



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
ENERGETIKAI GÉPEK ÉS RENDSZEREK TANSZÉK



Forgó testben történő hővezetés szimulációja és mérése kerékpár tárcsafék példáján

TDK DOLGOZAT

RITTGASSZER TAMÁS

Konzulens:

Dr. Szücs Mátyás
adjunktus

Budapest, 2023.11.10.

Tartalom

Bevezetés.....	3
Forgó rendszerek termikus folyamatokkal	3
Kerékpár hidraulikus tárcsafékek	4
A fékrendszer melegedése, problémák, megoldások.....	4
Optimális hőmérséklettartomány	5
Fékbetét anyagának hatása az ideális üzemi hőmérsékletre	6
Fékfolyadék melegedése	6
Hőátadás a fékbetét és dugattyúk között, fékbetét hűtése.....	7
Féktárcsa.....	9
Féktárcsa melegedése által okozott problémák.....	9
Konstrukciók a hűtésre, és egyéb problémák elkerülésére	10
Féktárcsa hővezetésének modellezése	13
Modell felállítása	13
Differenciálegyenlet felírása.....	15
Differenciálegyenlet dimenziótlánítása	17
Differenciálegyenlet diszkretizálása.....	19
Kezdeti feltétel.....	22
Periodikus peremfeltételek felírása	22
Paraméterek meghatározása	23
Mérés.....	25
Mérés leírása.....	25
Röviden a hőkamerákról.....	28
Mit érzékelnek a hőkamerák?	28
Infravörös sugárzás	28

Kamera felépítése.....	29
Tulajdonságai	30
Mérés előkészítése	31
Feketeségi fok meghatározása	32
Fékerő	34
Első mérés.....	35
Második mérés.....	36
A mérések numerikus szimulálása	38
Konklúzió, ötletek a téma bővítésére	42
Források.....	44

Bevezetés

Rengeteg olyan forgó eszközt találhatunk a hétköznapi életben és az ipari körülmények között is, melyek működésük közben forognak, és közben valamilyen hatásnak köszönhetően melegsznek. Ez a hatás lehet súrlódás, deformáció, elektromos ellenállás, vagy akár bármiféle szándékos melegítés is. De akármilyen okokat is feltételezünk, fontos lehet számunkra ennek a folyamatnak a leírása, mérése és modellezése is. Ezeknek a rendszereknek a termikus leírásához bonyolultabb eszközöket kell bevetnünk, mint állandósult állapotokban vagy álló esetekben. Ez a TDK dolgozat az ilyen forgó rendszerekkel foglalkozik mind mérés, mind numerikus szimuláció szempontjából. A téma nagysága miatt csak egy kerékpár tárcsafék példáján keresztül vizsgálom a jelenséget, és a hidraulikus tárcsafékek melegedésére részletesebben is kitérek.

Forgó rendszerek termikus folyamatokkal

Forgó rendszerek termikus folyamatokkal nagy számmal találhatók például rengeteg féle szerszámgépben, ahol a megmunkáláshoz szükséges energiát forgó mozgással biztosítjuk. Egy jó példa erre a köszörű, amiben működése során hő fejlődik a megmunkálandó anyaggal való kontakt hatására. Nem kell nagy ipari gépekre gondolnunk, például egy kézi sarokcsiszolónál vagy fúrónál is felfedezhetjük a jelenséget. Mindkét esetben a súrlódásnak köszönhetően melegszik a szerszám.

Gyártók számára előnyt jelenthet, ha jól tudják mérni illetve szimulálni ezt a melegedést, mert például ettől függően tudnak anyagot választani, vagy akár geometriát, üzemi körülményeket is változtathatnak ennek függvényében. Különösen kedvező, ha a numerikus szimuláció minősége kellően jó ahhoz, hogy mérés és tesztelés nélkül is tudjanak bizonyos következtetéseket tenni, ezzel időt és erőforrást spórolva. Hasonló okok miatt terjedtek el a kereskedelmi végelesemes szoftverek. A mérésnek fontos szerepük van a szimuláció validálásában. Ezen kívül lehetővé teszik, hogy egységes körülmények között végrehajtott mérésekből kapott eredményeken keresztül össze tudjuk hasonlítani a piacon található termékeket, és nem csak a gyártók által mondott adatokra tudunk hagyatkozni.

Egy másik jellemző terület forgó, melegedő rendszerekre a járművekben található forgó alkatrészek. Alkatrészek, mint például a gumikerék, amiben a plasztikus deformációk és az út-kerék kontakt súrlódásának hatására hő fejlődik forgás közben. Gondoljunk például a fékekre. Legyen szó bármilyen fékrendszerről, amivel egy forgó alkatrészt akarunk lassítani. Fékezés során minden esetben a kinetikus energiát disszipáljuk, erre egy egyszerű és hatékony megoldás a

kinetikus energia hővé alakítása. Ezt többféle módszerrel is elérhetjük. Például elektromágneses fékekkel, amik elektromotorokban találhatóak meg, de a leggyakoribb megoldás, amikor súrlódással történik a fékezés.

Sokfajta féket találhatunk, ami ezen elven működik, például a legelterjedtebb féktípus járművekben a tárcsafék (alkalmazzák személygépjárművekben, vonatokban, teherautókban és kerékpárokon is).

Kerékpár hidraulikus tárcsafékek

Napjaink egyik legelterjedtebb kerékpár féktípusa a hidraulikus tárcsafék. A felhasználók (pl. downhill kerékpárosok) és a gyártók körében is jól ismert tapasztalat, hogy a fékteljesítmény a felmelegedés következtében drasztikusan romolhat. A fékek fejlesztésében a mérnökség számos alterülete szerepet kap, beleértve az anyagtechnológiát, a mechanikai és termikus modellezést, a geometriai optimalizálást vagy a precíziós mérés technikát. Számos gyártó kínál olyan termékeket, melyek a tárcsafék felmelegedése következtében fellépő problémákra kívánnak megoldást nyújtani.

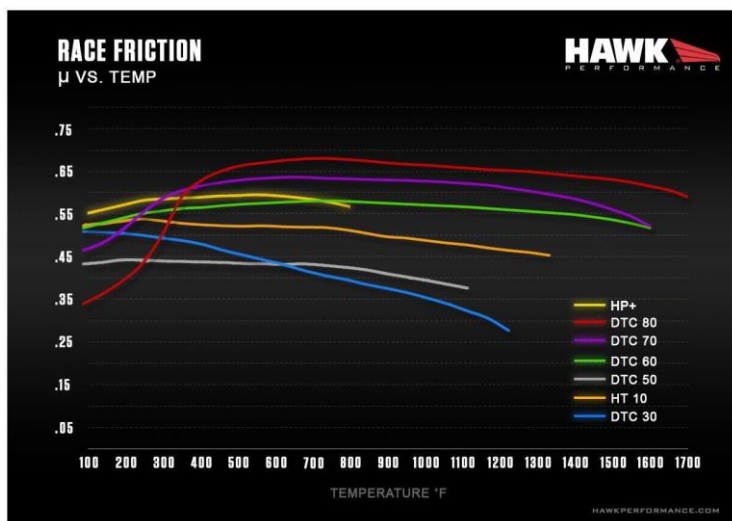
A kerékpár tárcsafék azért jó választás a téma részletesebb bemutatására, mert a forgó és melegedő rendszerek világában egy relatív egyszerű példát szolgáltat. Egyszerűsége abból is látszik, hogy míg vonatoknál a féktárcsák hűtőbordákkal, és komplikált furatokkal vannak ellátva, addig az elterjedtebb kerékpár féktárcsák kialakítása viszonylag egyszerű. Továbbá folyamatosan fejlesztik, tökéletesítik őket. Ez különösen igaz a versenysportoknál, ahol hatalmas erőforrásokat fektetnek az újításokba, de akár a hétköznapiakra is gondolhatunk, ahol például a környezetbarát városi közlekedéshez kerékpárokat használnak, és ezeket jó minőségű fékekkel kell felszerelni.

A fékrendszer melegedése, problémák, megoldások

Mint korábban már említettem, a fék melegedését a súrlódás okozza, mely során a kinetikus energia hővé alakul át. Ez leginkább a hosszú, intenzív fékezési szakaszokon okoz problémát, hisz itt két fékezési ciklus között nincs ideje visszahűlniük az alkatrészeknek az eredeti hőmérsékletükre. A gyakorlatban ezek a körülmények a downhill kerékpároknál teljesülnek legnagyobb mértékben, így a technológiák zömét is itt használják fel.

Optimális hőmérséklettartomány

Az autókhoz hasonlóan a kerékpár fékek működésének is van egy optimális hőmérséklettartománya. Például a [1] cikk alapján a Forma 1-es járművek fékei a 400-800 °C hőmérséklettartományban üzemelnek a legjobban, így nem probléma, amikor kanyarok előtt a tárcsák jelentősen felmelegednek. Ezt a tartományt a tervezők próbálják úgy beállítani, hogy a legjellemzőbb, legkritikusabb körülmények között legyen optimális. Például egy országúti kerékpárnál, ahol jellemzően rövidebbek a fékezési ciklusok nincsenek olyan magas üzemi hőmérsékletek. Ellenben egy downhill kerékpárnál hegyről való leereszkedés során több tíz perces intenzív fékezés is felléphet, és a fékeknek ilyenkor kell legjobban működniük. Ha ezt a hőmérsékletet nem érjük el, akkor a fékünk kicsit gyengébben fog. Viszont, ha túlzottan meghaladjuk, az a fékek élettartamának csökkenését, vagy akár a rendszer tönkremenetelét is okozhatja, amit mindenképp el kell kerülni. Az 1. Ábrán láthatjuk, hogy autó tárcsafékeknel



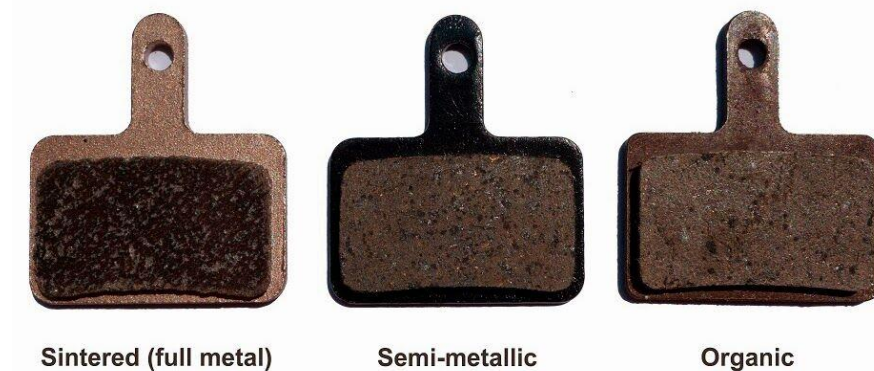
1. Ábra: Súrlódási együttható az idő függvényében különböző betét anyagoknál
Kép forrása: <https://www.hawkperformance.com/compounds/motorsports>

hogyan változik a fékbetét-féktárcsa anyagpár súrlódási együtthatója a hőmérséklet függvényében. Például a kék függvénynél a hőmérséklettel folyamatosan romlik, így ez a fékbetét nem előnyös magas hőmérsékletekre. Azonban a piros függvény magas hőmérsékleten magas súrlódási együtthatójú anyaghoz tartozik. Ennek ellenoldala, hogy alacsony hőmérsékleten viszont rosszabbul üzemel a fék.

A különböző technológiák fő feladata, hogy az üzemelés során minél inkább ebben a tartományban maradjon a hőmérséklet. Ezért építenek be a rendszerbe különféle hőelvonást szolgáló elemeket.

Fékbetét anyagának hatása az ideális üzemi hőmérsékletre

Az optimális hőmérséklettartományt például a fékbetétek anyagával lehet változtatni. Vannak úgynevezett organikus, fél-fémes és szinteres (teljes fém) fékbetétek (2. Ábra). Ezek ilyen sorrendben egyre magasabb üzemi hőmérsékleten működnek legnagyobb hatásfokkal, azonban a féktárcsát szintén ilyen sorrendben egyre gyorsabban koptatják, és egyre drágábbak is [2].



2. Ábra: Fékbetétek fajtái

Kép forrása: https://bikepro.hu/melyik_a_jo_tarcsafek_pofa_es_melyik_mire_valo

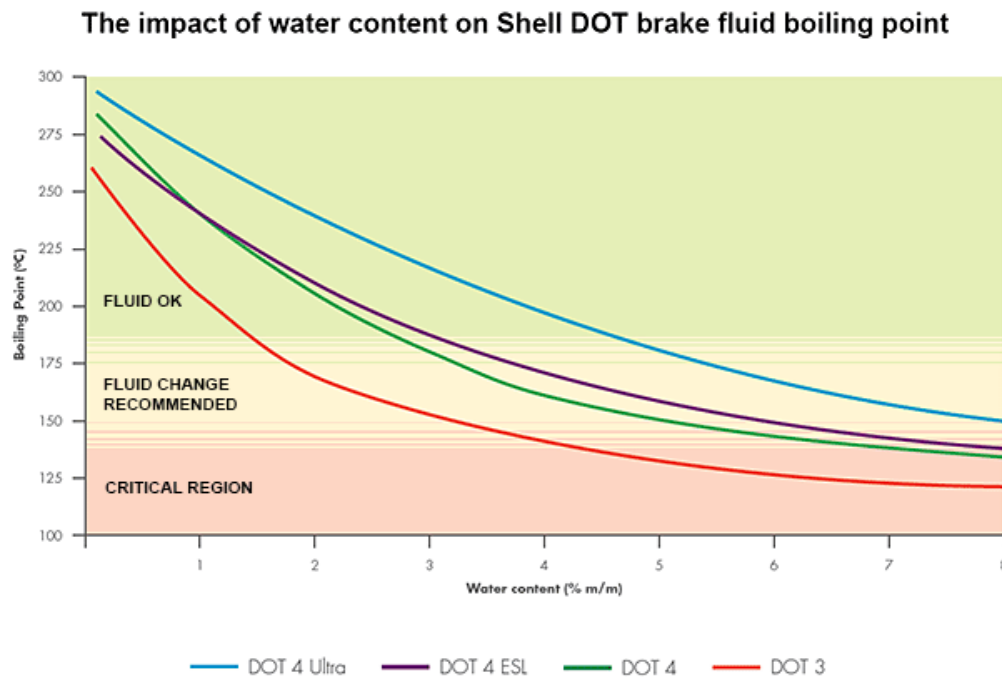
Ezért el kell döntenünk, hogy a fékező hatás erősítése vagy a tárcsa élettartama és ára a fontosabb. A hőmérséklettartományon kívül az anyag a fék hangját, és az időjárási tényezőkkel szembeni ellenállást is befolyásolja.

