



[1] 2013 1[1]

АГГ+ часопис за архитектуру, грађевинарство, геодезију и сродне научне области
ACEG+ Journal for Architecture, Civil Engineering, Geodesy and other related scientific fields

186-201 **Стручни рад** | Professional paper
UDK | UDC 624.21.014.2.059
DOI 10.7251/AGGPLUS1301186K
Рад примљен | Paper received 16/11/2013
Рад прихваћен | Paper accepted 06/12/2013

Саша Ковачевић

Булевар Војводе Степе Степановића 124, Бања Лука, Република Српска

СПРЕГНУТИ ДРУМСКИ
МОСТОВИ СА
ПРЕФАБРИКОВАНИМ
КОЛОВОЗНИМ ПЛОЧАМА

COMPOSITE ROADWAY
BRIDGES WITH
PREFABRICATED DECK
SLABS

Стручни рад
Professional paper
Рад примљен | Paper accepted
06/12/2013
УДК | UDC
624.21.014.2.059
DOI
10.7251/AGGPLUS1301186K

Саша Ковачевић

Булевар Војводе Степе Степановића 124, Бања Лука, Република Српска

СПРЕГНУТИ ДРУМСКИ МОСТОВИ СА ПРЕФАБРИКОВАНИМ КОЛОВОЗНИМ ПЛОЧАМА

АПСТРАКТ

У раду су представљени спрегнути друмски мостови изграђени помоћу префабрикованих коловозних плоча. Префабриковани елементи су погодни за мостове малих и средњих распона. Префабриковани системи се користе за изградњу нових и за реконструкцију и рехабилитацију постојећих мостова. Представљене су двије врсте префабрикованих коловозних плоча, дјелимично и потпуно префабриковане. Предности и недостаци примјене префабрикованих елемената су такође наведени. Осим тога, рад приказује детаље остваривања континуитета између елемената, начин њиховог повезивања, различите врсте и распоред средстава за спрезање. Приказане су различите врсте и специјална разматрања за конструисање попречних спојева. За постизање подужног смичућег споја између префабрикованих армиранобетонских елемената и челичних носача уобичајено се користе груписани чеп можданици (можданици са главом) и завртњеви. Оба средства за спрезање могу се подједнако користити у префабрикованим мостовима, док се предност завртњева огледа у једноставнијем одржавању и уклањању конструкције након достигнутог животног вијека. Употребом префабрикације могу се смањити укупни трошкови и вријеме изградње спрегнутих мостова.

Кључне ријечи: спрегнути мостови, префабриковане коловозне плоче, суви спојеви, смичући спој, можданици са главом, завртњеви као средство за спрезање.

COMPOSITE ROADWAY BRIDGES WITH PREFABRICATED DECK SLABS

ABSTRACT

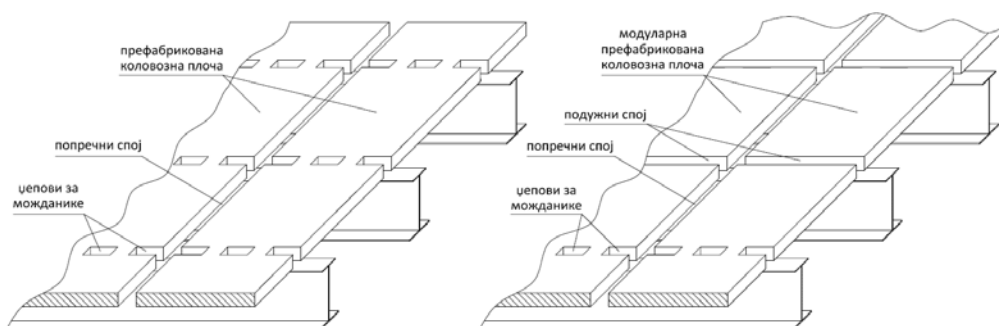
Composite roadway bridges constructed using precast deck slabs are exposed in this paper. Prefabricated units are suitable for use in small and middle span bridges. Prefabricated systems are used for new construction and reconstruction and rehabilitation of existing bridges. It is presented two types of the precast deck slabs, partial-thickness precast and full-thickness precast deck slabs. Advantages and disadvantages using the precast deck units are also listed. Furthermore, the details to provide continuity between units, ways of connecting precast deck elements, various types and arrangements of shear connectors are been showed. Different types and special design considerations of transverse joints are displayed. For achievement of longitudinal shear connection between precast units and steel girders welded headed studs distributed in group and bolted shear connectors are used. Both shear connectors can equally be used in precast bridges, while bolted shear connectors have advantage reflected in the simpler maintenance and removal of structure after achieved lifetime. The use of prefabrication can reduce overall costs and construction time of composite bridges.

Keywords: composite bridges, precast deck slabs, dry joints, shear connection, headed studs, bolted shear connector.

1. ПРЕФАБРИКОВАНЕ КОЛОВОЗНЕ ПЛОЧЕ

Стандардни начин грађења спрегнутих мостова подразумева изливање армиранобетонске коловозне плоче на градилишту. У том случају процес префабрикације обухватао је главне челичне носаче. Оваквим начином префабрикације успешно се граде спрегнути мостови од челика и бетона или бетона различитих карактеристика код класично армиранобетонских или претходно напрегнутих мостова. Сљедећи корак у развоју и унапређењу грађења спрегнутих мостова односи се на префабрикацију армиранобетонских коловозних плоча. Модеран начин грађења спрегнутих мостова још увијек има ограничену употребу. Разлог томе су: недовољно истражено понашање префабрикованих плоча у спрегнутом дејству, детаљи спајања префабрикованих елемената, односно, остваривање континуитета у подужном и попречном правцу, понашање груписаних можданика и завртњева као средстава за спрезање. Осим изградње нових мостова са два или више главних носача, префабрикација се успешно користи и за реконструкцију и рехабилитацију постојећих мостова. Овакви системи примјену налазе у тешко доступним и ограниченим градилиштима. У случају замјене коловозних плоча код мостова у градским условима или изнад постојећих саобраћајница, овакви системи представљају економично рјешење због малог утицаја на саобраћај [1].

Уопштено гледајући, постоји више подјела префабрикованих коловозних плоча. Основна подјела је у зависности од дебљине коловозне плоче [2]: потпуно префабриковане коловозне плоче (full-thickness или depth precast deck) и дјелимично префабриковане коловозне плоче (partial-thickness или depth precast deck). Сљедећа подјела може се извршити у зависности од ширине плоче [3] и тад се разликују два типа приказана на слици 1. Први тип су плоче код којих ширина одговара укупној ширини мостовске конструкције (full width). Ове плоче примјену налазе код мостова мањих и средњих ширина. Други тип су плоче које се означавају као модуларне или сегментне (partial width или modular) и премошћавају распон само између сусједних главних носача или које се постављају на више носача у случају мостова са више главних носача. Користе се код мостова са великим распонима и ширинама. Поред тога, префабриковане елементе је могуће класификовати и у зависности од средстава за спрезање, па се разликују префабриковани елементи са можданицима и завртњевима.



