



## УТИЦАЈ ВИСКОЗНИХ ДЕФОРМАЦИЈА БЕТОНА ПРИ ПРОРАЧУНУ ПОНАШАЊА ВИСОКИХ ЗГРАДА ТОКОМ ВРЕМЕНА

Andelko Cumbo, *cumbo@teol.net*,  
Institut za urbanizam, građevinarstvo i ekologiju RS

### *Резиме:*

На примјеру прорачуна понашања високе зграде указано је да временске деформације бетона имају значајан допринос на промјену понашања вертикалних носећих елемената - стубова и зидова. Указано је на феномен различитог скраћења бетонских/челичних стубова и бетонског језгра усљед скупљања и течења бетона током времена. Ова скраћења могу имати негативне посљедице по употребљивост конструкције, елемената испуне, инсталација у згради и сл. Прорачуни су урађени коришћењем прорачунског модела развијеног од стране аутора у оквиру ширег рада на анализи утицаја реолошких својстава код сложених спрегнутих конструкција слојевитим коначним елементима.

*Кључне ријечи: високе зграде, течење и скупљање бетона, коначни елементи.*

## THE INFLUENCE OF CONCRETE VISCOUS DEFORMATIONS IN THE CALCULATION OF THE HIGH-RISE BUILDINGS BEHAVIOR OVER TIME

### *Abstract:*

An example of a high-rise building behavior calculation shows that weather deformations of concrete have a significant contribution to changing the behavior of vertical load-bearing elements - columns and walls. The phenomenon of different shrinkage of concrete/steel pillars and concrete core due to the shrinkage and creep of concrete over time is pointed out. These shrinkages may have negative consequences on the usability of the structure, the filling elements, the installation in the building, etc. The calculations are made using a budget model developed by the author as a part of the more detailed paper on the analysis of the rheological properties impact in complex composite structures with layered finite elements.

*Keywords: high-rise buildings, creep and shrinkage of concrete, finite elements..*

## 1. УВОДНЕ НАПОМЕНЕ

На примјеру прорачуна понашања високе зграде, изложеном у овом раду, указано је, често у пракси занемариван, допринос деформисања вертикалних носећих елемената (стубова и зидова) током времена, што првенствено изазива различита скраћења бетонских и/или челичних стубова у односу на крута бетонска језгра. Ова различита скраћења вертикалних елемената, током времена, доприносе прерасподјели напрезања, нагињању таваница и зграде у цјелини, угрожавању секундарних елемената, инсталација, опреме у згради и сл. Овакве временске вискозне промјене у елементима могу утицати на стабилност, поузданост, функционалност и употребљивост објекта у цјелини или појединих његових дијелова.

## 2. ПРИМЈЕР ПРОРАЧУНА ВИСОКЕ ЗГРАДЕ

Узет је једноставан примјер једне вишеспратне зграде, димензија у основи 21x21 m (слика 1.) и висине 30 m (слика 2.), са симетричном вертикалном конструкцијом која се састоји од централног бетонског језгра и ободних стубова. Међуспратне конструкције су пуне бетонске плоче у систему са гредама (подвлакама). Разматрана су два случаја, гдје су за вертикалне елементе зграде узети бетонско језгро и:

- бетонски стубови
- челични стубови

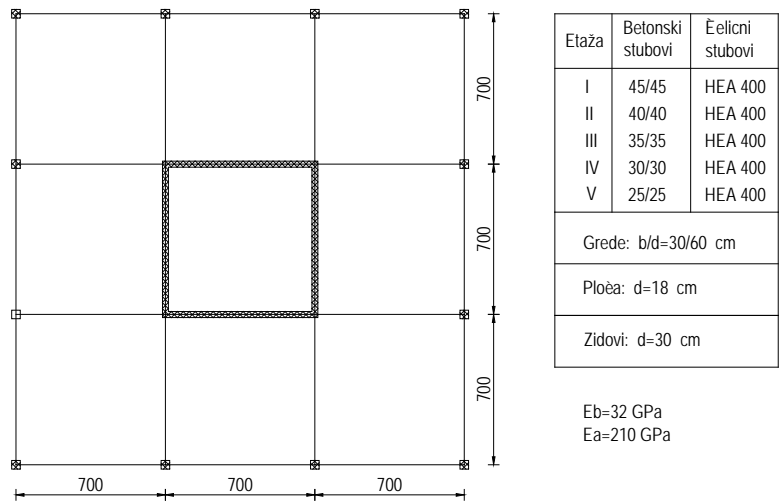
Технологија изградње конструкције зграде је по систему спрат по спрат, са узастопним оптерећивањем стубова и централног бетонског језгра. Усвојено је да се једна етажа гради 28 дана и да се тада међуспратна конструкција ослобађа оптерећења и скеле. Његовање бетона се одвија у току 28 дана од бетонирања у складу са уобичајеним поступцима у пракси. У складу са технологијом градње усвојени су статички системи и оптерећења за прорачун конструкције зграде по овде развијеном моделу са уведеним вискоеластичним коначним елементима (слика 3.).

