

MODAL ANALÍZIS SZÉLTERHELÉSNEK KITETT FÖLDI TELEPÍTÉSŰ NAPELEMES SZERKEZETRE

MODAL ANALYSIS OF A GROUND-MOUNTED PHOTOVOLTAIC STRUCTURE UNDER WIND LOADING

Dr. Szirbik Sándor*

ABSTRACT

This paper is dealt with some issues of the finite element analysis (FEA) of ground-mounted photovoltaic (PV) structure, focusing on the entire structure where the panels under a wind 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. The PV panels were meshed with composite shell elements. The purpose of finite element analysis is to provide a starting point for studies of the forced vibrations with the results of modal analysis.

1. BEVEZETÉS

A megújuló alternatív energiaforrások közül a már meglévő energia-portfóliókba jól illeszkedő napelem rendszerek telepítése vált Magyarországon elterjedté. A háztartási kiserőműveken kívül ipari méretű, akár több száz megawatt teljesítményt jelentő napelem parkok is jelentős mértékben kiépültek. Napelem rendszer legfőbb alkotórészei az inverter, a PV panel és a panelt megfelelő pozícióba állító tartószerkezet. Az emelkedő energiahasználat miatt ipari méretű napelemes erőművek létesítéséhez szükséges a tartószerkezetgyártásnak és telepítésnek hatékony megoldása. A nagyobb erőművek létesítése során jellemzően talajra telepített, földi tartószerkezeteket alkalmaznak. A napelem tartószerkezetek kiemelt célja a hatékony, stabil és biztonságos rögzítés lehetőségének biztosítása a panelek felszereléséhez. A napelemek működése optimális lesz, ha a tartószerkezet kialakítása és elhelyezése is megfelelő. Fontos, hogy a tartóváz alkotórészei a várható igénybevételekkel szemben megfelelő merevséget mutassanak és korróziómentes kivitelben készüljenek, így időjárásállónak is bizonyuljanak. Szempont még a könnyű telepíthetőség és helyszíni szerelhetőség, amelyek biztosítják azt, hogy maximálni lehessen hosszú távon is a napenergia költséghatékony begyűjtését. A szerkezet telepítése előtt, már a tervezési folyamatban érdemes figyelembe venni az időjárási tényezőket is, például az esetleges hőmennyiséget, valamint a várható szélsőségeset és a jellemző szélirányt.

A tervezett napelemes rendszerek tartószerkezeteinek mechanikai ellenőrzése az olykor előre kiszámíthatatlan környezeti hatások okozta igénybevételekre csak azok becsült értékeivel elvégezhető. A talajcsavaros rögzítésű, kétlábás tartószerkezet részelemeinek kialakításához, a profil-tervezéshez figyelembe veendő terhelésekre az Eurocode szerinti szél-, illetve hőterhelések szolgálnak. A tartóvázszerkezet végeselemes modelljében ezek megadása alkalmasan választott megoszló terhelés formájában történik. A hőterhelést általában statikus terhelésként kell kezelni, de a szél terhelőhatása végeselemes megközelítés mellett folyadék dinamikai szimulációkkal is vizsgálható [1, 2].

A kétlábás tartók általában szabványos profilacélból készülnek, melyekből többet hossztartókkal összekötve kialakítható a szükséges tartóváz szerkezete, amely merevítőkkal tovább is erősíthető. A tartóvázak legkritikusabb elemei a több ponton alátámasztott hossztartók, azaz szelemenek. Ezek méreteit és olykor egyedi profilkialakítását a várható igénybevételekből adódó szilárdságtani feladatok megoldásával kell ellenőrizni. A szilárdságtani számításra, a terhelt, folytatólagosan alátámasztott tartó lehajlásának ellenőrzésére, veszélyes keresztmetszet meghatározására és azon ébredő maximális feszültségérték megállapítására használható az Axisvm [3] célszoftver, kiváltva a kézi számításokat, így lerövidítve a tervezési időt. A tartószerkezeteket alkotó szelvényeket általában statikusok ellenőrzik le az előírásoknak megfelelő terheléskombinációk mellett külön véve a kétlábás keretet és az azokat összekötő szelemeneket.

