



Budapesti Műszaki Egyetem
Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Varga Géza
egyetemi tanársegéd

Jegyzet
a
Magasépítési acélszerkezetek
c. tárgy gyakorlataihoz

Az első változat a TEMPUS S_JEP 12116-97 projekt támogatásával készült.
Projektvezető: dr. Iványi Miklós egyetemi tanár

1. Alapfogalmak és alapelvek

1.1 A parciális biztonsági tényező mértezési eljárás

Az Eurocode szabványsorozat valamennyi része, így az acélszerkezetekkel foglalkozó Eurocode 3 is, a *parciális biztonsági tényező* mértezési eljárásán alapul. A parciális tényező mértezési eljárás formailag megegyezik az MSZ 15024-ben is alkalmazott osztott biztonsági tényező mértezési eljárással, tehát egy ún. *félvalószínűségi* módszer (ezt a fogalmat korábbi tanulmányainkból már ismerjük, ld. pl. a Halász–Platthy-könyv 220. oldalán).

Hogy mégis más neve van, az elsősorban annak köszönhető, hogy az Eurocode 3 szabvány magyar nyelvű változatának elkészítéséért felelős bizottság úgy gondolta, hogy célszerű új fogalmat bevezetni annak kihangsúlyozására, hogy a módszer *csak* formailag egyezik az MSZ osztott biztonsági tényező módszerével, *tartalmilag* nem. Az MSZ elnevezése a maga mértezési eljárására egyébként rendkívül találó: az osztott biztonsági tényező eljárás tudniillik lényegében úgy jött létre, hogy a korábbi, egységes biztonsági tényező mértezési eljárás egységes biztonsági tényezőjét mintegy „felosztották”, azt a szempontot tartva elsősorban szem előtt, hogy mindazok a szerkezetek, amelyeket a régi (egységes biztonsági tényező) eljárással terveztek, az új (osztott biztonsági tényező) eljárással is megfeleljenek.

A parciális eljárást, illetőleg az eljárás lényegét alkotó szabályokat és szorzótényezőket ezzel szemben – minthogy gyakorlatilag előzmény nélküli, vagy ha tetszik, sokelőzményes szabványról van szó – ténylegesen „félvalószínűségi” alapon határozták meg, a rendelkezésre álló adatok alapos statisztikai értékelésével.

A parciális biztonsági tényező eljárás jellegzetességei (ezek majd mindegyike igaz az MSZ osztott biztonsági tényező eljárására is) a következők:

- az egyes ellenőrzések alkalmával mind a bal oldalon (azaz a „teheroldalon”), mind a jobb oldalon (azaz az „ellenállásoldalon”) találunk biztonsági tényezőket
- ezek a biztonsági tényezők aszerint, hogy milyen terhekről, illetőleg ellenállásról van szó, különböző értékeket vehetnek fel és egymással is kombinálódhatnak
- az ellenőrzések mindig ún. határállapotokban vannak értelmezve (aszerint, hogy mit tekintünk a szerkezet működőképessége határának), amelyeket különböző tervezési állapotokban (a szerkezet élettartamának különböző szakaszaiban) tekintünk
- a számításokban szereplő egyes mennyiségek valószínűségi változókként vannak definiálva, amelyeket eloszlásfüggvényük jellegzetes pontjai szerint különböző ún. reprezentatív értékek írnak le (más mennyiségek – általában, de nem mindig, a geometriai jellemzők – ezzel szemben névleges, vagyis a tervben előírt értékükkel szerepelnek)

A továbbiakban ebben a fejezetben részint avval foglalkozunk, hogy az előzőekben már részben említett fogalmakat pontosítsuk és szerepüket megmagyarázzuk, részben pedig avval, hogy a biztonsági koncepcióhoz közvetlenül kapcsolódó számítási-technikai kérdésekben (elsősorban a terhekkel kapcsolatos „manipulációkról”) tájékoztatást adjunk.

1.2 A biztonsági tényezők tartalma

Az erőtani tervezés során általában a valamilyen módon megtervezett tartón különböző ellenőrzéseket hajtunk végre. Az ellenőrzés mindig olyan jellegű, hogy egy mennyiségről ki kell mutatni, hogy nem halad meg egy másik mennyiséget. Az egyenlőtlenséget mindig így írjuk fel:

$$\text{bal oldal} \leq \text{jobb oldal}$$

vagy másképpen, tekintettel arra, hogy a bal oldal elsősorban (de persze nem kizárólag) a szerkezetre működő terhektől, míg a jobb oldal elsősorban (de megint csak nem kizárólag) a szerkezet sajátosságaitól függ:

$$\text{teheroldal} \leq \text{ellenállásoldal}$$

A Magyar Szabvány szerinti ellenőrzések során megszokhattuk, hogy a teheroldalon az esetek többségében általában valamilyen *mértékadó feszültséget* számolunk ki, és ezt valamilyen *határfeszültséghez* hasonlítjuk hozzá. Tehát mind az egyenlet jobb oldalán, mind pedig a bal oldalán feszültség jellegű mennyiség van.

