

Уопште о прорачуну угиба бетонских конструкција

Независно од ког материјала су направљене, конструкције изложене оптерећењу се деформишу. За инжењерске сврхе од значаја могу бити и вертикална и хоризонтална померања. Вертикална померања (угиби) су у највећој мери резултат деловања гравитационих оптерећења и доминантно су узрокована деформацијама услед момената савијања. Хоризонтална померања која се контролишу су углавном изазвана хоризонталним дејствима (сеизмика, ветар). Она су такође резултат деформација услед момената савијања и, у неким случајевима, услед трансверзалних сила.

Прорачун деформација бетонских конструкција, у већини случајева, доста је сложенији од одговарајућег прорачуна конструкција од других материјала, на пример метала или дрвета. Прорачун је усложњен због два узрока:

- (1) Бетонске конструкције су углавном статички неодређене, а крутост елемената (EI , EA) се мења услед настајања прслина;
- (2) Дилатације услед течења и скупљања бетона нису обухваћене Хуковим законом.

(1) Армиранобетонске конструкције су у великом броју случајева многоструко статички неодређене. Прорачун пресечних сила се спроводи софтверима на моделима који у највећем броју случајева не узимају промену крутости услед настанка прслина. Померања која се добијају као резултат прорачуна нису тачна по два основа. Прво, пресечне силе статички неодређене конструкције, израчунате на моделу који нема коректно моделиране крутости, су приближне. Друго, и деформације, које се израчунавају из тих пресечних сила, рачунају се на основу крутости која није коректно моделирана.

(2) Примена линеарне везе напон - дилатација (Хуков закон) у је основи већине софтвера који се користе при прорачуну. Дилатације настале услед течења и скупљања бетона не уклапају се у овај приступ. С друге стране, дилатације услед течења су у већини случајева веће од еластичних (Хукових) дилатација од дуготрајног оптерећења које им одговарају. Деформације су последица укупних дилатација. То значи да је „учинак“ течења у произвођењу деформација најчешће већи од почетне еластичне деформације, те да мора бити узет у обзир. Скупљање бетона најчешће додатно увећава деформације. Уобичајени излаз софтвера (напони, померања) најчешће укључује само деформације које су директна последица напона.

У наставку ће бити речи углавном о прорачуну и контроли вертикалних деформација – угиба армиранобетонских елемената доминантно напрегнутих на савијање. У суштини, то су армиранобетонске греде и плоче, које су најчешћи елементи међусpratних и кровних конструкција зграда.

Разлози за контролу угиба

Превелики угиби веома ретко угрожавају граничну носивост и трајност конструкције. Разлози за контролу (то јест ограничавање) угиба су другачијег карактера и могу се сврстати у две групе:

- (1) Визуелни (естетски) и
- (2) Функционални.

(1) Визуелни разлози се односе на нелагодност коју изазивају конструкције чије су деформације приметне. Реакције у таквим случајевима су субјективне и крећу се у распону од „не изгледа лепо“ до сумње у способност конструкције да носи оптерећење.

(2) Функционални разлози се односе на настајање проблема у експлоатацији конструкције. Најчешћи проблеми повезани са прекомерним угибима у зградарству су настајање оштећења (напрслина) у крутим кртим неконструктивним елементима ослоњеним на конструкцију (на пример зиданим преградним зидовима), заглављивање столарије или губитак нагиба за одводњавање.

Ограничења угиба која проистичу из функционалних разлога обично су „оштрија“ од визуелних (то јест угиб не мора да буде приметан да би представљао проблем).

Битне напомене везане за контролу угиба

(А) Угиб је потребно контролисати. У претходним деценијама контроли угиба на нашим просторима се придавао мањи значај услед чега се, по инерцији, и данас тако неретко поступа. Чињеница је да, до пре двадесетак година, конструкције пројектоване према задовољењу *ULS* критеријума, а без детаљног разматрања *SLS* критеријума, нису исказивале проблеме у експлоатацији. Томе је доприносило неколико чинилаца: техника прорачуна, примењени материјали и начини градње. Следеће промене, везане за ове чиниоце, су у међувремену довеле до погоршања *SLS* услова:

- „Ручна“ техника прорачуна пресечних сила замењена је аутоматизованим прорачуном методом коначних елемената. Интегрални софтверски модели имају далеко већи степен статичке неодређености и, у већини случајева, дају мање утицаје него поједностављени модели добијени декомпозицијом конструкције при „ручном“ прорачуну. Тако срачунати моменти савијања допуштају „слабије“ пресеке.
- У употребу су ушли конструкциони материјали већих чврстоћа. Раније коришћене арматуре са $f_{yk} = 240$ и 400 МПа замењене су арматуром B500. Користе се и бетони већих чврстоћа што, заједно са претходним, омогућава употребу још мањих пресека носећих елемената. С друге стране, модули еластичности ових јачих материјала се не разликују битније од претходно коришћених. У укупном, то значи да се исти *ULS* услови могу савлађују елементима мање крутости, а то значи уз веће угибе.
- Велики напредак у технологији грађења знатно је убрзао извођење радова, скраћујући „такт“ градње (на пример израду конструкције једног спрата у зградарству). Последица је знатно раније оптерећивање бетона, пре свега сопственом тежином конструкције, што за последицу има значајно увећане деформације услед течења и настанак прслина у већем обиму, а тиме увећање угиба.

