

Moduláris felépítésű megmunkálógép vázszerkezetének fejlesztése

Development of a Modular Machine Tool Frame Structure

KAJDI Roland

MSc hallgató

Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, Géptan Intézeti Tanszék, H-8200 Veszprém, Egyetem u. 10.
+36 88 624 000, info@uni-pannon.hu, kajdi.roland@mk.uni-pannon.hu

Abstract

This study presents the design and development process of the frame structure of an innovative machine concept, which adapts to various customer requirements through the combination of different material removal technologies and a modular architecture.

Through a detailed investigation of a welded steel frame CNC gantry milling machine, I identified its structural design shortcomings, and subsequently developed alternative concepts for the frame structure, which were compared against the existing machine frame from multiple perspectives. The results of the finite element analysis showed that the maximum stress and deformation occurring under load remained within the target range, while the modular system incorporating any of the new concepts also satisfies the requirements of manufacturability and installation, owing to the targeted dimensional range, reduced mass, and integrated construction.

The selected frame concept underwent further design-for-manufacturing optimization and structural development processes.

Keywords: modular design, welded steel frame, finite element analysis, optimization, structural development

Kivonat

Jelen tanulmány egy olyan innovatív gépkonstrukció vázszerkezetének tervezési és fejlesztési folyamatát mutatja be, amely gép különböző anyagválasztási technológiák ötvözésével és moduláris felépítéssel igazodik a különböző vevői igényekhez.

Egy hegesztett acélvázazas CNC portálmargógép részletes vizsgálata során feltártam annak konstrukciós hátrányait, majd alternatív koncepciókat készítettem a vázszerkezetre vonatkozóan, amelyeket több szempontból összehasonlítottam a meglévő gépvázalal. A végelem-analízis eredményei azt mutatták, hogy a terhelés hatására bekövetkező maximális feszültség és alakváltozás a céltartományban maradt, míg az új koncepciók bármelyikét alkalmazó moduláris rendszer a célzott mérettartomány, a kisebb tömeg és az integrált felépítés okán a gyárthatósági és telepítési szempontoknak is eleget tesz.

A kiválasztásra került vázkonstrukció további gyártásszempontú optimalálási és konstrukciófejlesztési folyamatokon ment keresztül.

Kulcsszavak: moduláris felépítés, hegesztett acélváz, végelem-analízis, optimalálás, konstrukciófejlesztés

1. BEVEZETÉS

A szerszámgépvázak tervezése rendkívül összetett feladat, amely számos tudományágat és műszaki területet érint, és csak ezek együttes alkalmazásával végezhető.

Szerteágazó ismeretekre van szükség, amelyek mind elméleti, mind gyakorlati téren szükségesek, hiszen a mai kor követelményeinek megfelelő szerszámgépeknek rengeteg kritériumot kell teljesíteniük.

Megmunkálás során erőhatások, hőhatások, rezgések és egyéb hatások keletkeznek, amelyek a gép valamennyi szerkezeti elemét igénybe veszik, a gépvázak pedig fontos feladata – a részegységek hordozásán túl – ezen erőhatások felvétele, a rezgések csillapítása és a megfelelő stabilitás biztosítása. [1], [2]

A tervezés elősegítésére rendelkezésünkre állnak olyan numerikus, végelem-módszeren alapuló mérnöki szoftverek, amelyek alkalmazásával nagyban felgyorsul és egyszerűsödik egy tervezési folyamat, hisz a szimulációk eredményei fontos irányadó információkat és paramétereket szolgáltathatnak. [1], [3]

Ezzel kiiktathatók bizonyos köztes prototípusgyártási folyamatok és ehhez köthető kísérleti vizsgálatok, így lényegesen hamarabb juthatunk el a végleges konstrukció próbagyártásának fázisába.

