

Primljen / Received: 24.11.2021.
Ispravljen / Corrected: 1.6.2022.
Prihvaćen / Accepted: 5.7.2022.
Dostupno online / Available online: 10.8.2022.

Istraživanje učinkovitosti oblika upornjaka inspiriranog prirodom u podupiranju zidanih konstrukcija

Autori:



Mr.sc. **Rabia Izol**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Harran, Şanlıurfa, Turska
Odjel za građevinarstvo
izolrabia1@gmail.com
Autor za korespondenciju



Prof.dr.sc. **M. Arif Gürel**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Harran, Şanlıurfa, Turska
Odjel za građevinarstvo
agurel@harran.edu.tr



Doc.dr.sc. **H. Almila Arda Buyuktaskin**, dipl.ing.građ.
Tehničko sveučilište u Istanbulu, Istanbul, Turska
Arhitektonski fakultet
almila@itu.edu.tr

Pregledni rad

Rabia Izol, M. Arif Gürel, H. Almila Arda Buyuktaskin

Istraživanje učinkovitosti oblika upornjaka inspiriranog prirodom u podupiranju zidanih konstrukcija

Upornjak je važan element za nadsvođene i kupolaste zidane konstrukcije. Na početku ovog istraživanja, nakon pregleda oblika upornjaka u povijesnoj zidanoj arhitekturi, sažeta su dosadašnja istraživanja o zidanim upornjacima. Zatim su predstavljene neke ideje za buduća istraživanja zidanih upornjaka. Konačno, istražuje se učinkovitost idealiziranog upornjaka u obliku potpornog korijenja za podupiranje zidane konstrukcije protiv seizmičkih sila. Uočeno je da konkavni parabolični upornjak pruža veću otpornost konstrukciji nego upornjak s idealiziranim oblikom potpornog korijenja.

Ključne riječi:

oblici upornjaka, povijesne zidane konstrukcije, inspirirano prirodom, seizmička otpornost, svod

Subject review

Rabia Izol, M. Arif Gürel, H. Almila Arda Buyuktaskin

Investigation of the effectiveness of nature-inspired buttress forms in supporting masonry structures

A buttress is a crucial element for vaulted and domed masonry structures. In this study, after reviewing the buttress forms in historical masonry architecture, previous studies on masonry buttresses are summarized. Then, some ideas for potential studies on masonry buttresses are presented. Finally, the effectiveness of an idealized tree buttress-shaped buttress in supporting masonry structures against seismic forces is investigated. The results indicate that a concave parabolic buttress provides structures with a higher resistance than a buttress with an idealized shape of tree buttresses.

Key words:

buttress forms, historical masonry structures, inspired by nature, seismic resistance, vault

1. Uvod

Kamen, opeka i čerpić, koji se nazivaju i zidarskim građevnim materijalom, imaju povlašteno mjesto u ljudskoj povijesti. Njihova laka dostupnost i ekonomičnost omogućili su izgradnju gotovo svih vrsta građevina tisućama godina. I danas se smatraju važnim elementima u cijelom svijetu.

U nadsvođenim, kupolastim ili lučnim konstrukcijama, značajne sile potiska djeluju na zidove. Kako bi zidovi sigurno podnosili horizontalnu komponentu potiska koji se prenosi s ovih elemenata, moraju biti ili poprilično debeli ili poduprti upornjacima. Zbog debelih zidova, zgrada postaje glomazna i povećava se količina korištenog materijala. Iz tog razloga primjena upornjaka logičnije je rješenje od gradnje debljih zidova. Upornjaci su također posebno važni i nužni kako bi konstrukcija imala dovoljnu otpornost na horizontalne utjecaje kao što su potresi i vjetrovi. Pri istraživanju povijesnih zidanih konstrukcija, primjećuje se da su osobito one s visokim zidovima gotovo uvijek poduprte upornjacima. To nedvojbeno pokazuje da su arhitekti i graditelji ovih građevina imali visoku svijest o važnosti upornjaka za stabilnost konstrukcije.

Upornjak se općenito definira kao "izbočenje izgrađeno na zidu ili građevini, kako bi se postigla dodatna čvrstoća ili pružila potpora" [1]. Nema sigurnih podataka o tome gdje su upornjaci prvi put korišteni u povijesti. Kod većine povijesnih zidanih građevina, upornjaci su bili građeni zajedno sa zidovima objekta, odnosno izvorni su dio građevine. Međutim, postoje i strukture na kojima su barem neki od postojećih upornjaka dodani kasnije.

Upornjaci u povijesnim zidanim građevinama građevnog tipa mogu se podijeliti u dvije glavne skupine. Oni iz prve skupine međusobno su kontinuirano povezani sa zidom, to jest radi se o klasičnim upornjacima. A oni iz druge skupine povezani su sa zidom na maloj površini, imaju oblik luka i nazivaju se "lebdeći upornjaci". Ti upornjaci prenose silu potiska koju preuzimaju od zida do snažnog upornjaka nalik potpornom stupu na drugim krajevima.

Velika svjetska povijesna zidana arhitektura okarakterizirana je velikim brojem upornjaka. U ovom istraživanju ta će se raznolikost najprije prikazati pomoću primjera. Zatim će se preispitati dosadašnja istraživanja o zidanim upornjacima. Potom će se iznijeti nove ideje, s naglaskom da je moguće provesti niz istraživanja na temu zidanih upornjaka. Prvi put u literaturi provest će se istraživanje učinkovitosti oblika upornjaka inspiriranog prirodom u podupiranju zidane konstrukcije protiv horizontalnih seizmičkih sila.

2. Oblici upornjaka u povijesnim zidanim strukturama građevnog tipa

Jedna od prvih stvari koja privlači našu pozornost kod većine povijesnih zidanih građevina su upornjaci koji podupiru njihove zidove. U našem pregledu u ovom odjeljku, najprije ćemo se osvrnuti na klasične oblike zidanih upornjaka, a zatim na lebdeće

upornjake. Klasične zidne upornjake podijelit ćemo na najčešće oblike, kombinirane oblike, rjeđe oblike, posebne geometrijske oblike i posebne oblike. Svi oblici lebdećih upornjaka proučavat će se zajedno.

2.1. Klasični zidni upornjaci

U statičkom smislu, klasični zidni upornjaci podupiru zid svojom težinom radi uravnoteženja momenta prevrtanja koji nastaje potiskom svoda, kupole ili luka. Ti su upornjaci svojom visinom neprekidno međusobno povezani sa zidom koji podupiru.

2.1.1. Najčešći oblici

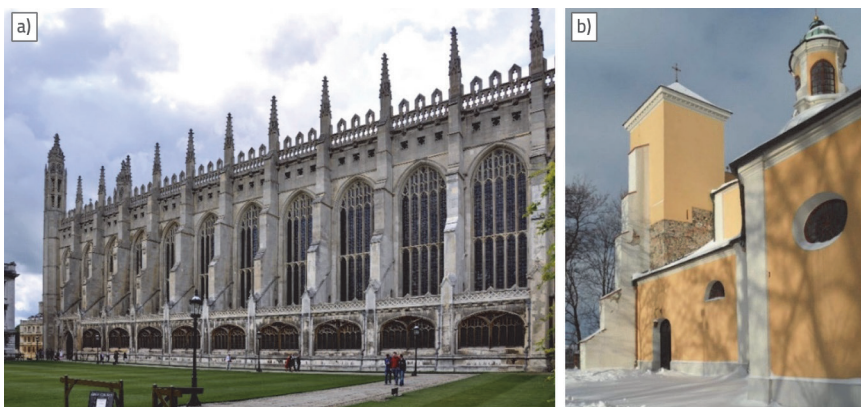
Od svih oblika upornjaka, u povijesnim građevinama diljem svijeta najčešći su oni pravokutni. Zahvaljujući lakoći izrade i jednostavnom obliku, pravokutni se upornjaci primjenjuju gotovo u svim vrstama građevina. Slika 1. prikazuje dvije građevine s upornjacima toga oblika.



Slika 1. Dvije povijesne građevine s pravokutnim upornjacima: a) Velika džamija Kızıltepe (Mardin, Turska); b) Şarapsa Han (konačište) (Antalya, Turska), (fotografije: autori)



Slika 2. Primjeri trapeznih i trokutnih upornjaka: a) Džamija Süleymaniye (Istanbul, Turska), (fotografija: autori); b) Džamija Piyala Paşa (Istanbul, Turska) [3]; c) Katedrala Sovana (Toskana, Italija) [4]; d) Kongregacijska džamija Eziran (Isfahan, Iran) [5]



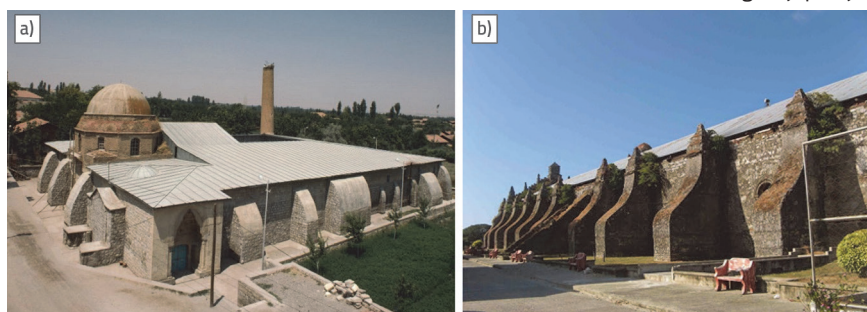
Slika 3. Primjeri stepenastih upornjaka: a) Kapela King's College (Cambridge, Engleska) [6]; b) Bazilika Uznesenja Gospe (Trzemeszno, Poljska) [7]

Trapezni upornjak bio je jedan od najčešćih u povijesnim građevinama zbog njegovog kontinuirano rastućeg poprečnog presjeka od vrha do dna, a time i njegovog očitog doprinosa zidovima protiv prevrtanja. Uglavnom se razlike u poprečnom presjeku ove vrste upornjaka očituju samo u dubini (dimenzija okomita na zid), ali postoje i slučajevi gdje se razlikuju i u dubini i debljini (dimenzija paralelna sa zidom). Slike 2.a i 2.b prikazuju dva primjera građevina s trapeznim upornjacima. Iako ih ima nešto manje od pravokutnih i trapeznih upornjaka, velik je broj i trokutnih upornjaka u povijesnim zidanim građevinama. Na slikama 2.c i 2.d prikazana su dva primjera takvog upornjaka.

