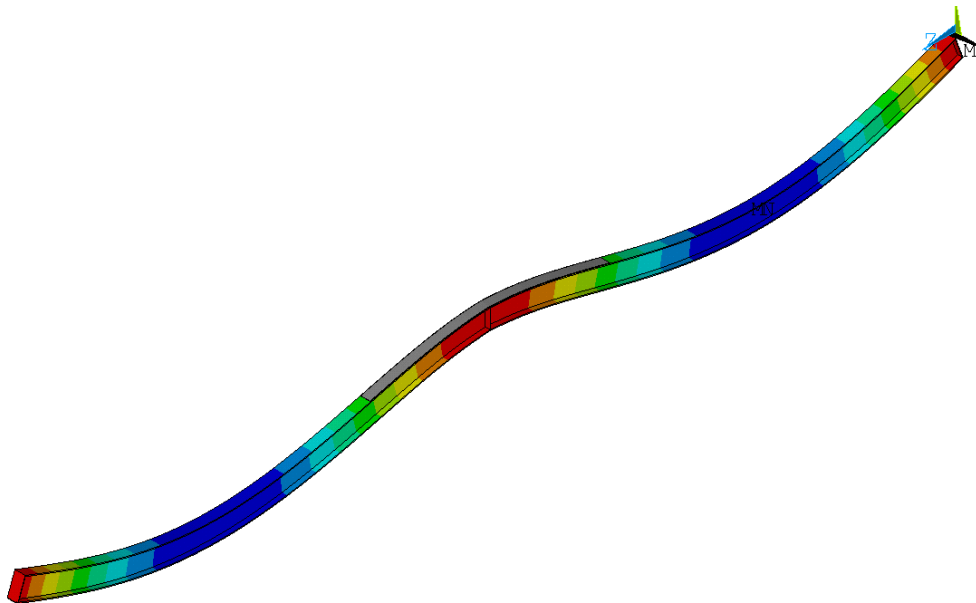


M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Hidak és Szerkezetek Tanszék
Tudományos Diákköri konferencia
2020

**Meglévő acélszerkezetek utólagos megerősítése szénszál
erősítésű polimerrel**



Készítette:

Borbély Hunor

Szerkezet-építőmérnök hallgató, MSc

Konzulens:

Dr. Budaházy Viktor
adjunktus



Tartalomjegyzék

Összefoglaló.....	4
1. A feladat ismertetése	5
1.1. Bevezetés a fenntartható tartószerkezet tervezésbe	5
1.1.1. A CO ₂ egyenérték.....	6
1.1.2. A téma fontossága mérnökként	8
1.1.3. Az eszközeink	9
1.1.4. A megrendelői igények befolyásolása	10
1.2. Az FRP-k általános ismertetése.....	11
1.2.1. Történeti bevezető.....	11
1.2.2. Felépítés.....	11
1.2.3. Kötőanyagok	11
1.2.4. Szálak	12
1.2.5. Ragasztóanyagok	15
1.3. A CFRP-k használata az építőipari gyakorlatban.....	15
1.4. A CFRP-k előnyei a hagyományos megerősítésekkel szemben	15
1.5. A CFRP-k alkalmazása	16
1.6. A CFRP-k lehetséges tönkremeneteli módjai	17
2. A feladat célkitűzései.....	19
2.1. A feladat véglegesítése	19
2.2. A feladat során megválaszolandó kérdések	19
3. Az alkalmazott módszer	20
4. Kiindulási feltételek meghatározása	21
4.1. A teher meghatározása, kiindulási adatok	21
4.2. Szelvény adatok	21
4.3. Lehajlás számítása	22
4.4. Nyomatéki ellenállás számítása	22
4.5. Ellenőrzés AxisVM-ben	23



5. A modellezés	24
5.1. A modell felépítésének meggondolásai.....	24
5.2. Tönkremenetelek.....	24
5.3. Az ANSYS rövid ismertetése.....	25
5.3.1. Általánosan a szoftverről	25
5.3.2. A szoftverben választott modellezési módszer	25
5.4. Geometriai modell	26
5.4.1. Térfogatelemek.....	26
5.4.2. Komponensek	27
5.4.3. A végeleemes háló generálása	29
5.4.4. Támaszok megadása	31
5.5. Anyagmodellek	32
5.4.1. Szerkezeti acél.....	32
5.4.1. Ragasztóréteg	32
5.4.1. CFRP réteg.....	32
5.6. Tehermodell.....	33
6. Az analízis.....	33
6.1. A folyamat ismertetése	33
6.2. A felhasznált analízisek	34
6.3. Az analízis eredményei	35
6.3.1. A modell verifikációja.....	35
6.3.2. Egylépcsős terhelésből származó eredmények	36
6.3.3. Többlépcsős terhelésből származó eredmények.....	38
6.3.4. A nyírófeszültség eloszlása a ragasztórétegben	41
7. Konklúzió	42
8. Irodalomjegyzék.....	43
9. Mellékletek	44



Összefoglaló

A 21. században az épített környezetünk egyik érdekes kérdése a régebbi építésű épületnek az integrációja a modern kori urbanizáció során folyamatosan változó városokba. Jelen tanulmány azt hivatott vizsgálni, hogy ezekre az épületekre, melyek az eredeti formájukban nem maradhatnak a helyükön, milyen alternatív megoldással tudunk szolgálni mi mérnökök azért, hogy ne legyen feltétlenül szükséges az elbontásuk, és az új épületek kivitelezése

Sok esetben a régi épületek azért lesznek problémásak, mert funkcióváltáson mennek keresztül, vagy esetleg többletterhet viselnek sorozatos ráépítések miatt. Ezeknek a változásoknak a tartószerkezeti lekövetése fontos feladat, hisz megoldásukkal megőrizhetőek épületeink, melyek sok esetben történelmi jelentőséggel bíró épületek, valamint a mai kor egyik legfontosabb problémájára is megoldás lehet, mert jelentősen csökkenthető az építőipar által okozott környezeti terhelés.

A célkitűzés, hogy az e fajta többletterhelésekből adódó problémákra tudjunk egy gazdaságos, roncsolásmentes és környezetkímélő megerősítési eljárást adni. A jelen tanulmányban vizsgált módszer az acélszerkezetekben (pl. acélgerendás födémek) lévő gerendák húzott övének a CFRP réteggel (carbon-fiber reinforced polimer) történő bevonása, a teherbírás növelése céljából. Ezt a specifikus problémát fogjuk a továbbiakban taglalni, és kerül numerikus analízis által megvizsgálásra.

A vizsgálat során kiderül, milyen típusú terhelésekre alkalmazható ez a fajta megerősítés hatékonyan, illetve, hogy melyek azok a terhelések, amik esetén nem ajánlott az alkalmazása. Számításba vesszük, hogy a tartószerkezet már eleve előterhelt állapotban kerül megerősítésre, és számszerűsítjük, hogy milyen mértékben tudtuk növelni a szerkezet teherbírását, az esetleges maradandó alakváltozások figyelembevételével. Mindezek mellett pedig különbséget teszünk az analízis során a között, hogy történik-e a megerősítést megelőzően teljes vagy részleges tehermentesítés, vagy sem.

Mivel az előbbieken felsorolt vizsgálatokhoz elengedhetetlen a nemlineáris viselkedés tanulmányozása, így a dolgozatom során az ANSYS végeselemes szoftverben fogom elvégezni az analízist, ügyelve az anyagmodellek lehető legpontosabb alkalmazására.



1. A feladat ismertetése

Jelen tanulmány a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán, a Szerkezet-Építőmérnök szakon, tartószerkezet tervezés specializáción készült, a Tudományos Diákköri Konferenciára. A vizsgálatnak a célja, a tartószerkezetekkel foglalkozó témában történő elmélyülés, mely a BSc-n tanult tervezési alapokat MSc szintű elméleti háttérrel ruházza fel.

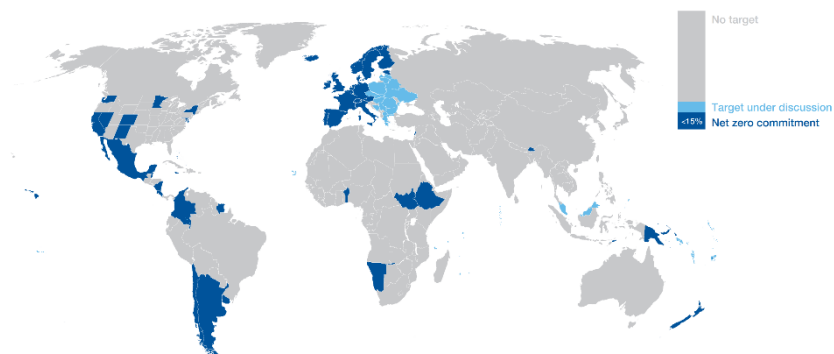
A témaválasztás során a legfőbb szempont az volt, hogy releváns legyen a vizsgálat a jelenlegi építőipari feladatokhoz képest. Ezért egy viszonylag korszerű technológiának alkalmazásának vizsgálata esett a választásom. A téma a régi, 50 évnél idősebb, illetve a fiatalabb, de funkciót váltó épületek tartószerkezetének az utólagos megerősítése lett, szénszállal erősített polimerrel.

A téma vizsgálatához fontos bemutatni annak a szükségességét, és az egyre növekvő igényt a megerősítésekre kontextusban, ezért egy környezetvédelmi bevezetővel kezdődik a tanulmányom. Majd pedig mivel mindenképpen elengedhetetlen a szóban forgó anyagok ismerete, így a tartószerkezetek megerősítéséhez használt FRP-knek (Fibre Reinforced Polymer) az anyagtudományi a bemutatásával folytatom. Több fajtája létezik, az anyagban található szálak különböző féle típusúak lehetnek, üveg, szén stb. Így az elkövetkezendőkben a feladat által érintett témát, anyagokat, körülményeket ismertetem.

1.1. Bevezetés a fenntartható tartószerkezet tervezésbe

Az elmúlt 100 évben, emberi tevékenységek hatására több CO₂e került a bolygónk atmoszférájába, mint amit a növények és a tengereink kompenzálni tudnának. Ahogy nőtt az emisszió, úgy vele együtt nőtt a bolygó globális hőmérséklete is, ami jelenleg közel 1 °C-al melegebb mint az iparosodás előtt. Az ilyen mértékű növekedés velejárói az árvizek, viharok, erdőtüzek. A jelenlegi álláspont szerint az 1.5 °C-os növekedésnél már jóval nehezebb lesz kontrollálni a következményeit, és ha nem is megállítani, de lelassítani a növekedést. [6]

Tekintettel arra, hogy a világon és Európában is egyaránt szavazzák meg a CO₂e kibocsájtás csökkentésére vonatkozó törekvéseket, így a közeljövőben elkerülhetetlenül találkozni fogunk vele mérnökként. Jelenleg 67 országban szavaztak meg emissziómentes terveket (net-zero carbon) a jövőre nézve, és ez a szám évről évre gyarapodik. Ahogy egyre inkább kezd elterjedni, úgy kerülhet bevezetésre nem csupán ajánlasként, hanem tervezési szabályzásként is. Elképzelhető, hogy pár éven belül egy projektnek a megvalósulásához a teljes életciklusához tartozó emissziót egy bizonyos szint alatt kell tartani, vagy egy bizonyos értéknek az átlépése kerül megadóztatásra. [5]



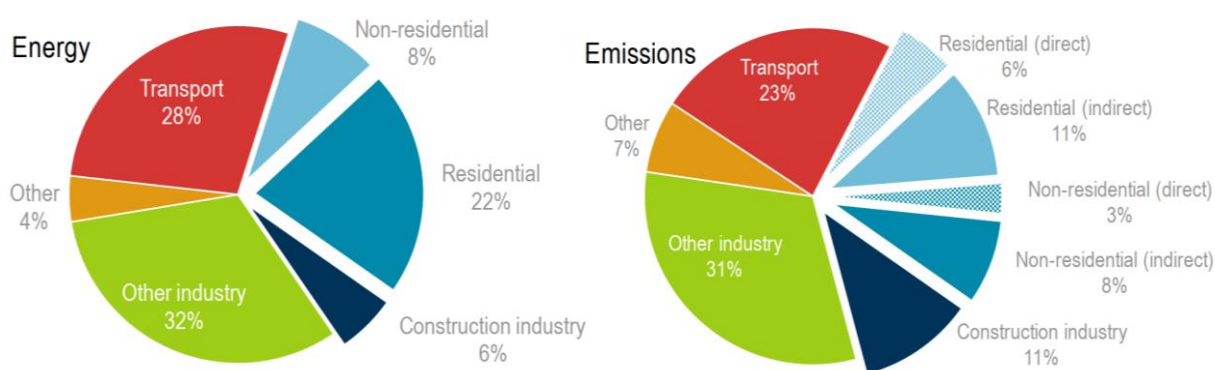
1. ábra

Az emissziómentes célkitűzéssel rendelkező országok [5]



A modern kori mérnököknek egyre újabb és újabb kihívásokkal kell megbirkózniuk, ezért fontos, hogy tájékozódjunk magunk körül és figyeljük a globális szakmai trendeket, irányzatokat. Napjainkban, a népesség robbanásszerű növekedéséből kifolyólag rendkívül felgyorsult a civilizált területek urbanizációja, és ez a beépített területek folyamatos növekedésével jár. Ezen felül a már régóta beépítésre került, kvázi városmagok sem úszák meg az építkezéseket, hiszen a városok szívében folyamatosan történnek -pont, hogy a beépíthető területek csökkenése miatt- a ráépítések, felújítások, és funkcióváltások.

A megnövekedett igény a lakóépületekben és a középületekben egyaránt, nagyban felelős azért, hogy az építőipar az utóbbi években egyre nagyobb arányban járult hozzá a bolygónkon történő GHG (green house gases) kibocsájtáshoz. Ez azt eredményezte, hogy 2018-ban az építőipar már az összes energiafelhasználáshoz kapcsolódó kibocsátásnak a **39%-áért** volt felelős. [2]



2. ábra

Eloszlások az energiafelhasználással kapcsolatos tevékenységek körében [2]

A probléma adott, és már régóta velünk van, viszont a távoli múltban egészen kevés figyelmet szenteltek neki. Az elmúlt években pedig egyre fokozódó fontosságúra nőtte ki magát a téma, és az intézkedések is elkezdtek kialakulni, fejlődni olyan szakterületeken, ahol eddig nem volt rá lehetőség, vagy legalábbis erősen limitált. Az egyik ilyen terület a tartószerkezet tervezés is.

1.1.1. A CO₂ egyenérték

Az ökológiai lábnyomot sokféleképpen mérték már az elmúlt évek során, viszont mostanára sikerült a nemzetközi tudományban egy globálisan elfogadott és elismert módszert és mérőegységet kitalálni, amivel számszerűsíteni lehet az iparosodásból adódó környezeti terhelést. Ez az egység a CO₂ egyenérték, leggyakoribb mértékegysége pedig a GtCO₂(e) (gigatonna, globálisan mérve) illetve a tCO₂(e)/kg (tonna, lokálisan lebontva).

A CO₂ egyenérték azért került bevezetésre, mivel az üvegházhatású gázok közé több, különböző gáz tartozik, és ezeknek egy egységes mérőszám kellett. Ami egyben azt is jelenti, hogy a CO₂ egyenérték nem csupán a széndioxidot tartalmazza, hanem az összes üvegházhatású gáznak (metán, ózon, dinitrogén-oxid) a nyomát, széndioxidra visszavezetve.



Ahhoz, hogy ezekkel az értékekkel a jövőre való tekintettel kutatásokat, kimutatásokat lehessen készíteni, különböző módokon kategorizálták az értelmezését az építőiparban:

- Megvalósulási CO₂ egyenértékek (Embodied carbon)

A megvalósulási kategóriába tartozik egy projektnek minden olyan alkategóriája, ami nem az annak a használatkor bekövetkező energiafogyasztáshoz köthető.

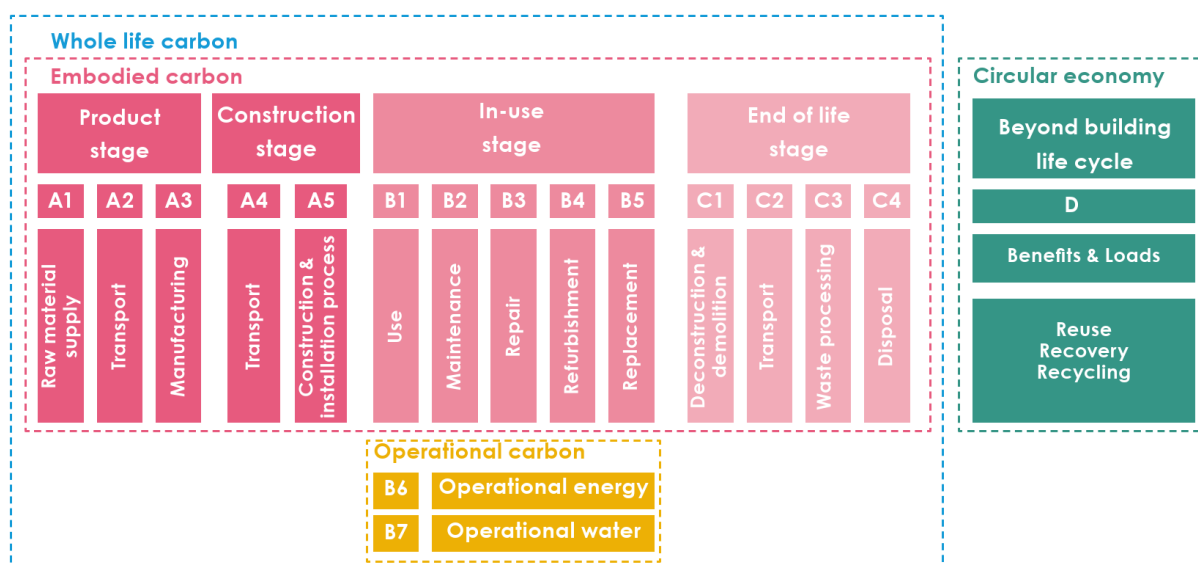
Egészen a nyersanyagok kinyerésekor kezdődik, majd azok szállításán keresztül, a gyártási folyamatok, majd a kivitelezésen át az elbontásig tart.

- Üzemeltetési CO₂ egyenértékek (Operational carbon)

Az épületek, építmények hasznos energiaigénye, mint például a hűtés, fűtés és az épület vízellátó szolgáltatásaihoz kapcsolódó emissziók.

Illetve ezeken a kategóriákon belül is vannak kisebb alkategóriák:

- Az épület előélete, egészen a kivitelezés befejezéséig (1-5)
- Az épület használatának és/vagy üzemeltetésének fázisa (1-7)
- Az épület életciklusának a vége, az elbontástól egészen az alapanyagok újra hasznosításáig (1-4)



3. ábra

Egy épületnek a teljes életciklus vizsgálatához tartozó kategóriák és besorolások [1]

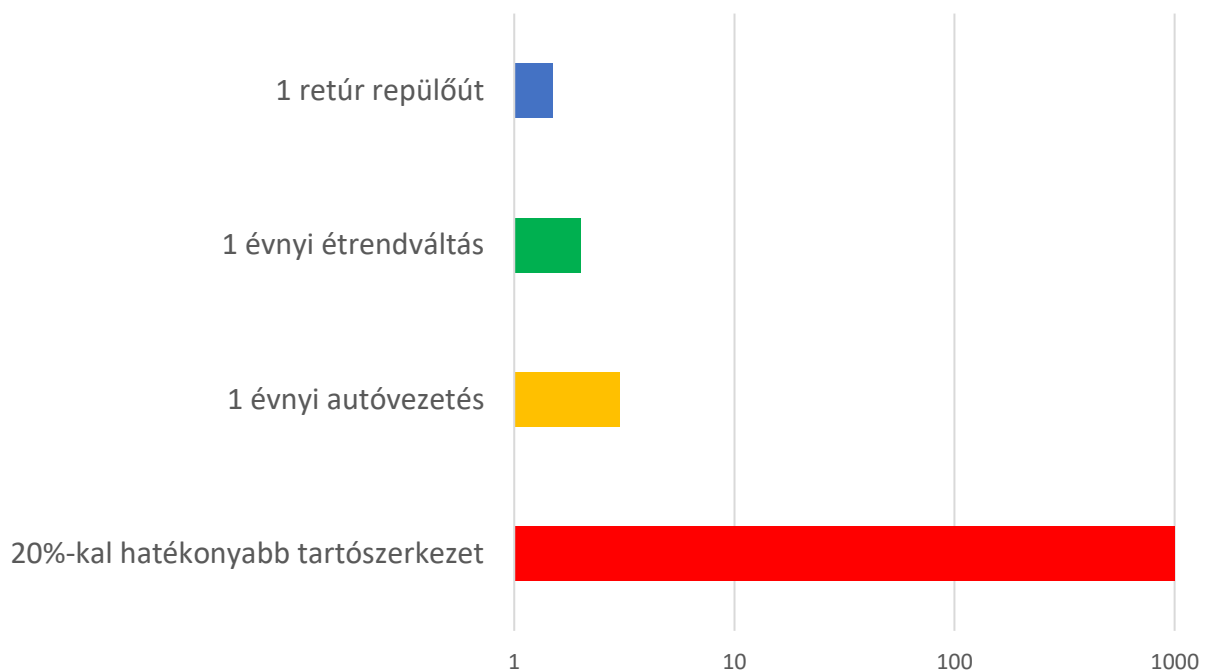
Tartószerkezet tervezőként az általunk leginkább befolyásolható kategória az A1-A5-ig tartó életciklus. Ezt a kategóriát gyökereiben tudjuk befolyásolni a szerkezeti kialakításunkkal, illetve a választott alapanyaggal. Merőben más eredményeket fogunk kapni, ha ugyan azt az épületet acélból tervezzük meg, mintha mondjuk fából tennénk ugyan ezt.