Az Eurocode-ban ezzel szemben általában a bal oldalon valamiféle igénybevétel (normálerő, hajlítónyomaték stb.), a jobb oldalon pedig ezzel az igénybevétellel szembeni ellenállás szerepel (melynek dimenziója természetesen megegyezik a bal oldalon álló mennyiség dimenziójával).

A különbség látszólag csupán formai. Arról van szó, hogy azt a műveletet, amelynek során az igénybevételekből feszültségeket számolunk, az MSZ szerint a bal oldalon kell elvégezni, az Eurocode szerint pedig a jobb oldalon, mintegy „visszafelé”.

A látszólag formai különbség azonban rögtön tartalmivá válik, ha meggondoljuk, hogy minden művelet, amelyet az erőtanai számítás során végzünk, így természetesen a feszültségek számítása is, bizonytalanságokat rejt magában. Éppen ezeket a bizonytalanságokat tartalmazzák a biztonsági tényezők – ezek közül is elsősorban a következő ötöt:

1. a tehermodell bizonytalanságait, tehát azt a bizonytalanságot, amely abban rejlik, hogy hogyan vesszük fel a szerkezetre működő terheket
2. a globális analízis (más szóval a számítási modell) bizonytalanságait, tehát annak a modellnek a bizonytalanságait, amelynek alapján a terhekből igénybevételeket számítunk (megtámasztások modellezése, anyagmodell stb.)
3. a keresztmetszeti modell bizonytalanságai – annak bizonytalanságai, hogyan számolunk az igénybevételekből mértékadó feszültségeket
4. a törési modell bizonytalanságai, tehát annak a módszernek a bizonytalanságai, ahogyan az ismertnek feltételezett anyagjellemzőkből (elsősorban az anyag szilárdági jellemzőiből) meghatározzuk egy keresztmetszet ellenállását
5. az anyagjellemzőknek, elsősorban az anyag szilárdsági jellemzőinek (folyáshatár, szakítószilárdság) bizonytalanságai

Biztonsági tényezőt azonban alapvetően csak kétfélet alkalmazunk: egyiket a teheroldalon, a másikat pedig az ellenállásoldalon. Ebből logikusan következik, hogy a fent felsorolt ötféle bizonytalanságot e két tényezőbe kell sűríteni, ami azt jelenti, hogy várhatóan mindkettő többféle bizonytalanság eredőjét fogja tartalmazni.

A Magyar Szabványban, ahol tehát a bal oldalon mértékadó feszültségek, a jobb oldalon pedig határfeszültségek szerepelnek, a teheroldal biztonsági tényezője az 1., 2. és 3., az ellenállásoldalé pedig az 5. bizonytalanságot tartalmazza; ezzel szemben az Eurocode-ban, ahol a bal oldalon igénybevételek, a jobb oldalon pedig ezekkel azonos dimenziójú ellenállások szerepelnek, a teheroldal az 1. és 2., az ellenállásoldal pedig a 4. és 5. bizonytalanságokat foglalja magában. (Megjegyzendő, hogy a 3. és a 4. bizonytalanságot egyszerre nyilván nem kell figyelembe venni, hiszen lényegében ugyanarról van szó.)

Az előzőekből világos, hogy annak, hogy a teher- és ellenállásoldalon a két szabványban más-más jellegű mennyiség található, az a következménye, hogy az egyes biztonsági tényezők tartalma a két szabványban más és más. Egyéb más okok mellett ezért sem lehet azt mondani, hogy két, egyébként azonos szerepű biztonsági tényező (pl. az állandó teher biztonsági tényezője) közötti különbség a két szabvány által nyújtott nagyobb vagy kisebb biztonságra utalna.

1.3 Határállapotok

A parciális biztonsági tényező mértezési eljárás egyik fontos eleme, hogy a mértezéskor mindig különböző határállapotokat kell vizsgálni, és ezek mindegyikében ki kell mutatni a szerkezet megfelelését. Határállapotnak nevezünk minden olyan állapotot, amelyen túl a szerkezet nem alkalmas azoknak a terheknek a viselésére, amelyek az adott határállapothoz tartoznak.

A határállapot fogalmával és fajtáival korábbi tanulmányainkban már foglalkoztunk (részletesebben lásd a Halász–Platthy-könyv 234–252. oldalán). Csupán ismétlésképpen érdemes sorra venni az egyes határállapot-fajtákat és ezek egymáshoz való viszonyát:

Teherbírási határállapotok (thá)
Szilárdsági határállapotok
Első folyás
Korlátozatlan folyás
Korlátozott maradó alakváltozás
Beállítás (halmozódó maradó alakváltozás)
Képlékeny törés
Stabilitási határállapotok
Kihajlás
Kifordulás
Lemezhorpadás
Fáradási határállapot
Helyzeti állékonysági határállapotok
Felborulás, elcsúszás, felúszás
Rideg törési határállapot stb.
Használhatósági határállapotok (hhá)
Kapcsolódó nem tartószerkezeti elemek tönkremenetele
Lehajlások
Rezgések
(Beton repedésével kapcsolatos határállapotok)

Mint az előzőekből látható, a határállapotoknak alapvetően két típusa létezik: teherbírási és használhatósági határállapotok. A kettő között az a lényeges különbség, hogy az első a tartószerkezetnek valamiféle tönkremenetelével, a második pedig annak használatra való alkalmasságával (esztétikai, üzemi, emberi komfortérzettel kapcsolatos stb.) függ össze.

