

VASBETON LEMEZEK ÁTSZÚRÓDÁSI MÉRETEZÉSÉNEK VÁLTOZÁSA NAPJAINKBAN (MAGYAR SZABVÁNY, EUROCODE 2, MODEL CODE 2010)



Jobbágy Dávid – Dr. Völgyi István

DOI: 10.32969/VB.2019.2.2

Paraméteres vizsgálatunk apropója, hogy az Eurocode szerinti átszűrődési méretezés a szabvány közelmúltbeli módosítása következtében szigorodott. A változásoknak számottevő hatása volt a síklemez födémekkel készült tartószerkezetek méreteire, versenyképességére. A szerzők arra keresték a választ, hogy milyen tendencia várható ezen a területen a jövőben. Ennek kapcsán bemutatják az európai vasbetonszerkezeti méretezés közeljövőjét jelentő Model Code 2010-es dokumentum szerinti méretezési eljárást. Ezt követően néhány tipikus alkalmazási példa segítségével összevetik a múltbeli (MSZ15022), a jelenlegi (MSZ EN 1992) és a jövőbeli számítási módszerekkel kapható ellenállás értékeket. A szerzők ezek ismeretében javaslatot tesznek a vasbeton födémek fejlesztési irányaira vonatkozóan.

Kulcsszavak: vasbeton, átszűrődés, MSZ, EC2, Model Code 2010, paraméteres vizsgálat, összehasonlítás

LEGFONTOSABB JELÖLÉSEK

EC/EC2	MSZ EN 1992-1-1:2001/A1:2016 a vonatkozó hatályos magyar szabvány
MC	Model Code 2010
MSZ	MSZ 15022/1-2000 Az utolsó MSZ szabvány az EC2 bevezetése előtt
d, d_v, h	az átszűrődés vizsgálat szempontjából releváns hasznos magasság EC, MC, MSZ szerint
Ψ	a kritikus zóna elfordulása MC
k_Ψ	a kritikus zóna elfordulásától függő tényező MC
r_s	a nyomatéki nullvonal oszloptengelytől mért távolsága MC
$L_x; L_y$	a lemez irányonkénti támaszköze
B	pillér oldalméret
r_1	húzott hajlítási geometriai vashányad a pillér felett a vasbeton lemezben
u_{EC}, u_{MC}, u_{MSZ}	a kritikus átszűrődési kerület hossza EC, MC, MSZ szerint
$V_{Rdc}^{EC}, V_{Rdc}^{MC}, T_{Ha}$	beton által felvehető átszűrő erő tervezési értéke EC, MC, MSZ szerint
$V_{Rds}^{EC}, V_{Rds}^{MC}, T_{Hs}$	vasalás által felvehető átszűrő erő tervezési értéke EC, MC, MSZ szerint
$V_{Rds}^{EC}, V_{Rds}^{MC}, T_{Has}$	vasalás és beton által felvehető átszűrő erő tervezési értéke EC, MC, MSZ
$V_{Rdmax}^{EC}, V_{Rdmax}^{MC}, T_{Hf}$	átszűrődési teherbírás felső korlátja EC, MC, MSZ.

1. BEVEZETÉS

Az átszűrődés (átlyukadás) a vasbeton lemezek pontszerűnek tekinthető terhelésének környezetében létrejövő tönkremeneteli mód. A törést elsősorban a terhelt felület környezetében kiala-

kuló nagy nyírási igénybevétel okozza. A jelenség rokonságot mutat a vasbeton gerendák nyírásával, de annál komplexebb.

Az oszlopfej erőjátékának összetettsége miatt a valóságot minden lényeges szempontból jól közelítő kísérletek végrehajtása költségigényes. A rendelkezésre álló kísérleti eredmények száma jelentős, de messze elmarad az egyéb területeken megszokottól.

Az elmúlt évszázadban számos számítási modell, méretezési módszer született. Ezek áttekintése meghaladja jelen dolgozat terjedelmét, ezért azon modellekre, módszerekre koncentrálunk, amelyek segítenek megérteni a korábbi (MSZ15022/1-2000; MSZ), a jelenlegi (MSZ EN 1992-1-1 2016-os nemzeti melléklettel, EC2) és a jövőbeli (**fib** Model Code 2010; MC2010) magyarországi szabályozás különbözőségeit. A szabályzatok összevetése lehetőséget teremt, hogy betekintsünk a módszerek fejlődésébe, és segít felmérni, mire kell számítani, ha új szerkezetet kell terveznünk, vagy egy jövőbeli felújítás során korábbi szabvány szerint készült tartószerkezettel dolgozunk.

Az említett három szabályzat méretezési módszerében, jelölésrendszerében és szóhasználatában számos kisebb-nagyobb különbség található, de egyeznek a következőkben:

- Az átszűrődési méretezés az átszűrődési kúpokat jellemző átszűrődési kerületek sorának elemzése.
- Kis igénybevétel esetén a beton biztosítja az átszűrődési ellenállást, vagyis a nyíróerő felvételét.
- Átszűrődésre vasalt lemezek ellenállása a beton és az átszűrődési vasalás teherbírásának alkalmas összegzésével kapható.
- A vasalt lemez átszűrődési ellenállása az átszűrődési felső korlát fölé nem növelhető.

Röviden áttekintjük a szabványok szerinti eljárások ellenállási oldalát. Az igénybevétel oldalon meglévő eltéréseket részletesen nem tárgyaljuk.

2. AZ MSZ15022/1-2000 MODELLJÉRŐL ÉS MÓDSZERÉRŐL RÖVIDEN

A fajlagos átszűrő erőt az átszűrő erő 20%-kal növelt értékéből kell számítani. Az MSZ módszere szerint az első vizsgálandó kerületet a terhelt felülettől $0.5h$ távolságra kell felvenni, ahol h a hasznos magasság. Itt kell ellenőrizni az átszűrődési felső korlát megfelelőségét. A lemez bevasalható, ha a vizsgált kerület (u' , továbbiakban u_{MSZ}) mentén a fajlagos átszűrő erőt meghaladja a fajlagos határerő tervezési értéke.

$$t_{Hf} = 0.2h \times \sigma_{bH},$$

ahol σ_{bH} a beton nyomási határfeszültsége, ami a karakterisztikus hengerszilárdság 1.4–1.5 értékkel való osztása útján kapható.

Átszűrődési vasalás nem szükséges, ahol a fajlagos átszűrő erő kisebb, mint fajlagos határerő alsó értéke:

$$t_{Ha} = 0.5h \times \sigma_{bH},$$

ahol a húzási határfeszültség σ_{bH} értéke a karakterisztikus hengerszilárdság 1.4–2.0 értékkel való osztása útján kapható. Átszűrődésre vasalt zóna ellenállása:

$$t_H = \sum t_{Hs} + t_{Hb} + t_{Hc},$$

ahol a lemezsíkkal α szöget bezáró, σ_{sH} határfeszültségű, sugárirányban t osztástávolsággal kiosztott, kerületenként A_s átszűrődési vasmennyiségből számított ellenállás:

$$\sum t_{Hs} = 0.85 \sigma_{sH} \frac{A_s}{t} \sin \alpha.$$

A berepedt beton figyelembe vehető

$$t_{Hb} = t_{Ha} \left(1 - \frac{\sum t_{Hs}}{t_{Hf}} \right),$$

teherbírása egyre csökken, ha az átszűrő erő közelíti a felső értéket.

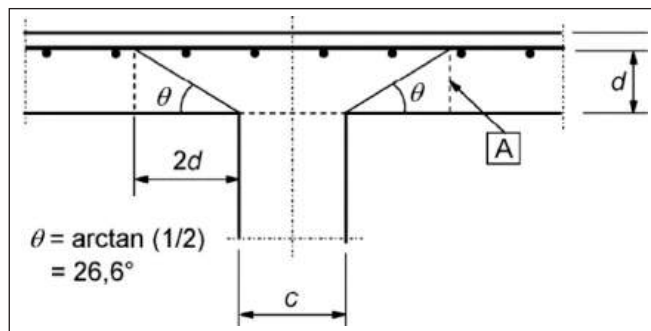
Az eredő fajlagos ellenállás a terhelt felület h környezetében növelhető a

$$t_{Hc} = 0.5a' \sqrt{\sigma_{bH} \sigma_{sH}}$$

értékkel, ahol a' a nyomott oldali hatásos fajlagos hosszvasmennyiség. A hatás azt fejezi ki, hogy a terhelt felület környezetében kialakuló esetleges meredek repedés mentén a beton fajlagos ellenállása nagyobb, mint a szokványos repedésgeometria esetén.