1.1.2. A téma fontossága mérnökként

A környezeti terhelések csökkentésének érdekében az életnek rendkívül sok aspektusában lehet tudatos odafigyeléssel változtatni. A változtatások következményeinek mértékeiből adódóan fontos, hogy a témának kellő figyelmet szenteljenek a mérnök társadalomban, hiszen mérnökként nagyban tudjuk befolyásolni az emisszió csökkentését. [4]

<u>Tevékenység/Szerkezet</u>	<u>CO₂e mennyiség</u>
• Retúr repülőút New York és London között: (Körülbelül 0.8 t, turistaosztályon utazva)	1 tonna
• Egy éves hús, tejtermék és sörfogyasztás: (Körülbelül 1.7 t, heti rendszerességű fogyasztással számolva 1 személyre, 1-2 adag marha, csirke, hal, illetve napi 200ml tej és napi egy korsó sör)	2 tonna
• Átlagos családi autó 16,000 km-en: (Körülbelül 3.09 t, egy közepes méretű benzines autó, 1.4-2.0 literes motorral)	3 tonna
• Egy acél rácsostartós csarnoképület: (Több ezer négyzetméteres, alacsony kihasználtságú, sok teherbírasi tartalékkal)	~5000 tonna



4. ábra

A különböző beavatkozások hatásai az emisszióra, logaritmus skálán [4]



Mint látható, természetes személyként viszonylag drasztikus változtatások árán vagyunk képesek kisebb mértékben csökkenteni az ökológiai lábnyomunkat. Viszont amíg ezek 1-2 tonnát jelentenek, hogyha a fentebb említett acélszerkezetű épületet karcsúbb tartószerkezettel, magasabb kihasználtságra tervezzük, akár 20%-kal, **vagyis 1000 tonnával** tudjuk csökkenteni a környezeti terhelést, egyetlen projekten belül. [4]

Természetesen a fentebb demonstrált radikális tartószerkezeti példa egy kedvező esetről szól, mikor lehetőségünk van a teljes tartószerkezeti kialakítást befolyásolni. Egyéb, kisebb projekteknél csupán már az is előrelépést tud jelenteni, ha egy-egy tartószerkezeti elemnél érünk el megvalósulási emissziócsökkenést.

Példa 1 – Utólagos ráépítés

*Egy belvárosi ráépítésnél meggyőzzük a befektetőt, hogy az eredetileg tervezett acélgerendák beépítése helyett, mivel statikailag megfelelőek, kerüljenek rétegelt ragasztott gerendák az épületbe. Lecserélünk 80db UC152x44 acélgerendát (32 tonna CO_{2e}) 80 db 300x200-as rétegelt ragasztott gerendára (4.9 tonna CO_{2e}). Csökkentettük az emissziót **27 tonnával**. [6]*

Példa 2 – Talajmechanikai paraméterek

*Pár év alatt, egy összesen 120 épületből álló lakónegyed kialakításában, 2,5 km hosszon kell megtervezni az épületek alapozását. Feltételezve a talajparamétereket, egy 800mm mély 600mm széles C25/30-as betonból álló alapozást tervezünk. Összesen 1200 m³ és 372 tonna CO_{2e}. Meggyőzzük a beruházót, hogy végezzünk talajszondázást, az extra költség ellenére. Emiatt beigazolódik a talaj teherbírása, és így épülhetnek az épületek 600mm mély, 450mm széles sávalappal. Összesen 675 m³ és 209 tonna CO_{2e}. Csökkentettük az emissziót **163 tonnával**. [6]*

1.1.3. Az eszközeink

Az ideig, 2020-as évben meglehetősen sok, és előremutató kutatás és publikáció érkezett a témában, a nemzetközi szakirodalom elkezdett foglalkozni az egyre növekvő problémával, és egymás után érkeznek a tanulmányok a különböző megoldásokkal. Mivel viszonylag új téma a szakmán belül, ezért egy keretrendszer is megfogalmazódott, ami segíti a mérnökök egymás közti információáramlását, és az újdonsült problémának a megértését.

Ez a rendszer a következő pontokba rendszerezhető: [3]

1. Informálódás
2. Alacsony széndioxid
3. Gondos tervezés
4. Hulladékmentesség
5. A megrendelői igények befolyásolása
6. Legyünk a részei

Ezekből a pontokból a jelen tanulmány relevanciájához az 5-ös pont a legfontosabb, és az szorult részletesebb ismertetésre.



1.1.4. A megrendelői igények befolyásolása

Egyértelműen kijelenthető, hogy a karcsú, széndioxidtól mentes tervezésnek abban az esetben nincsen értelme, hogyha az épületet alapvetően meg sem kellene építeni. Ezen a ponton érdemes megemlíteni azt a törekvését a nemzetközi tanulmányoknak a témában, hogy „build nothing, build less”, avagy ahol van rá lehetőségünk ott óvakodjunk az új épületek építésétől.

Így hát nem elég, hogy a szakmán belül a mérnök társadalom tisztában van a legújabb tervezési trendekkel, ezeket az információkat fel kell használni, hogy a befektetők, megrendelők is egyre inkább nyitottak legyenek a környezettudatos projektekre.

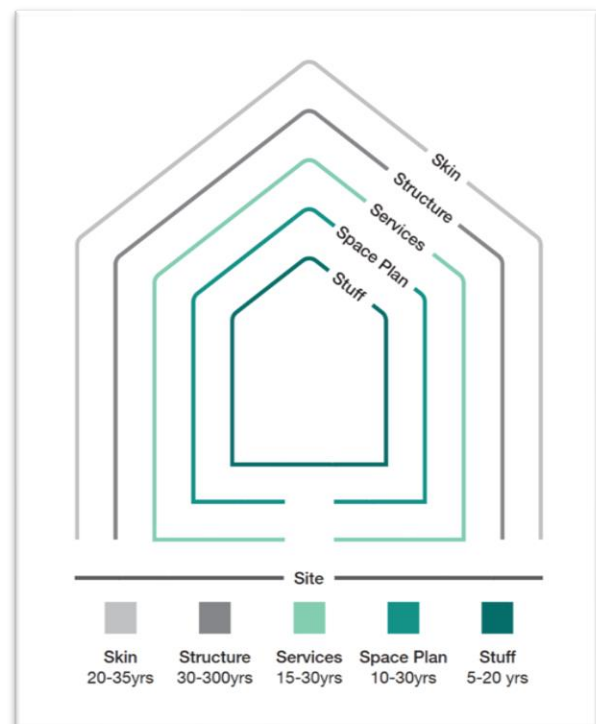
Természetesen ez nem azt jelenti, hogy az építőiparnak vissza kéne esnie, az egyik legnagyobb kihívás a modern kori mérnöki hivatásban pont az, hogy a felhasználói, emberi igényeket, úgy elégítsük ki, hogy ne legyen szükség kompromisszumokra, viszont mégis alacsonyan tudjuk tartani környezeti terhelést. Tehát ha a megrendelőnk szeretne egy új ingatlanba befektetni, de az ingatlanhoz fűződő terveit egy régóta lakatlan, felhasználatlan, történelmi épület felújításával is meg lehetne valósítani, úgy az utóbbi megoldását mindenképpen érdemes szem előtt tartani. [3][6]

Már ebben a kategóriában is rendkívül sok lehetőségünk van a környezettudatosságra való törekvésre, a különböző átépítési, felújítási és megerősítési módszerek között válogatva. Talán ennek a gondolatnak az egyik legjobb megoldása az, amikor úgy erősítünk meg már meglévő szerkezeteket, hogy azoknak a kihasználtságát minél kevesebb többletanyag bevitellel, minél nagyobb mértékben tudjuk csökkenteni.

Erre egy tökéletes példa a **CFRP-s megerősítés**.

A kompozit anyagnak a tulajdonságai lehetővé teszik számunkra, hogy a lehető legtöbb esetben, jelentősen kevés többletanyag bevitellel, számottevő teherbírás növekedést tudjunk elérni. És mivel roncsolásmentes, és könnyű, gyors az alkalmazása, tervezés után könnyedén kivitelezhető.

Alkalmazható acél és vasbeton szerkezetek esetén is, alkalmazható túlzottan nagy elmozdulások ellen, teherbírás növelése céljából, illetve ami szintén rendkívül kedvező, hogy szeizmikus terhekre való megerősítésre is alkalmas. Mivel a régi építésű, történelmi épületeinket évtizedekkel (esetleg századokkal!) ezelőtt, nem kellett szeizmicitásra méretezni, így ezeknél szükség lehet bizonyos esetekben a specifikus megerősítésre.



5. ábra

A rétegelt építkezés modellje, újra felhasználható, megerősíthető tartószerkezettel [7]



1.2. Az FRP-k általános ismertetése

1.2.1. Történeti bevezető

A szálerősítésű műanyag, angol nevén Fibre-reinforced polymer, az utóbbi 60 év új technológiája az építőiparban. Eleinte a szálerősítésű műanyagokat a 20. század első felében teljes más célból, nem mérnöki célokból alkalmazták. (pl. A legelső szálerősített műanyagból készült tárgy a bakelitlemez volt) Majd később kísérleteztek, azt követően pedig sikeresen alkalmazták a transzportációs eszközök piacán, leginkább hajó- illetve repülőgépgyártásban.

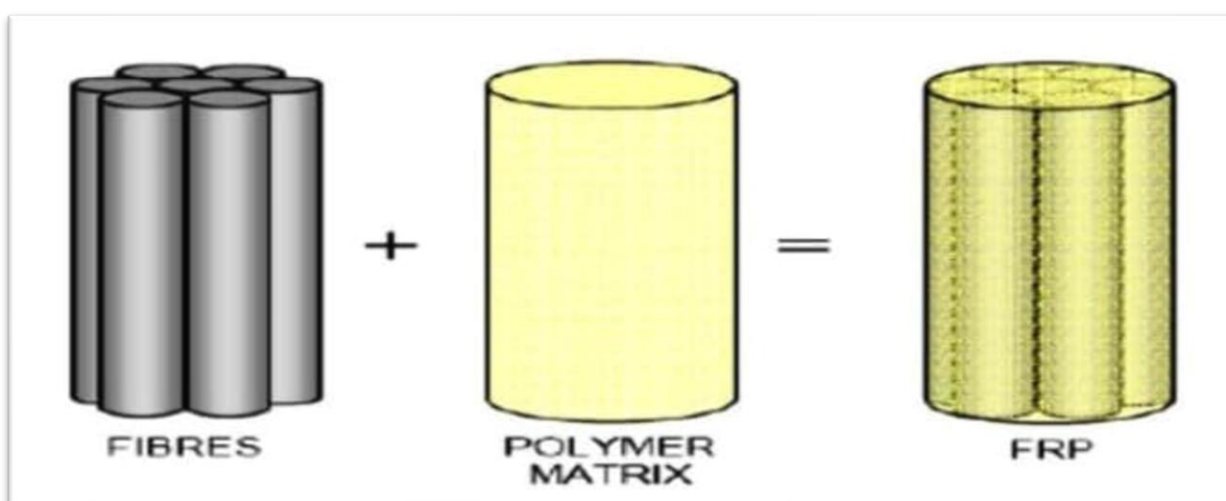
Angliában, század második felében, a '60-as évek elején kezdték el használni építőipari területeken az anyagot először. Eleinte kizárólagosan csak betonszerkezetek megerősítésére használták, mivel még nem voltak a teljes anyagjellemzők ismertek, és a nehézkes előállítása miatt rendkívül drága volt. Az ezt következő két évtizedben nőtt az előállítás minősége, és ahogy megjelentek az egyre inkább automatizált gyártástechnológiák úgy csökkent az ára is a végtermékeknek. Majd a '80-as években elkezdtek már meglévő hídszerkezetek megerősítésére is használni, ami utána a mai napokig kibővült a falazott, acél, és faszerkezetekkel is.

1.2.2. Felépítés

Az FRP egy kompozit anyag. A kompozit anyagok egynél több, általában kettő különböző szerkezetű (nano-, mikro-, makroszerkezet) anyagnak az összetétele alapján jönnek létre. Az anyagok társításának a célja a negatív tulajdonságaik háttérbe szorítása, és a pozitív tulajdonságok kiemelése.

Az alapanyagot mátrixnak hívjuk. Az FRP-k esetében ez az alapanyag egy ragasztó közeget jelent, amely továbbítja és kiegyenlíti a különböző szálak között a fellépő erőket. Az erők közvetítésén kívül még feladata a mátrixnak, hogy egy védőréteget képezzen a szálak körül és között.

1.2.3. Kötőanyagok

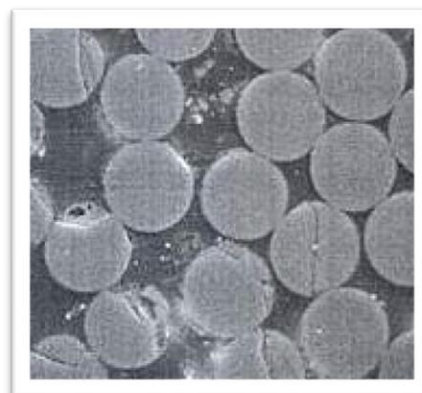


6. ábra
Az FRP anyagok összetétele [8]



Alapanyag mátrixnak építőipari felhasználásra majdnem teljes mértékben valamilyen hőre keményedő gyantát használnak. A két leggyakoribb a vinylester-, és az epoxy gyanta. A kettő közül pedig az Epoxy a kedvezőbb tulajdonságú az építőipari használatra, -és bár az a drágább megoldás is- azzal találkozni az esetek többségében.

Az előző bekezdésben már említett alapanyagokra azért van szükség, hogy egy összefüggő mátrixba kössék a választott szálformákat. Ezeknek az anyagoknak két fő kategóriájuk van, a hőre keményedő, illetve a hőre lágyuló. A hőre lágyuló gyantákat a kialakításuk után nem véglegesen kerülnek szilárd halmazállapotba, emiatt nem optimális az építőipari használatuk.



7. ábra
Szénszálak beágyazva gyanta mátrixba

Tipikus anyagjellemzői a gyantáknak: [12]

	Epoxy	Poliészter	Fenolok	Poliuretán
E (GPa)	2.6-3.8	3.1-4.6	3.0-4.0	0.5
Húzószilárdság (MPa)	60-85	50-75	60-80	15-25
Kritikus nyúlás (%)	1.5-8.0	1.0-2.5	1.0-1.8	10
Poisson-tényező	0.3-0.4	0.35-0.38		0.4
Hőtágulási tényező ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	30-70	30-70	80	40
Sűrűség (kg/m^3)	1110-1200	1110-1200	1000-1250	1150-1200

Mivel alapvetően a gyanták, -az Epoxy pedig különösen- költséges megoldások, és azért, hogy az anyagtulajdonságokat még inkább javítani tudják, adalékanyagokat és kitöltőanyagokat tesznek a gyantamátrixba.

A kitöltőanyagoknak csupán az a szerepük, hogy kevesebb drága nyersanyag felhasználásával tudjon elkészülni a mátrix, az adalékanyagok pedig anyagjellemző javító hatással bírnak.

1.2.4. Szálak

A szálak kiválasztása nagyon fontos tényezője az FRP használatnak. A végső anyag általában a benne használt szál után kapja a nevét, ami többféle is lehet:

- Üvegszálás: GFRP (Glass-fibre Reinforced Polymer)
- Szénszálás: CFRP (Carbon-fibre Reinforced Polymer)
- Aramidszálás: AFRP (Aramid-fibre Reinforced Polymer)
- Bazaltszálás: BFRP (Basalt-fibre Reinforced Polymer)



8. ábra
Üvegszálak [8]

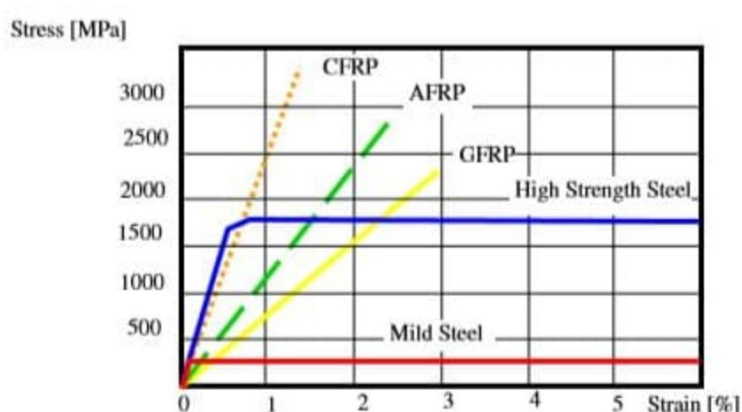
9. ábra
Szénszálak [8]

10. ábra
Aramidszálak [8]

A fentiek közül az építőiparban leginkább az első hármat alkalmazzák. A különböző szálak között a legnagyobb különbség, ami a döntésnek az alapját adja, hogy melyiket válasszuk, az a végső kompozitnak a merevsége, illetve a húzószilárdsága.

Tipikus anyagjellemzői a szálaknak: [12]

	CFRP			AFRP	GFRP
	HS	HM	UHM		
E (GPa)	230-240	295-390	440-640	125-130	70-85
Húzószilárdság (MPa)	4300-4900	2740-5940	2600-4020	3200-3600	2460-2580
Kritikus nyúlás (%)	1.9-2.1	0.7-1.9	0.4-0.8	2.4	3.5
Poisson-tényező	/	/	/	/	/
Hőtágulási tényező ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	-0.38	-0.83	-1.1	2.1	4.9
Sűrűség (kg/m^3)	1800	1730-1810	1910-2120	1390-14700	2600

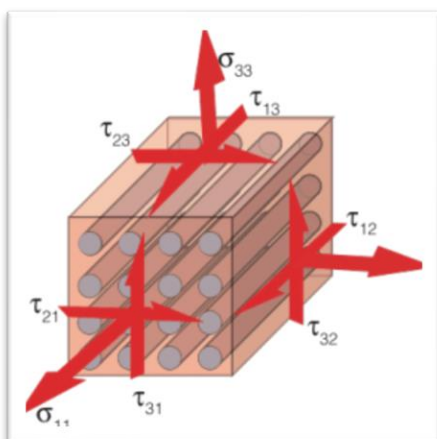


11. ábra
Különböző szálak szilárdsága az acéléhoz képest [8]

A szálak a kompozitban lévő elhelyezkedésük alapján is többfélek lehetnek. A végső elrendezés a szálak a mátrixba való adagolásától függ(het).



Egyenes szálak

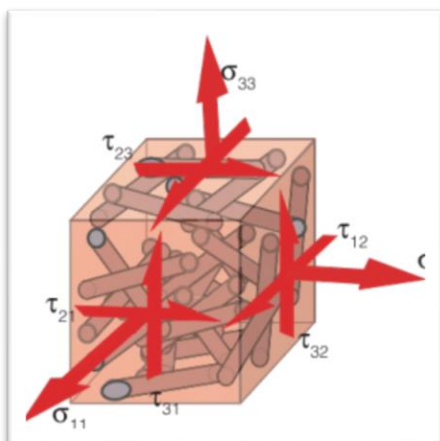


12. ábra
Egyenes szálak és erők elemi testben



13. ábra
Egyenes szálak a valóságban

Vágott szálak

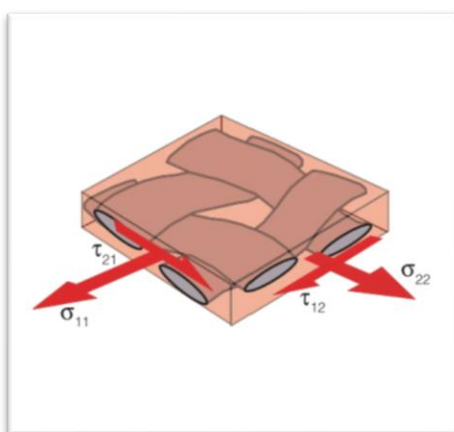


14. ábra
Vágott szálak és erők elemi testben

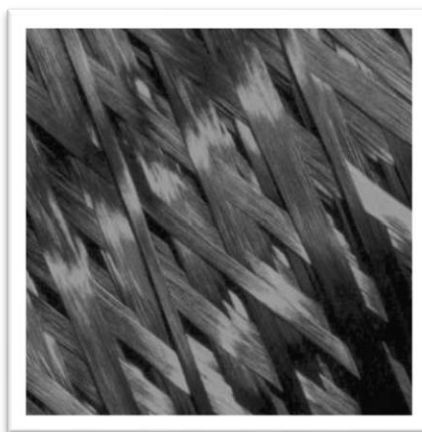


15. ábra
Vágott szálak a valóságban

Szött szálak



16. ábra
Szött szálak és erők elemi testben



17. ábra
Szött szálak a valóságban



A szálak iránya befolyásolja az anyagi viselkedést, illetve a kompozitnak az izotropiáját. A hosszú, egyenes szálakból álló anyagnak nagyon ideális viselkedést alakíthatnak ki, illetve, ha több irányú merevségre van szükség, akár több rétegben is lehet elhelyezni más-más irányokban a szálakat egymáson. Ezt a példát látni a 16-17. ábrán.

Az építőmérnöki gyakorlatban a szénszálás (CFRP) egyenes, esetleg szőtt szálalás megoldásokat használjuk a megerősítések kivitelezésére.

1.2.5. Ragasztóanyagok

Ahhoz, hogy a CFRP réteget alkalmazni tudjuk a meglévő szerkezeteinken, szükség van egy ragasztó rétegre, amivel a kívánt felülethez rögzíthetjük úgy, hogy az együtt dolgozás létre tudjon jönni a két réteg között. Ehhez a művelethez általában szintén gyantát használnak. Az építőiparban ezt a ragasztóréteget általában képlékeny formában hordják fel a felületre. Bár előfordulhat, hogy lapokként kerüljenek fel, az kevésbé hatékony mivel nem képes az anyagi imperfekciókat úgy kitölteni, mint az előbbi.

A ragasztáshoz használhatjuk ugyan azt a fajta gyantát, amit az anyagi mátrix kialakításánál alkalmaztunk. Leggyakoribb jelen esetben is az epoxy gyanta, mivel nagyon jó a tapadása a felületekhez, és a legvonzóbb tulajdonságai közé tartozik a magas húzószilárdsága.