Fékfolyadék melegedése

A hidraulikus tárcsafékek egyik névadó eleme a fékfolyadék. Ennek sok előnye van, de egy hátránya, hogy a legnagyobb problémát a hidraulikus tárcsafékek melegedése során az jelentheti, ha a fékfolyadék a magas hőmérséklet hatására felforr, így hirtelen összenyomhatóvá válik. Ez nagy romlást eredményez a fék teljesítményében. Extrém esetben akár teljesen is megszűnhet a fékhatás. Szerencsére azonban ehhez olyan magas hőmérsékletek kellenek, melyeket nem szokott elérni a folyadék.

Két fajta folyadék elterjedt a hidraulikus tárcsafékekben [3]. Az ásványi olaj (mineral oil) és a DOT (Department of Transportation) fékolaj. Melegedés kapcsán a DOT-ról fontosabb beszélni.

A DOT fékfolyadék egy hivatalosan minősített fékfolyadék, aminek magas elvárásoknak kell megfelelnie, így személygépjárművekben nagyon elterjedt. Higroszkópos tulajdonságú, ami azt jelenti, hogy idővel képes a levegő nedvességtartalmát felvenni. Ez azért jelent gondot, mivel így a forráspontja jelentősen lecsökkenhet. Ez a 3. Ábrán látható. Ezzel ellentétben az ásványi olaj nem képes elegyedni a vízzel. A higroszkópos tulajdonság azonban nem egyértelműen hátrány, mivel míg DOT-nál, ha víz kerül a rendszerbe, akkor csak csökken a forráspont, addig ásványi olajnál a víz össze tud gyűlni egy helyre, és nagy hőterhelés hatására könnyebben felforr, mint akár



3. Ábra: DOT folyadék forráspontjára való hatása a nedvességtartalomnak
 Kép forrása: <https://epicbleedsolutions.com/blogs/articles/dot-brake-fluid-vs-mineral-oil>

a csökkentett forráspontú DOT folyadék. Ráadásul ez a vízbuborék, ha olyan helyen gyűlik össze, akkor korrózióhoz is vezethet.

Hőátadás a fékbetét és dugattyúk között, fékbetét hűtése

Mivel a fékfolyadék felmelegedésére különösen figyelni kell, ezért fontos korlátoznunk a fékbetétek és a fékfolyadék közötti hőátadást. A folyamat során a hőáram útja több alkatrészen is keresztülvezet, így többféle megoldással is lehet csökkenteni az átadott hő mennyiségét. A következőkben említett technológiák nagyját a Shimano fejlesztette ki, vagy alkalmazza az Ice Technology terméksorozatában. Ezeknek a termékeknek a célja a fék túlzott melegedésének elkerülése, és így az ideális fékműködés elősegítése.

Kerámia dugattyú (ceramic piston)

A dugattyú a fékbetét alaplemezt és a fékolajat elzáró gumihártyát köti össze, vagyis a hőáram közvetlen keresztülhalad rajta. Ennek az anyagválasztásnak előnye, hogy használatával csökkenthető a fékolaj melegedése, mivel a kerámiák hővezetési együtthatója alacsony. Hátránya azonban, hogy a kerámia nagy ridegsége miatt a dinamikus hatásokat nem bírja jól, és könnyen eltörhet.

A fékfolyadék melegedésén kívül ez az alkatrész a gumi hártyát is megóvjja a hőterheléstől, ami fontos lehet, mivel a polimerek érzékenyek a magas hőmérsékletekre.

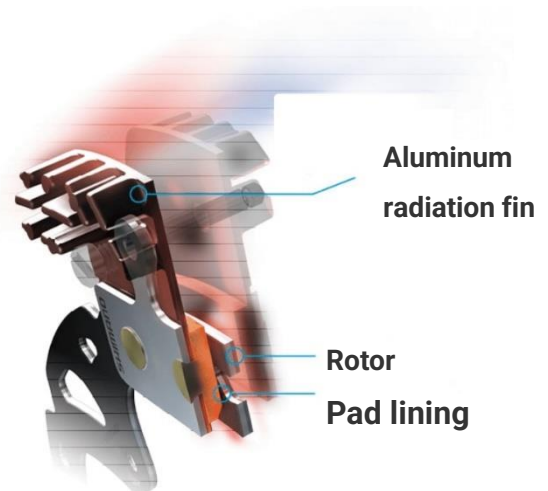


4. Ábra: Kerámia dugattyú

Kép forrása: <https://www.ebay.co.uk/itm/284588751142>

Hűtőbordás fékbetét

A melegedés csökkentésének lehetséges módja a hőátadás sebességének lassítása mellett az áramlás irányának megváltoztatása. Ezen az elven működnek a hűtőbordás fékbetétek, melyekről részletesebben az [4] forrásban olvashatunk. A képen látható kialakításnál a fékbetét kopófelülete egy acéllemezre van rögzítve, úgy, hogy a kettő között van még egy alumínium lemez. Az acéllemez strukturális merevséget ad a rendszernek, míg az alumínium lemez a jó hővezetési tényezője, és a fékházból az áramló levegőre kilógó hűtőbordák miatt hűti a fékbetétet, így kevesebb hő jut el a dugattyú és fékfolyadék felé.

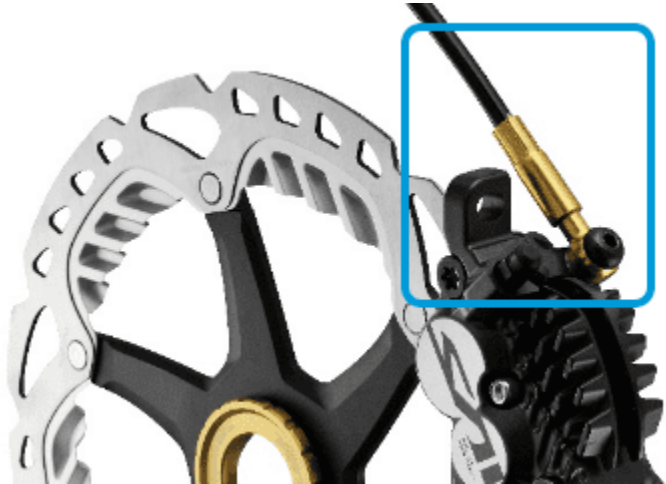


5. Ábra: Shimano Ice Technology pad

Kép forrása: <https://bike.shimano.com/en-EU/technologies/component/details/ice-technologies.html>

Fékvezeték csatlakozóelem

A fékfolyadék felmelegedhet olyan módon is, hogy először felmelegedik a fékház, aztán ez adja át a hőt az olajnak a fékvezetéken keresztül, annak csatlakozásánál. Az ilyen fajta hőátadás csökkentése miatt a Shimano kifejlesztett egy csatlakozóelemet [4], amely más termékekhez képest kisebb hővezetési együtthatójú fémből készül, és jelentősen hosszabb, így is megnövelve a környezetnek való hőátadást.



6. Ábra: Shimano Ice Technology Hose connection

Kép forrása: <https://bike.shimano.com/en-EU/product/component/saint-m820/SM-BH90-SBLS.html>

Féktárcsa

A tárcsafékek egyik legfontosabb eleme a féktárcsa (a nevét is erről kapta), hiszen ez továbbítja a fékerőből eredő nyomatékot a keréknek, és ezáltal lassítja a kerékpárt. Továbbá a fékerő is a fékbetét és a féktárcsa súrlódása során jön létre. A fékezés során felszabaduló hőmennyiség nagyobb része a féktárcsába fog távozni, mivel a fékbetét oldali rész szándékosan úgy van kialakítva, hogy megakadályozza a fékfolyadék melegedését. A féktárcsa jó hűtésével ezt még inkább elősegíthetjük. Kulcsfontosságú részként többfajta elemet is találhatunk ezen az alkatrészen, amelyek kapcsolatban állnak a rendszer melegedésével, és hűtésével. Nézzük most ezeket részletesebben.

Féktárcsa melegedése által okozott problémák

Féktárcsa hőtágulása

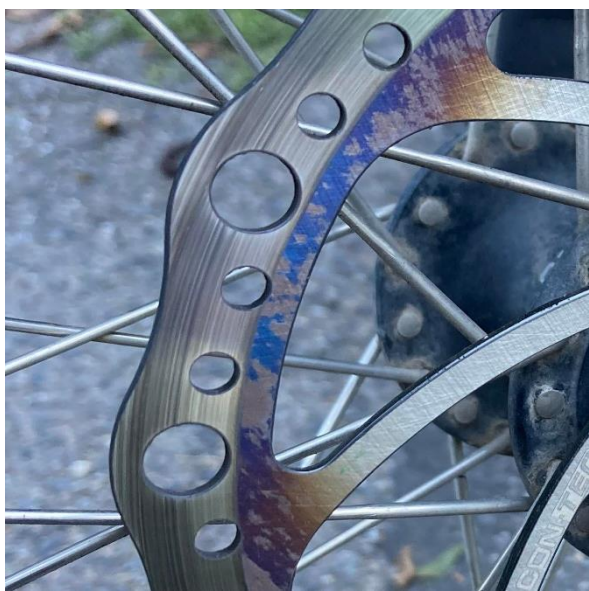
A tárcsafékekben a tárcsa síkjának merőlegesnek kell lennie a forgás tengelyére nagy tűrés pontossággal, máskülönben hozzáérnének a fékbetétek a tárcsához, és a fék akkor is lassítana, amikor mi ezt nem akarjuk. Ez alap esetben sem mindig egyszerű, ezért a fékek időnkénti után állítást igényelnek. Azonban a helyzet még rosszabb, ha nagy hőterhelés éri a rendszert, mivel ilyenkor a féktárcsa tágulna, de tárcsán belüli helytől függően eltérő hőmérsékletek miatt ezt nem tudja a saját síkjában megtenni, és elgörbülhet, így hozzáérve a fékbetétekhez.

Túlmelegedés egyéb hatásai

Magas, ismétlődő hőterhelés hatására a féktárcsa hőkezelése megváltozhat, keménysége csökkenhet, rosszabb fékhatást eredményezve. Ezenkívül a túlmelegedett fék gyorsabban kopik.

Ha a fékbetét is túlmelegszik, akkor az gyorsabb kopást, és a fékhatás csökkenését eredményezi. Bizonyos esetekben a betét ráéghet a tárcsára, ezzel egy réteget képezve a kettő között, ami kisebb súrlódási együtthatóval rendelkezik.

A túlmelegedést a teljesítménybeli változáson kívül jelezheti a féktárcsa elszíneződése és fekete csíkok megjelenése. A fekete csíkok (8. Ábra). a megégett fékbetétet, míg az elszíneződés (7. Ábra). a hőkezelés elromlását indikálja.



7. Ábra: Elszíneződés a féktárcsán

Kép forrása:

https://www.reddit.com/r/bikewrench/comments/xl3mk0/is_this_color_change_normal_i_noticed_smoke_too/



8. Ábra: Fekete csíkok a féktárcsán

Kép forrása:

<https://singletrackworld.com/forum/topic/what-have-i-done-to-my-disk-pads/>

Konstrukciók a hűtésre, és egyéb problémák elkerülésére

Féktárcsa méret

A féktárcsa átmérője közvetlen kapcsolatban van a féknyomatékkal, hisz nagyobb átmérőhöz nagyobb erőkar tartozik. Azonban a tárcsa hűtéséhez is köthető, mivel a nagyobb tárcsa nagyobb felületen képes a benne keletkező hőt leadni a környezetnek, nehezebben melegedik túl. A féktárcsa méretének növelése azonban nem ennyire egyértelmű, hisz nagyobb nyomatéknál az anyagban ébredő feszültségek is magasabbak lesznek, valamint a tárcsa tömege is nőni fog.

Másik jellemző mérete a tárcsának a vastagsága. Azonban ez leginkább csak a tömegre van hatással, illetve túl vékony tárcsa könnyen elgörbülhet, amit mindenképp el kell kerülni

Furatok

A féktárcsák rendszerint furatokkal vannak ellátva. Ennek több oka is van, egyrészt a már többször említett tömegcsökkentés, másrészt a számunkra fontosabb szempont, hogy ezeken a furatokon keresztül levegő tud áramolni a tárcsa két fele között, és ez nagyobb hőleadást tesz lehetővé. Továbbá a szennyeződések is könnyebben tudnak így távozni a tárcsáról, és segít a fékbetét felületének simán tartásában (az éles furatok simára formálják a betétet) [5].

Azonban a furatok hátránya, hogy mellettük nagyobb lesz mind a mechanikai-, mind a termikus terhelése az alkatrésznek, így a tárcsa esetleges tönkremenetelénél valószínű, hogy a repedés ezekből a pontokból fog megindulni.

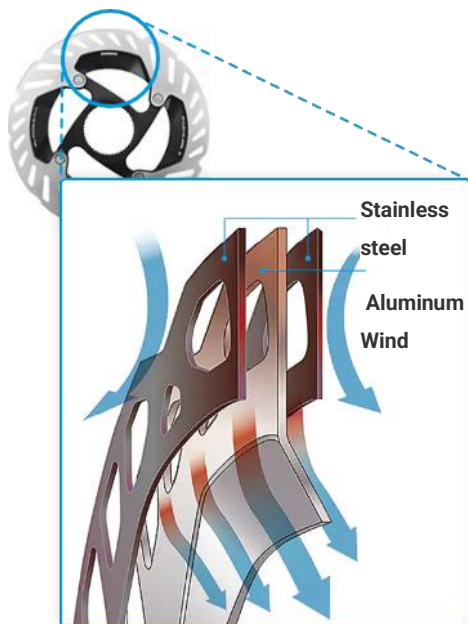
Kerékpároknál ez a szempont nem jelenik meg, de autóknál az intenzív fékezések során gázok szabadulhatnak fel a fékbetét anyagából a magas hőmérséklet hatására, és ezek egy vékony összenyomható réteget képezhetnek a fékbetét és tárcsa közt, ami rontja a fék teljesítményét. A tárcsán elhelyezett furatok lehetővé teszik ezeknek a gázoknak a távozását, így nem romlik a fékhatás.

Féktárcsa anyaga, Hűtőborda – Ice Technology Freeza

A Shimano által kifejlesztett Freeza féktárcsák [4,6] a csúcsát képzik a tárcsa hűtésére szolgáló konstrukcióknak. Fő tulajdonsága ennek a kialakításnak, hogy a féktárcsát nem csak egy acéllemezről hozzuk létre, hanem egy szendvicsszerkezetet alkotunk (9. *Ábra*), amelyben két acéllemez közé egy alumínium lemez van helyezve. Az alumínium lemez a tárcsa belseje felé kilóg, és egy hűtőbordában végződik.

Ez a kialakítás azért előnyös, mert az acéllemezek megfelelő merevséget biztosítanak a tárcsának a fékbetétéhez hasonlóan, és kopásállóbbá teszik a tárcsa felszínét. Ezzel szemben az alumínium rosszabb mechanikai tulajdonságú, de jó hővezető lévén átveszi a hőt az acéltól, és a hűtőbordák segítségével leadja azt a környezetnek. Az alumínium kisebb sűrűsége miatt a rendszer össztömege csökken.

