TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Építészmérnöki Kar

Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Húzószilárdság és lágyuló anyagmodell figyelembevétele a teherbírási vonalban

Készítette: Szilágyi Eszter

Konzulens: Dr. Pluzsik Anikó

Budapest 2020

Tartalomjegyzék

Jelölések

a_1	a nyomott oldalon az alakváltozásra fellágyuló rész magassága a keresztmetszet feszültségi ábráján
a_2	a húzott oldalon az alakváltozásra fellágyuló rész magassága a keresztmetszet feszültségi ábráján, ha az egész keresztmetszet dolgozik
a_3	a húzott oldalon az alakváltozásra fellágyuló rész magassága a keresztmetszet feszültségi ábráján, ha a keresztmetszet berepedt
b_1	a nyomott oldalon a lineárisan rugalmas rész magassága a keresztmetszet feszültségi ábráján
b_2	a húzott oldalon a lineárisan rugalmas rész magassága a keresztmetszet feszültségi ábráján
c_{ny}	a nyomott oldalon az alakváltozásra lágyuló ág és a rugalmas ág rugalmassági modulusa közötti arány: E_{uny}/E_{0ny}
c_h	a húzott oldalon az alakváltozásra lágyuló ág és a rugalmas ág rugalmassági modulusa közötti arány: E_{uh}/E_{0h}
d	a keresztmetszet szélessége
h	a keresztmetszet hossza
y	a semleges tengely helye a keresztmetszet feszültségábráján
r	berepedt rész magassága a keresztmetszet feszültségi ábráján
M	nyomaték
N	normálerő
κ	a keresztmetszet görbülete
E_{0ny}	a nyomott oldal rugalmassági modulusa az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell lineárisan rugalmas ágánál
E_{0h}	a húzott oldal rugalmassági modulusa az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell lineárisan rugalmas ágánál
E_{uny}	a nyomott oldal rugalmassági modulusa az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell fellágyuló ágánál
E_{uh}	a húzott oldal rugalmassági modulusa az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell fellágyuló ágánál
ε_{0ny}	a nyomott oldali maximális nyomófeszültséghez tartozó összenyomódás
ε_{0h}	a húzott oldali maximális húzófeszültséghez tartozó megnyúlás
ε_{uny}	a nyomott oldali törési összenyomódás
ε_{uh}	a húzott oldali határnyúlás
ε_{1ny}	alakváltozás a keresztmetszet nyomott oldali szélső szálában
ε_{1h}	alakváltozás a keresztmetszet húzott oldali szélső szálában
σ_{0ny}	nyomott oldali maximális nyomófeszültség
σ_{0h}	húzott oldali maximális húzófeszültség
σ_{uny}	törési összenyomódáshoz tartozó nyomófeszültség a nyomott oldalon
σ_{uh}	határnyúláshoz tartozó húzófeszültség a húzott oldalon
σ_{1ny}	nyomófeszültség a keresztmetszet nyomott oldali szélső szálában
σ_{1h}	húzófeszültség a keresztmetszet húzott oldali szélső szálában

Bevezetés

Ahhoz, hogy az építész tervezők által megálmodott épületek ne csak a papíron maradjanak, a tervezés során – sok egyéb feladat mellett – ki kell választani, hogy milyen anyagok felhasználásával lehet a legtökéletesebben megépíteni a teherhordó és nem teherhordó szerkezeteket.

Az anyagválasztásnál fontos szempont, hogy mely építőanyagok alkalmasak az építészeti szándék megvalósítására. Mely anyag képes elviselni a rá ható terheket? Mennyi anyag felhasználásával teljesíthetőek nemcsak a teherbírási, de a használhatósági követelmények is? Milyen egyéb tulajdonságai vannak az anyagnak, amelyek befolyásolhatják a szerkezet teherbírását vagy élettartamát? Melyik anyag felhasználása a leggazdaságosabb?

Ezeknek a kérdéseknek a megválaszolása nem könnyű, hiszen rendkívül sok építőanyag található a piacon, amelyek tulajdonságai igen eltérőek. A technológiai fejlődés hozadéka, hogy folyamatosan új anyagok jelennek meg, illetve a hagyományos építőanyagok alapanyagait, adalékait, gyártástechnológiáját is folyamatosan módosítják. A gyártók igyekeznek olyan anyagokat létrehozni, amelyek jobb tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a hagyományos építőanyagok. Ezenkívül bizonyos különleges szerkezetek is életre hívnak nem szokványos megoldásokat, anyagokat.

Az építőipari gyakorlatban régóta jelen lévő anyagok estében már vannak jól bevált eljárások, amelyekkel biztonsággal képesek vagyunk az egyes szerkezeti elemek méretezésére, ellenőrzésére. Mivel az anyagok viselkedése jól ismert, a kidolgozott szabványok alapján végezhetjük a számításainkat. Az Eurocode szabványsorozat rögzíti a beton, a vasbeton, az acél, a fa, az alumínium és a falazott szerkezetek tervezésére vonatkozó előírásokat. Azonban, új anyagok esetén, vagy ha az anyagi paraméterek módosulnak, a tartószerkezeti számítás során szükség lehet eddig elhanyagolt hatások figyelembevételére.

Problémafelvetés

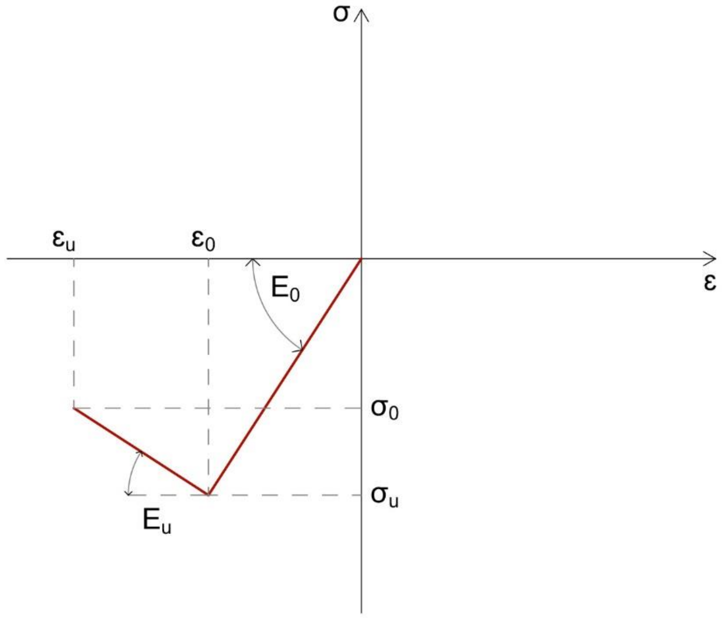
Bár az építőiparban megjelenő új anyagok tulajdonságai ismertek, a szabványban rögzített méretezési eljárások a hagyományos anyagok figyelembevételével lettek kidolgozva. Bizonyos esetekben a fejlesztés olyan tulajdonságokat érint, változtat meg, amelyek hatását a számítási eljárás tartalmazza. Ilyenkor a bevált módszerek továbbra is használhatóak. Lehetséges azonban, hogy a hagyományos méretezési módszerek által használt közelítésekkel számolva az újítás hatása nem érzékelhető. Ha a javuló anyagparaméter nem jelenik meg a számításokban, akkor hatását nem tudjuk a szabványos számításokkal igazolhatóan kiaknázni.

A nyomószilárdságukhoz képest kis húzószilárdsággal rendelkező anyagok esetében a húzószilárdságot hagyományosan elhanyagoljuk. Ezt amiatt tesszük, hogy a számítást leegyszerűsítsük, tudva, hogy ezzel a biztonság javára tévedünk. Bizonyos anyagoknál pl. a beton és vályog esetében az anyag paramétereinek javítására, a húzószilárdság növelésére gyakran szálakat kevernek az anyagba. A szálerősítés a nyomószilárdságra nincs nagy hatással, azonban a húzószilárdság növelése is kedvezően hathat a teherbírásra, amit korábban említett, szabványos számítás alkalmazásával nem tudunk figyelembe venni.

Ezt a problémát vizsgálom a dolgozatomban. A kutatás alapját Orbánné dr. Csicsely Ágnes doktori disszertációja (Orbánné Csicsely 2006: 41–54) adta, amely a vályog elméleti és gyakorlati teherbírásával foglalkozik. A doktori dolgozat a vályog húzószilárdságát elhanyagolja, figyelembe veszi azonban a nyomott oldalon az anyag lágyulását. Ezeket az eredményeket felhasználva, a disszertációban leírt számítási módszert alapul véve kezdtem el a nyomószilárdságukhoz képest kis húzószilárdsággal rendelkező anyagok teherbírásával foglalkozni. Azt vizsgáltam, hogyan változik a nyomaték-görbület összefüggés és a teherbírási vonal, ha figyelembe vesszük a beton, illetve a vályog húzószilárdságát is. A disszertációban használt lágyuló anyagmodellt a húzott oldali számításokban is felhasználtam.

