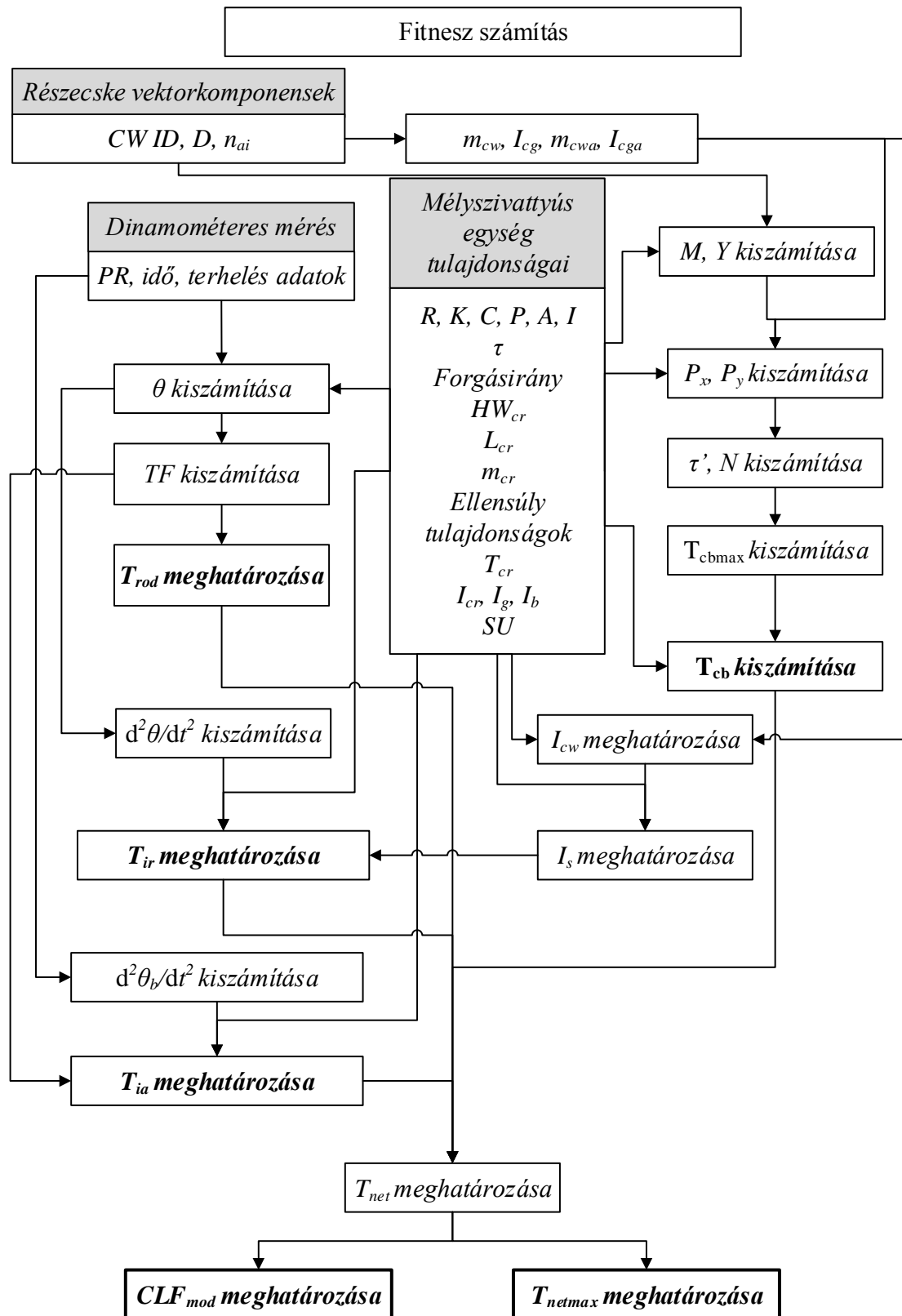
Az egyes részecskék sebességének meghatározásában fontos szerepe van mind az adott részecske korábbi legjobb helyzetének, mind a raj legjobb részecske helyzetének az aktuális iterációs lépésben. Az alábbi egyenlet felhasználása a sebességvektor koordinátáinak meghatározásához növeli a PSO számítási módszer hatékonyságát. Az egyes vektorkoordináták határait és az eljárásban használt együtthatókat átfogó tesztelések alapján határoztam meg.