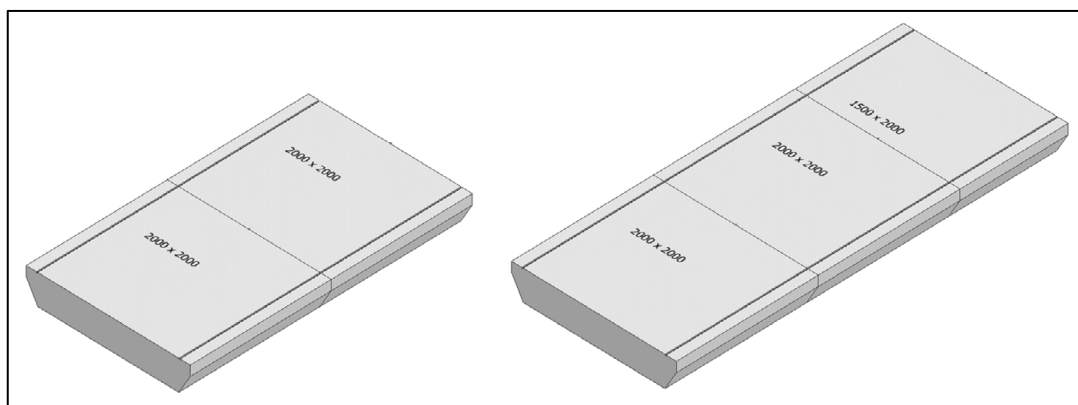
2. KÖVETELMÉNYEK ÉS BEMENETI INFORMÁCIÓK

Valamely konstrukciós tervezési folyamat sikeres kivitelezéséhez megfelelő követelményekre és bemeneti információkra van szükség, amelyek meghatározzák a tervezés menetét. Egy szerszámgépváz esetében ez kiterjedhet a teljes gépkonstrukcióra, hisz a vázszerkezet nyújtja a gépmechanika alapját. A gépváznak megfelelő statikus és dinamikus merevséggel, jó rezgéscsillapítással, hőmerevséggel kell rendelkeznie, emellett gyártástechnológiai, biztonságtechnikai és gazdasági szempontokat is ki kell elégítenie. [1]

2.1 Követelmények és célok

A „Vevői igényekre optimalizált, moduláris elemekből felépülő gyártóberendezés család fejlesztése” című kutatási és fejlesztési pályázat eredményeképp egy moduláris, multifunkciós megmunkológép legyártását és üzembehelyezését kell végrehajtani, megrendelői platformmal kiegészítve.

A fejlesztés fő célja, hogy egy adott gyártóberendezés több anyagleválasztási, vágási technológiát is ötvözzön – marás, lézervágás, plazmavágás –, amely berendezés vázszerkezete egyenként gyártható, majd komplett egységgé összeszerelhető modulokból épüljön fel. Feladatunk továbbá egy olyan vevői platformmal támogatott termék-szolgáltatás rendszer létrehozása, amelyben a megrendelők saját igényeik alapján állíthatják össze a nekik optimális megmunkológépet. A moduláris család elemeiből felépülő „egyedi” gép a megrendelést követően kerül gyártásra és szállításra, ehhez pedig rugalmas, de gazdaságos gyártásra van szükség. A modularitás esetünkben hosszanti irányba, sorban összekapcsolt elemeket jelent, az erre vonatkozóan készült egyszerűsített, szemléltető vázlat az 1. ábrán látható:



1. ábra. A moduláris vázfelépítés elve – 2 és 3 modulból álló vázlatos terv

2.2 Kiindulás és bemeneti adatok

A kutatáshoz a vállalat rendelkezésünkre bocsátott egy követelménylistát, amely főként a munkadarabok és a leendő gyártóberendezésen folyó megmunkálás oldaláról határozza meg a bemeneti paramétereket. Ezek között szerepelt többek között a megmunkált nyersanyagok vagy félkész termékek méretei, alapanyaguk, az alkalmazni kívánt technológiák, munkadarab felfogási lehetőségek, szerszámozási és gyártási tulajdonságok, valamint a kívánt megmunkálási pontosság.

