

Ádány Sándor–Dulácska Endre–Dunai László–
Fernezelyi Sándor–Horváth László

Acélszerkezetek

1. Általános eljárások

Tervezés az Eurocode alapján



Bevezetés

A méretezés alapelvei

Anyagok

Szerkezeti analízis

Teherbírési határállapotok

Kapcsolatok méretezése

Használhatósági határállapotok

Acélszerkezetek méretezési eljárásai

Irodalom

ACÉLSZERKEZETEK

Tervezés az Eurocode alapján

Általános eljárások

2. kiadás – 2007. december

Készült az Eurocode 3 2005-ben elfogadott angol nyelvű változata, valamint a szerzőknek az Eurocode-hoz kapcsolódó nemzetközi oktatási és kutatási projekteken végzett munkája, illetve ott szerzett tudása és tapasztalata alapján, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen

Szerzők:

Ádány Sándor, egyetemi docens, BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék
Dulácska Endre, professzor emeritusz, BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék
Dunai László, egyetemi tanár, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke
Fernezelyi Sándor, egyetemi tanár, BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék
Horváth László, egyetemi docens, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Lektorálta:

Dulácska Endre, professzor emeritusz, BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Statikai Kisokos
Segédlet tartószerkezetek tervezéséhez – Acélszerkezetek/
Általános eljárások – Tervezés az Eurocode alapján

A Business Media Magyarország Kft. kiadványa
2040 Budaörs, Neumann János utca 1.
Tel.: (06-23) 422-455, fax: (06-23) 422-357
E-mail: kisokos@businessmedia.hu

Felelős szerkesztő: Csanády Pál
Lapterv, tipográfia: Csanády Fivérek Kkt.
Szerkesztőségvezető: Bethlenfalvy Gábor

Felelős kiadó: Ádám János

Eurocode füzet évente egy-két alkalommal jelenik meg.
HU-ISBN 963 86129 5 9

Hirdetésfelvétel:
Sárdy Csaba
Tel.: (06-23) 422-455/234, fax: (06-23) 422-357

Előfizetés, terjesztés:
Szabó Nóra
Tel.: (06-23) 422-455/210, fax: (06-23) 422-456

A folyóirat és minden benne szereplő írás és kép szerzői jogi védelem alatt áll. A lap értékesítése a kiadó engedélye nélkül törvénybe ütközik, kivéve a törvény által engedélyezett eseteket. A tartalom helyességéért – annak többszöri ellenőrzése ellenére – nem vállalunk felelősséget.

Nyomtatás, kötészet:
D-Plus Nyomda

Tartalomjegyzék

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. Bevezetés | |
| 1.1. A könyv célja és felépítése | 4 |
| 1.2. Az Eurocode 3-ról általában | 4 |
| 1.2.1. Az Eurocode 3 kötetei | 4 |
| 1.2.2. A könyvben tárgyalt szabványkötetek | 5 |
| 1.3. Jelölések | 6 |
| 1.3.1. Jelölésrendszer az Eurocode-ban | 6 |
| 1.3.2. A könyvben alkalmazott jelölések | 8 |
| 2. A méretezés alapelvei | 11 |
| 2.1. Méretezésméleti alapok | 11 |
| 2.2. Határállapotok | 12 |
| 2.3. Hatások és kombinációik | 13 |
| 2.3.1. Teherbírási határállapot, tartós vagy ideiglenes tervezési állapotokban | 13 |
| 2.3.2. Teherbírási határállapot, rendkívüli tervezési állapot | 14 |
| 2.3.3. Teherbírási határállapot, szeizmikus tervezési állapot | 14 |
| 2.3.4. Használhatósági határállapotok | 14 |
| 2.3.5. Hatások parciális és kombinációs tényezői | 14 |
| 3. Anyagok | 16 |
| 3.1. Szerkezeti acélok jelölése | 16 |
| 3.2. Szerkezeti acélok jellemzői | 16 |
| 3.3. Kapcsolóelemek jellemzői | 16 |
| 3.4. Anyagválasztás szempontjai | 16 |
| 3.4.1. Alakíthatósági követelmények | 16 |
| 3.4.2. Hegeszthetőség | 17 |
| 3.4.3. Keresztirányú (vastagság irányú) alakváltozási képesség | 17 |
| 3.4.4. Szívósság | 17 |
| 4. Szerkezeti analízis | 19 |
| 4.1. Bevezetés | 19 |
| 4.2. A keresztmetszetek osztályozása | 19 |
| 4.2.1. A keresztmetszeti osztályozás háttere | 19 |
| 4.2.2. Az EC3 keresztmetszeti osztályozása | 19 |
| 4.3. Az anyagmodell | 23 |
| 4.3.1. Az anyagmodellekről általában | 23 |
| 4.3.2. Az EC3 rugalmas és képlékeny számításokkal kapcsolatos előírásai | 23 |
| 4.4. Geometriai nemlinearitás: az alakváltozások-elmozdulások figyelembe vétele | 24 |
| 4.4.1. A geometriai nemlinearitásokról általában | 24 |
| 4.4.2. Az EC3 másodrendű hatásokra vonatkozó előírása | 25 |
| 4.5. Acél keretszerkezetek stabilitásvizsgálatának módszerei | 26 |
| 4.5.1. Bevezetés: az imperfeciók figyelembe vétele a méretezésben | 26 |
| 4.5.2. A rugalmas kritikus teher meghatározása | 27 |
| 4.5.3. A stabilitási teherbírási meghatározása – csökkentő tényezős eljárás | 28 |
| 4.5.4. A stabilitási teherbírási meghatározása – helyettesítő imperfekeiós eljárás | 28 |
| 4.5.5. A csökkentő tényezős és a helyettesítő imperfekeiós eljárás alkalmazási lehetőségei | 28 |
| 4.6. Az EC3 előírásai a helyettesítő imperfekeiók meghatározására | 29 |
| 4.6.1. Bevezetés | 29 |
| 4.6.2. Globális helyettesítő imperfekeiók keret vizsgálatához | 29 |
| 4.6.3. Lokális helyettesítő imperfekeiók a keret vizsgálatához | 30 |
| 4.6.4. A helyettesítő geometriai imperfekeiók felvétele sájtalak szerint | 32 |
| 4.6.5. Helyettesítő imperfekeiók merevítőrendszerek vizsgálatához | 33 |
| 4.7. Az EC3 alapján javasolható stabilitásvizsgálati eljárások | 35 |
| 4.8. Keretszerkezetek kapcsolatainak modellezése | 36 |
| 4.8.1. Bevezetés | 36 |
| 4.8.2. A csomópont osztályozása merevség szerint | 36 |
| 4.8.3. A csomópont osztályozása teherbírási szerint | 37 |
| 4.8.4. A szerkezeti analízisben alkalmazandó csomóponti modell | 37 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 5. Teherbírási határállapotok | 38 |
| 5.1. <i>Keresztmetszetek ellenállása</i> | 38 |
| 5.1.1. Keresztmetszeti méretek | 38 |
| 5.1.2. Központosan húzott rudak keresztmetszeti ellenállása | 40 |
| 5.1.3. Központosan nyomott rudak keresztmetszeti ellenállása | 40 |
| 5.1.4. Hajlított keresztmetszetek ellenállása | 41 |
| 5.1.5. Keresztmetszetek nyírási ellenállása | 41 |
| 5.1.6. Keresztmetszetek csavarási ellenállása ⁴² | 42 |
| 5.1.7. Hajlítás és nyírás kölcsönhatásának vizsgálata | 42 |
| 5.1.8. Hajlítás és normálerő kölcsönhatásának vizsgálata | 43 |
| 5.1.9. Hajlítás, nyírás és normálerő kölcsönhatásának vizsgálata | 45 |
| 5.2. <i>Központosan nyomott rudak kihajlási ellenállása</i> | 45 |
| 5.2.1. Kihajlási ellenállás | 45 |
| 5.2.2. Síkbeli kihajlás | 49 |
| 5.2.3. Elcsavarodó kihajlás | 50 |
| 5.2.4. Osztott szelvényű, szorosan kapcsolt rudak | 51 |
| 5.3. <i>Hajlított gerendák kifordulási ellenállása</i> | 52 |
| 5.3.1. Kifordulási ellenállás – általános módszer, tetszőleges keresztmetszet | 52 |
| 5.3.2. Kifordulási ellenállás – általános módszer, melegen hengerelt keresztmetszet | 53 |
| 5.3.3. Kritikus nyomatek | 54 |
| 5.3.4. Kifordulási ellenállás egyszerűsített módszer | 56 |
| 5.4. <i>Nyomott-hajlított rudak stabilitási ellenállása</i> | 58 |
| 5.4.1. Stabilitási ellenállás kölcsönhatás vizsgálata alapján | 58 |
| 5.4.2. Általános eljárás szerkezetek és szerkezeti elemek stabilitási ellenőrzésére | 61 |
| 5.5. <i>Lemezek horpadási ellenállása</i> | 62 |
| 5.5.1. Nyírási horpadás ellenőrzése | 62 |
| 5.5.2. Keresztirányú nyomóerő hatására bekövetkező horpadás ellenőrzése | 65 |
| 6. Kapcsolatok méretezése | 68 |
| 6.1. <i>A kapcsolatok tervezésének alapjai</i> | 68 |
| 6.2. <i>Mechanikus kapcsolatok</i> | 68 |
| 6.2.1. A csavarozott kapcsolatok típusai | 68 |
| 6.2.2. Csavar- és furat méretek | 69 |
| 6.2.3. Csavarkép..... | 69 |
| 6.2.4. Egy csavar ellenállása | 70 |
| 6.2.5. Csavarozott kapcsolatok vizsgálata | 72 |
| 6.2.6. Az anyag ellenállása a csavarozott kapcsolatok környezetében | 74 |
| 6.3. <i>Hegesztett kapcsolatok</i> | 74 |
| 6.3.1. A hegesztett kapcsolatok típusai | 74 |
| 6.3.2. A varratok méretei | 74 |
| 6.3.3. Hegesztett kapcsolatok ellenállása | 75 |
| 7. Használhatósági határállapotok | 78 |
| 7.1. <i>Bevezetés</i> | 78 |
| 7.2. <i>Használhatósági követelmények</i> | 78 |
| 7.2.1. Függőleges alakváltozások | 78 |
| 7.2.2. Vízszintes eltolódások | 79 |
| 7.2.3. Rezgések | 80 |
| 8. Acélszerkezetek méretezési eljárásai | 81 |
| 9. Irodalom | 88 |

Az egyes részeket kidolgozták: Ádány Sándor egyetemi docens (4), Dunai László egyetemi tanár (1, 2.1, 2.2, 5.2-5.5), Femezelyi Sándor egyetemi tanár (6, 8), Horváth László egyetemi docens (2.3, 3, 5.1, 7). A végső szövegezés a szerzők közös munkájával alakult ki.

1. Bevezetés

1.1. A könyv célja és felépítése

Jelen könyv a magasépítési acélszerkezetek Eurocode alapú méretezésének alapjait összefoglaló tervezési segédlet második – módosított – kiadása. Bár az ismeretanyag egy adott szabványhoz kötődik, célunk nemcsak az előírások felsorolása, hanem azok fizikai hátterének, illetve gyakorlati alkalmazhatóságának bemutatása is.

A könyv felépítése alapvetően követi azt a rendszert, amely megszokott az acélszerkezetek méretezési eljárásainak ismertetésénél, igazodva a tartószerkezeti Eurocode-okban alkalmazott egységcs vázhoz. Az első három fejezetben áttekintjük az alkalmazott szabványok felépítését, jelölésrendszerét és méretezéscelméleti alapjait, majd az acélanyra vonatkozó szabványos adatokat ismertetjük. A negyedik fejezetben a szerkezeti modellezés és igénybevételek, illetve elmozdulások számításának – a továbbiakban együttesen „szerkezeti analízis” elveit és előírásait kiemelt részletességgel mutatjuk be, mivel elsősorban ez a rész tartalmazza az Eurocode alapú méretezés újabb, az eddigi gyakorlattól esetenként jelentősen eltérő elemeit. A következő fejezetekben az alapvető szerkezeti elemek és kapcsolatok teherbírásának – az Eurocode szóhasználatában „ellenállásának” meghatározásával foglalkozunk, szilárdsági és stabilitási határállapotok alapján, majd a használhatósági határállapot vizsgálatát ismertetjük. A könyvet lezáró fejezetben összefoglaljuk a szerkezeti analízis és ellenállás számítás összhangja alapján végrehajtható különböző szintű méretezési eljárásokat, illetve tipikus szerkezetek gyakorlati tervezésére alkalmazható méretezési sémákat közlünk.

Ebből a tartalmi felépítésből látható, hogy az anyag terjedelme miatt ebben a könyvben csupán az alapvető méretezési eljárásokat tárgyaljuk. A második kiadással egyidőben jelenik meg a könyv második része [20], amelyben elterjedten alkalmazott szerkezeti kialakítások és szerkezetek méretezésével foglalkozunk: homlok- és talplemez esemőpontok, hegesztett rácsos tartók esemőpontjai, osztott szelvényű rudak, gerinclemezes tartók, hidegen alakított acélszerkezetek.

Általánosságban elmondható a könyvben tárgyalt szabványkötetekről – a többi tartószerkezeti Eurocode-hoz hasonlóan –, hogy viszonylag kevesebb kötelezően betartandó tervezési, illetve méretezési alapelvet tartalmaznak, amelyeket kiegészítenek a nem kötelezően előírt alkalmazási szabályok. Utóbbiak alternatív módszerekkel helyettesíthetők. Jelen könyvben csak az Eurocode-ban javasolt alkalmazási szabályokat ismertetjük, kitérve azokra a tapasztalatokra és/vagy javaslatokra, amelyek véleményünk szerint segíthetik a megértést és egyszerűsíthetik az – esetenként igen bonyolult – eljárások alkalmazhatóságát.

Fontos megjegyezni, hogy a szabványok adott országban való alkalmazását meg kell előznie egy úgynevezett Nemzeti Melléklet – rövidítve NM – kidolgozásának. Az NM-nek tartalmaznia kell adott – a szabványokban pontosan meghatározott – tervezési jellemzők nemzeti sajátosságokat figyelembevevő értékeit. A könyv második kiadásának idején ezek az NM dokumentumok még nem készültek el, így a szabvány ajánlásait alkalmazzuk minden esetben, megjegyezve adott helyen, hogy az értékek változhatnak.

A könyv a szerzők közel egyéves munkájának eredményeként jött létre, a rendszeres megbeszéléseken kiforrt tapasztalatok és egységesített szemléletmód alapján. A szerzők köszönettel tartoznak Futó Tamásnak és Dr. Kovács Nauzikának az anyag formai rendezésében kifejtett segítségükért.

A könyv második kiadásában felhasználtuk Dr. Papp Ferenc, egyetemi docens kollégánk részletes és értékes megjegyzéseit, amiért ezúton is köszönetet mondunk.

1.2. Az Eurocode 3-ról általában

1.2.1. Az Eurocode 3 kötetei

Az Eurocode 3 szabvány a tartószerkezeti Eurocode-ok acélszerkezetek méretezésére vonatkozó része, amelyhez szorosan kapcsolódnak az általános méretezési elvekkel foglalkozó, illetve a terhelő hatásokra vonatkozó előírások:

EN 1990 A tartószerkezeti tervezés alapjai [1]

EN 1991 A szerkezeti hatások [2]

Ebben a könyvben e két szabványból csupán azokat az alapelvet foglaljuk össze röviden, amelyek az acélszerkezeti tervezést tartalmazó szabványok megértéséhez és alkalmazásához elengedhetetlenül szükségesek.

Az Eurocode 3 szabvány megnevezése és tartalma az alábbiak szerinti:

EN 1993 Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése

Az egyes acélszerkezeti szakterületeket külön kötetek tárgyalják:

EN 1993-1 Acélszerkezetek tervezése: Általános és épületekre vonatkozó szabályok.

EN 1993-2 Acélszerkezetek tervezése: Acélhidak

EN 1993-3 Acélszerkezetek tervezése: Tornokok, antennatornyok és kémények.

EN 1993-4 Acélszerkezetek tervezése: Silók, tartályok és csővezetékek.

EN 1993-5 Acélszerkezetek tervezése: Cölöpök.

EN 1993-6 Acélszerkezetek tervezése: Darupályatartók.

Az EN 1993-1 tekinthető az „alapszabványnak”, az EN 1993-2 – EN 1993-6 szabványok a szerkezet specifikus szabályokat tartalmaznak. Az EN 1993-1 szabvány az alábbi részekre – szabványkötetekre – lett bontva:

| | |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------|
| EN 1993-1-1 | Acélszerkezetek tervezése: Általános és épületekre vonatkozó szabályok. |
| EN 1993-1-2 | Acélszerkezetek tervezése: Tűzzel szembeni tervezés. |
| EN 1993-1-3 | Acélszerkezetek tervezése: Hidegen alakított vékonyfalú profilok és lemezek. |
| EN 1993-1-4 | Acélszerkezetek tervezése: Rozsdamentes acélok. |
| EN 1993-1-5 | Acélszerkezetek tervezése: Lemezekből összeállított szerkezetek. |
| EN 1993-1-6 | Acélszerkezetek tervezése: Héjszerkezetek. |
| EN 1993-1-7 | Acélszerkezetek tervezése: Síkjukra merőlegesen terhelt lemezes szerkezetek. |
| EN 1993-1-8 | Acélszerkezetek tervezése: Kapcsolatok. |
| EN 1993-1-9 | Acélszerkezetek tervezése: Fáradás. |
| EN 1993-1-10 | Acélszerkezetek tervezése: Acélminőség kiválasztási eljárások. |
| EN 1993-1-11 | Acélszerkezetek tervezése: Húzott elemekből felépített szerkezetek. |

1.2.2. A könyvben tárgyalt szabványkötetek

A szokásos melegen hengerelt és hegesztett szelvényekből kialakított magasépítési acélszerkezetek szerkezeti elemeinek és kapcsolatainak méretezése alapvetően az EN 1993-1-1, EN 1993-1-5, EN 1993-1-8 és az EN 1993-1-10 szabványkötetek alapján hajtható végre. A könyv ezekkel foglalkozik részletesebben, hivatkozva a kapcsolódó anyag- és méretezési alapelveket tartalmazó szabványokra.

A könyvben tárgyalt négy szabványkötet közül az EN 1993-1-1 elsősorban a szokásos szerkezeti elemek, míg az EN 1993-1-8 azok kapcsolatainak méretezésével foglalkozik, az alábbi fő tartalmi fejezetekkel:

EN 1993-1-1: Acélszerkezetek tervezése: Általános és épületekre vonatkozó szabályok. [3]

- A tervezés alapelvei
- Anyagok
- Szerkezeti analízis
- Teherbírási határállapotok
- Használhatósági határállapotok

EN 1993-1-8: Acélszerkezetek tervezése: Kapcsolatok. [4]

- A tervezés alapelvei
- Csavarozott kapcsolatok
- Hegesztett kapcsolatok
- Szerkezeti analízis és csomóponti viselkedés kölcsönhatása – osztályozás
- H- és I-szelvényű szerkezeti elemek csomópontjai
- Zártszelvényű szerkezeti elemek csomópontjai

A fenti felépítéséből következik, hogy a két kötet szorosan egymáshoz tartozó, gyakorlati tervezés során a legritkább esetben alkalmazhatók önálló formában. A könyv tartalmazza e két szabványkötet gyakorlati szempontból legfontosabb részeit, de nem tér ki bizonyos szerkezeti típusok méretezési sajátosságaira (mint például homloklemez kapcsolatok vagy zártszelvényű rácsos tartók csomópontjai).

Az EN 1993-1-5 a vékonyfalú – de nem hidegen alakított – szelvények méretezési sajátosságaival egészíti ki az EN 1993-1-1 előírásait, az alábbi fő tartalommal:

EN 1993-1-5: Acélszerkezetek tervezése: Lemezekből összeállított szerkezetek. [5]

- A tervezés és modellezés alapelvei
- Nyirási deformáció („shear lag”) hatása a szerkezeti elem méretezésre
- Lemezhorpadás hatása a szerkezeti elem méretezésére
- Nyirási ellenállás
- Ellenállás koncentrált erőbevezetés esetén
- Merevített lemezek szerkezeti kialakítása
- Alternatív módszerek merevítetlen és merevített lemezek számítására
- Változó gerincmagasságú és trapézshullám gerincű szerkezeti elemek

Utóbbi szabványkötetből a könyv azt a részt tárgyalja, amely merevítetlen, illetve csak keresztbordával merevített lemezek különböző horpadási ellenállásainak számításához szükséges.

Az EN 1993-1-10 szabványkötet rendelkezik a szerkezethez alkalmazandó anyagminőség kiválasztási módjáról, az alábbi tartalommal:

EN 1993-1-10: Acélszerkezetek tervezése: Acélminőség kiválasztási eljárások. [6]

- Anyagkiválasztás szívósság alapján
- Anyagkiválasztás keresztirányú anyagtulajdonság alapján

A továbbiakban a szabványokat rövidítve jelöljük: az Eurocode 3-at általában EC3-nak, adott részét pl. az EN 1993-1-1 kötetet EC3-1-1-nek nevezzük; a még érvényben lévő magyar szabványra – MSZ 15024 – MSZ-ként hivatkozunk [7].

1.3. Jelölések

1.3.1. Jelölésrendszer az Eurocode-ban

Az Eurocode betűjelölései többségükben angol szavak kezdőbetűjén alapulnak, az alábbiak szerint:

Latin nagybetűk:

| | | | |
|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| <i>A</i> Area | keresztmetszeti terület | <i>I</i> inertia | inercianyomaték |
| <i>B</i> bolt force | csavarerő | <i>l</i> length | hossz (pl. támaszköz) |
| <i>E</i> effect of actions | „hatások következménye”, azaz általános értelemben vett igénybevétel (belső erő vagy nyomaték, feszültség, alakváltozás, lehajlás stb.) | <i>M</i> moment | nyomaték |
| <i>E</i> modulus of elasticity | rugalmassági modulus | <i>N</i> normal force | normálerő |
| <i>F</i> force | erő | <i>Q</i> | esetleges teher |
| <i>G</i> gravity force | állandó teher | <i>R</i> resistance | ellenállás |
| <i>G</i> | nyírási modulus | <i>S</i> stiffness | merevség |
| | | <i>T</i> torsion moment | csavarónyomaték |
| | | <i>V</i> shear force | nyíróerő |
| | | <i>W</i> cross-sectional modulus | keresztmetszeti modulus |

Latin kisbetűk:

| | | | |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <i>a</i> | varrat gyökmérete | <i>n</i> number | száma valaminek |
| <i>b</i> breadth | szélesség | <i>p</i> pitch | osztástávolság |
| <i>d</i> diameter | átmérő | <i>r</i> radius | sugár; lekerekítési sugár |
| <i>d</i> depth | magasság (pl. I szelvény gerincelemezén a sík felületé) | <i>t</i> thickness | vastagság |
| <i>e</i> eccentricity | külpontosság | <i>w</i> width | szélesség |
| <i>e</i> edge/end distance | csavarozott kötésben a szélső csavar és a lemez szélé közötti távolság | <i>u</i> | <i>u</i> tengely (keresztmetszet erős súlyponti tengelye, ha ferde) |
| <i>f</i> strength | szilárdság | <i>v</i> | <i>v</i> tengely (keresztmetszet gyenge súlyponti tengelye, ha ferde) |
| <i>g</i> gap | hézagszél | <i>x</i> | <i>x</i> tengely (rúd hossz tengelye) |
| <i>h</i> height | magasság | <i>y</i> | <i>y</i> tengely (keresztmetszet erős súlyponti tengelye) |
| <i>i</i> radius of gyration | inerciasugár | <i>z</i> | <i>z</i> tengely (keresztmetszet gyenge súlyponti tengelye) |
| <i>l</i> length | hossz | | |

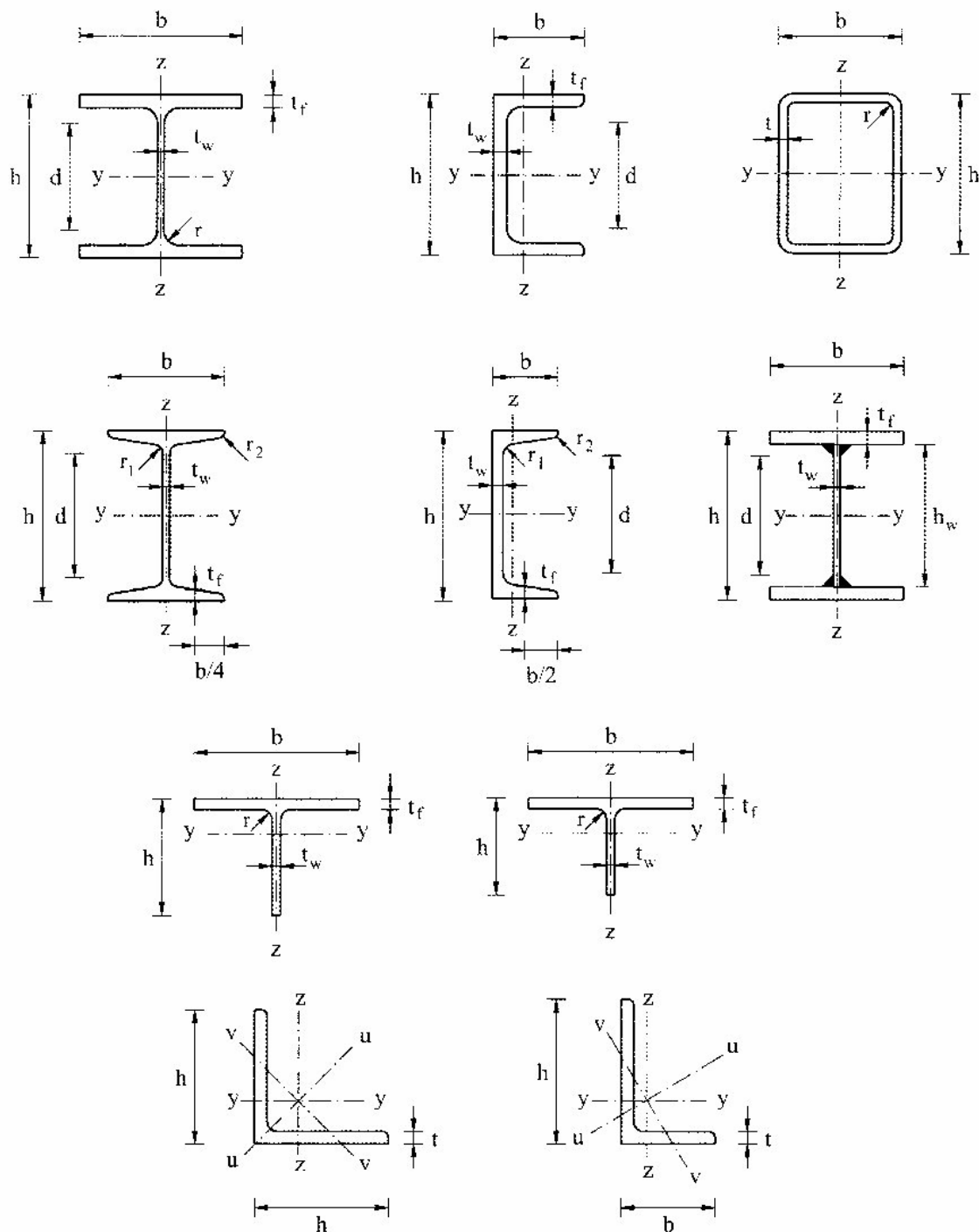
Indexek:

| | | | |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <i>a</i> average | átlagos | <i>p</i> pin | csap |
| <i>b</i> bolt | csavar | <i>p</i> punching | kígombolódási |
| <i>b</i> buckling | kihajlási, kifordulási, horpadási | <i>pl</i> plastic | képlékeny |
| <i>b</i> beam | gerenda | <i>r</i> rivet | szegecs |
| <i>b</i> bearing | palástnyomási, feltámaszkodási | <i>s</i> stressed area | húzófeszültséggel, húzásra redukált keresztmetszettel összefüggő |
| <i>c</i> cross-section | keresztmetszet | <i>s</i> slip | megesúzási |
| <i>c</i> column | oszlop | <i>s</i> storey | emelet |
| <i>com</i> compression | nyomás | <i>s</i> stiffening, stiffener | merevítő (pl. borda) |
| <i>cr</i> critical | kritikus | <i>ser</i> serviceability | használhatósági |
| <i>d</i> design value | tervezési érték | <i>t</i> tension | húzási |
| <i>eff</i> effective | hatékony, dolgozó, egyenértékű | <i>t</i> thickness | lemezvastagság |
| <i>el</i> elastic | rugalmas | <i>t</i> torsion | csavarási |
| <i>f</i> flange | övlécmez | <i>u</i> ultimate | töréshez, szakadáshoz tartozó |
| <i>j</i> joint | kapcsolat | <i>ult</i> ultimate | teherbírási határállapothoz tartozó |
| <i>k</i> characteristic value | karakterisztikus érték | <i>w</i> web | gerincelemez |
| <i>LT</i> lateral-torsional | kifordulási | <i>y</i> yield | folvás |
| <i>net</i> net | nettó, hasznos, gyengített | | |
| <i>p</i> plate | lemez, béléslemez | | |

Görög betűk:

| | | | |
|------------|---------------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------------|
| α | szög, arány, lineáris hőátviteli együttható | ν | Poisson-tényező |
| β | szög, arány | ρ | sűrűség; a hatékony keresztmetszeti szélesség csökkentő tényezője |
| γ | biztonsági tényező | σ | normál-feszültség |
| δ | lehajlás, alakváltozás | τ | nyírófeszültség |
| Δ | különbség | χ | kihajlási, kifordulási vagy horpadási csökkentő tényező |
| ϵ | nyúlás | ψ | kombinációs tényező |
| ϕ | dinamikus tényező; elfordulás | ψ | szélsőszél-feszültségek aránya |
| λ | karcúság | | |
| μ | súrlódási tényező | | |

Az EC3 a szerkezeti elemek koordináta rendszereit és a főbb keresztmetszeti méreteket az 1.1 ábra szerint jelöli: az x tengely a keresztmetszetre merőleges, súlyponti tengely.



1.1. ábra: Koordinátarendszerek az EC3-ban

1.3.2. A könyvben alkalmazott jelölések

Az alábbiakban megadjuk a könyvben alkalmazott legfontosabb betűjelöléseket, amelyek az előző szakaszban ismertetett elveken alapulnak; a zárójelben megadott szám arra a jellemző szakaszra utal, amelyben a fogalom megtalálható.

Latin nagybetűk:

| | | | |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A | teljes keresztmetszeti terület (5.1.3) | L_c | oldalirányú meglámasztások közötti távolság (5.3.4) |
| A_d | rendkívüli teher tervezési értékét (2.3.2) | L_{cr} | kihajlási hossz (5.2.2) |
| A_{eff} | effektív keresztmetszet területe (5.1.3, 5.2.1) | L_e | nyomatéki zéruspontok közötti távolság (5.1.1) |
| A_f | öv teljes keresztmetszeti területe (5.1.4, 5.1.5) | $M_{b,Rd}$ | kifordulási ellenállás (5.3.1, 5.3.4) |
| $A_{f,net}$ | öv nettó keresztmetszeti területe (5.1.4) | $M_{c,Rd}$ | keresztmetszet hajlítási ellenállása (5.1.4) |
| A_{net} | nettó keresztmetszeti terület (5.1.1) | M_{cr} | rugalmas kifordulási kritikus nyomaték (5.3.3) |
| A_{nt} | csavar húzott keresztmetszeti területe (6.2.5) | MM_{Ed} | az eredeti és az effektív keresztmetszet súlypontjai közötti távolságból adódó többlet nyomaték (5.4.1) |
| A_{nv} | csavar nyírt keresztmetszeti területe (6.2.5) | M_{Ed}^I | elsődrendű nyomaték (5.4.1) |
| A_s | csavar húzási keresztmetszete (6.2.2) | M_{Ed}^{II} | másodrendű nyomaték (5.4.1) |
| A_v | nyírt keresztmetszeti terület (5.1.5) | $M_{pl,Rd}$ | képlékeny hajlítási ellenállás (5.1.4) |
| $B_{p,Rd}$ | csavar és lemez együttes kigombolódási ellenállása (6.2.4) | M_{Rk} | kritikus keresztmetszet nyomatéki ellenállása (4.6.4) |
| C_1, C_2, C_3 | az M_{cr} számításában a nyomatéki ábra vizsgált szakaszon érvényes alakjától, valamint a k értéktől függő tényezők (5.3.3) | $M_{N,Rd}$ | normálerő hatására miatt redukált nyomatéki teherbírás (1. és 2. osztályú szelvényre) (5.1.8) |
| C_{my}, C_{mz}, C_{mLT} | ekvivalens konstans nyomaték tényezők (5.4.1) | $M_{V,Rd}$ | nyíróerő hatására miatt redukált nyomatéki teherbírás (1. és 2. osztályú szelvényre) (5.1.7) |
| E_d | a hatásokból származó állapotjellemző (hatás következmény) tervezési értéke (2.1) | $N_{b,Rd}$ | nyomott rúd kihajlási ellenállása (5.2.1) |
| F_{cr} | teherelrendezés kritikus értéke (4.4.2) | $N_{c,Rd}$ | keresztmetszet ellenállása tiszta nyomásra (5.1.3) |
| F_{Ed} | teher tervezési értéke (4.4.2) | N_{cr} | rugalmas kritikus nyomóerő (5.2.1) |
| $F_{Ed,ser}$ | használatossági határállapotban fellépő erő értéke (6.2.4) | $N_{cr,T}$ | tiszta elcsavarodó kihajlási módhoz tartozó rugalmas kritikus nyomóerő (5.2.3) |
| F_{Rd} | ellenállás tervezési értéke (5.5.2) | $N_{cr,TF}$ | térbeli elcsavarodó kihajlási módhoz tartozó rugalmas kritikus nyomóerő (5.2.3) |
| $F'_{b,Rd}$ | csavar palástnyomási ellenállása (6.2.4) | N_{Ed} | nyomóerő tervezési értéke (4.4.2) |
| $F'_{p,Cd}$ | feszítőerő tervezési értéke (6.2.4) | $N_{net,Rd}$ | C kategóriájú csavarozott kapcsolatokban a nettó keresztmetszet képlékeny töréssel szembeni ellenállása (5.1.2) |
| $F'_{s,Rd}$ | lészített csavar megcsúszással szembeni ellenállása (6.2.4) | $N_{pl,Rd}$ | központosan húzott keresztmetszet folyási ellenállása (5.1.2) |
| $F_{t,Rd}$ | csavarban számított húzóerő tervezési értéke (6.2.4) | N_{Rk} | kritikus keresztmetszet normálerő ellenállása (4.6.4) |
| $F'_{t,Rd}$ | csavar húzási ellenállása (6.2.4) | $N_{s,Rd}$ | húzott keresztmetszet ellenállása (5.1.2) |
| $F'_{v,Ed}$ | csavarra jutó nyíróerő tervezési értéke (6.2.4) | $N_{u,Rd}$ | húzott nettó keresztmetszet képlékeny töréssel szembeni ellenállása (5.1.2) |
| $F_{v,Rd}$ | csavar nyírási ellenállása (6.2.4) | R_d | az adott állapotjellemző ellenállásának (teherbírásának) tervezési értéke (2.1) |
| $F_{w,Ed}$ | egységnyi varrathosszra eső erő (6.3.3) | Q_{ki} | j -dik esetleges terhek karakterisztikus értéke (2.3.1) |
| $F_{w,Rd}$ | egységnyi hosszúságú varrat ellenállása (6.3.3) | $V_{b,Rd}$ | lemezmező nyírási horpadási ellenállása (5.5.1) |
| G_{ki} | i -dik állandó teher karakterisztikus értéke (2.3.1) | $V_{bf,Rd}$ | övek hozzájárulása a nyírási horpadási ellenálláshoz (5.5.1) |
| H_{Ed} | vízszintes terhek tervezési értéke (4.4.2) | $V_{bw,Rd}$ | gerinclemez hozzájárulása a nyírási horpadási ellenálláshoz (5.5.1) |
| I_{eff} | effektív inercianyomaték (5.3.4) | $V_{c,Rd}$ | nyírási ellenállás (1. és 2. osztályú szelvényre) (5.1.5) |
| I_{jc} | szelvény nyomott övének inercianyomatéka (5.3.3) | | |
| I_{jt} | szelvény húzott övének inercianyomatéka (5.3.3) | | |
| I_t | csavarási inercianyomaték (5.3.3) | | |
| I_z | gyenge tengely körüli inercianyomaték (5.3.3) | | |
| I_w | torzulási (öblösödési) modulus (5.3.3) | | |

| | |
|------------------|--------------------------------------|
| $F_{T,d}$ | nyíróerő tervezési értéke (5.1.5) |
| $T_{eff,3,pl,d}$ | csavarcsoport ellenállása (6.2.5) |
| $F_{pl,Rd}$ | képlékeny nyírási ellenállás (5.1.5) |

Latin kisbetűk:

| | |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| b | lemez szélessége (5.1.5) |
| b_{eff} | lemez hatékony szélessége (5.1.1) |
| d | csavarátmérő (6.2.2) |
| d_0 | csavarlyuk átmérője (5.1.1, 6.2.2) |
| d_m | kigombholódásnál figyelembe vehető átmérő (6.2.2) |
| e_N | normálcrónak a hatására hatékony keresztmetszet súlypontjának eltolódásai a teljes keresztmetszet súlypontjához képest (5.1.8) |
| e_0 | kezdeti görbesség (4.6.5) |
| e_1 | szélső csavarlyuk tengelyének távolsága az elem szélétől az erő irányában (6.2.3) |
| e_2 | szélső csavarlyuk tengelyének távolsága az elem szélétől az erőre merőleges irányában (6.2.3) |
| f_n | szakitószilárdság karakterisztikus értéke (6.2.4) |
| f_{ub} | csavar szakitószilárdságának karakterisztikus értéke (6.2.4) |
| f_y | folyási feszültség karakterisztikus értéke (4.4.2) |
| f_{yv} | gerinclemez folyáshatárának karakterisztikus értéke (5.5.1) |
| f_3 | önrezgésszám (7.2.3) |
| h | szerkezet magassága (4.4.2); szelvény magassága (5.1.5) |
| h_s | övek nyírási középpontjának távolsága (5.3.3) |
| h_w | övmek belső élei közötti távolság (5.1.5, 5.5.1) |
| i | inerciasugár (5.2.2) |
| i_{fe} | a helyettesítő nyomott öv inerciasugara (5.3.4) |
| k | végkeresztmetszet elfordulás elleni megfogását jellemző szám (5.3.3) |
| k_z | nyomateki ábra alakjától függő korrekciós tényező (5.3.4) |
| k_H | horpadási tényező (5.5.2) |
| k_β | módosító tényező kifordulási ellenállás számításához (5.3.4) |
| $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ | kölcsönhatási tényezők (5.4.1) |

Görög betűk:

| | |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| α | alakhíba tényező kihajlási görbékhez (4.6.5, 5.2.1): $\alpha = a / h_w$ lemezmező hossz szélesség aránya (5.5.1) |
| α_s | csavarelrendezéstől függő tényező (erő irányában) (6.2.4) |
| α_{cr} | kritikus teherparaméter értéke (4.4.2) |
| $\alpha_{cr,op}$ | kritikus teherszorító a hajlítás síkjára merőleges stabilitási tönkremenetekre (5.4.2) |
| α_{LT} | alakhíba tényező kifordulási görbékhez (5.3.1) |

| | |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|
| W_{eff} | hatékony keresztmetszet rugalmas keresztmetszeti modulusa (5.1.4) |
| W_{el} | rugalmas keresztmetszeti modulus (5.3.1) |
| W_{pl} | képlékeny keresztmetszeti modulus (5.1.4) |

| | |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| k_w | végkeresztmetszet vetemedés (öblösödés) elleni megfogását jellemző szám (5.3.3) |
| k_G | horpadási tényező (5.1.1) |
| k_r | nyírási horpadási tényező (5.5.1) |
| k_1 | csavarelrendezéstől függő tényező (erő irányára merőlegesen) (6.2.4) |
| ℓ | hálózati hossz (5.2.2) |
| ℓ_y | effektív hossz (5.5.2) |
| ℓ_0 | tényleges varrathossz (6.3.2) |
| m | oszlopok száma (4.6.5) |
| n | nyírt vagy súrlódó felületek száma (6.2.4) |
| p_1 | csavarlyukak tengelyének egymástól mért távolsága az erő irányában (6.2.3) |
| p_2 | csavarlyukak tengelyének egymástól mért távolsága az erőre merőleges irányban (6.2.3) |
| s_s | koncentrált erő megoszlási hossz (5.5.2) |
| t_f | övmek vastagsága (5.1.5) |
| t_w | gerincevastagság (5.1.5, 5.5.1) |
| u | H magasságú épület mentén fellépő teljes vízszintes eltolódás (7.2.1) |
| u_i | H_i magasságú szint mentén fellépő vízszintes eltolódás (7.2.1) |
| w_i | terheletlen tartószerkezet túlemelése (7.2.1) |
| w_{max} | a túlemelés figyelembevételével meghatározott teljes lehajlás (7.2.1) |
| w_{qp} | kvázi-állandó teher okozta lehajlás (7.2.3) |
| w_{tot} | teljes lehajlás (7.2.1) |
| w_1 | lehajlás az állandó terhek hatására (7.2.1) |
| w_2 | esetleges terhek hatására létrejövő többletlehajlás (7.2.1) |
| z_g | hajlított gerendán a teher támadáspontja és a keresztmetszet csavarási középpontja közötti függőleges távolság (5.3.3) |
| z_s | csavarási középpont koordinátája (5.3.3) |

| | |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha_{pl,k}$ | teherszorító, amelynek alkalmazásával a szerkezet valamely keresztmetszetében elérjük a szilárdsági – keresztmetszeti – ellenállást (4.6.4, 5.4.2) |
| $\beta_{W,1}$ | varrat ellenállását csökkentő tényező (hosszmiatti) (6.3.2) |
| β_w | korrelációs tényező (6.3.3) |
| β_2, β_3 | egyik szárúkon kapcsolt szögacélok bekötésének külpontosságát figyelembe vevő csökkentő tényezők (5.1.2) |

| | | | |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| γ_{Gi} | i -dik állandó teher parciális biztonsági tényezője (2.3.1) | $\hat{\lambda}$ | károsúság (5.2.2) |
| $\gamma_{G,inf}$ | parciális biztonsági tényezők a hatáskövetkezmények számításához – állandó hatás esetén, ha az kedvező (2.3.4) | $\bar{\lambda}$ | viszonyított károsúság (4.6.4, 5.2.1) |
| $\gamma_{G,sup}$ | parciális biztonsági tényezők a hatáskövetkezmények számításához – állandó hatás esetén, ha az kedvezőtlen (2.3.4) | $\bar{\lambda}_{r0}$ | károsúsági paraméter (5.3.4) |
| γ_M | ellenállások számítása során alkalmazandó parciális biztonsági tényező (2.1) | $\bar{\lambda}_{LT}$ | viszonyított károsúság kiforduláshoz (5.3.1) |
| γ_F | hatásokra (terhekre) vonatkozó parciális biztonsági tényező (2.1) | $\bar{\lambda}_T$ | viszonyított károsúság elesavarodó kihajláshoz (5.2.3) |
| γ_{M0} | parciális biztonsági tényező szilárdsági vizsgálatokhoz – első folyás és korlátatlan folyás esetén (2.2, 5.1.) | μ | sűrűlási tényező (6.2.4) |
| γ_{M1} | parciális biztonsági tényező stabilitási vizsgálatokhoz – kihajlás, kifordulás, nyírási horpadás (2.2, 5.2, 5.3) | ν | befogási tényező (5.2.2) |
| γ_{M2} | parciális biztonsági tényező szilárdsági vizsgálatokhoz – képlékeny törés esetén (2.2, 5.1.2, 5.2.4, 6.3.3) | $\sigma_{com,Ed}$ | keresztmetszet maximális nyomófeszültsége (4.2.2, 4.6.4) |
| γ_{M3} | parciális biztonsági tényező – feszített csavaros kapcsolat teherbírási határállapot (2.2, 5.2.4) | $\sigma_{x,Ed}$ | hosszirányú normálfeszültség tervezési (5.1.8, 5.1.9) |
| $\gamma_{M3,ser}$ | parciális biztonsági tényező – feszített csavaros kapcsolat, használhatósági határállapot (2.2) | $\sigma_{z,Ed}$ | keresztirányú normálfeszültség tervezési értéke (5.1.9) |
| γ_Q | parciális biztonsági tényezők a hatáskövetkezmények számításához – esetleges hatás (2.3.4) | σ_- | merőleges normálfeszültség (6.3.3) |
| γ_{Qi} | i -dik esetleges teher parciális biztonsági tényezője (2.3.1) | $\sigma_{ }$ | párhuzamos normálfeszültség (6.3.3) |
| ε | anyagminőségre jellemző segédmenyiség (5.5.1, 5.2.2) | τ_{cr} | lemezmező nyírási kritikus feszültsége (5.5.1) |
| η | módosító tényező (5.5.1) | τ_{Ed} | nyírófeszültség tervezési értéke (5.1.5, 5.1.9) |
| $\bar{\eta}$ | kihasználtság (5.5.2) | τ_{\perp} | merőleges nyírófeszültség (6.3.3) |
| | | $\tau_{ }$ | párhuzamos nyírófeszültség (6.3.3) |
| | | χ, χ_y, χ_z | kihajlási csökkentő tényezők (4.6.4, 5.2.1, 5.4.1) |
| | | χ_F | az effektív terhelt hossza vonatkozó horpadási csökkentő tényező (5.5.2) |
| | | χ_f | horpadási csökkentő tényező (5.5.2) |
| | | χ_{LT} | kifordulási csökkentő tényező (5.3.1) |
| | | χ_{op} | stabilitási csökkentő tényező (5.4.2) |
| | | χ_w | horpadási csökkentő tényező (5.5.1) |
| | | $\psi_{0,j}$ | kombinációs tényező (2.3.1) |

2. A mértezés alapelvei

A tartószerkezeti Eurocode szabványsorozat mértezéselméleti alapjait az „MSZ EN 1990:2003 A tartószerkezeti tervezés alapjai” (továbbiakban EC0) szabvány rögzíti. A terhekre – általánosabban a tartószerkezeti hatásokra – vonatkozó szabályok az „MSZ EN 1991:2005 Szerkezeti hatások” (továbbiakban EC1) szabványsorozatban találhatók. Az EC3-1-1 acélszerkezeti alapszabvány a 2. fejezetében ad rövid összefoglalót a legfontosabb mértezési alapelvekről.