Циљ овог примјера је да се укаже на феномен скраћење вертикалне конструкције високе зграде, односно на различито скраћење стубова и бетонског језгра услед скупљања и течења бетона током времена. Ова различита скраћења могу имати негативне утицаје по сигурност и употребљивост конструкције, елемената испуне, инсталација у згради и сл.

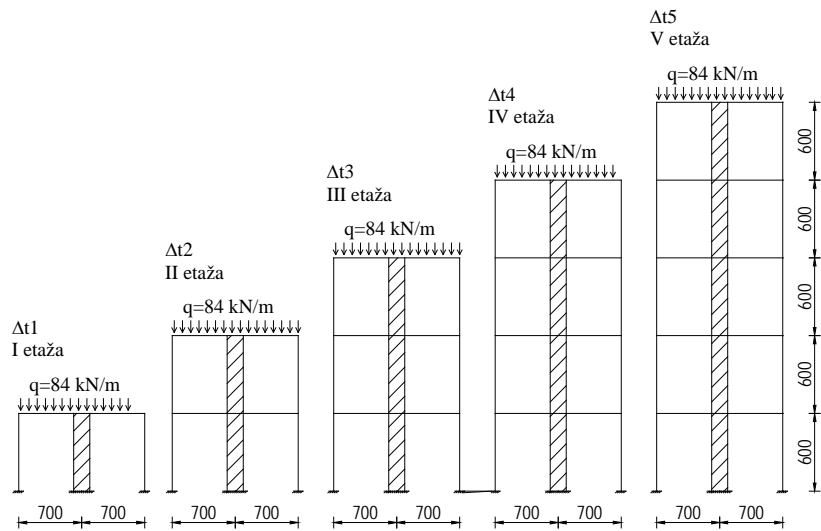
Прорачуни су изведени у складу са развијеним прорачунским моделом и програмом ВАСКЕЛ од стране аутора овог рада [1,2,3]. Реолошки параметри за бетон су узети у складу са ЕС2, а у прорачуну је за поступак и функцију бетона узета суцесивна примјена ААЕМ-методе.

У раду [4] приказан је прорачун дуготрајног диференцијалног скраћења зграде висине 300 m у Чилеу. Указано је на значајан допринос дуготрајних деформација и на потребу предвиђања ових утицаја још у прелиминарним фазама пројектовања.

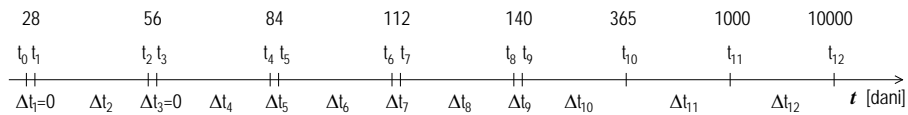
Сличан примјер је анализиран у раду [5] где је указано на значајан допринос реологије бетона на промјену стања напрезања и деформација у конструкцији зграде високе 30 m, а алгоритам прорачуна је реализован у програмском окружењу Matlab 7 у сарадњи са комерцијалним програмом TNO Diana 9.4.



