



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS
TÉZISFÜZETE

KERTÉSZ JÓZSEF

Gépjárművek ütközésbiztonságának fokozása konstrukciós megoldással

Témavezető: Prof. Dr. Kovács Tünde Anna

**BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2025.08.31.

Tartalomjegyzék

1	Summary	3
2	A kutatás előzményei	4
3	Célkitűzések	11
4	Vizsgálati módszerek	12
5	Új tudományos eredmények.....	13
6	Az eredmények hasznosítási lehetősége	16
7	Irodalmi hivatkozások listája	17
8	Publikációk.....	24
8.1	A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények.....	24
8.2	A disszertációhoz kapcsolódó további tudományos közlemények	24

1 Summary

The present study focuses on the research and development of an advanced vehicle bumper crashbox, a critical component of the crumple zone. As an initial step, the author examined the types and frequency of various vehicle collisions to emphasize the relevance and necessity of the topic. The introductory section of the dissertation outlines the kinematics of vehicle impacts, followed by a discussion on typical personal injuries and the resulting mechanical deformations.

Given that the research centers around aluminium-filled crashboxes, several subsections are dedicated to the mechanical properties, advantages, and potential applications of these structures. A review of related past research highlights existing gaps and opportunities in the field, establishing the basis for the author's investigations. The dissertation is divided into five main segments, each presenting original research and experimental findings. Every investigation was guided by specific hypotheses, which were later validated through measurements and analysis.

The first investigation examined an aluminium foam-filled thin-walled structure, focusing on the friction conditions during axial compression. The aim was to quantify the mechanical energy absorbed due to Coulomb friction—an area previously unexplored. Novel methods were developed to ensure accurate and representative results, which are summarized in the thesis.

The research then continued with compression tests on aluminium foam arranged in different configurations. It was hypothesized that the energy absorption capacity of closed-cell aluminium foam depends not only on its inherent properties but also on its relative positioning. Two new concepts, the parallel and serial arrangements, were introduced and tested, confirming the initial assumptions and revealing new energy absorption characteristics.

In the third part, finite element analysis (FEA) was employed to study the effect of crash initiators on the folding behavior of crashbox structures. Twelve different configurations were analyzed to draw conclusions, presented in the form of two new theses.

The fourth segment introduces an advanced, multi-segment, telescopically constructed crashbox filled with aluminium foam, developed by the author. This design was based on insights gained from the previous studies. Its effectiveness was validated through real-world crumpling tests, and the innovative crashbox design has since been patented.

2 A kutatás előzményei

A közúti közlekedéshez kapcsolódó statisztikai adatokat elemezve azt találjuk, hogy Magyarországon a kutatói munkám kezdetének évében (2021) 4,6 millió, Európában pedig 286 millió regisztrált jármű volt az ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) vagyis az Európai Autógyártók Szövetsége 2023-as adatai alapján [1]. Ráadásul ez a szám azóta is folyamatosan növekszik. A megnövekedett forgalom az infrastruktúra fejlesztési és fejlődési igényét is magával vonja, azonban a közlekedés jármű oldali növekedése nehezen követhető vagy kompenzálható újabb úthálózatok kiépítésével. A megnövekedett, közúti közlekedésben részt vevő járművek darabszáma magával vonja a közlekedés és forgalomtechnika tudományának egyik leginformatívabb mérőszámát, a sűrűséget. Az áramlatsűrűség az egységi idő alatt egységnyi útszakaszra vetített, azon áthaladó járműdarabszámot jelenti, és a követési távolsággal ad egyértelmű összefüggést. A sűrűség reciprok értéke adja meg a követési távolságot, vagyis azt, hogy a járművek milyen mértékben zárkozhatnak fel egymás után, azaz mekkora a minimális-redukált követési távolság [2]. Ezek alapján könnyű belátni, hogy a fent említett növekvő jármű darabszám kisebb követési távolságokat eredményez. A sűrűsödő forgalom pszichológiai hatását is figyelembe véve azt tapasztalhatjuk, hogy a járművezetők a sűrűséggel arányosan egyre türelmetlenebb, feszültebb magatartást tanúsítanak, ami közlekedési agresszióban és szabálysértésben mutatkozik meg leginkább [3-5]. A nagy forgalom ugyanis megnövekedett utazási időt és lassú, araszoló haladást eredményez, amelyek kompenzációja az indokolatlan gyorshajtasban és a nem megfelelő követési távolságok megválasztásában mutatkozik meg. Azonban, ha ez a megválasztott követési távolság kisebb, mint a biztonságos megálláshoz szükséges útszakasz, akkor utol-éréses, másnéven ráfutásos balesetek alakulnak ki. Ráfutásos balesetek bekövetkezési sebességtartománya meglehetősen széles, hiszen belvárosi araszolásnál és autópályán nagysebességgel való haladás alakalmával is kialakulhatnak ezek a baleseti események. Ezt az összefüggést igazolja a baleset típusokról szóló statisztikai elemzés, mely szerint a frontális ütközést és oldal ütközést követve a legnagyobb arányban előforduló ütközés a ráfutásos baleset [7][8]. Ezekben a közlekedési szituációkban a nem megfelelően választott követési távolság, figyelmetlen és erőszakos járművezetői magatartás könnyen ráfutásos balesetet eredményez. A megnövekedett forgalom sűrűség miatt ezen ütközések legnagyobb százaléka alacsony sebességű ütközésnek számítanak, mivel a résztvevő járművek sebesség különbsége nem haladja meg a 15-16 km/h értéket. (Mivel a nemzetközi szakirodalom „low-speed collision” kifejezést használja a 16 km/h

alatti ütközésekre, a magyar terminológia pedig az „alacsony sebességű ütközés” szóösszetételt ezért a disszertáció további részében ezt a megnevezést használom.) Alacsony sebességű ütközések következményeit alapul véve két fő sebességtartományt különíthetünk el. Közlekedésbiztonság nemzetközi előírásai olyan merevséget követelnek meg a járművektől, amely átlagosan 8 km/h alatti ütközésnél garantálja a jármű sérülésmentes állapotát [9]. Ezt a szerkezeti merevséget elsősorban a passzív biztonsági rendszer első zónája, a lökhárító rendszer kell, hogy garantálja. A lökhárító rendszer a lökhárító borítás és a nyúlvány közé szerelt keresztgerendából és energia elnyelőkből felépülő szerkezet. Funkcióját tekintve ezek alapján kettős, miszerint rendelkeznie kell legalább olyan merevséggel, amely meggátolja a maradó deformációt 8 km/h alatti ütközés esetén, valamint biztosítja a lehető legnagyobb energia abszorpciót 8 és 16 km/h közötti sebesség tartományban. A lökhárító rendszer, mint passzív biztonsági elem biztonságtechnikai szempontú feladata tehát az alacsony sebességű ütközések következményeinek minimalizálása, megakadályozása mind személyi sérülések, mind műszaki károk tekintetében. A 8 km/h és 16 km/h közötti sebességű ütközési energia abszorpció és nyúlvány deformáció prevenciója a lökhárító rendszer részét képező crashbox-ok által elszenvedett plasztikus gyűrődése révén valósul meg. Ezek a vékonyfalú szerkezetek speciális alak- és anyagtulajdonságuknak köszönhetően előre meghatározható, tervezhető gyűrődési jellemzőkkel bírnak, így az általuk elnyelni képes energia mennyiség már a tervezés fázisában ismeretes jellemző. Számos kutatás foglalkozik crashbox alakoptimalizációval, és alternatív anyagok alkalmazásával annak érdekében, hogy a szerkezet a lehető legnagyobb mennyiségű energia elnyelésére legyen alkalmas a legideálisabb gyűrődési karakterisztika mellett.

Kutatásom fókuszterülete a gépjárművek alacsonysebességű ütközésekre optimalizált crashbox szerkezetek fejlesztése konstrukciós megoldásokkal és fémhab integrációval a nagyobb ütközési energia abszorpció érdekében. A választott téma létjogosultságát mi sem igazolja jobban, mint az ide vonatkozó baleseti statisztikák, hiszen az aktív biztonsági rendszerek és önvezető funkciók gyors fejlődése ellenére a személyi sérülésekkel járó közúti balesetek száma még mindig nagyon magas, amelyek egy jelentős részét a ráfutásos, azon belül is az alacsony sebességű ütközések teszik ki. Az energiahatékony és fenntartható közlekedés kulcsfontosságú paraméter lett a járműfejlesztés területén, ezért a kutatás során ezt a kritériumot a tömegoptimalizáció és beépítési helyszükséglet követelményeivel vettem figyelembe. A kutatás a lökhárító rendszer egyik kiemelt tartozékának, a crashbox-nak a konstrukciós fejlesztésével, optimalizálásával foglalkozik, ezért ebben a fejezetben irodalomkutatás alapján

mutatom be ezen crashbox szerkezetek működését, előnyeit, hátrányait, és mai korszerű kiviteleit.