A kétféle határállapot-típusban elvégzett vizsgálatok általában különböző teherszintek mellett történnek, erről részletesen az 1.6. szakaszban lesz szó. Annyit azért előrebocsátunk, hogy az EC szerinti méretezésnél is igaz az a tétel, amit az MSZ kapcsán már megtanultunk, hogy a használhatósági határállapotokat egy alacsonyabb (tehát gyakrabban előforduló) teherszint mellett kell vizsgálni (a Magyar Szabványban ezt a két teherszintet a terhek alapértékével, illetőleg szélső értékével képzett kombinációk képezték).

Megjegyezzük, hogy ezen a felosztáson kívül a határállapotok másféle felosztása is elképzelhető. A földrengéssel foglalkozó korszerű szabványok (így az Eurocode 8 is) a két típus helyett hármat definiálnak: a teherbírási és a használhatósági határállapot mellett bevezetnek egy ún. károsodási határállapotot is, amelynek vizsgálatához olyan teherszintet kell felvenni, amely a használhatósági és a teherbírási határállapothoz tartozó teherszint között van. Földrengés esetén ez azt jelenti, hogy a gyakoribb, kis erősségű földrengésekre a károsodási, a kevésbé gyakori, közepes erősségű földrengésekre a károsodási, a nagy erősségű, ritkább földrengésekre a teherbírási határállapot túl nem lépését kell igazolni. Ebben a károsodási határállapotban megengedett a tartószerkezeti elemek oly mértékű károsodása, amely még nem okozza a tartószerkezet teljes egészének tönkremenetelét, illetőleg amely kevéssé veszélyes az épületben tartózkodók testi épsége szempontjából.

1.4 Az egyes mennyiségek reprezentatív értékei

Mint már az előzőekben láttuk, a számításainkban szereplő egyes mennyiségek legnagyobb része valószínűségi változó, ami azt jelenti, hogy nem egy meghatározott értékkel rendelkeznek, hanem viselkedésük valószínűségi sűrűségfüggvényekkel írható le. Különböző mennyiségek esetén ennek más-más oka van, például

- az anyagjellemzők értéke bizonytalan, és esetleg helyről helyre változhat azonos névleges érték mellett is (például az S235 anyagú, de különböző helyről származó elemek tényleges anyagjellemzői várhatóan különbözők lesznek)
- a terhek értéke a szerkezet élettartama során változik, és előre nem ismert, de még a lehetséges legkedvezőtlenebb értéküket sem lehet előre megmondani (különösen meteorológiai jellegű, az emberi tevékenységtől független terhek esetén).

Terhek esetén az is gondot okoz, hogy a különböző jellegű terhek legkedvezőtlenebb esetei elvileg ugyan egybeeshetnek, ennek azonban kisebb a valószínűsége, mint az egyes teherfélések maximumának külön-külön.

A félvalószínűségi méretezési eljárásoknak az a közös jellemzőjük – és ez természetesen az Eurocode parciális biztonsági tényező eljárására is igaz –, hogy egyrészt tudomásul vesszük azokat a tényeket, amelyeket az előzőekben az egyes mennyiségek valószínűségi változókként való működéséről elmondtunk, ugyanakkor azonban, az egyszerűség kedvéért, nem vesszük igénybe a valószínűség-elmélet teljes eszköztárát, hanem a problémát megkísérlik visszavezetni a determinisztikus megközelítés módra.

Ennek eszköze, hogy kiragadják a sűrűségfüggvény egyes jellemző értékeit, és ezeket a továbbiakban gyakorlatilag determinisztikus értéként kezelik. Ezek a kiragadott értékek az ún. *reprezentatív* (az idegen szó kb. *jellemzőt* jelent) *értékek*.

A legfontosabb reprezentatív érték az úgynevezett *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 sűrűségfüggvény adott kvantilisével definiáljuk. (Lásd az *I-1a ábrát*. A kvantilis szó valószínűség-elméleti fogalom. Például egy valószínűségi változó 5%-os – vagy 0,05-ös – kvantilise az az érték, amelyhez az eloszlásfüggvény 5% (0,05) értéke tartozik – ami a sűrűségfüggvényben a kvantilis alatti ábrarész területét jelenti.)

A karakterisztikus érték elvileg lehet felső vagy alsó, attól függően, hogy az előírt kvantilis 0-hoz vagy 1-hez (100%-hoz) van-e közelebb. Terhek esetén nyilván általában (de nem mindig) a felső, ellenállások esetén általában az alsó karakterisztikus értékkel számolunk (*I-1b ábra*).