1.3. A CFRP-k használata az építőipari gyakorlatban

Az épületek megerősítésének szükségességét többféle tényező is indokolhatja. Ahogy azt már korábban említettem, a régi épületek öregedése, illetve a funkcióváltás a két legnagyobb indok egy felülvizsgálatra, és átépítésre. Jelen téma csupán a tartószerkezeti megerősítésről szól, az egyéb, épületszerkezeti sérülések kezelésére nem tér ki.

Milyen típusú tartószerkezetek esetében alkalmazható a CFRP megerősítés?

Nagyjából az összes főbb tartószerkezeti kialakítás és anyag esetén alkalmazható a CFRP megerősítés. Ez magába foglalja a falazott, vasbeton, acél és faszervezeteket.

Az általam választott témában az acélból készült tartószerkezetek lesznek megvizsgálva.

A történelmi acélszerkezetek az idő múlása során sokféle módon szenvedhetnek el tönkremenetelt. Ezek közé tartozik a korrózió, illetve a túlzott irreverzibilis alakváltozás. Ha funkcióváltozás történik az épületben, szükség lehet egy-egy tartószerkezeti elem teherbírásának a megnövelésére.

1.4. A CFRP előnyei a hagyományos megerősítésekkel szemben

A legfőbb előnyét a CFRP megerősítésnek a kedvező mechanikai tulajdonságai és az ezek mellé társuló alacsony önsúlya adja. Az acélszerkezetek megerősítésénél sokszor alkalmaznak többlet lemezeket, amiket a problémás/túlterhelt/tönkrement részekhez hegesztenek vagy csavaroznak. Ezek az utólagos javítások során feszültségtöbblet ébred a hegesztésekben, illetve a csavarok/furatok környékén. Illetve a legtöbb esetben jelentős önsúlytöbbletet jelent a szerkezeten. Ezek mellett a korrózióra ugyan úgy viselkedik, mint az eredeti acélszerkezet.



A CFRP ezekkel szemben úgy képes megnövelni a teherbírást és javítani a fellépő szerkezeti inhomogenitásokat, hogy elhanyagolható, közel zérus önsúlytöbbslettel jár. Mindezek mellett kiemelten jól viselkedik az acélszerkezeteknél egy jelentős és veszélyes tönkremeneteli móddal -a fáradással- szemben.

1.5. A CFRP alkalmazása

CFRP kivitelezésének lépései: [10]

1. A ragasztóréteg megfelelő tapadásához nagy teljesítményű fúvófejes takarítása szükséges az acélfelületnek mielőtt felhordanánk.
2. A felület tisztítása után felhordható az alapozó réteg.
3. Mielőtt a CFRP rétegek a helyükre kerülnének, a felületüket meg kell tisztítani.
4. A ragasztóréteg előkészítése, kikeverése.
5. A ragasztóréteg felhordása.
6. A CFRP rétegek felragasztása a helyükre.



1. lépés

2. lépés

3. lépés



4. lépés

5. lépés

6. lépés

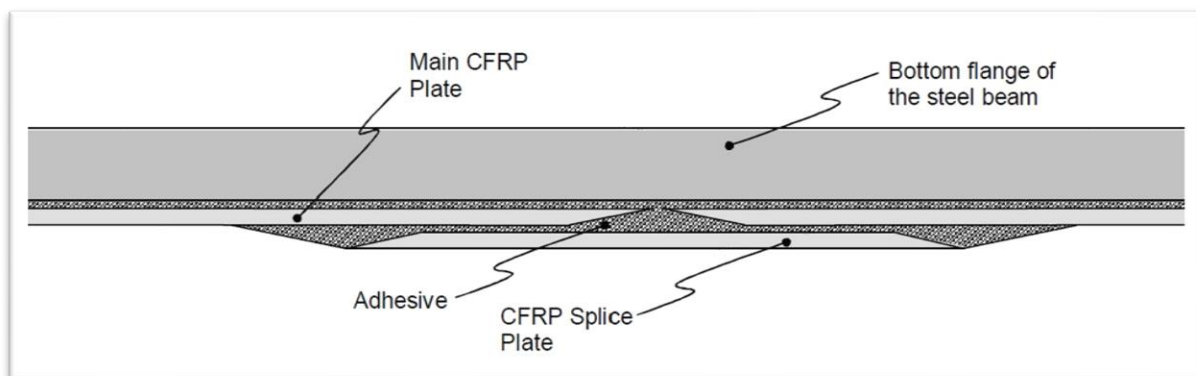
18. ábra

A CFRP megerősítés kivitelezésének lépései [10]

Érdeemes megemlíteni, hogy a CFRP rétegekre hasonló szabályok vonatkoznak, mint a vasbeton esetében az acélbetétekre. Tehát ha egy CFRP esetében toldásra van szükség, akkor semmi esetben sem szabad mezőközépen/támaszközépen toldani azt. A teljes kihasználtság érdekében ott kerüljön toldásra, ahol a szerkezetnek abszolútértékben vett nyomatékminimuma van.



A toldás kivitelezése a gyakorlatban: [11]

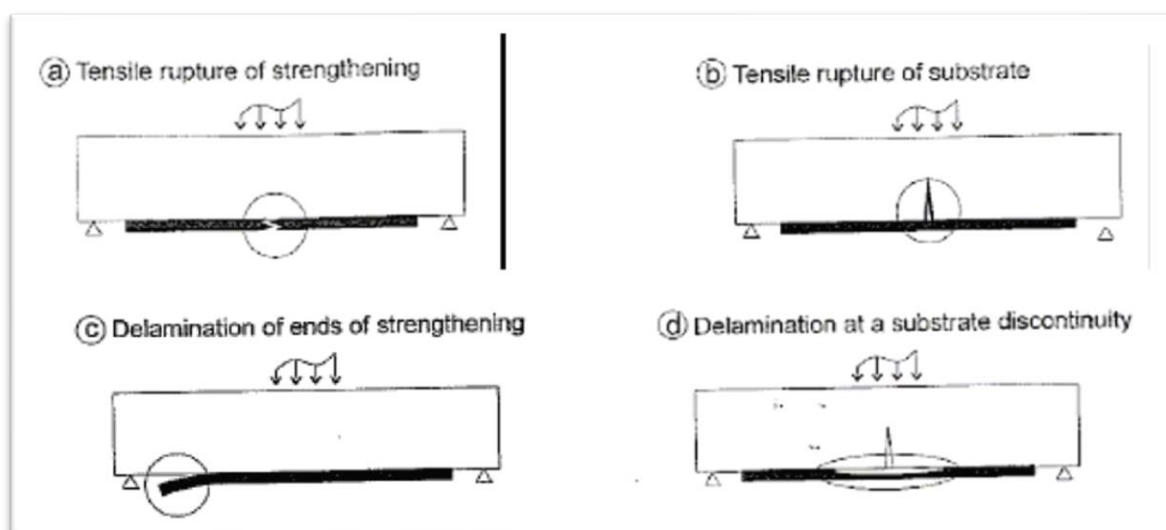


19. ábra
A CFRP toldása [11]

1.6. A CFRP-k lehetséges tönkremeneteli módjai

Mivel a CFRP tönkremeneteli módjai egészen közvetett módon összefüggésben van a felhasználási területétől, ezért az elkövetkezendőkben az acélszerkezeten (pontosabban acélgerendán) alkalmazott rétegnek a tönkremeneteli módjait fogjuk tárgyalni. [12]

- Húzószilárdság kimerülése és szakadás a kompozit anyagban (a)
- Az acélgerenda megfolyása és a túlzott alakváltozásból következő szakadás (b, d)
- Ragasztóanyagnak a nem megfelelő tapadása, a kompozit réteg leválása tartóközépen, vagy a végeknél (c)
- A CFRP belső rétegek közötti tönkremenetel (A mátrix elszakadása) (a)
- A Ragasztóréteg tönkremenetele nyírásra, húzásra (d)



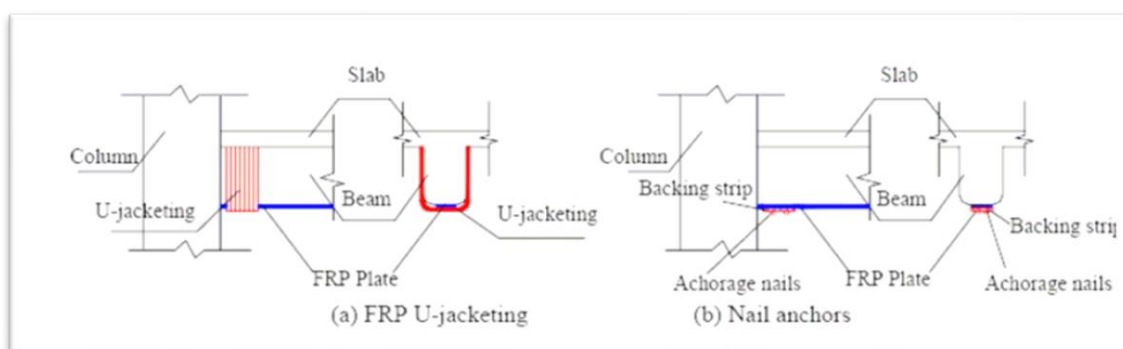
20. ábra
A CFRP tönkremeneteli módjai [12]



Korábbi tanulmányok megmutatják, hogy a kompozit anyag végénél a lehorgonyzásnál jelentkező felszakadás elkerülhető, ha további rögzítést használunk. [12]

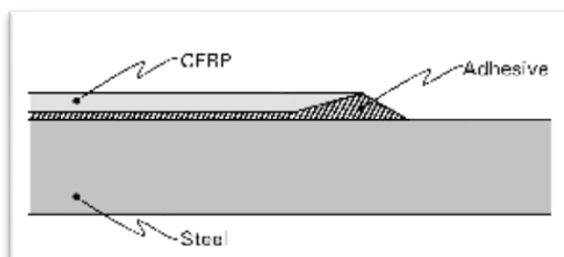
Ez a rögzítés lehet pl. mechanikus.

- U-keretezéssel (a)
- rögzítő szegekkel (b)

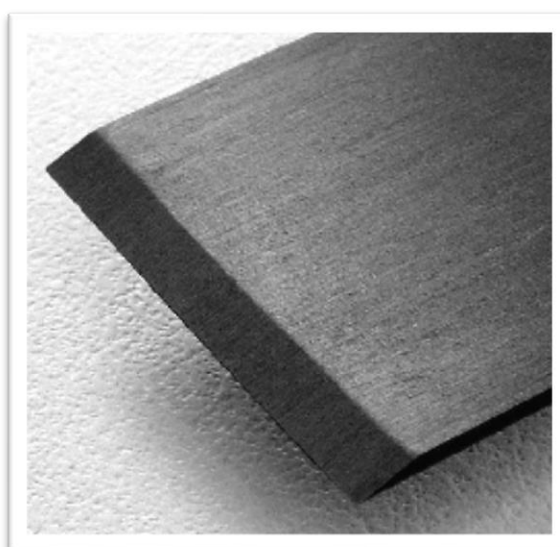


21. ábra
CFRP lehorgonyzási módok [12]

A másik módszer, hogy a ragasztóréteget és a laminált réteg véget úgy alakítjuk ki, hogy csökkentsük a végben jelentkező feszültségkoncentrációt. Ehhez a CFRP végeinek egy 20° bemetszése, és a ragasztó réteg vastagítása indokolt.



22. ábra
Ragasztóanyag kialakítása rétegvégén [12]



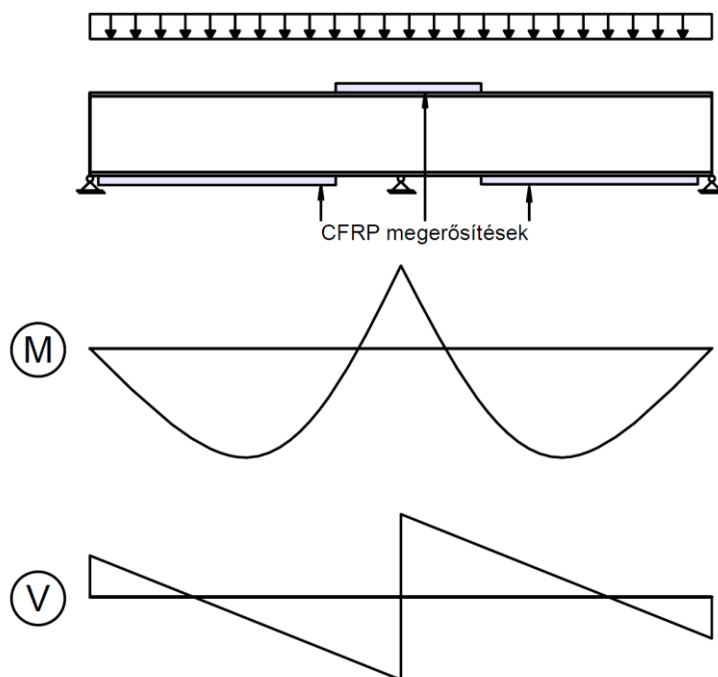
23. ábra
CFRP bemetszése rétegvégén [12]



2. A feladat célkitűzései

2.1. A feladat véglegesítése

A konkrét féléves feladat egy fiktív acélgerendának a vizsgálata lesz, amely egy földémet támaszt alá. Ezt a földémet réginek, legalább 50 évesnek tekinthetjük, és az acélgerendán pedig a folyáshatárának a kb. 90%-os kihasználtságát jelentő terhet veszünk figyelembe. A vizsgált fiktív gerendát háromtámaszúként veszem fel, és a nyomatéki ábrát lekövetve fognak a CFRP lamellák elhelyezésre kerülni.



24. ábra
A feladat sematikus
statikai modellje

2.2. A feladat során megválaszolendő kérdések

A tanulmány során megválaszolandó kérdések a témával kapcsolatban:

- 1) Képesek vagyunk-e a CFRP felhasználásával növelni a gerendának a teherbíró képességét?
- 2) Hogy alakulnak a gerendának az elmozdulásai CFRP réteg alkalmazásával az eredetihez képest?
- 3) Van-e különbség a teherbírásának a növelésében akkor, ha különböző állapotokban kerül rá a CFRP réteg?
 - a) A gerendán eddig működő teher megszüntetése nélkül
 - b) Alacsonyabb kihasználtságú terheléskor kerül rá a CFRP
 - c) 100%-os tehermentesítés után kerül rá a CFRP réteg.



3. A feladat elvégzéséhez alkalmazott módszer

A felvázolt példáról, a 24. ábrán ismertetett sematikus statikai váz formájában modell fog készülni ANSYS-ban, majd a gerendának a mezőnyomatéki részén az alsó húzott, a támasz feletti részen pedig a felső húzott övére CFRP réteg kerül. Az egész vizsgálat térfogatmodellként készül, hogy a CFRP lamellák és az acél közti együtt dolgozást, és az összekapcsolódást megfelelő pontossággal lehessen modellezni.

A térfogatmodell ahhoz is előnyös, hogy pontosabban tudjuk vizsgálni a feladat során létrejövő elmozdulásokat, illetve alakváltozásokat.

A további feladatok közé tartozik, hogy a lamellák és az acélgerenda öve közti kapcsolatot milyen módon fogom kialakítani. Ez egy -a valóságban is alkalmazott- ragasztóréteg modellezésével fog történni. A rétegnek az anyagi jellemzőihez a ragasztáshoz használt epoxy gyantának azegyszerűsített anyagi viselkedését fogom figyelembe venni.

Különös figyelmet követel az a feladat, hogy a lamellák, a ragasztóréteg, és a gerenda övének a modellje a végeelemes felosztásnál kompatibilis legyen. A három különböző modellnél az egyszerű felosztást követően nem biztosított, hogy a végelemeik a határaikon kapcsolódnak egymást, így modelli inkompatibilitások keletkezhetnek. Ennek az elkerülésére külön figyelmet kell szentelni, és manuálisan kompatibilissé tenni a rétegek közti végeelem átmenetet.



4. Kiindulási feltételek meghatározása

4.1. A teher meghatározása, kiindulási adatok

S235 Acél: $f_y := 235 \cdot MPa$ $\gamma_{M0} := 1$

Acél Young-modulus: $E := 210 \cdot GPa$

Fiktív földem gerenda osztásköze: $b := 4 \text{ m}$

Gerendák támaszköze: $l := 5 \cdot m$

Hasznos teher + önsúly + rétegrend önsúly:

$$p := 5.25 \cdot \frac{kN}{m^2} \cdot b = 21 \frac{kN}{m}$$

4.2. Szelvény adatok

Európai szabvány IPE szelvények tulajdonságai táblázatos formába szedve

Identification	Section properties. Static data							
	strong axis x-x							
	ix	Wel.x	Wpl.x	ix	Avy	Sx	Iy	Wel.y
cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ³	cm ⁴	cm ³	
IPE 80	80.1	20	23.2	3.24	3.58	12	8.49	3.69
IPE 100	171	34.2	39.4	4.07	5.08	20	15.9	5.79
IPE 120	318	53	60.7	4.9	6.31	30	27.7	8.65
IPE 140	541	77.3	88.3	5.74	7.64	44.9	44.9	12.3

Az IPE szelvények erős tengely körüli inercianyomatékának, és az erős tengelyre vonatkozó keresztmetszeti modulusainak a kigyűjtése vektoros formába:

Inerciák:

KM-i modulusok:

$$I_y = \begin{bmatrix} 80.1 \\ 171 \\ 318 \\ 541 \\ 869 \\ 1317 \\ 1943 \\ 2772 \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ cm}^4$$

$$w_{pl,y} = \begin{bmatrix} 23.2 \\ 39.4 \\ 60.7 \\ 88.3 \\ 124 \\ 166 \\ 221 \\ 285 \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ cm}^3$$



4.3. Lehajlás számítása:

Többszámú gerendának a lehajlásfüggvénye: (Befogott-csuklós)

$$e_z := \frac{2.1}{384} \cdot \frac{p \cdot l^4}{E \cdot I_y} = \begin{bmatrix} 426.713 \\ 199.881 \\ 107.483 \\ 63.179 \\ 39.332 \\ 25.953 \\ 17.591 \\ 12.33 \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ mm}$$

Kihasználtság:

$$?? := \begin{cases} \text{for } i \in 1, 2 \dots 18 \\ \quad b_i \leftarrow \text{if } e_{z_i} < \frac{l}{200} \\ \quad \quad \text{“megfelel”} \\ \quad \quad \text{else} \\ \quad \quad \text{“nem felel meg”} \\ \quad ?? \leftarrow b \end{cases}$$

4.4. Nyomatéki ellenállás ellenőrzése:

Ellenállás szelvényenként:

$$M_{Rd.y} := \frac{w_{pl.y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \begin{bmatrix} 5.452 \\ 9.259 \\ 14.265 \\ 20.751 \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Háromtámaszú gerenda maximális nyomatéka:

$$M_{Ed} := \frac{p \cdot l^2}{8} = 65.625 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Kihasználtságok szelvényenként:

$$??? := \begin{cases} \text{for } i \in 1, 2 \dots 18 \\ \quad b_i \leftarrow \frac{M_{Ed}}{M_{Rd.y_i}} \\ \quad ??? \leftarrow b \end{cases}$$

Lehajlás elleni
kihasználtság

Hajlítási
kihasználtság

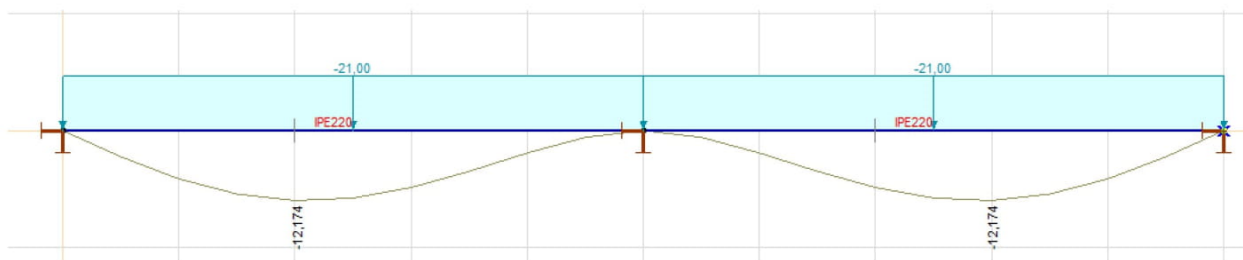
$szelvény =$	$?? =$	$??? =$
$\begin{bmatrix} \text{“IPE 80”} \\ \text{“IPE 100”} \\ \text{“IPE 120”} \\ \text{“IPE 140”} \\ \text{“IPE 160”} \\ \text{“IPE 180”} \\ \text{“IPE 200”} \\ \text{“IPE 220”} \\ \vdots \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \text{“nem felel meg”} \\ \text{“nem felel meg”} \\ \text{“nem felel meg”} \\ \text{“nem felel meg”} \\ \text{“nem felel meg”} \\ \text{“nem felel meg”} \\ \text{“megfelel”} \\ \text{“megfelel”} \\ \vdots \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1203.687\% \\ 708.77\% \\ 460.058\% \\ 316.257\% \\ 225.206\% \\ 168.226\% \\ 126.36\% \\ 97.984\% \\ \vdots \end{bmatrix}$

Választott gerenda: IPE220



4.5. Ellenőrzés AxisVM-ben

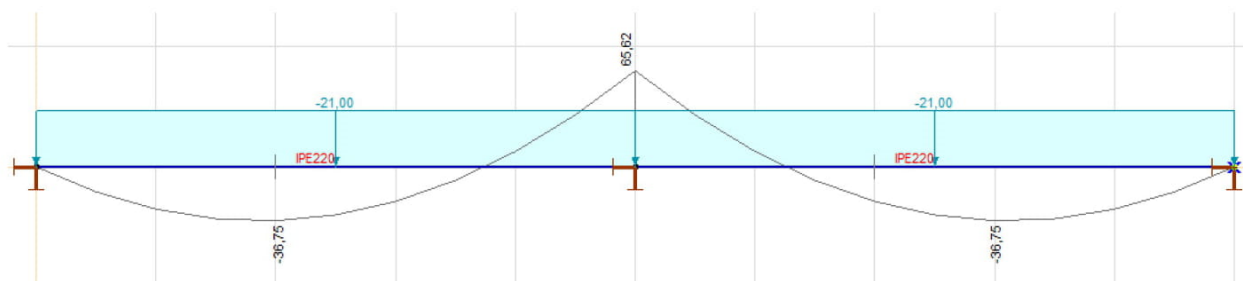
Lehajlás:



Analitikus: $e_{z_8} = 12.33 \text{ mm}$

Numerikus: $e_{z.num} := 12.174 \text{ mm}$

Nyomaték:



Analitikus: $M_{Ed} = 65.625 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Numerikus: $M_{Ed.num} := 65.62 \text{ kN} \cdot \text{m}$



5. A modellezés

5.1. A modell felépítésének megfontolásai

A modell építésénél már előre érdemes átgondolni, hogy mi az, amit vizsgálni szeretnénk az adott feladatban, és a modellnek a kialakítását és felépítését úgy kitalálni, hogy az a céljainkat a lehető legjobban letudja fedni, és a kérdéseink vizsgálhatóak legyenek rajta. A jelenlegi feladat célkitűzései vizsgálatához a legfőbb problémák a különböző egységek egymással való kapcsolata a modellben, illetve az anyagmodellek megválasztása, és anyagi tulajdonságoké.