Drugi najčešći tip upornjaka u zidanim konstrukcijama je stepenasti upornjak. Ta je vrsta upornjaka poprilično rasprostranjena, osobito u europskim povijesnim katedralama. Na slici 3. prikazana su dva primjera. U periodu intenzivne primjene ovog oblika upornjaka, osim tradicije i ekonomičnosti materijala, mogao je biti efektan i njegov stepenasti oblik koji pročeljima daje otmjenost.

2.1.2. Kombinirani oblici

Brojne povijesne zidane građevine karakteriziraju kombinirani upornjaci koji se sastoje od dvaju ili više dijelova. Kombinacije su



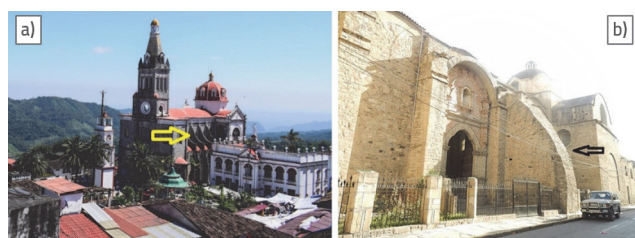
Slika 4. Dvije povijesne građevine s kombiniranim upornjacima: a) Velika džamija u Malatyi (Malatya, Turska) [8]; b) Crkva Paoay (Paoay, Filipini) [9]

različite poput pravokutnog i trokutnog dijela, pravokutnog i paraboličnog dijela ili trapeznog i pravokutnog dijela itd. Slika 4. prikazuje dva primjera.

2.1.3. Manje uobičajeni oblici

Uočeno je da mali broj povijesnih zidanih konstrukcija ima čiste zakrivljene (parabolične ili druge oblike) upornjake. Jedan od razloga može biti češća potreba za održavanjem, posebno konkavnih upornjaka, a to se posebice odnosi na probleme uzrokovane padalinama i mrazom. Postojeći zakrivljeni upornjaci su ili

konkavnog ili konveksnog oblika. Na slici 5. prikazana su dva primjera. Pregledom povijesne zidane arhitekture može se primijetiti da se zakrivljenim konkavnim oblicima uglavnom davala prednost u gornjim dijelovima građevina. To se može vidjeti, primjerice, u crkvi Cuetzalan del Progreso u Meksiku (slika 5.a), katedrali u Cadizu u Španjolskoj i katedrali u Sieni u Italiji. Može se pretpostaviti da su, osim u estetske svrhe, ovi zakrivljeni konkavni upornjaci primjenjivani u gornjim dijelovima tih građevina jer svojim oblikom ne zaklanjaju pogled na ostatak građevine.



Slika 5. Primjeri zakrivljenih upornjaka: a) Crkva Cuetzalan del Progreso (Progreso, Meksiko) [10]; b) Hram Templo de Santo Domingo (Bolivija) [11]

2.1.4. Geometrijski oblikovani oblici

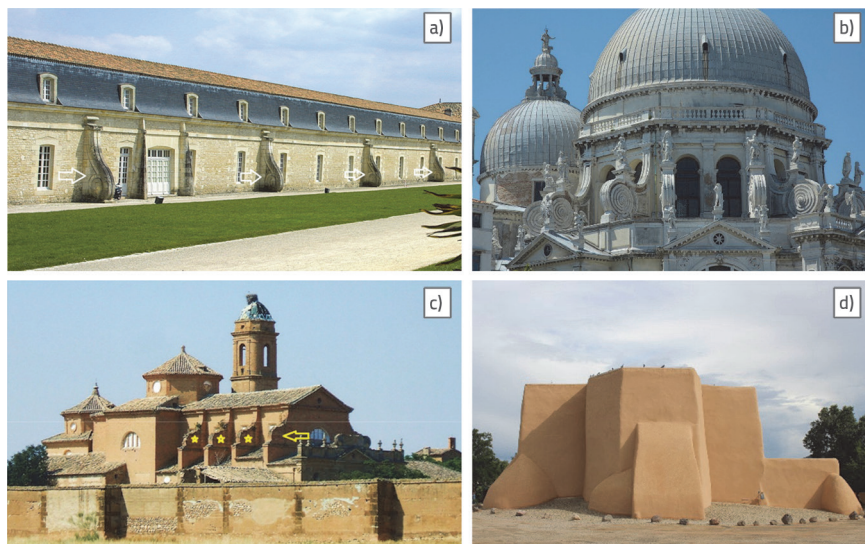
U bogatoj povijesnoj arhitekturi svijeta postoje i upornjaci s određenim geometrijskim oblicima. Kao primjeri za tu vrstu upornjaka mogu se navesti sljedeći: polucilindrični upornjaci, upornjaci nalik dijelu poligonalne prizme, režnjevasti upornjaci, upornjaci nalik trokutastoj prizmi, polukonusni upornjaci, upornjaci nalik trokutastoj piramidi, upornjaci nalik šupljom cilindričnoj i šupljom trokutastoj prizmi. Na slici 6. prikazani su neki primjeri.



Slika 6. Upornjaci posebnog geometrijskog oblika: a) Zazadin Han (Konya, Turska) [12]; b) Tuzhisar Sultan Han (Kayseri, Turska) [13]; c) Samostan Alaverdi (Kakheti, Gruzija) [14]; d) Velika džamija u Bobo-Dioulasso (Bobo Dioulasso, Burkina Faso) [15]; e) Dvorac Goodrich, (Herefordshire, Engleska) [16]; f) Bazilika San Francesco Assisi (Assisi, Italija) [17]

2.1.5. Posebni oblici

U svjetskoj arhitekturi postoje upornjaci koji su svojim izgledom zaista posebni. Nije moguće znati njihov broj. Iako su neki od njih slični, svaki je zapravo unikatan. Slika 7. prikazuje samo četiri primjera. Neki od tih upornjaka, poput upornjaka u obliku puževe

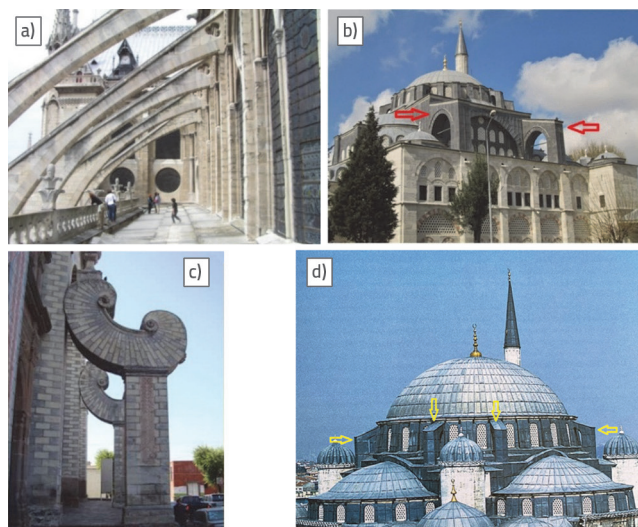


Slika 7. Unikatan oblikovani upornjaci: a) Corderie Royale, (Rochefort, Francuska) [18]; b) Kupola bazilike Santa Maria della Salute i njezini upornjaci u obliku puževe kućice, (Venecija, Italija) [19]; c) Samostan Cartuja de Nuestra Señora de las Fuentes (Huesca, Španjolska) [20]; d) Misijska crkva San Francisco de Assisi (Novi Meksiko, SAD) [21]

kućice koji se nalaze na kupoli bazilike Santa Maria della Salute prikazani na slici 7.b, toliko su umjetnički oblikovani da je nemoguće ne diviti im se i ne cijeniti ljude koji su ih projektirali i izgradili.

2.2. Lebdeći upornjaci

Kao što je već poznato, lebdeći ili lučni upornjak jedan je od glavnih obilježja gotičkih katedrala. Gradnja veličanstveno visokih gotičkih katedrala bila je moguća zahvaljujući takvom obliku upornjaka. Neke modificirane vrste tog upornjaka također se nalaze u islamskim i drugim arhitektonskim stilovima. Slika 8. prikazuje primjere lebdećih upornjaka.



Slika 8. Primjeri lebdećih upornjaka: a) Katedrala Notre-Dame de Paris (Francuska) [22]; b) Džamija Kılıç Ali Paşa (Istanbul, Turska) [23]; c) Jedinstveni lebdeći upornjaci crkve Santa Rosa de Viterbo (Querétaro, Meksiko) [24]; d) Lebdeći upornjaci kupole džamije Şehzade (Istanbul, Turska) [25]

3. Dosadašnji radovi na temu zidanih upornjaka

U literaturi postoje vrijedna istraživanja o zidanim upornjacima. U ovom se radu daje pregled onih najvažnijih. O konstrukciji i ponašanju gotičkih katedrala Ungewitter i Mohrmann [26] napisali su knjigu u dva sveska. Veliki dio knjige posvetili su i klasičnim i lebdećim upornjacima. Sa sigurnošću se može reći da je knjiga jedno od remek-djela ovog područja. U svom je radu o teoriji linije potiska, Milankovitch [27] demonstrirao primjenu teorije i na razne zidane upornjake. Sanabria [28] je iznio primjedbe na formule španjolskog arhitekta Rodriga Gila de Hontānóna za sigurno određivanje veličine upornjaka.