A gyártó cég állítása szerint ez a technológia a tárcsa hőmérsékletét labori körülmények közt akár 100 °C-kal is csökkentheti rozsdamentes acél tárcsákéhoz képest. Ezzel elérhető, hogy hosszabb fékezési szakasz esetén sem kell a fékerő melegedés miatti csökkenésével számolni.



9. Ábra: Szendvics szerkezet

Kép forrása: <https://bike.shimano.com/en-EU/technologies/component/details/ice-technologies-freeza.html>



10. Ábra: Hűtőbordák

Kép forrása: <https://bike.shimano.com/en-EU/product/component/duraace-r9100/SM-RT900.html>

Két darabból álló konstrukció – Ice Technology Freeza [6]

A másik technológiai különlegessége a Freeza féktárcsának, hogy a központi rögzítő rész és a fékező felület különböző alkatrészek, amelyek alakkal záró kötással vannak egymáshoz rögzítve. A kötés a két alkatrész közt kis elmozdulást enged meg, de csak a tárcsa síkjában, így a féket ez nem korlátozza a működésben. Ez a kialakítás lehetővé teszi, hogy a két rész külön táguljon a hő hatására, így csökkentve az esélyét, hogy a tárcsa elgörbüljön a melegedés következtében.

A konstrukció másik előnye, hogy így a rögzítő részét a tárcsának lehet alumíniumból készíteni, mivel nem kell, hogy az anyaga azonos legyen a fékező felületével. Ez a tárcsa tömegcsökkentését eredményezi, és további hővezetési javulást is okoz. Az alakkal záró kötést létrehozó szegecsek a 10. Ábrán láthatók.

Féktárcsa hővezetésének modellezése

Ahogy már említettem, rendkívül nagy haszna lehet, ha tudjuk modellezni megfelelő minőségben a forgó rendszerekben történő hőmérsékletváltozásokat. Ebben a fejezetben egy ilyen szimuláció alapjainak megalkotásáról lesz szó. A modellalkotás részleteit mutatom be, valamint felírom ezt az egyszerűsített modellt leíró differenciálegyenletet. Ezt diszkretizálom, és numerikusan oldom meg.

Autó tárcsafék példáján egy részletesebb cikk olvasható a [7] forrásban hasonló témában.

Modell felállítása

A modellalkotás során több hatást elhanyagoltam, célom a lehető legegyszerűbb, de mégis jelleghelyes eredményeket szolgáltató modell megalkotása. Ami bonyolulttá teszi mégis a leíró modellt, az az, hogy forgó rendszert tekintve nem stacionárius állapotot vizsgálunk, mint ahogy azt például hűtőbordáknál szoktuk, így a forgás sebességét is figyelembe kell venni. Továbbá mivel a felmelegedési folyamatot vizsgáljuk, így tranziens jelenséget kell leírnunk.

Feltételezve, hogy a fékpofa a tárcsa egy bizonyos szögtartományában a teljes tárcsaszélesség mentén azonosan fejti ki hatását, a féktárcsát effektíven egyetlen térdimenzióval jellemezhetjük. Ekkor tehát a hőmérsékletet a tárcsa középméretjére merőleges keresztmetszetben állandónak tekintjük és csak a tangenciális (szög-irányú) térbeli inhomogenitásokra fókuszálunk.

Az adott szögekhez tudunk különböző tulajdonságokat rendelni. Az én esetemben a geometriai méretek állandóak a keresztmetszetekben, de egy bonyolultabb modellben akár ezt is, vagy akár anyagtulajdonságokat is változtathatunk.

A modellben a féktárcsát a vizsgáló koordináta rendszerben állandó szögsebességgel forgónak feltételezzük. Ezt a szögsebességet a mérési adatoknál a kerületi sebességek átlagolásával határoztam meg.

Erre a forgó féktárcsára hatnak a különböző hatások. A fékbetét helyzete, és geometriai adatok (a fékbetét méretei, és a tárcsa kerület) alapján meghatároztam egy szögtartományt, ahol érvényesül a súrlódásból eredő hőteljesítmény hatása. Ez a tartomány körülbelül:

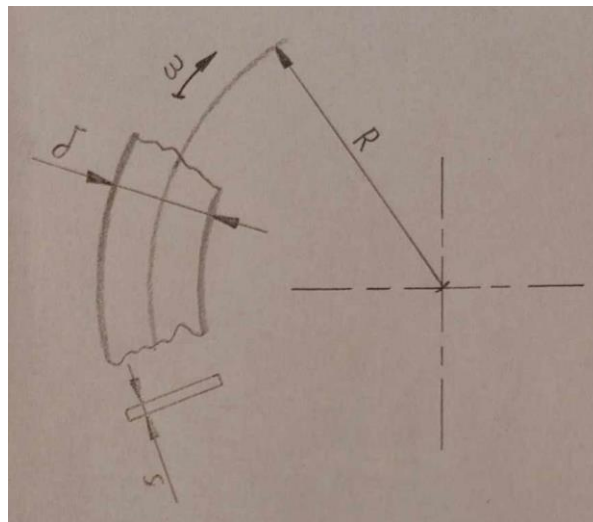
$$45^\circ < \varphi < 60^\circ$$

A hűlés a fékbetéttel érintkező részen kívül mindenhol lezajlik, valamint hogyha nem fékezünk, akkor ott is, ahol addig a hőforrás volt. Azonban a valóságban forgás alatt nem ugyanaz

a hőátadási tényező jellemzi a féktárcsát, mint álló helyzetben. Én ezt a modellben elhanyagoltam az egyszerűség kedvéért.

A fékezés során a súrlódásból a tárcsa felületén bevitt hőteljesítmény, valamint a szintén a felületen lejátszódó hűlés a tárcsa és környezete közötti hatások, melyek matematikailag peremfeltételként modellezendők. Ugyanakkor az effektív egy térdimenziós leírásunkban ezen hatásokat térfogati hőforrásként fogjuk figyelembe venni.

A szimulációban egy adott pont hőmérsékletét vizsgáljuk az idő függvényében. Ez a pont nagyjából azzal a ponttal egyezik meg, ahol a mérésnél mértük a hőmérsékletet (*kb.* 100° a vízszintes tengelytől). Ez a hely valójában nincs nagy befolyással az eredményekre, mivel a tárcsa gyors forgása miatt nagyjából egyenlő a hőmérséklet az egész felületen. Azonban ez nem mindig igaz. például egy jelentősen nagyobb sugarú felniféknél már jelentős lehet a hőmérsékletkülönbség az egyes pontok között.



11. Ábra: Geometriai adatok

Differenciálegyenlet felírása

Merev szilárd anyagban a hővezetés differenciálegyenlete:

$$\rho \cdot c \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot \underline{\dot{q}} + q_V^* + q_S^*,$$

ahol:

ρ	a féktárcsa anyagának sűrűsége,
c	a féktárcsa anyagának fajhője,
$\underline{\dot{q}} = -\lambda \cdot \nabla T$	a hőáram, melyet a hőmérséklettel a Fourier-törvény

kapcsol össze,

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla T \cdot \underline{v} \quad \text{az anyagi idő szerinti derivált, melynek első tagja a}$$

hőmérséklet lokális, második pedig a hőmérséklet konvektív megváltozását jellemzi. Ha a tárcsa nem forogna, akkor csak lokális megváltozás lenne.

t	az idő,
T	a hőmérséklet,
$\underline{v}$	a tárcsa sebessége,
q_S^*	a fékezés hőteljesítménye (térfogati hőforrásként),
q_V^*	a tárcsa hűlése (térfogati hőforrásként),
λ	a féktárcsa anyagának hővezetési tényezője.
∇	nabla operátor, ami vektori csatolástól függően a

gradienst (∇f), vagy a divergenciát ($\nabla \cdot f$) jelöli.

A tárcsa geometriájához az (r, φ, z) hengerkoordináta rendszer illeszkedik, ahol r a radiális, φ a tangenciális, z pedig a „magassági” koordinátát jelöli. A gradiens és divergencia a [8] forrás alapján henger koordinátarendszerben

$$\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial r}; \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi}; \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \text{vektormennyiség,}$$

$$\nabla \cdot \underline{\dot{q}} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot \dot{q}_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \quad \text{skalármennyiség,}$$

ahol

$\underline{\dot{q}} = (\dot{q}_r; \dot{q}_\varphi; \dot{q}_z)$	vektormennyiség.
---	------------------

Mivel a tárcsát effektíven egy térdimenzióban modellezzük, így az r és z szerinti parciális deriváltak a továbbiakban nem játszanak szerepet, a φ szerinti parciális deriváltban pedig a sugár értékét a tárcsa középpátmérőjéhez tartozó sugárral közelítem (R), így

$$\nabla T = \left(0; \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial \varphi}; 0 \right) ,$$

$$\nabla \cdot \underline{\dot{q}} = \frac{1}{R} \frac{\partial \dot{q}_\varphi}{\partial \varphi} ,$$

$$\underline{v} = (0; v; 0) ,$$

ahol $v = R \cdot \omega$ a tárcsa kerületi sebessége R sugáron,
 ω a tárcsa szögsebessége.

Ezekkel a feltételekkel a hővezetés differenciálegyenletét a

$$\rho \cdot c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial \varphi} \omega \right) = \frac{\lambda}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + q_v^* + q_s^*$$

alakban írhatjuk.

Egy feladatunk maradt, hogy a hűlés okozta felületi hőáramsűrűséget térfogati hőforrassűrűséggé transzformáljuk. A felületi hűlést a Newton-féle hűlési törvény segítségével a tárcsa felületére integrálva (elhanyagolva a tárcsa relatíve kicsi, ezáltal elhanyagolható vastagságát):

$$Q_\alpha = -2 \int_{(A)} q_\alpha^* dA = -2 \int_{(A)} \alpha \cdot (T - T_\infty) dA ,$$

ahol q_α^* a hűlést okozó felületi hőáramsűrűség,
 α hőátadási tényező,
 T_∞ a környezeti hőmérséklet (állandó).

A tárcsa tangenciális koordinátájával a felületelem és a térfogatelem a

$$dV = dA \cdot s = \delta \cdot R \cdot d\varphi \cdot s ,$$

$$dA = \delta \cdot R \cdot d\varphi ,$$

formulákkal adható meg, ahol s a tárcsa vastagságát, δ a radiális kiterjedését jelöli.

Így a felületen történő hűlés

$$Q_\alpha = -2 \int_{(V)} \alpha \cdot (T - T_\infty) \frac{1}{s} dV = Q_V = \int_{(V)} \frac{-2}{s} q_\alpha^* dV ,$$

amiből a térfogatba transzformált hőforrassűrűség

$$q_V^* = \frac{-2}{s} q_\alpha^* = \frac{-2}{s} \alpha \cdot (T - T_\infty) .$$

Így a hővezetés differenciálegyenlete a tárcsában

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial \varphi} \omega = \frac{a}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{s \cdot \rho \cdot c} \alpha \cdot (T - T_\infty) + \frac{1}{\rho \cdot c} q_s^* ,$$

Ahol $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ hőfokvezetési tényezőt jelöli.

Differenciálegyenlet dimenziótlanítása

A dimenziótlanítás azért fontos a szimulációhoz, hogy ne csak a konkrét példámra (hőmérséklet és geometriai adatok) legyen jó a numerikus megoldás, hanem más rendszerek leírásához is, amiknél ugyanilyen jelenségek lépnek, de más számszerű adatok vannak. A rendszert idő és hőmérséklet szerint dimenziótlanítottam. A helykoordináta szerint nem volt szükséges a dimenziótlanítás, mivel az radiánban van megadva, ami önmagában dimenziótlannak minősül.

Fourier-szám

$$Fo = \frac{a \cdot t}{R^2}$$

Ezzel dimenziótlaníthatjuk az idő szerinti deriválást:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{a}{R^2} \frac{\partial}{\partial Fo} .$$

Dimenziótlan hőmérséklet

$$\vartheta = \frac{T - T_\infty}{T_\infty} ,$$

ahol T_∞ a környezeti hőmérséklet.

Ezt átrendezhetjük

$$T = \vartheta \cdot T_{\infty} + T_{\infty}$$

alakra.

Ezeket behelyettesíthetjük a hővezetés differenciálegyenletébe, ahol a konstans tagok (zöld színnel) kiesnek.

$$\frac{a}{R^2} \frac{\partial(\vartheta \cdot T_{\infty} + T_{\infty})}{\partial Fo} + \frac{\partial(\vartheta \cdot T_{\infty} + T_{\infty})}{\partial \varphi} \omega = \frac{a}{R^2} \frac{\partial^2(\vartheta \cdot T_{\infty} + T_{\infty})}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{s \cdot \rho \cdot c} \alpha \cdot \vartheta \cdot T_{\infty} + \frac{1}{\rho \cdot c} q_s^* .$$

Ezt egyszerűsítom, és beszorzok $\frac{R^2}{a} \frac{1}{T_{\infty}}$ -el. Így

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial Fo} + \omega \frac{R^2}{a} \frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \varphi^2} - \frac{2 \cdot R^2}{s \cdot \rho \cdot c \cdot a} \alpha \cdot \vartheta + \frac{R^2}{a \cdot \rho \cdot c \cdot T_{\infty}} q_s^* .$$

Ebben az egyenletben az együtthatókat összevontam, és paramterekkel helyettesítettem. Egy kis átalakítással a Fourier-törvényből származó tagból kiemelhetjük a Biot-számot. Ezzel a paraméterek, és az így kapott egyenlet:

$$C_1 := \omega \frac{R^2}{a} ,$$

$$C_2 := \frac{R^2}{a \cdot \rho \cdot c \cdot T_{\infty}} q_s^* ,$$

$$\frac{2 \cdot R^2}{s \cdot \rho \cdot c \cdot a} \alpha = \frac{2 \cdot R}{s} \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} = C_3 \cdot Bi ,$$

$$C_3 := \frac{2 \cdot R}{s} ,$$

$$Bi := \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} \quad \text{a Biot-szám.}$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial Fo} + C_1 \frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \varphi^2} - C_3 \cdot Bi \cdot \vartheta + C_2 .$$

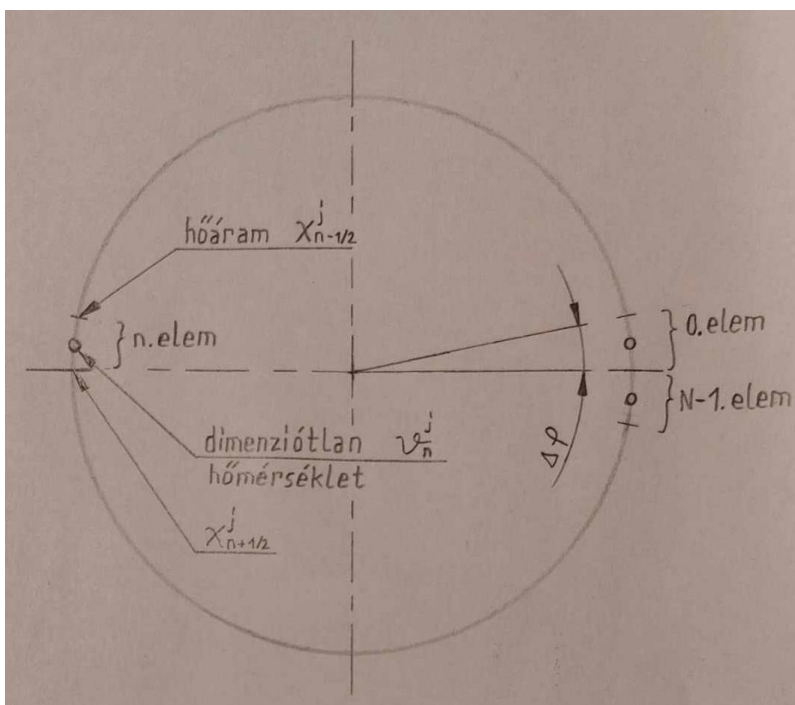
A számítások elvégzésének egyszerűsítése érdekében az így kapott másodrendű differenciálegyenletet felírhatjuk egy elsőrendű differenciálegyenlet rendszerként, ami két egyenletből áll. A dimenziótlan hőmérséklet deriváltat (ami egyben a dimenziótlan hőáram is) jelöljük χ -vel. Így az egyenletrendszer:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial Fo} + C_1 \chi = \frac{\partial \chi}{\partial \varphi} - C_3 \cdot Bi \cdot \vartheta + C_2,$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} = \chi.$$

Differenciálegyenlet diszkretizálása

Következő lépés a numerikus megoldáshoz, hogy diszkretizáljuk a differenciálegyenletrendszerünket, hogy iterációsán meg tudjuk oldani azt. A diszkretizálásnál a deriváltakat írjuk fel ahhoz hasonlóan, mint ahogy a differenciálhányadosnál láthatjuk, csak nem diszkrét értékekből megyünk a határérték felé, hanem pont fordítva.



