

Manja Kitek Kuzman, Martina Zbašnik-Senegačnik: PROCESI DIGITALIZACIJE V ARHITEKTURI: LES IN LESENE KONSTRUKCIJE

DIGITALIZATION PROCESS IN ARCHITECTURE: WOOD AND WOOD CONSTRUCTIONS

DOI: <https://dx.doi.org/10.15292/IU-CG.2018.06.060-067> ■ UDK: 624.011.1:004 ■ SUBMITTED: September 2019 / REVISED: September 2019 / PUBLISHED: October 2019

 1.02 Pregledni znanstveni članek / Review Article

IZVLEČEK

Oblike, ki jih je izoblikovala narava, so bile vedno inspiracija za oblikovanje grajenega okolja. Narava je namreč oblike organizmov in procese v njih razvila v smislu največje optimizacije. Organska arhitektura nastaja na podlagi študij oblik v naravi; te po pravilu skorajda niso ravne, ampak zaobljene. Načrtovanje in izvedba takih oblik pa je težja od ortogonalnih in zahteva dobro prostorsko predstavo, poznavanje geometrije in tudi primerna fizična orodja. Digitalizacija je pripeljala tudi do razvoja orodij za načrtovanje zahtevnih geometrijskih oblik, ki s preprostimi pripomočki niso bili obvladljive. Z digitalnimi orodji je danes mogoče načrtovati in oblikovati konstrukcije in konstrukcijske elemente, ki odstopajo od ortogonalne prakse in tvorijo kompleksne upognjene ravnine. Digitalizirani procesi so stopili tudi v druge panoge, ki so vezane na gradnjo stavb, in spremenili način dela pa tudi končne produkte. Arhitektom, oblikovalcem in inženirjem so na voljo zmogljiva analitična orodja, s katerimi lahko ustvarijo nove oblike, napovedujejo njihovo vedenje in oblikujejo učinkovite proizvodne strategije. Dosedanjim gradivom, ki so bila značilna za organsko oblikovano arhitekturo, se pridružujejo novi leseni inženirski proizvodi, katerih prednost je visoka nosilnost glede na težo, dobra dimenzijska stabilnost in fleksibilnost v konstruiranju večjih dimenzij in so zato idealen material za uresničevanje ambicioznih konstrukcijskih oblik z digitalno podprto tehnologijo oblikovanja in izdelave. Klasičnim načinom gradnje se pridružuje tehnologija 3D tiska, tudi z lesom, ki že omogoča nastanek stavb večjega formata. V članku so predstavljeni digitalizirani procesi v arhitekturi s primeri najnovejših realiziranih projektov, pri katerih so bili vključeni v fazah nastajanja.

KLJUČNE BESEDE

digitalizacija, les, lesene konstrukcije, arhitektura

ABSTRACT

Organic, flowing natural forms have always been the inspiration for creating a built environment. Nature has developed the forms of organisms and their processes in terms of maximum optimization. Organic architecture is based on studies of forms in nature; as a rule, they are almost not straight but rounded. The design and implementation of such shapes, however, is more difficult than orthogonal and requires a good spatial performance, knowledge of geometry and also suitable tools. Digitization has also led to the development of designing complex geometric shapes - free form shape that were not manageable with simple tools. Thanks to the potential of computing, parametric design and digital manufacture, it is now possible to design structural elements and structures that deviate from orthogonal practice and form complex shapes. Digitized processes have also entered other industries, which are related to buildings construction and changed the way they work, as well as finished products. Architects, designers and engineers are provided with powerful analytical tools to create new designs, predict their behavior, and formulate effective production strategies. The current materials that has been typical for organic architecture joined new engineered wood products, which have the advantage of high load-bearing capacity, good dimensional stability and flexibility in larger dimensions. Engineered wood products offers greater design freedom for ambitious construction and manufacture technology. The classic construction methods are joined by a novel 3D printing technology, including 3D printing with wood filaments, which already allows large building structures. The article presents digitalization processes in architecture – with examples of the most recent realized projects in which they were involved in different design stages.

KEY-WORDS

digitalization, wood, timber constructions, architecture

UVODNIK
EDITORIAL
ČLANEK
ARTICLE

RAZPRAVA
DISCUSSION
RECENZIJA
REVIEW
PROJEKT
PROJECT
DELAVNICA
WORKSHOP
NATEČAJ
COMPETITION
PREDSTAVITEV
PRESENTATION
DIPLOMA
MASTER THESIS

»It will evidently follow, upon our application of this test of natural resemblance, that we shall at once conclude that all perfectly beautiful forms must be composed of; since there is hardly any common natural form in which it is possible to discover a straight line« (Ruskin, 1981).

1 UVOD

Še pred dvema desetletjema je bilo v arhitekturnih birojih nekaj računalnikov, večinoma so se uporabljali za pisanje tekstov in vodenje računovodstva. Ob prelomu tisočletja pa so posodobili opremo z računalniki, skenerji, tiskalniki ter softverjem kot so AutoCad, ArchiCad, Maya, Rhino... Danes ni več arhitekturnega biroja brez digitalne tehnologije. Vprašanje ni, če je ta dobra ali slaba, ampak samo, kakšna je smer, ki jo arhitektura ubira po njenim vplivom (Picon, 2010). Soočeni smo s številnimi tehnološkimi inovacijami, spremembe, ki jo prinašajo, pa imajo velik vpliv na arhitekturno oblikovanje.

Do razvoja digitalne arhitekture je nedvomno prišlo zaradi želja po oblikah, ki so bile z obstoječimi orodji nemogoče. Do zgodnjih 90-tih je bilo sofisticirano geometrijsko oblikovanje sinonim za paraboloidne in hiperboloidne oblike, kot npr. v betonskih lupinah ali nateznih konstrukcijah ali gladke ter ohlapno definirane oblike vlite plastike ali pnevmatske konstrukcije. Širjenje računalnikov je to spremenilo, digitalni arhitekti so dramatično povečali formalni vokabular. Nova ni samo različnost samih oblik, ampak tudi možnost, da se te oblike natančno določijo z uporabo računalniškega modeliranja (Bianconi et al., 2019).