A tanulmány egy specifikus problémának a vizsgálatával foglalkozik, így a modellnek a lehető legjobban meg kell felelnie ehhez a vizsgálatához. A vizsgálat célja, hogy a gerendánkat leterheljük, egészen addig amíg a képlékenyedés be nem következik, majd levegyük a terhet, rátegyük a CFRP réteget, és utána ismételt terheléssel megvizsgáljuk mennyivel változott a szerkezetünk viselkedése a plusz réteggel rajta. Ezekkel bővebben a tanulmány utolsó fejezetében, az Analízisnél fogunk foglalkozni.

Ahhoz, hogy ezt problémamentesen meg tudjuk vizsgálni, szükségszerűen olyan önkényes változtatásokat intéztünk már a modellezés szakaszában a szerkezetünkön, hogy annak a lehető legkevesebb eséllyel következzen be egyéb, számunkra nem releváns, és ezáltal nem is igényelt tönkremenetele.

5.2. Tönkremenetelek

Amit mi vizsgálni szeretnénk az az anyagnak a megfolyása, képlékenyedési zónák és mechanizmusok kialakulása, majd maradandó alakváltozással a teher megszüntetése, erősítés, és újra terhelés.

Jelen vizsgálat szempontjából kedvezőtlen jelenségek:

- Az acélgerendának a kihajlása
- Az acélgerendának a kifordulása
- Az acélgerendának a támaszok feletti túlzott lokális problémái, feszültségcsúcsok
- Az acélgerendának a lokális stabilitásvesztése (Lemezhorpadás gerincen, övön)
- A ragasztóanyagok nem megfelelő viselkedése (Elszakadás, elnyíródás, stb. jelen tanulmányban nem a ragasztóréteg a vizsgálandó)

A különböző stabilitási problémák megoldására, ha úgy adódna az analízisek futtatásából, hogy azok a vizsgált tönkremenetelünk rovására hamarabb bekövetkeznének és emiatt nem tudnánk kellőképpen megvizsgálni, amit szeretnénk, úgy plusz megtámasztásokat alkalmazunk. Oldalirányú megtámasztásokat a felső övön, illetve a keresztmetszet összes pontját megfoghatjuk a horpadások elkerülés érdekében a megfelelő szabadságfokok körül.

A támaszok környékén jelentkező lokális problémák elkerülése miatt a modellbe már az elejétől fogva bekerülnek merevítőlemezek, amik a koncentrált támaszerő felvételében játszanak szerepet.



5.3. Az ANSYS rövid ismertetése

5.3.1. Általánosan a szoftverről

Az ANSYS egy rendkívül sokrétű és sokféleképpen felhasználható szoftver. Számos mechanikai szimuláció futtatására alkalmas, és használják is a mai napig a mérnökök elterjedt körökben. A gépészetben szintúgy fontos, talán még dominánsabb, mint az építőipari mechanikában. Szimulációs mérnökök dolgoznak vele, megfelelő használatát nagyon pontos és a valóságnak megfelelő eredményekkel jutalmazza.

Az ANSYS-nak több „részlege” működik, és ezek közül csupán az egyik a mechanical része, amit jelen tanulmányban használtam. A mechanikai szimulációs szoftverrészlegen belül is több szoftverrel találkozhatunk.

- ANSYS Mechanical
- ANSYS Mechanical APDL
- ANSYS Mechanical Product Launcher

A felsorolás első két változata szintúgy alkalmas lehetett volna a probléma megvizsgálására, viszont én az APDL-t választottam.

Az APDL egy néhai '90-es években fejlesztett felhasználói grafikus kezelőfelülettel rendelkezik (GUI), és ehhez azóta sem nyúltak hozzá, viszont a szoftvert folyamatosan frissíti a fejlesztő, ezért a mai napig megfelelően használható. Az oka, amiért megmaradt a szoftver a réginek, az a feladatok tipizációjában rejlik.

A gyakorló mérnökök körében a szoftver megjelenése óta felhalmozódott tipizált feladatok miatt viszonylag hatékonyan, és gyorsan lehet ma, 2020-ban is különböző felmerő problémákat megvizsgálni. Az APDL futtatható a saját szöveges programnyelvén megírt programkódokat bemásolva, importálva. Ezekből a „SCRIPT” -ekből halmozódtak fel az évek során, ezért a szoftver és a kódnyelv ismerete nagyon hasznos tud lenni azoknak, akik az építőiparban az átlagnál jobban el szeretnének mélyedni, és az átlagosnál egyedibb, ritkább problémákat megvizsgálni.

Az eddig taglaltak miatt, jelen tanulmányban arra törekedtem, hogy a saját tanulmányom lemodellezése közben, a lehető legjobban próbáljam tipizálni a problémát, ezért az később, kutatások, vizsgálatok, valós problémák esetén elővehető, és az akkori problémák paramétereire a lehető legkisebb fáradtsággal átírhatók legyenek.

5.3.2. A szoftverben választott modellezési mód

Ahogy már említettem, a szoftver rendkívül változatos felhasználási módjai miatt egy-egy feladatot, problémát számos módon meg lehet vizsgálni. A szoftver szabad utat ad a mérnöki kreativitásnak, ezért elengedhetetlenül fontos érteni a szoftver működése mögötti mechanikai tartalmat, illetve magát a programnak a működését is.

Példaként vehetünk egy gerendát. Egy gerendának a modellezése kiindulásból legalább 3 teljesen különböző módon modellezhető, ezáltal más és más dolgok vizsgálhatók meg közelebbről.



Ha egy egyszerű statikai vázunk van, és a gerendán sincsenek különböző módosulatok, elvárások, abban az esetben a leggyorsabb és legegyszerűbb modell a **rúdmodell**.

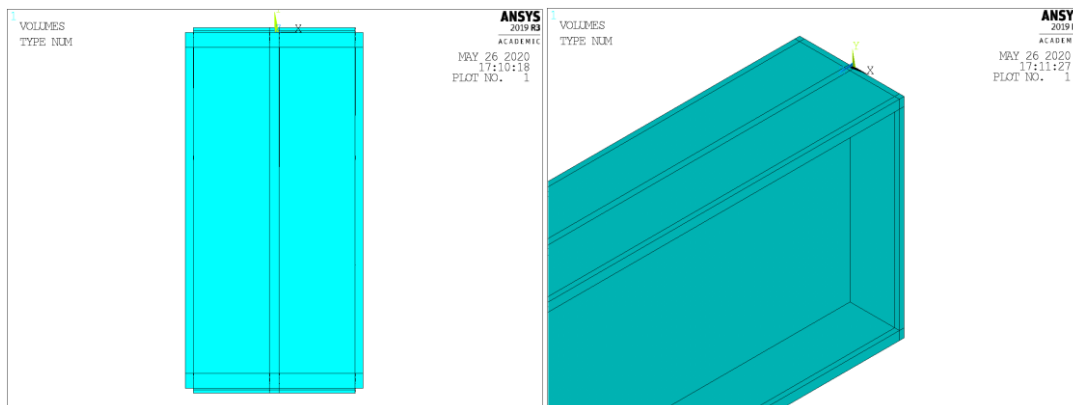
Ha egyéb analíziseket is szeretnénk futtatni, vizsgálni stabilitásvesztéseket melyre menőek, esetleg lokális problémákat, akkor választhatunk **héjmodellt**.

Ha pedig a lehető leginkább a valóság szerint szeretnénk valamit visszaadni, vagy egy olyan szerkezetről van szó, esetleg több, különböző szerkezetnek, vagy anyagnak a kapcsolatát szeretnénk modellezni, vagy olyat, amit nem lehet az előző 2 módon megalkotni (pl. nem egy gerendáról, szelvényről, nem geometriailag szabályos szerkezetről van szó stb.) akkor pedig a végtelékig elmehetünk a **térfogat (test) modellel**.

5.4. Geometriai Modell

5.4.1. Térfogatelemek

Mivel az általam vizsgált problémákhoz több szerkezeti elemet, réteget, és anyagot kell alkalmazni, és ezeknek fontos a kapcsolatuk, és egymásra hatásuk, ezért az egész szerkezetnek a modellezésére a választott modell típus a térfogat (test) modell.



25. ábra
Volume elemek Ansysban

26. ábra
Volume elemek Ansysban

A térfogatmodelleknél több dologra is oda kell figyelni, de az egyik legfőbb problémát jelentő tulajdonságuk a különböző elemeknek az egymáshoz való kapcsolata/viszonya. Ez azért fontos, mivel a végeselemes hálót ezekhez képest kell majd kialakítani, így, ha nincsenek jól előkészítve a testek, nehéz dolgunk lesz a hálózásnál. A különböző komponensek 3D-s „Volume” blokkokból épülnek fel.

Ahhoz, hogy a különböző komponensek minden irányú behálózását meg lehessen oldani, a blokkok széleinél felvágtam minden elemet, hogy határt képezzenek az elválasztások.

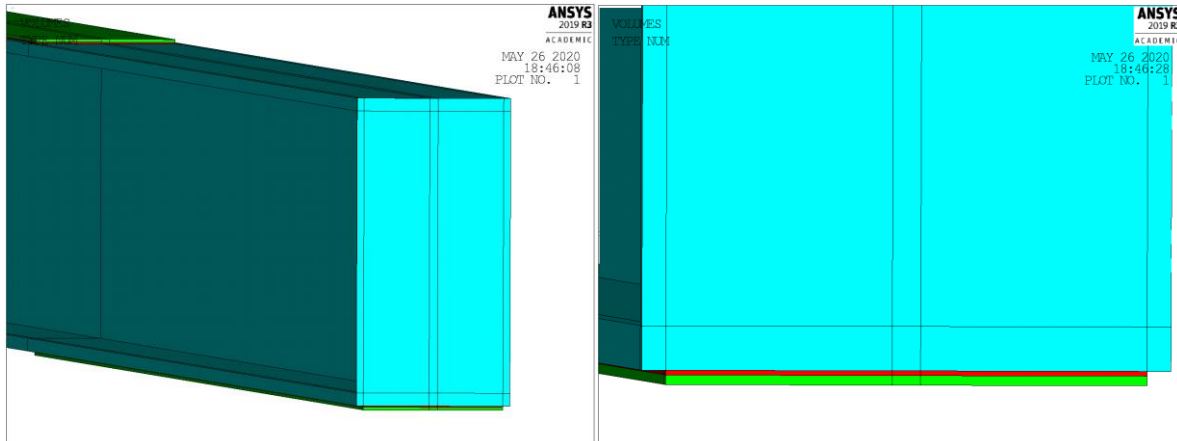
Már a geometriánál fontosnak véltem, hogy a lehető legtöbb adat paraméteres legyen, így ezzel később beállítható különösebb nehézségek nélkül.



5.4.2. Komponensek

A blokkokból összerakott szerkezetet a könnyebben kezelhetőség kedvéért szétszedtem különböző komponensekre. A komponensek azért hatékony a jelenlegi tanulmányban, mivel azokra külön-külön egyesével lehet tulajdonságokat beállítani és módosítani.

Ezáltal tovább növelve a feladatnak a tipizáltságát.



27. ábra
A komponensek Ansysban

28. ábra
A komponensek Ansysban

Ahogy a fenti ábrákon is látszik, anyag és funkció szerint is szét van a modell szedve komponensekre.

A komponenseken felhasznált tulajdonságok:

- **Acél** ● **S235**
Rugalmassági modulus: 210 GPa
Folyáshatár: 235 MPa
Tangenciális meredekség folyás után: E/100 (2100 MPa)
Poisson-tényező: 0.3
- **Epoxi ragasztó** ● **Horse HM120CP[13]**
Rugalmassági modulus: 7.449 GPa
Poisson-tényező: 0.3
- **CFRP** ● **Horse HM-1.2T[13]**
Rugalmassági modulus: 171 GPa
Szakítószilárdság: 2743 MPa
Poisson-tényező: 0.3

A ragasztó és a CFRP rétegek anyagtulajdonságairól található bemutatás, illetve szemléltetés a dolgozat első részében. Viszont a tényleges modellezésnél használt anyagtulajdonságokhoz felkerestem egy konkrét gyártót az interneten, és annak a cégnek a CFRP szalagjainak a terméktulajdonságok közül kivett tényleges, felhasználható tulajdonságait vettem figyelembe.



Illetve ennek a cégnek a CFRP rétegek mellett a termékínálatában található volt a ragasztórétegnek használt anyag is, így egy helyről tudtam kinyerni az anyagjellemzőket a két többletként felkerülő réteghez.

Ragasztóanyag [13]

Horse HM120CP

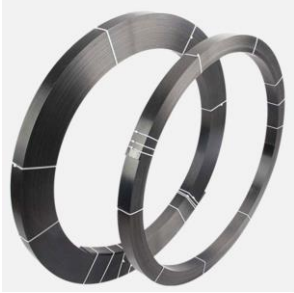



- Kétkomponensű ragasztó.
- A rész: Epoxy (2)
- B rész: Hardener (1)
- Magas húzószilárdság
- Magas nyírószilárdság



29. ábra
A modellezett
ragasztó
termékképe

Biszfenol-A modifikált epoxy gyanta alapú ragasztóanyag, amely nem hidrofil (víztaszító), nagyon magas kötési szilárdsággal rendelkezik, vízálló, korrózióálló adalékanyaggal kevert és környezetkímélő. Rendkívül tágas hőmérsékleti spektrumban alkalmazható és kiváló az alkáli/savas ellenállása. Lassan öregedik, alacsony páratartalommal szemben is ellenálló.

CFRP rétegek [13]

	Carbon Fiber Strip	CFRP Wrap	CFRP Sheet	CFRP Fabric
				
Szélesség [mm]	50-100- és egyedi	10-15-20-25-30-50-60 és egyedi	10-15-20-25-30-50-60 és egyedi	10-15-20-25-30-50-60 és egyedi
σ_x [MPa]	2700-3100	3800	3800	3800
E [MPa]	165000-180000	234500	234500	234500

Az alkalmazható megoldások közül több fajta is létezik, és ámbár ugyan azt a célt szolgálják, az alkalmazásuk részleteiben eltérőek lehetnek. Emiatt érdemes mérlegelni az adott problémánál milyenre van szükségünk, mi az, ami kielégíti a szerkezet tekintetéből a megfelelő alkalmazási területeket.

A legfőbb anyagjellemzők (Húzószilárdság, rugalmassági modulus) csupán egy modellnél különbözik a többitől, az összes többinél megegyeznek. Ezért a felhasználási területekben pont ez a fajta fog a leginkább kilógni.

Balról jobbra haladva a táblázatban egyre komplexebb rétegeket kapunk, míg a legelső verzió (Strips) a legegyszerűbb szerkezeti megerősítésekre való, a többi hárommal sokkal



komplexebb problémákat is orvosolni lehet. A strips felhasználási területei közé tartoznak a két és többtámaszú tartók, konzolok, egyszerű rúdszerkezetek. A wrap, sheet és fabriccal akár falazatokat meg lehet erősíteni nyírásra, szeizmikus terhekre, lemezszerű elemeket stb.

5.4.3. A végeleemes háló generálása

A mérnöki szimulációs szoftvereknek az egyik, hanem a legfontosabb része a végeleemes hálónak a generálása. Míg az általános, külön építőmérnöki felhasználásra (azon belül is tartószerkezeti) készült specifikus szoftvereknél kisebb hangsúly van azon, hogy a hálónk hogyan is generálódik le, addig Ansysban, tekintve univerzális felhasználását, nagyon fontos ezzel foglalkozni. A megszokott szoftvereinkben általában annyiban foglalkozunk a hálónkkal, hogy az milyen sűrűn legyen felosztva, illetve esetleg milyen alakzatokból álljon.

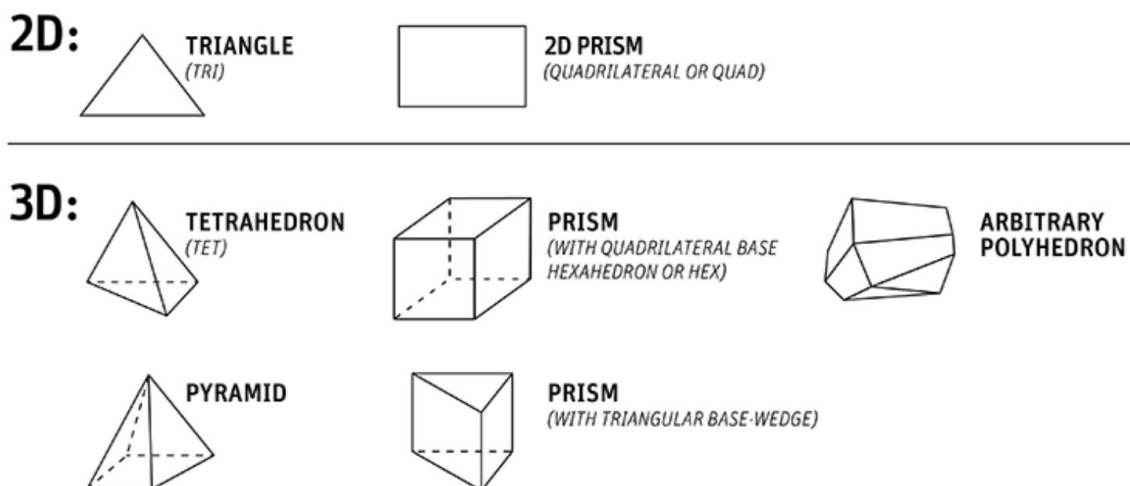
Addig az ANSYS-ban (és a hozzá hasonló, általánosabb mérnöki szimulációs szoftverekben) ennél melyebbre menően szükséges foglalni a hálónkkal.

A végeleemes háló befolyásolja a szimuláció:

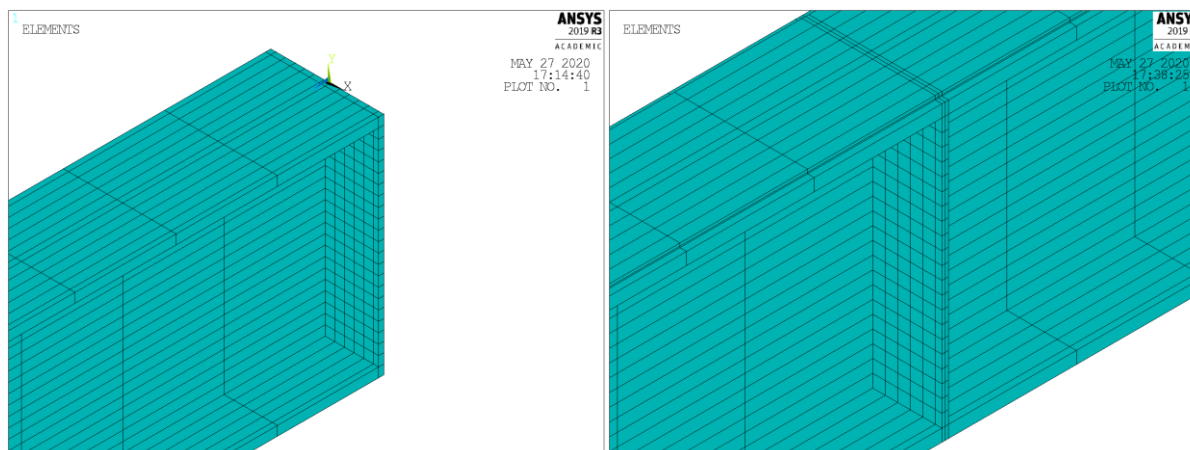
- pontosságot
- konvergenciáját
- sebességét

Általánosságban véve, a háló lényege, hogy a komplexebb szerkezeti geometriát feloszuk véges számú, egyszerűbb geometriájú testekre, amiket könnyebben le tudunk írni és jellemezni tudunk bázisfüggvényekkel. Minél kisebb elemeket alkalmazunk, annál több darabszám lesz belőlük, ezáltal annál lassabb lesz a szimulációnk sebessége. Emiatt fontos az elemeknek a helyes geometriai megválasztása.

