



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Doktori téziszfüzetei

Gépészmérnöki Kar Doktori Tanácsa

Írta:

Gombor Balázs

Járművázak számítógéppel segített tervezése a dinamikus igénybevételek figyelembevételével

című témakörből,
amellyel a Ph.D. fokozat elnyerésére pályázik

Témavezető: Dr. Varga László Prof. Emeritus az MTA doktora

Budapest
2008

A disszertáció bírálata és a védésről készült jegyzőkönyv a
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar Dékáni Hivatalában megtekinthető.

1. Bevezetés, a kutatás célkitűzései

A költségek csökkentése és a megbízhatóság növelése érdekében már a tervezés során hatékony módszereket és eljárásokat kell alkalmazni. Ilyen költség hatékony megoldás az úgynevezett virtuális prototípusgyártás. Az eljárás lényege, hogy a termék „életpályáját” szakaszokra bontja („a bölcsőtől - a sírig”), így már a tervezés fázisában lehetővé válik a termék vizsgálata az életpálya minden egyes szakaszára. Az eljárás csökkentheti, ideális esetben akár meg is szüntetheti a későbbi módosításokat, illetve azok számát. A virtuális prototípus alapját a járműgyártás területén széles körben elterjedt CAD rendszerek alkotják, melyek segítségével létrehozott geometriai modellek a többi modell alapjául is szolgálnak. A járműfejlesztésben kiemelkedő szerepet játszanak még a szerkezetek dinamikai vizsgálata, valamint azok szilárdsági és kifáradási számításai, melyek a virtuális prototípuson szintén elvégezhetők. Az ilyen jellegű vizsgálatok többnyire idő- és számításigényes feladatok. Az időráfordítás legnagyobb részét, így a költségeket is, a modellek létrehozása teszi ki. Bonyolult, összetett modellek esetében természetesen a számítás időigénye sem elhanyagolható, különösen akkor, ha azokat többször kell ismételni, pl. optimalizálás céljából.

A versenyképesség növelésének egyik leghatékonyabb eszköze a fejlesztési költségek csökkentése, melyben, mint már említésre került, a különböző számítások és az ezekhez szükséges modellek létrehozásának költségei számottevő részt képeznek. Logikusnak tűnik tehát a fejlesztési költségek csökkentését a modellek létrehozására fordított idő rövidítésével elérni. A csökkentés úgy érhető el, hogy a modellalkotás során olyan egyszerű modelleket hozunk létre, amelyek a pontosság és megbízhatóság szempontjából még megengedhetőek. Az alkalmazott egyszerűsítéseket, elhanyagolásokat úgy kell megválasztani, hogy az ezáltal a rendszerbe vitt hiba mértéke ne haladja meg a megengedett értéket.

További szakmai és gazdaságossági problémákat vetnek fel a dinamikai számítások kivitelezhetőségének kérdései is. A jármű-vázszerkezetek feszültségi állapotának feltárására jelenleg alkalmazott számítási módszerek vagy nagy számításigénnyel rendelkeznek, és így csak kis időtartományú számítások elvégzésére alkalmasak, vagy ha hosszú idejű számítások kezelhetők velük, akkor nem alkalmasak a részletes feszültségállapot feltárására. Léteznek ugyan eljárások az említett hátrányok kiküszöbölésére, azonban ezek is rendelkeznek hiányosságokkal, mint például csak lineáris anyagtörvény alkalmazására képesek.

A dolgozat elsődleges célja olyan – személyi számítógépen is használható – számítási eljárás létrehozása, amely alkalmas kis számítási-, tárhely kapacitás- és modellalkotási időigény mellett a jármű-vázszerkezet feszültségállapotának feltárására.

A dolgozat másik célja azon lineáris és nemlineáris hatásoknak, valamint paramétereknek a vázszerkezet feszültségi állapotára gyakorolt hatásának feltárása, amelyek a jármű dinamikai és szilárdsági számításaihoz használt modellek létrehozása során előtérbe kerülnek.

2. Irodalmi áttekintés

Járművek dinamikai vizsgálatának témakörében készült publikációk nagy számban találhatóak a szakfolyóiratokban és a konferencia-kiadványokban. Az autóbuszokat érintő témakörökben jelentős mennyiségű magyarnyelvű dolgozat is fellelhető, amelyek döntő többsége az 1970-es, 80-as években született. A járművek dinamikai számításaihoz használható analitikus – a klasszikus mechanika szerint létrehozott – modellek *Bosznay, Engels, Erz, Ilosvai, Jánosdeák, Komándi, König, Laib, Ludvig, Melegh, Mitschke, Nahlik, Szabó és Tímár*, a statikai számításokhoz készített modellek pedig lényegében többek között *Kokesch* és *Michleberger* publikációiban találhatóak. A nagyobb méretű, több szabadságfokkal rendelkező modellek számításához alkalmazott numerikus (mátrix) módszerekkel *Fekete, Háy, Lehoczky, Michelberger, Nádori, Páczelt, Popper, és Samu* dolgozatai foglalkoznak. Annak ellenére, hogy a bennük ismertetett módszerek egy része ma is használható, a számítógépek és a korszerű numerikus módszerek széleskörű elterjedésével, illetve a járművekkel, ezen belül is elsősorban azok vázszerkezetének szilárdsági- és kifáradási tulajdonságaival szemben támasztott igényeknek már nem felelnek meg.

A korszerű, numerikus megoldásokat alkalmazó, így a modern, többtestdinamikai és végeeselemes módszereken alapuló járműdinamikai és vázszerkezeti szilárdsági számítások témakörében: *Ambrosio, Bathe, Bergamini, Braccisi, Concalves, Conle, Craig, Croscheck, Errikson, Garcia, Hegazy, Ibrahim, Karlsson, Kepka, Kim, Király, Kuti, Lee, Medepalli, Mihálffy, Pan, Petrovics, Schwertassek, Srikatan, Szőke, Valásek, Vincze-Pap, Zhang, és Yim* publikációit érdemes kiemelni. A dolgozatokban a jármű-vázszerkezetek feszültségi állapotának feltárására alkalmazott számítási módszerek azonban vagy nagy számításiigénnyel rendelkeznek, vagy az alkalmazott egyszerűsített szerkezeti modell miatt csak globális feszültségállapot feltárására alkalmasak. A dolgozatok néhány kivételtől eltekintve nem, vagy csak részben foglalkoznak a jármű dinamikai és szilárdsági számításaihoz használt modellek létrehozása során előtérbe kerülő lineáris- és nemlineáris hatásokkal, illetve ezeknek a dinamikai számítások eredményeire gyakorolt hatásaival.

A hosszúidejű, kis lépésközű dinamikai számításokra, és a hozzájuk kapcsolódó, a járműfelépítmény részletes feszültségállapotának feltárására alkalmas eljárást, valamint a jármű dinamikai és szilárdsági számításaihoz használt modellek létrehozása során előtérbe kerülő lineáris és nemlineáris hatásokat, illetve ezeknek a dinamikai számítások eredményeire gyakorolt hatásait jelen dolgozat szerzőjének publikációi ismertetik.