Látható, hogy a vasalt lemez ellenállásának számításakor a betonteherbírás és a vasalás teherbírását is redukálni kell.

Az átszűrődési vasalás kialakítására vonatkozó részletes szabályokat az MSZ15022-es sorozat nem tartalmaz. Számos egyéb dokumentum foglalkozik azonban a kérdéssel. A magyar gyakorlatban megtalálhatók a zömített fejű csapok és a hosszvasalást közrefogó kengyelek mellett a hosszvasalási síkok között futó átszűrődési vasalások. Ezek hatékonyságát kialakítás függvényében határozza meg az irodalom (MMK (2004).



1. ábra: Legkisebb átszűrődési kúp és u_1 kerület [A] felvétele EC2 szerint

3. AZ MSZ EN 1992 MODELLJÉRŐL ÉS MÓDSZERÉRŐL RÖVIDEN

Az EC2 módszere a nyírás témaköréből jól ismert rácsostartó modellen alapul. Az átszűrődésre vasalatlan (továbbiakban vasalatlan) lemez ellenállását az oszlop peremétől $2d$ távolságra futó u_1 kerület mentén kell ellenőrizni. Az ellenállás megfelel, ha a kerületen kívül eső területekről átadódó nyíróerő u_1 kerület mentén fajlagosított értéke (v_{Ed}^{u1}) kisebb, mint a beton fajlagos nyírás ellenállása (v_{Rdc}). A v_{Ed}^{u1} a nyírás méretezés szerinti V_{Ed}^{red} értékének felel meg.

Átszűrődési vasalás jelenléte esetén ellenőrizni kell a nyomott és a húzott rácsrúd ellenállását. A nyomott beton rácsrúdat az oszlop pereme mentén (u_0) kell ellenőrizni a teljes nyíró (átszűrő) erőre. A nyomott rácsrúd megfelel, ha a beton és a vasalás együttes teherbírása (v_{Rdmax}) meghaladja a fajlagos átszűrő erőt (v_{Ed}^{u0}).

Az EC2 2016-os módosítása óta ugyancsak felső korlátot jelent, hogy a lemez igénybevétele az u_1 kerület mentén ne haladja meg a betonteherbírás k_{max} -szorosát, tehát $v_{Ed}^{u1} \leq k_{max} v_{Rdc}$. Az összefüggésben k_{max} 1.5 és 2.5 között változhat az átszűrődési vasalás típusa és kialakítása függvényében.

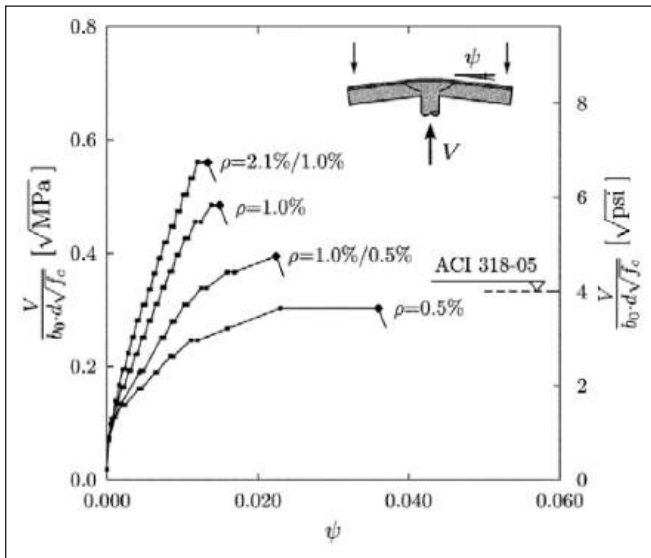
Ellenőrizni kell továbbá a húzott rácsrúd ellenállását. A húzott rácsrúd megfelel, ha a beton és a vasalás együttes teherbírása (v_{Rdcs}) meghaladja a fajlagos átszűrő erőt az u_1 kerület mentén (v_{Ed}^{u1}). Utóbbi vizsgálatot addig kell folytatni, amíg a vizsgált kerület akkorára nem nő (u_{out}), hogy a beton nyírás teherbírása önmagában elegendő. A közös v_{Rdcs} teherbírásban a beton teherbírásának 75%-át vehetjük számításba, és a vasalás szilárdságát is redukálni kell. A nyírás vasak megfelelő lehorgonyozottságának biztosítása céljából a $2d$ szélességű zóna helyett csak a $1.5d$ zónán belüli átszűrődési vasak vehetők figyelembe.

A fajlagos nyíróerőnek az átszűrő erő külpontosságából fakadó növekményét az átszűrő erőnek a külpontosságtól függő β növelő tényezővel vesszük figyelembe.

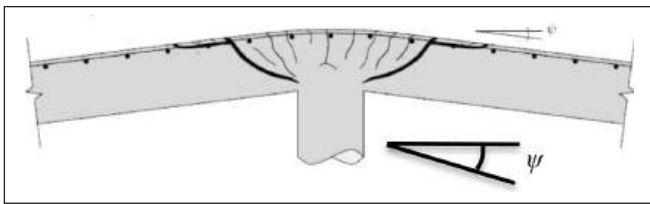
4. A FIB MODEL CODE 2010 MÓDSZERÉNEK ELMÉLETI ÉS KÍSÉRLETI HÁTTERE

Az MC2010 a fent említett alapelvekben hasonlít az MSZ és az EC2 eljárásához, ugyanakkor mind elméleti háttérben, mind összefüggéseiben jelentősen eltér tőlük. Az MC2010 az Aurelio Muttoni kutatócsoportja által megalkotott kritikus nyírás repedés elméletén (Critical Shear Crack Theory, CSCT) alapszik (Muttoni 2008, 2009, 2013).

Kinnunen és Nylander (Kinnunen 1960) kísérleti eredmé-



2. ábra: Az átszűrődásra vasalatlan lemez átszűrődési mechanizmusának jellege a hajlítási vasalás mennyiségének (ρ) függvényében. (Muttoni 2008)



3. ábra: Az átszűrődásra vasalatlan lemez átszűrődési kritikus zónája – repedéskép és a ψ relatív elfordulás értelmezése (MC2010)

nyek megmutatták, hogy az átszűrődásra vasalatlan lemezek átszűrődési teherbírásának mechanizmusa, jellege jelentősen függ a hajlítási vasalás mennyiségétől (2. ábra). A fajlagos vasmennyiség növekedésével a teherbírás nő, de a szerkezet alakváltozó képessége jelentősen csökken.