Слика 1. Основа конструкције зграде



Слика 2. Статички системи и оптерећења у току градње зграде



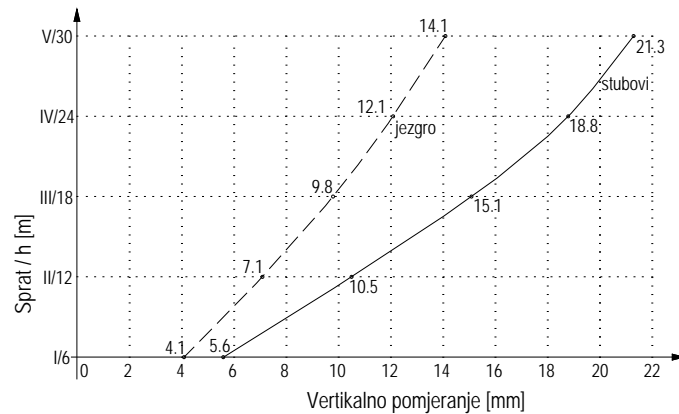
Слика 3. Дискретизација времена у складу са градњом зграде

Дискретизација времена спроведена је у складу са сликом 3. Укупно посматрано вријеме подјелено је на 12 интервала у складу са технологијом градње зграде, укључујући све основне промјене на конструкцији и оптерећењу. Тако је кроз првих 9 интервала обухваћена изградња објекта по етажама (градња спрат по спрат), што

је трајало укупно 140 дана. Кроз 10., 11. и 12. интервал издвојени су дискретни тренуци од 365, 1000 и 10000 дана респективно. У прорачуну нису занемарене различите старости бетона доњих дијелова зграде у вријеме новог оптерећивања, односно градња наредне етаже укључује оптерећење саме те етаже али и допринос реологије бетона раније изграђених доњих етажа.

## 2.1. ПРОРАЧУН ВИСОКЕ ЗГРАДА СА БЕТОНСКИМ СТУБОВИМА

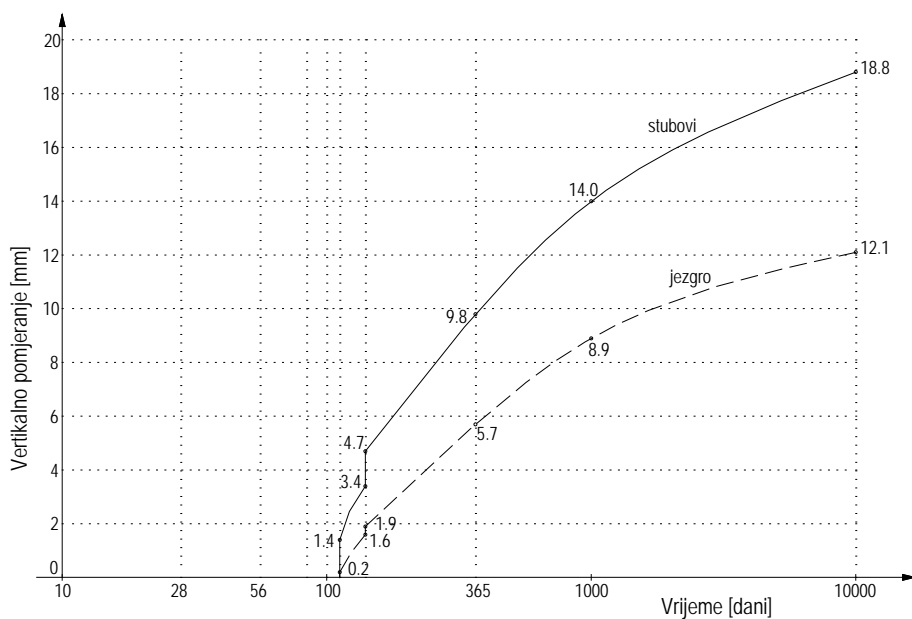
Вискозно понашање бетона, код зграде са крутим бетонским језгром и ободним бетонским стубовима, током времена изазива скраћење вертикалне конструкције. То скраћење за посматрани дискретни/крајњи тренутак расте по висини зграде (слика 4.). Максимално скраћење бетонских стубова петог спрата ( $h=30$  m) је 21.3 mm. Бетонски стубови се скраћују нешто више од бетонског језгра за све етаже, а највећа разлика износи 7.2 mm на петом спрату. Ободни бетонски стубови су под већим напонима притиска, него што је то случај код централног бетонског језгра, па је и за очекивати њихово веће еластично, али и вискозно скраћење током времена (слика 4.).