A követelmények megismerésén felül lehetőségem nyílt hozzáférni egy alkalmazásban lévő 3 tengelyes megmunkáló-berendezéshez, amelynek megléte és az üzemeltetése során történt észlelések, tapasztalatok további adatokat szolgáltatottak a tervezéshez. Az észrevételek alapján a gép megmunkálási pontossága nem bizonyult kielégítőnek.

2.3 A váz tervezéséhez köthető célok

A rendelkezésünkre álló követelménylista alapján meghatároztuk azon célparamétereket is, amelyek a váz tervezéséhez köthetők. Ilyen paraméterek a munkatér méretei, a gépváz felépítése, a felhasználandó szerkezeti anyagok, azok maximális anyagvastagsága, vázszerkezet gyártásához alkalmazni kívánt hegesztési eljárás, illetve a várható üzemi terhelés szimulálásához szükséges adatok. Ehhez segítségemre voltak szakirodalmak, kutatók korábbi eredményei, tanszéki mérnökök korábbi tapasztalatai.

3. MEGLÉVŐ GÉP VIZSGÁLATA

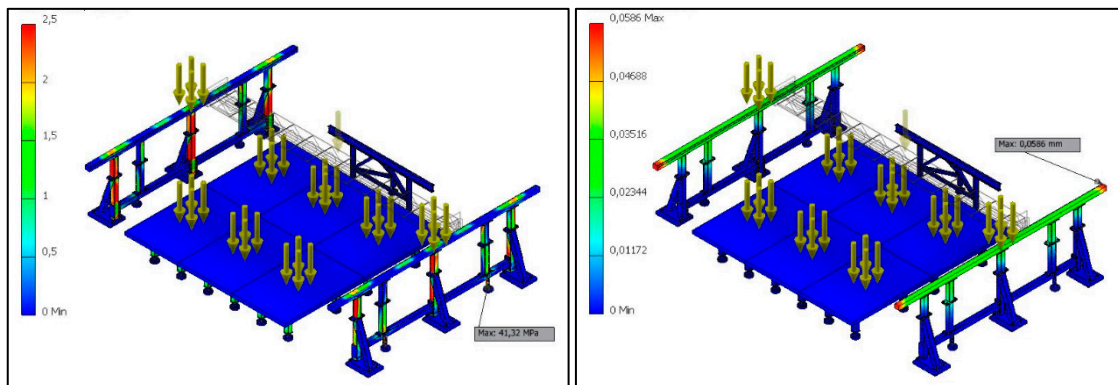
Vizsgálataim elsősorban a gép stabilitására irányultak, vagyis a konstrukciós hibák feltárása volt a céлом. A helyszíni szemle és a gyártógepről készített CAD modell alapján megvizsgáltam, melyek azok a tulajdonságok, amelyeknek köszönhetően a szerszám gép alulteljesít. Ennek eredményeképpen megállapítottam, hogy az osztott kivitel, a túl hosszú és karcsú gerenda, a túl sok talppont és a merevítések hiánya is mind hátrányosan befolyásolják a gép tulajdonságait. [4]

Az említett CAD modellen geometriai egyszerűsítést és a megfelelő peremfeltételek definiálását követően végesem analízist végeztem az „Autodesk Inventor Professional 2024” szoftver segítségével, amely vizsgálat irányadó feszültség- és alakváltozás értékekkel szolgált.

A modell szerkezeti elemei a lágyacél – S235 szerkezeti acél –, az asztallap pedig Alumínium 6061 ötvözet anyagjellemzőivel lett ellátva, tömege így (a vizsgálatot nem befolyásoló részegységek nélkül) 2517 kg.

A rögzített felületek a talpak és a feltételezett betonlap közös síkjai (talpsíkok). A végelem felbontás (Mesh) és a komponensek közötti kapcsolat automatikus, alapértelmezett (Nodes: 2435637, Elements: 1349790). Mivel statikus merevséget vizsgáltam ezért konstans, felületen egyenletesen megoszló terhelés került alkalmazásra. Az asztalszerkezetre ható terhelés 9000 N (0,001 MPa megoszló terheléssel helyettesítve), a gerendát tartó szerkezetekre pedig oldalanként 5000-5000 N terhelés (0,016 MPa megoszló terheléssel helyettesítve) került.

