

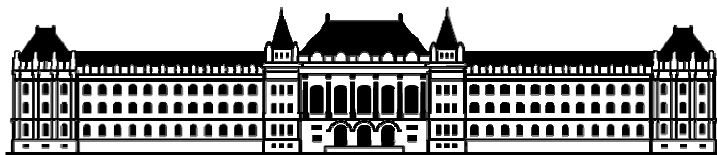


M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

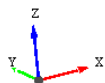
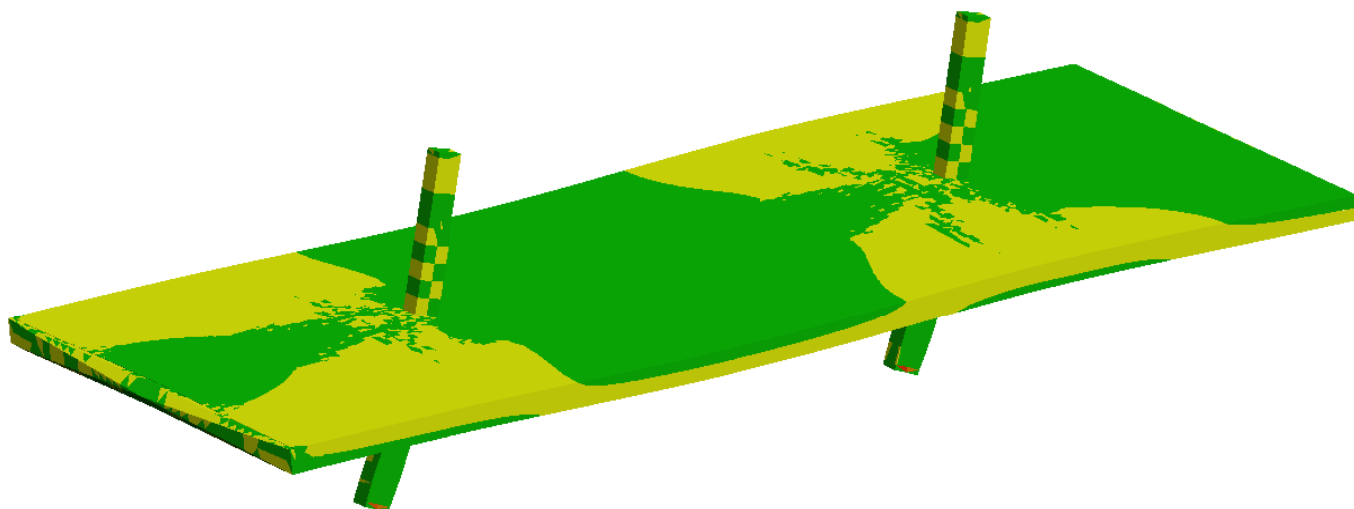
**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszék**

**Tudományi Diákköri Konferencia
2017**

**Bodó Pál Boldizsár
Építőmérnök Hallgató (B.Sc.)**



Pontonként alátámasztott monolit vasbeton síklemez végeelemes vizsgálata vízszintes teherre



Készítette: Bodó Pál Boldizsár
KLJN22

Konzulens: Dr. Haris István
BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

Tartalom

1. Előszó	5. old
2. Bevezetés	6. old
2.1 Magas épületek világviszonylatban	6. old
2.2 Magas épületek a mindennapokban	8. old
2.3 Vasbeton magas épületek szerkezeti rendszerei	10. old
2.4 Pontonként alátámasztott vasbeton síklemezes födémek	12. old
2.5 Síklemezes födémek számítási módszerei	13. old
2.6 Rugalmas - képlékeny anyagi viselkedés.....	15. old
2.7 A végeelemes módszer	17. old
2.8 Probléma felvetése	18. old
3. A vizsgált szerkezet.....	19. old
3.1 Célkitűzés	19. old
3.2 A szerkezet ismertetése	20. old
3.3 Az ATENA szoftver ismertetése.....	22. old
4. A numerikus modell	23. old
4.1 Anyagmodellek definiálása	23. old
4.2 Végeelem háló	25. old
4.3 Megtámasztások és terhek.....	28. old
5. A numerikus vizsgálatok eredményei	32. old
5.1 6x6-os raszter kiosztás	33. old
5.2 7x5-es raszter kiosztás.....	36. old

5.3 5x7-ös raszter kiosztás	38. old
5.4 8x4-as raszter kiosztás.....	41. old
5.5 4x8-as raszter kiosztás.....	42. old
5.6 Összegzett grafikon értelmezése és értékelése.....	44. old
6. Összefoglalás.....	46. old
7. További lehetőségek a témában	47. old
8. Felhasznált irodalom	48. old
8.1 Nyomtatott források	48. old
8.2 Elektronikus források	49. old
9. Mellékletek	50. old
9.1 I. melléklet: Rugóerő meghatározása.....	50. old
9.2 II. melléklet: Vasbeton lemez vasalása	52. old
9.3 III. melléklet: Összefoglaló táblázat	54. old
9.4 IV. melléklet: Nagy grafikon	55. old

1. Előszó

Egy gyakorló szerkezettervező életében mindennapos dolog a vasbeton használata, mint építőanyag. A komplex szerkezeti és anyagi viselkedést a szabványok és a tervezői gyakorlat is igyekszik oly módon leegyszerűsíteni, hogy az alkalmazható legyen a hétköznapi használathoz. Napjainkban a tervezett létesítményeink szerkezeti viselkedésének vizsgálata numerikus modelleken történik. Szükséges megtalálni az egyensúlyt a között, hogy a modellünk megfelelően egyszerű legyen, de a számított értékek jól közelítsék a szerkezeteink valós viselkedését. Amennyiben ez kellőképp nem valósul meg, az a szerkezetünk jobb esetben túl, rosszabb esetben alulméretezéséhez vezethet. A dolgozatom megírásával a céloom, hogy ezen bonyolult feladaton valamelyest egyszerűsítsek és optimális modellezési módszert keressek a monolit síklemezek egyidejű vertikális és horizontális hatásokra történő méretezéséhez.

A dolgozatomban vasbetonnal és az ebből készült szerkezetekkel foglalkozom. A hangsúlyt főként a vasbetonszerkezetek tartószerkezeti tervezésére és modellezésére fogom helyezni. Ezen témakörön belül a változó kialakítással készülő monolit vasbeton síklemezek nemlineáris, végeelemes vizsgálatát végzem el. A modellem elkészítése során egy fiktív többszintes épület közbenső födémrészletét fogom vizsgálni a függőleges terheken túl vízszintes hatásokat is figyelembe véve. A tanulmányom Roszevák Zsolt korábbi munkáira épül, mely dolgozatok azon célból jöttek létre, hogy segítséget adjanak a numerikus modelljeink helyes megalkotásához és részletesebb vizsgálatához.

Első lépésként jellemezni fogom a magasépületeket, azok szükségességét, valamint a napjainkban alkalmazott leggyakoribb megoldásokat. Részletesebben foglalkozom a vasbetonból készülő szerkezetekkel, főként a monolit kivitelű síklemezes födémekkel, azok kialakításával és számítási módszereivel. Bemutatom a végeelemes módszer alapvető tudnivalóit, illetve összevetem a lineáris és nemlineáris anyagi viselkedések között fellépő különbségeket.

Ezek alapján felvázolom az általam vizsgált szerkezetet, a fennálló problémát, valamint hogy milyen módon próbálok arra megoldást találni. Bemutatom az általam készített numerikus modelleket, kitérek a geometriai kialakításra, az anyagi modellek megválasztására és az analízis lépéseire. A numerikus modelleket az ATENA termékcsalád segítségével vizsgálom.

A analízist követően bemutatom a kapott eredményeket. Grafikonon és táblázatok formájában közlöm hogyan alakul a modellezett szerkezet oszlopsávjaiban az együttdolgozó lemezszélesség. Összegzem a kapott eredményeket és összevetem őket a csak vízszintes teherre igénybevett szerkezeti viselkedéssel.

Végül kitérek arra, hogy hogyan lehetne egzakttá tenni a kapott eredményeimet és milyen további vizsgálati lehetőségek kapcsolódhatnak ezen témához.

2. Bevezetés

Amint a dolgozatom címében is szerepel egy pontonként alátámasztott monolit vasbeton síklemezes földém képezi a vizsgálatom tárgyát. A téma bevezetéseként bemutatom a különböző funkciókkal rendelkező magas épületek szokványos kialakításait, valamint azok számításához használt módszereket. Ismertetem a nemlineáris, képlékeny anyagi viselkedés legfontosabb ismérveit, valamint a végeelemes módszer lényegét.

2.1. Magas épületek világviszonylatban

A magas épületek olyan szerkezetek, melyek tervezése során a függőleges terhek mellett a vízszintes hatások figyelembevétele döntő fontosságú. Ilyen vízszintes terhet jelent például a szél és a földrengés is, melyek figyelembevételének szükségessége az épület magasságával fokozottan nő.

Klasszikusan magas épületnek a tíz szintet, harminc métert meghaladó szerkezeteket nevezzük. Ezen épületeknél a vízszintes, destabilizáló hatások jellemzően nagyobb hangsúllyal vannak jelen, mint a függőleges terhek. Ezt a magasságot meg nem haladó épületeket középmagas, vagy alacsony épületnek nevezzük.[1]

Az ember természetéből fakadóan vágyik nagyot, eddig még nem létező dolgot alkotni. Ezen indíttatásból szeretne, minél hosszabb, nagyobb és magasabb szerkezeteket alkotni. Az ilyen irányú elképzeléseknek, csak a mindenkori technológia szabhat határt. Már időszámításunk előtt több ezer évvel is épültek monumentális épületek, mint például a gízai nagypiramis, mely habár a nagy önsúlya révén nem sorolható a klasszikus magas épületek közé, közel 150 méteres magasságával így is tekintélyt parancsoló.



1. Kép: A Hafré-piramis [A]

Az idő előrehaladtával jelentek meg az újabbnál-újabb építőanyagok és építési módszerek, melyek teret engedtek egyre magasabb szerkezetek készítésének. Épültek magas épületek fából, téglából, acélból és vasbetonból. A XIX. század végén kifejlesztésre kerültek a felvonók, melyek a nagy magasságok leküzdésére voltak és vannak a mai napig hivatva. Manapság a két legfőbb építőanyagunk az acél és a vasbeton. Utóbbi az első világháború után indult igazán fejlődésnek és terjedt el a használata köszönhetően előnyös szerkezeti viselkedésének.

A beton nagy nyomó, illetve az betonacél nagy húzószilárdságának kombinálásával jött létre ez a megkerülhetetlen építőanyag. Ennek ellenére a nagy önsúlyja miatt, hosszú ideig az igazán magas épületek dominánsan acélból készültek, mígnem a nagyszilárdságú beton kifejlesztésével tér nyílt ezen változtatni. A jelenlegi legmagasabb épület, a Burj Khalifa ezen anyag felhasználásával valósulhatott meg.

Utóbbi két példa, habár az építésük között eltelt több mint 4500 év, annyiban mindenképp megegyeznek, hogy koruk egyik legnagyobb építészeti alkotása.

Egy ekkora épületnek a megalkotása nagy hatást gyakorol. Egyrészt hatalmas presztízsértéke van, a fáraók ezzel fejezték ki, hogy mekkora hatalom van a kezükben és így érték el a népük tekintélyét, engedelmisségét. Ez a motiváció megvolt a utóbbi példa megalkotásakor is. A befolyáson túl gazdaságpolitikailag is nagy hatást gyakorolhat egy jól megválasztott beruházás akár az egész országra.



2. Kép: Burj Khalifa [B]

Utóbbira az Egyesült Arab Emírségek jó példa. Túl szerettek volna lépni azon, hogy csak a föld kincseinek kisajátítása révén rendelkeznek befolyással és egy fenntarthatóbb, a kőolaj előnyeinek megszűnése után is kitartó iparágba szerettek volna fektetni, melynek a turizmust választották.

Ezen projekt keretén belül több világhírűvé vált beruházás készült el, mint például a Burdzs al-Arab, a pálma-szigetek, vagy éppen a világ-szigetek. Ez biztosította az egész ország gazdasági stabilitását. Egyrészt elérték az egész világ csodálatát, melynek köszönhetően a befektetők visszanyerték a bizalmukat az országban, másrészt napjainkban is nagy bevételt is jelent, ugyanis rengeteg látogatót vonzanak az országba ezek a látványosságok [C].

2.2. Magas épületek a mindennapokban

A magas épületek elterjedését több tényező indokolja. Az egyre gyarapodó népesség, dráguló telekárak valamint a társadalmi elvárások megkövetelik, hogy a lehető legjobban kihasználjuk a rendelkezésre álló teret. Így fordulhat elő, hogy egyre magasabb iroda-, és lakóépületek, egyre tágasabb sportcsarnokok és egyre nagyobb kapacitású parkolóhelyek létesüljenek. Utóbbi biztosítására a tárolóteret egyre gyakrabban viszik le a föld alá, vagy létesítenek külön erre a célra tervezet parkolóházakat. Az ilyen feladatok ellátására a vasbeton kifejezetten alkalmas.

Amint az előzőekben utaltam rá, a szerkezeteink specifikációit a funkció alapvetően befolyásolja. Ilyen eltérő funkciót ellátó épületek közé tartoznak a sportlétesítmények, lakó és irodaházak, parkolóházak, raktárok, üzemi csarnokok, valamint a közösségi élet lebonyolítására szolgáló bevásárlóközpontok, színházak, múzeumok.

Lakó és iroda épületek:

Lakó épületeket tekintetében ebben az alponban a többlakásos házakról beszélek. *"Többlakásos a lakóház ha kettőnél több lakást tartalmaz és ezek egymás mellett és fölött helyezkednek el, valamint a lakások megközelítése közös területről történik."* [10]

Lakó és irodai funkciót ellátó épületek vannak jelen talán a legnagyobb számban. Az irodaépületeknél nagyobb, a lakóépületeknél kisebb egybefüggő terek kialakítása kívánatos. Fontos az esztétika és a tartósság. Jó beruházási lehetőséget nyújtanak, hiszen egy beruházással számos társadalmi csoportosulás elvárásait egyszerre tudjuk ellátni.



3.kép: Irodaház, Budapest [E]

Sportlétesítmények:

Ezen funkciót ellátó épületeinkkel szemben a fő elvárás a befogadóképesség, a nagy és nyitott terek, valamint az esztétikus megjelenés. Fajlagosan nagy értékű épületeknek számítanak, ezért főként állami beruházásként tudnak megvalósulni.

"A mai sportlétesítményeknek meg kell teremteniük az iskolai testnevelés, a tömegsport megfelelő lehetőségeit, a minősített sportolók részére a legkorszerűbb edzésfeltételeket, a megfelelő utánpótlás nevelést és az egyes versenyek nagyszámú közönség előtt való lebonyolításának minden feltételét." [10]

Csarnokok, raktárok:

Csarnokoknál és raktároknál szintén fontos a nagy belső tér, belmagasság, azonban az előzővel ellenkezőleg az esztétika nem fő szempont. Fajlagosan olcsó szerkezeteknek számítanak.



4. kép: Sportlétesítmény [D]

2.3. Vasbeton magas épületek szerkezeti rendszerei

A következőkben a magas épületek legelterjedtebb szerkezeti rendszereit közlöm a teljesség igénye nélkül. Ezen szerkezeti rendszerek a vízszintes terhek minél hatékonyabb felvételét hivatottak ellátni, így a vízszintes merevséget biztosító szerkezeti elemek megfelelő modellezése kulcsfontosságú. Minden ilyen rendszernek megvannak az előnyei, hátrányai és korlátai is.

Keretek

A keretek változatos kialakításokkal készülhetnek. Ez a tartószerkezeti egység oszlopokból és gerendákból épül fel, melyek kapcsolata lehet csuklós, vagy sarokmerv. Továbbá mind két esetben van lehetőség a szerkezet további merevítésére is.

A sarokmerv keret képes lehet önmagában felvenni a vízszintes terheket a nyomatékíró kapcsolatai révén. Itt a globális merevség a szerkezeti részek hajlítási merevségével arányosan nő. Az ilyen szerkezetek eltoldása nyírási alakváltozásként jön létre, melyre jellemző, hogy a szerkezete egyes szintjeinek relatív eltolódásai felfelé haladva csökkennek. Kialakítható acélból és vasbetonból egyaránt, utóbbi esetén előnyös a monolit technológia használata, de igény esetén van lehetőség az előregyártott szerkezetek kapcsolatát is hasonlóképp megoldani.[2]

A másik kialakítási lehetőség a szimplán csuklós kapcsolatokkal rendelkező keretek alkalmazása. Azonban ezek használata külön merevítés nélkül nem lehetséges, mivel így a vízszintes terhek felvétele nincs biztosítva. Merevítés hiányában a szerkezet úgy viselkedik, mint vízszintesen összekapcsolt konzolok sorozata. A merevség mértéke szimplán az oszlopok merevségétől függ. Továbbá nagy hátránya az ilyen kialakítással készülő szerkezetnek, hogy alakváltozása hajlítási alakváltozásként megy végbe, mely lényegesen nagyobb globális szerkezeti eltolódásokhoz vezet.

Nagyobb merevség igénye esetén alkalmazhatunk merevített kereteket is, melyeket változatos módokon alakíthatunk ki. Ilyen lehetőség az átlós rudak, huzalok alkalmazása. Kialakítható egyszerű diagonál, mely során egy húzott-nyomott szerkezeti elemet iktatunk a rendszerbe. Másik megoldás a kettős diagonál, mely működhet úgy, hogy két húzott-nyomott elemet alkalmazunk (ilyenkor alkalmazható vázkitöltő fal), vagy működhet húzott pótátlós módon is, mely során az erőket csak a húzott elem viseli, míg a nyomott elem nem dolgozik.

Önálló falakból álló szerkezetek

Ilyen kialakítás készülhet téglából falazva, fából, fémből vagy vasbetonból. A falak síkbeli teherviselő elemek, melyek a síkjukban nagy merevséggel rendelkeznek, így a vízszintes terhek felvételére kifejezetten alkalmasak. Befogott függőleges konzolként tekinthetünk rájuk, a falak egymással való kapcsolatát pedig leggyakrabban födémek képezik. Cél a vízszintes erőkből

keletkező húzóerők semlegesítése a függőleges erők által. További merevség igénye esetén alkalmazhatunk egymáshoz kapcsolt falakat is.

Hátránya ennek a szerkezeti rendszernek, hogy a falak nagy részeket takarnak ki, vagyis a függőleges tartószerkezeti elemek relatív alapterülete nagyobb, mint például a keretek esetében, így inkább lakócélnú épületek esetén tanácsos az alkalmazása. A falak kettős funkciót látnak el, egyrészt viselik a vertikális és horizontális terheket, másrészt a térelhatárolást is ez a szerkezeti elem végzi.

Falakkal merevített keret szerkezetek

"A vízkitöltő fallal merevített vasbeton váz, téglá vagy betonelemekből készült falakkal kitöltött vasbeton oszlop-gerenda vázszerkezet." [2]

Ennél a kialakításnál kombináljuk a sarokmerev kivittel készülő keretek és a falak előnyös tulajdonságait. A kettejük kapcsolata egyenlő alakváltozásra kényszeríti a rendszert. Ezzel merevebb és ellenállóbb szerkezetet kaphatunk. Kialakítható monolit vasbetonból (duális szerkezetek), vagy falazott kivitelben is.

Pontonként alátámasztott vasbeton szerkezetek

Dolgozatom témáját tekintve, a pontokon alátámasztott vasbeton födém a leglényegesebb. Ez kialakítás hasonló a keretek viselkedéséhez, annyi különbséggel, hogy itt a gerendákat vasbeton lemezzel helyettesítjük. A lemez egyszerre végzi el a szinthatárolás/elválasztás és a merevítés szerepét is.