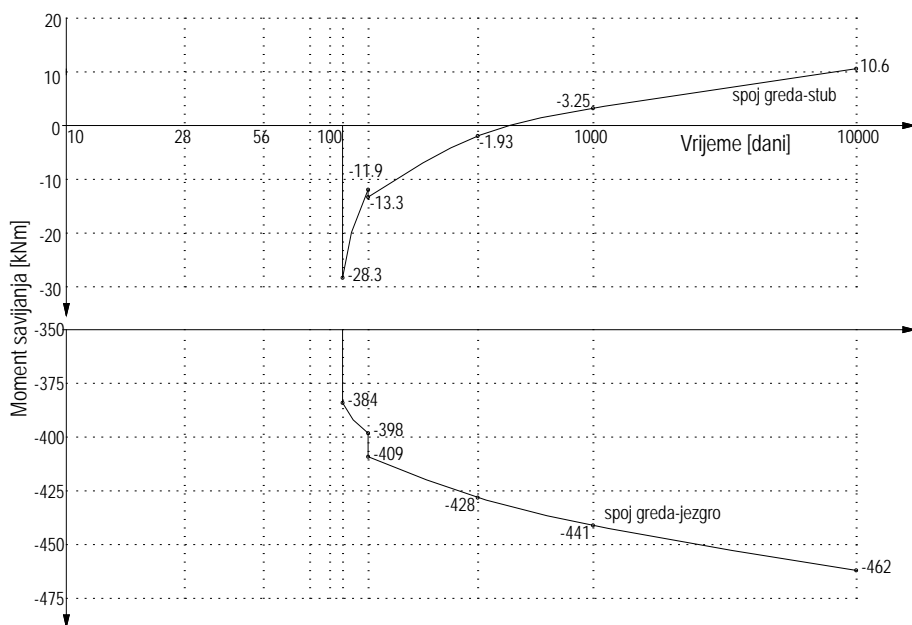
Слика 4. Вертикално померање спратова за  $t_{\infty}$

На слици 5. дати су дијаграми скраћења вертикалне конструкције објекта за IV спрат ( $h=24$  m) током времена. Ободни бетонски стубови су се скратили одмах након скидања подупирача IV-ог спрата (еластично скраћење) за 1.4 mm, а од изградње V спрата за додатних 1.3 mm. Вискозне деформације су знатно израженије од еластичних, и оне износе 16.1 mm, чиме је укупно скраћење стубова за крајњи тренутак достигло вриједност од 18.8 mm. Сличан облик дијаграма вертикалног помјерања је и за централно бетонско језгро али са мањим вриједностима, како еластичних, тако и вискозних деформација (слика 5.). Еластично скраћење овог језгра износи 0.2 mm и 0.3 mm од изградње IV-ог и V-ог спрата респективно (укупно 0.5 mm), док је вискозно скраћење знатно веће од еластичног и износи 11.6 mm.

На слици 6. дати су дијаграми промјене момената савијања на крајевима греде IV спрата током времена. Интензитет момента савијања греде на споју са стубом временом опада (апсолутна вриједност) услед већег вертикалног помјерања („спуштања“) стубова у односу на круће језгро, док из истог разлога интензитет момента савијања греде на споју са језгром расте (апсолутна вриједност). Значајно је истаћи да је негативна вриједност момента савијања греде на споју са стубом временом прешла у позитивну вриједност.



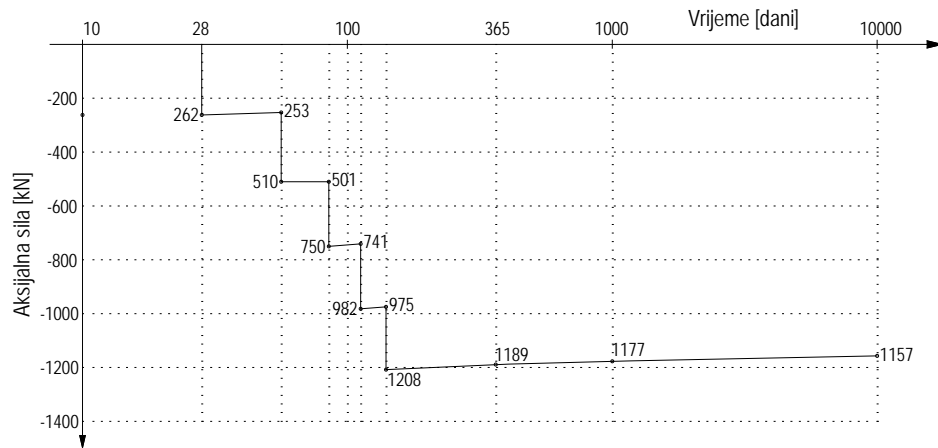
Слика 5. Вертикално померање IV спрата



Слика 6. Момент савијања на крајевима греде IV спрата

Еластични дио момента савијања на споју греде са стубом износи укупно 29.7 kNm (негативан моменат), а вискозни дио је 40.3 kNm али супротног знака (позитиван моменат). Код споја греде и језгра еластични дио момента савијања износи укупно