Ebben a fejezetben egy általános bevezetőt adunk az Eurocode mértezési módszeréről a fenti három szabvány alapján. Először áttekintjük az EC0 mértezéselméleti alapjait, majd röviden összefoglaljuk az EC3 határállapoton alapuló mértezési elveit és ismertetjük az EC0 terhekre és kombinációkra vonatkozó előírásait (megjegyezzük, hogy ezzel a témakörrel részletesebben a [8] kiadvány foglalkozik).

2.1. Mértezéselméleti alapok

Az EC0 a parciális biztonsági tényezős mértezési eljárás alapul. Ez formailag megegyezik az MSZ-ben alkalmazott osztott biztonsági tényezős mértezési eljárással, tehát egy félvalószínűségi módszer. Az elnevezésbeli különbség arra a különbségre mutat rá, hogy míg az MSZ eljárása alapvetően az egységes biztonsági tényezős eljárásból kiindulva – viszonylag kevés statisztikai adat birtokában – a biztonsági tényezőt a teher- és a teherbírással „szétosztotta”, addig az Eurocode parciális eljárását ténylegesen „félvalószínűségi” alapon dolgozták ki, a több adat statisztikai elemzésével.

A parciális biztonsági tényezős eljárás jellegzetességei hasonlóan az osztott biztonsági tényezős módszerhez – az alábbiakban foglalhatók össze:

1. Mind a „teheroldalon”, mind a „teherbírással” (az Eurocode szóhasználatával „ellenállásoldalon”) alkalmazunk biztonsági tényezőket, amelyek különböző értékeket vehetnek fel és egymással is kombinálódhatnak (ld. a 2.3 szakaszban és az alábbiakban).
2. A vizsgálatok „határállapotok”-ra vonatkoznak (aszerint, hogy mit tekintünk a szerkezet működőképessége határának), amelyeket különböző „tervezési állapotok”-ban (a szerkezet élettartamának különböző szakaszaiban) vizsgálunk (ld. a 2.3 szakaszban).
3. A számításokban szereplő egyes mennyiségek valószínűségi változókként vannak definiálva, amelyeket eloszlásfüggvényük jellegzetes pontjai szerint különböző „reprezentatív értékek”-nek nevezünk, az alábbiak szerint.

Az Eurocode-ban értelmezett legfontosabb reprezentatív érték a „karakterisztikus érték”, amelyre az összes többi reprezentatív értéket visszavezetjük. A karakterisztikus érték szerepét tekintve megegyezik az MSZ szerinti alapértékkel, és jele az indexbe tett k betű. A karakterisztikus értéket a statisztikai adatok alapján meghatározott sűrűségfüggvény adott kvantilisével definiáljuk (de pl. hasznos teher esetén felvett determinisztikus érték). A karakterisztikus érték lehet felső (általában terhek esetén) vagy alsó (általában teherbírási jellemzők esetén). A karakterisztikus értékből származtatható az Eurocode leglényegesebb reprezentatív értéke, a „tervezési érték”, alsó karakterisztikus érték esetén biztonsági tényezővel való osztással, felső karakterisztikus érték esetén biztonsági tényezővel való szorzással. A tervezési érték – jele az indexbe tett d betű – definíció szerint ugyancsak valószínűségi változó, amely a karakterisztikus értékhez képest szigorúbb kvantilisként van definiálva. Az MSZ analógiában a két tervezési értéknek feleltethető meg a mértékadó feszültség és a határfeszültség.

A fentiek illusztrálására az Eurocode jelöléseinek alkalmazásával a szerkezet ellenőrzését a teherbírási határállapotban a (2.1) képlet szerint írhatjuk fel:

$$E_d \leq R_d \quad (2.1)$$

ahol E_d állapotjellemző (pl. igénybevétel, feszültség) tervezési értéke, a hatásokból (terhekből) számítva (az Eurocode szóhasználatával „design value of Effect of action”, „hatás következmény tervezési értéke”)
 R_d ugyanazon állapotjellemző (pl. igénybevétel, feszültség) teherbírással jellemző tervezési értéke (az Eurocode szóhasználatával „design Resistance”, „ellenállás tervezési értéke”)

A tervezési értékek a karakterisztikus értékekből a parciális biztonsági tényezők felhasználásával általánosabban az alábbiak szerint számíthatók:

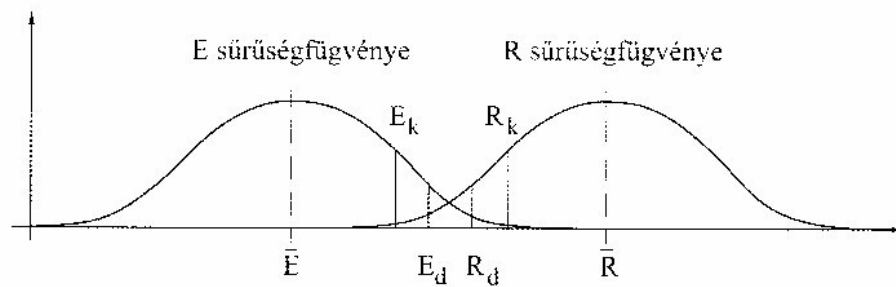
$$E_d = \gamma_F E_k \quad (2.2)$$

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (2.3)$$

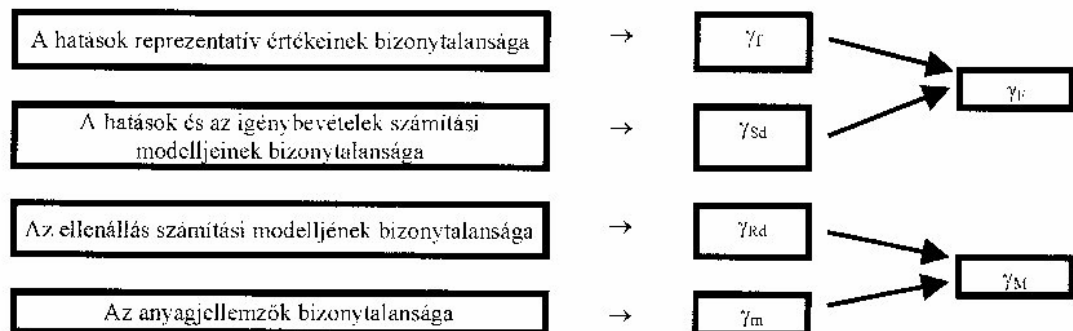
A γ_F és γ_M parciális biztonsági tényezős mértezési eljárást a 2.1 ábra, a tényezők tartalmát a 2.2 ábra szemlélteti.

Az Eurocode előírásai szerint a szerkezetet az élettartama alatt bekövetkező különböző helyzetekben, a „tervezési állapotok”-ban kell vizsgálni, amelyek az alábbiak lehetnek:

- Tartós állapot: a szerkezet üzemszerű körülményeit jelenti.
- Ideiglenes állapot: a szerkezet élettartamának csak egy rövid szakaszában érvényesül (pl. építés és karbantartás állapota).
- Rendkívüli állapot: valamilyen rendkívüli helyzetet jelentenek (pl. természeti csapások, járműütöközés).
- Földrengési állapot: a szabvány által külön kezelt rendkívüli állapot.



2.1. ábra: A parciális biztonsági tényezős méretezési eljárás elve



2.2. ábra: Parciális biztonsági tényezők tartalma

Az ellenőrzést a parciális biztonsági tényezős eljárás esetén a „határállapot” elve alapján hajtjuk végre: először definiáljuk a szerkezetnek azokat a lehetséges tönkremeneteli módjait - határállapotait - amelyen túl az már nem alkalmas a terhek viselésére, majd ennek megfelelően kiszámítjuk a (2.1) egyenlőség két oldalát és elvégezzük a vizsgálatot.

A 2.2 szakaszban röviden ismertetjük a könyvben tárgyalt acélszerkezeti határállapotokat, illetve az ezekre vonatkozó ellenállások számítása során alkalmazandó γ_M biztonsági tényezőket; az R_d ellenállások meghatározására vonatkozó EC3 alkalmazási szabályokat az 5. és 6. fejezetben részletezzük.

Az EC0 hatásokra (terhekre) vonatkozó általános elveit, a γ_f biztonsági tényezőket, valamint a különböző hatások kombinálásának szabályait röviden a 2.3 szakaszban mutatjuk be.

2.2. Határállapotok

Határállapotnak tekintünk – az általános definíció szerint – minden olyan állapotot, amelyen túl a szerkezet nem alkalmas azoknak a követelményeknek a teljesítésére, amelyek az adott határállapothoz tartoznak. Teherbírási határállapot jellemzi a tartószerkezet tönkremenetelét, míg használhatósági (MSZ szóhasználatban „használati”) határállapot írja le a használatra való alkalmasság megszűnésével (esztétikai, üzemi, stb.) összefüggő korlátozást.

A kétféle határállapot-típusban elvégzett vizsgálatok általában különböző teher szintek mellett történnek: a használhatósági határállapotokat egy alacsonyabb, gyakrabban előforduló teher szint mellett kell vizsgálni a teherbírási határállapothoz képest (lásd MSZ szerint a terhek alap-, illetve szélsőértéke). Az Eurocode-nak a különböző teher szintekre vonatkozó előírásait a 2.3 szakaszban mutatjuk be.

Az acélszerkezetekre vonatkozó teherbírási határállapotoknak ebben a könyvben elsősorban az alábbi két nagy csoportját tárgyaljuk, amelyek mindegyike a tartószerkezet tönkremenetelével kapcsolatos:

- Szilárdsági határállapotok, amelyeket az EC3 általában „keresztmetszeti”, illetve „kapcsolati ellenállás”-nak nevez, és első folyás, korlátozatlan folyás vagy képlekeny törés tönkremenetel alapján határoz meg.
- Stabilitási határállapotok, amelyeket az EC3 „szerkezeti elem ellenállás”-nak nevez, és kihajlás, kifordulás vagy lemezhorpadás tönkremenetel alapján határoz meg.

Megjegyezzük, hogy a szerkezetek tényleges tönkremenetele sok esetben a két határállapot kölcsönhatásával jellemezhető, és a kétfajta határállapot nem különül el élesen az EC3-ban sem (pl. a keresztmetszeti ellenállás vizsgálatába építi be az alkotóelemek hosszirányú nyomófeszültségre történő horpadásának ellenőrzését).

Az EC3 az ellenállások számítása során különféle γ_M biztonsági tényezőket alkalmazását írja elő, amelyeket a 2.1. táblázatban foglaltunk össze (a tényezők alkalmazását és részleteit a későbbi fejezetekben ismertetjük). Megjegyezzük, hogy a tényezők az EC3 javasolt értékei, amelyek a szabvány Nemzeti Mellekletében módosíthatók; ez esetben a táblázat értékeit ezekkel felül kell írni.

| A tényező használata | Jelölés | Számérték |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|
| Szilárdsági vizsgálatok – keresztmetszeti ellenállások első folyás és korlátozatlan folyás esetén. | γ_{M0} | 1,00 |
| Stabilitási vizsgálatok – szerkezeti clem kihajlás, kifordulás; alkotóelem nyirási horpadás. | γ_{M1} | 1,00 |
| Szilárdsági vizsgálatok – keresztmetszeti ellenállás lyukkal gyengített keresztmetszet képlékeny törése esetén; kapcsolati ellenállás: esavarak, szegecsek, csapok, hegesztési varratok, palástnyomásra működő lemezek ellenállása képlékeny törés esetén. | γ_{M2} | 1,25 |
| Feszített esaváros kapcsolat megcsúszási ellenállása teherbírási határállapot vizsgálata. | γ_{M3} | 1,25 |
| Feszített esaváros kapcsolat megcsúszási ellenállása használhatósági határállapot vizsgálata. | $\gamma_{M3,ser}$ | 1,10 |

2.1. táblázat: Parciális biztonsági tényezők az ellenállások számításához

További tipikus acélszerkezeti teherbírási határállapotok a rideg törési és fáradási határállapotok; előzőt érintőlegesen tárgyaljuk a 3. fejezet anyagkiválasztási eljárásainak kapcsán, a fáradás azonban kívül esik e könyv keretein. Nem foglalkozunk a helyzeti állékonyság elvesztésének, valamint az altalaj tönkremenetelének határállapotaival sem, amelyeket az EC0 ugyancsak a teherbírási határállapotok közé sorol.

A használhatósági határállapotok vizsgálata acélszerkezetek esetén nem tartalmaz jelentős specialitásokat, így ennek kapcsán az EC3 csupán az EC0 alapszabványra hivatkozik. Ebben a könyvben a 7. fejezetben foglaljuk össze az acélszerkezeti tervezésben alkalmazható praktikus elveket és korlátokat az alakváltozások és rezgések ellenőrzésére.

2.3. Hatások és kombinációik

Az Eurocode-ok általában a szerkezeteket érő „hatás”-okról ejtenek szót, amit a hazai szóhasználatban eddig a „teher” fogalmával fejeztünk ki. A szerkezetek méretezése során számításba vevendő hatásokat, azok nagyságát, eloszlását részleteiben az EC1 szabályozza, azokat jelen könyvben nem tárgyaljuk. A hatások csoportosítása nem tér el az MSZ-től: lehetnek állandó jellegűek (jelölésük G , például az önsúly), esetlegesek (jelölésük Q , ilyen például a hasznos teher vagy a meteorológiai terhek), vagy rendkívüli hatások (jelölésük A , például útközésből, kisiklásból származó erő, illetve A_E földrengési teher). Egy adott vizsgálat során együttesen működő hatások felsorolását teheresetnek, míg a hatások következményeinek együttes figyelembevételét teherkombinációnak nevezzük. Az Eurocode szóhasználata szerint a hatás általánosan. A teherkombinációkat a vizsgálandó határállapot jellegétől függően kell összeállítani, természetesen csak fizikailag össze illő hatásokat kell egyidejűleg fellépőknek tekinteni. A továbbiakban áttekintjük a teherkombinációkra vonatkozó legfontosabb szabályokat, majd az egyes tényezők értékeit vesszük sorra.

A teherkombinációs formulákban szereplő „+” szimbólum csak elsőrendű vizsgálat esetén jelenti a hatáskövetkezmények egyszerű összegzését, másodrendű vizsgálatnál a megfelelő tényezőkkel beszorzott hatásokat együttesen kell a szerkezetre működőnek tekinteni, és a szerkezet analizisét erre kell elvégezni (lásd részletesebben a 4. fejezetben).

2.3.1. Teherbírási határállapot, tartós vagy ideiglenes tervezési állapotokban

A teherkombinációk képzésére vonatkozó általános formulát az alábbi képlet írja le:

$$\sum_i \gamma_{Gi} G_{ki} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{j=1}^n \psi_{0,j} \gamma_{Qj} Q_{kj} \quad (2.4)$$

ami tartalmában megegyezik az MSZ-ben található szabállyal: vegyük az állandó terhek karakterisztikus értékének (G_{ki}) biztonsági tényezővel (γ_{Gi}) szorzott értékét, ezeket adjuk össze; vegyünk egy „kiemelt” esetleges terhet (Q_{k1}) és szorozzuk be a biztonsági tényezővel (γ_{Q1}); vegyük egyenként az összes többi esetleges terhet (Q_{kj}), szorozzuk be a biztonsági tényezőjével (γ_{Qj}) és az ún. kombinációs ($\psi_{0,j}$) tényezőjével (ami magyar szabványban egyidejűségi tényező), és ezeket adjuk össze; majd e három tagnak is vegyük az összegét (együttes hatását). A parciális biztonsági tényezők értékeit a 2.2 táblázatban, a kombinációs tényezők értékeit a 2.3 táblázatban foglaljuk össze.

Épületek esetében az EC0 lehetőséget ad a (2.4) formula helyett alternatívaképpen egy alacsonyabb teher szint szerinti vizsgálatra is, ekkor a vizsgálatokat az alábbi két összefüggésből számítható legkedvezőtlenebb intenzitás figyelembevételével kell elvégezni:

$$\sum_i \gamma_{Gi} G_{ki} + \sum_{j=1}^n \psi_{0,j} \gamma_{Qj} Q_{kj} \quad (2.5)$$

$$\sum_i \xi \gamma_{Gi} G_{ki} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{j=1}^n \psi_{0,j} \gamma_{Qj} Q_{kj} \quad (2.6)$$

ahol a ξ tényező ajánlott értéke 0,85. Az EC0 magyar Nemzeti Melléklete a (2.5) és (2.6) képletek alkalmazását $\xi = 0,85$ használatával engedélyezi, de előírja, hogy ekkor a használhatóságra vonatkozó erőtan követelményeket részletes számításal kell igazolni.

2.3.2. Teherbírási határállapot, rendkívüli tervezési állapot

A rendkívüli tervezési állapot ellenőrzése általában két vizsgálat valamelyikét jelenti:

- vagy egy rendkívüli teher megjelenése (pl. kisiklás, ütközés) jelenti a rendkívüli állapotot,
- vagy már nem hat a rendkívüli teher, de a szerkezet annak következtében csökkent teherbírással rendelkezik, és ezt kell ellenőrizni (pl. rendkívüli esemény, tűz utáni „életben maradás”).

Ekkor az alábbi teherkombinációval kell számolni:

$$\sum_i G_{ki} + A_d + \psi_{1,1} Q_{k1} + \sum_{j=1} \psi_{2,j} Q_{kj} \quad (2.7)$$

ahol a rendkívüli teher tervezési értékét A_d jelöli, és minden más hatás parciális biztonsági tényezője 1,0 értékű. A rendkívüli állapotok vizsgálatával a továbbiakban nem foglalkozunk.

2.3.3. Teherbírási határállapot, szeizmikus tervezési állapot

A földrengési tervezési állapot ellenőrzése az alábbi teherkombinációval történik:

$$\sum_i G_{ki} + A_{Ed} + \sum_{j=1} \psi_{2,j} Q_{kj} \quad (2.8)$$

ahol a szeizmikus teher tervezési értékét A_{Ed} jelöli, és minden más hatás parciális biztonsági tényezője 1,0 értékű. A földrengési állapot vizsgálatával a továbbiakban nem foglalkozunk.

2.3.4. Használhatósági határállapotok

A használhatósági követelmények vizsgálatához három teherkombináció képezhető, az alábbiak szerint:

- karakterisztikus kombináció (vagy más szóval ritka):

$$\sum_i G_{ki} + Q_{k1} + \sum_{j=1} \psi_{0,j} Q_{kj} \quad (2.9)$$

- gyakori kombináció:

$$\sum_i G_{ki} + \psi_{1,1} Q_{k1} + \sum_{j=1} \psi_{2,j} Q_{kj} \quad (2.10)$$

- kváziállandó kombináció:

$$\sum_i G_{ki} + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,j} Q_{kj} \quad (2.11)$$

Arról, hogy a három teherkombináció közül az egyes vizsgálatok során melyiket kell használni, az egyes Eurocode szabványok különbözőképpen rendelkeznek. Általános szabály, hogy a karakterisztikus kombinációt kell használni az irreverzibilis határállapotok, a gyakori kombinációt a reverzibilis határállapotok, a kváziállandó kombinációt pedig a hosszan tartó hatások, illetve a szerkezet megjelenését kedvezőtlenül befolyásoló jelenségek vizsgálata esetén. Az acélszerkezetek tervezésének alakváltozási követelményekre vonatkozó előírásait ezen könyv 7. fejezetében mutatjuk be részletesen.

2.3.5. Hatások parciális és kombinációs tényezői

A 2.2 táblázat mutatja be a szerkezet tönkremenetelével kapcsolatos teherbírási határállapotokban az állandó és esetleges terhek parciális biztonsági tényezőit az EC0 és magyar Nemzeti Melléklete szerint.

| A tényező | Jelölés | Számérték |
|---------------------------------|------------------|-----------|
| Állandó hatás, ha kedvezőtlen | $\gamma_{G,sup}$ | 1,35 |
| Állandó hatás, ha kedvező | $\gamma_{G,inf}$ | 1,00 |
| Esetleges hatás, ha kedvezőtlen | γ_Q | 1,50 |
| Esetleges hatás, ha kedvező | γ_Q | 0 |

2.2. táblázat: Parciális biztonsági tényezők a hatáskövetkezmények számításához

Néhány jellemző teher ψ tényezőit foglalja össze a 2.3 táblázat. A táblázatban látható teherkategóriákat részletesen az EC1 ismerteti. Megjegyezzük, hogy a megadott számértékek az EC0 ajánlott értékei, tehát országonként eltérhetnek. Különösen igaz ez a meteorológiai terhek esetén, ahol pl. a hőterhekre vonatkozó adatokat a magyar Nemzeti Melléklet írta elő.

| Hatás | Tényező számértéke | | |
|---------------------------------------------------|--------------------|----------|----------|
| | ψ_0 | ψ_1 | ψ_2 |
| Födém- és tetőteher | | | |
| A kategória (lakás) | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| B kategória (iroda) | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| C kategória (egyéb középület) | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| D kategória (áruház) | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| E kategória (raktár) | 1,0 | 0,9 | 0,8 |
| F kategória (könnyű járművel járt födém) | 0,7 | 0,7 | 0,6 |
| G kategória (közepesen nehéz járművel járt födém) | 0,7 | 0,5 | 0,3 |
| H kategória (közönséges tető) | 0 | 0 | 0 |
| Hőteher (általános eset) | 0,5 | 0,2 | 0 |
| Szélteher | 0,6 | 0,2 | 0 |
| Hőmérsékleti hatások (de nem tűzteher) | 0,6 | 0,5 | 0 |

2.3. táblázat: Néhány jellemző hatás ψ tényezőinek értéke

3. Anyagok

3.1. Szerkezeti acélok jelölése

Az acélfajták jelölése az EN 10027-1 [9] szerint a következő: **S nnn xx yy** (példák: S 355 J2; S 275 J2 II; S 460 NL)

- ahol **S** szerkezeti acélról van szó
- nnn** az előírt legkisebb folyáshatár N/mm^2 -ben (pl. 355 N/mm^2)
- xx** az előírt hőmérsékleten mérhető minimális fajlagos ütőmunkára utaló két karakter (pl. J0 – 0°C-on 27 J)
- yy** felhasználhatóságra vagy különleges kezelésre utaló jelek (pl. H – hengerelt zártzelvényhez alkalmas)

3.2. Szerkezeti acélok jellemzői

Az EC3 szerint méretezett tartószerkezetekhez az EN 10025 [10] szerinti melegen hengerelt acéltermékek, finomszemcsés nagyszilárdságú acélok, valamint az EN 10210-1 [11] és EN 10219-1 [12] szerinti zártzelvények használhatók. A vékonyfalú, hidegen alakított szerkezetekhez speciális acélok szükségesek, amelyekel más anyagszabványok tartalmazzák. A számításba vehető szilárdsági jellemzők karakterisztikus értékeit előbb felsorolt szabványok szerinti acélokra a 3.1. táblázat mutatja. Nagyobb anyagvastagság, vagy eltérő anyagminőség esetére a vonatkozó anyagszabványok adnak útmutatást.

Az acélok további jellemzői a 3.2. táblázat szerint vehetők számításba.

| | | |
|--------------------------------|----------|-------------------------------|
| Rugalmassági modulus | <i>E</i> | 210000 N/mm^2 |
| Nyírási rugalmassági modulus | <i>G</i> | 81000 N/mm^2 |
| Poisson tényező | ν | 0,3 |
| Lineáris hőtágulási együttható | α | $12 \cdot 10^{-6} 1/^\circ C$ |
| Sűrűség | ρ | 7850 kg/m^3 |

3.2. táblázat: Acélok fizikai jellemzői

3.3. Kapcsolóelemek jellemzői

A csavarozott kapcsolatokhoz olyan csavarokat, anyákat és alátéteket kell használni, amelyek az EC3-1-8-ban szerepelnek (a 4. referenciacsoport alatt felsorolt valamely szabvány szerintiék). A szabványos csavaranyagok szilárdsági jellemzőinek karakterisztikus értékeit a 3.3. táblázat tartalmazza.

| | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| Csavaranyag minősége | 4.6 | 5.6 | 6.8 | 8.8 | 10.9 |
| f_{sb} | 240 | 300 | 480 | 640 | 900 |
| f_{ub} | 400 | 500 | 600 | 800 | 1000 |

3.3. táblázat: Csavaranyagok szilárdsági jellemzői [N/mm^2]

A hegesztéshez használandó hozanyag folyáshatára, szakítószilárdsága, szakadónyúlása és ütőmunkája azonos vagy jobb legyen az alapanyagénál. A felhasznált anyagoknak és varratoknak az EC3-1-8-ban az 5. referenciacsoport címszó alatt felsorolt előírásokat teljesíteniük kell.

3.4. Anyagválasztás szempontjai

3.4.1. Alakíthatósági követelmények

A szerkezeti acélnak az alábbi követelményeket kell teljesítenie:

- a szakítószilárdság legalább 10%-kal legyen nagyobb a folyáshatárnál ($f_u/f_y \geq 1,10$)
- a szakadónyúlás haladjon meg a 15%-ot
- a szakadási alakváltozás legalább a 15-szöröse legyen a folyási alakváltozásnak ($\epsilon_u > 15 \epsilon_y$)

A 3.1. táblázat szerinti acélok a fenti feltételeknek megfelelnek.

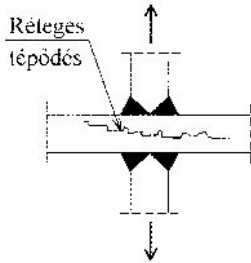
| Acélfajta jele | A szerkezeti elem névleges vastagsága <i>t</i> [mm] | | | |
|-------------------|-----------------------------------------------------|-------|--------------------------------|-------|
| | $t \leq 40$ mm | | $40 \text{ mm} < t \leq 80$ mm | |
| | f_y | f_u | f_y | f_u |
| EN 10025 | | | | |
| S 235 | 235 | 360 | 215 | 360 |
| S 275 | 275 | 430 | 255 | 410 |
| S 355 | 355 | 510 | 335 | 470 |
| S 450 | 440 | 550 | 410 | 550 |
| S 275 N/NL | 275 | 390 | 255 | 370 |
| S 355 N/NL | 355 | 490 | 335 | 470 |
| S 420 N/NL | 420 | 520 | 390 | 520 |
| S 460 N/NL | 460 | 540 | 430 | 540 |
| S 275 M/ML | 275 | 370 | 255 | 360 |
| S 355 M/ML | 355 | 470 | 335 | 450 |
| S 420 M/ML | 420 | 520 | 390 | 500 |
| S 460 M/ML | 460 | 540 | 430 | 530 |
| EN 10210-1 | | | | |
| S 235 H | 235 | 360 | 215 | 340 |
| S 275 H | 275 | 430 | 255 | 410 |
| S 355 H | 355 | 510 | 335 | 490 |
| S275NH/NHL | 275 | 390 | 255 | 370 |
| S355NH/NHL | 355 | 490 | 335 | 470 |
| EN 10219-1 | | | | |
| S 235 H | 235 | 360 | | |
| S 275 H | 275 | 430 | | |
| S 355 H | 355 | 510 | | |
| S275NH/NHL | 275 | 370 | | |
| S355NH/NHL | 355 | 470 | | |

3.1. táblázat: Szerkezeti acélok szilárdsági jellemzői [N/mm^2]

3.4.2. Hegeszthetőség

Hegesztett kapcsolatok alkalmazása esetén csak hegeszthető acélfajta használható. A 3.2 szakaszban felsorolt acélok általában jól hegeszthetők.

3.4.3. Keresztirányú (vastagság irányú) alakváltozási képesség

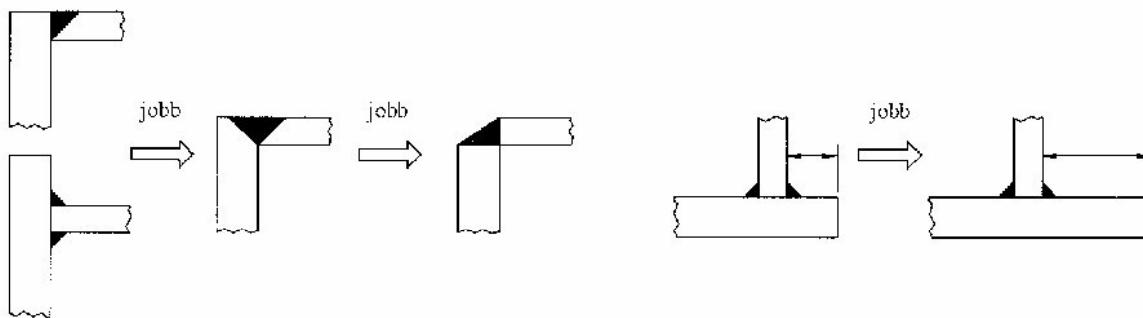


3.1. ábra: A réteges tépődés kialakulása

Gyakran alkalmazunk olyan hegesztett kapcsolatokat, ahol egy lemezhez síkjára merőlegesen hozzáhegesztett másik lemezt, vagy profilt húzóerővel terhelünk (pl. homloklemez-es kapcsolat). Ekkor a lemezben a hegesztési varrat körzetében ún. réteges tépődés alakulhat ki (3.1. ábra). A jelenség oka az, hogy a hegesztés utáni lehülés miatt a lemez hosszfelületére merőleges irányban nagy belső húzófeszültségek keletkeznek és az átlagos minőségű acélokban mikrorepedések alakulhatnak ki, amelyek a keresztirányú húzás miatt törést okoznak.

A vastagság irányában ható igénybevételeknek erőteljesen kitett szerkezeti elemeknél (ilyenek pl. a homloklemez, talplemez, hegesztett oszlopgerenda kapcsolatok) ezért a réteges tépődés elkerülésére különös gondot kell fordítani. Az EC3-1-10 részletes útmutatást ad a szükséges alakváltozó-képesség (Z_{ED}) meghatározásához, amelynek ismeretében az EN 10164 [13]

szerinti megnövelt alakváltozási képességgel (Z_{HD}) bíró acélfajta kiválasztható és megrendelhető. A legolcsóbb megoldás a helyes szerkezeti kialakítás, amire részletes ajánlásokat ugyanott találhatunk, példákat pedig a 3.2. ábra mutat.



3.2. ábra: A réteges tépődés elkerülésére ajánlott szerkezeti megoldások

3.4.4. Szívósság

A szerkezeti elemeket kellően szívós acélból kell elkészíteni ahhoz, hogy az előírt üzemi hőmérsékleten a szerkezet tervezett teljes élettartama során a ridegtörés kizárható legyen. A kellő szívósságú acélfajta kiválasztására korábban számos empirikus módszer született, míg az EC3-1-10-ben szereplő korszerű módszer törésmechanikai számításokon alapul.

A módszer húzott, vagy húzásnak is kitett szerkezeti elemekhez ajánl megfelelő szívósságú acélfajta. (Nyomott elemeknél a minimális szívóssági követelmények betartása is elegendő, amely például a 3.4. táblázat $\sigma_{Ed} = 0.25f_y(t)$ oszlopának használatával teljesíthető.)

Az eljárás használatához először a vizsgált elemben a várható repedés kezdőpontjában ébredő feszültséget (σ_{Ed}) kell kiszámítani, mint névleges feszültséget, a következő (rendkívüli) tehercsoportosításból:

$$E_d = E \{ A [T_{Ed}]^{++} + \sum G_K^{++} + \psi_1 Q_{K1}^{++} + \psi_2 Q_{K2} \} \tag{3.1}$$

amelyben a fő hatás (A): az üzemi hőmérséklet (T_{Ed}), ami a szerelési hőmérséklettől való eltérése miatt hőmozgásokat vagy feszültségeket kelthet. A tehercsoportosításban az állandó (G_K) és a további esetleges (Q_{Ki}) terhekként a használati határállapotban figyelembeveendő terheket kell számításba venni, a kiemelt esetleges terhet gyakori értékével ($\psi_1 Q_{K1}$), míg a többi kvázi-állandó értékekkel ($\psi_2 Q_{K2}$) a kombinációs tényezők (ψ_1, ψ_2) értékeit lásd 2.3 táblázatban.

A feszültségszintet rugalmas analízissel kell kiszámolni, tekintetbe véve a deformációkból származó másodlagos hatásokat is.

A számított feszültség alapján három feszültségi kategória - alacsony ($\sigma_{Ed} = 0.25 f_y(t)$), közepes ($\sigma_{Ed} = 0.50 f_y(t)$), vagy magas ($\sigma_{Ed} = 0.75 f_y(t)$) - egyikébe kell a vizsgált szerkezeti elemet besorolni. Itt az $f_y(t)$ a folyáshatár értéke az adott elemvastagság (t [mm]) esetén, és értéke vagy az anyagszabványból vehető az adott t vastagsághoz tartozó minimális folyáshatárként, vagy az anyagminőség jelében is szereplő névleges folyáshatárból ($f_{y,nom}$) az alábbi képlettel számítható ki:

$$f_y(t) = f_{y,nom} - 0.25t \text{ [N/mm}^2\text{]} \tag{3.2}$$

A 3.4. táblázatból kereshető ki a szerkezeti elem üzemi hőmérséklete (T_{Ed}) és az előbbiekben meghatározott feszültségi kategória függvényében az egyes anyagfajtákból használható legnagyobb elemvastagság értéke. Az adott feszültségi kategóriák közé eső σ_{Ed} értékhez a megengedett vastagságokat interpolációval is lehet számítani, de extrapolálni tilos!

| Szil. oszt. jele | Al-csop. jele | Üzemi hőmérséklet T_{Ed} [°C] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------------------------------|-----|-----|-----|-----|--|--|--|
| | | $\sigma_{Ed} = 0,75 f_y(t)$ (magas) | | | | | | | | $\sigma_{Ed} = 0,50 f_y(t)$ (közepes) | | | | | | | | $\sigma_{Ed} = 0,25 f_y(t)$ (alacsony) | | | | | | | |
| | | 10 | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 | 10 | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 | 10 | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 | | | |
| S235 | JR | 60 | 50 | 40 | 35 | 30 | 25 | 20 | 90 | 75 | 65 | 55 | 45 | 40 | 35 | 135 | 115 | 100 | 85 | 75 | 65 | 60 | | | |
| | J0 | 90 | 75 | 60 | 50 | 40 | 35 | 30 | 125 | 105 | 90 | 75 | 65 | 55 | 45 | 175 | 155 | 135 | 115 | 100 | 85 | 75 | | | |
| | J2 | 125 | 105 | 90 | 75 | 60 | 50 | 40 | 170 | 145 | 125 | 105 | 90 | 75 | 65 | 200 | 200 | 175 | 155 | 135 | 115 | 100 | | | |
| S275 | JR | 55 | 45 | 35 | 30 | 25 | 20 | 15 | 80 | 70 | 55 | 50 | 40 | 35 | 30 | 125 | 110 | 95 | 80 | 70 | 60 | 55 | | | |
| | J0 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 30 | 25 | 115 | 95 | 80 | 70 | 55 | 50 | 40 | 165 | 145 | 125 | 110 | 95 | 80 | 70 | | | |
| | J2 | 110 | 95 | 75 | 65 | 55 | 45 | 35 | 155 | 130 | 115 | 95 | 80 | 70 | 55 | 200 | 190 | 165 | 145 | 125 | 110 | 95 | | | |
| | M,N | 135 | 110 | 95 | 75 | 65 | 55 | 45 | 180 | 155 | 130 | 115 | 95 | 80 | 70 | 200 | 200 | 190 | 165 | 145 | 125 | 110 | | | |
| | ML,NL | 185 | 160 | 135 | 110 | 95 | 75 | 65 | 200 | 200 | 180 | 155 | 130 | 115 | 95 | 230 | 200 | 200 | 200 | 190 | 165 | 145 | | | |
| S355 | JR | 40 | 35 | 25 | 20 | 15 | 15 | 10 | 65 | 55 | 45 | 40 | 30 | 25 | 25 | 110 | 95 | 80 | 70 | 60 | 55 | 45 | | | |
| | J0 | 60 | 50 | 40 | 35 | 25 | 20 | 15 | 95 | 80 | 65 | 55 | 45 | 40 | 30 | 150 | 130 | 110 | 95 | 80 | 70 | 60 | | | |
| | J2 | 90 | 75 | 60 | 50 | 40 | 35 | 25 | 135 | 110 | 95 | 80 | 65 | 55 | 45 | 200 | 175 | 150 | 130 | 110 | 95 | 80 | | | |
| | K2,M,N | 110 | 90 | 75 | 60 | 50 | 40 | 35 | 155 | 135 | 110 | 95 | 80 | 65 | 55 | 200 | 200 | 175 | 150 | 130 | 110 | 95 | | | |
| | ML,NL | 155 | 130 | 110 | 90 | 75 | 60 | 50 | 200 | 180 | 155 | 135 | 110 | 95 | 80 | 210 | 200 | 200 | 200 | 175 | 150 | 130 | | | |
| S420 | M,N | 95 | 80 | 65 | 55 | 45 | 35 | 30 | 140 | 120 | 100 | 85 | 70 | 60 | 50 | 200 | 185 | 160 | 140 | 120 | 100 | 85 | | | |
| | ML,NL | 135 | 115 | 95 | 80 | 65 | 55 | 45 | 190 | 165 | 140 | 120 | 100 | 85 | 70 | 200 | 200 | 200 | 185 | 160 | 140 | 120 | | | |
| S460 | M,N | 90 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 25 | 130 | 110 | 95 | 75 | 65 | 55 | 45 | 200 | 175 | 155 | 130 | 115 | 95 | 80 | | | |
| | ML,NL | 125 | 105 | 90 | 70 | 60 | 50 | 40 | 180 | 155 | 130 | 110 | 95 | 75 | 65 | 200 | 200 | 200 | 175 | 155 | 130 | 115 | | | |

3.4. táblázat: Legnagyobb alkalmazható elemvastagság t [mm]

Magasépítési szerkezeteknél a 3.1 szerinti tehercsoportosítás eredményeképpen nem kapunk a folyáshatár 75%-ánál magasabb feszültséget a vizsgált elemben. Ha egyszerűen – csak a T_{Ed} üzemi hőmérséklet és a t elemvastagság ismeretében, de a σ_{Ed} feszültség kiszámítása nélkül – a „magas” feszültségi kategóriából választjuk a szükséges anyagminőséget, akkor magas valószínűséggel kellően szívós anyagfajtát fogunk használni. Ha még figyelembe vesszük azt is, hogy szokványos magasépítési szerkezetekben általában 40 mm-nél vékonyabb szerkezeti elemeket használunk, akkor a szürke háterű tartományban választhatunk.

Természetesen az eljárás következetes végrehajtásával – a σ_{Ed} feszültség kiszámításával – lehetőségünk van arra, hogy bizonyítsuk: kisebb szívóssági követelményű, tehát olcsóbb acélfajtából is megvalósítható a szerkezetünk.

4. Szerkezeti analízis

4.1. Bevezetés

A szerkezeti analízis fogalma alatt az igénybevételek és elmozdulások meghatározását értjük. Az igénybevételek és elmozdulások meghatározása természetesen csak úgy lehetséges, ha adott a szerkezet statikai modellje és terhelése, tehát a szerkezeti analízis fogalmába beleértjük a statikai modell felvételét is, mely – mint látni fogjuk – számos előzetes megfontolást és számítást is igényelhet.

Általános követelmény, hogy a statikai modell és a számítások végrehajtása reális legyen, azaz hogy a kiszámolt belső erők, feszültségek tükrözzék a szerkezet tényleges viselkedését. Ennek biztosítása minden esetben a tervező mérnök feladata és felelőssége. Jelen ismertetőben csak az EC3 által is kiemelten kezelt néhány rész kérdést tárgyalunk, melyekre általában elmondható, hogy újdonságok, azaz olyan kérdések, melyek a korábbi méretezési szabványokban csak érintőlegesen vagy egyáltalán nem szerepeltek.

A szerkezeti analízisre hatással lehet a keresztmetszetek osztályba sorolása, melyet a 4.2 szakasz foglal össze. A 4.3 szakaszban a számításokhoz alkalmazható, az EC3 által javasolt anyagmodelleket foglaljuk össze. A 4.4 szakaszban a szerkezet alakváltozásainak az igénybevételekre gyakorolt hatását, azaz az ún. másodrendű hatásokat tárgyaljuk. Mithogy a statikai modell felvételénél lehetőség van a helyettesítő imperfekciók alkalmazására, s mivel ezek az imperfekciók nagymértékben összefüggésben vannak a szerkezet stabilitásvizsgálatával, a 4.5 szakaszban először a stabilitásvizsgálatokkal kapcsolatos általános tudnivalókat ismertetjük. Ezután az EC3 által javasolt helyettesítő imperfekciókat foglaljuk össze (4.6 szakasz) és stabilitásvizsgálati eljárásokat (4.7 szakasz). Szintén meghatározó jelentőségű lehet a kapcsolatok modellezése, illetve a kapcsolatok viselkedésének a szerkezeti analízisre gyakorolt hatása. Ezt a kérdést tárgyalja a 4.8 szakasz.

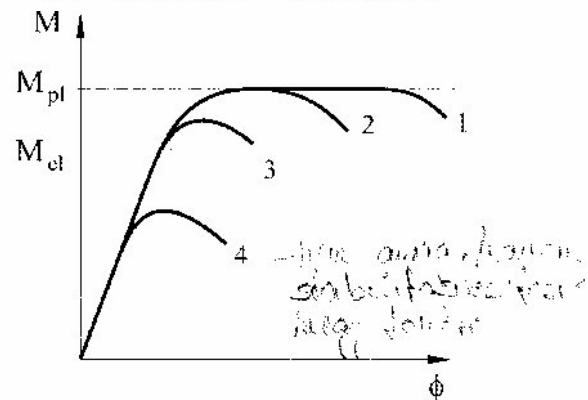
4.2. A keresztmetszetek osztályozása

4.2.1. A keresztmetszeti osztályozás háttere

A keresztmetszeti osztályozás szerepe annak meghatározása, hogy milyen mértékben csökkenti a keresztmetszet ellenállását és elfordulási képességét a lemezhorpadás esetleges kialakulása. A különféle viselkedési-tönkremeneteli módok tiszta hajlítás esetén jelentkeznek a legszemléletesebb formában. A jellemző nyomaték-elfordulás görbéket a 4.1. ábra mutatja be.

Négy, egymástól jól elkülöníthető eset definiálható:

1. A keresztmetszet alkotólemezeinek horpadása csak igen nagy képlékeny deformációknál alakul ki. Ez azt is jelenti, hogy a keresztmetszet ellenállását a képlékeny ellenállás jelenti.
2. A lemezhorpadás kialakul, de csak a képlékeny ellenállás elérése után. Ebben az esetben is a képlékeny ellenállás jelenti a keresztmetszet ellenállását.
3. A lemezhorpadás kialakul, a képlékeny ellenállás elérése előtt, de már a rugalmas tartományon túl. Ekkor a keresztmetszeti ellenállást a rugalmas ellenállás adja.
4. A lemezhorpadás a rugalmas tartományban alakul ki. Ebben az esetben a keresztmetszet ellenállását a horpadáshoz tartozó csökkentett ellenállás adja meg.



4.1. ábra: A keresztmetszet nyomaték-elfordulás karakterisztikájának alapesetei

4.2.2. Az EC3 keresztmetszeti osztályozása

Az EC3 a fenti négy esethez megfelelően 4 keresztmetszeti osztályt definiál, az alábbiak szerint:

- Az 1. osztályba azok a keresztmetszetek tartoznak, amelyekben képlékeny csukló kialakulhat, és amelyek rendelkeznek a képlékeny számításához szükséges elfordulási képességgel, a képlékeny ellenállás csökkenése nélkül.
- A 2. osztályba azok a keresztmetszetek tartoznak, amelyekben a képlékeny nyomatéki ellenállásnak megfelelő nyomaték kialakulhat, de amelyek elfordulási képességét a lemezhorpadás behatárolja.
- A 3. osztályba azok a keresztmetszetek tartoznak, amelyek nyomott szélő szálában a feszültség elérheti a folyáshatárt lineáris feszültségeloszlás feltételezése mellett, de a lemezhorpadás miatt a képlékeny nyomatéki ellenállás nem alakulhat ki.
- A 4. osztályba azok a keresztmetszetek tartoznak, amelyekben lemezhorpadás következik be még azelőtt, hogy a feszültség a keresztmetszetben bárhol elérné a folyáshatárt.

A fenti négy osztály csak abban az esetben különül el egymástól, ha a keresztmetszet döntően hajlításra van igénybe véve, de az EC3 tiszta nyomás és hajlítás-nyomás esetre is alkalmazza az osztályozást.

A keresztmetszeti osztályozásnak alapvetően három funkciója van:

- Ennek alapján dönthető el, hogy alkalmazható-e képlékeny számítás az igénybevételek meghatározásánál, illetve hogy az elvégzett képlékeny számítás során a képlékeny csuklóknál adódó koncentrált szögelfordulások ténylegesen kialakulhatnak-e az elemekben. (A képlékeny számításokat lásd a 4.3 szakaszban.)
- A keresztmetszet osztályba sorolása dönti el, hogy a keresztmetszet ellenállása hogyan számítandó (képlékeny, rugalmas vagy csökkentett ellenállással).
- A keresztmetszet osztályozása segít eldönteni, hogy szükséges-e a lokális horpadás ellenőrzése: amennyiben egy adott szakaszon nem hatnak keresztirányú erők, valamint a nyírófeszültségek is elhanyagolhatóak, akkor a keresztmetszeti osztályozás lényegében szükségtelenné teszi a horpadás-vizsgálatot.

A keresztmetszetek osztályba sorolására vonatkozó általános előírások a következők.

- A keresztmetszeti osztályozás a nyomott alkotóelemek szélesség/vastagság arányától és a nyomófeszültségek eloszlásától függ. Nyomott alkotóelemnek kell tekinteni minden olyan lemezrészlet, amely teljesen vagy részben nyomott (az adott teherkombináció esetén).
- A keresztmetszet különböző nyomott alkotóelemei (pl. öv és gerinc) különböző osztályúak lehetnek. A teljes keresztmetszetre vonatkozó osztály a legkedvezőtlenebb nyomott alkotóelem osztályával egyezik meg. (Kivételek lehetnek, lásd később.)
- A szélesség/vastagság arányszámoknak az 1., 2. és 3. osztályra vonatkozó határértékeit adja meg a 4.1. táblázat (két szélükön megtámasztott nyomott lemezelemekre), a 4.2. táblázat (egyik oldalukon megtámasztott nyomott lemezelemekre) és a 4.3. táblázat (szögacélokra és csövekre). Azon lemezelemeket, amelyek nem teljesítik a 3. osztályra megadott feltételeket sem, 4. osztályúnak kell tekinteni.
- 4. osztályú keresztmetszet esetén a lemezelemeket csökkentett (effektív) szélességükkel kell számításba venni. Az effektív keresztmetszet meghatározására vonatkozó szabályok a jelen könyv 5.1 1. szakaszában szerepelnek.