Слика 1. Типови префабрикованих коловозних плоча у зависности од ширине

1.1. ПРЕФАБРИКОВАНЕ ПЛОЧЕ СА МОЖДАНИЦИМА

Код класичног начина грађења распоред можданика дуж носача је континуалан. За извођење спрегнутих мостова са префабрикованим коловозним плочама неопходан је другачији распоред можданика. У том случају можданици се постављају у групи. Главни недостаци груписаних можданика односе се на редуцију носивости и крутости подужног смичућег споја. Осим тога, код груписаних можданика забиљежене су пукотине на спољашњој површини армиранобетонских плоча, док код уобичајеног распореда можданика таквих појава нема. Могуће објашњење је појава концентрисаних напона с обзиром на то да се смичуће силе прихватају у дискретним тачкама на већем растојању него код нормалног распореда можданика. Можданици са главом пружају неколико предности: брзо и једноставно постављање, имају мању тежину у односу на друге типове можданика, бољу отпорност на замор, заузимају мали простор и тиме најмање ремете распоред арматуре у бетонским плочама. У табели 1 приказане су карактеристике можданика који се користе у мостоградњи. Према [4] укупна висина можданика са главом треба да је $h_{sc} \geq 3d$, минималан пречник главе $1,5d$ и висина главе минимално $0,4d$, гдје је d пречник можданика.

Табела 1. Димензије можданика са главом

пречник можданика [mm]	висина можданика h_{sc} [mm]												
	25	50	75	100	125	150	175						
13	25	50	75	100	125	150	175						
16	35	50	75	100	125	150	175	200					
19	50	60	75	80	100	125	150	175	200				
22	75	90	100	125	150	175	200	250	300	350	400	525	

Еврокод 4, који се бави спрегнутим конструкцијама, дефинише носивост појединачних можданика, док груписани можданици нису обухваћени. На основу [4] прорачунска носивост на смицање можданика са главом једнака је мањој вриједности из сљедећих израза:

$$P_{Rd} = \frac{0,80 \cdot f_u \cdot \pi \cdot d^2 / 4}{\gamma_v} \quad (1)$$

$$P_{Rd} = \frac{0,29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v} \quad (2)$$

Први израз односи се на лом можданика, док се други односи на гњечење бетона. У наведеним изразима коришћене су ознаке: $\alpha = 0,20 \cdot (1 + h_{sc}/d)$ за $3 \leq h_{sc}/d \leq 4$ или $\alpha = 1,0$ за $h_{sc}/d > 4$, γ_v парцијални коефицијент који се дефинише Националним анексом (препоручена вриједност по Еврокоду 4 $\gamma_v = 1,25$), d пречник врата можданика $16 \text{ mm} \leq d \leq 25 \text{ mm}$, f_u гранична чврстоћа на затезање материјала можданика $f_u < 500 \text{ N/mm}^2$, f_{ck} карактеристична вриједност чврстоће бетона при притиску на цилиндар дефинисана [5] и h_{sc} укупна висина можданика. Област примјене Еврокода 4 односи се на можданике са главом који су изложени сили смицања или сили смицања и директној сили затезања. У случају заједничког дејства потребно је израчунати прорачунску силу затезања по можданику F_{ten} и занемарује се ако је испуњен услов $F_{ten} \leq 0,10 \cdot PRd$.

У случају груписаних можданика њихова носивост се провјерава помоћу експерименталних тестова. Носивост груписаних можданика или можданика дистрибуираних континуално код подужних спојева зависи од много фактора. Код другог случаја носивост можданика може се одредити множењем појединачне носивости можданика са редуccionим фактором. Фактор узима у обзир геометрију коловозне плоче и ефикасност (количину) бетона око можданика. Аутори [6] истичу четири значајна фактора: величина чеп можданика (пречник и висина изнад ножице главног носача), дебљина префабрикованих елемената, належућа ширина префабрикованих елемената на ножицу главног носача и количина и распоред трансверзалне арматуре. На основу експерименталних тестова показано је да употреба можданика пречника 19 mm и висине преко 115 mm код плоча дебљине 65 mm нема утицаја на носивост појединачних можданика. За остале случаје потребно је доказати носивост можданика експериментима.

Код можданика постављених у џепове носивост највише зависи од карактеристика материјала као што су: чврстоћа на притисак бетона, модул еластичности бетона, од пречника можданика и граничне чврстоће на затезање можданика. Можданици који имају довољан капацитет деформације да задовољавају претпоставку идеалног пластичног понашања смичућег споја третирају се као дуктилни. Стандард [4] дефинише услове за дуктилно појединачних можданика, док груписани можданици нису обухваћени. Поменути стандард налаже да је можданик еластичан или дуктилан ако је вриједност карактеристичног капацитета проклизавања $\delta_{ik} \geq 6$ mm. На основу истраживања аутора [7] показано је да груписани можданици посједују већи капацитет проклизавања у односу на појединачне можданике. Њихова деформација при лому (slip to failure) износи 0,40–0,45 пречника можданика. Носивост груписаних можданика, односно, носивост групе може се одредити помоћу фактора редуccionије препорученог од аутора [8]. Носивост појединачних можданика у групи одређује се помоћу израза (1) и (2). Фактор редуccionије може се примијенити ако је испуњен услов $3 \leq s / d < 5$, гдје је s подужно растојање можданика и d пречник врата можданика. Фактор редуccionије има облик:

$$\alpha_G = k \cdot (h_{sc} / d_G + 1) \leq 1 \quad (3)$$

гдје коефицијент k има облик $k = 0,2 \cdot \min(1; 20/d)$ и d_G представља еквивалентни пречник групе. Еквивалентни пречник се одређује помоћу израза:

$$d_G = d \cdot (1 + m) \cdot (0,90 + n_c / 10) \quad (4)$$

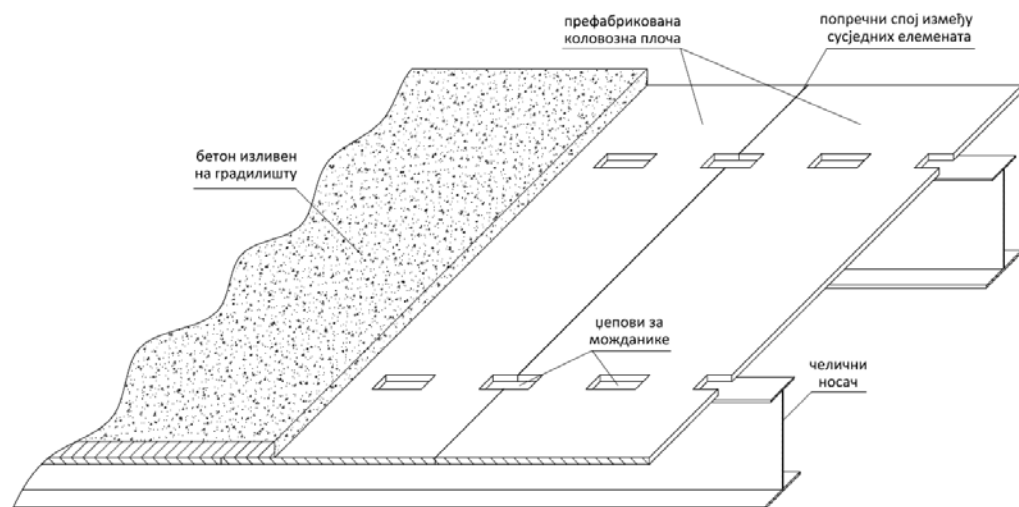
при чему n_r представља број редова можданика (у попречном правцу), n_c представља број можданика у реду и m коефицијент који се одређује из формуле:

$$m = n_r - n_r^{s/5d} \quad (5)$$

1.1.1. Дјелимично префабриковане коловозне плоче

Код дјелимично префабрикованих елемената само доњи дио коловозне плоче је префабрикован. Дужина префабрикованих плоча у правцу осе моста варира од 3 до 5 m. За постизање спрегнутог дејства користе се можданици који се постављају у џепове (shear pockets или box-outs). Распоред можданика није континуалан, већ се они налазе у

групи на одређеном растојању. Из економских разлога погодан је равномјеран распоред џепова дуж носача. На слици 2 приказан је процес изградње који се састоји од постављања на челичне носаче префабрикованих плоча, које преузимају улогу сталне оплате, а затим се врши добетонирање коловозне плоче. Основне предности дјелимично префабрикованих плоча [3]: мала тежина (једноставан рад приликом транспорта и монтаже) и лако остваривање спрегнутог дејства.

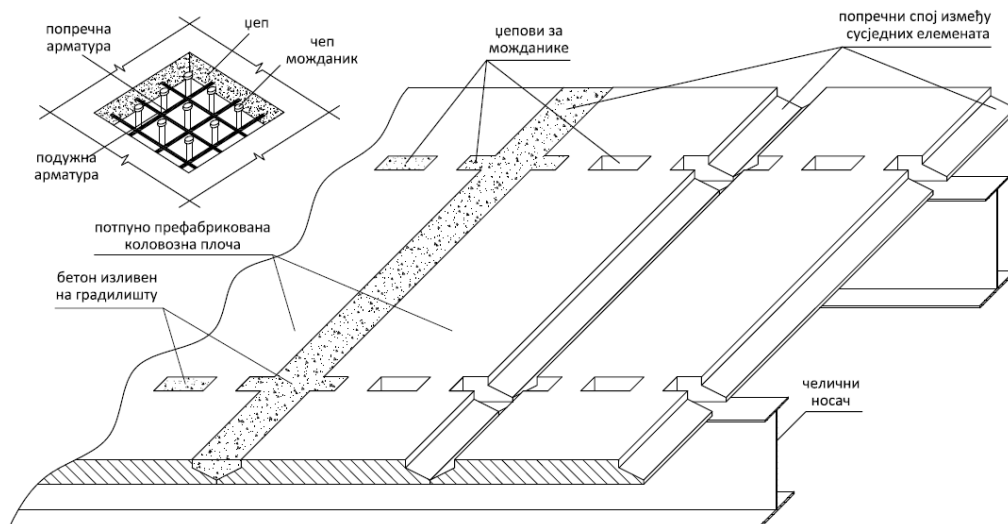


Слика 2. Дјелимично префабриковане коловозне плоче [9]

Овакав поступак грађења садржи танке префабриковане плоче, што представља и највећу ману. Користе се префабриковане плоче дебљине 80–100 (120) mm и дебљина свјежег бетона 200–300 mm. Управо због тога, монтажне плоче захтијевају велику количину арматуре која је неопходна за прихватање утицаја за вријеме транспорта, монтаже и додатне тежине свјежег бетона који се излива преко њих док се не постигне спрегнуто дејство. Као остали недостаци истичу се велика деформабилност елемената и појава прслина у фазама монтаже. За елиминисање ових недостатака могу се користити дјелимично префабриковане плоче са тракама. Такве плоче представљају префабриковане тракасте плоче са пуном дебљином плоче на мјесту траке а бетон се излива на градилишту између трака.

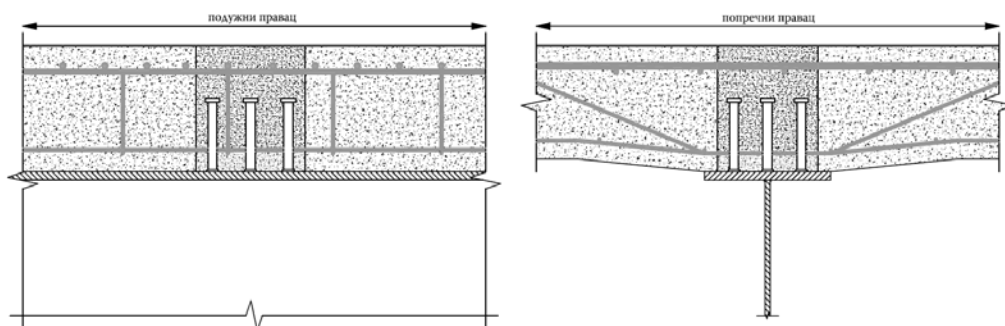
1.1.2. Потпуно префабриковане коловозне плоче

Због наведених проблема код дјелимично префабрикованих плоча препоручује се употреба потпуно префабрикованих. Потпуно префабриковане коловозне плоче се користе у већој мјери у односу на дјелимично префабриковане. Са пуном префабрикованом плочом, приказаном на слици 3, коловозна површина је скоро читава префабрикована. Код овакве градње бетонирање се односи на попуњавање простора за спрезање (џепова) и спојева између елемената. Ефекат спрезања постиже се преко можданика који се постављају у џепове у префабрикованој плочи. Џепови су, као и код дјелимично префабрикованих плоча, распоређени равномјерно дуж носача. Детаљ џепа потпуно префабриковане коловозне плоче са арматуром и можданицима приказан је на слици 4.



Слика 3. Потпуно префабриковане коловозне плоче [9]

Осим мањег бетонирања, предности потпуно префабрикованих плоча јесу: уштеда у арматури, раније пуштање саобраћаја, квалитетније изведени радови с обзиром на то да се изводе у постројењу за префабрикацију, бржа изградња и значајно смањена деформација скупљања. Највећи недостатак потпуно префабрикованих коловозних плоча је остваривање континуитета у спојевима, посебно код континуалних система на мјестима гдје је присутно затезање у коловозној плочи.