Pár lehetséges végelelem forma: [14]



30. ábra
ANSYS-ban járatos végelelemek



31. ábra
A végeelem háló Ansysban

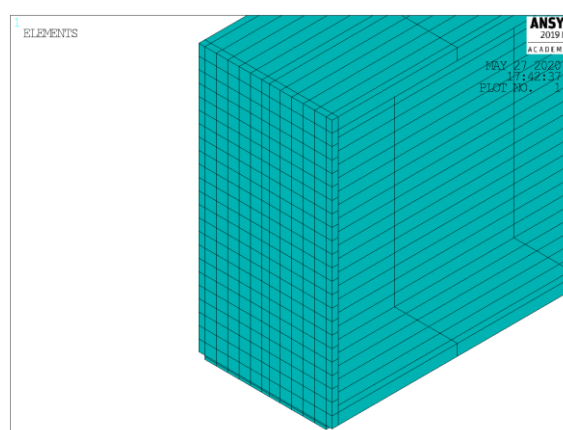
32. ábra
A végeelem háló Ansysban

Az aktuális feladatra vetítve az eddig felsoroltakat, a lényeg az a jelente, hogy egy arany középutat találhassak a hálózásban. Mivel az ANSYS-om diákverzió, így az egyetlen korlátozás benne ámbár bármelyik részét lehet használni a szoftvernek, arra limit van szabva hogy összesen egy projekten belül hány darab node-ot lehet alkalmazni. A maximum alkalmazható node szám 32000. Így olyan hálózási megoldást kellett találni, amivel nem lépem túl a node szám felső határát, viszont a lehető legpontosabb analízis eredményeket visszakaphassam.

A maximális node számba való beleférés csak a legtriviálisabb probléma ami a hálózáshoz kapcsolódik, viszont ehhez is szükséges átgondolni a kialakítást. A végső megoldás az lett a problémára, hogy hosszirányban és keresztirányban eltérő méretűek lettek a végeelemes háló vonalai, ezáltal az elemeinek az oldalai is.

Ahogy az az 31-32. ábrákon is látható, a tartó hossz tengelyével párhuzamosan egészen hosszú részekre van csupán felosztva, és a keresztirányú hálózás a sűrűbb. Ehhez még hozzá jött az is, hogy a különböző térfogattestek amikből áll maga a modell, minden végpontjukban meg kell hogy egyezzenek, különben nem lesznek a véglapok kompatibilisek, azoknál anomáliák lépnek fel.

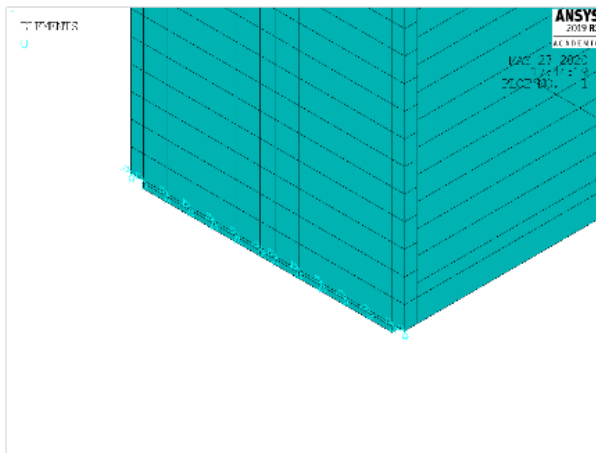
A fent említett kialakítás azért is fontos, hiszen a vizsgálatunk fő célja a különböző testek együttműködéséből fakad, így elengedhetetlenül fontos hogy a modellben megfelelően kompatibilisek legyenek, és a viselkedésük is tükrözze a valóságot. Ezért egy-egy adott térfogattestnek az élei mind végighaladnak a teljes modellen. Az összes olyan helyen ahol történik valami váltás, esetleg véget ér egy blokk, ott az ahhoz kapcsolódó testnek is éle kell hogy legyen, így össze lehet a testeket ragasztani egymással „kompatibilisen”.



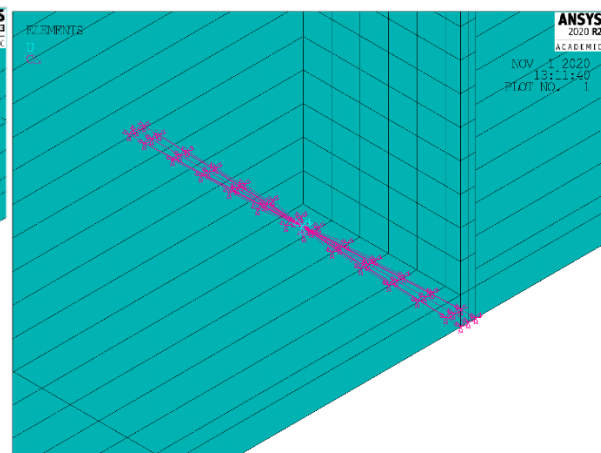
33. ábra
A végeelem háló Ansysban



5.4.4. Támaszok megadása



34. ábra
Tartóvégi megtámasztások



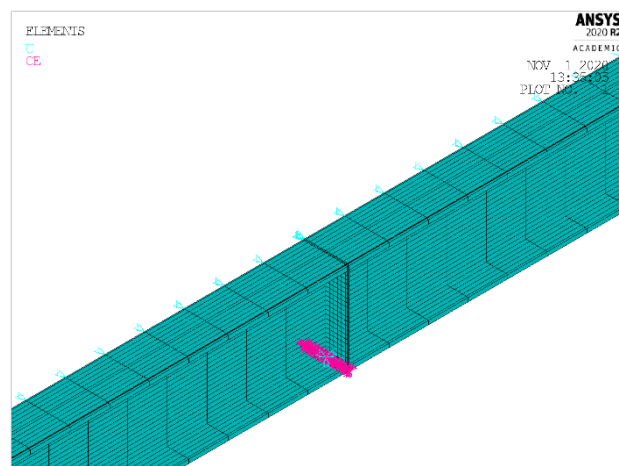
35. ábra
Tartó közepén lévő megtámasztások

A szerkezet megtámasztása a 3 támaszú statikai modell miatt a két végen és közepén található.

A tartóvégeken (mind a kettő esetben) csupán függőleges és a tartó hossz tengelyére merőleges irányú megtámasztásokat alkalmaztam, hogy a gerenda megfelelően tudjon alakváltozni a tartóvégen, és általa ne kerüljenek plusz feszültségek bele, hogy gátolt elmozdulások keletkezzenek. A tartó közepén viszont síkbeli csuklós támasznak megfelelően a függőleges, illetve vízszintes elmozdulások kerültek megfogásra.

A közbenső támasz feletti megtámasztásnál összevonásra kerültek a node-ok, és egy „master” nodeban definiált merev testbe lettek bekötve, ezzel szétszítva a támaszerőt 3 sornyi node-ra, az egy sornyi helyett. Erre azért volt szükség, mivel a támasz feletti merevítőlemez viszonylag vékony elem, és annak a vége elemes hálós felbontása miatt még rövidebb szakaszra összpontosultak a támaszerők. Ezért a támasz feletti lokális feszültségcsúcsokat csökkentettem, így kiküszöbölve az esetlegesen fellépő lokális tönkremeneteleket, hogy a gerendának a tényleges teherbírását le lehessen követni. Így mezőközépen kialakulhattak a képlékeny csuklók és a globális képlékenyedés.

Mivel a vizsgált fiktív acélgerendának a kiindulási feltételezése az volt, hogy egy födémgerenda szerepét tölti be, így feltételezhető, hogy a valóságban a felső öve végig meg van támasztva oldalirányú elmozdulások ellen. A modellben ezt is figyelembe vettem, tovább csökkentve a szilárdsági tönkremeneteli határ elérését megakadályozó tényezőket. Így, a gerendának jelentősen lecsökkent az esélye a kifordulásra a hajlítás következtében.



36. ábra
Felső övön lévő oldalirányú megtámasztások



5.5. Anyagmodellek

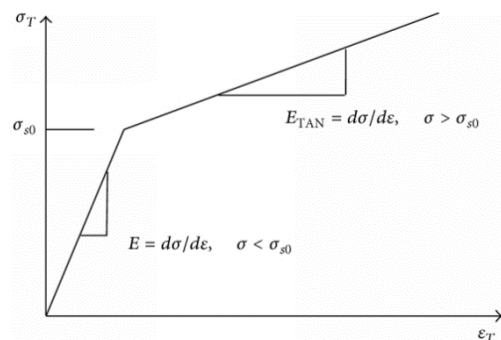
5.5.1. Szerkezeti acél

Fontos leszögeznünk, hogy a vizsgálat szempontjából az analízisünknek anyagilag nemlineárisnak kellett legyen, hiszen az acélnak vizsgálni és használni akarjuk a képlékenyedő képességét. Ehhez, hogy ezt elérjük az ANSYS-ban külön gondoskodni kellett róla, hogy az acél (STEEL, Mat type 1) anyagmodellje megfelelően legyen kiválasztva.

Az acélhoz felhasznált anyagmodell: Bilinear Isotropic Hardening

Ez az anyagmodell a von Mises folyási kritériumot használja fel izotropikus felkeményedéssel párosítva. Lényegében ez a fajta anyagi ábrázolás a lineárisan rugalmas – tökéletesen képlékeny, illetve a lineárisan rugalmas - felkeményedő idealizált anyagmodellhez hasonlít a leginkább, a folyáshatárt követő lineáris szakasznak a meredségétől függően.

A bilineáris -ahogyan azt neve is mutatja- két teljesen lineáris szakaszból áll, és a koordináta rendszer origójából indul pozitív értékekkel. A feszültség-megnyúlás diagram első lineáris szakasza teljesen megegyezik a lineárisan rugalmas anyagmodellel, annak a meredsége a rugalmassági modulussal egyenlő. Majd a folyási feszültséget elérve megtörik a diagram, és egy újabb meredséggel folytatódik, ami az érintő modulusból (tangent modulus) származik. Ez az új meredség viszont nem lehet kisebb zérusnál, és nagyobb sem a rugalmassági modulusnál.



37. ábra
Bilineáris σ - ϵ diagram

A modellben felhasznált anyagmodell az acélhoz az egyértelmű konvergenca érdekében, a második lineáris szakasán egy minimális, a rugalmassági modulusának az 1%-val megegyező meredséggel került felvételre.

5.5.2. Ragasztó

A ragasztó tekintetében arra a következtetésre jutottam, hogy az anyagmodell választása rendkívül sokrétű probléma lehet, tekintve annak a pontos anyagát. A ragasztónak használt Epoxy gyanták sosem „tisztá” formájukban vannak a piacon megvehető termékekben, és ahogyan az a 4.3.2. fejezetben látható, az általam vizsgált ragasztó anyag is egy keverék.

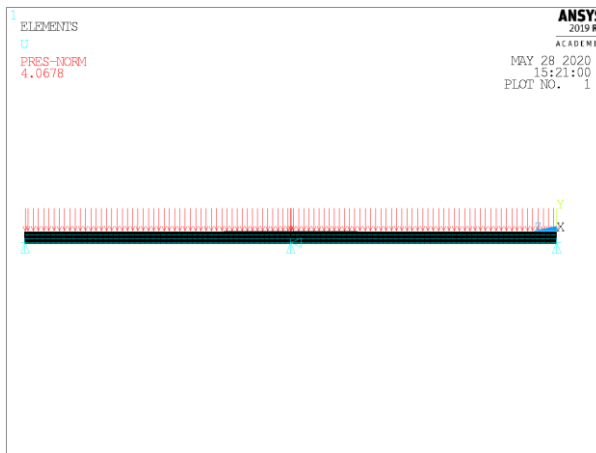
Így pontosabb, részletesebb anyagtani tulajdonságokat leíró termékismertető nélkül lineárisan rugalmasnak és izotropnak feltételeztem a ragasztó anyagmodellét.

5.5.3. CFRP réteg

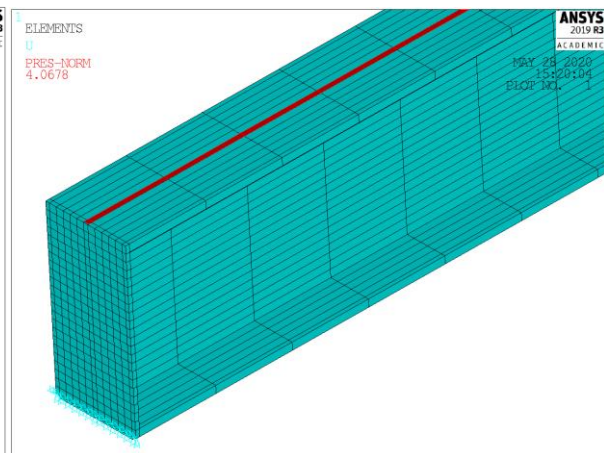
A CFRP rétegnél hasonló indokok miatt, mint a ragasztónál szintén lineárisan rugalmas, izotrop anyagmodellt feltételeztem.



5.6. Tehermodell



38. ábra
Konstans megoszló teher



39. ábra
A terhelt felület

Szintén a modell felépítéséből adódóan a terhelést csak kis felületen definiáltam a modellre. A fiktív teher, amit korábban számoltam egy konstans megoszló teher a szelvénynek a felső övéen.

Ezt a terhet pedig nem az öv teljes felső felületére „kentem” el, hanem csupán a gerinc vastagságára van leosztva, és oda is van definiálva. Ahogyan az látszik is a 39. ábrán.

Fontos még megjegyezni, hogy a teher csupán az acél anyagtípussal rendelkező komponensre van definiálva, tehát a ragasztó, és a CFRP réteg „alatt” van megadva, hogy az erőátadás közvetlenül az acélgerendára történjen.

6. Az analízis

6.1. A folyamat ismertetése

Ahhoz, hogy a célkitűzésekben foglaltakat megtudjuk vizsgálni, érdemes megfontolni, hogy milyen analízisekre van szükségünk. Az előző fejezetben már néhány pontban kitértünk arra, hogy a különböző anyagmodellekre miért van szükség, és hogy ezek miben befolyásolják az analízist. Az acél viselkedésének a figyelembevétele miatt mindenképpen anyagilag nemlineáris vizsgálatot kell végezzünk.

Az anyagi nemlinearitás az acélnek az anyagmodelljéből származik, viszont az ANSYS a nemlineáris számításoknál időkonvergenciával is dolgozik. Ez azt jelenti, hogy a különböző eseteket időlépésekre szét lehet szedni, és ezzel nyomon követni folyamatosan, hogy a terhelés folyamata közben hogyan viselkedik a szerkezetünk. Az időlépésekhez pedig meg tudjuk adni, hogy milyen lépésméreteket használjon a szoftver a futásnál.

Az analízis előkészítésénél azzal is számolni kellett, hogy ha már képesek vagyunk időlépésekre lebontva vizsgálandni, akkor ezekben az időlépésekben változtatni tudjuk a szerkezetünket, és ezáltal külön-külön beállítani, hogy mikor milyen anyagunk dolgozik, és milyen nem.



6.2. A felhasznált analízisek

1. Analízis: Egylépcsős terhelés – Csak a gerenda, a CFRP rétegek nélkül
2. Analízis: Egylépcsős terhelés – A gerenda és a CFRP rétegek is dolgoznak
3. Analízis: Többlépcsős terhelés – A teljes teher levétele, majd újra terhelés
4. Analízis: Többlépcsős terhelés – A teher levétele nélküli tovább terhelés

Egylépcsős terhelés

Az egylépcsős analízisnek az egyik célja az volt, hogy a kiindulási feltételek meghatározása után -felhasznált szelvényméret, teherintenzitás, támaszköz- meg tudjuk határozni, és definiálni a tanulmányban vizsgált szerkezet sajátos teherbírását. A teherbírás feltételeket több szabvány szerint, többféleképpen is meg lehet határozni. Jelen tanulmányban ennek a meghatározása a szerkezet Erő-Elmozdulás diagramjának egy, a lineáris szakasz után következő, közel kilaposodó szakaszhoz tartozó érték fogja adni. Az az érték, aminél számottevően több terhet már nem képes elviselni a gerenda, több nagyságrendű alakváltozás nélkül.

A teherbírás meghatározásához a gerendát egy a kiinduláskor analitikusan számított hajlítási ellenállásához tartozó terhet bőven meghaladó teherrel terheljük. Majd az ehhez tartozó diagramot vizsgáljuk.

Az egylépcsős mivoltától eltekintve a teherintenzitásnak a növekedését folyamatosan végig tudjuk követni.

Többlépcsős terhelés

A többlépcsős analízisben különböző időlépéseket alkalmazunk a modellnek a terhelése során ANSYS-ban, és ezekkel követjük le különböző valóságban előfordulható esetekben tanúsított viselkedését a gerendának. Lehetőségünk van az időlépéseket használva előterhelni a gerendát, és utána alkalmazni a CFRP réteget, illetve lehetőség van analízis közben növelni a terhet.

1. időlépés

A ragasztó és a CFRP rétegek deaktiválása

2. időlépés

A teher definiálása a szerkezetre

3. időlépés

A teher levétele a szerkezetről

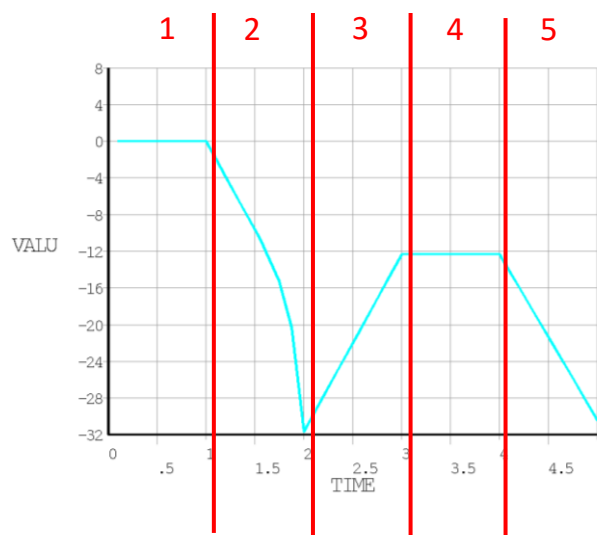
4. időlépés

A ragasztó és a CFRP rétegek újra aktiválása

5. időlépés

A teher ismételt definiálása a szerkezetre

40. ábra
ANSYS-ban alkalmazott
időlépések





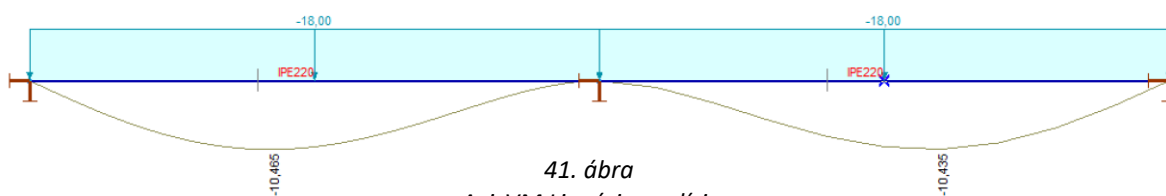
Ezekkel az időlépésekkel lehet variálni, és vizsgálni. Ezzel a strukturális felépítéssel az alap feltevéseink közül nagyjából az összeset meg lehet vizsgálni, csupán az éppen vizsgált problémához kell igazítani a terhelést, esetleg az időlépések sűrűségét, hosszát stb.

6.3. Az analízis eredményei

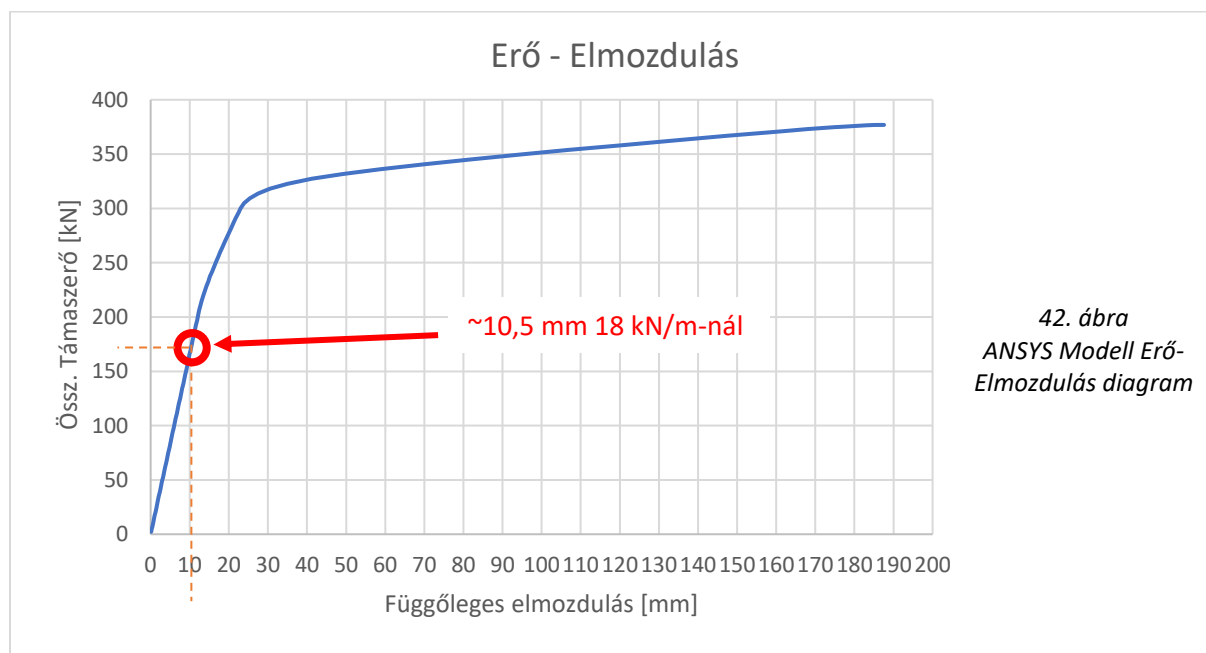
Ahhoz, hogy a modellen végzett vizsgálatok hitelesek legyenek, annak az előzetes ellenőrzése szükséges, és ehhez több módszert is alkalmazok. Az ellenőrzés után ismertetésre kerülnek a vizsgálatok, azoknak célja és eredménye.

6.3.1. A modell verifikációja

A modell helyes működését többféleképpen is vizsgálhatjuk.



- Terhelés: 18kN/m
- Maximális lehajlás mezőközépen: 10.465 mm



Az AxisVM-ben lefuttatott analízis korlátozottan összehasonlítható az ANSYS-ban vizsgált modellnek az analízisével. Mivel az ANSYS-os vizsgálat egyik fő célja az anyagi nemlineáris viselkedésnek a beépítése a vizsgálatba, így az AxisVM-mel történő verifikációnak



mindenképpen az acél még lineáris viselkedést mutató szakaszán kell történjen az összehasonlítás. Ezért egy csökkentett teherszinten, még a folyáshatárhoz tartozó feszültség elérése előtti állapotban kerül összehasonlításra a két a modell. A fenti ábrán látható, hogy ezekkel a feltételezésekkel élve látható az egyezés.

