

ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ

M85 – Ново техничко решење у фази реализације, тестирано у овлашћеној институцији

ДЕМОНТАЖНИ СМИЧУЋИ СПОЈ СА ЗАВРТЊЕВИМА И МОЖДАНИЦИМА СА ГЛАВОМ

АУТОРИ:

др Исидора Јаковљевић, мастер инж. грађ, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

в. проф. др Милан Спремић, дипл. грађ. инж, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

проф. др Златко Марковић, дипл. грађ. инж, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Београд, септембар 2022.

1) АУТОРИ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

др Исидора Јаковљевић, мастер инж. грађ, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

в. проф. др Милан Спремић, дипл. грађ. инж, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

проф. др Златко Марковић, дипл. грађ. инж, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

2) НАЗИВ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Демонтажни смичући спој са завртњевима и можданицима са главом

3) КЉУЧНЕ РЕЧИ

спрегнуте греде од челика и бетона, профилисани лим, поновна употреба, можданик, завртањ, смичући спој

4) ЗА КОГА ЈЕ РЕШЕЊЕ РАЂЕНО

ЕХ ВС d.o.o.

Николаја Хартвига 32, 11000 Београд

5) ГОДИНА КАДА ЈЕ РЕШЕЊЕ КОМПЛЕТИРАНО

2022.

6) ГОДИНА КАДА ЈЕ РЕШЕЊЕ ПОЧЕЛО ДА СЕ ПРИМЕЊУЈЕ И ОД КОГА

Планирана примена – 2022. година (техничко решење у реализацији)

7) ОБЛАСТ И НАУЧНА ДИСЦИПЛИНА НА КОЈОЈ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

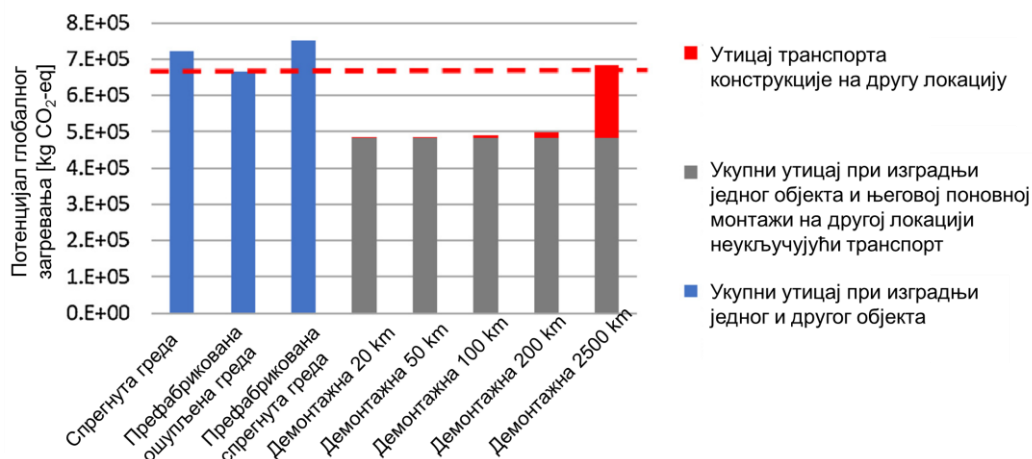
Грађевинарство, ужа научна област Металне конструкције

8) ПРОБЛЕМ КОЈИ СЕ ТЕХНИЧКИМ РЕШЕЊЕМ РЕШАВА

Растући тренд примене спрегнутих конструкција од челика и бетона у савременом грађевинарству може се приписати предностима које овакви системи носе, првенствено рационалној употреби и ефикасном искоришћењу челика и бетона. Најчешћи пример конструктивног спрегнутог елемента који се среће у пракси је спрегнута греда формирана од челичног профила и бетонске плоче. Бетонска плоча може бити пуна или на челичном профилисаном лиму. Како би се остварило спрегнуто понашање бетонске плоче и челичног профила, неопходно је да се примене можданици, односно механичка спојна средства попут еластичних можданика са главом, који се најчешће користе у пракси.

Један од важних захтева последњих деценија, у време када се значајна пажња посвећује очувању животне средине, јесте одрживи развој. У грађевинској пракси, примене овог принципа огледају се у рециклирању и поновној употреби коришћеног грађевинског материјала, замени традиционалних материјала са новим еколошким материјалима, као и у поновној употреби конструктивних елемената или комплетних конструкција (*reusing*). Могућност демонтаже и поновне монтаже објекта на другом месту су битне предности спрегнутих конструкција које су у складу са поменутих принципима одрживог развоја. Поновном употребом извесних конструктивних елемената или целе конструкције постижу се уштеде у ресурсима, што доводи и до смањења емисија штетних гасова. Међутим, спрегнуте греде од челика и бетона спојене еластичним можданицима са главом у својој основној форми немају могућност демонтаже. Из тог разлога, многа истраживања спроведена у области спрегнутих конструкција током последње деценије бавила су се испитивањем различитих иновативних смичућих спојева који омогућавају демонтажу и поновну употребу међуспратних спрегнутих конструкција.

Кроз студију утицаја примене демонтажних спрегнутих међуспратних конструкција од челика и бетона на животну средину [1], показано је да овакви системи имају значајне предности над традиционалним међуспратним спрегнутим конструкцијама које су префабриковане или изведене *in situ*. Смањење емисије угљен-диоксида при примени конструкција које се могу поново употребити приказано је на Сlici 1 на примеру објекта који је демонтиран на крају првог животног циклуса, а затим поново монтиран на другој локацији. Примена демонтажних међуспратних конструкција у еколошком смислу је оправдана при постојању краћих транспортних раздаљина између првобитне и будуће локације објекта.



Слика 1: Потенцијал глобалног загревања у функцији типа примењене међуспратне конструкције и транспортне раздаљине [1].

9) СТАЊЕ РЕШЕНОСТИ ПРОБЛЕМА У СВЕТУ

Различита спојна средства намењена употреби у демонтажним смичућим спојевима су експериментално и нумерички испитивана, како би се утврдили њихово понашање и применљивост у спрегнутим међуспратним конструкцијама од челика и бетона. Већина споменутих спојних средстава су завртњеве који путем различитих механизма преносе смичућу силу између бетонске плоче и челичног профила. Најпознатији су завртњеве који смичућу силу преносе трењем на контакту између бетона и челика (*friction-grip bolts*) [2–7]. Ова спојна средства одликује велика крутост при иницијалном напрезању. Међутим, услед губитка силе преднапрезања у завртњевима, долази до наглог проклизавања завртњева у рупама. Пример примене оваквих спојних средстава у спрегнутим међуспратним конструкцијама присутан је у неколико објеката у Србији, попут паркинг гараже „Обилићев венац“ у Београду. Међутим, код овог објекта након четири деценије употребе, дошло је до корозије спојних средстава и губитка силе преднапрезања, што је изазвало нестанак спрегнутог дејства између челичне греде и бетонске плоче и довело до додатних угиба челичног носача [8]. Може се закључити да су преднапрегнута завртњеве осетљиви у погледу трајности.

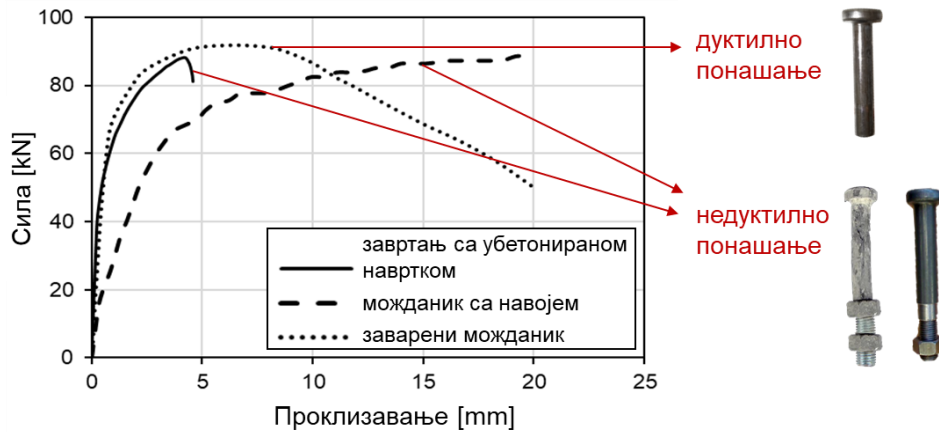
Примена класичних завртњева без навртке у бетону, који нису преднапрегнута (*bolts without embedded nuts*) [9], или можданика са главом који су посебно обрађени и којима је урезан навој дуж тела (*threaded headed studs*) [10] одликује се знатно мањом крутости и иницијалним проклизавањем споја у почетном тренутку напрезања у односу на преднапрегнуте завртњеве. Као решење за смањење деформабилности споја и ограничење ротације и померања спојног средства унутар рупе, испитивани су завртњеве са убетонираном једном или две навртке (*bolts with embedded nuts*) [4,11–13]. Такође, предложено је решење са различитим типовима каплера у бетону (*bolts with a coupler system*) [7,14] код којих се спој остварује завртњем који пролази кроз рупу у горњој ножици челичног профила и везује се за каплер претходно уграђен у бетонску плочу.

Међутим, код свих претходно наведених спојних средстава која нису преднапрегнута, карактеристичан је проблем иницијалног проклизавања завртња унутар рупе, који доводи до додатних угиба челичног носача. Како би се спречило почетно проклизавање, разматрана је могућност инјектирања рупа за завртњеве након њихове уградње [7,11]. На овај начин процес монтаже се продужава, али се уједно добијају спојеви повољнијих механичких карактеристика, односно веће иницијалне крутости.

Поред наведених врста спојних средстава, последњих година предлагана су и испитивана и друга сложенија решења која омогућавају демонтажу спрегнуте конструкције и њену поновну монтажу, попут самозабрављујућих завртњева (*blind bolts*) [15], иновативних спојница (*clamping connector*) [16], LNSC и FBSC конектора (*locking-nut shear connectors, friction-based shear connectors*) [17,18]. Упоредна анализа понашања различитих механичких спојних средстава код демонтажних спрегнутих греда од челика и бетона приказана је у раду [19].