Kialakítás szempontjából vannak gerendákra/fiókgerendákra támaszkodó, kazettás, gombafejes és síklemezes födémek is. Teherviselés szempontból pedig kialakítható egy, vagy két irányban teherhordó szerkezet.

A gombafödémek kialakítása annyiban különbözik a síklemez födémektől, hogy az oszlopok a lemezbe való csatlakozásnál kiszélesednek, így nagyobb csatlakozási felületet képeznek, ezzel pedig nagyobb nyírési teherbírást érnek el. Ez a szerkezeti kialakítás ma már nemigen használatos, azonban az új Puskás Ferenc Stadionban előreláthatólag alkalmazni fognak ilyen kapcsolattal kialakított oszlopokat is.



5. Kép: Gruber József víztároló medence [F]

2.4. Pontonként alátámasztott vasbeton síklemezes födémek

A gombafejes kialakítástól eltérően a síklemez födémeknél az oszlopok állandó keresztmetszettel vannak kialakítva, a nyíróerőt nagyobb keresztmetszetű oszlopokkal, nagyobb vastagságú lemezzel és- vagy kiegészítő vasalással tudjuk leépíteni. Ezen kialakítás több előnnyel is rendelkezik az előbbieken felsorolt szerkezeti rendszerekkel szemben. Ilyen például, hogy elmarad az alátámasztó gerendák, vagy gombafejek többlet zsaluzási munkája, illetve az elkészült szerkezetnek jobb a térkihasználtsága. Egyszerűsége miatt a vasalás és a kivitelezés szempontjából a leggazdaságosabb födém szerkezet.[1]

Kialakítható egy, vagy többtámaszú kivitelben, lágy, vagy feszített vasalással is. Míg az előbbi esetén általában 8 méteres, feszített födémek esetén elérhető a 12 méteres fesztávú vasbeton lemez is. Napjainkban ez a legelterjedtebb szerkezeti kialakítás, mely akár 30-40 szintmagasságig is alkalmazható.

"Síklemes födémeknél a függőleges és vízszintes terhekre történő méretezés külön történik, a szükséges vasalás értékét superponálni kell!"[2]

2.5.Síklemezes födémek számítási módszerei

A következőkben a pontonként alátámasztott vasbeton síklemezek számítási módszereit fogom ismertetni. A tervezés különböző fázisaiban más-más méretezési módszert használunk. A kezdeti fázisban közelítő modelleket alkotunk és ezzel vizsgáljuk a szerkezetünket. Ennél a résznél gyors becslést kell adnunk az igénybevételekre, alakváltozásokra, melyek segítségével kiválasztjuk az alkalmazandó szerkezeti típust, illetve közelítő méretfelvételt hajtunk végre. Ezen részeket a részletes számításnál felülvizsgáljuk és szükség esetén módosítjuk a paramétereket. Az a közelítő módszer a jó, mely során meghatározott paraméterek szignifikánsan nem térnek el a részletes számításától. Vasbeton födémek esetén a méretezést általában rugalmas állapot feltételezése mellett szokás elvégezni. Ennél a módszernél lehetőség nyílik külön-külön vizsgálni a függőleges és vízszintes terhek során fellépő igénybevételeket, alakváltozásokat.

I. Vízszintes terhek vizsgálata

Amennyiben a szerkezetünk a vízszintes terhek felvételére alkalmas külön merevítő rendszerrel nem rendelkezik, a keletkező többlet igénybevételeket figyelembe kell venni.

A vasbeton síklemezek vízszintes terhekből származó igénybevételeinek meghatározására az egyenértékű gerenda módszere alkalmazható, melynek használata során meg kell határozni egy együttdolgozó lemez szélességet, melyből kiszámítható, hogy a helyettesítő gerendának mekkora hajlítási merevséget kell beállítanunk. Ezen egyenértékű lemez szélességét b' -vel jelöljük, értékét ajánlás alapján [1] vehetjük fel. (Lásd. 4. ábra) Értéke függ a vasbeton lemez raszter távolságaitól, valamint az alátámasztó vasbeton oszlopok oldalméretétől és független a lemez vastagságától. Ezek alapján az egyenértékű lemezszélességből és a valódi lemezvastagságból meghatározható a gerenda inerciája. *"Ezután a közelítő, illetve végleges terhek meghatározására a sarokmerev keretek vizsgálatához ismert módszerek alkalmazhatók"* [1]

Közelítő számítás: A számítást rugalmas állapotban, lineáris szerkezeti viselkedés feltételezésével végezhető el. *"... igénybevételek meghatározására a sarokmerev keretek vizsgálatához ismert módszerek (portál-, arányos keretek módszere stb.) alkalmazhatók."* [2]

Részletes számítás: Részletes számítás során az igénybevételek és alakváltozások lehető legpontosabb meghatározása a cél. Ehhez a feladathoz részletesebb modellekre van szükségünk, így az igénybevételek meghatározása bonyolultabb feladatot jelent, melyet leginkább végeelemes módszerrel szokás megoldani. [1]

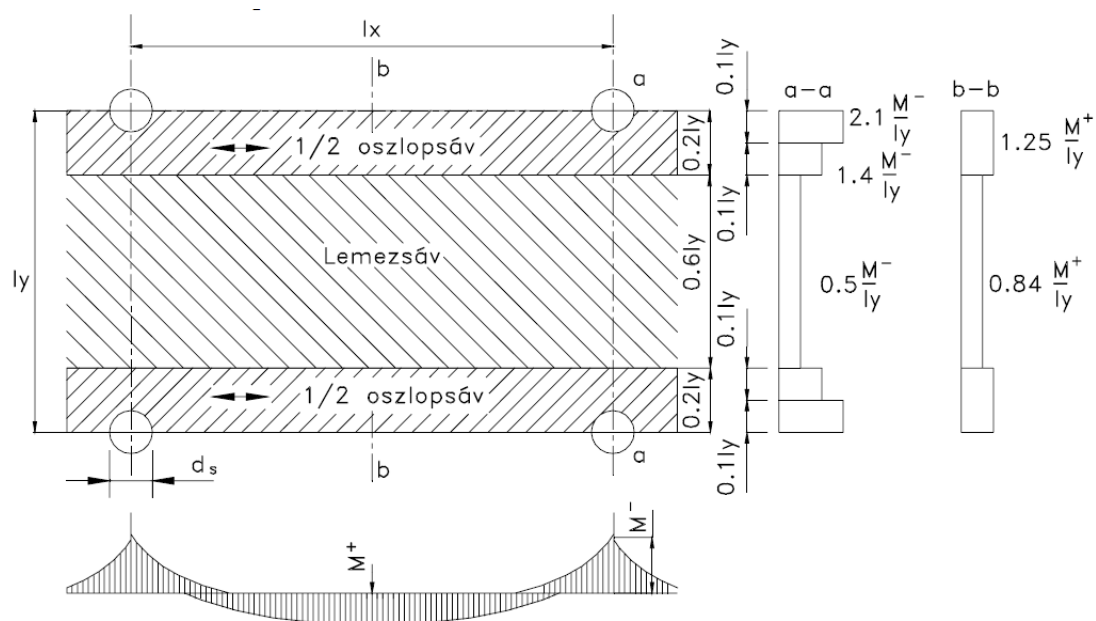
II. Függőleges terhek vizsgálata

Amint azt korábban is írtam, a síklemezes födémeknél a függőleges terhekre való méretezés elkülönítve történik a vízszintes tehertől. A tervezés során el kell végeznünk a födém méretezését hajlításra és átnyíródásra is.

Közelítő számítás:

Hajlítási méretezésnél, amennyiben a szerkezetünket egyenletesen megoszló terhelés éri, valamint az oszlopok raster távolsága egy adott tartományon belül helyezkedik el, úgy itt egy közelítő eljárás szolgál az igénybevételek meghatározására. Ezen eljárás során az oszlopok távolságával megegyező szélességű lemezsávot vehetünk figyelembe együttdolgozó lemezsáv címén. Ezen a helyettesítő gerendán meghatározhatjuk az igénybevételeket. [2]

Az így megkapott nyomatékokat szét kell osztani egy $0,4L$ széles oszlopsávra, valamint egy $0,6L$ széles lemezsávra. Ezen felosztást az 1. ábra szemlélteti. Látható hogy a felosztás mértéke eltérő a oszlopsáv (a-a), illetve a lemezsáv esetén (b-b). Az igénybevételek mindkét esetben a oszlopsávban koncentrálnak.[7]



1. ábra: Nyomatékok felosztása[7]

Síklemez födémeknél a kis felületen történő nagy erők átadása miatt az átszűrődési vizsgálatok elvégzése is fontos. Az átszűrődés nyírási jelenség, ezen tönkremenetel végbemehet a nyomott rácsrudak törése által, a beton nyírási teherbírás kimerülésével, valamint amennyiben a lemez rendelkezik nyírási vasalással akkor ezen vasalás elszakadásával.

Részletes számítás:

Egyenletesen megoszló terhelés esetén a Kirchhoff-féle rugalmas lemezegyenlet megoldása révén határozhatjuk meg az igénybevételeket. Ezen egyenletek megoldása történhet analitikusan, vagy numerikusan. Az előbbi komplex feladat egyszerűsítésére táblázatok állnak rendelkezésünkre, melyből leolvashatóak a legáltalánosabb szerkezeti kialakítások esetén meghatározott nyomatékok reakciók és lehajlások is. Numerikus vizsgálatok során valamilyen végeelemes szoftvert alkalmazhatunk. Manapság ez a legelterjedtebb módszer. [2]

2.6. Rugalmas-képlékeny anyagi viselkedés

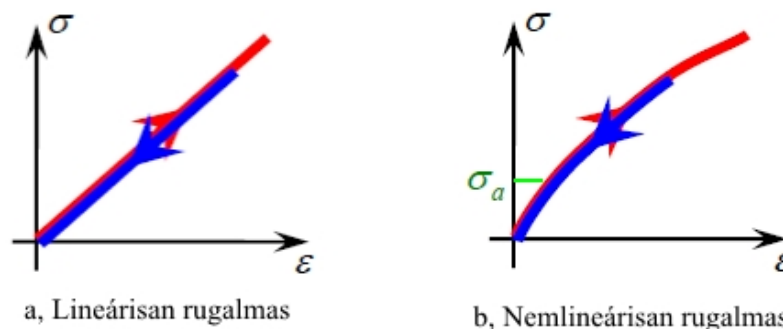
A szilárdságtan a mechanika azon területe, mely a test anyagi változásait (erők, alakváltozások) vizsgálja különböző mechanikai behatások esetén. Ahhoz, hogy a szerkezeteinket vizsgálni tudjunk, mechanikai anyagmodelleket kell létrehozni, melyek matematikailag leírják, hogy adott feszültségek hatására milyen alakváltozások jönnek létre, vagy fordítva. Ilyen anyagmodellekkel definiálhatjuk azt is, hogy milyen az anyagi viselkedés, mekkora az anyag teherbírása, hogyan viselkedik a terhelés folyamata során, vagy a teherbírás kimerülése után. Egy jó anyagmodell alkalmazása döntő fontosságú lehet az építőmérnöki gyakorlatban.

A mechanika számos az építőmérnöki gyakorlatot érintő anyagi modellel rendelkezik, én azonban csak a dolgozatomhoz legszükségesebb anyagmodelleket ismertetem. [8]

Rugalmas anyagi viselkedés

Rugalmas anyagi viselkedésről beszélünk akkor, amikor egy anyag adott terhelés hatására valamilyen deformációt szenved, ám a terhelés megszűnésekor az anyag visszanyeri eredeti állapotát. Tehát a terhelési és tehermentesítési feszültség-alakváltozás diagram fedti egymást, az anyag nem szenved maradandó alakváltozást. [8]

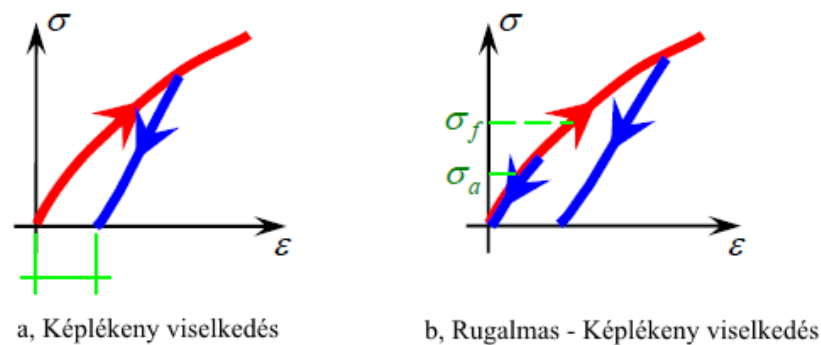
A rugalmas anyagi viselkedésnek egy speciális esete amikor az anyag alakváltozásai feszültséggel egyenlő mértékben növekednek és csökkennek. Ezt hívjuk lineárisan rugalmas anyagi viselkedésnek. Amennyiben a linearitás nem, de a rugalmasság teljesül, akkor nemlineárisan rugalmas anyagi viselkedésről beszélünk. [9]



2. ábra: Rugalmas anyagi viselkedés [9]

Képlékeny anyagi viselkedés

Képlékeny anyagi viselkedésnek nevezzük azt, amikor az anyag a terhelés megszűntekor nem nyeri vissza eredeti állapotát, vagyis maradandó változásokat szenved. Ez az állapotváltozás a belső anyagi szerkezet átrendeződése révén jön létre, mely átalakulás nem reverzibilis folyamat. A rugalmas anyagi viselkedéstől eltérően, a képlékeny alakváltozás mindig nemlineáris viselkedés. Ilyen anyagi viselkedés jellemzi például magas hőmérsékleten a fémeket. Különböző anyagoknál a képlékenyedési képesség eltérő lehet, ezt tulajdonságát az anyagnak duktilitással jellemezhetjük.[9]



3. ábra: Képlékeny anyagi viselkedés

Rugalmas - képlékeny anyagi viselkedés

Az építőmérnöki gyakorlatban leggyakrabban használt anyagok általában ilyen anyagi tulajdonsággal bírnak. Ez az összetett viselkedés jellemzi például az acélt is, melyben jelen van a lineárisan rugalmas, rugalmas és képlékeny anyagi viselkedés egyaránt. Ez azt jelenti, hogy kellően kicsiny terhelés hatására lineárisan rugalmasan viselkedik, ám mikor a terhelés elér egy megfelelően nagy értéket, melyet arányossági határnak nevezünk, az anyag linearitása megszűnik. Ezt követően is rugalmas maradhat, de már nem lineáris a kapcsolat a feszültségek és az alakváltozások között. Ebben a fázisban a terhelés megszűntekor az anyag még visszanyeri eredeti állapotát.

Amennyiben az arányossági határt elhagyva, a terhelő erőt még tovább növeljük egy adott ponton, melyet folyáshatárnak nevezünk az anyag rugalmas viselkedése fokozatosan megszűnik és maradandó alakváltozások keletkeznek az anyagban. Ebben a stádiumban már hiába szüntetjük meg a terhelést, az anyag nem tér vissza az eredeti állapotába.[9]

Azt a legnagyobb feszültséget, mely az anyagban keletkezhet szilárdságnak nevezzük. Ha a terhelés folytatódik, idővel bekövetkezik a tönkremenetel. A duktilitás szabja meg, hogy ez mekkora feszültség szinten és milyen alakváltozás mellett következik be.

2.7 A végeelemes módszer

A végeelemes módszer egy közelítő numerikus megoldási eljárás, mely parciális differenciálegyenletek megoldására alkalmas. A módszer a mérnöki gyakorlatban széleskörűen elterjedt. Az eljárás valamilyen számítástechnikai eszköz segítségével hajtható végre, a kézi megoldás túl komplex a mindennapos használathoz. Segítségével meghatározható, hogy egy adott modellen ható terhelések hatására, az milyen változásokon megy keresztül. A cél, hogy a tervezett szerkezet viselkedését vizsgáljuk.

Kézi megoldás:

Az általunk létrehozott modellben definiálnunk kell a szerkezet geometriai kialakítását, anyagmodelleket, peremfeltételeket és kapcsolati tulajdonságokat. Ezt követően a végeelemes módszerrel a modellünket adott mérettel és csomóponttal rendelkező, elemi részekre kell bontani. A csomópontokra ható erők és azok elmozdulásai között valamilyen kapcsolat áll fenn, mely segítségével meghatározhatók az elemi merevségi mátrixok. Az elemi merevségi mátrixokból tevődik össze a szerkezet teljes merevségi mátrixa. Ekkor létrejön egy egyenletrendszer, mely a szerkezet merevségi mátrixából (**K**) és két vektorból (terhelés, elmozdulás) áll. Ezekben a feladatokban az ismeretlen általában az elmozdulás vektor.[12]

$$\mathbf{K} * \mathbf{v} = \mathbf{q} \quad \mathbf{v} = \mathbf{K}^{-1} * \mathbf{q}$$

Mennyiben az elmozdulás vektor meghatározásra került, úgy kiszámítható az egyes csomópontok elmozdulása, majd ezen elmozdulásokból megadhatóak a csomóponti erők és igénybevételek.

Szoftveres megoldás:

A számítógépes megoldás az előzőekben leírtakon alapszik, ám itt a munka érdemi részét valamilyen számítástechnikai eszköz végzi el. Maga a feladat három részre bontható, az első részben (Preprocessing) határozhatjuk meg a modellünk geometriáját, választhatjuk meg a kívánt anyagmodellünket, definiálhatjuk a peremfeltételeket, valamint bonthatjuk elemire részekre szerkezetünket.

A második részben (Processing) játszódik le a számítás. Azért használom ezt a kifejezést, mert ez a folyamat tőlünk függetlenül, megy végbe. Ekkor történik meg az egyenletrendszer megoldása, eredményül pedig megkapjuk a kívánt elmozdulásokat és feszültségeket.. Az utolsó lépésként (Postprocessing) a kapott eredmények kiértékelése történik.

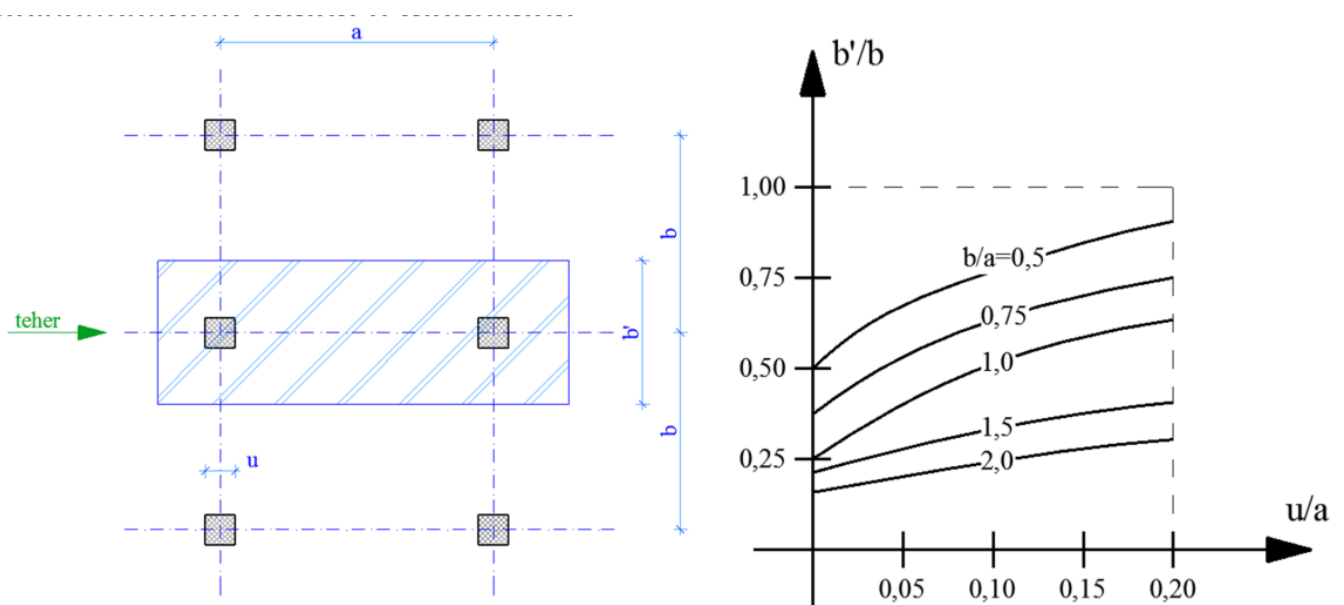
A módszer alkalmas lineáris-statikus, dinamikus és nemlineáris feladatok elvégzésére egyaránt. Utóbbira a nemlineáris anyagmodellek és terhelések, stabilitási vizsgálatok és nagy deformációk vizsgálata során lehet szükség.