A vizsgálat eredményei a 2. ábrán láthatók:



2. ábra. FEA feszültség [MPa] (bal) és deformáció [mm] (jobb) eredményei

A maximális feszültség 41,32 MPa, azonban ez kiugró érték, a szerkezetre a 10 MPa alatti értékek jellemzők. A szemléltetés céljából 0 – 2,5 MPa közötti feszültségértékek kerültek megjelenítésre a 2. ábra bal oldali képén. A maximális deformáció az alkalmazott terhelés hatására 0,059 mm, amely a két oldalsó konzol végein jelentkezik lehajlás formájában.

4. KONCEPCIÓK

Az új gyártóberendezés munkaterének meghatározásához a megmunkálni kívánt munkadarabok, valamint lemeztáblák méreteit vettem alapul. Az asztal mérete úgy lett definiálva, hogy a legszélesebb (2000 mm széles) munkadarabot is teljes szélességben meg tudja munkálni, a felfogható munkadarab vagy lemez maximális hosszát pedig a modulok száma, vagyis az eredő géphossz határozza meg.

A felépítést tekintve törekedtem egy integrált megoldás alkalmazására, amelynek lényege, hogy a hosszanti vezeté- és hajtásrendszer külön telepített tartószerkezetek helyett az asztallapot is hordozó, egybefüggő gépalap szélső síkfelületein kap helyet. Ezáltal egy masszív és térmerev gépmechanikát kapunk, ezzel a felépítéssel pedig csökkenthetők a vezetérendszer és az asztallap között értelmezett helyzetpontossági hibalehetőségek. [4]

A modellek koncepció jellegűből kifolyólag részleteket nélkülöző kidolgozottságúak, vagyis az interfészek, csatlakozó-, hordozó felületek nem kerültek kialakításra.

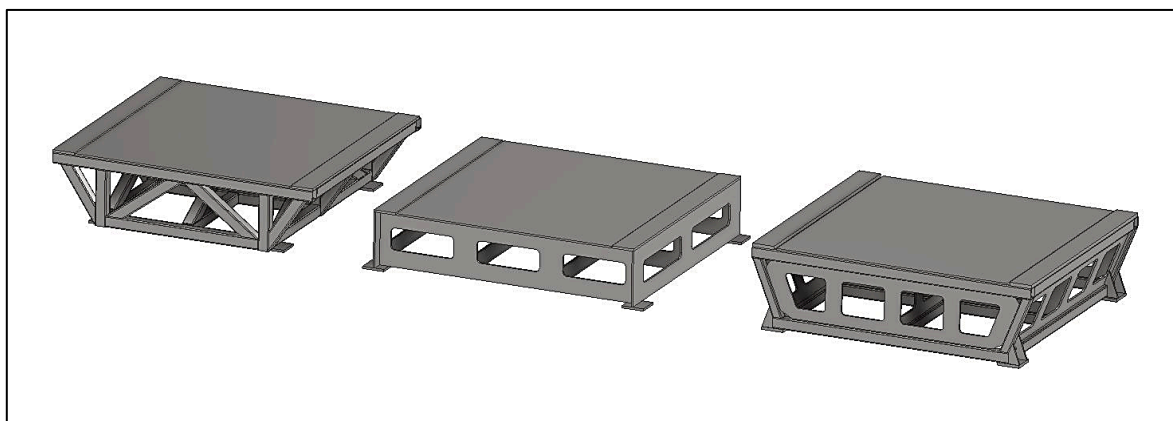
A kiválasztott mérettartományt képviselő modulok különböző módszerek mentén készültek el, alapul véve néhány elterjedt ipari megoldást. [5]

Első változat egy – az asztallapot és az oldalsó vezetékágyakat leszámítva – teljes egészében DIN EN 10219 szabványnak megfelelő, négyzet és téglalap keresztmetszetű, 80 és 100 mm oldalhosszúságú, 5 mm falvastagságú zártszelvényekből került megalkotásra, ennek tömege a szoftver szerint 1384 kg.

