

Energiahatékony versenyjármű karosszéria végeelem modelljeinek összehasonlítása

Comparison of the finite element models of the chassis of an energy efficient racecar

Für Balázs¹, Pusztai Zoltán¹

¹Széchenyi István Egyetem - Járműipari Kutatóközpont, 9026 Győr, Egyetem tér 1. www.uni.sze.hu

Abstract

During the development of SZEenergy Team's race vehicle, that is made for the Shell Eco-marathon energy efficiency competition, the vehicle's chassis is also developed, as it is imperative for the betterment of the vehicle's efficiency, which necessitates the design of a new chassis. The first step of the design process is the analysis of the current chassis, for which a finite element model of appropriate quality and adequate detail. For the analysis of composite structures there exist multiple options, however for this application accuracy is key. Three different models were examined and compared according to certain stiffness parameters. The first model doesn't account for layers, the second has layers, however it does not have composite joints, meanwhile the third model is closest to the real chassis, taking into account the composite joints as well. The models are compared based on torsional stiffness calculated based on the results. According to the results it can be determined which model is best suited for further analysis.

Keywords: FEM, chassis, composites, torsional stiffness

Kivonat

A SZEenergy Team Shell Eco-marathon-ra készült energiahatékony versenyjárművének fejlesztése során a karosszéria is jelentős figyelmet kap, ugyanis a jármű hatékonyságának növeléséhez elengedhetetlen a karosszéria jelentős változtatása, mely egy új karosszéria tervezését és építését indokolja. A tervezési folyamat első lépése a jelenlegi karosszéria részletes vizsgálata. Ehhez szükséges egy megfelelő minőségű, és kellő pontossággal létrehozott végeelem modell. A kompozit szerkezetek vizsgálatára több lehetőség is létezik, azonban ezen alkalmazáshoz a lehető legpontosabb eredmények kellenek. Ennek megfelelően háromfajta modell lett vizsgálva és összehasonlítva szilárdsági tulajdonságok alapján. Az első modell a rétegrendeket nem veszi figyelembe, a másodiknál már van rétegrend, míg a harmadiknál a rétegrend mellett az illesztések, valamint a maganyag szerkezete is a lehető legpontosabban modellezi a jármű karosszériáját. A modellek az eredmények alapján számolt torziós merevséggel lettek összehasonlítva. A vizsgálatok eredményei alapján egyértelműen meghatározható, hogy melyik modell az ideális választás további vizsgálatok elvégzéséhez.

Kulcsszavak: VEM, karosszéria, kompozitok, torziós merevség

BEVEZETÉS

A SZEenergy Team a Széchenyi István Egyetem hallgatói csapata, mely már 20 éve fejleszt elektromos, energiahatékony versenyjárműveket. A csapat legújabb autója 2019-ben épült a Shell Eco-marathon globális energiahatékonyági versenyre. A versenyen az elmúlt három évben sikerült zsinórban megnyerni vele az elektromos városi koncepció kategóriát, ráadásul mindhárom évben világrekorddal. 2019 óta a jármű gyakorlatilag minden eleme cserélve lett már, a karosszériát kivéve, így a jármű további fejlesztése érdekében elkezdődött a jelenlegi karosszéria végeelem módszeres vizsgálata. A folyamat első lépése, egy megfelelő modell létrehozása, mely a pontosság és a számítási kapacitás terén megfelelő kompromisszumot nyújt. A modellek vizsgálata a teljes karosszériával végzett szimulációkra fókuszál. Három különböző részletességű modell kerül összehasonlításra. Az első modellben (továbbiakban A modell) a kompozit szerkezet kizárólag anyagtulajdonságokkal van definiálva, a második modellben (továbbiakban B modell) a rétegrend is figyelembe van véve, azonban az egyes elemek közötti sarok illesztések, vagy éppen a maganyag formája nincsen modellezve,

míg a harmadik modell (továbbiakban C modell) a valóságot a lehető legjobban modellezi. A különböző modellek végül az elmozdulás értékekből számolt torziós merevség segítségével kerülnek összehasonlításra. [1]

