

Primljen / Received: 2.5.2023.
Ispravljen / Corrected: 25.1.2024.
Prihvaćen / Accepted: 20.3.2024.
Dostupno online / Available online: 10.5.2024.

Učinak uzoraka utora na čvrstoću prionljivosti u betonu ojačanom bambusom

Autori:



M. Sadique Ameen, dipl.ing.građ.
Nacionalni institut za tehnologiju Visvesvaraya,
Indija
sadiqueameen007@gmail.com
Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Debarati Datta**, dipl.ing.građ.
Nacionalni institut za tehnologiju Visvesvaraya,
Indija
debaratidatta@apm.vnit.ac.in

Izvorni znanstveni rad

M. Sadique Ameen, Debarati Datta

Učinak uzoraka utora na čvrstoću prionljivosti u betonu ojačanom bambusom

Upotreba bambusa kao materijala za ojačanje betona posljednjih je godina privukla pozornost zbog niske cijene, obnovljivosti i visokog omjera čvrstoće i težine. Međutim, čvrstoća prionljivosti bambusa i betona ključni je čimbenik koji utječe na ukupnu učinkovitost betonskih konstrukcija ojačanih bambusom. U ovom je istraživanju veza između bambusa i betona istražena pull-out metodom. Ispituje se čvrstoća prionljivosti triju različitih uzoraka utora - pravokutni, polukružni i V-urez. Također se ispituju različite kemijske obrade kako bi se smanjila sposobnost apsorpcije vode bambusovih traka. Najveće čvrstoće prionljivosti postignute nakon primjene Bond Tite adhezivne i bitumenske boje su 1,94 MPa odnosno 1,41 MPa. Rezultati ovog ispitivanja mogu biti korisni u optimizaciji projektiranja i izgradnje betonskih konstrukcija ojačanih bambusom.

Ključne riječi:

ojačanje bambusom, različiti uzorci utora, bambusove trake s utorima, obrada površine, mehaničko uklještenje

Original research paper

M. Sadique Ameen, Debarati Datta

Effect of groove patterns on composite bond strength in bamboo-reinforced concrete

The use of bamboo as a reinforcement material in concrete has garnered attention in recent years due to its low cost, renewability, and high strength-to-weight ratio. However, the bond strength between bamboo and concrete is a crucial factor affecting the overall performance of bamboo-reinforced concrete structures. In this study, the bond between bamboo and concrete is investigated through pull-out tests. Three different groove patterns - rectangular, semi-circular, and V-notch - are examined for their bond strength. Various chemical treatments are also being explored to reduce the water absorption capacity of bamboo splints. The highest bond strengths achieved after using Bond Tite adhesive and bituminous paint are 1.94 MPa and 1.41 MPa, respectively. The findings of this study can be valuable in optimizing the design and construction of bamboo-reinforced concrete structures.

Key words:

bamboo reinforcement, different grooving patterns, grooved bamboo strips, surface treatments, mechanical interlock

1. Uvod

Armirani beton je jedna od najznačajnijih inovacija u građevnoj industriji. Beton, najrasprostranjeniji građevni materijal na svijetu, odlikuje se iznimnom izdržljivošću, zahtijeva minimalno održavanje i nudi svestranost u oblikovanju. Također pokazuje i izvanrednu tlačnu čvrstoću. Kako bi se nadoknadila relativno niska vlačna čvrstoća betona, primjenjuje se čelik, iako je skuplji. Brojna istraživanja usmjerena su na zamjenu čelika pristupačnijim i lako dostupnim materijalima, osobito u zemljama u razvoju. Ipak, čelik posjeduje izvanredna mehanička svojstva i pokazao se isplativijim od alternativnih metala [1].

U zemljama poput Indije, gdje je potražnja za stambenim objektima velika, upotreba građevnih materijala je naglo porasla, što je dovelo do iscrpljivanja tradicionalnih prirodnih resursa kao što je željezna ruda koja je potrebna za čeličnu armaturu. Štoviše, proizvodnja konvencionalnih materijala pridonosi uništavanju okoliša zbog emisije stakleničkih plinova. Emisije koje nastaju proizvodnjom čelika, prije svega ugljikov dioksid, ali i SO_x, NO_x i PM_{2.5}, imaju značajan utjecaj na okoliš [2]. Osim toga, proizvodni proces stvara kruti otpad, opasni otpad i zagađujuće otpadne vode čime se dodatno šteti okolišu. S obzirom na to da potražnja i dalje raste, cijena čelika je znatno porasla tijekom godina, što je zahtijevalo istraživanje alternativnih održivih materijala. Brojni znanstvenici diljem svijeta provode istraživanja kako bi pronašli materijale koji bi zamijenili tradicionalne građevne materijale [1]. Neke od tih alternativa uključuju bambus, jutu, leteći pepeo, rižinu ljusku, reciklirane agregate i ljuske palmirnih koštica. U tijeku su opsežna ispitivanja kako bi se istražili navedeni alternativni građevni materijali koji su isplativi i ekološki održivi.

Bambus predstavlja obećavajuću alternativu čeliku, a može se pohvaliti impresivnom čvrstoćom i fleksibilnošću što ga čini prikladnim za građevne potrebe. U nekim slučajevima, bambus se može mjeriti s čelikom i u vlaklu i u tlaku. Njegova inherentna fleksibilnost omogućuje mu da izdrži potrese i jake vjetrove, što ga čini posebno pogodnim za određene konstrukcijske primjene [1]. Sve češće prepoznat kao održiv građevni materijal, bambus se stoljećima diljem svijeta primjenjuje u građevinarstvu. Sa svojim korisnim mehaničkim svojstvima i pozitivnim ekološkim, društvenim i ekonomskim utjecajima, bambus se predstavlja kao potencijalna zamjena za čeličnu armaturu, posebice u jeftinim građevinama u ruralnim i urbanim područjima. Naime, omjer čvrstoće i težine bambusa nadmašuje čelik za više od šest puta [3].

Uzgoj bambusa pruža značajne koristi za okoliš. Tijekom svog rasta bambus apsorbira otprilike 1 tonu CO₂, a proizvodnja čelika u okoliš emitira oko 50 puta više CO₂ [4]. Kao najbrže rastući obnovljiv i ekološki prihvatljiv materijal, bambus ima veliki potencijal kao održiva alternativa tradicionalnim čeličnim armaturama. Međutim, glavna zabrinutost u vezi s njegovom uporabom leži u slabom prianjanju bambusa i betona.

Diljem svijeta postoji više od 1200 vrsta bambusa, koji predstavlja jednu od vrsta prirodne trave [2]. Dostupnost različitih vrsta bambusa varira ovisno o čimbenicima kao što su regija, vrsta tla, klima i dostupnost vode. Prema IS 15912–2018 [5], u Indiji raste više od 100 vrsta bambusa, od kojih su neke čvrste, a druge pretežno šuplje. Do sada su rigorozna ispitivanja provedena na 20 vrsta. Šesnaest različitih vrsta bambusa u njihovom okruglom obliku, pogodno je za primjenu u građevnoj industriji. Karakteristike čvrstoće tih vrsta variraju ovisno o klimatskim i geografskim uvjetima u kojima se stabljika bambusa razvila.