$$V_{i+1,j} = W \cdot V_{i,j} + C_1 \cdot Rnd_1 \cdot (BP_{i,j} - P_{i,j}) + C_2 \cdot Rnd_2 \cdot (GBP_i - P_{i,j})$$

ahol:

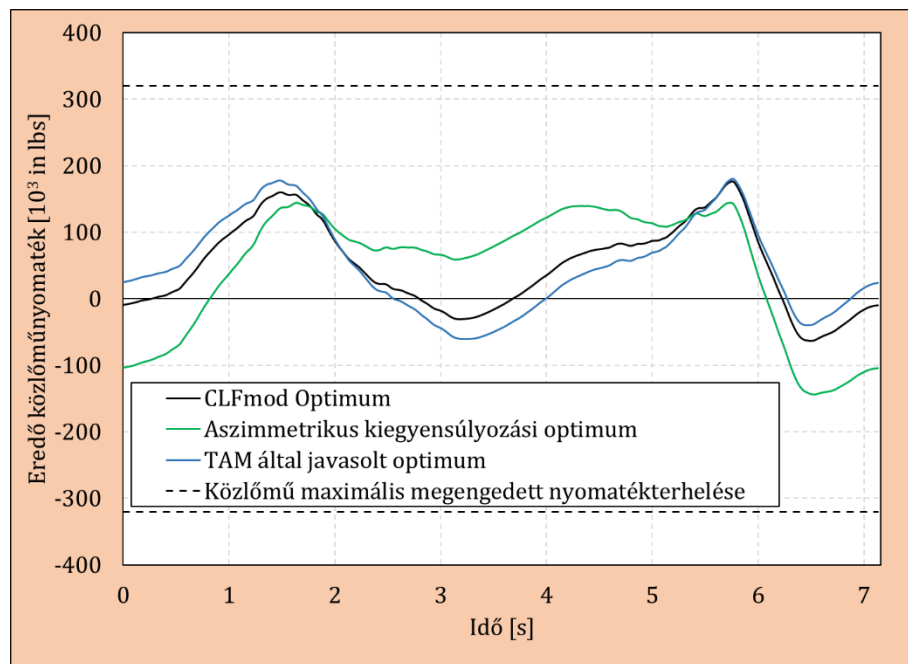
- $V_{i,j}$ a részecske j-edik sebességkomponense az i-edik iterációs lépésben [-],
- W csillapító tényező [-],
- C_1, C_2 gyorsulási tényező [-],
- Rnd_1, Rnd_2 véletlen számok a [0,1] intervallumból [-],
- $BP_{i,j}$ a részecske legjobb helyzetének j-edik összetevője az i-edik iterációs lépésben [-],

$P_{i,j}$ a részecske helyzetének j-edik összetevője az i-edik iterációs lépésben [-], és
 GBP_j a globális legjobb pozíció j-edik komponense [-].



10. ábra A fitnessz érték meghatározásának folyamatábrája

A 11. ábra a nyomatek optimalizálási eljárás eredményeit mutatja a TAM szoftver által meghatározott optimális megoldáshoz képest. A közlőmű eredménynyomatek függvényeinek legfontosabb tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza.



11. ábra A nyomatek optimalizálási módszerek összehasonlítása a TAM program eredményével

1. táblázat Az optimalizálási eredmények összefoglalása a vizsgált példa esetében

	Optimalizáció célja	Eredő közlőműnyomatek maximális értéke [10 ³ in lbs]	CLF_{mod} [-]	τ' [°]
Eredeti eset	-	245.11	1.929	0
TAM program eredménye	Csúcsnyomatek	180.10	1.727	0
Optimalizálási eredmények				
Azonos ellensúlyok és pozíciók	Csúcsnyomatek	178.85	1.728	0
Nincs megkötés	Csúcsnyomatek	144.33	2.151	-15.22
	CLF_{mod}	176.39	1.625	-4.08
Azonos ellensúlykonfiguráció a két hajtókaron	Csúcsnyomatek	178.82	1.728	0