Előzmények

Orbánné dr. Csicsely Ágnes a doktori disszertációjában a vályog keresztmetszet nyomaték-görbület függvényének, teherbírási vonalának meghatározásával foglalkozik az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell figyelembevételével.



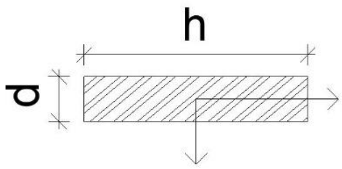
1. ábra: σ- ε diagram húzószilárdság figyelembevétele nélkül
Orbánné Csicsely (2006: 44)

A számításokban használt paramétereket a következő táblázat tartalmazza. A disszertáció alapján megírt programban az értékek nagyságrendileg a vályog tulajdonságait írják le, azonban nem volt célom az anyag valós jellemzőit alapul venni. A programban ezek az adatok változtathatóak, így lehetőség van a kísérletekkel meghatározott eredményeket az adott feladathoz, anyaghoz beállítani.

Jelölés	Érték	Jelentés
ε_0	0,0113	maximális nyomófeszültséghez tartozó összenyomódás
ε_u	0,013	törési összenyomódás
σ_0	3,63 N/mm^2	maximális nyomófeszültség
σ_u	4,52 N/mm^2	törési összenyomódáshoz tartozó nyomófeszültség
E_0	400 N/mm^2	rugalmassági modulus az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell lineárisan rugalmas ágánál
E_u	521.6 N/mm^2	rugalmassági modulus az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell fellágyuló ágánál
c	0,1304	alakváltozásra lágyuló ág és a rugalmas ág rugalmassági modulusa közötti arány: E_u/E_0

1. táblázat: Húzószilárdság nélküli számítási paraméterek

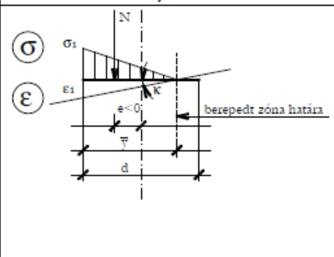
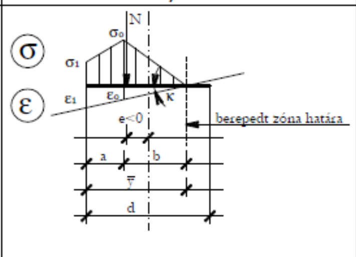
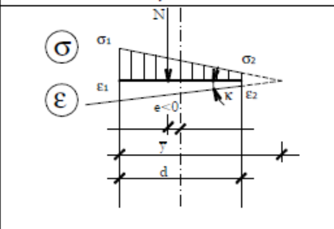
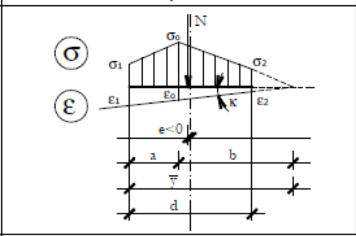
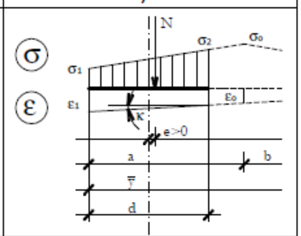
A keresztmetszet adatai az alábbi ábrán látható módon értelmezhetők. A d paraméter a keresztmetszet szélessége, h pedig a hosszúsága. A számításokban mindenhol d=200 mm és h=1000 mm értékeket használtam, de ezek az adatok is módosíthatóak.



2. ábra: A keresztmetszet adatai

Nyomaték-görbület függvény

A nyomaték görbület függvény meghatározásához először a lehetséges feszültségábrákat kellett definiálni. Itt két fő esetet lehet megkülönböztetni. Az egyik eset amikor a keresztmetszet húzásra berepedt (1), a másik pedig amikor a teljes keresztmetszet nyomott (2). Ezek tovább bonthatóak a szélső szálban ébredő feszültség értéke alapján: $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_0$ és $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_u$. A különböző esetekhez rendelt érvényességi határt a szélső szál összenyomódásának értéke és a semleges tengely helye adja.

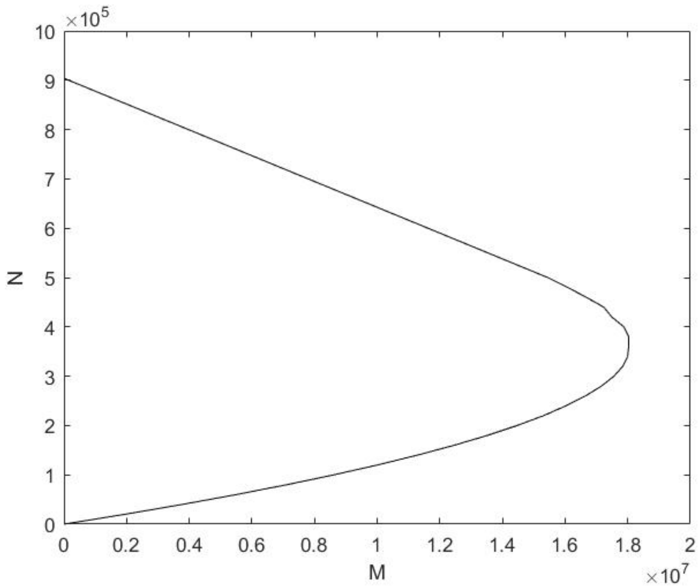
Esetek	**1/A**	**1/B**	
Feszültség ábrák			
$\boldsymbol{\sigma_1}$	$0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_o$	$\sigma_u \leq \sigma_1 \leq \sigma_o$	
$\bar{y}$	$0 < \bar{y}_{1/A} \leq d$	$\bar{y}_{1/B} \leq d$	
$\boldsymbol{\varepsilon_1}$	$\varepsilon_1 \leq \varepsilon_o$	$\varepsilon_o \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_u$	
Esetek	**2/A**	**2/B**	**2/C**
Feszültség ábrák			
$\boldsymbol{\sigma_1}$	$0 \leq \sigma_1 \leq \sigma_o$	$\sigma_u \leq \sigma_1 \leq \sigma_o$	$\sigma_u \leq \sigma_1 \leq \sigma_o$
$\bar{y}$	$d \leq \bar{y}_{2/A} \leq \infty$	$d \leq \bar{y}_{2/B} \leq \infty$	$d \leq \bar{y}_{2/C} \leq \infty$
$\boldsymbol{\varepsilon_1}$	$\varepsilon_1 \leq \varepsilon_o$	$\varepsilon_o \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_u$	$\varepsilon_o \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_u$

3. ábra: Feszültségábrák húzószilárdság figyelembevétele nélkül
Orbánné Csicsely (2006: 49)

Ezek alapján az egyes normálerőszintek esetére meghatározható a nyomaték-görbület függvény. A görbe alakja az egyes normálerő szinteknél eltérő lett. Előfordulhat olyan eset is, a maximális nyomaték környezetében, amikor az egyenleteknek két megoldása van, az M-κ görbe hurok alakú.

Teherbírási vonal

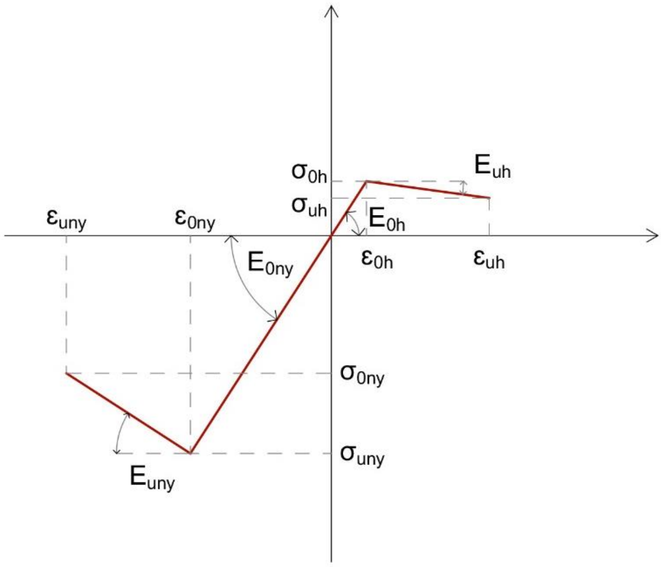
A nyomaték-görbület függvény maximuma adja a keresztmetszet teherbírását, ami a normálerővel együtt a teherbírási vonal egy pontja. A disszertáció képletei alapján a Matlab programban megrajzoltam a húzószilárdság nélküli állapot teherbírási vonalát. A kiindulási adatok az 1. táblázatban találhatóak.



4. ábra: Teherbírási vonal húzószilárdság figyelembevétele nélkül

Húzószilárdság és húzásra lágyuló anyagmodell

Az előzmények továbbgondolása során először az anyagmodellt kellett kiválasztani. A nyomószilárdságnál már alkalmazott alakváltozásra lágyuló anyagmodellt a húzott oldalon is figyelembe vettem.



