

FÖLDI TELEPÍTÉSŰ NAPELEMES SZERKEZET HÓTEHER ALATTI MODAL ANALÍZISE

Szirbik Sándor 

egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet
3515 Miskolc-Egyetemváros, e-mail: sandor.szirbik@uni-miskolc.hu

Absztrakt

Jelen tanulmány egy földi telepítésű, napelemekkel felszerelt tartószerkezet modal analizisének kérdéseivel foglalkozik a hazai klimatikus viszonyoknak megfelelő, Eurocode alapján megállapított hóteher alatt. Lánczos-iterációs módszer alkalmazásával, végeselemes szoftver segítségével elvégzett numerikus szimulációk alapján kerültek az adott szerkezet sajátrezgései elemzésre. A tartószerkezet C profilú acélelemei hajlított-nyírt rudelemekkel, a napelempanelok pedig kompozit héjelemekkel modellezve vizsgáltak. Az előállított sajátfrekvenciák és rezgéseképek további modellezési lehetőségek felé is utat nyitnak, mert felhasználhatóak például a tranziens terhelési körülményekre történő vizsgálatokban is. A szerkezet sajátrezgéseképeinek elemzéséből következtetni lehet a szerkezet elemeinek várható mozgásaira és ezek az eredmények kiindulópontként szolgálnak a paneleket és a szerkezeti elemeket egymáshoz rögzítő csavarokat érő hatások elemzésében.

Kulcsszavak: napelempanel, Eurocode, végeselem-módszer, modal analízis

Abstract

This paper is devoted to some issues of the finite element analysis (FEA) of ground-mounted photovoltaic (PV) structure, focusing on the entire structure where the panels under a snow load considering regional climatic data. The eigenvalue extraction used to calculate eigenfrequencies and mode shapes is based on the Lanczos iteration method. The frame and purlins were modeled as a 3D wire frame and meshed with the linear beam elements with specify C and U cross-section shapes. Composite shell elements were used to simulate the PV panel. The purpose of finite element analysis is to provide a starting point for studies of the forced vibrations with the results of modal analysis. These are also important results for analyzing the effects of vibrations of structure on the bolts securing the panels.

Keywords: PV panel, Eurocode, FEA, modal analysis

1. Bevezetés

Napjainkban a világban a legtöbb energia még mindig valamilyen nem megújuló fosszilis forrásból származik, így kihívás az egyre nagyobb energiaigény kielégítése a környezetszennyezés visszaszorítása mellett. A teret nyerő különböző megújuló alternatív energiaforrások közül az egyik legrendületesebben terjedő a fotovoltaiikus napelem, mert a napelemes rendszer rendkívül jól illeszthető a meglévő energiaportfóliókba. A fotovoltaiikus napelem alkalmazása az egyszerű zsebszámológéptől kezdve, a háztartási kiserőműveken keresztül, az ipari méretű akár több száz megawatt teljesítményig terjed. Az erősen emelkedő energiahasználat miatt Magyarországon is nagyon sok vállalkozás szakosodott napelemes

erőművek létesítésére, a szükséges tartószerkezetek legyártására és azok telepítésére. A nagyobb erőművek, napelemparkok létesítése során jellemzően talajra telepített, földi tartószerkezeteket alkalmaznak. A napelemek rögzítése többféle módon lehetséges és ezek vizsgálatára is többféle modellezési eljárás ismeretes (Xu-Hui He et al., 2020; Terigen Bao et al., 2023).

A napelemrendszerek tartószerkezeteinek előzetes mechanikai ellenőrzése és vizsgálata igen célravezető, mert a tartószerkezeteket így a változó, olykor előre kiszámíthatatlan környezeti hatások okozta igénybevételekre, becsült értékekkel előrelátóan meg lehet tervezni. A vizsgált talajcsavaros rögzítésű, kétlábás tartószerkezet elemeinek kialakításához, a profil-tervezéshez a tartószerkezetet érő terhelések, azaz az Eurocode szerinti szél-, illetve hőterhelések ismerete is szükséges. A szélterhelések hatása folyadékdinamikai szimulációkon keresztül is vizsgálható (Jubayer et al., 2016; Reina et al., 2017). A kétlábás tartók általában szabványos profilacélból készülnek. A tartóvázak legkritikusabb elemének, a több ponton alátámasztott hossztartóknak, azaz szelemeneknek méreteit és olykor egyedi profilkialakítását a várható igénybevételekre mindig ellenőrizni szükséges. A terhelésekből adódó szilárdságtani feladatok megoldására használható célszoftver (AXISVM), így kiváltva a kézi számításokat lerövidítve a tervezési időt. A szerkezet tényleges deformációinak és rezgéseinek elemzésére azonban a leghatékonyabb eljárás a végeselemes analízis.