12. Ábra: Diszkretizálás, indexelés

Az idő szerinti deriváltat előrehaladó differenciasémával diszkretizáltam. Ekkor az $\frac{df(t_i)}{dt}$ deriváltat a $\frac{f(t_i) - f(t_{i+1})}{\Delta t}$ hányadossal közelítjük. Hasonló elven lehet értelmezni más módszereket is, például a retrográd és központi differenciát. Iterációs módszerként az explicit Euler-módszert

választottam, mivel ez jól összekapcsolható a haladó differenciával, és egyszerűen felírhatjuk az iterációs egyenleteket. Ezen kívül még alkalmazhattam volna például implicit Euler-módszert, de léteznek más megoldások is.

A féktárcsát bontsuk fel N darabra, ezek a diszkrét elemek. Ezeknek az indexe megy 0-tól $(N - 1)$ -ig. Az indexelést a 12. Ábra alapján értelmezhetjük. Ezeknek az elemeknek a középső pontjaira felírhatjuk a dimenziótlan hőmérsékletet, ami jellemzi az egész elemet. Idő szempontjából pedig a vizsgált időszakot bontjuk fel J elemre. A n -edik elemet jellemző dimenziótlan hőmérsékletet j -edik időpillanatban jelölje

$$\vartheta_n^j = \vartheta(Fo = j \cdot \Delta Fo; \varphi = n \cdot \Delta \varphi) .$$

Hasonlóan felírhatjuk a hőáramot is, alapvetően ez a mennyiség a két elemet elválasztó virtuális felületet jellemzi, így, ha ez elem középpontjára akarjuk felírni, akkor a két végpontjában vett érték átlagát kell vennünk. Ezt az n -edik elem kezdőpontjában j -edik dimenziótlan időpillanatban jelölje

$$\chi_{n-\frac{1}{2}}^j = \chi(Fo = j \cdot \Delta Fo; \varphi = (n - \frac{1}{2}) \cdot \Delta \varphi) .$$

Itt az $n - \frac{1}{2}$ index jelöli, hogy az elem kezdőpontjában vagyunk. Az elem végpontját $n + \frac{1}{2}$ indexel jelöljük. Az indexelés $-\frac{1}{2}$ -től $N - \frac{1}{2}$ -ig megy.

Vagyis az elem középpontjára nézve

$$\chi_n^j = \frac{\chi_{n-\frac{1}{2}}^j + \chi_{n+\frac{1}{2}}^j}{2} .$$

Ezekkel a jelölésekkel tudjuk diszkrétizálni a deriváltakat.

- A **hőáram hely szerinti** deriváltja diszkrétizálva

$$\frac{\partial \chi}{\partial \varphi} = \frac{\chi_{n+\frac{1}{2}}^j - \chi_{n-\frac{1}{2}}^j}{\Delta \varphi} .$$

Ahol

$\Delta \varphi$

az elemekhez tartozó középponti szög.

- A **dimenziótlan hőmérséklet hely szerinti** deriváltja diszkretizálva

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \varphi} = \frac{\vartheta_{n+1}^j - \vartheta_n^j}{\Delta \varphi} = \chi_{n+\frac{1}{2}}^j.$$

- A **dimenziótlan hőmérséklet Fourier-szám szerinti** deriváltja diszkretizálva

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial Fo} = \frac{\vartheta_n^{j+1} - \vartheta_n^j}{\Delta Fo},$$

ahol

ΔFo

egy időegység nagysága.

Ezeket visszaírhatjuk a differenciálegyenlet rendszerbe figyelve az idő és helyindexekre, és így egy diszkretizált egyenletrendszert kapunk.

$$\frac{\vartheta_n^{j+1} - \vartheta_n^j}{\Delta Fo} + C_1 \frac{\chi_{n-\frac{1}{2}}^j + \chi_{n+\frac{1}{2}}^j}{2} = \frac{\chi_{n+\frac{1}{2}}^j - \chi_{n-\frac{1}{2}}^j}{\Delta \varphi} - C_3 \cdot Bi \cdot \vartheta_n^j + C_2,$$

$$\chi_{n+\frac{1}{2}}^{j+1} = \frac{\vartheta_{n+1}^{j+1} - \vartheta_n^{j+1}}{\Delta \varphi}.$$

Ebben az egyenletrendszerben megfigyelhetjük, hogy ez első egyenletében csupán egy tag van, aminek idő indexe $j + 1$. A többinek j , vagyis, ha feltételezzük, hogy j pillanatban ismert minden értékünk, akkor ϑ_n^{j+1} értéket tudjuk számolni minden helyindex esetén. Viszont, ha a ϑ_n^{j+1} értékek ismertek, akkor a második egyenlet alapján számíthatjuk $\chi_{n+\frac{1}{2}}^{j+1}$ értékeket, amik ismeretében minden információnk ismert a $j + 1$ időpillanatra, vagyis a folyamatot megismételhetjük $j + 2$ időpillanatra.

Az iterációs egyenletek:

$$\vartheta_n^{j+1} = \vartheta_n^j - \frac{\Delta Fo \cdot C_1}{2} \left(\chi_{n-\frac{1}{2}}^j + \chi_{n+\frac{1}{2}}^j \right) + \frac{\Delta Fo}{\Delta \varphi} \left(\chi_{n+\frac{1}{2}}^j - \chi_{n-\frac{1}{2}}^j \right) - \Delta Fo \cdot Bi \cdot \vartheta_n^j + \Delta Fo \cdot C_2,$$

$$\chi_{n+\frac{1}{2}}^{j+1} = \frac{1}{\Delta \varphi} (\vartheta_{n+1}^{j+1} - \vartheta_n^{j+1}).$$

Ennek az iterációnak az elvégzéséhez már csak a kezdeti feltételeket, a peremfeltételeket, valamint a paramétereket kell meghatározni.

Kezdeti feltétel

A rendszer modelljének kezdeti értéke meglehetősen egyszerű. Feltételezhetjük, hogy a féktárcsára egy homogén T_0 hőmérsékleteloszlás jellemző. Ez alapján

$$\vartheta_n^0 = \frac{T_0 - T_\infty}{T_\infty}.$$

Valamint mivel ez eloszlás homogén, így

$$\chi_{n+\frac{1}{2}}^j = 0.$$

Periodikus peremfeltételek felírása

A periodikus peremfeltétel felírásakor úgy kell megalkotnunk a peremfeltételeket, hogy a tárcsa kezdeti és végpontjában a hőmérséklet és a hőáram megegyezzen minden időpillanatban. Ezért hívjuk periodikus peremfeltételnek, mert minden pillanatban más számszerű érték írja le, de az értéket mindig ugyanúgy kell meghatározni. Ezek a peremfeltételek az első és utolsó elem adatainak számításához szükségesek, mert némely elemek indexelése kiér a tartományból, és nem értelmezhető, így ezt a peremfeltételek alapján számolhatjuk.

A peremfeltételek így:

$$\vartheta(Fo; 0) = \vartheta(Fo; 2\pi),$$

$$\chi(Fo; 0) = \chi(Fo; 2\pi).$$

Ezeket diszkrétizálva a korábbiak alapján, és felhasználva az iterációs egyenleteket, felírhatjuk a dimenziótlan hőmérsékletet és hőáramot rendre a kritikus $N - 1$ és $-\frac{1}{2}$ indexekre.

$$\vartheta_{N-1}^{j+1} = \vartheta_{N-1}^j - \frac{\Delta Fo \cdot C_1}{2} \left(\chi_{N-1-\frac{1}{2}}^j + \chi_{-\frac{1}{2}}^j \right) + \frac{\Delta Fo}{\Delta \varphi} \left(\chi_{-\frac{1}{2}}^j - \chi_{N-1-\frac{1}{2}}^j \right) - \Delta Fo \cdot Bi \cdot \vartheta_{N-1}^j + \Delta Fo \cdot C_2,$$

$$\chi_{-\frac{1}{2}}^j = \frac{1}{\Delta \varphi} (\vartheta_0^j - \vartheta_{N-1}^j).$$

Paraméterek meghatározása

Az utolsó lépés a szimuláció elvégzéséhez a paraméterek meghatározása. A geometriai méretek, és a mérési körülmények, valamint anyagjellemzők alapján a paramétereknek egy részét meg tudjuk határozni. Azonban van két paraméter, amit nem tudunk. Ezeket a mérési adatok alapján próbáltam úgy meghatározni, hogy a mérési eredmények, és a szimulációs eredmények a lehető legközelebb legyenek. Mivel a tárcsa anyagáról pontos információ nem áll rendelkezésünkre, így azt általános felhasználású acélként vettem figyelembe.

A paraméterek meghatározásához szükséges adatok:

$$D = 680 \text{ mm}$$

a kerék külső átmérője,

$$v_{\text{átl}} = 15,2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

a mérési eredmények átlaga,

$$D_{\text{tárcsa}} = 160 \text{ mm}$$

a tárcsa külső átmérője,

$$\delta = 16 \text{ mm}$$

a tárcsa fékfelület radiális kiterjedése,

$$s = 2 \text{ mm}$$

a tárcsa vastagsága,

$$\rho = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

az acél sűrűsége 20 °C -on,

$$\lambda = 46 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

az acél hővezetési tényezője 20 °C -on,

$$c = 473 \frac{\text{J}}{\text{kg K}}$$

az acél fajhője 20 °C -on.

$$T_{\infty} \approx 30^{\circ}\text{C} = 303 \text{ K}$$

környezeti hőmérséklet

Származtatott mennyiségek:

$$\omega = \frac{D}{2} v_{\text{átl}} = 12,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

a jellemző szögsebesség,

$$R = \frac{D_{\text{tárcsa}}}{2} - \frac{\delta}{2} = 0,072 \text{ m}$$

a féktárcsa középmérete,

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = 1,25 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

az acél hőfokvezetési tényezője 20 °C -on,

A paraméterek (mindegyik dimenziótlan).

$$C_1 := \omega \frac{R^2}{a} = 5150 [-],$$

$$C_2 := \frac{R^2}{a \cdot \rho \cdot c \cdot T_\infty} q_S^* = 3,7 \cdot 10^{-7} \left[\frac{m^3}{W} \right] \cdot q_S^* \left[\frac{W}{m^3} \right],$$

$$C_3 := \frac{2 \cdot R}{s} = 72 [-],$$

$$Bi := \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} = 1,57 \cdot 10^{-3} \left[\frac{m^2 K}{W} \right] \cdot \alpha \left[\frac{W}{m^2 K} \right].$$

Ezek után q_S^* és α értékét határoztam meg, hogy minél jobban egybeessen a szimulációs és a mért diagram. Így az értékeik a következőképpen adódtak:

$$q_S^* = 10^{8,2} \left[\frac{W}{m^3} \right],$$

$$\alpha = 10^{1,75} \frac{W}{m^2 K} \approx 56 \frac{W}{m^2 K}.$$

A hőátadási tényezőt megpróbáltam összehasonlítani más forrásokból szerzett értékekkel. Ez nem volt egyszerű, mert nehéz volt táblázatokat találni a hőátadási tényezőről, és az értékek is eltértek különböző helyeken. A [9,10] források alapján az érték nagyságrendileg $8 - 25 \frac{W}{m^2 K}$, ami bár kicsit kisebb az általam beállított értéknél, de a nagyobbikkal nagyságrendileg megegyezik. Ez az eltérés lehet a modell elhanyagolásainak következménye, vagy akár az egyéb paraméterekben fellépő hibák eredménye. De az is lehet, hogy jó az érték, csupán más körülmények, és anyagok vannak, mint a forrásokban található értékek meghatározásánál voltak.

Mérés

A következő fejezetben a kerékpár fékek melegedésével kapcsolatosan végzett mérésről írok részletesen. A mérés előkészítéséről, az adódó nehézségekről, és a kiértékelésről.

Egy hasonló mérésről, és szimulációról lehet olvasni a [14,15] forrásokban.

Mérés leírása

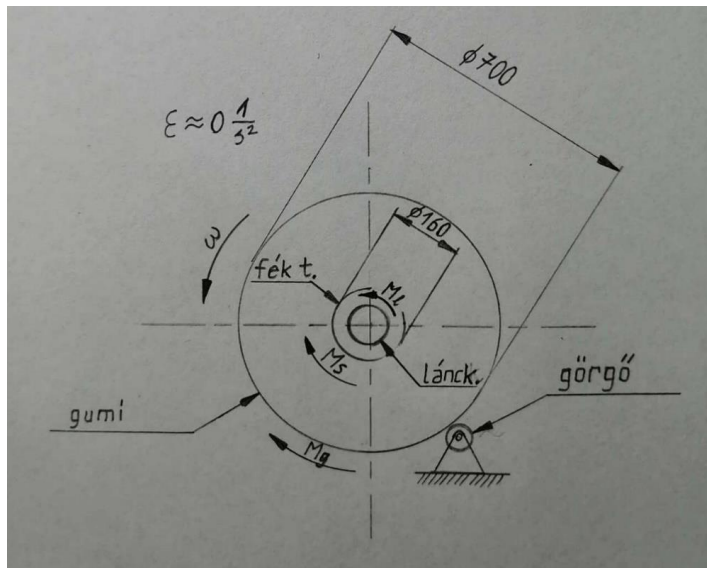
A mérés során egy *Shimano* hidraulikus tárcsaféknek fékező hatását akarjuk meghatározni a fékbetét hőmérsékletének, valamint az időnek a függvényében. Ezen kívül rögzítjük a féktárcsa felmelegedési lehűlési görbéjét is. Ezt a görbét numerikus módszerrel próbáltam meg előállítani a numerikus szimuláció fejezetben. A mérés nehézsége, hogy forgó alkatrész hőmérsékletét nem tudjuk egyszerűen érintkezést igénylő hőmérővel mérni. Ezért kellett hőkamerát használni a méréshez.