Digitalna arhitektura je ponovno oživila posnemanje oblik iz narave. Arhitekturne oblike so skozi zgodovino temeljile na geometrijskih linijah, prisotnih v naravi. Prvim civilizacijam so bile oblike v naravi navdih za oblikovanje enostavnih osnovnih geometrijskih likov. Krog, elipso, trikotnik in pravokotnik so povezovali v harmonične proporcije (npr. zlati rez), ki so bile generator logaritmčnih spiral (Hemenway, 2008). Spirale so prisotne v volutah ionskih stebrov. Najstarejša primera spiralne stavbe sta Babilonski stolp in minaret Velike mošeje Sammara v Iraku (Birindelli and Cedrone, 2012) (Veliko kasneje, 1959, je kot primer spiralne stavbe nastal Wrightov Guggenheimov muzej v New Yorku (Slika 1)). Etruščani so iz osnovnih geometrijskih likov razvili lok in obok, Rimljani so ta razvoj nadgradili s kupolo. Gotška arhitektura je prevzela grško geometrijo in ji dodala keltsko posnemanje oblik iz narave. Renesansa je utemeljila arhitekturo kot novo znanost. Zahtevala je, da mora biti vsak del stavbe integriran v enega izmed sistemov matematičnih razmerij – pravilo, ki je predhodnica matematičnih zakonitosti, vključenih v digitalna orodja za oblikovanje in projektiranje.

V arhitekturo se z digitalnimi orodji ponovno vrača pojem organska arhitektura. Prvič se je pojavil na začetku 20. stol., izhaja iz idej Viollet-le-Duca in Johna Ruskina. Le-Duc je bil kot mnogi teoretiki 19. stol. prepričan, da arhitektura v nasprotju s slikarstvom in kiparstvom narave ne sme enostavno imitirati, ampak mora posnemati predvsem naravne zakone (Viollet-le-Duc, 1854–1868), Ruskin pa, da mora lepota izhajati iz narave in biti oblikovana po človeku (Ruskin, 1981). Wright je njune ideje dopolnil z Sullivanovim aksiomom »form follows function« in razvil organsko arhitekturo, ki v zasnovo stavbe rahločutno vključuje naravo in se z njo popolnoma zlije (Wright, 1963) (Slika 2). Gaudi je preučeval statične sile v naravi. Stebri v njegovi arhitekturi so pogosto posnetek debel dreves, ki jih je narava skozi evolucijo optimirala (Zerbst, 2005) (Slika 3). Organska arhitektura išče inspiracije v naravi tudi s posnemanjem oblik živih organizmov. Te so skozi evolucijo nastale kot odgovor na zunanje vplive. Buckminster Fuller je vire za izčrpne strategije



Slika 1: Guggenheimov muzej, New York, 1959, Frank Lloyd Wright. Muzej je vlit v betonski stolp v obliki logaritmčne spirale, ki se dviguje proti dvanajstkupolni strehi. (Foto: Zbašnik-Senegačnik)



Slika 2: Hiša Hanna, San Francisco, 1936, Frank Lloyd Wright. Hiša je zrasla iz tal. (Foto: Kitek Kuzman)

oblikovanja kupol našel v radiolarijah, enoceličnih, radialno simetričnih praorganizmih, ki jih je s pomočjo poznavanja geometrije prevedel v arhitekturne konstrukcije. Številnim arhitektom so bile navdih (Fuller, 2005). Oblika Eifflovega stolpa je bila inspirirana s človeško stegnenico, ki dobro prenaša ekscentrične obremenitve, strop Kristalne palače pa posnema obliko orjaškega lokvanja vrste Victoria Amazonica. Biomimikrija je sestavni del arhitekturnega načrtovanja tudi v 21. stol. Norman Foster je obliko Gherkin Tower v Londonu (2003) našel v morski kumari, ki se z okroglo obliko upira močnim vodnim tokovom v globini morja (Benyus, 2008).

Mojstrovine Wrighta, Gaudija, Fullerja in drugih so nastale zaradi izredne geometrijske predstave avtorjev. Idejne zasnove konstrukcij so preverjali z modeli z različnimi tehnikami in materiali. Njihovi arhitekturni dosežki so bili izjemni, posnemovalcev pa



Slika 3: Park Güell, Barcelona, 1900-1914, Antoni Gaudí. Gaudí v svojih delih pogosto posnema oblike iz narave. (Foto: Zbašnik-Senegačnik)

zaradi zahtevnosti načrtovanja zelo malo. Digitalizacija načrtovalskih procesov je to spremenila. Oblike, ki s klasičnimi risarskimi in geometrijskimi pripomočki do sedaj niso bile enostavno obvladljive, omogočajo nova digitalna orodja. Ključno je, da so orodja nadgrajena z digitaliziranimi procesi v tehnoloških in proizvodnih fazah, kar je tako zelo spremenilo proces nastajanja stavb, da govorimo o nadaljevanju serij industrijskih revolucij. Prvo je prinesel izum parnega stroja 1780, drugo pa elektrika okrog 1900. Naslednje tri je sprožil računalnik. V 70-tih letih prejšnjega stoletja je s tretjo industrijsko revolucijo omogočil mehanizacijo tehnoloških procesov. Do četrte industrijske revolucije je prišlo ob prelomu tisočletja s pojavom interneta; zaznamovana je s popolno digitalizacijo procesov, integracijo sodobnih informacijskih sistemov in tehnologijami s fizično proizvodnjo in procesi. Trenutno smo na prehodu med 4. in 5. industrijsko revolucijo. Peta industrijska revolucija, ki prihaja, želi izboljšati kreativnost in inovativnost človeškega uma z naprednimi, sodobnimi in digitaliziranimi industrijskimi procesi. Ti po eni strani prinašajo natančnejšo in hitrejšo izvedbo, po drugi izpolnjujejo težnjo po večji trajnostnosti, fleksibilnosti in ekonomičnosti. Z novimi pristopi k načrtovanju sovpada tudi razvoj novih materialov, ki podpirajo izvedbo organskih oblik.

V arhitekturo ponovno prihaja les, tokrat v visokotehnološki izvedbi, v obliki masivnih elementov in kompozitov. V oblikovanju in konstrukcijsko zahtevnih projektih imajo morda nekateri materiali, konkurenčni lesu, še določene tehnične prednosti, vendar je njihova energijska in ekološka bilanca, kot jo določata količina sive energije materialov in ocena življenjskega cikla izdelkov, dramatično slabša od lesa (Torelli, 2009). Z modernimi tehnologijami dezintegracije in reintegracije lesa je mogoče izločiti naravne »napake« in tako optimirati lesne lastnosti v obliki lesnih tvoriv. Zelo uspešno se da dodajati vrednost z inovativnim oblikovanjem.

V prispevku obravnavamo digitalizacijo procesov v arhitekturi od načrtovanja do izvedbe lesenih konstrukcij. Digitalno podprta tehnologija oblikovanja in izdelave je razkrila nov potencial za uresničitev zapletenih kompleksnih oblik s trajnostnimi gradivi.