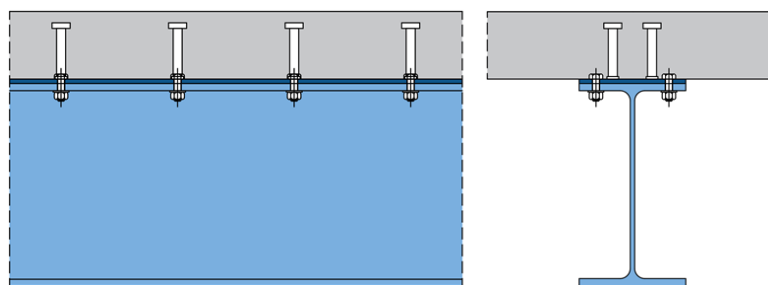
Међутим, већина демонтажних спојева формираних од наведених спојних средстава одликује се недуктилним понашањем при лому, које се битно разликује од одговора заварених можданика са главом. Дуктилно понашање можданика EN 1994-1-1 [20] дефинише се као могућност спојног средства да достигне карактеристичну вредност капацитета проклизавања од минимум 6 mm при тесту смицањем чија је поставка описана у Прилогу Б овог стандарда. Дуктилни одговор спојног средства омогућава прорачун под претпоставком идеалног пластичног понашања смичућег споја. Додатно, дуктилно понашање спојних средстава дозвољава примену парцијалног смичућег споја при прорачуну спрегнутог гредног носача. Пример криве сила-проклизавање можданика

са главом који је заварен за челичну греду дат је на Слици 2. Уочава се дуктилно понашање овог спојног средства. Међутим, исто не важи и у случају приказаних демонтажних спојних средстава: завртња са убетонираном навртком и можданика са урезаним навојем. Приказани завртња са убетонираном навртком одликује се кртим понашањем при лому. Са друге стране, можданик са урезаним навојем достиже значајне деформације, али се не може сматрати дуктилним, обзиром да се максимално проклизавање достиже управо при достизању максималне силе, односно при лому.



Слика 2: Понашање демонтажних и класичних спојних средстава у смичућем споју.

Имајући наведено у виду, развила се идеја о формирању демонтажног смичућег споја који би садржао заварене можданике са главом и тиме задржао предности коришћења оваквих спојних средстава. Како би се стекла особина демонтаже, уведе се додатна спојна средства у виду завртњева. Смичући спојеви са можданицима и завртњевима нису испитивани у значајном обиму. Наиме, једино истраживање пронађено у доступној литератури односи се на примену оваквог смичућег споја у спрегнутој греди са пуном бетонском плочом, у сладу са приказом на Слици 3 [12]. Спроведена су свега три теста смицања при којима је дошло до кртог лома услед прекорачења носивости завртња на смицање, а даља примена оваквог споја није разматрана. Поред кртог понашања и неискоришћења позитивних механичких особина можданика са главом, приказано решење поседује извесне недостатке који се огледају у немогућности потпуног уклањања завртњева приликом демонтаже конструкције, чиме они постају подложни оштећењима приликом транспорта конструкције на другу локацију.



Слика 3: Демонтажни смичући спој са завртњевима и можданицима при примени у пуној бетонској плочи [12].

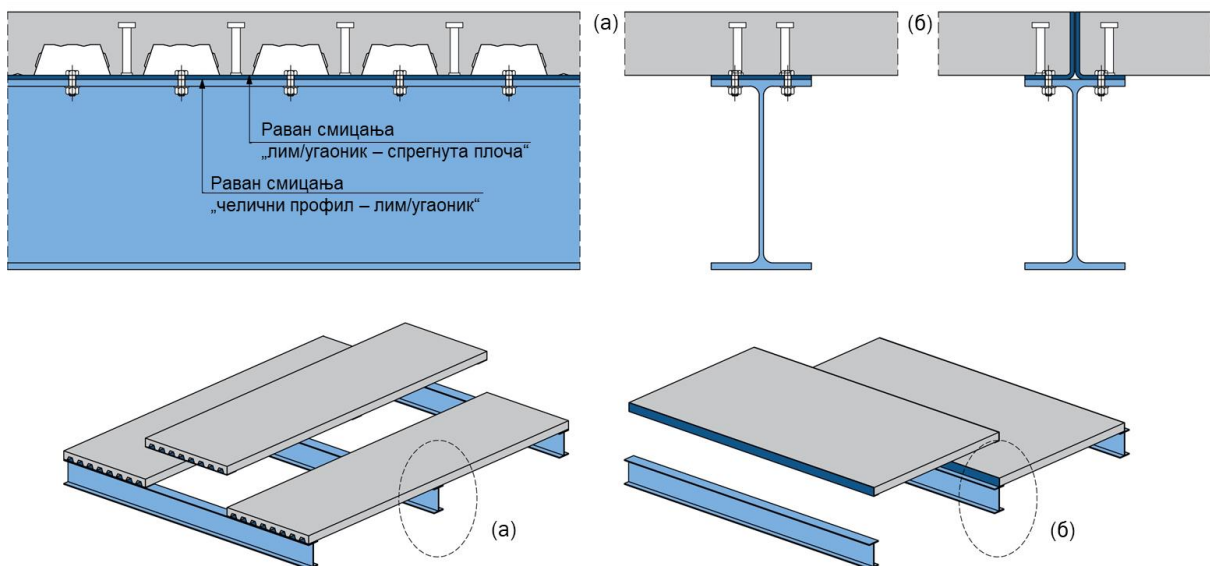
Како би се превазишли недостаци приказаног демонтажног споја, предложено је техничко решење новог, демонтажног смичућег споја са завртњевима и можданицима са главом које је намењено примени у спрегнутим плочама на профилисаном лиму. Употреба демонтажних спојних средстава у спрегнутим плочама на профилисаном лиму

до сада је испитивана у мањој мери, обзиром да је највећи број истраживања био фокусиран на понашање спојних средстава у пуним бетонским плочама. Са друге стране, предности употребе плоча на профилисаном лиму су значајне и огледају се пре свега у уштеди материјала и смањењу тежине међуспратне конструкције.

10) ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

1. Приказ решења смичућег споја

Техничко решење смичућег споја састоји се од два типа спојних средстава: можданика са главом и завртњева. Смичући спој је намењен примени у спрегнутим плочама на трапезном профилисаном лиму. Можданици се постављају у ребрима профилисаног лима, а завртњеви се постављају између њих у правцу подужне осе гредног носача, у складу са приказом на Слици 4. Техничко решење је предложено у две варијанте: 1) спрегнута плоча је континуална изнад челичног носача (Слика 4.а), 2) спрегнута плоча је дисконтинуална изнад челичног носача (Слика 4.б). Како би се омогућила демонтажа споја код континуалне плоче, примењује се додатни челични лим постављен између спрегнуте плоче и челичне греде. Можданици се заварују за овај челични лим, док се завртњевима лим везује за горњу ножицу челичног профила. У спојевима са дисконтинуалном плочом, уместо челичног лима примењује се пар угаоника. Можданици се заварују за угаонике, а путем завртњева се остварује веза између угаоника и горње ножице челичне греде. Оба типа смичућег споја одликују се постојањем две равни смицања преко којих се преноси подужна смичућа сила: равни „лим/угаоник – спрегнута плоча“ и равни „челични профил – лим/угаоник“.



Слика 4: Демонтажни смичући спој са завртњевима и можданицима:

- а) спрегнута плоча је континуална изнад челичног носача,
- б) спрегнута плоча је дисконтинуална изнад челичног носача.

Спој је формиран тако да омогућава поновну употребу како челичног носача, тако и спрегнуте плоче, односно међуспратне конструкције у целисти. Приликом демонтаже међуспратне конструкције на крају животног циклуса објекта, завртњеви се уклањају и спрегнута плоча се може једноставно одвојити од челичног носача. У истој конфигурацији, конструкција се може монтирати на другој локацији. Важно је напоменути да се завртњеви у потпуности уклањају приликом демонтаже, тако да нису подложни оштећењима приликом транспорта конструкције.

Иако је техничко решење смичућег споја првенствено намењено примени у демонтажним међуспратним конструкцијама новопројектованих објеката у зградарству, такође се може применити приликом реконструкције постојећих спрегнутих међуспратних конструкција. Пример могуће примене је замена постојећих префабрикованих бетонских плоча у вишеспратним гаражама код којих је иницијално примењено решење демонтажног смичућег споја са преднапрегнутим завртњевима [8]. Као што је претходно описано, примена споја са преднапрегнутим завртњевима у гаражи „Обилићев венац“ у Београду изазвала је значајна оштећења бетонских плоча, па би се у том случају иновативно решење могло применити у новим бетонским плочама приликом реконструкције објекта.

Широка примена у пракси и доступност оба типа спојних средстава, завртњева и можданика, могу се сматрати предностима предложеног решења. Додатне компоненте и елементи поред можданика и завртњева нису неопходни при монтирању споја, што такође представља погодности примене предложеног техничког решења.

Пре примене техничког решења, неопходно је утврдити понашање смичућег споја и дати препоруке за прорачун и конструисање. Пречник и висина можданика, као и пречник и класа чврстоће завртњева треба да буду адекватно усвојени како би омогућили демонтажу и поновну употребу споја током више животних циклуса објекта. Такође, кључни параметри треба да буду одговарајуће изабрани како би омогућили задовољавајуће понашање смичућег споја у погледу носивости и дуктилности:

- дебљина лима у спојевима са континуалном спрегнутом плочом, и дебљина угаоника у спојевима са дисконтинуалном плочом изнад носача,
- растојање од можданика до ивице спрегнуте плоче у спојевима са дисконтинуалном плочом изнад носача,
- узенгије постављене око можданика у спојевима са дисконтинуалном плочом изнад носача.