Слика 4. Детаљ џепа код потпуно префабриковане коловозне плоче [9]

Димензије потпуно префабрикованих плоча зависе од ширине моста, услова транспорта, распореда џепова и арматуре, опреме на градилишту, односно, монтаже, јер посједују велику тежину. Обично се користе плоче дужине 1,80–2,40 m. Ширина плоче зависи од ширине коловоза. Код коловоза ширине преко 14 m користе се сегментне плоче. Дебљина плоча зависи од оптерећења (стално и покретно) и конфигурације (распореда) главних носача. Минимална дебљина плоча је 250 mm, што је неопходно за адекватно постављање арматуре. Префабриковане елементе је потребно статички контролисати у свим фазама транспорта и монтаже. Потпуно префабриковане плоче могу се примијенити и код широких мостова. У том случају префабриковане плоче читаве ширине нису рационалне. Користе се плоче мањих ширина (сегментне) које се спајају подужно и попречно. Треба избјегавати подужне спојеве изнад главних челичних носача чиме се компликује рад око можданика и арматуре за спој и продужује вријеме

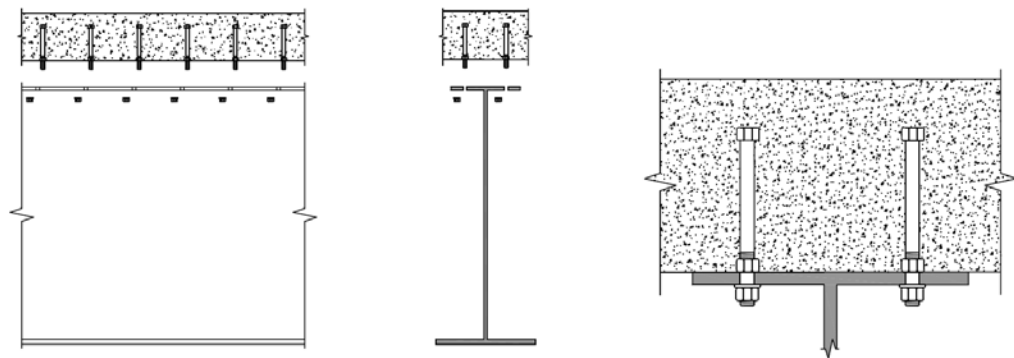
изградње. Код великих ширина аутори [3] предлажу рјешење са формирањем подужне траке између префабрикованих елемената. Овакво рјешење приказано је на слици 5.



Слика 5. Префабриковане коловозне плоче код мостова великих ширина

1.2. ПРЕФАБРИКОВАНЕ ПЛОЧЕ СА ЗАВРТЊЕВИМА КАО СРЕДСТВОМА ЗА СПРЕЗАЊЕ

Осим можданика са главом, који се најчешће користе у префабрикованим мостовима, могућа је и употреба завртњева као средства за спрезање. Њихова највећа предност огледа да у сувом поступку градње и брзој монтажи, за разлику од традиционалног начина грађења спрегнутих конструкција или за разлику од грађења помоћу префабрикације употребом можданика са главом. Осим тога, употребом завртњева омогућена је демонтажа коловозних плоча при замјени или реконструкцији мостовске конструкције. У недостатке може се сврстати: висока почетна цијена грађења и већа прецизност приликом израде префабрикованих армиранобетонских плоча у односу на можданике са главом.



Слика 6. Начин спајања префабриковане плоче и главног челичног носача

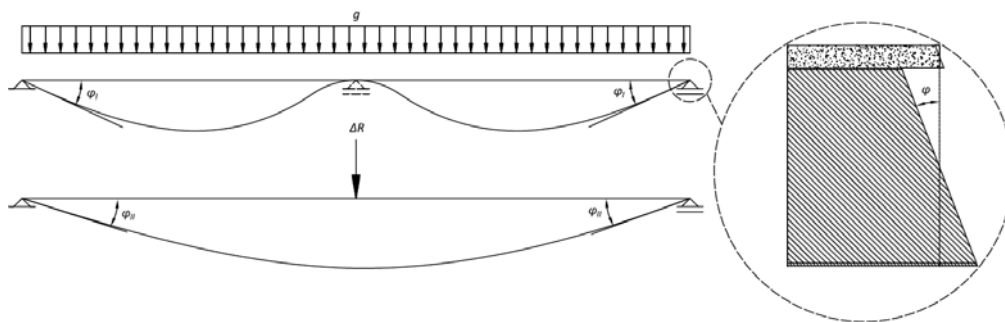
Завртњеви се убетонирају у префабриковане армиранобетонске плоче и на градилишту се постављају у унапријед припремљене рупе на ножици главног носача. На слици 6 је приказан поступак монтаже префабриковане плоче и главног носача (лијево) и веза између њих након завршене монтаже. Толеранција (величина зазора – clearance) између пречника завртња и рупе представља важан фактор при прорачуну спрегнутих конструкција помоћу завртњева. Величина зазора мора бити веће него код употребе у класичним металним конструкцијама (2–3 mm, па и више). Осим додатног напрезања челичног носача док се зазор не поништи (док се не постигне спрегнуто дејство), величина зазора утиче и на вријеме монтаже (већи зазор – бржа монтажа – веће напрезање челичног носача), што је директно повезано са цијеном конструкције.

Величину зазора потребно је контролисати кроз фазе грађења. Поништење зазора могуће је остварити на више начина. Додатно напрезање челичног носача док се зазор не затвори укратко ће се представити сљедећим примјером. У раду [9] је приказан

прорачун напона за челични и спрегнути пресјек за карактеристичну комбинацију дејстава у случају претпостављеног зазора $\Delta d=3$ mm на мосту прости греде распона 40 m. Помјерање на мјесту зазора представља клизање у смичућем споју и за прорачун се може претпоставити половина претпостављеног зазора $\delta_{sv}=\Delta d/2$. Уобичајени начин монтаже спрегнутих мостова подразумијева употребу привремених стубова (јармова), па је исти усвојен и у овом примјеру. На слици 7 приказане су фазе рада конструкције. У првој фази (континуалан носач на два поља) зазор је могуће поништити помоћу сопствене тежине конструкције g. У том случају помјерање на мјесту споја износи:

$$\delta_I = e \cdot \frac{g \cdot (L/2)^3}{48 \cdot E \cdot I_a} \quad (6)$$

гдје су: e растојање између тежишта бетона и тежишта челичног дијела пресјека, L укупна дужина моста, E модул еластичности и I_a момент инерције челичног пресјека.