2 DIGITALNA ORODJA ZA VIRTUALNO NAČRTOVANJE

Peta industrijska revolucija prinaša z digitalizacijo, povezljivostjo in direktno izmenjavo informacij v arhitekturi in gradbeništvu težnjo po izboljšanju produktivnosti pri gradnji. Uvaja informacijsko modeliranje stavb (Building Information Modeling – BIM), proces oblikovanja digitalnega modela, ki spremlja vse procese v stavbi skozi celotni življenjski cikel – od oblikovanja in projektiranja do izgradnje, upravljanja in vzdrževanja stavbe in infrastrukture, ter podpira multidisciplinarni pristop načrtovanja. Poleg BIM-a, ki se navaja kot vodilni način digitalizacije in povezljivosti delovnih procesov, peta industrijska revolucija uvaja še robotiko, 3D-tiskanje, virtualno resničnost (VR – Virtual Reality), razširjeno resničnost (AR – Augmented Reality), uporabo dronov, umetno inteligenco idr. (Furman in Kuhta, 2019; Singh et al., 2017).

V zadnjem poldrugem desetletju so nova orodja ponudila možnost za eksperimentiranje z različnimi organskimi oblikami v arhitekturnem oblikovanju. Digitalizacija procesov uvaja pojem »digitalna arhitektura«. V procesih nastajanja grajenega okolja se uporablja različne digitalizirane procese, v katerih s pomočjo virtualnih oblik nastajajo fizične oblike. Računalniška orodja niso nadomestila samo klasičnih risarskih pripomočkov, temveč predstavljajo nadgradnjo do nedavnega poznanih risarskih tehnik in omogočajo načrtovanje oblik, ki jih je bilo z obstoječimi orodji nemogoče narisati oz. skonstruirati. Digitalizacija je

v procesih arhitekturnega načrtovanja prinesla možnosti oblikovanja s sinergijo oblik iz narave (biomimetika, biomimikrija), intuicije, ... ter matematike in geometrije. Do zgodnjih 90-tih so bile sofisticirane geometrijske oblike sinonim za paraboloidne in hiperboloidne oblike, kot npr. lupine, membrane, vrvne konstrukcije ali gladke ter ohlapno definirane oblike vlite plastike ali pnevmatske konstrukcije, itd. Uporaba računalniških orodij je to spremenila, digitalni arhitekti so dramatično povečali formalni vokabular arhitekturnih oblik, kjer so ravne linije zamenjali za organske oblike, vzorce so našli v naravi (npr. radiolarije, amebe, ježki ...). Te oblike so bile popolno nasprotje trendu v arhitekturi, ki se je do pred kratkim izražal skozi ravne linije (Zbašnik-Senegačnik in Kitek Kuzman, 2014); nova ni postala samo različnost samih oblik, ampak tudi možnost, da se te oblike natančno izrišejo in skonstruirajo z uporabo računalniškega modeliranja (Bianconi et al., 2019). Najbolj neposredna posledica rabe računalniških orodij je brez dvoma zato prav možnost manipuliranja s kompleksno geometrijo, ki omogoča obvladovanje upogrnjenih površin.

2.1 Digitalna arhitektura

Digitalna arhitektura nastaja s pomočjo računalniškega modeliranja, programiranja, simulacij in upodabljanja in z njimi ustvarja virtualne in fizične oblike. Omogočajo jo kompleksni izračuni, ki s pomočjo zmogljivih računalniških algoritmov nudijo raznolike kompleksne oblike (Fischer, 2012). CAD programe se lahko nadgradi z različnimi digitalnimi orodji, s katerimi se generira krivulje in tridimenzionalne ploskve. Realni eksperimenti v obliki modelov in maket v procesu načrtovanja niso več potrebni, nadomeščajo jih simulacije in modeliranje. V zgodnji fazi načrtovanja omogočajo natančno vizualizacijo in nadomeščajo prototipe oz. makete, ki so včasih služili za eksperimentiranje z oblikami in preverjanje ustreznosti zasnove. Orodje DMU (Digital MockUp), ki se je prvotno uporabljalo pri oblikovanju avtomobilov in letal, je v arhitekturi prvi uporabil Frank Gehry za Guggenheimov muzej v Bilbao (1997) (Szalapaj, 2005) (Slika 4). Z orodjem NURBS (Non Uniform Rational Basis Splines) sta med drugim izdelana zgradba Modernega muzeja v Gradcu (Peter Cook, Colin Fournier, 2003) in Aquatic Center Zahe Hadid v Londonu (2012). Za razvoj oblik z novimi računalniškimi tehnikami se uporabljajo programi za generiranje, npr. L-sistem, »botanični« algoritmični sistem, ki se sicer uporablja za simulacijo rasti rastlin v laboratorijskih testih in simulacijah (Issa, 2009). Le z algoritmičnim postopkom oblikovanja je bilo možno ustvariti streho nad dvoriščem Britanskega muzeja v Londonu (2000, Norman Foster & Partners), Paviljon Serpentine Gallery v Londonu (2002, Toyo Ito) in objekte za olimpijske igre v Pekingu 2008 (Aquatics Center Water Cube, PTW Architects; National Stadium Bird's Nest, Herzog & de Meuron) (Szalapaj, 2005).

2.2 Digitalno oblikovanje lesa

Digitalizacija načrtovalskega procesa je vključena tudi v lesno industrijo in lesene konstrukcije. Tako imenovano »digitalno oblikovanje lesa« (ang. digital wood design) zaznamuje inovativne tehnike, ki se uporabljajo v arhitekturi in omogočajo visoko stopnjo predizdelanosti ter zagotavljajo največjo možno svobodo v arhitekturnem oblikovanju in najvišjo kakovost izvedbe lesene konstrukcije s kombinacijo tradicije in inovativnosti ter omogočajo tudi nestandardne organske oblike (Bianconi in Fillippucci, 2019). Prihodnost trajnostno načrtovanih lesenih arhitekturnih konstrukcij je v kombinaciji vidnega lesa, digitalnega dizajna in naprednih mehansko obdelovalnih tehnologij.



Slika 4: Guggenheimov muzej, Bilbao, 1997, Frank Gehry. Zasnova muzeja je močno odvisna od digitalne programske opreme za modeliranje ukrivljenih površin. (Foto: Zbašnik-Senegačnik)

Les je naravni kompozit in se je skozi vso zgodovino uporabljal kot trajen in vzdržljiv konstrukcijski material. Obnovljivi les je ekološko zdrava surovina, vendar le, če je njegovo pridobivanje, predelava in raba zdržna (Torelli, 2009). Sodobne, oblikovalsko ambiciozne arhitekturne konstrukcije pa danes zahtevajo od gradiva še večje razpone ob minimalnih premerih nosilnih elementov in oblike, ki jih masivni les ne omogoča. Lesna industrija razvija številne nove inženirske proizvode na osnovi lesa, ki ohranjajo trajnostni značaj in fizikalne lastnosti tega naravnega materiala, hkrati pa sledijo trendom po organskih oblikah, ki včasih že kljubujejo zakonom težnosti. Z ustreznimi načini predelave in obdelave lesnih tvoriv se lahko zmanjša ali povsem izloči neželene napake v masivnem lesu, hkrati se z uporabo osnovnih inženirskih principov izboljša njegove lastnosti ter prilagodi konstrukcijo, presek in obliko takega kompozita predvidenemu namenu uporabe (Šernek, 2009; Kitek Kuzman et.al., 2018) (Sliki 5 in 6). Les in lesni inženirski materiali, kamor spadajo lepljen lameliran les, križno lepljen les, proizvodi PSL, LSL in LVL, masivni les, furnirna vezana plošča, različne vlaknene plošče, furnirne plošče, iverna plošča, OSB plošča, lahki ploščni

kompoziti, lesno-plastični kompoziti, modificiran les, izolacijske plošče iz lesnih vlaken idr. so idealen material za izgradnjo zapletenih konstrukcijskih oblik z digitalno podprto tehnologijo oblikovanja in izdelave (Sandberg et al., 2018).