Побројане промене, које у суштини изражавају напредак у грађевинарству, као „нуспојаву“ реактивирале су проблем угиба. У практичном смислу то значи да се може очекивати да услов ограничења угиба може да буде меродаван при пројектовању конструкција – то јест при избору величине пресека и његовом армирању. Носачи посебно осетљиви на угиб су плоче које носе у једном правцу и греде са високим напонима притиска у бетону у распону.

(В) Ваљан прорачун угиба није једноставан. Угиб (деформација) армирано-бетонских конструкција зависи од много параметара и појава. Оно што прорачун чини сложеним није математичка комплексност (која се може савладати применом софтвера), већ потребно знање за прикладно дефинисање прорачунског модела. При прорачуну, у зависности од сложености модела, могу се разматрати:

- геометријске карактеристике носача (распон, облик и величина бетонског попречног пресека);
- модул еластичности (деформације) бетона и арматуре;
- чврстоћа бетона при затезању;
- количина и распоред арматуре у пресеку;
- историја оптерећења и величина укупног оптерећења (ниво напрезања материјала);
- промена крутости због формирања прслина и садејство затегнутог бетона;
- статички систем носача и облик дијаграма момента;
- течење бетона;
- скупљање бетона;
- прерасподела утицаја у статички неодређеним системима услед промене крутости;
- прерасподела утицаја у статички неодређеним системима услед течења и скупљања бетона.

(С) Сви поступци за контролу угиба бетонских конструкција су приближни.

Данашњи степен развоја инжењерске науке не омогућава прецизно предвиђање угиба. Подела поступака на приближне и „тачне“ (мање непрецизне) односи се у највећем броју случајева на број релевантних параметара који се узимају у обзир, као и на сложеност примењених модела за поједине чиниоце.

(Д) Померање $\neq$ угиб. Ограничење угиба односи се на деформацију (од савијања) елемента који се разматра, уз укључивање појава набројаних под (В). Приликом прорачуна (ручно, а нарочито софтверима) најчешће се као резултат добијају вертикална померања. Вертикално померање може да, у зависности од позиције која се разматра, представља збир деформације (угиба) и „слегања“ (кинематичког померања – померања као крутог тела). Због тога је неопходно да се, пре провере испуњености ограничења угиба, одреди „стварни“ (деформацијски) угиб, уклањањем кинематичког дела.

Ограничења угиба која препоручује Еврокод 2

Еврокод 2 усваја ограничења угиба која дефинише међународни стандард ISO 4356. Угиб од квази-сталног оптерећења генерално је ограничен на распон/250. У суштини, ово је ограничење које задовољава визуелни критеријум а односи се на такозвани „тотални угиб“ од дуготрајног оптерећења. Уколико на конструкцији постоје елементи осетљиви на превелике угибе (преградни зидови, стаклене фасаде, други завршни радови) препоручено је ограничење прираста угиба након завршетка градње („активни угиб“) на распон/500.

Параметарске студије, урађене приликом израде МС 2010 и Еврокода 2, показале су да је ограничење активног угиба меродавно, када се примењује (услов према активном угибу је оштрији од услова према тоталном угибу). С друге стране, срачунавање активног угиба је доста компликованије у односу на

срачунавање тоталног угиба. Проблем није толико у знатно већем обиму рачунања, колико у чињеници да је потребно дефинисати вредности неколико додатних параметара који учествују у прорачуну. Резултат прорачуна може у великој мери да зависи од вредности ових параметара. Може да буде прагматично да се у тим случајевима ипак срачуна тотални угиб, али да се примени оштрије ограничење, на пример распон/300.

Требало би имати у виду да приступ садржан у ограничавању тоталног угиба под квази-сталним оптерећењем по својој суштини више представља ограничавање деформабилности конструкције у еталонским условима, него настојање да се предвиди стварни угиб конструкције. Другим речима, стварни угиб конструкције у експлоатацији може бити и (доста) различит од срачунатог.

Поступци за контролу угиба према Еврокоду 2

Еврокод 2 даје две могућности за контролу угиба.