A karakterisztikus értékből származtatjuk a következő leglényegesebb reprezentatív értéket, az ún. tervezési értéket. A tervezési érték a karakterisztikus értékből alsó karakterisztikus érték esetén biztonsági tényezővel való osztás, felső karakterisztikus érték esetén biztonsági tényezővel való szorzás révén számítható (a biztonsági tényező mindig 1-nél nagyobb szám). A tervezési érték definíció szerint ugyancsak a valószínűségi változó valamely, a karakterisztikus értékhez képest szigorúbb kvantiliseként van definiálva. A tervezési értéket a teherbírási határállapotok vizsgálatánál alkalmazzuk.

Az esetleges terheknek a karakterisztikus érték és a tervezési érték mellett további reprezentatív értékei vannak, amelyeket az *I-1. táblázat* foglal össze. A táblázat jelöléseit és az ott előforduló alapfogalmakat részletesebben az 1.6. szakaszban fogjuk megmagyarázni.

Reprezentatív érték	Számítás	Felhasználás
Kombinációs érték a teherbírási határállapothoz	$\Psi_0 \cdot \gamma_Q \cdot Q_k$	Teherbírási határállapot, nem kiemelt esetleges teher
Kombinációs érték a használhatósági határállapothoz	$\Psi_0 \cdot Q_k$	Használhatósági határállapot, ritka kombináció, nem kiemelt esetleges teher
Gyakori érték	$\Psi_1 \cdot Q_k$	Használhatósági határállapot, gyakori kombináció, kiemelt esetleges teher
Kvázitartós érték	$\Psi_2 \cdot Q_k$	Használhatósági határállapot, gyakori kombináció, nem kiemelt esetleges teher; használhatósági határállapot, kváziállandó kombináció, valamennyi esetleges teher

I-1. táblázat: Esetleges terhek további reprezentatív értékei (a karakterisztikus érték és a tervezési érték mellett). Jelölések:

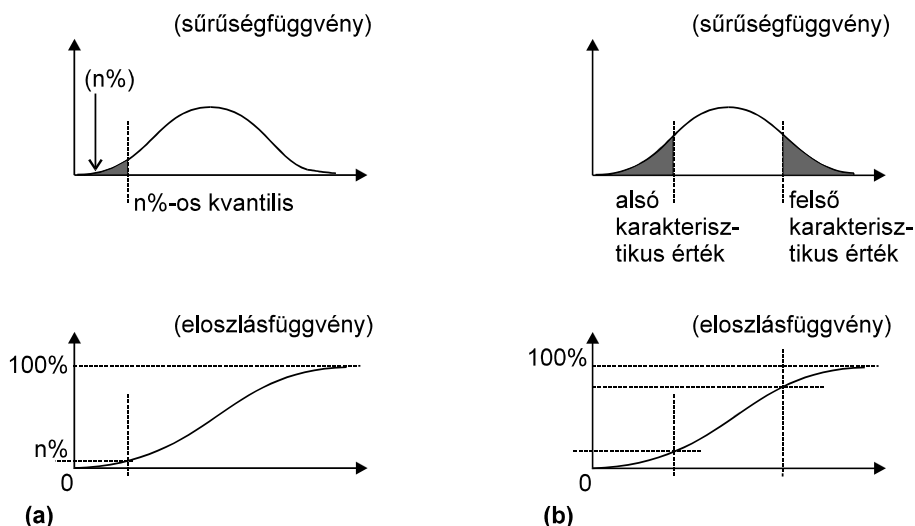
Q_k – az esetleges teher karakterisztikus értéke

γ_Q – az esetleges teher biztonsági tényezője (ajánlott értéke 1,50)

Ψ_0 – kombinációs tényező (értéke teherfőleségenként eltérő, ld. az 1.6. szakaszt)

Ψ_1, Ψ_2 – név nélküli tényezők (értékük teherfőleségenként eltérő, ld. az 1.6. szakaszt)

Megjegyezzük, hogy egyes terheknek (például hidak forgalmi terhei) egy ún. növelt gyakori értékét is szokás definiálni, amely egy Ψ'_1 értékkel való szorzással nyerhető.



1-1. ábra: A karakterisztikus érték mint a valószínűségi változó kvantilisa:
 (a) az n%-os kvantilis értelmezése; (b) a felső és az alsó karakterisztikus érték.

1.5 Tervezési állapotok

Az egyes határállapotokban az Eurocode felfogása szerint a szerkezet élettartama alatt bekövetkező különböző helyzeteket, az úgynevezett tervezési állapotokat kell vizsgálni. A szabvány a tervezési állapotok három csoportját különbözteti meg:

- tartós állapotok;
- ideiglenes állapotok;
- rendkívüli állapotok.

A tartós állapotok a szerkezet üzemszerű körülményeit jelentik, vagyis azt az állapotot, amelyre a szerkezetet tulajdonképpen készítjük. Ezek képezik a szerkezet időtartamának jelentős részét.