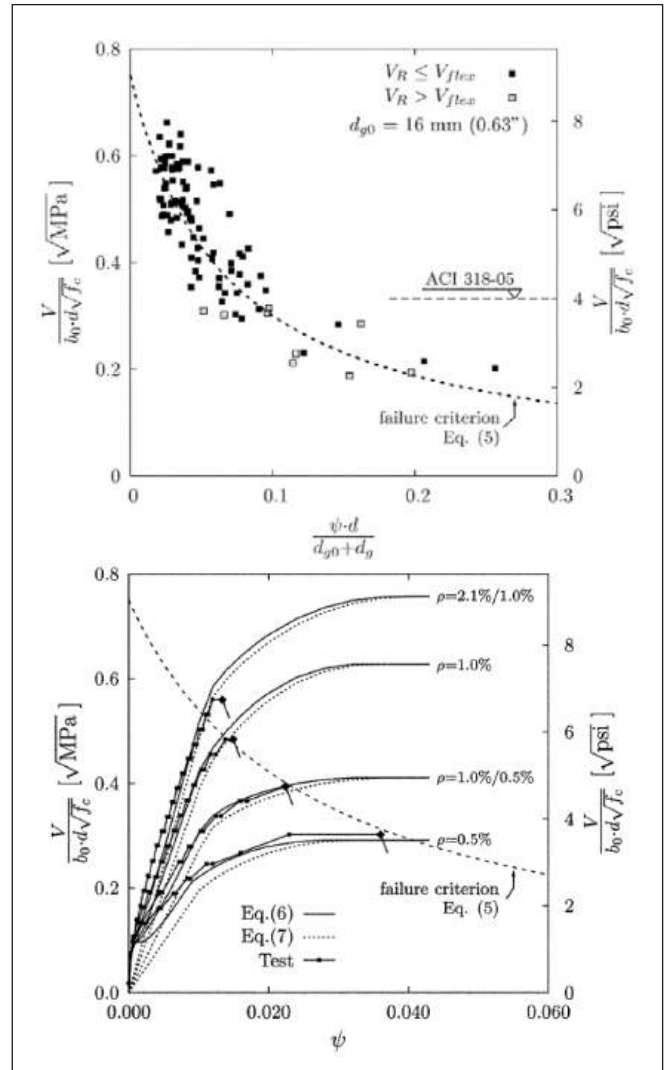
A CSCT alapja a kritikus nyírási repedés helyének, alakjának megértése és a metszet mentén fellépő teherbírás komponensek azonosítása, becslése az átszűrődési zóna ψ relatív elfordulása függvényében. Muttoni elmélete szerint a kritikus repedés megnyílása csökkenti a nyomott beton rácsrúd szilárdságát, így csökkenti az átszűrődési teherbírás¹. A jelenséget leíró paraméter lehet a keresztmetszet görbülete, a repedés tágassága vagy kritikus zóna relatív elfordulása (ψ). Utóbbi a görbületfüggvény vizsgált hosszön történő összegzésével nyerhető, könnyen mérhető, és a repedéstágassággal (w) arányos mennyiségnek tekinthető: $w \sim \psi d$. A ψ relatív elfordulás definícióját a 3. ábra tartalmazza.

Az átszűrődési ellenállás meghatározása a kritikus nyírási repedés mentén felvett metszet egyensúlyának felírásán alapszik. A szakirodalomban leggyakrabban szereplő teherbírás komponensek a következők:

- A repedésmentes nyomott betonzóna nyírási ellenállása
- A repedés érdes partjainak elcsúszása okán létrejövő repedéssúrlódás (szemcsehatás)
- A hajlítási vasalás meghajlításához szükséges erő (csaphatás).

Ezek részeseése, relatív jelentősége megosztja a témával foglalkozó kutatókat. A CSCT elmélete nem választja szét a felsorolt komponenseket, de számottevő szerepet tulajdonít a repedéssúrlódásnak. Walraven eredményeire (Walraven 1981) hivatkozva a CSCT a repedéssúrlódás hatékonyságát

1 Más kutatók a teherbírás csökkenését a növekvő tágasságú és hosszúságú, a számított nyomott zónába behatoló repedések okozta nyomott betonzóna teherbírás csökkenéssel (Windisch 1988.) (Völgyi 2014.) vagy a keresztmetszet növekvő görbületével (Bogdányi 2014.) magyarázzák, hasonló végkövetkeztetéssel.



4. ábra: A hajlítási teherbírás elért (négyzet) és el nem érő (teli négyzet) próbatetek átszűrődési ellenállása a repedés tágasságát és repedés érdességét leíró tényező függvényében (Muttoni 2008.), illetve a Kinnunen-féle kísérleti eredmények, és a számított erő-elfordulás összefüggések (pontvonal – bilineáris, folytonos-kvadrilineáris nyomtérk-görbület összefüggés felhasználásával), valamint a tönkremeneteli pontokra illeszthető tönkremeneteli kritérium (Muttoni 2008.)

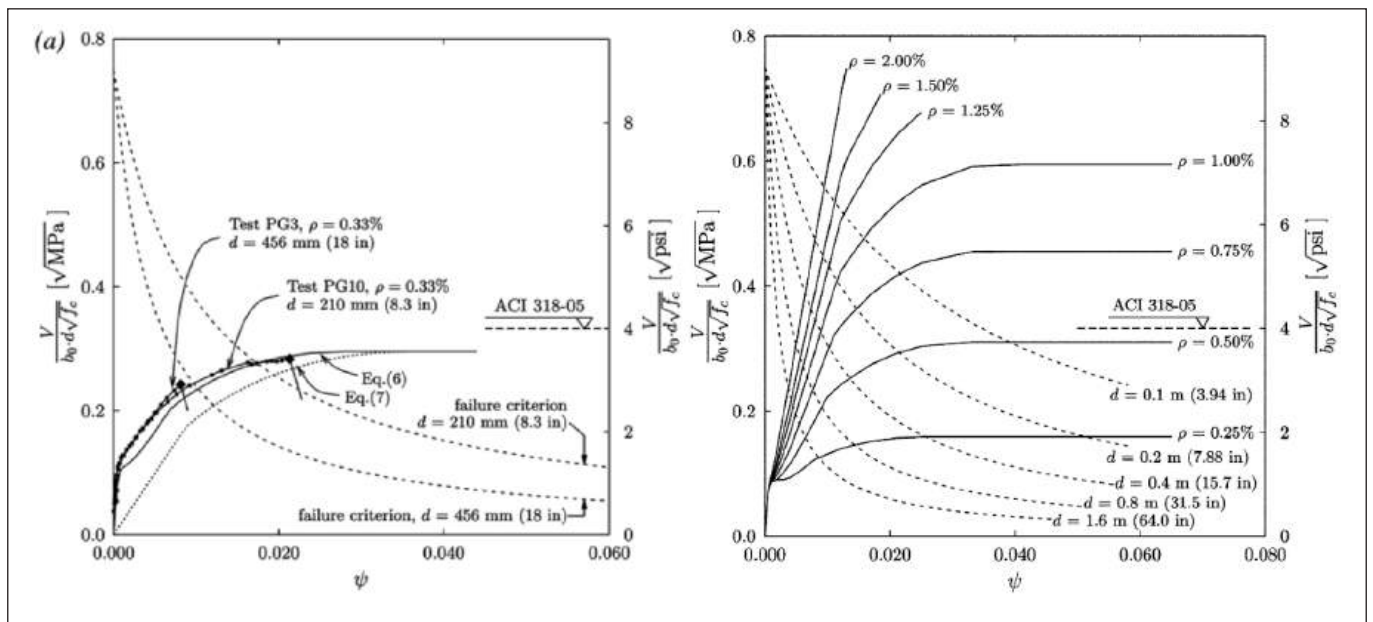
(k_{ψ}) a vizsgált repedés tágassága ($\sim \psi d$) és a repedés maximális szemcsemérettől függő érdessége mérőszám (k_{dg}) függvényében határozza meg². A 4. ábra jól mutatja, hogy a szakirodalmi kísérleti átszűrődési ellenállás értékek és a repedés relatív érdességére jellemző paraméter között határozott összefüggés mutatható ki.

A CSCT szerint az átszűrődés akkor jön létre, amikor lemez nyomtérk-görbület diagramja metszi a görbulettől ($\sim \psi$) függő tönkremeneteli kritériumot. A feladat szimmetrikus esetben egy kimetszett lemezdarab egyensúlyának felírásával oldható meg.

A CSCT a lemezek átszűrődése esetén a nyírásvizsgálathoz hasonlóan kezeli az úgynevezett mérethatást. Az 5. ábra (a) részén látható diagramok mutatják a számos kísérlettel alátámasztott hatást, miszerint a tartómagasság (d) növelésével a fajlagos nyírási (átszűrődési) ellenállás csökken³. Ez teszi szükségessé, hogy a tönkremeneteli kritérium függjön a lemezvastagságtól, lásd 5. ábra (a) és (b) rész. Az ábra jól mutatja, hogy a gyakorlatban előforduló hajlítási vasmennyiségek esetén rideg viselkedésre kell számítani. Az alakváltozó képesség tovább csökken a lemezvastagság növelésével.

2 A repedéssúrlódás működésének feltétele, hogy a repedéspartok között olyan mozgás alakuljon ki, ami az adalékszemek „összeakadását” lehetővé teszi (Völgyi 2017.).

3 Más elméletek szerint az eltérés háttérben részben az eltérő átmérőjű betonacélok eltérő tapadási, lehorgonyzási tulajdonságai miatt előálló eltérő repedéstágasság értékek állnak.