2. MODELLEZÉSI KÉRDÉSEK

A szerkezet tényleges feszültségi és alakváltozási állapotának és ezen túlmenően környezeti hatások okozta rezgések elemzésére hatékonyabb eljárásnak bizonyult a végeselemes analízis. A végeselem-módszer [4] alkalmazása lehetőséget nyújt többek közt egy méretpontos térbeli modellen végzett, a felmerülő terhelési esetekre módosítási lehetőséget kínáló, a mechanikai állapotok részletes vizsgálatára alkalmas analízisre, feltárva a konstrukció gyenge pontjait. Mód nyílik továbbá a szerkezeti kialakításon eszközölt egyéb későbbi változtatások befolyásának elemzésére, például a szerkezet állékonyságára. Ezzel összhangban érdemes

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Műszaki Mechanikai Intézet

a napelemeket és tartószerkezetüket egyben, azaz már összeszerelt állapotban vizsgálni a szimulációs feladatokban. Egyszerűség végett a napelem panelek egy közös táblában kerültek héjelemekkel történő modellezésre, melyben a napelemeket alkotó rétegeket alkalmasan választott kompozit anyagmodell írja le. Az egybeépített szerkezet modal analízisét így akár terhelt állapotban is el lehet végezni, mert a szimulációban a felületén megoszló terheléssel bíró tábla rezgés karakterisztikájában az azt jelentősen befolyásoló karcsú, vékony szelvényű rudakból álló tartószerkezet hatása is kimutatható. A szabvány szerint veendő szélterhelésből a napelem panelek felületére merőlegesen működő, felületen megoszló terhelések származnak, amelyek a rögzítési pontokon keresztül a paneleket tartó vázat is érik. A leterhelt napelemes szerkezet sajátrezgése és rezgésalakjai később egyes dinamikai vizsgálatokban felhasználhatók.

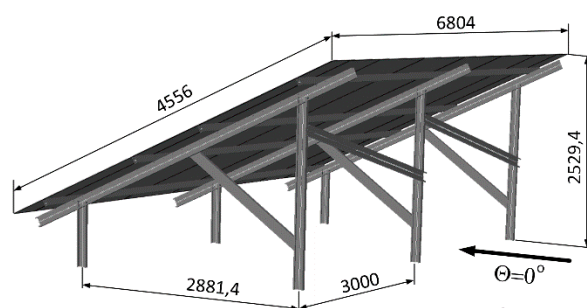
A vizsgált szerkezeti kialakítás alkotóelemeinek befoglaló méretei tipikusak, és a geometria modellezésekor az tartóváz-elemek elhelyezkedése és helyzete is ennek megtartására törekedett. Lényegében a tartószerkezetet modellező drótvázat az egyes gerendák súlyvonalai adják, így a drótvázmodell több, de nem kapcsolódó, külön álló középvonalból áll össze. A modell összeállítása így valóságközelibb lett, de szükségessé vált a drótvázmodell alkotóelemein és a napelempanelek tábláján létrehozott különálló hálók, azaz a végeleemes felbontások összekapcsolása a végeleemes modellben. A szimulációs modell megalkotása során a végeleemes hálók kapcsolódása a csavarozott szerkezet csavarkötéseinek geometriai középpontjaiban került megvalósításra.

A választott tartószerkezeti kialakítás a PV paneleknek fix, 25 fokos dőlésszöget biztosít. A tartóváz végeleemes modelljében alkalmazott hajlított-nyírt rúdelemekhez rendelt szelvények orientációja is valóságos helyzetnek megfelelő, szem előtt tartva így a szerelhetőséghez szükséges elrendezést. Tapasztalatok alapján és szoftveresen igazolhatóan, ha szükséges, lehetséges további merevítők alkalmazása a kétlábás tartókereteken, valamint a keretek összekapcsolásához, ezzel csökkentve a kihajlási hosszokat, támogatva az állékonyságot. A merevítők többféleképpen is felhelyezhetők. Célszerűnek tűnik egy bizonyos mintát követni. Az 1. ábrán látható a választott, egyébként bevett elrendezés, amely értelemszerűen merevítésekkel bír.

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 több fázisban adnak neki alakot. Minden állomás azonban csak annyi alakítást végez, amely még nem eredményez nemkívánt deformációt az alapanyagban. A görgőalakítást mindig a gyártani kívánt profilalakhoz, illetve mérethez kell igazítani. A szerszám görgői edzett szerszámacélból készülnek, hiszen használatuk során igen jelentős koptató igénybevételeknek kitéttek. A hengerelt profil gyártási

technológiája jóval hatékonyabbnak bizonyult, mint a klasszikus élhajlítás, mert a folyamatos gyártás során gyakorlatilag az összes hajlítás egyszerre készül. A szelemeneken specifikusan további merevítést adó peremezést alakítanak ki, de ezektől itt eltekintve a szelemen profilhoz közeli U szelvény került megadásra.