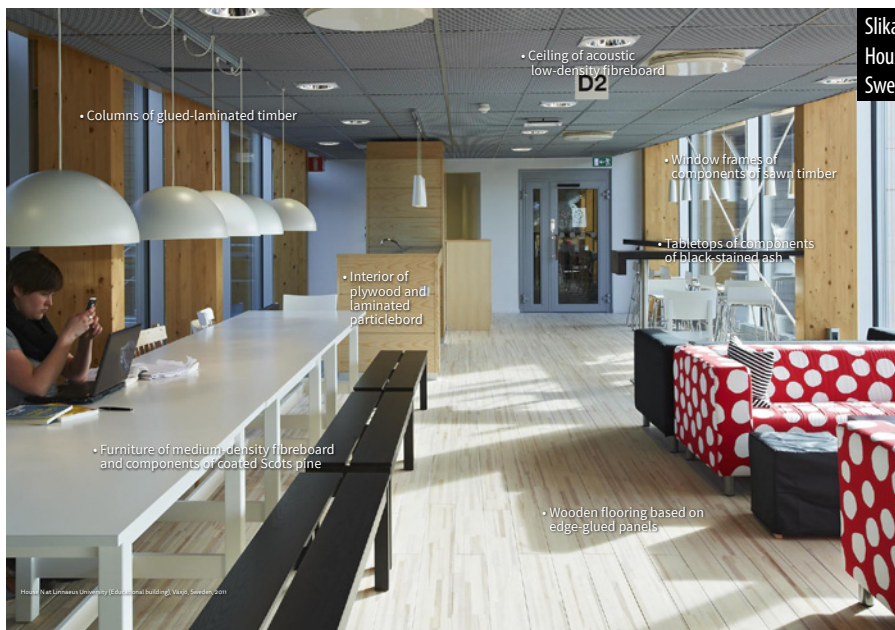
Po fazi načrtovanja se digitalizirani procesi nadaljujejo v izvedbenih fazah. Tudi sodobne lesene konstrukcije nastajajo v procesih digitalnega načrtovanja in proizvodnje. V teh procesih se uporabljajo računalniško podprto konstruiranje – CAE (Computer-Aided Engineering), računalniško podprto oblikovanje – CAD (Computer Aided Design) in računalniško podprta proizvodnja – CAM (Computer-Aided Manufacturing) (Neubau Swatch Biel, 2019). Proizvajalci danes pokrivajo že vse faze v celotnem konstrukcijskem procesu: od tehničnega razvoja do izvedbe konstrukcije, uporabe in vzdrževanja. Fleksibilna načrtovalska orodja in CNC procesi (Computer Numerically Controlled) dovoljujejo načrtovanje in gradnjo naprednih lesenih arhitekturnih konstrukcij novih dimenzij in oblik (Nine Bridges Country Club / Shigeru Ban Architects, 2019). Okvir za izdelavo komponent sestavljajo matematično natančni parametrizirani modeli konstrukcije in njenih sestavnih delov, ki zagotavljajo, da so odstopanja v fazah izdelave, obdelave in vgradnje čim manjša (Slika 7).

2.3 Možnosti uporabe lesa v dodajalnih tehnologijah – 3D tiskanje z lesom

Digitalni procesi v proizvodnji so pripeljali do razvoja dodatnih tehnologij (ang. Additive technologies) ali pogovorno tehnologije 3D tiskanja. 3D tiskalniki, ki so bili sprva uporabljeni za izdelavo modelov v majhnih dimenzijah, so se razvili do velikosti, ki omogočajo tiskanje večjih konstrukcijskih elementov in konstrukcij. Sočasno se razvijajo tudi okolju prijazni in hkrati cenovno ugodni materiali iz lesa, namenjeni 3D tiskanju, ki omogočajo različne načine tiskanja (stereolitografija, inkjet prašno tiskanje/ kapljično nanašanje/brizganje veziva, naganje krojenih plasti, modeliranje s spajanjem slojev (FDM) in ekstrudiranje – brizganje materiala). Poseben poudarek je na razvoju materialov, ki izhajajo iz naravnih surovin in bi bili cenejši in brez izpustov škodljivih snovi med postopkom izdelave, z možnostjo uporabe odpadnih surovin ter možnostjo reciklaže po odsluženju. Les oziroma lesni ostanki so ena od surovin, ki

Slika 5. Inženirski lesni materiali, gradniki v sodobnih digitalnih konstrukcijah: lepljen lameliran les, križno lepljen les, proizvodi PSL, LSL in LVL, masivni les, furnirna vezana plošča, različne vlaknene plošče, furnirne plošče, iverna plošča, OSB plošča, lahki ploščni kompoziti, lesno-plastični kompoziti, modificiran les, izolacijske plošče iz lesnih vlaken. (Foto: Sandberg, Kitek Kuzman)

Lepljen lameliran les	Križno lepljen les	Proizvodi PSL (Parallel strand lumber)	LSL (Laminated strand lumber)	LVL (Laminated veneer lumber)
Masivni les	Furnirna vezana plošča	Različne vlaknene plošče LDF/MDF/HDF	Furnirna plošče	Iverna plošča
OSB plošča	Lahki ploščni kompoziti	Lesno-plastični kompoziti	Termično modificiran les	Izolacijska plošča iz lesnih vlaken



Slika 6. Uporaba inženjskih lesnih materialov v prostoru, House N at Linnaeus University (Educational building), Växjö, Sweden, 2011. (Kitek Kuzman et al., 2018) (Foto: Sandberg)

se bodo uporabljale za 3D-tiskanje v kombinaciji z naravnimi in sintetičnimi polimeri tudi v arhitekturi (Kariž et al., 2017; Kitek Kuzman et al., 2019).