Ezekkel az ábrákkal kétféleképpen is verifikálható a modell.

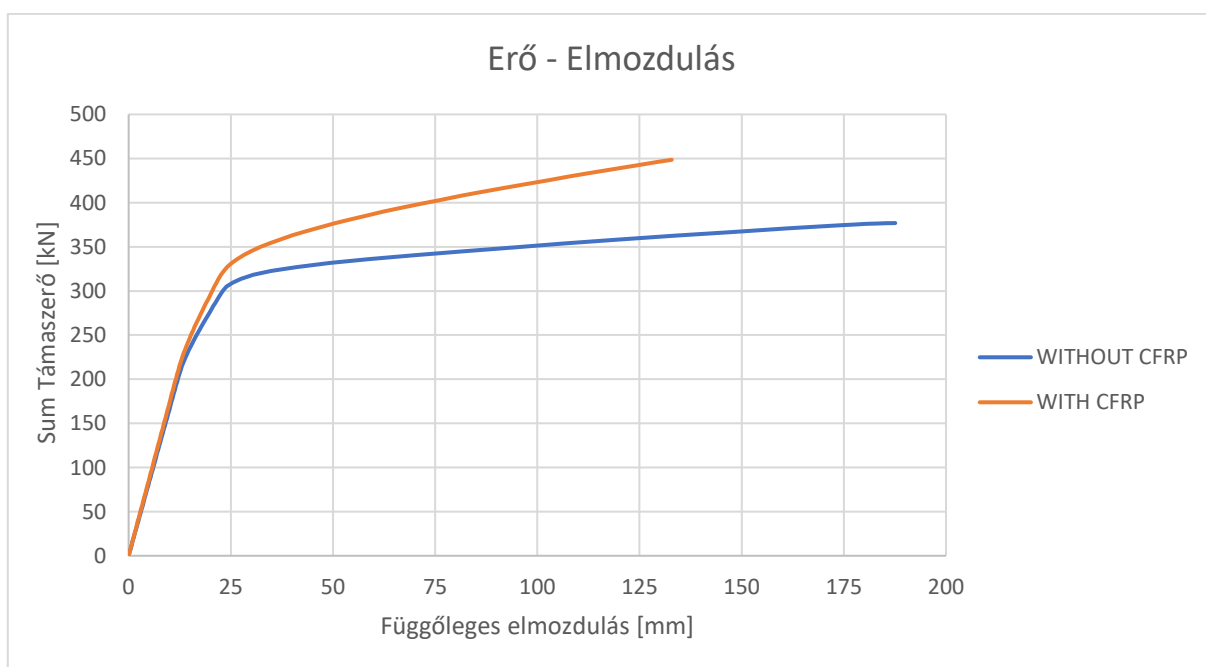
1. Az anyagmodell viselkedése megfelelőnek tekinthető. A terhelés hatására az anyag eleinte lineárisan terhelődik. Majd a folyási feszültséget átlépve megfolyik, és elkezd fokozottan alakváltozni, megtörik a lineáris görbe. Mivel az anyagmodell a második lineáris szakaszon kapott egy minimális meredekséget ($E/100$) így látható, hogy a szélső szálakban elért folyási feszültség után is képes további erőfelvételre, bár alacsonyabb intenzitással.
2. Az AxisVM-ben lineáris futtatást végeztem, és a lineárisan kapott lehajlás megtalálható az ANSYS modellnek a lineáris szakaszán, mielőtt megfolyyna az acél.

6.3.2. Egylépcsős terhelésből származó eredmények

Ha az analízis során a szerkezetünket nem tehermentesítjük, és csak végig terheljük a teljes teherintenzitásig, akkor egészen másabb tulajdonságokat lehet vizsgálni. Vizsgálhatjuk kialakuló feszültségeknek a változását, a lehajlás mértékét, illetve a képlékenyedés mértékét.

Fontos definiálni, hogy a tanulmány elején számított és megállapított teherintenzitás az csupán a szelvényünknek a 97.98%-os kihasználtságához tartozó terhet jelenti. Ez a szelvény kiválasztásához és a teher kezdeti értékének a megállapításához volt szükséges. Jelen esetben ennél számottevően nagyobb teherrel kerül leterhelésre, hogy a lehető legnagyobb képlékeny alakváltozáson menjen keresztül és nagy lehajlások keletkezzenek a vizsgálhatóság érdekében. Így végig követhetjük a gerendának az erő-elmozdulás diagramját.

A vizsgálatban alkalmazott teherintenzitás: **45 kN/m**



43. ábra
Egylépcsős terhelés Erő-Elmozdulás diagram



Az analízis eredményeiből megállapítható, hogy

- A rugalmas szakaszon nem dolgozik a CFRP réteg
- A képlékeny szakasz elérése után viszont jelentősen megváltoztatja a gerenda viselkedését

A fenti ábra alapján a további vizsgálatokban figyelembe vett 100%-os teherbírás a 35kN/m-es terhelés tartozó terhet jelenti.

A 35 kN/m-es teherintenzitáshoz tartozó függőleges elmozdulások változása:

- CFRP nélkül: 93,98 mm
- CFRP-vel: 32,21 mm

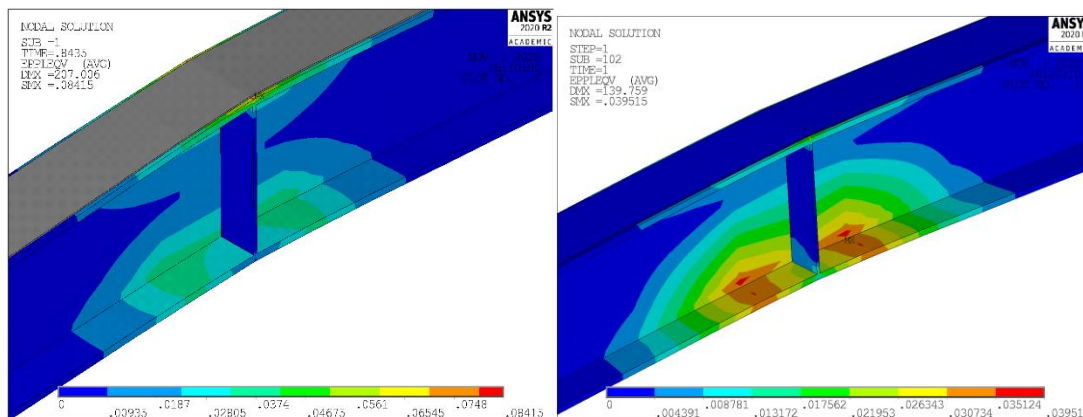
65,73%-os csökkenés

Az Erő elmozdulás diagram alapján definiálható teherbírás változása:

- CFRP nélkül: 31 kN/m
- CFRP-vel: 35 kN/m

11,43%-os növekedés

Feszültségek és képlékenyedés



44. ábra
Képlékenyedés CFRP nélkül

45. ábra
Képlékenyedés CFRP-vel

A fenti ábrán a CFRP megerősítő réteg nélküli viselkedés és az erősítés utáni látható. Az ábrákon jól látszik, hogy a közbenső támasz közvetlen közelében kezdődik meg először a képlékeny zónák kialakulása, és csak utána kezd mezőközepen. A 45 kN/m-es totálteher alkalmazásánál lehetőség volt mind a kétfajta modellt teljesen addig terhelni, ameddig tönkre nem ment valamilyen lokális problémára. Ez nagyon magas kihasználtságon történt, köszönettel a modell felépítésénél figyelembe vett megfontolásoknak. E miatt viszont az analízisek utolsó teherszintjei eltérnek egymástól, így egy azonos teherszinten hasonlítom össze a kapott eredményeket.

A 37,5 kN/m-hez tartozó eredmények: (Az utolsó eredmény a CFRP nélküli modellből)

	Képlékeny alakváltozás [%]	σ_x [MPa]
CFRP nélkül	8.42	477.27
CFRP erősítve	3.95	296.84



6.3.3. Többlepcsős terhelésből származó eredmények

A jelenlegi vizsgálat célja, hogy kiderítsük milyen hatással van, hogyha a túlterhelt szerkezetünket megpróbáljuk tehermentesíteni, és hogy a tehermentesítésnek mennyire érvényesül a végkifejletben.

Azt szintén meg kell említeni, hogy a referencia teherbírás **35 kN/m**.

Illetve amit használni fogunk, az a teherbírás 80%-a, a **28 kN/m**.

A vizsgált esetek:

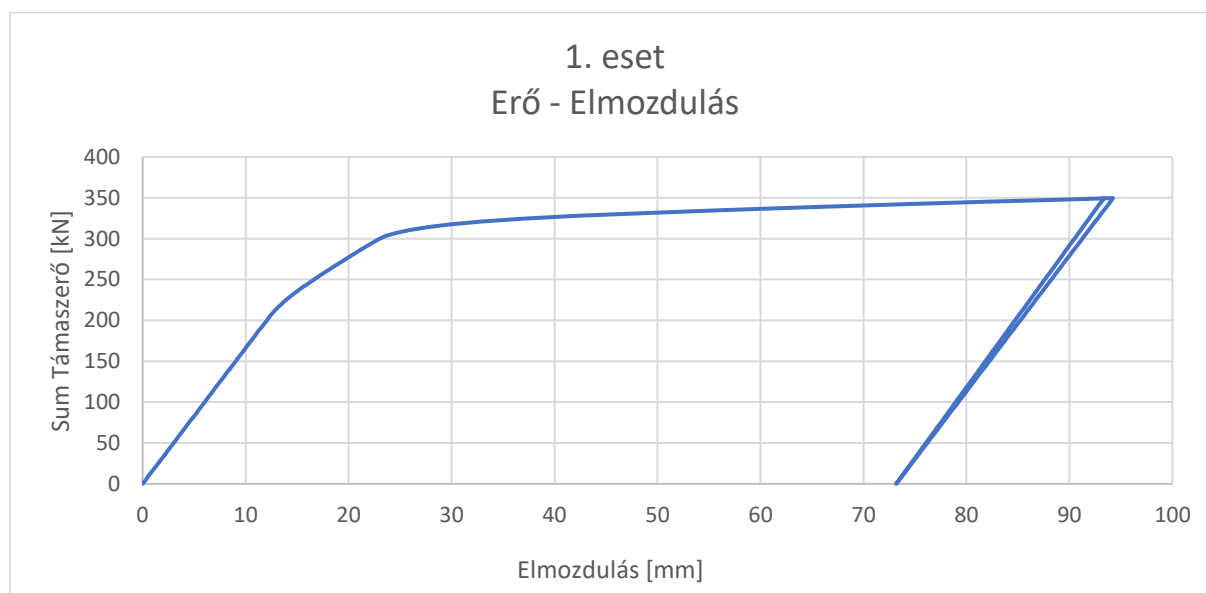
1.	100%-os leterhelés	Tehermentesítés	CFRP	100%-os leterhelés
2.	80%-os leterhelés	Tehermentesítés	CFRP	80%-os leterhelés
3.	80%-os leterhelés	Tehermentesítés	CFRP	100%-os leterhelés
4.	80%-os leterhelés	-	CFRP	100%-os leterhelés

1. eset

A gerendát egészen addig terheljük, amíg abban a szélső szálak megfolyznak, és elkezdődnek a nagy elmozdulások, és a képlékenyedés. Ez azt eredményezi, hogy a képlékenyedésből adódó alakváltozások maradandóak lesznek, és a tehermentesítés során csupán bizonyos mértékig tud rugalmasan csökkenteni lehajlásából. Majd, ezek után aktiváljuk a CFRP réteget és szintén alkalmazzuk rajta a terhet.

Kezdeti teherintenzitás: 35 kN/m

Újraterhelés utáni teherintenzitás: 35 kN/m



46. ábra

1. eset, Erő-Elmozdulás diagram

A fenti ábrán látható, hogy a kb. 94 mm-es lehajlásból a tehermentesítés után több mint 70 mm maradandó alakváltozás keletkezik, és a tehermentes állapotban aktivált CFRP réteggel együtt is ugyan ahhoz a lehajláshoz jutunk, mint az erősítő réteg nélkül.

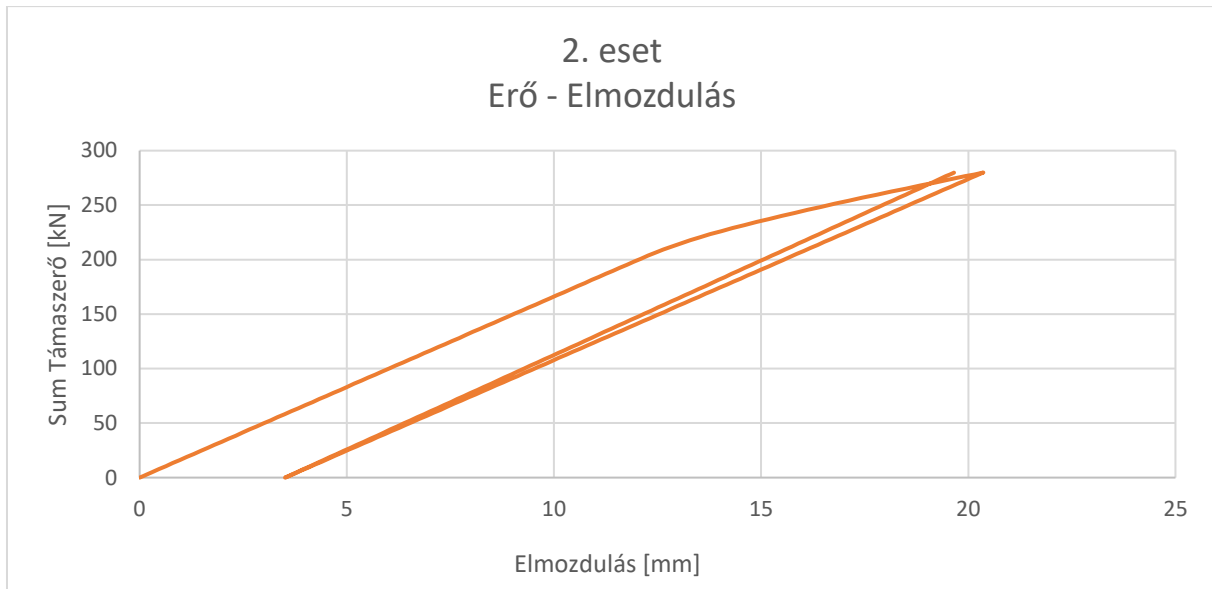


2. eset

Amikor a gerendánkat csak a rugalmas szakaszának a végéig terheljük, és nem hagyjuk, hogy elérje a folyási határát, ezáltal nem alakulnak ki benne maradandó alakváltozások, és nem fog képlékeny szakaszba lépni. Eddig terheljük, tehermentesítés és CFRP aktiválása után pedig szintén ugyan erre a teherintenzitásra terheljük vissza.

Kezdeti teherintenzitás: 28 kN/m

Újraterhelés utáni teherintenzitás: 28 kN/m



47. ábra

2. eset, Erő – Elmozdulás diagram

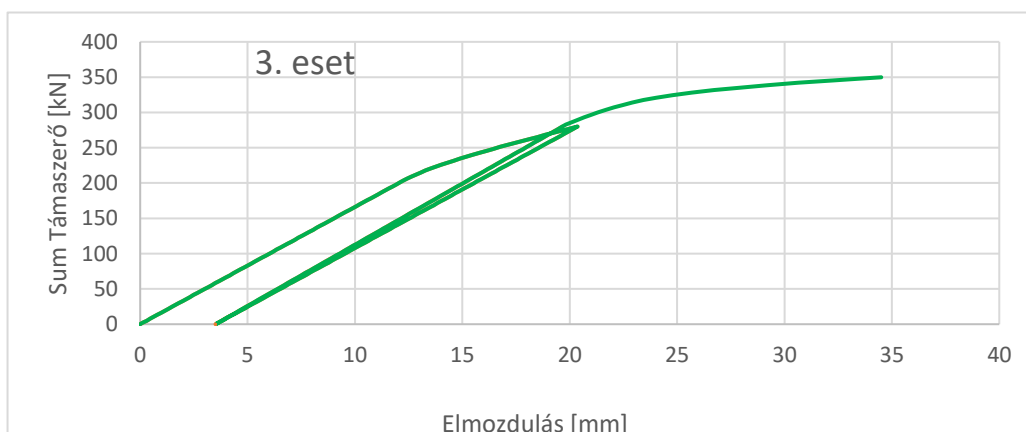
Az tapasztalható, hogy a gerendában hiába voltak kisebb elmozdulások, a kevesebb maradandó alakváltozás, a CFRP réteg alkalmazása után az újraterhelés során majdnem elérjük a megerősítés előtti lehajlást.

3. eset

A gerendát leterheljük a teherbírásnak a 80%-áig, amíg még kordában tarthatóak a lehajlások, majd utána tehermentesítjük. Viszont ezúttal a tehermentesítés után tovább terheljük, és leterheljük a teherbírás 100%-áig

Kezdeti teherintenzitás: 28 kN/m

Újraterhelés utáni teherintenzitás: 35 kN/m



48. ábra

3. eset, Erő – Elmozdulás diagram



4. eset

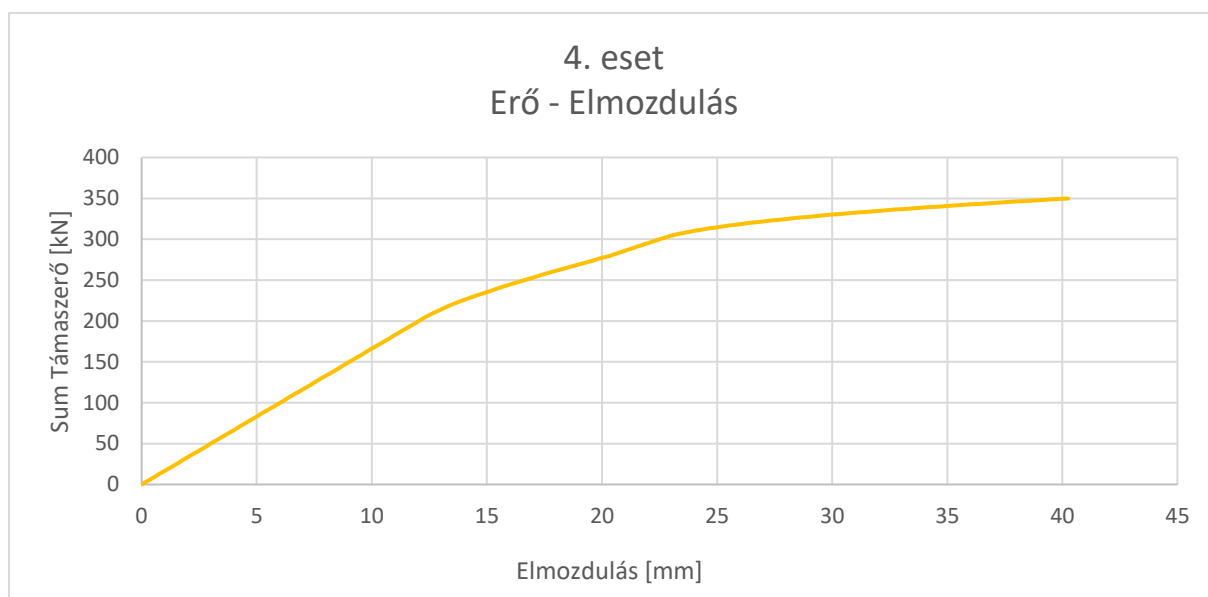
Mi történik, ha úgy szeretnénk alkalmazni a CFRP megerősítést, hogy nincs lehetőségünk tehermentesíteni a szerkezetet?

Erre a kérdésre próbál a jelen analízis eset választ adni.

A gerendát leterheljük 80%-osan, majd felkerül rá a megerősítés, és utána tovább terheljük 100%-ig, ahol eredetileg már a nagy elmozdulások következtek be.

Kezdeti teherintenzitás: 28 kN/m

Végő teherintenzitás: 35 kN/m

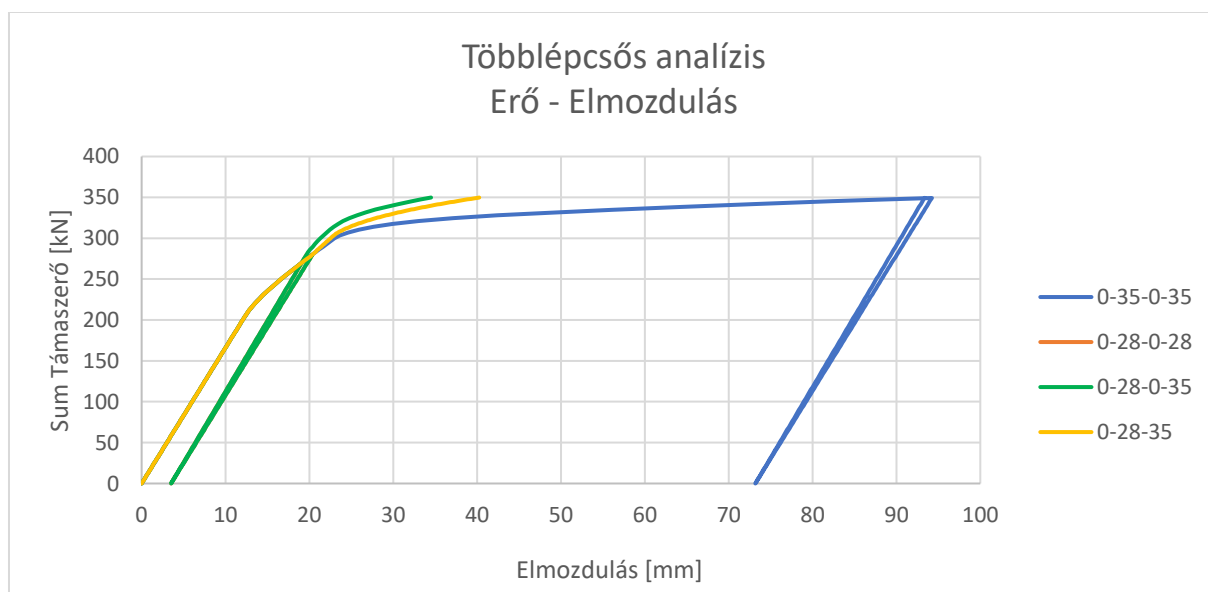


49. ábra

4. eset, Erő – Elmozdulás diagram

Az eredmény sokkal hatékonyabb alkalmazása a CFRP rétegnek, mint mikor a képlékenyedés és a nagy alakváltozások bekövetkezése után használtuk, viszont kedvezőtlenebb, mint amikor a 80%-ról tehermentesítettük.