A tárcsafék *organikus* fékbetétekkel van szerelve, és a féktárcsa névleges átmérője 160 mm . Mivel limitált eszközökkel dolgozunk, ezért nem számszerű adatok meghatározása a cél, csupán a görbe jellegének meghatározása a fékezőhatásnál. Ehhez egy *TACX flow T2200* görgőt, egy érintkezésen alapuló K-típusú termoelemet, egy *Raytek MI3* spot hőkamerát (infrahőmérőt) és egy *FLIR ONE* hőkamerát használtunk.

Elvárásunk a mérési eredményekkel szemben, hogy magas hőmérsékleten, vagyis az idő előrehaladtával a kerék meghajtásához szükséges nyomaték csökkenjen, mivel a fék ideális működési tartománya nem magas hőmérsékletre tartozik. Ezen kívül még egyéb nemlinearitások is fellépnek a függvényben. Például lehet, hogy az elején pozitív meredekségű, amíg el nem éri az ideális üzemi hőmérsékletet, ami a szobahőmérsékletnél feltételezhetően magasabb. Hasonló görbéket láthatunk az *1. Ábrán*.

A féktárcsa hőmérsékletét egy spot hőkamerával mérjük, melynek a beállításában a feketeségi fokát megfelelően meg kell határozni, hogy nagyjából helyes értékeket mérjen. Az infravörös hőmérsékletmérés azért szükséges, mert a tárcsa folyamatosan forog, így érintkezést igénylő hőmérőt nem használhatunk. Azonban a feketeségi fok beállításához szükség van egy ilyenre is a kezdeti kalibrációnál. A kalibrációt szobahőmérsékleten végeztem el, majd ez alapján végeztem a mérést, de a valóságban a feketeségi fok függ a hőmérséklettől, így a K-típusú termoelem nagy hőmérsékleten nem mutatna azonos értékeket a hőkamerával, még kalibrált esetben sem.

A rendszert egyszerűsítve modellezhetjük (13., 14. Ábra) úgy, hogy csak a hátsó kereket, és az arra ható hatásokat vesszük figyelembe. A mérés során állandó fordulatszámon igyekeztünk tartani a kereket, így a kerékre ható nyomatékok eredője közelítőleg nulla. Ezek a nyomatékok a láncon keresztül fellépő láncnyomaték, a fékbetéten keresztül fellépő féknyomaték, valamint a görgő hengerén keresztül fellépő görgőnyomatékmely. Előbbi előre, utóbbi kettő pedig hátrafelé hajtáná a kereket.



13. Ábra: A hátsó kerék egyszerűsített modellje



14. Ábra: A mérési elrendezés fényképe (görgő; slick külső; tárcsafék)

Láncnyomaték

A tekerő által kifejtett nyomaték a hátsó kerékre redukálva. A láncon fellépő erő a lánckeréken hat. Ezt a görgő kijelzőjén kiírt pillanatnyi teljesítményből és a kerék kerületi sebességéből lehet kiszámolni a $P_l [W] = M_l [Nm] \cdot \omega \left[\frac{1}{s} \right]$ és $v_k \left[\frac{m}{s} \right] = R [m] \cdot \omega \left[\frac{1}{s} \right]$ képlet alapján. Itt ω a kerék szögsebessége. Ez a nyomaték tart ellen a másik kettő nyomatéknak.

Féknnyomaték

A fékpofáknál fellépő súrlódási erőből számított nyomaték. Ennek a csökkenését akarjuk kimutatni a mérés során. Ez a fékerővel van összefüggésben, amivel a fékkart húzzuk, és nagysága állandó, valamint a súrlódási tényezővel, aminek a mértéke a hőmérséklettel változik.

$$M_S [Nm] = F_S [N] \cdot r[m] = F_f [N] \cdot \mu[-] \cdot r[m]$$

Görgő nyomatéka

A görgő fékező hatása miatt fellépő nyomaték. A görgőn beállított teljesítményből számítható $P_g = M_g \cdot \omega$ képlet alapján. Ennek a fékező teljesítménynek a nagysága állandó, és tetszőlegesen megválasztható. Célszerű minél alacsonyabbra beállítani

A mérési adatokat diagramokon is fogjuk szemléltetni. Az egyik ilyen diagram egy idő-hőmérséklet diagram, melyen jól tudjuk szemléltetni a tárcsa felmelegedését, a maximum hőmérsékletét, és a szobahőmérsékletre való lehűlését. Ehhez a szükséges adatokat a spot hőkamera rögzíti. És ezt a diagramot használjuk fel a szimuláció paramétereinek meghatározásához. Egy másik diagram, ami a fékhatás csökkenését ábrázolja, egy súrlódási nyomaték-idő diagram, ami súrlódási együttható-idő diagram is lehet. Ezek csak a tengelyek skálázásában különböznek, de az utóbbihoz több adatra van szükség, így nem azt fogom ábrázolni. Ebből lesz látható, hogy a nyomaték és a súrlódási együttható az idővel változik, vagyis a hőmérséklettel is, mivel az is időfüggő.

A mérés során extra érdekességként megpróbáljuk a hőkamerával is rögzíteni a melegedési folyamatot.

Röviden a hőkamerákról

A mérés során egy FLIR ONE hőkamerát, amit egy telefonhoz csatlakoztatunk, és egy *Raytek MI3* spot hőkamerát használunk, amivel egy pontban vizsgáljuk a hőmérsékletet. Működési elvüket tekintve ezek nagyban hasonlítanak, de míg a FLIR ONE egy területet vizsgál, és grafikusán is megjeleníti az értékeket, addig a *Raytek MI3* csupán egy pontot, viszont azt nagyobb frekvenciával és pontossággal.

Mit érzékelnek a hőkamerák?

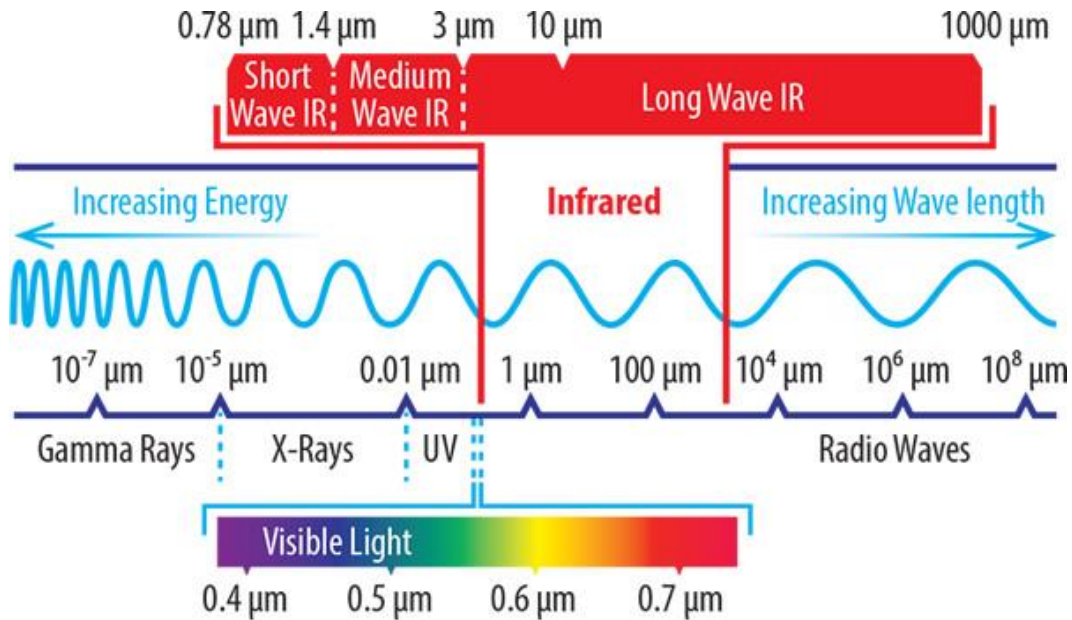
A hősugárzás mértékét érzékelik a kamerák, mely függ a hőmérséklettől, a felület minőségétől és az anyag minőségétől. Minden abszolút nulla hőmérsékletnél magasabb hőmérsékletű testet tud érzékelni, mert hőmérsékleti sugárzást bocsátanak ki [11,12]. A hőkamerák a hőmérsékletfüggőséget használják ki, ugyanis minél melegebb a test, annál nagyobb a kibocsátott hősugárzás intenzitása, így annak méréséből tudunk következtetni a test hőmérsékletére. A hőmérséklet-intenzitás viszonyt több paraméter is befolyásolja, ezek közül az emissziós tényező vagy feketeségi fok a legjelentősebb, melynek beállítására a mérőegységek lehetőséget nyújtanak.

Infravörös sugárzás

A hősugárzás elektromágneses hullám formájában történő hőközlési mechanizmus, így akár közvetítő közeg nélkül (azaz vákuumban) is lehetséges. A szemünk által érzékelhető látható fény is egy fajta elektromágneses sugárzás, csak más hullámhosszú, mint a testek által kibocsátott infravörös sugárzás. Ez az oka annak is, hogy a hőkamerák, és a közönséges fényképezők felépítése nagyban hasonlít. A 15. Ábrán is látszik, hogy az infravörös sugárzás hullámhossza nagyobb a látható fényénél. Ennek oka, hogy a fény nagyobb energiájú.

A testek hőmérséklete a bennük lévő részecskék rezgésének intenzitásától függ. Melegebb test részecskéi jobban rezegnek. Ez a rezgés okozza a testből fotonok kilépését, és az intenzitás a foton hullámhosszában jelenik meg. Így a melegebb testről kibocsátott elektromágneses sugárzás hullámhossza kisebb. Ennek következménye, hogy ha nagyon meleg egy test, akkor a látható fénytartományban is bocsát ki elektromágneses rezgést. Például ez történik a fémek melegítésekor.

Az is jól megfigyelhető például a csillagoknál, hogy a hidegebb csillagok vörösebbek, azaz nagyobb hullámhosszúak, míg a melegebbek kékebbek, azaz kisebb hullámhosszúak.



15. Ábra: Elektromágneses sugárzás
Kép forrása: <https://ceramicx.hu/informacio/segitseg/miert-az-infravoros/>

Kamera felépítése

Az objektív elején található egy lencse, ami a beérkező elektromágneses sugárzás útját határozza meg. Azonban a közönséges üveg lencsén az infravörös sugárzás nem tud teljesen áthatolni, ezért a lencsákat germánium fémből készítik [12].

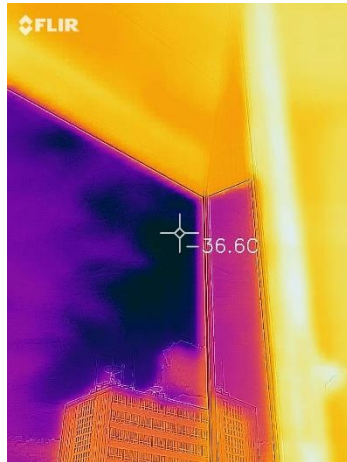
Az elektromágneses sugárzás egy több ezer szenzort tartalmazó lapkára van vetítve a FLIR ONE esetében. A Raytek MI3 -nál három ilyen szenzor található, és ezek átlagát képezi a processzor. Ezek a szenzorok piezoelektromos részeket tartalmaznak, így hő hatására eltérő elektromos jelet bocsátanak ki.

Ezt a jelet alakítja át egy processzor, és jeleníti meg egy színes képként, vagy más esetekben csak a számértéket tárolja.

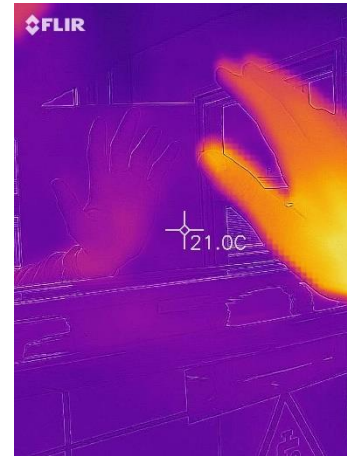
Tulajdonságai

A képek a FLIR ONE hőkamerával készültek.

- Mivel nem a látható fényt érzékelik a szenzorok, ezért annak jelenléte sem szükséges, és akár sötétben is tud képet alkotni.

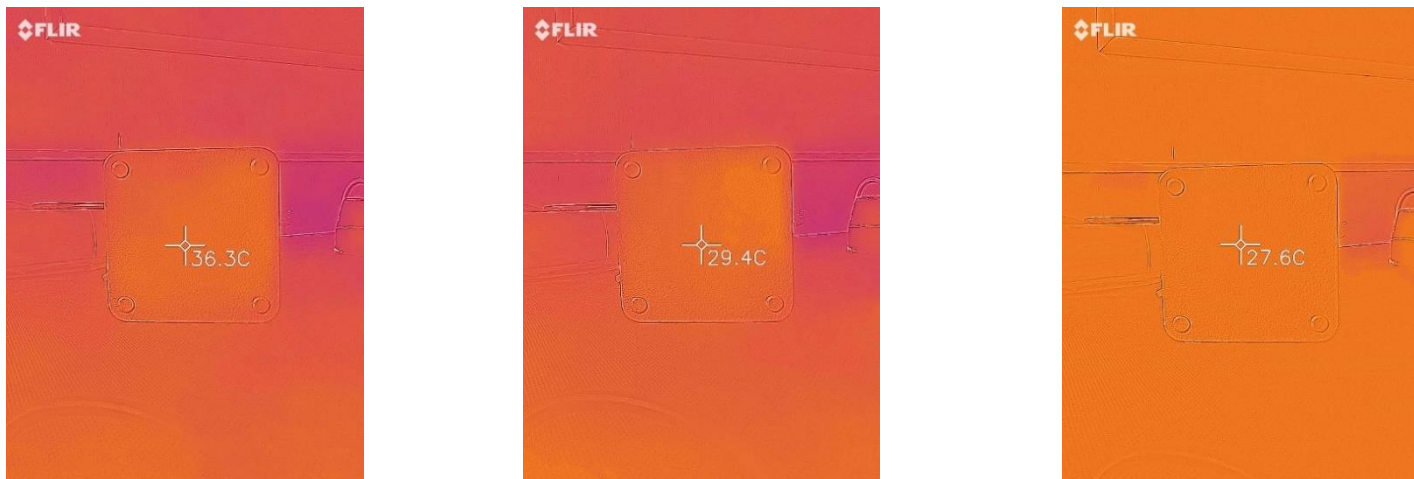


16. Ábra: Gázok érzékelése



17. Ábra: Tükröződés

- A gázokat nem érzékeli, mivel kicsi a sűrűségük, és nem képesek nagy mennyiségű sugárzást kibocsátani még magas hőmérsékleten sem. Ezért az égről készült felvételek sem mérvadók.
- Minden szenzorba érkező sugárzást érzékel, így tükröződő felületek megzavarhatják a képet.
- Az általam használt kameránál lehet a skálázás értékeit rögzíteni, így egy felvétel két különböző pillanatában az azonos szín azonos intenzitású sugárzáshoz tartozik. Ezt a mérés során célszerű így használni, hogy a posztprocesszálas egyszerűbb legyen.