395 kNm (негативан моменат), а вискозни дио је 67 kNm (негативан моменат), што укупно износи 462 kNm и представља увећање негативног момента савијања за 17%. На слици 7. дат је дијаграм промјене аксијалне силе за бетонски стуб приземља током времена. Прираст ове силе притиска прати поступак градње објекта спрат по спрат, а усљед различитих вискозних деформација стубова и језгра аксијална сила у коначним интервалима времена има благу тенденцију опадања.



Слика 7. Аксијална сила у стубу приземља

Еластични дио аксијалне силе притиска у стубу приземља од утицаја свих етажа износи 1242 kN, а вискозни дио за који се умањује сила износи 85 kN, што укупно износи 1157 kN и што представља пад силе притиска у стубу приземља за више од 7%. Овај пад силе у бетону био би више изражен да је у прорачуну укључена арматура стубова, јер би се тада извршила прерасподјела дијела напона са бетона на арматуру током времена (релаксација бетона).

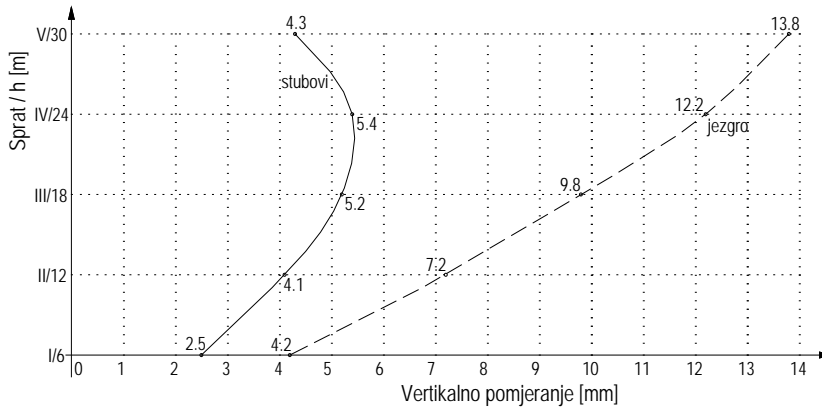
## 2.2. ПРОТРАЧУН ВИСОКЕ ЗГРАДА СА ЧЕЛИЧНИМ СТУБОВИМА

Максимално скраћење вертикалне конструкције објекта за крајњи тренутак је 13.8 mm, када се посматра бетонско језгро и највиша тачка (V-и спрат,  $h=30$  m), док је по етажама то скраћење у складу са дијаграмом датим на слици 8. Ободни челични стубови се скраћују знатно мање од централног бетонског језгра и та разлика се по висини објекта мијења. За пети спрат разлика вертикалних помјерања између челичних стубова и бетонског језгра износи 9.5 mm, док је за први спрат та разлика свега 1.7 mm.

Усљед скупљања и течења бетона централно бетонско језгро се током времена под напонима притиска додатно скраћује, док челични стубови због одсуства течења немају директне временске деформације. Пораст деформација челичних стубова током времена је посљедица реологије бетона централног језгра. Ова реологија доводи до прерасподјеле напрезања па тиме и додатних деформација челичних стубова.

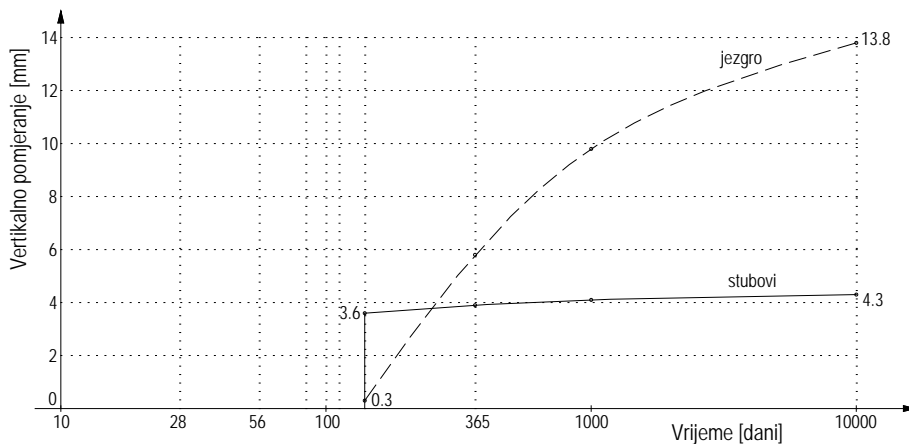
На слици 9. дати су дијаграми скраћења вертикалне конструкције објекта за пети спрат ( $h=30$  m) током времена. Може се констатовати да је промјена вертикалних помјерања знатно израженија код централног бетонског језгра (еластичне и вискозне деформације) него код ободних челичних стубова (еластичне