A crashbox, más néven gyűrődő elem, a járművek kritikus biztonsági alkatrésze, amelyet arra terveztek, hogy az ütközés során energiát nyeljen el. Általában az autó elején található, és az egyik legfontosabb ütközési energiaelnyelő eszköz. Feladatát tekintve multifunkciós, hiszen legfőbb feladata az autóban ülők és a gyalogosok védelme azáltal, hogy ütközés közben elnyeli a kinetikus energiát, és minimálisra csökkenti az erők átadását a jármű fő szerkezetére. Mindazonáltal feladata a jármű és más alkatrészek sérülésének csökkentése, ami csökkentheti a javítási költségeket [56-58]. A crashbox szerkezeteket gyakran vékony falú fémszelvényekből készítik, amelyek olyan anyagokból készülnek, mint pl. a szénacél vagy alumíniumötvözet [59-60], [KJ117]. A közelmúltban végzett kutatások a könnyű anyagok, például alumínium fémmátrix kompozitok (MMC-Metal Matrix Composite) és szálerősítéses műanyagok (CFRP-Carbon-Fiber Reinforced Polimer) felhasználásával készült crashboxok fejlesztésére összpontosítottak az ütközési energia abszorpció javítása és a súly csökkentése érdekében. Ezek közül kiemelkedik az XPREG XC130 epoxi alapú prepreg rendszer, amelyet kifejezetten szerkezeti célú CFRP-alkalmazásokhoz fejlesztettek, így nagy szilárdságú, ugyanakkor alacsony tömegű szerkezetek létrehozását teszi lehetővé [61]. Hasonlóan, más CFRP-anyagokat, mint például a HexPly® M77 prepreg rendszert vagy a Toray T700/2510 prepreg kombinációt is gyakran alkalmazzák az autóiipari ütközésvédelmi komponensek fejlesztésében [62]. Egy másik ígéretes kutatási irány az úgynevezett hibrid kompozit anyagok alkalmazása. Ma és társai (2020) egy alumínium és CFRP hibrid anyagú crashbox szerkezet energia abszorpciós képességét vizsgálta, ahol kiemelkedő fajlagos energia abszorpciós értékről számolnak be [63]. Az crashbox kialakítása kritikus fontosságú, mivel egyensúlyban kell lennie az ütközésbiztonsági követelményekkel, a súlycsökkentéssel és a gyártási korlátokkal, ezért komplex mérnöki gondolkodást igényel annak tervezése és/vagy optimalizációja. A crashbox abszorpciós teljesítményét befolyásoló tényezők közé tartozik az energiaelnyelő szerkezet alakja, a falvastagság és az anyagtulajdonságok. A feltörekvő technikákat, például a gépitanulást is használják az ütköződobozok tervezésének optimalizálására az ütközési viselkedés pontos előrejelzésével és egy szélesebb tervezési terület feltárásával az innovatív megoldásokhoz való közeledés érdekében [64-66]. Vékonyfalú szerkezetnek tekinthető egy konstrukció, ha annak falvastagság és a szerkezet szélességi és magassági dimenziójának aránya alacsony. A tömegoptimalizáció igénye miatt ezen szerkezetek teherviselő képessége

elsősorban a szelvény geometriájának optimalizációjával növelhető. Azonban számos tanulmány vizsgálja a különböző anyagok, geometriák és kialakítások, például habbtöltésű szerkezetek, összetett keresztmetszetek és hibrid szerkezetek használatát az energiaelnyelés és a deformációs jellemzők javítása érdekében [67-71], [KJ117]. A vékonyfalú szerkezetek falvastagsága és a plasztikus deformáció között lineáris összefüggés figyelhető meg. Az összefüggés értelmében falvastagság csökkentése magával vonja a plasztikus deformáció megjelenéséhez tartozó küszöbérték csökkenését, amelyet számos tanulmányban is olvasható eredmények igazolnak [75-77]. A kutatások viszont arról is beszámolnak, hogy a falvastagság természetesen szoros összefüggést mutat az adott vékonyfalú szerkezet energia elnyelő teljesítményével is. A tömegoptimalizáció és a csúcserő optimalizáció szempontjából ugyan előnyös a csökkentett falvastagság hiszen alacsonyabb szerkezeti merevséget eredményez, ugyanakkor kevesebb energia elnyelésre képes a plasztikus deformáció során [78]. A csúcserő optimalizáció ezért nem minden esetben a falvastagság módosításában keresendő, hanem a gyűrődési viselkedést nagymértékben befolyásoló alakoptimalizációban. Számos kutatás foglalkozik a gyűrődési jellemzőket befolyásoló alaksajátosságokkal és kiegészítő kialakításokkal [79-81]. Az alakoptimalizáció több csoportra bontható, ezek lehetnek keresztmetszet típusára vonatkozó idealizálások, a hosszdimenzió mentél alkalmazandó alaksajátosságok, mint pl. kúpos kialakítások és gyűrődést segítő bordák elhelyezésével kapcsolatos optimalizációk vagy a felsoroltak együttes alkalmazása. A crashbox optimalizációs kutatások legtöbbször az "origami" elven alapulnak. Az "origami" szó az ősi Japán papírhajtogatás művészetét összefoglaló kifejezés, azonban az "origami" hajtogatása mögött bonyolult matematikai összefüggések és törvényszerűségek állnak. Ezt a technikát az ütközésbiztonság tudományán belül több alkalmazási területen használják, mint például a repülés- és űrhajózásban, az orvostudományban és az autóiparban egyaránt [82]. A hagyományos crashbox energia elnyelők négyzet alakú szelvényekből, vagy kör keresztmetszetű csövekből készülnek, ehhez képest az "origami" elvet követő változatok már olyan alaksajátosságokat alkalmaznak, amelyek egy előre jól definiálható roncsolódási képességgel teszik jellemezhetővé a konstrukciót. Az origami elmélet alapgondolata az, hogy az ütközés során egy olyan, úgy nevezett szuperhajtogatott konstrukciót kapjunk, amely a hagyományos négyzet alakú szelvélynél jobb energia abszorpciót biztosít, és idealizált gyűrődési karakterisztikával bír. A csúcserőn túl a plasztikus deformációhoz szükséges erő fluktuáció is kritikus jellemző az energia elnyelők minősítésénél. Az "origami" elv erre a

problémára is megoldást jelenthet [83-84]. Azonban az „origami” elvet követő fejlesztése eredménye legtöbbször olyan összetett alakzat, melynek gyárthatósága problémás és költséges, ezért célra vezetőbbnek gondolom a hagyományos szelvények konstrukciós optimalizációját. Ennek egyik eszköze a gyűrődést segítő, ezáltal csúcserőt csökkentő úgynevezett geometriai tökéletlenségek alkalmazása a crashbox-ok palástján, amelyek geometriai eszközök lehetnek bordák, furatok, beszúrások, élettörések és lekerekítések, különböző lyukasztások és madárcsőr kialakítások, valamint ezek kombinációi. A bordázatok kialakítását tekintve a pozitív és negatív bordakialakítást különíthetjük el. A pozitív változat esetében a crashbox palástjából kiemelkedő bordákat hoznak létre, míg a negatív kialakítással a palást külső síkjához viszonyítva süllyesztett bordákat alkalmazunk.

A nemzetközi szakirodalom “crash initiator” vagyis “gyűrődést indító” kifejezést használja ezen módszer alkalmazására, hiszen a plasztikus deformáció küszöbértéke nagymértékben függ ezen geometriai „tökéletlenségek” alkalmazásától [85-86]. Alkalmazott kifejezések még a nemzetközi szakirodalomban a „trigger”, mint indító és a „stress concentrator”, mint feszültség koncentráló, amelyek rendkívül jól leírják ezen konstrukciós megoldások funkcióját, ahogyan azt Köseadağ [87] is használta crashbox optimalizációról szóló tanulmányában. Hiszen a cél olyan feszültséggyűjtő helyek kialakítása a szerkezet mentén, ahol az anyag képlékeny alakváltozása hamarabb megindul, ezáltal megkezdődik az ütközési energia abszorpciója deformációs munka révén. Bármely feszültség gyűjtő kialakításról is legyen szó, a “gyűrődést indító” geometriai megoldások hatással vannak a kezdeti csúcserőre, az erő fluktuációra és az energia abszorpciós teljesítményre [88]. Kumar [89] numerikus vizsgálatot végzett a madárcsőr típusú, az élen kialakított gyémánt formájú süllyesztés és a párhuzamos hornyokra vonatkozóan, hogy információt kapjon ezen geometriai módszerek a gyűrődési tulajdonságokra gyakorolt hatásáról téglalap keresztmetszetű crashbox-okra vonatkozóan. Megállapításra került általa, hogy a csúcserő minden konfigurációban csökken, míg az energia abszorpció csak a madárcsőrös gyűrődés indítók esetében nő. Az eredmények szerint a csúcserő 7%-kal, 12%-kal és 37%-kal csökken, a madárcsőr esetében pedig az energiaelnyelés 6%-kal nő, de a másik két geometria esetében 9%-os csökkenést észleltek. Az erőfluktuáció és gyűrődési hatékonyságról azonban nem számol be, ahogy több különböző gyűrődést segítő megoldás együttes alkalmazásáról sem.