U ovom je istraživanju upotrijebljena vrsta bambusa pod nazivom *Dendrocalamus strictus* (D. strictus), koja se obično naziva Manvel i koja u lokalnoj regiji raste u izobilju. Fizikalna i mehanička svojstva D. strictusa, kako je navedeno u IS 15912 – 2018, zajedno s dobivenim eksperimentalnim vrijednostima, detaljno su prikazana u tablici 1. Navedena je vrsta među onima koje se u Indijskom državnom zakonu o građenju [7] preporučuju za primjenu u građevne svrhe.

Bambus, kao prirodni materijal, pokazuje različita svojstva ovisno o klimi i uvjetima tla određenog područja. Čimbenici poput temperature, vlažnosti i sastava tla mogu utjecati na gustoću, čvrstoću i trajnost bambusa ubranog u različitim regijama. Štoviše, prakse održive berbe, uključujući starost u kojoj se bambus bere i metode koje se primjenjuju, mogu utjecati na njegovu čvrstoću i dugovječnost. Starost u kojoj se bambus bere ima značajnu ulogu u određivanju njegovih mehaničkih svojstava. Mlađi bambus obično je fleksibilniji, a stariji bambus može pokazati veću gustoću i čvrstoću. Optimalno vrijeme berbe može se razlikovati među vrstama i regijama, pri čemu lokalne prakse odlučuju o vremenu berbe bambusa za određene primjene. Uzimajući u obzir ta razmatranja, IS 15912 – 2018 i NBC (*National Building Code of India* - Indijski državni zakon o građenju) [7] sustavno su do danas ispitali 20 vrsta bambusa, preporučujući 16 vrsta za uporabu u građevinarstvu. Među 16 preporučenih vrsta je i *Dendrocalamus strictus*.

Uspješna integracija bambusa u betonske konstrukcije uvelike se oslanja na postizanje čvrste veze između bambusa i betonske matrice. Jedan od pristupa poboljšanju te veze jest uključivanje

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva bambusa (*Dendrocalamus strictus*)

	Svojstva	Vrijednosti prema IS standardu [5]	Eksperimentalne vrijednosti [6]
U uvjetima suhog zraka	Maksimalna tlačna čvrstoća [N/mm ²]	69.1	65.14
	Modul elastičnosti [N/mm ²]	15 · 10 ³	12.3 · 10 ³
	Modul loma [N/mm ²]	119.1	111.6
	Gustoća [kg/m ³]	728	783

uzoraka utora u elemente od bambusa [8]. Formiranje utora, koje uključuje namjernu promjenu geometrije površine bambusa, ima potencijalni učinak na mehaničko uklještenje i prijanjanje bambusa i betona. Razumijevanje učinaka različitih uzoraka utora na čvrstoću prijanjanja kompozita ključno je za optimizaciju učinkovitosti i trajnosti betonskih konstrukcija ojačanih bambusom (engl. *bamboo reinforced concrete structures* - BRC konstrukcija) [8]. Ovaj rad istražuje zamršeni odnos između uzoraka utora i čvrstoće prionljivosti betona ojačanog bambusom. Sustavnim ispitivanjem različitih tehnika formiranja utora i njihovog utjecaja na međupovršinske interakcije bambusa i betona, cilj nam je pružiti vrijedne uvide koji doprinose razvoju smjernica za projektiranje i izgradnju BRC konstrukcija. Istraživanje se ne bavi samo tehničkim aspektima formiranja utora, već naglašava i šire implikacije za održive građevne prakse i promicanje ekološki prihvatljivih građevnih materijala. Kako se građevna industrija nastavlja razvijati prema ekološki osvještenijim rješenjima, rezultati ovog istraživanja mogu odigrati ključnu ulogu u oblikovanju budućnosti primjene betona ojačanog bambusom.

U ovom se radu veza bambusa i betona ispituje pomoću ispitivanja čupanjem. Navedeno ispitivanje uključuje procjenu čvrstoće prionljivosti bambusovih traka s utorima i betonske matrice unutar betonskog cilindra ojačanog bambusom. To je prijeko potrebno za procjenu integracije bambusa i betona, kao i učinkovitosti uzoraka utora u poboljšanju čvrstoće prionljivosti kompozita. Kombinacija mehaničkih i kemijskih mehanizama primjenjuje se za poboljšanje svojstava prionljivosti bambusovih traka s betonom. Različiti uzorci utora primijenjeni na bambusove trake olakšavaju mehaničko djelovanje. Osim toga, za ispitivanje kemijskog djelovanja primijenjene su dvije različite kemijske obrade - Bond Tite adheziv i bitumenska boja.

2. Pregled literature

Tradicionalne metode odabira inženjerskih materijala moraju uzeti u obzir dodatne čimbenike osim čvrstoće, učinkovitosti i cijene, kao što su utjecaj na okoliš i fleksibilnost oblikovanja. Prirodni bambus se pojavljuje kao vrijedan građevni materijal koji nudi potencijal kao materijal za ojačanje za konstrukcijske primjene zbog navedenih dodatnih kvaliteta [9]. Nedavno istraživanje koje su proveli Anusha i sur. [10] ističe značajan doprinos građevne industrije onečišćenju okoliša i iscrpljivanju resursa. U zemljama u razvoju, gdje je potražnja za pristupačnim stanovima velika, potraga za održivim i isplativim građevnim materijalima od velike je važnosti. Istraživanje sugerira da trake od bambusa i polipropilena mogu učinkovito ojačati betonske grede, što donosi nekoliko prednosti. Bambus i polipropilen su obnovljivi izvori s manjim utjecajem na okoliš od čelika. Štoviše, znatno su isplativiji od čelika, što ih čini prikladnima za jeftine stambene projekte. Osim toga, njihova manja težina u usporedbi s čelikom smanjuje ukupno opterećenje konstrukcije. Bambus se može pohvaliti visokom vlačnom čvrstoćom i krutošću, a trake od polipropilena nude izvrsnu otpornost na smicanje.

Istraživanje pokazuje da uporaba bambusovih i polipropilenskih traka može smanjiti troškove izgradnje do 85 % u usporedbi s čeličnom armaturom.

Čvrsto prijanjanje ključno je za učinkovit prijenos opterećenja između armature i betona. Istraživanje je pokazalo da neobrađeni štapovi od bambusa slabo prijanjaju na beton [11]. Prethodna istraživanja koja su primjenjivala grede ojačane bambusom naišla su na izazove, uglavnom zbog slabog prijanjanja bambusa i betona [3, 12]. Poboljšanje prijanjanja bambusa i betona imperativ je za poboljšanje učinkovitosti greda od betona ojačanog bambusom (BRC). Istraživanje Sayeda i sur. [13] naglašava potencijal obrade površine i tehnika valovitosti u povećanju čvrstoće prionljivosti. Oni navode da BRC grede nude održivu alternativu armiranobetonskim gredama (engl. *steel reinforced concrete* - SRC), ali su potrebna daljnja istraživanja i razvoj kako bi se odgovorilo na izazove i optimizirala njihova učinkovitost.