1. KAROSSZÉRIA SZERKEZETE

A SZEmission névre keresztelt jármű karosszériája karbon kompozit anyagból készült, annak is egy speciális kialakításából, melyet szendvics szerkezetnek hívnak. A szénszálalaminát réteget követően egy Nomex anyagból készült méhsejtszerű maganyag következik, majd egy újabb szálerősítésű laminát. A szénszálalaminát szendvicsszerkezet metszete a 1. ábrán látható. A karosszéria alapvetően három, elsősorban gyártástechnológiai szempontból jól elkülöníthető elemből áll. A karosszéria, mely magát a jármű formáját biztosítja, a váz elemeket, melyek a szerkezet teherviselő elemei, valamint a merevítőket melyek a karosszéria merevségének növelésére szolgálnak. A merevítők utólag lettek beszerelve a szerkezetbe, míg a váz és karosszéria elemek tulajdonképpen egy egységként lettek gyártva. Az egyes elemek egymáshoz szénszálalaminát szövet segítségével kapcsolódnak. A karosszéria további sajátossága, hogy bizonyos helyeken a méhsejtszerű maganyag epoxi gyantával feltöltésre került, ezzel elősegítve egyes elemek rögzítését. Az így kialakult szerkezet egy úgynevezett önhordó karosszéria.



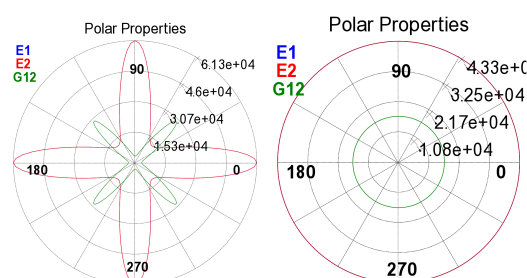
1. ábra. A szendvicsszerkezet metszete

2. MODELLEK FELÉPÍTÉSE

A kiinduló geometria a karosszéria felület modellje, mely az Ansys végelem szimulációs szoftver segítségével lett előkészítve. Mindhárom esetben ugyanaz a modell volt használva, mely hálózása is azonos volt a három esetben. Az elemméret 3 mm-nek lett definiálva a modell nagy mérete miatt, ugyanis a karosszéria nagyjából 2000x1300x900 mm-es befoglaló méretekkel rendelkezik. Lineáris elemek voltak használva a 2D-s elemek megtartása végett, így összességében 763 374 elem lett létrehozva. A vizsgálat szempontjából kritikus pontoknál, tehát a futómű bekötési pontoknál a sűrűbb háló lett alkalmazva. Ezek mellett a terhelések megfelelő definiálásához szükséges első futómű geometria MPC184 elemekkel lett definiálva. [2]

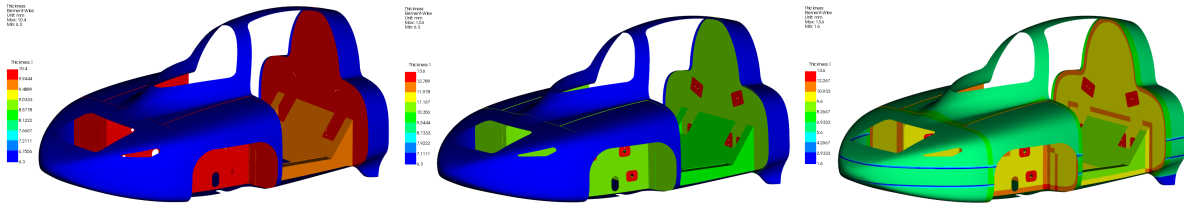
Az első modellnél a kompozit szendvics szerkezet kizárólag anyagtulajdonságokkal lett definiálva. A többi modellhez szükséges volt a kompozit szövet és a maganyag külön-külön történő megadása, melyeket a kompozit preprocesszorban lehetett a valóságban is használható szerkezetté alakítani. Az anyagmodellek között további különbség, hogy míg a szendvicsszerkezet izotróp anyagként lett definiálva, addig a szénszálalaminát szövet és a maganyag ortotróp anyagmodellekkel lettek megadva.