Утицај наведених кључних параметара треба проверити кроз експериментално и нумеричко истраживање.

2. Експериментално испитивање смичућег споја

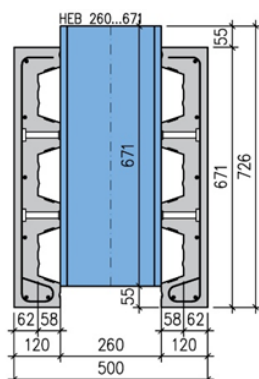
Демонтажни спој са можданицима и завртњевима експериментално је испитан кроз стандардне тестове смицања спроведене према Прилогу Б, EN 1994-1-1 [20], како би се утврдило понашање споја при смичућем оптерећењу. Такође, у виду контролне серије, испитан је одговарајући стандардни недемонтажни спој са можданицима. Испитане три различите диспозиције демонтажног смичућег споја и недемонтажни контролни узорак, приказани на Слици 5 и сумирани кроз Табелу 1, означени су на следећи начин:

- S – недемонтажни смичући спој са континуалном спрегнутом плочом,
- D – демонтажни смичући спој са континуалном спрегнутом плочом,
- DL – демонтажни смичући спој са дисконтинуалном спрегнутом плочом,
- DLU – демонтажни смичући спој са дисконтинуалном спрегнутом плочом и узенгијом постављеном око можданика.

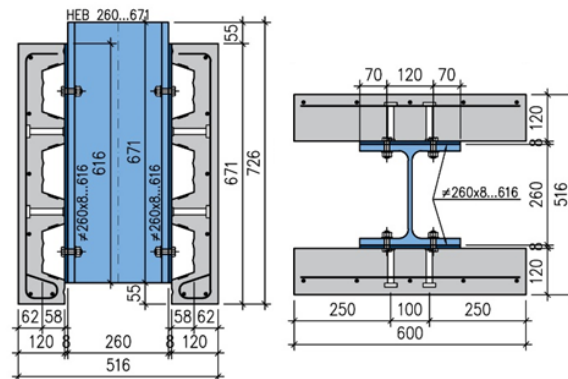
Табела 1: Рекапитулација испитаних смичућих спојева.

Смичући спој	Можданици	Завртњеве	Дебљина лима/угаоника	Спрегнута плоча	Напомена
S		/	/	континуална	/
D	$d = 16 \text{ mm}$				/
DL	$h_{sc}=100 \text{ mm}$	M12 8.8	8 mm	дисконтинуална	/
DLU					узенгије $\varnothing 8 \text{ mm}$

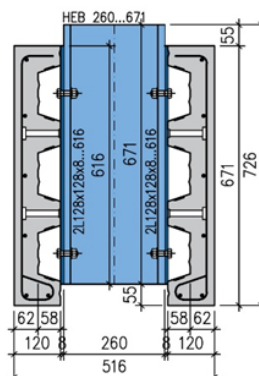
(а) узорак S



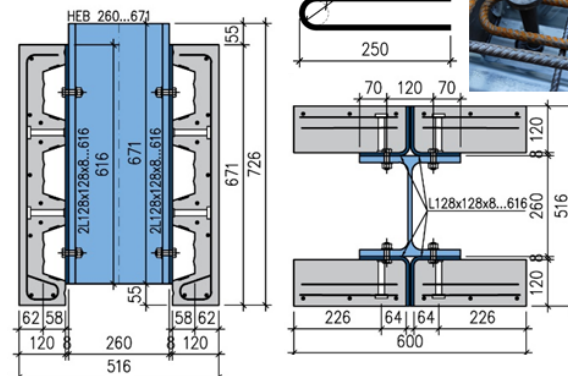
(б) узорак D



(в) узорак DL



(г) узорак DLU



Слика 5: Диспозиција испитаних узорка демонтажних смичућих спојева.

Узорци су формирано од профилисаног лима Cofraplus 60 (ArcelorMittal, Luxembourg) са претходно избушеним рупама на месту постављања можданика. Сви узорци се састоје од по осам можданика пречника 16 mm и висине 100 mm. Демонтажни узорци такође садрже осам завртњева M12 класе чврстоће 8.8. Спојна средства су изабрана тако да је прорачунска носивост можданика срачуната према EN 1994-1-1 [20] мања од прорачунске носивости завртњева срачунате према EN 1993-1-8 [21], $29.16 \text{ kN} / 43.43 \text{ kN} = 0.67$, чиме је очекивани лом узорка по можданику.

Код узорка са континуалном плочом, усвојено је растојање између можданика у попречном правцу од 100 mm. Код узорка са дисконтинуалном плочом растојање од можданика до ивице плоче у попречном правцу усвојено је као $4d = 64 \text{ mm}$, где је d пречник можданика. Усвојено растојање је мање од растојања $6d$ које је прописано у EN 1994-1-1 [20] као минимално растојање од можданика до ивице пуне бетонске плоче у општем случају. Међутим, уколико би растојање од $6d$ било усвојено у случају пројектованог демонтажног споја, можданик се не би налазио директно изнад ножице

челичног носача. Утицај редукованог растојања од можданика до ивице плоче на понашање споја испитан је у оквиру истраживања.

Положај завртњева у попречном правцу одређен је према предефинисаном положају рупа за завртњеве на ножици профила НЕВ 260. Пречник рупа на ножици профила, угаонцима и лиму је 13 mm.

Дебљина челичног лима, односно угаоника треба бити изабрана тако да се избегне његова деформација на месту где су заварени можданици, као и деформација рупа за завртњеве. Како је носивост завртњева на притисак по омотачу рупе већа од носивости завртњева на смицање, лом услед притиска по омотачу рупе није критичан. Међутим, према EN 1994-1-1 [20], однос пречника можданика и дебљине елемента за који се можданик везује треба да буде мањи од 2.5, тј. дебљина лима треба да буде већа од $0.4d$. У случају пројектованог споја, вредност $0.4d$ износи 6.4 mm, па је усвојен лим, односно угаоник дебљине 8 mm. Утицај усвојене дебљина лима на понашање споја испитан је у оквиру истраживања.

У горњој зони спрегнуте плоче постављена је арматура у попречном и подужном правцу пречника $\varnothing 8$ mm. Код узорака типа DLU, предвиђена је додатна арматура у виду узенгија постављених око можданика у нивоу горње површине профилисаног лима, у свему према Слици 5.г. Пречник узенгија усвојен је као $0.5d = 8$ mm.

При бетонирању је коришћен трофракцијски бетон са номиналном величином највећег зрна агрегата од 16 mm, како би били испуњени захтеви EN 1994-1-1 у погледу односа између номиналне величине зрна агрегата и геометрије смичућег споја. Како би се утицај иницијалног скупљања максимално смањио, узорци су чувани у средини одговарајуће влажности током прва три дана након бетонирања. Узорци су монтирани 28 дана након бетонирања и започето је испитивање. Приликом монтаже, завртњевима није аплицирана сила преднапрезања.

Испитивање је спроведено према захтевима наведеним у Прилогу Б, EN 1994-1-1 [20]. Спрегнуте плоче су постављене на слој гипса како би се остварио одговарајући контакт са подлогом. Вертикално оптерећење је путем пресе аплицирано на профил НЕВ 260. Трансверзално оптерећење није нането што је у складу са препорукама датим у реф. [30], обзиром да је однос између висине можданика и висине ребра профилисаног лима већи од 1.56.

За мерење хоризонталних и вертикалних померања примењено је 12 угибомера: четири за мерење вертикалног проклизавања између ножице челичног профила и спрегнуте плоче, четири за мерење вертикалног проклизавања између челичног лима/угаоника и спрегнуте плоче, и четири за мерење хоризонталног размицања између спрегнуте плоче и челичног профила. Вертикално проклизавање је мерено на врху узорка, док је хоризонтално размицање мерено у висини можданика.

Сила је мерена путем дозне за мерење силе притиска капацитета 1000 kN, која је постављена на врх узорка. Оптерећење је задато у складу са процедуром испитивања описаном у Прилогу Б, EN 1994-1-1 [20]. Подаци су мерени све док сила није пала за више од 20% од максималног постигнутог оптерећења.

Упоредо са главним испитивањем, експериментално су одређене механичке карактеристике материјала од којих су формиран узорци тестова смицања. Резултати тестова затезања челичних епрувета спроведених према EN ISO 6892-1 [22] сумирани су у Табели 2. Чврстоћа бетона одређена је кроз испитивање бетонских коцки димензија $150 \times 150 \times 150$ mm. Вредности чврстоћа бетона на притисак одређених у тренутку спровођења тестови смицања свих појединачних серија узорака приказане су у Табели 3.

Табела 2: Механичке карактеристике материјала.