деформације) због одсуства течења челика. У односу на еластично скраћење (0.3 mm), код централног бетонског језгра, вискозно скраћење је знатно више изражено (13.5 mm).



Слика 8. Вертикално померање спратова за  $t = \infty$

Код челичних стубова пораст скраћења са еластичних 3.6 mm на укупних 4.3 mm је последица прерасподеле напрезања са бетонског језгра на челичне стубове усљед релаксације бетона током времена.

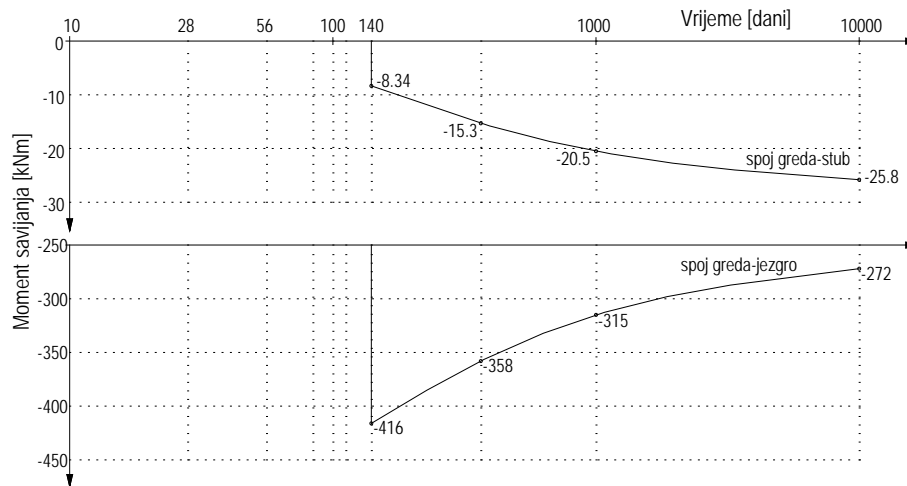


Слика 9. Вертикално померање V спрата

На слици 10. дат је дијаграм промене момента савијања током времена за греду последњег спрата на спојевима са челичним стубом и бетонским језгром. Пораст негативног момента савијања на мјесту споја греде и челичног стуба прати смањење негативног момента на споју греде са бетонским језгром. Ово је последица прерасподјеле напрезања усљед скупљања и течења бетона централног језгра и његовог интензивнијег скраћења у односу на еластичне стубове („омекшавање“ средњег ослоња за греде).

На споју греде са челичним стубом негативни момент савијања је порастао три пута (са 8.34 kNm на 25.8 kNm), док је на другој страни греде, на споју са бетонским

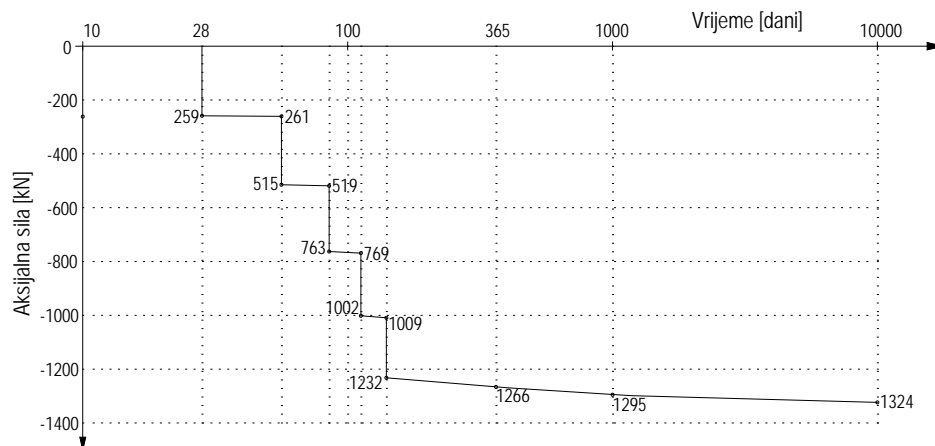
језгром, негативни момент савијања опао за један и по пута (са 416 kNm на 272 kNm).