Az ideiglenes állapotok a szerkezet olyan állapotai, amelyek a szerkezet élettartamának csak egy rövid szakaszában érvényesülnek – ugyanakkor ezek az állapotok „rendes”, „tervezett” állapotok, amelyek a szerkezet üzemszerű működése szempontjából nélkülözhetetlenek. Ilyenek a például a különböző építés és karbantartás közötti állapotok.

A rendkívüli állapotok valamilyen rendkívüli helyzetet jelentenek, amely nem kapcsolódik a szerkezet „rendes” üzeméhez, de elkerülhetetlenek – ide tartoznak a természeti csapások következtében előálló helyzetek (pl. orkán erejű szél, árvíz), közlekedési balesetek (pl. járműütközés, vonat kisiklása) stb.

1.6 Teheresetek és teherkombinációk. A teheroldal szorzótényezőinek számértéke

Az egyes tervezési állapotokban az egyes határállapotok vizsgálatát általában más-más terhekre és a terhek más-más reprezentatív értékének figyelembevételével kell elvégezni. Ezzel kapcsolatban két alapvető fogalmat kell először megismernünk: a tehereset és a teherkombináció fogalmát.

Teheresetnek azon terhek összességét nevezzük, amelyeket egy adott vizsgálat során együttesen működőnek kell feltételeznünk. A tehereset tehát egy felsorolás, amely különböző fajtájú terheket tartalmaz.

Teherkombinációnak nevezzük az egy adott teheresetben szereplő terhek együttes figyelembevételének leírását. A teherkombináció tehát egyrészt tartalmazza a teheresetet (azaz a terhek felsorolását), másrészt pedig azokat a szabályokat, amelyek megmondják, hogyan kell az egyes terhek következményeit együttesen figyelembe venni. (Teher következménye alatt igénybevételeket, alakváltozásokat, elmozdulásokat, feszültségeket, reakcióerőket stb. értünk.)

A teherkombinációk megadásakor az egyes terheken két műveletet értelmezünk: az összeadást és a számmal való szorzást. Az összeadás azt jelenti, hogy „vedd a két teher együttesének következményét” (amely csak és kizárólag elsőrendű rugalmas, tehát lineáris számítás esetén egyezik meg a két teher következményének együttesével); a számmal való szorzás pedig azt, hogy „vedd az adott teher adott számszorosának következményeit”. Az ily módon definiált összeadást a továbbiakban felső idézőjelek közé tett összeadásjellel („+”) jelöljük.

Az Eurocode, amikor terhekről beszél, általában nem „terheket”, hanem „hatásokat” mond – a két fogalom azonban gyakorlatilag ugyanazt jelenti. A hatásokat különböző jelzőkkel szokás illetni:

- a hatások lehetnek *állandó*, *esetleges* és *rendkívüli* hatások; ezek nem új fogalmak – állandó hatás (jelölése: G) például az önsúly, esetleges hatás (jelölése: Q) a hasznos teher vagy a meteorológiai teher, rendkívüli hatás (jelölése: A) pedig például egy vonat kisiklásából származó erő;
- a hatások lehetnek *rögzített* és *nem rögzített* hatások annak megfelelően, hogy irányuk és nagyságuk a szerkezet élettartalma alatt változik-e vagy sem; rögzített hatás például az önsúlyteher, nem rögzített hatás pedig például a darupályatartóra ható daruteher;
- a hatások lehetnek *statikusak*, *kvázistatikusak* és *dinamikusak* – a kvázistatikus hatás olyan dinamikus hatást jelent, amely a számításokban statikus hatásként vehető figyelembe (például egy dinamikus növelő tényező bevezetésével);
- a hatások lehetnek *közvetlenek* (erő formájában megjelenő hatások), és lehetnek *közvetettek* (támaszsüllyedés, hőmérséklet-változás stb. – ezek tipikusan kényszerelmozdulások vagy kényszer-alakváltozások formájában jelennek meg).

A következőkben áttekintjük a legfontosabb szabályokat, amelyek a teherkombinációk képzésére vonatkoznak, kezdve a legfontosabb és legáltalánosabb esettel, a teherbírási határállapot és a tartós és ideiglenes tervezési állapotok esetével. Ezután az egyes tényezők számértékét vesszük sorra.

(a) Teherbírási határállapot, tartós és ideiglenes tervezési állapot

Ebben az esetben a figyelembe veendő teherkombináció a következő képlettel írható le:

$$\sum_i \gamma_{Gi} G_{ki} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{j \neq 1} \psi_{0,j} \gamma_{Qj} Q_{kj}$$

Az első látásra szokatlannak tűnő képlet gyakorlatilag a Magyar Szabványban is megszokott megközelítésmódot tartalmazza: 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 az összes többi esetleges terhet (Q_{kj}), szorozzuk be a biztonsági tényezővel (γ_{Qj}) és az ún. kombinációs (a magyar szabvány szerinti egyidejűségi) tényezővel ($\psi_{0,j}$), és ezeket adjuk össze; majd e három tagnak is vegyük az összegét (együttes hatását).