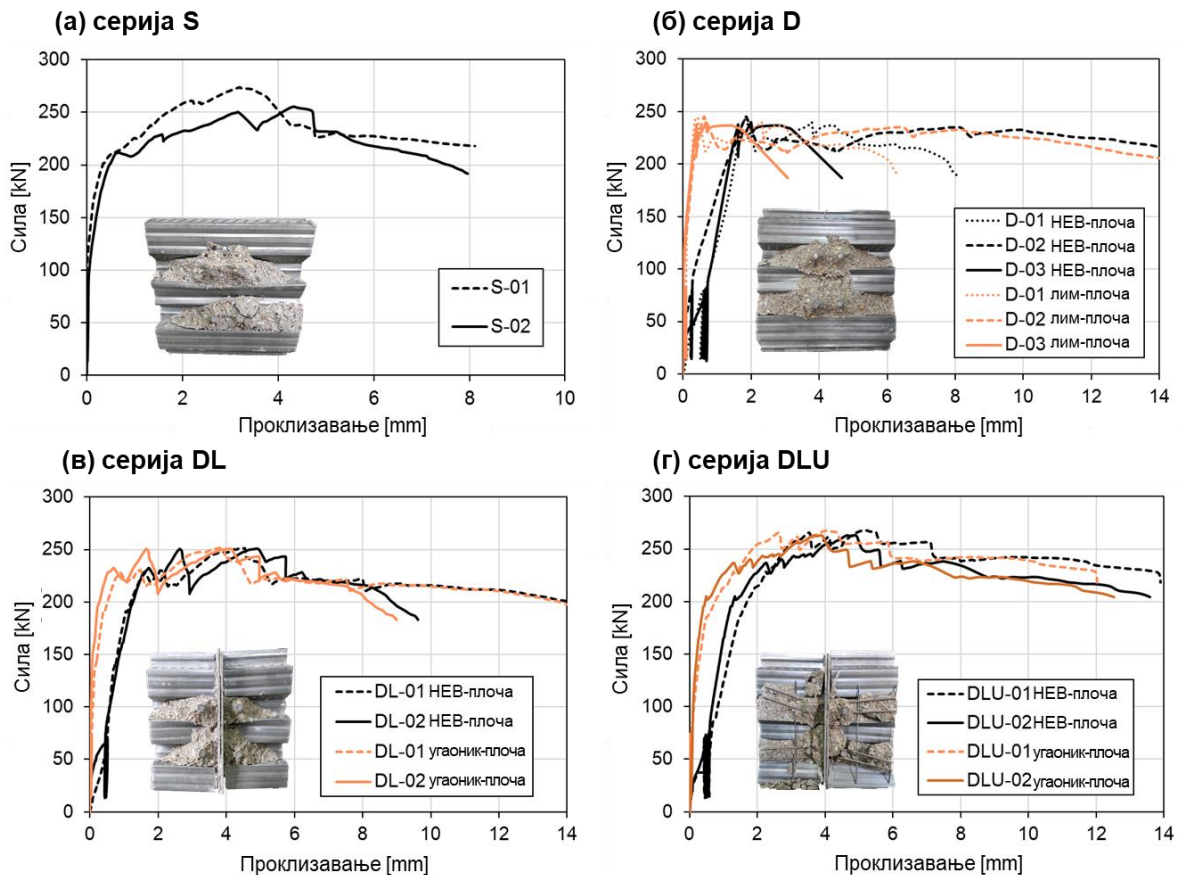
Елемент	Граница развлачења		Чврстоћа на затезање		Модул еластичности	Дилатација при макс. напону
	средња вредност	коэф. варијације	средња вредност	коэф. варијације	средња вредност	средња вредност
	f_y [MPa]	[%]	f_u [MPa]	[%]	E [GPa]	ϵ_u [%]
ножица профила	297.3	5.08	418.6	0.77	197.7	20.72
лим/угаоник	357.1	0.85	520.7	0.84	200.7	17.06
профилисани лим	347.7	4.06	408.2	1.92	194.5	17.35
можданик	421.0	1.43	509.0	2.37	200.0	3.90
завртња	928.9	2.64	966.5	2.14	204.0	-

2.1 Резултати експерименталног испитивања

Резултати спроведених тестова смицања показали су да је код сва четири испитана типа смичућег споја дошло до лома бетона формирањем конуса дуж ребра профилсаног лима. Овакав тип лома у литератури је познат као *concrete pull-out failure*. Након уклања бетона око можданика утврђено је да је можданик благо деформисан при чему је формиран пластични зглоб уз корен можданика.

Након испитивања демонтажних спојева, узорци су демонтирани без потешкоћа, чиме је могућност демонтаже споја демонстрирана. Деформације завртњева нису уочене, као ни деформације рупа за завртњеве у ножици челичног профила, лиму и угаонцима.

Криве сила-проклизавање које су забележене током испитивања узорка приказане су на Слици 6. Црном линију приказано је проклизавање између челичног профила и спрегнуте плоче. Код демонтажних узорка, додатно је приказано измерено проклизавање између спрегнуте плоче и лима, односно угаоника.



Слика 6: Криве сила-проклизавање испитаних узорка.

2.1.1 Носивост смичућег споја

Граничне носивости испитаних узорака крећу се у опсегу 240–274 kN. Поређење вредности носивости различитих серија дато је у Табели 3. Обзиром да је током испитивања дошло до лома бетона, вредности сила су нормиране на исту чврстоћу бетона од 35 МПа како би могле бити упоређене на одговарајући начин:

$$P_{ult,exp,nor} = P_{ult,exp} \left(\frac{35 \text{ МПа}}{f_{cm}} \right)^{2/3} \quad (1)$$

У приказаном изразу са f_{cm} означена је чврстоћа бетонског цилиндра на притисак. Корелација између носивости узорака приказана је кроз однос $P_{ult,exp,nor}/\bar{P}_{ult,exp,nor,S}$, где је $\bar{P}_{ult,exp,nor,S}$ средња вредност нормиране граничне носивости за серију S.

Табела 3: Поређење вредности граничних носивости.

Серија	Узорак	Чврстоћа	Гранична	Нормирана	Ср. вредност	Однос	Однос
		бетона на притисак					
		f_{cm} [МПа]	$P_{ult,exp}$ [kN]	$P_{ult,exp,nor}$ [kN]	$\bar{P}_{ult,exp,nor}$ [kN]	$P_{ult,exp,nor}/\bar{P}_{ult,exp,nor,S}$	$\bar{P}_{ult,exp,nor}/\bar{P}_{ult,exp,nor,S}$
S	S-01	35.0	274.0	274.2	264.8	1.04	1.00
	S-02	35.0	255.1	255.3		0.96	
D	D-01	34.5	244.0	246.4	245.3	0.93	0.93
	D-02	34.5	245.0	247.5		0.93	
	D-03	34.5	239.5	241.9		0.91	
DL	DL-01	37.3	251.3	240.9	240.6	0.91	0.91
	DL-02	37.3	250.6	240.3		0.91	
DLU	DLU-01	37.3	267.8	256.8	254.5	0.97	0.96
	DLU-02	37.3	263.0	252.2		0.95	

* нормирано на чврстоћу $f_{cm} = 35 \text{ МПа}$

Узимајући у обзир расипање резултата унутар појединачних серија, одступање носивости између различитих серија узорака није изразито. Упоређивањем граничних носивости серија D и DL, закључује се да трансформација демонтажног споја са континуалном плочом у спој са дисконтинуалном плочом и растојањем од можданика до ивице плоче од $4d$ не утиче у значајној мери на смањење носивости споја. Примена узенгија код демонтажног споја са дисконтинуалном плочом (DLU) повећава носивост споја за приближно 5% у односу на еквивалентни спој без узенгија (DL). На основу релативно доброг поклапања између средњих вредности граничне носивости серија S и DLU може се рећи да предложени демонтажни спој са дисконтинуалном плочом и узенгијама у погледу носивости одговара стандардном недемонтажном споју.

2.1.2 Крутост и капацитет проклизавања

На основу приказаних графика у оквиру Сликe 6, уочава се да се код свих демонтажних спојева на почетку оптерећења узорка, пре аплицирања цикличног оптерећења, јавља проклизавање између спрегнуте плоче и челочног профила у опсегу 0.25–0.70 mm. Ово проклизавање се не јавља у равни „лим/угаоник – спрегнута плоча“, као ни код стандардних недемонтажних спојева. Закључује се да је иницијално проклизавање резултат померања завртња унутар рупе, које настаје као последица чињенице да завртњеви нису преднапрегнути. Као резултат овог проклизавања, крутост демонтажног споја (18–22 kN/mm) је приближно четири пута мања од крутости стандардног споја (75 kN/mm). Иницијално проклизавање завртњева не утиче на носивост смичућег споја, али утиче на гранично стање употребљивости носача и приликом пројектовања треба бити узето у обзир кроз срачунавање величине угиба

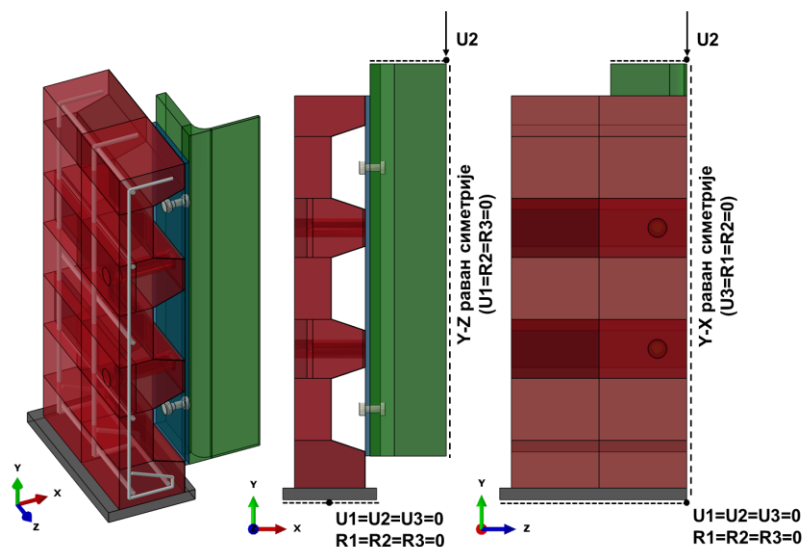
челичне греде који ће се том приликом јавити. Као и код других демонтажних спојних средстава могу се размотрити опције за смањење или потпуну елиминацију овог проклизавања путем инјектирања рупа или преднапрезањем завртњева.

Након иницијалног проклизавања, тј. након што су завртњеви заузели нови положај унутар рупа, даље понашање демонтажног смичућег споја одговара понашању стандардног споја. У овој фази највећи део проклизавања се одвија у равни „лим/угаоник – спрегнута плоча“, односно доминантно је проклизавање можданика. При оптерећењима већим од 200 kN, криве сила-проклизавање нису потпуно глатке, већ имају неколико локалних максимума. Овакво понашање објашњава се пропагацијом прелина наизменично унутар више ребара, њиховом стабилизацијом и намештањем узорка.