Clark i Mark [29] poduzeli su sveobuhvatno ispitivanje prvih lebdećih upornjaka katedrale Notre Dame de Paris.

Huerta, u svojoj disertaciji [30] i u jednom od drugih radova [31], daje detaljne informacije o pravilima određivanja veličine upornjaka tijekom srednjeg vijeka i renesanse. Iz Huertinih neprocjenjivih radova može se zaključiti da su drevni graditelji imali prilično visoku razinu svijesti o važnosti upornjaka za sigurnost cijele strukture.

U svom detaljnom istraživanju anatolijskih seldžučkih konačišta, Yavuz [32] daje brojne informacije o mnogim aspektima kao što su oblik, tlocrt, položaj i dekoracije upornjaka prisutnih na tim građevinama.

Heyman [33] u svojoj legendarnoj knjizi *Stone Skeleton* najprije raspravlja o strukturnoj teoriji zidanih konstrukcija, a zatim objašnjava ponašanje različitih strukturnih elemenata i dijelova uključujući lebdeće upornjake u povijesnim zidanim konstrukcijama.

U svoja druga dva rada [34, 35] Huerta je detaljno obradio pravila određivanja veličine upornjaka, među ostalim glavnim konstrukcijskim elementima, u srednjovjekovnim građevinama, a posebice u gotičkim crkvama i katedralama.

Ochsendorf i sur. [36] bavili su se urušavanjem zidanih upornjaka pod koncentriranim kosim opterećenjem. Tema rada Nikolinakoua i sur. [37] je struktura i oblik ranogotičkih lebdećih upornjaka.

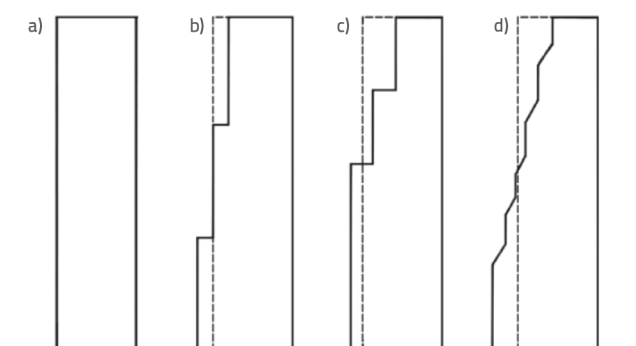
Soudipour [38] u svojem je diplomskom radu pokušao istražiti arhitekturu mezopotamskih hramova od Ubaida do starobabilonskog razdoblja. Iz rada se jasno vidi da su i graditelji najstarijih gradova bili svjesni upornjaka kao konstrukcijskog elementa te su ga primjenjivali u svojim građevinama.

Ochsendorf i De Lorenzis [39], uzimajući u obzir različite čimbenike, poput klizanja, ograničene tlačne čvrstoće i naginjanja, istraživali su uvjete urušavanja pravokutnih zidanih upornjaka izloženih koncentriranom kosom opterećenju.

García i Meli [40] pokušali su utvrditi jesu li meksički graditelji samostanskih crkava u 16. stoljeću pri određivanju dimenzija strukturnih elemenata, posebice zidova i upornjaka, slijedili strukturna pravila navedena u građevnim raspravama iz tog razdoblja.

Huerta [2] je proveo detaljno istraživanje o sigurnosti zidanih upornjaka. Najprije je opisao razvoj oblikovanja upornjaka od 16. stoljeća nadalje, a potom je sažeo najsuvremenije primjere u analizi modernih zidanih upornjaka i raspravljao o procjenama njihove sigurnosti. U istraživanju je također ukratko ispitan učinak oblika upornjaka u smislu stabilnosti protiv prevrtanja. Analizirana su četiri upornjaka, jednakih visina i volumena, prikazanih na slici 9., te je navedeno da ako moment statičke stabilnosti pravokutnog potpornja (slika 9.a) iznosi 1, momenti statičke stabilnosti ostalih upornjaka iznose 1,71, 1,63 odnosno 2,18.

Uzimajući u obzir lom i moguće klizanje, De Lorenzis i sur. [41, 42] proveli su detaljnu analizu urušavanja trapeznih i stepenastih zidanih upornjaka. Dobili su i analitička i numerička rješenja. Štoviše, usporedili su relativnu učinkovitost različitih oblika upornjaka za određeni volumen.



Slika 9. Upornjaci koje je Huerta (2010.) [2] analizirao pri ispitivanju utjecaja oblika upornjaka na moment statičke stabilnosti

Makris i Alexakis [43] proveli su opsežno istraživanje o lomu zidanih pravokutnih upornjaka i tornjeva kada su bili izloženi ili koncentriranom nagnutom opterećenju na vrhu ili inercijskom opterećenju uslijed potresa. Utvrdili su da se, u svom graničnom stanju, tanki zidani upornjaci i tornjevi ruše rotirajući oko svog osnovnog kuta, a oni malo deblji mogu se smicati.

Quintas [44] je slijedeći koncepte klasične znanosti o čvrstoći, analizirao lebdeće upornjake kao zakrivljene lukove. U istraživanju se, nakon predstavljanja problema kao što su pasivni potisak, obrasci povlačenja i linije potiska u zakrivljenim lukovima, detaljno razmatralo o evoluciji lebdećih upornjaka u gotičkim katedralama.

Karimi i sur. [45], uz pomoć istraživanja u knjižnici i deskriptivne i analitičke metode istraživanja, istraživali su tipologiju i razvoj upornjaka u iranskoj arhitekturi. Jedan od glavnih rezultata istraživanja ta da su arhitekti tijekom vremena sve bolje shvaćali strukturnu važnost upornjaka i svjesnije primjenjivali ovaj element u svojim građevinama.

Alexakis i Makris [46], primjenjujući načelo stacionarne potencijalne energije, pokušali su identificirati donji zglobni mehanizam jednobrodnog bačvastog svoda oslonjenog na pravokutne upornjake kada je podvrgnut bočnom inercijskom opterećenju uz gravitacijsko opterećenje.

Kavanaugh i sur. [47] modeliranjem različitih elemenata, izradili su analizu slučaja na temu potpornih stupova katedrale u Amiensu kako bi potvrdili upotrebljivost grafičke analize potisne linije.

U svom radu o geometrijskim svojstvima crkava, javnih zgrada i kolonijalnih kuća otpornih na potres u Santiagu (Čile), Jorquera i sur. [48] ističu i postojanje upornjaka, uz neke druge značajke, u otpornosti ovih konstrukcija na potres.

U svojoj knjizi o statici povijesnih zidanih konstrukcija, Como [49] uzima u obzir i klasične i lebdeće upornjake. Kada se radi o klasičnim upornjacima, ispituje problematiku kose pukotine odvajanja pri prevrtanju te bočnu čvrstoću upornjaka. Lebdeći upornjaci uglavnom se spominju u odjeljku u kojem se raspravlja o gotičkim katedralama.

U svojem istraživanju mehanike lebdećih upornjaka u slučaju katedrale na Mallorci, Fuentes [50] prva se osvrnula na strukturno ponašanje lebdećih upornjaka u kontekstu granične

analize. Zatim je analizirala deformacije i pukotine lebdećih upornjaka u katedrali na Mallorci i proučavala neke od problema kao što su klizanja glave lebdećih upornjaka, te različita rješenja koja su za njih usvojena tijekom povijesti.

Vannucci i sur. [51] ispitali su otpornost gotičkih katedrala na vjetar na primjeru pariške Notre Dame. U istraživanju su razmatrali urušavanje cjelokupne katedrale, međutim, istodobno su utvrdili da bi djelomična, ali značajna lokalna oštećenja mogla nastati na različitim dijelovima katedrale, uključujući i njezine lebdeće upornjake.

Izol i sur. [52], primjenjujući numerički proračun i usvajajući metode ekvivalentne statičke analize, istražili su izvanravničku seizmičku otpornost visokih zidanih zidova s pravokutnim upornjacima.

U svojem diplomskom radu Marrs [53] je imala za cilj odrediti izvanravničku čvrstoću kamenih zidova s upornjacima kako bi doprinijela znanju dostupnom građevinarima koji rade na kamenim zgradama. To je postigla pregledom niza povijesnih crkava u Ottawi u Kanadi, analizirajući povijesne reference i pregledom literature o relevantnim modernim istraživanjima. Jedan od glavnih zaključaka istraživanja je taj da povijesna metoda procjene čvrstoće zidova i upornjaka prevrtanjem krutog tijela znatno precjenjuje čvrstoću ovih elemenata, posebice onih tanjih. Osim toga, dolazi do značajnog povećanja čvrstoće ako je upornjak potpuno povezan sa zidom.

Osim navedenih radova, primjećuje se da su upornjaci uvršteni u niz drugih članaka i konferencijskih radova o zidanim konstrukcijama. Elyamani i sur. [54], na primjer, pridaju veliku važnost upornjacima katedrale na Mallorci, uzimajući ih kao primjer u svom radu na procjeni seizmičke sigurnosti povijesnih struktura koristeći ažurirane numeričke modele. Još jedan primjer je rad Ortege i sur. [55]. Oni tradicionalnim tehnikama otpornosti na potres za vernakularnu arhitekturu posebno mjesto pridaju upornjacima u suprotstavljenim horizontalnim opterećenjima.