Med različnimi 3D tehnikami je les najbolj uporaben pri tehniki FDM (ang. Fused Deposition Modeling) (Tao et al., 2017), ki je z ustrezno opremo primerna tudi za tisk večjih izdelkov. Na trgu so filamenti različnih proizvajalcev z različnimi deleži lesa (npr. Laywoo-d3) (Slika 8). Les je polnilo, primešan je termoplastičnemu polimeru v fazi izdelave filameta. V filamentih je večinoma do 40 % lesa (Slika 9), večji deleži že predstavljajo možnost mašenja šob, staljeni polimeri z večjim deležem imajo previsoko viskoznost za ekstrudiranje na obstoječih 3D tiskalnikih. Filamenti z večjim deležem lesa so bolj krhki.

Začetnim modelom 3D tiskalnikov, ki so omogočali izdelavo prototipov majhnih dimenzij, so se do danes pridružile tehnike, s katerimi je mogoče zgraditi modele v velikosti hiše. Oblike niso omejene zgolj na ortogonalne linije, saj 3D tiskalniki omogočajo izvedbo tudi zelo zapletenih organskih oblik v zelo visoki resoluciji, kvaliteti površine in uporabljajo zelo različne obstojne materiale. Prototip 3D natisnjene stene je bil zasnovan in oblikovan na Institute for Advanced Architecture of Catalonia, izvedel pa ga je Crane WASP v okviru Open Thesis Fabrication research programa, ki se osredotoča na proizvodnjo aditivov s področja gradbeništva.

3 MATERIALIZACIJA DIGITALNEGA MODELA Z DIGITALNIMI PROCESI IN TRAJNOSTNIM GRADIVOM – LESOM

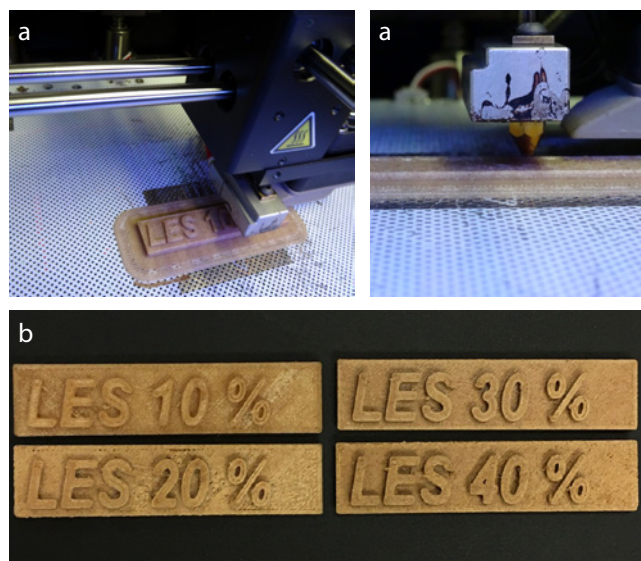
Kompleksne oblike stavb so s sodobnimi orodji veliko lažje dosegljive. Tudi seznam materialov se je razširil – prvotno uporabljenemu betonu, kovinskimi paličjem in oblogam iz umetnih mas se pridružuje les v različnih oblikah (od masivne izvedbe, lesnih kompozitov do 3D tiskanja).

Lesene konstrukcije dobivajo danes organske oblike in soustvarjajo organsko arhitekturo, kot npr. Kilden Performing Arts Centre (Norveška, 2012, ALA Architects in SMS Arkitekter) (Kilden / ALA Architects, 2019), Metropol Parasol (Španija, 2011, Jürgen Mayer) (Metropol Parasol / J. Mayer H + Arup, 2019), House of Bread (Avstrija, 2017, Coop Himmelb(l)au) (House of Bread, 2019) in La Seine Musicale (Francija, 2017, Shigeru Ban in Jean de Gastines) (La Seine Musicale / Shigeru Ban Architects, 2019). Stopajo ob

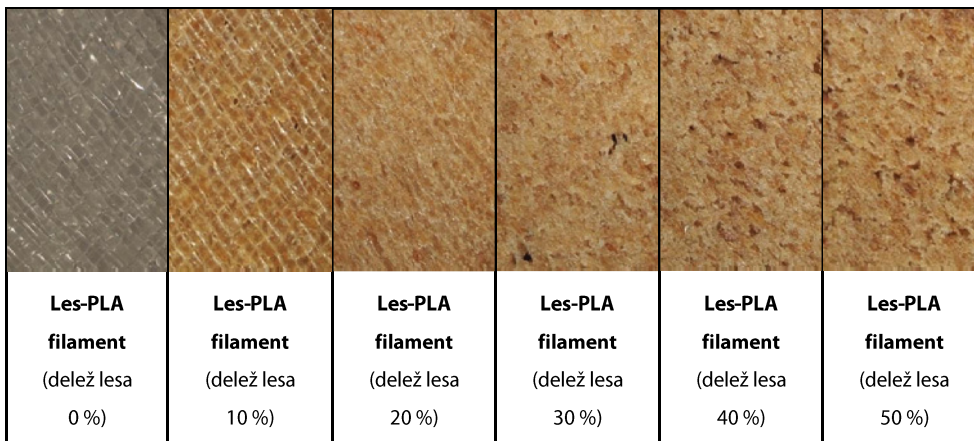


Slika 7: Knjžnica Helsingsfors, Finska, 2018, ALA Architects. (Foto: Sandberg)

bok tradicionalnim, kar pa zahteva digitaliziran proces izvedbe, kjer so vsi sestavni deli hitro, fleksibilno in natančno načrtovani in izvedeni z digitalnimi procesi v delavnicah. Preverjanje zasnov s 3D modeli, možnost statične presoje konstrukcije, reševanje tehničnih problemov v proizvodnji, sestavljanje delov ali celotne konstrukcije na gradbišču rezultira v hitro izgradnjo zgradbe na lokaciji in majhno število dodelavnih del (Slika 10).



Slika 8: a - 3D tiskanje FDM tehnika s PLA filament; b - filament z različnim deležem lesa od 10% do 40 % lesnega prahu. (Foto: Kariž)



Slika 9. Videz površine izdelka, tiskane- ga s filamentom z različnimi deleži lesa. (20-kratna povečava) (Foto: Žigon)