2.8 Probléma felvetése

A 2.4-es fejezetben taglaltam, hogy a síklemez földemek vízszintes teherre való méretezése egyenértékű helyettesítő kerettel vizsgálható. Ezt a helyettesítő modellt használjuk a közelítő és végleges számítások esetén. Hiányossága ennek a módszernek, hogy csak a vízszintes erők vizsgálatára alkalmas és a meghatározott vasalást utólag kell szuperponálni a függőleges erőkől meghatározott vasalással.

Az egyenértékű gerenda használata során meg kell határozni egy együttműködő lemez szélességet, mellyel megkaphatjuk, hogy a helyettesítő gerendáknak mekkora hajlítási merevséget kell beállítanunk. Ezen egyenértékű lemez szélességet b' -vel jelöljük, méretét ajánlás alapján [1] vehetjük fel. Értéke függ a vasbeton lemez raszter távolságaitól, valamint az alátámasztó vasbeton oszlopok oldalméretétől és független a lemez vastagságától. (Lásd: 4.ábra) Ezek alapján az egyenértékű lemezszélességből és a valódi lemezvastagságból meghatározható a gerenda merevsége.

Dolgozatom célja vizsgálni, hogyan változik az előbbieken említett egyenértékű lemezszélesség, egyidejű függőleges és vízszintes terhek hatására.



4. ábra: Együttműködő lemezszélesség [2]

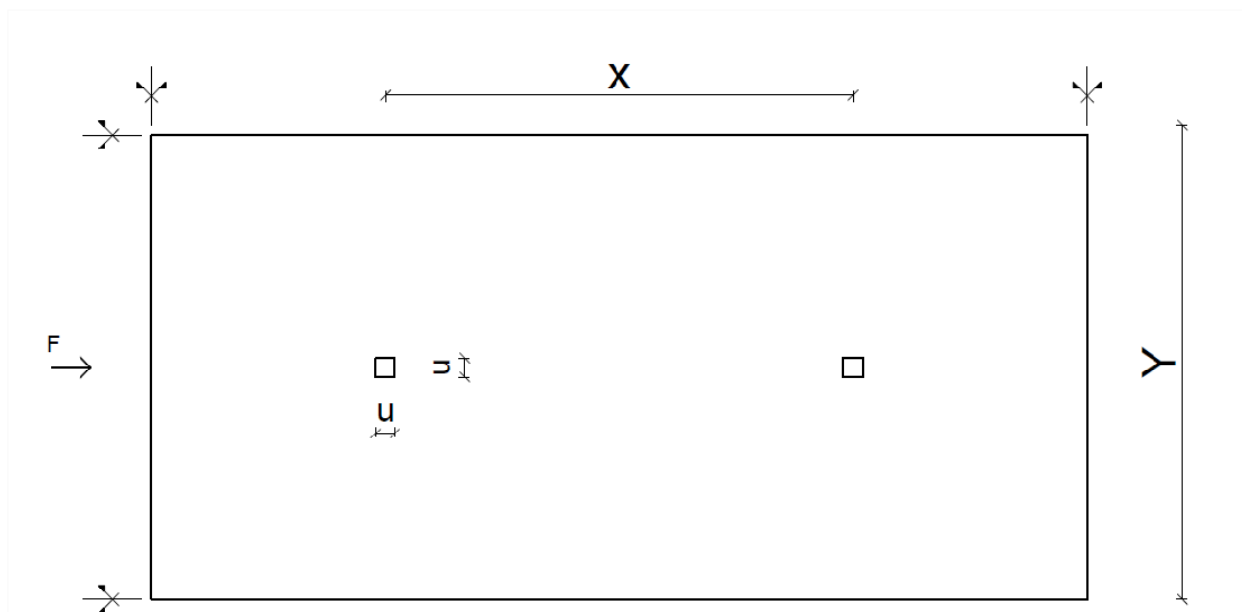
3. A vizsgált szerkezet

3.1 Célkitűzés

A síklemezes födékek vizsgálatával foglalkozó irodalomban Dr. Farkas György, a Magasépítési Vasbetonszerkezetek című könyvében [1] közöl egy grafikont, melyen a síklemez födékek egyenértékű keretekhez használatos együtt dolgozó lemez szélességre ad ajánlást. Ez a grafikon csak külön vízszintes terhek vizsgálatára használható. (Lásd: 4. ábra)

Célom egy ehhez hasonló grafikon készítése, mely a vízszintes terheken túl a függőleges terheket is figyelembe veszi. Tehát a modelleken egyszerre fogom működtetni a függőleges és vízszintes irányú terheket és az így kialakuló erőjátékot vizsgálom.

Az általam vizsgált szerkezete egy fiktív többszintes épület valamely közbenső szintjén helyezkedik el. Az épület teherhordó szerkezete monolit kivitelben készülő síklemezes vasbeton födéből és szabályosan elhelyezett oszlopokból álló váz. Geometriáját tekintve vannak paraméterek melyek a vizsgálataim során fixek maradnak, mint például a szintmagasság, vagy a vasbeton lemez vastagsága, másokat bizonyos kritériumok mellett változtatni fogok. Ilyen változó paraméterek lesznek a vasbeton oszlopok raszter kiosztása és a vasbeton oszlop keresztmetszeti mérete. A pontos szerkezeti kialakításokat a 3.2 fejezetben közlöm.



5. ábra: Változó paraméterek

A kezelhetőség kedvéért kihasználom, hogy a vizsgált szerkezet szimmetrikus, így a teljes szerkezet helyett csak egy részletét vizsgálom numerikus modellként, mely megfelelően kiválasztott peremfeltételek mellett úgy viselkedik, mintha az a tényleges szerkezeten belül lenne. (Lásd: 5. ábra)

A modellem két darab oszlopból, valamint a raszter közepig tartó vasbeton lemezből áll. Ez a kialakítás ad módot arra, hogy a kialakuló erőjátékot megfelelően vizsgálhassam és meghatározhassam az együttdolgozó lemezszélességet.

Függőleges értelemben az oszlopok a felezőponjukig vannak modellezve, ahol a nyomatéki nullpont miatt koncentrált nyomaték megadása nem szükséges, a szimmetria kialakítása egyszerűen megoldható a vízszintes terhek felvételével.

Az imént ismertetett szerkezetet az Atena nevű nemlineáris végeelemes szoftverrel vizsgálom. A nemlineáris vizsgált elvégzéséhez a szerkezet valós vasalását is definiálni kell, melyet egyszerűsítésképp a mértékadó modellen vettem fel a megfelelő körültekintés mellett. Ennek köszönhetően a más geometriájú modelleken, a vasalás csak kis mértékű változtatása volt indokolt.

3.2 A szerkezet ismertetés:

Állandó paraméterek:

A vizsgált szerkezet változatlan geometriai méretei közé tartozik az adott szint belmagassága, melyet három méter magasra vettem fel. Ezt a napjainkban általánosan alkalmazott méretekből kiindulón választottam.

A lemez vastagságát 25 cm vastagságúra állítottam, mellyel az átszűrődés elkerülése volt a fő szempont, mivel nyírási vasalás külön nem került elhelyezésre.

Szintén állandó értékkel vannak megadva az anyagmodellek, melyeket részletesen a 4.1-es részben ismertetek. Összesen négy féle anyagmodell definiálása volt indokolt. (Lásd: 6. ábra) Ezek egyenként a beton, a betonacél, a megtámasztásoknál elhelyezett kontakt elemek, valamint a támaszok megadásánál használt rugók tulajdonságait írják le. Az anyagmodelleket ajánlások alapján vettem fel [3]. Továbbá állandó értékkel szerepelnek a terhelések, illetve azonos módon kerültek kialakításra a megtámasztások és a végeelem háló is. [6]

Number	Material name	
1	Steel plate	CC3DElastIsotropic
2	Concrete - C25,30 mean values	CC3DNonLinCementitious2
3	Reinforcement bar	CCReinforcement
4	Spring	CCSpringMaterial

6. ábra: Anyagmodellek

Változó paraméterek:

A változó értékek közé tartozik a vasbeton síklemezes födém raszter kiosztása. Kiindulási modellnek a 6x6 méteres kiosztást választottam. Ez az egyetlen eset amikor a vasbeton lemez teljesen szimmetrikus. A továbbiakban ezt a raszter kiosztást változtattam oly módon, hogy fél méterenként növeltem az egyik, illetve csökkentettem a másik irányban való kiterjedését a lemeznek. Így a legnagyobb differencia a két irány között akkor alakul ki, amikor a 8x4 méteres kiosztást választom. Ekkor az oldalak aránya 2.0.

	x irány	y irány	Oldalak aránya:
1.	8	4	2,00
2.	7,5	4,5	1,67
3.	7	5	1,40
4.	6,5	5,5	1,18
5.	6	6	1,00
6.	5,5	6,5	0,85
7.	5	7	0,71
8.	4,5	7,5	0,60
9.	4	8	0,50

7. ábra: Raszter kiosztás

Teljesen analóg módon a másik irányban is hasonlóképp jártam el. Amit a korábbiakban növeltem, most csökkentettem, így pedig megkaptam végső soron a 4x8 méteres raszter értéket, mely raszter kiosztás aránya 0,5. Ezen esetek összesen kilenc féle modellt adnak ki. (Lásd: 7. ábra)

Változó paraméterként vettem fel a vasbeton oszlopok keresztmetszeti méretét is. Kiindulási méretnek a 25 cm oldalhosszúságú oszlopot vettem, majd ezt öt centiméteres lépcsőkben 45cm-ig növeltem. Az oszlop keresztmetszeti mérete a két irányban minden esetben azonos nagyságú. Ez összesen öt variációt jelent.

A raszter kiosztás és a változó keresztmetszeti méretű oszlopok kombinációjaként összesen 45 darab, különböző modell került kialakításra, majd vizsgálva. (Lásd: 8. ábra)

	25	30	35	40	45
8x4	1.	2.	3.	4.	5.
7,5x4,5	6.	7.	8.	9.	10.
7x5	11.	12.	13.	14.	15.
6,5x5,5	16.	17.	18.	19.	20.
6x6	21.	22.	23.	24.	25.
5,5x6,5	26.	27.	28.	29.	30.
5x7	31.	32.	33.	34.	35.
4,5x7,5	36.	37.	38.	39.	40.
4x8	41.	42.	43.	44.	45.

8. ábra: Modell kombinációk

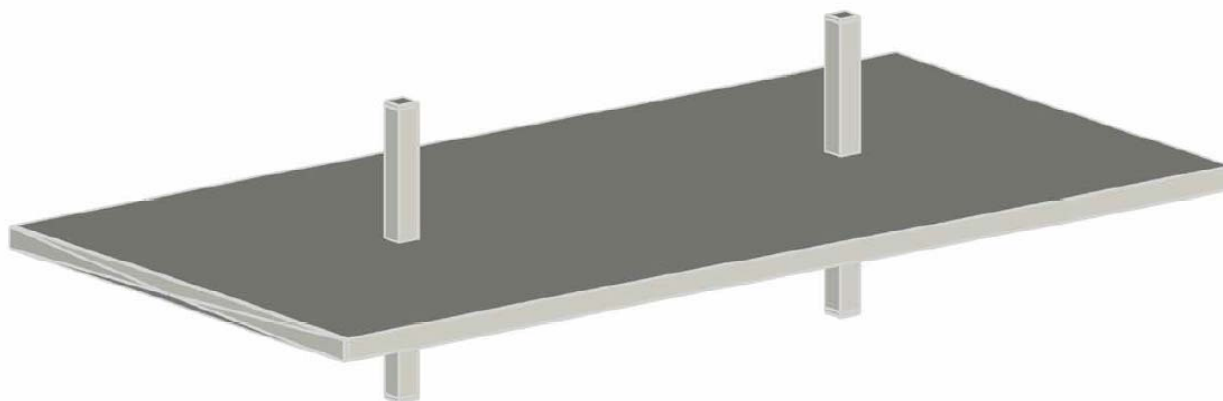
3.3 Az ATENA szoftver ismertetése

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek tanszékének jóvoltából lehetőségem nyílt megismerkednem és használnom a Červenka Consulting termékét az ATENA programcsomagot.

A termékcsalád vasbeton szerkezetek nemlineáris, végeelemes vizsgálatát segíti elő és teszi ezt olyan pontossággal, hogy az eredmények megközelítik a valós erőjátékát a szerkezeteknek. A programban lehetőség nyílik a valós anyagi viselkedés modellezésére, a betonacél képlékeny tartálékainak vizsgálatára és a vasbetonban kialakuló repedések megfigyelésére.

A valós és numerikus modellek közti eltéréseket vizsgálta Roszevák Zsolt, korábbi TDK dolgozatában [3], melyben azt a megállapítást teszi, hogy a megfelelően kialakított numerikus modellek a valós kísérleti modellekkel szinte azonosan viselkednek. Feszültségek és a repedéseket tekintve kardinális eltérés nem tapasztalható.

Az Atena 3D segítségével megalkothatók a numerikus modellek, ebben a szoftverben kell definiálni az anyagokat, geometriai paramétereket, terheket, teherlépcsőket és a végeelem hálót is. Kisebb kapacitásigényű számítások elvégzésére is alkalmas ez a program, a nagyobb igénybevétel esetén pedig az adatok kiexportálhatók az Atena Studio nevű programba. A kapott eredmények vizsgálatára mind két programban van lehetőség.



9. ábra: Minta ATENA modell

4. A numerikus modell

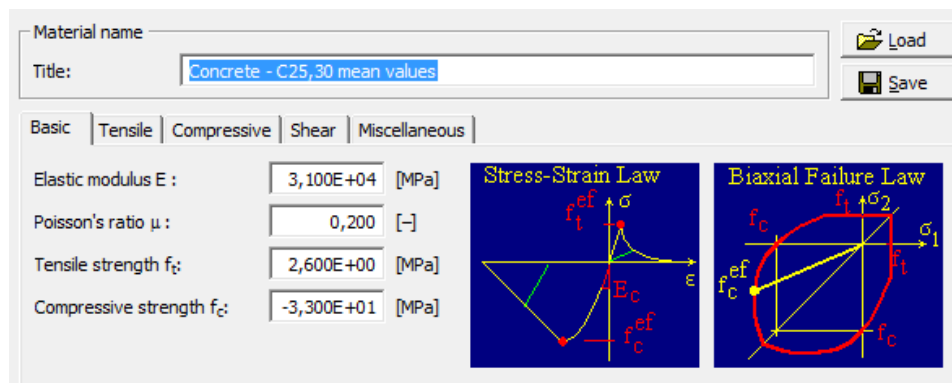
A vizsgált szerkezet geometriai méreteit a 3. fejezetben ismertettem. Ebben a részben ismertetem a numerikus modellek során alkalmazott megoldásokat, úgy mint az alkalmazott anyagmodelleket, definiált a megtámasztásokat, a terheket valamint a végeelem hálót. A vasalást a mértékadó modellen végrehajtott igénybevétel meghatározás alapján hajtottam végre, melyet az AxisVM végeelemes programmal végeztem el. Az alkalmazott vasalásokat a II. mellélet tartalmazza.

4.1 Anyagmodellek definiálása

Beton:

Feladatom során összesen 4 anyagmodell definiálása volt szükséges. Első lépésként megválasztottam a beton szilárdsági osztályát. Ezt C25/30 minőségben szabtam meg. Ezt követően a beton anyagi viselkedésének jellemzésére kellett megadni egy anyagmodellt. A program több lehetőséget is felajánl, megadható saját feszültség-alakváltozás görbe, vagy van lehetőség a beépülő modulokból választani.

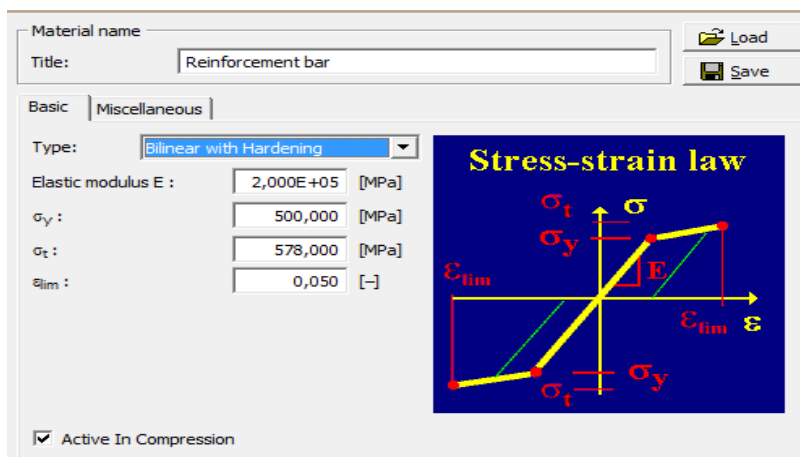
Végül a "C25/30 mean values" elnevezésű anyagmodellt választottam, ajánlás alapján [6], mely egy katalógusból választható modell. A program automatikusan megadja a beton jellemzőit, az Eurocode 2-es számú kiadásához igazodva. (Lásd: 10. ábra) Szükség esetén lehetőség van bizonyos értékek manuális megváltoztatására, mint például a beton rugalmassági modulusa, vagy a Poisson-tényező.