Egy másik konfigurációt javasolt és elemzett Zhang [90], aki több numerikus vizsgálatot is végzett negatív típusú horonnyal optimalizált vékonyfalú szerkezeten. Az eredmények a

hagyományos négyszögletes konstrukciókhoz képest jelentősen megnövekedett energia abszorpciós értéket mutattak, és a csúcserő is csökkent egyes konfigurációk esetében. A tanulmány átlagos 9%-os csúcserő csökkenésről számolt be, energia abszorpciós teljesítmény növekedése mellett, azonban tanulmány nem tér ki arra, hogy ez a típusú törésindító, hogyan hat más keresztmetszet típusokra.

Mamalis [91] szintén egy átfogó tanulmányt készített, amely numerikusan és kísérletileg is elemezte a kör alakú furatok hatását a négyszög keresztmetszetű vékony falú crashbox szerkezeteken. A vizsgálatok a furatok méretére és a paláston elhelyezésére koncentráálódtak, amely vizsgálatok alapján Mamalis [91] megállapította, hogy a furatok elhelyezkedésének hatása az oldalfalra jelentősebb csúcserő csökkenést eredményez, mint a furatok mérete. Ezen túlmenően ez az elemzés kiemelte, hogy a középmagasságban lévő furatokkal rendelkező próbatestek jobb ütközésbiztonsággal rendelkeztek, mivel ezeknél volt a legnagyobb energiaelnyelés és érdemleges csúcserő csökkenés. Az alkalmazott furatok alakváltozási stabilitásra tett hatásáról nincs információ a tanulmányban.

Egy másik gyakran alkalmazott alakoptimalizációs módszer a csúcserő csökkentésére, a crashbox hosszirányában alkalmazott kúpos kialakítás. A kutatások alapján a vékonyfalú, kúpos szerkezetek hatásosnak bizonyulnak a maximális erő csökkentésében anélkül, hogy az energiaelnyelés jelentős mértékben csökkenne [92-93]. Azonban sem ezekben sem más szakirodalmakban nem lehet olvasni egyértelmű információt arról, hogy milyen összefüggés áll fenn az alkalmazott kúpszög mértéke és a csúcserő, az erő fluktuáció és az elnyelt energia mennyisége között. Az előző fejezetben említésre került, hogy ha a terhelés eléri az alkalmazott szerkezet folyási értékét, akkor plasztikus deformáció jön létre, amely ütközésbiztonsági szempontból kiemelt fontosságú folyamat, hiszen ebben a szakaszban történik az energia abszorpció érdemi része. A plasztikus deformáció egy irreverzibilis folyamat, vagyis a terhelés megszűnése után sem rendeződik vissza az anyag kristály szerkezete. A plasztikus deformációt az azt létrehozó és utána a gyűrődési folyamatot fenntartó erő mértékével jellemezhető. Az ideális abszorber plasztikus deformációjához közel állandó zömítő erő párosul (plató szakasz), ez azt jelenti, hogy a maradó deformáció során jelentkező erő fluktuáció egy fontos jellemzője az adott konstrukciónak.

A csúcserő optimalizáció érdekében alkalmazott geometriai módszerek természetesen hatással vannak az abszorpció mértékére, azonban gyakran nem előnyösen. Nehéz megtalálni azt az ideális méretet, alakot és falvastagságot, amely valamennyi kritériumra pozitív hatással van. Ha

sikerül is kititrálni egy megoldást akkor annak gyárthatóságával és előállítási költségeivel adódhatnak problémák. Ezért a legtöbb kutatás az alakoptimalizáción túl más módszereket keres a nagyobb energia elnyelési képesség elérése érdekében. Ennek egyik eszköze az anyaginteráció, amikor a vékonyfalú szerkezetet valamilyen ideális gyűrődési karakterisztikával rendelkező abszorberrel töltik meg. Ezek az abszorber töltetek lehetnek nyitott vagy zárt cellás fémhabok, lattice szerkezetek, szintaktikus kompozitok, kerámiák. A megoldás nagy előnye, hogy úgy fokozható az eredeti vékonyfalú szerkezet energia abszorpciók képessége, hogy nem növekszik jelentősen a tömege.

Djamaluddin [94] elektromos járművek ütközésbiztonságának fokozására szánt zártcellás alumínium habbal töltött crashbox-ot vizsgált a tanulmányában. A kutatásban más tanulmányokhoz eltérően csak részleges töltést alkalmazott különböző elrendezésekben. Djamaluddin arról számolt be, hogy a fémhab töltésű crashbox szerkezetek energia elnyelő képessége nem csak az alkalmazott fémhab típusától függően növelhető, hanem fontos a fémhab elhelyezkedése a szerkezeten belül. Mindazonáltal az elhelyezéstől függetlenül minden konstrukciónál tudta növelni az energia abszorpció értékét, azonban a kezdeti csúcserő értékét nem tudta csökkenteni, így az optimalizált változatok is csak 49%-os gyűrődési hatékonyságot sikerült elérnie. Mivel a vékonyfalú szerkezet és a töltet egyidejűleg zömül az általa fejlesztett konstrukcióban, ezért részleges gyűrődés esetén a teljes szerkezet cseréje szükséges.

Ezzel szemben Wang és társai [95] már olyan kísérleteket végeztek, ahol már nem csak az energia abszorpció, de a csúcserő problémája is megoldandó probléma volt. Szintén részlegesen töltött crashbox szerkezeten végezte a vizsgálatokat, amiben a próbatesteken már élen alkalmazott törésindító bemetszéseket is alkalmazott. A próbatestek további különlegessége, hogy duplafalúak voltak. A tanulmányban azt olvashatjuk, hogy 12,5%-kal tudta növelni az egységnyi tömegre vetített elnyelt energia értékét, és több mint 40%-al csökkentette a kezdeti csúcserő értékét. Ez összeségében azt eredményezte, hogy a fejlesztéssel 64%-os gyűrődési hatékonyságot sikerült elérni. Wang szerkezetében a fémhab töltet egyidejűleg zömül az azt körülvevő vékonyfalú szerkezettel, így a fémhabokra jellemző előnyös (plató) karakterisztikát nem tudta megtartani.

3 Célkitűzések

A kutatás célja olyan alacsony ütközési sebességre optimalizált, crashbox konstrukció megalkotása, amely szerkezeti kialakításának köszönhetően alkalmas nagymértékű ütközési energia abszorpcióra a káresemény során, csökkentve ezzel a személyi sérülések és a műszaki károk mértékét nagyobb biztonságban tudva ezzel a közlekedésben résztvevőket. A hatósági, megvalósíthatósági és gazdaságossági követelmények együttese miatt a passzívbiztonsági rendszerek, köztük az energiaelnyelő szerkezetek optimalizációja komplex mérnöki gondolkodásmódot, új anyagok alkalmazását és fejlett konstrukciók megalkotását követelik meg.

A céloom, olyan termék megalkotása volt, amely nem csak elméleti szinten jelenik meg a biztonságstudomány területén, hanem alkalmas gyakorlati felhasználásra, ezáltal a társadalom jobb és biztonságosabb létét szolgálhatja a közlekedésbiztonság területén.

A kutatás további céljai között szerepelt olyan mérési eredmények és összefüggések feltárása is a fémhabokra vonatkozóan, amely más tématerületek kutatásait segítheti és szolgálhatja. A crashbox szerkezetek energia elnyelési képességét zártcellás fémhabok integrációjával kívántam elérni, azt feltételezve, hogy ezek az abszorberrel töltött crashbox szerkezetek - konstrukciós újragondolással - energiaelnyelő képessége és hatásfoka javítható, anélkül, hogy jelentősen növelnék a szerkezet tömegét. Ezért a kutatásom során kitüntetett szerepet kapott a zártcellás alumínium habok különböző peremfeltételek figyelembe vételével történő zömítő vizsgálatok, azzal a céllal, hogy a lehető legnagyobb energia abszorpciót tudjam elérni általuk. A vizsgálatokhoz több különböző sűrűségű, zártcellás alumínium habot használtam, amelyek energia elnyelő képességét szabad és radiálisan gátolt zömítésen keresztül vizsgáltam.

A radiálisan gátolt zömítés azonban egy kiaknázatlan területe a fémhab kutatásnak és a fémhabbal töltött crashbox szerkezetek konstrukciós fejlesztésének. A fémhabok ilyen elrendezésben történő zömítésükkor nagyobb energia abszorpció valósul meg, amely alapvetően két okra vezethető vissza. Az egyik, hogy a cellák alakváltozási lehetősége radiálisan gátolt ezért, nagyobb energia szükséges azok elasztikus és plasztikus deformációjához egyaránt, hiszen a Poisson-hatás nem tud érvényesülni. A másik ok a vékonyfalú szerkezet fala és a hab között jelentkező Coulomb-féle súrlódás a zömülés során [10-14]. Ezen tanulmányokban azonban nem számolnak be arról, hogy a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező energia többlet, hány százaléka vezethető vissza az alkatrészek között ébredő súrlódásra.