3. Az elvégzett számítások, eredmények összefoglalása

3.1. Új összetett járműdinamikai modellezési eljárás kidolgozása

A gyakorlatban alkalmazott járműdinamikai modellezési eljárások, bevezetésben említett hátrányainak kiküszöbölésére új modellezési eljárást dolgoztam ki, melynek folyamatábrája 1. ábrán látható. A módszer, amelynek lényege, hogy szétbontja a vizsgálatot dinamikai- és feszültség számításra (tranziens végelem analízis), a többtestdinamikai elven alapuló dinamikai számítások kibővítése, mely egyesíti a különböző modellezési eljárások előnyeit.

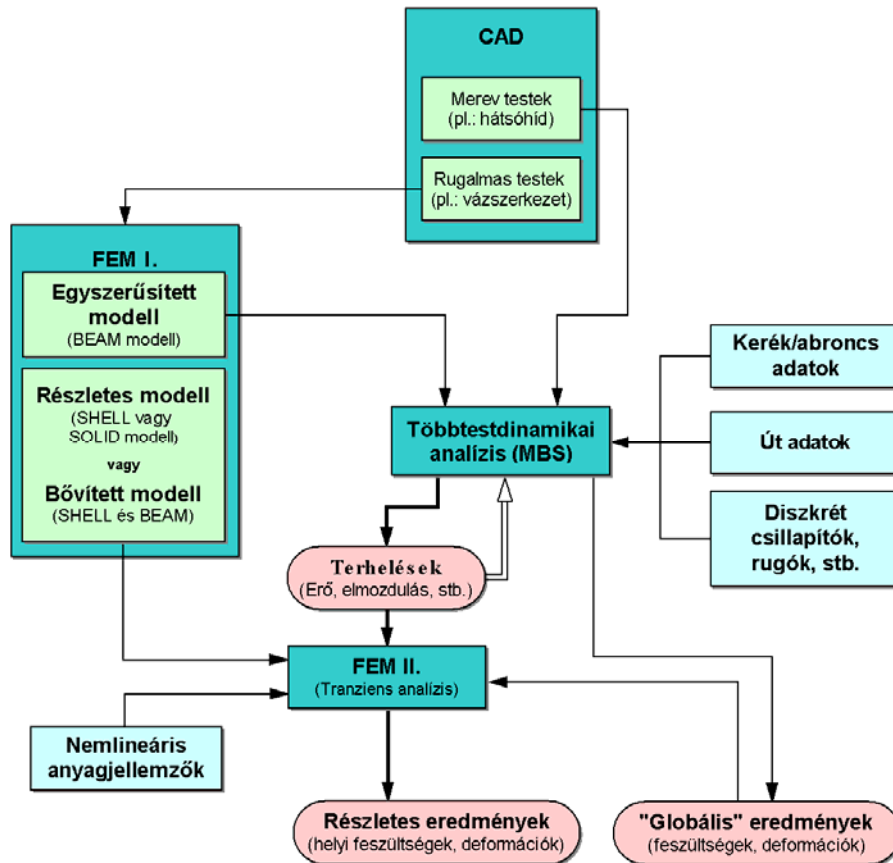
Az elsődleges előny a meglévő eljárásokkal szemben abban mutatkozik, hogy a többtestdinamikai analízishez egyszerűsített végelem modellt alkalmaz (1. ábra: FEM I.). Az egyszerűsített modellel végzett dinamikai analízis gyorsabban végrehajtható, mint az alszerkezet- (*substructuring*), vagy a részmodell (*submodeling*) technikával bővített modellel végzett számítások. A modellt viszonylag könnyen és gyorsan létre lehet hozni és a későbbi, transziens végelelemes számításoknál használt modell ennek a modellnek a lokális bővítésével (részmodell technika), minimális időráfordítással kialakítható.

Az új eljárás második előnye, hogy lehetőséget biztosít a dinamikai analízis (1. ábra: MBS) eredményeinek (pl. gyorsulások, sebességek, elmozdulások, stb.) felhasználásával a dinamikai modell ellenőrzésére, illetve iteratív módon történő javítására, módosítására. Az eljárás akkor is hasznos lehet például, ha a vizsgált jármű már hosszabb-rövidebb ideje üzemel, így az egyes kopásnak kitett elemek karakterisztikája (pl. lengéscsillapító) eltérhet az új elem karakterisztikájától és a járműbe beépített elemeknek a karakterisztika meghatározásához való kiszereles nem megoldható. Az ilyen esetekben az ellenőrző dinamikai mérések során regisztrált, fentebb említett paraméterek jó lehetőséget kínálnak a dinamikai modell visszacsatolás révén történő meghatározására. A gyorsulások, sebességek, és elmozdulások használata esetén a számításokat viszonylag egyszerűen el lehet végezni, (szükség esetén többször lehet ismételni), míg a vázszerkezetben ébredő feszültségek, nyúlások visszacsatoláshoz történő alkalmazása a hozzá szükséges részletességű modell nagy számítási igénye miatt nem célszerű.

Az új eljárás harmadik előnye a részletes feszültség-meghatározás céljából végzett transziens végelem analízis (1. ábra: FEM II.) beiktatásából adódik. Az elsődleges egyszerűsített modell lokális bővítésével lehetőség nyílik az időben változó feszültségek részletes meghatározására. A többtestdinamikai analízis eredményeként kapott vázszerkezetre ható erők, nyomatékok, gyorsulások, szöggyorsulások, stb. a második végelem modellen, mint terhelések alkalmazhatók. Azáltal, hogy a feszültségeket egy másodlagos végelelemes számítással határozzuk meg, lehetőség kínálkozik arra, hogy a többtestdinamikai analízis által meghatározott „globális eredmények” alapján kiválasszuk azokat az időtartományokat, amelyen belül a feszültségek meghatározását el kívánjuk végezni. Nem szükséges tehát a végelelemes számítást a többtestdinamikai analízis egész időtartományában elvégezni, elegendő csak a kívánt időtartományban, így jelentős számítási idő- és tárhelykapacitás takarítható meg. Az időtartomány

szűkítése az előbbi okok miatt lehetővé teszi, a vázszerkezet több csomópontjának részletes lokális geometriai kidolgozását, adott esetben akár a vázszerkezet nagyobb részének, esetleg a teljes vázszerkezet részletes geometriai modelljével történő számítását.

Az új eljárás negyedik előnye szintén a második végelem analízis alkalmazásából adódik. A beiktatott tranziens végelemes vizsgálat lehetővé teszi a nemlineáris anyagmodell alkalmazását a részletes feszültség-meghatározás során, melyet számos esetben nem lehet figyelmen kívül hagyni.