Az 1.4. pontban a terhek reprezentatív értékeiről tanultak alapján azt is mondhattuk volna, hogy a teherkombináció a következő reprezentatív értékek együtteséből áll:

- az állandó terhek tervezési értéke;
- egy kiemelt esetleges teher tervezési értéke;
- a többi esetleges tehernek a teherbírási határállapothoz tartozó kombinációs értéke.

Az egyes γ biztonsági tényezők ajánlott értékét az 1-2. táblázat foglalja össze a vizsgálat jellegének függvényében. A $\psi_{0,j}$ értékei teherféleségenként eltérőek (1-nél kisebb számok) – erről a (d) pontban lesz szó.

Megjegyzendő, hogy ezek az értékek ún. keretes értékek, ami azt jelenti, hogy az Eurocode szabványok európai (angol, francia és német nyelvű) szövegei ezeket tartalmazzák; nemzeti szinten a nemzeti kiadás megjelenésekor a tagállamok (a nemzeti alkalmazási dokumentumban) megerősíthetik vagy módosíthatják ezeket az értékeket. Mivel Magyarországon egyelőre egyetlen Eurocode szabványhoz sincs nemzeti alkalmazási dokumentum, ebben a jegyzetben mindenütt az ajánlott (keretes) értékeket adjuk meg.

Szokványos magasépítési szerkezetek acélszerkezeteinek vizsgálata esetén az előző módszerrel szemben követhetünk egy könnyebben átlátható eljárást is, amelynek során a figyelembe veendő teherkombináció:

$$\sum_i \gamma_{Gi} G_{ki} + \gamma_{Q1} Q_{k1} \quad \text{vagy} \quad \sum_i \gamma_{Gi} G_{ki} + \sum_{j \geq 1} 0,9 \gamma_{Qj} Q_{kj}$$

Az első esetben csak egyetlen kiemelt terhet veszünk; a második esetben pedig nincs kitüntetett, kiemelt teher, hanem minden terhet egyformán csökkentünk egy 0,9-es tényezővel (ez a ψ_0 érték helyett van, amelynek értéke általában jóval kisebb 0,9-nél). A két lehetőség közül azt kell tekinteni, amely kedvezőtlenebb következményt szolgáltat.

Ez utóbbi eljárás előnye, hogy nem kell ismerni a kombinációs tényezők értékét; ez annyiban jelent könnyítést, hogy (az 1-6B. példához hasonlóan) minden különösebb gondolkodás nélkül megállapítható, mely teherféléseget kell kiemelt teherként kezelni. Hátránya viszont, hogy általában nagyobb (kedvezőtlenebb) eredményt szolgáltat.

1-6A. példa. Egy acélgerenda egy adott keresztmetszetében ébredő hajlítónyomatéki igénybevételt ellenőrizzük. Az egyes teherfélésegekből a következő nyomatékok ébrednek:

önsúly: $M_{G,k} = 33 \text{ kNm}$

hasznos teher („A” kategóriájú födém): $M_{Q_i,k} = 133 \text{ kNm}$

hóteher: $M_{Q_s,k} = 43 \text{ kNm}$

szélteher: $M_{Q_w,k} = \pm 73 \text{ kNm}$.

Az általános eljárás szerint a következő teherkombinációkat kell vizsgálni:

kiemelt teher a hasznos teher: $1,35 \cdot 33 + 1,5 \cdot 133 + 0,6 \cdot 1,5 \cdot 43 + 0,6 \cdot 1,5 \cdot 73 = 348,45 \text{ kNm}$

kiemelt teher a szélteher: $1,35 \cdot 33 + 1,5 \cdot 73 + 0,7 \cdot 1,5 \cdot 113 + 0,6 \cdot 1,5 \cdot 43 = 311,4 \text{ kNm}$

tehát mértékadó a 348,45 kNm.

1-6B. példa. Vizsgáljuk meg az előző példát a magasépítési szerkezetekre adott egyszerűsített eljárás szerint. Ekkor:

csak egy teher (nyilván a legnagyobbat vesszük): $1,35 \cdot 33 + 1,5 \cdot 133 = 244,05 \text{ kNm}$

valamennyi teher: $1,35 \cdot (33 + 133 + 43 + 73) = 380,7 \text{ kNm}$ (vegyük észre, hogy $0,9 \cdot 1,5 = 1,35$!)

Megjegyzés mindkét előző példához: Mint az 5. fejezetben látni fogjuk, minden magasépítési keretszerkezet esetén figyelembe kell venni egy képzelte erőt, az ún. imperfekciós erőt. Ezt itt mi most ebben a két példában elhagytuk.

Hatás	Vizsgálat		
	Általános állékonyság (pl. felborulás)	Az acél tartó-szerkezet vizsgálatai	Altalaj vizsgálatai
Állandó hatás, ha kedvezőtlen	1,10	1,35	1,00
Állandó hatás, ha kedvező	1,00	1,00	1,00
Esetleges hatás, ha kedvezőtlen	1,50	1,50	1,30
Esetleges hatás, ha kedvező	0	0	0

1-2. táblázat: A biztonsági tényezők értéke a teherbírási határállapotok vizsgálatához.