Прва могућност је да се контрола спроведе без срачунавања угиба (индиректни поступак). Овај поступак користи гранични однос распон/статичка висина (L/d). Основна предност овог поступка је једноставност и брзо долажење до резултата. Међутим, поступак је изведен уз претходно усвајање вредности скоро свих релевантних параметара (наведених под (B)), што ограничава његову примену. У периоду након публиковања у литератури су се појавиле и озбиљне критике које се односе на његову примену. Аутори су недавно предложили одређена побољшања. Могуће је да ће текст Еврокода 2 у овом делу у будућности бити модификован. На пројектанту је да процени да ли је поступак прикладан за конструкцију коју решава (често није!). Као алтернатива увек остаје могућност прорачуна угиба.

Друга могућност је да се угиб срачуна и потом упоређи са ограничењем. Постоје две варијанте са срачунавањем угиба. У приближној варијанти срачунава се величина угиба двапут – једном са крутошћу неиспрског пресека (ознаке величина носе индекс „I“), а други пут са крутошћу пресека са прслином (индекс „II“). Коначан резултат (угиб од квази-сталног оптерећења) добија се интерполирањем између две срачунате вредности. Ова варијанта се може означити као задовољавајућа за практичне потребе. Друга, прецизнија, варијанта подразумева нумерички поступак са израчунавањем ефективне кривине у великом броју пресека. Иза једноставно постављеног принципа, међутим, крију се бројне препреке за примену оваквог поступка у практичним инжењерским прорачунима.

Контрола угиба прорачуном – приближна варијанта

- улазни подаци за прорачун

Квази-стално оптерећење се састоји од сопствене тежине конструкције (g), додатних сталних терета ($\Delta g_1, \Delta g_2, \Delta g_3 \dots$) и стално присутног дела променљивих терета ($\psi_{2,1}q_1, \psi_{2,2}q_2, \psi_{2,3}q_3, \dots$). Сва ова оптерећења посматрају се као стална дејства: $g_1, g_2, g_3, g_i, \dots$ која се „активирају“ у временским тренуцима $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i$. Време се одмерава од справљања (уградње) бетона.

Под „историјом оптерећења“ подразумевају се величине оптерећења g_i и времена њиховог наношења t_i . За прорачун угиба потребно је за свако стално дејство g_i одредити одговарајућу коначну вредност коефицијента течења $\varphi(\infty, t_i)$.

Вредност коефицијената течења може се срачунати помоћу израза датих у Анексу Б Еврокода 2, или прочитати са номограма (поглавље 3.1.4 Еврокода 2, Слика 3.1) или из таблица, на у прилогу на кају текста. Коефицијент течења зависи од:

- старости бетона t_i у тренутку наношења оптерећења;
- (релативне) влажности средине (RH);
- номиналне димензије елемента (h_0)
- чврстоће при притиску (f_{cm});
- класе цемента (S, N, R).

За практичне прорачуне у зградарству најчешће се разматрају само три стална дејства – сопствена тежина (g), сумарни додатни стални терет (Δg) и стални део променљивог терета, према употребној намени објекта, ($\psi_2 q$), којима се придружује процењена историја (t_1, t_2, t_3). За њих је потребно одредити три одговарајуће вредности коефицијента течења.

За прорачун угиба од квази-сталног оптерећења потребно је срачунати ефективни коефицијент течења за квази-стално оптерећење:

$$\varphi_{eff} = \frac{g \cdot \varphi(\infty, t_1) + \Delta g \cdot \varphi(\infty, t_2) + \psi_2 q \cdot \varphi(\infty, t_3)}{g + \Delta g + \psi_2 q}$$

Коефицијент течења φ_{eff} из Анекса Б Еврокода 2 се примењује са тангентним модулом бетона E_c чија је вредност: $E_c = 1,05 \cdot E_{cm}$. При прорачуну геометријских карактеристика бетон се урачунава са ефективним модулом $E_{c,eff}$ који износи:

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi_{eff}}.$$

Однос модула еластичности арматуре и ефективног модула бетона користи се при израчунавању потребних геометријских карактеристика:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}}$$

Поред коефицијента течења у прорачун се узима и скупљање бетона. Укупна коначна дилатација скупљања $\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cs}(\infty)$ добија се као:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

Компоненте, дилатација скупљања услед сушења ε_{cd} и сопствена дилатација скупљања ε_{ca} , могу се срачунати према изразима из Еврокода 2 (поглавље 3.1.4 и Анекс Б). Укупна коначна дилатација скупљања дата је у таблицама у прилогу на крају текста. Укупна коначна дилатација скупљања ε_{cs} зависи од:

- (релативне) влажности средине (RH);
- номиналне димензије елемента (h_0)
- чврстоће при притиску (f_{cm});
- класе цемента (S, N, R).