Капацитет проклизавања демонтажних спојева је углавном већи од проклизавања стандардних спојева, што је очекивано узимају у обзир да се демонтажни спојеви одликују проклизавањем завртњева које је доминантно у почетној фази оптерећења. Уочава се да је капацитет проклизавања демонтажног смичућег споја са дисконтинуалном плочом и узенгијама око можданика (DLU) већи у односу на случај истог споја без узенгија (DL), односно примена узенгија упућује на повећање дуктилности смичућег споја.

3. Нумеричка анализа понашања смичућег споја

На основу спроведеног експерименталног испитивања формиран су нумерички модели у програмском пакету *Abaqus* (Dassault Systemes) засновани на примени метода коначних елемената (МКЕ). Прорачун је спроведен узимајући у обзир постојање материјалних и геометријских нелинеарности, користећи модул *Dynamic Explicit*, погодан за симулирање наношења квази-статичког оптерећења. Трајање симулације је ограничено на 1000 s, док је кроз коришћење опције *mass scaling* задат временски инкремент од 0.003 s.



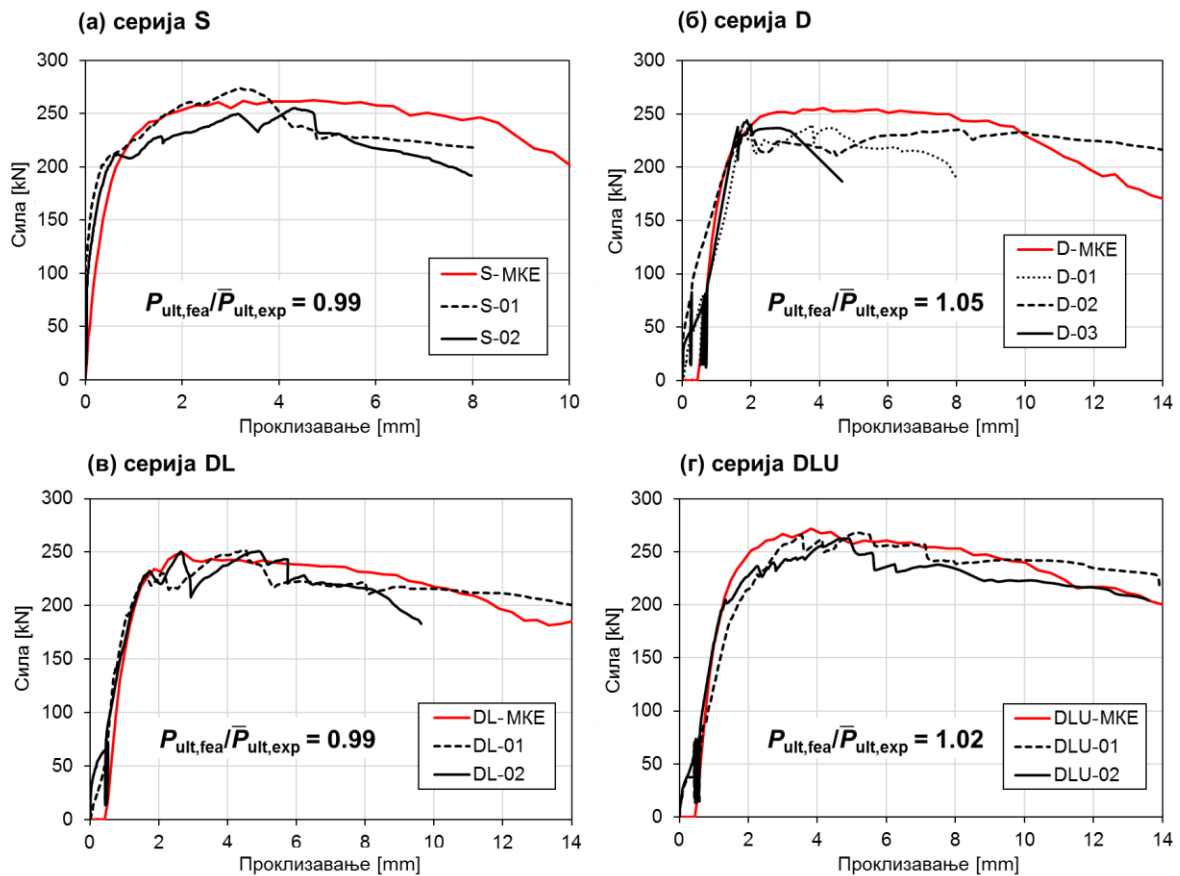
Слика 7: Нумерички модел демонтажног смичућег споја.

Модели су формиран поштујући геометрију експериментално испитаних узорака уз задавање одговарајућих граничних услова по померањима. Моделирана је четвртина сваког узорка, а услови симетрије задати су у равнима у-х и у-з, као што је приказано на Сlici 7. Све тачке на врху челичног профила су круто везане за референтну тачку у којој је задато вертикално померање преко функције *smooth step*. Све тачке на дну плоче на коју је узорак ослоњен су такође круто везане за референтну тачку

у којој су спречена сва померања и ротације. Веза између можданика и елемента за који је можданик заварен моделирана је користећи *tie constraint*. Како би се симулирала веза између шипки арматуре и бетонске плоче коришћен је *embedded constraint*. При формирању контактних услова између осталих компоненти задати су одговарајући услови трења са коефицијентом трења у опсегу 0.20–0.45.

Моделу су формирану користећи три типа коначних елемената: хексагоналне просторне елементе са осам чворова C3D8R, правоугаоне површинске елементе са четири чвора S4R, и линијске елементе са два чвора T3D2. Мрежа површинских коначних елемената задата је профилисаним лиму, док су линијски елементи задати шипкама арматуре. Све остале компоненте моделиране су путем просторних коначних елемената. Величина мреже коначних елемената усвојена је на основу студије конвергенције. Најмањи елементи примењени су за моделирање можданика и околног бетона (2 mm), док су највећи коначни елементи задати на ивицама модела где се лом узорка не очекује (10 mm).

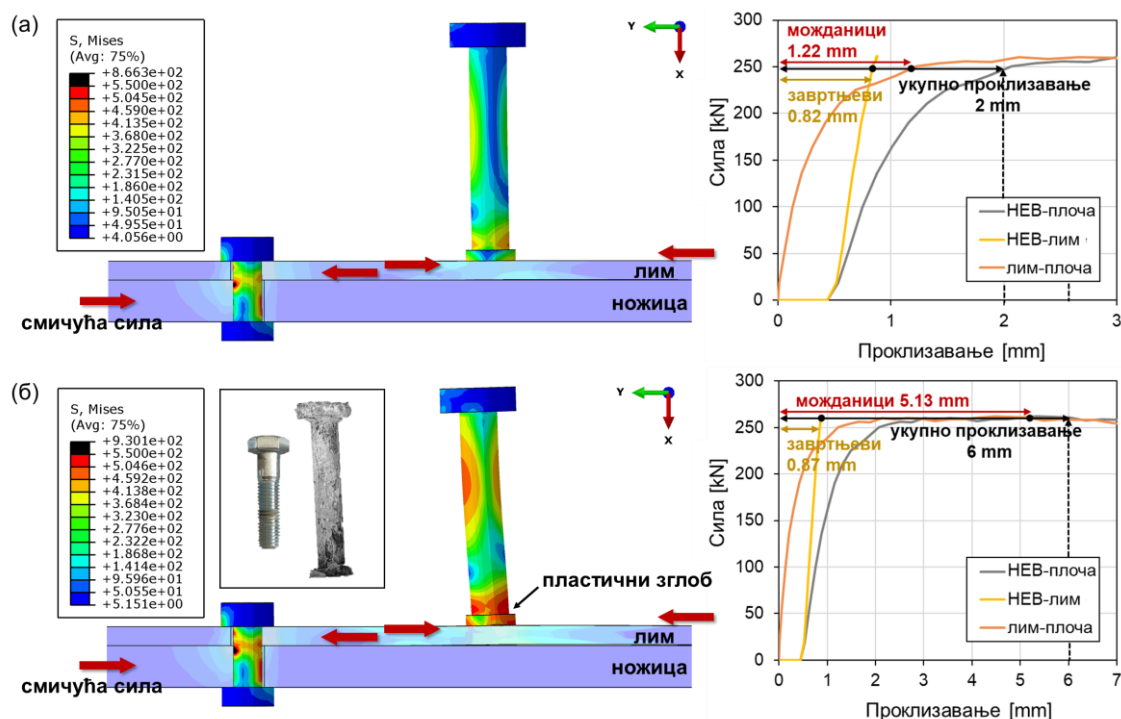
Нелинеарно понашање материјала симулирано је на основу резултата експерименталних испитивања челичних епрувета (Табела 2), задавањем одговарајућих параметара који описују одговор материјала у области еластичних и пластичних деформација. Арматурне шипке нису испитане кроз тестове затезања, па је крива напон-дилатација задата у билинеарном облику у складу са EN 1992-1-1 [23]. Понашање бетона при аксијалном притиску и затезању симулирано је према моделима које је предложио Павловић [13] применом одговарајућих улазних параметара који описују криву напон-дилатација: $\alpha = 8$, $\alpha_{ID} = 0.50$, $\alpha_{IE} = 0.60$, $\varepsilon_{cuE} = 0.05$, $\varepsilon_{cuF} = 0.20$, $f_{cuF} = 0.40$ МПа. Вредности параметара пластификације усвојене су на следећи начин: $\psi = 38^\circ$, $e = 0.1$, $f_{b0}/f_{c0} = 1.16$, $K = 0.67$.



Слика 8: Поређење експерименталних и нумеричких резултата.