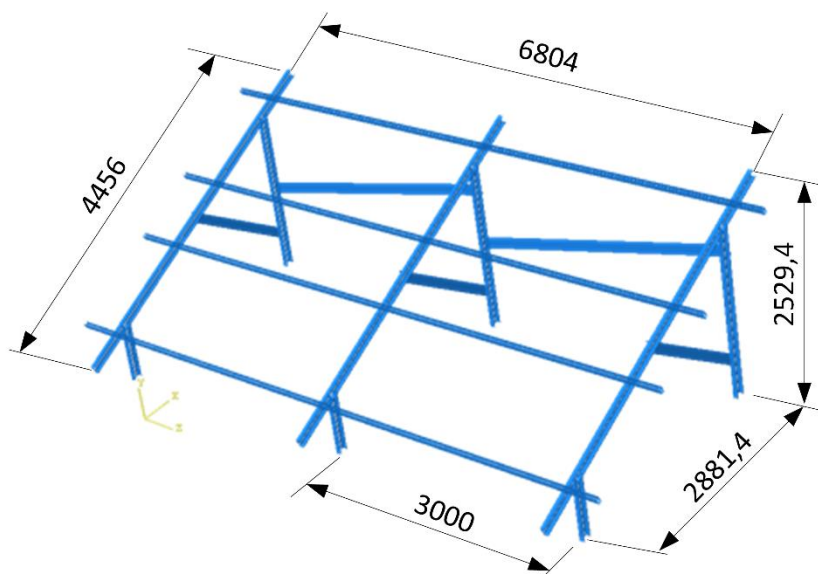
A végeselem-módszer (Bathe, 1996) alkalmazása lehetőséget nyújt a tartószerkezetek geometriailag méretpontos, terhelési állapotokat könnyen megváltoztatható módon figyelembe vevő, részletes és hatékony vizsgálatára. A felmerülő terhelési esetek vizsgálatával fel lehet tární a konstrukciók gyenge pontjait, valamint a választott kialakítási variációk viselkedése a szerkezetet támadó külső hatásokra jól modellezhető. A napelempanelék és a tartószerkezetük együttes végeselemes vizsgálatai során a napelempanelék összessége egyben, táblában került modellezésre. A modellezett táblát a napelempaneléket alkotó rétegeknek megfelelően rétegből álló kompozit anyagmodellel bíró héjelemek alkotják. A napelemtáblát a tartószerkezetre szerelten, vele együtt érdemes vizsgálni, mert az egybeépített szerkezet modal analízisét, a rezgéstani karakterisztikáját a karcsú, vékony szelvényű rudakból álló tartószerkezet jelentősen befolyásolja.

A tartószerkezeteket alkotó szelvényeket általában statikusok ellenőrzik le az előírásoknak megfelelő terheléskombinációk mellett külön véve a kétlábás keretet és az azokat összekötő szelemeneket. A dolgozat ezzel szemben a napelempanelék felületén működő valósághoz közelebb, felületeken megoszló terhelésekkel számol a szabvány szerinti veendő hőterhelésből, amelyek egyúttal a rögzítési pontokat és a paneleket tartó vázat is leterhelik. A terhelt szerkezet sajátrezgéseit pedig hatékonyan elő lehet állítani a megfelelően elkészített szimulációs modellből.

2. Szerkezeti kialakítás

Napelemrendszerek főbb alkotórészei az inverter, a PV-panel és a panelt megfelelő pozícióba állító tartószerkezet. A napelem-tartószerkezetek kiemelt célja a hatékony, stabil és biztonságos rögzítés lehetőségének biztosítása a panelek felszereléséhez. A napelem működése optimális lesz, ha a tartószerkezet kialakítása és elhelyezése is megfelelő. Fontos, hogy a tartó alkotórészei a várható igénybevételekkel szemben megfelelő merevséget mutassanak és korróziómentes kivitelben készüljenek, így időjárásállónak bizonyuljanak. Szempont még a könnyű telepíthetőség és szerelhetőség, amelyek biztosítják azt, hogy maximálni lehessen hosszú távon is a napenergia költséghatékony begyűjtését. Szerkezet telepítése előtt, már a tervezési folyamatban figyelembe kell venni az egyéb időjárási tényezőket is, például az esetleges hőmennyiséget, valamint a várható szélsébséget és annak jellemző irányát.