5. ábra (a) Azonos fajlagos hajlítási vasmennyiséggel készülő, de eltérő vastagságú lemezek (PG3; PG10) erő-elfordulás diagramja, illetve (b) tönkremeneteli kritérium eltérő fajlagos vasmennyiségek és változó lemezvastagságok esetén [Muttoni 2008.]

A **fib** Model Code 2010 négy eltérő almodszert (LoA I-IV = Level of Approximation I-IV = I-IV. szintű közelítés) tartalmaz. Az I-III. szintű közelítések azonos modellen alapulnak, de a méretezés alapját jelentő ψ relatív elfordulás értéket elnagyoltabb vagy pontosabb feltételezések alapján számítják. Az első, legegyszerűbb módszert előtervezéshez, a későbbieket részletes számításához javasolják.

Az I-III. szintű közelítés szerint a kritikus zóna ψ relatív elfordulása rendre a következő összefüggésekkel becsült iránymenkenti értékek maximumaként vehető fel:

$$\psi = 1.5 \frac{r_s}{d} \frac{f_{yd}}{E_s} \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1.5} \quad \psi = 1.2 \frac{r_s}{d} \frac{f_{yd}}{E_s} \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1.5}$$

ahol $r_s \approx 0.22L_x$ vagy $0.22L_y$ a nyomatéki nullvonal oszloptengelytől mért távolsága, m_{Ed} az oszlopsávban számított átlagos mértékadó negatív nyomaték az oszlop vonalában. A II. közelítés számottevő nyomatéki átrendezés esetén is alkalmazható. A III. modell akkor alkalmazható ha r_s és m_{Ed} értékét lineárisan rugalmas, repedésmentes modellel (tipikusan VEM modell) számították.

Az átszűrődásra vasalatlan lemez átszűrődási ellenállása a kritikus zóna ψ relatív elfordulásától függő k_ψ tényező felhasználásával a következő összefüggéssel számítható:

$$k_\psi = \frac{1}{1.5 + 0.9k_{dg}\psi d [\text{mm}]} \leq 0.6$$

$$V_{Rdc} = k_\psi \frac{\sqrt{f_{ck}} [\text{MPa}]}{\gamma_c} b_0 d_v$$

Az összefüggésben szereplő d hajlítási hasznos magasság nem feltétlenül egyezik az átszűrődási hasznos magassággal (d_v). A repedés érdességét figyelembe vevő k_{dg} tényező értéke $d_g \geq 16$ mm-es maximális szemmagyság esetén 1.0, egyéb esetekben a

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g [\text{mm}]} \geq 0.75,$$

összefüggéssel számítható. Érdekes, hogy az MC2010 könnyűbetonok és nagyszilárdságú betonok esetén elhanyagolja

a repedés érdességének (repedéssűrűlódás, szemcsehatás) szerepét ($d_g=0$). Előbbi esetben az adalékszemek csekély szilárdsága, utóbbi esetben az adalékszemen átfutó, így sokkal kisebb érdességet eredményező törési felület áll a háttérben. Átszűrődási vasalás alkalmazása szükséges, ha $V_{Ed}^{b0} > V_{Rdc}$.

4.1. Az átszűrődási ellenállás felső korlátja

Az átszűrődási ellenállás felső korlátja a következő összefüggéssel számítható:

$$V_{Rdmax} = k_{sys} k_\psi \frac{\sqrt{f_{ck}} [\text{MPa}]}{\gamma_c} b_0 d_v \leq \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v$$

ahol a k_{sys} tényező azt veszi figyelembe, hogy az átszűrődási vasalás milyen hatékonyan korlátozza a kritikus repedés megnyílását, helyezi többtengelyű feszültségállapotba a fiktív nyomott beton rácsrudat (abroncsolás). Általános esetben a $k_{sys}=2.0$ alkalmazható.

Az EC2 2016-17-es módosításához hasonlóan lehetőség van arra, hogy a felső korlát számításakor a tervező figyelembe vegye az alkalmazott vasalás típusát, elhelyezését és a kivitelezés körülményeit:

- $k_{sys}=2.4$ a nyomott oldalon tökéletesen lehorgonyzott, a húzott oldalon kampózott kengyelek alkalmazása esetén.
- $k_{sys}=2.8$ a szár háromszorosát elérő átmérőjű zömített fejjel kialakított csapok alkalmazása esetén.

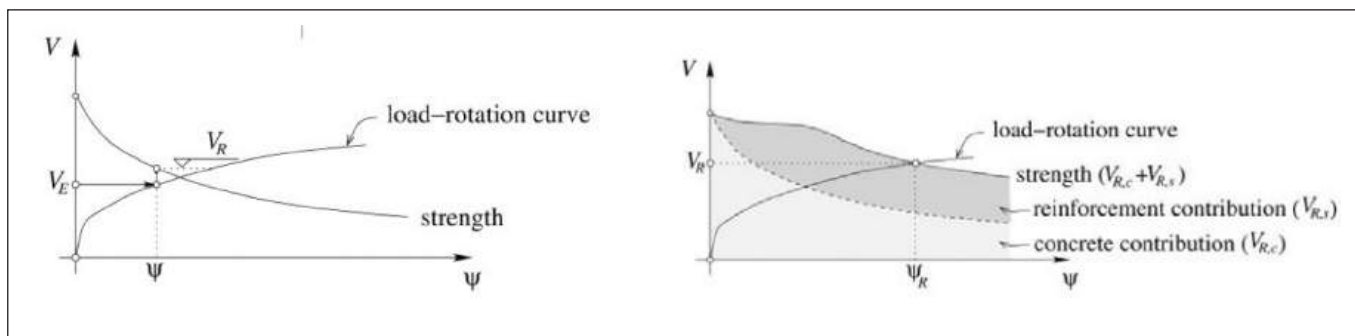
A növelt k_{sys} értékek alkalmazásának feltételei:

- A vasalási elemek sugárirányú távolsága elegendően kicsi: $s_0 \leq 0.5d_v$; $s_1 \leq 0.6d_v$.
- A vasalási elemek elhelyezési távolságát, alsó és felső betonfedését (c_v) (helyes függőleges pozíciót) a helyszínen ellenőrzik.

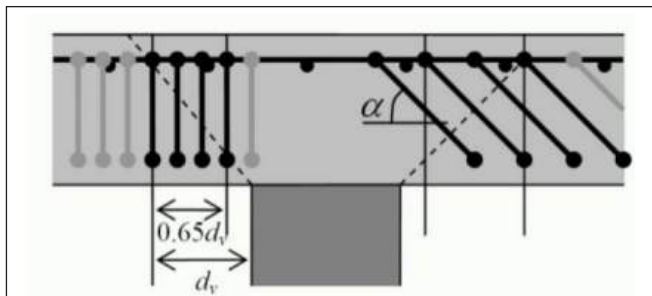
A lemez átszűrődásra vasalható, ha $V_{Rdmax} \geq V_{Ed}$.

4.2. AZ ÁTSZÜRÖDÁSRA VASALT LEMEZ ÁTSZÜRÖDÁSI ELLENÁLLÁSA

A vasalt lemez ellenállása a beton és a vasalás teherbírásának összegéként számítható. Más modellekhez hasonlóan a beton



6. ábra: Erő-elfordulás (load-rotation curve) összefüggés, tönkremeneteli kritérium (strength) valamint a beton ($V_{R,c}$) és az átszűrődési vasalás részese-sedése ($V_{R,s}$) átszűrődésre vasalatlan, illetve vasalt esetben (Muttoni 2013)



7. ábra: Az első átszűrődési kúp ellenőrzésekor figyelembe vehető átszűrődési vasalás tartósíkra merőleges, illetve ferde vasalás esetén (MC2010)

ellenállását redukálni kell. Ennek részleteit a 6. ábra mutatja be. Ha a mértékadó átszűrő erő kisebb, mint a tönkremeneteli kritérium által meghatározott ellenállás ($V_E < V_R = V_{Rdc}$), a lemez átszűrődési vasalás nélkül megfelelő. Ellenkező esetben az elvárt ellenállás (V_R) kimetszi az erő-elfordulás görbe megfelelő elfordulás értékét (ψ_R), illetve a hozzá tartozó redukált beton-teherbírás értéket ($V_{R,c}$). A fennmaradó erőt a vasalás veszi fel ($V_{R,s}$ vagy $V_{Rd,s}$). Az ábrán jól kivehető, hogy a nagyobb teherhez tartozó nagyobb alakváltozás (görbület, repedéstágasság) csökkenő beton teherbírásrészt eredményez.

$$V_{Rds} = \sum A_{sw} k_e \sigma_{swd} \sin \alpha (\geq 0.5V_{Ed})$$

A nyírási vasalás teherbírása a 45° -os átszűrődési kúp által metszett lehorgonyzott vasalás figyelembe vételével számítható. A 7. ábra szerinti $0.65d_v$ zónán belüli lehorgonyzott vasak tekinthetők hatékonyak ($\sum A_{sw}$). Az EC2 szerinti $1.5d$ helyett $0.65d_v$ távolságot kell alkalmazni. Ez azt eredményezi, hogy a vasalást terhelő erőt gyakran mindössze néhány (2-3) kerület mentén elhelyezett vasalással kell felvenni.