5. ábra: Lágyuló anyagmodell σ- ε diagramja a húzószilárdság figyelembevételével

A következő táblázatban összefoglaltam, hogy a módosított számítás során milyen jelöléseket és hozzájuk tartozó értékeket vettem figyelembe.

Jelölés	Érték	Jelentés
ε_{0ny}	0,0113	a nyomott oldali maximális nyomófeszültséghez tartozó összenyomódás
ε_{uny}	0,013	a nyomott oldal törési összenyomódása
σ_{0ny}	3,63 N/mm^2	a nyomott oldali maximális nyomófeszültség
σ_{uny}	4,52 N/mm^2	a nyomott oldali törési összenyomódáshoz tartozó nyomófeszültség
E_{0ny}	400 N/mm^2	a nyomott oldali rugalmassági modulus az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell lineárisan rugalmas ágánál
E_{uny}	521.6 N/mm^2	a nyomott oldali rugalmassági modulus az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell fellágyuló ágánál
c_{ny}	0,1304	a nyomott oldalon az alakváltozásra lágyuló ág és a rugalmas ág rugalmassági modulusa közötti arány
ε_{0h}	0,0011	a húzott oldali maximális húzófeszültséghez tartozó megnyúlás
ε_{uh}	0,0012	a húzott oldali határnyúlás
σ_{0h}	0,44 N/mm^2	a húzott oldali maximális húzófeszültség
σ_{uh}	0,38 N/mm^2	a húzott oldali határnyúláshoz tartozó húzófeszültség

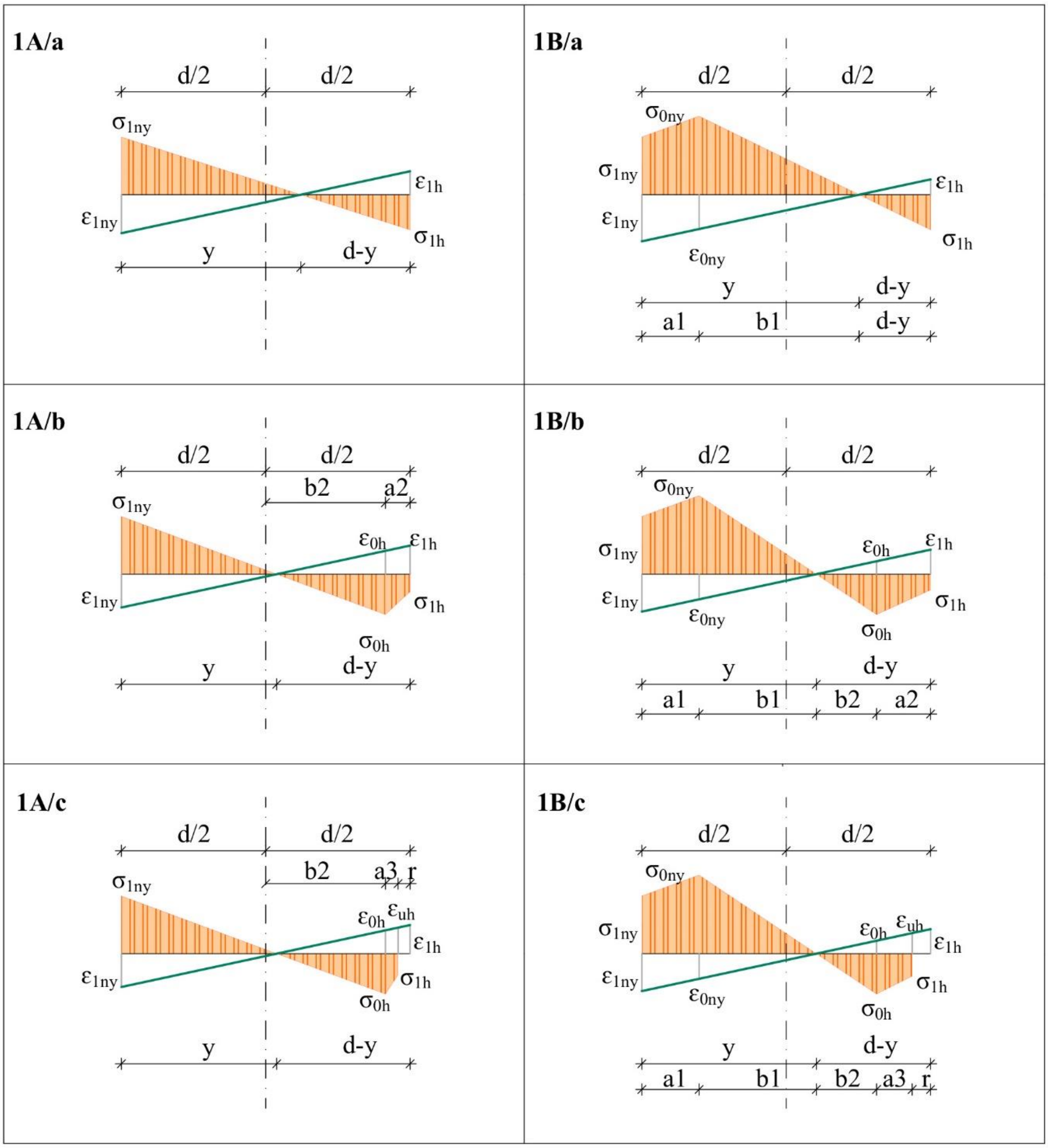
E_{0h}	400 N/mm^2	a húzott oldali rugalmassági modulus az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell lineárisan rugalmas ágánál
E_{uh}	600 N/mm^2	a húzott oldali rugalmassági modulus az alakváltozásra fellágyuló anyagmodell fellágyuló ágánál
c_h	1,5	a húzott oldalon alakváltozásra lágyuló ág és a rugalmas ág rugalmassági modulusa közötti arány

2. táblázat: A húzószilárdságot figyelembe vevő számítás paraméterei

Nyomaték-görbület függvény

A nyomaték-görbület függvény meghatározásához először megrajzoltam a keresztmetszet lehetséges feszültségábráit. A 2-es esetek, amikor az egész keresztmetszet nyomott, nem változtak az eredeti, csak nyomószilárdságot figyelembe vevő számításhoz képest. Az 1-es esetek esetében azonban a húzószilárdság elhanyagolásakor használt modell alapján húzásra berepedt rész képes húzószilárdságot is felvenni. Ezen belül is megkülönböztethetünk 3 esetet: az egyik amikor a húzott oldal egésze rugalmas állapotban van (a), a második amikor a húzott oldali feszültségek a lágyuló ághoz tartoznak (b), illetve a harmadik amikor a húzott oldal is berepedt (c).

Ezekből az ábrákból levezethetőek a semleges tengely helyének (y) meghatározásához használt egyenletek. Ebből számítható adott normálerőhöz a húzott (N_h) és a nyomott oldalon (N_{ny}) működő erő nagysága, ezenkívül a külpontosság, amelyek alapján már meghatározható a keresztmetszeten működő hajítónyomaték értéke. Az esetek feltételeinek meghatározásához az előzményekkel megegyező módon szintén a szélső szálak összenyomódását és a semleges tengely helyét kell figyelembe venni.



6. ábra: Feszültségábrák a húzószilárdság figyelembevételével

1A/a eset

érvényességi határ: $d \geq y$ $0 \leq \varepsilon_{1h} \leq \varepsilon_{0h}$ és $0 \leq \varepsilon_{1ny} \leq \varepsilon_{0ny}$

egyenletek:

$$\sigma_{1ny}=E0_{ny} * y * \kappa$$

$$\sigma_{1h}=E0_{h} * (d-y) * \kappa$$

$$N_{ny} =\sigma_{1ny} * y * h / 2$$

$$N_{h}= \sigma_{1h} * (d - y) * h / 2$$

$$M_{ny}= \sigma_{1ny} * y * h / 2 * (d / 2- y / 3)$$

$$M_{h}= \sigma_{1h} * (d - y) * h / 2 * (d /2 - (d - y) / 3)$$

$$M=M_{ny} + M_{h}$$

1A/b eset:

érvényességi határ: $d \geq y$ $\varepsilon_{0h} \leq \varepsilon_{1h} \leq \varepsilon_{uh}$ és $0 \leq \varepsilon_{1ny} \leq \varepsilon_{0ny}$

egyenletek:

$$\sigma_{1ny}=E0_{ny} * y * \kappa$$

$$\sigma_{1h}= \sigma_{0h}*(1 + c_{h}) - E_{0h} * c_{h} * (d - y) * \kappa$$

$$N_{ny} =\sigma_{1ny} * y * h/2$$

$$N_{h}= \sigma_{1h} * a_2 * h + (\sigma_{0h} - \sigma_{1h}) * a_2 *h / 2 + \sigma_{0h} * b_2 *h / 2$$

$$M_{ny}= \sigma_{1ny} * y * h/2 * (d / 2 - y / 3)$$

$$M_{h}= \sigma_{1h} * a_2 * h * (d /2 - a_2 / 2) + (\sigma_{0h} - \sigma_{1h}) * a_2 *h / 2 * (d / 2 - a_2 / 3) + \sigma_{0h} * b_2 *h / 2 * (d / 2 - a_2 - b_2 / 3)$$

$$M=M_{ny} + M_{h}$$

1A/c eset:

érvényességi határ: $d \geq y$ $\varepsilon_{uh} \leq \varepsilon_{1h}$ és $0 \leq \varepsilon_{1ny} \leq \varepsilon_{0ny}$

egyenletek:

$$\sigma_{1ny}=E0_{ny} * y * \kappa$$

$$\sigma_{1h}= \sigma_{0h} - (\varepsilon_{uh} - \varepsilon_{0h}) * E_{uh}$$

$$N_{ny} = \sigma_{1ny} * y * h/2$$

$$N_h = \sigma_{1h} * a_3 * h + (\sigma_{0h} - \sigma_{1h}) * a_3 * h / 2 + \sigma_{0h} * b_2 * h / 2$$

$$M_{ny} = \sigma_{1ny} * y * h / 2 * (d/2 - y / 3)$$

$$M_h = \sigma_{1h} * a_3 * h * (d/2 - a_3 / 2 - r) + (\sigma_{0h} - \sigma_{1h}) * a_3 * h / 2 * (d / 2 - a_3 / 3 - r) + \sigma_{0h} * b_2 * h / 2 * (d / 2 - a_3 - b_2 / 3 - r)$$

$$M = M_{ny} + M_h$$

1B/a eset:

érvényességi határ: $d \geq y$ $0 \leq \varepsilon_{1h} \leq \varepsilon_{0h}$ és $\varepsilon_{0ny} \leq \varepsilon_{1ny} \leq \varepsilon_{uny}$

egyenletek:

$$\sigma_{1ny} = \sigma_{0ny} * (1 + c_{ny}) - E_{0ny} * c_{ny} * (d - y) * \kappa$$

$$\sigma_{1h} = E0_h * (d - y) * \kappa$$

$$N_{ny} = \sigma_{1ny} * a_1 * h + (\sigma_{0ny} - \sigma_{1ny}) * a_1 * h / 2 + \sigma_{0ny} * b_1 * h / 2$$

$$N_h = \sigma_{1h} * (d - y) * h/2$$

$$M_{ny} = \sigma_{1ny} * a_1 * h * (d/2 - a_1 / 2) + (\sigma_{0ny} - \sigma_{1ny}) * a_1 * h / 2 * (d / 2 - a_1 / 3) + \sigma_{0ny} * b_1 * h / 2 * (d / 2 - a_1 - b_1 / 3)$$

$$M_h = \sigma_{1h} * (d - y) * h / 2 * (d / 2 - (d - y) / 3)$$

$$M = M_{ny} + M_h$$

1B/b eset:

érvényességi határ: $d \geq y$ $\varepsilon_{0h} \leq \varepsilon_{1h} \leq \varepsilon_{uh}$ és $C_{0ny} \leq \varepsilon_{1ny} \leq \varepsilon_{uny}$

egyenletek:

$$\sigma_{1ny} = \sigma_{0ny} * (1 + c_{ny}) - E_{0ny} * c_{ny} * (d - y) * \kappa$$

$$\sigma_{1h} = \sigma_{0h} * (1 + c_h) - E_{0h} * c_h * (d - y) * \kappa$$

$$N_{ny} = \sigma_{1ny} * a_1 * h + (\sigma_{0ny} - \sigma_{1ny}) * a_1 * h / 2 + \sigma_{0ny} * b_1 * h / 2$$

$$N_h = \sigma_{1h} * a_2 * h + (\sigma_{0h} - \sigma_{1h}) * a_2 * h / 2 + \sigma_{0h} * b_2 * h / 2$$

$$M_{ny} = \sigma_{1ny} * a_1 * h * (d/2 - a_1 / 2) + (\sigma_{0ny} - \sigma_{1ny}) * a_1 * h / 2 * (d / 2 - a_1 / 3) + \sigma_{0ny} * b_1 * h / 2 * (d / 2 - a_1 - b_1 / 3)$$

$$M_h = \sigma_{1h} * a_2 * h * (d/2 - a_2 / 2) + (\sigma_{0h} - \sigma_{1h}) * a_2 * h / 2 * (d / 2 - a_2 / 3) + \sigma_{0h} * b_2 * h / 2 * (d / 2 - a_2 - b_2 / 3)$$

$$M = M_{ny} + M_h$$

1B/c eset:

érvényességi határ: $d \geq y$ $\varepsilon_{uh} \leq \varepsilon_{1h}$ és $\varepsilon_{0ny} \leq \varepsilon_{1ny} \leq \varepsilon_{uny}$

egyenletek:

$$\sigma_{1ny} = \sigma_{0ny} * (1 + c_{ny}) - E_{0ny} * c_{ny} * (d - y) * \kappa$$

$$\sigma_{1h} = \sigma_{0h} - (\varepsilon_{uh} - \varepsilon_{0h}) * E_{uh}$$

$$N_{ny} = \sigma_{1ny} * a_1 * h + (\sigma_{0ny} - \sigma_{1ny}) * a_1 * h / 2 + \sigma_{0ny} * b_1 * h / 2$$

$$N_h = \sigma_{1h} * a_3 * h + (\sigma_{0h} - \sigma_{1h}) * a_3 * h / 2 + \sigma_{0h} * b_2 * h / 2$$

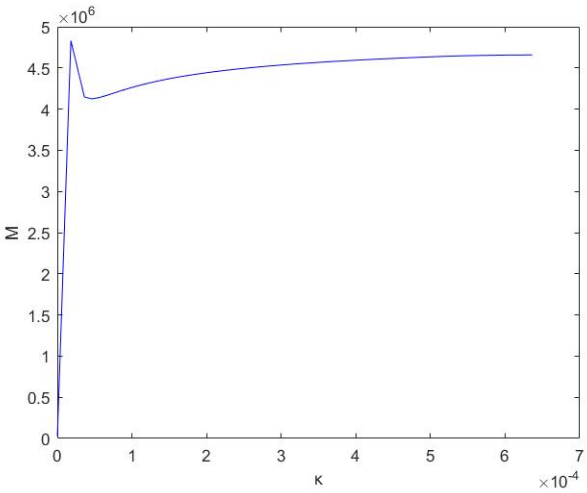
$$M_{ny} = \sigma_{1ny} * a_1 * h * (d/2 - a_1 / 2) + (\sigma_{0ny} - \sigma_{1ny}) * a_1 * h / 2 * (d / 2 - a_1 / 3) + \sigma_{0ny} * b_1 * h / 2 * (d / 2 - a_1 - b_1 / 3)$$

$$M_h = \sigma_{1h} * a_3 * h * (d/2 - a_3 / 2 - r) + (\sigma_{0h} - \sigma_{1h}) * a_3 * h / 2 * (d / 2 - a_3 / 3 - r) + \sigma_{0h} * b_2 * h / 2 * (d / 2 - a_3 - b_2 / 3 - r)$$

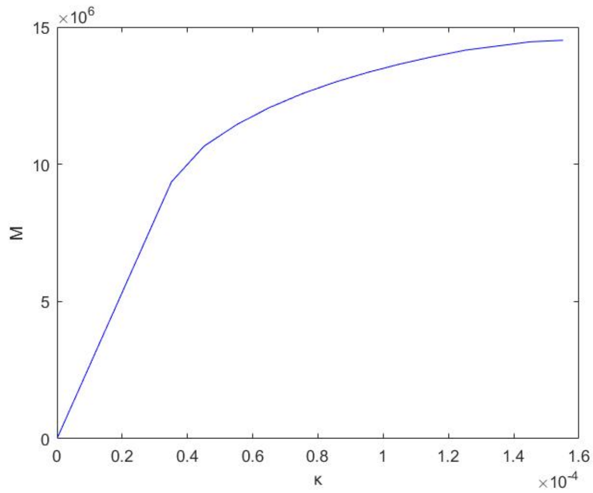
$$M = M_{ny} + M_h$$

A képletek alapján megrajzolt nyomaték-görbület függvények alakja a normálerő nagyságától függően eltérő lett. A 7–10-es ábrákon különböző normálerőkhöz tartozó jellegzetes nyomaték-görbület függvényeket ábrázoltam. A számításhoz használt anyagparaméterek a 2. táblázatban találhatóak.