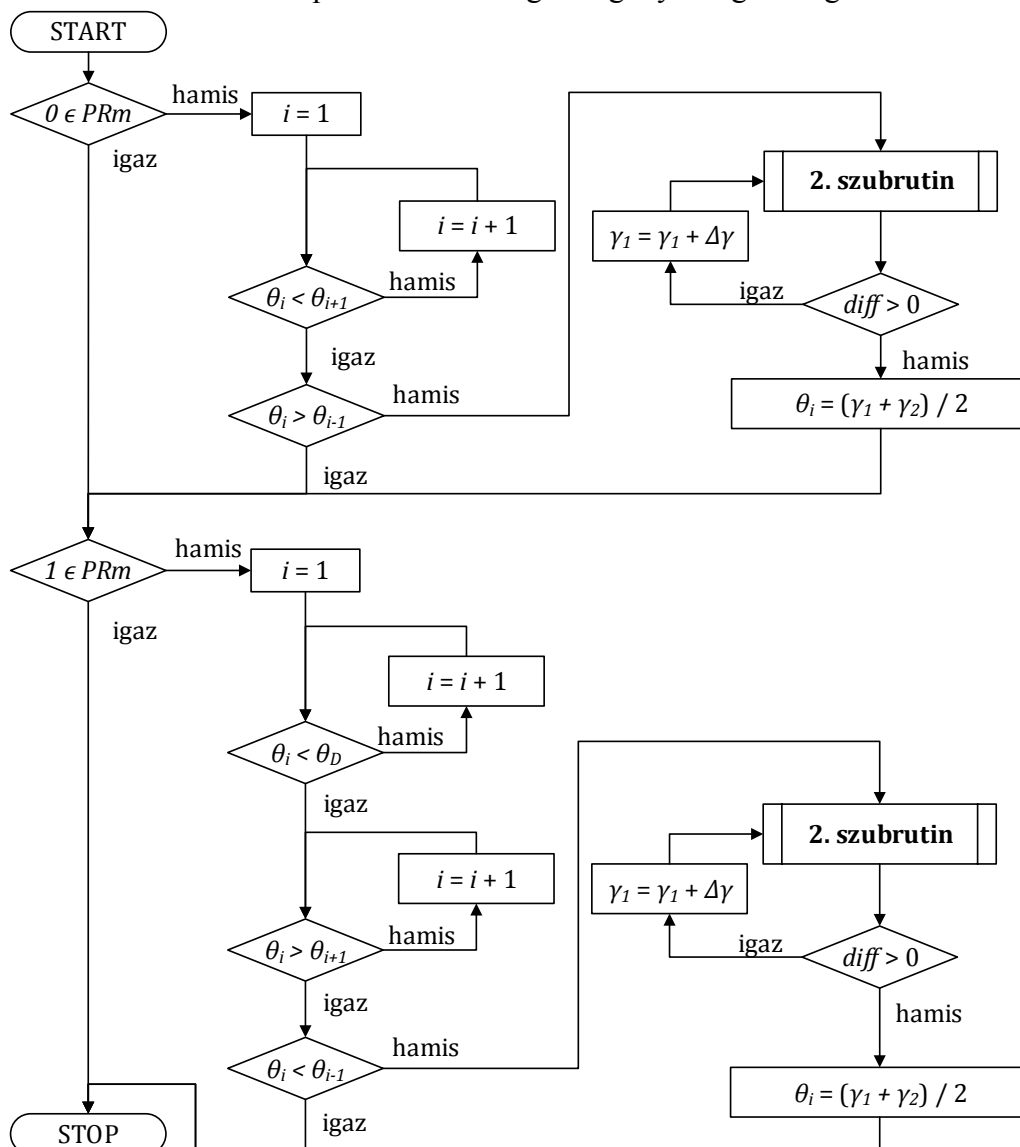
Új optimalizálási stratégiát vezettem be, amely egyszerre veszi figyelembe a közlőmű megengedett nyomatekterhelését és a módosított ciklikus terhelési tényezőt. Az elsődleges optimalizálási kritériumnak a módosított CLF-értéknek kell lennie, mivel ennek az esetnek a felhasználásával szükséges a legkevesebb energia az azonos folyadékmennyiség

kitermeléséhez. A közlőmű maximális nyomatékának alacsonyabbnak kell lennie, mint a sebességváltó névleges nyomatékterhelése, különben más optimalizálási célt kell alkalmazni.