Második esetben termikus vágással kialakított, egyedi geometriájú, 15 mm vastagságú S235 acéllemez komponensek kerültek kidolgozásra, majd ezek egymásba csúsztatásával és összehegesztésével jön létre a 2. ábrán, középen látható konstrukció. Ennek tömege a szoftver szerint 1417 kg.

A harmadik változat az előző kettő kombinálásával jött létre, több iteráció eredményeképp. Ötvözi a két változat tulajdonságait. Tömege a szoftver szerint 1834 kg.

A koncepciók 3D-s CAD modelljei a 3. ábrán láthatók, balról jobbra haladva sorrendben:



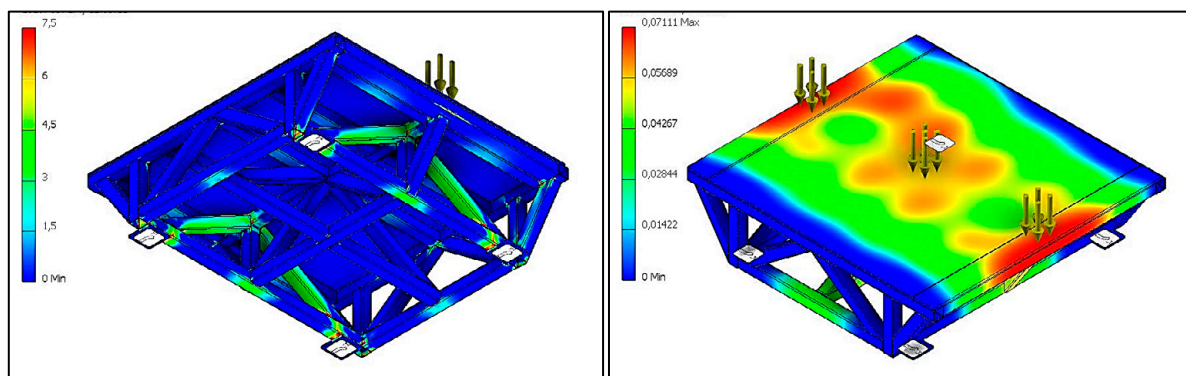
3. ábra.

Az elkészült 3 változat CAD modellje – balról jobbra haladva: zártszelvény, acéllemez, hibrid