Khatib i Nounu [9] istraživali su potencijalnu upotrebu bambusa s utorima kao ojačanja u betonu. Proveli su eksperimentalna ispitivanja na betonskim gredama ojačanim ili čeličnim šipkama ili bambusovim trakama s utorima, uspoređujući njihova mehanička svojstva kao što su nosivost, savijanje i uzorci pukotina. Rezultati su pokazali da su grede ojačane bambusom imale sličnu nosivost kao grede ojačane čelikom, ali su pokazale veću duktilnost i apsorpciju energije, što se pripisuje čvrstoći i fleksibilnosti bambusa. Također su raspravljali o izazovima i mogućnostima primjene bambusa kao održive i ekološki prihvatljive alternative čeličnoj armaturi u građevinarstvu, naglašavajući potrebu za daljnjim istraživanjem i standardizacijom u ovom području. Azadeh i Kazemi [14] predstavili su nove metode za povećanje čvrstoće prijanjanja bambusa i betona. Istraživali su različite uzorke utora na bambusovim štapovima i njihove učinke na čvrstoću prijanjanja bambusa i betona. Istraživanje je uključivalo eksperimentalna ispitivanja na kompozitnim uzorcima bambusa i betona s različitim uzorcima utora. Rezultati su pokazali da odgovarajući uzorci utora na površini bambusa mogu znatno povećati čvrstoću prijanjanja bambusa i betona.

U novijem istraživanju, Tazowar i sur. [8] ispitivali su metode za poboljšanje učinkovitosti prijanjanja BRC-a pomoću obrade površine i primjenom različitih uzoraka nabora na bambusove trake. Loše prijanjanje predstavlja značajno ograničenje BRC-a, ugrožavajući njegovu učinkovitost i strukturni integritet. Istraživanje je otkrilo da formiranje utora ili uzoraka na površini bambusa poboljšava mehaničko uklještenje s betonom. Rezultati su pokazali da se, u usporedbi s običnim bambusom, čvrstoća prionljivosti značajno povećala za 46 % za pravokutne, 85 % za V-urezane i 81 % za trapezoidne uzorke. Ovo istraživanje predstavlja nov i učinkovit pristup rješavanju ključnog izazova u primjeni bambusa kao održivog materijala za ojačanje. Njime se olakšava šire usvajanje BRC-a u građevinarstvu, promičući ekološki prihvatljive građevne prakse koje štede resurse.

Kute i Wakchaure [15] istraživali su primjenu bambusa kao armature u betonu procjenjujući nekoliko njegovih građevnih svojstava, uključujući vlačnu čvrstoću, tlačnu čvrstoću, čvrstoću prionljivosti s betonom i modul elastičnosti. Proveli

su niz laboratorijskih ispitivanja na betonskim uzorcima ojačanim bambusovim trakama različitih dimenzija i postavljenih u različitim smjerovima, uspoređujući njihovu učinkovitost s učinkovitošću uzoraka ojačanih čelikom. Rezultati su pokazali da su uzorci ojačani bambusom pokazali nižu tlačnu i vlačnu čvrstoću od uzoraka ojačanih čelikom. Međutim, pokazali su veću apsorpciju energije i izdržljivost, što se pripisuje vlaknastoj i duktilnoj prirodi bambusa. Autori su također predložili mjere za povećanje čvrstoće prijanjanja bambusa i betona, kao što je primjena kemijskih obrada, ohrapavljanje površine bambusa i optimiziranje sastava betonske mješavine.

Ukratko, pregled literature naglašava važnost jačanja prionljivosti bambusa i betona kako bi se u potpunosti ostvario potencijal BRC-a kao održivog i konkurentnog građevnog materijala. Prionljivost bambusa i betona ima ključnu ulogu u određivanju učinkovitosti i strukturnog integriteta BRC konstrukcija.

3. Eksperimentalni program

3.1. Karakteristike bambusovih traka

Prema IS 15912 – 2018 [5], čvrsti bambusi ili bambusi s debljim stjenkama i usko raspoređenim općenito se smatraju prikladnima za primjenu u građevinske svrhe [5]. Uzorci bambusa primijenjeni u istraživanju bili su stari između 4 i 5 godina, što predstavlja fazu u kojoj vrste bambusa pokazuju optimalna mehanička i fizikalna svojstva [16]. *Dendrocalamus strictus*, lokalno poznat kao manvel, bambus je srednje veličine kojeg karakteriziraju stabljike u rasponu od 8 do 20 m visine i 25 do 80 mm u promjeru. Internodiji su dužine između 300 do 450 mm i debljine 8 mm do 15 mm. Stabljike su šuplje u vlažnim uvjetima, ali gotovo čvrste kada su suhe. Tijekom berbe, bambusove se stabljike pažljivo biraju kako bi se osigurala ravna i neoštećena geometrija, što rezultira konačnim uzorcima s ravnomjerno raspoređenim vlaknima (s koncentracijom vlakana koja je na vanjskoj površini veća nego u unutarnjem dijelu). Taj precizan proces daje uzorke visoke kvalitete s povoljnim fizikalnim i mehaničkim karakteristikama.

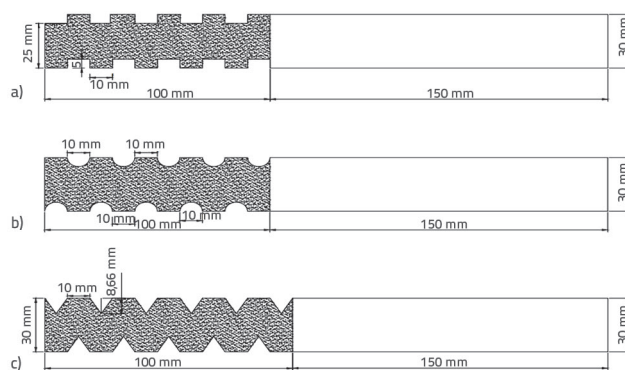
Kako bi se zaštitili od infestacije termitima i štetočinama, očišćene stabljike bambusa uranjaju se u 6 %-tnu otopinu borne kiseline na 72 sata. Nakon te obrade, stabljike se vade iz otopine i ostavljaju da se suše pet dana na temperaturi od 35 °C [11]. Zatim se očišćene i na zraku osušene stabljike bambusa režu na trake jednake debljine i pravokutnog poprečnog presjeka. Te se bambusove trake premazuju kemikalijama kako bi se smanjila apsorpcija vlage unutar betona.

3.2. Formiranje utora na bambusovim trakama i obrada površine

Prema IS 15912-2018 [5], bambus namijenjen za ojačavanje betona najprije je potrebno prepolutiti, a zatim podijeliti na četiri dijela. Za ojačanje betona preporučuju se trake širine od 20 do

25 mm, minimalne debljine 9 mm. Te trake trebaju biti ravne u duljini i približno pravokutnog presjeka.

Mehanička interakcija na granici između bambusa i betona primarni je izvor prijanjanja obrađenog bambusa i betonske površine. Vanjski premaz (adheziv) koji je nanesen na površinu bambusa ne samo da je čini nepropusnom, već također potiče prijanjanje s okolnim betonom. Međutim, ova čvrstoća prionljivosti može biti nedovoljna za olakšavanje kompozitnog djelovanja između dva materijala pod velikim konstrukcijskim opterećenjima. Uvođenje modifikacija na granici između bambusa i betona može zadovoljiti dodatne zahtjeve za čvrstoćom prionljivosti. U ovom su ispitivanju, u svrhu poboljšanja mehaničke interakcije između bambusa i betona, odabrana tri različita obrasca utora kako bi se ispitalo prijanjanje bambusovih traka s utorima i betona. Ti uzorci, prikazani na slici 1., uključuju pravokutne, polukružne i V-urezane utore.