A vizsgált szerkezet alkotóelemeinek befoglaló méretei megfelelnek a szokásos méreteknak, bár a szerkezeti kialakítás modellezése egyszerűsített, de kialakításában így is törekvés volt az alkotóelemek elhelyezkedésének és helyzetének pontos megadására, azaz az igényesebb geometriai modellalkotásra. A tartószerkezetet modellező drótváz vonalai a gerendák középvonalainak, azaz a szelvénytűlypontokat összekötő egyenes vonaldaraboknak felelnek meg, így maga a drótváz több, de nem kapcsolódó, különálló középvonalból áll össze, bonyolítva a modellösszeállítást. A modell így valóságközelibb és alkalmasabb a szimulációs eredmények gyakorlati használhatóságának demonstrációjára. Ennek ára az alkotóelemeken létrehozott különálló hálózások, végeselemes felbontások összekapcsolásának megoldása. A modellezés során végeselemes hálók kapcsolódása a csavarkötések geometriai középpontjaiban került megvalósításra. A választott tartószerkezeti kialakítás a PV-paneleknek fix, 25 fokos dőlésszöveget biztosít. A hajlított-nyírt rúdelemekhez rendelt szelvények orientációja is valóságos helyzetnek megfelelő, szem előtt tartva a geometriai modellben a szerelhetőséghez szükséges elrendezéseket. Tapasztalatok alapján és szoftveresen leellenőrizve szükséges különböző merevítőket is alkalmazni a kereteken és azok között, mivel lábaik karcsú rúdként viselkednek, így célszerű csökkenteni a kihajlási hosszukat, támogatva az állékonyságot. A merevítők többféleképpen is felhelyezhetők. Az 1. ábrán látható a választott, egyébként bevett elrendezés.



1. ábra. Tartószerkezet kialakítása jellemző befoglaló méretekkel

A tartószerkezet néhány alkotóeleme ún. profilalakító hengerléssel is készülhet egy 2 mm vastagságú acélszalagból. A folyamat során az acélszalag alakító görgők sora között halad, melyek azt több fázisban munkálják meg. Minden állomás csak annyi alakítást végez, amely még nem eredményez nem kívánt deformációt az anyagban. A görgők kialakítását mindig a gyártani kívánt profil alakjához, méretéhez kell igazítani. A szerszám görgői pedig speciális, edzett szerszámacélból készülnek, hiszen használatuk során jelentős koptató igénybevételnek vannak kitéve. A hengerelt profil gyártási technológiája jóval hatékonyabb, mint a klasszikus élhajlítás, mert a folyamatos gyártás során gyakorlatilag az összes hajlítás egyszerre készül. A szelemeneken specifikusan további merevítést adó peremezést alakíthatnak ki, de ezektől itt eltekintve a profilhoz nagyon közeli U szelvény került figyelembevételre.

A vizsgált feladat geometriai modelljében a keretek elemei, lábai, gerendái és a merevítők $C120 \times 45 \times 15 \times 2,0$ profilú, míg a hossztartók, azaz szelemenek az $U80 \times 40 \times 2,0$ kialakítású hengerelt profilú acélszelvényként lettek megadva. A kétlábás tartószerkezet lábait általában a kb. 2,0 m mélyen földbe lévő talajcsavarokhoz csatlakoznak. A csavaros csatlakozásnak figyelembevétele a modellezés során a lábaknál előírt fix, azaz teljes megfogásokkal történt. A tartószerkezet főbb befoglaló méretei az 1. ábrán láthatóak.

A vázszerkezet alapanyaga, az általában 2 mm vastagságú acélszalag már korrózióvédelmi mechanizmussal is rendelkezhet, amelyet például a Magnelis® bevonat speciális összetétele biztosíthat számára, amely egy nagyon sűrű, stabil és tartós védőréteg kialakulását eredményezi a kezelt felületeken. Ez a kompakt réteg gátat jelent a korrózió ellen, megakadályozva azt, hogy az alatta lévő acél érintkezzen a környezettel, rendkívül hatékony korrózióvédelmet adva a legzordabb környezetben is. A bevonat legfontosabb előnye más fémes bevonatokhoz képest még az is, hogy az erősen deformált zónákon is sűrű réteget képez és így kb. 10 évig a szerkezet korrózióvédelemmel lesz. A bevonat alkalmazása költséghatékonyabb is más megoldásokkal szemben.

A több rétegből álló napelempanelok külső műanyag vagy üveg védőrétege védelmet nyújt az időjárás ellen, a fotovoltaiikus cellák nyerik az elektromos energiát, az alsó réteg biztosítja a mechanikai védelmet, míg egy alumíniumkeretezés merevséget és további védelmet biztosít. A panel belső részei a kompozit anyagok felhasználásával gyártott félvezető cellák, amelyekben két különböző szennyezettségű réteg található egy pozitív (p típusú) és egy negatív (n típusú). E rétegek között kialakuló határretegben a különböző szennyezettségű félvezetők napfény segítségével semlegesítődnek és az így létrejövő feszültség adja a napelemes panel villamosenergia-termelését. A fő alkotóelem, a szilícium egy elég ellenálló anyag, de környezeti hatások ellen védeni kell. Természetesen villamos szigetelésre is szükség van. Különböző felépítésű napelemek és eltérő gyártási technológiák léteznek. Mivel a napelempanel működése a fény elnyelésén alapul, ezért a fényvisszaverődést is csökkentik további rétegekkel és a szilícium érdesítésével.