Слика 10. Моменти савијања на крају греде V спрата

Може се констатовати да различито скраћење бетонског језгра и челичних стубова током времена може довести до прекорачења момента савијања ригли на спојевима са челичним стубовима. О овоме је нужно водити рачуна још у прелиминарним фазама пројектовања хибридних високих зграда.

На слици 11. дат је дијаграм промјене аксијане силе притиска у челичном стубу приземља током времена. Пораст ове силе прати поступак градње објекта (еластични дио силе), док временом сила додатно расте и без додавања оптерећења. Ово је последица прерасподјеле напона усљед скупљања и течења бетона централног језгра и његовог интензивнијег скраћења у односу на еластичне ободне челичне стубове.



Слика 11. Зграда са челичним стубовима. Аксијална сила у стубу приземља



Еластични дио аксијалне силе у челичном стубу приземља од утицаја свих етажа износи 1212 kN, а вискозни дио усљед прерасподјеле силе са бетонског језгра на челичне стубове износи 112 kN, што је пораст за скоро 10%.

Може се констатовати да различито скраћење бетонског језгра и челичних стубова током времена, те пораст напона притиска у челичним стубовима, може довести до прекорачења дозвољених вриједности за челик, као и врло неповољних ефеката извијања челичних стубова. Овакви случајеви захтијевају посебну пажњу још у прелиминарним фазама пројектовања вишеспратних зграда.

### 3. ЗАВРШНЕ НАПОМЕНЕ

Високе зграде са бетонском или мјешовитим (челик-бетон) конструкцијом захтијевају посебне анализе временских деформација. Различите деформације вертикалних елемената могу бити посљедица разлике напона, различите изложености, односа површине и запремине, скупљања и течења бетона и одсуства течења код челика. Поред тога, у случају недостатка симетрије у конструкцији зграде могу се развити бочна помјерања и врло неповољни ефекти другог реда за витке челичне стубове [4,5].

Уколико се ови утицаји у прорачунима изоставе могу се временом јавити негативне посљедице по објекат. Поред угрожавања носивости конструкције и безбједности објекта могу се јавити нагињања подова, пуцање греда и плоча, прскање материјала ентеријера, извијање лифтовских вођица и цјевовода, оштећења зидова испуне и сл. Хибридне конструкције челик-бетон су осјетљивије на ове ефекте чак и код објеката ниже спратности, док су симетричне бетонске конструкције знатно сигурније чак и за висине 50-100 m [5].

Поменути негативни ефекти код вишеспратница не пружају неку могућност корективних мјера након изградње, те је веома важно ове ефекте сагледати у фази пројектовања и градње објекта, те на вријеме предуприједити њихов негативни утицај.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cumbo, A., Folić, R.: Uslojeni konačni elementi u proračunu spregnutih konstrukcija izloženih dugotrajnim djelovanjima, GRAĐEVINAR, 69 (2017) 11, pp. 991-1005, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1659.2016>
- [2] Folić, R., Cumbo, A.: Theoretic Bases for Analysis of Viscous Deformations in Composite Beams using the Finite Elements Method, Bulletins for Applied & Computing Mathematics, Technical University of Budapest, BAM-1770/2000 XCIII, Budapest, pp. 17-28.
- [3] Folić, R., Cumbo, A.: Application of Finite Elements Method in Analysis of Composite Concrete-Steel Beams, Bulletins for Applied & Computing Mathematics, Technical University of Budapest, BAM-1782/2001 XCIV, Budapest, pp. 55-66.
- [4] Lagos, R.C., Kupfer, M.C., Sanhueza, S.T., Cordero, F.V.: Costanera Center – Shortenings due to elastic deformation, creep and shrinkage of concrete in a 300-m tall building, ICJ The Indian Concrete Journal, 86 (2012) 12, pp. 53-60.
- [5] Sassone, M., Casalegno, C.: Evaluation of the structural response to the time-dependent behaviour of concrete: Part 2 – A general computational approach, ICJ The Indian Concrete Journal, 86 (2012) 12, pp. 39-51.