1. ábra: A javasolt modellezési eljárás folyamatábrája

3.2. A jármű dinamikai viselkedését befolyásoló lineáris és nemlineáris hatások vizsgálata

A járművek dinamikai modelljének létrehozása bonyolult és összetett feladat, ennek megfelelően a szükséges részletességű modell létrehozását számos tényező befolyásolja. Az alkalmazott modellek összetettségét és részletességét nagymértékben behatárolják az elérhető anyagi-, számítógépes hardver-, szoftverforrások és a rendelkezésre álló idő. Ezért a számításokhoz olyan modellt kell létrehozni, amely biztosítja a vizsgálatok kellő pontosságát és megfelel a fentebb említett elvárásoknak. A modell részleteinek pontosításával általában

növelhető a kapott eredmények minősége, azonban egy ponton túl a modell építésére fordított idő és energia már nem térül meg, mivel az eredmények pontosságának növekedése egyre csökken. A modellezés időigényének jelentős részét (így a költségeknek is) a modell létrehozása képezi. Bonyolult, összetett modellek esetében a számítás időigénye sem elhanyagolható, különösen akkor, ha a számításokat többször ismételni kell (pl. optimalizálás céljából).

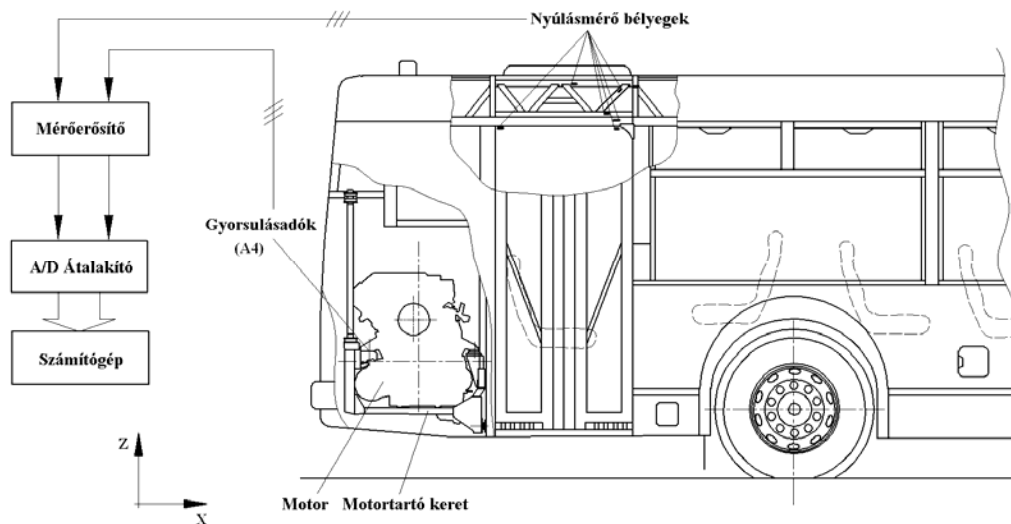
A versenyképesség növelésének egyik hatékony eszköze a fejlesztési költségek csökkentése, amelyben, mint említettem a különböző vizsgálatok és a szükséges modellek létrehozásának költségei jelentős részt képeznek. Logikusnak tűnik tehát a fejlesztési költségek csökkentését a modellek létrehozására fordított idő lerövidítésével elérni, amely úgy valósítható meg, hogy a modellalkotás során olyan modelleket hozunk létre, amelyek számítás szempontjából a még megengedhető legegyszerűbbek. Az alkalmazott egyszerűsítéseket, elhanyagolásokat úgy kell megválasztani, hogy az általuk a rendszerbe bevitt hiba már megengedett legyen. A modellek létrehozásánál és a számítások elvégzésénél azonban azért, hogy a számításokból kapott eredményeket értékelni lehessen, illetve azok pontosságát meg lehessen becsülni, ismerni kell a modell létrehozásakor alkalmazott egyszerűsítéseknek és elhanyagolásoknak a számítások végeredményére gyakorolt hatását. A következőkben a modellépítési egyszerűsítések és a számítások egy autóbusz példáján keresztül kerülnek bemutatásra, így elsősorban autóbuszok esetében alkalmazhatók, de megfelelő megfontolásokkal és adaptációval más járművekre is használhatók, (pl. teherautókra, vonatokra, személygépjárművekre, stb.).

Az értekezésben a járműmodell létrehozása során alkalmazott, illetve alkalmazható egyszerűsítéseknek a dinamikai analízis végeredményére gyakorolt hatásainak vizsgálatára kerül sor, amelyek a modellépítés szempontjából a legszignifikánsabbak, és a szükséges modellépítési- és számítási időre gyakorolt hatásuk a legjelentősebb. Ezek a lineáris és nemlineáris hatások a következők: A vázszerkezet geometriai modelljének részletessége, illetve a végeselemes diszkretizációjának mértéke. A járművön alkalmazott erősen nemlineáris jelleggörbájű diszkrét csillapítók és rugók karakterisztikájának közelítése. A vázszerkezeten elhelyezett koncentrált tömegű szerelvények, gépészeti berendezések tömegének, tömegeloszlásának figyelembevétele. A többtestdinamikai megközelítés esetén a rugalmas testek tömegmátrixában megjelenő inercia kapcsolótagok elhanyagolásának, illetve figyelembevételének hatása. Lokálisan nemlineáris anyagmodell alkalmazhatóságának vizsgálata. Végül az ablaküveg – ragasztóréteg – vázszerkezet kapcsolatát leíró modell vizsgálata.

3.3. Kísérleti mérések

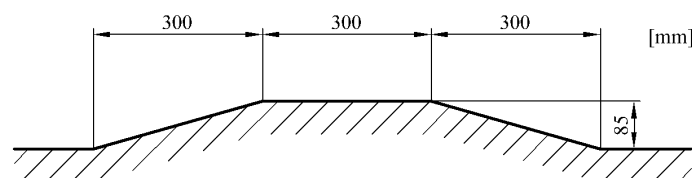
A kidolgozott újszerű számítási módszer helytállóságát és megbízhatóságát valamint az előzőekben ismertetett lineáris- és nemlineáris hatások közelítésének ellenőrzését valós járműn végzett mérések-, és a számítási modellek eredményeinek összehasonlításával igazoltam.

A mérések során a vázszerkezet azon pontjaira (összesen *13 helyen*), ahol az üzemeltetéskor szerzett tapasztalatok kifáradás jeleit mutatták, nyúlásmérő bélyegeket ragasztottunk. A mérőrendszert kiegészítettük a motortartó-, valamint a hűtőtartó kereten elhelyezett piezoelektromos gyorsulásdókkal a függőleges lengésgyorsulások meghatározása céljából. A mért elektromos jeleket erősítés és digitalizálás után számítógépen rögzítettük. A mérés vázlatos körvonalrajzát a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: A mérés vázlatos körvonalrajza

A modellek és a számítási módszer ellenőrzését egy pontosan definiálható, és könnyen legyártható, determinisztikus jellegű útgerjesztést biztosító útkadályon valósítottuk meg, amelynek kialakítás és méretei a 3. ábrán kerül bemutatásra.