Ennek meghatározása azért szerepelt a céljaim között, mert a súrlódás által az energia elnyelőkben és ütköző elemeknél nagyobb energia abszorpció lenne elérhető kizárólag a súrlódási feltételek növelésével, ami a ráadásul nem jár többlet tömeggel.

A fémhabok alkalmazásával lehetőséget láttam a modulálható crashbox szerkezetek megalkotásában, melynek műszaki hátterét a fémhabok soros és párhuzamos elrendezésben történő zömítése adta a radiálisan gátolt zömítés elvén működve, ezért célom volt elvégezni és ismertetni ezen fémhab elrendezések laboratóriumi vizsgálatait.

Passzív biztonsági rendszerek fejlesztése során azonban nem csak a tömegoptimalizációs szempontok figyelembevétele fontos, hanem a szerkezetek helyigénye is, hiszen ezek alapvetően meghatározhatják a jármű szerkezeti felépítését, formavilágát, és kialakítását.

A gyűrődő zóna deformációja arányos az általa elnyelt energia mennyiségével. Ez a visszafelé történő baleseti számításoknál (EES – módszer) is gyakran alkalmazott módszer. Ezért a konstrukciós fejlesztéssel célom volt, hogy a gyűrődő zóna/alkatrész működő deformációs hosszának növelése nélkül tudjam fokozni a szerkezet energia elnyelő képességét, anélkül, hogy jelentősen növelném a konstrukció tömegét vagy a beépítési helyszükségletét.

4 Vizsgálati módszerek

Kutatásom módszertani alapját az irodalomkutatás; laboratóriumi mechanikai zömítő vizsgálatok; a 3D tervezés és végelelemes analízis, valamint ezen módszerek adta eredmények értékelése alkotják.

A kutatást a szakirodalom feldolgozásával és szakmai kitekintéssel kezdtem a baleseti statisztikákra vonatkozóan. Ezzel először is célom volt betekintést nyerni a mai közúti közlekedésbiztonság színvonalába és fejlődési irányába, valamint informálódni a leggyakoribb baleseti típusokról továbbá azok előfordulási körülményeiről. Ekkor tapasztaltam, hogy a ráfutásos balesetek az egyik leggyakoribb káreseménynek számítanak, ezért elkezdtem felkutatni, hogy a mai korszerű járművek milyen aktív és passzív biztonsági megoldásokkal tudnak hasznosítani ezekben a baleseti szituációkban a személyi sérülések és műszaki károk csökkentése érdekében. Mivel a kutatás elsődleges célja a mechanikai konstrukciós fejlesztés ezért a passzívbiztonsági eszközök vizsgálatával folytattam az irodalomkutatást. Fontosnak tartottam megvizsgálni, hogy a ráfutásos baleseteknek milyen jellemző személyi sérülései vannak. Korábbi kárszakértői munkám során lehetőségem volt a járművek mechanikai

sérüléseinek vizsgálatára, így az ott szerzett tapasztalatokat empirikus információkként hasznosítottam a kutatásom során.

Mivel a ráfutásos balesetek igen jelentős részét az alacsony sebességű ($v \leq 16$ km/h) ütközések teszik ki, ez magával vonta azt, hogy a fejlesztést a lökhárító rendszerre vonatkozóan kell elvégeznem. Ezért következő lépésként információt gyűjtöttem elsősorban nemzetközi szakirodalmak és publikációk által a lökhárítórendszerek mai fejlesztési állapotáról és az ide vonatkozó hatósági előírásokról. Az informálódás ezen szakaszában lehetőséget véltem felfedezni a fémhabokkal integrált crashbox szerkezetek fejlesztésében, ezért az irodalomkutatást a fémhabok és azok mechanikai vizsgálatával foglalkozó tanulmányok elemzésével folytattam [15-18].

Számos fémhabokra jellemző mechanikai tulajdonságot azonban nem sikerült a szakirodalomból megtudnom, így laboratóriumi zömítő méréseket kellett végeznem. Ezek elsősorban szabadzömítések, radiálisan gátolt zömítések és súrlódásmérés módszerét jelentették.

A crashbox-ok gyűrődési jellemzője befolyásolható alak sajátossággal [19-20], ezért a kutatást alakoptimalizációval folytattam. Mivel a 3D-ben megtervezett prototípusok legyártása költséges lett volna, ezért végelelemes analízist alkalmaztam, mint vizsgálati módszer. Azonban fontos volt az analízishez választott anyagmodell és paraméterezési eljárás validálása ezért zömítő gépen laboratóriumi mérést végeztem egy egyszerűsített próbadarabon, hogy összehasonlíthassam a numerikus vizsgálat és fizikai mérés eredményeit.

Végül a fejlesztett konstrukció működésének igazolására egyszerűsített próbadarabokat gyártottam és törésvizsgálatokat végeztem, majd a vizsgálat során kapott eredményeket kiértékeltem. A konstrukció P2400387 ügyszámon szabadalmi nyilvántartásba került, ahol az újdonság kutatási jelentés minden igénypont tekintetében elismerte az újdonságot, a feltalálói tevékenységet, valamint a termék ipari alkalmazhatóságot is.

5 Új tudományos eredmények

Az általam végzett és az értekezésben bemutatott – a lökhárító és aláfutásgátló rendszerekben alkalmazható crashbox szerkezetekre vonatkozó – kutatásom és fejlesztői munkám új tudományos eredményeit az alábbi tézispontokban fogalmaztam meg.

Az első részben ismertetett, súrlódás ellenállással kapcsolatos kutatásomat azzal a feltételezésemre alapoztam, hogy 0,4 és 0,7 g/cm³ sűrűségű, zártcellás alumínium fémhab

radiálisan gátolt, AW6060 alumínium csövön belüli zömítéséhez szignifikánsan több mechanikai energiára van szükség szabad zömítésükhöz képest. Valószínűsítettem, hogy a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező mechanikai energia abszorpció többlett egy jelentős részét a cső belső felülete és a fémhab között ébredő súrlódási ellenállás okozza, vagyis a zömítés alkalmával a súrlódási ellenállás leküzdésére fordítódik. Mindemellett feltételeztem, hogy a súrlódási ellenállás mértékét a fémhab és a cső fala között ébredő súrlódási együttható, valamint a fémhab porozitása határozza meg és nem a kontakt felület mérete.

1. tézis: Laboratóriumi méréssel igazoltam, hogy zártcellás 0,4 és 0,7 g/cm³ sűrűségű alumínium fémhabok radiálisan gátolt zömítéséhez - átlagosan 53,6 % - al több mechanikai energiára van szükség szabad zömítésükhöz képest. Méréssel meghatároztam, hogy a radiálisan gátolt zömítés során jelentkező mechanikai energia abszorpció többlett egy jelentős részét – átlagosan 20,79 %-át – a cső belső felülete és a fémhab között ébredő súrlódási ellenállás okozza. A mérések eredményei alapján megállapítottam, hogy a súrlódási ellenállás mértékét a fémhab és a cső fala között ébredő súrlódási együttható, valamint a fémhab porozitása és a kontaktmechanizmus határozza meg. Az elvégzett mérések igazolták, hogy a belső zömítésű, fémhabbal töltött crashbox szerkezetek energia abszorpciós képessége, és ezáltal ütközésbiztonsági hatásfokuk növelhető a súrlódási paraméterek növelésével, ez azt jelenti, hogy tömegnövelés nélkül is fokozható egy gyűrődő elem energia elnyelő képessége [KJ118], [KJ125], [KJ126], [KJ127].

A dolgozat második szakaszában a zömítővizsgálatok eredményeit ismerttettem, amely vizsgálatokat azzal a hipotézissel kezdtem meg, hogy a passzívbiztonsági szerkezetekben energia elnyelőként használt alumínium fémhabok energia abszorpciós képességét nem csak azok mechanikai paraméterei, hanem egymáshoz viszonyított helyzete és a zömítés relatív sorrendje is nagymértékben befolyásolja. A vizsgálatok eredményei igazolták a kezdeti feltevéseimet, amely alapot adott a soron következő tézisem megfogalmazásához.