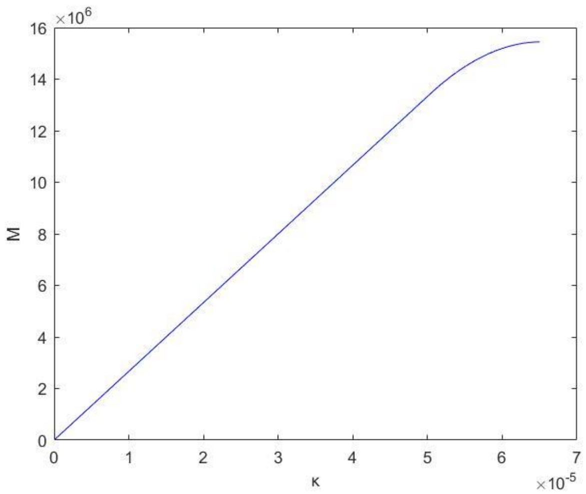
Az látható a 7-es ábrán, hogy kis normálerő esetén a húzásra berepedés pillanatában lesz a nyomaték-görbület függvény értéke maximális (1A/a). Az anyagjellemzők változtatásával előállhat olyan eset is, hogy húzásra bereped a keresztmetszet, a nyomaték értéke visszaesik, de azután újra növekedésnek indul és meghaladja a húzási repedéshez tartozó értéket, tehát a maximum nem a berepedéshez tartozik. Az anyagjellemzők változásának a hatását a következő fejezetben vizsgálom. A normálerő növekedésekor az M-κ görbe monotonná válik (8. ábra). Ilyenkor a keresztmetszet csak nagyobb görbület esetén reped be húzásra. A maximum érték az 1B/c feszültségábrához tartozik. Még nagyobb normálerő esetén a keresztmetszet egésze nyomott (2A és 2B esetek). Itt a feszültségábrák megegyeznek a húzószilárdságot figyelmen kívül hagyó számítás ábráival. (lásd 3. ábra). Ezeknél az eseteknél a görbe monoton nő (9. ábra), de tovább növelve a normálerőt a görbének eső ága is lesz (10. ábra).



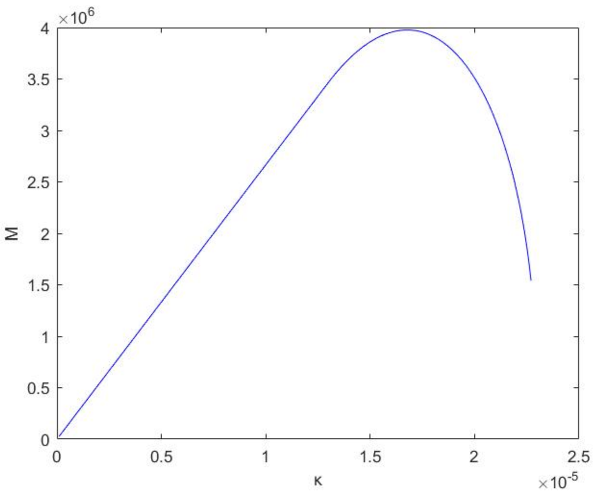
7. ábra: M-κ függvény N=50000 N esetén



8. ábra: M-κ függvény N=200000 N esetén



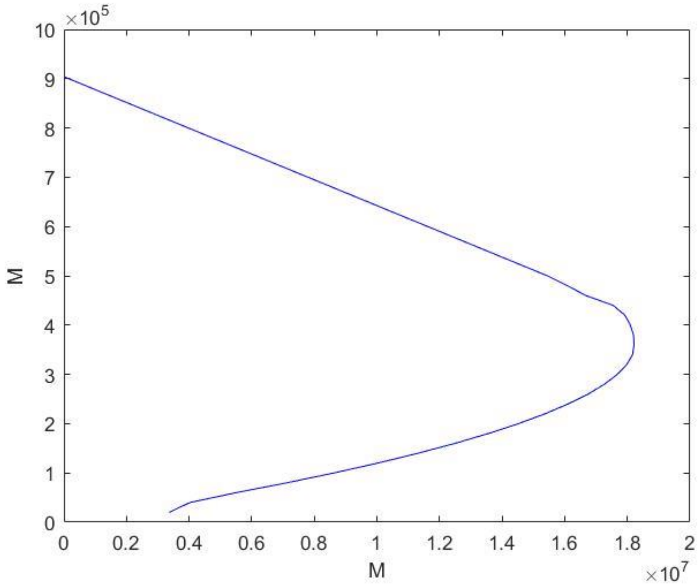
9. ábra: M-κ függvény N=500000 N esetén



10. ábra: M-κ függvény N=800000 N esetén

Teherbírási vonal

A teherbírási vonal meghatározása a következőképpen történt: Adott nagyságú normálerőhöz a 2. táblázat adatait felhasználva meghatároztam a nyomaték-görbület függvényt az előző fejezetben ismertetett módon. Ennek a függvénynek a maximuma jelenti azt a nyomatékot, amely a normálerővel egy pontot ad az M-N görbén. A leírt folyamatot sokszor megismételve kaptam meg a teherbírási vonalat. Minél kisebb a különbség az egymás után következő normálerők között, annál több pontból áll a teherbírási vonal, ezáltal egyre pontosabb lesz. A normálerő értéke 0 és a központos nyomáshoz tartozó ellenállásérték (N_{rd}) között változik.



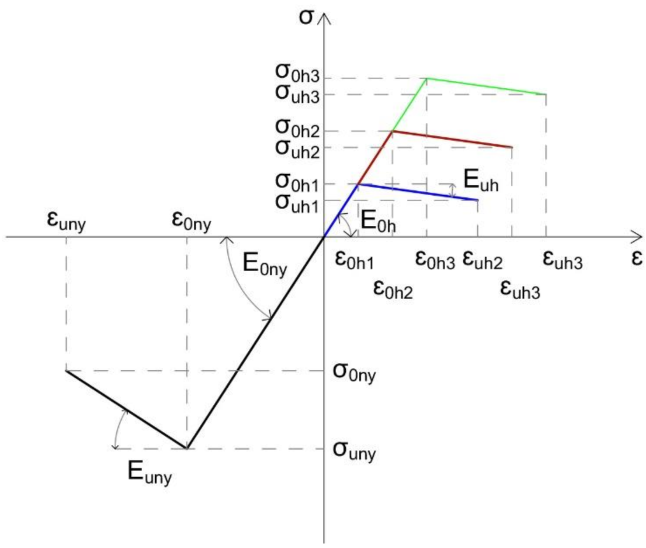
11. ábra: Teherbírási vonal húzószilárdság figyelembevételével a 2. táblázat adataival számolva

Eredmények összevetése

Az anyagjellemzők változtatásának hatása

Az előző két fejezetben a húzószilárdság figyelembevételével számítottam a nyomaték-görbület összefüggést és a teherbírási vonalat. A pontosítás jelentősége azonban akkor válik láthatóvá, ha a kapott eredményeket összehasonlítjuk a húzószilárdságot figyelmen kívül hagyó számítás eredményeivel. A húzószilárdság figyelembevételének hatását a húzott oldali anyagparaméterek változtatásával vizsgáltam. Megnéztem, hogy hogyan változnak az eredmények a húzószilárdság növekedésével, illetve van-e jelentősége a lágyulási, vagy a duktilitási paraméterek változtatásának.

Húzószilárdság növekedésének hatása

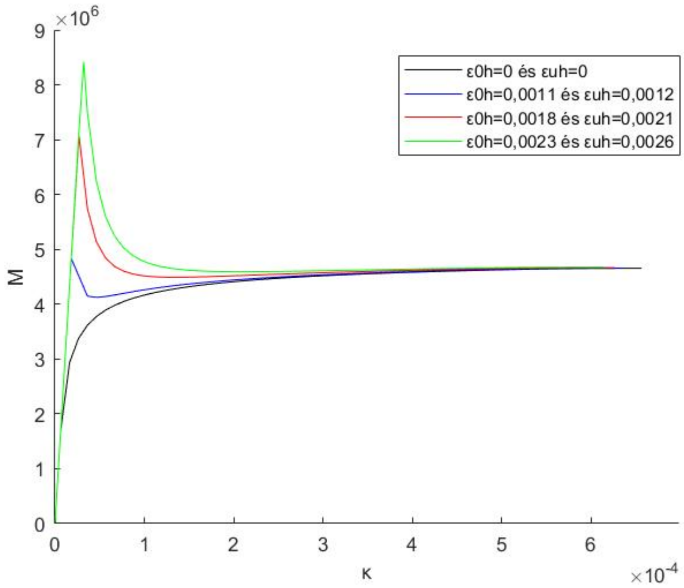


12. ábra: σ- ε diagram változó húzószilárdság esetén

A 12-es ábrán láthatóak a vizsgált anyagmodellek. A húzószilárdság növekedését két húzott oldali paraméter ε_{0h} és ε_{uh} növelésével értem el, a többi paramétert változatlanul hagytam.