3. ábra: Az alkalmazott műakadály

A járművek esetében a sztochasztikus útgerjesztések is fontos szerepet játszanak, ezért a számítások során a járműmodelleket sztochasztikus útgerjesztés esetére is megvizsgáltam.

3.4. A számításokhoz használt modellek leírása

A numerikus vizsgálatokhoz természetesen a problematikus szerkezet kiválasztása, a konkrét szerkezetet meghatározó paraméterek (anyag – alak – terhelés, stb.) megállapítása szükséges. Választásom az IkarusBus Rt. 412 típusú, alacsonypadlós autóbuszára esett. A kiválasztást az motiválta hogy ezen a típuson az üzemeltetés során a hátsó ajtó környezetében a kifáradás jelei mutatkoztak. Ehhez igazodva a dinamikus terheléssel járó gyorsulások és nyúlások mérése is ezen a típuson történt.

Az autóbusz dinamikai számításait a 3.1. fejezetben ismertetett számítási eljárás szerint végeztem. A jármű dinamikai viselkedését befolyásoló közelítések és elhanyagolások hatásainak vizsgálatára a jármű dinamikai modelljéből összesen 16 változat készült, amelyeket 1. táblázat ismertet.

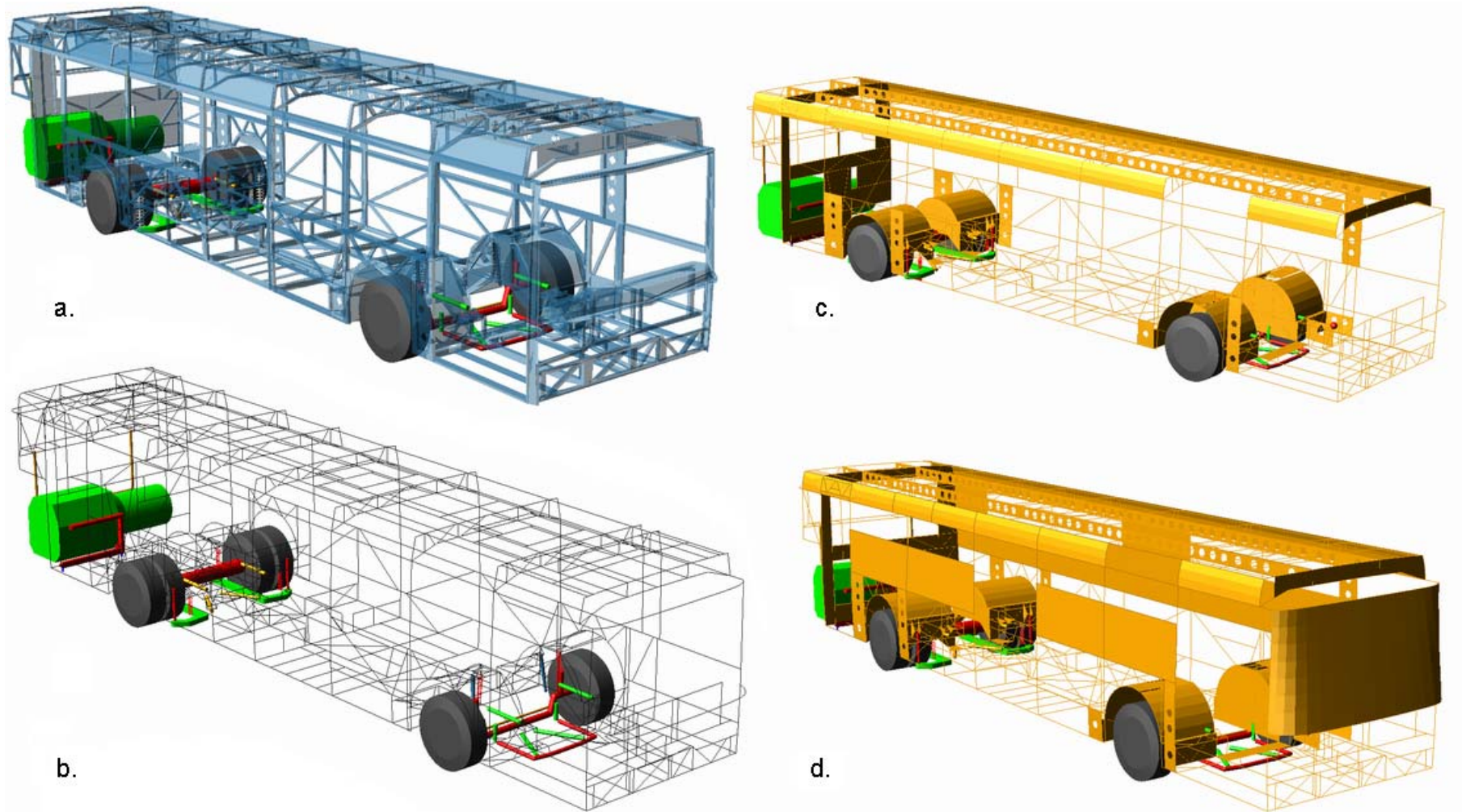
1. táblázat: A számításokhoz használt modellek tulajdonságai a 3.1. fejezetben ismertetett számítási módszernek megfelelően

Modellek	FEM I. modell							Többszintű dinamikai modell (MBS)							FEM II. modell	
	A vázszerkezet tömegeloszlásának közelítése				A vázszerkezet-modell részletessége			Diszkrét elemek karakterisztikája			Inercia kapcsolótagok figyelembevétele				Lineáris anyagmodell	Nemlineáris anyagmodell
	Egyenletes sűrűség	Részegységenként eltérő sűrűség	Üvegezés figyelembevétele	Koncentrált tömeg figyelembevétele	Merev felépítmény	Gerenda felépítmény	Lemezreléssel bővített felépítmény	Üvegezéssel bővített felépítmény	Lineáris közelítés	Bilineáris közelítés	Szplájnos közelítés	17	13, 17	16, 17		
Mo-01			X			X				X					X	X
Mo-02			X				X			X					X	X
Mo-03			X					X		X					X	X
Mo-04			X					X	X						X	X
Mo-05			X					X		X					X	X
Mo-06			X					X		X	X				X	
Mo-07			X					X		X		X			X	
Mo-08			X					X		X			X		X	
Mo-09			X					X		X			X		X	
Mo-10	X							X		X					X	X
Mo-11		X						X		X					X	X
Mo-12				X				X		X					X	X
Mo-13			X					X		X					X	X
Mo-14			X*		X			X							X	
Mo-15			X*		X				X						X	
Mo-16			X*		X					X					X	