2. tézis: Definiáltam a soros és párhuzamos zömítés fogalmát zártcellás alumínium fémhabok szabad zömítésére vonatkozóan. Soros elrendezés esetében a két különböző sűrűségű (0,4 és 0,7 g/cm³) zártcellás fémhabból készült próbatesteket egymásra, a párhuzamos elrendezés esetén pedig közvetlenül egymás mellé helyezzük. A párhuzamos elrendezésű konstrukció 21,5 %-al több energiát képes elnyelni, az alacsonyabb és nagyobb sűrűségű hab egyenként mért abszorpciós értékének matematikai

összegéhez képest. A soros elrendezés előnye, hogy - az energia abszorpció tekintetében kiemelt fontosságú - plató szakasz átlagosan 40%-al hosszabb lefutású, amely a plasztikus deformációra jutó elnyelt energia hányad (CP) értékével is igazolható, hiszen ezen elrendezés esetén ennek értéke 22 %-al nőtt. A soros és párhuzamos elrendezések passzívbiztonsági karosszéria elemekben alkalmazva alkalmas a biztonság fokozására, nagyobb energia abszorpciós képességük, és a soros elrendezés adta kétlépcsős plató szakasz révén. [KJ122], [KJ123].

A dolgozat harmadik, gyakorlati részében a végeselemes vizsgálat folyamatát és eredményeit ismertetem. Az anyagmodell és a paraméterezési eljárás megfelelőségét validációs kontrollméréssel igazoltam. Ezt követően lehetőségem nyílt arra, hogy szoftverkörnyezetben megvizsgáljam, milyen mértékben befolyásolja egy adott crashbox gyűrődési és energiaelnyelő tulajdonságait az alaksajátosság. A fejlesztés során abból a feltételezésből indultam ki, hogy az alumíniumötvözetből készült, eltérő keresztmetszetű crashbox szerkezetek plasztikus deformációjához — különösen a kezdeti csúcserőhöz — szükséges zömítőerő csökkenthető megfelelő kúpszög és a paláston alkalmazott törésindító bordázat alkalmazásával. Mindezt úgy, hogy közben az energiaelnyelő képesség ne csökkenjen jelentősen. A vizsgálatok során kapott eredmények alapján az alábbi új tudományos eredményt fogalmazhattam meg:

3. tézis: Végeselemes-analízissel igazoltam, hogy az EN AW 6082 AlSi1MgMn alumínium ötvözetből készített téglalap és nyolcszög keresztmetszetű crashbox szerkezetek plasztikus deformációjához (kezdeti csúcserő) szükséges zömítő erő mértéke 35 %-al csökkenthető 20 %-os kúpszög alkalmazásával, és a paláston alkalmazott három darab törésindító, negatív típusú bordázat használatával. Ezzel az alakoptimalizációval egy hagyományos, a gyakorlatban gyakran is alkalmazott téglalap keresztmetszetű crashbox gyűrődési hatásfoka (CFE) 43 %-al, míg a nyolcszögletű koncepció CFE-értéke 36 %-al növelhető, miközben a tömegoptimalizáció szempontjából fontos, egységnyi térfogatra és egységnyi tömegre vonatkoztatott elnyelt energia értéke is javul [KJ121], [KJ122].

Ezen végeselemes analízisnek köszönhetően megállapítást nyert, hogy linearitás áll fenn alumínium ötvözetből készített crashbox-ok szerkezeti merevségi értéke és a próbatesten alkalmazott gyűrődést segítő kúpszög értéke között, amelyet tézisként is megfogalmaztam.

4. tézis: Iterációs módszerrel meghatároztam, hogy az EN AW 6082 AlSi1MgMn alumínium ötvözetből készített crashbox-ok zömítési vizsgálattal meghatározott szerkezeti merevségi értéke és a próbatesten alkalmazott gyűrődést segítő kúpszög értéke között lineáris összefüggés áll fenn [KJ121].

A kutatás egyik legfőbb célja egy olyan crashbox szerkezet kifejlesztése volt, amely fémhabbal integrálva képes nagyobb mennyiségű energiát elnyelni egységnyi elmozdulásra vetítve, mint a tömbösített fémhabból készült energiaelnyelők. Emellett fontos szempont volt az is, hogy az energiaelnyelés és a tömeg aránya is kedvezőbb legyen az új megoldás esetében. Ezen kívül feltételeztem, hogy egy teleszkópos működési mechanizmussal az adott crashbox alakváltozási stabilitása javítható, a kezdeti csúcserő értéke pedig függetleníthető a keresztmetszet típusától és a falvastagság értékétől.

5. tézis: Fejlesztettem egy olyan - lökhárító és aláfutásgátló rendszerekben alkalmazható - abszorberrel töltött, több tagú-crashbox konstrukciót, amelynek az ütközés során jelentkező egységnyi deformációja a szerkezet belsejében két egységnyi abszorber zömülést hoz létre, növelve ezzel a szerkezet és ezáltal a jármű ütközésbiztonsági teljesítményét. Ezt az eddig energia elnyelőknél nem alkalmazott működési mechanizmust a deformáció áttétel fogalmával definiáltam.

Méréssel igazoltam, hogy az általam tervezett fémhabbal töltött szerkezet 66%-al több energiát képes elnyelni egységnyi elmozdulásra számítva, mint a tömbösített fémhabból kialakított abszorber, miközben a energia abszorpció/tömeg arány értéke is javult. Azonos geometriájú és dimenziójú, fémhabbal töltött crashbox szerkezethez viszonyítva a plasztikus deformációra jutó elnyelt energia hányad értéke 34,5 %-al nagyobb, miközben az alakváltozási stabilitás tekintetében is 35,3 %-os javulást értem el.

A mérésekkel igazoltam, hogy a szerkezet működésének köszönhetően a töltet és a héjszerkezet zömítése elkülöníthető, így a hagyományos vékonyfalú szerkezetekre jellemző kezdeti csúcserő és erő ingadozási probléma nem jelentkezik, vagyis függetleníthető a keresztmetszeti jellemzőktől. Ráadásul részleges zömítés esetén a fémhab töltet cserélhető, nem szükséges a teljes szerkezet cseréje [KJ126], [KJ127], [KJ133].

6 Az eredmények hasznosítási lehetősége

A disszertációmban bemutatott eredmények széles tudománykörben hasznosíthatók, hiszen több tématerületet érint. A kutatás első felében bemutatott zártcellás fémhabokkal végzett

laboratóriumi mérések eredményei hasznosak lehetnek nem csak az ütközésbiztonsággal foglalkozó kutatók számára, de értékes információt adhat más pl. anyagtudományban végzett kutatásokhoz. A kutatásom eredményei elsősorban járműipari vonatúak, de azok hasznosíthatók csomagolás technikában és objektum törésvédelemben is. A végeselemes analízis eredményei hasznosíthatók alakoptimalizációval foglalkozó jármű ipari kutatásokhoz, valamint gondolatébresztőként szolgálhatnak lökhárító és aláfutásgátló rendszerek fejlesztésénél. A disszertációban megfogalmazott gondolatokat és eredményeket ajánlom a közlekedésbiztonság területén dolgozó kutatóknak és mérnököknek. Az általam fejlesztett crashbox konstrukció hasznosítható személygépjárművek lökhárító rendszereinél, valamint személy- és teherszállító járművek aláfutásgátló rendszereinek optimalizációjához, ezért munkámat ajánlom gépjármű gyártói fejlesztői csoportoknak. Ráadásul a kutatás során szerzett tapasztalatok és eredmények beépíthetők a felsőoktatásba, például minta feladatok vagy esettanulmányok formájában, hozzájárulva ezzel a fiatalabb mérnökgenerációk színvonalasabb képzéséhez.

7 Irodalmi hivatkozások listája

- [1] ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) – *Vehicles in use in Europe 2023 report* , **2023** <https://www.acea.auto/files/ACEA-report-vehicles-in-use-europe-2023.pdf> (Letöltve : 2024.07.17.)
- [2] Dr. Tettamanti Tamás, Dr. Varga István - Közúti forgalomtechnikai paraméterek mérése és becslése, Egyetemi jegyzet – Széchenyi István Egyetem, https://jem.sze.hu/images/Dok/Kozuti_forgalomtechnikai_parameterek_merese_es_becslese.pdf (Letöltve : 2024.07.17.)
- [3] Paleti, R., Eluru, N., & Bhat, C. R. (2010). Examining the influence of aggressive driving behavior on driver injury severity in traffic crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 1839-1854.
- [4] Wang, J., Xu, W., Fu, T., Gong, H., Shangguan, Q., & Sobhani, A. (2022). Modeling aggressive driving behavior based on graph construction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 138, 103654.
- [5] Yu, D., Wu, Y., & Yang, N. (2016, March). Influence of aggressive driving behavior on traffic flow character in following flow. In *2016 Eighth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)* (pp. 339-346). IEEE.
- [6] Zhang, L., Zhang, S., Zhou, B., Jiao, S., & Huang, Y. (2021). An Improved Car-Following Model considering Desired Safety Distance and Heterogeneity of Driver's Sensitivity. *Journal of advanced transportation*, 2021(1), 6693433.
- [7] Magyar Közút - Közúti közlekedési balesetek statisztikai adatai, 2024, <https://www.kozut.hu/download/kozuti-kozlekedesi-balesetek-statisztikai-adatai/> (Letöltve : 2024.07.17.)
- [8] Malin, F., Norros, I., & Innamaa, S. (2019). Accident risk of road and weather conditions on different road types. *Accident Analysis & Prevention*, 122, 181-188.