10.ábra: "C25/30 mean values"

Betonacél:

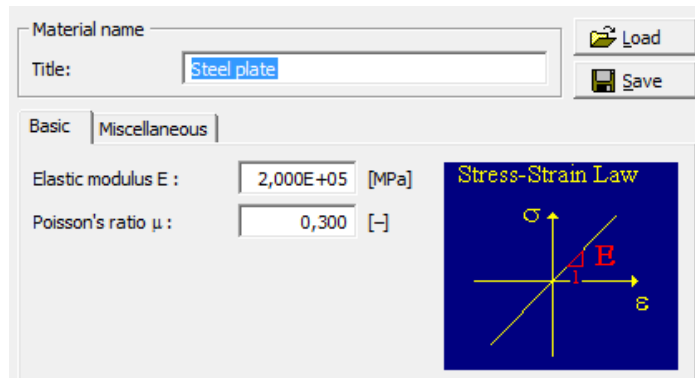
A vasalás anyagának kiválasztására a program szintén felajánl bizonyos számú lehetséges modellt. Ilyen például a lineáris, a bilineáris és a bilineáris - felkeményedő anyagmodell. Itt is van lehetőség, szükség szerint az értékek manuális változtatására, mint a rugalmassági modulus, folyáshatár, húzófeszültség, vagy a szakadónyúlás megadására. Én elfogadtam a program által felajánlott bilineáris - felkeményedő modellt, mely az acél folyáshatárát 500 MPa-nak veszi fel. (Lásd: 11. ábra)



11. ábra: Bilinear with hardening

Acél kontaktelelem:

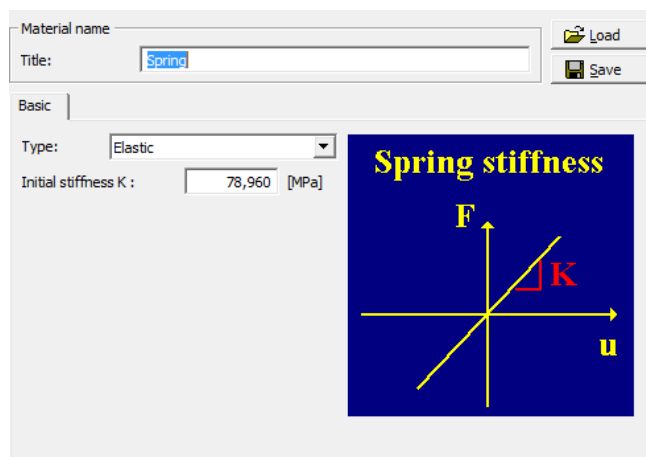
Szükséges egy kiegészítő anyagot is definiálnom, mely az acél kapcsolóelemhez tartozik. Ennek a plusz elemnek a szükségességét a 4.2-es fejezetben taglalom. Az acéllemez anyagát egy lineárisan rugalmas, izotróp modellel adtam meg. (Lásd: 12. ábra) Ez, az előzőektől eltérően egy egyszerűbb anyagmodell, ami kielégítő, révén hogy csak teher továbbítás és elosztás céljából kerül elhelyezésre. Fontos a nagy merevség biztosítása, a teher egyenletes szétosztása végett.



12. ábra: Acél kontaktelelem

Rugóállandó:

Utolsóként egy rugó modell definiálása vált szükségessé. Ez biztosítja a szerkezet szimmetrikus viselkedését, mivel közvetlen szimmetrikus megtámasztásra nem adott lehetőséget a program. (Bővebben: 4.2-es fejezet) A programban van rugó megadására szolgáló opció, itt a rugó merevségi értékét kell megadni. (Lásd: 13. ábra)



13. ábra: Rugó definiálása

A rugóerő meghatározása kézzel történt az adott megtámasztási viszonyokat figyelembevéve. Kilenc darab rugóerő meghatározására volt szükség, melyek értékét a 14. ábra adja meg. A 6x6-os kiosztású lemez rugóerő meghatározását az [I.] melléklet tartalmazza.

Raszter	Rugóállandó [Mpa]
8x4	33,31
7,5x4,5	40,43
7x5	49,73
6,5x5,5	62,11
6x6	78,96
5,5x6,5	87,61
5x7	95,51
4,5x7,5	101,32
4x8	112,41

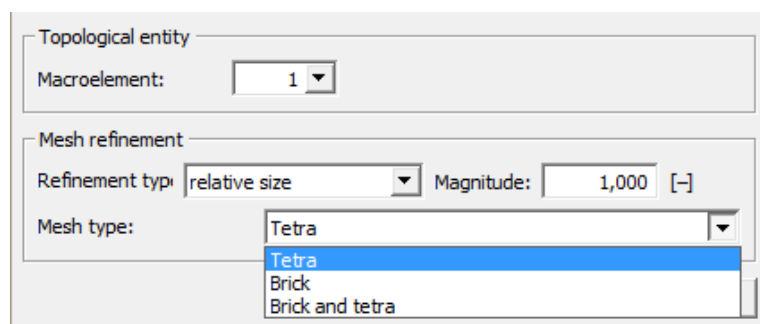
14. ábra: Rugóállandók

4.2 Végeelem háló megadása

Általános bemutatás:

Következő lépésként a végeelem háló definiálást végeztem el. Az Atena 3D szoftverben van automatikus hálógeneráló opció, mely segítségével egyszerűen elvégezhető ez a művelet. A program szerkezeti elemként végzi el ezt a lépést, ehhez csak néhány paraméter megadására van szükség. A számítási kapacitás igénye, valamint a kapott eredmény pontossága nagyban függ az itt megadott értékeken.

Elsőként a végeelemet kell megadni. Itt három opció közül választhatunk. (lásd:15. ábra). A program legegyszerűbben a téglatest elemet kezeli. Ezt követően meg kell adni, hogy kvadratikusan, vagy lineárisan szeretnénk. (Lásd: 16. ábra) Előbbi esetben csomópontok csak az elem sarkaiban kerülnek elhelyezésre, tehát egy téglatest elem esetén 8 csomópont lesz. Utóbbi esetben az élre is kerülnek csomópontok, melynek köszönhetően 20 csomóponttal fog rendelkezni a végeelem.



15. ábra: Végeelem alakja

Ezt követően a végeelemek él hosszát kell betáplálnunk, majd legenerálni a hálót. Lehetőség van, a különböző szerkezeti elemeket külön definiálni, ez azért lehet hasznos, mert amennyiben csak egy bizonyos szerkezeti elemet szeretnénk részletesen vizsgálni, úgy arra sűrűbb hálót generálva részletesebb eredményeket kaphatunk. Illetve ugyanezzel a számítással futtatás idején is tudunk nyerni.

Fordított arányosság áll fenn a végeelemek mérete és a futtatási idő között. ennek is szerepe volt, mikor mérlegeltem, hogy mekkora végeelem méretet alkalmazzak. Ezen összefüggés szemléltetésére szolgál a 17. ábra, melyen azt ábrázoltam, hogy hogyan nőtt a modell számítás igénye (RAM), a végeelem háló él hosszát változtatva.

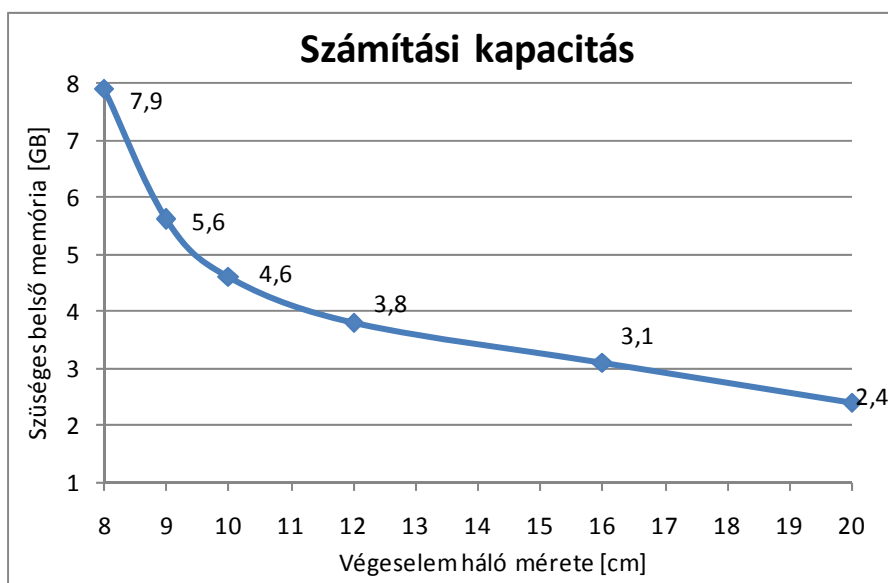
Végül a nemlineáris analízisnél alkalmazott iterációs eljárást kell megadni. Ennél én a Newton-Raphson iterációs eljárást választottam [6], majd legeneráltam a végeelem hálót.

"Newton-Raphson közelítés az alkalmazott terhelés felosztásával és több lépésben történő közelítésével oldja meg a nemlineáris feladatot. Minden megoldás előtt a program megbecsül egy az egyensúlyi helyzetből kitérítő (*out-of-balance*) terhelési vektort, ami az elemfeszültségeknek megfelelő visszaható (*restoring*,) terhelés és az alkalmazott terhelés különbsége. Ezután a program futtat egy lineáris megoldást az *out-of-balance* terhelési vektor felhasználásával és vizsgálja a konvergenciát. Ha nem teljesítette a konvergencia kritériumot, akkor az *out-of-balance* terhelési vektort újra megbecsüli, a merevségi mátrixot frissíti, és újra futtatja a számolást. Ezen lépéseket addig futtatja, amíg nem konvergál a szimuláció." [1]

Group	Generate	State	Generator	Elements
> 1	<input type="checkbox"/> No	Generated	T3D	quadratic
2	<input type="checkbox"/> No	Generated	T3D	linear
3	<input type="checkbox"/> No	Generated	T3D	linear
4	<input type="checkbox"/> No	Generated	T3D	linear
5	<input type="checkbox"/> No	Generated	T3D	linear
6	<input type="checkbox"/> No	Generated	T3D	linear

16.ábra: Generált végelemek

A generált végelemek száma a 18. ábrán jelölt példa esetén közel 6500. Ebbe vegyesen beletartoznak a téglatest és a tetraéderez elemek is.

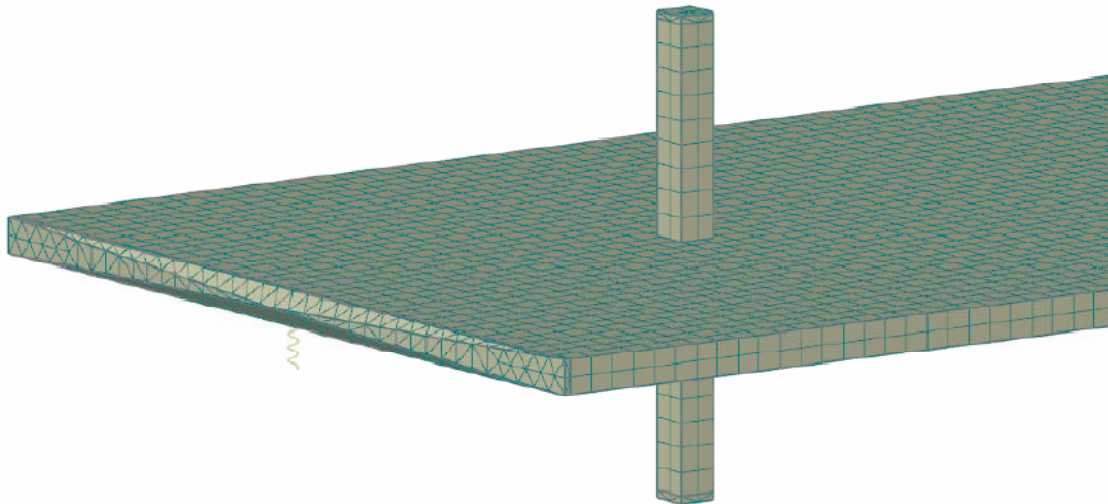


17.ábra: Szükséges számítási kapacitás a végelem háló függvényében

Definiált végelem:

A feladatom során a szerkezeti elemeknek téglatest alakú véges elemeket definiáltam. Az oszlopok esetén lineáris, míg a lemez esetében kvadratikus módon, melyre azért volt szükség, mert a lemezben vizsgáltam a kialakuló feszültségeket és ez elem pontosabb eredményt ad. A kontakt elemek esetén tetraéderez, lineáris elemeket alkalmaztam a program készítői javaslatára [H]. A tetraéderez kialakítás feszültségek vizsgálatára nem ajánlott, de itt nem is ez a cél. [3]

A végelem méretének megadásakor először az volt a célom hogy minden keresztmetszetre három végelem jusson. Ez a 25cm oszlop és lemez esetén 8 cm háló kiosztást jelentett volna, de végül a nagy számítási igények miatt ettől elálltam. Egy modellen két centiméteres lépcsőkben megvizsgáltam, hogy mekkora differencia jelentkezik az egyes hálók alkalmazása esetén és végül a 16 cm - es felosztás mellett döntöttem. Ezt találtam optimálisnak a modell pontossága, valamint futási időket figyelembevéve. (lásd:17. ábra)



18. ábra: Végelelem háló kialakítása

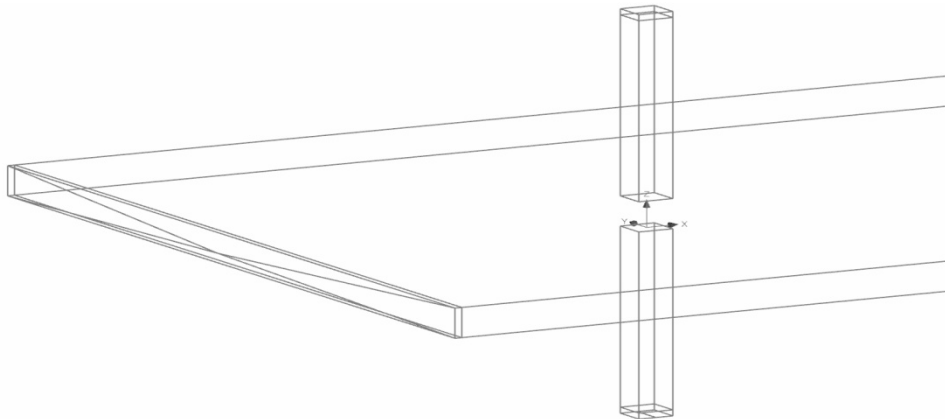
4.3 Megtámasztások és terhek

Kontaktelem megadása:

A támaszok és az erők bevezetésénél kontakt elemeket definiáltam. Erre azért van szükség, hogy elkerüljük a szerkezeti elemek felhasadását és ezzel a lokális repedések és feszültségcsúcsok kialakulását.

Kétféle ilyen elemet definiáltam. Az egyiket az oszlopok végein helyeztem el. Az oszlopok talpánál a támaszok miatt, a tetejénél pedig a felsőbb szintekről érkező terhek felvétele miatt szükséges. A másik elemet a lemez széléhez tettem, ahol a koncentrált kinematikai teher hat a modellre és ezen hatást közvetíti egyenletesen a lemezre. (Lásd: 19. ábra)

Az előbbi elemeket egy lapos négyszögletes hasáb segítségével adtam meg, melyek szélességei megegyeznek a kapcsolódó oszlop méreteihez, magassága pedig öt centiméter. Ezekre az elemekre statikai jellegű terhek hatnak. A másik ilyen kapcsolóelemre már kinematikai teher hat, melyet szét kell osztani egyenletesen a lemez teljes szélessége mentén. Ezért ez az elem egy négyszögletes hasáb és a négyszögletes gúla segítségével adtam meg. Az elem rövidebbik oldala a lemez vastagságával, a hosszabbik pedig az y raszter méretével egyezik meg. Magassága a gúla csúcsánál 10cm.



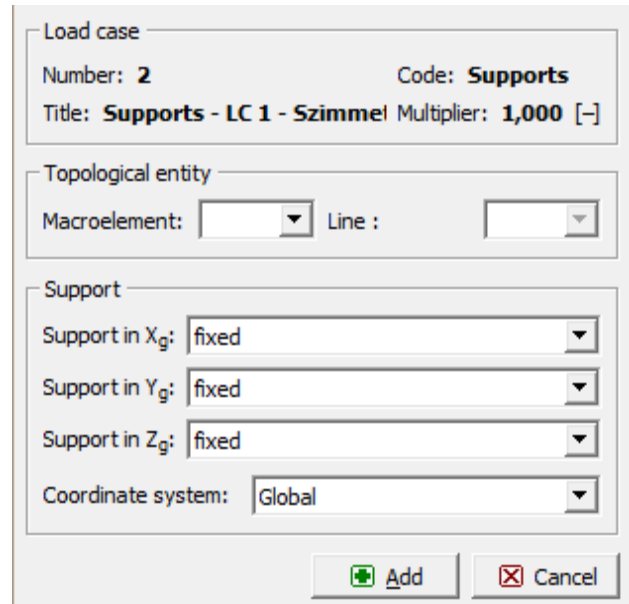
19. ábra: Megtámasztások

Támaszok:

Lévén, hogy a vizsgálatom arra irányul, hogy a függőleges és vízszintes terhek együttes hatására kialakuló feszültségeket vizsgálja, így két teher van definiálva a szerkezeten. Ebben a két esetben más-más megtámasztási kialakítást kell megadni. Az Atena programcsomagban teherlépcsőnként kell definiálni a terheket, az első öt teherlépcsőben kerül fel a szerkezetre a függőleges teher, majd tíz lépcsőben a vízszintes kinematikai teher.



20. ábra: Axis támasz megadás



21. ábra: Atena támasz megadás

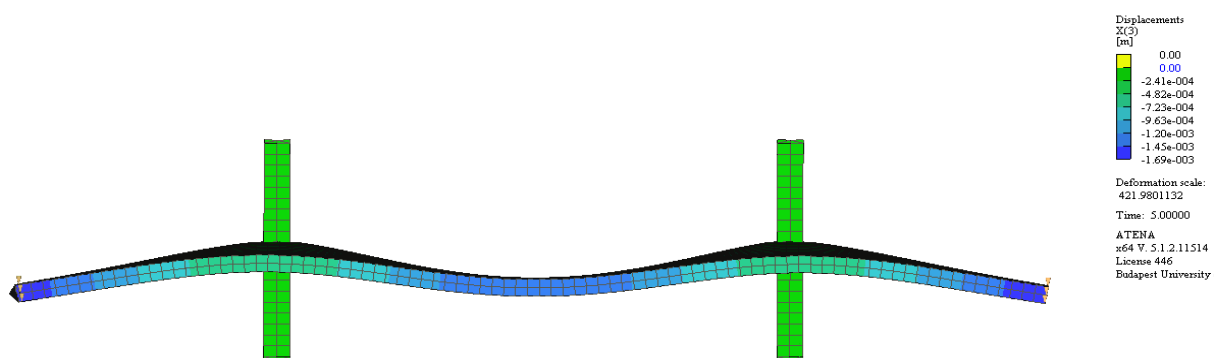
Az általam használt szoftverben, ellentétben az Axis végeelemes programmal nincs mód arra, hogy a megtámasztásoknál hat féle megtámasztási komponenst definiáljunk. Itt csak a 3 koordináta főirányt tudjuk blokkolni, vagy felszabadítani, ellentétben az Axissal, ahol egyszerűen megadhatók, hogy mely elfordulások legyenek letiltva, függetlenül az elmozdulásoktól.

Az elfordulások letiltása úgy lehetséges, hogy a fixálni kívánt felületre merőlegesen helyezünk el megtámasztást. Lényegében ez teszi szimmetrikussá a szerkezetet, mivel így a felület függőleges értelemben el tud tolni, de elfordulni, vagy a támasszal megegyező értelemben eltolódni nem képes. Ez a vízszintes teher definiálásánál okozott problémát, mivel az kinematikai terhet a lemez szélénél elhelyezett fix támasz leblokkolná.

Függőleges terhek:

Függőleges értelemben a lemezre csak önsúlyterhet helyeztem el öt teherlépcsőben, ami $1,25\text{kN/m}^2$ nagyságú terhet jelent teherlépcsőnként. Az oszlopokra lévén, hogy egy fiktív épületről van szó egy általam megválasztott teherértéket adtam meg, melyet az oszlop teherbírásának 70%-ra állítottam be. A kialakuló lehajlást egy mintán szemléltetem. (Lásd: 22.ábra). Itt a maximális lehajlás, kizárólag a függőleges terhekből keletkezik az 5. teherlépcső befejeztével, melynek értéke: $1,69\text{mm}$.

A megtámasztásokat szimmetrikusan alakítottam ki, tehát a lemez széleire merőleges felület menti támaszt adtam meg. Az oszlopok alján is hasonlóan jártam el.