Jelölés	Érték	Ezek alapján a szilárdsági értékek
ε_{0h1}	0,0011	σ_{0h1}=0,44 N/mm^2 és σ_{uh1}=0,38 N/mm^2
ε_{uh1}	0,0012	
ε_{0h2}	0,018	σ_{0h2}=0,72 N/mm^2 és σ_{uh2}=0,54 N/mm^2
ε_{uh2}	0,021	
ε_{0h3}	0,023	σ_{0h3}=0,92 N/mm^2 és σ_{uh3}=0,74 N/mm^2
ε_{uh3}	0,026	

3. táblázat: Húzószilárdság növelése során használt paraméterértékek



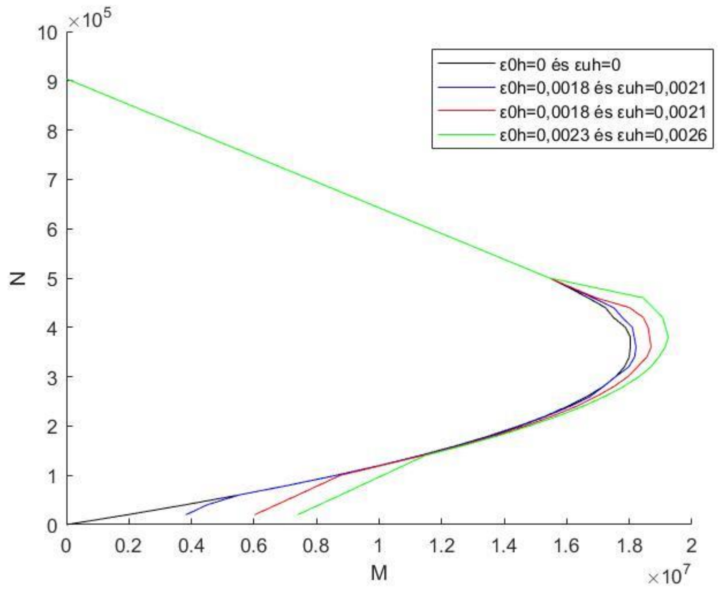
13. ábra: M-κ függvény különböző nagyságú húzószilárdság esetén

A 13-as számú ábrán látható M-κ görbék azonos nyomott oldali paraméterekkel, azonos húzott oldali lágyulással számolva, különböző nagyságú húzószilárdságot figyelembevéve, azonos normálerő estén különböző értékeket vesznek fel.

Kezdetben nincs különbség az eltérő húzószilárdságú keresztmetszetek között. Ennek oka, hogy a keresztmetszet egésze nyomott (2-es számú esetek). Itt nincs szerepe a húzószilárdságnak. Ezután megfigyelhető, hogy az eltérő húzószilárdság miatt eltérő nagyságú maximális nyomatékot tud elviselni a keresztmetszet. Ilyenkor a keresztmetszet a korábban alkalmazott modellel szemben nem reped be, hanem képes a húzófeszültségek felvételére. Az 1A/a esetben a feszültségek a húzott oldali lineárisan rugalmas szakaszhoz tartoznak, az 1A/b esetben pedig már az alakváltozásra fellágyuló ághoz. A maximum nyomaték elérése után azonban a húzott oldalon is eléri maximális feszültséget a szélső szál, ezért nagyobb terhelés esetén itt is megjelennek a repedések. (1A/c eset). Látható, hogy a húzószilárdság növekedésével a görbe maximuma egyre biztosabban az első húzási repedés megjelenéséhez köthető A nyomott oldal eddig lineárisan rugalmasan viselkedik. További terhelés hatására a nyomott oldalon is az alakváltozásra fellágyuló ágra kerülünk (1B/c eset).

Ha a normálerő nő a nyomatéki maximum nem a berepedéskor lép fel, hanem a nyomott oldali fellágyuló ághoz tartozó feszültségek esetén (1B/c). Ez látható volt korábban a 9-es ábrán.

Megfigyelhető, hogy a húzószilárdság figyelembevételével kis görbület esetén jelentősen nagyobb nyomaték elviselésére alkalmas a keresztmetszet. Ez amiatt lehetséges, hogy a húzott oldalon is fellépő feszültségeket a pontosabb számítás során figyelembe tudjuk venni. A görbületet tovább növelve azonban ez csökkenni kezd, majd a függvény a húzószilárdság nélküli modell görbéjéhez simul. Ez azt jelenti, hogy nagy göbület esetén nincs jelentős hatása, kis görbület esetén viszont látható a különbség a húzószilárdságot elhanyagoló és a húzószilárdságot figyelembe vevő számítások között.

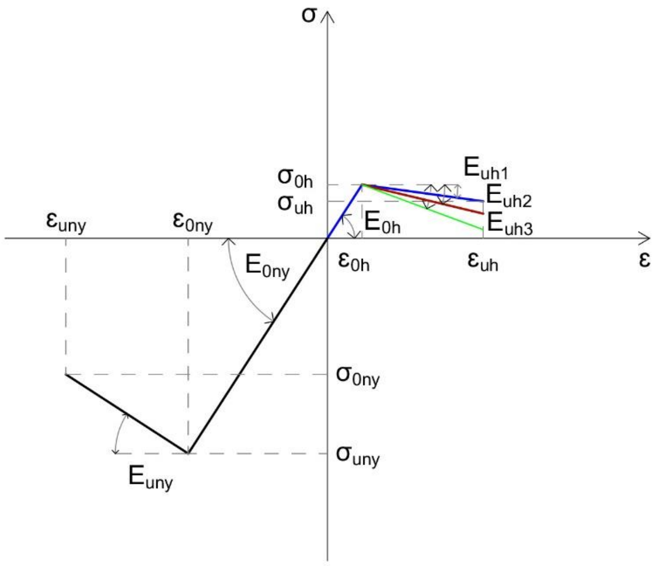


14. ábra: Teherbírási vonal különböző nagyságú húzószilárdság esetén

A 14-es számú ábrán a teherbírási vonalban a pontosítás hatása főleg két helyen érvényesül. Egyrészt a húzószilárdság figyelembevétele miatt számolhatunk azzal, hogy a keresztmetszet N=0 estén is képes nyomatékot elviselni, illetve viszonylag kis normálerőszint esetén is nagyobb teherbírást vehetünk figyelembe. Másrészt a maximális nyomaték környezetében van még hatása a pontosabb számításnak. A köztük lévő szakaszon az 1B/c eset adja az M-κ görbe maximumát, ami közel van a húzószilárdság nélküli eset maximumához, ezért nincs jelentős különbség a teherbírási vonalak között. Az ezután következő szakaszon az összes görbe egybeesik. Ennek oka, hogy itt a keresztmetszet egésze nyomott, így mindenhol a 2-es esetek adják az M-κ függvény maximumát.

Lágyulás

Az alkalmazott alakváltozásra lágyuló anyagmodell egyik fontos jellemzője a lágyulás mértéke. A következőkben különböző Euh értékekkel számolva vizsgáltam meg, hogy ez a paraméter hogyan és mennyire befolyásolja a nyomaték- görbület függvényt és a teherbírási vonalat.

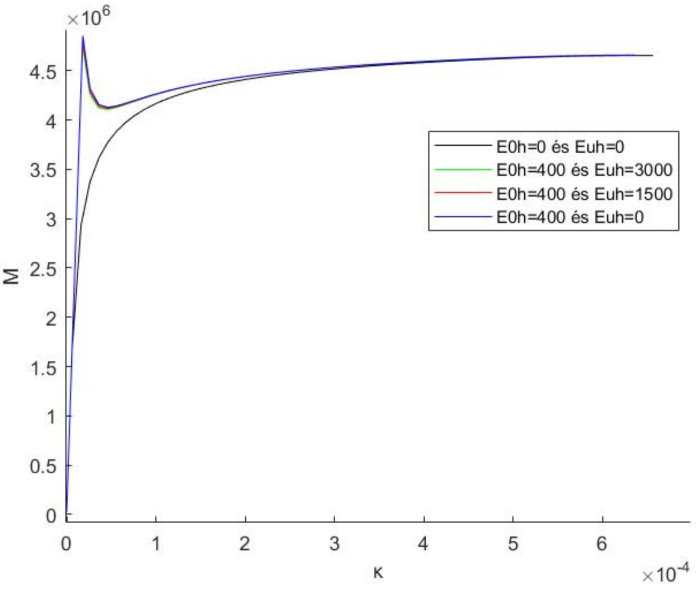


15. ábra: σ- ε diagram változó húzott oldali lágyulás esetén

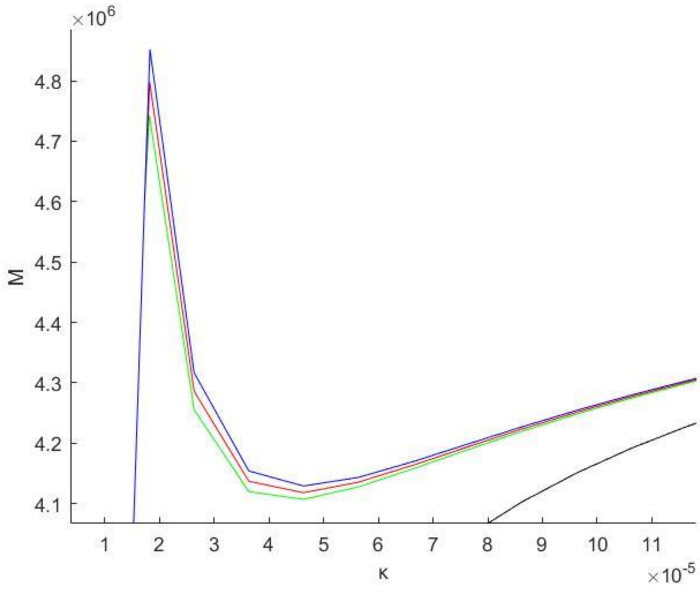
A 15-ös ábrán látható különböző anyagmodellek esetében csak Euh értékét változtattam meg, a többi érték minden esetben változatlan maradt.