Slika 1. Razne vrste uzoraka utora: a) pravokutni; b) polukružni; c) V-urez

Kako bi se održale inherentne karakteristike sirove bambusove trake, utori su izrezani po debljini i duž duljine bambusove trake. Međutim, ručni proces stvaranja i obrade uzoraka bambusa s utorima može biti spor i neučinkovit. Ručno formiranje utora predstavlja izazove u postizanju dosljedne veličine i dubine utora na svim uzorcima bambusa. Promjenjivost primijenjenog pritiska, upotrijebljenih alata i razine vještine pojedinca koji formira utore mogu dovesti do nepravilne distribucije i oblika. Ručno formiranje utora obično zahtijeva vještu izradu i zahtjevno je za rad. Brzina i učinkovitost procesa ograničeni su fizičkim sposobnostima pojedinca, što rezultira sporom stopom proizvodnje koja je nepraktična za proizvodnju velikih razmjera. Kako bi se riješio ovaj izazov, za stvaranje različitih utora primjenjuju se različiti stolarski alati i tokarski stroj, kao što je prikazano na slici 2. Upotreba tokarskog stroja olakšava formiranje utora u kraćem razdoblju.

Bambusove trake s utorima primjenjuju se kao ojačanje unutar betonskih cilindara za provođenje ispitivanja čupanjem kako bi se odredio profil utora kod kojih dolazi do sloma pri maksimalnom opterećenju. Ispitivanja čupanjem provode se u skladu s normom IS 2770 (I. dio) - 1967 [17].

Glavni nedostatak primjene bambusa kao ojačanja u betonu je njegova sklonost apsorpciji vlage iz betona. To dovodi do



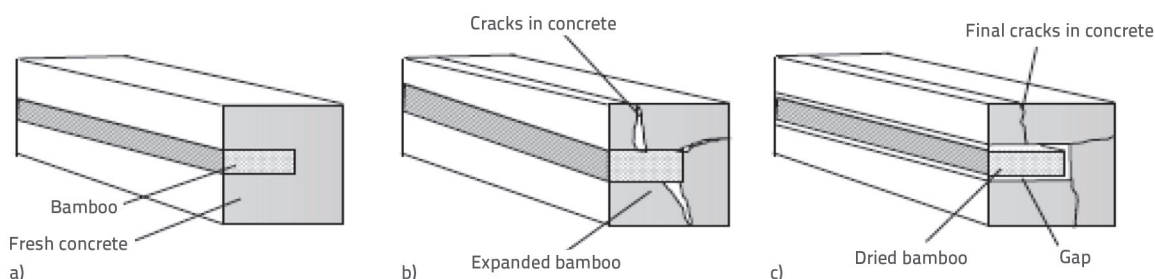
Slika 2. Tokarski stroj te prikaz izrade utora

promjena dimenzija u bambusu, značajno utječući na prijanjanje bambusa i betona, kao što je prikazano na slici 3. [18].

Kako bi se riješio ovaj problem, primjenjuju se dvije vrste kemijskih obrada, točnije bitumenska boja (poznata kao tzv. japanska crna) i Bond Tite adheziv, kako bi se smanjila apsorpcija vode bambusovih štapova. Mali i Datta [11] istraživali su različite kemijske obrade i utvrdili da je Bond Tite adheziv pokazao najbolje rezultate u smanjenju apsorpcije vode i povećanju čvrstoće prionljivosti bambusa i betona. U ovom su radu ispitani ekonomski aspekti različitih obrada. Tablica 2. prikazuje približne troškove različitih kemijskih obrada na temelju dostupnih tržišnih podataka.

Tablica 2. Trošak različitih kemijskih obrada

Uzorak br.	Kemijske obrade	Trošak [EUR]
1	Bitumenska boja (japanska crna)	1.1 po litri
2	Bond Tite	18.7 po kg
3	Triflor PUAL lak	1.5 po litri
4	Araldite	12.1 po kg
5	Strepoxy	8.2 po kg
6	Bitumen (VG-30)	0.6 po kg
7	EPI BOND - 21	6.6 po litri

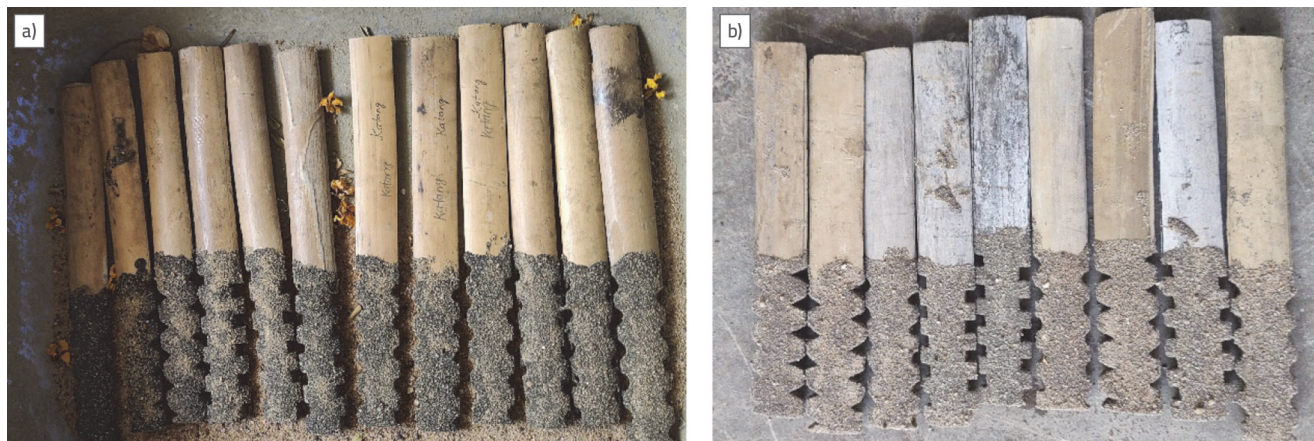


Slika 3. Učinkovitost bambusa u betonu: a) bambus u betonu; b) bambus tijekom njege betona (s razvijenim pukotinama); c) vidljive šupljine i pukotine u betonu nakon njegovanja [18]

Iz tablice 2. je vidljivo da su bitumen (VG-30) i bitumenska boja isplativiji u usporedbi s drugim kemikalijama. Bitumenska boja je lako dostupna i obrada bambusovih traka s takvom bojom jednostavnija je u usporedbi s bitumenom (VG-30). Budući da je primarni cilj smanjiti troškove izgradnje, za obradu bambusovih štapova odabrana je bitumenska boja. Ona smanjuje apsorpciju vode za 75 %, sa samo 10 % utjecaja na naprezanje pri prijanjanju [15]. Osim toga, Bond Tite adheziv primijenjen je za olakšavanje usporedbe s prethodnim istraživanjima.

Njavežnije je osigurati da kemijsko djelovanje ovih premaza ne utječe na unutarnju strukturu bambusovih vlakana. Bambusove trake su pomoću stolarskih alata i kista jednoliko obložene tankim slojem ovih kemikalija. Taj proces osigurava da je površina ravnomjerno premazana završnim slojem adheziva, održavajući otpornost na vodu i olakšavajući kemijsko prijanjanje s okolnim betonom. Na kraju, štapovi od bambusa prolaze proces pjeskarenja. Slika 4. prikazuje obrađene bambusove štapove s utorima. Kratak opis kemikalija koje se primjenjuju:

- Bitumenska boja: sastoji se od asfaltne baze otopljene u benzinu ili terpentinu, povremeno s dodatkom komponenti laka poput lanenog ulja. Ta boja, sa svojom bitumenskom crnom bojom, na bazi je otapala čija je svrha vodootpornost i otpornost na vremenske uvjete različitih materijala uključujući čelične konstrukcije, asfalt, drvo, beton i spremnike za vodu. Nakon sušenja, formira bitumenski premaz bez mirisa i mrlja koji je vodootporan te otporan na vremenske uvjete i koroziju.
- Bond Tite adheziv: dvokomponentni sustav epoksidnog adheziva poznat po iznimno visokoj otpornosti na udarce i smičnoj čvrstoći. Nudi veću pokrivenost od standardnih epoksidnih adheziva i prikladan je za vanjsku primjenu zbog svoje otpornosti na sve vremenske uvjete i UV zračenje. Osim toga, zahtijeva kraće vrijeme pričvršćivanja i ima duži vijek trajanja, što ga čini idealnim za primjene na velikim površinama i poboljšanje produktivnosti. Bond Tite se može upotrebljavati za lijepljenje različitih materijala kao što su metali, keramika, drvo, koža, guma, mramor i staklo, bilo da su slični ili različiti.