Слика 7. Фазе затварања зазора

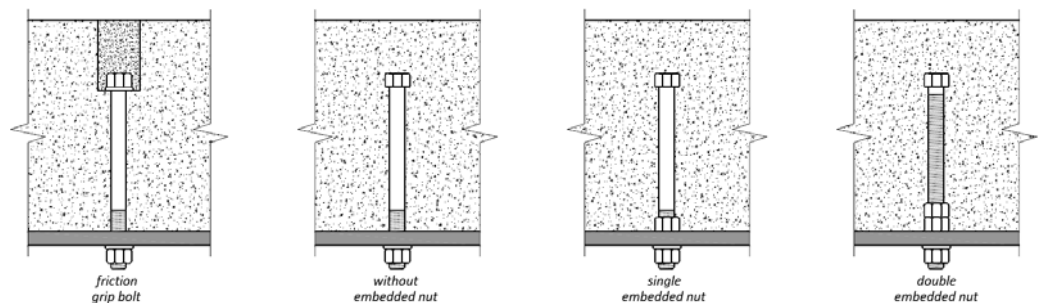
Ако је $\delta_I < \delta_{sv}$ спрегнуто дејство није остварено и утицаје прихвата само челични носач. Након уклањања привременог стуба на носач дјелује његова реакција. С обзиром на то да је у том случају носач система прости греде и оптерећен концентрисаном силом, помјерање је једнако:

$$\delta_{II} = e \cdot \frac{\Delta R \cdot L^2}{16 \cdot E \cdot I_a} \quad (7)$$

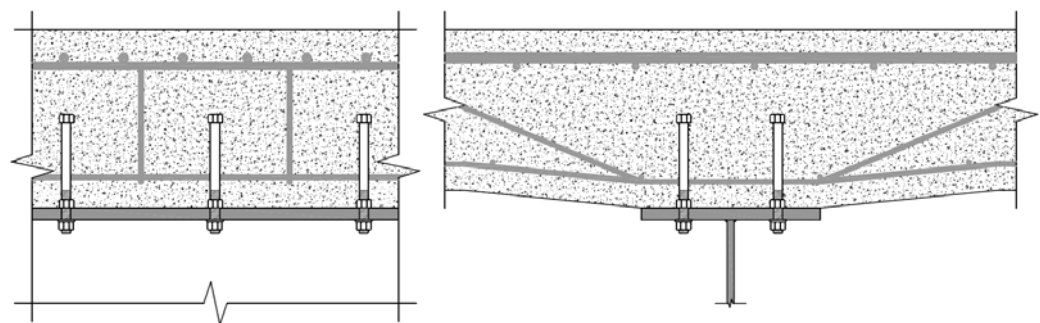
Из услова да је $\delta_I + \delta_{II} = \delta_{sv}$ добија се дио реакције привременог стуба ΔR која се наноси на неспрегнути пресјек, док остатак реакције опада на спрегнути пресјек. Усвајањем великог зазора може се десити да се ни последице овог не поништи зазор. У том случају оптерећење из претходне двије фазе дјелује само на челичном пресјеку, док се зазор поништава осталим оптерећењем (додатно стално), што није рационално. Такође, потребно је напоменути да величина додатног напрезања челичног носача зависи и од облика челичног носача. У случају симетричних носача напрезање је веће него код моносиметричних (носачи симетрични око своје слабије осе инерције). Разлог томе су боље геометријске карактеристике моносиметричних челичних пресјека (неутрална оса се налази у доњем дијелу носача, што резултује мањим напонима у доњој ножици који се касније сабирају кроз фазе рада конструкције).

У зависности од начина постављања завртњева у бетонску плочу, постоје двије подјеле. Слика 8 приказује различите начине примјене завртњева у спрегнутим конструкцијама

када се завртњеви постављају у бетонску плочу непосредно прије бетонирања. Након очвршћавања бетона завртњеви остају уграђени у бетонској плочи и оне се као такве допремају на градилиште. Рад на градилишту односи се на постављање завртњева у претходно припремљене рупе на ножици челичног носача. Спрегнуто дејство се остварује на различите начине и помоћу различитих завртњева, па тако постоје завртњеви који смичуће силе прихватају трењем (friction grip bolt) или завртњеви без матице (without embedded nut) или са уграђеном (single embedded nut) односно, са двоструком матицом (double embedded nut) [10]. На слици 9 приказан је детаљ армирања и остваривања спрегнутог дејства помоћу завртњева са једном уграђеном матицом.

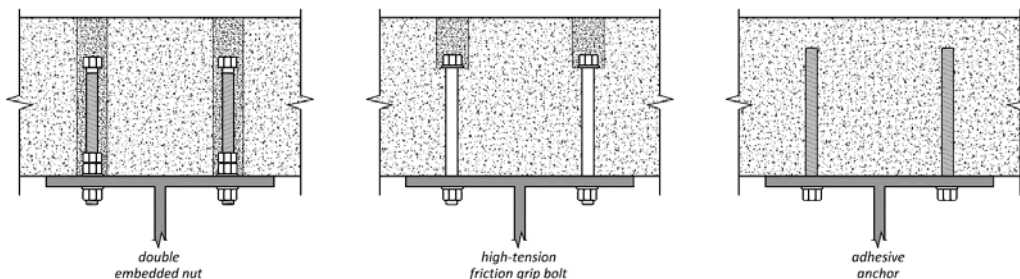


Слика 8. Врсте примјене завртњева у спрегнутим конструкцијама уграђеним у префабриковану плочу



Слика 9. Подужни и попречни пресјек армирања и остваривања спрегнутог дејства помоћу завртњева [9]

Насупрот томе, завртњеви се могу постављати у претходно припремљене рупе у бетонској плочи и ножици челичног носача, односно, врши се бушење оба материјала приликом постављања завртњева, слика 10. Приједлог оваквог начина грађења представљен је од стране [11]. У том случају зазор између завртња и бетонске плоче је доста већи од зазора између завртња и ножице челичног носача и може да се креће и до 35 mm. Ова величина зазора се испуњава инјекционом масом високе чврстоће. Као и код претходног начина примјене завртњева, и у овом случају се користе разне врсте завртњева (са уграђеним двоструким матицама) и на различите начине се прихватају смичуће силе, помоћу трења (high-tension friction grip bolt) или смицањем завртња и локалним притиском у бетону (double embedded nut, adhesive anchor). Предност овог начина грађења огледа се у примјени код постојећих неспрегнутих мостова када је неопходно објезбиједити спрегнуто дејство између бетонске плоче и челичног носача.



Слика 10. Врсте примјене завртњева у спрегнутим конструкцијама уграђеним накнадно у префабриковану плочу

Будући да оваква средства за спрезање нису дефинисана Еврокодом 4, њихова носивост се одређује само експерименталним тестовима. На основу тога, аутор [12] предлаже изразе за носивост завртњева пречника већег од 12 mm са уграђеном матицом (single embedded nut). Као и у случају смицања можданика са главом, прорачунска носивост завртњева на смицање узима се као мања вриједност од носивости бетона на смицање $P_{c,Rd}$ и носивости завртњева на смицање $P_{b,Rd}$. Прорачунска носивост завртњева на смицање може се одредити из израза [12]:

$$P_{c,Rd} = \frac{55 \cdot \alpha_c \cdot d^{1,9} \cdot (f_{ck} \cdot h_{sc} / d)^{0,4} + 22\,000}{\gamma_V} \quad (8)$$

$$P_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_V} \quad (9)$$

Ознаке у претходним изразима означавају: d пречник завртња, A_s попречни пресјек завртња на затезање ($A_s \approx 0,785 \cdot d^2 \cdot \pi / 4$), h_{sc} висина завртњева изнад ножице, f_{ub} гранична чврстоћа на затезање завртњева у N/mm^2 која је дефинисана у [13], f_{ck} чврстоћа бетона при притиску на цилиндар и γ_V парцијални коефицијент сигурности (може се одредити помоћу експерименталних тестова или предложено од стране [12] да се усвоји препоручена вриједност као и за можданике $\gamma_V = 1,25$). Поред тога, коефицијенти α_c и α_b одређују се из израза:

$$\alpha_c = \frac{22,50}{d+3} \leq 1,0 \quad (10)$$

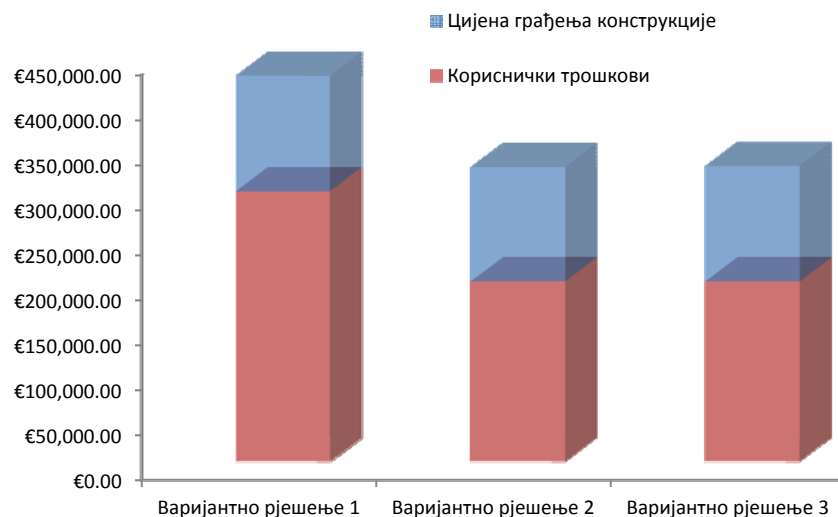
$$\alpha_b = 0,60 \cdot \left(\frac{34}{d}\right)^{0,23} \quad (11)$$

Такође, завртњеви треба да испуњавају критеријум дуктилности као и чеп можданици како би било омогућено прихватање момента пуне пластичне носивости спрегнутог пресека. Критеријум дуктилности за завртњеве може се представити помоћу односа:

$$P_{b,Rd} / P_{c,Rd} > 0,963 \quad (12)$$

1.3. ПРЕДНОСТИ И НЕДОСТАЦИ ПРЕФАБРИКОВАНИХ МОСТОВА

Највећа предност префабрикованих спрегнутих мостова у односу на класичне мостове јесте скраћење времена грађења, што директно утиче на мању укупну цијену конструкције. Економска анализа извршена на друмском мосту просте греде распона 40 m приказана је у раду [9]. Анализа обухвата три варијантна рјешења. Варијантно рјешење 1 представља класичан начин грађења употребном чеп можданика. Варијантна рјешења 2 и 3 су потпуно префабриковане коловозне плоче гдје су за средства за спрезање кориштени груписани можданици и завртњеве, респективно. Почетни трошкови, који обухватају саму конструкцију моста, јесу већи за префабриковане елементе. Међутим, укупни трошкови, укључујући корисничке трошкове и вријеме грађења, јесу доста мањи. Коначни трошкови највише зависе од степена префабрикације. Што је префабрикација више искориштена, то су трошкови мањи [14]. Потребно је напоменути да су кориснички трошкови усвојени на основу претходних анализа и да зависе од много фактора. Одређивање корисничких трошкова није једноставно и обухвата много студија. Они обухватају трошкове у току грађења конструкције када је саобраћај заустављен или преусмјерен на привремене/сталне путеве или мостове. Основни фактор који утиче на вриједност ових трошкова је вријеме грађења. На графикону 1 приказана је претходна анализа из које се виде да су трошкови изградње моста на градилишту (варијантно рјешење 1) најмањи, али кориснички трошкови су највећи и управо они чине префабриковане мостове најеконичнијим рјешењем.



Графикон 1. Цијена конструкције моста за разматрана варијантна рјешења [9]

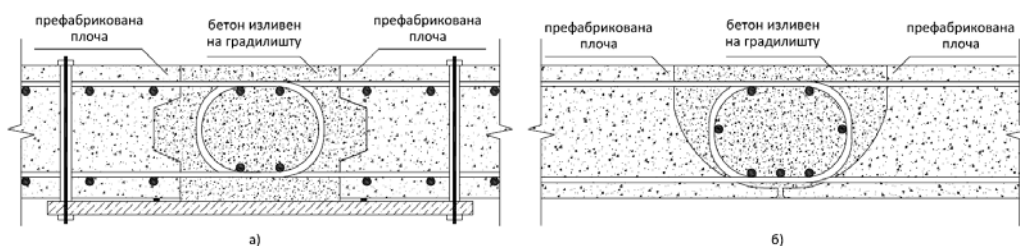
Остале предности префабрикованих мостова су: смањено ремећење саобраћаја и утицаја на околину, мањи ниво бетонирања на градилишту, уштеда у арматури, повећан квалитет изведених радова (префабриковани елементи израђени у бољим климатским условима), употреба преко разних препрека и на тешко доступним мјестима (аутопутева, ријека, долина), већи степен безбједности, потребно мање времена и средстава за поправке и замјене коловозних плоча, боље експлоатационе карактеристике (смањено скупљање у коловозној плочи, што утиче на смањење пукотина) и могућност израде за

вријеме ниских температура. Као главне недостатке потребно је истаћи: израда префабрикованих елемената (сложена оплата), редукована носивост чеп можданика распоређених групно, мала толеранција приликом постављања префабрикованих елемената, потребна велика прецизност при изради елемената код мостова у кривини, велика прецизност главног челичног носача (могући проблеми са распоредом група можданика и рупа за завртњеве у фази монтаже).

2. СПОЈЕВИ ПРЕФАБРИКОВАНИХ ПЛОЧА

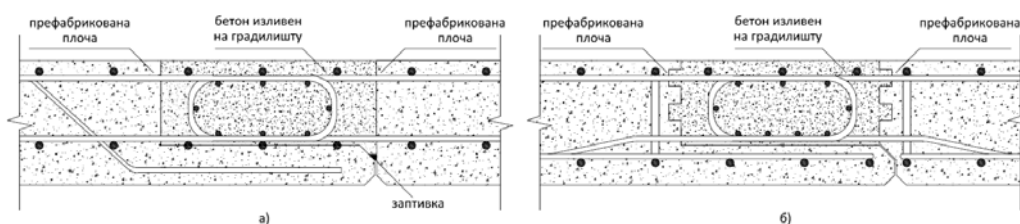
2.1. ПОПРЕЧНИ И ПОДУЖНИ СПОЈЕВИ – ВЛАЖНИ ПОСТУПАК

За извођење потпуно префабрикованих плоча користе се спојеви који треба да буду ефикасни и једноставни за израду. Спојеви се формирају на два начина, у зависности од тога да ли захтијевају оплату при извођењу. Остављањем размака између елемената 200–650 mm, настаје трансверзалан спој. Арматура се испушта из префабрикованих елемената и врши се преклапање на мјесту споја или се арматурне шипке савијају (на мјесту споја образује се омча) из горње у доњу зону. На слици 11 а) приказан је начин формирања спојева са оплатом, чиме се негативно утиче на предност префабрикације [15].