1. táblázat

Napelemcella modellezés során használt jellemzői

Réteg	Anyag	Sűrűség (kg/m ³)	Young-modulus (GPa)	Poisson- tényező	Vastagság (mm)
Védőüveg	Edzett üveg	2500	70	0,2	4
Antireflexiós bevonat	Szilícium- nitrid (Si ₃ N ₄)	3200	300	0,27	0,45
Félvezető rétegek	Szilícium	2330	170	0,28	0,25
Hátsó kontaktus	Alumínium	2700	70	0,33	0,02
Encapsulant	Etilén-vinil- acetát (EVA)	960	0,05	0,4	0,5
Hátlap	Tedlar (PVF)	1500	3	0,38	0,15

A tartóvázra felszerelt PV-panelek, a szimulációs feladatokban átlagos panelméretekkel ($a = 1134$ mm, $b = 2278$ mm) bíró 12 darab PV-panelt, egyetlen kompozittábla modellezi, amelynél a kompozit rétegek anyagi tulajdonságai és vastagságai az 1. táblázatban foglaltak alapján kerültek megadásra az anyagmodellek összeállítása során a numerikus szimulációban.

A PV-panelek a szelemenekhez általában csúszó csavarozással rögzítik, így modell összeállításakor figyelembevételre került, hogy a PV-panel 4 pontban rögzül. A tartószerkezet sem hegesztett, hanem csavarral szerelt. A csavarkötésbe tett helyeknél az egyes alkotórészek végeselemes felbontásainak összekötésére az ún. beam típusú MPC-kapcsolatok szolgáltak a teljes szerkezetre vonatkozó végeselemes modellben. Az alkalmazott szoftverben egy globális kontakt beállítása is megtörtént a teljes szerkezetre nézve.

3. Hőteher meghatározása

A hőteher megállapítása az MSZ EN 1991-1-3:2005 Eurocode 1 szabványrendszer alapján az

$$s_d = \gamma_s S \quad (1)$$

összefüggéssel történik, amelyben az s a szöget bezáró tetők vízszintes vetületére vonatkoztatott függőleges irányú hőteher alapértékét, míg a $\gamma_s = 1,5$ a hőteher adott parciális tényezőjét jelöli. A hőteher vízszintes vetületre vonatkozó alapértékének kiszámítására – amennyiben szél hatására még nem történt átrendeződés – az

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \quad (2)$$

összefüggés szolgál. Az s meghatározásához szükséges a μ_i hőteher alaki tényező, amely 30° hajlásszög alatt 0,8 értékkel veendő, a szél miatti C_e csökkentő tényező, amely értéke szokásos időjárási viszonyok esetén 1,0-nél kisebb értékkel vehető figyelembe az erőteljes szél hőterhet csökkentő hatása miatt és a most 1 értékkel figyelembe vett C_t hőmérsékleti csökkentő tényező, valamint a felszíni hőteher s_k -val jelölt karakterisztikus értéke. A hőterhelés meghatározásához szükséges C_e együtthatónál figyelembe kell venni a jövőbeli változást is. A 2. táblázat tartalmazza az erre vonatkozó értékeket különböző te-repviszonyokhoz kötötten.

2. táblázat

Szél általi csökkentő tényező

Topográfia	C_e
Széljárta	0,8
Normál	1
Védett	1,2

A C_e kiválasztásakor széljárta területnek minősül a minden oldalról szabad, akadálymentes terület, ahol csak csekély számú fa, vagy magasabb épület található. A napelemeket általában ilyen helyekre telepítik. Normál domborzati területen a szél nem távolít el havat jelentősebb mértékben. Védett terület az, ami jelentősen alacsonyabb, mint az őt körülvevő terep, azaz az ott található építmények, fák stb. A hőteher karakterisztikus értékét az

$$s_k = 0,25 \left(1 + \frac{A}{100} \right) \quad (3)$$

összefüggés adja meg. Magyarországon s_k felszíni hőteher karakterisztikus értékének minimuma $1,25 \text{ kN/m}^2$, amely az $A = 400 \text{ m}$ tengerszint feletti értéknek felel meg. A hőteher alaki tényezője kiolvasható a szabványból, amely 30° dőlésszög alatt $0,8$ értéket vesz fel. Helyettesítve a (2) képletbe a megfontolások alapján vett állandókat az

$$s = 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1,25 = 0,8 \text{ kN/m}^2 \quad (4)$$

hőteher alapértékből adódó

$$s_d = 1,5 \cdot 0,8 = 1,2 \text{ kN/m}^2 \quad (5)$$

számérték határozza meg a hőterhelés számszerűsített értékét a szimulációs feladat összeállításakor. Az s_d értéket felület mentén megoszló terhelés nagyságaként, a talajra merőlegesen, lefelé irányítva kell a napelempanelok alkotta táblán működtetni $0,0012 \text{ N/mm}^2$ értékben megadva.