A növekvő alakváltozás az átszűrődési vasalás nagyobb nyúlását okozza, ezért a ψ érték növekedése a vasalás σ_{sw} hatékony feszültségének növelését eredményezi:

$$\sigma_{swd} = \frac{E_s \psi}{6} (\sin \alpha + \cos \alpha) \left(\sin \alpha + \frac{f_{bd}}{f_{ywd}} \frac{d}{\phi_w} \right) \leq f_{ywd}$$

A 6. ábra jobb oldalán látható, hogyan nő a vasalás által felvehető erő a ψ növekedésével (sötétebb kitöltés).

4.3. Az átszűrődésre vasalt zóna méretének meghatározása

Vasalt zónának az a tartomány nevezhető, ahol az átszűrődési vasalási elemek gyűrűirányú távolsága nem haladja meg a $3d_v$ távolságot, vagy az a tartomány, amelynél a vasalási elemektől irányonként $1.5d_v$ távolságon belüli átszűrődési kerület figyelembe vételével is igazolható az elvárt teherbírás, lásd 8. ábra.

Az átszűrődési vasalási elemek elhelyezését addig kell folytatni, amíg a külső vaselemtől mért $0.5d_v$ távolságra futó átszűrődési kerület (b_0^*) mentén a teherbírás vasalás nélkül is igazolható. Az oszloptól távolodva a vaskiosztás sok esetben ritkítható.

Terjedelmi okokból a szerkesztési szabályokat nem tárgyaljuk.

4.4. Az oszlop környezete duktilitásának, szívósságának biztosítása

Az átszűrődésre vasalt lemez kritikus zónájának duktilitása megfelelőnek tekinthető, ha a vasalás teljesíti a $V_{Rds} \geq 0.5V_{Ed}$ összefüggést.

Az átszűrődésre vasalatlan zóna rideg viselkedésű. A nyomott betonzóna nem képes viselni a rá nehezedő nyomó- és nyíróerőt. A kritikus repedés erőteljesen megnyílik, a húzott oldali hajlítási vasalás kiszakad (9. ábra).

A lemez átszűrődése a teljes szerkezet progresszív tönkremeneteléhez vezethet, amit meg kell akadályozni. Ennek módja az oszlop felett átvezetett nyomott oldali integritási hosszvasalás (a 10. ábra esetében az alsó hosszvasalás), ami a lemez törése esetén kötélhatással gátolja meg annak lezuhanását.

Az integritási vasalás ($\sum A_{sint}$) működését rendkívüli állapotnak lehet tekinteni, ennek megfelelő teherszinten lehet az igénybevételeit számítani⁴. A lehorgonyzott integritási hosszvasalást a lemez nyomott zónájában kell az oszlop fölött átvezetni. Az MC2010 az integritási vasalás ellenállását a folyáshatár tervezési értéke alapján határozza meg.

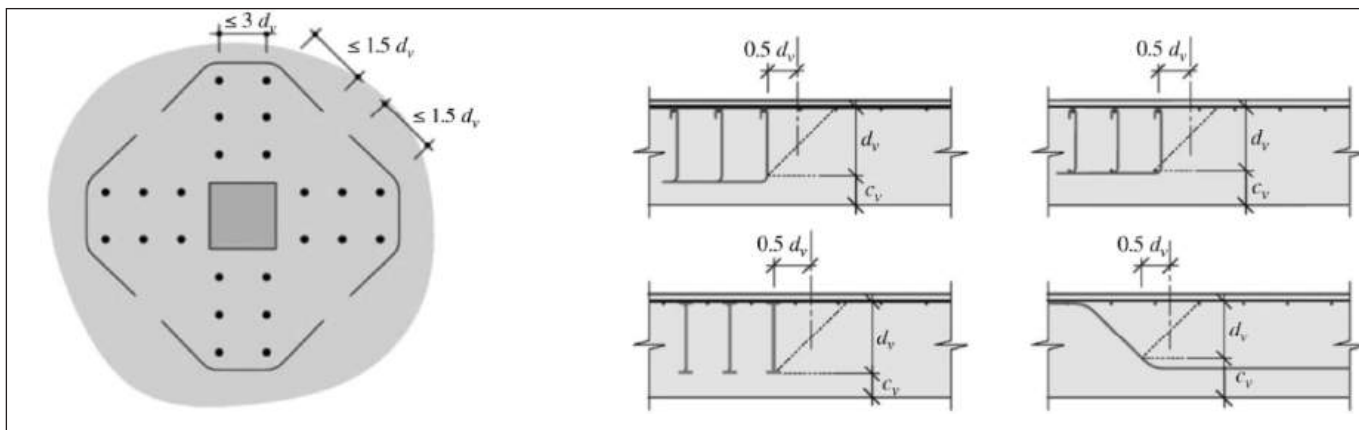
$$V_{Rdint} = \min \left(\frac{\sum A_{sint} f_{yd} \left(\frac{f_t}{f_y} \right)_k \sin \alpha_{ult}}{0.5 \sqrt{f_{ck} [\text{MPa}]} \gamma_c} d_{res} b_{int} \right) \geq V_{Ed,acc}$$

ahol $(f_t/f_y)_k$ az integritási vasalás szakítószilárdsága és folyáshatára hányadosának duktilitási osztálytól függő karakterisztikus értéke.

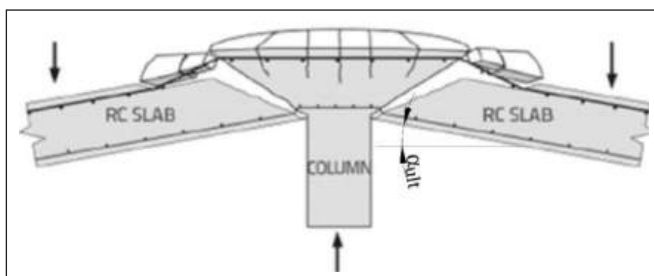
Az összefüggésben szereplő α_{ult} érték az a szög, amit a vasalás a szakadása előtt a kötélként belógó lemezben a vízszintessel bezár (9. ábra). B duktilitási osztályú betonacél esetén $\alpha_{ult} = 20^\circ$, C/D osztály esetén $\alpha_{ult} = 25^\circ$, felhajlított vas esetén pedig $\alpha_{ult} \leq 40^\circ$ alkalmazandó.

Az integritási vasalás teherbírása képletében szereplő b_{int} az átszűrődés után az integritási vasalás által aktivált kerület hossza.

⁴ Az integritási vasalás tervezése szempontjából mértékadó igénybevétel felvételében érzékelhető némi ellentmondás a szabályozásban. Az előírás általános, ezért nem azonosítható a kvázi állandó igénybevétellel együtt átszűrődést okozó rendkívüli hatás. (Következésképpen ennek figyelembevételére sincs lehetőség). Javasoljuk konkrét esetekben annak mérlegelését, hogy az átszűrődést milyen rendkívüli hatás okozhatja (rendkívüli teher vagy megváltozó statikai vázon számítható kedvezőtlenebb igénybevétel-elosztlás, támaszszüllyedés, stb.) Ha valószínűsíthető, hogy a vizsgált oszlopnál a kvázi állandónál nagyobb átszűrő erő hat, javasoljuk az integritási vasalás tervezését a V_{Ed} mértékadó átszűrő erőre elvégezni.