Slika 4. Obradeni bambusovi štapovi: a) bitumenska boja; b) Bond Tite

3.3. Priprema ispitnog uzorka za ispitivanje čupanjem

U ovom je istraživanju upotrijebljen beton klase M 20 (ekvivalent razredu tlačne čvrstoće C 16/20 prema Eurokodu 2). Prosječna tlačna čvrstoća kocke nakon 7 i 28 dana bila je 18 MPa odnosno 29 MPa. Primijenjen je obični portlandski cement (OPC) klase 53. Za izradu uzoraka za ispitivanje čupanjem korišteni su čelični kalupi promjera 100 mm i visine 200 mm. Slika 5.a daje shematski prikaz bambusovog štapa s utorima u cilindričnom uzorku, a slika 5.b prikazuje originalni uzorak za ispitivanje čupanjem. U tablici 3. navedene su pojedinosti ispitnih uzoraka s različitim uzorcima utora.

3.4. Ispitivanje uzoraka

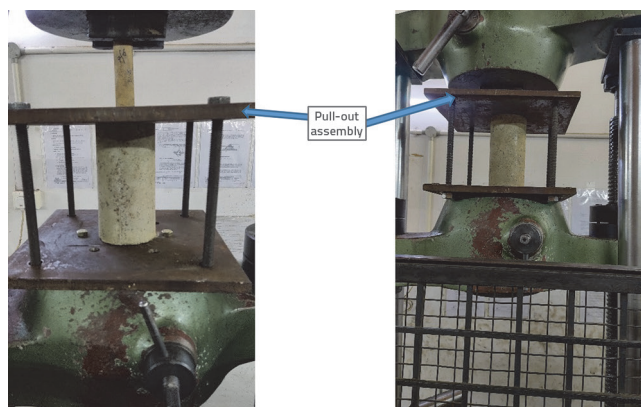
Ispitivanje čupanjem je standardna metoda koja se upotrebljava za procjenu čvrstoće prionljivosti armaturnih šipki (armature) i betona u armiranobetonim konstrukcijama. Navedeno ispitivanje ocjenjuje učinkovitost veze između armaturnog čelika i okolnog betona, što je bitno za strukturni integritet i učinkovitost betonskih elemenata. U ovom su istraživanju provedena ispitivanja čupanjem na različitim uzorcima pomoću univerzalnog stroja za ispitivanje (engl. *universal testing machine* - UTM) s kapacitetom od 600 kN, opremljenog mogućnošću primjene opterećenja s kontrolom pomaka. Izrađuje se sklop za ispravno postavljanje uzorka u UTM, kao što je prikazano na slici 6.



Slika 5. a) Shematski prikaz uzorka za ispitivanje čupanjem; b) Originalni ispitni uzorak za ispitivanje čupanjem

Tablica 3. Pojedinosti ispitnog uzorka

Kemijska obrada	Uzorak utora	Skraćenica	Broj uzoraka
(a) Bond Tite	pravokutni (R)	BO - R	5
(b) Bitumenska boja		BA - R	5
(a) Bond Tite	polukružni (S)	BO - S	5
(b) Bitumenska boja		BA - S	5
(a) Bond Tite	V - urez (V)	BO - V	5
(b) Bitumenska boja		BA - V	5



Slika 6. UTM s ispitnim uzorkom

Sklop je izrađen od kaljenog čelika, čime se omogućuje sigurno zadržavanje uzorka bez pojave bilo kakvih unutarnjih deformacija, a time se održava njegov ispravan položaj tijekom cijelog procesa ispitivanja čupanjem.

Raspored zahvata koji se primjenjuje za pričvršćivanje bambusove trake na opterećenom kraju oblikovan je tako da spriječi gnječenje bambusovih traka u području zahvata. Brzina nanošenja opterećenja od 6 mm po minuti (0,1 mm po sekundi) primjenjuje se u intervalima. Upravljačka jedinica priključena na UTM bilježi relevantne pomake u svakoj fazi opterećenja.

4. Rezultati i rasprava

4.1. Rezultati vršnog opterećenja

Svi su uzorci podvrgnuti ispitivanju pod jednoosnim vlačnim opterećenjem. Prije ispitivanja glavnih uzoraka za ispitivanje čupanjem, nekoliko je probnih uzoraka ispitano u istom UTM-u kako bi se identificirali i ublažili učinci početnog klizanja i gnječenja bambusa na mjestu zahvata. Na mjestu zahvata nije došlo do gnječenja ili klizanja. Ova proba osigurava da se uzme u obzir usklađenost stroja pri određivanju odziva na primijenjeno opterećenje i pomak iz uzoraka za ispitivanje čupanjem pri svakom koraku opterećenja. Nakon završetka ispitivanja, konačni pomak se potvrđuje fizičkim mjerenjem stvarnog klizanja bambusove trake do kojeg je došlo u neispravnim uzorcima (mjereno od gornje površine betonskog cilindra). Pretpostavlja se da će u betonu raspodjela prijanjanja ostati

konstantna duž ugrađene duljine. Nakon ispitivanja uzoraka, uočeno je da su se bambusove trake s pravokutnim uzorkom utora pokazale najučinkovitijima među tri ispitane vrste. Pravokutni uzorak utora pokazao je najpovoljniju kombinaciju svojstava u zadanim uvjetima ispitivanja. Primijećeno je da pravokutni utori bambusovih traka poboljšavaju mehanička svojstva ojačanja od bambusa, nudeći bolju učinkovitost u smislu čvrstoće, fleksibilnosti i drugih relevantnih čimbenika. Uočeno je da uzorci traka s pravokutnim uzorkom popuštaju pri većim opterećenjima. Tablica 4. prikazuje prosječne vrijednosti vršnog opterećenja pri kojima kod sva tri uzorka, i to: pravokutnog, polukružnog i V-ureza, a koja su obrađena Bond Tite adhezivom i bitumenskom bojom dolazi do sloma.

Iz tablice 4. vidljivo je da bambusove trake s pravokutnim utorima obrađene Bond Tite adhezivom pokazuju najveće opterećenje pri slomu, koje doseže 22,02 kN, od svih ostalih bambusovih traka s utorima. Nadalje, pravokutne bambusove trake obrađene bitumenskom bojom pokazuju relativno visoko opterećenje pri slomu od 13,83 kN u usporedbi s drugim uzorcima utora s istim premazom. Odgovarajuće vrijednosti progiba i linearne krutosti također su navedene u tablici 4. Ova zapažanja pokazuju da različiti uzorci utora i izbor obrade (Bond Tite ili bitumenska boja) značajno utječu na strukturnu učinkovitost bambusa.