За прорачун је потребна вредност чврстоће бетона при затезању. За конструкције зграда и уобичајене поступке грађења као прикладна величина може се усвојити средња вредност чврстоће при затезању $f_{ctm} (= f_{ctm}(28))$.

Момент отварања прслина M_{cr} може се довољно тачно срачунати коришћењем карактеристика бетонског бруто пресека:

$$M_{cr} = \frac{I_c}{z_{c,1}} \cdot f_{ctm} = W_{c,1} \cdot f_{ctm}$$

где је $z_{c,1}$ одстојање његовог тежишта од затегнуте ивице 1, а I_c сопствени момент инерције.

- избор модела прорачуна

Под избором модела подразумева се процена да ли угиб носача треба прорачунавати по моделу без прслина (у распону) или са прслинама. Прслине се јављају уколико затезање услед момента савијања и скупљања бетона пређе чврстоћу при затезању бетона. Овде се често чини грешка тако што се разграничавање модела врши упоређивањем вредности максималног момента у пољу M_D са M_{cr} (логиком $M_D < M_{cr}$ - значи нема прслина). То је погрешно (и на страни несигурности) из два разлога:

- M_D је момент од квази-сталног оптерећења. Носач је у експлоатацији изложен и вишим нивоима оптерећења, на пример при карактеристичној комбинацији, када могу настати прслине. Прслине (а то значи смањена крутост) остају трајно, и након смањивања променљивих оптерећења.
- Скупљање бетона производи затезање које се сабира са затезањем од оптерећења. То значи да и моменти мањи од M_{cr} могу да, уколико има довољно затезања од скупљања, изазову прслине.

Претходне чињенице се могу узети у обзир тако што се M_D упоређује са редукованом вредношћу момента прслина:

- $M_D < \sqrt{\beta} \cdot M_{cr}$ (без прслина) или
- $M_D \geq \sqrt{\beta} \cdot M_{cr}$ (са прслинама),

где је β коефицијент који има вредност 0,5. На тај начин се M_D пореди са око $0,7 \cdot M_{cr}$, што на задовољавајући начин обухвата описане разлоге.

- потребне геометријске карактеристике пресека

Одређују се карактеристике за пресек без прслине, а уколико је при претходном разматрању закључено да носач има прслине, и за пресек са прслином.

Пресек се састоји од бетона и арматуре. Површина арматуре се узима према пресеку са максималним моментом у пољу M_D , а за конзоле за пресек у укљештењу.

Пресек без прслине укључује сав бетон, док се у пресек са прслином урачунава само притиснути бетон (бетон са одговарајуће стране неутралне линије). Бетон се у геометријске карактеристике укупног (бетон + арматура) спрегнутог пресека урачунава са ефективним модулом $E_{c,eff}$.

Геометријске карактеристике укупног спрегнутог пресека добијају се тако што се прво површине арматура трансформишу у одговарајуће површине бетона множењем односом $\alpha_e = E_s/E_{c,eff}$. Након тога се срачунају карактеристике укупног пресека уобичајеним поступком отпорности материјала за одређивање карактеристика сложеног (вишеделног) пресека. Сопствени момент инерције арматуре се занемарује.

Потребно је срачунати површину (A^*), положај тежишта трансформисаног пресека, момент инерције око тежишта (I^*) и статички момент (S^*) арматуре према тежишту. Генерално, све се ради двапут, за пресек без прслине (индекс I) и за пресек са прслином (индекс II) Карактеристике трансформисаног пресека овде су означене горњим индексом звезда (*).

- за пресек без прслине (индекс I):

- Срачуна се површина бетонског пресека A_c , положај његовог тежишта (на пример одстојање од ивице 1) $z_{c,1}$ и сопствени момент инерције I_c .
- $A_I^* = A_c + (\alpha_e \cdot A_{s1}) + (\alpha_e \cdot A_{s2})$
- $z_{I,1}^* = \frac{A_c \cdot z_{c,1} + (\alpha_e \cdot A_{s1}) \cdot d_1 + (\alpha_e \cdot A_{s2}) \cdot (h - d_2)}{A_I^*}$
- $I_I^* = I_c + A_c \cdot (z_{c,1} - z_{I,1}^*)^2 + (\alpha_e \cdot A_{s1}) \cdot (d_1 - z_{I,1}^*)^2 + (\alpha_e \cdot A_{s2}) \cdot (h - d_2 - z_{I,1}^*)^2$
- $S_{I,s}^* = (\alpha_e \cdot A_{s1}) \cdot (z_{I,1}^* - d_1) - (\alpha_e \cdot A_{s2}) \cdot (h - d_2 - z_{I,1}^*)$