A kompozit szerkezet rétegrendjét is figyelembe vevő modelleknél, alapvetően 3 különböző vastagságú szendvicsszerkezetet különböztetünk meg. A legvékonyabb konstrukció a jármű karosszériájában, míg a legvastagabb a váz elemeknél található. A kettő közötti vastagsággal rendelkező szerkezet pedig a jármű karosszériáját merevítő alkatrészekre jellemző. A szénszálalaminátok definiálásánál a rétegrend úgy lett kialakítva, hogy a síkban minden irányban nagyjából azonos tulajdonságokkal rendelkezzen a réteg. Ennek megfelelően a biaxiális karbon szövet 0° és 45°-os rétegekben követi egymást, páros alkalommal.



2. ábra. A szövet (balra), valamint egy két réteges laminát (jobbra) tulajdonságai

A három különböző vastagságú szendvicsszerkezetben a laminátok rétegszámai valamint a maganyag vastagsága is eltér. A legvékonyabb, 6,3 mm vastag struktúráknál mindössze két-két rétegből laminát fogja közre a 4,7 mm vastag maganyagot. A vastagabb szerkezeteknél a maganyag 7,2 mm vastag, melyet a váz elemknél négy-négy, míg a merevítőknél három-három réteg laminát fog közre. A futómű bekötési pontoknál a szendvicsszerkezet helyett egy laminált tömb található, mely összesen 30 rétegből áll, ezzel kellően merev és megbízható alapot nyújtva a jármű futóművének. A legegyszerűbb modellnél, a futóműbekötési pontoknál lévő "pogácsák" nem lettek modellezve. A modellek vastagságai a 3. ábrán láthatóak.



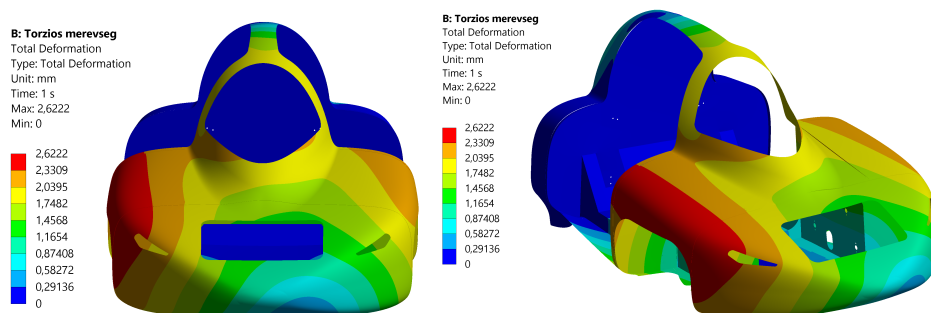
3. ábra. A végelemek modellek vastagságai balról jobbra: A, B és C modell

A három modell tehát jelentősen eltérő részletekkel rendelkezik, mely a modellek felépítéséhez és megoldásához szükséges időket is jelentősen befolyásolja. Az A modell a legegyszerűbb, a szendvicsszerkezetet csak az anyagmodell tulajdonságai modellezzik. A B modellben a szendvicsszerkezetnek a rétegrendje is megtalálható, a futómű bekötéshez használt pogácsákkal együtt. A C modellben pedig már az egyes elemek csatlakozását jelentő sarokelemek. Habár a C modell áll a legközelebb a valósághoz, ennek is vannak limitációi. Az 1. fejezetben említett epoxi gyantás feltöltések modellezését például nem lehetett megvalósítani.

A hálózást, valamint a rétegrendek meghatározását követően a terhelések és megfogások definiálása következett. A karosszériák torziós merevségének a mérése általában úgy zajlik, hogy a jármű hátsó tengelye le van rögzítve és a rugóstagok ki vannak szerelve. Az első tengelyre pedig egy olyan alkatrészt rögzítenek, mely mindkét oldalon a jármű tengelyéhez kapcsolódik, a jármű hosszanti síkjában van egy forgástengelye, és az egyik oldalára súlyok vannak rögzítve. A peremfeltételek meghatározásánál ezeknek a körülményeknek a modellezése volt a cél. Ennek megfelelően a hátsó futómű bekötési pontjainak megfogása minden szabadsági fokát lekorlátozza. A forgástengely egy olyan megfogással lett modellezve, mely a translációs mozgást és a deformációt nem engedi, míg a forgást igen. Ez a kényszer a karosszéria hosszanti osztósíkjának alul található szakaszára lett definiálva. A terhelések az első futóműre lettek megadva, a kerék talppontjának megfelelő csomópontokra. A bal oldalon 350 N, míg a jobb oldalon -350 N nagysággal lettek definiálva, ezzel biztosítva a karosszéria megfelelő csavarodását. [3, 4, 5]