8. ábra: Az effektív átszűrődási kerület szakaszok és a d_v hasznos magasság (MC2010)



9. ábra: Az integritási vasalás működése és az α_{ult} szög értelmezése (Bartolac, Damjanovic és Ivan 2015.) ábrája nyomán

Értéke a 10. ábra szerinti s_{int} és d_{res} távolságok segítségével számítható:

$$b_{int} = \sum \left(s_{int} + \frac{\pi}{2} d_{res} \right).$$

5. AZ MSZ, AZ EC2 ÉS A MC2010 SZERINTI FÖDÉMTEHERBÍRÁS ÉRTÉKEK

A szabványok által közölt módszerek összevetésére számos példát számszerűen kidolgoztunk. Egy irodaépület különböző d/b (hasznos magasság és oldalméret) arányú pillér-födém csomópontjait vizsgáltuk (pince pillér-alaplemez, átlagos méretű közbenső pillér, karcsú tetőszinti pillér) eltérő kihasználtsági fok mellett (alacsony, közepes, magas). A kihasználtság jelen esetben azt jelenti, hogy mennyire közelíti meg az átszűrő erő az átszűrődási teherbírás felső korlátját. Minden kihasználtsági szinten hat esetet elemeztünk, melyek d/b aránya a 0.42-1.89 tartományban mozgott. A teherbírás számításokhoz az EC2 alapján felvettünk egy átszűrődási vasalás kiosztást, ami az

adott geometria és terhek mellett megfelelő teherbírással rendelkezik, majd ezt az elrendezést ellenőriztük a többi szabvány szerint. Az 1. táblázatban ennek az eredményei láthatóak. Az összehasonlítást elvégeztük az EC és MC szerinti felső korlátok leggyakrabban használt értékeivel ($k_{max} = 2.0$; $k_{sys} = 2.0$), illetve a szabványok által megengedhető legmagasabbakkal is ($k_{max} = 2.5$; $k_{sys} = 2.8$). A teherbírás értékek mellett különböző részeredményeket (vizsgálandó átszűrődási kerület hossza, beton által felvehető nyíróerő, vasalás által felvehető nyíróerő stb.) is közlünk. Megjegyezzük, hogy a módszerek objektív összehasonlítása igen nehéz, mert sok és eltérő paramétertől függnek az eredmények, ráadásul több esetben elágazásokat tartalmaznak az algoritmusok, illetve a paraméterek változtatásával esetenként ugrásszerű a teherbírás értékek változása. A szabványok ilyen összevetése e nehézségek ellenére fontos szerepet kap, ha egy EC2 szerint tervezett épületet később pl. funkció váltás miatt MC szerint ellenőrizni kell

Az összehasonlításokban az alábbi feltételezésekkel számoltunk:

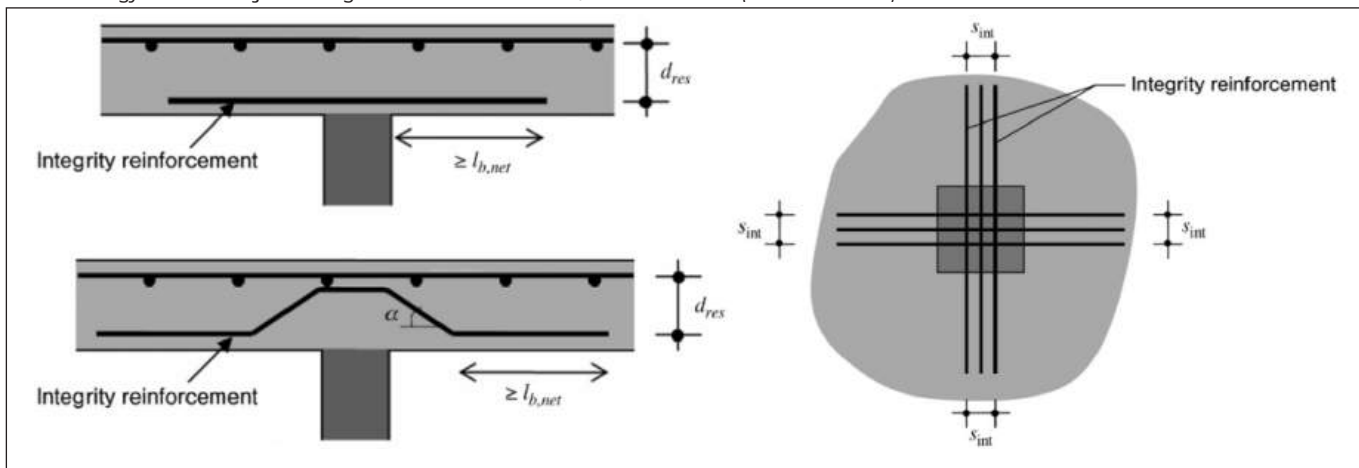
- átszűrődási vasalás típusa: zömített fejű csapok sugárirányban kiosztva
- betonacél folyáshatár karakterisztikus értéke: 500 MPa
- a hajlítási vasalás megfelelően le van horgonyozva
- beton szilárdsági osztály: C30/37.

A táblázatot vizsgálva az alábbi megfigyeléseket tehetjük:

A vizsgált esetek alapján kijelenthető, hogy az EC2 szerint megtervezett oszlopfej számított teherbírása a másik két szabvány szerint számítva szinte minden esetben kisebb lesz. A számítási részeredmények elemzésével a következők figyelhetők meg:

- Az eltérő vizsgálati kerületek miatt az EC2 több átszűrődási vassort vesz figyelembe, illetve nagyobb kerületen összegzi a beton fajlagos határerejét.
- A beton által felvehető átszűrő erő – még a 75%-os redukció

10. ábra: Egyenes és felhajlított integritási vasalás – metszetek, illetve felülnézet (MC2010 7.3-34)



1. táblázat: A kidolgozott esetek eredményei ($k_{max}=2.0$ $k_{sys}=2.0$ bal oldalt; $k_{max}=2.5$; $k_{sys}=2.8$ jobb oldalt-csak a változó mennyiségeket ismételtük meg)

				$k_{max}=2.0; k_{sys}=2.0$										$k_{max}=2.5; k_{sys}=2.8$													
B [mm]	d/d_f [mm]	d/B [-]	ρ_l [%]	u_{EC} [mm]	u_{MC} [mm]	u_{MSZ} [mm]	$V_{Rot,EC}$ [kN]	$V_{Rot,MC}$ [kN]	T_{Tis} [kN]	$V_{Rot,EC}$ [kN]	$V_{Rot,MC}$ [kN]	T_{Tis} [kN]	$V_{Rot,EC}$ [kN]	$V_{Rot,MC}$ [kN]	T_{Tis} [kN]	$V_{Rot,EC}$ [kN]	$V_{Rot,MC}$ [kN]	T_{Tis} [kN]	$V_{Rot,EC}$ [kN]	$V_{Rot,MC}$ [kN]	T_{Tis} [kN]						
500	210	0.42	1.63	4639	2660	2660	550	388	213	1007	1446	887	1640	1834	1160	1439	776	1943	1439	<u>776</u>	1160	1835	1086	1640	<u>1086</u>	1160	
300	210	0.70	1.63	3839	1860	1860	456	271	118	883	1259	774	1407	1530	935	1157	542	1358	1157	<u>542</u>	935	1157	759	1157	<u>759</u>	935	
250	210	0.84	1.21	3639	1660	1660	391	279	125	670	964	593	1120	1243	756	964	<u>558</u>	756	964	781	964	781	964	781	<u>756</u>	964	
200	210	1.05	1.21	3439	1460	1460	369	245	95	673	964	593	1098	1209	722	771	491	1066	771	<u>491</u>	722	771	687	771	<u>687</u>	722	
800	1135	1.42	0.60	17463	6766	6766	5769	1607	2336	25786	13830	15102	32420	15437	17714	15076	3213	26710	15076	<u>3213</u>	17714	16676	4498	16676	<u>4498</u>	17714	
600	1135	1.89	0.60	16663	5966	5966	5505	1417	1700	25826	13830	15102	32156	15247	17046	12507	2833	23552	12507	<u>2833</u>	17046	12507	3966	12507	<u>3966</u>	17046	
500	210	0.42	2.00	4639	2660	2660	590	353	153	1364	1928	1182	2042	2281	1396	1541	707	1943	1541	<u>707</u>	1396	1928	989	1928	<u>989</u>	1396	
300	210	0.70	1.66	3839	1860	1860	459	269	118	883	1259	774	1411	1528	935	1157	539	1358	1157	<u>539</u>	935	1157	754	1157	<u>754</u>	935	
250	210	0.84	1.59	3639	1660	1660	428	255	88	887	1259	774	1380	1514	901	964	509	1212	964	<u>509</u>	901	964	713	964	<u>713</u>	901	
200	210	1.05	1.30	3439	1460	1460	379	238	95	672	964	593	1108	1202	722	771	476	1066	771	<u>476</u>	722	771	666	771	<u>666</u>	722	
800	1135	1.42	0.81	17463	6766	6766	6387	4044	1661	31616	7898	18458	38961	11942	20395	16676	8087	26710	16676	<u>8087</u>	20395	16676	1132	16676	<u>11320</u>	20395	
600	1135	1.89	0.64	16663	5966	5966	5641	3799	2702	17025	5280	10127	23513	9079	13072	12507	7598	23552	12507	<u>7598</u>	13072	12507	1064	12507	<u>10640</u>	13072	
500	210	0.42	1.18	4639	2660	2660	495	433	276	628	1062	571	1197	1495	908	1292	867	1943	1197	<u>867</u>	908	1649	1213	1197	1213	<u>908</u>	908
300	210	0.70	0.98	3839	1860	1860	385	324	197	410	708	381	853	1032	620	1005	648	1358	853	648	<u>620</u>	1157	907	853	907	<u>620</u>	620
250	210	0.84	1.08	3639	1660	1660	377	293	167	412	708	381	845	1001	586	964	586	1212	845	<u>586</u>	586	964	820	845	820	<u>586</u>	586
200	210	1.05	1.03	3439	1460	1460	351	265	138	416	708	381	819	973	552	771	529	1066	771	<u>529</u>	552	771	741	771	741	<u>552</u>	552
800	1135	1.42	0.50	17463	6766	6766	5430	1782	4350	8174	9220	5093	14418	11002	9719	14190	3563	26710	14190	<u>3563</u>	9719	16676	4988	14418	<u>4988</u>	9719	
600	1135	1.89	0.47	16663	5966	5966	5094	1557	3211	12639	9220	7595	18498	10777	11050	12507	3115	23552	12507	<u>3115</u>	11050	12507	4360	12507	<u>4360</u>	11050	