Az EC3 megengedi, hogy néhány esetben a keresztmetszetet a fenti általános szabályokból adódóhoz képest elterő (kedvezőbb) osztályba soroljuk.

- Amennyiben a keresztmetszeti osztályozás nem a rúd-clem stabilitási ellenállásának meghatározásához történik, a fenti táblázatokban a 3. osztályra (a lemezelemek szélesség/vastagság arányára) megadott határértékek a

$$\sqrt{\frac{f_y Y_{M0}}{\sigma_{com,Ed}}} \text{ tényezővel növelhetőek, ahol } \sigma_{com,Ed} \text{ a keresztmetszet maximális nyomófeszültsége. (Ez a növelés}$$

értelemszerűen akkor jöhet szóba, ha $\sigma_{com,Ed}$ kisebb, mint $f_y Y_{M0}$.)

- Az olyan keresztmetszetek, amelyek övei 1. vagy 2. osztályúak és gerince 3. osztályú (és így az általános szabályok alkalmazásával a keresztmetszetet a 3. osztályba kellene sorolni), kezelhetők csökkentett gerincmérettel rendelkező 2. osztályú keresztmetszetként. (A gerinc csökkentését az EC3-1-1 6.2.2.4 szakasza alapján kell végrehajtani.)
- Ha feltételezzük, hogy a gerinclemez csak nyíróerőket visel és nem járul hozzá a keresztmetszet nyomatékai és normál-ellenállásához, a keresztmetszet osztályba sorolása történhet csak az övek alapján, de az így adódó osztály nem lehet 1. osztály.

Megjegyzések:

- A 4.1.-4.3. táblázatokban a pozitív előjel a nyomófeszültségeket jelöli.
- A 4.1. táblázatban ψ a gerinclemez húzott (ill. kevésbé nyomott) és nyomott (ill. jobban nyomott) szélső szálában ébredő feszültségek előjeles arányszámát jelöli.
- A 4.1.-4.3. táblázatok alkalmazásánál a $\psi \leq -1$ eset akkor áll elő, ha a nyomott oldalon a szélsőszál-feszültség abszolút értéke nem éri el a folyáshatárt, vagy ha a húzott oldalon az alakváltozás meghaladja az f_y/E rugalmassági határt.
- A 4.1.-4.3. táblázatokból látható, hogy a keresztmetszeti osztály nem pusztán a keresztmetszet geometriai arányaitól függhet, hanem az igénybevételtől is (tisztá hajlítás, tisztá nyomás vagy egyidejű nyomás-hajlítás). Az ezzel kapcsolatos gyakorlati javaslatokat jelen könyv 5.1 8. szakaszában részletezzük.
- Képlékeny csuklókat alkalmazó igénybevétel számítás esetén feltételezhető, hogy a keresztmetszetek nyomaték-elfordulás diagramja lineárisan rugalmas – tökéletesen képlékeny, azaz nem kell pontosan követni a rugalmas nyomaték ellenállás fölött szükségszerűen kialakuló átmeneti (Jekerekített) zónát.
- 4. osztályú keresztmetszetek esetén a lokális horpadás csökkenti a keresztmetszet merevségét, sőt általában a keresztmetszet súlypontja is eltolódik az elméleti súlyponthoz képest. Ezeket a hatásokat szokásos keresztmetszetek esetén a szerkezeti analízis során nem kell figyelembe venni, azaz az igénybevételek és elmozdulások számíthatóak az eredeti merevségekkel és súlyvonalakkal.

4.1. táblázat: Két szélükön megtámasztott lemezlemek osztályba sorolása

| | | Hajlítás tengelye | | Hajlítás tengelye | | |
|--------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
| | | | | | | |
| Osztály | | | | | | |
| Feltételezett képlékeny feszültségeloszlás | | | | | | |
| 1. osztály | $\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$ | $\frac{c}{t} \leq 33\varepsilon$ | ha $\alpha > 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ ha $\alpha \leq 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$ | ha $\alpha > 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ ha $\alpha \leq 0,5$: $\frac{c}{t} \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$ | | |
| 2. osztály | $\frac{c}{t} \leq 83\varepsilon$ | $\frac{c}{t} \leq 38\varepsilon$ | | | | |
| Rugalmas feszültségeloszlás | | | | | | |
| 3. osztály | $\frac{c}{t} \leq 124\varepsilon$ | $\frac{c}{t} \leq 42\varepsilon$ | ha $\psi > -1$: $\frac{c}{t} \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ha $\psi \leq -1$: $\frac{c}{t} \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$ | | | |
| $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ | f_y | 235 | 275 | 355 | 420 | 460 |
| | ε | 1,00 | 0,92 | 0,81 | 0,75 | 0,71 |

4.2. táblázat: Egyik szélükön szabad lemezelemek osztályba sorolása

| | Hengerelt szelvények | | Hegesztett szelvények | |
|---------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--|
| | | | | |
| Osztály | | | | |
| Feltételezett képlékeny feszültség-eloszlás | | | | |
| 1. osztály | $\frac{c}{t} \leq 9\epsilon$ | $\frac{c}{t} \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$ | $\frac{c}{t} \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$ | |
| 2. osztály | $\frac{c}{t} \leq 10\epsilon$ | $\frac{c}{t} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$ | $\frac{c}{t} \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$ | |
| Rugalmas feszültség-eloszlás | | | | |
| 3. osztály | $\frac{c}{t} \leq 14\epsilon$ | $\frac{c}{t} \leq 21\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ | | |

4.3. táblázat: Szögacélok és csőszelvények osztályba sorolása

| | szögacél | csőszelvény |
|------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| | | |
| 1. osztály | $\frac{h}{t} \leq 9\epsilon$ és $\frac{b}{t} \leq 9\epsilon$ | $\frac{d}{t} \leq 50\epsilon^2$ |
| 2. osztály | $\frac{h}{t} \leq 10\epsilon$ és $\frac{b}{t} \leq 10\epsilon$ | $\frac{d}{t} \leq 70\epsilon^2$ |
| 3. osztály | $\frac{h}{t} \leq 15\epsilon$ és $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5\epsilon$ | $\frac{d}{t} \leq 90\epsilon^2$ |

4.3. Az anyagmodell

4.3.1. Az anyagmodellekről általában

Anyagmodellnek a feszültségek és alakváltozások között kapcsolatot teremtő matematikai összefüggést tekintjük. Bár rendkívül sokféle anyagmodell létezik, acélszerkezetek esetén elsősorban a lineárisan rugalmas modellt szokás használni, illetve ritkábban valamilyen képlékeny modellt. Ezek nem pusztán viszonylagos egyszerűségük miatt terjedtek el a gyakorlatban, hanem mert jól modellezik az acélananyag tényleges viselkedését.

Lineárisan rugalmas az anyagmodell, ha egyrészt az anyag rugalmas, azaz a feszültségek és alakváltozások közötti kapcsolat egy-egyértelmű, (ami továbbá azt is jelenti, hogy a tehermentesítés mindig a terhelési úton következik be, így nem jöhetnek létre maradó alakváltozások,) másrészt ha a feszültségek és alakváltozások közötti kapcsolat lineáris, azaz a feszültség σ a feszültségi szinttől függetlenül – egyenes arányos az alakváltozással.

Képlékeny az anyagmodell akkor, ha létezik olyan feszültségi szint, (az ún. folyáshatár,) amely elérése után a feszültségek és alakváltozások közötti kapcsolat nem egyértelmű, azaz egy adott feszültséghez többféle alakváltozás is tartozhat (tehát különbség lehet a terhelés és tehermentesítés között, ami maradó alakváltozások kialakulásához vezethet).

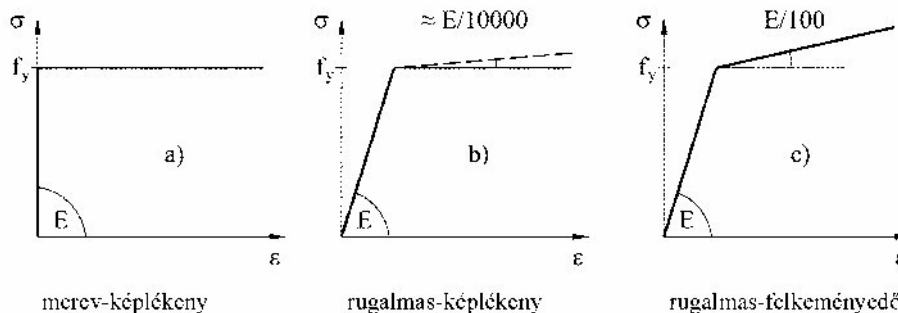
A képlékeny anyagmodellek családjába sokféle modell tartozik, melyek közül a gyakorlat szempontjából legfontosabbak: a merev-képlékeny modell, a rugalmas-képlékeny modell és a rugalmas-felkeményedő modell. Ezek jellemző feszültség-alakváltozás diagramjait foglalja össze a 4.2. ábra (tiszta húzás esetére).

A merev-képlékeny modell nem veszi figyelembe a szerkezet rugalmas alakváltozásait, mint ahogy általában a felkeményedést sem. Az ilyen modellek célja a szerkezet teherbírásának közvetlen meghatározása, a szerkezet erő-elmozdulás diagramjának előállításának nélkül. A módszer rúdszerkezetek esetén a képlékeny zónákat képlékeny csuklókkal veszi figyelembe (lemezszerkezetek esetén képlékeny vonalakkal, az ún. törésvonalakkal).

A rugalmas-képlékeny és a rugalmas-felkeményedő anyagmodell esetén azt feltételezzük, hogy a folyáshatár alatt az anyag lineárisan rugalmas, a folyáshatár elérésekor viszont képlékennyé válik. Ilyen anyagmodellel a számítás a terhelési út nyomán követésével lehetséges, amely tehát azt igényli, hogy a szerkezetre ható terheket kis teherlépcsőkben működtessük a szerkezetre.

Megjegyzések:

- Speciális mérnöki feladatok esetén szükség lehet a fentebb említetteknel pontosabb anyagmodell alkalmazására is. Ilyenek pl. azok a feladatok, ahol nagy képlékeny alakváltozások jöhetnek létre (pl. csomópontok környezetében), vagy ha ciklikus terhelés hat (azaz terhelés-tehermentesítés ciklus ismétlődik).
- Acélra mindig feltételezhető, hogy az anyag izotróp és homogén.
- Egyszerű szerkezetek esetén a képlékeny csuklókon alapuló teherbírásszámítás kézzel is végrehajtható, míg bonyolultabb esetekben számítógépi eljárás (tipikusan az ún. matematikai programozás) szükséges. Megemlítjük, hogy a jelenleg elterjedt végesesemes programokkal az ilyen számítások általában nem hajthatók végre.
- Rugalmas-képlékeny és rugalmas-felkeményedő modell esetén a szerkezet teherbírását jellemzően a teher-elmozdulás diagram tetőpontja adja.



4.2. ábra: Különböző anyagmodellek jellegzetes feszültség-alakváltozás diagramjai

4.3.2. Az EC3 rugalmas és képlékeny számításokkal kapcsolatos előírásai

- Az olyan igénybevételsszámítást, amely lineárisan rugalmas anyagmodellt alkalmaz, röviden *rugalmas számításnak* nevezzük. A valamilyen képlékeny anyagmodellt alkalmazó számításokat röviden *képlékeny számításnak* nevezzük.

- Az EC3 szerint rugalmas számítás mindig alkalmazható.
 - o Az igénybevételek rugalmas alapon számíthatók akkor is, ha a keresztmetszet ellenállását a képlékeny ellenállás jelenti.
 - o A rugalmas számítás olyan esetben is alkalmazható, ha a keresztmetszetek ellenállását a képlékeny folyások létrejötte előtti – lemezhorpadás szabja meg.
- A képlékeny számítás alkalmazására vonatkozó fontosabb szabályok:
 - o A szerkezet rendelkezzen megfelelő elfordulási képességgel a képlékeny csuklók helyén. Azt, hogy a rúdelem keresztmetszete megfelelő elfordulási képességgel rendelkezik-e, a keresztmetszet osztályba sorolása határozza meg. (A keresztmetszetek osztályozását lásd a 4.2 szakaszban.) Általános szabályként elmondható, hogy a képlékeny csuklók helyén a keresztmetszetnek 1. osztályúnak kell lennie.
 - o Ha a képlékeny csukló egy rúdelemben jön létre, az elem keresztmetszetének szimmetrikusnak kell lennie, és a szimmetriatengelynek a terhelés síkjába kell esnie.
 - o Ha a képlékeny csukló az elem végén jön létre, akkor vagy a csomóponti kapcsolatnak kell elég erősnek lennie ahhoz, hogy a csukló valóban az elembe alakuljon ki, vagy pedig a kapcsolatnak kell megfelelő elfordulási képességgel rendelkeznie.
 - o További feltételek betartása is szükséges lehet, lásd az EC3-1-1 5.6 fejezetét.
 - o Az EC3-ban megadott szabványos anyagokra megengedett a rugalmas-képlékeny anyagmodell alkalmazása. Megengedett továbbá, hogy a rugalmas-képlékeny anyagmodellt rugalmas-felkeményedő anyagmodellel helyettesítsük, kicsiny keményedési paraméter alkalmazásával (ami számítástechnikai szempontból lehet előnyös).
 - o Rugalmas-képlékeny anyagmodell alkalmazása esetén szabad a képlékeny zónákat képlékeny csuklóként modellezni, de természetesen a képlékeny zónák figyelembe vehetők pontosabban is.
- Többtámaszú folytatódagos tartók esetén megengedett a nyomatékok képlékeny alapon történő átrendezése (részletesebb képlékeny analízis nélkül), ha az alábbi feltételek teljesülnek:
 - o a nyomaték csúcsok maximum 15 %-kal haladják meg a keresztmetszet képlékeny nyomatéki ellenállását,
 - o az igénybevételek az átrendezés után is egyensúlyi rendszert alkotnak (a reakciókkal és terhekkel),
 - o 1. vagy 2. osztályú keresztmetszettel rendelkezik minden olyan elem, amelyben csökkentjük a nyomatékot,
 - o az elemek kifordulása meg van akadályozva.

4.4. Geometriai nemlinearitás: az alakváltozások-elmozdulások figyelembe vétele

4.4.1. A geometriai nemlinearitásokról általában

Első- és másodrendű számítás

Az alakváltozások-elmozdulások figyelembe vétele szempontjából szokás elsőrendű és másodrendű elméletről beszélni. Elsőrendű a számítás, ha az igénybevételek számításánál a szerkezet megváltozott alakjának az igénybevételekre gyakorolt hatását nem vesszük figyelembe, amely azt jelenti, hogy az igénybevételeket a szerkezet eredeti alakján határozzuk meg (azaz alkalmazzuk az ún. megmerevítés elvét). Másodrendű a számítás, ha az igénybevételek számításánál a szerkezet megváltozott alakjának az igénybevételekre gyakorolt hatását figyelembe vesszük.

Megjegyzések:

- Minthogy az elmozdulások-alakváltozások hatása sokféleképpen figyelembe vehető, másodrendű számítás sokféleképpen végrehajtható, s a különféle másodrendű számítások eredményei között akár számottevő különbség is lehet.
- Az elsőrendű-másodrendű csoportosítás az építőmérnöki gyakorlatban elterjedt, de talán némileg félrevezető, mert azt sugallja, hogy a másodrendű hatások csak az elmozdulások figyelembe vételében jelentkeznek, s nem hívja fel a figyelmet az elmozdulások és alakváltozások közötti kapcsolatra. Megjegyezzük, hogy teljesebb csoportosítások is találhatóak az irodalomban.
- Az elsőrendű számítást gyakran lineáris számításnak is szokás nevezni. Fel kell azonban hívni a figyelmet, hogy az elsőrendű számítás csak akkor lesz lineáris is, ha az anyagmodell mellett az alakváltozások és elmozdulások közötti kapcsolat is lineáris, azaz a kapcsolatot leíró differenciál-egyenlet elsőrendű (pl. húzott rúd esetén: $\epsilon = du/dx$). Ekkor igaz lesz, hogy a feladatot reprezentáló egyenletrendszer lineáris, ami két fontos gyakorlati előnnyel jár: egyrészt a számítás viszonylag gyors és egyszerűen végrehajtható, másrészt pedig alkalmazható a szuperpozíció elve (ami különösen nagyszámú teherkombináció esetén előnyös).
- Másodrendű számítást lehet rugalmas vagy valamilyen képlékeny anyagmodellel is végezni. Meg kell azonban említeni, hogy merev-képlékeny modell esetén nincs értelme első- vagy másodrendű számításról beszélni, hiszen e modell lényege, hogy nem vesz figyelembe (rugalmas) alakváltozásokat/elmozdulásokat.
- Síkbeli keretek esetén általában akkor van számottevő eltérés az első- és másodrendű számítás eredményei között, ha jelentős a normál erő. Általában az is igaz, hogy a nyomatékok és elmozdulások (lehajlás) szempontjából a nyomóerő kedvezőtlen, míg a húzóerő kedvező. (De pl. a nyomóerők jelenléte nem feltétlenül növeli a nyíróerőket.) Minthogy a keretszerkezetek esetén általában a nyomatékok hatása elsődleges, megállapítható, hogy másodrendű számítást általában akkor érdemes/kell végezni, ha a szerkezetben jelentős nyomóerők lépnek fel.

A másodrendű számítás végrehajtása

Másodrendű számítás sokféle módon végezhető. Minthogy a másodrendű számítások rendszerint tartalmaznak valamiféle iterációt, általában elmondható, hogy végrehajtsuk célszerűen valamilyen számítógépi programmal történhet. Érdekes azonban megemlíteni, hogy léteznek kézi eljárások is, mint pl. az ún. stabilitási függvényeken alapuló eljárás. Az alábbiakban két lehetséges eljárást említünk, egy lehetséges iterációs másodrendű számításról, és egy közelítő módszert.

A magasépítési acélszerkezetek esetén leggyakrabban rúdszerkezeti modelleket alkalmazunk. A legtöbb mérnöki alkalmazásban elegendő kis elmozdulásokat feltételezni. Eszerint a rúdszerkezetek másodrendű számításánál jól alkalmazható egy olyan másodrendű számítás, ahol a „másodrendűséget” az jelenti, hogy az egyébként elsőrendű elmélettel kiszámított elmozdulásokkal, mint kezdeti alakokkal újraszámítjuk az igénybevételeket és elmozdulásokat, s az eljárást mindaddig folytatjuk, míg két egymás utáni lépés eredményei között már számottevő változás nincs.

Lehetőség van a másodrendű számítási eredmények becslésére is. A módszer alap gondolata az, hogy alkalmazzunk egy megfelelő növelő szorzótényezőt az elsőrendű igénybevételekre/elmozdulásokra, ami kiküszöböli az iterációt. Egyszerű alapfeladatok (pl. alaktartó keresztmetszetű kétsuklós rúd) közvetlen másodrendű megoldásával (tehát pl. a rugalmas vonal differenciál-egyenletének megoldásával, vagy energia-módszeres megoldással) igazolható, hogy a lehajlások (azaz: rúdtengelyre mérőlegesen elfordulások) és nyomatékok másodrendű elmélet szerinti értékei az alábbi növelő tényező alkalmazásával számolhatók:

$$\frac{1}{1 - \frac{N}{N_{cr}}} \quad (4.1)$$

ahol N és N_{cr} rendre a rúdelemben fellépő nyomóerő és a kihajláshoz tartozó kritikus erő. (Az N_{cr} erő értelmezését részletesebben lásd a 4.5.2 szakaszban.)

Megjegyzések:

- Fenti szorzótényező úgy vezethető le, ha feltételezzük, hogy a koncentrált normálerőből származó (elsőrendű) elmozdulások szinusz (vagy koszinusz) hullám alakúak. Ebből az az általános szabály következik, hogy fenti szorzótényező annál pontosabb értéket ad, minél jobban közelítik a lehajlások a szinusz-hullám alakot.
- Érdekes megemlíteni, hogy pl. egy egyenletesen megosztó keresztirányú erővel és nyomóerővel is terhelt kéttámaszú gerenda esetén (ahol az elsőrendű lehajlások negyed-fokú parabola alakúak) fenti szorzótényezővel számított másodrendű nyomatékok maximum 3%-kal térnek el (kisebbek) a „pontos” másodrendű nyomatékoktól. Más terhelések esetén természetesen ennél nagyobb különbségek is adódhatnak.
- Fel kell hívni a figyelmet, hogy fenti szorzótényező nem tekinthető általános érvényűnek abból a szempontból sem, hogy pl. nyíró-igénybevételre számos esetben nyilvánvalóan nem alkalmazható.

4.4.2. Az EC3 keretszerkezetek másodrendű számítására vonatkozó előírásaiÁltalános előírások

- Általános kívánalom, hogy a szerkezeti analízisben minden olyan – az elmozdulásokat befolyásoló – hatást figyelembe kell venni, amely jelentősen befolyásolja az igénybevételeket. Ilyen hatások lehetnek: „shear lag” (részletesebben lásd az 5.1.1 szakaszban), lemezhorpadás, csavarkapcsolatok megcsúszása, másodrendű hatások, stb.
- Szokásos keresztmetszetek esetén (melegen hengerelt vagy hasonló hegesztett) a „shear lag” hatása elhanyagolható.
- Szokásos keresztmetszetek esetén a lemezhorpadásnak a szerkezeti analízisre gyakorolt hatása elhanyagolható, azaz 4. osztályú keresztmetszetek esetén sem kell az esetleges lemezhorpadások miatti fokozatos merevségcsökkenést figyelembe venni.
- Az EC3 első- és másodrendű számítás között tesz különbséget. A másodrendű számítás pontosabban nem definiálja, hanem másodrendűnek tekint minden olyan számítás, amely figyelembe veszi a szerkezet deformációinak hatását az igénybevételekre.
- Az EC3 szerint másodrendű számítás mindig alkalmazható.
- Elsőrendű számítás akkor alkalmazható, ha a másodrendű hatások elhanyagolhatóak. Feltételezhető, hogy a másodrendű hatások elhanyagolhatóak, ha az alábbi feltétel teljesül:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \begin{cases} \geq 10, \text{ rugalmas számítás esetén} \\ \geq 15, \text{ képlékeny számítás esetén} \end{cases} \quad (4.2)$$

ahol

α_{cr} , a kritikus teherparaméter értéke,

F_{cr} , az adott (tervezési) teherelrendezés kritikus értéke

F_{Ed} a (tervezési) teher.

Megjegyzések:

- α_{cr} és F_{cr} értelmezéséhez lásd még a 4.5.2 szakaszt.
- α_{cr} és F_{cr} számításánál globális, az egész szerkezetre kiterjedő (kerteleknél általában: kilengő) stabilitásvesztési módokat kell figyelembe venni.

Reguláris keretek

- Reguláris kereteknek az olyan kereteket tekintjük, amelyeknél az oszlopok és gerendák szabályos elrendezésben szerepelnek (pl. függőleges oszlopok, vízszintes gerendák, az egyes szinteken hasonló elrendezésben, stb).
- Többszintes keretek esetén fenti (4.2) feltételnek minden szintre teljesülnie kell.
- Lapos tetőhajlású portálkeretek és reguláris többszintes keretek esetén a kritikus teherorzó közelítően az alábbi összefüggésből határozható meg, amennyiben a gerendákban fellépő nyomóerő nem túl nagy:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) \quad (4.3)$$

ahol

H_{Ed} a vízszintes terhekből és esetleges fiktív imperfekciós terhekből származó vízszintes reakció tervezési értéke az adott szint alján, (az imperfekciós terhek értelmezését lásd a 4.6 szakaszban.)

V_{Ed} a teljes függőleges teher tervezési értéke az adott szint alján.

h a szint magassága,

$\delta_{H,Ed}$ az adott oszlop teteje és alja közötti vízszintes eltolódáskülönbség az összes vízszintes teherből.

- A tetőhajlás elegendően laposnak tekinthető, ha nem nagyobb, mint 1:2 (26°).
- A gerendákban fellépő nyomóerő akkor tekinthető „túl nagy”-nak, ha teljesül, hogy

$$\bar{\lambda} \geq 0,3 \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}} \quad (4.4)$$

ahol

$\bar{\lambda}$ a gerendának a keret síkjában értelmezett viszonyított karcsúsága, melyet a szerkezeti hossz alapján kell számítani, azaz úgy, mintha a gerenda mindkét végén csuklós lenne, (részletesen lásd az 5.2.1. szakaszban)

A a gerenda keresztmetszeti területe,

f_y a folyási feszültség,

N_{Ed} a gerendában fellépő nyomóerő tervezési értéke.

- Fenti (4.4) képlet átrendezhető az alábbi formába is:

$$N_{Ed} \geq 0,888 \frac{EI}{L^2} \quad (4.5)$$

ahol EI a keretsíkban értelmezett hajlítási merevség, míg L az elem hossza

Másodrendű igénybevételek közelítése

- A másodrendű hatások figyelembe vehetők közelítőleg úgy, hogy az elsőrendű elmélettel meghatározott értékeket növelő tényezővel szorozzuk. A növelő tényező:

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (4.6)$$

ahol α_{cr} a kritikus teherparaméter.

- A (4.6) képlet akkor alkalmazható, ha $\alpha_{cr} \geq 3,0$.
- A (4.6) képletben α_{cr} számítható a (4.3) összefüggéssel lapos tetőhajlású portálkeretek és reguláris többszintes keretek esetén.
- A (4.6) képlet többszintes keretekre csak akkor alkalmazható, ha a keret minden szintjén hasonló a függőleges és vízszintes erők, valamint a vízszintes (nyírási) merevségek eloszlása.

Megjegyezzük, hogy amennyiben a szerkezet olyan, hogy (4.3) összefüggés nem alkalmazható, a kritikus teherparaméter értéke a szerkezet lineáris stabilitásvizsgálata alapján határozható meg (lásd a 4.5.2 szakaszt). Ekkor azonban nem biztos, hogy érdemes ezt a vizsgálatot elvégezni, hanem esetleg egyszerűbb és gyorsabb a másodrendű számítás elvégzése.

4.5. Acél keretszerkezetek stabilitásvizsgálatának módszerei**4.5.1. Bevezetés: az imperfekciók figyelembe vétele a méretezésben**

A szerkezeti analízist mindig a szerkezet modelljén hajtjuk végre, mely modell mindig *idealizált* és legtöbbször *perfekt* is: pl. az alkotó rudak tökéletesen egyenes tengelyűek, az anyag tökéletesen homogén és lineárisan rugalmas, stb. A valóság ettől a tökéletes állapottól minden esetben – még ha csekély mértékben is, de eltér, mely eltéréseket összefoglaló néven *imperfekciónak* nevezük. Acélszerkezetek esetén a legfontosabb imperfekciók az alábbiak:

- geometriai imperfekció (alakhiba),
- maradó feszültségek,
- anyagi nemlinearitás,
- anyagi inhomogenitás,
- a teherelhelyezés bizonytalansága.

Mint hogy az imperfekeciók általában kis mértékű eltéréseket jelentenek, hatásuk számos esetben elhanyagolható. Vannak ugyanakkor olyan viselkedési-tönkremeneteli formák, melyeknél az imperfekecióknak jelentős (kedvezőtlen) hatása van, tehát figyelembe kell őket venni. Ennek egyik legfontosabb példája a nyomott elemek instabilitása.

Acélszerkezeteknél az imperfekeciók stabilitási ellenállásra gyakorolt kedvezőtlen hatásának a figyelembe vételére két megközelítés alakult ki. Az elmúlt évtizedekben elterjedten alkalmazott mérnöki stabilitásvizsgálatban az imperfekeciók nem közvetlenül, hanem a kihajlási-kifordulási csökkentő tényezőkben jelentek meg. Ezt a módszert a továbbiakban *'csökkentő tényező'*-nek fogjuk nevezni. Újabbban, részben a számítástechnikai lehetőségeknek köszönhetően, azonban előtérbe került az a megközelítés, mely az imperfekeciókat közvetlenül, a szerkezeti analízisben veszi figyelembe. Mint hogy az imperfekeciók sokfélék, és jelentős szórást is mutatnak, a szerkezeti analízisben való alkalmazásuk *'helyettesítő'* imperfekeciókkal valósítható meg (melyek lehetnek *'geometriai'* jellegűek vagy *'teher'* jellegűek). Az ilyen eljárást a továbbiakban *'helyettesítő imperfekeciós'* méretezési eljárásnak fogjuk nevezni.

Ákár a csökkentő tényezőkön keresztül vesszük figyelembe az imperfekeciókat, akár közvetlenül (geometriai vagy teher jellegű hibák közvetlen alkalmazásával), mindenképpen modelleket használunk a számítások végrehajtásához, melyek szükségszerűen tartalmaznak egyszerűsítéseket. Egyik eljárás sem tekinthető tehát pontosnak. Mégis, a helyettesítő imperfekeciós eljárás talán jobban kifejezi a szerkezeti imperfekeciók fontosságát, valamint egységesebben kezeli a szerkezet ellenőrzését, s ebből a szempontból talán közelebb áll a valósághoz, hiszen a tényleges szerkezeti viselkedésben sem különülnek el élesen a különféle viselkedési formák ill. tönkremeneteli módok.

A továbbiakban röviden összefoglaljuk a perfekt modellen végrehajtható stabilitásvizsgálat (kritikus erő és stabilitásvesztési alak meghatározása) jellegzetességeit, majd ismertetjük a mérnöki értelemben vett stabilitásvizsgálat fentebb említett kétféle megközelítésének legfontosabb tulajdonságait.

4.5.2. A rugalmas kritikus teher meghatározása

Keretszerkezetek kritikus terhenek meghatározásánál általában azokat a teherszinteket keressük, amelyek működése esetén a szerkezet többféle egyensúlyi alakot vehet fel. Ennek klasszikus példája a nyomott rúd síkbeli kihajlása, ahol a kritikus erő ($\pi^2 EI/L^2$) működése esetén a rúd nem csak az eredeti egyenes tengely mellett, hanem szinuszhullám szerinti alakban is egyensúlyban lehet.

A rugalmas kritikus teher meghatározása matematikailag a szerkezeti modell általánosított sajátérték-feladatának megoldását jelenti, ahol a sajátértékek jelentik a kritikus teherparaméter értékeit, míg a sajátvektorok/sajátfüggvények pedig a kihajlási alakot (általánosabban: a stabilitásvesztési alakot). A rugalmas kritikus teher számítása egy perfekt modellen történik, mely egyrészt lineárisan rugalmas anyagmodellt jelent, másrészt mindenfajta imperfekeciótól való mentességet. (Megjegyezzük, hogy matematikai értelemben a kritikus teher számítását is szokás *'stabilitásvizsgálat'*-nak nevezni, de jelen könyvben a stabilitásvizsgálatot mérnöki értelemben értelmezzük, és a stabilitással szembeni teherbírást meghatározását vagy ellenőrzését értjük alatta.)

Hangsúlyozni kell, hogy a feladat megoldása feltételezi, hogy a szerkezetre ható terhek definiáltak, mert nélkülük kritikus teherről nincs értelme beszélni. A kritikus teher fogalmilag tehát nem pusztán a szerkezethez, hanem a szerkezethez és egy adott teherkonfiguráció együtteséhez tartozik. A *'kritikus teher'* azt az – adott elrendezésű – terhet jelenti, amely mellett a rugalmas stabilitásvesztés létrejön. A gyakorlatban a teherelrendezést konkrét értékekkel tudjuk definiálni; ekkor a kritikus teher az eredetileg definiált terheknek a *'kritikus teherparaméterrel szorzott'* értéke lesz, ahol a kritikus teherparaméterek a sajátértékek.

A sajátérték-feladat teljes megoldásával annyi számú sajátérték és sajátvektor áll elő, amennyi a szerkezet figyelembe vett elmozdulási szabadságfokainak száma. (Végeselemes módszer alkalmazása esetén pl. az elmozdulási szabadságfokok száma a végeselemes csomópontok száma szorozva egy csomópont elmozdulási szabadságfokaival. Ez utóbbi pl. síkbeli keretszerkezet esetén tipikusan 3.) A stabilitásvizsgálat szempontjából leggyakrabban elegendő a legkisebb (vagy a néhány legkisebb) sajátérték meghatározása, mert a legtöbb szerkezet stabilitásvesztéssel szembeni ellenállását az első sajátalakhoz tartozó teherbírási érték adja. A magasabb sorszámú sajátértékekre rúdszerkezetek esetén általában akkor lehet szükség, ha a szerkezet egy része el tudja veszíteni a stabilitását úgy is, hogy a szerkezet többi részének geometriája gyakorlatilag nem változik. Ilyen eset lehet pl. egy kétesuklós portálkeret, melyben közbenső ingaoszlop(ok) is van(nak). Ebben az esetben az ingaoszlopok kihajolhatnak anélkül, hogy a keret geometriája lényegileg megváltozna, s így az ilyen kihajlási alakhoz tartozó kritikus teherérték nyilvánvalóan nem lesz jellemző a keret stabilitásvesztésére. Tehát ha a keret stabilitási ellenállását kívánjuk meghatározni, akkor olyan (esetleg magasabb sorszámú) stabilitásvesztési alakot és hozzá tartozó kritikus erőt kell választanunk, amelynél a keret veszíti el a stabilitását. (Megjegyezzük, hogy a magasabb sorszámú sajátértékeknek még más esetekben is fontos szerepe lehet, pl. a horpadáshoz tartozó kritikus erő számításánál.)

Mint hogy a valós szerkezetek esetén mindig vannak imperfekeciók, s mint hogy ezek az imperfekeciók mindig kedvezőtlenül befolyásolják a stabilitásvesztést, valós szerkezetek tényleges teherbírása jellemzően kisebb, mint az ideális modellen számolható kritikus erő. (Kivételt képeznek azok az esetek, ahol a szerkezet vagy szerkezeti elem rendelkezik ún. posztkritikus tartálékkal, azaz ha a feszültségek átrendeződése és/vagy stabilizáló másodrendű hatások következtében a szerkezet vagy szerkezeti elem a kritikus állapothoz tartozónál nagyobb terhek elviselésére is képes. Ennek a jelenségnek pl. lemezhorpadás esetén van fontos szerepe.) A kritikus erő és hozzátartozó stabilitásvesztési alak meghatározása mégis fontos (és legtöbbször szükséges) része a mérnöki stabilitásvizsgálatnak, mert egyrészt a kritikus erő egyfajta számítási segédmenyiségként jelenik meg (a csökkentő tényező eljárásokban mindig, a helyettesítő imperfekeciósban nem feltétlenül),

másrészt a stabilitásvesztési alak jó kiindulásként szolgálhat a tönkremeneteli mód illetve a figyelembe veendő helyettesítő imperfekciók meghatározásában.

A tervezési szabványokban szokás megkülönböztetni a szerkezet *globális* stabilitásvesztését (pl. kilengő keret instabilitása) és a szerkezeti elemek (*lokális*) stabilitásvesztését (pl. rúdelem kihajlása). Meg kell jegyezni, hogy ez a megkülönböztetés elméletileg nem teljesen megalapozott, mert a valóságban egy szerkezeti elem stabilitásvesztése csak ritkán jöhet létre a környezetétől függetlenül. Ugyanakkor ez a fajta megkülönböztetés a tervezési gyakorlat szempontjából hasznos, és az EC3 is használja. A megkülönböztetés talán legnagyobb haszna, hogy a rúdelemek kritikus erejét a közismert egyszerű képletekből közvetlenül számíthatjuk (pl. $\pi^2 EI / L^2$), ami lehetőséget teremt a stabilitási méretezés kézi elvégzésére.

4.5.3. A stabilitási teherbírás meghatározása – csökkentő tényezős eljárás

A szerkezeti elemek stabilitásvesztéssel szembeni ellenállását az elmúlt évtizedek általános gyakorlata szerint a keresztmetszeti ellenállás és egy szorzótényező (jellemzően: csökkentő tényező) szorzataként számítjuk. A szorzótényező elsődlegesen azt veszi figyelembe, hogy az anyagi képlékenyedés mellett a stabilitásvesztés is meghatározhatja a teherbírást, azaz hogy a kritikus állapot közelében olyan nagy deformációk jöhetnek létre a szerkezetben, amely végül tönkremenetelhez vezet. (Vagyis: a mérnöki értelemben vett stabilitásvesztés esetén a tönkremenetelt végző soron képlékeny folyás okozza.) A szorzótényező emellett tartalmazza az imperfekciók kedvezőtlen hatását is (továbbá speciális esetben a posztkritikus tartalek kedvező hatását).

A csökkentő tényezős méretezési eljárások a szorzótényezőt az ún. kihajlási-kifordulási görbékkel adják meg. Minthogy a kihajlási csökkentő tényező a szerkezeti elem karcsúságának függvénye, az eljáráshoz szükség van a karcsúság, illetve az ún. kihajlási hossz meghatározására. Ezek viszont általánosan a kritikus teher és hozzátartozó stabilitásvesztési alakból származtathatók. (Részletesen lásd a nyomott rúd kihajlásánál az 5.2.1. és 5.2.2. szakaszokban.)

Érdemes megemlíteni, hogy a tervezési szabványokban szereplő kihajlási-kifordulási csökkentő tényezőkre vonatkozó képletek lényegileg empirikus alapon lettek meghatározva, még ha a formulák meghatározásában elméleti megfontolások is szerepet játszottak. Más szóval a közölt képleteket úgy kalibrálták, hogy a számítási eredmények végül visszaadják a nagyszámú kísérlettel meghatározott teherbírasi értékeket.

4.5.4. A stabilitási teherbírás meghatározása – helyettesítő imperfekciós eljárás

Egyszerű alapesetekre (pl. prizmatikus, katesuklós nyomott rúd) elméletileg igazolható, hogy definiálhatóak olyan helyettesítő imperfekciók, amelyek alkalmazásával a legjobban igénybevett keresztmetszet szilárdsági vizsgálata alapján éppen akkora teherbírás adódik, mint a csökkentő tényezős stabilitási vizsgálat alapján, amennyiben az igénybevételeket másodrendű elmélettel számítjuk. A helyettesítő imperfekciós eljárás lényegében e gondolat általánosítása: ha megfelelő kezdeti helyettesítő imperfekciókat veszünk fel, a másodrendű elmélettel meghatározott igénybevételekre való szilárdsági méretezés magában foglalja a stabilitásvesztés vizsgálatát is.

A helyettesítő imperfekció lehet geometriai jellegű, ekkor *helyettesítő kezdeti alakhibáról* beszélhetünk, vagy lehet teher jellegű, ekkor *helyettesítő imperfekciós teherről* beszélhetünk.

A helyettesítő imperfekciós terhet általában egyenletesen megoszló teherként vagy koncentrált erőként érdemes felvenni.

A helyettesítő kezdeti alakhibát alapvetően kétféleképpen vehetjük fel: előre definiált függvény szerint (pl. szinusz félhullám alakú rüdgörbeség), vagy valamely sajátalak szerinti eloszlásban. Hangsúlyozni kell, hogy bár a valós szerkezetek ténylegesen is rendelkeznek kezdeti alakhibával, (melyek eloszlásukban is hasonlíthatnak a helyettesítő kezdeti alakhibához,) a helyettesítő kezdeti alakhiba a tényleges kezdeti alakhibától lényegileg különbözik, mert magában foglalja mindenfajta imperfekció hatását.

4.5.5. A csökkentő tényezős és a helyettesítő imperfekciós eljárás alkalmazási lehetőségei

A kétféle stabilitásvizsgálati eljárás alapvetően háromféle módon alkalmazható.

- A csökkentő tényezős eljárás alkalmazható önmagában. Ekkor az igénybevételeket a tökéletes geometriájú keretben, általában elsőrendű elmélettel számíthatjuk ki, s mindenfajta stabilitásvesztési módot (kihajlás, kifordulás) a szerkezeti elemekre alkalmazott megfelelő csökkentő tényezőkkel vesszük figyelembe. Ehhez tehát a szerkezetet - a stabilitásvesztés szempontjából jellemző méretekkel (ún. kihajlási hossz) meghatározott elemekre kell bontani.
- A helyettesítő imperfekciós eljárás is alkalmazható önmagában. Ekkor az imperfekciókat úgy kell megválasztani, hogy a másodrendű szerkezeti analízis elvégzése utáni keresztmetszeti ellenőrzés mindenfajta lehetséges stabilitásvesztés jellegű tönkremeneteli módot is tartalmazzon.
- Lehetőség van a csökkentő tényezős és a helyettesítő imperfekciós eljárás vegyes alkalmazására is. Ekkor tehát alkalmazunk (általában: globális) imperfekciókat és másodrendű számítást kell végeznünk az igénybevételek meghatározására, de az olyan (általában: lokális) stabilitásvesztési módokat, amelyeket az alkalmazott imperfekciók nem vagy nem kellően reprezentálnak, a csökkentő tényezős eljárásnak megfelelően kell vizsgálni. Az olyan stabilitásvesztési módokat, amelyeket az alkalmazott imperfekciók részben reprezentálnak, a csökkentő tényezős eljárásnak megfelelően, de egyszerűsítve végezhetjük el.

A fenti lehetőségeket részletezi a 4.7 szakasz az EC3 előírásainak figyelembe vételével.

4.6. Az EC3 előírásai a helyettesítő imperfeekciók meghatározására

4.6.1. Bevezetés

Az EC3 külön foglalkozik azon imperfeekciókkal, amelyek a keretszerkezet stabilitási vizsgálataihoz szükségesek, illetve azokkal, amelyek egy tartószerkezet (vagy szerkezeti elem) merevítőrendszerének vizsgálata szempontjából szükségesek.

Egy másik, az EC3-ban alkalmazott csoportosítás szerint az imperfeekciók lehetnek *globálisak* vagy *lokálisak*. Bár az EC3 nem ad definíciót a globális-lokális imperfeekciókra. Nyilvánvaló, hogy a globális-lokális csoportosítás csak egy adott szerkezeti egységen belül nyer értelmet, s globálisnak tekinthetjük azokat az imperfeekciókat, amelyek a vizsgált szerkezeti egység egészen értelmezendők, míg lokálisnak azokat, amelyeknek csak helyi hatása van, s az egész egység erőjátékát, elmozdulásait, stb. nem befolyásolják. Például, ha a vizsgált szerkezeti egység egy főtartó keretszerkezet, lokálisnak lehet tekinteni egy rúd görbeségét, de ha a vizsgált szerkezeti egység a rúd, a rúdgörbeség inkább globális imperfeekcióként értelmezhető, míg lokális lehet pl. a rúd alkotó lemezelemek helyi „kihasasodása”. Jelen szakaszban a globális-lokális megkülönböztetést úgy alkalmazzuk, hogy a szerkezeti egységnek a keretszerkezetet tekintjük.

Bármilyen imperfeekcióról is van szó, általában lehetőség van geometriai jellegű (kezdeti alakhiba) vagy teherjellegű (imperfeekciós teher) imperfeekció alkalmazására is.

A továbbiakban az EC3 vonatkozó előírásait ismertetjük a fenti kategóriáknak megfelelő csoportosításban.

4.6.2. Globális helyettesítő imperfeekciók keret vizsgálatához

A globális geometriai imperfeekció értékét az EC3 egy kezdeti ferdeséggel veszi figyelembe. Kezdeti ferdeség alatt az oszlopok (általában függőleges) terv szerinti alakjától való eltérést kell érteni, melyet következők szerint ad meg (lásd 4.3. ábra):

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m \quad (4.7)$$

ahol

$$\phi_0 = 1/200 \quad (4.8)$$

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} \text{ de } 2/3 \leq \alpha_h \leq 1.0 \quad (4.9)$$

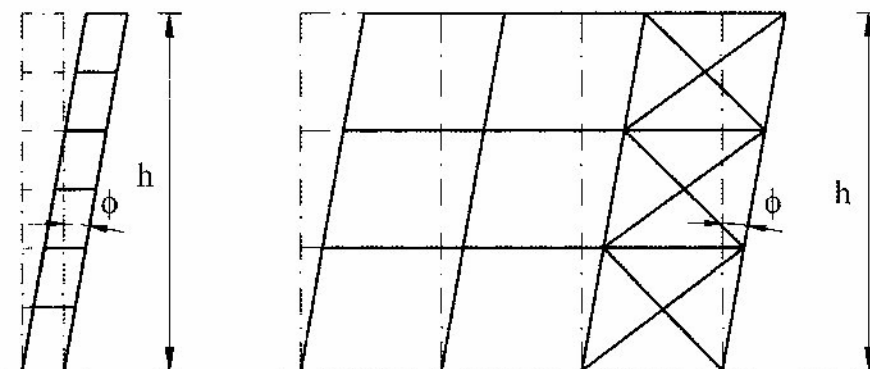
$$\alpha_m = \sqrt{0.5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \quad (4.10)$$

h a szerkezet magassága méterben,

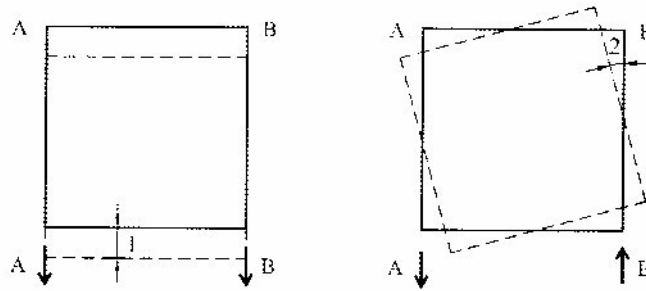
m az oszlopok száma, de csak azon oszlopokat lehet figyelembe venni, amelyben fellépő normálerő eléri az adott síkban ható függőleges terhekből számítható átlagos oszlop-normálerő legalább 50%-át.

Az EC3-nak a keret globális imperfeekciókra vonatkozó általános előírásai a következők.

- Globális helyettesítő imperfeekciót akkor kell alkalmazni, ha a keret érzékeny a kilengő stabilitásvesztésre. (Megjegyzés: bár az EC3 közvetlenül nem tartalmazza, javasolható, hogy az érzékenységet a (4.2) összefüggéssel értelmezzük.)
- Amennyiben globális kilengő stabilitásvesztés létrejöhet több irányban, akkor a globális imperfeekciókat is több irányban kell figyelembe venni, de nem egyidejűleg, azaz egy adott teherkombinációból származó igénybevételek meghatározásánál csak egy irányban kell felvenni imperfeekciókat.