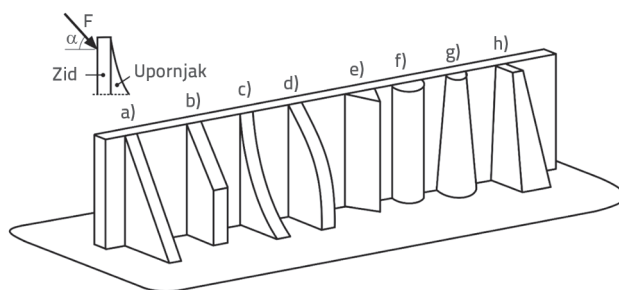
Neka od tih navedenih istraživanja odnose se na klasične upornjake, neka na lebdeće upornjake, a neka od njih su analize slučaja. Također, navedeni su neki radovi i knjige vezani uz tu temu. Sve su to uistinu vrijedna istraživanja. Međutim, kao što će se objasniti, postoji mnogo problema u vezi sa zidanim upornjacima koji se mogu istražiti.

4. Ostala istraživanja zidanih upornjaka koja se mogu provesti u budućnosti

U ovom poglavlju predstavljaju se neke nove ideje za buduća istraživanja zidanih upornjaka. To se uglavnom odnosi na klasične upornjake.

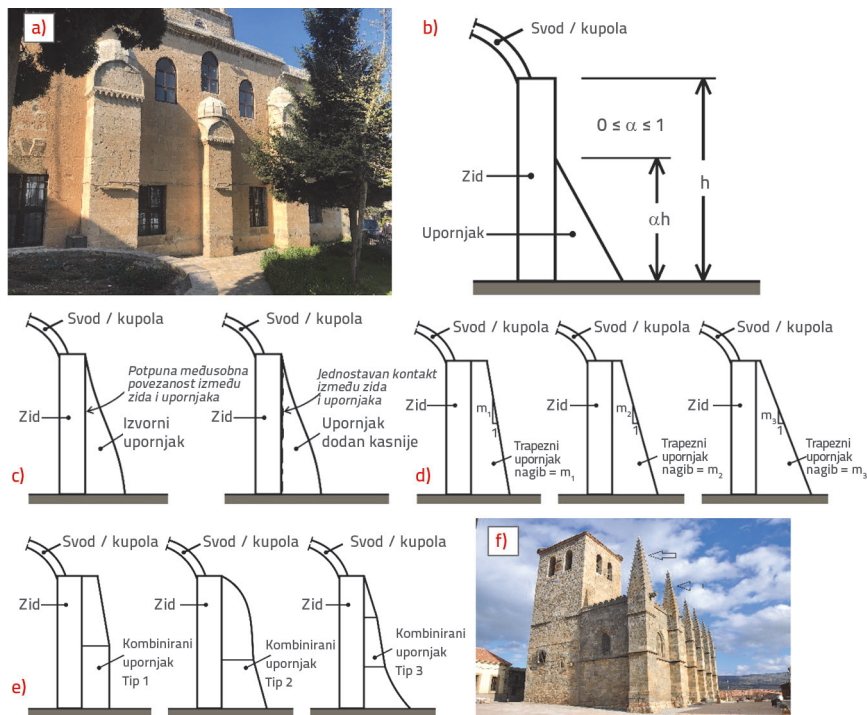
1) U prethodnim istraživanjima, oblici upornjaka analizirani pod koncentriranim kosim opterećenjem, koji predstavljaju opterećenje od svoda (ili luka), ograničeni su samo na pravokutne, trapezne i stepenaste oblike (Ochsendorf i sur. [36], Ochsendorf i De Lorenzis [39], De Lorenzis i sur. [41, 42]). Istina je da su ti upornjaci najčešći, ali kao što je

navedeno, postoje mnogi drugi oblici upornjaka u golemoj svjetskoj povijesnoj zidanoj arhitekturi. Naravno, nije moguće sve to uzeti u obzir. Međutim, među njima postoje vrste koje se ne mogu ne primijetiti. Neke od njih prikazane su na slici 10. Jednostavan model zidanog zida - upornjaka koji ima takve upornjake pojedinačno se može analizirati pod rastućim koncentriranim nagnutim opterećenjem, pa se tako može odrediti i učinkovitost svakog oblika upornjaka. Jasno je da, kako bi ovi izračuni imali smisla, volumeni upornjaka u analizi moraju biti konstantni. Osim toga, učinkovitost ovih oblika upornjaka na horizontalnu otpornost modela može se istražiti izvođenjem, na primjer, metodom postupnog guranja u okomitom smjeru na zidove jednostavnog nadsvođenog modela.



Slika 10. Uz pravokutne, trapezne i stepenaste upornjake, potrebno je razmotriti i sljedeće oblike upornjaka za analizu pod koncentriranim kosim opterećenjem: a) trokutni upornjak, b) kombinirani upornjak, c) zakrivljeni konkavni upornjak, d) zakrivljeni konveksni upornjak, e) upornjak u obliku trokutaste prizme, f) polucilindrični upornjak, g) krnji polukonusni upornjak i h) trapezni upornjak različite debljine

- 2) Spomenute dvije skupine istraživanja mogu se izvesti i održavajući dubinu baze upornjaka konstantnom.
- 3) U gotovo svakoj zemlji postoje mnoge povijesne zidane građevine koje imaju visoke zidove poduprte upornjacima i prekrivene svodovima ili kupolama. Mogu se provesti istraživanja o tim konstrukcijama, odnosno istraživanja specifična za konstrukciju. Doprinos upornjaka može se jasno odrediti izvođenjem statičkih proračuna i usporedbom trenutnog stanja (stanje s upornjacima) i stanja konstrukcije bez upornjaka. I naravno, na sličan način, učinci ovih elemenata na dinamičko ponašanje konstrukcije mogu se prepoznati izvođenjem dinamičke vremenske analize koristeći se zapisima o potresu koji su važni za regiju u kojoj se građevina nalazi. Na primjer, autori planiraju u bliskoj budućnosti obaviti navedena istraživanja na džamiji Melik Mahmut (Mardin, Turska), prikazanoj na slici 11.a. Na pročelju zgrade nalaze se tri pravokutna upornjaka, čiji su gornji dijelovi ukrašeni u obliku gotovo polukugle. Srednji upornjak je i po presjeku i po visini manji od bočnih. Ova je značajka zgrade posebno zanimljiva i čini je vrijednom istraživanja. Kao što se može primijetiti, u svijetu postoje brojni razlozi i mogućnosti istraživanja koja se mogu izvesti za tako konstrukcijsko specifične građevine.



Slika 11. Razna istraživanja koja se mogu provesti na zidanim upornjacima i zidanim konstrukcijama koje imaju upornjake: a) Primjer posebne povijesne zidane građevine s upornjacima (džamija Melik Mahmut, Mardin, Turska), (fotografija: autori); b) Istraživanje utjecaja relativne visine upornjaka u odnosu na zid na ponašanje konstrukcije; c) Istraživanje utjecaja izvornog upornjaka i kasnije dodanog upornjaka na ponašanje konstrukcije; d) Istraživanje utjecaja nagiba trapeznog upornjaka na ponašanje konstrukcije; e) Ispitivanje učinkovitosti različitih kombiniranih upornjaka; f) Primjer povijesne zidane građevine sa završecima na upornjacima: Crkva San Martin de Bonilla de la Sierra (Avila, Španjolska) [56]

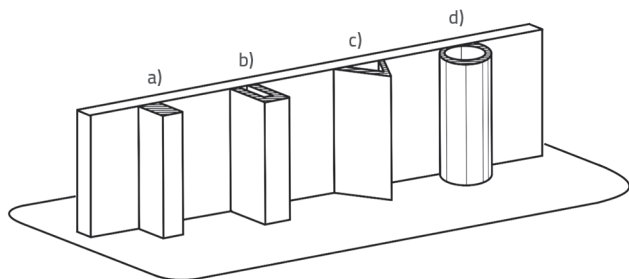
- 4) Kod nekih povijesnih zidanih građevina tradicionalni upornjaci iste su visine kao i zidovi, a kod nekih oni dolaze samo do određene visine zidova. Iz ovoga se može dalje istražiti na koji način visina upornjaka u odnosu na zid utječe na ponašanje građevine. Istraživanje se može provesti npr. na jednostavnom modelu zidane zgrade. Mogu se uzeti u obzir različiti oblici upornjaka. Za odabrani oblik upornjaka kao što je pravokutnik ili trokut, uz konstantnost dubine i debljine, mijenja se visina i provode se analize. Na slici 11.b prikazana je jedna strana shematskog modela koji ima trokutne upornjake. Tako se može odrediti učinak visine upornjaka na rezultate. Naravno, ispitivanja se mogu provesti i za statičke i za dinamičke uvjete.
- 5) Kod većine povijesnih zidanih zgrada, upornjaci su bili izvorni, međutim u nekim su zgradama barem neki od upornjaka dodani kasnije. Potaknuti time, može se istražiti učinak savršenog (slučaj izvornog upornjaka) i slabog (slučaj kasnije dodanog upornjaka) stanja veze između zida i upornjaka na ponašanje građevine. Istraživanje se može provesti na jednostavnom modelu zidane zgrade za oblik upornjaka, a njegove dimenzije potrebno je odabrati.