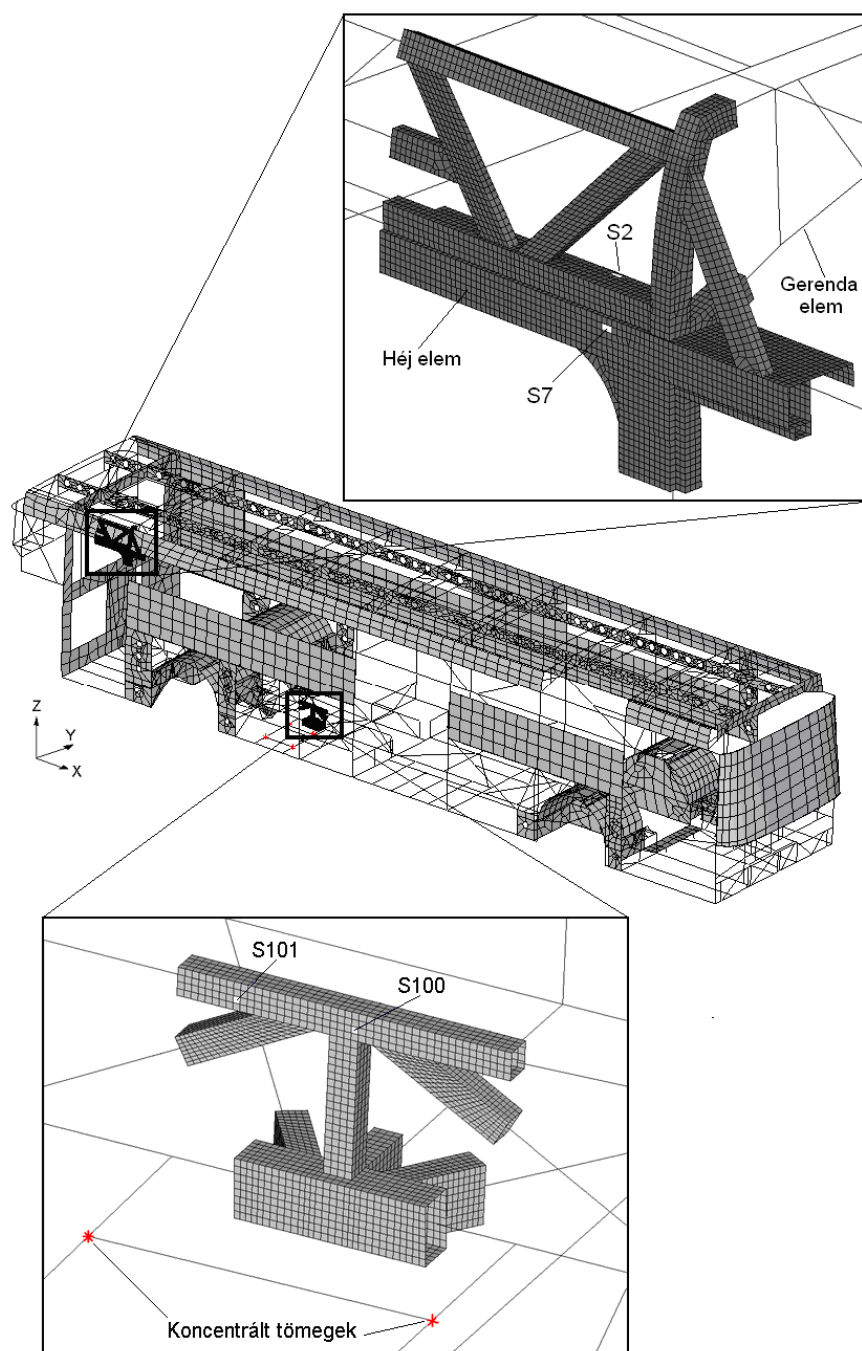
A számításokhoz elkészítettem a vizsgált jármű többtestdinamikai (MBS) modelljeit. A modellépítés során, a nagy merevséggel rendelkező elemeket (mellső- és hátsó híd, hosszlegrugók, nyomtávrudd, és a légrugót tartó úgynevezett „C keret”) merev testként modelleztem. A részletes statikai számításokhoz, a pontosabb tehetetlenségi adatok meghatározásához létrehoztam a felépítmény teljes héjszerkezetű geometriai modelljét (4.a. ábra) és a modelltől származó tehetetlenségi adatokat használtam a merev felépítményű modellel történt dinamikai számítások és geometriai modellt a felépítmény reprezentációja során. A vázszerkezet (a Mo-14 ÷ Mo-16 modellek kivételével), mint rugalmas test vettem figyelembe. A rugalmas felépítményből három eltérő részletességű modell készült. Az első felépítmény modell esetében, amely a 4.b. ábrán látható, csak a vázszerkezetet képező zártszelvényeket vettem figyelembe. A zártszelvények végeeselemes reprezentációjához gerenda típusú elemeket használtam. A második rugalmas felépítmény modell az első továbbfejlesztése, amelynél a lemezelés merevítő hatását is figyelembe vettem (4.c. ábra). A lemezek végeeselemes diszkretizálásához héj típusú elemet használtam. A ragasztott üvegezés merevítő hatásának dinamikai számítások eredményeire gyakorolt hatásának vizsgálatára egy harmadik rugalmas modellt alkalmaztam, amelyhez a második rugalmas modell ablakokkal történő kibővítése révén jutottam (4.d. ábra). Az üveget és a ragasztóréteget héj elemekkel modelleztem. A tömegrészletesség modellezéséhez az üvegezéssel bővített felépítmény modellt négy különböző tömegelosztással készítettem el (lásd: 1. táblázat). Az első esetben a felépítmény teljes tömegét egyenletesen szétosztottam a vázon. A második esetben a felépítmény szerkezeti egységeinek (fenékváz, oldalvázak, tető, mellső- és hátfal) sűrűségét úgy számoltam, hogy a részegységekhez tartozó gépészeti és elektromos berendezések (vezetékek, fűtőradiátorok, stb.) tömegét osztoztam egyenletesen szét a részegységeken. A harmadik esetben az üvegezést valós sűrűséggel vettem figyelembe, és a részegységek sűrűségét a maradék tömeg második modellnél alkalmazott elosztásával határoztam meg. A negyedik esetben a nagy koncentrált tömegeket tömegem segítségével vettem figyelembe, és a felépítmény maradék tömegét a harmadik modellnek megfelelően osztoztam szét. A dinamikai analízisek elvégzéséhez a rugalmas felépítmény modelljeinek méretét modális kondenzációval csökkentettem. A determinisztikus gerjesztésű modellek esetében a többtestdinamikai járműmodellt Fiala típusú kerékmodellel egészítettem ki.

A vázszerkezetben ébredő feszültségek meghatározásához a többtestdinamikai számítások eredményeit alapul véve elvégeztem a vizsgált jármű felépítményének tranziens végeeselemes vizsgálatát (FEM II.). A számításokhoz az üvegezett modellt alapul véve a részmodell technika (*substructuring*) alkalmazásával új végeeselem modellt alkottam. A modell azon részén ahol a nyúlásméréseket végeztük (az autóbusz hátsó ajtaja feletti rész), és ahol nagy koncentrált tömeg helyezkedik el (üzemanyagtartály), a vázszerkezet összetettebb környezetét részletes geometriai modellel bővítettem. A végeeselemes diszkretizáció során, a gerenda elemek helyett héj elemeket alkalmaztam. A számításokkal feltártam a vázszerkezet vizsgált pontjainak feszültségi állapotát.