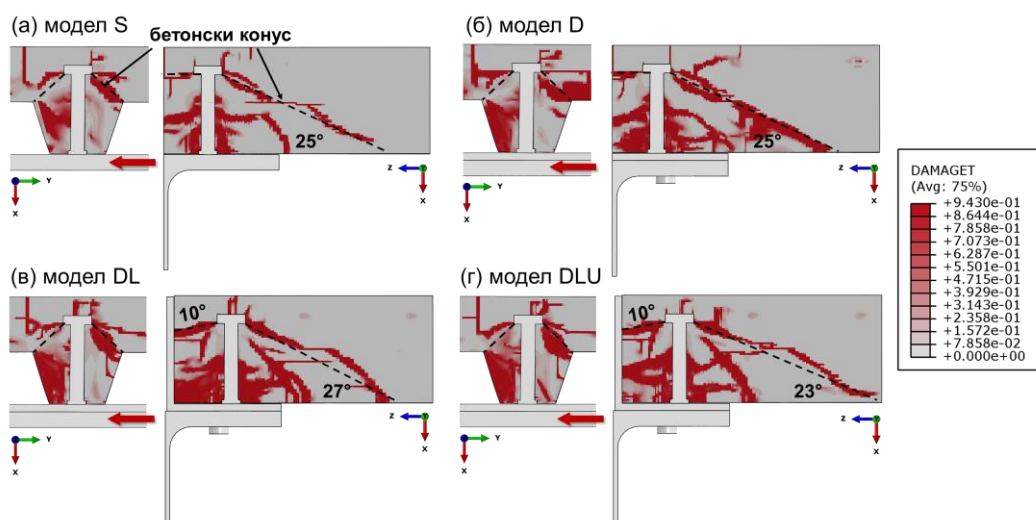
Формирани нумерички модели су валидирани поређењем са експерименталним резултатима. Уочен је висок степен поклапања кривих сила-проклизавање које су добијене на основу експерименталног испитивања и нумеричких симулација, као што је приказано на Слици 8. Максимално одступање између нумерички одређене носивости модела и средње вредности експериментално добијене носивости узорка износи 5%.

Понашање нумеричких модела одговара понашању експерименталних узорка. Напони и деформисани облик спојних средстава модела D приказани су на Слици 9, где су такође дати дијаграми укупног проклизавање између челичног профила и спрегнуте плоче, и појединачног проклизавања унутар две смичуће равни. Проклизавање завртњева је изражено при почетном оптерећењу, док је у наредним фазама доминантно проклизавање можданика. При укупном проклизавању споја од 2 mm и 6 mm, проклизавање завртњева је готово непромењено, док проклизавање можданика расте. Пораст напона у можданицима од једног до другог тренутка је приметан, као и пораст деформација. Концентрација напона већих од напона на граници развлачења у области уз корен можданика јасно упућује на формирање пластичног зглоба. Деформисани облик можданика поклапа се са деформисаним обликом уоченим током експерименталног испитивања. Максимални напон у завртњевима је испод напона на граници развлачења. Вредности напона се минимално мењају при проклизавању споја од 2 mm и 6 mm, а деформација завртња је занемарљива.



Слика 9: Напонско стање у можданицима и завртњевима при проклизавању споја од: (а) 2 mm, (б) 6 mm.

Нумерички модели предвиђају исти облик лома који је експериментално одређен. Облик прелина у бетону које су приказане на Слици 10 упућује на формирање конуса унутар ребра профилисаног лима и коначни лом одвајањем конуса од остатка плоче. Облици конуса различитих серија се међусобно незнатно разликују са нагибом изводнице у опсегу од 23° до 27°.



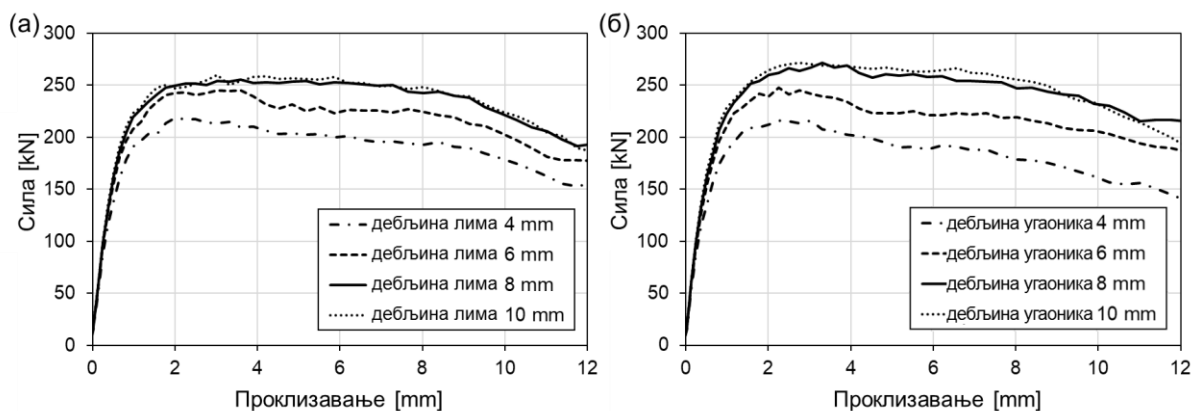
Слика 10: Формирање конуса дуж ребра плоче.

4. Параметарска анализа

Валидирани нумерички модели искоришћени су за даљу параметарску анализу којом је испитан утицај промене појединих величина на понашање демонтажног смичућег споја. На основу формиране базе модела изведени су закључци и препоруке за примену техничког решења.

4.1 Дебљина челичног лима и угаоника

Утицај дебљине лима, односно угаоника на понашање демонтажног смичућег споја испитан је на моделима D и DLU, варирајући дебљину у опсегу од 4 mm до 10 mm. Криве сила-проклизавање приказане су на Слици 11, а поређење носивости споја дато је у Табели 4. Уочава се да се понашање модела са дебљином лима од 8 mm и 10 mm готово не разликује. Са друге стране, смањење дебљине лима испод 8 mm узрокује пад носивости споја, који је посебно изражен у случају дебљине од 4 mm. Пад носивости на смицање као последица смањења дебљине са 8 mm на 4 mm је израженији код угаоника (18–20%), него код лима (14%). Код модела са лимом, односно угаоником дебљине 4 mm уочена је изражена деформација самог лима, односно угаоника непосредно испод корена можданика, која се јавила као последица ротације можданика, и која је директно утицала на смањење носивости споја.



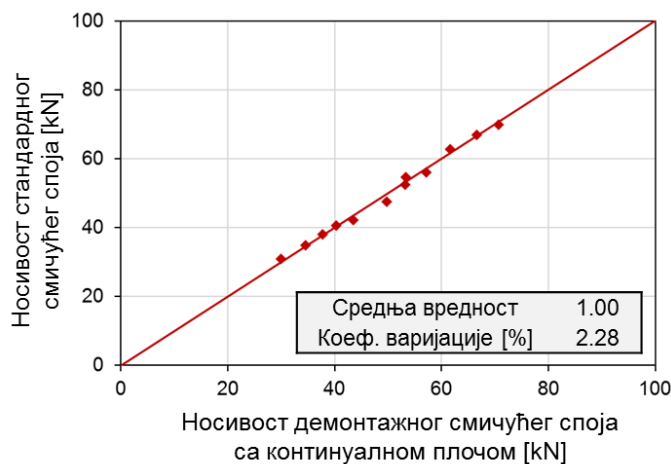
Слика 11: Криве сила-проклизавање¹ за варирану: (а) дебљину лима, (б) дебљину угаоника.

¹ Криве су приказане без иницијалног проклизавања завртњева.

Табела 4: Гранична носивост при промени дебљине лима и угаоника.

Бр.	D (континуална плоча изнад носача)				DLU (дисконтинуална плоча изнад носача)		
	Дебљина лима/ угаоника	Чврстоћа бетона	Гранична носивост	Однос	Чврстоћа бетона	Гранична носивост	Однос
	t_p [mm]	f_{cm} [MPa]	$P_{ult,fea}$ [kN]	$P_{ult,fea,(i)}/P_{ult,fea,(3)}$	f_{cm} [MPa]	$P_{ult,fea}$ [kN]	$P_{ult,fea,(i)}/P_{ult,fea,(3)}$
(1)	4	34.5	218.7	0.86	37.3	216.2	0.80
(2)	6	34.5	245.4	0.96	37.3	247.5	0.91
(3)	8	34.5	255.3	-	37.3	271.6	-
(4)	10	34.5	259.7	1.02	37.3	271.3	1.00

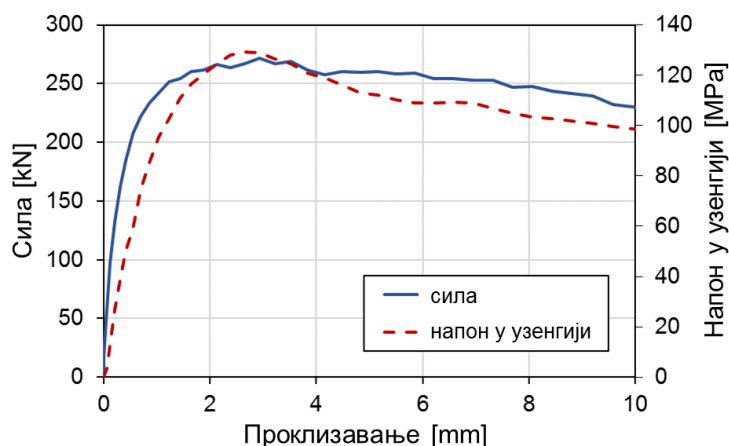
И у случају угаоника и у случају лима, одговарајућа дебљина при којој не долази до редукције носивости је 8 mm за случај примењених можданика пречника 16 mm. Резултати су у складу са препоруком датом у EN 1994-1-1 [20] према којој дебљина елемента за који су можданици заварени треба да буде већа од $0.4d$. Како би закључци у погледу адекватног избора лима, односно угаоника, могли бити проширени на општи случај спојева различите геометрије и квалитета материјала, формиран су додатни модели демонтажног смичућег споја са континуалном плочом кроз које је вариран пречник можданика (16–22 mm), висина можданика (100–125 mm) и класа бетона (C20/25–C50/60). Пречник завртња сваког споја је усвојен тако да при граничном оптерећењу не дође до пластичног понашања завртња. Дебљина лима је усвојена тако да буде једнака или већа од граничне вредности $0.4d$. Носивости формираних модела упоређене су са носивостима одговарајућих модела стандардног споја на Слици 12. Средња вредност односа одговарајућих носивости демонтажног и стандардног смичућег споја једнака 1.0 и коефицијент варијације од 2.28% упућују на врло добро поклапање резултата. Може се закључити да се избором дебљине лима од минимум $0.4d$ постиже носивост демонтажног споја која одговара носивости стандардног недемонтажног споја.