4. Hőteher által leterhelt szerkezet sajátrezgései

A szerkezetek sajátértékfeladatainak numerikus megoldására szolgáló bevett eljárás a Láncczos-módszer. Ennek választása célravezetőbb a szimulációs szoftver nyújtotta választási lehetőségek közül (Bathe, 1996; Abaqus 6.13), ha a rezgéstani feladat szabadságfoka nagy, vagy a feladat jellege igényli a numerikusan hatékonyabb módszert. A megoldás részeként a sajátrezgések képi megjelenítésén a maximális elmozdulás helye a színskálán általában piros színnel jelölt. E számítások alapvető jelentősége a gerjesztésnek kitett szerkezetek esetén a sajátfrekvenciák valamelyikével egybeeső gerjesztési frekvencia okozta rezonanciakatasztrófa megelőzésében van, mivel az általában a leggyengébb alkotórészek törésében jelentkezik, gátolva így a szerkezet üzemszerű működését. A rezonanciakatasztrófa lehetséges veszélyei miatt különféle ipari területeken végeznek is erre vizsgálatokat.

A szerkezet rezgéstani vizsgálatai során a terhelések hatását is figyelembe vevő sajátfrekvencia-számítások csak egymást követő két lépésben végezhetők el. Első lépésben kerül sor az alkalmazott hőterhelés hatására rugalmas alakváltozást szenvedő szerkezet deformált alakjának meghatározására a kitűzött megfogások és terhelések felvétele mellett. Ezt a lépést a használt szoftverben az NIgeom beállítása határozza meg, mert így a szoftver figyelembe veszi a geometriai nemlinearitást a terhelt alak kiszámításában és a programban csak emellett lehetséges a terhelés hatására kialakuló egyensúlyi deformált alakot adni a második szimulációs lépésben végzett lineáris perturbációnak. Az első lépésnek alárendelt második lépésben kerül sor a hőteherrel terhelt alak geometriáján a sajátértékek kinyerésére. Megjegyzendő, hogy a dinamikai és rezgéstani és az NIgeom beállítást használó feladatokban a lineáris approximációt alkalmazó véges elemek használata mindig célravezetőbb. A meghatározott és növekvő sorrendbe állított első néhány domináns sajátfrekvenciához tartozó rezgéskép ezután kerül meghatározásra, mert bizonyítható módon a sajátfrekvenciák mindig pontosabban számíthatók, mint a rezgéseképek és így a frekvenciákból számított sajátrezgéseképek lesznek pontosabbak.

3. táblázat

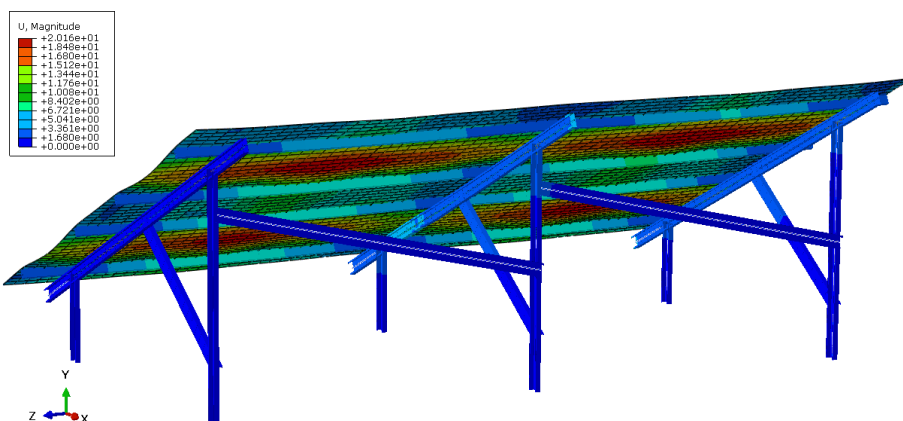
A terheletlen szerkezeten és hőteher mellett számolt sajátfrekvenciák értékei

Modus sorszám	Sajátfrekvencia [Hz]	
	terheletlen esetben	előírt hőteher alatt
1.	6,2038	5,8333
2.	8,9630	8,3362

Modus sorszáma	Sajátfrekvencia [Hz]	
	terheletlen esetben	előírt hőteher alatt
3.	9,1250	9,6308
4.	9,2150	9,9735
5.	9,2267	10,026
6.	10,094	10,065

A vázszerkezetre szerelt PV-panelek, a modellezett kompozittáblán előírt $0,0012 \text{ N/mm}^2$ terhelés mellett a nagyság szerint sorba rendezett sajátfrekvenciákra a 3. táblázat harmadik oszlopába foglalt számértékek adódtak, amelyek összevetése a táblázat második oszlopában álló, terheletlen eset szintén sorba állított számértékeivel rámutat arra, hogy a vékonyszelvényű rudakból kialakított vázszerkezet a felvett hőterhelés alatt hajlamosabbá válik a stabilitásvesztésre a domináns első sajátfrekvenciák alapján. Tapasztalat szerint ezek az értékek szignifikánsan eltérnek a szélterheléseknél látottaktól, mert a nagyobb terhelést jelentő hőmennyiség jobban elhangolja a szerkezetet.