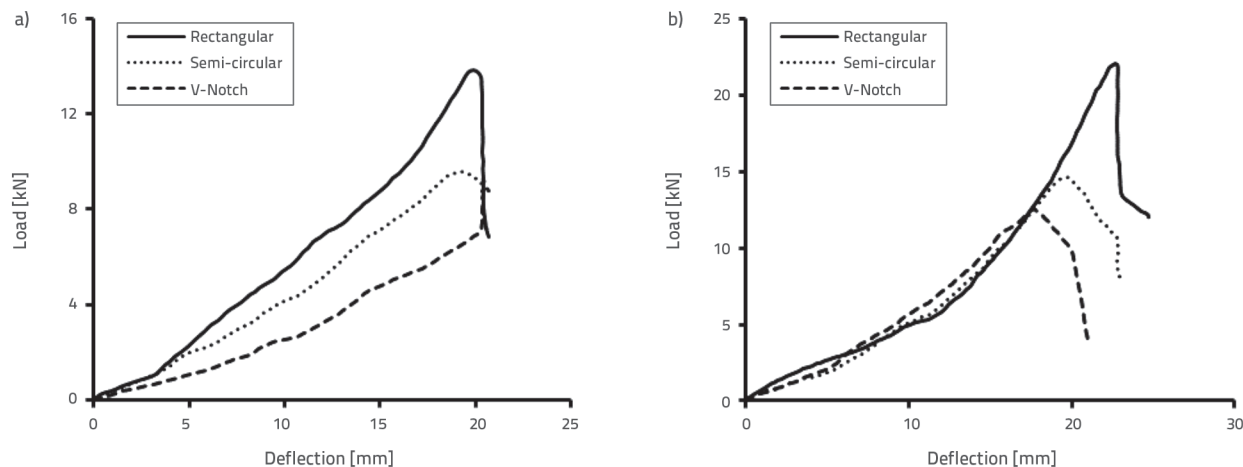
Daljnja analiza krivulja opterećenja i pomaka može ponuditi uvid u ponašanje bambusa u slučaju različitih uzoraka utora, pomažući u razumijevanju čimbenika kao što su krutost, duktilnost i načini sloma. Krivulje opterećenja i pomaka iscrtane su za sva tri uzorka utora obrađenih Bond Tite adhezivom i bitumenskom bojom, kao što je prikazano na slici 7.

Zaključci izvedeni iz krivulja opterećenja i deformacija nude vrijedan uvid u strukturno ponašanje bambusovih traka pod različitim uzorcima utora i obradama. Krivulje pokazuju da bambusove trake s pravokutnim utorima pokazuju najveće vršno opterećenje među tri vrste uzoraka utora. Međutim, nosivost naglo pada nakon postizanja vršnog opterećenja, što upućuje na nisku duktilnost. Duktilnost se odnosi na sposobnost materijala da se deformira prije sloma, a naglo smanjenje opterećenja sugerira da materijal možda neće pretrpjeti značajnu deformaciju prije sloma.

Osim toga, primijećeno je da je nosivost bambusovih traka s polukružnim uzorcima i V-urezima niža od nosivosti u slučaju pravokutnog uzorka. Unatoč nižem vršnom opterećenju, ovi uzorci utora pokazuju bolju duktilnost. Krivulje opterećenja i

Tablica 4. Rezultati različitih uzoraka pri vršnom opterećenju

Uzorak br.	Uzorci	Prosječno vršno opterećenje [kN]	Progib [mm]	Linearna krutost [kN/m]
1	BA - R	13.83	19.9	694.97
2	BO - R	22.02	22.6	974.34
3	BA - S	9.67	22.2	435.59
4	BO - S	14.71	25.2	582.81
5	BA - V	9.30	14.1	659.57
6	BO - V	12.67	16.6	763.25



Slika 7. Krivulja opterećenja i progiba; a) za uzorke obrađene bitumenskom bojom; b) za uzorke obrađene Bond Tite adhezivom

pomaka pokazuju da bambusove trake mogu pretrpjeti veću deformaciju prije sloma, što upućuje na duktilniji odziv. Primijećeno je da je izrada bambusovih traka s pravokutnim uzorkom utora lakša u usporedbi s polukružnim utorima i V-urezima. Navedeno je važno za praktičnu primjenu, posebice u regijama gdje je lakoća izrade ključna. Što se tiče obrade bambusovih traka, one obrađene bitumenskom bojom razmatraju se za daljnja istraživanja. Taj izbor proizlazi iz njihove pristupačnosti i lake dostupnosti na indijskom tržištu, što ih čini praktičnom opcijom za široke primjene. Budući da je primarni cilj ovog istraživanja smanjiti troškove izgradnje bez ugrožavanja strukturnog integriteta, bambusove trake obrađene bitumenskom bojom imaju prioritet u daljnjim istraživanjima. Kao što je prikazano u tablici 1, Bond Tite adheziv je skuplji od bitumenske boje. Ta razlika u troškovima ključna je u donošenju odluka za velike projekte ili primjene u kojima su materijalni troškovi značajni. Osim toga, obrada bambusovih traka bitumenskom bojom je jednostavna: trake se stavljaju u veliku posudu napunjenu bojom. Ta metoda pojednostavljuje proces obrade i omogućuje istodobno obrađivanje većeg broja bambusovih traka, olakšavajući masovnu proizvodnju. Isplativost bitumenske boje i jednostavnost postupka njezine obrade čine je praktičnim izborom za projekte s proračunskim ograničenjima ili one koji zahtijevaju velike količine obrađenih bambusovih traka. Lakoća masovne proizvodnje putem metode obrade temeljene na spremnicima čini bitumensku boju održivom opcijom za primjene koje zahtijevaju značajnu količinu obrađenog bambusa.

4.2. Rezultat čvrstoće prionjivosti

Izračun naprezanja pri prionjivosti ključan je za određivanje učinkovitosti prijenosa sile između bambusa i okolnog betona. Čvrsto prianjanje olakšava učinkovit prijenos opterećenja i jača strukturni integritet kompozitnog materijala. Naprezanje pri prianjanju izračunava se primjenom sile smicanja po jedinici nazivne površine armaturne bambusove trake. To naprezanje

djeluje paralelno s bambusovom trakom na granici s okolnim betonom. Odnos između opterećenja pri čupanju i prianjanja običnih bambusovih traka dan je izrazom (1).

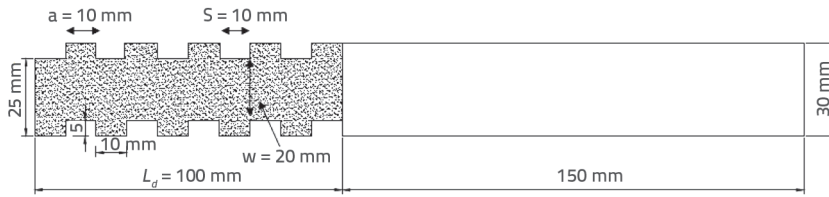
$$P = \tau_{bp} \cdot (2b + 2t) \cdot L_d \quad (1)$$

pri čemu je P sila čupanja koja se primjenjuje putem UTM-a (kN), L_d je duljina ugradnje bambusovih traka u mm, b i t su širina i debljina bambusovih traka u mm, a τ_{bp} je prosječno naprezanje pri prianjanju u N/mm^2 .