4.3. ábra: Globális keretimperfeekció (függőleges metszet ill. oldalnézet)



4.4. ábra: Globális keretimperfekciók alkalmazása eltolódó és elsavarodó jellegű stabilitásvesztés esetén (felülhéz)

- Amennyiben elsavarodó jellegű globális stabilitásvesztés is bekövetkezhet, az imperfekciókat lehet a 4.4. ábra szerint felvenni, azaz egy irányban, de a különböző keretsíkokban ellentétes értelemben.
- A keret globális imperfekcióit nem kell figyelembe venni, ha a szerkezetre ható vízszintes terhek nagyok. Konkrétan:

$$H_{Ed} \geq 0,15V_{Ed} \quad (4.11)$$
 ahol H_{Ed} és V_{Ed} rendre a vízszintes és függőleges terhek tervezési értéke (többszintes épület esetén szintenként értelmezve).

A geometriai imperfekció helyett lehetőség van imperfekciós terhek alkalmazására is, melyet minden oszlopszakaszra két koncentrált vízszintes erővel kell felvenni, melyek az oszlopszakasz aljánál és tetejénél működnek egymással ellentétes irányban (vagyis cröpárként, lásd 4.5. ábra baloldali részét).

- Az erők nagysága: ϕN_{Ed} , ahol ϕ a (4.7) által definiált szög, míg N_{Ed} az adott oszlopban fellépő normálérő.
- Az így kiadódó erőket minden oszlopra, illetve többszintes épületek esetén minden szintre működtetni kell (de az általános szabályok értelmében egy teherkombinációban csak egy adott irányban).

A főtartóról egy fődémre, mint vízszintes diafragmára az imperfekciókból származó többleterőket a 4.6. ábra szerint kell figyelembe venni. Ebben az esetben ϕ a (4.7) képletből határozható meg, de a h magasság egy emelet magasságával vehető figyelembe.

4.6.3. Lokális helyettesítő imperfekciók a keret vizsgálatához

Az EC3 általános előírásai

- Geometriai imperfekcióként egy kezdeti görbeséget kell alkalmazni.
- A lokális imperfekciókat általában nem kötelező alkalmazni, ha a rudak kihajlásának ellenőrzése a csökkentő tényező eljárással történik. Ha azonban a keret érzékeny a másodrendű hatásokra, mindenképpen alkalmazni kell őket azon elemekben, amelyeknek legalább egyik vége nyomatókbitő módon kapcsolódik a kerethez, és amelyekben a normálérő viszonylag nagy. Ez utóbbi feltétel akkor áll fenn, ha

$$\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{Af_y}{N_{Ed}}} \quad (4.12)$$

ahol

$\bar{\lambda}$ az elemnek az adott síkban értelmezett viszonyított karcsúsága, melyet a szerkezeti hossz alapján kell számítani azaz úgy, mintha az elem mindkét végén csuklós lenne. (részletesen lásd az 5.2.1. szakaszban),

A az elem keresztmetszeti területe,

f_y a folyási feszültség,

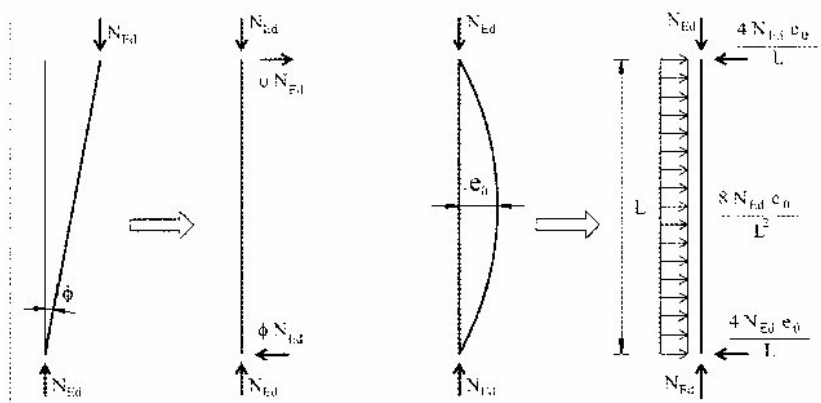
N_{Ed} az elemben fellépő nyomóerő tervezési értéke.

- Fenti (4.12) képlet átrendezhető az alábbi formába is:

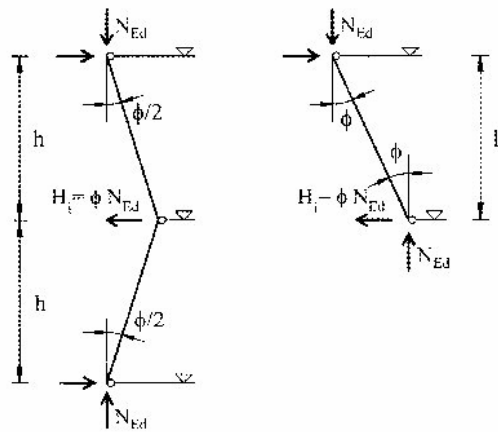
$$N_{Ed} > 2,467 \frac{EI}{l^2} \quad (4.13)$$

ahol EI az adott síkban értelmezett hajlítási merevség, míg l az elem hossza.

- Megjegyzés: minthogy a normálérő értéke pontosan csak az igénybevételezés számítás után derül ki, fenti előírás alkalmazása iterációra vezethet. Ugyanakkor az is elmondható, hogy a megadott határfeltétel olyan, amely gyakorlati esetekben igen ritkán teljesül. Más szóval: csak igen ritkán fordulhat elő, hogy a rúd görbeséget mindenképpen alkalmazni kellene.



4.5. ábra: Globális és lokális helyettesítő imperfekciós terhek



4.6. ábra: Födémekre átadódó vízszintes erők a globális imperfekciókból

4.4. táblázat

| kihajlási görbe (lásd az 5.2.1. szakaszt.) | rugalmas számítás | képlékeny számítás |
|-----------------------------------------------|-------------------|--------------------|
| | e_0/L | e_0/L |
| a_0 | 1/350 | 1/300 |
| a | 1/300 | 1/250 |
| b | 1/250 | 1/200 |
| c | 1/200 | 1/150 |
| d | 1/150 | 1/100 |

A kezdeti görbeség felvétele

- Az elméleti alakhoz képesti maximális eltérések (amplitúdó) értékét a 4.4. táblázat adja meg, a keresztmetszet alakjának és a szerkezeti analízis típusának (rugalmas vagy képlékeny) függvényében.
- A keresztmetszet alakja abban jelentkezik, hogy a kezdeti imperfekció amplitúdója függ attól, hogy a csökkentő tényezőes kihajlásvizsgálat során melyik kihajlási görbéről (a_0 , a, b, c vagy d) kellene venni a kihajlási csökkentő tényező értékét.

Megjegyzések:

- A kezdeti görbeség alakjára az 1/C3 pontos javaslatot nem ad. Szokásos a fél-színusz hullám alak alkalmazása.
- A kezdeti görbeség maximális értékét általában célszerű középen felvenni. Ezt a fentebb javasolt fél-színusz hullám alak természetesen kielégíti.

A lokális imperfekeció, mint helyettesítő teher

- A helyettesítő teher egy adott oszlopszakaszra egy keresztirányú egyenletesen megoszló teherből és két, a megoszló terhet egyensúlyozó koncentrált erőből áll. (Vagyis ún. egyensúlyi erőrendszert kell alkalmazni. Ez biztosítja, hogy az imperfekeciós teher hatása valóban lokális lesz.)
- A megoszló erő értéke (lásd még 4.5. ábra):

$$q = \frac{8N_{Ed}}{L^2} e_{0,d} \quad (4.14)$$

ahol

L az adott elem hossza,

N_{Ed} az adott elemben fellépő normálereő,

míg $e_{0,d}$ számítása kétféleképpen lehetséges:

- közelítőleg a 4.4. táblázatban szereplő e_0 értékek alkalmazásával,
 - vagy a (4.16) képlet alkalmazásával, mely elvileg pontosabb eredményre vezet, de jóval bonyolultabb.
- Megjegyzés: A helyettesítő teher fenti képletében szerepel a normálereő tervezési értéke is. Amennyiben a normálereő változik egy elemen belül, javasolható a maximális normálereő alkalmazása (bár erre vonatkozólag az EC3 nem tartalmaz előírást).

Imperfekeciók a kifordulás vizsgálatához

- Elvileg lehetőség van a kifordulás hatását is figyelembe venni helyettesítő rúdimperfekeciók alkalmazásával
- Az alkalmazandó imperfekeció a gyenge tengelyre mérőleges görbeség, melynek maximális amplitúdója $ke_{0,d}$, ahol k értékére általában 0,5 javasolható.
- A rúdtengely elcsavarodásaként jelentkező imperfekeciót általában nem kell figyelembe venni.
- Meg kell jegyezni, hogy a kifordulás vizsgálatának helyettesítő imperfekeciós módszere csak akkor alkalmazható elvileg korrekt módon, ha a számításokhoz alkalmazott numerikus módszer a gátolt csavarás hatását is képes figyelembe venni. (A legtöbb rúdszerkezeti végelelemes szoftver a gátolt csavarást nem kezeli.)

4.6.4. A helyettesítő geometriai imperfekeciók felvétele sajátalak szerint

Az EC3 lehetőséget ad arra, hogy a kezdeti helyettesítő imperfekeciót valamely sajátalak szerint vegyük fel. Ekkor a sajátalak szerinti geometriai imperfekeció kiváltja a fentiekben megadott globális és lokális imperfekeciókat is.

A sajátalakok egyik jellegzetes tulajdonsága, hogy tetszőlegesen skálázhatók, azaz az alakot leíró függvény tetszőleges valós számmal megszorozható, és a kapott új függvény is sajátalak lesz. Ez azt is jelenti, hogy pl. a maximális elmozdulás tetszőleges értéket vehet fel. A geometriai imperfekeció meghatározásához a sajátalak megfelelő skálázására van szükség az alábbi összefüggés szerint:

$$\eta_{int} = e_{0,d} \frac{1}{\bar{\lambda}^2} \frac{N_{Rk}}{EI\eta_{cr,max}'} \eta_{cr} \quad (4.15)$$

ahol

EI a hajlítási merevség a kritikus keresztmetszetben

η_{cr} jelöli a sajátalakot (mely tetszőlegesen skálázott lehet),

η_{cr}' jelöli a sajátalak (függvény) második deriváltját a kritikus keresztmetszetben,

$$e_{0,d} = \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \frac{1 - \chi\bar{\lambda}^2}{1 - \chi\bar{\lambda}^2} \gamma_{M1} \quad (4.16)$$

α az ún. alakhiba tényező, értékeit az 5.2.1. szakasz 5.6. táblázatából lehet venni,

M_{Rk} és N_{Rk} az ún. kritikus keresztmetszet nyomatéki és normálereő ellenállása,

γ_{M1} biztonsági tényező,

χ a kihajlási csökkentő tényező értéke, melyet a keresztmetszet típusának megfelelő kihajlási görbe alapján kell meghatározni,

$\bar{\lambda}$ a szerkezet viszonyított kareúsága, melyet az alábbi összefüggésből lehet számítani:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad (4.17)$$

ahol

α_{cr} a kritikus teherparaméter (értelmezését lásd a 4.5.2 szakaszban),

$\alpha_{ult,k}$ az a legkisebb teherszorító, amelynek alkalmazásával a szerkezet valamely keresztmetszetében a normálereő értéke éppen eléri az adott keresztmetszet képlékeny normálereő ellenállását.

Megjegyzések:

- M_{Rk} jelentheti a keresztmetszet képlékeny vagy rugalmas nyomatéki ellenállását is, a keresztmetszet osztályba sorolásától függően.
- Az EC3 megengedi, hogy a szerkezet $\bar{\lambda}$ viszonyított karcsúságának számításánál egyszerűsített terhelést alkalmazzunk. Az egyszerűsített terhelés csak normálerőkből áll, mely normálerők a tényleges tervezési teherkombináció esetén elsőrendű elmélettel számítható normálerőkkel egyeznek meg. (Azaz: az elsőrendű normálerő ábrát, mint terhelést lehet alkalmazni.)
- Az $Et \eta_{cr}$ kifejezés lényegében egy nyomatékot jelöl: azt a nyomatékot, amelyet a kritikus keresztmetszetben lehet kiszámolni a sajátalaknak, mint kinematikai tehernek a szerkezeten történő alkalmazásával.
- A kritikus keresztmetszet elvileg az a keresztmetszet lesz, ahol az imperfekt geometriájú szerkezet másodrendű vizsgálatából a legnagyobb kihasználtság adódik. (3. osztályú keresztmetszetek esetén pl. legnagyobb szélsőszálfeszültség.) Reguláris szerkezetek esetén ez a keresztmetszet várhatóan ott lesz, ahol a sajátalaknak, mint kinematikai tehernek az alkalmazásával a legnagyobb szélsőszálfeszültség adódik.
- Keretszerkezetek esetén általában lehet az 1. sajátalakkal (azaz a legkisebb kritikus erőhöz tartozó sajátalakkal) számolni. Ez alól azok az esetek tehetnek kivételek, amikor az első sajátalak nem a teljes szerkezet kilengő jellegű stabilitásvesztéséhez tartozik, ami pl. előfordulhat akkor, ha a szerkezet egy része az egésztől függetlenül elveszítheti stabilitását (pl. belső ingaoszlop). Ilyenkor tehát célszerű azt a legkisebb sorszámú sajátalakat használni, amelynél a teljes szerkezet kilengő stabilitásvesztése bekövetkezik.
- Meg kell jegyezni, hogy a sajátalak szerinti kezdeti geometriai imperfekció alkalmazása kézi számítás esetén meglehetősen körülményes. Ugyanakkor az EC3 által támogatott lehetőségek közül ez tekinthető a leginkább automatizálhatónak, azaz automatikus számítógépi méretezési eljárások kifejlesztésére leginkább alkalmasnak.

4.6.5. Helyettesítő imperfekciók merevítőrendszerek vizsgálatához

A merevítőrendszer szempontjából alkalmazandó imperfekciók az előző szakaszokban tárgyalt imperfekcióktól két lényeges tulajdonságban térnek el. Az egyik az, hogy ebben az esetben az imperfekciót a *merevített* szerkezetben kell értelmezni, miközben az imperfekciók hatását a *merevítőrendszer* méretezésénél kell figyelembe venni. A másik fontos eltérés, hogy – bár itt is fiktív imperfekciókról van szó – az alkalmazandó imperfekciók nem teszik lehetővé, hogy bármely vizsgálatot elhagyjunk, hanem azért szükségesek, hogy a merevítőrendszerre a megtámasztott szerkezetről átadódó (annak stabilitásvesztési hajlamából származó többlet-) erőket számítani tudjuk, mert imperfekciók alkalmazása nélkül ezek a többleterők nullára adódnának.

Az alábbi előírások olyan merevítőrendszer esetén alkalmazandók, amely nyomott elemek oldalirányú megtámasztását hivatott biztosítani.

Geometriai imperfekció

- kezdeti görbeséget kell alkalmazni (lásd 4.7. ábra),
- a kezdeti görbeség amplitúdója:

$$e_0 = \alpha_0 L / 500 \quad (4.18)$$

ahol L a merevítőrendszer hossza,

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)} \quad (4.19)$$

m a megtámasztott elemek száma.

- Fenti összefüggéssel meghatározott kezdeti görbeséget az összes merevített elemre alkalmazni kell. (Tehát ha pl. egy szokásos keretekkel rendelkező csarnok vízszintes szélrácsát vizsgáljuk, minden olyan keretgerendára alkalmazni kell a kezdeti görbeséget, amelyet a vizsgált szélrács hivatott vízszintesen merevíteni.) Ez egyben azt is jelenti, hogy a vizsgálat elvégzéséhez olyan statikai modellre van szükség, amely a szerkezet valamely nagyobb egységét tartalmazza (akár az egész szerkezetet). Az ilyen modellek tipikusan térbeli modellek.

Imperfekciós terhelés

- Az imperfekciós terhet egy egyenletesen megoszló teherrel lehet felvenni, melynek értéke:

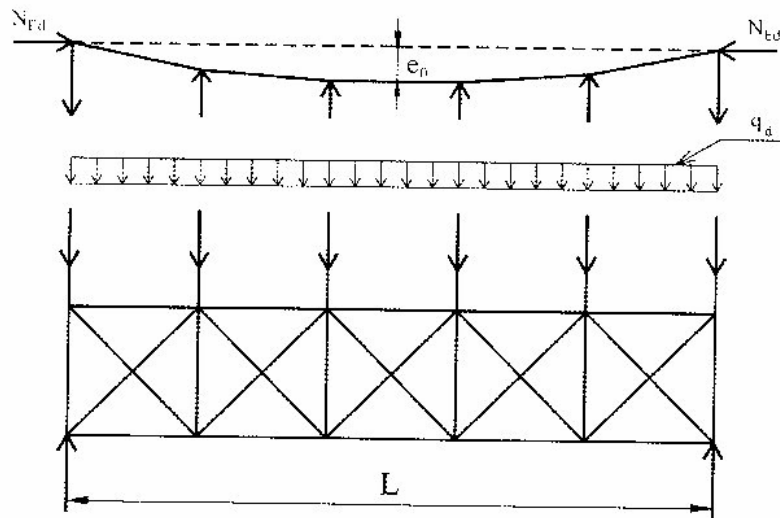
$$q_d = \sum_{i=1}^m N_{Ed,i} 8 \frac{e_0 + \delta_q}{L^2} \quad (4.20)$$

ahol

e_0 értékét a (4.18) képlet adja meg,

δ_q a merevítőrendszer q_d -ből és a külső erőkől származó lehajlása elsőrendű elmélettel számítva, illetve ha másodrendű elmélettel számolunk, δ_q értéke 0.

N_{Ed} a merevített elemekben fellépő nyomóerő.



4.7. ábra: Imperfekciók merevítőrendszer vizsgálatához

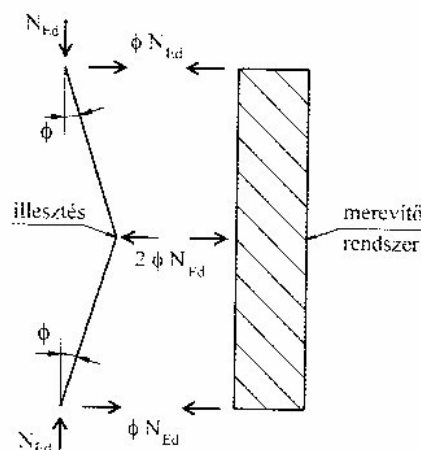
- Fenti összefüggésben az összegzést mindazon elemekre ki kell terjeszteni, amelyeket a vizsgált merevítőrendszer megtámaszt. Ez tehát azt is jelenti, hogy a fenti összefüggéssel adódó terhet a szerkezetben egy helyen a merevítőrendszeren kell működtetni, ami azzal az egyszerűsítéssel is jár, hogy a merevítőrendszer vizsgálata elvégezhető külön is egy kisebb, lényegében magára a merevítőrendszerre korlátozódó statikai modellen.
- Amennyiben a merevítőrendszer egy hajlított gerenda nyomott övét merevíti, az N_{Ed} nyomóerő értéke számítható a nyomatékából úgy, hogy a nyomatékot elosztjuk a gerenda magasságával. Ha a gerendában a hajlítónyomaték mellett nyomóerő is működik, ennek a megtámasztott övre jutó részét is számításba kell venni.
- A fentiek alapján meghatározott imperfekciós terhet azoknál az elemeknél is figyelembe kell venni, amelyek az erők közvetítésében részt vesznek (pl. szelemenek, vagy trapézlemezecskék).

Illesztések hatása

Amennyiben a megtámasztandó nyomott és/vagy hajlított elemben illesztés van, ellenőrizni kell, hogy a merevítőrendszer képes-e egy $\alpha_m N_{Ed}/100$ nagyságú koncentrált erőt is elviselni, amely minden illesztett elemről átadódik a merevítőrendszerre (lásd 4.8. ábra). Ennek ellenőrzésénél minden külső terhet is működtetni kell, de nem kell figyelembe venni a (4.20) képlettel megadott imperfekciós terhet.

Hosszkötések vizsgálata

A főtartó keret síkjára merőleges hosszukötések vizsgálatához a 4.6.2 pontban részletezett kezdeti írdesség alkalmazása javasolható.



4.8. ábra: Illesztéseknél létrejövő elforduláshoz származó erők a merevítőrendszeren

4.7. Az EC3 alapján javasolható stabilitásvizsgálati eljárások

Az EC3 előírásai alapján egy keretszerkezet esetén a csökkentő tényező és helyettesítő imperfekciós stabilitásvizsgálati eljárásokat a 4.5. táblázatban összefoglalt kombinációkban javasoljuk alkalmazni.

4.5. táblázat: A csökkentő tényező és helyettesítő imperfekciós stabilitási vizsgálatok lehetséges kombinációi

| Méretezési eljárás | Csökkentő tényező | Részben helyettesítő imperfekciós I. | Részben helyettesítő imperfekciós II. | Teljesen helyettesítő imperfekciós |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Imperfekciók | Perfekt geometria (és teher) | Imperfekt geometria, vagy imperfekciós teher alkalmazandó, de csak globális imperfekciók, a (4.7) képlet szerint. | Imperfekt geometria, vagy imperfekciós teher alkalmazandó. Globális és lokális imperfekciók is (csak keret síkban), (4.7) képlet és 4.4. táblázat szerint, vagy sajátalak szerint. | Imperfekt geometria alkalmazandó. Egyrészt a (4.7) képlet és 4.4. táblázat szerinti globális és lokális imperfekciókat kell alkalmazni, másrészt az elcsavarodó stabilitásvesztési módoknak megfelelő imperfekciókat is figyelembe kell venni. Alternatívaként sajátalak szerinti imperfekció is alkalmazható. |
| Másodrendű hatások figyelembe vétele | Elsőrendű elmélet | Elsőrendű vagy másodrendű elmélet, a (4.2) feltétel szerint | Elsőrendű vagy másodrendű elmélet, a (4.2) feltétel szerint | Elsőrendű vagy másodrendű elmélet, a (4.2) feltétel szerint |
| Igénybevételek számítása | Kézi módszerrel, vagy 3/6 szabadságfokú rúdelemeket használó (2D/3D) számítógépi eljárással. | 3 vagy 6 szabadságfokú rúdelemeket használó (2D/3D) számítógépi eljárással (esetleg kézi módszerrel). | 3 vagy 6 szabadságfokú rúdelemeket használó (2D/3D) számítógépi eljárással (esetleg kézi módszerrel). | 7 szabadságfokú rúdelemeket, vagy héjelemeket használó végeleemes eljárással. |
| A keret stabilitási vizsgálata | A keret (kíngő módú) stabilitásvizsgálatát a csökkentő tényező eljárással kell végezni. | A keret stabilitási vizsgálatát külön nem kell elvégezni. | → ugyanaz. | → ugyanaz |
| A rúdelemek keretsíkban bekövetkező kihajlásának vizsgálata | A rúdelemek stabilitási ellenőrzése a csökkentő tényező eljárással történik. A kihajlási hosszakat a keret merevségi viszonyai alapján kell felvenni. | A rúdelemek stabilitási ellenőrzése a csökkentő tényező eljárással történik. A hálózati hossz használható kihajlási hosszak. | A rúdelemek keretsíkban létrejövő kihajlását külön ellenőrizni nem kell. | → ugyanaz |
| A rúdelemek egyéb stabilitási vizsgálata (keretsíkra mérőleges kihajlás, kifordulás, elcsavarodó kihajlás) | A rúdelemek egyéb stabilitási ellenőrzései a csökkentő tényező eljárással történnek. A kihajlási hosszakat a keret merevségi viszonyai alapján kell felvenni. | A rúdelemek egyéb stabilitási ellenőrzései a csökkentő tényező eljárással történnek. A hálózati hossz használható kihajlási hosszak. | A rúdelemek egyéb stabilitási ellenőrzései a csökkentő tényező eljárással történnek. A hálózati hossz használható kihajlási hosszak. | A rúdelemek egyéb stabilitásvesztési módjait külön ellenőrizni nem kell. |

Megjegyzések:

- A csökkentő tényező alkalmazásával végrehajtott stabilitási vizsgálat abban az esetben ad viszonylag pontos eredményt, ha a szerkezet felbontható a teljes szerkezet viselkedését jól reprezentáló rúdelemekre. Minthogy az eredmények nagymértékben függenek a kihajlási hosszaktól, azokat minden körülmény figyelembe vételével kell felvenni.
- A részlegesen imperfekt modell alkalmazásának nagy előnye, hogy bár számolni kell a károsítással, a károsítás meghatározásához nincs szükség a kihajlási hosszak meghatározására, hanem a károsítás a szerkezeti hossz alapján számolható (azaz úgy, mintha az adott rúdelem kétszükszerű lenne). Meg kell azonban jegyezni, hogy nem reguláris keretszerkezetek esetén a szerkezeti (hálózati) hossz meghatározása sem feltétlenül egyértelmű.
- A teljesen imperfekt modell általános alkalmazása esetén olyan numerikus modellre van (volna) szükség, amely figyelembe veszi a gátolt csavarás hatását, azaz modellezni tudja a kifordulás és elcsavarodó kihajlás jelenségét is. A klasszikus hatszabadságfokú csomópontokat használó rúdelemek (melyet a legtöbb kereskedelmi végeleemes program alkalmaz) erre a célra nem alkalmasak.
- A teljesen imperfekt modell általános alkalmazásában még viszonylag kevés tapasztalat áll rendelkezésre. Az elcsavarodó stabilitásvesztési módok vonatkozásában az EC3 jelenleg nem ad részletes alkalmazási szabályokat.

4.8. Keretszerkezetek kapcsolatainak modellezése

4.8.1. Bevezetés

Ebben a szakaszban keretszerkezetek csomópontjaival foglalkozunk. Jelen könyvben ezen belül is inkább csak az alapelveket és fontosabb definíciókat ismertetjük azzal az elsődleges céllal, hogy felhívjuk a figyelmet a csomópontok viselkedésének a szerkezeti analízisre gyakorolt esetleges hatásaira. A témával részletesen foglalkozik jelen könyv második kötete.

A keretszerkezetek csomópontjait hagyományosan csuklósnak vagy merevnek volt szokás tekinteni a szerkezeti analízis (igénybevételek, elmozdulások számítása) során, mely feltételezést később a csomóponti részletek megfelelő kidolgozásával igyekeztek biztosítani. Az EC3 ehhez a hagyományos szemlélethez képest jelentős újításokat vezetett be, részben a számítástechnika fejlődése által biztosított lehetőség (VEM szoftverek elterjedése), részben pedig a gyártástechnológiai változások nyomán fellepő igény miatt. (Ilyen pl. a homloklemezcsatlakozások alkalmazásának elterjedése, amelyeknél az egyszerű csuklós-merev kategorizálás általában nem jól működik.)

Az EC3 a keretszerkezetek csomópontjait többféle szempont szerint kategorizálja.

- A csomópont merevsége alapján lehet: (névlegesen) csuklós, félmerev vagy merev.
- A csomópont teherbírása szerint lehet: (névlegesen) csuklós, részleges teherbírású vagy teljes teherbírású (egyenteherbírású).
- Az igénybevételek számításra gyakorolt hatása szerint a csomópont modellje lehet: egyszerű, fél-folytonos vagy folytonos, lásd 4.6. táblázat.

Meg kell jegyezni, hogy bár a fenti kategorizálás elvileg általános, az EC3 leginkább egytengelyű hajlításra értelmezi és használja őket. Továbbá: konkrét számítási képleteket viszonylag kevés kapcsolattípusra közöl.

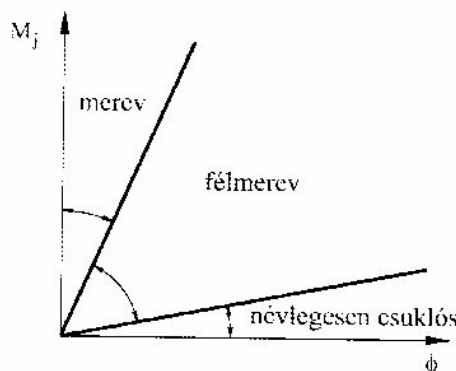
4.8.2. A csomópont osztályozása merevség szerint

Az EC3 által alkalmazott osztályok

- A névlegesen csuklós kapcsolatnak úgy kell biztosítani az erők átadását, hogy közben ne ébredjen olyan nyomaték a kapcsolatban, amely esetleg kedvezőtlenül befolyásolná a kapcsolódó elemek vagy a szerkezet egészének a viselkedését. A névlegesen csuklós kapcsolatoknak továbbá megfelelő elfordulási képességgel kell rendelkezniük.
- A merev kapcsolatoknak olyan elfordulási merevséggel kell rendelkezniük, hogy a teljesen folytonos nyomatékátadás reálisan feltételezhető legyen.
- Az olyan kapcsolatokat, amelyek nem tekinthetők sem csuklósnak sem merevnek, félmerevnek kell tekinteni.

Osztályba sorolás

- Merevségük alapján a keretszerkezetek kapcsolatai a 4.9. ábra szerint sorolhatók osztályba.
- A csomópont merevség szerinti osztályba sorolása történhet számítás alapján vagy más módon. Számítás esetén meg kell határozni a csomópont nyomaték-elfordulás karakterisztikájának S_{lim} kezdeti merevségét, és összehasonlítani a különféle osztályokhoz megadott határértékekkel. A határértékek alapvetően a kapcsolódó rudak hajlítási merevségétől függenek. (Az osztályba sorolás, azon belül is elsősorban a kezdeti merevség meghatározása, általában hosszadalmas számítást igényel. Ennek részleteit jelen könyv második kötetében fogjuk ismertetni. A merevségek számítása továbbá megtalálható az EC3-1-8 6.3.1. szakaszában I-szelvényekre. Az egyes osztályokra vonatkozó határfeltételeket pedig az EC3-1-8 5.2.2.5. szakasza ismerteti.) Az osztályozás történhet kísérletek alapján, hasonló esetekből nyert korábbi tapasztalatok alapján, vagy kísérlettel segített számítás alapján. (Erre vonatkozólag az EC3 nem közöl részletes előírásokat.)



4.9. ábra: Csomópontok osztályozása merevség szerint az M_j nyomaték és ϕ elfordulás függvényében

4.8.3. A csomópont osztályozása teherbírás szerint

Az EC3 által alkalmazott osztályok

- A névlegesen csuklós kapcsolatnak úgy kell biztosítania az erők átadását, hogy közben ne ébredjen olyan nyomaték a kapcsolatban, amely esetleg kedvezőtlenül befolyásolná a kapcsolódó elemek vagy a szerkezet egészének a viselkedését. A névlegesen csuklós kapcsolatoknak továbbá megfelelő elfordulási képességgel kell rendelkezniük.
- A teljes teherbírású kapcsolat tervezési ellenállása nem lehet kisebb, mint a kapcsolódó szerkezeti elemek nyomatéki tervezési ellenállása.
- Az olyan kapcsolatokat, amelyek nem tekinthetők sem csuklósnak sem teljes teherbírásúnak, részleges teherbírásúnak kell tekinteni.

Osztályba sorolás

- A kapcsolat teherbírás szerinti osztályba sorolása a kapcsolat és a kapcsolódó szerkezeti elemek nyomatéki tervezési ellenállásának összehasonlítása alapján történhet, melynek részleteit jelen könyv második kötete, illetve az EC3-1-8 5.2.3. szakasza közli.

4.8.4. A szerkezeti analízisben alkalmazandó csomóponti modell

A szerkezeti analízisre gyakorolt hatás szerint a kapcsolat:

- egyszerű, ha feltételezzük, hogy a kapcsolat nem továbbit hajlítónyomatékot,
- folytonos, ha feltételezzük, hogy a kapcsolatnak nincs hatása a szerkezeti analízisre,
- fél-folytonos, ha a kapcsolat viselkedését figyelembe kell venni a szerkezeti analízisben.

Azt, hogy a szerkezeti analízisre gyakorolt hatása szerint a kapcsolat melyik kategóriába kerül (azaz hogy milyen az alkalmazandó csomópontmodell), egyrészt a csomóponti merevség és teherbírás, másrészt a szánítás típusa dönti el, a 4.6. táblázat szerint:

4.6. táblázat: A csomóponti modell és a csomópont típusa közötti összefüggés

| Szerkezeti analízis módszere | A csomópont osztályozása | | |
|------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | Névlegesen csuklós | Merev | Fél-merev |
| Rugalmas | Névlegesen csuklós | Merev | Fél-merev |
| Merev-képlékeny | Névlegesen csuklós | Teljes teherbírású | Részleges teherbírású |
| Rugalmas-képlékeny | Névlegesen csuklós | Merev és teljes teherbírású | Félmerev és részleges teherbírású vagy: Félmerev és teljes teherbírású vagy: Merev és részleges teherbírású |
| Csomópont modellje | Egyszerű | Folytonos | Fél-folytonos |

Fél-folytonos kapcsolati modell esetén szükség lehet a kapcsolat kezdeti merevségének, teherbírásának és elfordulási képességének meghatározására. Ezek számítása nagymértékben függ a kapcsolat kialakításától, és általában elmondható, hogy meghatározásuk hosszadalmas számítást igényel. Az EC3 néhány tipikus esetre közöl számítási eljárást, melyek az EC3-1-8 6. és 7. fejezetében találhatók meg (elsősorban I-szelvényű és zárt szelvényű elemek homloklemez-es kapcsolataira), illetve ismertetni fogja jelen könyv második kötete is.

5. Teherbírási határállapotok

Az EC3 szerint a teherbírási határállapotok ellenőrzése során a következő vizsgálatokat kell elvégezni:

- keresztmetszeti ellenállások ellenőrzését, amit az eddigi mérnöki szóhasználat szilárdsági vizsgálatoknak nevezett,
- szerkezeti elemek ellenőrzését, ami a stabilitásvizsgálatok egy részét is magába foglalja,
- és a lemezhorpadás ellenőrzését.

5.1. Keresztmetszetek ellenállása

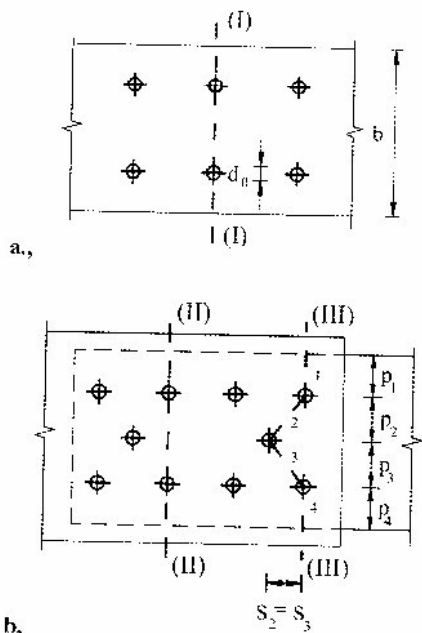
A keresztmetszetek ellenállását attól függően kell kiszámítani, hogy a keresztmetszet a vizsgált igénybevétel szempontjából melyik keresztmetszeti osztályba tartozik – ahogy azt már a 4.2 szakaszban láttuk. A keresztmetszeti osztályba való besorolást a 4.2.2-ben részletezettek szerint kell elvégezni. Mivel egy adott keresztmetszet osztályba sorolása függ az igénybevétel módjától is, ezért a későbbiekben mindenütt felhívjuk a figyelmet a besorolás sajátosságaira. Megjegyezzük, hogy a kereskedelemben kapható profilok szelvénykatalógusaiban a gyártók a keresztmetszeti adatok mellett általában az egyszerű igénybevételekre való besorolást is közlik.

Az EC3 alapelve, hogy bármelyik osztályba sorolt szelvény keresztmetszeti ellenállását kiszámíthatjuk úgy, hogy a keresztmetszeten belül rugalmas feszültségeloszlást tetelezünk fel. Ikkor az első folyás határállapotára méretezünk. Hajlított szelvények esetében a keresztmetszet részleges képlékenyedésének megengedése útján – kismértékű többletteherbírást vehetünk figyelembe az 5.1.4 alatt részletezett módon.

A 4. fejezetben láttuk, hogy képlékeny feszültségeloszlás alapján csak 1. vagy 2. osztályú szelvény esetén számíthatjuk a keresztmetszet ellenállását. A keresztmetszet képlékeny többletteherbírást – ami jelentős lehet – így számításba tudjuk venni. A 3. és 4. keresztmetszeti osztály esetén ellenben kötelező a rugalmas feszültségeloszlás alapján számolni.

5.1.1. Keresztmetszeti méretek

Lükegyengítések számításba vétele



5.1. ábra: nettó keresztmetszeti terület számítása

a, egyszerű esavarkép esetén

b, eltoltsavarkép esetén

teljes (brutó) terület: a keresztmetszet névleges méreteivel számított teljes terület, amelyből a esavarylukakat nem, de a nagyobb áttöréseket le kell vonni.

nettó terület: a teljes keresztmetszeti területből a esavarylukak által okozott gyengítést levonva kapjuk meg.

A nettó terület számítása:

Egyszerű esetben (5.1. ábra a.) az I-I vonal mentén számítva

$$A_{net} = (b - n \cdot d_0) \cdot t \quad (5.1)$$

- Eltoltsavarkép esetén (5.1. ábra b.) a II-II és III-III szakadási vonal mentén számított értékek minimuma veendő:

$$A_{net} = (b - n \cdot d_0) \cdot t \quad \text{a II-II vonal mentén} \quad (5.2)$$

$$\text{vagy } A_{net} = \left(b - n \cdot d_0 + \sum_{i=1}^k \frac{s_i^2}{4p_i} \right) \cdot t \quad \text{a III-III vonal mentén.} \quad (5.3)$$

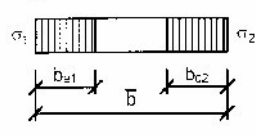
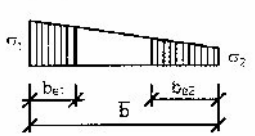
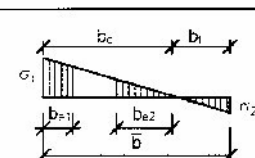
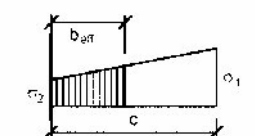
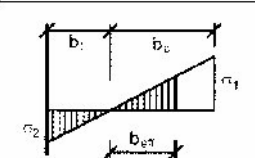
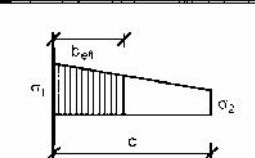
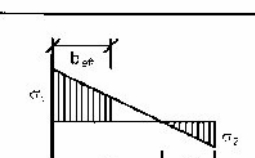
A képletekben

| | |
|-------|-----------------------------------------------------|
| d_0 | a esavaryluk átmérője |
| b | a lemez szélessége |
| t | a lemez vastagsága |
| n | egy szakadási vonalba eső esavarylukak száma |
| k | szakadási vonal alkotószakaszainak száma |
| s_i | i -dik alkotószakasz vetülete erőátadás irányában |
| p_i | ugyanaz erőátadás irányára merőlegesen. |

- Különleges előírás vonatkozik egyenlőtlen szárú szögacélra abban az esetben, ha a rövidebbik szárán esavarozzuk, ekkor A_{net} nem vehető nagyobbra, mint a kisebbik szár hosszúságával megegyező szár-méretű, képzelt egyenlő szárú szögacél gyengített keresztmetszeti területe.

„Shear lag” hatás: Széles övlemezek esetén az övlemez nyírási deformációját (lárcsahatását, „shear lag” hatását) nem kell tekintetbe venni, ha egy oldalon megtámasztott elemeknél $c \leq 50L_e$, illetve kétoldalt megtámasztott elemeknél $c \leq 100L_e$, ahol L_e a nyomatéki zéruspontok közötti távolság (lásd EC3-1-5 3.1 szakasza); c az övszélesség (lásd a 4.1 és 4.2 táblázatokban).

Effektív (egyenértékű, hatékony) terület: 4. osztályú keresztmetszeteknél a nyomott keresztmetszeti részek effektív szélességének számítása alapján határozható meg a hatékony keresztmetszet, és annak keresztmetszeti jellemzői, ami figyelembe veszi a lemezhorpadás esetén fellépő posztkritikus tartaleket. Az eljárás részleteit az I:33-1-5 tartalmazza. Az 5.1. táblázatban összefoglaljuk az effektív szélesség számításához szükséges képleteket.

| Feszültségeloszlás (nyomás pozitív!) | Hatékony szélesség b_{eff} | $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ | k_{σ} horpadási tényező |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------|
| Közbülső (két él mentén megtámasztott) lemezsávok | | $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2}$ | |
|  | $\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0.5b_{eff} \quad b_{e2} = 0.5b_{eff}$ | 1 | 4 |
| | | $1 > \psi > 0$ | $8.2 / (1.05 + \psi)$ |
|  | $1 > \psi > 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} \cdot b_{e1}$ | 0 | 7.81 |
| | | $0 > \psi > -1$ | $7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2$ |
|  | $\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0.4b_{eff} \quad b_{e2} = 0.6b_{eff}$ | -1 | 23.9 |
| | | $-1 > \psi > 2$ | $5.98(1 - \psi)^2$ |
| Szélső (egy él mentén megtámasztott) lemezsávok | | $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\bar{\lambda}_p^2}$ | |
|  | $1 > \psi > 0$ $b_{eff} = \rho c$ | 1 | 0.43 |
| | | 0 | 0.57 |
|  | $\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ | -1 | 0.85 |
| | | $1 \geq \psi \geq -3$ | $0.57 - 0.21\psi + 0.07\psi^2$ |
|  | $1 > \psi > 0$ $b_{eff} = \rho c$ | 1 | 0.43 |
| | | $1 > \psi > 0$ | $0.578 / (\psi + 0.34)$ |
| | | 0 | 1.70 |
|  | $\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ | $0 > \psi > -1$ | $1.7 - 5\psi + 17.1\psi^2$ |
| | | -1 | 23.8 |
| $\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b} / t}{28.4 \epsilon \sqrt{k_{\sigma}}}$ | $\bar{b} = c$ lásd a 4.1 – 4.2 – 4.3 táblázatokat t lemezzvastagság b_{eff} hatékony szélesség | | |

5.1. táblázat: Effektív szélesség számítása a 4. keresztmetszeti osztályban

5.1.2. Központosan húzott rudak keresztmetszeti ellenállása

Húzott rudak keresztmetszeteinek számított ellenállása legyen nagyobb, mint a húzóerő tervezési értéke:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.4)$$

Központosan húzott rudak esetén keresztmetszeti besorolásra nincs szükség, a keresztmetszet ellenállása az alábbi két érték közül a kisebbik:

$$N_{t,Rd} = \min(N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}) \quad (5.5)$$

ahol $N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ a teljes keresztmetszet folyási ellenállása, valamint (5.6)

$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ lyukakkal gyengített keresztmetszetben a nettó keresztmetszet képlékeny töréssel szembeni ellenállása. (5.7)

A feszített csavaros, úgynevezett C kategóriájú csavarozott kapcsolatokban (lásd a 6.2.5.2 szakasz) a rúd ellenállását a következő képlettel kell számolni:

$$N_{u,Rd} = N_{net,Rd} = \frac{A_{net} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.8)$$

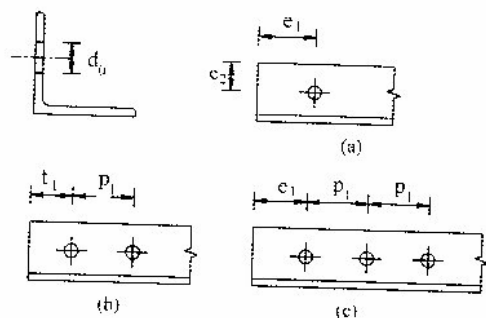
Egyik szárakon kapcsolt szögacéloknál (5.2. ábra) esetén a kapcsolat külpontosságát elhanyagolva, tiszta húzásra ellenőrizhetjük a szelvényt. Ekkor az $N_{u,Rd}$ ellenállás a szerint számítandó, hogy az erőtávítás irányában hány csavart helyezünk el:

$$N_{u,Rd} = \frac{2 \cdot (e_2 - 0,5d_0) \cdot t \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{1 csavar esetén} \quad (5.9)$$

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{2 csavar esetén} \quad (5.10)$$

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{3 vagy több csavar esetén} \quad (5.11)$$

A csökkentő tényezők értékét az 5.2. táblázat mutatja, közbülső p_1 értékekhez interpolálni lehet. A képletekben t a szögacél kapcsolt szárának vastagsága; e_2 , p_1 és d_0 az 5.2. ábra szerint értendők.



| p_1 | $\leq 2,5 \cdot d_0$ | $\geq 5,0 \cdot d_0$ |
|-------------|----------------------|----------------------|
| $\beta_2 =$ | 0,4 | 0,7 |
| $\beta_3 =$ | 0,5 | 0,7 |

5.2. ábra: egyik szárán kapcsolt szögacél a, egy csavarral b, két csavarral c, három csavarral

5.2. táblázat: β_2 és β_3 külpontosság miatti csökkentő tényezők értékei

5.1.3. Központosan nyomott rudak keresztmetszeti ellenállása

Központosan nyomott rúdkeresztmetszetek ellenállása legyen nagyobb, mint a nyomóerő tervezési értéke:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.12)$$

A keresztmetszet ellenállása központos nyomásra $N_{c,Rd}$ az alábbiak szerint számítandó:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{1., 2. és 3. osztályú szelvényre, illetve } A = A_{eff} \text{ 4. osztályú szelvénynél.} \quad (5.13)$$

ahol A a teljes keresztmetszeti terület
 A_{eff} az effektív keresztmetszet területe.

Központosan nyomott keresztmetszeteknél a csavarokkal kitöltött lyukgyengítéseket nem kell levonni, feltéve, hogy nem oválfuratok vagy túlméretes lyukak. A keresztmetszetben egyenletes eloszlású nyomófeszültség működik, tehát a besorolásnál minden keresztmetszeti alkotóelemet (övek, gerincek) figyelembe kell venni.