5. EREDMÉNYEK

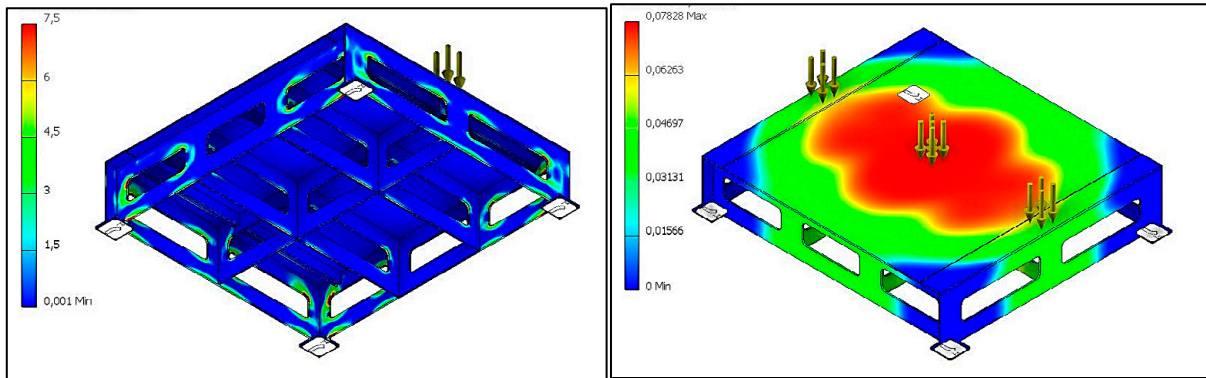
5.1 A három koncepció vizsgálata

Az egyes változatokat ugyanazon peremfeltételek mellett vizsgáltam (a terhelés azonban megoszló $0,001 \text{ N/mm}^2$, vagyis ez esetben az eredő erő a kisebb asztalfelület miatt kb. 6000 N), a szimulációk eredményei pedig a következő ábrákon, a bemutatott sorrendben láthatók. A feszültségértékek a szemléltethetőség és az összehasonlíthatóság érdekében $0 - 7,5 \text{ MPa}$ tartományon kerültek ábrázolásra, kiemelten fókuszálva a kritikus helyekre. A deformációk minden esetben az adott konstrukcióhoz tartozó minimális és maximális értékek között értelmezendők. A vázszerkezetek vizsgálati eredményeit a 4., 5. és 6. ábra mutatja be:



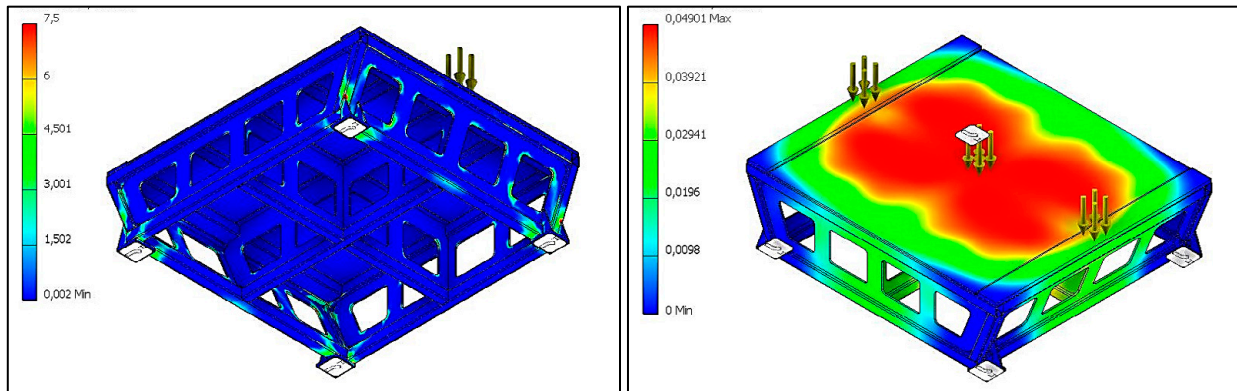
4. ábra. *A zártszelvényekből álló váz FEA eredményei - feszültség [MPa] (bal) és deformáció [mm] (jobb)*

A zártszelvény konstrukcióban ébredő maximális feszültség $40,88 \text{ MPa}$, a legnagyobb elmozdulás pedig $0,071 \text{ mm}$.



5. ábra. A kivágott lemezekből álló váz FEA eredményei - feszültség [MPa] (bal) és deformáció [mm] (jobb)

A lemez konstrukcióban ébredő maximális feszültség 13,58 MPa, a legnagyobb elmozdulás pedig 0,078 mm.