A modellekkel történő dinamikai és tranziens végeeselem számításokat az Mo-06 ÷ Mo-13 modellek kivételével sztochasztikus gerjesztés esetére is elvégeztem.



4. ábra: Az autóbusz különböző részletességű többtestdinamikai modelljei
(a. merev felépítményű, b. rugalmas felépítményű, c. lemezelés merevítő hatását figyelembe vevő,
d. üvegezés merevítő hatását figyelembe vevő)

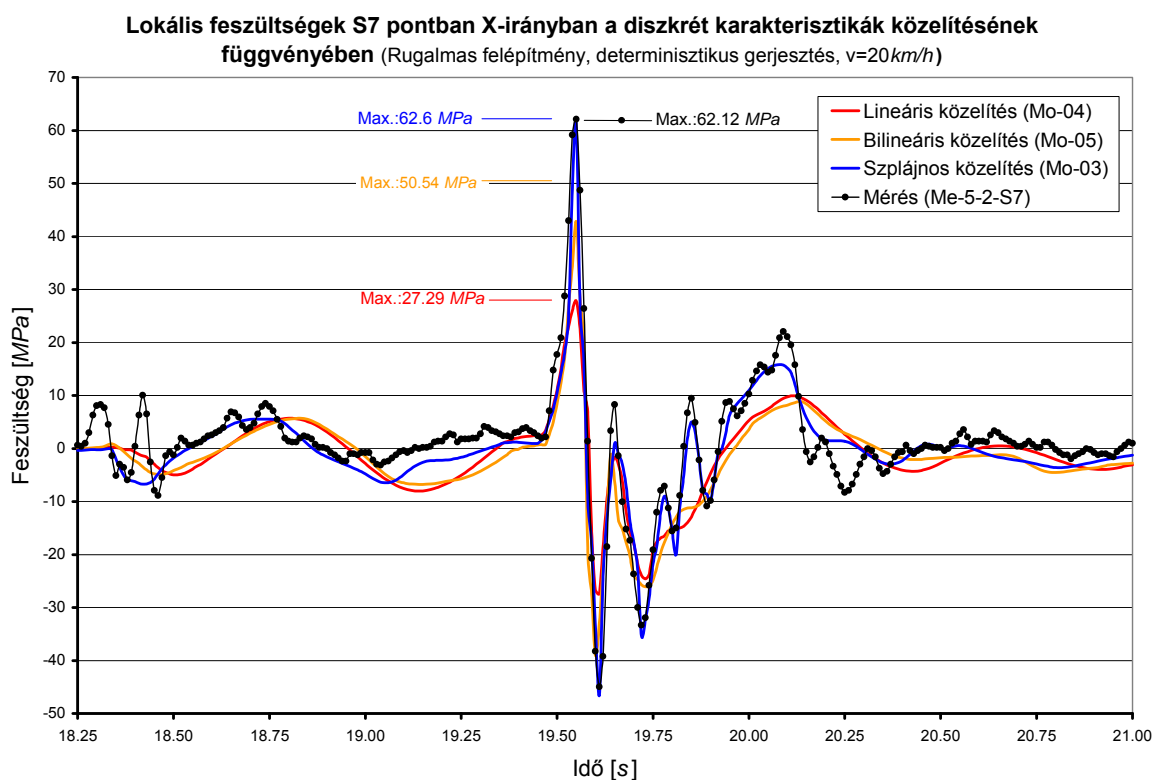


5. ábra: A vizsgált autóbusz vázszerkezetének végeselem modellje (FEM II.) a hátsó ajtó és az üzemanyagtartály környezetében kialakított részmodellel a feszültségek részletes meghatározásához.

3.5. A számítások eredményei

A vizsgálatok eredményeit a jármű vázszerkezetének egyes pontjaiban ébredő feszültségek és a pontok gyorsulásai alapján értékeltem ki. A számított és mért eredmények összehasonlításának egy példája a 6. ábrán látható.

Autóbuszok vázszerkezetének geometriai részletessége kapcsán megállapítottam, hogy a többtestdinamikai analízis során rugalmas felépítményű modell használata szükséges, valamint a rugalmas felépítmény esetén a lemezelést és a ragasztott üvegezést is figyelembe kell venni a megfelelő pontosság elérése érdekében. A vázszerkezethez kapcsolódó koncentrált tömegek esetén megállapítottam, hogy az egyszerűbb dinamikai számításokhoz elegendő a vázszerkezet részegységeire egyenletesen elosztott tömegek modellezése, az üvegezés és a koncentrált tömegek modellezése nem szükséges, ha ezeknek vázszerkezethez történő kapcsolódási pontjaitól kellően távoli keresztmetszetek feszültségállapotának a feltárása a cél.



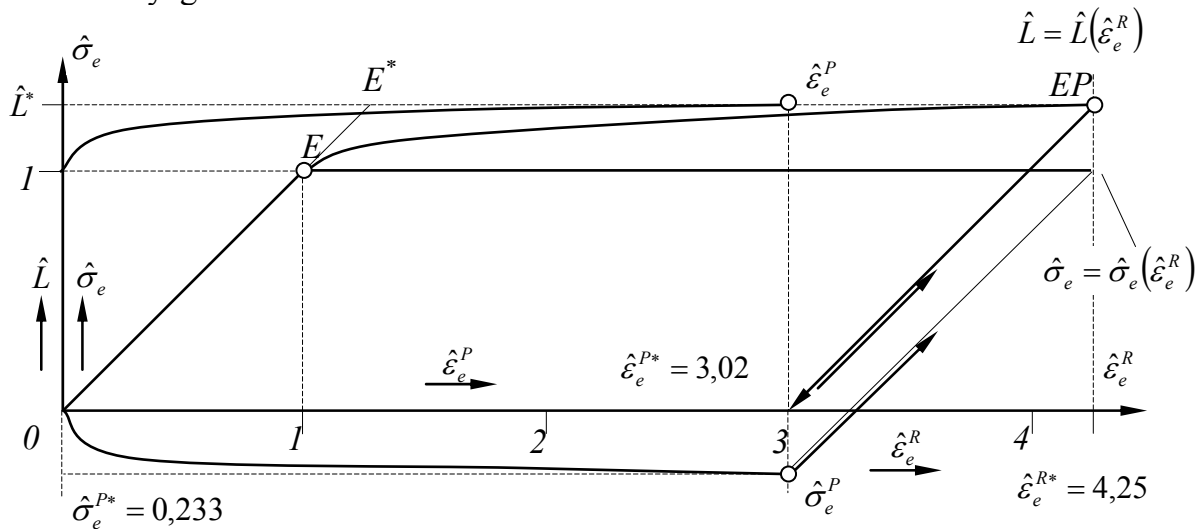
6. ábra: Az S7 pontban számított és mért X-irányú feszültségek a diszkrét csillapítók és rugók karakterisztikájának közelítése függvényében rugalmas felépítmény esetén

A tömegmátrix invariánsának figyelembevételénél az egyes modellek eltérései minimálisra adódtak, a kapcsolótagok által leírt hatásokból (pl. a véges nagy forgásának a translációs mozgásra gyakorolt hatása) adódó deformációk a vázszerkezet hajlító igénybevételéhez képest minimális változást okoznak, ebből következően az ébredő feszültségre való hatásuk is kisebb. Mivel azonban a számítások elvégzése során szerzett tapasztalatok azt mutatták, hogy a többi

invariáns figyelembevétele sem okoz jelentős számításiidő-növekedést (a modális kondenzáció miatt), így a számítások során az összes invariáns figyelembevétele ajánlott.