Na slici 11.c prikazana je jedna strana shematskog modela. U slučaju naknadno dodanog upornjaka, može se smatrati da postoji samo jednostavan kontakt između zida i upornjaka. Može se provesti statička analiza, tj. analiza isključivo pod vlastitom težinom modela, te, na primjer, nelinearna statička analiza u smjeru okomitom na ravninu zida. Tako se može otkriti učinak stanja spoja između zida i upornjaka na ponašanje konstrukcije. Osim toga, izračuni i usporedbe koje treba napraviti za stanje modela bez dodanih upornjaka i s njima otkrit će razinu potpore koju pruža konstrukcija nakon dodavanja upornjaka.

- 6) Kao što je navedeno, trapezni upornjak jedan je od najčešćih u povijesnim zidanim građevinama. Jasno je da se za konstantnu vrijednost volumena mogu dobiti brojni trapezni upornjaci iste debljine, ali s različitim nagibima. Uzimajući u obzir ovu činjenicu, na jednostavnom modelu zidane zgrade, uzimajući u obzir trapezne upornjake jednakih volumena i debljina, ali različitih nagiba, može se odrediti učinak nagiba upornjaka na ponašanje zgrade (slika 11.d). Nakon toga, proučavat će se i pravokutni i trokutni upornjaci, koji su granična stanja trapeznog upornjaka.

- 7) Već je navedeno da su kombinirani upornjaci među najčešćim u povijesnim zidanim građevinama. Osmišljavanjem različitih oblika kombiniranih upornjaka jednakog volumena i debljine, učinak kombinacije upornjaka na ponašanje konstrukcije može se proučavati na jednostavnom modelu zidane konstrukcije. Na slici 11.e prikazane su neke vrste kombiniranih upornjaka.
- 8) Može se primijetiti da neke povijesne zidane konstrukcije imaju završetke na tradicionalnim zidnim upornjacima. To se vidi na primjeru crkve San Martin de Bonilla de la Sierra (Avila, Španjolska) na slici 11.f. Neosporno je da završeci poboljšavaju estetiku građevine. Budući da ovi tornjevi dodatno opterećuju upornjake, oni će također utjecati na strukturno ponašanje građevine. Ovaj se učinak može proučavati na jednostavnom modelu zidane zgrade s upornjacima, uzimajući u obzir različite težine završetaka na upornjacima. Može se provesti i statička i dinamička analiza. Utjecaj završetaka na upornjacima stupova koji podupiru lebdeće upornjake na ponašanje konstrukcije već je istražen. Vidjeti, na primjer, Kavanaugh i sur. [47].
- 9) Iako malobrojne, neke povijesne građevine imaju upornjake u obliku kule. Ova vrsta upornjaka također se može ispitati. Za međusobnu usporedbu, razmotrite normalan pravokutni

upornjak i nekoliko upornjaka u obliku kule jednakog volumena (slika 12.). Statički izračuni koji će se izvesti, primjerice, na modelu nasvođene zidane zgrade otkrit će kako ovi upornjaci utječu na statičko ponašanje konstrukcije. Ako se izvedu, metoda postupnog guranja pokazat će učinkovitost upornjaka na horizontalni kapacitet konstrukcije.



Slika 12. Pravokutni upornjak i različiti upornjaci u obliku kule jednakog volumena

10) Kao što smo primijetili, deblo većine stabala oblikuje usjek koji je s površinom tla pod ostrim kutom. No kod nekih je stabala to mjesto, osobito privjetrinska strana, premošteno izraženim korijenskim izdankom (upornjakom), a oštar je kut ublažen. Primjer takvog stabla prikazan je na slici 13.a. Nadahnuti oblikom potpornog korijenja takvog drveća, Mattheck i sur. [57] predložili su metodu vlačnih trokuta, prikazanu na slici 13.b, za ublažavanje pukotina u različitim tehničkim komponentama. Općenito, potporno korijenje drveća funkcionira kao zatezna užad. Unatoč tome, u pogledu naše teme, njihovi se oblici čine vrijednima razmatranja pri određivanju najprikladnijih oblika upornjaka u različitim strukturama kao što su zidane zgrade, brane i potporni zidovi.



Slika 13. a) Stablo s potpornim korijenjem [58], b) Metoda vlačnih trokuta koju su, inspirirani potpornim korijenjem, razvili Mattheck i sur. [57] za ublažavanje pukotina u tehničkim komponentama

11) Postoji veliki nedostatak literature o eksperimentalnom određivanju čvrstoće i ponašanja zidanih upornjaka i konstrukcija s upornjacima pod statičkim i dinamičkim opterećenjem. Stoga će istraživanja koje će se provesti na tu temu dati vrijedan doprinos. Osim toga, usporedba rezultata teorijskih istraživanja s eksperimentalnim rezultatima omogućit će bolju interpretaciju dobivenih nalaza. Uzimajući

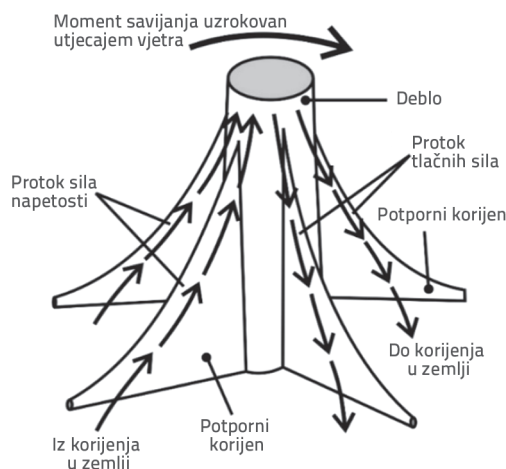
u obzir i prije navedene ideje, nepotrebno je reći da ovo eksperimentalno znanstveno područje ima širok potencijal za daljnja istraživanja.

12) Kada se radi o lebdećim upornjacima, može se detaljno proučiti učinak nagiba tih upornjaka na ponašanje konstrukcije. Štoviše, uzimajući u obzir lebdeći upornjak s određenim nagibom, vrijedi istražiti učinak primjene pojedinačnog opterećenja u sredini ili jednoliko raspodijeljenog opterećenja na ponašanje upornjaka. U većini povijesnih zidanih konstrukcija s velikim kupolama, te su kupole poduprte lebdećim upornjacima bočno na razini obruča (vidjeti sliku 8.d). Razina potpore koju oni pružaju kupoli može se odrediti pomoću statičke analize prisutnosti i odsutnosti tih upornjaka i usporedbom rezultata.

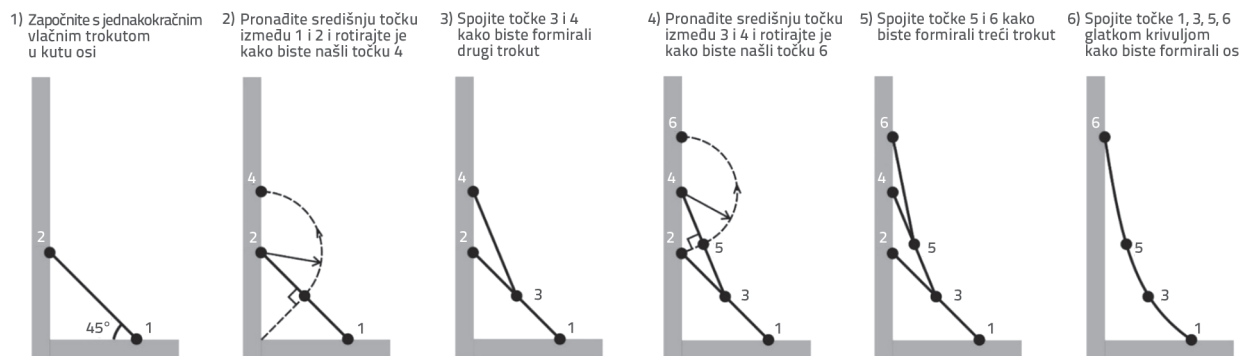
Sve predstavljene ideje odnose se na pitanja koja zasigurno treba istražiti.

5. Ispitivanje učinkovitosti upornjaka u obliku potpornog korijenja drveća u podupiranju zidane konstrukcije protiv bočnih seizmičkih sila

U ovom poglavlju jedna od predstavljenih ideja bit će uzeta u obzir i istraživanje će se provesti na temelju toga. Kao što je spomenuto, neka stabla imaju potporno korijenje. Kada puše vjetar, privjetrinsko potporno korijenje takvih stabala izloženo je napetosti, a ono s druge strane podložno je pritisku (slika 14.). Potporno korijenje učinkovito djeluje pri napetosti te djeluje kao zatezna užad. Naravno, na području gdje se stablo nalazi prevladava jedan smjer puhanja vjetra, ali vjetar ponekad puše i iz drugih smjerova. Također, dok se stablo njiše na povjetarcu, potporno korijenje je naizmjenično mnogo puta izloženo napetosti i pritisku. Stoga, potporno korijenje je neizbježno podvrgnuto i napetosti i pritisku.



Slika 14. Prikaz funkcije potpornog korijenja (Crtež se temelji na radu Crooka i sur. [59])



Slika 15. Metoda vlačnih trokuta autora Matthecka i sur. za oblikovanje glatkijeg usjeka pomoću 3 trokuta (Crtež se temelji na radu Abhyankar i sur. [63])

Tablica 1. Dimenzije razmatranih upornjaka (u m)

Oblik upornjaka	Visina, h	Dubina baze*, d	Debljina**, t
Pravokutan	11,10	2,20	1,35
Trokutni	11,10	4,40	1,35
Parabolični	11,10	6,60	1,35
U obliku potpornog korijenja	$2,35+2,84+5,91=11,10$	4,70	1,983

* Dimenzija okomita na zid, ** Dimenzija paralelna sa zidom.