5.1.4. Hajlított keresztmetszetek ellenállása

Mivel itt egyenes, azaz valamelyik keresztmetszeti főtengely körüli hajlításról van szó, ezért a következő képletek indexében a vonatkozó tengely jele is megjelenhet. Ferde hajlítás esetén az (5.31) illetve (5.35) képleteket kell értelemszerűen alkalmazni. Hajlított keresztmetszetek ellenállása legyen nagyobb, mint a hajlítónyomaték tervezési értéke a vizsgált keresztmetszetben.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.14)$$

A keresztmetszet $M_{c,Rd}$ hajlítási ellenállását különböző keresztmetszeti osztályokra az (5.15) – (5.17) képletek adják:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{1., és 2. osztályú szelvényre, ahol } W_{pl} \text{ a képlékeny keresztmetszeti modulus,} \quad (5.15)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{3. osztályú szelvényre, ahol } W_{el} \text{ a rugalmas keresztmetszeti modulus,} \quad (5.16)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{4. osztályú szelvényre,} \quad (5.17)$$

ahol W_{eff} a hatékony keresztmetszet rugalmas keresztmetszeti modulusa.

A képlékeny keresztmetszeti modulusot hengerelt profilokra a szelvénytáblázatok megadják, egyéb esetben alábbiak szerint számítható:

$$W_{pl} = S_1 + S_2 \quad (5.18)$$

ahol S_1 és S_2 a keresztmetszeti terület felét alkotó keresztmetszetrészek statikai nyomatéka a vonatkozó rugalmas súlyponti tengelyre.

A nyomott zónában (nyomott öv és gerinc nyomott része) a csavarokkal kitöltött furatok miatt gyengítést nem kell számításba venni, feltéve, hogy nem túlméretes vagy oválfuratokról van szó.

A húzott övben nem kell levonni lyukgyengítést, ha az alábbi feltétel teljesül:

$$\frac{A_{f,net} \cdot 0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.19)$$

ahol $A_{f,net}$ az öv nettó keresztmetszeti területe,

A_f az öv bruttó keresztmetszeti területe.

Az (5.19) képlet a teljes húzott zónára (húzott öv és a gerinc húzott része) is kiterjeszhető, ekkor a területek értelemszerűen a teljes húzott zónára vonatkoznak.

Hajlított keresztmetszet besorolásánál a nyomott és részben nyomott keresztmetszeti részeket (nyomott öv ill. teljes gerinc) kell figyelembe venni. Kétszeresen szimmetrikustól eltérő szelvénynél a gerincben ébredő tényleges feszültségi ábra – ami a keresztmetszeti osztálytól függően rugalmas vagy képlékeny – figyelembevételével kell a gerinclemezt besorolni.

Megjegyzés: A rugalmas hajlítási ellenőrzés során az EC3 megengedi, hogy a nyomott szélső szál helyett a nyomott öv középvonalára számítsuk a legnagyobb feszültséget, és ezzel többlet-teherbírás érhető el. Ha a legnagyobb feszültség a húzott szélső szálban ébred, akkor pedig az előző feltétel betartása mellett a húzott keresztmetszeti részben részleges képlékenyedést vehetünk számításba.

5.1.5. Keresztmetszetek nyírási ellenállása

Feltételezzük, hogy a nyírás keresztirányú terhelésből származik (hajlítással egyidejű nyírás), ezért a hajlítási igénybevételre elvégzett keresztmetszeti osztályba sorolást vesszük itt is tekintetbe.

Nyírási ellenállás számításakor a csavarfuratok okozta gyengítések elhanyagolhatók, kivéve a kapcsolatok kiszakadásának ellenőrzését.

Az acélmag nyírási ellenállása a következőképpen számítható:

$$\frac{f_v}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (5.20)$$

így az 1. és 2. keresztmetszeti osztály esetén a képlékeny nyírási ellenállás:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (5.21)$$

a nyírt keresztmetszet ellenőrzése ekkor a következő képlettel történik:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1.0 \quad (5.22)$$

- ahol A_v a nyírt keresztmetszeti terület, amely közelítésképpen $A_v = h_w \cdot t_w$ -nek vehető, pontosabban az 5.3. táblázat szerint határozható meg,
 h_w az övlemezek belső élei közötti távolság, ami hegesztett profilnál a gerinclemez magasságával egyezik meg, míg hengerelt szelvénynél $h_w = h - 2 \cdot t_f$.

| Keresztmetszet formája | Előállítási mód | Nyíróerő iránya | A_v |
|---------------------------------------|-----------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------|
| I és H profilok | hengerelt | gerinccel párhuzamos | $A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f$ |
| U és C profilok | hengerelt | gerinccel párhuzamos | $A - 2 \cdot b \cdot t_f + (t_w + r) \cdot t_f$ |
| T profilok | hengerelt | gerinccel párhuzamos | $0,9 \cdot (A - b \cdot t_f)$ |
| I, H és zártszelvények | hegesztett | gerinccel párhuzamos | $\sum (h_w \cdot t_w)$ |
| I, H, U, C és zártszelvények | hegesztett | övvel párhuzamos | $A - \sum (h_w \cdot t_w)$ |
| Négyszög keresztmetszetű zártszelvény | hengerelt | a „h” magassággal párhuzamos | $\frac{A \cdot h}{b + h}$ |
| Négyszög keresztmetszetű zártszelvény | hengerelt | a „b” szélességgel párhuzamos | $\frac{A \cdot b}{b + h}$ |
| Kör keresztmetszetű zártszelvény, cső | bármely | bármely | $\frac{2 \cdot A}{\pi}$ |

5.3. táblázat: Nyírt keresztmetszeti terület számítása

3. és 4. keresztmetszeti osztály esetén rugalmas alapon kell elvégezni a nyírási ellenőrzést, általában a legnagyobb nyírófeszültség helyén:

$$\tau_{Ed} \leq \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (5.23)$$

ahol $\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t}$ általános esetben a közismert Zsuravszkij-képlettel számítva, illetve egyszerűbben (5.24)

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w} \quad \text{I és H szelvényeknél, ha } \frac{A_f}{A_w} \geq 0,6 \text{ akkor a gerinccben egyenletes feszültségeloszlással számolva} \quad (5.25)$$

ahol A_f egy öv keresztmetszeti területe
 $A_w = h_w \cdot t_w$ a gerinc keresztmetszeti területe.

Az (5.24) és (5.25) képletek az alábbiak szerint átrendezhetők, és ekkor az ellenőrzés az (5.21) formulával végezhető el:

$$V_{c,Rd} = \frac{I \cdot t}{S} \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad \text{általános esetben, illetve } V_{c,Rd} = \frac{A_w \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad \text{I és H szelvények esetén.} \quad (5.26)$$

5.1.6. Keresztmetszetek csavarási ellenállása

Az alaktartó keresztmetszetek csavarási ellenállásának ellenőrzése során mind a tiszta csavarásból, mind a gátolt csavarásból származó belső feszültségeket tekintetbe kell venni. A vizsgálat részleteire vonatkozóan lásd EC3-1-1 6.2.7 szakaszát, vagy [14]. Nem alaktartó keresztmetszetek esetén az EC3-1-3 ad útmutatást.

5.1.7. Hajlítás és nyírás kölcsönhatásának vizsgálata

A hajlítás és vele egyidejűleg működő nyírás kölcsönhatását csak akkor kell számításba venni, ha

$$V_{Ed} \geq 0,5 \cdot V_{c,Rd} \quad (5.27)$$

A kölcsönhatást képlekeny keresztmetszeti ellenállás számításakor a nyomateki ellenállás csökkentésével vesszük figyelembe olyan módon, hogy a keresztmetszet nyírt területén egy $(1-\rho) \cdot f_y$ csökkentett folyáshatárral számolunk a nyomateki

ellenállás meghatározása során, ahol $\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$.

A módszert alkalmazva, az 1. vagy 2. osztályú, kétszeresen szimmetrikus, nagytengeley körül hajlított I szelvények esetén a nyíróerő hatására a nyomateki teherbírás a következő értékre csökken:

$$M_{y,V,Rd} = \left(W_{pl,y} - \frac{\rho \cdot A_w^2}{4 \cdot t_w} \right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{de} \quad M_{y,V,Rd} \leq M_{c,Rd} \quad (5.28)$$

Rugalmas számítás során a 3. és 4. keresztmetszeti osztályú szelvényekre a kölcsönhatást az (5.35) általános formulával vehetjük tekintetbe.

5.1.8. Hajlítás és normálerő kölcsönhatásának vizsgálata

Ha hajlítónyomatékkal egyidejűleg normálerő is hat, akkor kölcsönhatásokra tekintettel kell lenni. Ez képlekeny vizsgálat esetén a nyomateki ellenállás csökkentésével, rugalmas vizsgálat esetén a két hatásból származó feszültségek összegzésével történhet.

A keresztmetszet besorolásához az EC3 nem ad egyértelmű előírásokat. Az első lehetőség az, hogy normálerőre történő vizsgálatnál a normálerőből számított besorolást használjuk, míg hajlítás esetén hajlításra soroljuk be a szelvényt. A második módszer szerint a keresztmetszeti osztályba soroláshoz mindkét igénybevételt együttesen kell figyelembe venni, és az együttes hatásra kapott keresztmetszeti osztályt kell mindkét vizsgálathoz használni.

Az első módszer egyszerűbb, viszont elvi ellentmondásra vezet, ha eredményeképpen hajlításnál képlekeny eljárást alkalmazunk, de tiszta nyomásra 4. osztályúvá válik szelvényünk. A második módszer konzekvensőbb, de elvégzése általában bonyolultabb, különösen a hajlított-nyomott gerinclemez besorolásakor.

1. és 2. osztályú szelvényeknél általában az első módszer használható. Az előbb bemutatott speciális esetben a második módszer segíthet, mert a gerinc besorolása összetett igénybevételre kedvezőbb, mint a tiszta nyomásnál. 3. keresztmetszeti osztályú szelvény rugalmas ellenőrzése során a feszültségeket egyébként is kiszámoljuk, tehát a második módszer használata sem okoz külön nehézséget, ezt javasoljuk. A 4. osztályú szelvények vizsgálatához való (5.34) összefüggésben pedig az EC3 előírja az első módszer használatát.

1. és 2. keresztmetszeti osztályba sorolható szelvények esetén a kölcsönhatás vizsgálatát a következők szerint kell elvégezni.

Kétszeresen szimmetrikus I, H és más, övlemezekkel rendelkező szelvények esetén a normálerő nem csökkenti az y tengely körüli nyomateki ellenállást, amennyiben mindkét következő feltétel teljesül:

$$N_{Ed} \leq 0,25 N_{pl,Rd} \quad \text{és} \quad N_{Ed} \leq \frac{0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.29)$$

Hasonlóképpen, kétszeresen szimmetrikus I és H szelvények esetén a normálerő nem csökkenti a z tengely körüli nyomateki ellenállást, ha:

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.30)$$

Amennyiben a normálerő hatását figyelembe kell venni, akkor *egyik tengelyük körül hajlított*, csavarlyukakkal nem gyengített szelvények esetében az 5.4. táblázat szerint kell a csökkentett nyomateki ellenállást kiszámítani.

A táblázatban és a továbbiakban a következő jelöléseket használjuk:

| | |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| $n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}$ | normálerő-kihasználtság |
| b | zártszelvény teljes övszélessége |
| h | zártszelvény teljes magassága |
| Megjegyzés: | hengerekt zártszelvények esetén természetesen azonos a falvastagság $t_w = t_f = t$ |

| Keresztmetszettípus | Hajlítás iránya | Csökkentett nyomatéki ellenállás | segédmennyiség |
|------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Kétszeresen szimmetrikus hengerelt és hegesztett I és H profilok | y tengely körül | $M_{Ny,Rd} = M_{ply,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a} \leq M_{ply,Rd}$ | $a = \frac{A-2b \cdot t_f}{A} \leq 0,5$ |
| | z tengely körül | $M_{Nz,Rd} = M_{plz,Rd} \cdot \left[1 - \left(\frac{n-a}{I-a} \right)^2 \right]$ ha $n > a$ $M_{Nz,Rd} = M_{plz,Rd}$ ha $n \leq a$ | $a = \frac{A-2b \cdot t_f}{A} \leq 0,5$ |
| Hengerelt és kétszeresen szimmetrikus hegesztett zártszelvények | y tengely körül | $M_{Ny,Rd} = M_{ply,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_w} \leq M_{ply,Rd}$ | $a_w = \frac{A-2b \cdot t_f}{A} \leq 0,5$ |
| | z tengely körül | $M_{Nz,Rd} = M_{plz,Rd} \cdot \frac{1-n}{1-0,5 \cdot a_f} \leq M_{plz,Rd}$ | $a_f = \frac{A-2h \cdot t_w}{A} \leq 0,5$ |

5.4. táblázat: Nyomatéki ellenállás csökkentése egytengelyű hajlítás és normálerő esetén

Amennyiben *mindkét* tengely körül működik hajlítás, akkor az ellenőrzést a következő képlettel kell elvégezni:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{Ny,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{Nz,Rd}} \right)^\beta \leq 1 \text{ ahol a nevezőben a normálerő hatásával csökkentett nyomatéki ellenállások vannak. (5.31)}$$

A képletben szereplő segédmennyiségek az 5.5. táblázatból vehetők.

| Keresztmetszet formája | α | β |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| bármely profil (egyszerűsítés) | $\alpha = 1$ | $\beta = 1$ |
| I és H profilok | $\alpha = 2$ | $\beta = 5n$ de $\beta \geq 1,0$ |
| zártszelvények | $\alpha = \frac{1,66}{1-1,13 \cdot n^2}$ de $\alpha \leq 6,0$ | $\beta = \frac{1,66}{1-1,13 \cdot n^2}$ de $\beta \leq 6,0$ |
| kör keresztmetszetű zártszelvény | $\alpha = 2$ | $\beta = 2$ |

5.5. táblázat: α és β segédmennyiségek

Végző egyszerűsítésként az alábbi képlet is használható:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \right) + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right) + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right) \leq 1 \quad (5.32)$$

Látható, hogy az (5.32) összefüggés az egyszerű igénybevételekre számított kihasználtságokat lineárisan összegzi, ezért a biztonság javára közelít.

3. és 4. osztályú szelvény ellenőrzésénél rugalmas elven számolva, egyszerűen meg kell határozni a hajlítás és normálerő együttes hatásából származó legnagyobb hosszirányú normálfeszültséget, és ki kell mutatni, hogy:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.33)$$

A normálfeszültség számításánál a lyukgyengítőket az 5.1.3-ban és 5.1.4-ben foglaltak szerint kell számításba venni.

3. osztályú keresztmetszetek ellenőrzéséhez alternatívaként az (5.32) összefüggés is használható.

Egyszeresen szimmetrikus 4. osztályú keresztmetszetek esetén tekintetbe kell venni azt a hatást, hogy a normálerőre hatékony keresztmetszet és a teljes keresztmetszet súlypontja nem esik egybe, amiből többlet nyomatékok keletkeznek. A következő képlettel számoljunk:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}}{W_{eff,y,min} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,Ed} - N_{Ed} \cdot e_{Nz}}{W_{eff,z,min} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}} \leq 1,0 \quad (5.34)$$

ahol A_{eff} a normálérőre hatékony keresztmetszet területe,
 $W_{eff,min}$ a megfelelő tengely körüli hajlításra hatékony keresztmetszetben ébredő legnagyobb feszültségű szélső szálhoz tartozó rugalmas keresztmetszeti modulus,
 e_N a normálérőre hatékony keresztmetszet súlypontjának tengelyirányú eltolódásai a teljes keresztmetszet súlypontjához képest.

5.1.9. Hajlítás, nyírás és normálérő kölcsönhatásának vizsgálata

A nyírás hatását csak akkor kell figyelembe venni, ha az (5.27) feltétel fennáll. Ekkor a következők szerint kell eljárni. Képlekény ellenőrzést végezve (1. és 2. keresztmetszeti osztály) a keresztmetszet nyírt területén egy csökkentett $(1-\rho) \cdot f_y$ értékű folyáshatárt veszünk tekintetbe, és így határozzuk meg a keresztmetszet ellenállását normálérőre és hajlításra, majd az 5.1.8 szerint elvégezzük a normálérő és hajlítás kölcsönhatásának vizsgálatát.

Ha rugalmas számítást végzünk, akkor összetett feszültségállapotban az alábbi képlettel végezhető el az ellenőrzés:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \leq 1.0 \quad (5.35)$$

ahol $\sigma_{x,Ed}$ a hosszirányú normálfeszültség (hajlításból és normálérőből együtt) tervezési értéke a vizsgált pontban
 $\sigma_{z,Ed}$ a keresztirányú normálfeszültség tervezési értéke a vizsgált pontban
 τ_{Ed} a nyírófeszültség tervezési értéke a vizsgált pontban.

Megjegyezzük, hogy az (5.35) képlet a biztonság javára közelít, mert nem veszi figyelembe a megengedett részleges képlekényedést, ezért ha lehet, más módon – például a kölcsönhatási formulákat használva az 5.1.8 szerint – kell méretezni.

5.2. Központosan nyomott rudak kihajlási ellenállása

Ebben a szakaszban egyenes tengelyű, tömör (nem osztott) keresztmetszetű, központosan nyomott rudak kihajlási ellenállásával foglalkozunk. Az EC3 általánosan alkalmazható méretezési módszere mellett kitérünk azokra a gyakorlatban sűrűn előforduló speciális esetekre – pl. síkbeli kihajlás – amelyek esetén egyszerűbben végrehajthatók a vizsgálatok.

Osztott szelvényű nyomott rudak általános vizsgálati módszerét az EC3 könyv 2. része tartalmazza [20]; állandó keresztmetszetű, központosan nyomott rudak méretezését speciális esetben jelen könyv 5.2.4 szakaszában tárgyaljuk.

5.2.1. Kihajlási ellenállás

A központosan nyomott rúd globális stabilitás szempontjából megfelel, ha kihajlási ellenállása nagyobb, mint a nyomóerő tervezési értéke.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.36)$$

$N_{b,Rd}$ a központosan nyomott rúd kihajlási ellenállása az (5.37) és (5.38) képletek alapján számítható:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad 1, 2 \text{ és } 3. \text{ keresztmetszeti osztály esetén,} \quad (5.37)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad 4. \text{ keresztmetszeti osztály esetén,} \quad (5.38)$$

ahol χ kihajlási csökkentő tényező,
 A_{eff} központos nyomóerőre effektív keresztmetszeti terület

Megjegyezzük, hogy ha a keresztmetszet 4. osztályú és nem kétszeresen szimmetrikus, az eredeti és effektív keresztmetszetek súlyponteltolódásából nyomaték keletkezik, ezért szerkezeti elemet központosan nyomott rúdként kell méretezni.

A kihajlási csökkentő tényezőt a rúd viszonyított karcsúsága ($\bar{\lambda}$) alapján, a kihajlási görbék felhasználásával lehet meghatározni, az alábbiak szerint:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{de} \quad \chi \leq 1,0 \quad (5.39)$$

ahol

$$\varphi = \frac{1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2}{2} \quad \text{segédmenyiség,}$$

α *alakhíba tényező*: az EC3 6t – szemi-empirikus alapon meghatározott – kihajlási görbét alkalmaz - a_0, a, b, c és d – az 5.3. ábra szerint, az 5.6. táblázat szerinti alakhíba tényezők definiálásával; felvételére az adott nyomott rúd esetén az 5.7. táblázat ad útmutatást, a keresztmetszeti alak, lemezméret, gyártási mód, kihajlási tengely és anyagminőség függvényében; a $\chi - \bar{\lambda}$ összefüggés gyakorlati szempontból alkalmazható összetartozó értékeit az 5.8. táblázat tartalmazza.

$\bar{\lambda}$ *viszonyított karcsúság*, amely általános esetben az (5.40) és (5.41) képletek alapján számítható:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{1, 2 és 3. keresztmetszeti osztály esetén,} \quad (5.40)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{4. keresztmetszeti osztály esetén} \quad (5.41)$$

N_{cr} az adott megtámasztással rendelkező, adott nyomóerő eloszlású rúd mértékadó kihajlási módjához tartozó – legkisebb – rugalmas kritikus nyomóerő, a teljes (gyengítetlen) keresztmetszeti jellemzők alapján számolva.

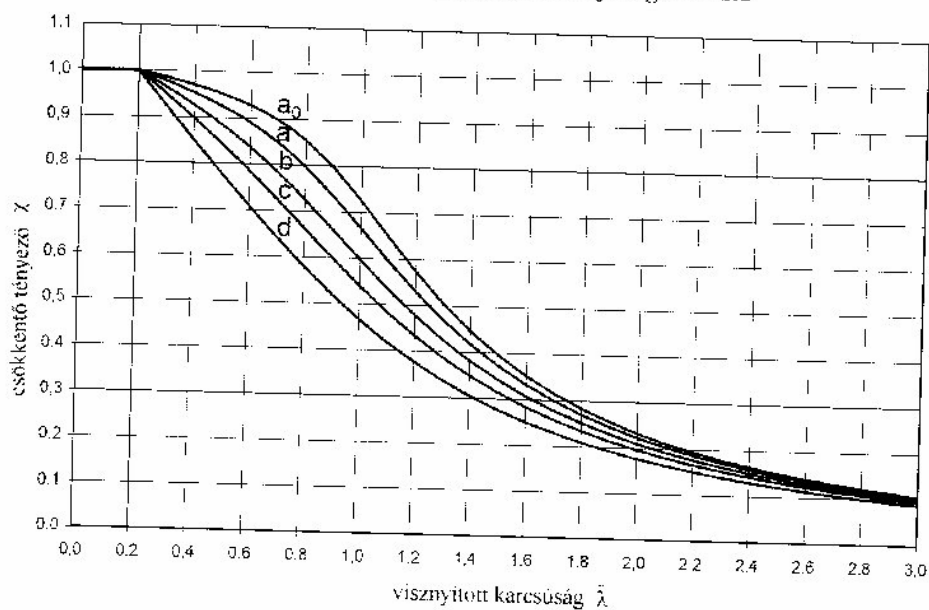
A fenti eljárás tehát teljesen általános esetben – síkbeli, elcsavarodó, térbeli elcsavarodó módokra, tetszőleges megtámasztási viszonyokra, hosszmentén változó nyomóerővel terhelt rudakra – definiálja a kihajlási ellenállást a viszonyított karcsúság általános értelmezésével. A viszonyított karcsúsághoz tehát a szerkezeti elem legkisebb kritikus nyomó normálerőjét kell meghatározni, amely lehetséges speciális esetekben zárt képletekkel (pl. síkbeli kihajlás, Euler-rúd analógia alapján, ld. az 5.2.2 szakaszban), illetve összetettebb szerkezet és/vagy megtámasztás, terhelési esetén numerikus analízis alapján, a 4.5.2 szakaszban ismertetett elvek szerint.

Az EC3 előírásai szerint a kihajlásvizsgálat nem mértékadó, ha az (5.42) képletben adott feltételek közül bármelyik teljesül, és ekkor az 5.1.3. szakaszban ismertetett keresztmetszet ellenőrzést kell végrehajtani.

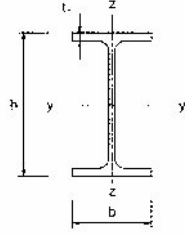
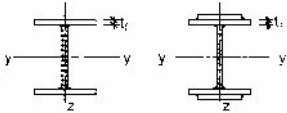

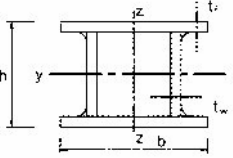
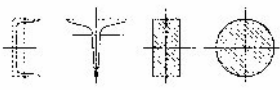
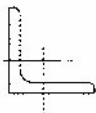
$$\bar{\lambda} \leq 0,2 \quad \text{vagy} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04 \quad (5.42)$$

| Kihajlási görbe | a_0 | a | b | c | d |
|---------------------------|-------|------|------|------|------|
| Alakhíba tényező α | 0,13 | 0,21 | 0,34 | 0,49 | 0,76 |

5.6. táblázat: alakhíba tényezők a kihajlási görbékhez



5.3. ábra: Kihajlási görbék

| Keresztmetszet típusa | Eset | Kihajlás tengelye | Kihajlási görbe | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------|------------------------------|-------|
| | | | S235 S275 S355 S420 | S460 |
| Hengerelt I szelvény  | $h/b > 1,2$ | y z | a | a_0 |
| | | | b | a_0 |
| | $h/b \leq 1,2$ | y z | b | a |
| | | | c | a |
| Hegesztett I szelvény  | $t_f \leq 40$ mm | y z | b | b |
| | 40 mm $< t_f$ | y z | c | c |
| Zárt szelvényű idomacél  | melegen hengerelt | bármely | a | a_0 |
| | hidegen alakított | bármely | c | c |
| Hegesztett zárt szelvény  | általában | bármely | b | b |
| | erős varratok ($a > 0,5t_f$), továbbá $b/t_f < 30$ és $h/t_w < 30$ | bármely | c | c |
| U, I és tömör szelvény  | minden esetben | bármely | c | c |
| Szögacél  | minden esetben | bármely | b | b |

Megjegyzés: egyéb keresztmetszetek esetén a szakirodalom szerint kell eljárni.

5.7. táblázat: Kihajlási görbék kiválasztása

| $\bar{\lambda}$ | a_0 | a | b | c | d |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,20 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 0,25 | 0,9931 | 0,9889 | 0,9822 | 0,9746 | 0,9611 |
| 0,30 | 0,9859 | 0,9775 | 0,9641 | 0,9491 | 0,9235 |
| 0,35 | 0,9783 | 0,9655 | 0,9455 | 0,9235 | 0,8866 |
| 0,40 | 0,9701 | 0,9528 | 0,9261 | 0,8973 | 0,8504 |
| 0,45 | 0,9612 | 0,9391 | 0,9057 | 0,8705 | 0,8146 |
| 0,50 | 0,9513 | 0,9243 | 0,8842 | 0,8430 | 0,7793 |
| 0,55 | 0,9402 | 0,9080 | 0,8614 | 0,8146 | 0,7444 |
| 0,60 | 0,9276 | 0,8900 | 0,8371 | 0,7854 | 0,7100 |
| 0,65 | 0,9130 | 0,8700 | 0,8112 | 0,7554 | 0,6762 |
| 0,70 | 0,8961 | 0,8477 | 0,7837 | 0,7247 | 0,6431 |
| 0,75 | 0,8764 | 0,8230 | 0,7547 | 0,6935 | 0,6109 |
| 0,80 | 0,8533 | 0,7957 | 0,7245 | 0,6622 | 0,5797 |
| 0,85 | 0,8266 | 0,7659 | 0,6931 | 0,6308 | 0,5496 |
| 0,90 | 0,7961 | 0,7339 | 0,6612 | 0,5998 | 0,5208 |
| 0,95 | 0,7620 | 0,7003 | 0,6290 | 0,5695 | 0,4933 |
| 1,00 | 0,7253 | 0,6656 | 0,5970 | 0,5399 | 0,4671 |
| 1,05 | 0,6870 | 0,6306 | 0,5657 | 0,5115 | 0,4423 |
| 1,10 | 0,6482 | 0,5960 | 0,5352 | 0,4842 | 0,4189 |
| 1,15 | 0,6101 | 0,5623 | 0,5060 | 0,4583 | 0,3969 |
| 1,20 | 0,5732 | 0,5300 | 0,4781 | 0,4338 | 0,3762 |
| 1,25 | 0,5382 | 0,4993 | 0,4517 | 0,4106 | 0,3568 |
| 1,30 | 0,5053 | 0,4703 | 0,4269 | 0,3888 | 0,3385 |
| 1,35 | 0,4746 | 0,4432 | 0,4035 | 0,3684 | 0,3215 |
| 1,40 | 0,4461 | 0,4179 | 0,3817 | 0,3492 | 0,3055 |
| 1,45 | 0,4197 | 0,3943 | 0,3613 | 0,3313 | 0,2906 |
| 1,50 | 0,3953 | 0,3724 | 0,3422 | 0,3145 | 0,2766 |
| 1,55 | 0,3728 | 0,3521 | 0,3245 | 0,2989 | 0,2635 |
| 1,60 | 0,3520 | 0,3332 | 0,3079 | 0,2842 | 0,2512 |

| $\bar{\lambda}$ | a_0 | a | b | c | d |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1,65 | 0,3328 | 0,3157 | 0,2925 | 0,2705 | 0,2397 |
| 1,70 | 0,3150 | 0,2994 | 0,2781 | 0,2577 | 0,2289 |
| 1,75 | 0,2985 | 0,2843 | 0,2646 | 0,2457 | 0,2188 |
| 1,80 | 0,2833 | 0,2702 | 0,2521 | 0,2345 | 0,2093 |
| 1,85 | 0,2691 | 0,2571 | 0,2403 | 0,2240 | 0,2004 |
| 1,90 | 0,2559 | 0,2449 | 0,2294 | 0,2141 | 0,1920 |
| 1,95 | 0,2437 | 0,2335 | 0,2191 | 0,2049 | 0,1841 |
| 2,00 | 0,2323 | 0,2229 | 0,2095 | 0,1962 | 0,1766 |
| 2,05 | 0,2217 | 0,2129 | 0,2004 | 0,1880 | 0,1696 |
| 2,10 | 0,2117 | 0,2036 | 0,1920 | 0,1803 | 0,1630 |
| 2,15 | 0,2024 | 0,1949 | 0,1840 | 0,1731 | 0,1567 |
| 2,20 | 0,1937 | 0,1867 | 0,1765 | 0,1662 | 0,1508 |
| 2,25 | 0,1855 | 0,1790 | 0,1694 | 0,1598 | 0,1452 |
| 2,30 | 0,1779 | 0,1717 | 0,1628 | 0,1537 | 0,1399 |
| 2,35 | 0,1707 | 0,1649 | 0,1565 | 0,1480 | 0,1349 |
| 2,40 | 0,1639 | 0,1585 | 0,1506 | 0,1425 | 0,1302 |
| 2,45 | 0,1575 | 0,1524 | 0,1450 | 0,1374 | 0,1257 |
| 2,50 | 0,1515 | 0,1467 | 0,1397 | 0,1325 | 0,1214 |
| 2,55 | 0,1458 | 0,1413 | 0,1347 | 0,1278 | 0,1173 |
| 2,60 | 0,1404 | 0,1362 | 0,1299 | 0,1234 | 0,1134 |
| 2,65 | 0,1353 | 0,1313 | 0,1254 | 0,1193 | 0,1097 |
| 2,70 | 0,1305 | 0,1267 | 0,1211 | 0,1153 | 0,1062 |
| 2,75 | 0,1259 | 0,1224 | 0,1170 | 0,1115 | 0,1029 |
| 2,80 | 0,1216 | 0,1182 | 0,1132 | 0,1079 | 0,0997 |
| 2,85 | 0,1175 | 0,1143 | 0,1095 | 0,1045 | 0,0966 |
| 2,90 | 0,1136 | 0,1105 | 0,1060 | 0,1012 | 0,0937 |
| 2,95 | 0,1098 | 0,1070 | 0,1026 | 0,0981 | 0,0909 |
| 3,00 | 0,1063 | 0,1036 | 0,0994 | 0,0951 | 0,0882 |

5.8. táblázat: Kihajlási görbék táblázata

5.2.2. Síkbeli kihajlás

5.2.2.1 Viszonyított karcúság

Síkbeli kihajlási ellenállás kétszeresen szimmetrikus keresztmetszetű, központosan nyomott rudak esetén számítható, amennyiben a tiszta elcsavarodó kihajlás nem mértékadó (tipikusan I- és zártszelvényű rudak esetén). Ebben az esetben az Euler-féle N_{cr} kritikus erő (5.40) és (5.41) képletekbe való behelyettesítésével a viszonyított karcúságra az (5.43), illetve (5.44) képletek szerinti egyszerűsített összefüggés adódik.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{1}{\lambda_1} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad \text{1, 2 és 3. keresztmetszeti osztály esetén,} \quad (5.43)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \cdot \frac{\sqrt{A_{eff}}}{\lambda_1} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \quad \text{4. keresztmetszeti osztály esetén,} \quad (5.44)$$

ahol L_{cr} a kihajlás tengelyére vonatkozó kihajlási hossz (kihajlás tengelye: ami körül a kihajlás bekövetkezik),
 i a kihajlás tengelyére vonatkozó inerciasugár,
 λ karcúság,

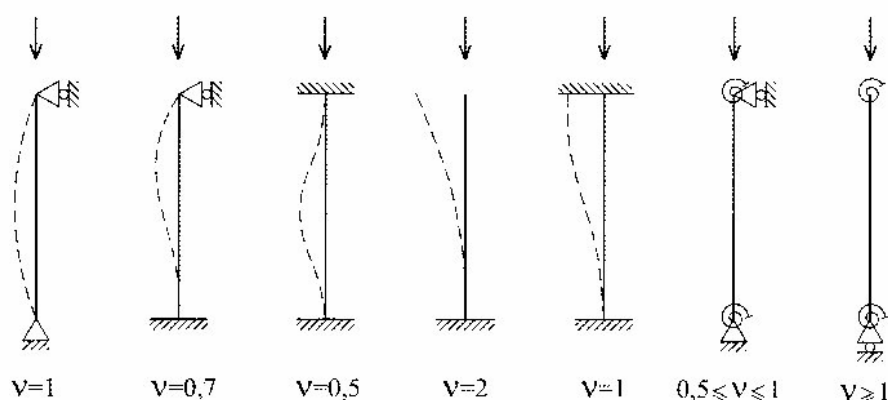
$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \cdot \varepsilon \quad \text{Euler karcúság,} \quad (5.45)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad \text{anyagminőségre jellemző segédmenyiség (} f_y \text{ dimenziója N/mm}^2\text{)} \quad (5.46)$$

A helyettesítő Euler-rúd kihajlási hossza – az EC3 jelölése szerint L_{cr} – a rúd hálózati hossza és a befogási viszonyok alapján számítható. Utóbbit a hazai gyakorlatban alkalmazott – EC3-ban nem szereplő – v befogási tényezővel szokás figyelembe venni, az (5.47) képlet szerint. A v értékeit alapesetekre az 5.4. ábra szemlélteti; meghatározására egyszerű keretszerkezetek esetén jól alkalmazhatók a [7], [15], [17], illetve EC2 megfelelő táblázatai. Ugyancsak a tényezővel a központos nyomóerő hossz menti változása is számítható a helyettesítő Euler-rúd analógiával (ld. [15] vagy [16] vonatkozó táblázatát).

$$L_{cr} = vL \quad (5.47)$$

ahol L a rúd hálózati hossza,
 v befogási tényező (általánosabb értelemben kihajlási hossz tényező).



5.4. ábra: Befogási tényezők alapesetekre

A síkbeli kihajlási ellenállás számítása fenti egyszerűsítés után az ismert módon hajtható végre:

- a keresztmetszet osztályba sorolása, keresztmetszeti jellemzők számítása (4.2.2 és 5.1.1 szakaszok alapján);
- kihajlási hosszak meghatározása a két kihajlási tengelyre vonatkoztatva (I- és zártszelvények esetén y-y és z-z tengelyekre) az (5.47) képlet alapján;
- a viszonyított karcúságok meghatározása az (5.43) vagy (5.44) alapján;
- mindkét síkú kihajlásra a kihajlási görbe kiválasztása – 5.7. táblázat – és a viszonyított karcúságok alapján a kihajlási csökkentő tényezők meghatározása (5.8. táblázat vagy (5.39) képlet);
- a kisebb kihajlási csökkentő tényező alapján a kihajlási ellenállás meghatározása az (5.37) vagy (5.38) képlet alapján.

5.2.2.2 Rácsos tartók nyomott rúdjaik kihajlási hosszai

Tipikus magasepítési rácsos tartók központosan nyomott rúdjaik teherbírása síkbeli kihajlási ellenállással jellemezhető, az alábbi kihajlási hosszak figyelembevételével:

Övrudak kihajlási hossza a rácsos tartó síkjában, illetve arra merőlegesen bekövetkező kihajlás esetén általában egyenlő a hálózati hosszal: $I_{cr} = L$ (L a rácsos tartó síkjában a szomszédos csomópontok távolsága, illetve arra merőlegesen az oldalirányban megtámasztott csomópontok távolsága). I-szelvényű övrudak esetén a rácsos tartó síkjában bekövetkező kihajlás $L_{cr} = 0,9L$ kihajlási hosszal vehető figyelembe (az y tengely a rácsos tartó síkjára merőleges). Zártszelvényű övrudak esetén a kihajlási hossz mindkét síkban bekövetkező kihajlás esetén csökkenthető: $I_{cr} = 0,9L$.

Rácsrudak kihajlási hossza a rácsos tartó síkjában bekövetkező kihajlás esetén általában $L_{cr} = 0,9L$, feltéve, ha a rácsrúd nem szögacél, és az öv-rácsrúd kapcsolata nem-csuklós kialakítású (tehát hegesztett, vagy min. két csavarral kialakított); síkra merőleges kihajlás esetén általában $I_{cr} = L$ (rácsrudak hálózati hossza a rúdvégi csomópontok elméleti távolságával azonos).

Zártszelvényű rácsrudak kihajlási hossza csuklós kialakítás esetén azonos a hálózati hosszal, mindkét síkra vonatkozóan. Zártszelvényű övrudak, hegesztett csomópontok és párhuzamos övek esetén, amennyiben a rácsrúd-övrúd szélesség/átmérő arány kisebb, mint 0,6, akkor a rácsrúd végeinek relatív befogása elfordulással szemben nagyobb, így $L_{cr} = 0,75L$ kihajlási hossz vehető figyelembe mindkét síkra vonatkozóan.

Hegesztett, vagy min. két csavarral kialakított kapcsolati, egy szögacél szelvényű rácsrudak esetén a bekötésből adódó különbség elhanyagolható, és központosan nyomott rúdként síkbeli kihajlásra méretezhető, az alábbi helyettesítő viszonyított karcsúságok figyelembevételével:

$$\bar{\lambda}_{eff,v} = 0,35 + 0,7\bar{\lambda}_v \quad \text{kihajlás a v-v tengely körül} \quad (5.48)$$

$$\bar{\lambda}_{eff,y} = 0,50 + 0,7\bar{\lambda}_y \quad \text{kihajlás az y-y tengely körül} \quad (5.49)$$

$$\bar{\lambda}_{eff,z} = 0,50 + 0,7\bar{\lambda}_z \quad \text{kihajlás a z-z tengely körül} \quad (5.50)$$

Amennyiben a szögacél szelvényű rácsrúd csak egy csavarral kapcsolódik az övrúddhoz, a rácsrudat különösen nyomott elemként kell méretezni (ld. az 5.2.3 szakaszban), $L_{cr} = l$ kihajlási hossz feltételezéssel.

Megjegyzés: a kihajlási hosszak meghatározhatók (csökkenthetők) a befogási merevségek pontosabb figyelembevételével, pl. kísérleti vizsgálat és/vagy pontosított modellen alapuló vizsgálat alapján (ld. [17]-ben, illetve a 4.5.2 szakaszban).

5.2.3. Elcsavarodó kihajlás

Nyitott keresztmetszetű rudak esetén a – szimmetria viszonyoktól függően – a tiszta elcsavarodó, vagy térbeli elcsavarodó kihajlás is mértékadó lehet. Ebben az esetben a síkbeli kihajlás mellett az elcsavarodó kihajlási módokat is meg kell vizsgálni az (5.51), illetve (5.52) képletek szerint számítható viszonyított karcsúságok alapján:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{1.2 és 3. keresztmetszeti osztály esetén,} \quad (5.51)$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \text{4. keresztmetszeti osztály esetén,} \quad (5.52)$$

ahol

$$N_{cr} = N_{cr,TF} \quad \text{de} \quad N_{cr} < N_{cr,T}$$

$N_{cr,TF}$ és $N_{cr,T}$ az adott megtámasztási viszonyú, központosan nyomott rúd térbeli, illetve tiszta elcsavarodó kihajlási módjaihoz tartozó rugalmas kritikus nyomóerők, a teljes (gyengítetlen) keresztmetszeti jellemzők alapján számolva.

Az $N_{cr,TF}$, illetve $N_{cr,T}$ alapesetekben meghatározható a szakirodalomban megtalálható képletekkel alapján – pl. [14], [17] – vagy pontosított – gátolt csavarást is figyelembevevő – modellen alapuló numerikus analízis alapján.

Vizsgálható a jelenség a hazai gyakorlatban alkalmazott eljárással is, amelyben az elcsavarodás hatását a síkbeli kihajlás feltételezésével számított karcsúság ρ tényezővel való növelésével vesszük figyelembe ([15], az (5.53) képlet szerint).

$$\lambda_d = \rho \lambda \quad (5.53)$$

A továbbiakban a síkbeli kihajlásra adott (5.43) vagy (5.44) képlet alapján a viszonyított karcsúság, kihajlási csökkentő tényező és kihajlási ellenállás számítható, az 5.2.2.1 szakaszban ismertetett elvek szerint.

Megjegyzés: a könyv második kötete részletesebben foglalkozik az elcsavarodó kihajlással [20].

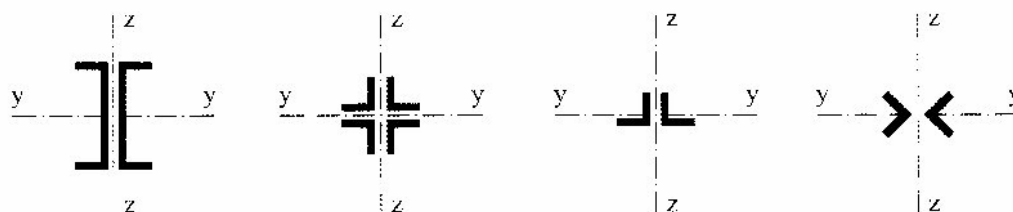
5.2.4. Osztott szelvényű, szorosan kapcsolt rudak

Az EC3 az osztott szelvényű rudak teherbírását általában kezdeti geometriai imperfekcióval rendelkező, összetett szerkezet - nyírási merevséget is figyelembevevő - globális analízise alapján, a mértékadó öv- és összekötő rácsrúd/heveder elemek lokális ellenállása alapján ellenőrzi. Megjegyezzük, hogy ez a vizsgálat a tényleges szerkezeti viselkedést pontosabban követi, de végrehajtását tekintve jóval komplikáltabb, mint a hazai gyakorlatban alkalmazott, helyettesítő - ideális - karcúságon alapuló globális kihajlásvizsgálat. Az EC3 általános vizsgálati módszerét a könyv 2. része tartalmazza [20].

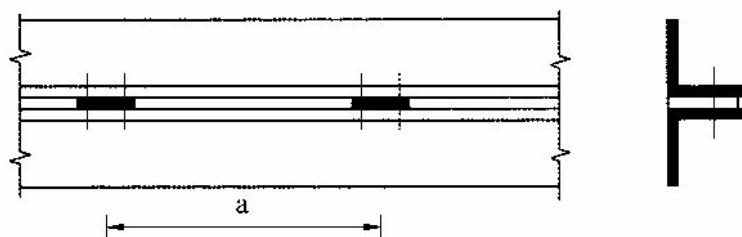
Az EC3 - speciális esetként - lehetővé teszi az osztott szelvényű, állandó keresztmetszetű, központosan nyomott rudak egyszerűsített vizsgálatát, abban az esetben, ha a rész-szelvények ún. szorosan kapcsoltak, és ennek következtében a nyírási deformációk elhanyagolhatók. Az 5.5. ábrán szemléltetett osztott szelvényű rudak szorosan kapcsoltak tekinthetők, amennyiben a rész-szelvényeket összekötő hevederek távolsága nem haladja meg az 5.9. táblázatban adott maximális értékeket. Ezen feltételek teljesülése esetén a kihajlási ellenállás a tömör keresztmetszetű rudakra az 5.2.1-3 szakaszokban részletezett módon határozható meg. A rész-szelvényeket összekötő hevederek és azok kapcsolatai méretezendők, a vizsgálat közelítő módon végrehajtható hazai gyakorlatból átvett (5.54), illetve (5.55) képlet szerinti rudvégi lüktív V_{Ed} nyíróerő és a [15]-ben ismertetett elvek alkalmazásával.

$$V_{Ed} = \frac{A \cdot f_y}{80 \cdot \gamma_{M0}} \quad 1,2 \text{ és } 3. \text{ keresztmetszeti osztályok esetén,} \quad (5.54)$$

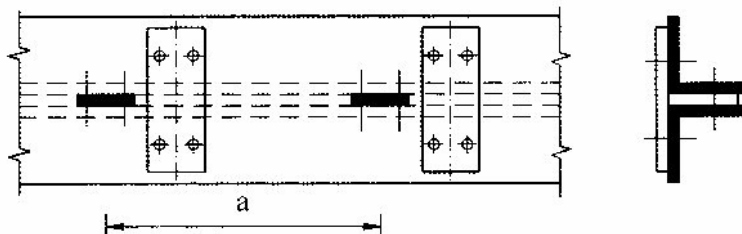
$$V_{Ed} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{80 \cdot \gamma_{M0}} \quad 4. \text{ keresztmetszeti osztály esetén.} \quad (5.55)$$



a, Tipikus keresztmetszet típusok



b, Csak egy alkotóelem kapcsolt



c, Valamennyi alkotóelem kapcsolt

5.5. ábra: Szorosan kapcsolt osztott szelvényű rudak

| Alkotó elemek típusa | Az összekapcsoló elemek legnagyobb a távolsága |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Elemek illesztése 5.5. b. ábra szerint | $15 i_{\min}$ |
| Elemek illesztése 5.5. c. ábra szerint | $70 i_{\min}$ |
| i_{\min} a rész-szelvény minimális inerciasugara | |

5.3. Hajlított gerendák kifordulási ellenállása

Ebben a szakaszban egyenes tengelyű, a nagyobb tehetetlenségi nyomatéki főtengelye („erős tengely”) körül hajlított gerendák kifordulási ellenállásával foglalkozunk. Először bemutatjuk az EC3 ún. általános módszerét, amelyhez megadjuk a gyakorlatban tipikusan előforduló esetekre alkalmazható kritikus nyomaték számítási módszerét. Ismertetjük ezután az EC3 által javasolt ún. egyszerűsített számítási eljárást is, amely a kifordulásvizsgálatot a hazai gyakorlat övmerevség-vizsgálat elvén hajtja végre. Ezek mellett általánosabban is alkalmazható – $N + M$ kölcsönhatásokat is tartalmazó – módszert az 5.4. szakaszban közlünk.

Megjegyzés: a nyomott övén oldalirányban megfelelő megtámasztással rendelkező, illetve nagy csavarási merevségű, félkész termékként kapható zártszelvényű hajlított gerendák esetén a kifordulási vizsgálat nem mértékadó.