Слика 11. Спојеви између префабрикованих елемената

Поред тога, спојеве је могуће извести без оплате формирањем касета (језгро са касетама – downstand) од префабрикованих елемената. У том случају на мјесту споја дебљина префабрикованих плоча се редукује на одређеној ширини, чиме се формира потребни простор (касета) за постављање бетона. На основу тога да ли оба префабрикована елемента формирају касету, елементи могу бити симетрични (слика 11 б) [16]) или несиметрични слика 12 а) [3] и 12 б) [17].



Слика 12. Спојеви префабрикованих несиметричних елемената

Спојеве треба провјерити на затезање и савијање а да при томе буду задовољени услови носивости, употребљивости (пукотине) и отпорност на замор. Експериментални тестови (лабораторијски тестови на стварним моделима) служе да се провјере теоријска

истраживања с обзиром на то да су везе префабрикованих елемената слабо дефинисане стандардима. Носивост оваквих спојева представљена је у [3]. Разматрани су различити распореди, број и облици (форме) арматуре и различита геометрија споја. Резултати тестова представљају поређење теоријске чврстоће и понашање спојева при експлоатационом и граничном оптерећењу. У тим анализама показано је да касета повећава чврстоћу пресека на мјесту споја.

Код несиметричних елемената лом се јавља приближно при 90% од претпостављене вриједности, док симетрични елементи имају већу носивост (лом при 95% претпостављене вриједности). Поред тога, симетричним распоредом арматуре повећава се носивост спојева. Такође, тестови су показали да језгра са савијеним шипкама (омчама) могу да прихвате предвиђено оптерећење, које одговара граничној чврстоћи затезања повијених шипки, и да се не јавља пуцање бетона унутар омчи. У експериментима са равним шипкама у касети оптерећење при којем настаје лом превазилази претпостављено оптерећење које се односи на чврстоћу арматуре (чврстоћа на затезање). Међутим, у том случају тешко је одредити допринос арматуре из касете који је очигледно присутан. Употреба попречне арматуре је обавезна. Спојеви који нису имали попречну арматуру достижу лом при 65% претпостављеног оптерећења. Употреба микроарматуре (додатних челичних влакана) ради повећавања чврстоће бетона изливеног на градилишту није значајна.

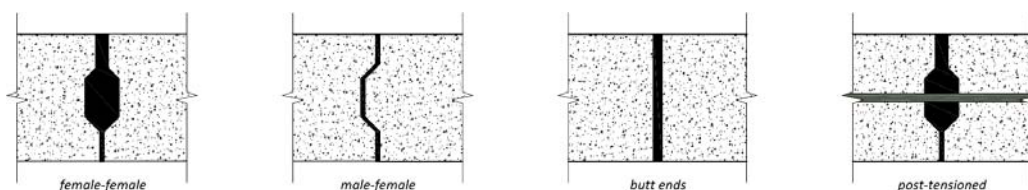
2.2. ПОПРЕЧНИ СУВИ СПОЈЕВИ

Осим претходног начина повезивања префабрикованих елемената, трансверзалне спојеве је могуће извести и помоћи сувих спојева (dry joints). За пренос хоризонталних и вертикалних сила кроз спојеве и за спречавање вертикалног помјерања између префабрикованих коловозних плоча на мјесту споја користе се преклопни бетонски конектори (overlapping keys или shear keys) [18]. Конектори представљају низ преклопних елемената који се налазе дуж споја и представљају значајан детаљ при пројектовању префабрикованих елемената. На слици 13 приказани су уобичајени спојеви између префабрикованих елемената. Осим прецизности израде самих спојева, посебна пажња се поклања армирању конектора. Пожељно је елементе израђивати један помоћу другог како би се добило на прецизности спојева. Први елемент се може извести помоћу класичне оплате, док се сљедећи елементи формирају тако што им претходни елементи на мјесту споја представљају оплату.

У [19] је представљена експериментална анализа бетонских конектора. Показано је да се максимално 40% саобраћајног оптерећења према [20], које дјелује на један префабриковани елемент, преноси преко једног споја. Остатак оптерећења се преноси директно на главне челичне носаче или кроз други спој на супротној страни префабрикованог елемента. На основу тога, бетонске конекторе је потребно пројектовати са носивошћу преко 40% оптерећења дефинисаног према [20]. Носивост конектора на смицање може се одредити кориштењем [5] док аутори [19] препоручују додатне приједлоге у погледу детаља армирања конектора. За елементе са арматуром за смицање у нагибу, носивост при смицању једнака је [5]:

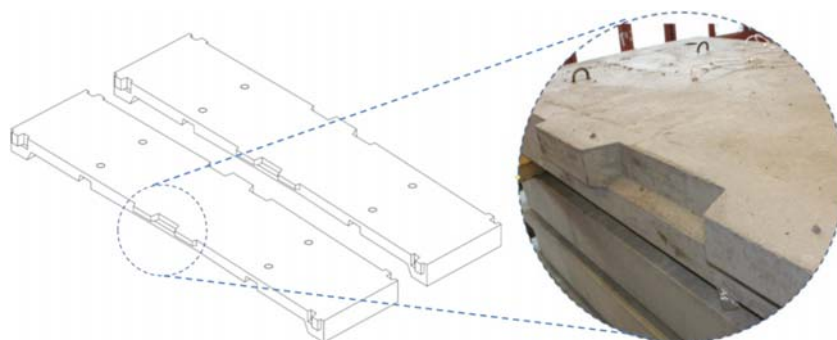
$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha \quad (13)$$

гдје су: α угао између арматуре за смицање и осе елемента управне на силу смицања, A_{sw} површина пресека арматуре за смицање, s растојање шипки, f_{ywd} прорачунска граница развлачења арматуре за смицање и z крак унутрашњих сила.



Слика 13. Уобичајени попречни суви спојеви између префабрикованих елемената [21].

Све силе се преносе преко контактнoг притиска између бетонских површина. Односно, овакви трансверзални спојеви не могу пренијети силе затезања. Због тога, најпогоднији статички систем је проста греда јер је коловозна плоча читавом дужином распона у притиску. Код континуалних система на мјестима негативних момената могуће је извести претходно напрезање у подужном правцу. На овај начин постижу се квалитетнији спојеви и боље експлоатационе карактеристике. На слици 14 приказана је префабрикована коловозна плоча са сувим спојевима са преклопним конекторима.