3. AZ EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

A modellek összehasonlításához szükséges eredmény a karosszéria csomópontjainak elmozdulás értékei. Az elmozdulás eloszlás közel azonos formát vesz fel mindhárom modellnél, azonban az értékek eltérőek. Általánosságban véve az A modell a legmerevebb, míg a B modell a legkevésbé merev a modellek közül. A C modell elmozdulás eloszlása a 4. ábrán látható.



4. ábra. A C modell elmozdulás eloszlása két nézetből

A 4. ábrán látható színtérkép alapján jól látható, hogy az autó hátuljában található tűzfal, tulajdonképpen nem mozdul el, míg az első futómű körüli geometria jelentős deformációval rendelkezik. Továbbá a jármű padlólemezen is található egy tartomány, mely minimális elmozdulás értékekkel rendelkezik, és a tűzfaltól

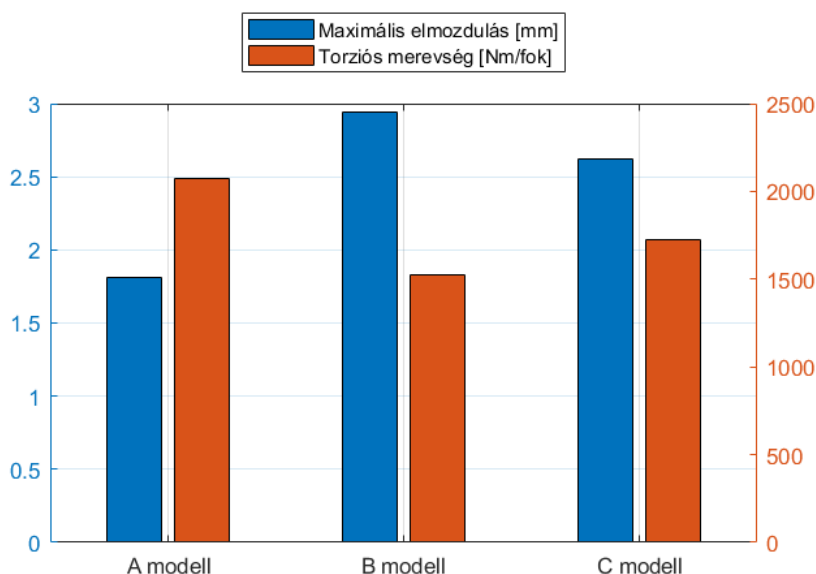
nagyjából a jármű orráig tart. Ezek a tulajdonságok mindhárom modell eredményeiről elmondhatók. Ezzel szemben a maximális elmozdulás értékek helyében jelentős eltérés figyelhető meg. A C modell esetében a maximális érték a jármű jobb oldalán található, a B modelleken a bal oldalon is ezt megközelítő értékek találhatók, míg az A modellen a maximális elmozdulás értéket a bal oldalon éri el a karosszéria.

Az elmozdulás értékekről elmondható még, hogy a maximális elmozdulás értékek, valamint a terhelte futómű talppontokban mért elmozdulás értékek jelentősen különböznek, ugyanis a két érték között milliméteres eltérések vannak mindegyik modell esetében. Ezen kívül még megfigyelhető jelenség, hogy a karosszéria kerékfedő elemeinél jelentkezik a legnagyobb elmozdulás mindhárom esetben. Ennek több oka is lehet, de a két legvalószínűbb a vastagságbeli különbség a váz elemekhez képest, valamint a jármű hosszanti tengelyétől mért nagyobb távolság.