- [9] KSH (Központi Statisztikai Hivatal) – Közúti gépjármű állomány Magyarországon https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ode006b.html (Letöltve:2024.07.18.)
- [10] Luo, G., Xue, P., & Sun, S. (2018). Investigations on the yield behavior of metal foam under multiaxial loadings by an imaged-based mesoscopic model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 142, 153-162.
- [11] Gioux, G., McCormack, T. M., & Gibson, L. J. (2000). Failure of aluminum foams under multiaxial loads. *International Journal of Mechanical Sciences*, 42(6), 1097-1117.
- [12] Szlancsik, A. (2021). Szintaktikus fémhabok rugalmas, és nyomóvizsgálatokkal meghatározható képlékeny tulajdonságai és modellezése (Doctoral dissertation, Budapest University of Technology and Economics (Hungary)).
- [13] Duarte, I., Vesenjak, M., & Krstulović-Opara, L. (2016). Compressive behaviour of unconstrained and constrained integral-skin closed-cell aluminium foam. *Composite Structures*, 154, 231-238.
- [14] Li C, Li C, Wang Y, Compressive behavior and energy absorption capacity of unconstrained and constrained open-cell aluminum foams, *Advanced Composites Letters* 29 (2020) 1-4
- [15] –Benouali, A. H., Froyen, L., Delerue, J. F., & Wevers, M. (2002). Mechanical analysis and microstructural characterisation of metal foams. *Materials science and technology*, 18(5), 489-494.
- [16] –Mankovits, T., Budai, I., Balogh, G., Gábora, A., Kozma, I., Varga, T., ... & Kocsis, I. (2014). Structural analysis and its statistical evaluation of a closed-cell metal foam. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 5(2), 135-143.
- [17] –Toan Thang, P., Nguyen-Thoi, T., & Lee, J. (2020). Mechanical stability of metal foam cylindrical shells with various porosity distributions. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 27(4), 295-303.
- [18] –Papadopoulos, D. P., Konstantinidis, I. C., Papanastasiou, N., Skolianos, S., Lefakis, H., & Tsipas, D. N. (2004). Mechanical properties of Al metal foams. *Materials letters*, 58(21), 2574-2578.
- [19] –Rayamajhi, M., Hunkeler, S., & Duddeck, F. (2014). Geometrical compatibility in structural shape optimisation for crashworthiness. *International Journal of Crashworthiness*, 19(1), 42-56.
- [20] –Perdana, M. A. P., Hapid, A., Muharam, A., Kaleb, S., Ristiana, R., & Budiman, A. C. (2023). Crashworthiness Enhancement: The Optimization of Vehicle Crash Box Performance by Utilizing Bionic-Albuca Spiralis Thin-Walled Structure.
- [21] KSH (Központi Statisztikai Hivatal) – Személyesüléses közúti közlekedési balesetek <https://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/stattukor/bal/bal1909m.pdf> (Letöltve : 2024.07.23.)
- [22] Miley Legal – Accident Injury Lawyers : The Most Common Injuries From Rear-End Collisions, <https://mileylegal.com/rear-end-collision-injuries/> (Letöltve : 2024.07.23.)
- [23] Wang, C., Chen, F., Zhang, Y., & Cheng, J. (2023). Analysis of injury severity in rear-end crashes on an expressway involving different types of vehicles using random-parameters logit models with heterogeneity in means and variances. *Transportation letters*, 15(7), 742-753.
- [24] Balcerak, J. C., Williams, J. S., Morris, A. T., Babcock, W., Polvino, R., Riger, P., & Dawley, R. E. (1972). Injury frequency and head restraint effectiveness in rear-end impact accidents (No. 720967). SAE Technical Paper.
- [25] Stigson, H., Ydenius, A., & Kullgren, A. (2006, September). Variation of crash severity and injury risk depending on collisions with different vehicle types and objects. In 2006

- international IRCOBI conference on the biomechanics of impact, Madrid, Spain (pp. 20-22).
- [26] Markogiannakis, H., Sanidas, E., Messaris, E., Koutentakis, D., Alpantaki, K., Kafetzakis, A., & Tsiftsis, D. (2006). Motor vehicle trauma: analysis of injury profiles by road-user category. *Emergency medicine journal*, 23(1), 27-31.
 - [27] Bono, G., Antonaci, F., Ghirmai, S., D'Angelo, F., Berger, M., & Nappi, G. (2000). Whiplash injuries: clinical picture and diagnostic work-up. *Clinical and experimental rheumatology*, 18(2; SUPP/19), S-23.
 - [28] Ratliff, A. H. C. (1997). Whiplash injuries. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 79(4), 517-519.
 - [29] Linder, A., Avery, M., Krafft, M., & Kullgren, A. (2003). Change of velocity and pulse characteristics in rear impacts: real world and vehicle tests data. Paper No. 285
 - [30] Linder, A., Avery, M., Krafft, M., Kullgren, A., & Svensson, M. Y. (2001). *Acceleration pulses and crash severity in low velocity rear impacts—real world data and barrier tests* (No. 2001-06-0253). SAE Technical Paper.
 - [31] McCleery, C. H., Limousis-Gayda, M., Rubio, E., Sie, M., & Hashish, R. (2022). The effect of Rear-End collisions on triaxial acceleration to occupant cervical and lumbar Spines: An analysis of IIHS data. *Accident Analysis & Prevention*, 174, 106761.
 - [32] Luo, Q., Chen, X., Yuan, J., Zang, X., Yang, J., & Chen, J. (2020). Study and Simulation Analysis of Vehicle Rear-End Collision Model considering Driver Types. *Journal of advanced transportation*, 2020(1), 7878656.
 - [33] Linder, A., Avery, M., Krafft, M., Kullgren, A., & Svensson, M. Y. (2001). *Acceleration pulses and crash severity in low velocity rear impacts—real world data and barrier tests* (No. 2001-06-0253). SAE Technical Paper.
 - [34] Jaspers, J. P. (1998). Whiplash and post-traumatic stress disorder. *Disability and rehabilitation*, 20(11), 397-404.
 - [35] Hutchinson, J., Kaiser, M. J., & Lankarani, H. M. (1998). The head injury criterion (HIC) functional. *Applied mathematics and computation*, 96(1), 1-16.
 - [36] Henn, H. W. (1998). Crash tests and the head injury criterion. *Teaching mathematics and its applications*, 17(4), 162-170.
 - [37] Wilde, K., Tilsen, A., Burzyński, S., & Witkowski, W. (2019). On estimation of occupant safety in vehicular crashes into roadside obstacles using non-linear dynamic analysis. In *MATEC Web of conferences* (Vol. 285, p. 00022). EDP Sciences.
 - [38] Walder, A. D., Yeoman, P. M., & Turnbull, A. (1995). The abbreviated injury scale as a predictor of outcome of severe head injury. *Intensive care medicine*, 21, 606-609.
 - [39] IIHS - Moderate Overlap Frontal Crashworthiness Evaluation Guidelines for Rating Injury Measures, 2014 September,
 - [40] Karapetkov, S., Dimitrov, L., Uzunov, H., & Dechkova, S. (2019). Identifying vehicle and collision impact by applying the principle of conservation of mechanical energy. *Transport and Telecommunication Journal*, 20(3), 191-204.
 - [41] Miskolci Egyetem – Fizika, egyetemi jegyzet https://web.uni-miskolc.hu/~www_fiz/pszota/Fizika_I_lev_Ozd/EA01.pdf (Letöltve : 2024.07.23.)
 - [42] Berta Miklós, Farzan Ruszlán, Giczi Ferenc, Horváth András – Fizika mérnököknek, egyetemi jegyzet, Széchenyi István Egyetem, 2006
 - [43] Kádár Lehel, Dr. Varga Ferenc, Köfalusi Pál – Közúti járműrendszerek szerkezetana, BME MOGI, 2014
 - [44] Tamny, S. (1992). The linear elastic-plastic vehicle collision (No. 921073). SAE Technical Paper.