5.3.1. Kifordulási ellenállás – általános módszer, tetszőleges keresztmetszet

A hajlított gerenda kifordulás szempontjából megfelel, ha kifordulási ellenállása nagyobb, mint a hajlítónyomaték tervezési értéke.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.56)$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{a hajlított gerenda kifordulási ellenállása} \quad (5.57)$$

ahol W_y az erős tengelyre vonatkozó keresztmetszeti modulus:

$$W_y = W_{pl,y} \quad \text{1 és 2. keresztmetszeti osztály esetén,}$$

$$W_y = W_{el,y} \quad \text{3. keresztmetszeti osztály esetén,}$$

$$W_y = W_{eff,y} \quad \text{4. keresztmetszeti osztály esetén,}$$

$$\chi_{LT} \quad \text{kifordulási csökkentő tényező.}$$

A kifordulási csökkentő tényezőt a gerenda $\bar{\lambda}_{LT}$ viszonyított karcúsága alapján, a kifordulási görbék felhasználásával lehet meghatározni, *tetszőleges keresztmetszet esetében az (5.58) képlet szerint*. Megjegyezzük, hogy ez a képlet azonos a kihajlási görbékre adott (5.39) képlettel, de az eltérő jelölések miatt újra közöljük; ennek megfelelően a kifordulási csökkentő tényező meghatározására alkalmazható az

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{de} \quad \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (5.58)$$

ahol $\Phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2}{2}$ segédmenyiség,

α_{LT} alakhiba tényező: az EC3 négy kifordulási görbét alkalmaz – a, b, c és d – az 5.10. táblázat szerinti alakhiba tényezők definiálásával; az adott szerkezeti kialakítás esetén alkalmazandó kifordulási görbét az 5.11. táblázat adja meg, a keresztmetszet típusa és geometriai aránya alapján.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad \text{viszonyított kifordulási karcúság,} \quad (5.59)$$

M_{cr} a hajlított gerenda rugalmas kifordulási kritikus nyomatéka a teljes keresztmetszeti jellemzők, valamint a tényleges terhelés, illetve nyomatékeloszlás és megtámasztási viszonyok alapján számolva (ld. részletesen az 5.3.3 szakaszban).

A kifordulásvizsgálat nem mértékadó, amennyiben az alábbi feltételek közül bármelyik teljesül:

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,2 \quad \text{vagy} \quad \frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,04 \quad (5.60)$$

| Kifordulási görbe | a | b | c | d |
|--------------------------------|------|------|------|------|
| Alakhiba tényező α_{LT} | 0,21 | 0,34 | 0,49 | 0,76 |

5.10. táblázat: α_{LT} alakhiba tényezők a különböző kifordulási görbékre

| Keresztmetszet típusa | Keresztmetszeti arány | Kifordulási görbe |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| Hengerelt I-szelvény | $h/b \leq 2$ | a |
| | $h/b > 2$ | b |
| Hegesztett I-szelvény | $h/b \leq 2$ | c |
| | $h/b > 2$ | d |
| Más szelvény | - | d |

5.11. táblázat: Kifordulási görbék kiválasztása – általános módszer, tetszőleges keresztmetszet

5.3.2. Kifordulási ellenállás – általános módszer, melegen hengerelt keresztmetszet

Melegen hengerelt – és azokkal ekvivalens geometriai méretekkel kialakított hegesztett – tipikusan I-szelvények esetén a kifordulási csökkentő tényező számítására az EC3 megad egy alternatív számítási eljárást is; amely az (5.61) képlet szerinti kifordulási görbékét használja. Megjegyezzük, hogy ez a módszer IPE-szelvényű gerendák esetén a 0,5-1,0 viszonyított kifordulási karcsúság tartományában 2-5 %-kal, az 1,2-2,0 tartományban pedig 9-20 %-kal nagyobb kifordulási ellenállást eredményez.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{de} \quad \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (5.61)$$

$$\text{ahol} \quad \Phi_{LT} = \frac{1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}{2} \quad \text{segédmenység,}$$

α_{LT} alakhiba tényező (5.10. táblázat)

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

$$\beta = 0,75$$

A hengerelt, illetve ekvivalens hegesztett I-szelvényű gerendák esetén alkalmazandó, (5.61) képlet szerinti kifordulási görbe típusát az 5.12. táblázat definiálja. Megjegyezzük, hogy ebben az esetben az 5.8. táblázat nem használható – minthogy annak értékei más összefüggésből lettek számítva – így a kifordulási csökkentő tényező a képletből számítandó.

| Keresztmetszet | Keresztmetszeti arány | Kifordulási görbe |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|
| Hengerelt I-szelvény | $h/b \leq 2$ | b |
| | $h/b > 2$ | c |
| Hegesztett I-szelvény | $h/b \leq 2$ | c |
| | $h/b > 2$ | d |

5.12. táblázat: Kifordulási görbék kiválasztása – általános módszer, melegen hengerelt keresztmetszet

Melegen hengerelt vagy ekvivalens hegesztett szelvényű hajlított gerendák esetén, amennyiben a kifordulás vizsgálata a fentiek alapján történik, az EC3 megengedi, a χ_{LT} kifordulási tényező (5.62) képlet szerinti módosítását:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{de} \quad \chi_{LT,mod} \leq 1,0 \quad (5.62)$$

$$\text{ahol} \quad f = 1 - 0,5(1 - k_c) / [1 - 2,0(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \quad \text{de} \quad f \leq 1,0 \quad (5.63)$$

k_c a nyomatécni ábra alakjától függő korrekciós tényező, az 5.15. táblázat szerint.

A melegen hengerelt, illetve ekvivalens hegesztett szelvényű gerendák esetén a kifordulásvizsgálat nem mértékadó, amennyiben az alábbi feltételek közül bármelyik teljesül:

$$\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4 \quad \text{vagy} \quad \frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16 \quad (5.64)$$

5.3.3. Kritikus nyomaték

Az EC3 az M_{cr} kritikus nyomatékot az előző szakasz szerint definiálja, de számítására nem ad közvetlenül alkalmazható összefüggést; meghatározása lehetséges a szakma bármely elfogadott számítási eljárása szerint (ld. alapesetre [15], összetettebb esetekre [14], [17]).

Az alábbiakban megadjuk a gyakorlatban elterjedten alkalmazott, végén oldalirányban megtámasztott, változó nyomatékkal terhelt, min. egyszeresen szimmetrikus, állandó keresztmetszetű, a szimmetriában hajlított gerendák kritikus nyomatékának meghatározására alkalmas összefüggést, amely megfelelő megfontolásokkal általánosabb esetekben is alkalmazható:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot EI_z}{(k \cdot L)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{k}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k \cdot L)^2 \cdot GI_t}{\pi^2 \cdot EI_z} + (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)^2 - (C_2 \cdot z_g - C_3 \cdot z_j)} \quad (5.65)$$

ahol:

- I_z a tartó támaszköze (két szomszédos oldalirányú megtámasztás tengelytávolsága),
- I_z a gyenge tengely körüli inercianyomaték,
- I_t a csavarási inercianyomaték, amelynek értéke nyitott vékonyfalú szelvények esetén $I_t = \frac{1}{3} \sum b_i t_i^3$ (itt b_i és t_i a szelvényt alkotó lemezek szélességi mérete és vastagsága), hengerelt szelvények esetén szelvénytáblázatból vehető,
- I_w a torzulási (öblösödési) modulus, közelítő képlete kétszeresen szimmetrikus I-szelvényekre

$$I_w = \frac{I_z \cdot (h - t_f)^2}{4} \quad (5.66)$$

értéke általában ugyancsak megtalálható szelvénytáblázatokban,

- z_g közvetlenül terhelt gerendák esetén a teher támaszpontja és a keresztmetszet csavarási középpontja közötti függőleges távolság; akkor pozitív, ha a támaszpont a csavarási középpont felett van, ha nincs közvetlen teher (a gerendát csak a két végén ható hajlítónyomatékok terhelik), akkor értéke zérus,
- z_j kétszeresen szimmetrikus keresztmetszet esetén zérus, egyszeresen szimmetrikus I-szelvényekre pedig közelítően

$$z_j = \beta_f \cdot h_s \cdot (2\beta_f - 1) \quad (5.67)$$

ahol h_s az övek nyirási középpontjának távolsága, $\beta_f = \frac{I_{fc}}{I_{fc} + I_{ft}}$ (itt I_{fc} és I_{ft} a szelvény nyomott, illetve

húzott övének inercianyomatéka a szelvény gyenge tengelye körül), továbbá $\beta_f = 0,4$ ha $\beta_f > 0,5$ és $\beta_f = 0,5$ ha $\beta_f \leq 0,5$,

C_1 , C_2 és C_3 a nyomatéki ábrának a vizsgált szakaszon (tehát két szomszédos oldalirányú megtámasztás között) érvényes alakjától, valamint k értéktől függő tényezők, az 5.13. táblázat és az 5.14. táblázat szerint,

k a vizsgált tartószakasz végkeresztmetszeteinek elfordulás elleni megfogását jellemző szám, a kifordulás síkjára merőleges z tengely körül (fizikai tartalmát tekintve azonos a kihajlásnál tárgyalt ν befogási tényezővel): mindkét vég teljes értékű megfogása esetén $k = 0,5$, két szabad rúdvég esetén $k = 1,0$,


k_w a vizsgált tartószakasz végkeresztmetszeteinek vetemedés (öblösödés) elleni megfogását jellemző szám: mindkét vég teljes értékű megfogása esetén $k_w = 0,5$ (a keresztmetszeti pontok síkból való kilépése gátolt), két szabad rúdvég esetén $k_w = 1,0$;

Megjegyzések:






(i) az 5.13. táblázatban és az 5.14. táblázatban összetartozó, azonos k és k_w tényezők szerepelnek; ezek felvételére további gyakorlati ajánlások találhatók a [15]-ben;

(ii) a k és k_w tényezők felvételére további gyakorlati ajánlások találhatók a [15]-ben;

(iii) folytatólagos tartók közbelső részének ellenőrzéséhez a k és a k_w tényezők értéke – a biztonság javára való közelítéssel – 1,0-re vehető fel (hajlított gerenda, oldalirányú megtámasztások közötti szakasza).

| A nyomatéki ábra alakja az oldalirányú támaszok között | ψ | k | C_1 | C_2 | C_3 |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
|  | 1 | 1,0 | 1,000 | – | 1,000 |
| | | 0,7 | 1,000 | | 1,113 |
| | | 0,5 | 1,000 | | 1,144 |
| | 0,75 | 1,0 | 1,141 | – | 0,998 |
| | | 0,7 | 1,270 | | 1,565 |
| | | 0,5 | 1,305 | | 2,283 |
| | 0,5 | 1,0 | 1,323 | – | 0,992 |
| | | 0,7 | 1,473 | | 1,556 |
| | | 0,5 | 1,514 | | 2,271 |
| | 0,25 | 1,0 | 1,563 | – | 0,977 |
| 0,7 | | 1,739 | 1,531 | | |
| 0,5 | | 1,788 | 2,235 | | |
| 0 | 1,0 | 1,879 | – | 0,939 | |
| | 0,7 | 2,092 | | 1,473 | |
| | 0,5 | 2,150 | | 2,150 | |
| –0,25 | 1,0 | 2,281 | – | 0,855 | |
| | 0,7 | 2,538 | | 1,340 | |
| | 0,5 | 2,609 | | 1,957 | |
| –0,5 | 1,0 | 2,704 | – | 0,676 | |
| | 0,7 | 3,009 | | 1,059 | |
| | 0,5 | 3,093 | | 1,546 | |
| –0,75 | 1,0 | 2,927 | – | 0,366 | |
| | 0,7 | 3,009 | | 0,575 | |
| | 0,5 | 3,093 | | 0,837 | |
| –1 | 1,0 | 2,752 | – | 0,000 | |
| | 0,7 | 3,063 | | 0,000 | |
| | 0,5 | 3,149 | | 0,000 | |

5.13. táblázat: Kifordulásvizsgálathoz szükséges C tényezők közvetlenül nem terhelt gerendákra

| A nyomatéki ábra alakja az oldalirányú támaszok között | ψ | k | C_1 | C_2 | C_3 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----|-------|-------|-------|
|  | – | 1,0 | 1,132 | 0,459 | 0,525 |
| | | 0,5 | 0,972 | 0,304 | 0,980 |
|  | – | 1,0 | 1,285 | 1,562 | 0,753 |
| | | 0,5 | 0,712 | 0,652 | 1,070 |
|  | – | 1,0 | 1,365 | 0,553 | 1,730 |
| | | 0,5 | 1,070 | 0,432 | 3,050 |
|  | – | 1,0 | 1,565 | 1,267 | 2,640 |
| | | 0,5 | 0,938 | 0,715 | 4,800 |
|  | – | 1,0 | 1,046 | 0,430 | 1,120 |
| | | 0,5 | 1,010 | 0,410 | 1,890 |

5.14. táblázat: Kifordulásvizsgálathoz szükséges C tényezők közvetlenül terhelt gerendákra

5.3.4. Kifordulási ellenállás – egyszerűsített módszer

A kifordulási ellenállás meghatározható egyszerűsített módszerrel, a helyettesítő nyomott öv kihajlási ellenállása alapján (hazai gyakorlatban övmerevség-vizsgálat), az (5.68) képlet segítségével.

$$M_{b,Rd} = k_{fl} \cdot \chi \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{Af1}} \quad \text{de} \quad M_{b,Rd} \leq M_{c,Rd} \quad (5.68)$$

ahol χ a helyettesítő nyomott öv kihajlási csökkentő tényezője,
 $k_{fl} = 1,10$ módosító tényező (a számítási modell biztonság javára tett közelítése miatt),
 W_y értelmezését ld. az (5.57) képlet alatt,
 $M_{c,Rd}$ a keresztmetszet hajlítási ellenállása az (5.16)–(5.18) képletek szerint.

A helyettesítő nyomott öv a hajlított gerenda nyomott övéből és a gerinc nyomott részének 1/3-ából álló szelvény, amelynek a hajlítás síkjára merőleges síkbeli kihajlásához tartozó viszonyított karcsúsága az (5.69) képlet alapján számítható:

$$\bar{\lambda}_{f,z} = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \cdot \lambda_1} \quad (5.69)$$

ahol

L_c a nyomott öv oldalirányú megtámasztásai közötti távolság,
 k_c a nyomatécki ábra alakjától függő korrekciós tényező, az 5.15. táblázat szerint,
 $i_{f,z}$ a helyettesítő nyomott öv inerciasugara a hajlítás síkjára merőleges (azaz „gyenge”) tengelyre számítva, 4. keresztmetszeti osztályú szelvény esetén $i_{f,z}$ az (5.70) képlet alapján számítandó:

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_{eff,f}}{A_{eff,f} + \frac{1}{3} A_{eff,w,c}}} \quad (5.70)$$

$I_{eff,f}$ a nyomott öv effektív inercianyomatéka a gyenge tengelyre,

$A_{eff,f}$ a nyomott öv effektív keresztmetszeti területe,

$A_{eff,wf}$ a gerinc nyomott részének effektív keresztmetszeti területe.

A kihajlási csökkentő tényező az 5.2.1 szakaszban definiált, alábbiak szerint kiválasztott kihajlási görbék alapján számítható:
d görbe hegesztett szelvények esetén, amennyiben a szelvény teljes magasságának és a nyomott öv vastagságának aránya:

$$\frac{h}{t_f} \leq 44\epsilon$$

c görbe minden egyéb szelvény esetén (az ϵ (5.46) képlet szerint értelmezve).

Az egyszerűsített módszer alkalmazásával megadható az L_c nyomott öv oldalirányú megtámasztások tengelytávolságára vonatkozó (5.71) feltétel, melynek teljesülése esetén a kifordulásvizsgálatot nem kell elvégezni.

$$\bar{\lambda}_{f,z} = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \cdot \lambda_1} \leq \bar{\lambda}_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}} \quad (5.71)$$

ahol

$M_{y,Ed}$ az oldalirányú megtámasztások közötti szakaszon fellépő legnagyobb nyomaték,








$$\bar{\lambda}_{c0} = \bar{\lambda}_{LT,0} + 0,1 = 0,5 \quad \text{karcsúsági paraméter.} \quad (5.72)$$

Megjegyzés:

Melcen hengercelt vagy ekvivalens hegesztett szelvények esetén a helyettesítő nyomott öv inerciasugara a gyakorlati számítások pontosságának megfelelő közelítéssel, a következő összefüggésekkel számítható [18]:

$$\text{ha } \frac{h}{b} > 1,2 \quad i_{f,z} = 1,15 i_z \quad (5.73)$$

$$\text{ha } \frac{h}{b} \leq 1,2 \quad i_{f,z} = (1,15 + 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot h) i_z \quad (5.74)$$

| A nyomatéki ábra alakja az oldalirányú támaszok között | k_c tényező |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
|  | $\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$ |
|  | 0,94 |
|  | 0,90 |
|  | 0,91 |
|  | 0,86 |
|  | 0,77 |
|  | 0,82 |

5.15. táblázat: k_c korrekciós tényező

5.4. Nyomott-hajlított rudak stabilitási ellenállása

Az EC3 az egyenes tengelyű, nyomott-hajlított rudak stabilitásvizsgálatára – különböző kiindulási feltételeken alapulva – két méretezési eljárást ad meg. Az 5.4.1 szakaszban ismertetett módszer stabilitási kölcsönhatási összefüggésen alapul, míg az 5.4.2 szakaszban tárgyalt általánosabb – de mégsem teljesen általános – módszer a 4. fejezetben ismertetett „részben helyettesítő imperfekciós” elvet alkalmazza. A tárgyalt eseteknél általánosabb esetekben a „helyettesítő imperfekciós” módszer alkalmazása javasolt (ld. 4.7 szakasz, 4.5. táblázat).

5.4.1. Stabilitási ellenállás kölcsönhatás vizsgálata alapján

5.4.1.1 Nyomóerő – nyomaték kölcsönhatási összefüggés

Kiindulási feltevések: (i) a rúd kétszeresen szimmetrikus, állandó keresztmetszetű; (ii) torzulási horpadás (nem-alaktartó stabilitási tönkremenetel) nem következhet be; (iii) a szerkezetből kivágott külpontosan nyomott elem egy nyílású, két végén villásan megtámasztott modellel jellemezhető, amelyre nyomóerő és – általános esetben – kéttengelyű hajlítás hat.

A feltevéseknek megfelelő külpontosan nyomott szerkezeti elem nyomóerő és kéttengelyű hajlítás kölcsönhatásából bekövetkező határpontos stabilitási jelenségét – ellenállását – az (5.75) és (5.76) képletekben adott teherbírási feltételek segítségével vizsgálhatjuk.

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (5.75)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (5.76)$$

ahol N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ a nyomóerő, illetve az y-y és z-z tengelyek körüli maximális nyomatékok

tervezési értékei az elem hossza mentén,

$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$ 4. keresztmetszeti osztályú szelvény esetén az eredeti és az effektív keresztmetszet

súlypontjai közötti távolságból adódó többlet nyomatékok,

N_{Rk} , $M_{y,Rk}$, $M_{z,Rk}$ az 5.16. táblázat alapján definiált kihajlási és nyomatéki ellenállások,

χ_y , χ_z síkbeli kihajlási csökkentő tényezők,

χ_{LT} kifordulási csökkentő tényező (amennyiben a szerkezeti elem kifordulása nem mértékadó, a

a megtámasztások következtében, az értéke 1,0)

k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} kölcsönhatási tényezők, meghatározásuk lehetséges a szabvány által javasolt két alternatív

módszer alapján (ld. 5.4.1.2. szakaszban).

| Km. osztály | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------------|
| A_i | A | A | A | A_{eff} |
| W_y | $W_{pl,y}$ | $W_{el,y}$ | $W_{el,y}$ | $W_{eff,y}$ |
| W_z | $W_{pl,z}$ | $W_{pl,z}$ | $W_{el,z}$ | $W_{eff,z}$ |
| $\Delta M_{y,Ed}$ | 0 | 0 | 0 | $e_{N,y} N_{Ed}$ |
| $\Delta M_{z,Ed}$ | 0 | 0 | 0 | $e_{N,z} N_{Ed}$ |

5.16. táblázat: Az $N_{Rk} = f_y A_i$ és $M_{i,Rk} = f_y W_i$ ellenállások meghatározásához szükséges tényezők

A vizsgálatban a másodrendű hatást figyelembe kell venni, amely az alábbi két alternatív módon lehetséges:

(i) Az analízis során a globális imperfekciókkal rendelkező szerkezeti modellel másodrendű nyomatékokat számolunk – $M''_{y,Ed}$, $M''_{z,Ed}$ – és ezeket helyettesítjük be a kölcsönhatási összefüggésekbe; ezután a kölcsönhatási tényezők meghatározásánál a szerkezeti elem kihajlási hosszát a hálózati hosszal azonosnak vesszük fel mindkét síkban: $I_{cr} = I$.

(ii) A szerkezeti modellel lineáris analízissel elsőrendű nyomatékokat számolunk – $M^I_{y,Ed}$, $M^I_{z,Ed}$ – és ezeket helyettesítjük be a kölcsönhatási összefüggésekbe; ezután a kölcsönhatási tényezők (ld. 5.17. és 5.18. táblázatokban) meghatározásánál a szerkezeti elem kihajlási hosszát az ekvivalens Euler-rúd alapján vesszük fel mindkét síkban: $I_{cr} = \nu I$.

5.4.1.2 Kölcsönhatási tényezők – EC3, B Függelék szerinti 2. módszer

A k_{yy} , k_{zz} , k_{yy} , k_{zz} kölcsönhatási tényezők meghatározására két alternatív módszert javasol az EC3 szabvány (EC3-1-1 A és B Függelék); ebben a szakaszban a B Függelék szerinti ún. 2. módszer előírásait adjuk meg a kölcsönhatási tényezők meghatározására (5.17. és 5.18. táblázatok). Ezeket kísérleti és numerikus vizsgálatsorozat alapján állapították meg [19].

5.17. táblázat: kölcsönhatási tényezők nem elcsavarodó tönkremeneteli módok esetén: azaz a nyomóerő hatására csak síkbeli kihajlás következhet be (elcsavarodó, illetve térbeli elcsavarodó kihajlás nem), és a kifordulás sem mértékadó ($\chi_{LT} = 1$). Ez igaz a gyakorlati esetekben alkalmazott téglalap alakú zártszelvényekre (RHS), illetve az oldalirányban kifordulással szemben megtámasztott kétszeresen szimmetrikus I-szelvényekre.

5.18. táblázat: kölcsönhatási tényezők elcsavarodó tönkremeneteli módok esetén: azaz vagy a nyomóerő hatására bekövetkező elcsavarodó, illetve térbeli elcsavarodó kihajlás, és/vagy kifordulás bekövetkezése esetén ($\chi_{LT} < 1$).

Az 5.19. táblázat a C_{my} , C_{mz} és C_{mLT} ekvivalens konstans nyomatók tényezőket tartalmazza.




Az 1. alternatív módszerre vonatkozó összefüggések az EC3-1-1 szabvány A függelékében található. Megjegyezzük, hogy a két módszer alapján végrehajtott összehasonlító vizsgálatok gyakorlati szempontból nem adnak jelentősen eltérő eredményeket; a könyvben a 2. módszer választását a könnyebb gyakorlati alkalmazhatóság indokolja.

| Kölcsönhatási tényező | Keresztmetszet típusa | A keresztmetszet | |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | 3., 4. keresztmetszeti osztályú | 1., 2. keresztmetszeti osztályú |
| k_{yy} | I vagy RHS | $C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ | $C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ |
| k_{zz} | I vagy RHS | k_{zz} | $0,6 k_{zz}$ |
| k_{yy} | I vagy RHS | $0,8 k_{yy}$ | $0,6 k_{yy}$ |
| k_{zz} | I | $C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ | $C_{mz} \left(1 + (2\bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ |
| | RHS | $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ | $C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ |

5.17. táblázat: Kölcsönhatási tényezők elcsavarodás nélküli mértékadó tönkremenetel esetén

| Kölcsönhatási tényező | A keresztmetszet | |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | 3., 4. keresztmetszeti osztályú | 1., 2. keresztmetszeti osztályú |
| k_{yy} | k_{yy} (5.17) táblázat szerint | k_{yy} (5.17) táblázat szerint |
| k_{yz} | k_{yz} (5.17) táblázat szerint | k_{yz} (5.17) táblázat szerint |
| k_{zz} | $\left[1 - \frac{0,05\bar{\lambda}_z}{(C_{mLz} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,05}{(C_{mLz} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right]$ | $\bar{\lambda}_z \geq 0,4$ esetén: $\left[1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLz} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right]$ $\geq \left[1 - \frac{0,1}{(C_{mLz} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}} \right]$ $\bar{\lambda}_z < 0,4$ esetén: $k_{zz} = 0,6 + \bar{\lambda}_z \leq 1 - \frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLz} - 0,25) \chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1}}$ |
| k_{zz} | k_{zz} (5.17) táblázat szerint | k_{zz} (5.17) táblázat szerint |

5.18. táblázat: Kölcsönhatási tényezők elcsavarodással járó mértékadó tönkremenetel esetén

| Nyomateki ábra | Tartomány | | $C_{my} : C_{mz} : C_{mLT}$ | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| | | | megoszló terhelés | koncentrált terhelés |
|  | $-1 \leq \psi \leq 1$ | | $0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$ | |
|  | $0 \leq \alpha_s \leq 1$ | $-1 \leq \psi \leq 1$ | $0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$ | $0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$ |
| | $-1 \leq \alpha_s < 0$ | $0 \leq \psi \leq 1$ | $0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$ | $-0,8\alpha_s \geq 0,4$ |
| $-1 \leq \psi < 0$ | | $0,1(1 - \psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$ | $0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$ | |
|  | $0 \leq \alpha_h \leq 1$ | $-1 \leq \psi \leq 1$ | $0,95 + 0,05\alpha_h$ | $0,90 + 0,10\alpha_h$ |
| | $-1 \leq \alpha_h < 0$ | $0 \leq \psi \leq 1$ | $0,95 + 0,05\alpha_h$ | $0,90 + 0,10\alpha_h$ |
| | | $-1 \leq \psi < 0$ | $0,95 + 0,05\alpha_h(1 + 2\psi)$ | $0,90 - 0,10\alpha_h(1 + 2\psi)$ |
| Kilengő kihajlási mód ($\nu > 1$) esetén a C_{my} és C_{mz} tényezők értékei 0,9-re veendők fel. | | | | |
| Természetesen az egyes, különböző irányokhoz tartozó tényezők (C_{my} , C_{mz} és C_{mLT}) meghatározásakor a megfelelő nyomateki ábra megfelelő megtámasztások közötti szakaszát kell figyelembe venni, így: | | | | |
| tényező | hajlítás tengelye | megtámasztások iránya | | |
| C_{my} | y-y | z-z | | |
| C_{mz} | z-z | y-y | | |
| C_{mLT} | y-y | y-y | | |

5.19. táblázat: Ekvivalens konstans nyomatek tényezők

5.4.2. Általános eljárás szerkezetek és szerkezeti elemek stabilitási ellenőrzésére

Amennyiben egy szerkezeti elem stabilitásvizsgálata nem hajtható végre az 5.2, 5.3, illetve 5.4.1 szakaszokban ismertetett módszerek alapján, mert a szerkezeti kialakítás és/vagy terhelési mód nem felel meg az ott részletezett kiindulási feltevéseknek, akkor az alábbi módszer általában – a következő feltevések érvényessége esetén – alkalmazható a stabilitási ellenállás ellenőrzésére.

A vizsgálandó szerkezet lehet:

- (i) szerkezeti elem, tömör vagy osztott szelvényű, hossza mentén állandó vagy változó keresztmetszettel, összetett megtámasztási viszonyokkal, vagy
- (ii) síkbeli keretszerkezet vagy keretszerkezeti részlet a fenti jellemzőkkel rendelkező elemekből felépítve, amelyek nyomó normálerővel és/vagy egytengelyű hajlítónyomatékkal terheltek a szerkezet síkjában, de nem tartalmaznak képlékeny csuklót.

Megjegyzés: a feltétel tehát általános kialakítású és terhelésű, de síkbeli rúdszerkezet stabilitási ellenállásának az ellenőrzésére alkalmas.

A szerkezet globális stabilitás szempontjából megfelelő, amennyiben az (5.77) képletben adott feltétel teljesül:

$$\frac{\chi_{op} \cdot \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1,0 \quad (5.77)$$

- ahol $\alpha_{ult,k}$ a teher tervezési értékének az a minimális szorzótényezője (síkbeli szilárdsági teherparaméter), amellyel a terhet megszorozva a mértékadó keresztmetszetben elérjük a szerkezet szilárdsági teherbírását, a síkbeli viselkedés és globális és/vagy lokális imperfekciók figyelembevételével, de a hajlítás síkjára merőleges kihajlás, illetve kifordulási stabilitási tönkremenetel figyelembevétele nélkül.
- χ_{op} stabilitási csökkentő tényező, a globális viszonyított karcsúság ($\bar{\lambda}_{op}$) alapján számítva.

A globális viszonyított karcsúság az (5.78) képlet alapján határozható meg:

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr,op}}} \quad (5.78)$$

- ahol $\alpha_{cr,op}$ a teher tervezési értékének az a minimális szorzótényezője (hajlítási síkra merőleges stabilitási teherparaméter), amellyel a terhet megszorozva elérjük a szerkezet hajlítás síkjára merőleges – oldalirányú – kihajlási, illetve kifordulási stabilitási tönkremeneteléhez tartozó rugalmas kritikus terhet, a síkbeli kihajlás figyelembevétele nélkül.

Megjegyzés: az $\alpha_{ult,k}$ és $\alpha_{cr,op}$ meghatározása általában pontosított modellen alapuló végeselemes globális analízissel lehetséges.

A χ_{op} stabilitási csökkentő tényező az alábbi alternatív módszerek valamelyikével határozható meg:

- (i) a kisebb érték az alábbiak közül, az $\bar{\lambda}_{op}$ alapján számolva:

χ a hajlítás síkjára merőleges – oldalirányú – kihajláshoz tartozó kihajlási csökkentő tényező (ld. 5.2. szakasz),

χ_{LT} kifordulási csökkentő tényező (ld. 5.3. szakasz),

- (ii) a fentiek alapján számított χ és χ_{LT} csökkentő tényezők közötti interpolálással adódó érték, a mértékadó keresztmetszetben az $\alpha_{ult,k}$ meghatározása során kapott normálerő, illetve nyomatéki kihasználtság arányában.

Megjegyzés: ha $\alpha_{ult,k}$ számítása az (5.79) képlet alapján történt a mértékadó keresztmetszetben, akkor az interpolálást követően a stabilitási ellenőrzés az (5.80) képlet szerinti eredményre vezet:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rk}} \quad (5.79)$$

$$\chi \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}} + \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (5.80)$$

5.5. Lemezek horpadási ellenállása

Az előző szakaszokban tárgyalt teljes szerkezeti elemre vonatkozó stabilitási jelenségei mellett a lemez alkotóelemekre vonatkozó horpadási tönkremenetek vizsgálatát is végre kell hajtani. Az elem *hosszirányú nyomófeszültségeinek* hatására bekövetkező lemezhorpadást, illetve ennek kölcsönhatását egyéb tönkremeneteli módokkal az EC3 a keresztmetszet osztályozásán és az effektív keresztmetszet számításán keresztül figyelembe veszi, amint ezt a 4. fejezetben, illetve 5.1-4 szakaszokban már ismertettük. E szerint az 1., 2. és 3. osztályú keresztmetszetek esetén a horpadás nem mértékadó, míg a 4. osztályú keresztmetszet esetén az effektív keresztmetszet alapján számított nyomási és hajlítási ellenállások tartalmazzák a lemezhorpadás hatását. A teljes szerkezeti elem stabilitási vizsgálatai – kihajlás, kifordulás – pedig a karcsúságok számításának szintjén veszi figyelembe a két jelenség kölcsönhatását.

A *nyírás*, illetve *keresztirányú koncentrált nyomóerő* hatására bekövetkező lemezhorpadás, valamint az ezekből adódó kölcsönhatási jelenségek ellenőrzését az EC3 kiegészítő vizsgálatokkal hajtja végre. Az 5.5.1. és 5.5.2. szakaszokban az ezekre vonatkozó előírásokat foglaljuk össze merevítetlen, illetve csak keresztbordákkal merevített lemezek esetén. A tárgyalásmódban az általános elvek ismertetését követően a vizsgálati módszereket elsősorban magascéptési gerinclemezek gerendatartókra mutatjuk be. Megjegyezzük, hogy a nyírás horpadás általánosabb vizsgálatát, illetve a kereszt- és hosszbordákkal merevített lemezekből összeépített szerkezetek összetett stabilitási jelenségeit a könyv második részében fogjuk részletesen tárgyalni.

5.5.1. Nyírás horpadás ellenőrzése

5.5.1.1 A vizsgálat feltételei

Geometriai kiindulási feltevések:

- a nyírt lemezmező téglalap alakú; az EC3 szerint téglalap alakúnak tekinthető a lemezmező, amennyiben az egyirányú oldalak párhuzamostól való eltérése 10° -nál nem nagyobb,
- a lemezben található nyitott lyukak és/vagy kivágások elhanyagolható mértékűek; az EC3 szerint ez akkor teljesül, ha a nyitott lyuk d átmérőjének és a h_w lemezszélességnek az arányára fennáll a $d/h_w \leq 0,05$ feltétel,
- a merevítőbordák kereszt-, illetve hosszirányúak; ebben a szakaszban csak keresztbordákkal merevített lemezekkel foglalkozunk.

Az alábbi feltételek teljesülése esetén a nyírás horpadás nem mértékadó, így a vizsgálatot nem kell elvégezni: merevítetlen gerinclemezek esetén

$$h_w/t_w \leq 72\varepsilon/\eta, \text{ és} \quad (5.81)$$

legalább a támaszok felett keresztbordával merevített gerinclemezek esetén

$$h_w/t_w \leq 31\varepsilon\sqrt{k_\tau}/\eta, \quad (5.82)$$

- ahol h_w, t_w a gerinclemez magassága és vastagsága (1.1 ábra jelölései alapján),
 k_τ nyírás horpadási tényező, az (5.90) képlet alapján,
 η módosító tényező, amelyet az EC3-1-5 Nemzeti Melléklete szabályoz;
az EC3 szerinti ajánlott értéke $\eta = 1,20$,
 ε anyagminőségre jellemző segédmenyiség az (5.46) képlet alapján.

Amennyiben az (5.81) feltétel nem teljesül, akkor a merevítetlen lemezmezőt meg kell erősíteni, melynek legcélszerűbb módja a mértékadó helyen – tipikusan a támaszok fölött – megfelelő merevségű keresztborda alkalmazása. Az így kialakított merevített lemezmező ha nem felel meg az (5.82) képlet feltételeinek, akkor a nyírás horpadási ellenállás ellenőrzését a következő szakasz szerint kell végrehajtani.

5.5.1.2 Nyírás horpadási ellenállás

A négy oldalán megtámasztott merevített lemezmező – tipikusan az övekkel és legalább a támaszok fölött elhelyezett keresztbordákkal kialakított gerinclemezmező – nyírás horpadás szempontjából megfelel, ha nyírás horpadási ellenállása nagyobb, mint a lemezmező mentén fellépő legnagyobb nyíróerő tervezési értéke.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.83)$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \text{ a lemezmező nyírás horpadási ellenállása.} \quad (5.84)$$

- ahol $V_{bw,Rd}$ a gerinclemez hozzájárulása a nyírás horpadási ellenálláshoz,
 $V_{bf,Rd}$ az övek hozzájárulása a nyírás horpadási ellenálláshoz,
 f_{yw} a gerinclemez anyagának folyáshatára (karakterisztikus érték).

A nyírási horpadási ellenállás fenti képlet szerinti számítása a horpadás utáni tartalék figyelembevételével történik, amely a húzott sávok elvén alapul. A nyírt gerinclemezt és a megtámasztásait biztosító öveket, valamint a keresztbordákat mint folyási mechanizmust vizsgálja, és a nyírási horpadási ellenállást a gerinclemez és az övlemez teherbírásai hozzájárulása összegeként határozza meg.

Tipikus magasépítési gerinclemez tartók esetén az övek hozzájárulása a gerinclemez nyírási horpadási ellenállásához nem jelentős mértékű. Emiatt célszerű az ellenállást csak a gerinclemez hozzájárulása alapján – viszonylag egyszerűen – kiszámolni ($V_{bw,Rd}$ számítását ld. az alábbiakban), az övek hozzájárulását pedig csak akkor vizsgálni, ha teherbírás hiány mutatkozik az ellenőrzés során ($V_{bf,Rd}$ számítását ld. az EC3-1-5 5.4 szakaszában).

$V_{bw,Rd}$ számítása:

A nyírási horpadási ellenálláshoz a gerinclemezről adódó hozzájárulást az (5.85) képlet adja meg:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad (5.85)$$

ahol χ_w horpadási csökkentő tényező a lemezmező $\bar{\lambda}_w$ viszonyított lemezkarcsúsága alapján számolva, a következő összefüggéscs alapján.

Merev – ferde húzott lemezsávot lehorgonyzó – a gerendavég merevítések, illetve a tartó közbenső támasza melletti gerincpanel vizsgálata esetén (ld. 5.6.b, ábra – megjegyzés: az ábrázolt végkialakítás nem tipikus magasépítési gerinclemez tartók esetén):

$$\chi_w = \begin{cases} \eta & \text{ha } \bar{\lambda}_w < \frac{0,83}{\eta} \\ \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} & \text{ha } \frac{0,83}{\eta} \leq \bar{\lambda}_w < 1,08 \\ \frac{1,37}{0,7 + \bar{\lambda}_w} & \text{ha } 1,08 \leq \bar{\lambda}_w \end{cases} \quad (5.86)$$

Nem merev véglehorgonyzást biztosító végkialakítás esetén (ld. 5.6.c, ábra):

$$\chi_w = \begin{cases} \eta & \text{ha } \bar{\lambda}_w < \frac{0,83}{\eta} \\ \frac{0,83}{\bar{\lambda}_w} & \text{ha } \frac{0,83}{\eta} \leq \bar{\lambda}_w \end{cases} \quad (5.87)$$

ahol $\bar{\lambda}_w = \sqrt{\frac{f_{yw} / \sqrt{3}}{\tau_{cr}}}$ viszonyított nyírási horpadási karcsúság, (5.88)

$$\tau_{cr} = k_\tau \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t_w}{h_w} \right)^2 \quad \text{a lemezmező nyírási kritikus feszültsége,} \quad (5.89)$$

a k_τ tényező a lemezmező $\alpha = a / h_w$ hossz–szélesség arányának a függvénye:

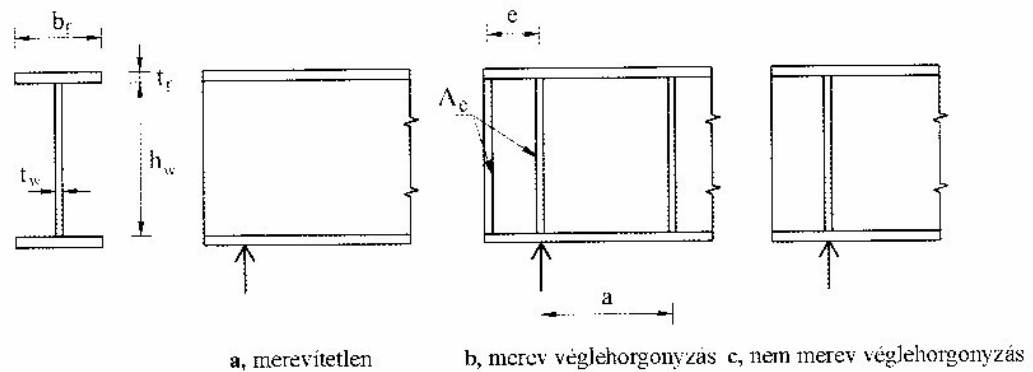
$$k_\tau = \begin{cases} 4 + \frac{5,34}{\alpha^2} & \text{ha } \alpha < 1,0 \\ 5,34 + \frac{4}{\alpha^2} & \text{ha } \alpha \geq 1,0 \end{cases} \quad (5.90)$$

Az (5.89) képlet kifejtésével és az (5.88) képletbe való behelyettesítésével a $\bar{\lambda}_w$ képlete az alábbi alakban írható fel:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} \quad (5.91)$$

Tipikus magasépítési gerinclemez tartók esetén, amennyiben a gerinclemez csak a támaszok fölött merevítjük, az $\alpha = \infty$ -hez tartozó $k_\tau = 5,34$ értéket használhatjuk. Ezt behelyettesítve a viszonyított karcsúság képlete az alábbira egyszerűsödik:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon} \quad (5.92)$$



5.6. ábra: Gerendavég merevítések

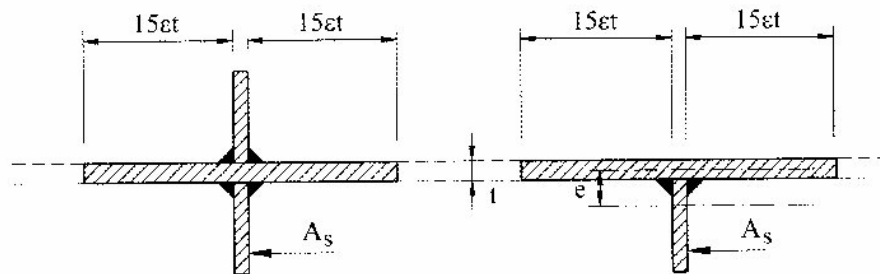
5.5.1.3 Keresztbordák méretezése

Az előzőekben megadott összefüggések feltételezték, hogy a keresztborda megfelelő merevséggel rendelkezik ahhoz, hogy a gerinclemeznek megtámasztást biztosítson. Ezt a feltételt az EC3 mind a közbelső keresztbordákra, mind pedig a gerendavég bordáira ellenőrzi, az alábbiak szerint.

Közbelső keresztborda:

A közbelső keresztborda megfelelő merevségű, ha a borda és a vele együttműködő gerinclemez alkotta keresztmetszet – ld. 5.7. ábrán A_s terület – adott tengelyre vonatkozó I_{st} inerciájára teljesülnek a következő feltételek:

$$I_{st} \geq \begin{cases} \frac{1,5h_w^3 \cdot t_w^3}{a^2} & \text{ha } \frac{a}{h_w} < \sqrt{2} \\ 0,75h_w t_w^3 & \text{ha } \sqrt{2} \leq \frac{a}{h_w} \end{cases} \quad (5.93)$$



5.7. ábra: Keresztborda keresztmetszetének értelmezése

Emellett a keresztborda ellenállását is ellenőrizni kell: e vizsgálat során ki kell mutatni, hogy az előzőekben definiált fiktív keresztmetszetű rúd az adott tengely körüli kihajlásra megfelel, $0,75h_w$ kihajlási hossz és a „c” kihajlási görbe feltételezésével, a következő N_{Ed} nyomóerőre:

$$N_{Ed} = V_{Ed} - \frac{1}{\lambda_w^2} \cdot \frac{f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad (5.94)$$

ahol V_{Ed} a nyíróerő tervezési értéke; ha a nyíróerő változik a két szomszédos gerincpanel mentén, akkor a nagyobb nyíróerővel terhelt panel – maximális nyíróerejű – elétől $0,5h_w$ távolságban lévő nyíróerőt kell figyelembe venni.

Megjegyzések:

- aszimmetrikus keresztborda alkalmazása esetén a fiktív keresztmetszetű rúdát külpontos nyomásra kell ellenőrizni,
- amennyiben a közbelső keresztborda nem megfelelő merevségű – azaz az (5.93) szerinti feltétel nem teljesül – a borda merevségét figyelembe kell venni a k_r számításában.

Végborda:

A gerenda végén elhelyezett keresztborda akkor tekinthető merevnek, ha a kialakítása az 5.6.b, ábra szerint, dupla merevítéssel történik. Mínt hogy magasépítési acélszerkezetekben ez nem tipikus megoldás, ennek a számítási részleteit ebben a könyvben nem közöljük (ld. EC3-1-5, 9.3.1 szakasz részletesen).

Nem merev végborda esetén – ld. 5.6.c, ábra – a közbelső keresztbordára előírt teherbírási vizsgálatát az (5.94) képlet szerinti normálerőre kell végrehajtani.

5.5.1.4 Nyírási horpadás kölcsönhatása más tönkremeneteli módokkal

Előzőleg bemutattuk a hajlítás és nyírás, illetve a hajlítás, nyírás és normálerő kölcsönhatását a keresztmetszet ellenállásának számításakor. Ott abból a feltételezésből indultunk ki, hogy a vizsgált gerinclemezben nyírási horpadás nem jön létre, azaz annak teljes nyírási ellenállását figyelembe vehetjük. Amennyiben azonban a nyírási horpadás bekövetkezhet, a következő vizsgálatot kell végrehajtani (az egyes igénybevételekre vonatkozó, külön-külön végrehajtott ellenőrzések mellett).

I-szelvényű, illetve szekrény keresztmetszetű tartók gerinclemezének vizsgálata során a kölcsönhatást figyelembe kell venni amennyiben:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} > 0,5 \quad (5.95)$$

ahol V_{Ed} a nyíróerő tervezési értéke,

$V_{bw,Rd}$ a nyírási horpadási ellenállás csak a gerinclemez figyelembe véve.

Ekkor a következő feltételnek kell eleget tenni:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(2 \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1,0 \quad \text{és} \quad \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \quad (5.96)$$

ahol M_{Ed} a nyomaték tervezési értéke,

$M_{f,Rd}$ csak a hatékony övlemez részekből álló képzeltek keresztmetszet nyomatéki ellenállása (a kisebb hatékony övre számítható $A_f f_y / \gamma_{M0}$ erő és az övek súlypontjai közötti távolság szorzata),

$M_{pl,Rd}$ a keresztmetszet képlékeny nyomatéki ellenállása (keresztmetszeti osztálytól függetlenül).

Az (5.96) képlet szerinti vizsgálat végrehajtandó a lemezmezőnek keresztbordával merevített támaszától $0,5h_w$ -nál nagyobb távolságban lévő bármelyik (mértékadó) keresztmetszetében.

Amennyiben a nyíróerő és a nyomaték mellett normálerő is hat, akkor az 5.1.8. szakaszban ismertetett mód szerint csökkentett nyomatéki ellenállások behelyettesítésével kell végrehajtani a fenti vizsgálatot.