A vizsgált feladat geometriai modelljében a hajlított-nyírt rúdelemekhez rendelt keresztmetszetek, azaz a keretek elemei, lábai, gerendái és a merevítők C120×45×15×2,0 profilú, míg a hossztartók, azaz szelemenek az U80×40×2,0 kialakítású hengerelt profilú acélszelvényként lettek megadva. A kétlábás tartószerkezet lábait általában a kb. 2 m mélységben földben lévő talajcsavarokhoz csatlakoznak.



1. ábra Napelemes szerkezet kialakítása jellemző befoglaló méretekkel

A talajcsavaros csatlakozás figyelembevétele a megtámasztások modellezése során a keretek lábainál előírt fix, azaz teljes megfogásokkal történt. A vázszerkezet alapanyaga, a 2 mm vastagságú acélszalag korrózióvédelmi bevonattal is rendelkezhet, amely speciális összetétele egy nagyon sűrű, stabil és tartós védőréteg kialakulását eredményezi a kezelt felületeken. Ez jelent gátat a korrózió ellen, megakadályozva azt, hogy az alatta lévő acél érintkezzen a környezettel, hatékony korrózióvédelmet adva a kültéri környezetben.

A végeleemes felbontás rúdelemeihez rendelt lineáris anyagmodellben leírt acélszalagot az $E = 2,1 \times 10^5$ MPa Young-modulus, $\nu = 0,3$ Poisson-szám és $\rho = 7,85 \times 10^{-9}$ t/mm³ sűrűség jellemzi.

A napfény segítségével létrejövő feszültség adja a napelemes panel villamosenergia termelését. A rétegekből álló napelem panel külső rétege nyújt védelmet az időjárás ellen, a belső rétegek nyerik az elektromos energiát, az alsó réteg biztosítja a mechanikai védelmet, míg egy alumínium keretezés a merevséget. A panel belső részei, kompozit anyagok felhasználásával gyártott félvezető cellák fő alkotóeleme a szilícium. A tartóvázra felszerelt PV paneleket, 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: rugalmassági modulusuk, sűrűségük és vastagságaik kerültek megadásra az anyagmodellek összeállítása során a numerikus szimulációban.

A PV paneleket a szelemenekhez általában csúszó csavarozással rögzítik, így a modell összeállításakor figyelembevételre került, hogy egy-egy PV panel 4 pontban rögzül a vázhoz. Maga a tartószerkezet is csavarokkal összeszerelt. A csavarkötésbe tett helyeknél az egyes alkotórészek végeselemes felbontásainak összekötésére az ún. MPC (Multi-Point Constraint) kapcsolatok definiáltak a teljes szerkezet végeselemes modelljében, amelyben a globális kontakt előírása is meg történt.

3. SZÉL OKOZTA TERHELÉSNEK KITETT SZERKEZET MODAL ANALÍZISE

A szélterhelés megadásával az Eurocode MSZ EN 1991-1-4 szabvány foglalkozik, amely alapján a végeselemes modellben a terheléserőterek megállapításra kerültek. A telepítési helyek meteorológiai adatai hozzáférhetőek. A napelemekkel felszerelt talajcsavaros földi telepítésű tartóvázat pedig nyitott épületnek tekintjük. A szélteher karakterisztikus értéke a

$$q_b = \frac{1}{2} \rho v_b^2 \quad (1)$$

képlet alapján adódik a mérsékelt szeles vidéknek vehető Magyarországon átlagos értékű $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ levegő sűrűség és a $v_b = 20 \text{ m/s}$ referencia szélesebség értékből 250 N/m^2 nagyságúnak. A lokális tényezők által is befolyásolt

$$q_p(z) = q_b c_e(z) \quad (2)$$

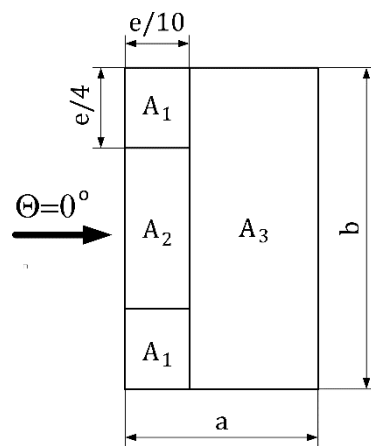
szélesebséget a különböző beépítettségi kategóriák határozzák meg a helyszíntényező diagramból kivett értékkel. Az A felület nagyságtól is függő c_{pe} külső nyomási tényezővel szorzódó szélesebség megadja a