22. ábra: Függőleges eltolódás

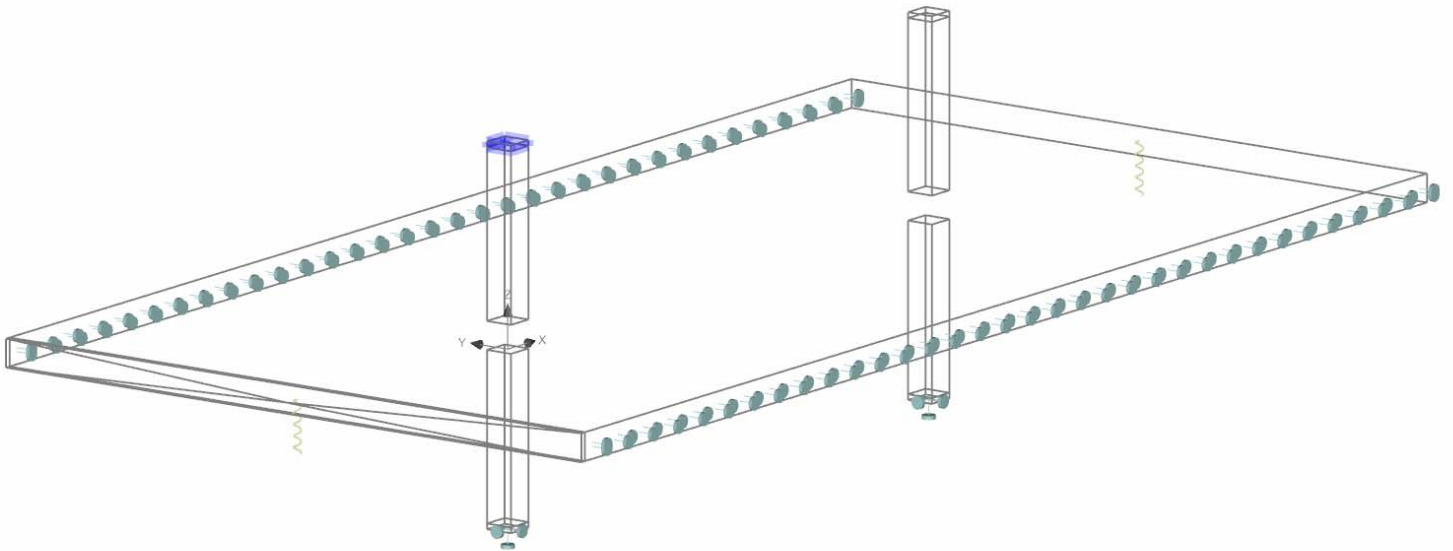
Vízszintes terhek:

A vízszintes terhek meghatározásánál figyelembevettem, hogy egy adott épület egy szintjének szabványosan mekkora eltolódás engedhető meg. Ez az érték $H/300$, ami azt jelenti, hogy a teljes megengedhető eltolódás 10mm , az egy teherlépcsőben elhelyezett teher értéke 1mm .

A megtámasztás ennél a teheresetnél az előzőtől eltérően lett kialakítva. Az oszlopok alján oly módon helyeztem el vonal menti megtámasztásokat, hogy a szerkezet képes legyen az y tengely körüli elfordulásokra. Így nem keletkezik ebben a pontban nyomaték, ahogyan egy valós szerkezet esetén sem keletkezne. A lemez x irányban futó széleire y irányú felületi támaszt adtam meg, ám az y irányban futó élekre ez nem volt kivitelezhető az előbbieken leírtak miatt.

Arra a megoldásra jutottam, hogy ezen a két szélen egyenértékű rugókat definiálok, melyek éppen akkora elmozdulást engednek meg, amekkora az akkor lenne, ha a szélen szimmetria lenne definiálva. Ezt a függőleges terhekből származó elmozdulások figyelembevétele alapján számoltam ki. (lásd: I. melléklet)

Ezzel a módszerrel az elmozdulásokat tekintve lényegében egyenértékű lesz a szerkezet a szimmetrikus modellel. A feszültségeloszlásban némi eltérés tapasztalható, ám megvizsgálva az eltérést arra jutottam, hogy a differencia nem mértékadó és az a vizsgálatomat nem befolyásolja negatívan. Az egyes modelleknél alkalmazott rugóerőket az előzőekben adtam meg. (Lásd: 14. ábra)



23. ábra: A megtámasztások

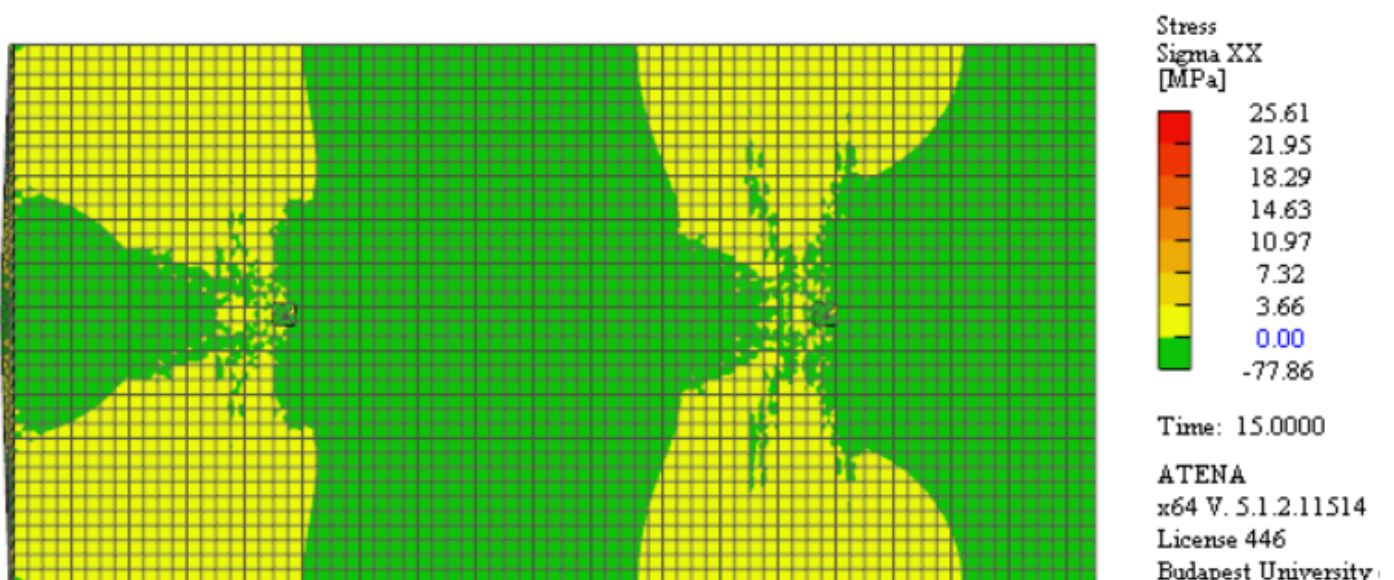
5. A numerikus vizsgálatok eredményei

Ebben a fejezetben a numerikus vizsgálatok eredményeit ismertetem. Bemutatom hogyan történt az együttdolgozó szélesség meghatározása az egyes modellek esetén.

A vízszintes teher hatására a lemezben a keresztmetszetek nem egyenletesen nyúlnak meg, ennek köszönhetően a hosszirányú normálfeszültségek eloszlása sem lesz kiegyensúlyozott. Együttdolgozó szélességen azt a lemezsávot értjük, melyen a vízszintes teher hatására kialakuló feszültségek eloszlása közel egyenletes.

Az együttdolgozó szélesség meghatározása manuálisan történt, pontossága nagyságrendileg fél raszter, 8 cm méretű. A kapott eredmények, a vizsgálat módja miatt egzaktak nem tekinthető, pontos értékének meghatározására további vizsgálatokat igényelne. A következőkben közölt értékek, grafikonok az én véleményem szerint kialakuló együttdolgozó szélességeket mutatják be.

A modell elmozdulásainak mérésére monitor pontokat helyeztem el. A kinematikai teher bevezetésénél egy erőmérőt, mely [MN] mértékegységű erőt, míg a lemezen egy elmozdulás mérőt, mely [m] dimenzióban adja meg, hogy a lemez adott erőre, mekkora vízszintes eltolódást végez. Az értékek az analízis során folyamatosan nyomon követhetőek, akár egy valós kísérlet során. Ezen adatok segítségével erő-eltolódás grafikont szerkesztettem, mely megmutatja, hogy teherlépcsőnként mekkora x irányú eltolódást végez a modell.

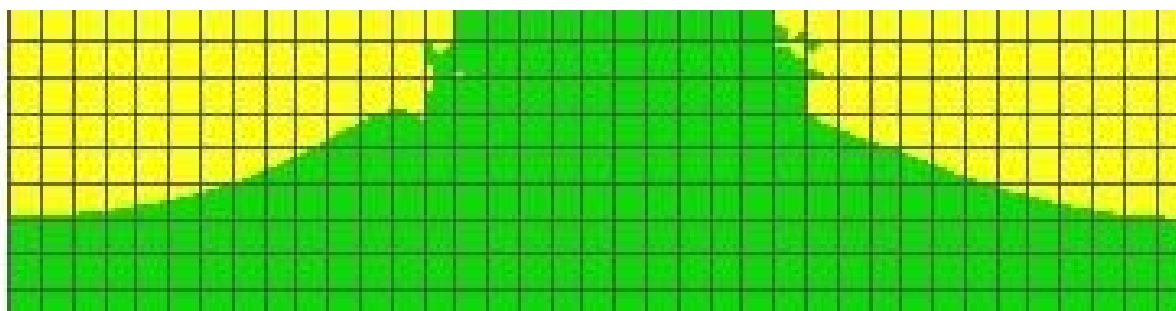


24. ábra: 6x6: Normálfeszültség eloszlás

5.1 6x6-os raszter kiosztás

Elsőként a teljes szimmetriával rendelkező modell futtatási eredményeit mutatom be, melynél az oszlok kiosztása mind két irányban hat méterenként történt. A későbbiekben erre a modellre hivatkozom "kiindulási modellként". Vizsgálatom tárgyát a hosszirányú normálfeszültségek képezik, melyek a programban az eredmények fül alatt, "szigma XX" néven találhatók.

Az együttdolgozó szélességek meghatározása a lemez felületén kirajzolódó feszültségkép alapján történt. Látható, hogy a feszültség valamilyen görbét ír le, mely szimmetrikus az oszlopok által kijelölt egyenesre. Ez alapján meghatároztam az együttdolgozó szélesség felét, melynek értéke az oszlopok által kijelölt egyenesre és a görbe inflexiós pontja közti távolsággal felel meg. Az inflexiós pontok távolsága szintén megadja az együttdolgozó szélességet. (Lásd:25. ábra)

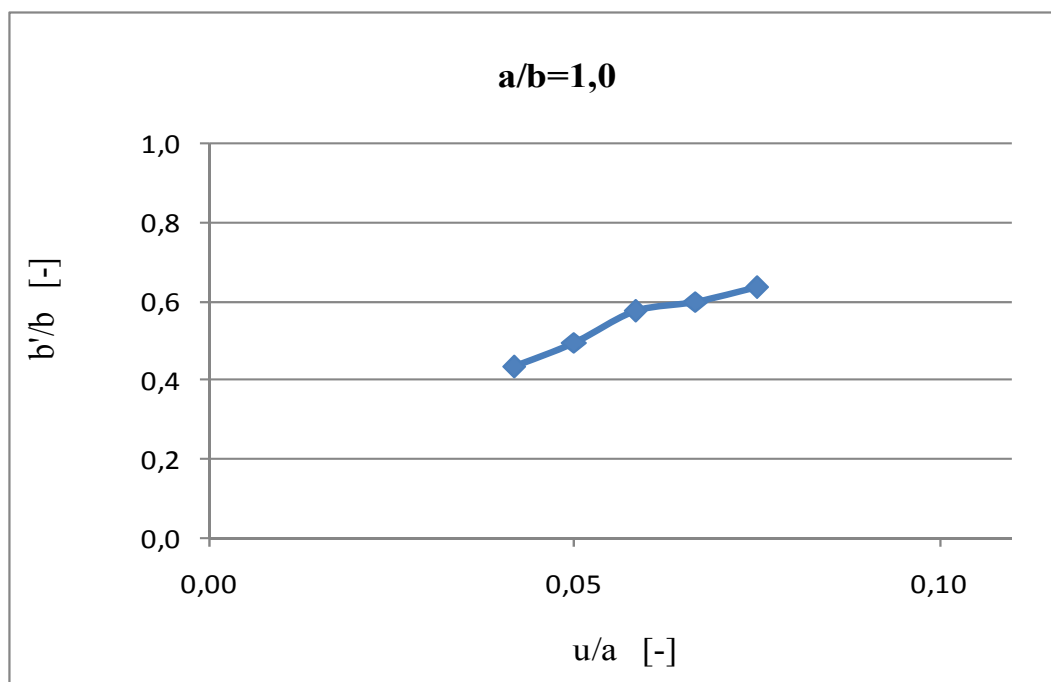


25. ábra: Inflexiós pont

A grafikonok jelölése a raszterek arányszámával történt (a/b). Az egyik változó az oszlopok méretének és oszlopok x irányú távolságának az arányszáma (u/a), a másik pedig az együttdolgozó szélesség és a teherre merőleges irányú oszloptávolság hányadosával adható meg (b'/b). A kapott eredményeket mutatja a 26. ábra. A grafikon szerkesztése során öt érték állt rendelkezésemre, az optimális megoldás olyan görbeillesztés lett volna, mely nem feltétlenül illeszkedik az adott pontokra, de azok tendenciájának alakulását megmutatja.(Lásd: 4. ábra) Ezt a részt kihagytam, mert csak olyan függvények illesztésére volt lehetőségem, melyek fals eredményekre vezettek volna.

u [m]	u/a [-]	b' [m]	b'/b [m]
25	0,042	2,600	0,433
30	0,050	2,960	0,493
35	0,058	3,440	0,573
40	0,067	3,600	0,600
45	0,075	3,800	0,633

26. ábra: 6x6: Együttdolgozó szélesség összefoglaló táblázat



1. grafikon: 6x6: Együttdolgozó szélesség

Az ATENA Studioban lekérdezhetőek további adatok is az analízissel kapcsolatban. Most a monitor pontok által közölt adatokat ismertetem.

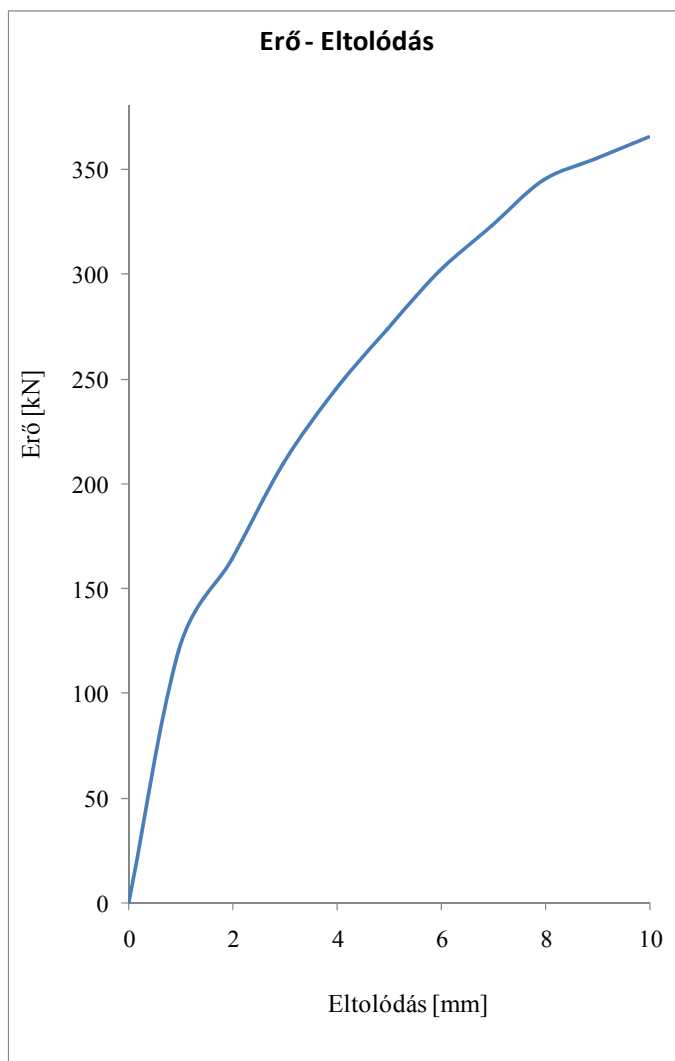
Az eredmények részletezése során minden pontban csak a 25 centiméteres oszlop él hosszúságú modellt közlöm és hasonlítom össze.

A program egy adatsort ad meg, melyből megalkotható a szerkezet erő-eltolódás diagramja. A dolgozatomban a teherlépcsőnként bekövetkező elmozdulásokat tüntetem fel, a teher bevezetésénél keletkező erő függvényében. A 27. ábra azt mutatja, hogy az egyes teherlépcsők esetén mekkora eltolódást végez a szerkezet. (Lásd: 2. grafikon)

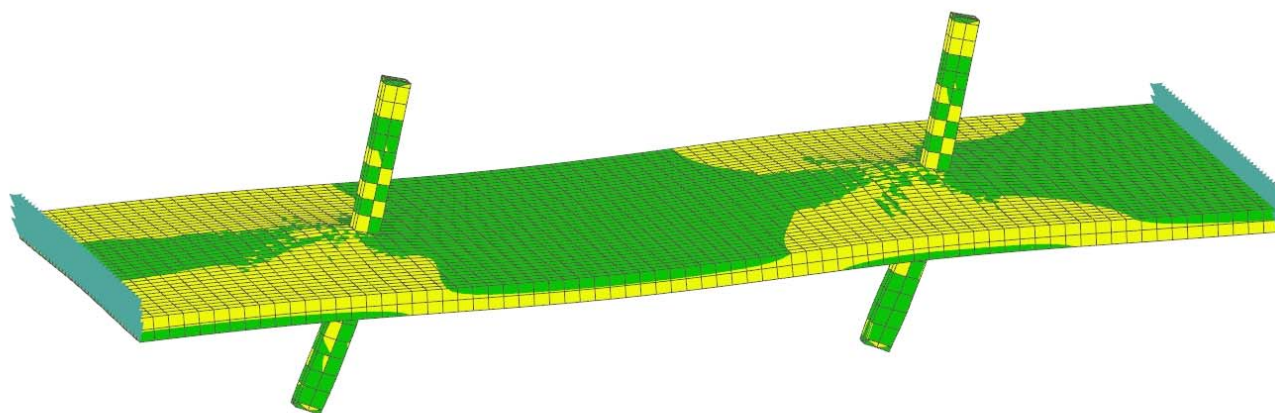
A grafikonokon látható, hogy a szerkezet kezdetben nagy merevséggel rendelkezik (126,05 kN/m) ám ez az eltolás mértékével fokozatosan csökken. Lévén, hogy a szerkezeten működtetett teljes kinematikai teher egy centimétert tesz ki, a szerkezet nem megy tönkre, a modell akár további terhelést is képes lenne elviselni. A teljes eltolódáshoz tartozó erő értéke 365,5 kN.