18. Ábra: A feketeségi fok változtatásának hatása

- Ha változtatjuk a feketeségi fok beállítását, akkor különböző hőmérsékletet mutat ugyanarra a testre.

Mérés előkészítése

A méréshez használt kerékpárra felraktunk egy slick külsőt, aminek sajátossága, hogy direkt a görgőzéshez van kifejlesztve, így például halkabb lesz a járás, és kevésbé kopik a gumi. Ennek feltétele nem volt egyszerű, mivel a külső vastagsága jelentősen keskenyebb, mint amihez a kerékpár felnije ki lett találva (mivel mountain bike-ról van szó). A használt külső egy 29"-es *Vittoria Zafiro Pro* külső 23 mm szélességgel.

Ahhoz, hogy a kerékpár kompatibilis legyen a görgővel, egy a görgőhöz tartozó gyorsárat kellett rakni a kerékpárba. Ennek speciális geometriája teszi lehetővé a kerékpár befogatását. Ezt követően csak be kellett helyezni a görgőbe, és a külsőt illeszteni a futófelülethez.

A hőmérsékletméréshez K-típusú termoelemet, *Raytek MI3* spot infravörös hőmérőt és *FLIR ONE* hőkamerát használtam.

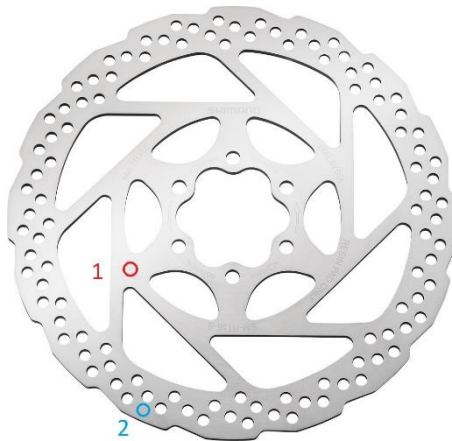
Feketeségi fok meghatározása

A spot hőkamerát, és a hőmérőt a 19. Ábrán látható módon rögzítettük, hogy a féktárcsának az adatait mérjük.



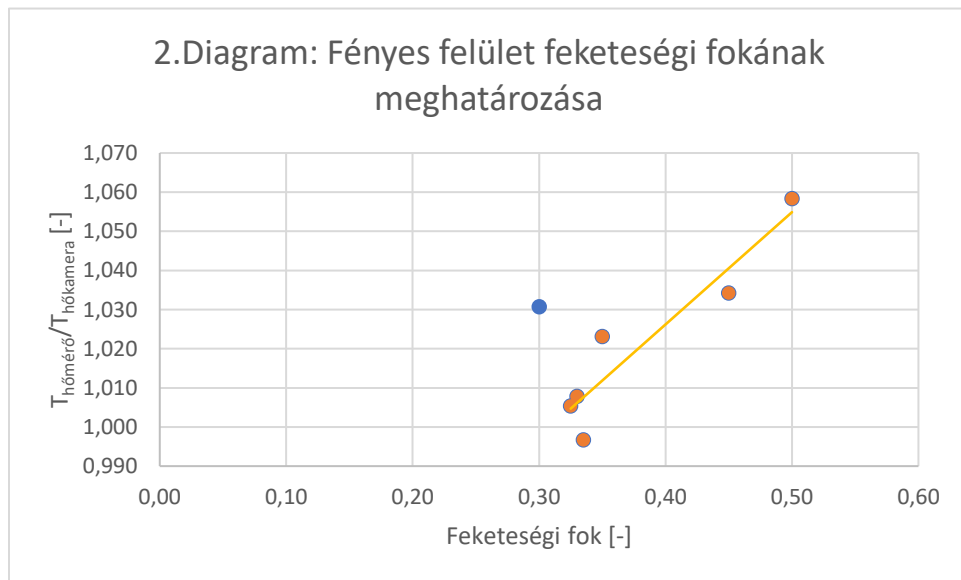
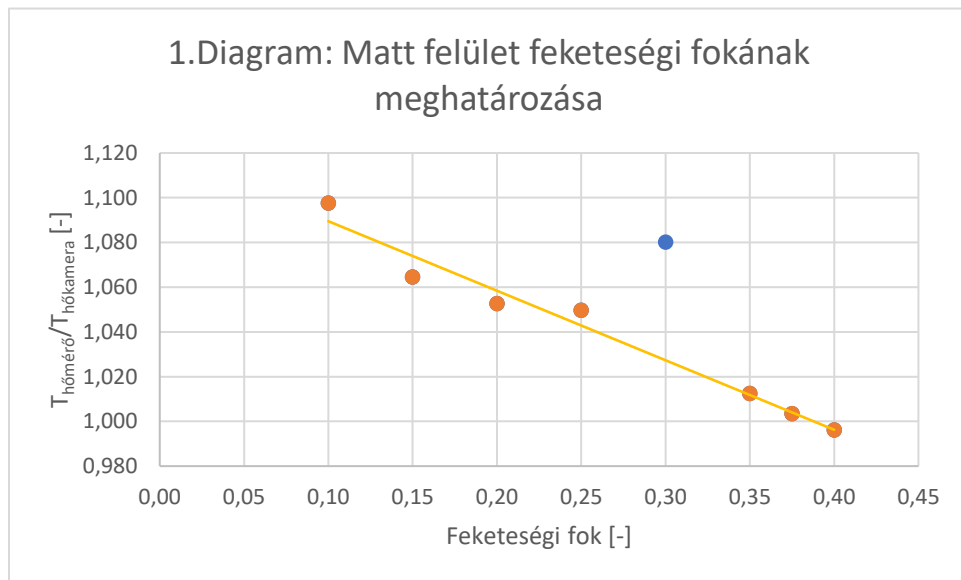
19. Ábra: Feketeségi fok meghatározásának mérési elrendezése
Kép forrása: spot hőkamera narancssal; hőmérő vezetéke lilával

A tárcsa hőmérsékletét álló állapotban K-típusú termoelemmel (3 adat) és a spot hőkamerával egy adott feketeségi fokon (2 x 3 adat) mértük. Ezután kicsit megváltoztattuk a feketeségi fokot és új mérést végeztünk. A feketeségi fokot két helyen is meghatároztuk (21. Ábra). A tárcsa fékezőfelületén, és egy másik felületén is.



20. Ábra: Mérési helyek a féktárcsán
Kép forrása:
<https://bicycles.stackexchange.com/questions/20520/bicycle-disc-brake-rotors>

A mért adatok alapján látható, hogy a tárcsa hőmérséklete nagyjából állandó mind térben, mind időben, és nagyjából a szobahőmérséklettel egyenlő. A mérés során a tárcsa hőmérséklete kicsit emelkedett, de ez nem meglepő, mert a szobahőmérséklet is kicsit emelkedett.



A 1., 2. Diagramokon látható, hogy a két féle módszerrel mért hőmérséklet, hogy viszonyul egymáshoz adott feketeségi foknál. A tárcsa emissziós tényezőjét beállítva a két mért hőmérséklet aránya 1. Az általam vizsgált emissziós tényező tartományban a tényleges és az infrahőmérővel mért hőmérséklet értékekre jó közelítéssel lineáris összefüggés illeszthető, mind a matt, mind pedig a fényes felület esetén. A féktárcsa felmelegedésének mérésekor a fényes felület hőmérsékletét tudjuk rögzíteni, aminek emissziós tényezőjére 0,330 és 0,335 közötti értéket állapítottam meg. A

[13]-ban vizsgált féktárcsa esetén 0,19 emissziós tényezőt állapítottak meg, mely nem tér el erősen az általam meghatározott értéktől.

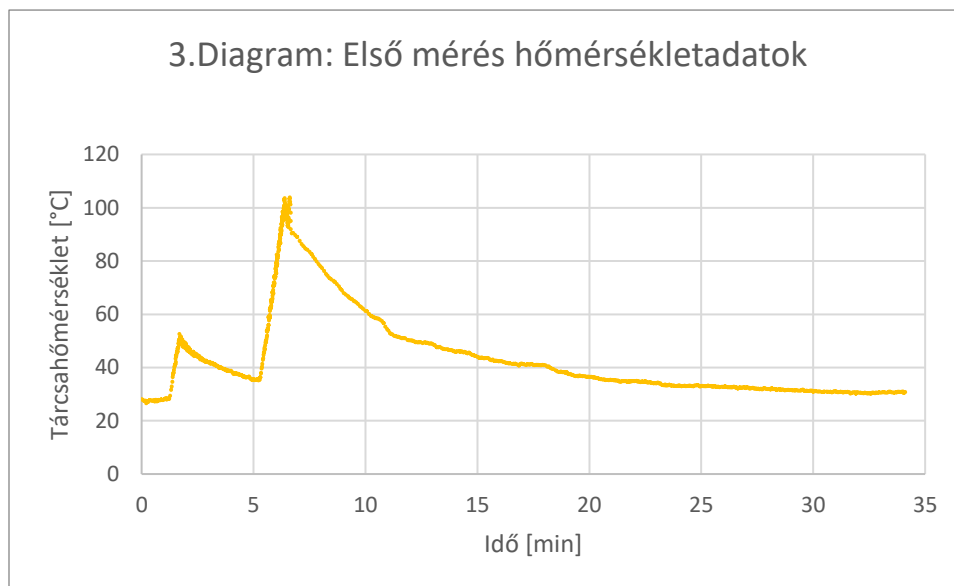
Fontos megemlíteni, hogy a feketeségi fok többek közt hőmérsékletfüggő, ennek ellenére én azzal ez egyszerűsítéssel éltem, hogy állandónak vette. Ez magas hőmérsékleteken hibákat eredményezhet, így pontosabb eredmény eléréséhez célszerű lenne több hőmérsékleten is meghatározni a feketeségi fokot, erre egy görbét illeszteni, és ez alapján korrigálni a mért eredményeket.

Fékerő

A mérés megfelelő kivitelezéséhez a fékbetétet állandó erővel kell a tárcsának szorítani. Mía fékkaron próbálunk állandó erőt létrehozni, ami nagyjából állandó erőhöz vezet a fékpofáknál is, ha elhanyagoljuk a fékfolyadék tulajdonságainak változását. Ezt megtehetjük, ha feltételezzük, hogy a folyadék a mérés során még nem melegszik túl. Az állandó erőt befőttesgumik segítségével próbáljuk elérni. Ez azért előnyös, mert a gumi nagyjából tudja kompenzálni a kis változásokat a rendszerben, például, ha a fék felkeményedik vagy felpuhul. Ekkor megváltozik a fékkar útja, viszont a gumi ugyanúgy kifejti rá az erőt és a nagysága is csak kis mértékben fog megváltozni. Ezzel ellentétben, ha egy kötéllal kötöttük volna oda a fékkart, akkor az a fék felpuhulásakor egyszerűen csak leesett volna a karról.

Első mérés

A mérés kezdetekor befőttesgumikat raktunk a fékkarra, ezzel biztosítva az állandó fékerőt. Ezt követően folyamatosan tekertem a kerékpárt. A féktárcsa a súrlódás hatására gyorsan melegedni kezdett, körülbelül 100 °C hőmérsékletet mértünk maximálisan. Ezután hagytuk lehűlni a tárcsát körülbelül szobahőmérsékletre. A hőmérséklet adatokat egy dokumentumba rögzítette nekünk a számítógép. A többi mennyiséget ekkor nem mértük, mivel ez csak egy tesztmérés volt a spot hőkamera használatához.

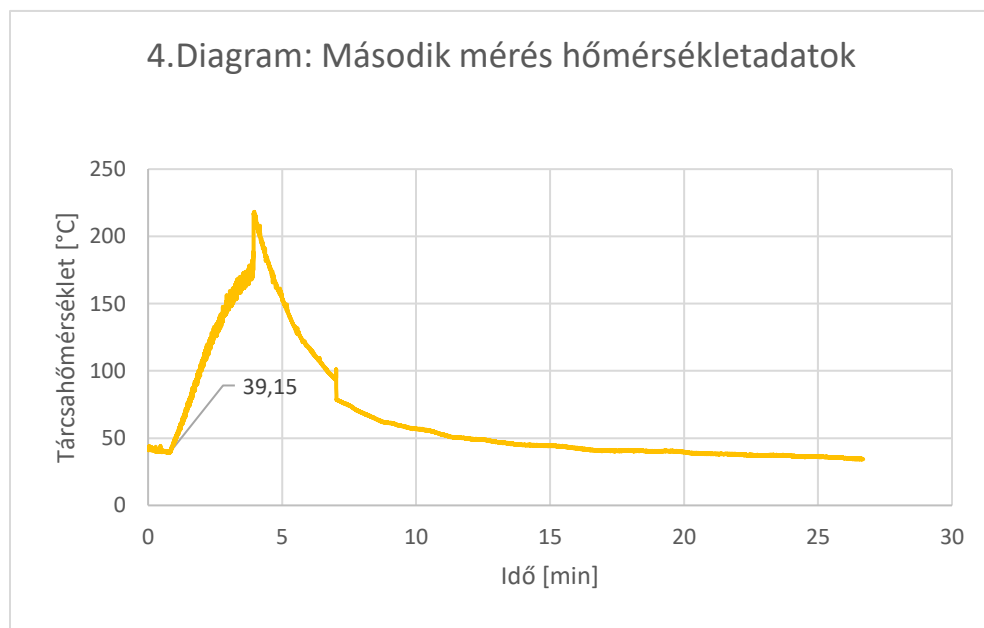


A 3. Diagramból szépen látszódik a lehűlés exponenciális jellege, és így az is, hogy nagyon nehezen hűl vissza a tárcsa szobahőmérsékletre. Emiatt célszerű két egymás utáni mérés között elegendő időt hagyni a tárcsa megfelelő visszahűlésére. Ezen kívül a diagram alapján látszik, hogy a melegedés gyorsan történik a hűléshez képest. A melegedés azért két szakaszban történt, mert a mérés során abbahagytam a tekerést, és csak később kezdtem újra.