$$w_e = q_p(z) c_{pe} \quad (3)$$

szélnyomást. Ha a táblafelület $A \geq 10 \text{ m}^2$, akkor $c_{pe} = c_{pe,10}$, külső nyomási tényező értékei egy θ szöggel jellemzett szélirányokhoz szabványból, táblázatos formában, adott hajlásszöghöz megállapíthatók. Esetünkben az értéke $w_e = 375 \text{ N/m}^2$.

A napelem táblán különböző nyomási tényezőjű zónákat különböztetünk meg. A zónák meghatározásához szükséges $b = 6804 \text{ mm}$ itt a napelem tábla szélirányra merőleges oldalhossza, $h = 2529,4 \text{ mm}$ a szerkezet széltámadta oldal magassága, és $a = 4556 \text{ mm}$ itt a napelem tábla széliránnyal párhuzamos oldalhossza. Ezek felhasználásával képezhető egy $e = \min \{b, 2h\}$ érték, amely segítségével a 2. ábrán látható zónák különböztethetők meg az említett, ábrán is berajzolt, $\theta = 0^\circ$ szöghöz rendelt szélirány esetében. Ez igaz az ellenirányban, $\theta = 180^\circ$ szélirányból, azaz ismét merőlegesen a tábla hosszabb

oldalára, de a dőlésszög miatt alacsonyabb, szélirányba $h = 604 \text{ mm}$ magasságú szerkezetet támadó esetre.



2. ábra Zónák szélteherre $\theta = 0^\circ$ szélirányra

A napelem táblán a szélterhelés meghatározott zónákra előírt nagyságban kerül előírásra. A zónák területe, illetve elhelyezkedése a 2. ábra alapján megállapítható az adott szélirány esetében.

A külső felületre ható szélnyomásból és a különböző nyomási tényezőjű zónákból számítható az

$$F_w = c_s c_d \sum w_e A_{ref} \quad (4)$$

összegzett szélerő is, melyben $c_s c_d$ mérettényező és szélhatás dinamikus tényező szorzata adja a szerkezeti tényezőt, mely szokványos esetben egynek vehető fel, míg az A_{ref} a 2. ábrán látható A_1 , A_2 és A_3 részterületek nagyságát jelenti. Hasonló gondolatmenetet követve, de más kiosztású zónákkal a $\theta = 90^\circ$ szélirányhoz is meghatározható összetett szélerő.

A napelemes szerkezet modal analízise során sajátfrekvenciák és vonatkozó rezgések képek kerülnek meghatározásra a numerikusan pontosabb és általában hatékonyabb Lánczos-módszer kiválasztása mellett szoftveresen [5], ahol a megoldás részeként a sajátrezgések képek grafikus megjelenítésére is van lehetőség. A terhelések hatását figyelembe vevő sajátfrekvencia-számítások csak két egymást követő lépésben végezhetők el. Első lépésben kerül sor a szélerők adott zónákban, mint terhelések felvétele és a lábak teljes megfogása mellett a rugalmas alakváltozást elszenvedő szerkezet deformált alakjának meghatározására. Az első lépést az Abaqus szoftverben az Nlgeom beállítás mellett tesszük, mert a szoftverben csak így 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 statikusan már felterhelt szerkezet deformációt szenvedett geometriáján a sajátértékek kinyerésére.

Amíg a hőterhelés napelem tábla felületére statikusan, talajra merőlegesen és értelemszerűen lefelé irányított

módon definiált, addig a szélterhelés a napelem tábla alapsíkjára merőlegesen, adott intenzitással az adott zónákban fejti ki hatását. Szélterhelésnél meg kell különböztetni a szélirány és a szerkezet orientációja alapján a szélnyomást és a szélszívást.