A hőterhelés a modellezett napelemtábla felszínén, az függőlegesen lefele működve rászorítja a táblát tartószerkezet szelemenjeire és az így kialakuló elmozdulások nagysága van a 2. ábrán bemutatva.

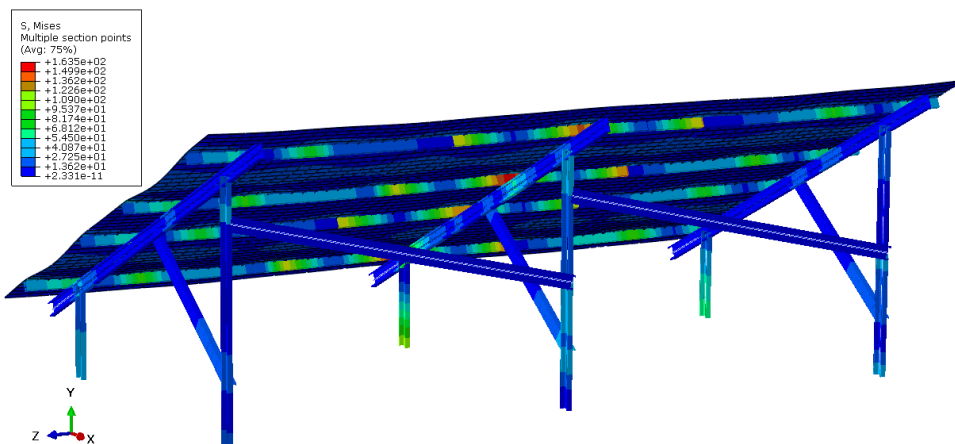


2. ábra. A hőteher alatti elmozdulások nagysága mm-ben

A terhelt állapotban kialakuló deformált alakon a szelemenek és tábla között záródnak egyes kontaktok, azaz érintkezés jön létre a felületek közt. A 3. ábrán beazonosítható, hogy a felvett terhelés okozta feszültségkoncentrációnak legjobban kitett részeknek a hossztartó szelemenek bizonyultak.

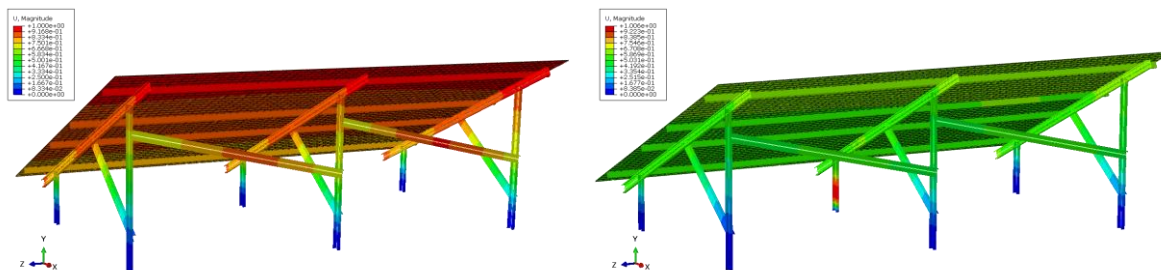
A teljes szerkezetet figyelembe véve a maximális $163,5 \text{ MPa}$ értékű redukált feszültség is ott keletkezett. Az $R_e = 350 \text{ MPa}$ folyáshatár esetén ez a tartórész is megfelel $n_t = 2,14$ tényleges biztonsági tényező mellett. A napelemes rendszerek telepítésének előkészülete során szelemeneket, főleg, ha egyedi profilúak külön, mint statikailag határozatlan, folytatólagosan többtámaszú tartót szilárdságtani szempontok szerint szükséges ellenőrizni, de az ellenőrzést most a végeszelelemes számítás elvégezte.

Jól látszik az alábbi ábrákon ábrázolt rezgéseképeken a tartószerkezet gerendáinak, szelemenjeinek stb. alkotórészeinek PV-panelekkel történő együtt mozgása. A 3. táblázatba foglalt, a terhelés hatására változó sajátfrekvenciák mellett kitűnik az is, hogy a sorba állított sajátfrekvenciákhoz tartozó rezgések is jól láthatólag átrendeződtek.