Les kot konstrukcijski material postaja tudi pri večjih objektih enakovreden betonu in jeklu, lesene nosilne konstrukcije pa imajo poleg konstrukcijske vloge še oblikovno. Z uporabo digitalnih orodij v oblikovanju se odpira novo poglavje t.i. konstrukcijskega ornamenta. Primeri konstrukcijske ornamentike, kot so npr. Sendai Mediatheque (Japonska, 2001, Toyo Ito), Prada Aoyama Epicenter (Japonska, 2003, Herzog & de Meuron), The Gherkin Tower (Anglija, 2003, Norman Foster), Simmons Hall Student Housing (ZDA, 2002, Steven Hall) so le nekateri izmed mnogih, ki jasno kažejo, da ornament v sodobni fasadi ni več le posledica oblikovanja, ampak je lahko tudi izhodiščna točka konstrukcije. Trend se nadaljuje tudi v oblikovanju z lesom in lesnimi kompoziti: BUGA wood pavilion, zgrajen v Bundesgartenschau Heilbronn (2019, ICD/ITKE University of Stuttgart) predstavlja nov pristop k digitalnemu načrtovanju in izvedbi konstrukcije iz lesa. Njegova segmentirana lesena lupina je inspirirana iz oblike lupine morskih ježkov, ki je grajena z minimalno porabo materiala in maksimalno nosilnostjo. V okviru projekta je bila razvita robotska platforma za samodejno sestavljanje in rezkanje 376 votlih lesnih segmentov z milimetrsko natančnostjo (ICD, 2019). Prav tako je inovativna zasnova objekta Fiber Pavilion (Bundesgartenschau Heilbronn, 2019, CD/ITKE University of Stuttgart), ki združuje vrhunske digitalne tehnologije in konstrukcijska načela, ki jih lahko najdemo v naravi. Uporabljeni so sicer umetni kompoziti, na primer bioplastika, ojačana s steklenimi ali ogljikovimi vlakni, ki svoje temeljne značilnosti deli z naravnimi kompoziti. Narava je večino nosilnih struktur izoblikovala iz vlaknastih kompozitov in v oblikah, ki imajo izredne zmogljivosti. Poleg organizacije, usmerjenosti in gostote vlaken sta pomembna njihova pozicija in dimenzije, da se zagotovi optimalnost porabe materiala; material se nahaja samo tam, kjer je to potrebno. V arhitekturo prinaša biološki princip (Suyi in Wang, 2017).

Slika 10: Lesene konstrukcije kot produkt digitalnega načrtovanja in izvedbe: a – Univerza Tokio (Foto: Kitek Kuzman), b – Sejmišče v Hannoveru, Madžarski paviljon 2000 (Foto: Sandberg), c – Kapela Kamppi Chapel, Helsinki, 2012. (Foto: Sandberg)



Raziskovalni paviljon Bowooss Bionic Inspired Research Pavilion (2019) na Fakulteti za arhitekturo Univerze Saarland v Nemčiji (2012) je nastal kot plod raziskovalnega projekta bioničnih lesenih lupinastih konstrukcij. Organske oblike je inspirirala narava, ki je skozi evolucijo oblike organizmov in procese, s pomočjo katerih delujejo, ter s procesi reprodukcije, mutacije, rekombinacije in selekcije izoblikovala tako, da lahko delujejo optimalno (Pohl in Nactigall, 2015b). Raziskava je potekala na preučevanju raznolikih enoceličnih organizmov, diatomej, z namenom, da se osredotoči na razvoj trajnostnih, fleksibilnih in razstavljivih enot in spodbuja močnejšo povezavo med uporabniki izdelkov in naravo.

Pri izvedbi začasnega objekta Temporary chapel for the Deaconesses of St-Loup (Švica, 2008, Localarchitecture in Danilo Mondad) so se pri iskanju ustrezne oblike opirali na geometrijsko študijo origamija za doseganje skladnosti gradnje po načelih tektonike (Weinand, 2017). Leseni ploskovni kompoziti so bili idealna izbira za izvedbo nosilnih elementov zloženega volumna, ki poudarja notranji prostor in s pregibi ustvarja ritem. Oblika arhitekture je posledica konstrukcijskega premisleka in prezentacija konstrukcije navzven, kar je načelo tektonike (Temporary chapel for the Deaconesses of St-Loup, 2019).

Posnemanje narave se razširja tudi na področje samooblikovanja. Zasnova projekta Urbach Tower (2019, CD/ITKE Univerza v Stuttgartu) izhaja iz novega procesa samooblikovanja ukrivljenih lesenih konstrukcijskih elementov. Ta pionirski razvoj pomeni premik paradigme v proizvodnji lesa od prefinjenih in energijsko intenzivnih postopkov mehanskega oblikovanja, ki zahtevajo težke stroje, do procesa, kjer se material v celoti oblikuje sam. Ta sprememba oblike temelji na značilnem naravnem krčenju lesa med zmanjšanjem vsebnosti vlage. Sestavni deli 14 m visokega stolpa so zasnovani in izdelani v ravnem stanju in se avtonomno pretvorijo v končne, programirane ukrivljene oblike med standardnim tehničnim sušenjem. Možnost, da se material sam oblikuje, odpira nove in nepričakovane arhitekturne možnosti za visoko zmogljive in elegantne konstrukcije z uporabo

trajnostnega, obnovljivega in lokalno pridobljenega gradbenega materiala. Urbach Tower je prva tovrstna stavba na svetu, ki je izdelana iz samooblikovanih sestavnih delov (University of Stuttgart makes Urbach Tower..., 2019).

Klasičnim načinom gradnje se pridružuje tehnologija 3D tiska, ki že omogoča nastanek stavb večjega formata. Znani so poskusi uporabe novih dodajalnih tehnologij, ki omogočajo tiskanje večjih konstrukcijskih elementov in zagotavljajo inovativne rešitve za bolj trajnostni habitat in mesto. Nizozemski arhitekti so npr. začeli v Amsterdamu večletni projekt živega laboratorija 3D Print Canal House. Urban Cabin (2014, DUS architects in mesto Amsterdam) je 3D natisnjen urbani paviljon, ki na novo razmišlja o intimnosti in individualnem prostoru znotraj mesta (Urban Cabin, 2019). Zgradba Office of the future (Dubaj, 2016, Killa Design) je prva poslovna zgradba, izdelana s pomočjo 3D tiskanja z uporabo trajnostnih bioplastičnih materialov (3D Printed Office Building..., 2019).

Predvidevamo, da se bo v razvoju dodajalnih tehnologij z uporabo lesa širil tudi spekter njihove uporabe na gradbenem področju, predvsem pri gradnji montažnih hiš in za izdelavo posamezniku prilagojenih kompleksnejših izdelkov z višjo stopnjo funkcionalnosti in oblikovalskim presežkom.

4. DISKUSIJA IN ZAKLJUČEK

Pristop k oblikovanju v arhitekturi se je z digitalizacijo spremenil; objekti niso več oblikovani, ampak izračunani (Bianconi et al., 2019), kar omogoča izvedbo zapletenih oblik z upognjenimi površinami, ki bi jih bilo težko predstaviti z uporabo tradicionalnih načinov risanja in izdelati s standardnimi načini proizvodnje. S pomočjo naprednega digitalnega modeliranja (digitalizacije) je možna serijska izdelava geometrijsko skladnih, pa vendar različnih elementov, ter hkrati vrhunskih, natančnih in relativno cenovno ugodnih unikatnih komponent (Zellner, 1999; Mitchell, 2005).