A kedvező hatás azt jelenti, hogy a vizsgált határállapot kialakulását akadályozza – ilyen például egy gerenda középső keresztmetszetének szilárdsági vizsgálata esetén a felfelé ható megoszló erő (például a tetőszerkezetben a szélszívásból). A táblázatból látható, hogy a kiemelt esetleges teher biztonsági tényezője (γ_{Q1}) megegyezik a nem kiemelt esetleges terhek biztonsági tényezőivel. Megjegyzendő, hogy bizonyos speciális terhek esetén az acél tartó-szerkezet vizsgálatához a kedvezőtlen esetleges teher biztonsági tényezője 1,50 helyett 1,35 lehet (például darupályatartón a daruteherből, acélhidon a forgalmi terhekből származó erők esetén).

(b) Teherbírási határállapot, rendkívüli tervezési állapot

A rendkívüli tervezési állapot általában két vizsgálat valamelyikét jelenti:

- vagy van egy rendkívüli teher, amelynek megjelenése jelenti a rendkívüli állapotot (pl. vasúti hídon a vonat kisiklásából keletkező erők)
- vagy a szerkezet kerül rendkívüli állapotba, amelyben kisebb terheket képes csak felvenni (például tűz esetén a felmelegedő acél mechanikai jellemzői csökkennek, illetőleg a tűz nyomán olyan alakváltozások keletkeznek, hogy az így nyert új tartóalak lehülés után sem tesz lehetővé megfelelő szintű teherviselést).

Most csak az első esettel foglalkozunk, azzal sem túl részletesen. Ilyenkor, ha a rendkívüli teher tervezési értékét A_d jelöli, akkor a vizsgálandó teherkombináció:

$$\sum_i \gamma_{GAi} G_{ki} + A_d + \psi_{1,1} Q_{k1} + \sum_{j \neq 1} \psi_{2,j} Q_{kj}$$

ahol γ_{GAi} az i -edik állandó teher biztonsági tényezője a rendkívüli tervezési állapotban – e tényező ajánlott értéke 1,00. A képletből látható, hogy a kiemelt esetleges teher a gyakori, a többi esetleges teher pedig kváziállandó értékével szerepel (mivel pedig például a meteorológiai terhek kváziállandó értéke általában zérus, ez azt is jelenti, hogy a meteorológiai terheket a rendkívüli tervezési állapotban általában figyelmen kívül hagyhatjuk).

(c) Használhatósági határállapot

A használhatósági határállapotok vizsgálatához az Eurocode három teherkombinációt ad meg (hidakra van még egy negyedik, az ún. növelt gyakori kombináció is, de ezt mi most nem tárgyaljuk). A három kombinációt az 1-3. táblázat foglalja össze.

Arról, hogy a három teherkombináció közül az egyes vizsgálatok során melyiket kell használni, az egyes Eurocode szabványok különbözőképpen rendelkeznek. Az acélszerkezetek kapcsán leggyakrabban előforduló esetek a következők:

- merevségi vizsgálatok (lehajlás stb.) épületekben – ritka kombináció
- rezgésvizsgálatok épületekben – gyakori kombináció
- öszvérszerkezetekben a beton berepedése – kváziállandó kombináció

Kombináció	Alkalmazandó reprezentatív érték		
	Állandó hatás	Kiemelt esetleges hatás	Többi esetleges hatás
Ritka	karakterisztikus érték	karakterisztikus érték	kombinációs érték (hhá)
Gyakori	karakterisztikus érték	gyakori érték	kvázitartós érték
Kváziállandó	karakterisztikus érték	kvázitartós érték	kvázitartós érték

Képletekkel:

Ritka kombináció: $\sum_i G_{ki} + Q_{k1} + \sum_{j \neq 1} \psi_{0,j} Q_{kj}$

Gyakori kombináció: $\sum_i G_{ki} + \psi_{1,1} Q_{k1} + \sum_{j \neq 1} \psi_{2,j} Q_{kj}$

Kváziállandó kombináció: $\sum_i G_{ki} + \sum_{j \geq 1} \psi_{2,j} Q_{kj}$

1-3. táblázat: A használhatósági határállapotok teherkombinációi

(d) A ψ tényezők értéke

Néhány jellemző teher ψ tényezőinek értékét az 1-4. táblázat foglalja össze.

Hatás	Tényező		
	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
Hóteher	0,6	0,2	0
Szélteher	0,6	0,5	0
Hőmérsékleti hatások (de nem tűz)	0,6	0,5	0

1-4. táblázat: Néhány jellemző hatás ψ tényezőinek számértéke – e tényezők segítségével számítható a hatások kombinációs, gyakori és kvázitartós értéke.

A megadott értékek „keretes” értékek, tehát országonként elvileg eltérhetnek.