Ha a szivattyúegység túlterhelése megakadályozható az optimalizálási probléma megoldásával azonos fő- és segédellensúlyokkal, akkor ajánlott a szimmetrikus optimális ellensúly konfiguráció. Ha azonban a szimmetrikusan elhelyezett ellensúlyok nem csökkenthetik a maximális eredő közlőmű nyomatékot, akkor az eltérő ellensúlyok használata megakadályozhatja a túlterhelést. A megfelelő aszimmetrikus ellensúly konfiguráció mindig alacsonyabb maximális eredő közlőmű nyomatékértéket eredményez, mint a szimmetrikus esetek.

5. Tézis

Ha a dinamométeres mérés mintavételi üteme alacsony az egység szivattyúzási sebességéhez képest, a maximális és minimális simarúd pozíció hiányozhat a mérésből. Ilyen esetekben további validációs lépésre van szükség a forgattyúszögek megfelelő kiszámításához.



12. ábra A továbbfejlesztett forgattyúszög-számítási folyamat folyamatábrája

Új számítási eljárást hoztam létre a forgattyúszög értékeinek javítására a fel- és lelöket kezdetének közelében. Erre az ellenőrzésre akkor van szükség, ha a dinamométeres mérés nem tartalmazza a simarúd legfelső vagy legalsó pontját. A javasolt módszer alkalmazásával megakadályozható a forgattyúszög hibás kiszámítása, ezért csökkentjük a forgattyúszög sebességének és a forgattyú szöggyorsulás értékeinek meghatározásának hibáját. A 12. ábra a javasolt eljárás folyamatábráját mutatja be, amely növeli a forgattyúszög értékeinek pontosságát, amikor a dinamométeres mérés alacsony mintavételi ütemmel készül.

6. Tézis

Módosított ciklikus terhelési tényezőt – CLF_{mod} – vezettem be a hajtóegység leírására. Ez az új paraméter figyelembe veszi a változó forgattyúszögsebességet, ezért pontosabb eredményeket ad, ha a hibás-rudazatos szivattyúegységet nagy szlipű vagy ultranagy szlipű elektromotor hajtja.

$$CLF_{mod} = \frac{\sqrt{\frac{\int_{t=0}^T (T_{net}(t))^2 dt}{T}}}{\frac{\int_{t=0}^T T_{net}(t) dt}{T}}$$

ahol:

CLF_{mod}	módosított ciklikus terhelési tényező [-],
$T_{net}(t)$	eredő közlőműnyomaték függvény [in lb], és
T	a hibás-rudazatos egység periódus ideje [sec].

Az eredetileg bevezetett egyenletet elsősorban azért használták, mert a forgatószög volt a nyomatékelemzés alapja, minden paramétert egyenletesen elosztott forgattyúszög értékeken határoztak meg. Ezekben az esetekben a forgattyúszög függvényének időben állandó változását feltételezték. A javasolt egyenlet alapja az idő; ezért ez az új egyenlet képes figyelembe venni a pontosan kiszámított forgattyúszögváltozást a szivattyúzási ciklus alatt.

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TOVÁBBI KUTATÁSI IRÁNYOK

A dinamométeres mérés kiértékelését továbbfejlesztettem, összehasonlítva a korábbi publikációkkal és a kőolajiparban használt szoftverekkel. Az első fontos tudományos eredmény egy nagy pontosságú számítási módszer létrehozása a mért simarúd helyzetértékeihez tartozó megfelelő forgattyúszögek meghatározásához. Ezekkel a pontosabb forgattyúszögekkel a dinamométeres mérések értelmezése és a nyomatékelemzés kisebb hibával végezhető el.

A forgattyúkar és a hímagerenda szöggyorsulásának kiszámítási módszerén javítottam, biztosítva a szivattyúzási ciklus alatti tehetetlenségi nyomatékok pontos leírását. Minden bemutatott számítás képes figyelembe venni a nagy szlipű vagy ultranagy szlipű elektromotorok által hajtott szivattyúegységek változó forgattyúszögsebességét. Számos korábban publikált módszert hasonlítottam össze a bemutatott numerikus módszerekkel és újszerű, általam bevezetett számítási eljárásokkal, hogy a szükséges paraméterek időbeni változását a lehető legnagyobb pontossággal biztosítsam. A Fourier-sorok alkalmazása elengedhetetlen volt a releváns szögek és azok gyorsulásának pontos kiszámításához a

szivattyúzási ciklus alatt. Az eredő közlőműnyomaték változásának meghatározását részletesen kidolgoztam, melynek megértését egy példa megoldásán keresztül segítettem elő. A tehetetlenségi nyomatékok megfelelő figyelembevétele megváltoztathatja a közlőmű eredő nyomatékfüggvényét.