V arhitekturi se je začel ponovno pojavljati trend po oblikovanju z organskimi, neortogonalnimi linijami, kar omogočajo sodobna digitalna orodja. Organske oblike, ki so jih bili v preteklosti zmožni pripeljati od idejne do izvedbene faze samo največji umi (kot npr. Gaudi, Wright, Fuller), so danes lažje dosegljive s podporo računalnikov in parametričnih orodij. Vanje pa so skriti vsi koncepti, ki so se razvili v zgodovini – od idej Ruskina in Viollet-le-Duca ter Wrighta in Gaudija, preko matematikov 20. stol. do Grega Lynna, Williama Mitchella, Petra Eisenmanna, Franka Gehryja, idejnih očetov digitalizacije v arhitekturi (Picon, 2010). Digitalizacija v arhitekturi prinaša možnosti oblikovanja s sinergijo narave, matematike, geometrije, intuicije itd.

Intenzivnejše so tudi težnje po inspiriranju oblik in procesov v naravi. Čeprav narave ni mogoče neposredno kopirati z analizo fizičnih subjektov, lahko živi svet arhitektom in inženirjem ponudi veliko navdihov za njihove kreativne zasnove (Pohl in Nachtigall, 2015). Po drugi strani pa naj bi se s povezovanjem grajenega okolja z naravo – z razgledi na naravo, z uporabo naravnih materialov (predvsem lokalnih gradiv) ter z upoštevanjem lokalne ekologije pri načrtovanju gradnje in uporabe – izboljšalo uporabnikovo dožemanje naravnega okolja in povečala motivacija k večji skrbi za okolje. Restorativno okoljsko oblikovanje (angl. "restorative environmental design"; RED) združuje ideje trajnostnega in "biofilicnega" oblikovanja. RED poskuša spodbujati močnejšo povezavo med uporabniki izdelkov in naravo, da bi navdihnili uporabnike in jih motivirali k skrbi za okolje.

Digitalno načrtovanje in sodobne tehnologije proizvodnje označujejo les kot optimalno gradivo. Za ta namen je poleg masivnega žaganega lesa razvitih veliko inženirskih lesnih proizvodov, ki

imajo dobre mehanske lastnosti, so estetski, na pogled atraktivni in zelo funkcionalni. Les in lesni kompoziti ponujajo sposobnost gradnje s trajnostnim, popolnoma obnovljivim in visoko zmogljivim materialom tako iz energijskega kot konstrukcijskega vidika. Skupaj z arhitekturnimi rešitvami organskih oblik je les dragocena alternativa materialom, ki so do nedavnega služili za arhitekturno artikulacijo (Bianconi in Filippucci, 2019). Poleg tega postaja ključnega pomena tudi trajnostni doprinos pri izbiri gradiv. Izkoristek lesa (finančni in tudi z vidika trajnostnega razvoja) zgoj za energetiko je majhen, zato ga ni smiselno uporabljati samo kot energent. Upoštevati je treba načelo, da les uporabimo večkrat oz. v več stopnjah, pri uporabi pa naj se ohranja čim dlje v masivni obliki. S tem dosežemo v vsaki stopnji (ponovne) rabe tudi optimalno skladiščenje CO₂ (Meier et al., 1990; Kitek Kuzman et al., 2019). Na (1) prvi stopnji bi ga morali najprej uporabiti kot produkt (žagan les, lepljen les, lepljen les, ki je izdelan z lepljenjem masivnega lesa, furnirne plošče, stavbno pohištvo, bivalno pohištvo ...), (2) drugič kot material v procesu ponovne uporabe/recikliranju (lepljeni kompoziti iz dezintegriranega lesa; npr. OSB, iverne plošče, vlaknene plošče, lesno-cementne plošče ..., ali produkti iz različnih vrst odpadne lignocelulozne biomase (karton, papir ...) – tu pridejo v poštev tudi stranski produkti iz prve stopnje oz. zavoja in šele na koncu te tako imenovane »kaskade« (3) za pridobivanje »zelene energije« iz gozdnih ostankov, ostankov pri posameznih tehnoloških postopkih in ostankih, ki nastanejo pri rabi starega lesa ali celo odslužen les.

3D tisk z naravnimi materiali se širi tudi na področje nestandardne arhitekture organskih oblik. 3D tisk in digitalna izdelava je ena izmed prihodnosti oblikovanja. Smiselno bi bilo tudi vlagati v nadaljnje raziskave novih biopolimernih materialov, ki bi po svojih konstrukcijskih zmogljivostih bili celo primerljivi z visokotrdoznimi kompoziti iz steklenih vlaken.

Razvojni potencial sodobnih lesenih konstrukcij, ki so kombinacija tradicije in inovativnosti, vidimo v upoštevanju biomimetičnih načel v arhitekturi in inženirskem oblikovanju, v povezavi digitalnega oblikovanja in izdelavi konstrukcijskih elementov s pomočjo numerično krmiljenih strojev. Inženirji poznajo digitalna orodja, imajo sposobnost geometrijske predstave in konstrukcijsko znanje, medtem ko imajo arhitekti ambiciozne ideje za posebne oblike zgradb, ki jih omogoča digitalizacija procesov.

Zahvala

Raziskava je bila podprta s strani ARRS, Program P4-0015 in P5-0068.

Literatura in viri

- Bianconi, F., & Filippucci, M. (Eds.). (2019). *Digital Wood Design: Innovative Techniques of Representation in Architectural Design*. 24. Springer. <https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8>
- Benyus, J. (2008). A Good Place to Settle: Biomimicry, Biophilia, and the Return of Nature's Inspiration to Architecture, in: *Biophilic Design: The Theory, Science and Practice of Bringing Buildings to Life* [eds. Kellert, S. R.; Heerwagen, J.; Mador, M.], Wiley, New York.
- Bianconi, F., Filippucci, M. (2019). Wood, CAD and AI: Digital Modelling as Place of Convergence of Natural and Artificial Intelligent to design Timber Architecture. V: *Digital Wood Design*. str. 3–61, Springer, Basel. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-03676-8_1
- Birindelli, I., Cedrone, R. (2012). *Modern Geometry versus Modern Architecture*. V: *Imagine Math. Between Culture and Mathematics*. Emmer, M. (ur), Springer-Verlag Italia. str. 105–115. Milan, Dordrecht, Heidelberg, London, New York.