	0.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
Erő [kN]	0	121	163,8	209,7	245,2	274	301,1	322,8	344,5	355	365,5
Eltolódás [mm]	0	0,96	1,96	2,96	3,96	4,95	5,95	6,95	7,94	8,95	9,96

27. ábra 6x6 u25: Erő - Eltolódás adatsor



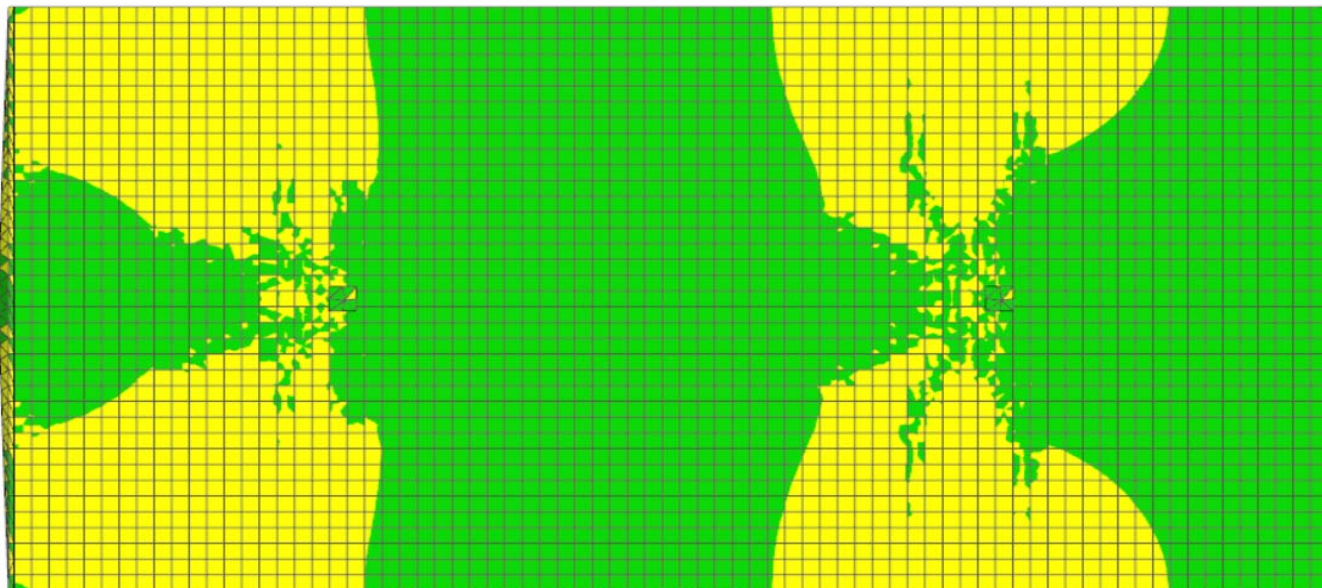
2. grafikon: 6x6 u25: Erő - Eltolódás diagram



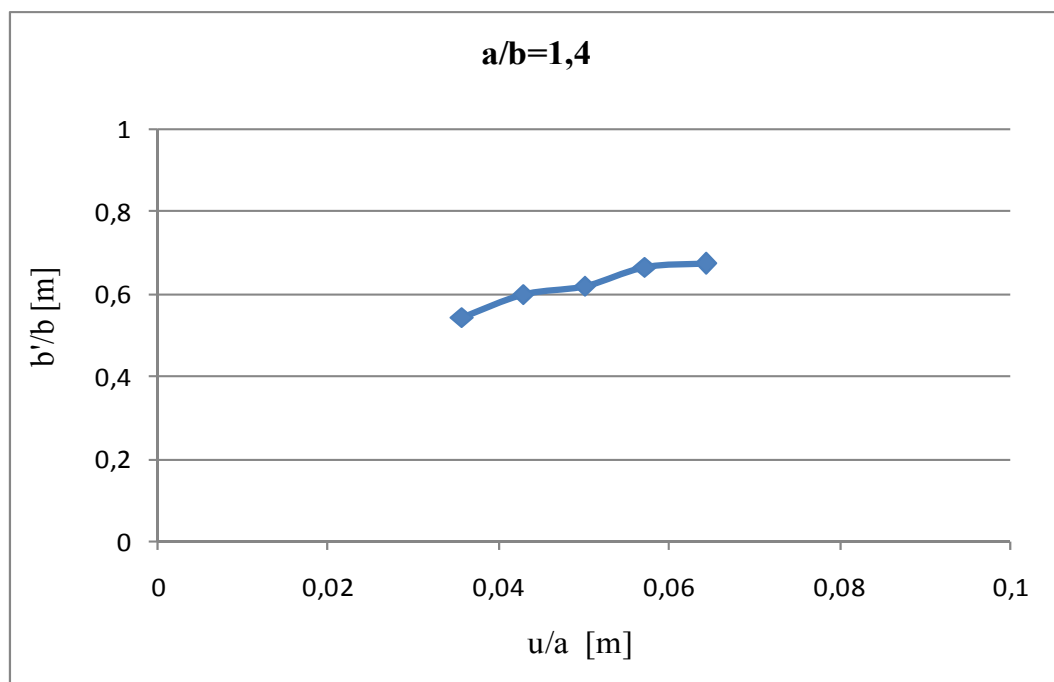
28. ábra: 6x6: Perspektíva

5.2 7x5 -ös raszter kiosztás

A második eset, melyet vizsgáltam a 7x5-ös raszter kiosztású modell. Itt is az előzőhöz hasonló értékeket vizsgáltam. Ennél a modellnél megfigyelhető, hogy összességében kisebb együttdolgozó szélességek alakultak ki, mint az előbbi példánál. Ennek oka a nagyobb oszloptávolság a terhelés irányában. (Lásd: 29. ábra) A közepes eltérés körülbelül 10%.



29. ábra 7x5 u25 Normálfeszültség eloszlás



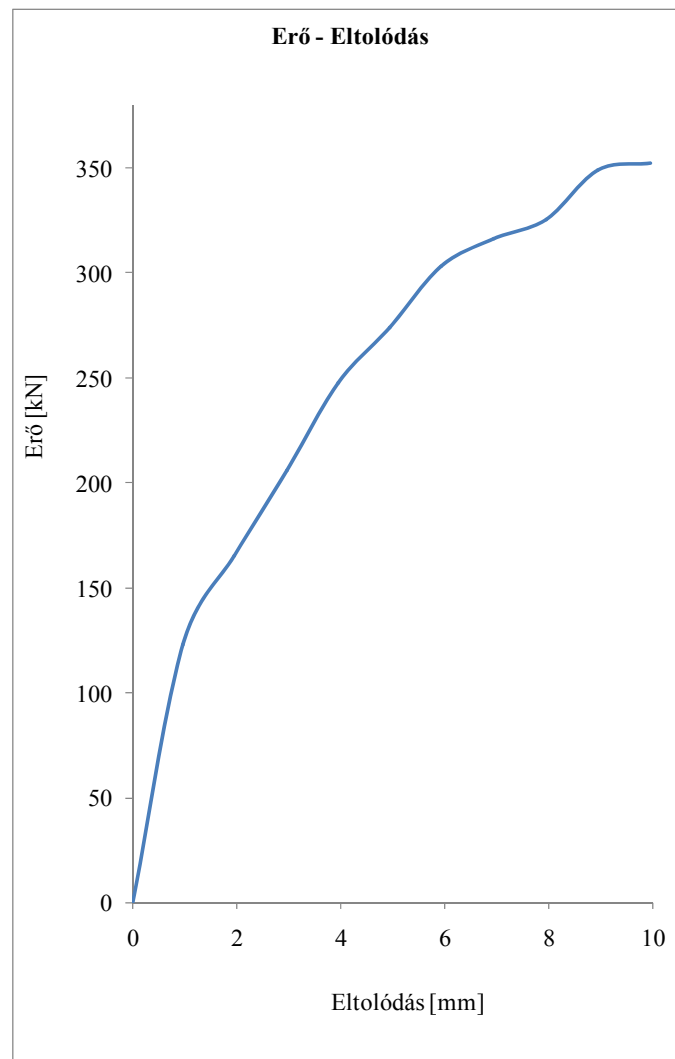
3. grafikon: 7x5: Együttdolgozó szélesség

u [m]	u/a [-]	b' [m]	b'/b [m]
25	0,04	2,72	0,54
30	0,04	3,00	0,60
35	0,05	3,10	0,62
40	0,06	3,32	0,66
45	0,06	3,36	0,67

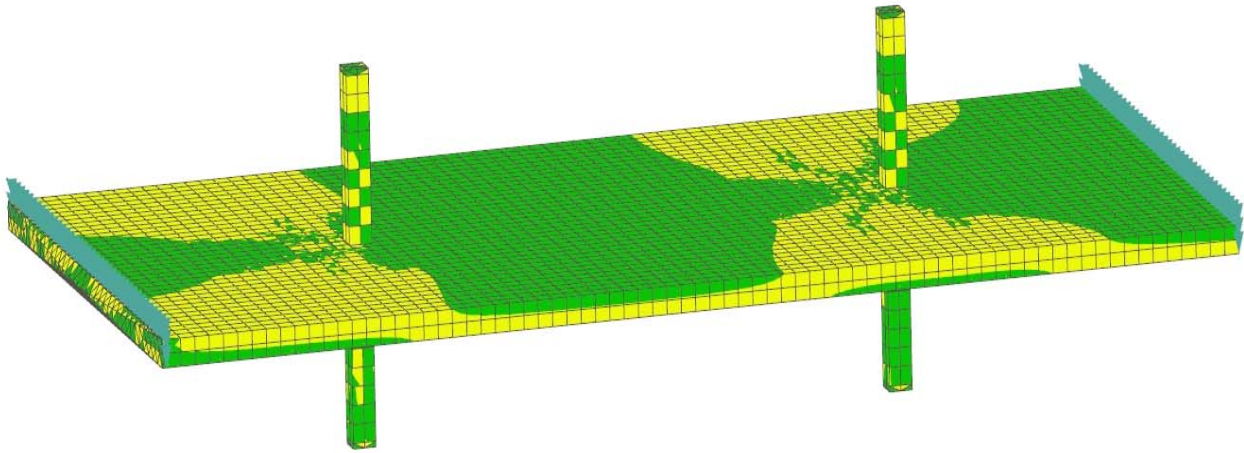
30. ábra 7x5 Együttdolgozó szélesség összefoglaló táblázat

Az erő - eltolódás diagramot tekintve az elvárásoknak megfelelően, nagy differencia nem mutatkozik az előző esethez képest. A kezdeti szakaszon nagy merevség olvasható le, melynek értéke 128 [kN/mm], ez az érték a berepedés után csökken le jelentősen. A maximális eltolódás létrejöttéhez szükséges erő értéke 352,6 kN, mely minimális csökkenést jelent az előző modellhez képest.

A másik látható különbség a két grafikon között, hogy ellentétben az első esettel a grafikon több töréssel is rendelkezik, főként a későbbi teherlépcsőknél.



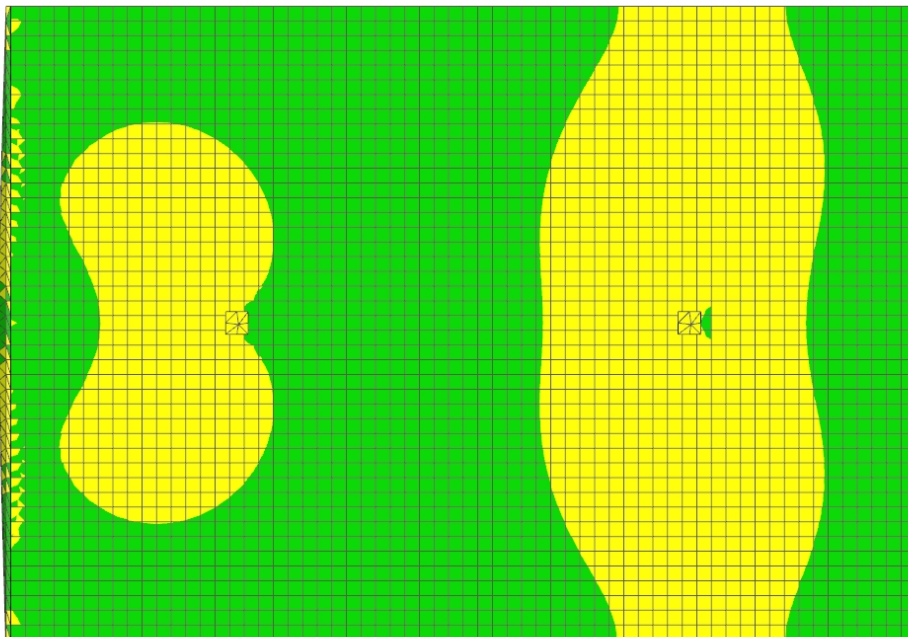
4.grafikon: 7x5 u25: Erő - Eltolódás diagram



31. ábra: 7x5: Perspektíva

5.3 5x7 -es raszter kiosztás

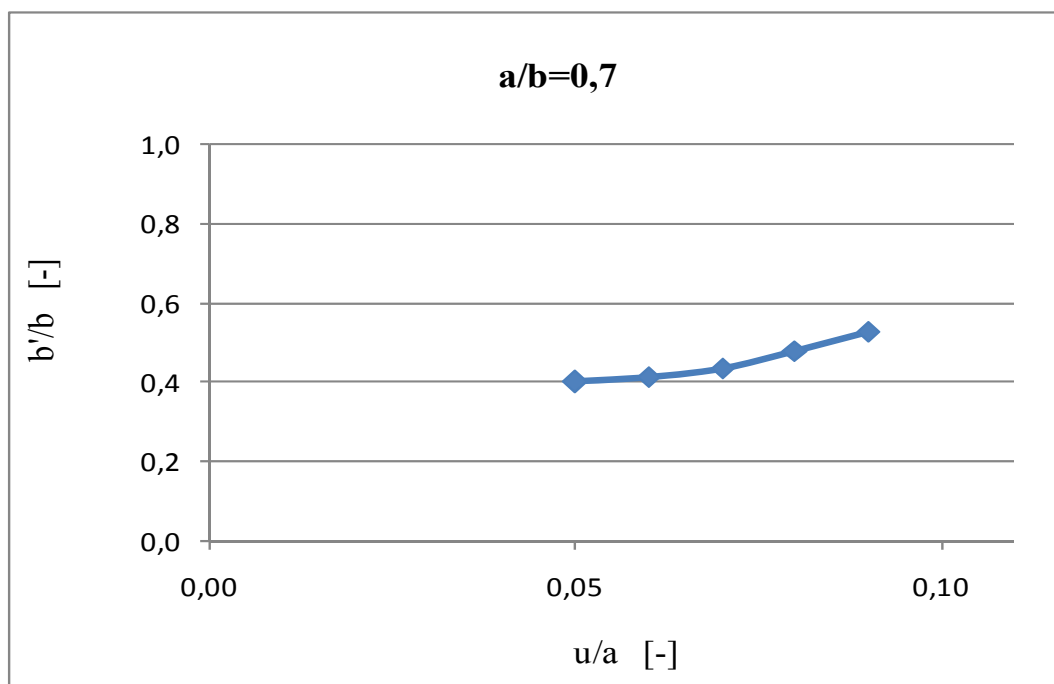
A harmadik eset, melyet vizsgáltam a 5x7-es modell. Szintén az erő-eltolódás diagramot, valamint az x-x irányú feszültségeket vizsgáltam. A kialakuló feszültségek lényegesen eltérnek az eddigiektől. Ennek oka a feszítávolságokban keresendő. Az együttműködő szélességek az alap modellhez képest szintén csökkennek, értékeit a 33. ábra mutatja.



32. ábra 5x7 u25 Normál feszültség eloszlás

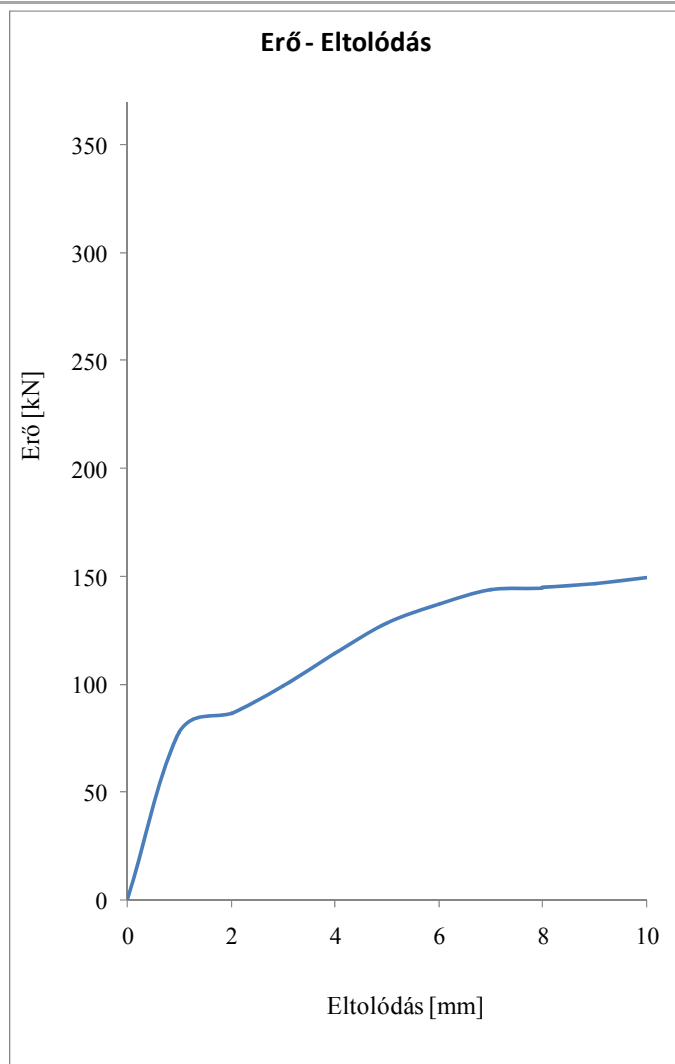
u [m]	u/a [-]	b' [m]	b'/b [m]
25	0,05	2,80	0,40
30	0,06	2,88	0,41
35	0,07	3,04	0,43
40	0,08	3,36	0,48
45	0,09	3,68	0,53

33. ábra 5x7 Együttdolgozó szélesség összefoglaló táblázat

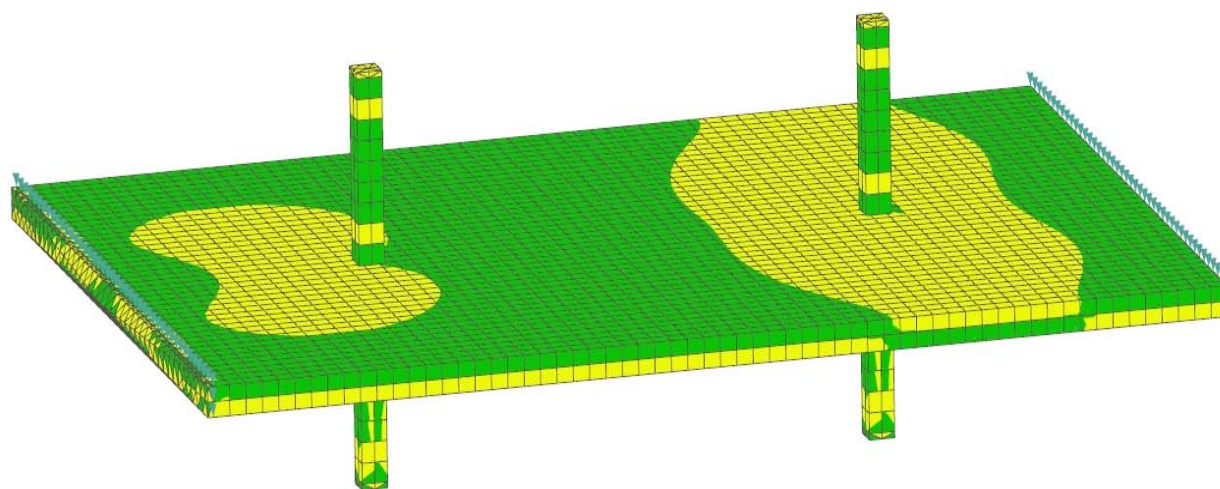


5. grafikon: 5x7: Együttdolgozó szélesség

A kapott erő eltolódás diagramról leolvasható, hogy a kezdeti merevség közel felére visszaesik (77,6 kN/m), az előzőhöz képest ennél a kialakításnál. Továbbá a maximálisan keletkező erő értéke is hasonlóképpen lecsökken. (149,6 kN) Az arányos ábrázolás miatt láthatóan nagy eltérés mutatkozik a korábbi hasonló diagramokkal szemben, a görbe, karakterisztikáját tekintve viszont hasonló az előzőekhez.