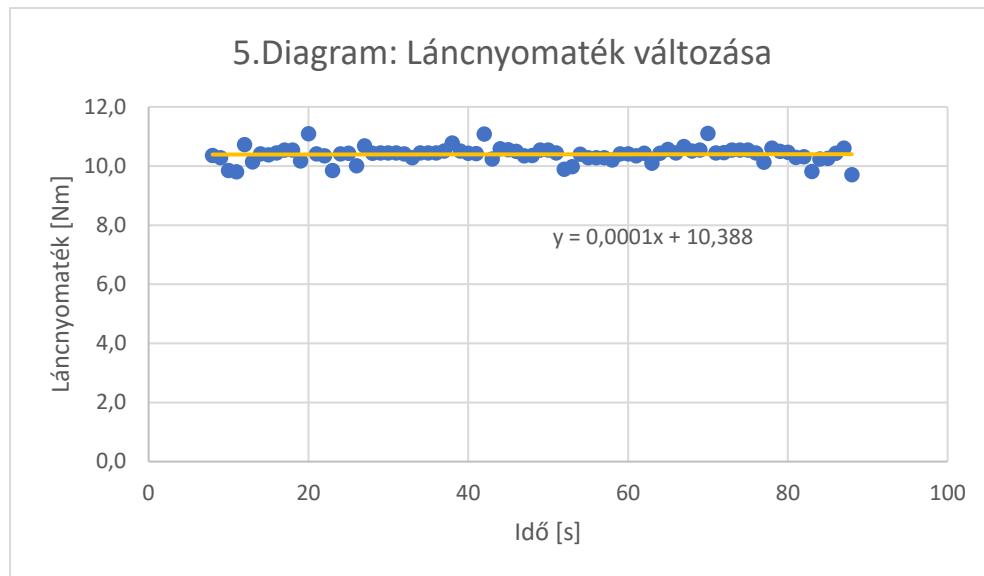
Második mérés

Az előtte végzett mérés miatt a tárcsa nem szobahőmérsékletű volt a mérés kezdetén. A mérés közben telefonnal vettem a kijelzőt, melynek minősége nem lett a legjobb, mivel tekerés közben fogtam a telefont. A későbbiekben ezt jó lenne rögzíteni valahogy. Ez a tekerést is egyszerűsíteni, és az adatfeldolgozást is megkönnyíteni, mert jobb minőségű felvételtől kellene leolvasni az értékeket. Ezen kívül hőkamerával vettük a tárcsát is, ezt szintén jó lenne, ha tudnánk rögzíteni valamilyen módon. Körülbelül 3 percig tekertem, és a telefonnal, valamint a hőkamerával is eddig videóztunk. A lehűlést már nem vizsgáltuk csak a spot hőkamerával. A mérés során az előző méréssel ellentétben a sebességet próbáltam állandóan tartani. Ez nem ment a legjobban, de ez nem is fontos, csak látványosabbá tudta volna tenni az eredményeket, hogyha tisztán a teljesítmény változik, és nem a teljesítmény és szögsebesség hányadosát kell vizsgálni

A kapott adatokat Excelben dolgoztam fel és jelenítettem meg. Ez a spot hőkamerával mért adatok esetén rendkívül egyszerű volt, ugyanis a mérőeszköz az adatokat továbbította egy gépnek, ami készített egy .csv formátumú dokumentumot, amit egyszerűen be lehetett exportálni Excelbe. A sebesség és teljesítmény adatoknál viszont már nem volt ilyen könnyű a feladat. Itt egy Free Video to JPG Converter nevű software-t használtam, ami a telefonnal készített videóanyagból két másodpercenként kivágott egy fényképet, amikről a szükséges adatokat manuálisan le lehetett olvasni.



A 4. Diagramból látszódik az első mérésnél már megállapított jelleg, azonban a felmelegedése nem ugyanolyan. Az első mérésnél nagyjából lineáris jellegű volt, de ez itt már nem igaz. Ez valószínűleg azért van, mert itt már magasabb hőmérsékletek léptek fel. Azonban a felmelegedés jellege nem látszik teljesen jól, mivel a diagram alapján valami féle hiba léphetett fel a mérés során a maximális hőmérséklet elérésének környékén. Az eddigiek alapján úgy gondolom, egyre nehezebb melegíteni a tárcsát, így a görbe el fog laposodni.



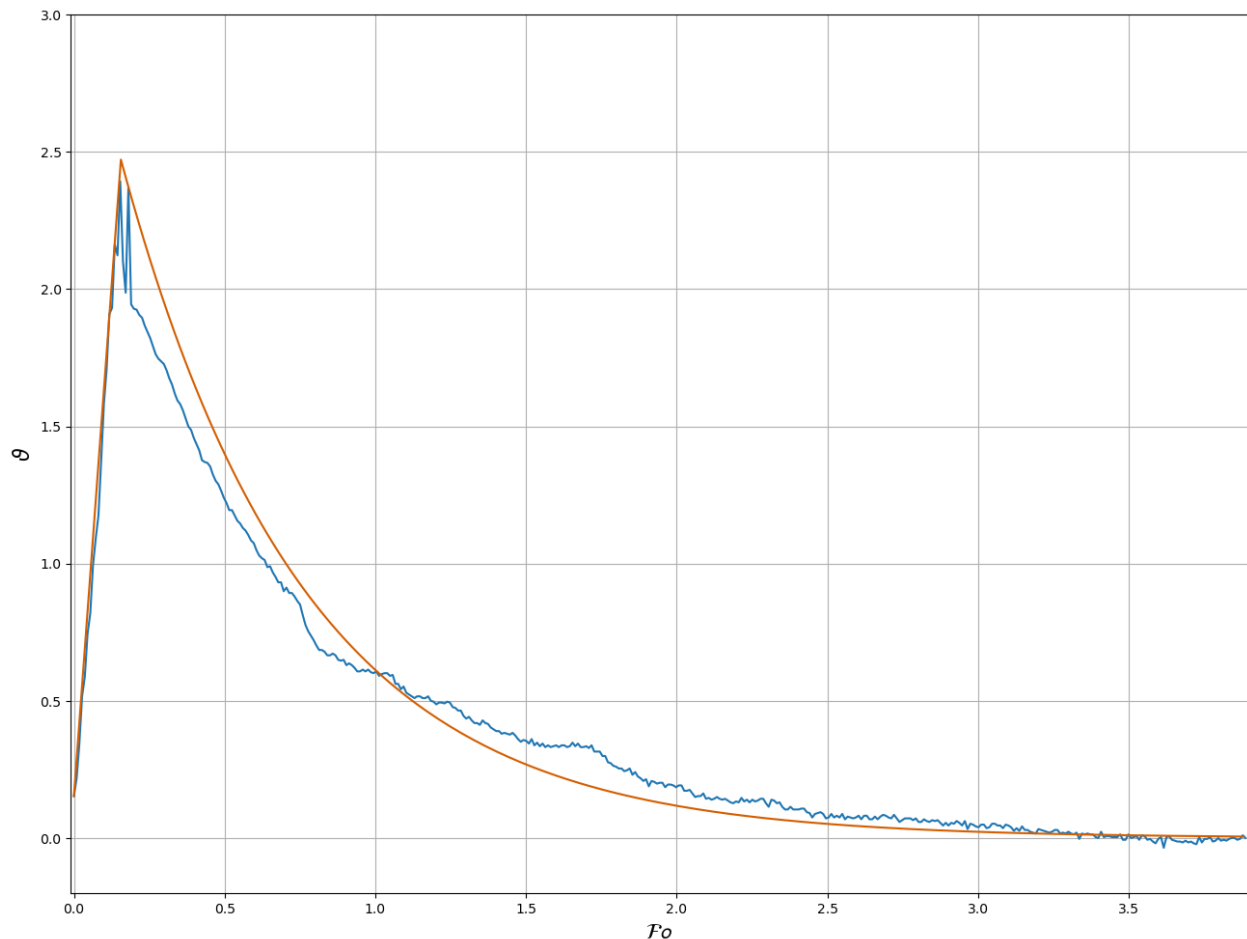
A 5. Diagramon ábrázoltam a kerék hajtásához szükséges nyomatékot az idő függvényében. Ebből kellene, hogy látszódjon, hogy az idő előrehaladtával, vagyis a hőmérséklet növekedésével a szükséges nyomaték csökken, ugyanis egyre kisebb lesz a súrlódási nyomaték a súrlódási együttható csökkenése miatt. A diagramnak egy jobb változata lenne, ha a nyomaték helyett a súrlódási együtthatót ábrázolnánk, mivel így az dimenziótlan mennyiségként jelenne meg, és nem konkrét szituációra vonatkozna, hanem a fékbetét és tárcsa anyagára. Ehhez azonban más mérési módszer alkalmazása lenne szüksége, és mivel ez egyszerűbb, és a görbe jellege így is ugyanaz marad, így maradunk ennél a módszernél.

A vártakkal ellentétben azonban nem látszik a diagramon a nyomaték csökkenése. Sőt a diagram jellege mérési hibákon és egyéb módosító tényezőkön belül konstansnak mondható. Ez olyan szempontból jó eredménynek számít, hogy látszik, hogy nem rossz mennyiségeket mérünk, és jó a mérési módszer, valamint a felállított modell is. Feltételezésem, hogy a jelenség magasabb hőmérsékleten jelentkezik, és ezért nem látszódik most. Azonban egy ilyen méréshez már komolyabb előkészületek, és jobb mérőberendezés lenne szükséges.

A mérések numerikus szimulálása

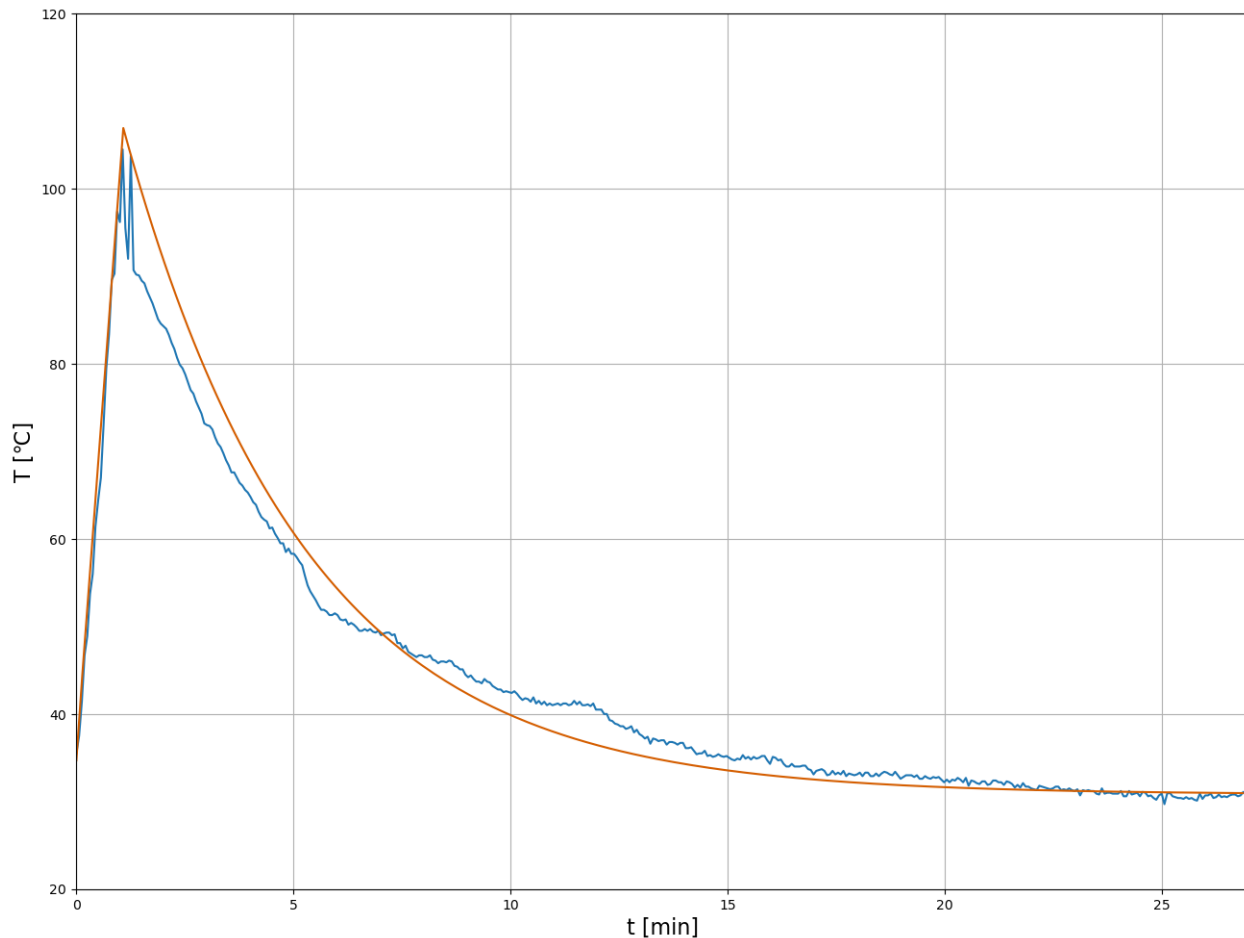
A szimulációhoz szükséges kódot Python-ban írtam meg. Három szimulációt végeztem el. Az egyes esetek közt a különbség a szimuláció hossza, a melegedési szakasz hossza, és elhelyezkedése, illetve a kezdeti és véghőmérséklet adatok. Ez alapján akármilyen mérésre lefuttatható a szimuláció, csupán az említett adatokat kell megváltoztatni.

Elsőként Az első mérésben a diagramon látható második melegedéstől/fékezéstől a hűlés végéig emeltem ki az adatokat, és ennél a szimulációnál adtam meg úgy a paramétereket, hogy a lehető legközelebb essen a szimuláció a méréshez. Az összehasonlíthatóság kedvéért a mérési eredményeket először át kellett skálázni ugyanazokkal a képletekkel, amikkel a dimenziótlanítást is végeztem. Az így kapott eredmények az 6. Diagramon láthatjuk.