- [45] ECF-European Cyclists' Federation - Passenger cars: Vehicle mass in running order by brand, <https://ecf.com/news-and-events/news/eus-motor-vehicles-need-go-diet> (Letöltve: 2024.07.31.)
- [46] Żuchowski, A. (2016). Analysis of the influence of the impact speed on the risk of injury of the driver and front passenger of a passenger car. *Eksplatacja i Niezawodność*, 18(3), 436-444.
- [47] Taylor, T. J. (2014). New generation advanced high strength steels for automotive hot stamping technologies. Swansea University (United Kingdom).
- [48] Kőfalusi Pál, Dr. Antal Ákos, Dr. Varga, Ferenc, Kádár Lehel, Dr. Fodor, Dénes – Járműfedélzeti elektronika, BME MOGI, 2014
- [49] –Mario Boreanaz - Development of crash box for automotive application, FCA-Fiat Chrysler Automobile, 2018
- [50] King, D. J., Siegmund, G. P., & Bailey, M. N. (1993). Automobile bumper behavior in low-speed impacts (No. 930211). SAE Technical Paper.
- [51] UN ECE R42 regulation, <https://unece.org/transport/documents/2021/02/standards/un-regulation-no-42-amend2> (Letöltve : 2024.08.30.)
- [52] IIHS (Insurance Institute for Highway Safety – Bumper Test Protocol (Version VI), April 2007, 1005 N. Glebe Road, Arlington, VA 22201
- [53] Nagwanshi, D. K., & Kulkarni, S. C. (2009). Light weight Solitary Beam Design to meet Low speed vehicle damageability and RCAR impact requirements (No. 2009-26-0007). SAE Technical Paper.
- [54] Research Council for Automobile Repairs - Information on the implimentation of RCAR crash standards in the German insurance vehicle rating system and information on AEB sys tems, AZT (RCAR) Bumper Test Front/ Rear, 2013 https://www.rcar.org/Papers/Procedures/CrashStandards_GermanRatingSystem.pdf (Letöltve : 2024.07.24.)
- [55] Farkas, L., Moens, D., Donders, S., & Vandepitte, D. (2012). Optimisation study of a vehicle bumper subsystem with fuzzy parameters. *Mechanical systems and signal processing*, 32, 59-68.
- [56] Per Emil Back - Deformation Behaviour of an Energy Absorber, Luleå University of Technology, 2010:037 CIV - ISSN: 1402-1617 - ISRN: LTU-EX--10/037--SE
- [57] Yusof, N. S. B., Sapuan, S. M., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., & Maleque, M. A. (2017). Design and materials development of automotive crash box: a review. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, 29(3), 129-144.
- [58] Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153, 106795.
- [59] Liu, Y., & Ding, L. (2016). A study of using different crash box types in automobile frontal collision. *Int. J. Simulation: System, Science and Technology*, 17(38), 21-1.
- [60] Sarmah, A., & Mukhopadhyay, J. Crashworthiness of Automobile Components Made from Aluminium Alloys.
- [61] Ciampaglia, A., Fiumarella, D., Niutta, C. B., Ciardiello, R., & Belingardi, G. (2021). Impact response of an origami-shaped composite crash box: Experimental analysis and numerical optimization. *Composite Structures*, 256, 113093.
- [62] Sorokin, A. E., Bulychev, S. N., & Gorbachev, S. I. (2021). Environmental impact of polymer composites. *Russian Engineering Research*, 41, 53-55.
- [63] Ma, Q., Zha, Y., Dong, B., & Gan, X. (2020). Structure design and multiobjective optimization of CFRP/aluminum hybrid crash box. *Polymer Composites*, 41(10), 4202-4220.

- [64] Borse, A., Gulakala, R., & Stoffel, M. (2023). Machine learning enhanced optimisation of crash box design for crashworthiness analysis. *PAMM*, 23(4), e202300145.
- [65] Ristiana, R., Mardiaty, R., Kaleg, S., Hapid, A., Muharam, A., Perdana, M. A. P., & Budiman, A. C. (2023, October). Machine Learning-Based Crashworthiness Optimization of Crash Box Geometry by Adding Corner Shape Reinforcement Variations. In *2023 17th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)* (pp. 1-6). IEEE.
- [66] Borse, A., Gulakala, R., & Stoffel, M. (2024). Development of a machine learning-based design optimization method for crashworthiness analysis. *Archives of Mechanics*, 76.
- [67] Warsiyanto, B. A. (2021). The Effect of Cross-section and Elliptical Hole Ratio on Crashworthiness Parameters of Crash-Box Structure. *Jurnal Teknologi Dirgantara*, 19(1), 1-14.
- [68] Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., & Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153, 106795.
- [69] Ma, Q., Zha, Y., Dong, B., & Gan, X. (2020). Structure design and multiobjective optimization of CFRP/aluminum hybrid crash box. *Polymer Composites*, 41(10), 4202-4220.
- [70] Wu, X., Zhang, S., & Shao, J. (2018). *Studies on impact performance of gradient lattice structure applied to crash box* (No. 2018-01-0119). SAE Technical Paper.
- [71] Fuganti, A., Lorenzi, L., Grønsund, A., & Langseth, M. (2000). Aluminum foam for automotive applications. *Advanced Engineering Materials*, 2(4), 200-204.
- [72] Marzbanrad, J. A. V. A. D., & Keshavarzi, A. (2014). A Numerical and experimental study on the crash behavior of the extruded aluminum crash box with elastic support. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11, 1329-1348.
- [73] Bilmez, S. A., & Taşdemirci, A. (2024, March). Experimental and Numerical Investigation of Energy Absorption Characteristics of a E-Glass/Epoxy Crash Box. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2725, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- [74] Dr. Égert János, Dr. Nagy Zoltán, Dr. Nagy Tamás, Aczél Ákos – Alkalmazott mérnöki rugalmasságtan, Széchenyi István Egyetem, 2013
- [75] Choi, S. Y., Hong, S. C., Park, S. K., & Jeong, S. W. (2022). Effects of diameter-to-thickness ratio on impact energy absorption capability of CFRP cylindrical crash box. *International journal of automotive technology*, 23(6), 1663-1671.
- [76] Memane, K., Mashalkar, A., & Kumar, P. (2023, February). A review thin-wall-tube energy-absorbing structure: crash-box. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2426, No. 1, p. 012060). IOP Publishing.
- [77] Segade, A., Bolaño, A., López-Campos, J. A., Casarejos, E., Fernandez, J. R., & Vilán, J. A. (2018). Study of a crash box design optimized for a uniform load profile. In *Proceeding of the 6th International Conference Integrity-Reliability-Failure*.
- [78] Pavlovic, A., & Fragassa, C. (2024). Investigating the crash-box-structure's ability to absorb energy. *International Journal of Crashworthiness*, 1-15.
- [79] Li, Q. F., Liu, Y. J., Wang, H. D., & Yan, S. Y. (2009, April). Finite element analysis and shape optimization of automotive crash-box subjected to low velocity impact. In *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation* (Vol. 2, pp. 791-794). IEEE.
- [80] Redhe, M., Nilsson, L., Bergman, F., & Stander, N. (2005, May). Shape Optimization of a Vehicle Crash-box using LS-OPT. In *Proceedings 5th European LS-DYNA users conference*, 5a-27.

- [81] Ingrassia, T., & Nigrelli, V. (2018). Shape optimization of high-energy absorbers. *INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, 9(5), 867-875.
- [82] Zhou, C. H., Wang, B., Luo, H. Z., Chen, Y. W., Zeng, Q. H., & Zhu, S. Y. (2017). Quasi-static axial compression of origami crash boxes. *International Journal of Applied Mechanics*, 9(05), 1750066.
- [83] Wu, J., Zhang, Y., Li, K., & Su, L. (2022). Origami-inspired metamaterials hierarchical structure with tailorable crushing behavior. *Construction and Building Materials*, 345, 128328.
- [84] Cui, Z., Qi, J., Tie, Y., Zou, T., & Duan, Y. (2023). Research on the energy absorption properties of origami-based honeycombs. *Thin-Walled Structures*, 184, 110520.
- [85] Dionisius, F., Rohmat, Y. N., Yusuf, M. M., Suliono, S., Haris, E., & Endramawan, T. (2020, May). An increase in crashworthiness capability using pyramid arrangement of the crush initiator. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 850, No. 1, p. 012049). IOP Publishing.
- [86] Dionisius, F., Istiyanto, J., Sumarsono, D. A., Prayogo, G., Baskoro, A. S., & Malawat, M. (2022). Modeling of crashworthiness criteria based on variation of hole as crush initiator in thin-walled square. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 19(1), 9487-9497.
- [87] Köseadağ, E. (2024). Response of trigger type to circular CFRP crash box energy absorption performance. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 123-130.
- [88] Harhash, M., Kuhtz, M., Richter, J., Hornig, A., Gude, M., & Palkowski, H. (2021). Trigger geometry influencing the failure modes in steel/polymer/steel sandwich crashboxes: Experimental and numerical evaluation. *Composite Structures*, 262, 113619.
- [89] Kumar, S. (2008). *A numerical study on the axial crush characteristics of thin walled rectangular tubes subjected to dynamic impact* (No. 2008-01-0242). SAE Technical Paper.
- [90] Zhang, X., Cheng, G., You, Z., & Zhang, H. (2007). Energy absorption of axially compressed thin-walled square tubes with patterns. *Thin-Walled Structures*, 45(9), 737-746.
- [91] Mamalis, A. G., Manolacos, D. E., Spentzas, K. N., Ioannidis, M. B., Koutroubakis, S., & Kostazos, P. K. (2009). The effect of the implementation of circular holes as crush initiators to the crushing characteristics of mild steel square tubes: experimental and numerical simulation. *International Journal of Crashworthiness*, 14(5), 489-501.
- [92] Altin, M., Halis, S., & Yücesu, H. S. (2017). Investigation of the effect of corrugated structure on crashing performance in thin-walled circular tubes. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 1(2), 1-7.
- [93] Yuan, L., Shi, H., Ma, J., & You, Z. (2019). Quasi-static impact of origami crash boxes with various profiles. *Thin-Walled Structures*, 141, 435-446.
- [94] Djamaluddin, F. (2024). Optimization of foam-filled crash-box under axial loading for pure electric vehicle. *Results in Materials*, 21, 100505.
- [95] Wang, G., Zhang, Y., Zheng, Z., Chen, H., & Yu, J. (2022). Crashworthiness design and impact tests of aluminum foam-filled crash boxes. *Thin-Walled Structures*, 180, 109937.