6.grafikon: 5x7 u25: Erő - Eltolódás diagram

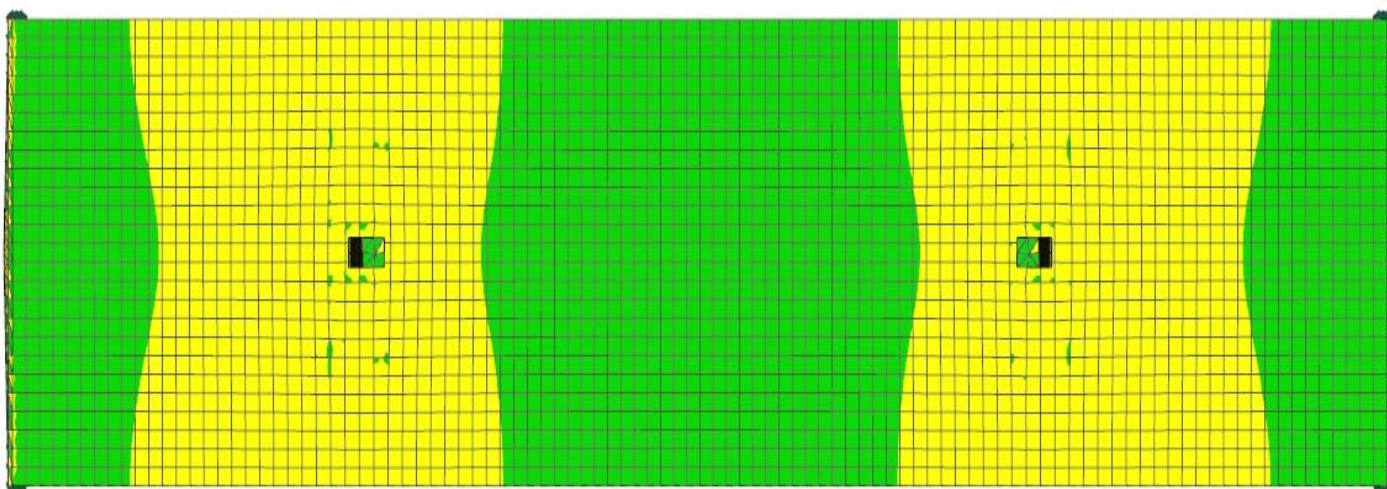


34. ábra: 5x7: Perspektíva

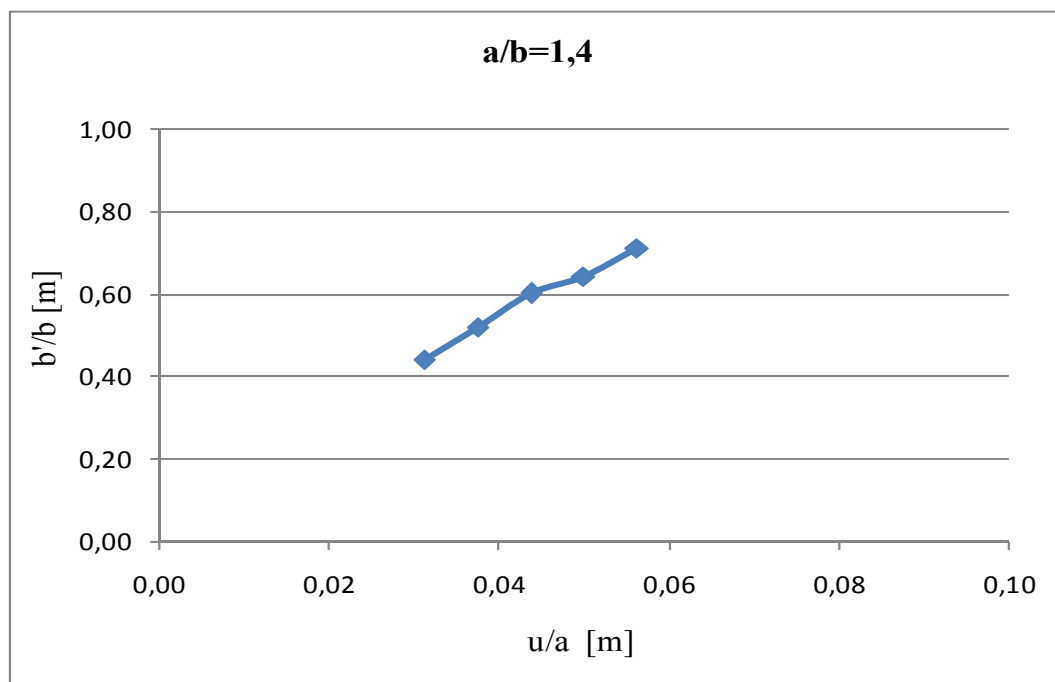
5.4 8x4 -es raszter kiosztás

Az együttdolgozó szélességek az oszloptávolság növekedésével továbbra is csökken. A kiindulási modellhez képest körülbelül 30%-os csökkenés mutatható ki. Ezen sajátossága a jelenségnek az oszlopok méretétől függetlenül érzékelhető.

A feszültségek eloszlásában szembeötlő a "szabályosság". Ennek oka az lehet, hogy az általam működtetett terhelésre a szerkezet már nem funkcionál kétirányban teherviselő szerkezetként.



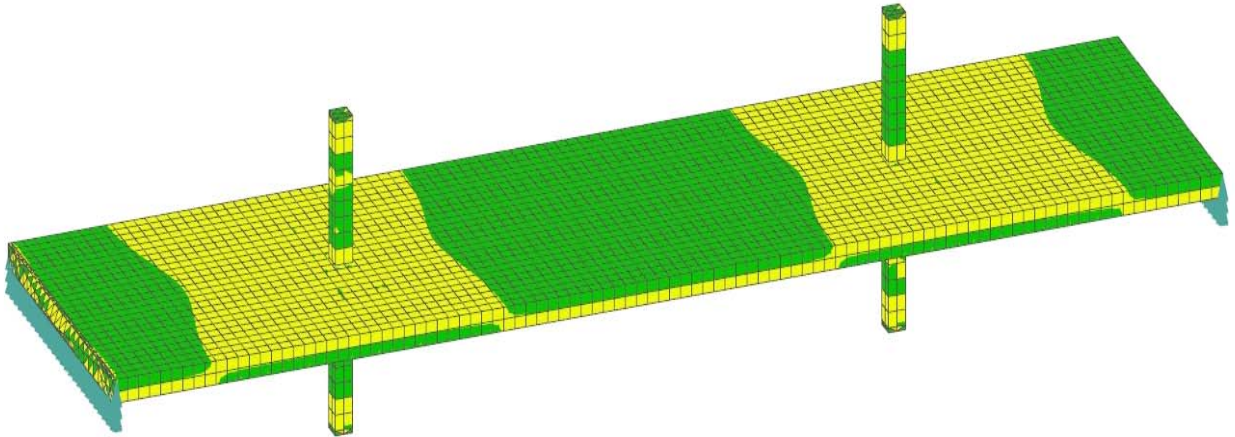
35. ábra: 8x4 u25 Normálfeszültség eloszlás



7. grafikon: 8x4: Együttdolgozó szélesség

u [m]	u/a [-]	b' [m]	b'/b [m]
25	0,03	1,76	0,44
30	0,04	2,08	0,52
35	0,04	2,40	0,60
40	0,05	2,56	0,64
45	0,06	2,84	0,71

36. ábra 8x4 Összefoglaló táblázat

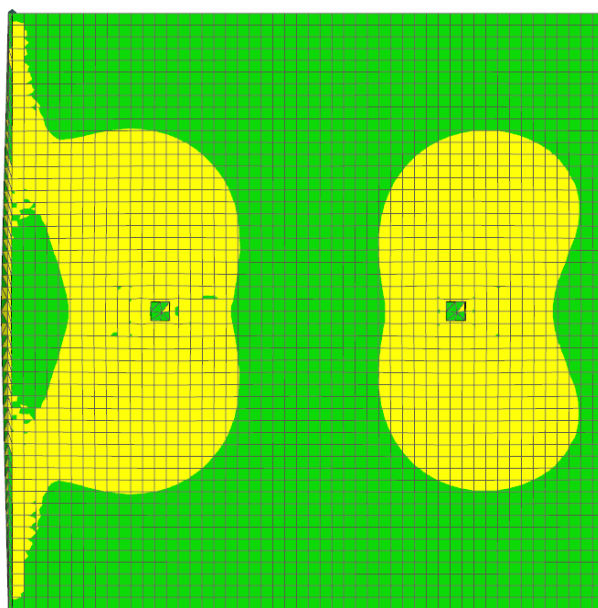


37. ábra: 8x4: Perspektíva

5.5 4x8 -as raszter kiosztás

Utolsóként a 4x8 -as modellt mutatom be, ennek a különlegessége, hogy az előzővel megegyezően az oszlopok egyik irányban kétszer olyan távolságonként vannak elhelyezve. Az együttdolgozó szélesség meghatározása komplikált, nem kézenfekvő.

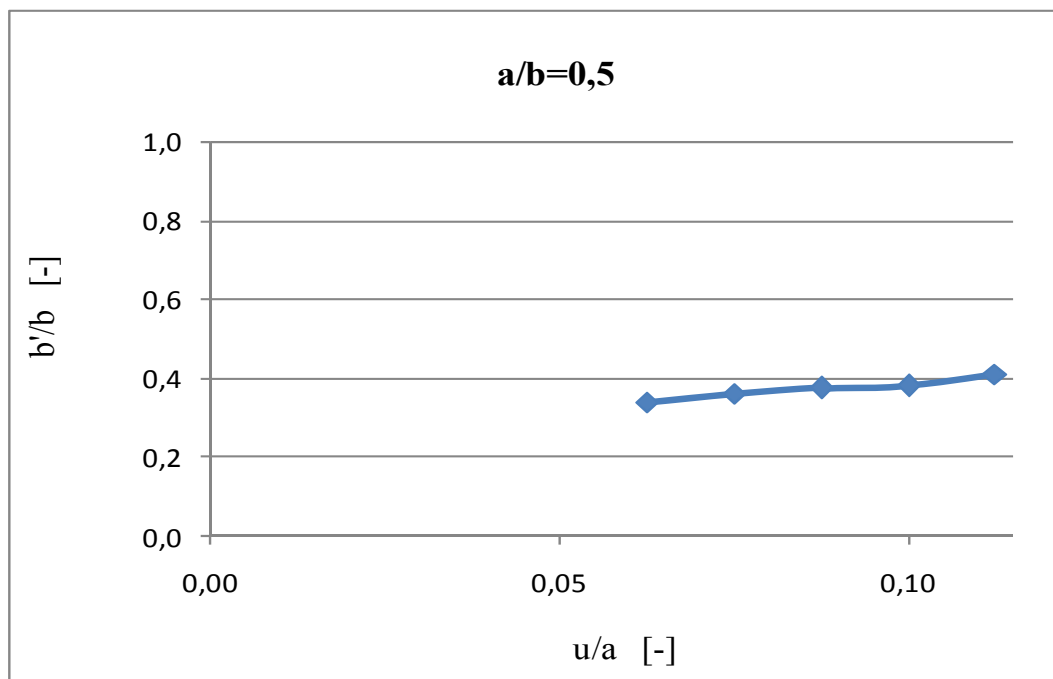
A meghatározott együttdolgozó szélességek átlagosan 14 százalékos eltérést mutatnak a kiindulási modellhez képest. Értékeit a 39. ábra tartalmazza.



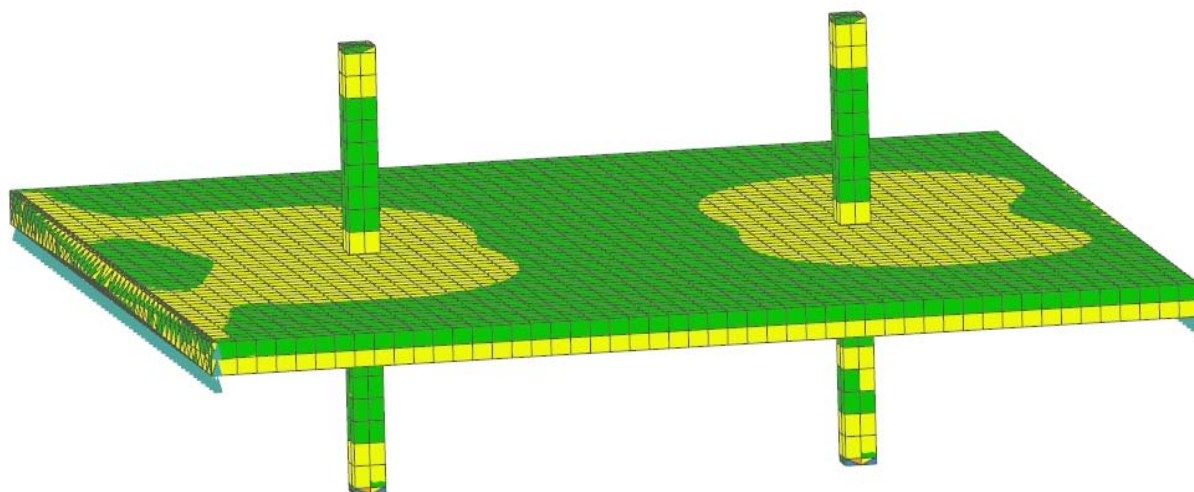
38. ábra: 8x4 u25 Normál feszültség eloszlás

u [m]	u/a [-]	b' [m]	b'/b [m]
25	0,06	2,72	0,34
30	0,08	2,88	0,36
35	0,09	3,00	0,38
40	0,10	3,04	0,38
45	0,11	3,28	0,41

39. ábra 4x8 Összefoglaló táblázat



8. grafikon: 8x4: Együttműködő szélesség

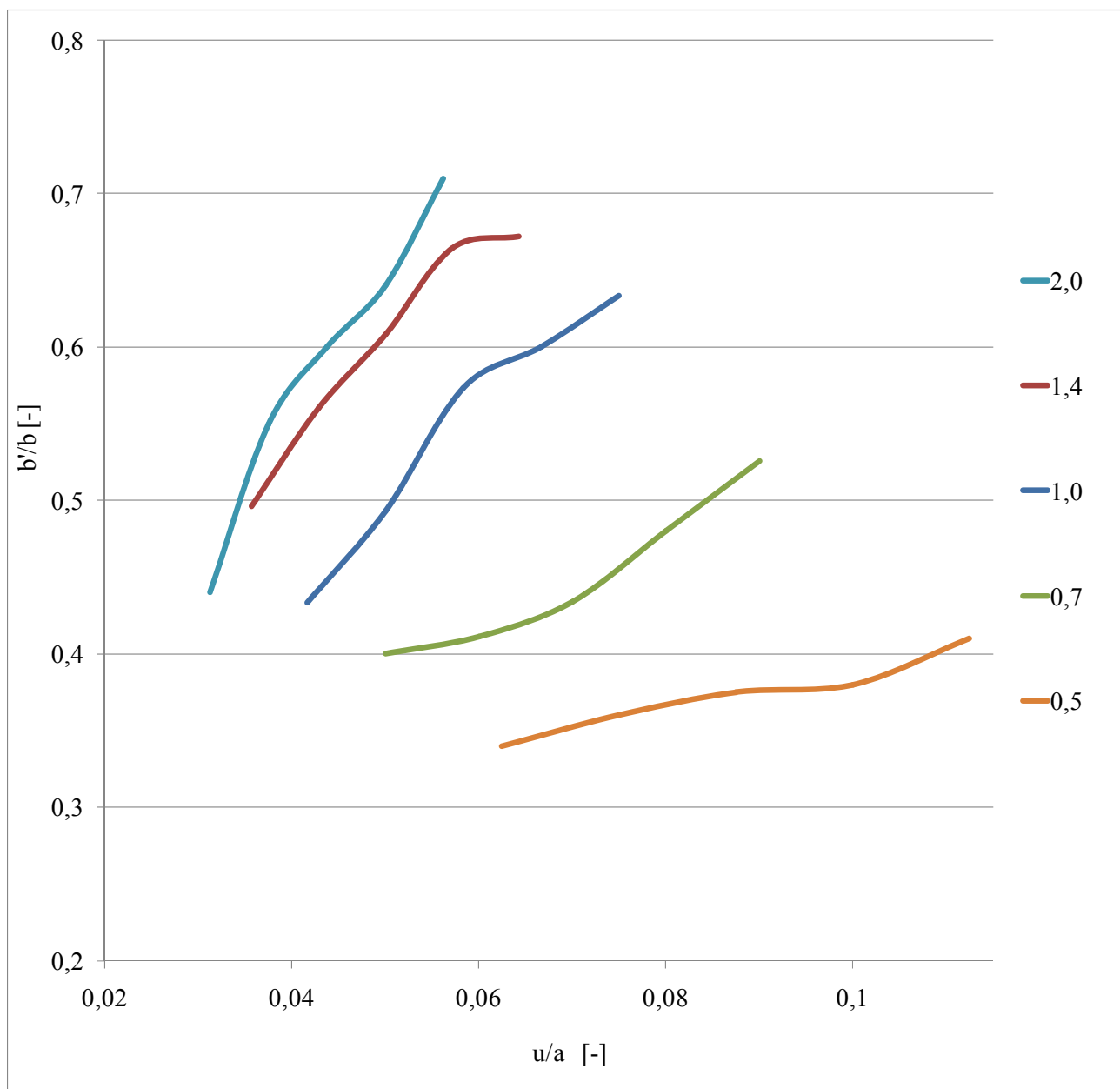


40. ábra: 4x8: Perspektíva

5.6 Összegzett grafikon értelmezése, értékelése

A dolgozatom elején célként tűztem ki egy olyan grafikon összeállítását, mely segítségével meghatározható egy síklemezes födém együttdolgozó szélessége, amennyiben a szerkezeten vízszintes terheken túl, függőleges irányú erők is hatnak. Ezen grafikonon ebben a részben közlöm és levonom a szükséges következtetéseket belőle.

Az előző fejezetekben közölt együttdolgozó szélességek egy diagramon való ábrázolásával megkaptam a kívánt ábrát, melyet a 9. grafikonon reprezentál. Értékeit a III. melléklet tartalmazza részletesen. Lényegben ez prezentálja a dolgozatom eredményeit.



9. grafikon: Összegzett együttdolgozó szélesség

A mellékletben közölt táblázat minden sora egy grafikont ad meg, melyeket az előzőekben már közöltem. Hiányossága annyi a 3.2-es fejezetben ismertetettekkel ellentétben, hogy 3 sora hiányzik. Ez azért van, mert a dolgozatom beadásakor a kimaradt adatokkal még nem rendelkezem, a numerikus modellek futtatása még nem történt meg. A feladatom időtervezésénél próbáltam úgy eljárni, hogy a lényegesebb számítások elkészüljenek, ezen sorokat a táblázat tartalmazza.

A IV. mellékletként csatolom azt a grafikont, mely jobban összevethető a csak vízszintes teherből keletkező együttdolgozó szélességgel.

Grafikon használata:

Elvi szinten a grafikon használható lehet egy valós szerkezet modellezése során. Azt persze, hogy a kapott eredmények az adatok jelenlegi állása szerint helyesek lesznek, túlzás lenne kijelenteni. Ennek ellenére bemutatom, hogyan lehetne használni a grafikont, ha mégis ilyen irányú elhatározás születne.

Első lépésként meg kell határozni a tervezet síklemezünk rasztereinek kiosztását. A példa kedvéért legyen ez egy 6x6-os síklemez. Ez azt jelenti, hogy a 9. grafikonon közölt görbék közül a 1,0-ás görbét vennénk figyelembe.