- за пресек са прслином (индекс II):

- Срачуна се положај неутралне линије пресека са прслином. На пример, за обострано армирани пресек са правоугаоним обликом притиснуте зоне је (добива се различита вредност од оне при прорачуну напона, јер се користи другачији однос модула еластичности - α_e уместо α):

$$\xi = \alpha_e \cdot (\rho_1 + \rho_2) \cdot \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot (\rho_1 + \rho_2 \cdot (d_2 / d))}{\alpha_e \cdot (\rho_1 + \rho_2)^2}} \right)$$

- Срачуна се површина притиснутог дела бетонског пресека A_{IIc} , положај његовог тежишта (на пример одстојање од ивице 1) $z_{IIc,1}$ и сопствени момент инерције I_{IIc} .

- $A_{II}^* = A_{IIc} + (\alpha_e \cdot A_{s1}) + (\alpha_e \cdot A_{s2})$
- $z_{II,1}^* = \frac{A_{IIc} \cdot z_{IIc,1} + (\alpha_e \cdot A_{s1}) \cdot d_1 + (\alpha_e \cdot A_{s2}) \cdot (h - d_2)}{A_{II}^*}$ (за пресек са

правоугаоним обликом притиснуте зоне може и: $z_{II,1}^* = d \cdot (1 - \xi) + d_1$

- $I_{II}^* = I_{IIc} + A_{IIc} \cdot (z_{IIc,1} - z_{II,1}^*)^2 + (\alpha_e \cdot A_{s1}) \cdot (d_1 - z_{II,1}^*)^2 + (\alpha_e \cdot A_{s2}) \cdot (h - d_2 - z_{II,1}^*)^2$
- $S_{II,s}^* = (\alpha_e \cdot A_{s1}) \cdot (z_{II,1}^* - d_1) - (\alpha_e \cdot A_{s2}) \cdot (h - d_2 - z_{II,1}^*)$

- ефективне крутости на савијање, за рачунање угиба

Ефективне крутости на савијање за израчунавање угиба су

- за пресек без прслине: $E_{c,eff} \cdot I_I^*$
- за пресек са прслином: $E_{c,eff} \cdot I_{II}^*$

- угиб од оптерећења

Срачуна се угиб од квази-сталног оптерећења, за крутост I ($u_{I,qp}$) и крутост II ($u_{II,qp}$). На пример, за просту греду и крутост II, уколико је квази-стално оптерећење једнако подељено:

$$u_{II,qp} = \frac{5}{384} \cdot \frac{(g + \Delta g + \psi_2 q) \cdot L^4}{E_{c,eff} \cdot I_{II}^*}$$

- угиб од скупљања

Угиб од скупљања може се срачунати као

$$u_{sh} = \delta_{sh} \cdot \varepsilon_{cs}(\infty) \cdot \frac{S_s^*}{I^*} \cdot \frac{L^2}{8}$$

Потребно је срачунати угиб од скупљања за крутост I ($u_{I,sh}$) и II ($u_{II,sh}$), са одговарајућим вредностима статичког момента S и момента инерције I . Коефицијент δ_{sh} зависи од статичког система и има вредност:

- за просту греду $\delta_{sh} = 1$
- за обострано укљештену греду $\delta_{sh} = 1/2$
- за греду укљештену на једном и ослоњену на другом крају $\delta_{sh} = 29/44$
- за конзолу $\delta_{sh} = 4$.

Алтернативно (приближно), угиб од скупљања може да се срачуна и као:

$$u_{I,sh} = u_{I,qp} \frac{E_{c,eff} S_{I,s}^*}{M_D} \varepsilon_{cs}(\infty) \quad \text{и} \quad u_{II,sh} = u_{II,qp} \frac{E_{c,eff} S_{II,s}^*}{M_D} \varepsilon_{cs}(\infty)$$

- интерполациони коефицијент за рачунање угиба

Укупни угиби, за крутости I и II - u_I и u_{II} , су:

$$u_I = u_{I,qp} + u_{I,sh} \quad \text{и}$$

$$u_{II} = u_{II,qp} + u_{II,sh}.$$

Интерполациони коефицијент ζ се израчунава као:

$$\zeta = 1 - \beta \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2 = 1 - 0,5 \cdot \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2.$$

Еврокод 2 не даје инструкцију за избор репрезентативне вредности момента M када се израчунава коефицијент ζ који би у описаном поступку требало да процењује (осредњену) вредност садејства затегнутог бетона на читавом распону са прслинама.