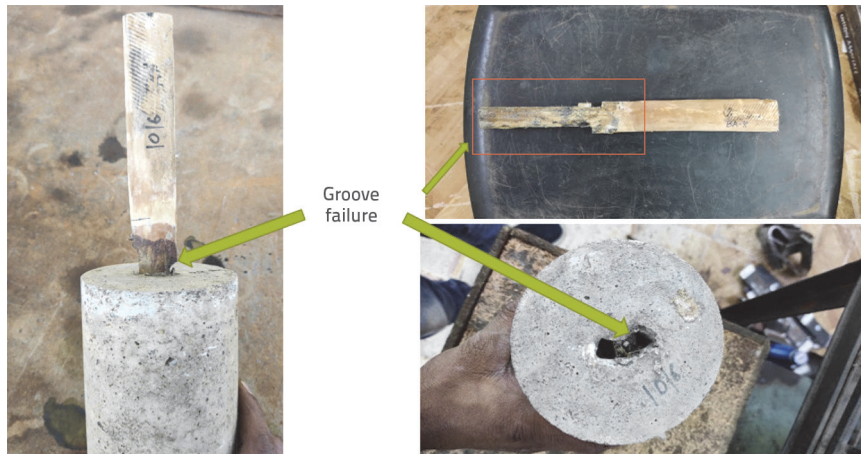
Rezultati eksperimenta pokazuju da su bambusove trake s pravokutnim utorima pokazale bolju učinkovitost od drugih uzoraka utora. Taj je uzorak stoga odabran za daljnje izračune. Mehanizam sile čupanja uključuje i prionljivost i trenje između bambusa i okolnog betona. Prionljivost se odnosi na molekularno privlačenje između materijala, a trenje je otpor relativnom kretanju na površini. Mehaničko uklještenje pravokutnih utora povećava otpornost na čupanje. Utori fizički zahvaćaju beton, stvarajući mehaničku vezu koja se odupire silama čupanja. Geometrija bambusovih traka, posebice pravokutnih utora, ključni je čimbenik u određivanju sile čupanja. Dimenzije i raspored utora utječu na ukupnu interakciju s okolnim betonom. Izraz (2) uspostavlja odnos između teorijskog opterećenja pri čupanju i unutarnjeg otpora veze. Navedeni izraz kvantificira silu čupanja na temelju čimbenika kao što su dimenzije utora, svojstva materijala i priroda veze.

$$P_{\text{theoretical}} = \{[(s \cdot n \cdot t) + (2 \cdot w \cdot L_d)] \cdot \tau_{bp}\} + [(a \cdot n \cdot t) \cdot \tau_{bs}] \quad (2)$$

pri čemu je τ_{bp} čvrstoća prionljivosti između običnog bambusa i betona u N/mm^2 , τ_{bs} je posmična čvrstoća bambusovog uzorka duž strukture ($11,02 N/mm^2$) [19]. U ovom slučaju s označava veličinu utora u mm, a je udaljenost između susjednih utora u mm, a n je broj utora. L_d je duljina bambusa ugrađenog u betonski cilindar u mm, w i t su efektivna širina i debljina bambusovih traka u mm. Slika 8. prikazuje pojedini pravokutne bambusove trake s utorima.



Slika 8. Pojediniosti pravokutne bambusove trake s utorima



Slika 9. Slom utora bambusovih traka

Razumijevanje odnosa između teorijskog opterećenja pri čupanju i unutarnjeg otpora veze ključno je za projektiranje struktura ojačanih bambusom. Time se pruža uvid u čimbenike koji utječu na silu čupanja te se omogućuje optimizacija u konstrukcijskim primjenama. Geometrija pravokutnih utora ima ključnu ulogu u mehanizmu sile čupanja. U tablici 5 prikazani su proračuni eksperimentalnih i teorijskih krajnjih opterećenja prema izrazu (2). Vrijednosti τ_{bp} za BO-R i BA-R su 1,48 MPa [11], odnosno 0,66 MPa [15].

Iz tablice 5. može se zaključiti da bambusove trake s pravokutnim utorima, obrađene Bond Tite adhezivom, pokazuju veću čvrstoću prionljivosti od pravokutnih bambusovih traka obrađenih bitumenskom bojom. Oba uzorka imaju omjere

eksperimentalnog krajnjeg opterećenja (P_{EG}) i teorijskog krajnjeg opterećenja (P_{TG}) koji približno iznose 1, što pokazuje da su eksperimentalna krajnja opterećenja relativno konzistentna s teorijskim predviđanjima. To sugerira da je čvrstoća prionljivosti u oba uzorka razumno blizu predviđenih vrijednosti.

Bambusove trake s utorima pokazuju povećanu mehaničku otpornost u usporedbi s običnim bambusovim trakama. To se poboljšanje pripisuje prisutnosti utora, koji vjerojatno povećavaju čvrstoću prianjanja i nosivost veze bambusa i betona. Postiže se maksimalna mehanička otpornost jer svi utori istovremeno sudjeluju u otporu primijenjenim silama. To podrazumijeva zajednički i sinergijski učinak utora, koji zajedno djeluju kako bi pružili optimalnu strukturnu učinkovitost. Kod svih je uzoraka došlo do sloma zbog uzastopnog sloma utora, kao što je prikazano na slici 9. To pokazuje da je način sloma povezan s učinkovitošću tih utora, sugerirajući ključnu ulogu koju utori

imaju u cjelokupnom mehanizmu sloma. Na slici 9. uzorak sloma uočen je tijekom eksperimenta, prikazujući progresiju slomova utora i cjelokupno ponašanje bambusovih traka ugrađenih u beton. U nekim uzorcima dolazi do djelomičnog sloma utora tijekom ispitivanja čupanjem, što se može pripisati varijacijama u svojstvima materijala, raspodjeli opterećenja ili drugim čimbenicima koji utječu na učinkovitost pojedinačnih utora. Ispitivanje uzastopnog sloma utora naglašava važnost utora u održavanju strukturnog integriteta veze bambusa i betona. Mehanizam sloma uglavnom je povezan s utorima, a razumijevanje kako i zašto dolazi do sloma utora može daljnja istraživanja usmjeriti prema optimizaciji bambusovih traka s utorima radi poboljšanja učinkovitosti.

Tablica 5. Rezultati opterećenja pri čupanju za bambusove trake s utorima

Čvrstoća prionljivosti običnog bambusa i betona (τ_{bp}) [N/mm ²]	Uzorak	Eksperimentalno krajnje opterećenje P_{EG} [kN]	τ_{bp} [kN]	P_{EG} / P_{TG}	Čvrstoća prionljivosti [MPa]
1.48	BO-R	22.02	21.38	1.03	1.94
0.66	BA-R	13.83	15.64	0.88	1.41

Tablica 6. Usporedba čvrstoće prionljivosti čeličnih ojačanja i ojačanja bambusom

Razred tlačne čvrstoće betona	M 20 (C 16/20)	M 20 (C 16/20)	M 20 (C 16/20)	M 20 (C 16/20)
Vrsta armature	Obična čelična armatura (IS 456)	Rebrasta čelična armatura (IS 456)	Armatura od bambusa s pravokutnim utorima (bitumenska boja)	Armatura od bambusa s pravokutnim utorima (Bond Tite adheziv)
Projektirano naprezanje pri prianjanju [MPa]	1.2	1.92	1.41	1.94

Uočeno je da kemijska obrada bitumenskom bojom smanjuje sposobnost apsorpcije vode bambusovih traka, što je u građevinarstvu poželjno. Apsorpcija vode može uzrokovati bubrenje, savijanje i degradaciju bambusa tijekom vremena. Smanjenjem apsorpcije vode, obrađeni bambus postaje otporniji na uvjete okoline. Primjena bitumenske boje pomaže u ublažavanju značajnih dimenzijskih promjena bambusa tijekom njegovanja betona, što sugerira da se obrađeni bambus manje širi ili skuplja u usporedbi s neobrađenim bambusom. Očekuje se da će bambus obrađen bitumenskom bojom pokazati poboljšanu stabilnost i dugovječnost, što ga čini pouzdanijim materijalom u građevnim primjenama.