Ezt követően megadjuk, hogy mekkora legyen az oszlopunk keresztmetszeti mérete és a lemezünk vastagsága, melyeket most rendre 30 és 25 centiméteresnek választok. Így megkapjuk, hogy a grafikon vízszintes tengelyén, $u/a=0.05$ pontnál kell egy függőleges vonalat húznunk, ami metszi az 1,0-ás görbét.

A görbén keletkezett metszéspontból vízszintes irányban elmetsszük a grafikon függőleges tengelyét, ahol azt kapjuk, hogy a tengely 0,49-nél kerül elmetzésre.

Tehát az együttdolgozó szélesség és a terhelés irányára merőlegesen elhelyezkedő oszlop távolság aránya 0,49 lesz, ebből pedig megkapjuk, hogy az együttdolgozó szélesség 2,94 méteres.

Ezen adat, valamint a 25 centiméteres lemezvastagság alapján kiszámíthatjuk az egyenértékű gerendánk merevségét, mellyel folytathatjuk tovább a vizsgálatunkat.

6. Összefoglalás

Dolgozatom fő célja az volt, hogy egy vasbeton síklemezes födémét vizsgáljak a vízszintes terheken túl, függőleges hatásokat is figyelembevéve. Ennek keretén belül különböző geometriai kialakítású modelleken numerikus vizsgálatot végeztem, meghatároztam az együttdolgozó lemezszélességeket és azokat a dolgozatom végén grafikonok formájában közöltem.

Első lépésként bemutattam a magas épületeket, azok funkcióját, szerkezeti kialakításait. Részletesen foglalkoztam a pontonként alátámasztott síklemezes födémekkel, azok számításainak módszereivel mind vízszintes, mind függőleges teherre való méretezésének vonatkozásában. Bemutattam a dolgozatomhoz leginkább kapcsolódó anyagmodelleket, valamint a végeelemes módszer alapvető ismérveit. Majd az eddig felvázolt témához kapcsolódóan bemutattam a dolgozatomban végzendő vizsgálatot.

A bevezetést követően meghatároztam a célt, melyet el szerettem volna érni. Mégpedig azt, hogy különböző geometriai kialakítású modelleken numerikus vizsgálatokat végezve, vízszintes és függőleges terheket figyelembevéve meghatározzam az együttdolgozó lemezszélességeket.. A kapott eredményeket pedig egy grafikonon ábrázoljam.

A cél ismertetése után bemutattam az általam vizsgált fiktív szerkezetet. Meghatároztam annak geometriai kialakítását, felhasznált anyagmodelleket, megtámasztásokat, terheket és a végeelem felosztást egyaránt. Továbbá áttekintést adtam az ATENA programcsomag kapcsán.

A kapott eredményeket raszter kiosztásonként vizsgáltam. Meghatároztam és ábrázoltam az együttdolgozó szélességeket, valamint felrajzoltam a szerkezetek erő - eltolódás grafikonjait is.

Utolsó lépésként az előzőekben megkapott eredményeket egy grafikonon ábrázoltam és vázlatosan leírtam annak használatát.

7. További lehetőségek a témában

A továbbiakban néhány, a témát érintő kutatási, vizsgálati irányt szeretnék megadni, mellyel esetlegesen érdemes lehet foglalkozni a későbbiekben. A témák alkalmasak lehetnek egy újabb, általam is fontolgatott TDK dolgozat keretén belüli vizsgálatra is.

- Vasbeton síklemez, csak vízszintes teherre történő vizsgálata és ez alapján együttdolgozó szélességek meghatározás
- Vasbeton síklemez függőleges és vízszintes hatásokra történő vizsgálata, majd a kialakuló feszültségek egzakt meghatározásával az együttdolgozó lemezszélesség megadása
- Együttdolgozó szélességek összehasonlítása és értékelés abban a két esetben, mikor csak vízszintes teher hat a modellen, valamint mikor vízszintes és függőleges is.
- Egyéb további vizsgálatok lehetnek a ciklikus teherre történő vizsgálatok, valamint a feszített vasbeton lemez vizsgálata

8. Felhasznált irodalom

8.1 Nyomtatott források

- [1] Farkas György: Magasépítési Vasbetonszerkezetek
Műegyetemi Kiadó - 2007
- [2] Haris István: Magasépítési Vasbetonszerkezetek - Előadásjegyzet
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem - 2016
- [3] Haris István - Roszevák Zsolt:
Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata
Újság cikk - Vasbetonépítés 2017/1. -2017
- [4] Roszevák Zsolt: Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata-
TDK dolgozat - 2015
- [5] Roszevák Zsolt: Vasbeton szerkezetű épület viselkedésének vizsgálata különböző
numerikus modellezési módszerekkel - MSc. Diplomamunka - 2016
- [6] Haris István - Roszevák Zsolt:
Comparison of different models on different cast in situ RC joints -
Újságcikk- 2017
- [7] Bódi István - Farkas György
Vasbeton Lemezek - Oktatási segédlet - 2001
- [8] Kalinszky Sándor - Szilágyi György - Kurutzné Kovács Márta:
Szilárdságtan - Nemzeti Tankönyvkiadó - 2000
- [9] Elemi Szilárdságtan - Előadásjegyzet
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem - 2015
- [10] Körössi Éva - Szalánczi Gábor
Épülettervezése - Egyetemi jegyzet - 1994
- [11] Deák György - Draskóczy András - Dulácska Endre - Kollár László -Visnovitz György:
Vasbeton Szerkezetek - Tervezés az Eurocode alapján - 2016
- [12] Hortobágyi Zsolt: Tartók Statikája II. - Előadásjegyzet
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem - 2017

8.2 Internetes források

- [A] <http://www.erdekesvilag.hu/a-csodalatos-gizai-piramisok/>
2017.10.20.
- [B] <http://www.burjkhalifa.ae/en/the-tower/gallery/burj-khalifa.aspx>
2017.10.15.
- [C] <https://www.youtube.com/watch?v=yyaEIf2ok6I>
National Geographic - Mega Structures
- [D] <http://epiteszforum.hu/puskas-ferenc-stadion-az-uj-nemzeti-stadion>
2017.10.21. Fotó: Látványterv
- [E] <http://www.origo.hu/foto/multimedia/20150716-elhagyott-epuletek-budapest.html>
2017.10.21. Fotó: Polyak Attila - Origo
- [F] <http://indafoto.hu/grafur/image/7997529-aba5ee13>
2017.10.20. Fotó: GrafUr
- [G] http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/vegeselem_modszerek/book.html#ch-I
2017.10.23.
- [H] http://www.cervenka.cz/assets/files/atena-pdf/ATENA_Theory.pdf
2017.10.18.
- [I] http://www.mogi.bme.hu/TAMOP/vegeselem_modszerek/ch04.html
2017.10.31. Szerzők: Tamás P. - Bojtos A. - Décsei-Paróczy A. - Fekete R.

9. Mellékletek

I.-es melléklet - Rugóerő meghatározása

Fesztávolság:	$L := 6\text{m}$
Lehajlás értéke a szimmetrikus szerkezeten:	$e := 0.00106\text{m}$
Beton rugalmassági modulusa:	$E_{\text{cm}} := 31\text{GPa}$
Beton hatásos alakváltozási tényezője:	$E_{\text{c,eff}} := 9.3\text{GPa}$
Acél rugalmassági modulusa:	$E_s := 200\text{GPa}$
Beton és acél feszültség aránya:	$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{\text{c,eff}}} = 21.505$

A vizsgálat 1. feszültségi állapotban történik

Lemez egységnyi széles részének vizsgálata:

Betonacél átmérője:	$\phi_s := 12\text{mm}$
Lemez szélessége:	$b := 1000\text{mm}$
Lemez vastagsága:	$v := 25\text{cm}$
Felső vasak egymástól mért távolsága:	$s_{\text{f1}} := 400\text{mm}$
Felső vasak darabszáma az egységnyi lemezben:	$n_1 := \frac{b}{s_{\text{f1}}} = 2.5$
Alsó vasak egymástól mért távolsága:	$s_{\text{f2}} := 200\text{mm}$
Alsó vasak darabszáma az egységnyi lemezben:	$n_2 := \frac{b}{s_{\text{f2}}} = 5$
Felső vasak keresztmetszeti területe:	$A_{\text{s1}} := n_1 \frac{\phi_s^2 \cdot \pi}{4} = 282.743 \text{ mm}^2$
Alsó vasak keresztmetszeti területe:	$A_{\text{s2}} := n_2 \frac{\phi_s^2 \cdot \pi}{4} = 565.487 \text{ mm}^2$
A betonacél összterülete:	$A_{\text{s,össz}} := A_{\text{s1}} + A_{\text{s2}} = 848.23 \cdot \text{mm}^2$
Az felső vasak tengelytávolsága a felső szélső száltól:	$d_1 := 38\text{mm}$
Az alsó vasak tengelytávolsága a felső szélső száltól:	$d_2 := 212\text{mm}$

Inercia meghatározása:

Ideális keresztmetszeti terület: $A_I := b \cdot v + (\alpha_e - 1) \cdot A_{s.össz} = 0.267 \text{ m}^2$

Statikai nyomatéka felső szélső szárlra:

$$S_I := b \cdot v \cdot \frac{v}{2} + A_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot d_1 + A_{s2} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot d_2 = 0.034 \text{ m}^3$$

Ideális keresztmetszet súlypontja: $e_I := \frac{S_I}{A_I} = 126.886 \text{ mm}$

Ideális keresztmetszet inercianyomatéka:

$$I_I := \frac{b \cdot v^3}{12} + b \cdot v \cdot \left(\frac{v}{2} - e_I \right)^2 + A_{s1} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (d_1 - e_I)^2 + A_{s2} \cdot (\alpha_e - 1) \cdot (d_2 - e_I)^2 \dots = 1.433 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

A kapott elmozduláshoz tartozó erő:
Lásd: [11].-21. oldal

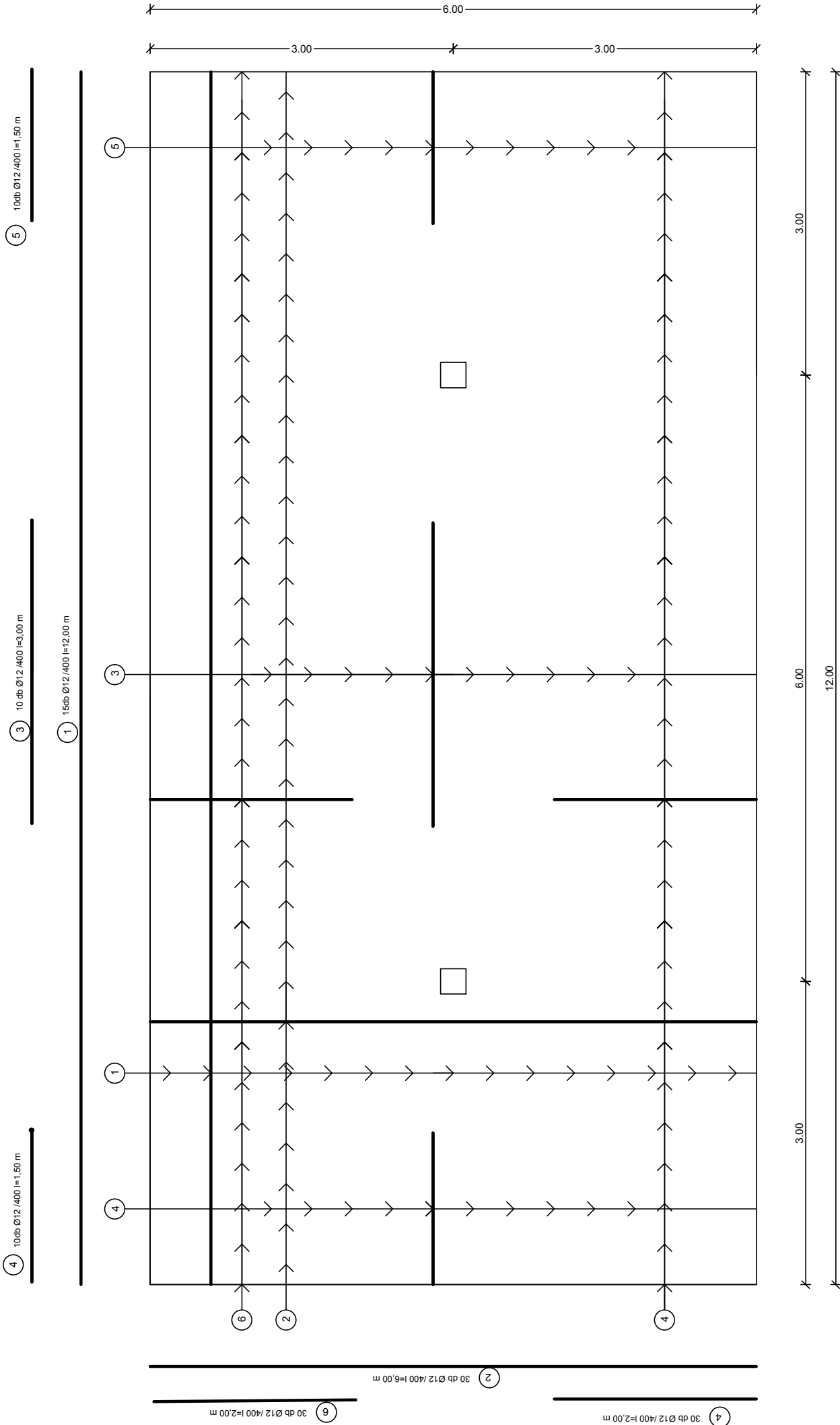
$$e = \frac{2 \cdot P \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I_I}$$

$$P := \frac{e \cdot 384 \cdot E_{cm} \cdot I_I}{2 \cdot L^3} = 41.85 \text{ kN}$$

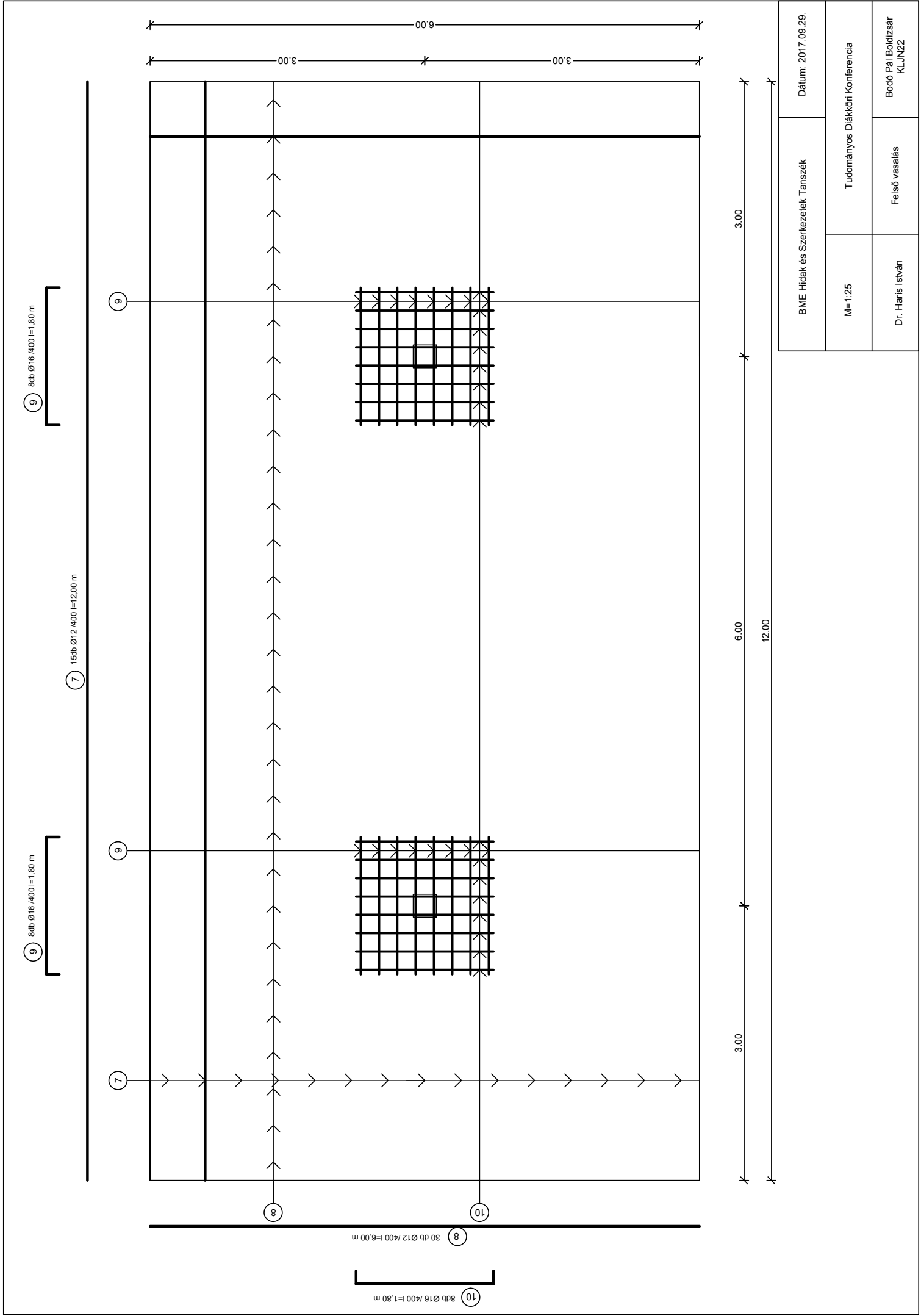
Rugóállandó értéke:

$$\xi := \frac{P \cdot 2}{e \cdot 1000} = 78.9622 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

II.-es melléklet - Vasalás



BME Hidak és Szerkezetek Tanszék		Dátum: 2017.09.29.
M=1:25	Tudományos Diáktörki Konferencia	
Dr. Haris István	Alsó vasalás	Bodó Pál Boldizsár KLJN22



BME Hidak és Szerkezetek Tanszék		Dátum: 2017.09.29.
M=1:25	Tudományos Diákköri Konferencia	
Dr. Haris István	Felső vasalás	Bodó Pál Boldizsár KLJN22

III. Melléklet: Összegző táblázat

u	25				30				35				40				45			
	SSz.	b'	b'/b	u/a	SSz.	b'	b'/b	u/a	SSz.	b'	b'/b	u/a	SSz.	b'	b'/b	u/a	SSz.	b'	b'/b	u/a
8x4	21.	1,76	0,44	0,03	22.	2,08	0,52	0,04	23.	2,40	0,60	0,04	24.	2,56	0,64	0,05	25.	2,84	0,71	0,06
7x5	11.	2,72	0,54	0,04	12.	3,00	0,60	0,04	13.	3,10	0,62	0,05	14.	3,32	0,66	0,06	15.	3,36	0,67	0,06
6,5x5,5	6.	2,72	0,49	0,04	7.	2,80	0,51	0,05	8.	2,88	0,52	0,05	9.	2,96	0,54	0,06	10.	3,04	0,55	0,07
6x6	1.	2,60	0,43	0,04	2.	2,96	0,49	0,05	3.	3,44	0,57	0,06	4.	3,52	0,59	0,07	5.	3,80	0,63	0,08
5x7	31.	2,80	0,40	0,05	32.	2,88	0,41	0,06	33.	3,04	0,43	0,07	34.	3,36	0,48	0,08	35.	3,68	0,53	0,09
4x8	41.	2,72	0,34	0,06	42.	2,88	0,36	0,08	43.	3,00	0,38	0,09	44.	3,04	0,38	0,10	45.	3,28	0,41	0,11

IV.-es melléklet: Teljes grafikon