Описани поступак (*Favre et al.*) био је, са задовољавајућим резултатима, у вишедеценијској примени, са

$$M = \sqrt{M_D \cdot M_{cr}}$$

и познат је под називом *билинеарни поступак*. Поједини аутори у скорије време сугеришу да се узме

$$M = M_D.$$

Тако се добијају веће величине израчунатих угиба, што је на страни сигурности.

- израчунавање угиба

Угиб се израчунава као:

$$u = \zeta \cdot u_{II} + (1 - \zeta) \cdot u_I.$$

Контрола угиба без директног прорачуна

Поступак приказан у Еврокоду 2 и MC2010 заснива се на одређивању граничног односа распон/статичка висина (L/d). Улазни подаци потребни за одређивање почетне вредности L/d су:

- коефицијент армирања затегнутом арматуром ρ , израчунат на основу потребне арматуре у распону (за конзолу у укљештењу) $A_{s,req}$, према ULS прорачуну;
- коефицијент армирања потребном притиснутом арматуром ρ' у истом пресеку у коме се одређује ρ ;

- класа чврстоће бетона;
- коефицијент K , који зависи од статичког система, дат у табели 7.4N.

Формула (7.16) Еврокода 2 служи за израчунавање основне вредности L/d :

$$\frac{L}{d} = K \left[11 + 15 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2 \sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad \text{ако је } \rho \leq \rho_0 \quad (7.16.a)$$

$$\frac{L}{d} = K \left[11 + 15 \sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \quad \text{ако је } \rho > \rho_0 \quad (7.16.b)$$

где је

$$\rho_0 = \sqrt{f_{ck}} \cdot 10^{-3}.$$

При израчунавању основне вредности L/d према претходним формулама требало би имати у виду следеће:

- Коефицијент армирања добија се дељењем потребне површине затегнуте арматуре $A_{s1} = A_{s,req}$ ширином пресека и статичком висином:

$$\rho = \frac{A_{s,req}}{b \cdot d}$$

У случају „Т“ пресека са притиснутом фланшом потребно је узети ширину фланше $b = b_{eff}$. Поступак је изведен за правоугаоне пресеке, а за „Т“ се врши модификација. Неки аутори предлажу да се, у случају „Т“ пресека, ρ израчуна дељењем површине арматуре површином бетона изнад тежишта арматуре.
- Потребна притиснута арматура, уведена у образац (7.16.b) преко ρ' , одређује се из другачијег услова него што је то случај са српским националним документом. У том погледу, примена обрасца (7.16.b) је на страни сигурности.
- Релације (7.16) изведене су под претпоставком да је квази-стално оптерећење 50 % граничног оптерећења, као и да је употребљена арматура са $f_{yk} = 500$ МПа. Као што је напред напоменуто, изрази одговарају потребној (искоришћеној) арматури. Корекција због разлике у вредности f_{yk} употребљене арматуре и разлике у површини усвојене $A_{s,prov}$ и потребне $A_{s,req}$ арматуре постиже се множењем израчунате вредности L/d према (7.16) са $\frac{500}{f_{yk}} \cdot \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}}$.
- За пресеке са фланшама, у којима је однос ширине фланше према дебљини ребра већи од 3, L/d према (7.16) треба да се помноже са 0,8.
- Контрола за плоче које носе у два правца спроводи се према краћем распону. За плоче директно ослоњене на стубове (без греда) прорачун се врши према дужем распону.
- За греде и плоче, осим плоча директно ослоњених на стубове без капитела, са распонима већим од 7 м, које носе преградне зидове који би могли да буду оштећени услед превеликих угиба, вредности L/d према (7.16) треба да се помноже са $7/L_{eff}$ (L_{eff} ефективни распон у метрима, према одредби 5.3.2.2 (1) Еврокода 2). За директно ослоњене плоче без капитела, претходна граница (дужег распона) је 8,5 метара, а мултипликатор $8,5/L_{eff}$.

У табели 7.4 N дате су и вредности које се добијају према изразима (7.16) за бетон класе C30/37, за различите конструкцијске системе, и $\rho = 0,005$ и $\rho = 0,015$). Квалитативни описи у заглављу колона ("бетон изложен високим/ниским

напонима") требало би да помогну пројектанту да у фази диспозиционог решавања предвиди подесну конструкцијску висину. У том моменту потребни коефицијент армирања још није познат, али се може предвидети да ће, на пример, у случају плоча бетон бити изложен ниским напонима.