5.5.2. Keresztirányú nyomóerő hatására bekövetkező horpadás ellenőrzése

Az előző szakaszban részletezett merevítetlen vagy merevített gerinclemezeken esetén, amennyiben a nyírási horpadási feltételek teljesülnek, de a merevítetlen lemezszakaszra közvetlen koncentrált nyomóerő – a továbbiakban keresztirányú nyomóerő – működik, az ennek hatására bekövetkező horpadási tönkremenetelt az alábbiakban részletezett kiegészítő vizsgálattal kell ellenőrizni. Keresztirányú nyomóerő magasépítési gerendatartók esetén jellemzően a megtámasztások adta reakcióerőből, fióktartók terhéből, illetve darupályatartók esetén a koncentrált kerékteherből adódik. Ennek hatására a koncentráltan nyomott gerinclemez az erő felett (vagy alatt) lokálisan behorpadhat (más, a jelenségre alkalmazott szóhasználattal beroppanhat). A tönkremeneteli mód különösen többtámaszú tartók közbenső támaszainál válhat mértékadóvá, ahol a keresztirányú nyomóerő negatív nyomatékkal egyidejűleg hat, azaz a gerinclemeznek erre a részére kétirányú nyomófeszültség működik.

5.5.2.1 A vizsgálat feltételei

A vizsgálati módszer az alábbi szerkezeti kialakítások és keresztirányú nyomóerő elrendezések esetén igaz:

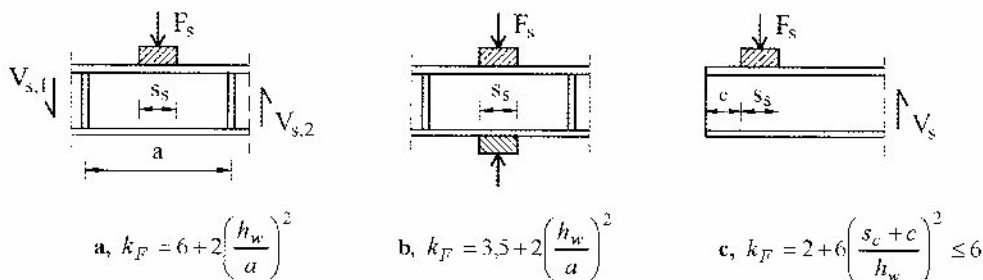
A keresztirányú nyomóerő melegen hengerelt vagy hegesztett szelvényű gerenda gerinclemezét terheli, amelynek az övei oldalirányban megtámasztottak vagy megfelelő merevségűek ahhoz, hogy az övek oldalirányba ne mozduljanak el.

A keresztirányú nyomóerő elrendezése az 5.8 ábra szerinti:

- az erő egy övön hat, és a gerinclemezmezőt nyíróigénybevétel egyensúlyozza (5.8.a, ábra),

- mindkét övön, egymással szemben hat keresztirányú nyomóerő; másképpen fogalmazva: az egyik övön ható erőt a gerinc közvetlenül továbbítja a másik övre (5.8.b, ábra),

- az erő egy övön hat, a merevítetlen gerendavég közelében (5.8.c, ábra).



5.8. ábra: Különböző keresztirányú nyomóerő elrendezések és horpadási tényezők

5.5.2.2 Horpadási ellenállás keresztirányú nyomóerő esetén

Merevítetlen vagy az 5.8. ábra szerint merevített gerinclemez horpadás szempontjából megfelel, ha horpadási ellenállása keresztirányú nyomóerőre nagyobb, mint az adott helyen fellelő keresztirányú nyomóerő tervezési értéke.

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0 \quad (5.97)$$

$$F_{Rd} = \frac{f_{yw} \cdot l_{eff} \cdot t_w}{\gamma_{M1}} \quad \text{a gerinclemez horpadási ellenállása keresztirányú nyomóerőre,} \quad (5.98)$$

ahol f_{yw} a gerinclemez anyagának folyáshatára (karakterisztikus érték),
 $l_{eff} = \chi_F \cdot \ell_y$ a keresztirányú nyomóerőnek az ellenállás számításban figyelembe vehető effektív megoszlási hossza, (5.99)
 χ_F az effektív terhelt hosszra vonatkozó horpadási csökkentő tényező,
 ℓ_y effektív terhelt hossz, amely az erő tényleges eloszlási hossza, az erő elrendezése és az öv és gerinc merevségi viszonya alapján számítható.

χ_F számítása:

A χ_F horpadási csökkentő tényező, amely a keresztirányú nyomóerőnek a horpadási ellenállás szempontjából figyelembe vehető effektív megoszlási hosszát adja meg a $\bar{\lambda}_F$ viszonyított lemezkarcsúság függvényében, az alábbiak szerint:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0 \quad (5.100)$$

ahol $\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{\ell_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}}$ viszonyított horpadási karcsúság keresztirányú nyomóerő esetén, (5.101)

$$F_{cr} = 0,9 \cdot k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad \text{a gerinclemez kritikus feszültsége keresztirányú nyomóerő hatására,} \quad (5.102)$$

k_F horpadási tényező az 5.8. ábra szerint.

ℓ_y számítása:

Az ℓ_y effektív terhelt hossz az 5.9. ábra szerint értelmezett s_s keresztirányú nyomóerő megoszlási hossz és az alábbi dimenzió nélküli segédmenntényiségek alapján számítható:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad (5.103)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2 \quad \text{ha } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad (5.104)$$

$$m_2 = 0 \quad \text{ha } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad (5.105)$$

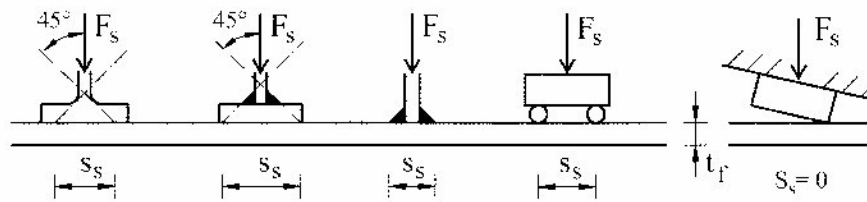
Az 5.8. ábra szerinti a) és b) esetben

$$\ell_y = s_s + 2 \cdot t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2}), \text{ de } \ell_y \text{ kisebb, mint a merevítéscsk közti távolság.} \quad (5.106)$$

Az 5.8. ábra szerinti c) esetben

$$\ell_y = \min \begin{cases} s_s + 2 \cdot t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \\ \ell_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{\ell_e}{t_f} \right)^2 + m_2} \\ \ell_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \end{cases} \quad (5.107)$$

ahol $\ell_e = \frac{k_F E \cdot t_w^2}{2 \cdot f_{yw} h_w} \leq s_s + c$ (5.108)



5.9. ábra: A keresztirányú nyomóerő s_s megoszlási hosszának értelmezése

5.5.2.3 Keresztirányú nyomóerő hatására bekövetkező horpadás kölcsönhatása más tönkremeneteli módokkal

Amennyiben a keresztirányú nyomóerő a gerenda nyomott övén hat hajlítással és normálerővel egyidejűleg, akkor az alábbi kölcsönhatási képlet alkalmazandó az ellenőrzés végrehajtásához:

$$\eta_2 + 0.8\eta_1 \leq 1.4 \quad (5.109)$$

ahol $\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}}$ a keresztirányú nyomóerőre bekövetkező horpadása vonatkozó kihasználtság,

η_1 a hajlítás és normálerő kölcsönhatására vonatkozó, 5.1.8. szakasz, (5.31)-(5.34) képletei szerinti, adott keresztmetszeti osztályra számított kihasználtság; (a képletek baloldala egyenlő η_1 -gyel).

Amennyiben a keresztirányú nyomóerő a gerenda húzott övén hat hajlítással és normálerővel egyidejűleg, akkor az (5.97) képlet szerinti ellenőrzés mellett az összetett feszültségállapot vizsgálatát az (5.35) szerinti összefüggéssel kell elvégezni.

5.5.2.4 Keresztborda méretezése

Amennyiben a merevítetlen lemez nem felel meg a keresztirányú nyomóerőre, akkor az erő hatásvonalában keresztborda alkalmazása szükséges. A keresztbordát teherbírásra kell méretezni az 5.5.1.3 szakaszban, a nem merev végbordára ismertetett elvek alapján.

6. Kapcsolatok méretezése

Az acélszerkezetek előállítása során: a félkész termékekből (lemezelemek, rudak) kell – a gyártás során – a szállítási-szerelési egységeket összeállítani. A helyszínen ezekből az egységekből szerelik össze a teljes szerkezetet. Ezért az acélszerkezetek esetében a kapcsolatok kialakítása – általában – alapvető fontosságú. Mechanikus kapcsolatok esetén az előkészített (fűrt, lyukasztott) munkadarabokat betétszerűen alkalmazott kötőelem (szegecs, csavar, csap, stb.) kapcsolja össze. A hegesztett kapcsolatoknál a kapcsolandó részek megolvasztásával fémes összeköttetést hoznak létre.

Az EC3 megfogalmazza azokat az alapelveket, amelyeket bármely kapcsolat tervezése során figyelembe kell venni. Ezeket a 6.1 szakaszban ismertetjük. A mechanikus kapcsolatok közül csak a csavarozott kapcsolatokkal foglalkozunk a 6.2 szakaszban. Tíz a manapság legáltalánosabban alkalmazott kapcsolattípus és a megadott szabályokból levezethetők a további kapcsoló elemekre vonatkozó előírások. A hegesztett kapcsolatokkal a 6.3 szakaszban foglalkozunk.

6.1. A kapcsolatok tervezésének alapjai

A kapcsolatot alkotó elemek: csavarok, varrat szakaszok teherbírásának megállapítása kísérletek alapján történt. A kísérletek a statikus törőteher megállapítására irányultak, így – lényegében – képlékeny teherbírás értékeket szolgáltatottak. Ezért az EC3-ban meghatározott kötőelem, varratszakasz ellenállás értékek mindig képlékeny teherbírást reprezentálnak. Több kötőelemet, varratszakaszt tartalmazó kapcsolatok esetén az egyes elemek vonatkozásában további alapelvek érvényesülnek.

A kapcsolat elemeire vonatkozóan az alábbi feltételeknek kell teljesülnie:

- egyensúlyi feltétel: a szerkezet egészén meghatározott igénybevételek és a kapcsolat elemein feltételezett (belső) erők legyenek egyensúlyban egymással.
- szilárdsági feltétel: a kötőelemeken fellépő (belső) erők ne haladják meg a kötőelemek teherbírását (ellenállását),
- duktilitási feltétel: a kötőelemeken feltételezett (a feltételek alapján számított) alakváltozások ne haladják meg a kötőelem alakváltozási képességét.
- kompatibilitási feltétel: a feltételezett alakváltozások legyenek összhangban a kapcsoló részek fizikailag lehetséges, merevtestszerű elmozdulásaival, illetve elfordulásaival.

A kompatibilitási feltétel kielégítése során figyelembe vett alakváltozások feleljenek meg valamilyen elfogadott anyagtörvény előírásainak, így alkalmazhatunk:

- rugalmas eljárást, ennek során a kötőelemeken az erők és alakváltozások lineáris összefüggését tételezzük fel,
- képlékeny eljárást, amelynek során nem lineáris, hanem például merev – képlékeny, vagy rugalmas – képlékeny összefüggést veszünk alapul a belső erők és az alakváltozások között.

A továbbiakban ismertetett eljárások tartalmazzák az említett feltételeket, illetve azok teljesülésének igazolására vonatkoznak. (A duktilitási feltételek teljesítéséről még a könyv második részében lesz bővebben szó.)

Mivel a csavarozott és hegesztett kapcsolatokon az erő - alakváltozás összefüggés jelentősen eltér (a kapcsolatoknak eltérő a merevsége) általában nem szabad ugyanazt az erőt megosztani a kétféle kapcsolat között.

6.2. Mechanikus kapcsolatok

Az EC3 a mechanikus kapcsolatok körében foglalkozik a szegecsekkel, csavarokkal, lehorgonyzó csavarokkal, injektált csavarokkal és csapokkal. A könyvben kizárólag a csavarozott kapcsolatok méretezését tárgyaljuk. A csavarokra vonatkozó eljárások – általában – érvényesek a többi mechanikus kapcsolatra is.

A csavarozott kapcsolatoknál alkalmazható anyagok minőségét a 3.3 szakasz tartalmazza.

6.2.1. A csavarozott kapcsolatok típusai

A csavarozott kapcsolatokat a bennük lévő csavaroknak az erőátadásban játszott szerepe szerint öt osztályba soroljuk:

- **A** osztályú csavar: tengelyére merőlegesen terhelt, nem feszített (normál) csavar, ennek megfelelően az erőátadás nyírás és palástnyomás révén valósul meg.
- **B** osztályú csavar: tengelyére merőlegesen terhelt, feszített csavar, az erőátadás az összeszorított felületek közötti súrlódás révén valósul meg, de ez a működés, csak használhatósági határállapotig áll fenn, a teherbírást a csavar nyírása és palástnyomása határozza meg.
- **C** osztályú csavar: tengelyére merőlegesen terhelt, feszített csavar, az erőátadás a teherbírási határállapotban is az összeszorított felületek közötti súrlódás révén valósul meg.
- **D** osztályú csavar: tengelye irányában terhelt (húzott), nem feszített csavar.
- **E** osztályú csavar: tengelye irányában terhelt (húzott), feszített csavar.

Amennyiben egy csavar egyidejűleg húzott és nyírt, akkor két osztályba van, például: **AD**, vagy **CE**.

A **B**, **C** és **E** osztályú – feszített csavaros kapcsolatok – esetén kizárólag 8.8 és 10.9 minőségű csavarok alkalmazhatók.

6.2.2. Csavar- és furat méretek

A járatos esavarméreteket, az alkalmazandó furatokat, valamint a jellemző keresztmetszeti értékeket a 6.1. táblázat tartalmazza.

| Csavar | Átmérő d [mm] | Furatátmérő d_0 [mm] | Keresztmetszeti terület A [mm ²] | Húzási keresztmetszet A_s [mm ²] | Átmérő kigömböklődésnél d_m [mm]* |
|--------|-----------------------|------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| M 12 | 12 | 13 | 113 | 84,3 | 20,5 |
| M 14 | 14 | 15 | 154 | 115 | 23,7 |
| M 16 | 16 | 18 | 201 | 157 | 24,6 |
| M 18 | 18 | 20 | 254 | 192 | 29,1 |
| M 20 | 20 | 22 | 314 | 245 | 32,4 |
| M 22 | 22 | 24 | 380 | 303 | 34,5 |
| M 24 | 24 | 26 | 452 | 353 | 38,8 |
| M 27 | 27 | 30 | 573 | 459 | 44,2 |
| M 30 | 30 | 33 | 707 | 561 | 49,6 |

* Meghatározását l. a 6.2.4.3 szakaszban.

6.1. táblázat: Csavar és furatméretek

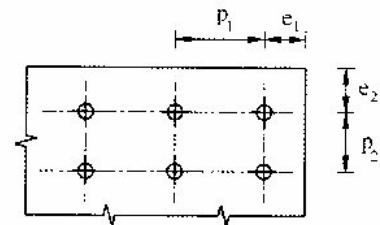
6.2.3. Csavarkép

A csavarkép kialakításánál betartandó maximális és minimális csavartávolságokat a 6.2. táblázat tartalmazza. A táblázatban alkalmazott jelöléseket a 6.1. ábra mutatja.

| Méret | Minimális távolság | Maximális távolság | | |
|-------|--------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| | | Külsőtér Korrózió veszély | Belsőter Nincs korrózió veszély | Korrózió fokozottan ellenálló acél |
| e_1 | $1,2 \cdot d_0$ | $40 \text{ mm} + 4 \cdot t$ | - | $8 \cdot t$ vagy 125 mm |
| e_2 | | | | |
| p_1 | $2,2 \cdot d_0$ | $14 \cdot t$ vagy 200 mm | $14 \cdot t$ vagy 200 mm | $14 \cdot t$ vagy 175 mm |
| p_2 | $2,4 \cdot d_0$ | | | |

6.2. táblázat: Csavarkép maximális és minimális távolságai

- ahol:
- d_0 furat átmérő, a csavarlyuk átmérője,
 - e_1 végtávolság, a szélső csavarlyuk tengelyének távolsága az elem szélétől az erő irányában,
 - e_2 széltávolság, a szélső csavarlyuk tengelyének távolsága az elem szélétől az erőre merőleges irányban,
 - p_1 osztásköz, a csavarlyukak tengelyének egymástól mért távolsága az erő irányában,
 - p_2 osztásköz, a csavarlyukak tengelyének egymástól mért távolsága az erőre merőleges irányban,
 - t a vékonyabbik csatlakozó lemez vastagsága.



6.1. ábra: Csavartávolságok jelölései

A maximális távolságra belsőterben megadott korlátozást csak nyomott elemek esetén kell betartani.

A 6.2. táblázatban megadott minimális csavartávolságok a technikailag lehetséges legkisebb értékek. Tekintettel arra, hogy a palástnyomási ellenállás értéke függ a csavaroknak az elem szélétől, illetve egymástól való távolságától (6.2.5.1 szakasz) alkalmazásuk esetén előfordul, hogy a palástnyomási ellenállása a kapcsolatnak lényegesen kisebb lesz a nyírási ellenállásnál. Ezért a kapcsolat teherbírása kedvezőtlen lesz.

Szokásos csatlakozások esetén viszonylag kedvező ellenállás értékeket kapunk, amennyiben az alábbi minimális csavartávolság értékeket alkalmazzuk:

$$e_1 = 2 \cdot d_0 \quad e_2 = 1,5 \cdot d_0 \quad p_1 = 3 \cdot d_0 \quad p_2 = 3 \cdot d_0 \quad (6.1)$$

6.2.4. Egy csavar ellenállása

6.2.4.1 „A” osztályú nem feszített nyírt csavar

A nyírt csavarok tönkremenetele akkor következik be, ha:

- a csavarszár elnyíródik, vagy
- a csavarszár, vagy a csavarszár körül az alapanyag palástnyomási ellenállása kimerül.

A csavar nyírási ellenállása:

$$F_{v,Rd} = n \frac{0,6 f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (6.2)$$

ahol: f_{ub} a csavar anyagának szakítószilárdsága,
 A a csavarszár keresztmetszeti területe (lásd 6.1. táblázat),
 n a nyírási síkok száma.

Fenti képlet akkor érvényes, ha a nyírás síkjában a teljes csavarszár van, azaz a menetes rész nem ér a nyírás síkjáig. Ellenkező esetben a csavarszár keresztmetszeti területe helyett a húzási keresztmetszeti területtel (A_s) kell számolni és 4.8. 5.8, 6.8 és 10.9 anyagminőségek esetén 20% mértékben csökkenteni kell az ellenállás értékét.

A csavar palástnyomási ellenállása:

$$F_{b,Rd} = k_1 \frac{\alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (6.3)$$

ahol: f_u az alapanyag szakítószilárdsága,
 d a csavarszár átmérője,
 t a kisebb lemezvastagság,
 k_1 értéke a következők közül a kisebb:

$$\text{szélső csavar esetén: } \min\left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) \quad (6.4)$$

$$\text{közbenső csavar esetén: } \min\left(1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) \quad (6.5)$$

α_b értéke a következők közül a kisebb:

$$\text{szélső csavar esetén: } \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right) \quad (6.6)$$

$$\text{közbenső csavar esetén: } \min\left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0\right) \quad (6.7)$$

Az A osztályú nyírt csavar megfelel, amennyiben mind a nyírási ellenállás, mind a palástnyomási ellenállás nagyobb, mint a ható nyíróerő:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.8)$$

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.9)$$

ahol: $F_{v,Ed}$ a csavaron fellépő erő tervezési értéke.

Egyszerűsített eljárás

Csavarozott kapcsolat tervezése során, ha adott a kapcsolandó elemek mérete (t) és anyagminősége (f_u), igen sok további paramétert kell megválasztani, így az alkalmazott csavar átmérőjét (d), minőségét (f_{ub}), a csavarkép elrendezését (e_1, e_2, p_1, p_2).

A tervezés egyszerűsítése érdekében az alábbi eljárás választható:

- adott a kapcsolandó elemek mérete (t) és anyagminősége (f_u),
- feltételezzük, hogy a csavarkép elrendezése a 6.2.3 szakasz végén lévő „kedvező”, azaz: $e_1 = 2 \cdot d_0$, $e_2 = 1,5 \cdot d_0$,
 $p_1 = 3 \cdot d_0$, $p_2 = 3 \cdot d_0$,
- felvesszük az alkalmazott csavar minőségét (f_{ub}),
- $\delta_t = \frac{d}{t_{min}}$ formában jelöljük az átmérő és a minimális vastagság hányadosát, értékeit a 6.3. táblázat tartalmazza,

- meghatározzuk az alkalmazott esavar átmérőjét: $d \geq \delta_t t_{min}$. (6.10)
- megállapítjuk a csavar nyírási ellenállását a (6.2) képlet szerint,
- ellenőrizzük azt, hogy elrendezhetők-e a csavarok úgy, hogy az elemszéléitől, illetve egymástól mért távolságuk legyen egyenlő, vagy nagyobb az előzőekben feltételezett értékeknél.

| f_u \ f_{ub} | 360 | 430 | 510 | 530 |
|------------------|------|------|------|------|
| 400 | 3,18 | - | - | - |
| 500 | 2,53 | 3,04 | - | - |
| 600 | 2,12 | 2,54 | 3,01 | 3,13 |
| 800 | 1,59 | 1,90 | 2,26 | 2,34 |
| 1000 | 1,27 | 1,52 | 1,80 | 1,82 |

6.3. táblázat: δ_t : a javasolt átmérő és a minimális vastagság hányadosa

Az eljárás végrehajtása esetén a csavarok palástnyomási ellenállása mindig nagyobb lesz, mint a nyírási ellenállás, tehát azt ellenőrizni nem kell.

Azokban az esetekben, amikor a csavarkép nem egyezik a fent megadott elrendezéssel, a táblázati értékeket módosítani kell $\alpha_b \cdot k_1 / 1,667$ értékkel. Például a szabvány szerinti minimális távolság alkalmazása esetén a táblázati értékeket 0,398 értékkel, míg a legnagyobb palástnyomási ellenálláshoz tartozó elrendezés esetén 1,5 értékkel szorozva kell figyelembe venni.

6.2.4.2 „B” és „C” osztályú feszített nyírt csavar ellenállása

B osztályú csavarok a használhatósági határállapot eléréséig működnek feszített csavarként.

A **C** osztályú feszített, nyírt csavar akkor megy tönkre, ha

- a kapcsolat megcsúszik, vagy
- a palástnyomási ellenállás kimerül.

A palástnyomás vizsgálat azonos a korábban ismertetettel.

A 6.1. táblázatban megadott méretű furatba szerelt feszített csavar megcsúszással szembeni ellenállása:

$$F_{s,Rd} = \frac{n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} \quad (6.11)$$

ahol: $F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s$ az előírt feszítőerő értéke,

n a súrlódó felületek száma,

μ a súrlódási tényező értéke:

- 0,5 sörétezett, vagy szemcséjűt festetlen felület,
- 0,4 sörétezett, vagy szemcséjűt festett felület,
- 0,3 drótképezett, vagy lángszórással tisztított felület,
- 0,2 kezeletlen felület esetén.

A_s a húzási keresztmetszet.

B osztályú feszített nyírt csavar használhatósági határállapotban megfelel ha, a megcsúszással szembeni ellenállás nagyobb, mint a használhatósági határállapotban fellépő erő értéke:

$$\frac{F_{Ed,ser}}{F_{s,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.12)$$

ahol: $F_{Ed,ser}$ a csavaron használhatósági határállapotban fellépő erő értéke.

Töredékhatárállapotban az **A** osztályú csavarok esetén ismertetett ellenőrzést kell alkalmazni.

C osztályú feszített nyírt csavar megfelel, amennyiben a megcsúszással szembeni ellenállás nagyobb, mint a csavaron fellépő nyíróerő tervezési értéke:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{s,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.13)$$

Egyidejűleg teljesülnie kell a palástnyomási ellenállásra (a 6.9 képletben megadott) feltételnek is.

6.2.4.3 „D” és „E” osztályú húzott csavarok ellenállása

A húzott csavar tönkremegy, ha az adott csavarra ható húzóerő meghaladja:

- a csavar húzási ellenállását,
- a csavar lemez kapcsolat kigombolódási ellenállását.

Ez utóbbi tönkremeneteli formán az EC3 a csavarfejnek (vagy az anyának) a kapcsolt lemezből való kiszakadását érti.

A csavar húzási ellenállása:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6.14)$$

A képletben szereplő jelöléseket az előzőekben megadtuk.

A csavar – lemez együttes kigombolódási ellenállása:

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.15)$$

ahol: d_m a csavarfej vagy csavaranya alatti rész átmérője (lásd 6.1. táblázat),
 t_p a csavarfej, illetve a csavaranya alatti, kisebbik lemez vastagság.

A **D** és **E** osztályú húzott csavar megfelel, amennyiben a húzási ellenállás és a kigombolódási ellenállás értéke is, meghaladja a csavarra ható húzóerő értékét, azaz:

$$\frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.16)$$

$$\frac{F_{t,Ed}}{B_{p,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

ahol: $F_{t,Rd}$ az adott csavarban számított húzóerő tervezési értéke.

6.2.4.4 „AD” és „CE” osztályú húzott és nyírt csavarok ellenállása

Nem feszített, egyidejűleg *húzott és nyírt* csavarok megfelelésének ellenőrzéséhez meg kell határozni az adott csavar nyírási és húzási ellenállását, az előzőek szerint, és meg kell vizsgálni kölcsönhatást az alábbi képlettel:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.18)$$

Feszített és egyidejűleg *húzott és nyírt* csavarok megcsúszási ellenállása:

$$F_{s,Rd} = \frac{n \mu}{\gamma_{M3}} (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed}) \quad (6.19)$$

Az alkalmazott jelöléseket a korábbiakban megadtuk.

A csavar megfelel, ha az így meghatározott megcsúszási ellenállás függvénybe vételevel teljesül a 6.13 képletben megadott feltétel. Természetesen teljesülnie kell a palástnyomásra (6.9), valamint a kigombolódásra (6.15) megadott feltételeknek is.

6.2.5. Csavarozott kapcsolatok vizsgálata

Csavarozott kapcsolatokban – általában – egynél több csavart kell alkalmazni. Ezért meg kell határozni a több csavart tartalmazó kapcsolat ellenállását, illetve azt, hogy az egyes csavarokon fellépő erőt hogyan határozzuk meg.

Az EC3 előírása szerint a több csavart tartalmazó kapcsolat teljes teherbírását a palástnyomási ellenállások összegeként lehet meghatározni, amennyiben egy csavar nyírási ellenállásának értéke nagyobb, mint bármelyik (szélső, vagy közbelső) csavar palástnyomási ellenállása. Ellenkező esetben a kapcsolat teherbírását a legkisebb nyíró-, vagy palástnyomási ellenállás és a csavarszám szorzata határozza meg. Azaz az erők szétosztása a kapcsoló elemek között a továbbiak szerint történik.

Amennyiben a globális analízis során meghatározott igénybevétel (normálerő, nyíróerő, hajlító nyomaték) eredője áthalad a kapcsolat középpontján (a kötőelem kép súlypontján), akkor *centrikus* kapcsolatról beszélünk, amennyiben nem, akkor a kapcsolat *excentrikus*. Az első esetben csak erő hat a kapcsolatra, a második esetben nyomaték is.

Ebben a szakaszban csak olyan kapcsolatokkal foglalkozunk, amelyeknél a teher és kapcsolat síkja egybe esik (síkheli kapcsolatok). A merőleges elemeket kapcsoló, homloklemeszes-kecsolatok méretezését a könyv második részében tárgyaljuk.

6.2.5.1 Síkbeli centrikus kapcsolat

Síkbeli, centrikus kapcsolatok esetén, ha a kapcsolatot azonos átmérőjű csavarok alkotják, egyszerű és a biztonság javára szolgáló közelítésként az erőt egyenletesen oszthatjuk el a kötőelemek között:

$$F_{v,Ed} = \frac{F_{Fd}}{n} \quad (6.20)$$

ahol: $F_{v,Ed}$ az adott csavarra ható nyíróerő tervezési értéke,
 F_{Fd} a kapcsolatra ható erő,
 n a kötőelemek száma a kapcsolatban.

Módosul az eljárás *hosszú kapcsolat* esetén, amikor az erő irányában az első és az utolsó csavartengely közötti távolság (L_j) nagyobb, mint $15d$. (6.2 ábra.) Ebben az esetben az egyenletes erőeloszlás figyelembe vétele mellett mindenegyes csavar teherbírását (ellenállást) csökkenteni kell.

A csökkentő tényező:

$$\beta_{Lj} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d}$$

ahol: L_j a szélső kötőelemek tengelyének távolsága az erő irányában.

A csökkentő tényező értéke nem kevesebb 0,75-nél.

6.2.5.2 Síkbeli excentrikus kapcsolat

Amennyiben a csavarozott kapcsolatra hajlító nyomaték is hat, rugalmas, vagy képlékeny elmozdulások figyelembe vételével lehet meghatározni az ebből származó erőt. (A normál- és nyíróerőből származó hatást a 6.2.5.1 szakasz szerint osztjuk el a kötőelemek között.)

Kizárólag rugalmas eljárást szabad alkalmazni akkor, ha:

- C osztályú, feszített csavaros kapcsolatot kell vizsgálni,
- nyírt kapcsolat esetén, amennyiben a csavarok nyírási ellenállása kisebb, mint a palástnyomási ellenállása,
- a kapcsolat ütésnek, rázódnak, vagy változó irányú igénybevételeknek van kitéve (pl. darupálya, merevítés, stb.).

Rugalmas eljárás esetén, a kötőelemen a nyomatékból származó erő arányos a csavarkép súlypontja (forgási középpont) és az adott kötőelem tengelye közötti távolsággal. (lásd 6.3. ábra) A nyomatékból származó hatás a legjobban igénybevett csavarban:

$$F_{x,Ed} = \sum \frac{M_{Ed}}{(x_i^2 + y_i^2)} y_{max} \quad (6.22)$$

$$F_{y,Ed} = \sum \frac{M_{Ed}}{(x_i^2 + y_i^2)} x_{max} \quad (6.23)$$

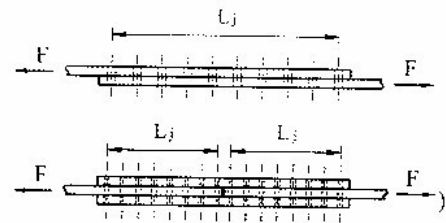
ahol: M_{Ed} a kapcsolat középpontjára ható nyomaték tervezési értéke,
 x_i, y_i az egyes kötőelemek tengelyének távolsága a kapcsolat középpontjától,
 x_{max}, y_{max} az egyes kötőelemek tengelyének távolsága a kapcsolat középpontjától,

A nyomatékból származó komponenseket összegezni kell az – esetleg fennálló – normál, illetve nyíróerőkből származó komponensekkel és úgy kell meghatározni a legjobban igénybevett (1 darab) kötőelemre jutó erőt.

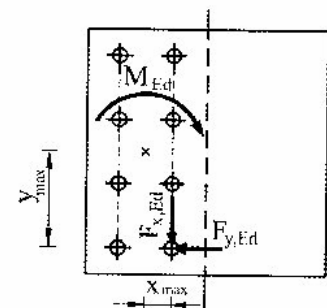
Képlékeny eljárást kizárólag akkor szabad alkalmazni, ha a képlékeny alakváltozások nem haladják meg a kötőelemek alakváltozási képességét.

6.2.5.3 Szögacél excentrikus bekötése

Szögacélok bekötése esetén – rendszeresen – csak az egyik szarát csavarokkal. Így a bekötés excentrikus lesz: az erő hatásvonala (a szögacél súlyvonala) és a kapcsolat tengelye nem esik egybe. Az EC3 megengedi ilyen esetekben, hogy a kapcsolatot centrikusan (lásd 6.2.4 szakasz) méretezzük, de keresztmetszet gyengítésének számításánál további csökkentést kell alkalmazni. Az eljárást az 5.1.2 szakaszban mutatjuk be részletesebben.



6.2. ábra: Hosszú kapcsolat



6.3. ábra: Síkbeli excentrikus

6.2.6. Az anyag ellenállása a csavarozott kapcsolatok környezetében

A csavarlyukak által okozott gyengítést az 5. fejezetben megadott módon kell figyelembe venni.

Csavarcsoportok kialakítása esetén vizsgálni kell a kiszakadás lehetőségét. Ebben az esetben a tönkremenetel részben húzás, részben nyírás hatására következik be.

Szimmetrikus csavarcsoport esetén (pl.

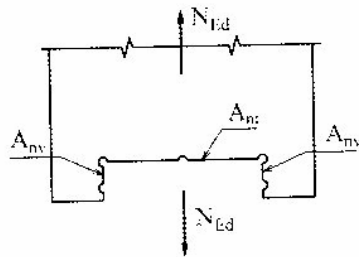
6.4. ábra) az ellenállás értéke:

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (6.24)$$

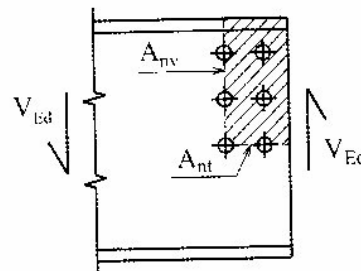
ahol: A_{nt} a húzott keresztmetszeti terület,
 A_{nv} a nyírt keresztmetszeti terület.

Excentrikus elrendezésű csavarcsoport (pl. 6.5. ábra) esetén:

$$V_{eff,1,Rd} = 0,5 \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (6.25)$$



6.4. ábra: Csavarcsoport kiszakadása



6.5. ábra: Csavarcsoport kiszakadása

6.3. Hegesztett kapcsolatok

6.3.1. A hegesztett kapcsolatok

Hegesztési varratok típusai:

- tompavarrat, az anyagot keresztmetszetében kapcsolja,
- sarokvarrat, a kapcsolódó anyagok közötti "szögletet" tölti ki a hozaganyag.

A segédletben csak folyamatos kialakítású tompa- és sarokvarratokkal foglalkozunk. Szakaszos-, kör- és lyukvarratokkal nem.

A tompavarrat lehet teljes beolvadási, amikor a varrat az anyag teljes keresztmetszetét kapcsolja és lehet részleges beolvadási.

6.3.2. A varratok méretei

A varratok méreteit a középsíkban értelmezzük. A varratok jellemző méretei a hossz (l) és a gyökméret (hasznos méret) (a).

30 mm-nél, illetve 6a-nál rövidebb varratot a méretezésnél nem szabad figyelembe venni. A varrat hossz méretének megállapításánál a varratkráterek kialakulására tekintettel kell lenni. Amennyiben a kráter kialakulása nem kizárt (pl. előtűl lemez alkalmazásával, vagy a varrat körbe vezetésével) akkor a figyelembe vehető varrat hossz:

$$l = l_0 - 2a \quad (6.26)$$

ahol: l a méretezésnél figyelembe vehető varrathossz,
 l_0 a tényleges varrathossz,
 a a varratkráter hossza, azonos a varrat gyökméretével.

Amennyiben a varrathossz meghaladja a gyökméret 150-szeresét, a varrat ellenállását csökkenteni kell. A csökkentő tényező értéke:

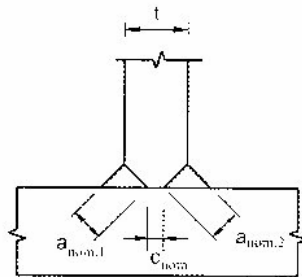
$$\beta_{HW,1} = 1,2 - \frac{0,2 l_j}{150 a} \quad (6.27)$$

ahol: l_j a teljes varrathossz az erő irányával párhuzamosan. (A feltétel nem vonatkozik zárt szelvények

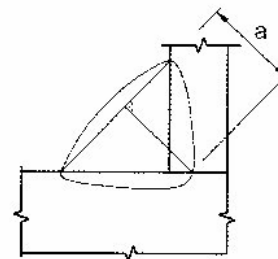
hosszvarrataira.)

A gyökméret értékét az alábbi szabályok figyelembe vételével határozhatjuk meg:

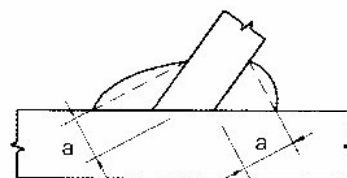
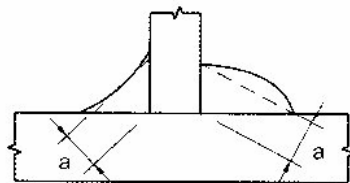
- teljes beolvadású tompavarrat esetén a méret a vékonyabbik kapcsolt elem vastagságával egyezik meg,
- részleges beolvadású tompavarrat esetén a méret a megbízhatóan elérhető beolvadási mélységgel egyezik meg (lásd 6.6. ábra),
- sarokvarrat esetén a varrat keresztmetszetébe írható háromszögnek a nem kapcsolt lemezekre eső oldalához tartozó magasság hosszával egyezik a gyökméret. Speciális esetekre vonatkozó példákat mutat a 6.8. ábra,
- a sarokvarrat gyökméretének legalább 3 mm-nek kell lennie. A sarokvarratok figyelembe vehető gyökmérete nem haladhatja meg a vékonyabb kapcsolt lemez vastagságát.
- mélybeolvadású sarokvarratok esetén (lásd 6.7. ábra), megnövelt gyökméretet szabad számításba venni, amennyiben előzetes kísérletekkel igazolták, hogy a tervezett érték minden esetben elérhető.



6.6. ábra: Részleges beolvadású tompavarrat



6.7. ábra: Mélybeolvadású sarokvarrat



6.8. ábra: Sarokvarrat gyökmérete

6.3.3. Hegesztett kapcsolatok ellenállása (teherbírása)

6.3.3.1 A kapcsolatot terhelő erők szétosztása

Összetett igénybevételeket (normál-erő, nyíróerő, nyomaték) szét kell osztani a kapcsolat varratai között. A szétosztás a 6.1 szakaszban foglaltak figyelembevételével, a kompatibilitási feltétel betartásával, rugalmas, vagy képlékeny eljárás alapján hajtható végre.

Egyszerűsítő feltételezések – az egyensúlyi feltétel betartásával – alkalmazhatók. Pl.: a nyíróerőket csak az irányukkal párhuzamosan elhelyezkedő varratok viselik.

A maradó feszültségek, valamint azok a feszültségek, amelyeket nem kell a varratnak továbbítani (pl. a varrat tengellyel párhuzamos normál feszültségek) figyelmen kívül hagyhatók az ellenőrzésszámítás során.

Amennyiben a hegesztett kapcsolatnál képlékeny csukló jöhet létre, a kapcsolatnak legalább akkora ellenállással kell rendelkeznie, mint a gyengébb kapcsolt elem.

6.3.3.2 Tompavarratok ellenállása

Tompa varratos kapcsolatok esetén, amennyiben a varratot teljes beolvadásúnak lehet tekinteni a kapcsolat teherbírása azonos az alapanyagével. Így az ilyen varratok ellenállást külön vizsgálni nem kell.

Nem teljes beolvadású varrat esetén a kapcsolatot a sarokvarratokra vonatkozó eljárás alapján lehet méretezni.

6.3.3.3 Sarokvarratos kapcsolatok ellenállása

Sarok varratos kapcsolatok esetén a szabvány két lehetőséget ad:

- általános eljárás,
- egyszerűsített eljárás.

Az általános eljárás

Az általános eljárás a varratban megállapítható feszültségkomponensek összegzésén alapul. Megfelel a varrat, ha az alábbi két feltétel teljesül:

$$\sqrt{\sigma_1^2 + 3(\tau_{II}^2 + \tau_{\perp}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \tag{6.28}$$

$$\sigma_1 \leq \frac{f_u}{\gamma_{M2}} \tag{6.29}$$

A korrekciós tényező értékeit különböző anyagminőségek esetén a 6.4 táblázat tartalmazza.

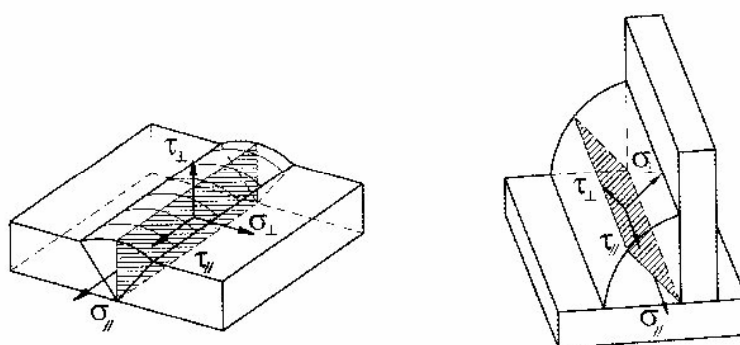
| Anyagminőség | β_w értéke |
|--------------|------------------|
| S 235 | 0,80 |
| S 275 | 0,85 |
| S 355 | 0,90 |
| S 420 | 1,00 |
| S 460 | 1,00 |

Az egyes feszültség komponensek értelmezését a 6.9. ábra mutatja. A feszültség komponensek az alábbiak:

- merőleges normálfeszültség,
- párhuzamos normálfeszültség (az összegzésnél elhanyagoljuk),
- párhuzamos nyírófeszültség,
- merőleges nyírófeszültség.

Feszültségkomponensek meghatározását - általában - a szilárdságtan módszereinek segítségével végezzük el.

6.4. táblázat: β_w korrekciós tényező



6.9. ábra: Varrat feszültségkomponensei

Egyszerűsített eljárás

Az egyszerűsített eljárás a biztonság javára közelítő módszer. Ennél az eljárásnál nem teszünk különbséget abban a vonatkozásban, hogy a varrat tengely és a varrat szakaszra ható erő milyen szöget zár be egymással.

Kizárólag nyíró, vagy normál erővel terhelt kapcsolat esetén az ellenőrzést az egységnyi varrathosszra eső igénybevétel meghatározásával végezzük.

$$F_{w,Ed} = \frac{F_{Ed}}{\sum l_i} \tag{6.30}$$

ahol: F_{Ed} a kapcsolatra ható erő,
 l_i a kapcsolatban lévő varratszakaszok hossza (függetlenül az erő és a varrat irányától).

Excentrikus igénybevétel esetén (amikor nyomaték is hat a kapcsolatra) az adott varrat pontra (1 cm hosszú szakaszra) ható erők eredőjét kell meghatározni.

Az egységnyi hosszúságú varrat szakasz ellenállása:

$$F_{w,Rd} = \frac{f_u a}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}} \tag{6.31}$$

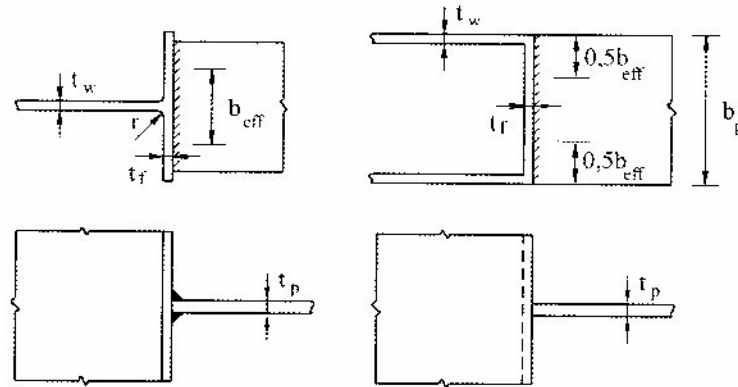
A képletben szereplő, anyagminőségtől függő korrekciós tényező értékét a 6.5 táblázat tartalmazza.

A kapcsolat megfelel, amennyiben:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \tag{6.32}$$

6.3.3.4 Merevítlen övhöz való kapcsolat teherbírása - erőbevezetés

Amennyiben egy I, H, vagy zárt szelvény övéhez kapcsolunk a szelvényre merőleges hegesztéssel egy másik elemet (pl. lemezt) az övnek csak a gerinc melletti szakaszait szabad figyelembe venni a hasznos varrathossz (b_{eff}) meghatározásánál. (lásd 6.10. ábra)



6.10. ábra: Hasznos varrathosszak

Ha a szelvény és a kapcsolt elem anyagminősége azonos, H és I szelvény esetén a hasznos varrathossz az alábbi:

$$b_{eff} = t_w + 2r + 7kt_f \quad (6.33)$$

ahol: $k = \frac{t_f}{t_p}$ de $k \leq 1,0$.

A méretek értelmezését a 6.10. ábra mutatja.

Zártszelvény esetén:

$$b_{eff} = 2 \cdot t_w + 5kt_f \quad (6.34)$$

A hasznos varrathossz értékére vonatkozóan az alábbi feltételnek is teljesülnie kell:

$$b_{eff} \geq \frac{f_{y,p}}{f_{u,p}} b \quad (6.35)$$

Amennyiben a feltétel nem teljesül a kapcsolatot merevíteni kell.

7. Használhatósági határállapotok

7.1. Bevezetés

A tartószerkezetnek, vagy szerkezeti elemeknek a szokásos használati körülmények közötti működésével, az emberek komfortérzetével, és az építmény külső megjelenésével kapcsolatos követelmények teljesülését a használhatósági határállapotokban vizsgáljuk. Az EC0 megkülönbözteti a reverzibilis és az irreverzibilis használhatósági határállapotokat. Az első esetben a határállapotot okozó hatás megszűnésével annak következménye is megszűnik, tehát például a lehajlások maradéktalanul rugalmasak – míg a második esetben a következmények, például maradványok a lehajlások vagy azok egy része megmaradnak. A használhatósági határállapotok igazolását a következő követelmények alapján kell elvégezni:

- a) alakváltozások, melyek kedvezőtlenül befolyásolják
- a külső megjelenést,
 - a felhasználók komfortérzetét, vagy
 - a tartószerkezet működését (beleértve a gépek és az épületgépesítési eszközök működőképességét is).

vagy károsodást okoznak a burkolatokban és a nem tartószerkezeti elemekben;

- b) rezgések, melyek
- az emberek számára kellemetlenek,
 - korlátozzák vagy lehetetlenné teszik a tartószerkezet működőképességét.

7.2. Használhatósági követelmények

Épületek használhatósági határállapotainak vizsgálatakor pl. a födémek merevségére, a födém és/vagy az épület kilengésére vonatkozó követelményeket kell figyelembe venni. A merevségi követelmények a függőleges lehajlásra és a rezgésre vonatkozó korlátozásokkal, míg a kilengési követelmények a vízszintes eltolódásra vonatkozó korlátozásokkal adhatók meg.