Összegzés



50. ábra

Többlépcsős analízis összegző diagram



Többlépcsős analízisek összefoglalása				
Kezdeti teherintenzitás [kN/m]	Kezdeti Lehajlás [mm]	Tehermentesítés	Végző teherintenzitás [kN/m]	Végző Lehajlás [mm]
28	20.36	igen	28	19.66
	20.36	igen	35	34.50
	20.36	nem	35	40.25
35	94.24	igen	35	93.35

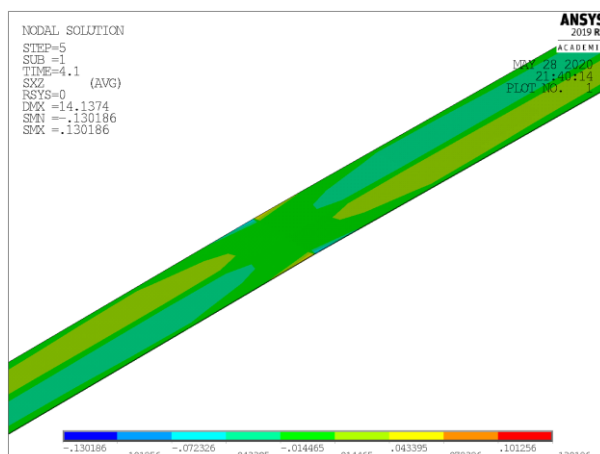
Érdeemes megjegyezni, a kézenfekvő konklúziót, hogy az eredmények között elég nagy szórás tud kialakulni, annak függvényében, hogy hogyan, és milyen feltételek mellett alkalmazzuk a CFRP megerősítéseket.

6.3.4. A nyírófeszültség eloszlása a ragasztórétegben

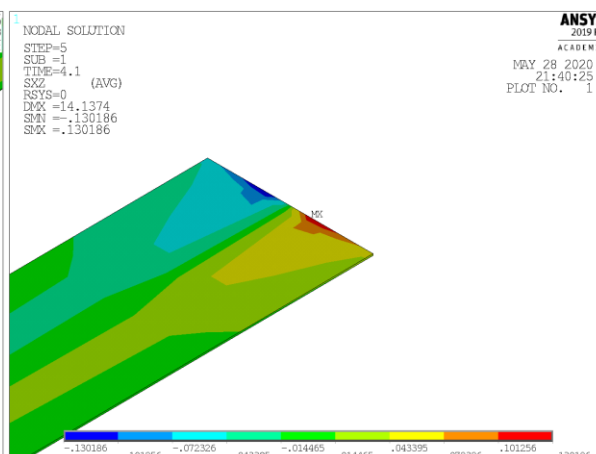
A ragasztórétegben megoszló nyírófeszültséget azért érdemes vizsgálni, mivel ez azt is indikálja, hogy maga a terhelés hol, hogyan, és milyen intenzitással adódik át az acélgerendáról a CFRP rétegbe, hogy hol kezd el az dolgozni, milyen mértékben.

Az időpillanatokra szétszedett modellel nyomon lehet követni folyamatosan a feszültség változását a ragasztórétegben, így informálódva annak a felépüléséről, kialakulásáról.

A nyírófeszültségek eloszlása:



51. ábra
Nyírófeszültségek mezőközépen

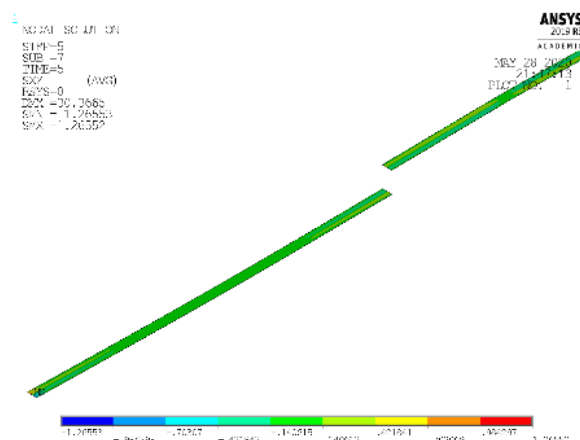


52. ábra
Nyírófeszültségek támasznál



Észrevehető, hogy a teher időbeli változásával -tehát ahogy rákerül a teher teljes intenzitással- nem változik meg a nyírófeszültségek alakulása, csupán az értékük növekszik meg. Az intenzitásból látható, hogy a közbenső támasznál fognak kialakulni egyszerre negatív és pozitív értékek, hiszen ott vált előjelet a nyíróerő ábra.

A tartóvégeken pedig szélső értéke van a feszültségnek a ragasztórétegben, mivel a ragasztónak a node-jai részben meg vannak ott fogva, így ott a közvetlen erőbevezetés miatt anomáliák alakulhatnak ki. Viszont az is látható az ábráról, hogy a mezőközépen, ahol a gerendában nincsenek közvetlen erőbevezetések, és csupán a lehajlásából kerül nyírófeszültség a ragasztórétegbe, ott egyenletes eloszlású, a teljes felületén.



53. ábra
Egyenletes nyírófeszültség eloszlás

7. Konklúzió

Az eredményekből a célkitűzésnek megfelelő eredmények és tanulságok vonhatók le. A szerkezetről kaphattunk egy specifikus helyzetben való viselkedési módszertant, és arról egy fajta megértést, hogy hogyan is viselkedne egy ilyen szerkezet ebben a helyzetben.

A vizsgálat persze ettől még kibővíthető lenne, hogyha vizsgálnánk olyan paramétereket is az eddigieken felül, hogy milyen hatással lehet a ragasztó/CFRP pontosabb anyagmodelljeinek figyelembevétele, a geometriájuknak a változtatása stb.

Egyértelmű tanulságként levonható, hogy abban az esetben, ha a CFRP réteg a teher szerkezetre kerülése előtt kerül fel a gerendára, vagy olyan esetben mikor az acélszerkezetünk az élete során teljes mértékben rugalmasan viselkedett, és tehermentesítéssel el lehet érni az alakváltozás mentes állapotát, számottevően nagy teherbírás növekedést, illetve lehajlás csökkenést lehet elérni.

Az egylépcsős analízis bekezdésben bemutatott példánál beláttuk, hogy ugyan az alatt a teher alatt a lehajlásokat közel **66%-kal** csökkenteni tudjuk a megerősítéssel.

Ha ezt úgy vizsgáljuk, hogy már előterhelt a szerkezetünk, akkor látható, hogy **ha a szerkezetünkbe maradandó alakváltozások kerültek, a CFRP réteg nem hatékony**, és alkalmazásával nem tudunk előhozni további tartalékokat.

Ezek tudatában kijelenthető, hogy a megerősítésnek olyan esetekben van létjogosultsága, mikor az acélgerendánk a folyáshatárán belül van terhelve. Mivel ezekben az esetekben drasztikusan le tudjuk csökkenteni a további terhelések hatására az elmozdulásokat, és növelhetjük a gerendánk teherbírását. Illetve, ha előterhelt állapotban alkalmazzuk, akkor szintén jobb eredményeket érhetünk el, ha azt tehermentesíteni tudjuk. Rugalmas állapotban lévő acélszerkezet esetében, ha tehermentesítjük, nagyságrendekkel jobb eredményeket kaphatunk a CFRP alkalmazása és újra terhelés után.



8. Irodalomjegyzék

- [1] London Energy Transformation Initiative: „Embodied Carbon Primer”, UK, London, 2020
- [2] Global Alliance for Buildings and Construction, International Energy Agency: „Global status report for buildings and construction”, 2019
- [3] The Institution of Structural Engineers: „The Structural Engineer: A Framework for change”, UK, London, 2020 június
- [4] Will Arnold: „The climate emergency, and what the institution is doing about it”, Climate Emergency Conference, IStructE, 2020
- [5] World Economic Forum: „The Net-Zero Challenge: Global Climate Action at a Crossroads (Part 1), online, 2020, Elérhető: <https://www.weforum.org/reports/the-net-zero-challenge-global-climate-action-at-a-crossroads-part-1>
- [6] The Institution of Structural Engineers: „The structural engineer’s responsibility in this climate emergency”, UK, London, 2020 június
- [7] Arup, Ellen MacArthur Foundation: „Realising the value of the circular economy in real estate”, UK, London, 2020
- [8] „Fibre Reinforced Polymer (FRP) in Construction, Types and Uses” Elérhető: <https://theconstructor.org/concrete/fibre-reinforced-polymer/1583/>
- [9] „Strengthening of Concrete Structures Using FRP Composites” Elérhető: <https://www.structuremag.org/?p=8643>
- [10] Richard Berggren, John Lennby: „Upgrading the Structural Capacity of a Steel Frame using Externally Bonded CFRP”, Göteborg, Sweden 2008
- [11] David Schnerch, Mina Dawood, Dr. Sami Rizkalla: „Strengthening Of Steel Concrete Composite Bridges With High Modulus Carbon Fiber Reinforced Polymer (Cfrp) Strips” Raleigh, North Carolina, USA 2007
- [12] Arshad Abosh, Amjad Hussain Mohammed: „A New Method for Controlling the Interfacial Stresses in Beams Strengthened with Prestressed CFRP Laminate” Göteborg, Sweden 2007
- [13] Shanghai Horse Construction Co., Ltd., Structural Strengthening Systems Elérhető: <https://www.horseen.com/prestressed-FRP-System/carbon-fiber-laminate-adhesive>
- [14] ANSYS Meshing Solutions, ANSYS, Inc. Elérhető: <https://www.ansys.com/products/platform/ansys-meshing>



9. Melléklet

- [1] ANSYS modell - Script file kivonat

```

1 /CLEAR,START
2 /prep7
3
4 ! *****
5 ! ANALYSIS TYPES
6 ! *****
7
8 ! 1: Without removing loads - Only the beam
9 ! 2: Without removing loads - ALL of the components
10 ! 3: Load subtracting - 100% - Subtracting the full load before re-loading
11 ! 4: Without Subtracting - Initial 80% utilization, and then adding more load until 100% utilization
12
13 analysistype='1'
14
15 ! *****
16 ! MATERIAL DATA & ELEMENT TYPE DATA
17 ! *****
18
19 MPTEMP,1,0          ! Material model: we use only 1 temperature
20 ET,1,SOLID185      ! Solid element type
21 ET,2,MASS21       ! Mass element type for the rigid middle cross section's constraint
22
23 ! *****
24 ! REAL CONSTANT
25 ! *****
26
27 R,2,0
28
29 ! *****
30 ! GENERAL DATA
31 ! *****
32
33 q=45                ! Distributed load in N/mm
34 q2=35
35 v=5                ! Stiffener plate thickness at constraints in mm
36 l=10000            ! Beam length in mm
37
38 ! *****
39 ! BEAM DATA
40 ! *****
41
42 sectionname='IPE220' ! Cross-section: name
43 h=220              ! Cross-section: full height in mm
44 b=110              ! Cross-section: flange width in mm
45 tw=5.9            ! Cross-section: web thickness in mm
46 tf=9.2            ! Cross-section: flange thickness in mm
47 materialname='steel' ! Cross-Section: CS's Material's name
48 MPDATA,EX,1,,210000 ! Cross-section: Young's modulus in N/mm2
49 MPDATA,PRXY,1,,0.3 ! Cross-section: Poisson's ratio
50 TB,BISO,1,1,2,     ! Bilinear isotropic hardening using von Mises or Hill plasticity
51 TBTEMP,0           ! Steel Material model: we use only 1 temperature

```

```
52 TBDATA,1,235,2100, ! Yield strength in N/mm^2 and post yield stiffness
53
54 ! *****
55 ! ADHESIVE LAYER DATA
56 ! *****
57
58 layername='adhesive' ! Adhesive Layer: Name
59 had=1 ! Adhesive Layer: Full height in mm
60 bad=100 ! Adhesive Layer: Full width in mm
61 materialname='epoxy' ! Adhesive Layer: Layer's material's name
62 MPDATA,EX,2,,7994 ! Adhesive Layer: Young's modulus in N/mm2 (Tensile)
63 MPDATA,PRXY,2,,0.3 ! Adhesive Layer: Poisson's ratio
64
65 ! *****
66 ! LAMINATE LAYER DATA
67 ! *****
68
69 layername='cfrp' ! Laminate Layer: Name
70 hlam=1.2 ! Laminate Layer: Full height in mm
71 blam=100 ! Laminate Layer: Full width in mm
72 materialname='carbonfiber' ! Laminate Layer: Layer's material's name
73 MPDATA,EX,3,,171000 ! Laminate Layer: Young's modulus in N/mm2
74 MPDATA,PRXY,3,,0.3 ! Laminate Layer: Poisson's ratio
75
76 ! *****
77 ! CREATING VOLUMES
78 ! *****
79
80 ! *****VOL1
81 ! IPE220
82 BLOCK,-(b/2),b/2,0,-tf,0,v,
83 BLOCK,-(tw/2),tw/2,-tf,-(h-tf),0,v,
84 BLOCK,-(b/2),b/2,-(h-tf),-h,0,v,
85 ! STIFFENERS
86 BLOCK,tw/2,b/2,-tf,-(h-tf),0,v,
87 BLOCK,-b/2,-tw/2,-tf,-(h-tf),0,v,
88 ! EXTRA LAYERS (BELOW)
89 BLOCK,-(bad/2),(bad/2),-h,-(h+had),0,v
90 BLOCK,-(blam/2),(blam/2),-(h+had),-(h+had+hlam),0,v
91
92 ! *****VOL2
93 ! IPE220
94 BLOCK,-(b/2),b/2,0,-tf,v,3750,
95 BLOCK,-(tw/2),tw/2,-tf,-(h-tf),v,3750,
96 BLOCK,-(b/2),b/2,-(h-tf),-h,v,3750,
97 ! EXTRA LAYERS (BELOW)
98 BLOCK,-(bad/2),(bad/2),-h,-(h+had),v,3750
99 BLOCK,-(blam/2),(blam/2),-(h+had),-(h+had+hlam),v,3750
100
101 ! *****VOL3
102 ! EXTRA LAYERS (ABOVE)
```

```
103 BLOCK,-(bad/2),(bad/2),0,had,3750,(l/2)-(v/2)
104 BLOCK,-(blam/2),(blam/2),had,had+hlam,3750,(l/2)-(v/2)
105 ! IPE220
106 BLOCK,-(b/2),b/2,0,-tf,3750,(l/2)-(v/2),
107 BLOCK,-(tw/2),tw/2,-tf,-(h-tf),3750,(l/2)-(v/2),
108 BLOCK,-(b/2),b/2,-(h-tf),-h,3750,(l/2)-(v/2),
109
110 ! *****VOL4
111 ! EXTRA LAYERS (ABOVE)
112 BLOCK,-(bad/2),(bad/2),0,had,(l/2)-(v/2),l/2,
113 BLOCK,-(blam/2),(blam/2),had,had+hlam,(l/2)-(v/2),l/2,
114 ! IPE 220
115 BLOCK,-(b/2),b/2,0,-tf,(l/2)-(v/2),l/2,
116 BLOCK,-(tw/2),tw/2,-tf,-(h-tf),(l/2)-(v/2),l/2,
117 BLOCK,-(b/2),b/2,-(h-tf),-h,(l/2)-(v/2),l/2,
118 ! STIFFENERS
119 BLOCK,tw/2,b/2,-tf,-(h-tf),(l/2)-(v/2),l/2,
120 BLOCK,-b/2,-tw/2,-tf,-(h-tf),(l/2)-(v/2),l/2,
121
122 ! *****VOL5
123 ! EXTRA LAYERS (ABOVE)
124 BLOCK,-(bad/2),(bad/2),0,had,l/2,(l/2)+(v/2),
125 BLOCK,-(blam/2),(blam/2),had,had+hlam,l/2,(l/2)+(v/2),
126 ! IPE 220
127 BLOCK,-(b/2),b/2,0,-tf,l/2,(l/2)+(v/2),
128 BLOCK,-(tw/2),tw/2,-tf,-(h-tf),l/2,(l/2)+(v/2),
129 BLOCK,-(b/2),b/2,-(h-tf),-h,l/2,(l/2)+(v/2),
130 ! STIFFENERS
131 BLOCK,tw/2,b/2,-tf,-(h-tf),l/2,(l/2)+(v/2),
132 BLOCK,-b/2,-tw/2,-tf,-(h-tf),l/2,(l/2)+(v/2),
133
134 ! *****VOL6
135 ! EXTRA LAYERS (ABOVE)
136 BLOCK,-(bad/2),(bad/2),0,had,(l/2)+(v/2),6250,
137 BLOCK,-(blam/2),(blam/2),had,had+hlam,(l/2)+(v/2),6250,
138 ! IPE 220
139 BLOCK,-(b/2),b/2,0,-tf,(l/2)+(v/2),6250,
140 BLOCK,-(tw/2),tw/2,-tf,-(h-tf),(l/2)+(v/2),6250,
141 BLOCK,-(b/2),b/2,-(h-tf),-h,(l/2)+(v/2),6250,
142
143 ! *****VOL7
144 ! IPE 220
145 BLOCK,-(b/2),b/2,0,-tf,6250,l-v,
146 BLOCK,-(tw/2),tw/2,-tf,-(h-tf),6250,l-v,
147 BLOCK,-(b/2),b/2,-(h-tf),-h,6250,l-v,
148 ! EXTRA LAYERS (BELOW)
149 BLOCK,-(bad/2),(bad/2),-h,-(h+had),6250,l-v
150 BLOCK,-(blam/2),(blam/2),-(h+had),-(h+had+hlam),6250,l-v
151
152 ! *****VOL8
153 ! IPE220
```

```

154 BLOCK,-(b/2),b/2,0,-tf,l-v,l,
155 BLOCK,-(tw/2),tw/2,-tf,-(h-tf),l-v,l,
156 BLOCK,-(b/2),b/2,-(h-tf),-h,l-v,l,
157 ! STIFFENERS
158 BLOCK,tw/2,b/2,-tf,-(h-tf),l-v,l,
159 BLOCK,-b/2,-tw/2,-tf,-(h-tf),l-v,l,
160 ! EXTRA LAYERS (BELOW)
161 BLOCK,-(bad/2),(bad/2),-h,-(h+had),l-v,l,
162 BLOCK,-(blam/2),(blam/2),-(h+had),-(h+had+hlam),l-v,l,
163
164 ! *****
165 ! CUTTING VOLUMES WITH THE WORKING PLANE
166 ! *****
167
168 ALLSEL,ALL
169 WPOFF,-blam/2,0,0
170 WPROT,-90,-90,,
171 ALLSEL,ALL
172 VSBW,ALL,,DELETE
173
174 WPOFF,0,0,(blam/2)-(tw/2)
175 ALLSEL,ALL
176 VSBW,ALL,,DELETE
177
178 WPOFF,0,0,tw
179 ALLSEL,ALL
180 VSBW,ALL,,DELETE
181
182 WPOFF,0,0,(blam/2)-(tw/2)
183 ALLSEL,ALL
184 VSBW,ALL,,DELETE
185
186 NUMCMP,VOLU
187 ALLSEL,ALL
188 NUMMRG,KP,,,,LOW
189
190 ! *****
191 ! COMPONENTS & MATERIAL MODELS
192 ! *****
193
194 ! STEEL - component creating and material adjustment
195
196 VSEL,S,LOC,Y,-h,0,,0      ! Selecting the areas of the beam
197 CM,STEEL,VOLU             ! Creating a component from them with the name 'BEAM'
198 AISEL,ALL                 ! Selecting back everything
199 CMSEL,S,STEEL             ! Selecting the beam component
200 VATT,1,,1                 ! Setting material and element type
201 CMSEL,S,STEEL             ! Re-Selecting the steel component
202 /COLOR,CM,4,STEEL        ! Adjusting the color for the component in the model
203
204 ! ADHESIVE - component creating and material adjustment