Jelölés	Érték
E_{uh1}	0 N/mm^2
E_{uh2}	1500 N/mm^2
E_{uh3}	3000 N/mm^2

4. táblázat A lágyulás változtatásához használt paraméterek



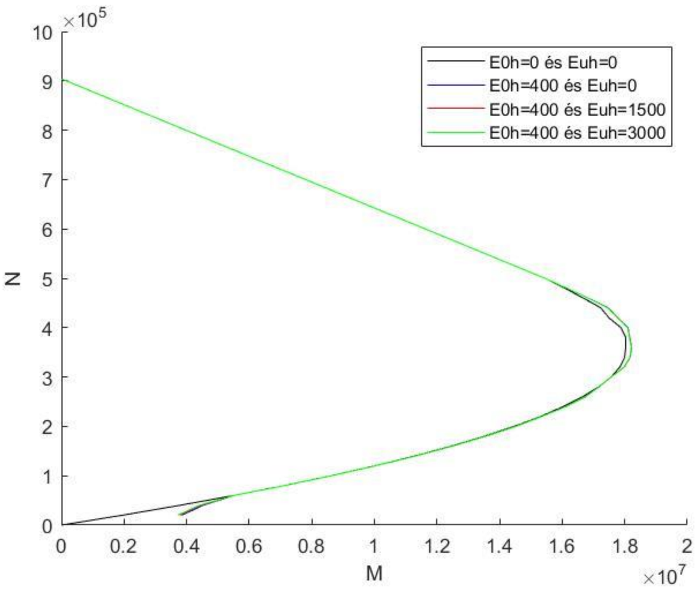
16. ábra: M-κ függvény N=50000 estén különböző húzott oldali lágyulás esetén



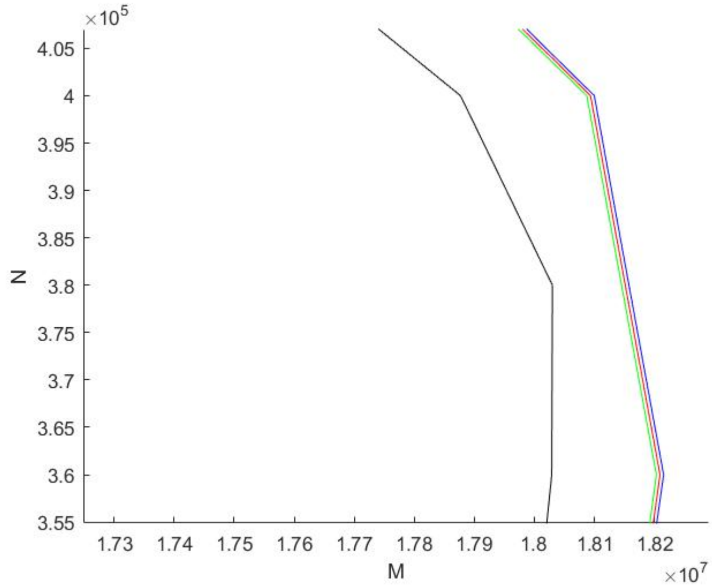
17. ábra: M-κ függvény N=50000 estén különböző húzott oldali lágyulás esetén részlet

A 16-os ábrán látható három eltérő lágyulású keresztmetszet nyomaték-görbület függvénye. Az látszik a görbéken, hogy ameddig a keresztmetszet egésze nyomott, nincs eltérés. Miután a keresztmetszet egy része húzott lesz, de még a lineáris szakaszán vagyunk a σ-ε diagramnak (1A/a), addig szintén nincs eltérés, hiszen ennek a szakasznak a paraméterei azonosak. Miután azonban a lágyuló ágra kerülünk (1A/b), a nagyobb lágyulás hatására kisebb nyomatékot képes elviselni a keresztmetszet, hiszen azonos ε_{uh} érték és nagyobb E_{uh} kisebb törőfeszültséget eredményez a húzott oldalon. Emiatt hamarabb véget ér az a szakasz, ahol már a lágyuló ág hatása érvényesül, de a keresztmetszet még nem repedt be (1A/b). A berepedés után növekvő görbület hatására csökken az elviselhető nyomaték nagysága.

A 18-as ábrán a nyomaték-görbület függvények alapján megrajzolt teherbírási vonalat ábrázoltam. Látható, hogy a lágyulás növekedésével csökken a keresztmetszet a teherbírása. Ennek mértéke azonban kevésbé jelentős, mint a húzószilárdság növekedésével elért változás. Azonban ez nagymértékben függ attól, hogy mekkora a húzószilárdság. Jelentős húzószilárdság esetén a lágyulás elhanyagolása veszélyes lehet, mert a biztonság kárára történne. Ebben a dolgozatban nem térek ki arra, hogy ezt a valós anyagi viselkedést pontosabban leíró anyagmodellt ténylegesen hol (milyen anyagoknál, milyen igénybevétel kombinációknál) kell figyelembe venni. Ennek meghatározása a jelenlegi kutatásom továbbfejlesztését igényli.



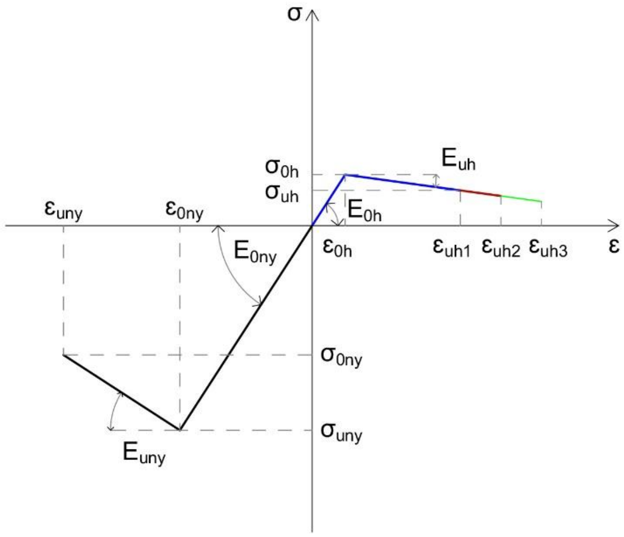
18. ábra: Teherbírási vonal különböző nagyságú lágyulás esetén



19. ábra: Teherbírási vonal különböző nagyságú lágyulás esetén részlet

Duktilitás

A következő paraméter a duktilitás, amelynek változtatása hatással lehet a teherbírásra. A programban ezt ε_{uh} változtatásával vizsgáltam meg. A duktilitás növekedését okozhatja például az anyagba kevert szálak jobb tapadása.

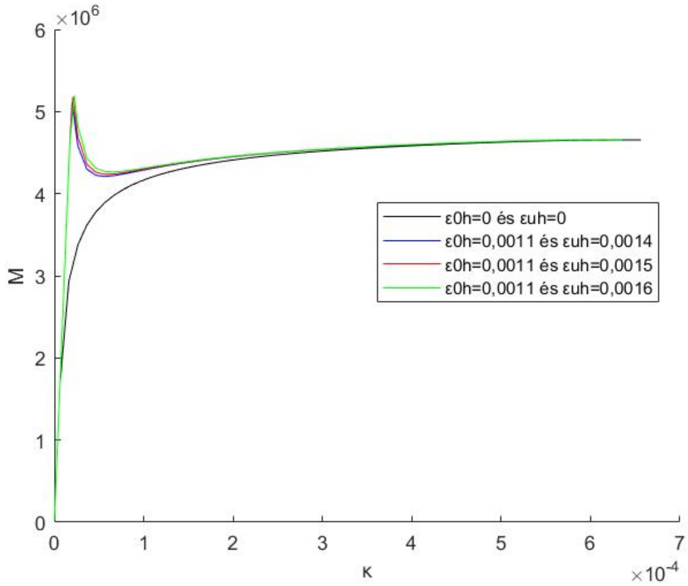


20. ábra σ- ε diagram változó húzott duktilitás esetén

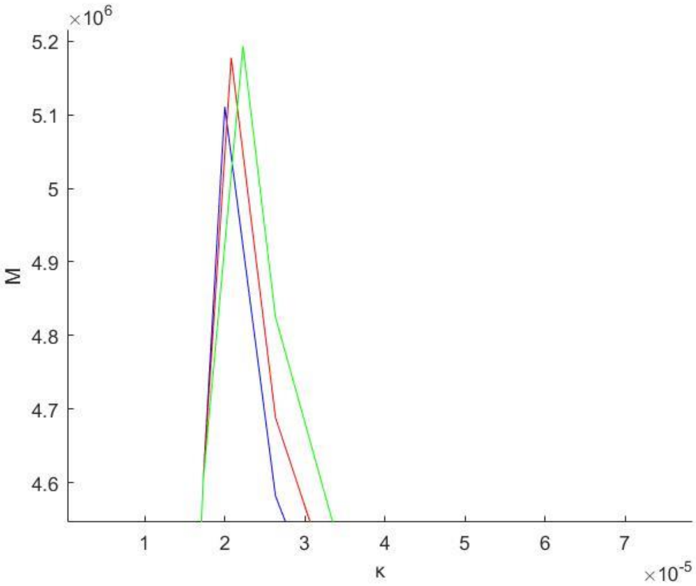
A 20-as ábrán látható anyagmodelleket használtam a számítás során. A módosított paramétereket táblázatos formában adom meg.