Diszkrét elemek karakterisztikája közelítésének a vizsgálatából megállapítottam, hogy a karakterisztikák közelítésére a lineáris és a bilineáris közelítés nem alkalmas, a diszkrét elemek karakterisztikájának leírásához szplájnos, vagy magasabb fokszámú polinommal történő leírás ajánlott. Az elvégzett számítások és a mérések segítségével igazoltam, hogy a gyakorlatban alkalmazott ablaküveg – ragasztóréteg – vázszerkezet kapcsolatát leíró végeselemes modell dinamikai feladatok során is alkalmazható, és az ablaküveg figyelembevétele a számítások során a kapott eredményeket pontosítja. További fontos megállapítást tettem annak kapcsán, hogy a modellalkotás során a felépítmény rugalmas, illetve merev testként történő figyelembevétele a számított feszültségek pontosságára nagyobb hatással van, mint a diszkrét elemek karakterisztikájának közelítése.

Eljárás mutattam be, amely alkalmas a globális vizsgálat alapján kiválasztott feszültséggyűjtő keresztmetszetek gyenge pontjának alakváltozási- és feszültségi állapotának (7. ábra) részletes feltárására, a maradó és ébredő valódi nyúlások és feszültségek meghatározására. Számításokkal igazoltam, hogy nemlineáris anyagmodell lokális alkalmazható a feszültség-meghatározás során, és az alkalmazásával számított feszültségek pontosabban közelítik a valós értékeket, mint lineáris anyagmodell esetén.



7. ábra: A bővített vázszerkezet modell egy pontjának (S11) állapotdiagramja

A kapott eredmények tekintetében megállapítottam, hogy a vázban ébredő feszültségek meghatározásához, mivel nem okoz jelentős számításiigény növekedés, viszont a feszültségcsúcsok, illetve a feszültségátrendeződés tekintetében jelentős javulást eredményez – olyan esetekben, ahol a vázszerkezet egyes keresztmetszeteiben folyáshatár közeli feszültségállapot ébred – lokálisan nemlineáris anyagmodellt is alkalmazó végeselem modellek használata célszerű.

4. Tézisek

1. Dinamikai modellezési eljárást dolgoztam ki zártszelvényekből (prizmatikus rudakból) felépített autóbusz-vázszerkezetekben ébredő feszültségek feltárására. Az egyszerűsített rugalmas vázszerkezet modális kondenzációval történő létrehozásából, a jármű rugalmas felépítményű modelljének többtestdinamikai analiziséből, valamint a lokálisan részletes geometriával bővített egyszerűsített vázszerkezet-modell tranziens szilárdsági végelelemes vizsgálatából álló eljárással a vázszerkezetben ébredő feszültségek meghatározása a jelenleg használt, csak végelelemes számításra épülő módszerekhez képest a számítási idő egy nagyságrenddel csökkenthető. [GB-1]
2. Egy valós autóbusz esetében létrehoztam annak merev testekből felépülő futóművű, valamint gerenda elemekből, és lokálisan héjelemekből álló vázszerkezetű, különböző részletességű számítási modelljeit, amelyek alkalmasak a jármű-vázszerkezet vizsgált csomópontjainak feszültségi állapot meghatározására. A modellek segítségével részletesen feltártam a jármű vizsgált csomópontjának feszültségi és alakváltozási állapotát és ezek időbeni változását. Mérési eredmények felhasználásával igazoltam a számítási eljárás és a modellek gyakorlati használhatóságát és megbízhatóságát. [GB-1, GB-2, GB-13]
3. A vizsgált autóbusz többtestdinamikai modelljét alkotó elemek esetén megvizsgáltam a modell létrehozása során alkalmazott közelítéseknek és elhanyagolásoknak a vázszerkezet dinamikai viselkedésére gyakorolt hatását:
 - 3.1. Meghatároztam a többtestdinamikai számítások során használt eltérő geometriai részletességű felépítménymodelleknek a vázban ébredő feszültségekre gyakorolt hatását. A számítások eredményeiből megállapítottam, hogy a többtestdinamikai számítások során a részletes, a lemezelés és a ragasztott üvegezés merevítő hatását is magába foglaló modell szolgáltatja a mérési eredményekkel legjobban megegyező eredményt. [GB-1]
 - 3.2. A járműfelépítmény tömegeloszlás vizsgálatának eredményéből megállapítottam, hogy a csomópontok feszültségi állapotának vizsgálatához nem szükséges az üvegezés és a koncentrált tömegek modellezése, ha ezek a vizsgált csomóponttól távol helyezkednek el.
 - 3.3. A rugalmas felépítmény tömegmátrixának közelítése kapcsán megállapítottam, hogy a többtestdinamikai számítások során a mátrix főátlóján kívüli invariánsok figyelembevételének, illetve elhanyagolásának a felépítmény feszültségállapotára gyakorolt hatása elhanyagolható, tekintettel arra, hogy figyelembevételük a számított feszültségekhez viszonyítva két nagyságrenddel kisebb eltérést okoz.