Tablica 2. Svojstva materijala koja se primjenjuju u proračunima

Jedinična masa, γ [kN/m ³]	Modul elastičnosti, E [MPa]	Tlačna čvrstoća, f_c [MPa]	Vlačna čvrstoća, f_t [MPa]	Poissonov omjer, ν
23,37	11738	15,65	1	0,20

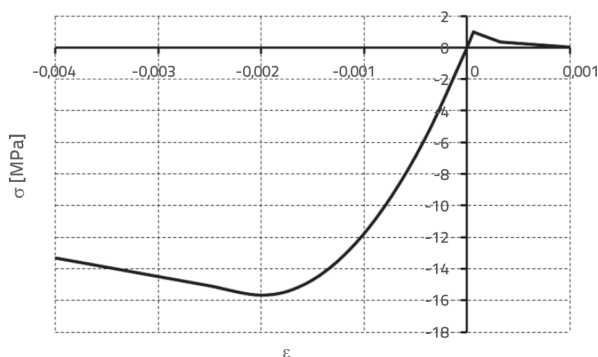
Potporno korijenje dugi niz godina privlači interes biologa i inženjera. Inženjeri, inspirirani ovom prirodnom formacijom, proveli su posebne studije optimizacije oblika u različitim tehničkim komponentama kao što su rešetke, usjeci itd. (Mattheck[60], Mattheck i sur.[57], Mattheck i sur.[61], Mattheck i sur. [62], Abhyankar i sur. [63], Yap i sur. [64], Yap i sur. [65], Feng i sur. [66]. U ovom će radu autori ispitati učinkovitost samo jednog oblika odabranog među mnogim oblicima potpornog korijenja drveća u bočnom podupiranju zidane konstrukcije. Odabrani oblik je idealizirani oblik potpornog korijenja u "metodi vlačnih trokuta (eng. *Tensile Triangles Method* - TTM)" koju su predložili Mattheck i sur. [57]. TTM, koja spada pod grafičke metode, razvijena je kao alat za oblikovanje koji oponaša prirodu (posebice drveće) za optimizaciju oblika različitih tehničkih komponenti u pogledu produženog trajanja i smanjene težine. Temelj metode prikazan je na slici 15.

Za analize su autori upotrijebili malo modificirani model građevine Šarapsa Han (konačišta) u Antaliji u Turskoj, povijesne kamene zidane zgrade, prikazane na slici 1.b. Toj se građevini dala prednost zbog njenog jednostavnog i pravilnog oblika. Međutim, njezin omjer visine i širine (razmjer proporcija), ne uključujući upornjake, iznosi približno 0,55. Dakle, radi se o širokoj, ali niskoj zgradi. Kao što je već poznato, smicanjem može doći do urušavanja ovakve konstrukcije pod utjecajem sve

većih horizontalnih opterećenja (Makris i Alexakis, [43]). Takav slučaj urušavanja nije bio uključen u opseg ovog istraživanja, a istražen je samo slučaj urušavanja savijanjem. U skladu s tim, izvorni model zgrade umjereno je izmijenjen, kako bi omjer visine i širine iznosio 1, bez upornjaka, a ostale značajke nisu promijenjene. Tako dobiveni model u daljnjem tekstu nazivat ćemo temeljni model.

Na temeljni model, osim upornjaka u obliku potpornog korijenja idealiziranog pomoću TTM-a, za usporedbu su posebno pripremljeni pravokutni, trokutni i konkavni upornjaci drugog reda u obliku parabole, te su izrađeni modeli izračuna. Kao što je prikazano u odjeljku 2, pravokutni upornjak najčešći je oblik upornjaka, a trokutni upornjak jedan je od češćih oblika. S druge strane, pri istraživanju, može se primijetiti da je krivulja konkavnog paraboličnog upornjaka vrlo dobro usklađena s vanjskom granicom mnogih potpornih korijenja drveća. Ova tri upornjaka su stoga uzeta u obzir u usporedbi koja će se napraviti. Geometrijska svojstva upornjaka čiji se volumen održava jednakim i iznosi 33 m³, prikazana su u tablici 1., a svojstva materijala korištenih u proračunima prikazana su u tablici 2. Grafički prikaz materijala prikazan je na slici 16. Svojstva materijala preuzeta su iz još neobjavljenog istraživanja istraživačkog tima u kojem sudjeluju prva dva autora ovog istraživanja. Ponovno su uzeli kamenu zidanu građevinu Šarapsa

Han kao model. U navedenom istraživanju vrijednosti prikazane u tablici 2. dobivene su uzimajući u obzir svojstva kamena i žbuke građevine te primjenjujući pristup makromodeliranja (homogenog materijala).



Slika 16. Jednoosni $\sigma - \varepsilon$ grafikon homogeniziranog zidanog materijala razmatrane konstrukcije

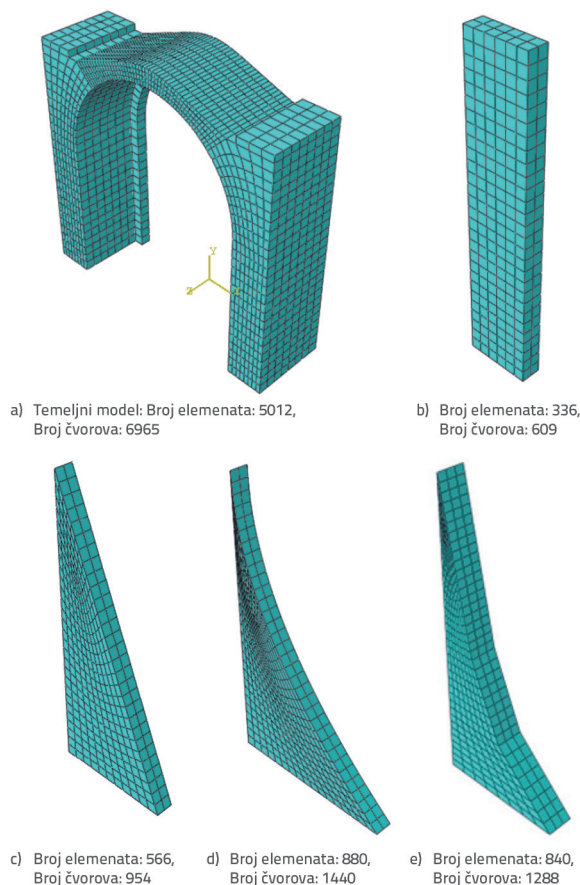
Metoda postupnog guranja, okomita na ravninu uzdužnih zidova zgrade (slika 17.), izvedena je na modelima koji imaju analizirane upornjake, te je ispitan utjecaj oblika upornjaka na poprečnu seizmičku otpornost. U izračunima je korišten program konačnih elemenata Abaqus [67]. Čvrsti C3D8R element korišten je pri formiranju mreže konačnih elemenata modela. Mreže, broj elemenata i čvorova polovice temeljnog modela i polovice svakog upornjaka prikazani su na slici 18. Potrebno je napomenuti da su konačne mreže formirane usavršavanjem početnih mreža, sve dok se nisu postigli stabilni rezultati.



Slika 17. Analizirana zgrada (Şarapsa Han, Antalya – Turska) i smjer metode postupnog guranja provedene na modelima zgrade, (fotografija: autori)

Kao što je već poznato, najpopularniji materijalni modeli za gotovo krhke materijale kao što su beton i zid su model razmazanih pukotina, model krhkih pukotina i model plastičnosti oštećenja betona (eng. *concrete damaged plasticity* - CDP). Model razmazanih pukotina može se preferirati samo u uvjetima monotonog opterećenja i u uvjetima niskog pritiska. Štoviše, taj je model osjetljiv na mrežu s obzirom na veličinu i oblik konačnih elemenata. Stoga je njegova primjenjivost ograničena. S druge strane, model krhkih pukotina može se koristiti u bilo kojem uvjetu opterećenja, ali model pretpostavlja linearno elastično

ponašanje materijala pri pritisku. Iz tog razloga model je pouzdan samo kada vlačni slom dominira ponašanjem krhkog materijala. Što se tiče CDP modela, to je napredniji model gotovo krhkog materijala ugrađen u Abaqus te može uzeti u obzir drobljenje pod pritiskom i pucanje pri napetosti, a može se koristiti za bilo koji uvjet opterećenja.