Табела 7.4N Еврокода 2: Основни односи распон/статичка висина за елементе од армираног бетона без аксијалне силе притиска

Конструкцијски систем	K	бетон изложен високим напонима $\rho = 1.5\%$	бетон изложен ниским напонима $\rho = 0.5\%$
Проста греда, слободно ослоњена плоча која носи у једном или два правца	1,0	14	20
Крајњи распон континуалне греде или континуалне плоче која носи у једном правцу, или континуална плоча која носи у два правца са континуитетом преко једне, дуже стране	1,3	18	26
Унутрашњи распон греде или плоче која носи у једном или два правца	1,5	20	30
Плоча директно ослоњена на стубове, без греда (равна плоча), у односу на дужи распон	1,2	17	24
Конзола	0,4	6	8

Вредност L/d одређена према изразима (7.16) и коригована на описани начин представља граничну вредност $(L/d)_{limit}$ са којом се пореди вредност L/d елемента конструкције. Да би доказ угиба успео, потребно је да буде:

$$\left(\frac{L}{d}\right)_{stvarno} \leq \left(\frac{L}{d}\right)_{limit}$$

Уколико угиб није према овом критеријуму задовољен, најједноставнија интервенција је повећање арматуре, с обзиром да се тако увећава кориговани коефицијент - множење односом усвојена/потребна арматура повећава гранични однос L/d . При примени ове корекције потребан је опрез. Зависност односа L/d од напона у арматури (који се уважава овом корекцијом) није линеарна и добијени резултат при већим разликама $A_{s,prov}$ и $A_{s,req}$ није на страни сигурности. У Еврокоду 2 нема ограничења по овом питању. Британски национални анекс NA BS EN1992-1-1 ограничава укупну корекцију основне вредности L/d тако што прописује максимална вредност корекционог коефицијента

$$\frac{500}{f_{yk}} \cdot \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} \leq 1,5$$

што се може означити као добра препорука за избегавање поменуте несигурности.

У случају пресека са веома широком фланшом, што је честа ситуација код греда које носе плоче, формуле (7.16) дају (ирационално) велике вредности основног односа L/d , које воде, након примене корекционих коефицијената, такође великим граничним односима $(L/d)_{limit}$. Еврокод 2 нема ограничења ни по овом питању. Британски и немачки (NA DIN EN1992-1-1) национални анекс прописују следећа ограничења:

$$\left(\frac{L}{d}\right)_{limit} \leq \begin{cases} K \cdot 40 & (NA BS1992-1-1) \\ K \cdot 35 & (NA DIN1992-1-1) \end{cases}$$

Оваква ограничења би требало применити. Обе наведене вредности се могу означити као прихватљиве.

У прилогу у наставку дате су вредности коначног коефицијента течења и коначне дилатације скупљања за бетон класе C30/37. За друге класе, вредности се могу добити множењем приложеним коефицијентма.

t_i (дани/ године)	h_0 (mm)	Вредности коначног коефицијента течења $\varphi(\infty, t_i)$ за бетон класе C30/37											
		RH (%) = 50			70			80			90		
		Класа цемента											
		S	N	R	S	N	R	S	N	R	S	N	R
7	100	3.80	3.43	3.10	3.03	2.74	2.47	2.65	2.39	2.16	2.27	2.05	1.85
	200	3.41	3.07	2.77	2.80	2.53	2.28	2.49	2.25	2.03	2.19	1.98	1.78
	300	3.21	2.90	2.62	2.68	2.42	2.18	2.42	2.18	1.97	2.15	1.94	1.75
14	100	3.19	3.01	2.85	2.54	2.40	2.27	2.22	2.10	1.98	1.90	1.80	1.70
	200	2.86	2.70	2.55	2.35	2.22	2.09	2.09	1.98	1.87	1.84	1.73	1.64
	300	2.69	2.55	2.41	2.25	2.13	2.01	2.03	1.91	1.81	1.80	1.70	1.61
21	100	2.90	2.79	2.69	2.31	2.23	2.14	2.02	1.95	1.87	1.73	1.66	1.60
	200	2.60	2.50	2.41	2.13	2.05	1.98	1.90	1.83	1.76	1.67	1.61	1.55
	300	2.45	2.36	2.27	2.04	1.97	1.89	1.84	1.77	1.71	1.64	1.58	1.52
28	100	2.72	2.64	2.57	2.17	2.11	2.05	1.89	1.84	1.79	1.62	1.58	1.53
	200	2.43	2.37	2.30	2.00	1.94	1.89	1.78	1.73	1.68	1.56	1.52	1.48
	300	2.30	2.23	2.17	1.92	1.86	1.81	1.73	1.68	1.63	1.54	1.49	1.45
45	100	2.45	2.41	2.37	1.96	1.93	1.89	1.71	1.68	1.65	1.46	1.44	1.42
	200	2.20	2.16	2.13	1.81	1.78	1.75	1.61	1.58	1.56	1.41	1.39	1.37
	300	2.07	2.04	2.01	1.73	1.70	1.67	1.56	1.53	1.51	1.39	1.36	1.34
60	100	2.31	2.28	2.26	1.85	1.82	1.80	1.61	1.59	1.57	1.38	1.36	1.35
	200	2.07	2.05	2.02	1.70	1.68	1.66	1.52	1.50	1.48	1.33	1.31	1.30
	300	1.95	1.93	1.91	1.63	1.61	1.59	1.47	1.45	1.43	1.31	1.29	1.28
90	100	2.13	2.11	2.10	1.70	1.69	1.67	1.48	1.47	1.46	1.27	1.26	1.25
	200	1.91	1.89	1.88	1.57	1.55	1.54	1.40	1.39	1.38	1.23	1.22	1.21
	300	1.80	1.79	1.77	1.50	1.49	1.48	1.35	1.34	1.33	1.20	1.20	1.19
365	100	1.61	1.61	1.61	1.29	1.29	1.29	1.13	1.12	1.12	0.96	0.96	0.96
	200	1.45	1.44	1.44	1.19	1.19	1.18	1.06	1.06	1.06	0.93	0.93	0.93
	300	1.36	1.36	1.36	1.14	1.14	1.14	1.03	1.02	1.02	0.91	0.91	0.91
3 године	100	1.30	1.30	1.30	1.04	1.04	1.04	0.91	0.91	0.91	0.78	0.78	0.78
	200	1.17	1.17	1.17	0.96	0.96	0.96	0.85	0.85	0.85	0.75	0.75	0.75
	300	1.10	1.10	1.10	0.92	0.92	0.92	0.83	0.83	0.83	0.74	0.74	0.74