- Viollet-le-Duc, VEE (1854–1868). *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XVe au XVIe siècle*. 8. Paris.
- Fischer, JR. (2012). *Optimizing Digital Organic Freeform Modelling for Fabrication by Using Parameterization With Glass Fibre Reinforced Plastics (GRP)*. eCAADe - Digital Applications in Construction, 2012, 30, vol.2, str. 181–190. http://papers.cumincad.org/cgi-bin/works/_id=ecaade2014/Show?ecaade2012_257
- Fuller, P. (2005). *Buckminster Fuller: designing for mobility*. Milano: Skira.
- Furman, M., Kuhta, M. (2019). Povezljivost BIM-modela in CNC-stroja na primeru lesene okvirne montažne hiše. *Gradbeni vestnik*, 68, str. 120–126.
- ISSA, R. (2014). *Generative Algorithms: Lindenmayer-System (L-System)*. <http://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/generative-algorithms> (dostopno, november 2019).
- Hemenway, P. (2008). *Der Geheime Code*. Köln: Evergreen GmbH.
- Kariž, M., Šernek, M., Kitek Kuzman, M. (2017). *Possible uses of wood in additive technologies (3D printing)*. *Les/Wood*, 66 (2), str. 71–84. <https://dx.doi.org/10.26614/les-wood.2017.v66n02a07>
- Kitek Kuzman, M. Sandberg, D., Moutou Pitti, R. (2018). *Engineered wood products in contemporary architectural use: case studies = Produits d'ingénierie en bois pour l'architecture contemporaine: cas d'étude*. Ljubljana: Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology.
- Kitek Kuzman, M., Ayrilmis, N., Šernek, M., Kariz, M. (2019). *Effect of selected printing settings on viscoelastic behaviour of 3D printed polymers with and without wood*. *Materials research express*, 2019, str.1–21. <https://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab411c>
- Meier, K., Streiff, H., Richter, K. (1990). *Zur ökologischen Bewertung des Bau- und Werkstoffs Holz. For the ecological assessment of the construction and wood material*. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 108 (1990), str. 689–695. <https://dx.doi.org/10.5169/seals-77453>
- Mitchell, W. J. (2005). *Constructing Complexity*. V: Martens, B.; Brown, A. (ur), *Computer Aided Architectural Design Futures 2005*, Proceedings of the 11th International CAAD Futures Conference, Vienna University of Technology, Vienna, Austria. June 20–22, Springer, str. 41–50. https://dx.doi.org/10.1007/1-4020-3698-1_3
- Pohl, G., Nachtigall, W. (2015). *Biomimetics for architecture & design. Merges biological knowledge with architectural know-how*. *Nature-Analogies-Technology*. Switzerland: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19120-1>
- Picon, A. (2010). *Digital Culture in Architecture*. Basel: Birkhäuser.
- Ruskin, J. (1981). *The Seven Lamps of Architecture*. New York: Farrar, Straus and Goroux.
- Sandberg, D., Kitek Kuzman, M., Gaff, M. (2019). *Engineered Wood Products- Wood as an engineering and architectural material. Kompozitni materialy na bazi dřeva - Dřevo jako kompozitni a konstrukčni material*. Prag: Czech University of Life Science in Prag.
- Singh, MM., Sawhney, A., Sharma, V. (2017). Utilising Building Component Data from BIM for Formwork Planning. *Construction Economics and Building*, 17(4), str. 20–36. <https://dx.doi.org/10.5130/AJCEB.v17i4.5546>
- Suyi, L., KW Wang, K. W. (2017). Plant-inspired adaptive structures and materials for morphing and actuation: a review. *Bioinspiration & Biomimetics*, 12, 011001, str. 1–17. <https://dx.doi.org/10.1088/1748-3190/12/1/011001>
- Szalapaj, P. (2005). *Contemporary Architecture and the Digital Design Process*. TaylorFrancis Group. <https://dx.doi.org/10.4324/9781315042879>
- Šernek, M. (2009). *Konstruktivski kompozitni les*. V: M. Kitek Kuzman (ur.), *Gradnja z lesom izziv in priložnost za Slovenijo* (str. 84–88). Ljubljana: Fakulteta za arhitekturo, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Univerza v Ljubljani.
- Zerbst, R. (2005). *Gaudi: The complete buildings*. Köln: Taschen.
- Zellner, P. (1999). *Hybrid Space: New Forms in Digital Architecture*. Thames & Hudson.
- Tao, Y., Wang, H., Li, Z., Li, P., Shi, SQ. (2017). *Development and Application of Wood Flour-Filled Poly(lactic Acid Composite Filament for 3D Printing)*. *Materials*, 10(4), str. 339–345. <https://dx.doi.org/10.3390/ma10040339>
- Torelli, N., (2009). *Les zares*. V: M. Kitek Kuzman (ur.), *Gradnja z lesom izziv in priložnost za Slovenijo* (str. 66–73). Ljubljana: Fakulteta za arhitekturo, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Univerza v Ljubljani.
- Zbašnik Senegačnik, M., Kitek Kuzman, M. (2014). Interpretations of organic architecture = Interpretacije organske arhitekture. *Prostor: znanstveni časopis za arhitekturo i urbanizam*, 22, 2 (48), str. 291–301.
- Wenand, Y. (2017). *Advanced timber structures*. Basel: Birkhäuser.
- Wright, F.L., (1963). *The Natural House*. New York: Mentor Book.

Spletni viri:

- 3D Printed Office Building Unveiled in Dubai. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://all3dp.com/3d-printed-office-building>
- House of Bread. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <http://en.timberconstruction.wiehag.com/Wiehag-Timber-Construction2/References/House-of-bread>
- ICD, Institut for Computational Design and Construction. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://icd.uni-stuttgart.de/>
- Kilden / ALA Architects. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://www.archdaily.com/225522/kilden-ala-architects>.
- La Seine Musicale / Shigeru Ban Architects. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://www.archdaily.com/874535/la-seine-musicale-shigeru-ban-architects>
- Metropol Parasol / J. Mayer H + Arup. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://www.archdaily.com/201961/metropol-parasol-j-mayer-h-arup>
- Neubau Swatch Biel. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://www.lehmann-gruppe.ch/holzbaue>
- Nine Bridges Country Club / Shigeru Ban Architects. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://www.archdaily.com/490241/nine-bridges-country-club-shigeru-ban-architects>
- Temporary chapel for the Deaconesses of St-Loup - Localarchitecture / Danilo Mondada + Localarchitecture. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://www.archdaily.com/9201/temporary-chapel-for-the-deaconesses-of-st-loup-localarchitecture>
- The Bowooss Bionic Inspired Research Pavilion | School of Architecture at Saarland University. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://www.arch2o.com/the-bowooss-bionic-inspired-research-pavilion-school-of-architecture-at-saarland-university/>
- University of Stuttgart makes Urbach Tower from self-shaping wood. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://www.dezeen.com/2019/06/03/university-of-stuttgart-urbach-tower-self-shaping-wood/>
- Urban Cabin. Pridobljeno v novembru 2019 s spletne strani <https://all3dp.com/1/3d-printed-house-homes-buildings-3d-printing-construction/#urban-cabin>