Слика 12: Поређење носивости демонтажног (D) и стандардног смичућег споја (S).

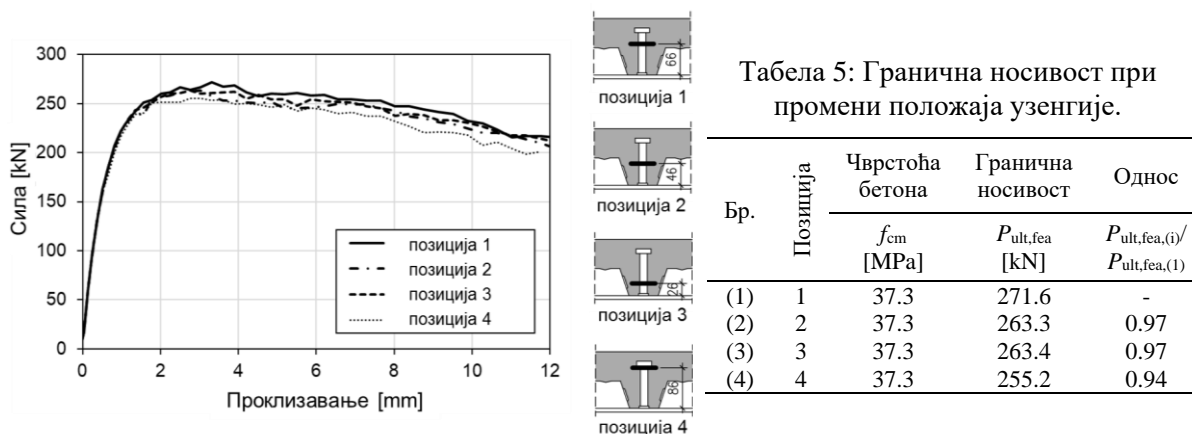
4.2 Узенгије

Експериментално испитивање показало је да узенгије постављене око можданика повећавају носивост и дуктилност смичућег споја са дисконтинуалном плочом. Нумерички модели потврдили су активацију ових арматурних шипки, показујући да пораст напона у узенгији прати оптерећење узорка. Тренутак достизања максималног напона у узенгији одговара тренутку у ком је постигнуто гранично оптерећење, као што је приказано на Слици 13. Такође, уочено је да максимални напон у узенгији од приближно 130 MPa одговара домену еластичних деформација.



Слика 13: Активација узенгија приликом оптерећења модела DLU.

Приликом експерименталног испитивања узенгије су постављене у нивоу горње површине профилисаног лима (означено као *позиција 1* на Слици 14), обзиром да је такав положај омогућио једноставно извођење и адекватну уградњу бетона у ребру профилисаног лима. Положај узенгије дуж висине можданика вариран је кроз нумеричке моделе, а добијени резултати су упоређени на Слици 14 и у Табели 5. Иако EN 1994-1-1 [20] препоручује постављање узенгија што ниже уз корен можданика, разлике у понашању базичног модела (*позиција 1*) и модела са узенгијом спуштеном ближе корену можданика (*позиција 2 и 3*) нису изражене. Међутим, до нешто израженијег пада носивости долази код модела где је узенгија постављена непосредно испод главе можданика (*позиција 4*). На основу приказаних резултата препоручује се постављање узенгија у нивоу горње површине профилисаног лима или ниже унутар ребра.



Слика 14: Криве сила-проклизавање за различит положај узенгија.

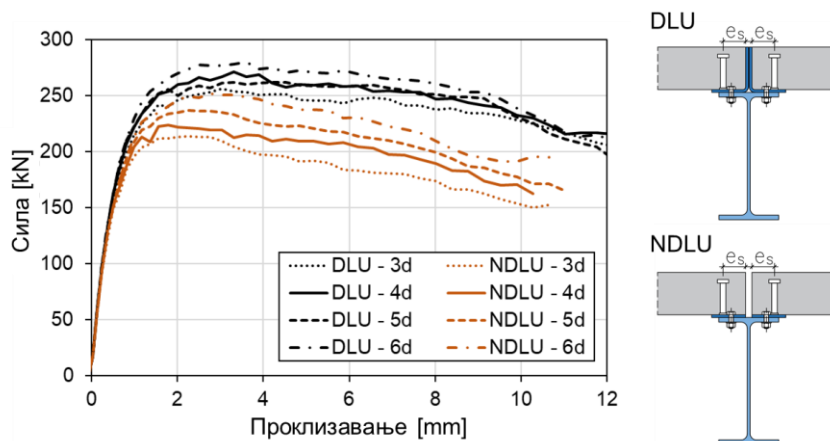
4.3 Растојање од можданика до ивице плоче

Код демонтажног смичућег споја са дисконтинуалном плочом попречно растојање између можданика и ивице плоче треба пажљиво усвојити. Иако EN 1994-1-1 [20] захтева да минимално растојање у општем случају пуне бетонске плоче буде $6d$, експериментални резултати показали су да пројектовани смичући спој са растојањем од можданика до ивице плоче $4d$ има исту носивост као одговарајући стандардни смичући спој са континуалном плочом. Утицај овог растојања на понашање споја испитан је на моделу DLU ове варирањем величине у опсегу од $3d$ до $6d$. Параметарском анализом су

такође обухваћени демонтажни спојеви код којих на ивици плоче изостаје вертикални крак угаоника, на Слици 15 означени као модели NDLU.

Криве сила-проклизавање приказане на Слици 15 упућују на значајне разлике у одговору између модела са и без постављених угаоника на ивици плоче. Челични елемент на крају спрегнуте плоче игра значајну улогу у понашању споја, тако да спој са угаоником и растојањем од можданика до ивице плоче од $3d$ има скоро исту носивост као спој без угаоника са растојањем од $6d$. Међутим, спој без угаоника и са растојањем од $6d$ има скоро два пута мањи капацитет проклизавања.

Поређење граничних носивости за задата различита растојања од можданика до ивице плоче, и за моделе са и без угаоника дато је у Табели 6. Пораст носивости са повећањем растојања од можданика до ивице плоче израженији је код плоча без угаоника. Носивост на смицање модела са угаоником је за 11–21% већа у односу на носивост модела без угаоника. Разлика у носивости модела код којих је угаоник примењен у односу на оне код којих нема угаоника израженија је у случају мањих растојања од можданика до ивице плоче.



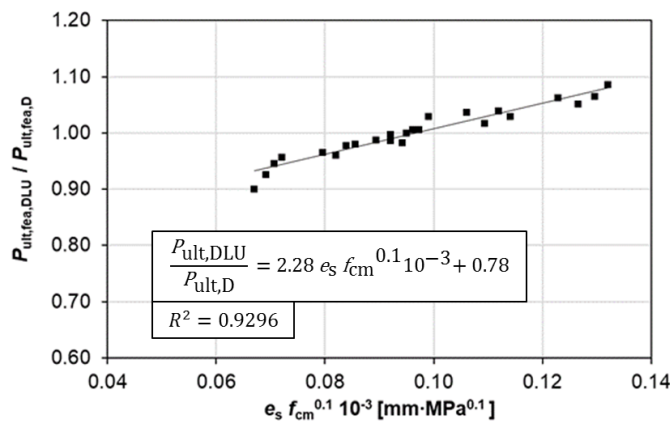
Слика 15: Криве сила-проклизавање за различита растојања од можданика до ивице плоче.

Табела 6: Гранична носивост при промени растојања од можданика до ивице плоче.

Бр.	Растојање од можданика до ивице плоче	Чврстоћа бетона f_{cm} [MPa]	DLU (са угаоником)		NDLU (без угаоника)		Однос $P_{ult,fea,DLU}/P_{ult,fea,NDLU}$
			Гранична носивост	Однос	Гранична носивост	Однос	
			$P_{ult,fea,DLU}$ [kN]	$P_{ult,fea,DLU(1)}/P_{ult,fea,DLU(2)}$	$P_{ult,fea,NDLU}$ [kN]	$P_{ult,fea,NDLU(1)}/P_{ult,fea,NDLU(2)}$	
(1)	$3d$	37.3	256.5	0.94	213.5	0.95	1.20
(2)	$4d$	37.3	271.6	-	224.2	-	1.21
(3)	$5d$	37.3	262.1	0.97	237.0	1.06	1.11
(4)	$6d$	37.3	280.0	1.03	251.9	1.12	1.11

Резултати су показали да примена угаоника на ивици плоче доприноси носивости и дуктилности смичућег споја. Вертикални крак угаоника ојачава ивицу спрегнуте плоче и спречава лом услед цепања бетона. Такође, примена угаоника омогућава редукуцију растојања од можданика до ивице плоче у односу на прописаних $6d$. Како би су дале нове препоруке за избор растојања од можданика до ивице плоче, параметарска анализа је проширена на смичуће спојеве са можданицима пречника 16–22 mm, висине 100–125 mm и класом бетона C20/25–C50/60. Сваки модел је формиран аплицирајући растојање од можданика до ивице плоче као $3d$ и $4d$. На ивици плоче задати су угаоници минималне дебљине $0.4d$, а око можданика су постављене узенгије пречника $0.5d$.