Az EC3 nem ad számszerűsített határértékeket a használhatósági követelményekre vonatkozóan, hanem csak annyit ír elő, hogy azokat építményenként, a megbízó egyetértésével kell meghatározni. Az EC0 Nemzeti Mellékletében a lehajlásokra és a rezgésekre van néhány korlátozó előírás, ezeket a továbbiakban ismertetjük. Pontosabb meghatározás hiányában, a tervezők munkájának segítésére megadjuk azokat a határértékeket is, amelyek az MSZ ENV 1993-1-1:1995 vonatkozó előírásaiént szerepeltek.

Megjegyzés: az EC3 Nemzeti Mellékletében előírhatók használhatósági követelmények, amelyeket az alakváltozásokra és a rezgésekre az előírt használat jellegétől függően kell megfogalmazni. Amennyiben a jövőben ilyen előírások megjelennek, azok feltűrik a határértékekre a következőkben megfogalmazott ajánlásokat.

7.2.1. Függőleges alakváltozások

A függőleges és vízszintes alakváltozásokat a 2. fejezetben felsorolt teherkombinációk közül a későbbiekben megadott kombináció alkalmazásával, és a megfogalmazott használhatósági követelmények figyelembevételével kell kiszámítani. A reverzibilis és az irreverzibilis határállapotokat meg kell különböztetni.

A függőleges lehajlások értelmezését a 7.1. ábra mutatja, ahol:



7.1. ábra: Függőleges lehajlások értelmezése

- w_c a terheletlen tartószerkezet túlemelése;
- w_1 a lehajlás kezdeti része az állandó terhek hatására közvetlenül a terhelés után;
- w_2 az esetleges terhek hatására létrejövő többlet-lehajlás a vonatkozó teherkombináció alapján;
- w_{tot} teljes lehajlás, azaz a w_1 és w_2 lehajlások összege;
- w_{max} a túlemelés figyelembevételével meghatározott teljes lehajlás.

Ha a vizsgálat célja a tartószerkezet működőképességének megőrzése, vagy a tartószerkezet, a burkolatok és a nem tartószerkezeti elemek (pl. válaszfalak, héjazatok) károsodásának megelőzése, akkor a lehajlás igazolása során a szóban forgó szerkezeti, vagy burkolati elem kivételével követően fellépő állandó és esetleges hatások következményeit kell figyelembe venni.

Az EC0 szerint a tartószerkezet megjelenésével kapcsolatos vizsgálatok esetén a kvázi-állandó kombinációt kell alkalmazni.

Az EC0 Nemzeti Mellékletében szereplő előírások szerint a lehajló szerkezeti elemek zavaró hatású látványának elkerülése érdekében a kvázi-állandó teher szinten bekövetkező w_{max} lehajlás nem lehet nagyobb a 7.1. táblázatban megadott értékeknél, ahol L a támaszköz. Az L/w_{max} arány helyettesíthető a nyomatéki nullpontok L_0 távolságának és a nullpontokat összekötő vonalaktól mért w_0 lehajlásnak az arányával. Konzoloknál $L = 2L_K$ értéket kell alkalmazni; w_{max} számításánál a támasz feletti elfordulás hatásait is figyelembe kell venni.

| A szerkezet kialakítása | Igényszint | | |
|--------------------------------------|---------------------|----------------|-----------------------------|
| | még nem érzékelhető | még nem zavaró | még nem kelt veszélyeztetet |
| Síma felület (pl. síklemez födém) | L/250 | L/200 | L/150 |
| Látható egyenes bordák, lehajló élek | L/300 | L/250 | L/200 |

7.1. táblázat: Alakváltozási követelmények a lehajlás okozta zavaró látvány megelőzése érdekében (az EC0 Nemzeti Melléklete szerint)

A szerkezeti elemek alakváltozása ne károsítsa a csatlakozó nem-teherhordó elemeket.

Gépi berendezések (daruk, targoncák) esetében az azokat alátámasztó szerkezetek (darupálya-tartók, födémek) alakváltozásának korlátozásánál a gyártó előírásait kell figyelembe venni. Ennek hiányában a darupálya lehajlása a ritka kombináció hatására $w_{max} \leq L/600$ és $w_{max} \leq 25$ mm legyen. A két darusín vízszintes elmozdulása egymáshoz képest ne legyen nagyobb 10 mm-nél.

Az MSZ ENV 1993-1-1:1995-ben épületekre ajánlott függőleges alakváltozási határértékek a 7.2. táblázatban a szerepelnek, ahol L a tartó támaszköze, konzoltartó esetén L a konzol hosszának kétszerese. Az itt megadott határértékek használatához a karakterisztikus teherkombinációval kell a lehajlásokat meghatározni.

| Feltételek | Határértékek | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------|
| | w_{max} | w_2 |
| Csak fenntartás céljából járt tetők (nem járható tetők) | L/200 | L/250 |
| Járható tetők | L/250 | L/300 |
| Födémek általában | L/250 | L/300 |
| Födémek és tetők, amelyek vakolatot vagy más rideg burkolatot vagy merev válaszfalakat hordoznak | L/250 | L/350 |
| Oszlopokat megtámasztó födémek (amennyiben a lehajlások hatását a teherbírási határállapotban végzett globális vizsgálatban nem vettük tekintetbe) | L/400 | L/500 |

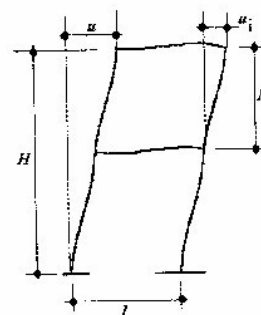
7.2. táblázat: Függőleges alakváltozások ajánlott határértékei az MSZ ENV 1993-1-1:1995 szerint

7.2.2. Vízszintes eltolódások

A vízszintes eltolódások értelmezését a 7.2. ábra mutatja, ahol:

- u a H magasságú épület mentén fellépő teljes vízszintes eltolódás;
- u_i egy H_i magasságú szint mentén fellépő vízszintes eltolódás.

Sem az EC0 sem az EC3 nem ad határértékeket a vízszintes alakváltozásokra. Az MSZ ENV 1993-1-1:1995-ben épületekre ajánlott vízszintes eltolódási határértékek a 7.3. táblázatban a szerepelnek – az eltolódásokat ekkor a karakterisztikus teherkombinációból kell számítani.



7.2. ábra: Vízszintes eltolódások értelmezése

| Feltételek | Határértékek |
|--------------------------------------------|------------------|
| Daru nélküli portálkeretek | $u \leq H/150$ |
| Egyéb egyszintes épületek | $u \leq H/300$ |
| Többszintes épületben az egyes szintekre | $u_i \leq H/300$ |
| Többszintes épületben a szerkezet egészére | $u \leq H/500$ |

7.3. táblázat: Vízszintes eltolódások ajánlott határértékei az MSZ ENV 1993-1-1:1995 szerint

7.2.3. Rezgések

Annak érdekében, hogy egy rezgéseknek kitett tartószerkezet, vagy szerkezeti elem a használhatósági határállapotban megfelelő legyen, önrezgésszámát egy előírt érték felett kell tartani. Ez a megkívánt érték függ az épület funkciójától és a rezgés forrásától, és ezt a megbízó és/vagy az illetékes hatóság egyetértésével kell megállapítani. Lehetséges rezgésforrásként a gyaloglást, az emberek összehangolt ritmus szerinti mozgását, a gépek és az általaj mozgásait, a forgalom okozta gerjesztett rezgéseket és a szélhatásokat kell figyelembe venni. Ezeknek, és más hatásoknak a figyelembevételét építményenként, a megbízó egyetértésével kell előírni.

Az EC0 Nemzeti Melléklete szerint a személyek mozgása okozta rezonancia elkerülése érdekében a födémek sajátfrekvenciája vasbeton szerkezetű középületeknél és irodaházaknál ne legyen kisebb 3 Hz-nél, tánc- és tornatermeknél, valamint könnyűszerkezetes (fém- vagy faszervezetű) épületeknél 5 Hz-nél. Az f_0 sajátfrekvencia közelítően meghatározható a (7.1) kifejezéssel:

$$f_0 \approx \frac{5}{\sqrt{w_{qp}}} \quad (7.1)$$

ahol w_{qp} a rezgésamplitúdó irányában működő kvázi-állandó teher okozta alakváltozás cm-ben.

Ha a tartószerkezet sajátfrekvenciája az előírt érték alattinak bizonyul, akkor a tartószerkezet dinamikai válaszanak a csillapítás figyelembevételével történő részletes vizsgálatára van szükség.

8. Acélszerkezetek méretezési eljárásai

Az áttekinthetőség kedvéért, egyszerű táblázatokba foglaltuk az EC3 tartalma szerint összeállított, méretezésre vonatkozó eljárásokat.

Általános folyamatábrát mutat a 8.1. táblázat.

A folyamatábra tartalmára vonatkozó, értelmező, megjegyzések:

1. Az első feltétel arra vonatkozik, hogy a teljes szerkezet számításánál figyelembe kell-e venni a globális imperfekciókat. A második pedig arra, hogy a lokális (elem) imperfekciókat figyelembe kell-e venni a teljes szerkezet számításánál.
2. Az imperfekciók figyelembe vétele során:
 - a. csak térbeli (3D) analízis elvégzésére alkalmas eljárás esetén végezhető el,
 - b. síkbeli (2D) analízis esetén, az elemek imperfekcióinak figyelembe vételével, vagy a nélkül végezhető el.
3. A b. eljáráson belül két lehetőség van:
 - a keret síkjában értelmezett lokális (elem) imperfekciók figyelembe vétele, a keret síkjára merőleges imperfekciók nem,
 - valamennyi lokális (elem) imperfekciót figyelmen kívül hagyása.
4. Ilyben a fázisban célszerű az előtervezés során, becsléssel felvett szelvényeket ellenőrizni és amennyiben szükséges módosítani. (Ez – általában – lényegtelen mértékben befolyásolja a terheket.) Ezután lehet a szelvények osztályba sorolását elvégezni, az előszámítás eredményeül kapott igénybevételek számításba vételével.
5. A használhatósági határállapot ellenőrzését az erre az esetre előírt teherkombinációk figyelembe vételével kell végrehajtani.
6. A karcsúság számításánál elsőrendű eljárás esetén az elemek kihajlási hosszát, másodrendű eljárás esetén a hálózati hosszát kell figyelembe venni.
7. Amennyiben az ellenőrzések során negatív eredmény adódik, az eljárást módosított adatokkal meg kell ismételni.

A tervezési gyakorlatban – az esetek nagyobb részében – prekoncepció érvényesül. A tervező előre eldönti, hogy milyen eljárást fog alkalmazni. Ez attól függ, hogy:

- milyen az alkalmazott szerkezet rendszere, kialakítása,
- milyen a tervező felkészültsége, gyakorlata,
- milyen eszközök (pl. szoftver) áll rendelkezésére.

A fentiek alapján nem szükséges (és nem célszerű) az általános eljárás szerinti folyamatot végig vezetni. A konkrét esetre vonatkozó (szűkített) eljárást kell elvégezni. Erre vonatkozó példákat mutatunk be a következőkben. A felhasználás elősegítésére a táblázatok tartalmazzák a lehetséges alkalmazási területeket és utalnak az alkalmazás feltételeire is.

8.2. táblázat: Egyszerű szerkezetek méretezése elsőrendű, rugalmas elmélet alapján. (A teljes szerkezet stabilitás vizsgálata az alkotó elemek stabilitás vizsgálatával történik.)

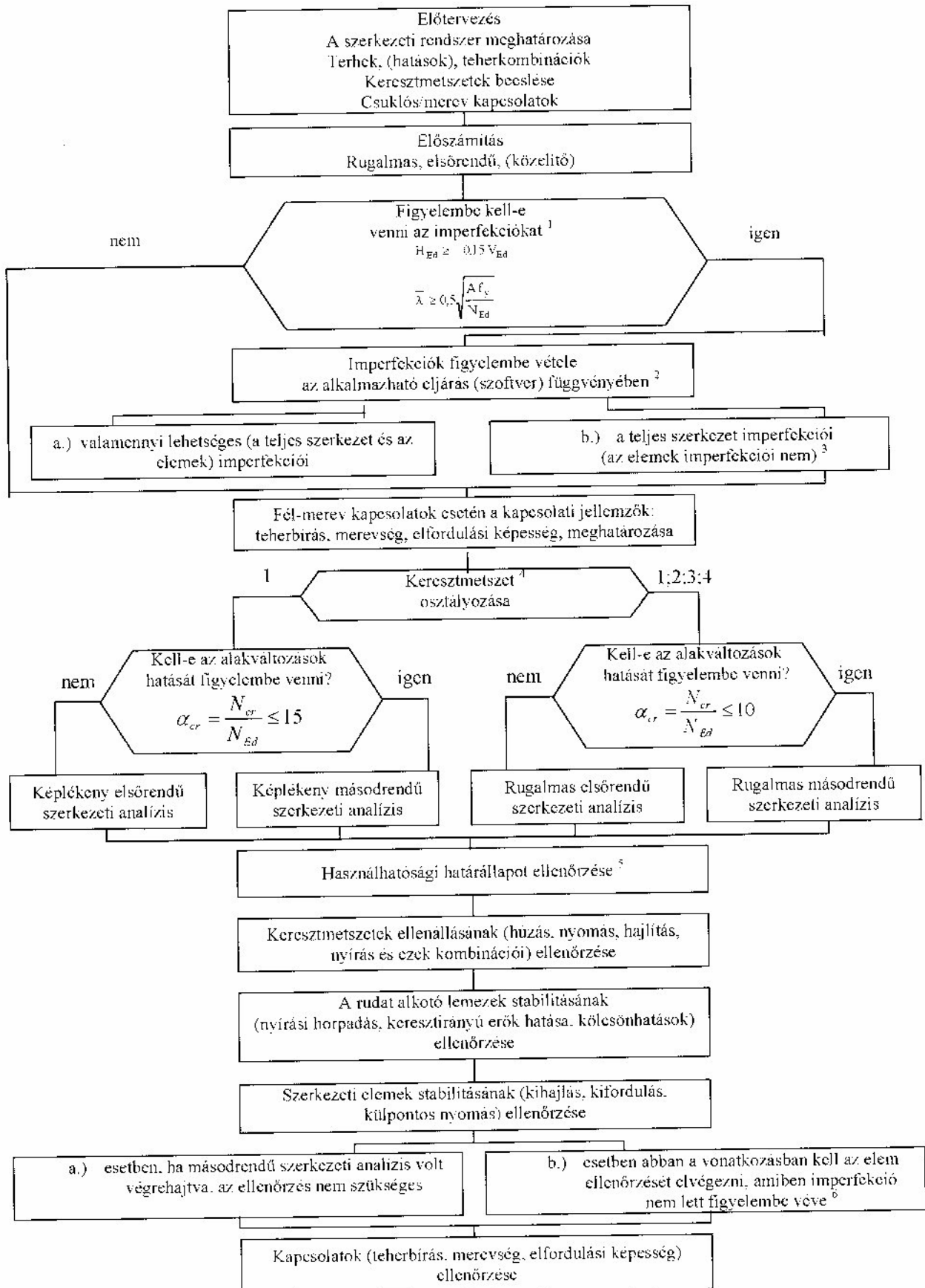
8.3. táblázat: Merevített szerkezetek méretezése elsőrendű, rugalmas elmélet alapján, fél-merev kapcsolatok figyelembe vételével. (A teljes szerkezet stabilitás vizsgálata az alkotó elemek stabilitás vizsgálatával történik.)

8.4. táblázat: Egyszerű szerkezetek méretezése képlékeny (elsőrendű) elmélet alapján. (A teljes szerkezet stabilitás vizsgálata az alkotó elemek stabilitás vizsgálatával történik.)

8.5. táblázat: Keretek méretezése másodrendű elmélet alapján, a szerkezeti analízis során csak a teljes szerkezet imperfekcióinak figyelembe vételével. (A szerkezeti elemek lokális imperfekciói az elemek stabilitás ellenőrzésénél kerülnek figyelembe vételre.)

8.6. táblázat: Keretek méretezése másodrendű elmélet alapján, a szerkezeti analízis során minden lehetséges imperfekciót figyelembe véve. (Az elemek stabilitás ellenőrzését nem kell elvégezni.)

8.1. táblázat



| Egyszerű szerkezetek méretezése elsőrendű, rugalmas elmélet alapján | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| A teljes szerkezet stabilitás vizsgálata az alkotó rúdlemek stabilitás vizsgálatával történik | | | | |
| Alkalmazási területek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Statikailag határozott húzott, vagy nyomott elemek • Gerendatartók • Rácsostartók • Aláfeszített-, függesztett-, háromsuklós tartók • Egyszerű (max. két szintes) keretek, amelyeknél a vízszintes elmozdulás hatása elhanyagolható (ld.: feltételek). | | | | |
| Feltételek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Rugalmas eljárás minden esetben (bármilyen keresztmetszeti osztályba tartozó szelvény esetén alkalmazható) • Első rendű eljárás alkalmazható, ha: $\alpha_{cr} = \frac{N_{cr}}{N_{Ed}} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) > 10 \quad (\text{ld.: 4.4.2})$ | | | | |
| Sorsz. | Művelet | Ref. | Megjegyzés | |
| E L Ő T E R V E Z É S | 1. | A szerkezeti rendszer meghatározása | Hálózat előállítás | |
| | 2. | Terhek, (hatások), teherkombinációk | Teherkombinációk meghatározásánál a szuperpozíció elve érvényesíthető | |
| | 3. | Keresztmetszetek felvétele | Az igénybevételek becslése alapján | |
| | 4. | Kapcsolatok felvétele | 4.8 Csuklós – merev kapcsolatok | |
| R É S Z L E T E S T E R V E Z É S | 5. | Rugalmas elsőrendű szerkezeti analízis (igénybevételek meghatározása) | Az igénybevételek meghatározásánál a szuperpozíció elve érvényesíthető | |
| | 6. | Használhatósági határállapot ellenőrzése | 7 A használhatósági határállapotra vonatkozó teherkombinációkkal Az elmozdulások ismeretében a feltétel ellenőrizhető | |
| | 7. | Keresztmetszet osztályozása | 4.2 | |
| | 8. | Keresztmetszetek ellenállásának ellenőrzése | 5.2 | Húzás, nyomás, hajlítás, nyírás és ezek kombinációi |
| | 9. | Szerkezeti elemek stabilitásának ellenőrzése | 5.3 | Kihajlás, kifordulás, külpontos nyomás Karcsúság számításánál: kihajlási hossz. |
| | 10. | A rudakat alkotó lemezek stabilitásának ellenőrzése | 5.4 | Nyírási horpadás, keresztirányú crök hatása, kölcsönhatások |
| | 11. | Kapcsolatok ellenőrzése | 6 | A teherbírás vizsgálata |
| A 6., 8., 9. és 10. műveleteknél, amennyiben a feltétel nem teljesül a szelvények módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |
| A 11. műveletnél, amennyiben a feltétel nem teljesül a kapcsolatok módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |

| Merevített keretek méretezése elsőrendű, rugalmas elmélet alapján. fél-merev kapcsolatok figyelembe vételével. A teljes szerkezet stabilitás vizsgálata az alkotó elemek stabilitás vizsgálatával történik | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Alkalmazási területek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Merevített keretek, amelyeknél a vízszintes elmozdulás hatása elhanyagolható (ld.: feltételek). | | | | |
| Feltételek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Rugalmas eljárás minden esetben (bármilyen keresztmetszeti osztályba tartozó szelvény esetén alkalmazható Elsőrendű eljárás alkalmazható, ha: $\alpha_{cr} = \frac{N_{cr}}{N_{Ed}} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) > 10 \quad (\text{ld.: 4.4.2})$ | | | | |
| Sorsz. | Művelet | Ref. | Megjegyzés | |
| E L Ő T E R V E Z É S | 1. | A szerkezeti rendszer meghatározása | Hálózat előállítás | |
| | 2. | Terhek, (hatások), teherkombinációk | Teherkombinációk meghatározásánál a szuperpozíció elve érvényesíthető | |
| | 3. | Keresztmetszetek felvétele | Az igénybevételek becslése alapján | |
| | 4. | Kapcsolatok felvétele: csuklós, merev, fél-merev | 4.8 Fél-merev kapcsolatoknál a kapcsolati jellemzők: teherbírás, merevség, elfordulási képesség meghatározása | |
| R É S Z L E T E S T E R V E Z É S | 5. | Rugalmas elsőrendű szerkezeti analízis (igénybevételek meghatározása) | Az alkalmazott eljárás legyen képes a kapcsolatokon létrejövő elfordulások számításba vételére | |
| | 6. | Használhatósági határállapot ellenőrzése | 7 A használhatósági határállapotra vonatkozó teherkombinációkkal Az elmozdulások ismeretében a feltétel ellenőrizhető | |
| | 7. | Keresztmetszet osztályozása | 4.2 | |
| | 8. | Keresztmetszetek ellenállásának ellenőrzése | 5.2 | Húzás, nyomás, hajlítás, nyírás és ezek kombinációi |
| | 9. | Szerkezeti elemek stabilitásának ellenőrzése | 5.3 | Kihajlás, kifordulás, külpontos nyomás Karcúság számításánál: kihajlási hossz |
| | 10. | A rudakat alkotó lemezek stabilitásának ellenőrzése | 5.4 | Nyírási horpadás, keresztirányú crók hatása, kölcsönhatások |
| | 11. | Kapcsolatok ellenőrzése | 6 | Teherbírás, merevség, elfordulási képesség |
| A 6., 8., 9. és 10. műveleteknél, amennyiben a feltétel nem teljesül a szelvények, vagy a kapcsolat kialakításának módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |
| A 11. műveletnél, amennyiben a feltétel nem teljesül a kapcsolatok módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |

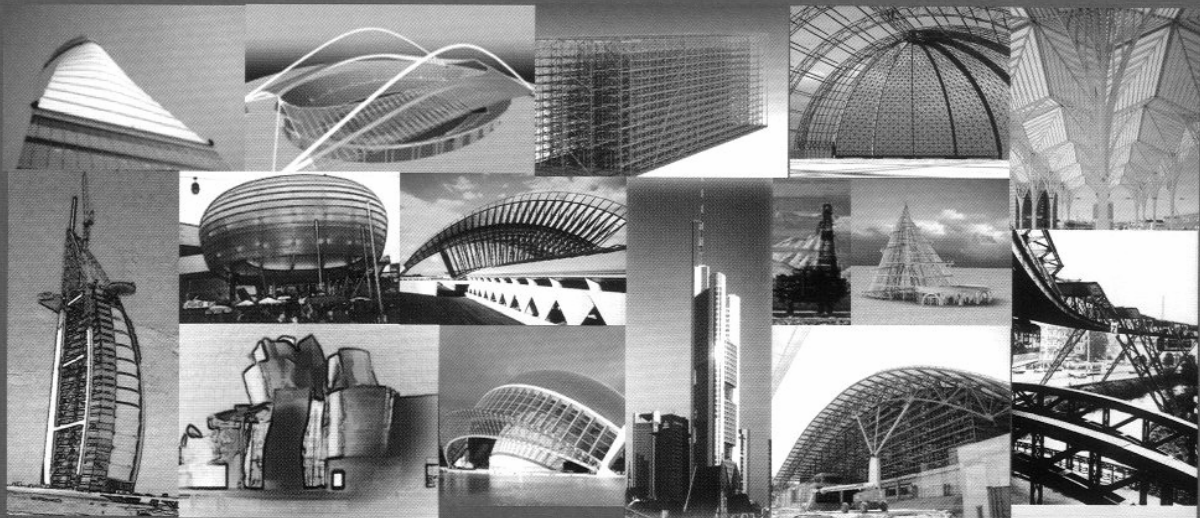
| Egyszerű szerkezetek méretezése képlékeny (elsőrendű) elmélet alapján | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| A teljes szerkezet stabilitás vizsgálata az alkotó elemek stabilitás vizsgálatával történik | | | | |
| Alkalmazási területek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Statikailag határozatlan gerendatartók • Egyszerű (max. két szintes) keretek, amelyeknél a vízszintes elmozdulás hatása elhanyagolható (ld.: feltételek). | | | | |
| Feltételek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> • Képlékeny eljárás kizárólag abban az esetben alkalmazható, ha az alkotó rudak szelvénye az 1. keresztmetszeti osztályba tartozik és a 4.3.2 részben leírt feltételek fennállnak • Első rendű (képlékeny) eljárás alkalmazható, ha: $\alpha_{cr} = \frac{N_{cr}}{N_{Ed}} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right) > 15 \quad (\text{ld.: 4.4.2})$ | | | | |
| Sorsz. | Művelet | Ref. | Megjegyzés | |
| E L Ő T E R V E Z É S | 1. | | Hálózat előállítás | |
| | 2. | | Teherkombinációk meghatározásánál a szuperpozíció elve nem érvényesíthető | |
| | 3. | | Az igénybevételek becslése alapján | |
| | 4. | 4.8 | Csuklós – merev kapcsolatok | |
| | 5. | | Rugalmas elsőrendű (esetleg közelítő) | |
| R É S Z L E T E S | 6. | 4.2 | A képlékeny csuklót tartalmazó rudak legyenek 1. keresztmetszeti osztályúak | |
| | 7. | | A teherkombinációkat külön – külön kell kiszámítani | |
| | 8. | 7 | A használhatósági határállapot ellenőrzése Az elmozdulások ismeretében a feltétel ellenőrizhető | |
| T E R V E Z É S | 9. | 5.2 | Húzás, nyomás, hajlítás, nyírás és ezek kombinációi | |
| | 10. | 5.3 | Kihajlás, kifordulás, külpontos nyomás Karcsúság számításánál: kihajlási hossz | |
| | 11. | 5.4 | Nyírási horpadás, keresztirányú erők hatása, kölcsönhatások | |
| | 12. | 6 | A képlékeny csukló közelében lévő kapcsolatok teherbírása legyen 20 %-kal magasabb a képlékeny ellenállásnál | |
| A 9., 10. és 11. műveleteknél, amennyiben a feltétel nem teljesül a szelvények módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |
| A 12. műveletnél, amennyiben a feltétel nem teljesül a kapcsolatok módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |

| Keretek méretezése másodrendű elmélet alapján | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stabilitásvizsgálat a szerkezeti analízis során csak a teljes keret imperfekcióinak figyelembe vételével | | | | |
| Alkalmazási területek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Bármilyen szerkezet (de elsősorban) keretek esetén | | | | |
| Feltételek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Előzetes feltétel nincs | | | | |
| Sorsz. | Művelet | Ref. | Megjegyzés | |
| E L Ő T E R V E Z É S | 1. | A szerkezeti rendszer meghatározása | Hálózat előállítása | |
| | 2. | Terhek, (hatások), teherkombinációk | Teherkombinációk meghatározásánál a szuperpozíció elve nem érvényesíthető | |
| | 3. | Keresztmetszetek felvétele | Az igénybevételek becslése alapján | |
| | 4. | Kapcsolatok felvétele: csuklós, merev, fél-merev | 4.8 | Fél-merev kapcsolatok esetén a kapcsolati jellemzők: teherbírás, merevség, elfordulási képesség, meghatározása |
| | 5. | Előszámítás | | Rugalmas, elsőrendű (esetleg közelitő) |
| | 6. | Imperfekciók figyelembe vétele | 4.6.2 | A teljes keretre vonatkozó imperfekciók, nem kell figyelembe venni ha: $H_{Ed} \geq 0.15V_{Ed}$ |
| R É S Z L E T E S | 7. | Keresztmetszetek osztályba sorolása | 4.2 | Az előszámítás alapján |
| | 8. | Másodrendű szerkezeti analízis * (igénybevételek meghatározása) | | Általában rugalmas, amennyiben megfelelő szoftver áll rendelkezésre és a feltételek teljesíthetők, köplékeny A teherkombinációkat külön – külön kell kiszámítani |
| | 9. | Használhatósági határállapot ellenőrzése | 7 | A használhatósági határállapotra vonatkozó teherkombinációkkal |
| | 10. | Keresztmetszetek ellenállásának ellenőrzése | 5.2 | Húzás, nyomás, hajlítás, nyírás és ezek kombinációi |
| | 11. | Szerkezeti elemek stabilitásának ellenőrzése | 5.3 | Kihajlás, kifordulás, külpontos nyomás azokra az esetekre kell elvégezni, amelyekkel kapcsolatos imperfekciókat a 6. résznél nem vettük figyelembe Karcsúság számításánál: hálózati hossz * |
| | 12. | A rudakat alkotó lemezek stabilitásának ellenőrzése | 5.4 | Nyírási horpadás, keresztirányú erők hatása, kölcsönhatások |
| | 13. | Kapcsolatok ellenőrzése | 6 | Minden esetben: a teherbírás, fél-merev kapcsolatok esetén: merevség, elfordulási képesség |
| A 9., 10., 11. és 12. műveleteknél, amennyiben a feltétel nem teljesül a szelvények módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |
| A 13. műveletnél, amennyiben a feltétel nem teljesül a kapcsolatok módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |
| * Az 5.4.1.1 szakasz szerint lehet lineáris analízist végezni, de ebben az esetben a kihajlási hosszat az ekvivalens Euler-rúd hosszaként kell meghatározni. | | | | |

| Keretek méretezése másodrendű elmélet alapján | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stabilitásvizsgálat a szerkezeti analízis során, minden lehetséges imperfekciót figyelembe véve | | | | |
| Alkalmazási területek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Bármilyen szerkezet (de elsősorban keretek) esetén | | | | |
| Feltételek: | | | | |
| <ul style="list-style-type: none"> Előzetes feltétel a megfelelő számítási eljárás (szoftver) rendelkezésre állása | | | | |
| Sorsz. | Művelet | Ref. | Megjegyzés | |
| E L Ő T E R V E Z É S | 1. | A szerkezeti rendszer meghatározása | Hálózat előállítása | |
| | 2. | Terhek, (hatások), teherkombinációk | Teherkombinációk meghatározásánál a szuperpozíció elve nem érvényesíthető | |
| | 3. | Keresztmetszetek felvétele | Az igénybevételek becslése alapján | |
| | 4. | Kapcsolatok felvétele: csuklós, merev, fél-merev | 4.8 | Fél-merev kapcsolatok esetén a kapcsolati jellemzők: teherbírás, merevség, elfordulási képesség meghatározása |
| | 5. | Előszámítás | | Rugalmas, elsőrendű (esetleg közelítő) |
| | 6. | Minden lehetséges imperfekció figyelembe vétele | 4.6.2 | A teljes keretre vonatkozó imperfekciók, nem kell figyelembe venni ha: $H_{Ed} \geq 0,15V_{Ed}$ |
| R É S Z L E T E S T E R V E Z É S | 7. | Keresztmetszetek osztályba sorolása | 4.2 | Az előszámítás alapján |
| | 8. | Másodrendű globális erőtan számítás (Igénybevételek meghatározása) | | Általában rugalmas, amennyiben megfelelő szoftver áll rendelkezésre és a feltételek teljesíthetők, képlékeny A teherkombinációkat külön – külön kell kiszámítani |
| | 9. | Használhatósági határállapot ellenőrzése | 7 | A használhatósági határállapotra vonatkozó teherkombinációkkal |
| | 10. | Keresztmetszetek ellenállásának ellenőrzése | 5.2 | Húzás, nyomás, hajlítás, nyírás és ezek kombinációi |
| | 11. | Szerkezeti elemek stabilitásának ellenőrzése | 5.3 | A vizsgálatot nem kell elvégezni, tartalmazza a globális erőtan számítás |
| | 12. | A rudakat alkotó lemezek stabilitásának ellenőrzése | 5.4 | Nyírás horpadás, keresztirányú erők hatása, kölcsönhatások |
| | 13. | Kapcsolatok ellenőrzése | 6 | Minden esetben: a teherbírás, fél-merev kapcsolatok esetén: merevség, elfordulási képesség |
| A 9., 10. és 12. műveleteknél, amennyiben a feltétel nem teljesül a szelvények módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |
| A 13. műveletnél, amennyiben a feltétel nem teljesül a kapcsolatok módosítása után újra el kell végezni az eljárást. | | | | |

9. Irodalom

- [1] MSZ EN 1990:2005 A tartószerkezeti tervezés alapjai.
- [2] MSZ EN 1991-1-(1-6) Tartószerkezeteket érő hatások.
- [3] MSZ EN 1993-1-1 Acélszerkezetek tervezése: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok.
- [4] EN 1993-1-5 Acélszerkezetek tervezése: Lemezekből összeállított szerkezetek.
- [5] MSZ EN 1993-1-8 Acélszerkezetek tervezése: Csomópontok tervezése.
- [6] MSZ EN 1993-1-10 Acélszerkezetek tervezése: Az anyagok szívóssága és vastagságirányú jellemzői.
- [7] MSZ 15024/1-85 Építmények acélszerkezetének erőtani tervezése.
- [8] Deák Gy., Erdélyi T., Visnovitz Gy. (2006), „A tartószerkezeti tervezés alapjai; Tervezés az Eurocode alapján”, Springer Média Magyarország.
- [9] MSZ EN 10027-1 Acélok jelölési rendszere. 1. rész: Az acélminőségek jele
- [10] MSZ EN 10025-(1-5) Melegen hengerelt termékek szerkezeti acélokból
- [11] MSZ EN 10210-1 Melegen hengerelt, zárt idomacélok ötvözetlen és finom szemcsés acélból. 1. rész: Műszaki szállítási feltételek.
- [12] MSZ EN 10219-1 Hidegen alakított, hegesztett, szerkezeti zárt idomacélok ötvözetlen és finom szemcsés acélokból. 1. rész: Műszaki szállítási feltételek.
- [13] MSZ EN 10164 Felületükre merőleges irányban javított alakítási tulajdonságú acéltermékek. Műszaki szállítási feltételek.
- [14] Halász O., Iványi M. (2001) „Stabilitáselmélet”, Akadémia Kiadó, Budapest
- [15] Halász O., Platthy P. „Acélszerkezetek”, Tankönyvkiadó, Budapest
- [16] Csellár Ö., Szépe F. „Táblázatok acélszerkezetek méretezéséhez”, Tankönyvkiadó, Budapest
- [17] Petersen (1982) „Statik und stabilität der Baukonstruktionen”, Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden
- [18] Fernezelyi, S., Hegyi, D., Vigh, A. (2005) „Approximation for the critical moment for lateral-torsional buckling of rolled sections”, 4. Eurosteel Konferencia Kiadványa, Maastricht, Hollandia, Volume A, 1.4-151 – 14.4-158.
- [19] Greiner, R. (2001) „Background information on the beam-column interaction formulae at level 1”, ECCS jelentés, Paper No. TC8 - 2001
- [20] Ádány S., Dulácska E., Dunai L., Fernezelyi S., Horváth L. „Acélszerkezetek, 2. Speciális eljárások, Tervezés az Eurocode alapján, Springer Média Magyarország kiadó, 2007.



Mesteri acél- fa- és üvegszerkezetek **bocad**[®]

hidak, csarnokok, ipari és kiállítási létesítmények, különleges szerkezetek, lépcsők és korlátok, üvegfalak, felüvilágítók, üvegházak, télikertek - mindezt egy programmal

bocad Hungary Kft, 1096. Budapest, Mester u. 87. Fax: (06)-1-463 1660

www.bocad.com/home/hu

eArecon Architecture, Engineering and Construction
 Építészeti, szerkezetmérnöki és konstruktív szakmai portálja

ACÉLSZERKEZETEK újság
 Mérnökhallgatók oldala

- Eurocode tudásbázis
- Web-alapú tervezési segédlet
- ConSteel 4.0 letöltés

Mérnöktovábbképzés

www.earecon.com

ConSteel 4.0

Paraméterek
 Vastagság (mm) 200
 Referencia sík helyzete: középen Anyag: S185 Végeselem méret: 500

Automatikus ellenőrzés

Technikai információk
 Szabványos teherbírási

Szelvény (1)
 Név: CHE323.9x10
 Típus: Acél - szabványos

Lépcső: 250

Frisomat csarnokok

A belgiumi N. V. Frisomat céget 1978-ban alapították, standardizált elemekből készülő, egyszerűen tervezhető, gyorsan kivitelezhető, tipizált csarnokok gyártására és kivitelezésére. A Frisomat Kft. 1991. óta van jelen a magyar piacon.

Természetesen az acélszerkezet méretezését minden esetben a forgalmazó országban érvényben lévő szabványok szerint végzik el, a gyártás ezen méretezési eredmények betartásával történik. Az acélszerkezet, a burkolatok és a kötőelemek gyártásához felhasznált alapanyagok Európa legnevesebb gyártóitól érkeznek. (Voest-Alpine, Hoescht, Clecon, Wuppermann Austria, Cockerill Sambre stb.)

A teljes szerkezet előrefurattal érkezik a helyszínre, ahol kizárólag csavarozott kötésekkel alkalmaznak, elkerülve ezzel a tűzihorganyzást tönkretévő hegesztéseket.

A csarnokok alapfelszereltségének részei a tetőn beépített bevilágító sávok, melyek a csarnokban közel nappali fényt biztosítanak.

Csarnoktípusok

■ Omega

Legegyszerűbb és leggazdaságosabb, dongaszerkezetű csarnok, melyet ezen tulajdonságai miatt elsősorban mezőgazdasági termény- és géptároló, valamint egyszerű raktárak céljára építenek.

A teherhordó acélszerkezet idomacéllal erősített íves acélcsövekből készül, melyekre gombásodás és egyéb kártevők ellen impregnált, fából készülő vízszintes tető- és falvázszelemeket kerülnek.

A burkolat is az egyszerűség és gazdaságosság jegyében készül, általában egyrétegű, horganyzott, műanyagbevonatos acél hullámlemez, horganyzott szegekkel a fa szelemekhez rögzítve. Hőszigetelés nélküli kivitelben rendelhető.

Főbb felhasználási területek: Mezőgazdasági tárolóépületek, gabonátárolók, géptárolók, egyszerű raktárépületek, kisebb lovardák.

■ Ipszilón

Szintén kedvező árú csarnoktípus, mivel szerkezete ugyanaz a festett acél vázszerkezet és hullámlemez burkolat, mint az Omegáé. A különbség a két csarnok között, hogy az Ipszilónnak függőlegesek az oldalfalai és íves a teteje. A függőlegesek oldalfalakat a belső tér jobb kihasználását teszik lehetővé. Igény esetén hőszigetelt kivitelben is rendelhető.

Főbb felhasználási területek: Mezőgazdasági tárolóépületek, géptárolók, garázsok, kerti tárolók, egyszerű raktárépületek.

■ Delta

Modernebb, függőleges oldalfalú, nyeregvetésű kivitelű. A tetőlejtés kötött, 22 fokos.

A teherhordó acélszerkezet tűzihorganyzott C300-as profilokból készül, melyre gombásodás és egyéb kártevők ellen impregnált, fából készülő vízszintes tető- és falvázszelemeket kerülnek. A burkolat műanyagbevonatos acél hullámlemez, horganyzott szegekkel vagy önbefúrós csavarokkal a fa szelemekhez rögzítve. Igény esetén hőszigetelt kivitelben is rendelhető.

Főbb felhasználási területek: Mezőgazdasági tárolóépületek, gabonátárolók, géptárolók, egyszerű raktárépületek, egyszerű műhelyek, kisebb üzemcsarnokok.

■ Sigma

A csarnok homogén tartóvázszerkezete 22 méteres szélességet tesz lehetővé alátámasztás és mindenféle zavaró belógás, vonóvas nélkül.

A teherhordó acélszerkezet, eltérően a „hagyományos” acélszerkezetektől, könnyű, hidegen hengerelt, a görög szigma betűt formázó, teljes egészében tűzihorganyzott, S320 mm-es acél profilokból készül, melyekre szintén tűzihorganyzott C120 mm-es acél tető- és falvázszelemeket kerülnek.

A burkolat trapézprofilú, horganyzott, műanyagbevonatos acéllemezekből, illetve kiváló hőszigetelési képességű szendvicspanelekből készül.

Főbb felhasználási területek: Nagyobb légtérű raktárak, üzemcsarnokok, sportcsarnokok, tornatermek, bemutatótermek, autósza-lonok, kereskedelmi épületek, teniszcsarnokok.

■ Astra

Minden igényt kielégítő, professzionális csarnoktípus, akár 25 m-ig terjedő feszítéssel, nagy magasságokkal. A tervezés során figyelembe vették az alacsonyabb tetőlejtésre vonatkozó igényeket, így ez a típus kötött, 10 fokos hajlásszöggel készül.

A teherhordó acélszerkezet hidegen hengerelt acél profilokból készül.

A függőleges főtartó oszlopok a görög szigma betűt formázó, teljes egészében tűzihorganyzott profilokból készülnek. A tetőtartó rácsos szerkezetű, a rácsrudak hidegen hengerelt C160-as illetve C130-as, tűzihorganyzott acél profilokból készülnek. A tető és falvázszelemeket szintén tűzihorganyzott 2120 mm-es acél profilok.

A burkolat trapézprofilú, horganyzott, műanyagbevonatos acéllemezekből, illetve kiváló hőszigetelési képességű szendvicspanelekből készül.



| Omega | szélesség (m) | magasság (m) | hosszúság |
|-------|-------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| | 7,6; 8,6; 9,6; 10,6; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20 | 3,8; 4,8; 5,5; 6,5; 5,5; 7,5 | A főtartók tengelytávolságának (2,5 m) tetszőleges többszöröse |



| Delta | szélesség (m) | ereszmagasság (m) | hosszúság |
|-------|--------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------|
| | 7,5; 9,4; 11,2; 13,1; 15 | 2,5; 4,0 | A főtartók tengelytávolságának (2,5 m) tetszőleges többszöröse |



| Astra | szélesség (m) | ereszmagasság (m) | hosszúság |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------|
| | Főbb felhasználási területek: Nagyobb légtérű raktár-épületek, üzemcsarnokok, sportcsarnokok, tornatermek, lovardák, műhelyek, bemutatótermek, autósza-lonok, kereskedelmi épületek, teniszcsarnokok. | | |



| Ipszilón | szélesség (m) | magasság (m) | hosszúság |
|----------|--------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------|
| | 5,2; 7,7; 8,7; 9,7; 10,7 | 2,5; 3,7 | A főtartók tengelytávolságának (2,5 m) tetszőleges többszöröse |



| Sigma | szélesség (m) | ereszmagasság (m) | hosszúság |
|-------|-------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------|
| | 7; 8; 9; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 22 | 2,5; 3,5; 4,5 | A főtartók tengelytávolságának (4,0 m) tetszőleges többszöröse |



| Astra | szélesség (m) | ereszmagasság (m) | hosszúság |
|-------|------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|
| | 15; 17; 19; 21; 23; 25 | 4; 5; 6; 7 | A főtartók tengelytávolságának (4,0 m) tetszőleges többszöröse +1 m |

Frisomat Kft.

8611 Siófok, Csárdaréti út 5.

Telefon: (84) 323-333; Fax: (84) 322-652

e-mail: info@frisomat.hu

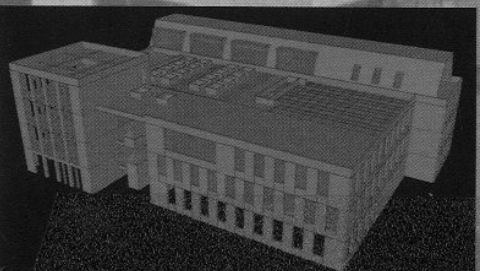
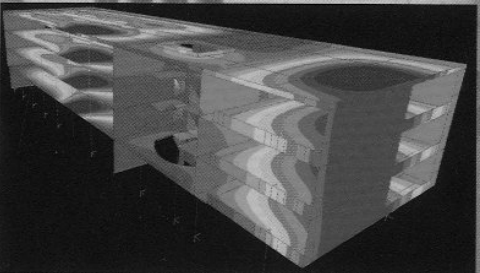
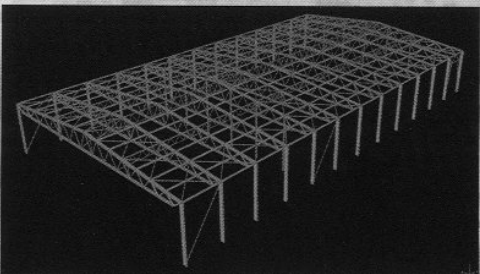
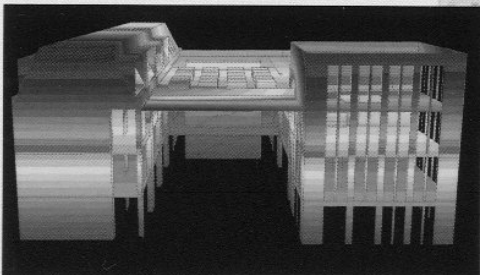
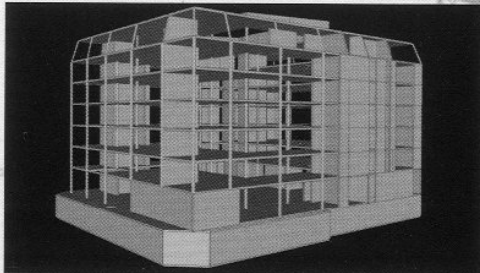
Internet: www.frisomat.hu

FRISOMAT®

AxisVM

Statikai számító és méretező programrendszer

www.axisvm.hu



- Teljeskörű megoldás az építőmérnöki feladatokhoz.
- Szerkezetmodellezés egyszerű keretektől komplex többszintes épületekig.
- Méretezési modulok EUROCODE és más európai szabványok szerint.
- Vasbeton gerendák, oszlopok, lemezek, falak vasalás-számítása.
- Acél rúdelemek szilárdsági és stabilitási ellenőrzése.
- Lineáris és nemlineáris statikai és rezgés számítások.
- Méretezési modulok MSz, Eurocode, DIN, SIA, NEN, STAS és DM szabványok szerint.

AZ AXISVM PROGRAMRENDSZERT TIZENHAT EURÓPAI ORSZÁGBAN TÖBB MINT KÉTEZER MÉRNÖKIRODA HASZNÁLJA A MINDENNAPI TERVEZÉSI FELADATAIHOZ.

KILENC ORSZÁGBAN 22 MŰSZAKI EGYETEMEN ÉS FŐISKOLÁN ALKALMAZZÁK AZ OKTATÁSBAN.

InterCAD Mérnöki Szoftverfejlesztő Kft.
1075 Bp., Károly krt. 9.
Tel/Fax: (1)-322-9072
Email: inform@axisvm.com