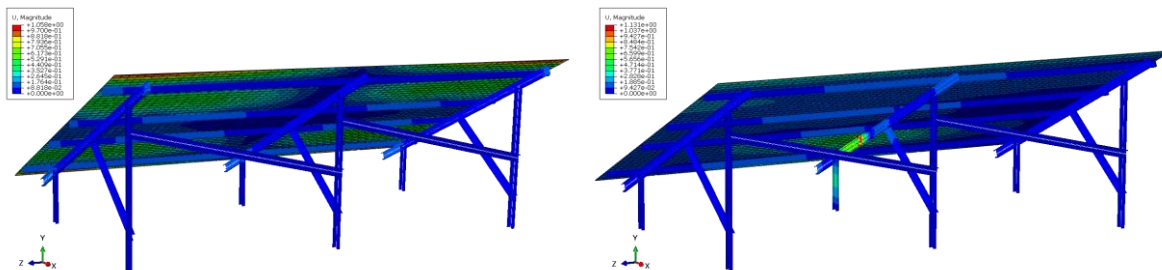
3. ábra. A hőteher alatt ébredő egyenértékű feszültség MPa-ban

A 4. ábrán látható módon terheletlen esetben az első sajátrezgéskép a tartóváz mozgását mutatja, míg a magasabb frekvenciákhoz tartozó ábrákon már inkább a tábla hajlítórezgései dominálnak.



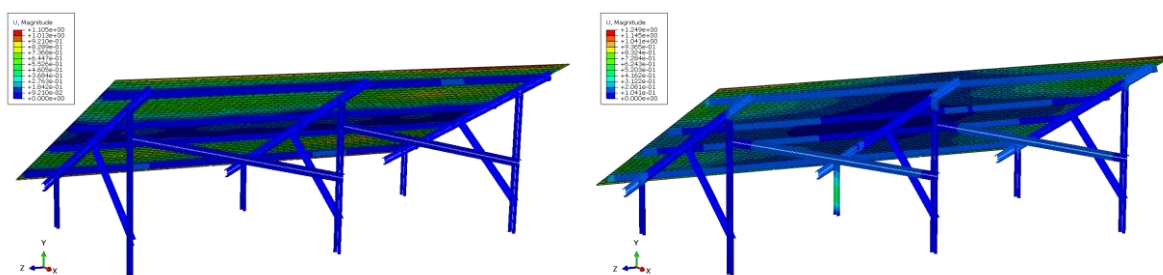
4. ábra. A terheletlen állapotban és hőteher esetén az 1. rezgéseképek

A függőleges irányban, lefelé felvett terhelés hatására a tartóváz gerendáinak hajlító rezgései lépnek fel először, de végig szignifikánsan megjelennek a tábla rezgései mellett a magasabb frekvenciákon is. Indokolt volt tehát a tartóvázat erősíteni keresztmerezítőkkel, illetve hosszmeresztőkkel. A kritikus részek az ezt követő ábrákon is főleg a középső kétlábos tartószerkezeten jelennek meg a dominánsabb első három sajátfrekvenciáknál.



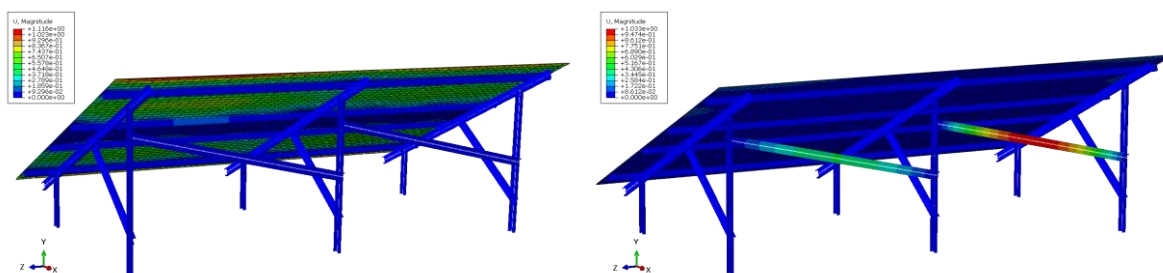
5. ábra. A terheletlen állapotban és hőteher esetén a 2. rezgéseképek

A kialakult rezgéseképek természetesen a geometriától és az anyagminőségtől erősen függenek, melyeket a modellezett alátámasztás és a kereszt- és hosszmerítések is döntően befolyásolnak. A számítási munkát az érintkezési feladat megoldása növeli, mert a szerkezeti kialakításon a gerendák és a panelek mérethelyes középvonal-távolságokkal kerültek modellezésre, így a közöttük lévő távolságok megjelenésével a szerkezet lehetséges deformációi érintkezési lehetőségeket nyitottak. A kialakult, 3. ábrán látható, statikusan ráadott terheléshez tartozó deformált alak pedig erősen befolyásolja a 4–7. ábrákon látható rezgéseképeket. Ez a változás az ábrákon is jól demonstrált a terheletlen esethez tartozó rezgéseképek bemutatásával.