Slika 18. Mreže konačnih elemenata, broj elemenata i čvorova polovice temeljnog modela i polovice svakog razmatranog upornjaka: a) temeljni model, b) pravokutni upornjak, c) trokutni upornjak, d) konkavni parabolični upornjak, e) idealizirani upornjak u obliku potpornog korijenja, autora Mattheck i sur." [57] (Brojevi nisu u mjerilu)

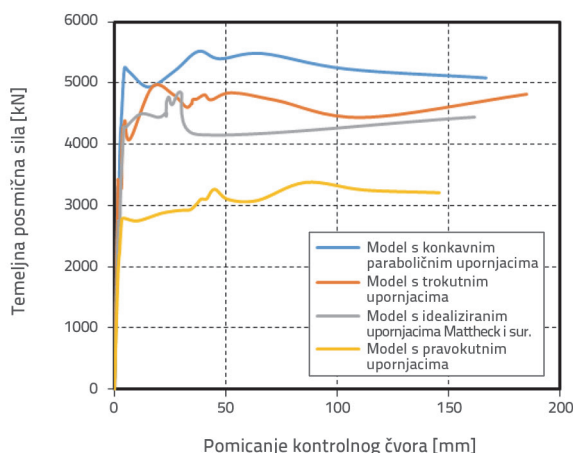
Postoje neprocjenjiva istraživanja o nelinearnoj analizi zidanih konstrukcija, koja su uspješno koristila CDP model (vidjeti, na primjer, Tiberti i sur. [68], te Valente i Milani [69]). Stoga smo također dali prednost i koristili CDP model u ovom istraživanju. Pri korištenju CDP modela, potrebni parametri za točnu simulaciju nelinearnog ponašanja su; kut dilatacije ψ , omjer početne dvoosne i početne jednoosne tlačne čvrstoće f_{bo}/f_{co} , ekscentričnost potencijala povlačenja ε , omjer druge konstante naprezanja na meridijanu napetosti i druge konstante naprezanja na meridijanu pritiska K_c i parametar viskoznosti μ koji se koriste u izračunima (tablica 3.). To su često korištene vrijednosti u analizi zidanih konstrukcija slične onoj u ovom

Tablica 3. Parametri oštećene plastičnosti korišteni u analizama

Kut dilatacije, ψ	f_{bo}/f_{co}	Ekscentričnost, ε	K_c	Parametar viskoznosti, μ
10°	1,16	0,1	0,667	0,002

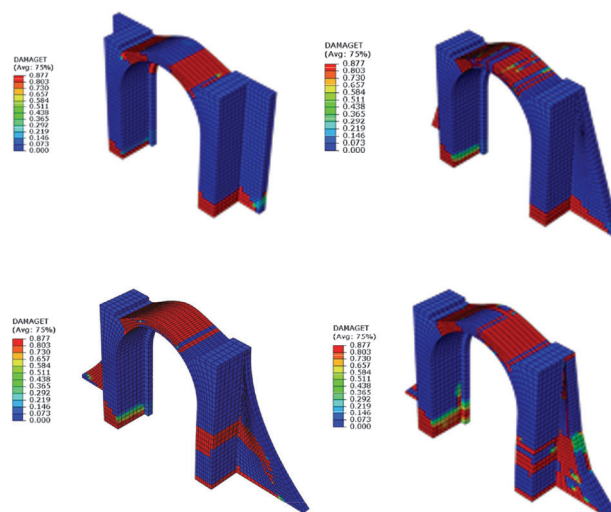
istraživanju pomoću programa Abaqus (vidjeti primjerice Valente i Milani [69]). Druga dva parametra oštećenja, d_t i d_c , izražavajući degradaciju modula elastičnosti na napetost i pritisak, određeni su pomoću $d = 1 - \sigma/f$ jednadžbe, koja je vrlo česta u literaturi. U ovom izrazu f je vršno naprezanje, a σ je naprezanje nakon vršnog naprezanja.

Metode postupnog guranja provedene su u dva koraka. U prvom koraku njihove su vlastite težine primijenjene na modele, a u drugom koraku na njih je postupno nametnut ravnomjerno primijenjen uzorak proporcionalnog opterećenja mase do prekoračenja maksimalnog bočnog otpora i nastanka mehanizma kvara. Za svaki model izrađena je krivulja kapaciteta, tj. krivulja temeljne posmične sile u odnosu na bočni pomak prethodno odabranog kontrolnog čvora. Središnji čvor na vrhu luka odabran je kao kontrolni.



Slika 19. Krivulje kapaciteta modela koji imaju različite oblike upornjaka

Krivulje kapaciteta dobivene nakon analiza za modele prikazane su na slici 19., a konture prikaza oštećenja u završnoj fazi analiza dani su na slici 20. Na slici 20. jasno je da su oštećenja u modelima koncentrirana u četiri regije tijekom faze urušavanja. S druge strane, na slici 19. vidljivo je da model s pravokutnim upornjacima ima najmanju seizmičku otpornost, a model s konkavnim parabolničnim upornjacima ima najveću otpornost. Iako model s trokutnim upornjacima ima nešto veću otpornost, modeli s trokutnim i idealiziranim upornjacima u obliku potpornog korijenja daju maksimalnu seizmičku otpornost blizu jedan drugome. Dakle, analiza je pokazala da idealizirani upornjak u obliku potpornog korijenja nema nikakvu nadmoć nad trokutnim upornjakom, koji je tradicionalan i često ga se susreće na povijesnim zidanim građevinama. Međutim, konkavni parabolni upornjak, za koji je uočeno da dobro predstavlja zakrivljenu geometriju potpornog korijenja barem nekih stabala, jasno se razlikuje od ostalih upornjaka u smislu seizmičke otpornosti koju pruža strukturi.

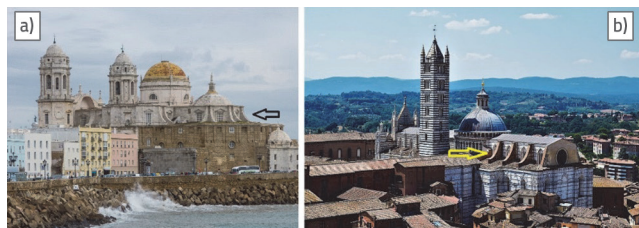


Slika 20. Za modele, konturni prikazi oštećenja u završnim fazama analize: a) model s pravokutnim upornjacima, b) model s trokutnim upornjacima, c) model s konkavnim parabolničnim upornjacima, d) model s idealiziranim upornjacima u obliku potpornog korijenja drveća, autora Matthecka i sur. [57]

Na tablici 1. primjećuje se da konkavni parabolni upornjak ima najveću dubinu baze među četiri vrste upornjaka, a može se reći da je ovo primarni faktor u njegovoj sposobnosti da pruži najveći otpor strukturi. Kod nekih stabala s potpornim korijenjem, to je korijenje dugačko. Stoga se podrazumijeva da stabla s velikom međusobnom udaljenosti potpornog korijenja i ona s manjom udaljenosti treba ispitati odvojeno. Treba imati na umu da različiti oblici potpornog korijenja mogu biti učinkovitiji za različite tehničke primjene. Dakle, dok potporno korijenje s kratkom baznom udaljenosti može biti prikladno za neke primjene, potporno korijenje s velikom baznom udaljenosti može biti prikladno za druge. Provedene jednostavne analize pokazale su da je, na primjer, konkavni parabolni upornjak inspiriran potpornim korijenjem s dužim baznim razmakom, umjesto idealiziranog modela potpornog korijenja s kraćim baznim razmakom Matthecka i sur. [57], učinkovitiji za inženjerske konstrukcije koje imaju upornjake, barem pod određenim opterećenjima i uvjetima.

Pogledom na povijesnu zidanu arhitekturu može se primijetiti da su se također koristili upornjaci slični konkavnim parabolničnim upornjacima, to jest, jednim od upornjaka koje smo ispitali. Primjer je prikazan na slici 5.a, a još dva primjera prikazana su na slici 21. Konkavni zakrivljeni upornjaci koriste se i u našoj modernoj arhitekturi. Na slici 22. prikazana su dva primjera. Može se primijetiti da upornjaci ovog oblika ne samo da podupiru strukture, već im dodaju i notu elegancije.

Pitanje razvijanja oblika nadahnutog prirodom koji će se koristiti u tehničkim primjenama svakako je tema koja zahtijeva mnogo više istraživanja. Štoviše, jasno je da se ta istraživanja trebaju provoditi odvojeno za različite tipove konstrukcija kao što su armiranobetonske višekratnice, potporne brane i betonski potporni zidovi s upornjacima. Dobro je poznato da se sigurnosni zahtjevi, opterećenja i ograničenja razlikuju ovisno o vrsti konstrukcije.



Slika 21. Dvije povijesne zidane strukture s konkavnim zakrivljenim upornjacima: a) Katedrala u Cadizu, (Španjolska), [70]; b) Katedrala u Sieni, (Italija), [71]



Slika 22. Dvije moderne zgrade s konkavnim zakrivljenim upornjacima: a) Kondominiji Sea Monarch, Pompano Beach, Florida, [72]; b) Stambena zgrada u Torontu, Kanada (Building Blocks Magazine) [73]

6. Zaključak

Upornjaci su vrlo važan element za sigurnost povijesnih zidanih građevina kako od vlastite težine tako i od horizontalnih opterećenja. Činjenica da većina povijesnih građevina, od kojih su neke vrlo drevne, a koje danas poznajemo, ima upornjake, jedan je od dokaza. Ovo je istraživanje prvo pokazalo nevjerovatnu raznolikost upornjaka u svjetskoj povijesnoj zidanoj arhitekturi, a otkriveno je da se ta raznolikost proteže od jednostavnih, ali najčešće korištenih pravokutnih upornjaka, do upornjaka u obliku puževe kućice. Zatim su predstavljena prethodna istraživanja o klasičnim i lebdećim upornjacima. Uvidjelo se da su pravokutni, trapezni i stepenasti upornjaci dobro statički istraženi pod kosim opterećenjem koje djeluje blizu njihovih vrhova. Također je utvrđeno da postoji mnogo radova na temu lebdećih upornjaka. Istraživanje je također ponudilo mnoge ideje za buduće radove na temu zidanih upornjaka. Ove su ideje pokazale da postoje mnoga istraživanja koja se mogu izvesti u pogledu zidanih upornjaka. Zbog ove mogućnosti, istraživanje je izvor inspiracije za istraživače koji će u budućnosti obrađivati ovu temu. Kao posljednja i glavna stavka istraživanja, nadahnuta prirodom, učinkovitost idealiziranog oblika potpornog korijenja stabala s potpornim korijenjem, istražena je u pogledu podupiranja zidane konstrukcije protiv seizmičkih sila u poprečnom smjeru. Uočeno je da konkavni parabolični upornjak, koji bolje predstavlja oblik potpornog korijenja određenih stabala, daje primjetno veću seizmičku otpornost od idealiziranog upornjaka u obliku korijenja koji je dostupan u literaturi.