- [96] Özen, İ., Gedikli, H., & Aslan, M. (2023). Experimental and numerical investigation on energy absorbing characteristics of empty and cellular filled composite crash boxes. *Engineering Structures*, 289, 116315.
- [97] Magliaro, J., Altenhof, W., & Alpas, A. T. (2022). A review of advanced materials, structures and deformation modes for adaptive energy dissipation and structural crashworthiness. *Thin-Walled Structures*, 180, 109808.
- [98] Wan, X., Wang, W., Liu, J., & Tong, T. (2014). Estimating the sample mean and standard deviation from the sample size, median, range and/or interquartile range. *BMC medical research methodology*, 14, 1-13.
- [99] Gupta, M. K., & Singhal, V. (2022). Review on materials for making lightweight vehicles. *Materials Today: Proceedings*, 56, 868-872.
- [100] Noorsumar, G., Robbersmyr, K., Rogovchenko, S., & Vysochinskiy, D. (2020). *Crash response of a repaired vehicle-influence of welding UHSS members* (No. 2020-01-0197). SAE Technical Paper.
- [101] Kennedy, A. (2012). Porous metals and metal foams made from powders. *Powder Metallurgy*, 2, 31-46.
- [102] Cs. Kádár, P. Kenesei, „Napjaink korszerű anyagai: a fémhabok,” *Fizikai Szemle*, p. 279., 7-8. 2008.
- [103] Rajak, D. K., Gupta, M., Rajak, D. K., & Gupta, M. (2020). Applications of metallic foams. *An insight into metal based foams: processing, properties and applications*, 21-37.
- [104] Orbulov, I. N. (2017). *Alumínium és alumínium ötvözet mátrixú szintaktikus fémhabok gyártása és mechanikai tulajdonságai* (Doctoral dissertation, BME Gépészmérnöki Kar).
- [105] GÁBORA, A., BALOGH, G., THALMAIER, G., & MANKOVITS, T. (2023). Perlites alumínium habok gyártása, fizikai és mechanikai vizsgálata: Manufacturing, physical and mechanical testing of perlite reinforced. *Nemzetközi Gépészeti Konferencia–OGÉT*, 148-151.
- [106] Ramamurty, U., & Paul, A. (2004). Variability in mechanical properties of a metal foam. *Acta materialia*, 52(4), 869-876.
- [107] Kohári Dóra – Fémhabok, Pórusos anyagok, BME, 2019
- [108] Xia, X. C., Chen, X. W., Zhang, Z., Chen, X., Zhao, W. M., Liao, B., & Hur, B. (2013). Effects of porosity and pore size on the compressive properties of closed-cell Mg alloy foam. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(4), 330-335.
- [109] Hassanli, F., & Paydar, M. H. (2021). Improvement in energy absorption properties of aluminum foams by designing pore-density distribution. *Journal of materials research and technology*, 14, 609-619.
- [110] Behai Composite - <https://www.beihaicomposite.com/> (Letöltés : 2025.07.16.)
- [111] Wiener Csilla – Fémhabok szerkezeti és mechanikai vizsgálata, Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Anyagfizikai Tanszék Budapest, 2006
- [112] Anyagok világa – Fémhabok előállításának módszerei, http://anyagokvilaga.hu/tartalom/2001/apr/kenesei_kadar_rajkovits_lendvai.htm (Letöltve : 2024.07.26.)
- [113] Ramesh, R., Prasanth, A. S., Krishna, R., KoushikSundaram, K., MozhiSelvan, R. A., & Roy, A. (2020, December). Experimental and numerical analysis of compression behaviour of 3D printed metal foams. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1706, No. 1, p. 012213). IOP Publishing.

- [114] Thiagarajan, R., Sakthivel, G., Jegadeeshwaran, R., Lakshmipathi, J., & Kumar, M. S. (2023, September). Compressive deformation behavior of closed-cell aluminium syntactic foam. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2601, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- [115] Mysarh, A. M., & Abdelshafy, M. H. (2022, July). Quasi static compressive behavior of aluminum foam. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2299, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- [116] Fiedler, T., Movahedi, N., York, L., & Broxtermann, S. (2020). Functionally-graded metallic syntactic foams produced via particle pre-compaction. *Metals*, 10(3), 314.
- [117] International Standard – ISO 13314:2011 ISO-13314-2011.pdf (iteh.ai) (09.05.2024)

8 Publikációk

8.1 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [KJ118] Kertész, J., & Kovacs, T. A. (2024). Friction Investigation of Closed-Cell Aluminium Foam during Radial-Constrained Test. *Materials*, 17(13), 3344.
- [KJ121] Kertész, J., & Kovács, T. A. (2024). Finite element analysis regarding folding behaviour of different crashbox versions. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 105375.
- [KJ122] Kertész, J., Menyhárt, J., & Kovács, T. A. (2024). Investigation of Heavy Vehicle Underrunning Guard Focusing for the Energy Absorbing Issue. *Advances in Science and Technology*, 153, 79-87.
- [KJ123] Kertész, J., File, M., Nyikes, Z., Kovács, T. A., & Tóth, L. (2023). Al-Foam Compression Tests in Parallel and Serial Concepts. *Applied Sciences*, 13(2), 883.
- [KJ125] Kertész, J., & Kovács, T. A. (2022). Effect of the Radial Constrain for the Impact Energy-Absorbing Behaviour of the Closed-Cell Metal Foam. In *Vehicle and Automotive Engineering* (pp. 139-150). Cham: Springer International Publishing.
- [KJ126] Kertész, J., & Kovacs, T. A. (2022, August). Optimized metal foam-filled Crushbox structure to improve the impact energy absorption. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1246, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- [KJ127] Kertész, J. ; Kovács, T.A. Konstruktív megoldások az utolérési balesetek következményeinek csökkentésére INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT SCIENCES / MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 7 : 1 pp. 70-83. , 14 p. (2022)
- [KJ133] József, Kertész ; Tünde, Kovács Alacsony ütközési sebességre optimalizált többtagú crashbox szerkezet BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 5 : (2024)

8.2 A disszertációhoz kapcsolódó további tudományos közlemények

- [KJ119] Kertész, J., & Kovács, T. A. (2022, September). Importance of Vehicle's Unloaded Weight Optimisation: The Personal Injury Severity Point of View. In *IFIP International Conference on Human Choice and Computers* (pp. 303-314). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [KJ120] Kertész, József ; Kovács, Tünde Anna Anyag- és gyártástechnológiai trendek a korszerű járművek tömegoptimalizációja érdekében, Mérnöki Szimpózium a Bánkin

- Előadásai : Proceedings of the Engineering Symposium at Bánki (ESB 2023) Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem (2024) 367 p. pp. 280-285., 6 p.
- [KJ124] József, Kertész ; Tünde, Kovács Elektromos járművek passzív ütközésbiztonsági rendszerei BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 5 : 4 pp. 55-65. , 11 p. (2023)
- [KJ128] KERTÉSZ, József; KOVÁCS, Tünde A.; FILE, Máté; GÉRESI, Zoltán Effect of the Different Speed Compression on the Mechanical Behaviour of Aluminium Foam EUROPEAN JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING 7: 3 pp. 183-194., 12 p. (2022)
- [KJ129] Kertész, József; Kovács, Tünde Anna Elektromos járművek többlettömegének hatása a közlekedésbiztonságra, Mérnöki Szimpózium a Bánkin előadásai, Proceedings of the Engineering Symposium at Bánki (ESB 2022) Budapest, Magyarország: Óbudai Egyetem (2022) 312 p. pp. 187-193.
- [KJ130] Kertész, József; Kovács, Tünde Anna Gépjárművek ütközésbiztonsági megbízhatóságának alakulása a járművek korának előrehaladtával HADITECHNIKA 56: 5 pp. 45-51., 7 p. (2022)
- [KJ131] Kertész, József; Kovács, Tünde Anna Impact Energy Absorbtion by Active Braking MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK (EN) 16 pp. 36-42., 7 p. (2022)
- [KJ132] Kertész, József; Nyikes, Zoltán; Pinke, Péter; Kovács, Tünde Anna Investigation of the Energy Absorption of the Aluminium Foam JOURNAL OF PHYSICS-CONFERENCE SERIES 2315: 1 Paper: 012026, 6 p. (2022)