figyelembe vételével is – az EC2 esetében a legnagyobb.

- A nagyobb hatékony feszültség miatt gyakran magasabb az átszűrődési vasalás MC szerinti ellenállása, a figyelembe vett vasak alacsonyabb száma ellenére is.
- Bár a MC esetében a vasalás által felvehető erő gyakran jóval nagyobb, mégis az EC2 szerinti teherbírás lesz magasabb, mert a MC szerinti felső korlát gyakran korlátozza azt.
- Az MSZ nem csökkenti a vasalás effektív feszültségét, viszont csak 0,85d széles zónán belül veszi figyelembe a csapokat. Ez a vizsgált esetekben többnyire csak az első sort (fajlagosan számolva ~1,3 sornyt) jelenti. Így összességében azonos átszűrődési ellenállás eléréséhez nagyobb átszűrődési vasmenyiség elhelyezésére van szükség MSZ szerint, mint EC2 szerint.

Az átszűrődési teherbírás felső korlátját illetően az alábbi megállapítások tehetők:

- A MC a legszigorúbb a felső korlát tekintetében. Az EC2 módosítása jelentős szigorítást jelent a kis d/b arányú lemezek esetében. Egyedül a nagy vastagságú lemezek vizsgálatok fordul elő EC2 esetében, hogy közepes és magas teher szinten is a vasalás teherbírása a mértékadó.
- Az MSZ felső korlátja magas. Így minden vizsgált esetben

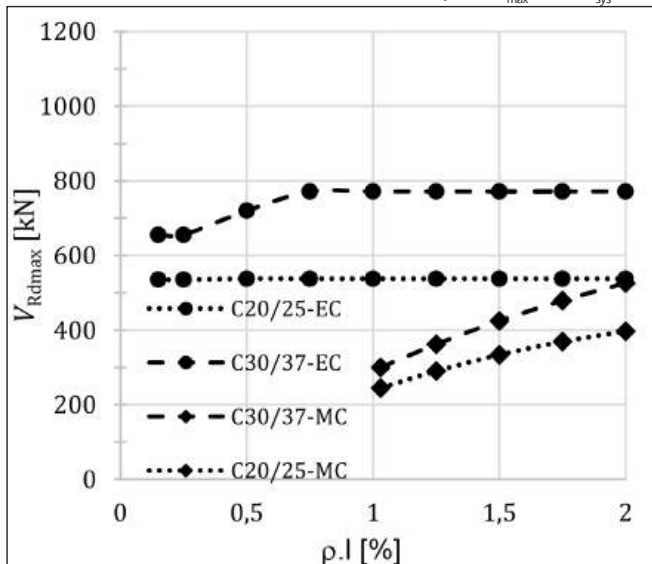
a vasalás határereje volt a mértékadó. A vasalás alkalmas növelésével az MSZ esetében növelhető leginkább a teherbírás értéke.

- Az MSZ szerinti felső korlát csak a betonminőségtől, az EC2 szerinti azonban néhány további paramétertől is függ. A MC felső korlátjának meghatározása a legbonyolultabb. Ez alapvetően összefügg a hajlítási vasalás tervezésével.

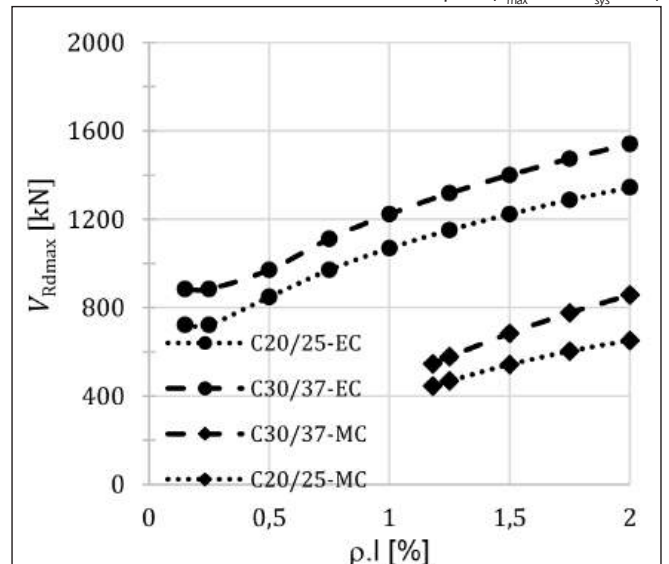
6. AZ ÁTSZÜRÖDÁSI TEHERBÍRÁS FELSŐ KORLÁTJÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA AZ EC2 ÉS A MC2010 SZERINT

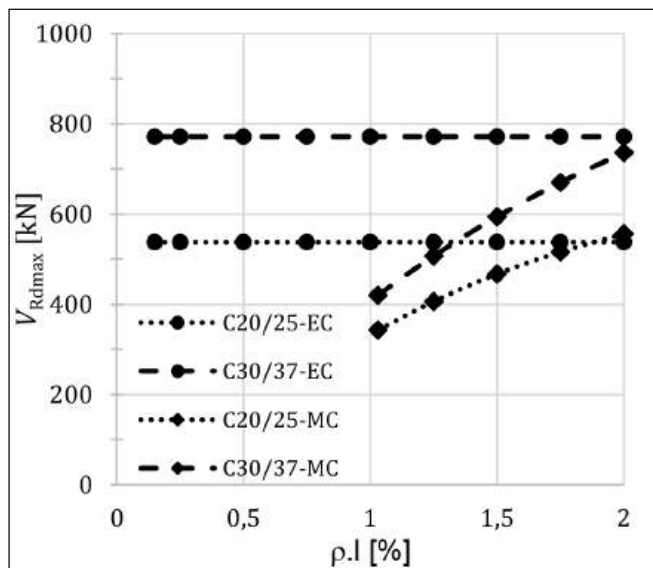
Az EC2 szerinti felső korlát 2016-os módosítása nagy megdöbbenést váltott ki a tartószerkezeti tervezők körében. Ennek fényében érdekes, hogy mire kell számítanunk a jövőben az adott lemezvastagsággal áthidalható támaszközök kérdésében. Készítettünk egy rövid összehasonlítást, melyben a jelenlegi EC2 és a MC átszűrődési teherbírásának felső korlátját hasonlítjuk össze a hajlítási vashányad függvényében. Az alábbi összehasonlítás nem általánosan érvényes, hanem csak