Tablica 6. uspoređuje stvarno naprezanje pri prijanjanju obrađenih bambusovih traka s pravokutnim utorima i ravnih i rebrastih čeličnih armatura, prema IS 456:2000 [20]. Bitumenska boja i bambus s pravokutnim utorima obrađen Bond Tite adhezivom pokazuju veće naprezanje pri prijanjanju od tradicionalnih čeličnih armatura. To ukazuje na to da bambus s utorima može osigurati konkurentnu čvrstoću prijonjivosti u betonskim konstrukcijama.

5. Zaključak

Ovaj je rad usredotočen na vezu bambusa i betona kroz ispitivanja čupanjem (pull-out metoda). Mehanička i kemijska djelovanja primjenjuju se za poboljšanje veze bambusa i betona, ispitujući

pritom tri različita uzorka utora: pravokutni, polukružni i V-urez. Uočeno je da kod bambusovih traka s pravokutnim uzorkom dolazi do sloma pri većim opterećenjima. Bambusove trake su, uz pjeskarenje, kemijski obrađene Bond Tite adhezivom i bitumenskom bojom kako bi se smanjila sposobnost bambusa da upija vodu. Navedena kemijska obrada poboljšava vezu bambusa i betona, postižući čvrstoću prijanjanja od 1,94 MPa i 1,41 MPa primjenom Bond Tite adheziva i bitumenske boje. Primarni cilj ovog rada je minimiziranje troškova izgradnje. Nakon usporedbe troškova obiju kemikalija, za obradu se preporučuje primjena bitumenske boje jer je jeftinija od Bond Tite adheziva i prikladna za masovnu proizvodnju obrađenih bambusovih traka. Projektirane vrijednosti naprezanja pri prijanjanju za uzorke s pravokutnim utorima uspoređive su s onima predloženima u IS 456:2000 za ravne i rebraste čelične šipke s betonom klase M20 (C 16/20 prema Eurokodu 2). Ovaj se rad uglavnom usredotočuje na vezu bambusa i betona. Daljnja bi se istraživanja mogla usmjeriti na optimizaciju metoda obrade bambusa kako bi se povećala čvrstoća prijonjivosti, uzimajući u obzir čimbenike poput isplativosti i ekološke održivosti. Istraživanje dugoročne učinkovitosti betonskih konstrukcija ojačanih bambusom moglo bi pružiti uvid u trajnost i učinkovitost bambusa kao materijala za ojačanje. Ovo je istraživanje pokazalo da je učinkovitost prijanjanja uvelike poboljšana predloženim uzorkom utora bambusove trake s bitumenskom bojom kao kemijskom obradom.

LITERATURA

- [1] Ameen, M.S., Datta, D.: Bamboo as reinforcing material in concrete structures: A literature study, GRADEVINAR, 75 (20238 8), pp. 803–818. <https://doi.org/10.14256/JCE.3681.2022>
- [2] Dixit, A., Puri, V.: Bamboo bonding in concrete: A critical research, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 8 (2019) 11, Special Issue, pp. 323–334.
- [3] Ghavami, K.: Bamboo as reinforcement in structural concrete elements, Cem Concr Compos, 27 (2005) 6, pp. 637–649, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>.
- [4] Sharma, B., Gató, A., Ramage, M.H.: Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo, Constr Build Mater, 83 (2015), pp. 95–101, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.048>.
- [5] Indian Standard Specifications for Code of Practice for Structural Design using Bamboo, IS 15912-2018, Bureau of Indian Standards, New Delhi, 2012.
- [6] Correal, J.F., Echeverry, J.S., Ramírez, F., Yamín, L.E.: Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated Guadua angustifolia Kunth, Construction and Building Materials, 73 (2014), pp. 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.056>
- [7] NBC (2005), National Building Code of India, Group-2, Part 6 Section 3B, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.
- [8] Tazowar, M., Siddique, A.F.A., Ahmed, I.: A novel approach for enhancing the bond performance of bamboo reinforced concrete by surface treatment and corrugation, Construction and Building Materials, 409 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133728>
- [9] Khatib, A., Nounu, G.: Corrugated bamboo as reinforcement in concrete, Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, 170 (2017) 4, pp. 311–318, <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00067>
- [10] Anusha, M., Surendra, H.J., Dhar, N., Choudhary, M., Khan, I.A., Pasha, S.F.A.: Enhancing sustainability of polypropylene band and bamboo-reinforced structural elements for rural low-cost housing. Environment, Development and Sustainability, (2022) <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02864-9>
- [11] Mali, P.R., Datta, D.: Experimental study on improving bamboo concrete bond strength, Advances in Concrete Construction, 7 (2019) 3, pp. 191–201, <https://doi.org/10.12989/acc.2019.7.3.191>.
- [12] Agarwal, A., Nanda, B., Maity, D.: Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns, Comput Chem Eng, 71 (2014), pp. 610–617, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.011>.
- [13] Sayed, U., Dauletbeke, A., Xin, X., Lorenzo, R., Li, H.: A Review on the Mechanical Behaviour of Bamboo Reinforced Concrete Beams, In Journal of Renewable Materials, Tech Science Press, 10 (2022) 12, pp. 3629–3657, <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.022624>
- [14] Azadeh, A., Kazemi, H.H.: New approaches to bond between bamboo and concrete, Key Engineering Materials, 600 (2014), pp. 69–77, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.600.69>
- [15] Kute, S.Y., Wakchaure, M.R.: Performance Evaluation for Enhancement of Some of the Engineering Properties of Bamboo as Reinforcement in Concrete, Journal of The Institution of Engineers (India): Series A, 94 (2013) 4, pp. 235–242, <https://doi.org/10.1007/s40030-014-0063-1>.

- [16] Lima, H.C., Willrich, F.L., Barbosa, N.P., Rosa, M.A., Cunha, B.S.: Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 41 (2008) 5, pp. 981–989, <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9299-9>.
- [17] Indian Standard Specifications for Methods of Testing Bond in Reinforced Concrete, IS 2770 (Part 1), Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 1967.
- [18] Mondal, B., Maity, D., Patra, P.K.: Bond Behavior between Bamboo and Normal-Strength Concrete: Experimental and Numerical Investigation, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 27 (2022) 3, pp. 1–11, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)sc.1943-5576.0000715](https://doi.org/10.1061/(asce)sc.1943-5576.0000715)
- [19] Chand, N., Shukla, M., Sharma, M.K.: Analysis of mechanical behaviour of bamboo (*Dendrocalamus strictus*) by using FEM, *Journal of Natural Fibers*, 5 (2008) 2, pp. 127–137, <https://doi.org/10.1080/15440470801928970>
- [20] Indian Standard Specifications for Code of Practice for Plain and Reinforced Concrete, IS 456-2000, Bureau of Indian Standards, New Delhi, 1987.