Носивости формираних модела смичућих спојева са дисконтинуалном плочом упоређене су са носивостима одговарајућих спојева са континуалном плочом изнад носача. Утврђена је линеарна зависност између односа ове две носивости ($P_{ult,DLU}/P_{ult,D}$) и производа растојања од можданика до ивице плоче и чврстоће бетона са експонентом 0.1 ($e_s f_{cm}^{0.1}$), као што је приказано на Слици 16. Линеарна зависност ових величина је интерпретирана кроз аналитички израз приказан на истој слици. Користећи дати израз изједначене су носивости монтажног споја са континуалном и дисконтинуалном плочом, а срачуната растојања од можданика до ивице плоче за случај различитих класа бетона приказана су у Табели 7. Закључује се да при примени растојања од 70 mm носивост споја са дисконтинуалном плочом неће бити мања од носивости споја са континуалном плочом.



Слика 16: Однос носивости монтажног споја са континуалном и дисконтинуалном плочом.

Табела 7: Растојање од можданика до ивице плоче за случај $P_{ult,DLU} = P_{ult,D}$.

Чврстоћа бетона	Растојање од можданика до ивице плоче
f_{cm} [MPa]	e_s [mm]
28.0	69.2
38.0	67.1
48.0	65.6
58.0	64.3

5. Закључци и препоруке за примену техничког решења

Техничко решење смичућег споја са завртњевима и можданицима са главом намењено је примени у монтажним међуспратним конструкцијама новопроектваних објеката у зградарству, али и примени приликом реконструкције постојећих спрегнутих међуспратних конструкција. Предложени монтажни спој је погодан за примену у спрегнутим плочама на профилисаном лиму, омогућавајући поновну употребу и спрегнуте плоче и челичног носача. Применом овог техничког решења, уз мало већа почетна улагања добија се потпуно монтажна спрегнута међуспратна конструкција која се може поново користити, што је у духу обновљивог развоја и циркуларне економије. Посебну примену оваква решења ће налазити у градским срединама, на пример за конструкције вишеспратних јавних гаража.

На основу спроведених истраживања која су обухватила експериментално испитивање и нумеричко симулирање тестова смицања монтажног смичућег споја, донети су следећи закључци:

- (1) Техничким решењем монтажног смичућег споја са завртњевима и можданицима постиже се иста носивост као код одговарајућег стандардног споја са можданицима. Модел лома одликује се одвајањем бетонског конуса од остатка бетонске плоче.
- (2) Кључна разлика у одговору монтажног и стандардног споја огледа се у деформабилности споја. Укупно проклизавање монтажног споја представља збир проклизавања завртњева и можданика. Проклизавање завртњева доминантно је у почетној фази оптерећења, док је проклизавање можданика доминантно у каснијим

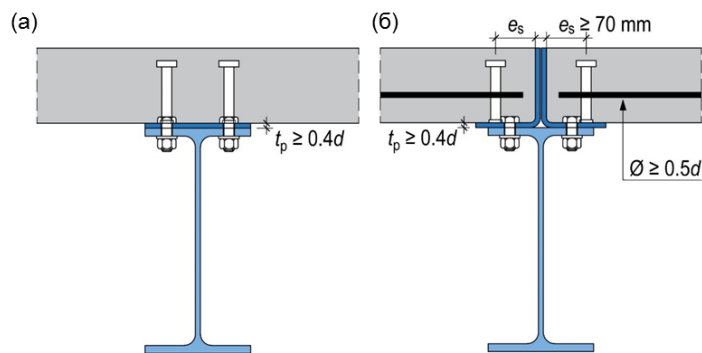
фазама. Иницијално проклизавање завртњева може се спречити применом преднапрегнутих завртњева или инјектирањем рупа.

- (3) Техничким решењем омогућено је извођење спрегнуте плоче као континуалне или дисконтинуалне изнад носача. У оба случаја уз адекватно конструисање споја може се постићи носивост која одговара носивости одговарајућег стандардног споја са можданицима.
- (4) Параметри попут дебљине челичног лима, односно угаоника, примена узенгија постављених око можданика и растојања од можданика до ивице плоче, утичу на понашање демонтажног смичућег споја, па из тог разлога треба да буду одговарајуће усвојени како би била постигнута потребна носивост споја.
- (5) Применом угаоника у техничком решењу са дисконтинуалном плочом изнад носача спречава се лом цепањем бетона на ивици плоче, а уједно се повећава носивост и дуктилност споја. Применом угаоника попречно растојање од можданика до ивице спрегнуте плоче може се редуковати у односу на растојање прописано у EN 1994-1-1 за општи случај пуне бетонске плоче.

Препоруке којих се треба придржавати приликом конструисања демонтажног смичућег споја са завртњевима и можданицима су следеће:

- (1) Демонтажни смичући спој са можданицима и завртњевима треба да буде пројектован тако да одговор завртњева при граничном оптерећењу буде еластичан.
- (2) Демонтажни спој може бити са континуалном или дисконтинуалном плочом изнад челичног носача (Слика 17). У случају континуалне плоче, предвиђа се примена додатног челичног лима између спрегнуте плоче и челичног профила, а у случају дисконтинуалне плоче, примењују се угаоници. Дебљина лима, односно угаоника треба да буде већа од $0.4d$.
- (3) Код демонтажног смичућег споја са дисконтинуалном плочом, око можданика треба поставити узенгије пречника $0.5d$, у нивоу горње површине профилисаног лима или ниже унутар ребра уколико се може постићи одговарајућа уградња бетона.
- (4) Код демонтажног смичућег споја са дисконтинуалном плочом растојање од можданика до ивице плоче у попречном правцу треба да буде минимално 70 mm .

Уколико су претходно наведене препоруке испоштоване, може се сматрати да је носивост демонтажног смичућег споја једнака носивости одговарајућег стандардног смичућег споја са можданицима.



Слика 17: Демонтажни смичући спој са:
(а) континуалном плочом, (б) дисконтинуалном плочом.

Литература

- [1] Brambilla G., Lavagna M., Vasdravellis G., Castiglioni C.A.: Environmental benefits arising from demountable steel-concrete composite floor systems in buildings, *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 2019, 133–142.
- [2] Dallam L.N.: Pushout tests with high strength bolt shear connectors, Missouri State Highway Department, 1968.
- [3] Marshall W., Nelson H., Banerjee H.: An Experimental Study of the Use of High-Strength Friction Grip Bolts as Shear Connectors In Composite Beams, *Structural Engineer*, 49, 1971, 171–178.
- [4] Kwon G., Engelhardt M.D., Klingner R.E.: Behavior of post-installed shear connectors under static and fatigue loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 66, 2010, 532–541.
- [5] Chen Y.-T., Zhao Y., West J.S., Walbridge S.: Behaviour of steel–precast composite girders with through-bolt shear connectors under static loading, *Journal of Constructional Steel Research*, 103, 2014, 168–178.
- [6] Liu X., Bradford M.A., Lee M.S.S.: Behavior of High-Strength Friction-Grip Bolted Shear Connectors in Sustainable Composite Beams, *Journal of Structural Engineering*, 141, 2015, 04014149.
- [7] Kozma A., Odenbreit C., Braun M.V., Veljkovic M., Nijgh M.P.: Push-out tests on demountable shear connectors of steel-concrete composite structures, *Structures*, 21, 2019, 0–1.
- [8] Jakovljević I., Spremić M., Marković Z.: Methods for life extension of multi-storey car park buildings, *Structural Engineering International*, 2022.
- [9] Hawkins N.M.: Strength in Shear and Tension of Cast-in-Place Anchor Bolts, *Special Publication*, 103, 1987, 233–256.
- [10] Dai X.H., Lam D., Saveri E.: Effect of Concrete Strength and Stud Collar Size to Shear Capacity of Demountable Shear Connectors, *Journal of Structural Engineering*, 141, 2015, 04015025.
- [11] Dedic D.J., Klaiber F.W.: High-strength bolts as shear connectors in rehabilitation work, *Concrete international*, 6, 1984, 41–46.
- [12] Sedlecek G., Hoffmeister B., Trumpf H., Kühn B.: EUR 20583 - Steel structures: Composite bridge design for small and medium spans, Luxembourg, 2003.
- [13] Pavlović M., Marković Z., Veljković M., Buđevac D.: Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests, *Journal of Constructional Steel Research*, 88, 2013, 134–149.
- [14] Yang F., Liu Y., Jiang Z., Xin H.: Shear performance of a novel demountable steel-concrete bolted connector under static push-out tests, *Engineering Structures*, 160, 2018, 133–146.
- [15] Pathirana S.W., Uy B., Mirza O., Zhu X.: Bolted and welded connectors for the rehabilitation of composite beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 125, 2016, 61–73.
- [16] Wang L., Webster M.D., Hajjar J.F.: Pushout tests on deconstructable steel-concrete shear connections in sustainable composite beams, *Journal of Constructional Steel Research*, 153, 2019, 618–637.
- [17] Suwaed A.S.H., Karavasilis T.L.: Novel Demountable Shear Connector for Accelerated Disassembly, Repair, or Replacement of Precast Steel-Concrete Composite Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 22, 2017, 04017052.
- [18] Suwaed A.S.H., Karavasilis T.L.: Removable shear connector for steel-concrete composite bridges, *Steel and Composite Structures*, 29, 2018, 107–123.
- [19] Jakovljević I., Spremić M., Marković Z.: Demountable composite steel-concrete floors:

- A state-of-the-art review, Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, 73, 2021, 249–263.
- [20] EN1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels, 2004.
- [21] EN1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-8: Design of joints, CEN, Brussels, 2005.
- [22] ISO6892-1:2009: Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature, CEN, Brussels, 2009.
- [23] EN1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels, 2004.

11) ТЕХНИЧКА ДОКУМЕНТАЦИЈА

- Уговор о пословно-техничкој сарадњи у прилогу.

- Листа техничких решења свих аутора:
Аутори немају друга техничка решења.

Аутори решења:

др Исидора Јаковљевић, мастер инж. грађ.

в. проф. др Милан Спремић, дипл. грађ. инж.

проф. др Златко Марковић, дипл. грађ. инж.