Elvégeztem az aszimmetrikusan elhelyezett ellensúlyok hatásának mélyreható vizsgálatát. Korábbi munkákban nem javasolt az aszimmetrikusan elhelyezett ellensúlyok alkalmazása, mivel annak hatása a közlőmű eredőnyomatékára nem volt ismert. Meghatároztam a másodlagos fázisszöget, ami az ellensúlyokat és a hajtókart tartalmazó rendszer súlypontjának a hajtókar szimmetriatengelye közötti szög.

A javasolt dinamométeres mérés kiértékelése alapján az optimális eredő közlőműnyomatékának meghatározását két különböző optimalizálási kritérium alkalmazásával végeztem el. Módosított ciklikus terhelési tényezőt vezettem be a himbás-rudazatos szivattyúegységek hatékonyságának kiszámításának javítására változó forgattyúszögsebességek esetére. Korábbi munkákban a hajtókar nem állandó szögsebességű eseteit nem vették megfelelően figyelembe. Ha a szivattyúegység a legjobb módosított ciklikus terhelési tényező esetén túl van terhelve, akkor más optimalizálási kritériumot kell alkalmazni a közlőmű védelmére: a maximális eredő közlőműnyomatékokot.

Részecske raj optimalizálási technikát alkalmaztam annak az ellensúly konfigurációnak a megtalálásához, amely biztosítja a sebességváltó optimális nyomatékterhelését. Ezzel a módszerrel az aszimmetrikus ellensúly konfigurációk alacsonyabb maximális nyomatékterhelést értek el, mint az iparban korábban publikált módszerek és szoftverek eredményei. A másodlagos fázisszöget új szabadságfokként alkalmazva az optimalizálási eljárásban az eredmények jobbak voltak, mint a szimmetrikus ellensúlykonfigurációt leíró esetek.

Számos paraméter ismeretét igényli a teljes nyomatékelemzés, ami az értékezésben részletesen bemutatásra került. Ezen változók némelyike a termelőmérnökök számára általában ismeretlen, vagy a megfelelő érték megállapítása költséges méréseket igényel. Gyakorlati egyenleteket vezettem be, amik megfelelően közelítik ezeket a paramétereket, lehetővé téve a himbás-rudazatos mélyszivattyús egység kezelői számára, hogy mélyreható nyomatékelemzést végezzenek, és ezáltal javítsák a berendezés gazdasági értékét.

A bevezetett számítási eljárások alapján több jövőbeli kutatási út is kijelölhető. A hajtókar és a himbagerenda szögsebességének változásának pontos meghatározása a közlőmű eredőnyomatékának függvényében hasznos kiegészítés lenne, de valószínűtlennek tűnik, hogy erre a problémára általános megoldás létezne.

A javasolt aszimmetrikus konfigurációk számításainak beépítése olyan munkákba, mint (Koncz, 2018), előnyös lenne. A bevezetett módszerek alkalmazása a dinamométeres szoftverek esetében kedvezőbb működési feltételeket eredményezhetnek a himbás-rudazatos mélyszivattyús egységek számára. A bemutatott számítási eljárás módosítható a több segédellensúlytengelyt használó technológiák eredményeinek javítására (Feng, et al., 2015).

A bevezetett módszer módosítható és alkalmazható változó fordulatszámú meghajtású himbás-rudazatos mélyszivattyús egységekre, tovább javítva azok hatékonyságát. Ehhez azonban a mikrokontroller által vezérelt hajtókar szöggyorsulási mintázat és az ebből adódó eredő közlőműnyomaték függvény közötti komplex kölcsönhatások további tanulmányozására van szükség.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT KÖZLEMÉNYEK