A modellek összehasonlítása az elmozdulás és terhelés értékekből számolt torziós merevség segítségével történt. A terhelések az első futómű talppontjaira lettek definiálva, éppen ezért ezeknek a pontoknak az elmozdulás értékei szükségesek a torziós merevség számolására. A torziós merevséget az (1) egyenlet szerint lehet számolni,

$$C_t = \frac{T}{\alpha} = \frac{F \cdot W_t}{\arctan\left(\frac{\Delta z}{W_t}\right)} \quad (1)$$

ahol C_t a torziós merevség, F a terhelés egyoldalon megadott értéke, W_t az első futómű nyomtávja, és Δz az első futómű talppontjainak összesített elmozdulása a z irányban. Az így számolt értékek megfelelnek a maximális elmozdulás értékek alapján feltételezett merevségeknek. Az A modell 2071,508, a B modell 1523,553, míg a C modell 1721,142 Nm/fok torziós merevséggel rendelkezik. Ezek alapján elmondható, hogy az A modell számottevően magasabb torziós merevséggel rendelkezik, mint a B modellel, mely a pontosabb modellezésre vezethető vissza, míg a C modellnél figyelembe vett sarokelem további merevítő hatással bír, melyet a B modellelhez képest magasabb torziós merevség is jól mutat. A maximális elmozdulás valamint a torziós merevség értékek a 5. ábrán láthatók. [6, 7]



5. ábra. A maximális elmozdulás értékek és a torziós merevségek összehasonlítása

4. KÖVETKEZTETÉS

A SZEnergia Team elektromos energiahatékony versenyautójának karosszéria fejlesztési folyamatának első lépéseként különböző részletességű modellek lettek vizsgálva, majd szilárdsági paraméterek segítségével összehasonlítva. Az önfordó karbon kompozit karosszéria modellezésében az elsődleges különbségek az anyagmodellben valamint a szerkezeti felépítésben találhatók. A legegyszerűbb A modell anyagmodellel szimulálja a szánszál szendvicsszerkezet viselkedését, azonban a rétegrendet, vagy az egyes elemek közötti erősítéseket nem veszi figyelembe. A B modell már figyelembe veszi a rétegrendet, valamint a futómű bekötési pontoknál található pogácsák sajátosságait is. A legrészletesebb modell, a C változat pedig a rétegrenden túl az egyes elemek közti rögzítéseket is figyelembe veszi. A megnövelt részletességgel a modell előkészítéséhez

szükséges idő is jelentősen megnövekedett, azonban az optimális teljesítmény elérése érdekében nélkülözhetetlen a megfelelő pontosságú szimulációs eredmény. A további vizsgálatok elvégzéséhez a C modell tűnik a legjobb választásnak.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikációban szereplő kutatást a Széchenyi István Egyetem az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002)

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] SZEenergy Team. *A SZEenergy team-ről*. . . Elérés: 2025. február 27. <https://szenergy.hu/about/>
- [2] ANSYS Inc. *Mechanical User's Guide*, ANSYS Inc., 2024.
- [3] Velie H. D. *Chassis Torsional Rigidity Analysis for a Formula SAE Racecar*. University of Michigan, 2016.
- [4] Eakambaram A., Sethupathi P. B., Saibalaji M., Baskar A. *Experimental analysis and Validation of torsional stiffness of a Tubular space frame chassis*. Materials Today: Proceedings. Elsevier, 2021, 46, 7719–7727.
- [5] Jindal R., Arora R., Papney R., Patel M., Saini R. C., Rana R. *Torsion test for a BAJA chassis using gyroscopic sensor and validation of CAE results*. Materials Today: Proceedings. Elsevier, 2022, 56, 3774–3779.
- [6] Eurenus C. A., Danielsson N., Khokar A., Krane E., Olofsson M., Wass J. *Analysis of Composite Chassis*. Dipl. Chalmers University of Technology, 2013. <https://odr.chalmers.se/items/6ee91235-b9f1-4e9d-b177-45631d729a5a>
- [7] Wolska N., Szycia M., Estrada Q., Castaneda L. *Formula Student car chassis—research on the torsional stiffness*. MATEC Web of Conferences, 2024, 1004.