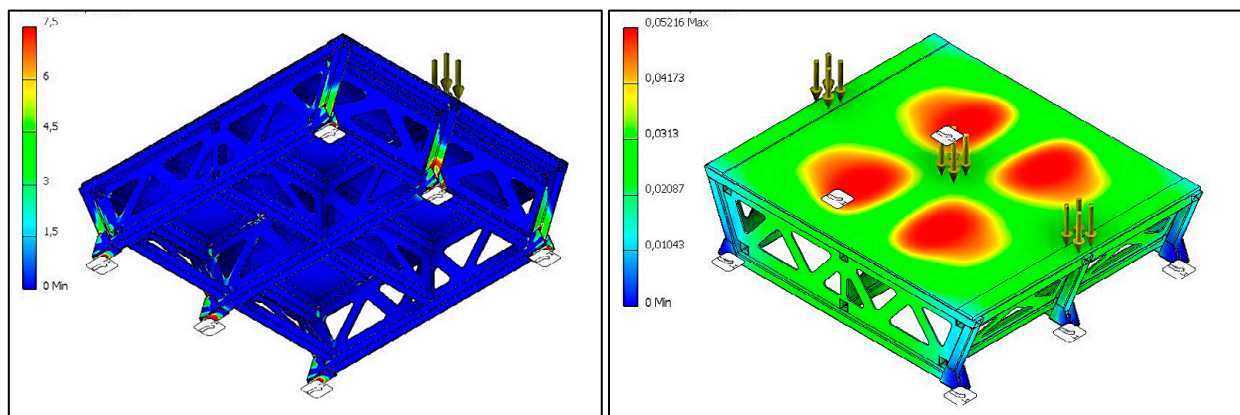


6. ábra. A hibrid váz FEA eredményei - feszültség [MPa] (bal) és deformáció [mm] (jobb)

A hibrid konstrukcióban ébredő maximális feszültség 32,63 MPa, a legnagyobb elmozdulás pedig 0,049 mm.

5.2 Kiválasztás és továbbfejlesztés

A megrendelői visszajelzések alapján – gazdasági és gyárthatósági szempontokból – a harmadik koncepció, vagyis a hibrid típusú váz bizonyult megfelelőnek. A modellen statikai és gyártástechnológiai szempontú optimalizálást végeztem – végelem vizsgálatokat is alkalmazva –, amely során a teherviselő elemek és lemezek geometriája több fejlesztési iteráción ment keresztül, ennek következtében növekedett a tömegfajlagos merevség. Az optimalizálás érintette a zártszelvények keresztmetszetét, a lemezek vastagságát, a lemezkivágási struktúrát, az elemek egymáshoz képesti pozícióját, valamint géptalp alkalmazását és számuk növelését. Ezen fejlesztés eredményeképp készült el a következő vázkonstrukció, melynek vizsgálati eredményei a 7. ábrán láthatók:



7. ábra: A továbbfejlesztett hibrid váz FEA eredményei - feszültség [MPa] (bal) és deformáció [mm] (jobb)

A továbbfejlesztett hibrid konstrukcióban ébredő maximális feszültség 53,17 MPa, a legnagyobb deformáció 0,052 mm, tömege pedig 1457 kg. Megállapítható, hogy a fejlesztés következtében a hibrid vázhoz képest 22%-os, azaz 412 kg-os tömegcsökkenést értem el, a terhelés hatására pedig csak 3 µm-rel nagyobb maximális deformáció jelentkezett.

5.3 Összehasonlítás

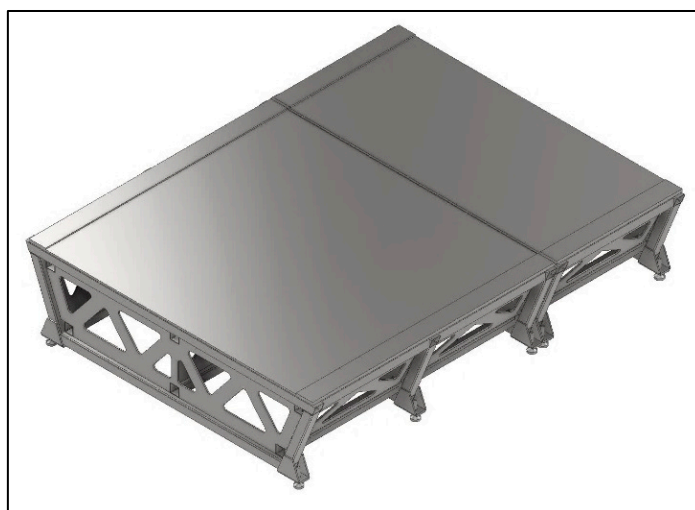
Az elkészített változatok összehasonlíthatósága érdekében összefoglaltam az eredményeket, ezt az 1. táblázat tartalmazza:

A koncepciók eredményeinek összehasonlítása

1. táblázat

Vizsgálati eredmények					
	Kiindulás Meglévő váz	1. koncepció Zártszelvény	2. koncepció Acéllemez	3. koncepció Hibrid	4. koncepció Hibrid 2.0
Tömeg [kg]	2517	1384	1417	1869	1457
Maximális alakváltozás [mm]	0,059	0,071	0,078	0,049	0,052
Maximális feszültség [MPa]	41,32	40,88	13,58	32,63	53,17

A kiindulási alapként használt géppel nem lehet egyértelműen összehasonlítani őket, hiszen más munkatérnagysággal rendelkeznek. Belátható azonban, hogy egy 2000 x 3000 mm nagyságú táblalemez előgyártmány megmunkálásához egy 2 m-es és egy 1 m-es modulból összeállított gép alkalmas lehet. A legutolsó iteráció következtében létrejött, az 5.2 alfejezetben bemutatott, ún. hibrid 2.0 vázmodulok alkotta rendszernek a tömege 2258 kg, ami kb. 10 %-kal kisebb, mint a meglévő gép nyers vázának 2517 kg-os tömege. A hibrid 2.0 modulokból előállított, 2000 x 3000 mm munkatérű moduláris váz koncepció terve a 8. ábrán látható:



8. ábra. A továbbfejlesztett, hibrid 2.0 modulokból felépülő váz látványterve

6. ÖSSZEGZÉS

A cikk bemutatja egy moduláris rendszerű CNC gyártóberendezés vázszerkezet-moduljainak statikai merevségre irányuló fejlesztését. A folyamat során feltárára kerültek egy alkalmazásban lévő CNC portálmargógép konstrukciós hibái, azokra megoldási javaslatok, majd koncepcionális tervek kerültek kidolgozásra. A 3D-s modelleken végesem szimuláció segítségével, adott terhelés mellett alakváltozás- és feszültségértékek kerültek meghatározásra, majd összehasonlításra. Az ipari partner visszajelzései alapján kiválasztásra került változat további optimalizáláson ment keresztül, melynek eredményeképp egy olyan vázkonstrukció terve készült el, amellyel a célparaméterek teljesítésén felül 10 % tömegcsökkenést és jobb várható merevséget sikerült elérni egy meglévő vázszerkezethez képest.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A „Vevői igényekre optimalizált, moduláris elemekből felépülő gyártóberendezés-család fejlesztése” elnevezésű, 2024-1.1.1-KKV_FÓKUSZ-2024-00063 azonosítószámú projekt az NKFI Hivatal és a Nemzeti Innovációs Ügynökség konzorciumában, a Magyar Állam támogatásával, társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] T.-C. Chan, A. Ullah, B. Roy, és S.-L. Chang, „Finite element analysis and structure optimization of a gantry-type high-precision machine tool”, *Sci. Rep.*, köt. 13, aug. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-40214-5.
- [2] S. S. Abuthakeer, P. V. Mohanram, és G. Mohankumar, „Static and Dynamic Performance Improvement of Conventional Computer Numerical Control Machine Tool Bed with Hybrid Welded Steel”, *Am. J. Appl. Sci.*, köt. 8, sz. 6, o. 610–616, jún. 2011, doi: 10.3844/ajassp.2011.610.616.
- [3] S. Pedrammehr és mtsai., „Modal Analysis of the Milling Machine Structure through FEM and Experimental Test”, *Adv. Mater. Res.*, febr. 2013.
- [4] L. Wang, J. Han, Z. Tang, Y. Zhang, D. Wang, és X. Li, „Geometric Accuracy Design of High Performance CNC Machine Tools: Modeling, Analysis, and Optimization”, *Chin. J. Mech. Eng.*, köt. 38, jún. 2025, doi: 10.1186/s10033-025-01258-y.
- [5] P. Boral, T. Nieszporek, és R. Gołębski, „The welded CNC machine tool frame”, *MATEC Web Conf.*, köt. 157, o. 01003, jan. 2018, doi: 10.1051/mateconf/201815701003.