A terheletlen szerkezet esetén a sajátrezgések első sajátfrekvenciája 6 Hz-nél van és a rákövetkező 5 darab 8,9 Hz és 10 Hz közé esik. A szélterhelések közül értelemszerűen a $\Theta = 0^\circ$ szélirányhoz tartozó emeli meg a napelem táblát nagyobb mértékben, azaz alakapva a szerkezetnek a tartószerkezet lábainak megfogásaitól húzza felfele, megfeszítve azt, így csak magasabb frekvenciákon jöhet rezgésbe a szerkezet. Ez az állapot veszélyes a csúszó csavarozással rögzített panelek csavarkötéseire. A nagyobb mértékű terhelést jelentő hőteher viszont csökkenti az első sajátfrekvenciát 5,8 Hz értékre. Ez esetben a szerkezet nagyobb hajlandóságot mutat a hőteher alatti összecsuklásra, azaz a vázszerkezet karcsú lábai veszélyesek.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A terhelések megadása a regionális időjárási adatok figyelembevételével történt a napelem panelek felületére vonatkozó szélterhelés, illetve hőterhelés 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. A vizsgált vázszerkezeten ezek hatását a gyakorlati tapasztalatok alapján eleve a hossz- és keresztmerezítésekkel csökkenteni sikerült.

A tartóváz drótmódeljét alkotó hajlított-nyírt rúdelemekből álló végeleemes felbontások és a napelemeket egy táblában kezelő héjelemekre bontott felület csatlakozási pontjai a valós csavározási helyek középpontjainak felelnek meg. A napelem paneleket tartó szelemenek és a vázszerkezet rúdjai nyitott, vékonyfalú szelvényű gerendák, amelyek csavarkötéssel szereltek.

Modal analízis az Abaqus szoftver használatával került elvégzésre a napelem tábla és a tartóváz-elemek végeleemes felbontásainak egy végeleemes modellben történő összekapcsolása után. Megállapíthatóvá vált az összeszerelt szerkezet rezgéstani karakterisztikája terheletlen állapotban, illetve környezeti terhelések mellett is. Az eredmények azt mutatják, hogy a szerkezet legsérülékenyebb részeinek szilárdságtani szempontból a hossztartók mutatkoznak, illetve a csúszó csavarkötések, ha a szelvények deformációja széllesek hatására jelentős lesz.

A számítások igazolták, hogy a szerkezet mozgásait befolyásoló sajátrezgések hő- és szélterhelés alatt kis mértékben, de változnak és elindíthatnak lehetséges károsodási folyamatokat. Ezek a hatások értelemszerűen okozhatják egyes csavarkötések lazulását, illetve idő előtti tönkremenetelét is. Ha a szerkezet károsodik, a csavarfejek alatt elhelyezkedő nem nagyon kiterjedt

felületű részek könnyen deformálódhatnak, amely a bemutatott szélterhelések esetében $\Theta = 0^\circ$ széliránynál jelent veszélyt.

A dolgozat a napelemes rendszerek szerkezeti tervezésének optimalizálásához, illetve széllesek későbbi vizsgálatához hasznos segítve a hosszú távú megbízható működést és a fenntarthatóságot.

5. SUMMARY

The current study was devoted to the modal analysis of a ground-mounted photovoltaic structure, focusing on the entire structure where the panels under a wind load considering regional climatic data. The finite element analysis can be used to predict the shape modes and natural vibrations of the entire structure including structural elements, namely, the solar panels and support structure. The modal analysis was performed not only the PV panel, as two-pile mounting structure is more susceptible to vibrations than other support solutions.

The wire frame consists of open, thin-walled beams, while the PV panels were meshed with composite shell elements. The software Abaqus was used to perform the modal analysis. The elements of the support structure and the solar panels are connected by multi-point constraints. Simulations confirm that the natural vibrations of the structure change slightly under wind load, which can trigger possible damage processes that may lead to the loosening deformation of the screws of sliding connections or even distortions of the frame prematurely. The open, thin-walled tie beams and its portions under the screw heads can be easily deformed, which poses the greatest risk in the case of wind loads in the $\Theta = 0^\circ$ direction.

Overall, the study contributes to the optimization of the structural design of solar PV systems, helping to ensure long-term reliable operation and sustainability.

6. IRODALOM

- [1] REINA G. P., DE STEFANO G.: *Computational evaluation of wind loads on sun-tracking ground-mounted photovoltaic panel arrays*, Aerodyn. 170, 2017, pp. 283-293.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.09.002>
- [2] JUBAYER C. M., HANGAN H.: *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, 2016, pp. 60-70.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.03.009>
- [3] AXISVM, Statikai számító és méretező szoftver <https://axisvm.hu/>
- [4] BATHE K. J.: *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall Inc.: Englewood Cliffs, NJ, USA, 1996.
- [5] *Abaqus 6.13 online documentation*, Dassault Systems, 2015