Слика 14. Префабрикована коловозна плоча са сувим спојевима [21]

Армиранобетонске коловозне плоче са сувим спојевима су погодније за мостове малих распона и статичког система просте греде. Код таквих мостова цјелокупно оптерећење се узима у обзир на спрегнутом пресеку. Карактеристике и носивост спрегнутог пресека одређује се према [22]. Могуће је примијенити исту технику и код мостова са више распона (континуални системи). У том случају, на мјестима гдје је бетонска плоча у затезању, челични носач је пројектован да прихвати читаво оптерећење [18]. Поред тога, на тим мјестима присутно је отварање спојева, што може негативно утицати на заштитне слојеве (хидроизолацију) и асфалт, што даље утиче на животни вијек конструкције. Овако пројектовани мостови захтијевају више челика на мјестима ослонаца, што се негативно одражава на цијену конструкције. Ипак, предност овог типа мостова није у смањењу почетне цијена конструкције већ у бржој монтажи, бољим условима рада, одсуству оплате и мањим корисничким трошковима. Теоријско отварање спојева на мјестима негативних момената може се одредити из израза:

$$\delta = \frac{(M_{sr} / W_{tf}) \cdot (e + h_c)}{E} \cdot L \quad (14)$$

и потребно је да задовољи експлоатационе услове за слојеве који се наносе преко префабрикованих елемената. У изразу (14) кориштене су следеће ознаке: M_{sr} средња вриједност момент дуж једног префабрикованог елемента, W_{tf} еластични отпорни момент за горњу страну горње ножице, e вертикално растојање до неутралне осе мјерено од врха горње ножице, h_c дебљина бетонске плоче и L дужина елемента.

Код мостова сложене геометрије, која обухвата промјену кривине, ширине коловоза дуж моста итд., боље рјешење је са влажним спојевима у односу на суве, јер омогућавају извјесна помјерања елемената на мјесту споја, односно, могуће су измјене на префабрикованим елементима на мјесту споја. Насупрот томе, ако је потребна замјена мостовске конструкције или изградња моста у подручју са ограниченим приступом (изнад постојећих саобраћајница), суви спојеви имају предност у односу на влажне.

3. ЗАКЉУЧАК

Грађење спрегнутих мостова помоћу префабрикованих коловозних плоча представља рационално и успјешно рјешење. У раду су представљене многобројне предности префабрикованих мостова, а најзначајније су: краће вријеме грађења, сигурност при изради конструкције и квалитет изведених радова. Због бољих карактеристика препоручује се употреба потпуно префабрикованих коловозних плоча. Континуитет између префабрикованих елемената могуће је извести сувим и влажним спојевима. Суви спојеви имају предност код мостова малих и средњих распона, док се влажни спојеви препоручују код мостова сложене геометрије. Употребом завртњева и чеп можданика као средстава за спрезање постижу се исти ефекти у погледу граничних стања и анализе трошкова. Предност завртњева се огледа у једноставнијем одржавању конструкције и уклањању конструкције након достигнутог животног вијека. Тиме се значајно смањује утицај оваквих конструкција на животну средину, поспјешујући одрживи развој при грађењу.

Трошкови изградње префабрикованих мостова су већи у односу на трошкове изградње мостова са коловозном плочом ливеном на градилишту. Међутим, употребом процеса префабрикације могуће је остварити уштеде у коначним трошковима и до 25%. Разлог за овакву велику уштеду је значајно смањење трошкова током изградње конструкције, и до 40% у односу на класичне методе грађења. Развијањем и стандардизацијом префабрикованих елемената, детаља веза, фаза монтаже процес префабрикације резултираће мањим почетним трошковима и пружати завршни производ високог квалитета.

4. БИБЛИОГРАФИЈА

- [1] S. Chang-Su, L. Pil-Goo and C. Sung-Pil, "Design of shear connection in composite steel and concrete bridges with precast decks," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 57, pp. 203–219, 2001.
- [2] S. R. Gordon and Ian M. May, "Precast deck systems for steel-concrete composite bridges," *Institution of Civil Engineers*, vol. 160, pp. 25–35, 2007.
- [3] E. Yandzio and David C. Iles, *Precast concrete decks for composite highway bridges*. Berkshire: The Steel Construction Institute, 2004.

- [4] "Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures. Part 1–1: General rules and rules for buildings," Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation (CEN), 2004.
- [5] "Eurocode 2, Design of concrete structures. Part 1–1: General rules and rules for buildings," Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation (CEN), 2002.
- [6] S. S. J. Moy and C. Tayler, "The Effect of Precast Concrete Planks on Shear Connector Strength," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 36, pp. 201–213, 1996.
- [7] C. Xu, K. Sugiura, C. Wu and Q. Su, "Parametrical static analysis on group studs with typical push-out tests," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 72, pp. 84–96, 2012.
- [8] М. Спремић. "Анализа понашања групе еластичних можданика код спрегнутих носача од челика и бетона." Докторска теза, Грађевински факултет, Београд, 2013.
- [9] С. Ковачевић. "Пројектовање и конструисање спрегнутих мостова са аспекта префабриковане градње." Дипломски-мастер рад, Грађевински факултет, Београд, 2013.
- [10] М. Pavlović, Z. Marković, М. Veljković i D. Buđevac, "Bolted shear connectors vs. headed studs behaviour in push-out tests," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 88, pp. 134–149, 2013.
- [11] G. Kwon, M. D. Engelhardt and R. E. Klingner, "Behavior of post-installed shear connectors under static and fatigue loading," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, pp. 532–541, 2010.
- [12] М. Pavlović. "Resistance of Bolted Shear Connectors in Prefabricated Steel–Concrete Composite Decks." PhD thesis, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 2013.
- [13] "Eurocode 3, Design of steel structures. Part 1–8: Design of joints," Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation (CEN), 2003.
- [14] R. Hallmark, H. White and P. Collin, "Prefabricated Bridge Construction across Europe and America," *Practice Periodical on Structural Design and Construction (ASCE)*, vol. 17, pp. 82–92, 2012.
- [15] D. Matteis, G. Chauvel, N. Cordier, P. Corfdir, R. Leconte, D. Faucheur and R. Leglise. *Steel-Concrete Composite Bridges Sustainable Design Guide*. France: Setra, 2010.
- [16] Stuart R. Gordon and Ian M. May, "Precast Bridge Deck Units in the United Kingdom," *Workshop on Prefabricated Composite Bridges*, P. Collin, R. Hallmark, M. Nilsson, Stockholm: Lulea University of Technology Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering, pp. 69–85, 2009.
- [17] P. Schaumann and J. Upmeyer, *Composite bridges with precast concrete slabs*. Hanover: Institute for Steel Construction, 1999.
- [18] R. Hallmark, P. Collin and A. Stoltz, "Innovative Prefabricated Composite Bridges," *Structural Engineering International*, vol. 19, pp. 69–78, 2009.
- [19] R. Hallmark, M. Nilsson and P. Collin, "Concrete shear keys in prefabricated bridges with dry deck joints," *Nordic Concrete Research*, vol. 44, pp. 109–122, 2011.
- [20] "Eurocode 1, Action on structures. Part 2: Traffic load on bridges," Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation (CEN), 2003.
- [21] R. Hällmark, *Prefabricated Composite Bridges—a Study of Dry Deck Joints*. Lelea, Sweden: Lulea University of Technology Department of Civil, Mining and Natural Resources Engineering, 2012.
- [22] "Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures. Part 2: General rules and rules for bridges," Brussels, Belgium: European Committee for Standardisation (CEN), 2005.