- 3.4. A vizsgált autóbusz többletestdinamikai modelljében lévő diszkrét rugók és csillapítók karakterisztikájának közelítéséhez kapcsolódó számítások során feltártam a vázszerkezetben ébredő feszültségeket, és ezek változását a karakterisztikák közelítésének függvényében. A számítások eredményeiből megállapítottam, hogy a diszkrét elemek karakterisztikájának közelítésére nagy amplitúdójú determinisztikus gerjesztés esetén sem a lineáris, sem a bilineáris közelítés nem alkalmas. Kielégítő eredmény csak a lineáris és bilineáris leírásnál pontosabb közelítés (pl.: szplájnos) használatával érhető el. [GB-2]
- 3.5. Az elvégzett számításokból megállapítottam, hogy a dinamikai modellalkotás során a jármű felépítményének merev- illetve rugalmas testként történő figyelembevétele nagyobb mértékben befolyásolja a számítások eredményeként kapott feszültségértékeket, mint a diszkrét elemek karakterisztikájának közelítése. [GB-2]
- 3.6. Számításokkal igazoltam, hogy a gyakorlatban használt üveg – ragasztóréteg – vázszerkezet modell, amely a ragasztóréteget héjelemekkel írja le, a dinamikai vizsgálatok során a vázszerkezetben ébredő feszültségek meghatározásakor is használható. [GB-13]
4. Módszert dolgoztam ki a járműszerkezet dinamikai analízisének és szintézisének elvégzésére. A módszer lényege és célja, a dinamikus terhek hatására ébredő, időben változó/váltakozó nagyságú/értelmű fajlagos alakváltozások és feszültségek számítása. Továbbá a helyileg jelentkező képlékeny alakváltozások és a velük járó sajátfeszültségi rendszer feltárása, valamint a valódi eredő alakváltozások és feszültségek meghatározása, különös tekintettel a feszültséggyűjtő keresztmetszetek (csomópontok) gyenge pontjaira.
- Az ajánlott dinamikai szintézis, ami a lineáris- és a nemlineáris anyagmodell használatán alapul, a feszültséggyűjtő keresztmetszetek gyenge pontjában maradó és számbavételükkel adódó valódi alakváltozások és feszültségek számítására használható előnyösen. A bemutatott numerikus eljárás az eddieknél pontosabb és megbízhatóbb eredményeket szolgáltat. Ezek felhasználásával a járműszerkezet szilárdsági, merevségi, fáradási elemzése és értékelése kis idő- és költségfordítással elvégezhető.
 - A valóságot mind jobban megközelítő, a terhelés-, szerkezet- és anyagmodelleket integráló, kidolgozott és javasolt módszer megbízhatóságát és gyakorlati alkalmazhatóságát a valós szerkezeten végzett kísérleti mérések és a numerikus eljárás során adódó eredmények összevetése, közelebből a referenciapontokban mért és számított gyorsulás- és nyúlásértékek jó egyezései igazolják.

4.1. Az értekezés eredményeinek hasznosítása

A dolgozatban olyan számítási módszer kidolgozását ismertettem, amely alkalmas alacsony számítási- és tárhelykapacitás, valamint kis modellalkotási időigény mellett is a járművek vázszerkezetében ébredő feszültségek meghatározására. Az értekezésben a számítási eljárás menetét, alkalmazhatóságát és megbízhatóságát egy konkrét autóbusz estén mutattam be, azonban a módszer nem csak autóbusz, de más, elsősorban prizmatikus szelvényekből felépülő vázszerkezetű járművek, pl. kötőtpályás járművek (vonat, villamos, stb.), vagy teherautó esetében is alkalmazható. Az értekezés modellrészletességre, tömegmodellezésre vonatkozó megállapításait autóbuszok tervezése során lehet felhasználni. Az egyes esetekre (lineáris és nemlineáris hatások) megállapított modellpontosságok támpontot adhatnak a tervezőknek, hogy a számítási modelleken végzett esetleges elhanyagolások és egyszerűsítések a számítások eredményeit milyen mértékben befolyásolják, mekkora hibát okoznak. A dolgozat megállapításait felhasználva a modellalkotási és a számítási idő csökkenése révén a jármű fejlesztési költségei is csökkenthetők.

5. A szerző tudományos közleményei

Külföldön megjelent idegen nyelvű folyóiratszövegek

- [GB-1] **Gombor B.:** Dynamic analysis of a bus body frame; determination of the loads and stresses, *Vehicle System Dynamics*, Vol. 43, No. 11, pp. 807–822, 2005 (IF=0.340)
- [GB-2] **Gombor B.:** Applicable reduction of dynamic models of vehicles, *International Journal of Vehicle Design* (bírálat alatt)

Nemzetközi Konferencia-kiadványban megjelent idegen nyelvű előadás

- [GB-3] Szász A., Kokesch S., Turkevi-Nagy N., **Gombor B.:** Opportunity of dynamic simulation of buses demonstrated on IK405, *30th Meeting of Bus and Coach Experts*, Győr, 1999
- [GB-4] **Gombor B.:** Dynamic modelling of vehicles, *3rd International Conference of PhD Students*, Vol. I. pp. 143-147, Miskolc, 2001
- [GB-5] **Gombor B.,** Varga L.: Dynamic modeling of vehicle with flexible body frame, *Gépészet 2002 konferencia*, Vol. II. pp. 609-613, Budapest, 2002
- [GB-6] **Gombor B.:** Validation of Vehicle's Dynamic Models, *MicroCAD2003, Applied Mechanics, Modern Numerical Method*, pp. 7-12, Miskolc, 2003
- [GB-7] **Gombor B.:** Nonlinear Dynamic Analysis of Coaches, *MicroCAD 2004, Applied Mechanics, Modern Numerical Method*, pp. 117-122., Miskolc, 2004

[GB-8] **Gombor B.:** Determination the finite element model for dynamical simulation of vehicles with easy deformable frame, *Gépészet 2004 konferencia*, Vol. II. pp. 519-523, Budapest, 2004

[GB-9] **Gombor B.:** Nonlinear dynamic analysis of body frame of buses, *36th. Meeting of Bus and Coach Experts 21. Congress on Commercial Vehicles*, Budapest, 2005, CD melléklet

Magyar nyelvű folyóiratcikk

[GB-10] Varga L., **Gombor B.:** Acélszerkezetek tervezésének oktatása a BME Gépészmérnöki karán, *MAGÉSZ Hírlevél*, Különszám, 12.-13. oldal, Budapest, 2001.

[GB-11] **Gombor B.:** Járműmodellek dinamikai viselkedése, *Műszaki Szemle Melléklete 2002*, pp. 109-112., Székelyudvarhely, Románia, 2002

[GB-12] **Gombor B.:** Járművek dinamikai modellezése, *Gép*, LIV évf., 10-11. sz. 46-49. old., 2003

[GB-13] **Gombor B.:** A ragasztott oldalüveg járművázra gyakorolt merevítő hatása, *Gép*, LVI évf., 9-10. sz. 63-66. old., 2005

Magyar nyelvű konferencia-előadás

[GB-14] **Gombor B.:** Járművázakban ébredő dinamikus feszültségek számítása, *MicroCAD2002 Machine and Construction Design*, Vol. I. pp. 31-35, Miskolc, 2002

[GB-15] **Gombor B.:** Autóbuszok nemlineáris dinamikai vizsgálata, *Műszaki Szemle*, 55-59. old., Csíksomlyó, Románia, 2004

Csak kivonatban megjelent konferencia-előadás

[GB-16] **Gombor B.:** Járművek dinamikai modellezése, *Vörös Imre emlékülés*, BME GSZI, Budapest, 2003

Csak szóban elhangzott előadás

[GB-17] **Gombor B.:** The application of the coupled FEM-MBS dynamic model of vehicles, *Robert Bosch GmbH*. Waiblingen, Németország, 2005

[GB-18] **Gombor B.:** Járművázak számítógéppel segített tervezése a dinamikus igénybevételek figyelembevételével, *MTA GAB ülés*, BME GSZI, Budapest, 2006