1.7 Az ellenállásoldallal kapcsolatos általános tudnivalók

Az ellenállásoldalon szereplő mennyiségekkel, azok kiszámítási módjával és egyes módszerek elméleti háttérével a következő fejezetek foglalkoznak.

- A 2. fejezet témája a keresztmetszetek vizsgálata – az Eurocode megközelítésmódjában a keresztmetszet vizsgálatai közé tartozik a *hosszirányú normálfeszültségek okozta lemezhorpadás* figyelembevétele is.
- A 3. fejezet a stabilitásvizsgálatokkal foglalkozik: kihajlás, kifordulás, nyírófeszültségek okozta horpadás, keresztirányú normálfeszültségek okozta instabilitási jelenségek
- A 4. fejezet a csavarozott (normál és feszített csavaros), valamint a hegesztett kötések kialakítását és ellenállásának számítását tárgyalja
- Az 5. fejezet a magasépítési keretszerkezetek analízisével kapcsolatos általános fogalmakat veszi sorra (imperfekciónak, keretek osztályozása, keretek kapcsolatainak osztályozása több szempont szerint)
- A 6. fejezet a képlékenységtani elvekkel, illetve ezek magasépítési acélszerkezetekre történő alkalmazásával foglalkozik.

Ebben a részben két fontos táblázatot közlünk, amely valamennyi vizsgálatnál hasznos lehet. Az első az ellenállásoldalon figyelembe veendő biztonsági tényezőket, a második az acélanyag jellemzőinek karakterisztikus értékét adja meg.

(a) Az ellenállásoldal biztonsági tényezői

Az ellenállásoldal biztonsági tényezőit az 1-5. táblázat foglalja össze. Ezek jelentését részletesen az egyes vizsgálatok kapcsán, e jegyzet következő fejezeteiben tárgyaljuk.

A tényező használata	Jelölés	Számérték
Szilárdsági vizsgálatok (1., 2. és 3. keresztmetszeti osztály)	γ_{M0}	1,10
Stabilitási vizsgálatok (4. keresztmetszeti osztály, kihajlás, kifordulás)	γ_{M1}	1,10
Képlékeny törés vizsgálata (csavarlyukkal gyengített keresztmetszet)	γ_{M2}	1,25
Csavarok	γ_{Mb}	1,25
Szegecsek	γ_{Mr}	1,25
Csapok	γ_{Mp}	1,25
Hegesztési varratok	γ_{Mw}	1,25
Megcsúszásnak ellenálló kapcsolatok, thá	$\gamma_{Ms,ult}$	1,25
Megcsúszásnak ellenálló kapcsolatok, hhá	$\gamma_{Ms,ser}$	1,10
Megcsúszásnak ellenálló kapcsolatok, thá, hasíték és túlméretes furat	$\gamma_{Ms,ult}$	1,40
Betonacél	γ_s	1,15
Beton, alapvető kombináció	γ_C	1,50

1-5. táblázat: Az ellenállásoldal biztonsági tényezői acélszerkezetekre.
A megadott értékek „keretes” értékek, tehát országonként eltérhetnek.

(b) Az acélanyag jellemzői

Az acélanyag szilárdsági jellemzőinek az Eurocode szerinti számítások során figyelembe veendő karakterisztikus értékeit az 1-6. táblázat tartalmazza. További lényeges anyagjellemzők:

- rugalmassági modulus: $E = 210000$ MPa
- Poisson-tényező: $\nu = 0,3$
- nyírási modulus: $G = 80769$ MPa
- sűrűség: $\rho = 8750$ kg/m³
- lineáris hőtágulási együttható: $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ 1/°C

A csavarok anyagminőségéről a 4. fejezetben lesz szó. A jelölések megegyeznek a magyar gyakorlatban már bevett jelölérendszerrel; például az 5.6.-os csavar jelentése: a szakítószilárdság 500 MPa, a folyáshatár pedig ennek 60%-a, tehát 300 MPa. Ezek az értékek az Eurocode szerint karakterisztikus értéknek tekintendők.

Szabvány	Acélminőség	Anyagjellemzők a t lemezvastagság függvényében			
		$t \leq 40$ mm		40 mm $< t \leq 100$ mm*	
		f_y	f_u	f_y	f_u
EN 10025	S 235	235	360	215	340
	S 275	275	430	255	410
	S 355	355	510	335	490
EN 10113	S 275	275	390	355	370
	S 355	355	490	335	470
	S 420 N	420	520	390	520
	S 420 M	420	500	390	500
	S 460 N	460	550	430	550
EN 10137**	S 460 M	460	530	430	530
	S 460 Q	460	550	440	550

1-6 táblázat: Anyagok szilárdsági jellemzői (MPa, karakterisztikus értékek). Megjegyzések: *az EN 10113 szerinti M szállítási feltétel esetén ez a határ 63 mm; **az EN 10137 szerinti S 460 Q minőség 100 mm és 150 mm lemezvastagság között is alkalmazható; ekkor a folyáshatár 400 MPa, a szakítószilárdság 500 MPa.