- Kis, L.** (2013): Calculation of the gearbox torque including inertia effects. Doktoranduszok Fóruma, Konferencia előadás. Miskolc. 46-50
- Kis, L.** (2014): Comparison of beam acceleration calculation models. XXVIII. MicroCad International Multidisciplinary Scientific Conference, Konferencia előadás. Miskolc
- Takács, G., & **Kis, L.** (2014): Finding the best way to calculate articulating torque on sucker-rod pumping gear reducers. *Kőolaj és földgáz*, 2014/3. 17-20.
- Kis, L.** (2014): A dinamométeres mérések kiértékelésének nehézségei. Doktoranduszok Fóruma, Konferencia előadás. Miskolc
- Takács, G., & **Kis, L.**, & Koncz, Á. (2015): The use of Dynamometer Data for Calculating the Torsional Load on Sucker-Rod Pumping Gearboxes, Southwestern Petroleum Short Course, Texas, 22-23 April, 2015. 176-183.
- Kis, L.** (2015): Mechanical Net Torque Optimization of Sucker-Rod Pumping Units, XXIX. MicroCad International Multidisciplinary Scientific Conference, Konferencia előadás. Miskolc
- Kis, L.** (2015): The effect of the articulating inertial torque on the permissible loads of sucker-rod pumping units, *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 85(1), 118-122.
- Takács, G., & **Kis, L.**, & Koncz, Á. (2016): The calculation of gearbox torque components on sucker-rod pumping units using dynamometer card data. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 101-110. doi: <https://doi.org/10.1007/s13202-015-0172-z>
- Koncz, Á., & **Kis, L.**, & Szabó, T. (2018): New method for stripper well supervision. 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2018, Konferencia előadás. Sofia, Bulgaria. STEF92 Technology Ltd. 649-656. doi: <https://doi.org/10.5593/sgem2018/1.4/S06.085>
- Koncz, Á., & **Kis, L.** (2020). Particle swarm optimization usage in petroleum production, *Műszaki Földtudományi Közlemények*, 89(2), 117-125.
- Takács, G., & **Kis, L.** (2021). A New Model to Find Optimum Counterbalancing of Sucker-Rod Pumping Units Including a Rigorous Procedure for Gearbox Torque Calculations, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 205, 108792. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108792>

AZ ÉRTEKEZÉSBEN IDÉZETT LEGFONTOSABB SZAKIRODALMAK

- API. (2013, November). Specification for Pumping Units. 19th Edition. Washington DC.: American Petroleum Institute.
- Clegg, J. (2007). Petroleum Engineering Handbook (Vol. IV). Society of Petroleum Engineers.
- Eberhart, R. C., & Kennedy, J. (2001). Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann.
- Echometer. (2011). Retrieved 04 21, 2020, from <http://www.echometer.com/Products/Transducers>
- Echometer. (2018). Total Asset Monitor Acquisition and Analysis Operating Manual. Wichita Falls, Texas: Echometer Company.
- Engelbrecht, A. (2007). Computational Intelligence. John Wiley & Sons, Ltd.
- Gibbs, S. G. (1975, September). Computing Gearbox Torque and Motor Loading for Beam Pumping Units with Consideration of Inertia Effects. *Journal of Petroleum Technology*, 1153-1159.
- Koncz, Á. (2018). Sucker Rod Pumping Analysis Based on Measured Electrical Parameters, PhD Thesis.
- Lea, F. (2007). Artificial Lift Selection, Chapter 10. In *Petroleum Engineering Handbook (Vol. IV)*. Dallas, Texas: Society of Petroleum Engineers.
- Lufkin. (1997). Conventional Counterbalance Torque (CBT) Data.
- Rowlan, O., McCoy, J., & Podio, A. (2005, July). Best Method to Balance Torque Loadings on a Pumping Unit Gearbox. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 44(07), 27-33. doi:<https://doi.org/10.2118/05-07-TN3>
- Schlumberger. (2019). Sucker Rod Pump Surface Units Catalog. Schlumberger.
- Svinos, J. G. (1983). Exact kinematic analysis of pumping units. 58th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE. SPE 012201-MS. San Francisco, California: Society of Petroleum Engineers.
- Takács, G. (1989). Torque analysis of pumping units using dynamometer cards. Proc. 36th Annual Southwestern Petroleum Short Course, (pp. 366-376). Lubbock, Texas.
- Takács, G. (2015). Sucker-Rod Pumping Handbook. Elsevier.
- Takács, G., Kis, L., & Koncz, Á. (2016). The calculation of gearbox torque components on sucker-rod pumping units using dynamometer card data. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 101-110. doi:<https://doi.org/10.1007/s13202-015-0172-z>