Класа чврстоће бетона	Количник коефицијента $\varphi(\infty, t_i)$ за поједине класе и коефицијента $\varphi(\infty, t_i)$ за C30/37			
	RH (%) = 50	70	80	90
C20/25	1.22	1.21	1.20	1.19
C25/30	1.12	1.11	1.11	1.10
C35/45	0.88	0.89	0.90	0.91
C40/50	0.79	0.81	0.82	0.83
C45/55	0.72	0.74	0.75	0.77
C50/60	0.66	0.68	0.70	0.72

 t_i

старост бетона у тренутку оптерећења (дани/године)

h_0 номинална димензија елемента (mm), $h_0 = 2A_c/u$ (A_c је површина, а u обим пресека у контакту са атмосфером; за плоче $h_0 = h$)

RH релативна влажност средине (%)

h_0 (mm)	Вредности коначне дилатације скупљања $\epsilon_{cs}(\infty)$ (‰) <u>за бетон класе C30/37</u>											
	RH (%) = 50			70			80			90		
	Класа цемента											
	S	N	R	S	N	R	S	N	R	S	N	R
100	0.44	0.53	0.72	0.34	0.41	0.55	0.27	0.32	0.42	0.17	0.20	0.26
200	0.38	0.46	0.62	0.30	0.36	0.48	0.23	0.28	0.37	0.15	0.18	0.23
300	0.34	0.41	0.55	0.27	0.32	0.43	0.21	0.25	0.33	0.14	0.16	0.21

Класа чврстоће бетона	Количник дилатације $\epsilon_{cs}(\infty)$ за поједине класе и дилатације $\epsilon_{cs}(\infty)$ за C30/37											
	RH (%) = 50			70			80			90		
C20/25	1.06			1.04			1.02			0.95		
C25/30	1.03			1.02			1.01			0.97		
C35/45	0.98			0.98			1.00			1.03		
C40/50	0.95			0.97			1.00			1.06		
C45/55	0.93			0.96			1.00			1.09		
C50/60	0.92			0.96			1.00			1.13		

h_0 номинална димензија елемента (mm), $h_0 = 2A_c/u$

RH релативна влажност средине (%)

Задатак 4

за самостални рад

1. Одредити вредност ефективног коефицијента течења φ_{eff} и коначне дилатације скупљања $\epsilon_{cs}(\infty)$ за армиранобетонску плочу из Задатка 2. Подаци за прорачун:

- влажност средине RH је 50/70/80 %;
- класа цемента S/N/R;
- оптерећења почињу да делују:

g : 14/21. дана, Δg : 60/90. дана и $\psi_2 \cdot q$: 365. дана

(биће задата по једна од сваке вредности у сивим пољима).

2. Одредити величину угиба плоче у првом пољу (срачунати угиб при квази-сталном оптерећењу са φ_{eff} и $\epsilon_{cs}(\infty)$ према тачки 1.). Ако је ограничење угиба $L/300$, коментарисати резултат.

3. Контролисати угиб назначене греде у првом пољу применом граничног односа L/d (распон/статичка висина) према формули (7.16) Еврокода 2. Уколико критеријум није задовољен, предложити решење.