```



```
205
206 VSEL,S,LOC,Y,0,had,,0
207 VSEL,A,LOC,Y,-h,-(h+had),,0
208 CM,ADHESIVE,VOLU
209 AISEL,ALL
210 CMSEL,S,ADHESIVE
211 VATT,2,,1,
212 CMSEL,S,ADHESIVE
213 /COLOR,CM,9,ADHESIVE
214
215 ! LAMINATE - component creating and material adjustment
216
217 VSEL,S,LOC,Y,had,had+hlam,,0
218 VSEL,A,LOC,Y,-(h+had),-(h+had+hlam),,0
219 CM,LAMINATE,VOLU
220 CMSEL,S,LAMINATE
221 VATT,3,,1,
222 CMSEL,S,LAMINATE
223 /COLOR,CM,11,LAMINATE
224
225 ! *****
226 ! MESHING
227 ! *****
228
229 ! Setting the length of the lines in 2 directions
230
231 LSEL,U,TAN1,Z,-0.99,0.99
232 LESIZE,ALL,100
233 LSEL,INVE
234 LESIZE,ALL,10
235 ALLSEL,ALL
236 ESIZE,20
237 ALLSEL,ALL
238
239 ! Meshing the STEEL components
240
241 CMSEL,S,STEEL
242 TYPE,1
243 MAT,1
244 REAL,2
245 MSHAPE,0,3D
246 MSHKEY,1
247 VMESH,ALL
248
249 ! Meshing the adhesive layer
250
251 CMSEL,S,ADHESIVE
252 TYPE,1
253 MAT,2
254 REAL,2
255 MSHAPE,0,3D
```

```

256 MSHKEY,1
257 VMESH,ALL
258
259 ! Meshing the laminate layer
260
261 CMSEL,S,LAMINATE
262 TYPE,1
263 MAT,3
264 REAL,2
265 MSHAPE,0,3D
266 MSHKEY,1
267 VMESH,ALL
268
269 ! *****
270 ! CONSTRAINTS
271 ! *****
272
273 ! The FIRST cross-section of the beam
274
275 NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
276 NSEL,R,LOC,Z,0-0.1,0+0.1
277 D,ALL,UX
278 D,ALL,UY
279 ALLSEL,ALL
280
281 ! The MIDDLE cross-section of the beam
282
283 *GET,maxnode,NODE,0,NUM,MAXD      ! Get the maximum node number
284
285     N,maxnode+1,0,-h,l/2      ! Create a node in the gravity center of the middle cross-section
286     NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1      ! Selecting the nodes in the cross-section of the steel beam
287     NSEL,R,LOC,Z,(l/2-v),(l/2+v) ! Reselecting the nodes at the middle cross section
288     CERIG,maxnode+1,ALL,ALL      ! Apply rigid cross section where the maxnode+1 node is the master
node
289     ALLSEL,ALL      ! Select everything back
290     REAL,2      ! Set the default real constant
291     TYPE,2      ! Set the default element type
292     E,maxnode+1      ! Creat the zero mass element a maxnode+1
293     D,maxnode+1,UY      ! Apply constraint on node at location NODE(x,y,z)
294     D,maxnode+1,UX      ! Apply constraint on node at location NODE(x,y,z)
295     D,maxnode+1,UZ      ! Apply constraint on node at location NODE(x,y,z)
296
297 ! the LAST cross-section of the beam
298
299 NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
300 NSEL,R,LOC,Z,l-0.1,l+0.1
301 D,ALL,UX
302 D,ALL,UY
303 ALLSEL,ALL
304
305 ! Lateral constraints against buckling

```

```

306
307 NSEL,S,LOC,X,-b/2-0.1,-b/2+0.1
308 NSEL,R,LOC,Y,0-0.1,0+0.1
309 D,ALL,UX
310 ALLSEL,ALL
311
312 ! *****
313 ! ANALYSIS
314 ! *****
315
316 *IF,analysistype,EQ,'1',THEN
317
318     !1: Without removing loads - Only the beam
319
320     /SOLU             ! Step into the solution
321     SOLCONTROL,on,,,
322     ANTYPE,0         ! Analysis type: Static
323     NLGEOM,1         ! Enabling large displacements
324     DELTIM,0.005,0.001,0.01,
325     NEQIT,200
326     OUTRES,ALL,ALL
327
328     NROPT, FULL
329     EKILL, ADHESIVE     ! Deactivating the adhesive layer
330     EKILL, LAMINATE     ! Deactivating the laminate layer
331
332     ESEL,S,CENT,Y,0-tf/2-0.1,0-tf/2+0.1     ! Select the elements at the top flange
333     ESEL,R,CENT,X,0-0.1,0+0.1             ! Reselect the elements at top of the web
334     SFE,ALL,2,PRES,,q/tw                 ! Apply pressure load
335     ALLSEL,ALL                           ! Select everything back
336
337     ANTYPE,0         ! Static analysis
338     TIME,1
339     SOLVE            ! Solve
340     FINISH           ! Step out from the solution
341
342     /post1
343
344     *get,step_num,active,0,set,nset
345
346     FINISH
347
348     /POST26
349     csys,0
350     ALLSEL,ALL
351     ANSOL,3,NODE(b/2,0,l/2),S,Z,STRESS,1
352     NSOL,4,NODE(0,-h,l/4),U,Y,ELMOZD,1
353     ANSOL,5,NODE(b/2,0,l/2),EPEL,Z,EL_STRAIN,1
354     ANSOL,6,NODE(b/2,0,l/2),EPPL,Z,PL_STRAIN,1
355     ALLSEL,ALL
356

```

```
357     !Selecting the constraints of the beam
358
359     !The FIRST cross-section's constraint of the beam
360     NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
361     NSEL,R,LOC,Z,0-0.1,0+0.1
362     CM,FIRST,NODE
363
364     !The MIDDLE cross-section's constraint of the beam
365     NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
366     NSEL,R,LOC,Z,l/2-0.1,l/2+0.1
367     CM,MIDDLE,NODE
368
369     !The LAST cross-section's constraint of the beam
370     NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
371     NSEL,R,LOC,Z,l-0.1,l+0.1
372     CM,LAST,NODE
373
374     CMSEL,S,FIRST
375     CMSEL,A,MIDDLE
376     CMSEL,A,LAST
377     NPLOT
378
379     *GET,CONSTRAINTS,NODE,0,COUNT,
380     *DIM,REAK,ARRAY,CONSTRAINTS,1
381
382     *VGET,REAK(1,1),NODE,0,NLIST
383
384     !Summarizing the reaction forces
385     RFORCE,9,REAK(1),F,Y
386     ADD,7,9,,,EREDOFEL,,,1,1,1
387
388     *DO,RR,2,CONSTRAINTS,1
389         RFORCE,9,REAK(RR),F,Y
390         ADD,8,7,9,,,,,1,1,1
391         VARDEL,7
392         ADD,7,8,,,EREDOFEL,,,1,1,1
393         VARDEL,8
394         VARDEL,9
395     *ENDDO
396
397     !Writing the result file
398     PROD,2,7,,,ERO,,,,,1,1,1,
399
400     *CREATE,scratch,gui
401     *DEL,AN1_EXPORT
402     *DIM,AN1_EXPORT,TABLE,step_num,5
403     VGET,AN1_EXPORT(1,0),1
404     VGET,AN1_EXPORT(1,1),2
405     VGET,AN1_EXPORT(1,2),3
406     VGET,AN1_EXPORT(1,3),4
407     VGET,AN1_EXPORT(1,4),5
```

```

408     VGET,AN1_EXPORT(1,5),6
409     /OUTPUT,'AN1_RESULTS','TXT','!'
410     *VWRITE,'Time
step:',AN1_EXPORT(1,0),'Force:',AN1_EXPORT(1,1),'Stress:',AN1_EXPORT(1,2),'Displacements:',AN1_E
EXPORT(1,3),'Elastic strain:',AN1_EXPORT(1,4),'Plastic strain:',AN1_EXPORT(1,5)
411     %C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,
412     /OUTPUT,TERM
413     *END
414     /INPUT,scratch,gui
415     FINISH
416
417 *ELSEIF,analysistype,EQ,'2',THEN
418
419     !2: Without removing loads - ALL of the components
420
421     /SOLU                ! Step into the solution
422     SOLCONTROL,on,,,
423     ANTYPE,0            ! Analysis type: Static
424     NLGEOM,1           ! Enabling large displacements
425     DELTIM,0.005,0.001,0.01,
426     NEQIT,200
427     OUTRES,ALL,ALL
428
429     ESEL,S,CENT,Y,0-tf/2-0.1,0-tf/2+0.1      ! Select the elements at the top flange
430     ESEL,R,CENT,X,0-0.1,0+0.1                ! Reselect the elements at top of the web
431     SFE,ALL,2,PRES,,q/tw                     ! Apply pressure load
432     ALLSEL,ALL                               ! Select everything back
433
434     ANTYPE,0            ! Static analysis
435     TIME,1
436     SOLVE              ! Solve
437     FINISH            ! Step out from the solution
438
439     /post1
440
441     *get,step_num,active,0,set,nset
442
443     FINISH
444
445     /POST26
446     csys,0
447     ALLSEL,ALL
448     ANSOL,3,NODE(b/2,0,l/2),S,Z,BEAMSTRESS,1
449     ANSOL,10,13910,S,Z,LAMSTRESS,3
450     NSOL,4,NODE(0,-h,l/4),U,Y,ELMOZD,1
451     ANSOL,5,NODE(b/2,0,l/2),EPEL,Z,EL_STRAIN,1
452     ANSOL,6,NODE(b/2,0,l/2),EPPL,Z,PL_STRAIN,1
453     ALLSEL,ALL
454
455     !Selecting the constraints of the beam
456

```

```
457 !The FIRST cross-section's constraint of the beam
458 NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
459 NSEL,R,LOC,Z,0-0.1,0+0.1
460 CM,FIRST,NODE
461
462 !The MIDDLE cross-section's constraint of the beam
463 NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
464 NSEL,R,LOC,Z,l/2-0.1,l/2+0.1
465 CM,MIDDLE,NODE
466
467 !The LAST cross-section's constraint of the beam
468 NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
469 NSEL,R,LOC,Z,l-0.1,l+0.1
470 CM,LAST,NODE
471
472 CMSEL,S,FIRST
473 CMSEL,A,MIDDLE
474 CMSEL,A,LAST
475 NPLOT
476
477 *GET,CONSTRAINTS,NODE,0,COUNT,
478 *DIM,REAK,ARRAY,CONSTRAINTS,1
479
480 *VGET,REAK(1,1),NODE,0,NLIST
481
482 !Summarizing the reaction forces
483 RFORCE,9,REAK(1),F,Y
484 ADD,7,9,,,EREDOFEL,,,1,1,1
485
486 *DO,RR,2,CONSTRAINTS,1
487   RFORCE,9,REAK(RR),F,Y
488   ADD,8,7,9,,,,1,1,1
489   VARDEL,7
490   ADD,7,8,,,EREDOFEL,,,1,1,1
491   VARDEL,8
492   VARDEL,9
493 *ENDDO
494
495 !Writing the result file
496 PROD,2,7,,,ERO,,,1,1,1,
497
498
499 *CREATE,scratch,gui
500 *DEL,AN2_EXPORT
501 *DIM,AN2_EXPORT,TABLE,step_num,6
502 VGET,AN2_EXPORT(1,0),1
503 VGET,AN2_EXPORT(1,1),2
504 VGET,AN2_EXPORT(1,2),3
505 VGET,AN2_EXPORT(1,3),4
506 VGET,AN2_EXPORT(1,4),5
507 VGET,AN2_EXPORT(1,5),6
```

```

508   VGET,AN2_EXPORT(1,6),10
509   /OUTPUT,'AN2_RESULTS','TXT','!'
510   *VWRITE,'Time
step:',AN2_EXPORT(1,0),'Force:',AN2_EXPORT(1,1),'Stress:(BEAM)',AN2_EXPORT(1,2),'Displacements:'
,AN2_EXPORT(1,3),'Elastic strain:',AN2_EXPORT(1,4),'Plastic
strain:',AN2_EXPORT(1,5),'Stress(CFRP):',AN2_EXPORT(1,6)
511   %C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,
512   /OUTPUT,TERM
513   *END
514   /INPUT,scratch,gui
515   FINISH
516
517 *ELSEIF,analysistype,EQ,'3',THEN
518
519   !3: Load subtracting - 100% - Subtracting the full load before re-loading
520
521   /SOLU           ! Step into the solution
522   !1. Timestep - Removing the laminate layers
523   SOLCONTROL,on,,,
524   ANTYPE,0       ! Analysis type: Static
525   NLGEOM,1       ! Enabling large displacements
526   DELTIM,0.005,0.001,0.01,
527   NEQIT,200
528   OUTRES,ALL,ALL
529
530   NROPT, FULL
531   EKILL, ADHESIVE ! Deactivating the adhesive layer
532   EKILL, LAMINATE
533
534   ALLSEL,ALL
535   TIME,1
536   SOLVE
537
538   !2. Timestep - Applying the load
539   ESEL,S,CENT,Y,0-tf/2-0.1,0-tf/2+0.1 ! Select the elements at the top flange
540   ESEL,R,CENT,X,0-0.1,0+0.1 ! Reselect the elements at top of the web
541   SFE,ALL,2,PRES,,q/tw ! Apply pressure load
542
543   ALLSEL,ALL
544   TIME,2
545   SOLVE
546
547   !3. Timestep - Subtracting the loads
548   ALLSEL,ALL
549   SFCUM,PRES,ADD
550   ESEL,S,CENT,Y,0-tf/2-0.1,0-tf/2+0.1 ! Select the elements at the top flange
551   ESEL,R,CENT,X,0-0.1,0+0.1 ! Reselect the elements at top of the web
552   SFE,ALL,2,PRES,,-(q/tw) ! Subtract the pressure load ! Select
everything back
553
554   ALLSEL,ALL

```

```

555     TIME,3
556     SOLVE
557
558     !4. Timestep - Activating the laminate layers
559     ALLSEL, ALL
560     EALIVE, ADHESIVE
561     EALIVE, LAMINATE
562
563     ALLSEL,ALL
564     TIME,4
565     SOLVE
566
567     !5. Timestep - Applying the loads again
568     SFCUM,PRES,ADD
569     ESEL,S,CENT,Y,0-tf/2-0.1,0-tf/2+0.1           ! Select the elements at the top flange
570     ESEL,R,CENT,X,0-0.1,0+0.1                   ! Reselect the elements at top of the web
571     SFE,ALL,2,PRES,,q2/tw                       ! Apply pressure load
572
573     ALLSEL,ALL
574     TIME,5
575     SOLVE
576
577     FINISH                                     ! Step out from the solution
578
579     /post1
580
581     *get,step_num,active,0,set,nset
582
583     FINISH
584
585     /POST26
586     csys,0
587     ALLSEL,ALL
588     ANSOL,3,NODE(b/2,0,l/2),S,Z,BEAMSTRESS,1
589     ANSOL,10,13910,S,Z,LAMSTRESS,3
590     NSOL,4,NODE(0,-h,l/4),U,Y,ELMOZD,1
591     ANSOL,5,NODE(b/2,0,l/2),EPEL,Z,EL_STRAIN,1
592     ANSOL,6,NODE(b/2,0,l/2),EPPL,Z,PL_STRAIN,1
593     ALLSEL,ALL
594
595     !Selecting the constraints of the beam
596
597     !The FIRST cross-section's constraint of the beam
598     NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
599     NSEL,R,LOC,Z,0-0.1,0+0.1
600     CM,FIRST,NODE
601
602     !The MIDDLE cross-section's constraint of the beam
603     NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
604     NSEL,R,LOC,Z,l/2-0.1,l/2+0.1
605     CM,MIDDLE,NODE

```



```

506
507 !The LAST cross-section's constraint of the beam
508 NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
509 NSEL,R,LOC,Z,I-0.1,I+0.1
510 CM,LAST,NODE
511
512 CMSEL,S,FIRST
513 CMSEL,A,MIDDLE
514 CMSEL,A,LAST
515 NPLOT
516
517 *GET,CONSTRAINTS,NODE,0,COUNT,
518 *DIM,REAK,ARRAY,CONSTRAINTS,1
519
520 *VGET,REAK(1,1),NODE,0,NLIST
521
522 !Summarizing the reaction forces
523 RFORCE,9,REAK(1),F,Y
524 ADD,7,9,,,EREDOFEL,,,1,1,1
525
526 *DO,RR,2,CONSTRAINTS,1
527   RFORCE,9,REAK(RR),F,Y
528   ADD,8,7,9,,,,,1,1,1
529   VARDEL,7
530   ADD,7,8,,,EREDOFEL,,,1,1,1
531   VARDEL,8
532   VARDEL,9
533 *ENDDO
534
535 !Writing the result file
536 PROD,2,7,, ,ERO,, ,1,1,1,
537
538 *CREATE,scratch,gui
539 *DEL,AN3_EXPORT
540 *DIM,AN3_EXPORT,TABLE,step_num,6
541 VGET,AN3_EXPORT(1,0),1
542 VGET,AN3_EXPORT(1,1),2
543 VGET,AN3_EXPORT(1,2),3
544 VGET,AN3_EXPORT(1,3),4
545 VGET,AN3_EXPORT(1,4),5
546 VGET,AN3_EXPORT(1,5),6
547 VGET,AN3_EXPORT(1,6),10
548 /OUTPUT,'AN3_RESULTS_28-0-35','TXT','!'
549 *VWRITE,'Time
step:',AN3_EXPORT(1,0),'Force:',AN3_EXPORT(1,1),'Stress:(BEAM)',AN3_EXPORT(1,2),'Displacements:'
,AN3_EXPORT(1,3),'Elastic strain:',AN3_EXPORT(1,4),'Plastic
strain:',AN3_EXPORT(1,5),'Stress(CFRP):',AN3_EXPORT(1,6)
550   %C, %G, %C, %G, %C, %G, %C, %G, %C, %G, %C, %G, %C, %G, %C, %G,
551 /OUTPUT,TERM
552 *END
553 /INPUT,scratch,gui

```

```

554     FINISH
555
556
557
558 *ELSEIF,analysistype,EQ,'4',THEN
559
560     !4: Without Substracting - Initial 80% utilization, and than adding more load until 100% utilization
561
562     /SOLU                ! Step into the solution
563     !1. Timestep - Removing the laminate layers
564     SOLCONTROL,on,,,
565     ANTYPE,0            ! Analysis type: Static
566     NLGEOM,1           ! Enabling large displacements
567     DELTIM,0.005,0.001,0.01,
568     NEQIT,200
569     OUTRES,ALL,ALL
570
571     NROPT, FULL
572     EKILL, ADHESIVE      ! Deactivating the adhesive layer
573     EKILL, LAMINATE
574
575     ALLSEL,ALL
576     TIME,1
577     SOLVE
578
579     !2. Timestep - Applying the loads
580     ESEL,S,CENT,Y,0-tf/2-0.1,0-tf/2+0.1      ! Select the elements at the top flange
581     ESEL,R,CENT,X,0-0.1,0+0.1                ! Reselect the elements at top of the web
582     SFE,ALL,2,PRES,,q/tw                     ! Apply pressure load
583
584     ALLSEL,ALL
585     TIME,2
586     SOLVE
587
588     !3. Timestep - Activating the laminate layers
589     ALLSEL, ALL
590     EALIVE, ADHESIVE
591     EALIVE, LAMINATE
592
593     ALLSEL,ALL
594     TIME,3
595     SOLVE
596
597     !4. Timestep - Increasing the load to 100% utilization
598     SFCUM,PRES,ADD
599     ESEL,S,CENT,Y,0-tf/2-0.1,0-tf/2+0.1      ! Select the elements at the top flange
700     ESEL,R,CENT,X,0-0.1,0+0.1                ! Reselect the elements at top of the web
701     SFE,ALL,2,PRES,,(q2/tw)-(q/tw)           ! Apply pressure load
702
703     ALLSEL,ALL
704     TIME,4

```

```
705 SOLVE
706
707 FINISH ! Step out from the solution
708
709 /post1
710
711 *get,step_num,active,0,set,nset
712
713 FINISH
714
715 /POST26
716 csys,0
717 ALLSEL,ALL
718 ANSOL,3,NODE(b/2,0,l/2),S,Z,BEAMSTRESS,1
719 ANSOL,10,13910,S,Z,LAMSTRESS,3
720 NSOL,4,NODE(0,-h,l/4),U,Y,ELMOZD,1
721 ANSOL,5,NODE(b/2,0,l/2),EPEL,Z,EL_STRAIN,1
722 ANSOL,6,NODE(b/2,0,l/2),EPPL,Z,PL_STRAIN,1
723 ALLSEL,ALL
724
725 !Selecting the constraints of the beam
726
727 !The FIRST cross-section's constraint of the beam
728 NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
729 NSEL,R,LOC,Z,0-0.1,0+0.1
730 CM,FIRST,NODE
731
732 !The MIDDLE cross-section's constraint of the beam
733 NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
734 NSEL,R,LOC,Z,l/2-0.1,l/2+0.1
735 CM,MIDDLE,NODE
736
737 !The LAST cross-section's constraint of the beam
738 NSEL,S,LOC,Y,-h-0.1,-h+0.1
739 NSEL,R,LOC,Z,l-0.1,l+0.1
740 CM,LAST,NODE
741
742 CMSEL,S,FIRST
743 CMSEL,A,MIDDLE
744 CMSEL,A,LAST
745 NPLOT
746
747 *GET,CONSTRAINTS,NODE,0,COUNT,
748 *DIM,REAK,ARRAY,CONSTRAINTS,1
749
750 *VGET,REAK(1,1),NODE,0,NLIST
751
752 !Summarizing the reaction forces
753 RFORCE,9,REAK(1),F,Y
754 ADD,7,9,,,EREDOFEL,,,1,1,1
755
```

```
756 *DO,RR,2,CONSTRAINTS,1
757 RFORCE,9,REAK(RR),F,Y
758 ADD,8,7,9,,,,,1,1,1
759 VARDEL,7
760 ADD,7,8,,,EREDOFEL,,,,1,1,1
761 VARDEL,8
762 VARDEL,9
763 *ENDDO
764
765 !Writing the result file
766 PROD,2,7,,,ERO,,,,1,1,1,
767
768 *CREATE,scratch,gui
769 *DEL,AN4_EXPORT
770 *DIM,AN4_EXPORT,TABLE,step_num,6
771 VGET,AN4_EXPORT(1,0),1
772 VGET,AN4_EXPORT(1,1),2
773 VGET,AN4_EXPORT(1,2),3
774 VGET,AN4_EXPORT(1,3),4
775 VGET,AN4_EXPORT(1,4),5
776 VGET,AN4_EXPORT(1,5),6
777 VGET,AN4_EXPORT(1,6),10
778 /OUTPUT,'AN4_RESULTS_28-35','TXT','!'
779 *VWRITE,'Time
step:',AN4_EXPORT(1,0),'Force:',AN4_EXPORT(1,1),'Stress:(BEAM)',AN4_EXPORT(1,2),'Displacements:'
,AN4_EXPORT(1,3),'Elastic strain:',AN4_EXPORT(1,4),'Plastic
strain:',AN4_EXPORT(1,5),'Stress(CFRP):',AN4_EXPORT(1,6)
780 %C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,%C,%G,
781 /OUTPUT,TERM
782 *END
783 /INPUT,scratch,gui
784 FINISH
785
786 *ENDIF
```