6. ábra. A terheletlen állapotban és hőteher esetén a 3. rezgéseképek

A hőterhelésre bemutatott rezgéseképek hasonló jelleget mutatnak, azaz sorban egymást követő rezgésalakokban a tartószerkezet gerendáinak mozgásai dominálnak. Mutatva azt, hogy a szerkezet extrém hőterhelésére a várható következmény a tartóváz összezsugorlása lesz, amely ennél a kialakításnál leginkább a középső keret rövidebb lábánál várható. A vázszerkezet mozgásai miatt, mivel csavarozott szerkezetről van szó, érdemes a csavarokat időként újra meghúzni.



7. ábra. A terheletlen állapotban és hőteher esetén a 4. rezgéseképek.

Az előállított rezgéseképek felhasználhatók későbbiekben a gerjesztett tartószerkezet esetén a különböző transziens viselkedések modellezésére is.

5. Összefoglalás

A tartószerkezetet modellezése során kialakított drótvázmodellben a gerendák tényleges geometriai középvonalaihoz, a szelvénytárcsákat összekötő, egyenes vonaldarabokhoz a megfelelő szelvényorientációk lettek társítva. A váz geometriai modelljéhez rendelt (beam) hajlított-nyírt rúdelemekből álló végelemes felbontások és a napelemeket egyben modellező táblát alkotó (shell) héjelemek csatlakozását meg kellett oldani a valósághoz közelebb és gyakorlati használhatóságra alkalmasabb szimulációs ered-

mények érdekében. A napelempaneleket tartó szelemenek és a vázszerkezetben csavarkötésben összekapcsolt alkatrészek nyitott, vékony falú és szelvényű gerendák, ha a szerkezet károsodik a csavarfejek alatt elhelyezkedő részeik könnyen deformálódhatnak. A számítások bemutatták azt, milyenek lehetnek a szerkezet mozgásainak, rezgéseinek változása hőterhelés alatt és ezek utalnak a lehetséges károsodási folyamatokra is. Ezek a hatások a csavarkötések lazulását, illetve idő előtti tönkremenetelét okozhatják.

A hőterhelés kiszámítása a regionális időjárási adatok figyelembevételével történt a napelempanelek felületére hulló hőmennyiség alapján. A deformációk és sajátrezgések vizsgálata panelokat modellező táblán és annak rögzítését biztosító tartószerkezeten egyben történt, mert a kétlábás, földi telepítésnél a tartószerkezeti kialakítás a rezgésekre a másféle megoldásoknál nagyobb mértékben mutat érzékenységet, de ezt lehet a hossz- és keresztmerezítésekkel csökkenteni, ahogy az a bemutatott szerkezeten is történt.

Modal analízis Abaqus szoftver használatával került elvégzésre. A napelemtábla és a vázszerkezet alkotóelemei végeselemes felbontásainak összekapcsolása után a végeselemes modellben már kellő hatékonysággal volt vizsgálható a feladat. Megállapíthatóvá vált az összeszerelt szerkezet rezgéstani karakterisztikája terheletlen állapotban, illetve hőteher mellett is. Az eredmények azt mutatják, hogy a szerkezet legsérülékenyebb részeinek szilárdságtani szempontból a hossztartók mutatkoznak, illetve rezgéstani vizsgálatok alapján a középső kétlábás tartó. A dolgozat összességében hozzájárulhat a napelemes rendszerek szerkezeti tervezésének optimalizálásához, segítve a hosszú távú megbízható működést és a fenntarthatóságot.

Irodalom

- [1] AXISVM. *Statikai számító és méretező szoftver*. <https://axisvm.hu/>
- [2] Bathe, K. J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice-Hall Inc.: Englewood Cliffs, NJ, USA.
- [3] *Abaqus 6.13 online documentation*. Dassault Systems. 2015.
- [4] Bao, T., Li, Z., Pu, O., Chan, R. W. K., Zhao, Z., Pan, Y., Yang, Y., Huang, B., Wu, H. (2023). Modal analysis of tracking photovoltaic support system. *Solar Energy*, 265, 112088. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112088>
- [5] He, X.-H., Ding, H., Jing, H.-Q., Zhang, F., Wu, X.-P., Weng, X.-J. (2020). Wind-induced vibration and its suppression of photovoltaic modules supported by suspension cables. *Aerodyn*, 206, 104275. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104275>
- [6] Reina, G. P., De Stefano, G. (2017). Computational evaluation of wind loads on sun-tracking ground-mounted photovoltaic panel arrays. *Aerodyn*, 170, 283–293. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.002>
- [7] Jubayer, C. M., Hangan, H. (2016). A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 153, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.03.009>