11. ábra: Felső korlátok összehasonlítása 20/20 pillér ($k_{max}=2.0$; $k_{sys}=2.0$)

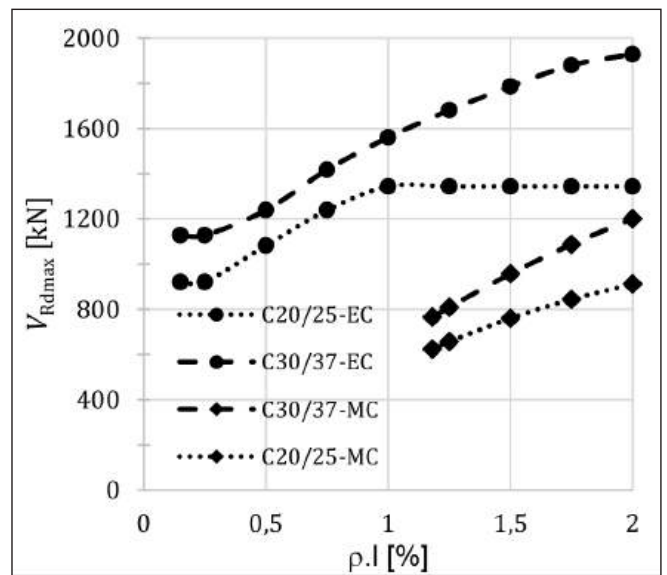


12. ábra: Felső korlátok összehasonlítása 50/50 pillér ($k_{max}=2.0$; $k_{sys}=2.0$)





13. ábra: Felső korlátok összehasonlítása 20/20 pillér ($k_{max}=2.5$; $k_{sys}=2.8$)



14. ábra: Felső korlátok összehasonlítása 50/50 pillér ($k_{max}=2.5$; $k_{sys}=2.8$)

a vizsgált – tipikus – pillér-födém elrendezéshez (méretek, vasalás, teher) használható közvetlenül. Az eredmények a különböző tendenciák érzékeltesére alkalmasak.

A vizsgált elrendezés egy 20/20 és egy 50/50 cm-es pillérhez tartozik, melyek egy 25 cm vastag födémlemezhez kapcsolódnak. A 100%-os nyomatéki kihasználtságot pl. ~1%-os hajlítási vashányaddal kapjuk. A következőkben 2×3 db diagramot közlünk, melyek vízszintes tengelyén a fajlagos hajlítási vashányad, függőleges tengelyén pedig az átszűrődési teherbírás felső korlátja található. Az első két ábra (11.-12. ábrák) a $k_{max}=2.0$, illetve $k_{sys}=2.0$ esethez, míg a következő kettő (13-14. ábrák) a $k_{max}=2.5$; $k_{sys}=2.8$ esethez tartozik. A C20/25 és a C30/37 betonszilárdsági osztályokat vizsgáltuk.

A MC felső korlátja gyakorlatilag minden vizsgált esetben kisebbre adódik, mint az EC2 szerinti érték. Tekintve, hogy a vizsgált esetek tipikusak a tendencia világos: a MC szigorítja az átszűrődési teherbírás felső korlátját a jelenleg hatályos szabványhoz képest.

Megjegyezzük, hogy – amennyiben az geometriailag lehetséges – a hajlítási vasalás növelésével (a hajlítási kihasználtság csökkentésével) az elérhető átszűrődési felső korlát növelhető.

7. ÖSSZEFOGLALÁS, JAVASLATOK

Áttekintettük az utolsó MSZ, az EC2 és a várhatóan a közeljövőben bevezetésre kerülő MC átszűrődési méretezésre vonatkozó előírásait, és elemeztük néhány tipikus EC2 szerint megtervezett magasépítési síklemez födém szabványos ellenállását. Elemeztük a komponensenkénti és a végeredményben látszó különbségeket és azok hátterét.

A síklemez födémek jövőbeli versenyképessége szempontjából legfontosabb megállapítás szerint a MC bevezetésével az azonos lemezvastagsággal és betonszilárdsággal áthidalható támaszköz mérete csökken. Az építészeti trendek viszont nem tolerálják az oszlop raszterek csökkentését, ezért a versenyképesség fenntartásához a tervezői gyakorlat módosítása, és sok esetben fejlesztések szükségesek. Az egyik irány a lemezek betonszilárdságának növelése, vagy az oszlopok területének növelése. E mellett javasolt olyan megoldások fejlesztése, amelyek alacsony helyszíni élőmunka és rövid építési idő útján képesek kiszolgálni a kor igényeit. A körülmények várhatóan arra sarkallják a mérnököket, hogy a monolit és az előregyártott megoldások előnyeinek ötvözésével alakítsanak ki félmonolit gombafejes födémeket.

8. IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- Bogdányi, B., Hegedűs, I. (2014): A nyomott öv nyírási teherbírása és az Eurocode szerinti nyírási ellenállás kapcsolata. Vasbetonépítés. 2014/3. pp.62-67.
- Kinnunen S., Nylander H. (1960): Punching of Concrete Slabs Without Shear Reinforcement. Transactions of the Royal Institute of Technology. No.158. Stockholm, Svédország.
- Magyar Mérnöki Kamara Tartószerkezeti Tagozat (MMK) (2004): Síklemez födémek átlukadás elleni méretezése. Budapest
- Muttoni A. (2008): Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. ACI Structural Journal, July-August pp.440-450.
- Muttoni, A., Fernández, R. M., (2009): Application of the critical shear crack theory to punching of R/C slabs with transverse reinforcement. ACI Structural Journal, 106, 4, pp. 485-494, <https://doi.org/10.14359/56614>
- Muttoni A., Ruiz M. F., Bentz E., Foster S., Sigris V. (2013): Background to fib Model Code 2010 Shear provisions – part II. Punching shear. Structural Concrete 14 No.3. pp.204-214., <https://doi.org/10.1002/suco.201200064>
- Völgyi, I., Windisch, A. (2014): Resistance of reinforced concrete members with hollow circular cross-sections under combined bending and shear - Part II: New calculation model. Structural Concrete. 15/1. pp.21-29., <https://doi.org/10.1002/suco.201200036>
- Völgyi, I., Windisch, A. (2017): Experimental investigation of the role of aggregate interlock in the shear resistance of reinforced concrete beams. Structural Concrete, pp.792-800., <https://doi.org/10.1002/suco.201600137>
- Walraven J. C. (1981): Fundamental Analysis of Aggregate Interlock. Journal of Structural Engineering. ASCE V.107. No.11 pp.2245-2270.
- Windisch A. (1988): Das Modell der charakteristischen Bruchquerschnitte. Beton und Stahlbetonbau. 83 pp.251-255., <https://doi.org/10.1002/best.198800400>

Jobbágy Dávid (1991) okleveles építőmérnök (2016), M-TEAMPANNON Kft. tartószerkezeti tervező: középületek, irodaházak tervezése.

Dr. Völgyi István (1979) okleveles építőmérnök (2002), Betontechnológiai szakmérnök (2009), PhD (2011), a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék docense. Kapcsolódó kutatási területek: vasbeton rúdszerkezetek nyírási viselkedése, vasbeton lemezek átszűrődési viselkedése. A *fib* Magyar Tagozat tagja.

DEVELOPMENT OF DESIGN CODES FOR PUNCHING DESIGN OF REINFORCED CONCRETE SLABS

Dávid Jobbágy – Istvan Völgyi

The design rules for punching of reinforced concrete slabs according to the MSZ EN 1992 standard has been changed a few years ago. The more strict rules have a significant effect on the thickness and competitiveness of the reinforced concrete slabs. The aim of the paper is to show the trends of this field in the close future. The punching design method of the Model Code 2010 and background is shown in the paper. The design resistance for slabs of typical buildings according to the earlier hungarian standard (MSZ15022), the current standard (MSZ EN 1992) and the Model Code 2010 is analysed.