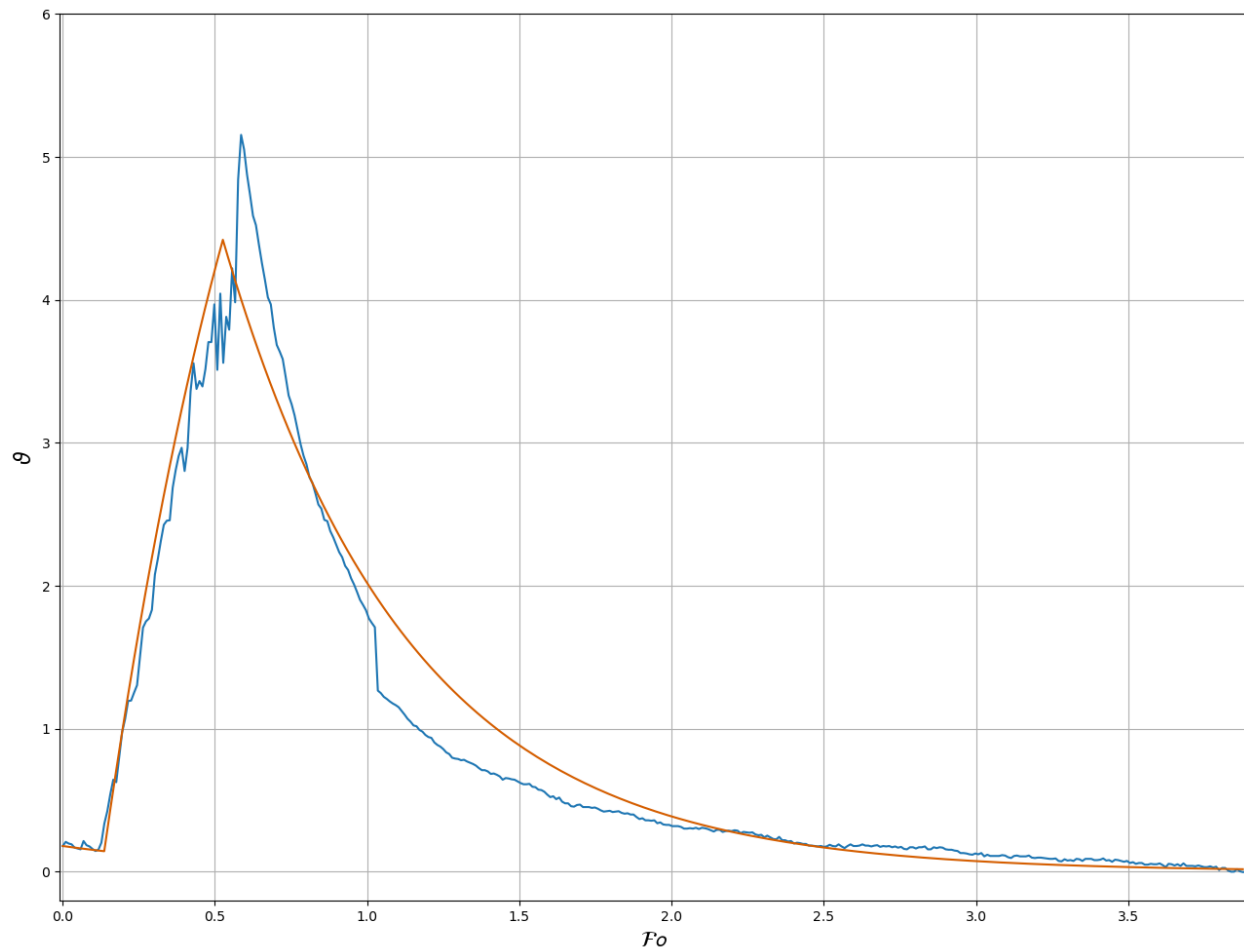
6. Diagram: Féktárcsa melegedése és hűlése az Első mérés második fékezés (dimenziótlan)
Kékkel: mérés
Sárgával: szimuláció

Az 6. Diagramon jól látszik a dimenziótlanításnak az a következménye, hogy nulla pillanatban az érték 1, és a hűlés végén nullához tart. Az eredményt a jobb olvashatóság kedvéért visszatranszformáltam hőmérséklet és idő skálára is (7. Diagram). Azt csak ennél a szimulációnál tettem meg.



7. Diagram: Féktárcsa melegedése és hűlése Első mérés második fékezés
Késsel: mérés
Sárgával: szimuláció

Ezután a szimulációt lefuttattam a már ismert paraméterekkel a Második mérés adataira is. Itt a mérési adatok valószínűleg hibával vannak terhelve a maximális hőmérséklet környékén, és a lehűlési szakasz közepén, így nem meglepő, hogy kevésbé esik egybe a két görbe, mint az első esetben. Ennek ellenére meglehetősen jó a hasonlóság a kettő mérés és a szimuláció között. Mind a melegedés, mind a hűlés jellege jól látszik a szimulációs diagramon. Ez eredmények, és összehasonlítás a 8. Diagramon látható.

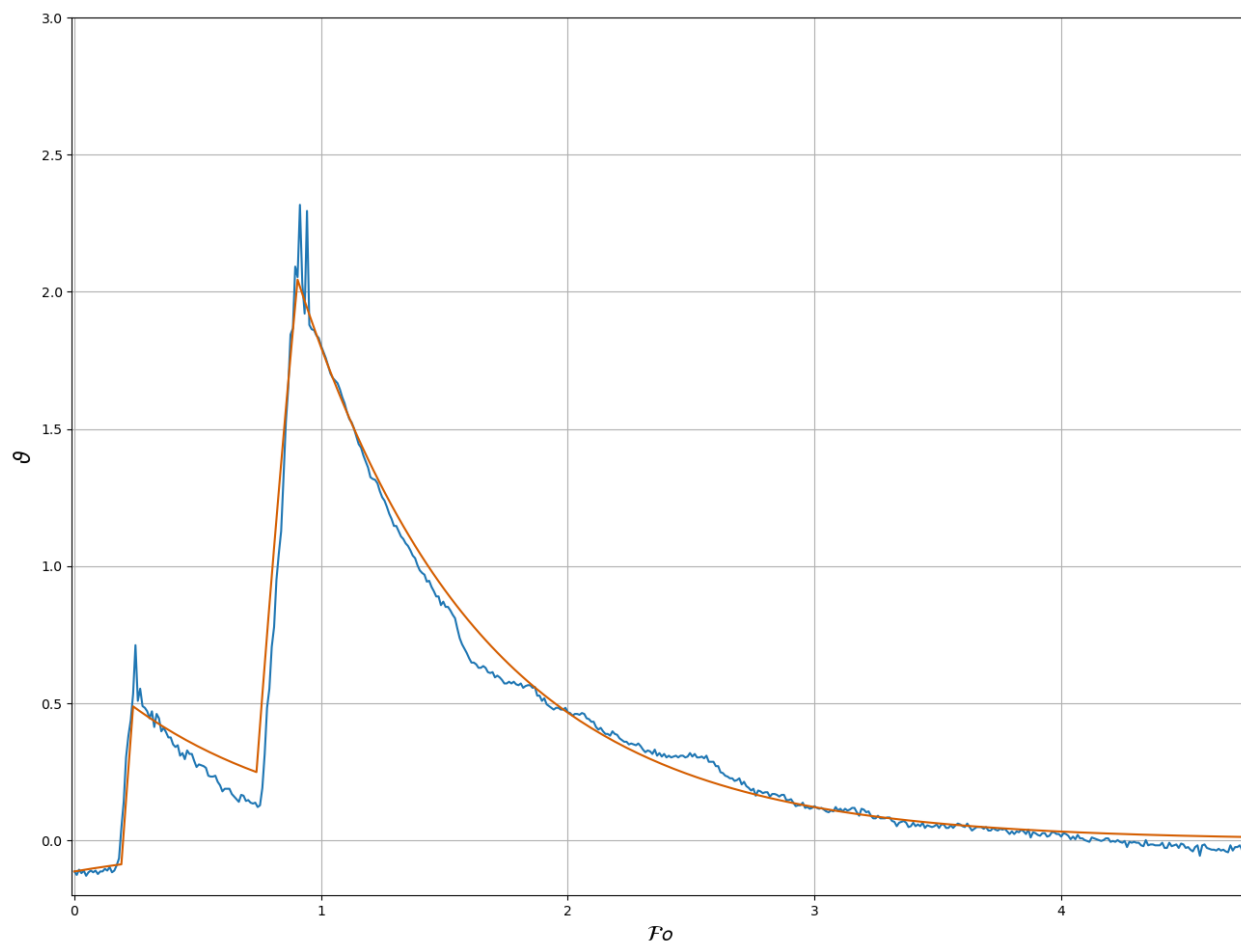


8. Diagram: Féktárcsa melegedése és hűlése Második mérés (dimenziótlan)

Kékkkel: mérés

Sárgával: szimuláció

Végül utolsó tesztként egy bonyolultabb esetre is lefuttattam a szimulációt. Itt kettő fékezési szakasz is volt a mérés során, így a modell nagyobb pontosságot igényel a helyes eredmények megszerzéséhez. A szimulációs, és mérési eredmények a 9. Diagramon láthatók. A diagramból látszódik, hogy itt már jelentősebbek a hibák az első melegedési szakasznál, de a jelleghelyességet itt is láthatjuk.



9. Diagram: Féktárcsa melegedése és hűlése a teljes Első mérés (dimenziótlan)

Kékkel: mérés

Sárgával: szimuláció

Szimulációnk egyelőre számszerűleg nem teljesen pontos, viszont jellegre helyes értékeket ad. Kvantitatíven is helyes eredményeket kaphatunk, ha a paramétereket illesztjük, illetve a forgó és álló szakaszokon különböző hőátadási tényezőket alkalmazunk.

Konklúzió, ötletek a téma bővítésére

Ez a dolgozat azt próbálta bizonyítani, hogy van értelme a forgó testekben hőforrás hatására történő hőmérsékletváltozás mérésével, és szimulációjával foglalkozni. Úgy gondolom ebben sikerrel jártunk. Az eredmények alapján láthatjuk, hogy téma tovább vihető komolyabb irányokba is, és azt is, hogy melyik elemeivel érdekesebb melyekben foglalkozni.

A mérési vonal továbbvitelével kapcsolatban lehetne méréseket elvégezni, aminél nem tárcsaféket vizsgálunk, hanem valami nagyobb sugarú forgó rendszert, például egy felniféket. Ez azért lehetne érdekes, mert itt akár azt is kimérhetnénk, hogy a tárcsán belül milyen hőmérsékleteltérések alakulnak ki. Hasonló célokkal nagy felbontású hőkamerákat is bevethetünk, amikkel sokkal pontosabban tudnánk mérni a hőmérsékleteloszlást a tárcsafékben, és a fékszerkezetben is. Hogyha célunk a pontosan megismételhető mérési körülmény megteremtése, akkor akár egy mérőberendezést is tervezhetünk, amivel különféle fékbetétekre és tárcsákra tudjuk ugyanazt a mérést elvégezni, így összehasonlíthatjuk a termékeket, anyagokat.

A mérési adatok feldolgozásában is lehetne jobb eredményeket elérni. Például alkalmazhatnánk különféle görbeillesztő algoritmusokat (pl.: legkisebb négyzetek elve), vagy korrigálhatnánk az értékeket az alapján, hogy a féktárcsa feketeségi foka függ a hőmérséklettől. Ez utóbbihoz egy szélesebb hőmérséklettartományra kiterjedő kalibrációs lépést kellene megvalósítani. Jelentősen leegyszerűsíthetnénk az adatfeldolgozást azzal is, ha olyan mérőberendezéseket alkalmazunk, amelyek azonnal tudják digitalizálni az adatokat, és így például nem nekünk kell egy videóanyagról leolvasni az információkat.

Amennyiben a numerikus szimuláció résszel akarnánk mélyebben foglalkozni, akkor is van több lehetőségünk. Célszerű lehet a paraméterek pontosabb meghatározásán dolgozni. Ehhez egy illesztő algoritmust vethetnénk be, amivel gyorsabb, és pontosabb paramétereket kaphatunk. Továbbá érdekes lehet érzékenységvizsgálatot végezni a paraméterekre, vagy akár a paramétereket felépítő adatokra, hogy ezzel kiderítsük, melyik adat pontosabb meghatározása adna jobb eredményeket, illetve milyen adatok módosításával tudunk legegyszerűbben például kedvezőbb terméket megalkotni. Hogyha még pontosabb szimuláció megalkotása a cél, akkor a modellünket is bővíthetjük. Ezt például megtehetjük azzal, hogy nem egy dimenziósként modellezzük a tárcsát, hanem figyelembe vesszük a kiterjedését. Vagy megkülönböztethetjük a hőátadási tényezőt a

melegedési szakaszban. Ez viszonylag egyszerű módosítás, de lehet, hogy sokkal jobb illesztést tesz lehetővé.

Összességében úgy gondolom, hogy habár a fékteljesítmény romlásának kimérése sikertelen volt, mégis sikeresnek mondhatjuk a téma kidolgozását. Sikerült egy jelleghelyes értékeket szolgáltató szimulációt megalkotni, és a mérés elvi hátterének használhatóságát is tudtuk bizonyítani. Ezzel egy stabil alapot biztosítottunk az további célok elérésének.

Források

A források 2023. 11. 01-én lettek ellenőrizve

- [1] F1 fékrendszer
<https://formafan.gportal.hu/gindex.php?pg=26415794>
- [2] MELYIK A JÓ TÁRCSAFÉK POFA ÉS MELYIK MIRE VALÓ?
<https://bikepro.hu/melyik-a-jo-tarcsafek-pofa-es-melyik-mire-valo>
- [3] DOT Brake Fluid vs. Mineral Oil
<https://epicbleedsolutions.com/blogs/articles/dot-brake-fluid-vs-mineral-oil>
- [4] ICE TECHNOLOGIES
<https://bike.shimano.com/en-EU/technologies/component/details/ice-technologies.html>
- [5] Why do Bike Disc Brakes Have Holes?
<https://ridersrundown.com/why-bike-disc-brakes-have-holes/>
- [6] ICE TECHNOLOGIES FREEZA
<https://bike.shimano.com/en-EU/technologies/component/details/ice-technologies-freeza.html>
- [7] Investigation of temperature and thermal stress in ventilated disc brake based on 3D thermomechanical coupling model (Ali Belhocine, Mostefa Bouchetara)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209044791200069X>
- [8] Del in cylindrical and spherical coordinates
https://en.wikipedia.org/wiki/Del_in_cylindrical_and_spherical_coordinates
- [9] Heat transfer coefficients in heat exchanger surface combinations
https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html
- [10] CONVECTION COEFFICIENT ESTIMATION OF STILL AIR USING AN INFRARED THERMOMETER AND CURVEFITTING (Tuba Yenera, Şuayb Çağrı Yenerb, Reşat Mutluc)
<https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/820288>
- [11] HOGYAN MŰKÖDIK A HŐKAMERA?
<https://www.abeta.hu/hogyan-mukodik-a-hokamera/>
- [12] Hőkameráról szakmai szemmel II.
<https://www.villanylap.hu/lapszamok/2015/junius/3679-hokamerakrol-szakmai-szemmel-ii>
- [13] Thermal/Mechanical Measurement and Modeling of Bicycle Disc Brakes (Ioan Feier and Robin Redfield)
<https://www.mdpi.com/2504-3900/2/6/215>
- [14] Thermal/Mechanical Measurement and Modeling of Bicycle Disc Brakes (Ioan Feier, Robin Redfield)
<https://pdfs.semanticscholar.org/d256/aaf7c7c46bf5b16ad8014b406ea021306c83.pdf>
- [15] Bicycle Disc Brake Thermal Performance: Combining Dynamometer Tests, Bicycle Experiments, and Modeling (Ioan Feier, Joseph Way, Rob Redfield)
<https://www.mdpi.com/2504-3900/49/1/100>