Jelölés	Érték
ε_{uh1}	0,0014
ε_{uh2}	0,0015
ε_{uh2}	0,0016

5. táblázat: A duktilitás változtatásához használt paraméterek



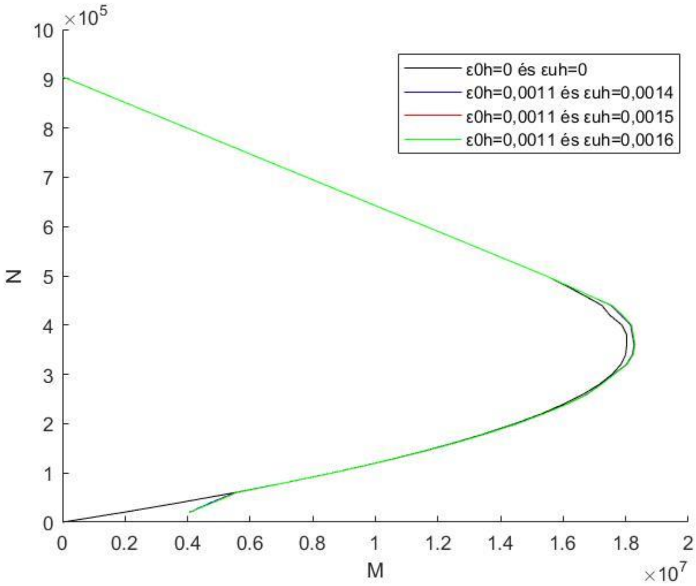
21. ábra: M-κ függvény N=50000 estén különböző húzott oldali duktilitás esetén



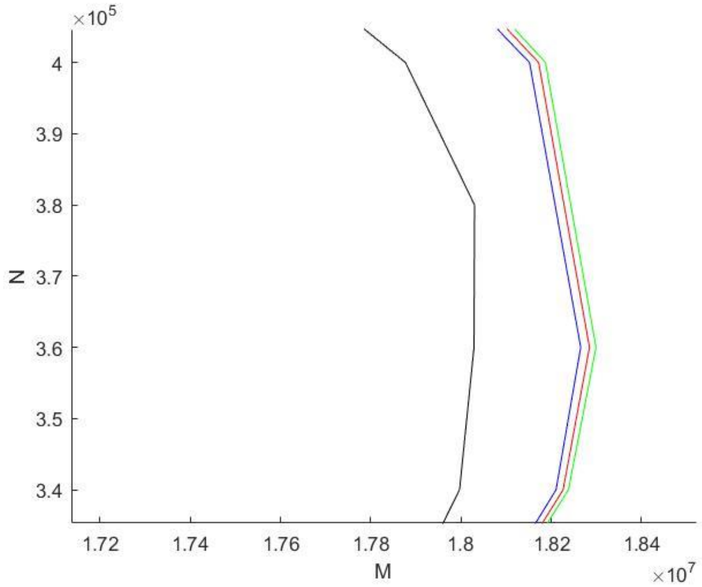
22. ábra: M-κ függvény N=50000 estén különböző húzott oldali duktilitás esetén részlet

A nyomaték-görbület függvény hasonlóan viselkedik, mint a korábban bemutatott esetekben. Az eltérő duktilitású keresztmetszetek azonos nyomatékot képesek elviselni ameddig csak nyomás lép fel a keresztmetszeten (2-es esetek), illetve a húzott oldali lineáris szakasz végéig (1A/a eset). Ezután azonban különböző görbületeknél éri el az M-κ görbe a maximumot, melynek értéke is eltérő, így a görbék a 22-es ábrán látható módon eltolódnak egymáshoz képest.

A teherbírási vonalban látható, hogy a nagyobb duktilitás képes megnövelni a keresztmetszet teherbírását. A duktilitás növelésnek a hatása a lágyuláshoz hasonlóan szintén elsősorban a húzószilárdság nagyságától függ.



23. ábra: Teherbírási vonal különböző nagyságú duktilitás esetén



24. ábra: Teherbírási vonal különböző nagyságú duktilitás esetén részlet

Összefoglalás

A dolgozatban a nyomószilárdságukhoz képest kis húzószilárdsággal rendelkező anyagok teherbírásával foglalkoztam. Dr. Csicsely Ágnes doktori disszertációja alapján módosítottam a számításhoz használt képleteket úgy, hogy a húzószilárdságot is figyelembe vettem. A módosított képletek segítségével Matlab programot írtam, amely adott normálerőhöz megrajzolja a külpontosan nyomott keresztmetszet M-κ görbéjét. A teherbírási vonalat a különböző normálerő értékek és a hozzájuk tartozó nyomatéki maximum értékek adják.

A kutatásom eredményeinek segítségével a külpontosan nyomott beton és vályog elemek pontosabban méretezhetőek, a húzószilárdság figyelembevételével nagyobb teherbírást vehetünk figyelembe. Ez a hatás nem minden esetben jelentős, nagy normálerő esetén a keresztmetszet nagy része (vagy egésze) nyomott, a húzószilárdságnak nincs jelentős szerepe a teherviselésben. Főként két helyen van számottevő hatása a pontosításnak: kis normálerő esetén, illetve a maximális nyomaték környezetében (lásd 14. ábra).

A maximális húzószilárdság mellett azonban az anyagmodellben más paraméterek is befolyásolhatják a teherbírást és az M-N görbét. A valós anyagi viselkedést nem mindig írja le kellő pontossággal egy lineáris anyagmodell. Dolgozatomban bilineáris anyagi viselkedést feltételeztem. Eszerint a maximális húzószilárdság elérése után a rugalmassági modulus megváltozik, az anyag lágyulni kezd, míg el nem éri a határnyúlás értékét (lásd 5.ábra).

A kutatás során megvizsgáltam az anyagi paraméterek változtatásának a teherbírási vonalra gyakorolt hatását. Elsőként a húzószilárdság értékét vizsgáltam, és kerestem, hogy adott szilárdságnövekmény mekkora teherbírás növekedést okoz, illetve milyen igénybevétel kombinációk esetén lehet szükség a nyomott oldal mellett a húzási ellenállás figyelembevételére is.

Ezután a lágyulási paramétert változtattam. Minél nagyobb a lágyulás, annál kedvezőtlenebbül hat a teherbírásra. A lágyulás elhanyagolásából származó hiba mértéke a maximális húzószilárdság nagyságától függ. Minél nagyobb az anyag húzószilárdsága a nyomószilárdságához képest, annál fontosabb a tényleges viselkedés pontos figyelembevétele. A húzószilárdság figyelembevétele, de a lágyulás elhanyagolása a biztonság kárára történő közelítés. Ezen dolgozat eredményeinek továbbfejlesztéseként valós anyagi paraméterek esetén meg lehet vizsgálni, hogy mikor kell ezzel a pontosabb anyagi viselkedést leíró anyagmodellel számolni.

A dolgozatban megvizsgáltam azt is, hogy milyen hatással van a duktilitás a teherbírásra. Az eredmények azt mutatják, hogy a duktilitás növekedésével nő a teherbírás is. Azonban a hatás mértéke a lágyuláshoz hasonlóan a húzószilárdság nagyságrendjétől függ. A duktilitás változtatásának a hatása, a húzószilárdság változásához hasonlóan főként csak a teherbírási vonal két helyén (kis normálerő, nyomatéki maximum környezete) érvényesül. Ezenkívül a különböző ε_{uh} értékek esetén csak kismértékű változás tapasztalható.

A dolgozat megírásával a cél az anyagmodell pontosításából származó teherbírásnövekmény meghatározása volt. A dolgozat ábráin az eltérő anyagi paraméterek teherbírási vonalra gyakorolt hatása, a kialakuló tendenciák jól megfigyelhetőek.

Irodalomjegyzék

Orbánné Csicsely, Ágnes. 2006. *Vályogfalak kísérleti és elméleti teherbírásvizsgálata*. Doktori disszertáció, 41-54. oldal

Ábrajegyzék

Ábrák

Táblázatok