Istraživanje je također pokazalo da možemo crpiti inspiraciju iz prirode dok razvijamo oblike upornjaka za naše građevine, ali to vrijedi i za mnoge druge teme. Ne treba zaboraviti da nas, u tom pogledu, ne samo drveće, nego i bezbroj drugih inspirativnih elemenata u prirodi, poput oblika obronaka planine, oblika brane koju je sagradila vidra ili oblika životinjskog kopita, može u tome inspirirati.

LITERATURA

- [1] Smith, T.R.: Architecture: Gothic and Renaissance, R. Clay. Sons. and Taylor, London, 1880.
- [2] Huerta, S.: The safety of masonry buttresses, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering History and Heritage, 163 (2010) 1, pp. 3–24.
- [3] Kuban, D.: Ottoman Architecture, Second Edition, YEM Publications, İstanbul, 2016. (in Turkish).
- [4] The Cathedral of Sovana, <http://www.medioevo.org/artemedievale/Pages/Toscana/Sovana.html>, Accessed 26 December 2019.
- [5] Friday Mosque of Eziran, <https://archnet.org/sites/5434>, Accessed 28 April 2021.
- [6] King's College Chapel, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cambridge_King %27s_College_Chapel_2011_03.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cambridge_King%27s_College_Chapel_2011_03.jpg), Accessed 25 March 2021.
- [7] Basilica of the Assumption of Our Lady, http://www.historygrandrapids.org/imgs/1406/full/winter_basilica_4.jpg, Accessed 25 December 2019.
- [8] Malatya Grand Mosque, https://archnet.org/sites/2057/media_contents/43054, Accessed 28 April 2021.
- [9] Paoay Church, <http://lexicalcrown.blogspot.com/2014/10/paoay-church.html>, Accessed 25 February 2020.
- [10] Cuetzalan del Progreso Church. <https://www.wallpaperflare.com/mexico-cuetzalan-del-progreso-mexico-church-iglesia-catedral-wallpaper-exqyu>, Accessed 18 December 2019.
- [11] Templo de Santo Domingo, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Iglesia_de_Santo_Domingo_vista_contrafuerte.jpg, Accessed 07 February 2020.
- [12] Zazadin Han. <http://konyalife.com.tr/haber/anadolunun-en-buyuk-hani-zazadin-han-2476.html>, Accessed 26. February 2020.

- [13] Tuzhisar Sultan Han. <https://artofwayfaring.com/destinations/sultanhani-kayseri/>, Accessed 28 February 2020.
- [14] Alaverdi monastery. <http://www.comtourist.com/travel/caucasus/photos-georgia/>, Accessed 28 February 2020.
- [15] Michelle, A.: *Architecture, Islam and Identity in West Africa: Lessons from Larabanga*, Routledge, Taylor & Francis, 2016.
- [16] Goodrich Castle. <https://letsgowiththechildren.co.uk/places-to-go/goodrich-castle/>, Accessed 28 February 2020.
- [17] Basilica of San Francesco Assisi, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Basilica_San_Francesco_Assisi_02.JPG, Accessed: 03 March 2020.
- [18] Corderie Royale, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Jardin_de_la_galisonniere.jpg, Accessed 11 November 2021.
- [19] Santa Maria della Salute. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Santa-Maria-della-Salute-20050525-012.jpg>, Accessed 27 March 2021.
- [20] Cartuja de Nuestra Señora de las Fuentes Monastery, https://es.wikipedia.org/wiki/Cartuja_de_Nuestra_Se%C3%B1ora_de_las_Fuentes, Accessed 06 January 2021.
- [21] San Francisco de Assisi Mission Church, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2014.08.04-Ranchos_de_Taos.NM_USA_-_San_Francisco_de_Assisi_Mission_Church_\(52\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2014.08.04-Ranchos_de_Taos.NM_USA_-_San_Francisco_de_Assisi_Mission_Church_(52).JPG), Accessed 27 March 2021.
- [22] Cathedral of Notre-Dame de Paris, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Notre-Dame_de_Paris_035.jpg, Accessed 13 March 2020.
- [23] Kılıç Ali Paşa Mosque, <http://www.istanbulhides.com/turkish-baths-in-istanbul-kilic-ali-pasha-hammam>, Date Accessed 17 March 2020.
- [24] Santa Rosa de Viterbo Church. <https://es.slideshare.net/Int13/estilo-barroco-queretaro>, Accessed 17 March 2020.
- [25] Aslanapa, O.: *Ottoman Era Architecture*, Inkilap Press, 2004. (in Turkish).
- [26] Ungewitter, G.G., Mohrmann, K.: *Lehrbuch der Gotischen Konstruktionen*, 3rd edition, 2 volumes, T. O. Weigel Nachfolger, Leipzig, 1890.
- [27] Milankovitch, M.: *Theorie der Druckkurven*, Zeitschrift für Mathematik und Physik, 55, 1907, pp. 1–27, (in German).
- [28] Sanabria, S.L.: *The Mechanization of Design in the 16th Century: The Structural Formulae of Rodrigo Gil de Hontañón*, Journal of the Society of Architectural Historians, 41 (1982) 4, pp. 281–293.
- [29] Clark, W.W., Mark, R.: *The First Flying Buttresses: A New Reconstruction of the Nave of Notre-Dame de Paris*, The Art Bulletin, 66 (1984) 1, pp. 47–65.
- [30] Huerta, S.: *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca. 1500-ca. 1800*, PhD thesis, Univ. Politécnica de Madrid, E.T.S. de Arquitectura, Madrid, Spain 1990, (in Spanish).
- [31] Huerta, S.: *Arcos, bóvedas y cúpulas: geometría y equilibrio en el cáculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Spain 2004, (in Spanish).
- [32] Yavuz, A.T.: *Defense and Sheltering in Space-Function Relationship in Anatolian Seljuk Caravanserais*, IX. Foundations Week Book, pp. 253–284, Publication of the General Directorate of Foundations, Ankara, 1992, (in Turkish).
- [33] Heyman, J.: *The Stone Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*, Cambridge University Press; Reprint edition, 1995, 160 pages.
- [34] Huerta, S.: *The Medieval ‘Scientia’ of Structures: The Rules of Rodrigo Gil de Hontañón, Omaggio a Edoardo Benvenuto*, University of Genoa, Italy, 1999.
- [35] Huerta, S.: *Technical Challenges in the Construction of Gothic Vaults: The Gothic Theory of Structural Design, Bautechnik Des Historismus: Von den Theorien über Gotische Konstruktionen bis zu den Baustellen des 19. Jahrhunderts / Construction Techniques in the Age of Historicism: From Theories on Gothic Structures to Building Sites in the 19th Century*, U. Hassler, C. Rauhut, S. Huerta (Eds.), Munich 2012, pp. 163–195.
- [36] Ochsendorf, J.A., Hernando, J.I., Huerta, S.: *Collapse of masonry buttresses*, Journal of Architectural Engineering, ASCE, 10 (2004) 3, 88–97.
- [37] Nikolinakou, M.K., Tallon, A.J., Ochsendorf, J.A.: *Structure and form of early Gothic flying buttresses*, Revue Européenne de Génie Civil, 9 (2005) 9–10, pp. 1191–1217.
- [38] Soudipour, A.H.: *An Architectural and Conceptual Analysis of Mesopotamian Temples from the Ubaid to the Old Babylonian Period*, Master of Arts Thesis, Department of Archaeology and History of Art, Bilkent University, Ankara, 123 pages, 2007.
- [39] Ochsendorf, J.A., De Lorenzis, L.: *Failure of rectangular masonry buttresses under concentrated loading*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 161 (2008) 5, 265–276.
- [40] García, N., Meli, R.: *On Structural Bases for Building the Mexican Convent Churches From the Sixteenth Century*, International Journal of Architectural Heritage, 3 (2009) 1, pp. 24–51.
- [41] De Lorenzis, L., Dimitri, R., Ochsendorf, J.A.: *Structural study of masonry buttresses: the trapezoidal form*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings 165 (2012a) 9, 483–498.
- [42] De Lorenzis, L., Dimitri, R., Ochsendorf, J.A.: *Structural study of masonry buttresses: the stepped form*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings 165 (2012b) 9, 499–521.
- [43] Makris, N., Alexakis, H.: *Limit equilibrium analysis of masonry buttresses and towers under lateral and gravity loads*, Archive of Applied Mechanics, 85, (2015), pp. 1915–1940.
- [44] Quintas, V.: *Structural analysis of flying buttresses*, European Journal of Environmental and Civil Engineering, DOI: 10.1080/19648189.2015.1131201, 2016, pp. 1–37.
- [45] Karimi, N., Abouei, R., Heydari, D.: *Typology and Developments in buttresses from the beginning to the historical era in Iranian architecture*, Bagh-e Nazar Journal, Journal of art, architecture and urban studies at NAZAR research center, 13 (2016) 40, pp. 55–68.
- [46] Alexakis, H., Makris, N.: *Hinging Mechanisms of masonry single-nave barrel vaults subjected to lateral and gravity loads*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001762.
- [47] Kavanaugh, C., Morris, I.M., Napolitano, R., Jorquera-Lucerga, J.J.: *Validating the Use of Graphical Thrust Line Analysis for Pier Buttresses: The Case Study of Amiens Cathedral*, International Journal of Architectural Heritage, 11 (2017) 6, pp. 859–870.
- [48] Jorquera, N., Vargas, J., Martínez, M., Cortez, D.: *Revealing Earthquake-Resistant Geometrical Features in Heritage Masonry Architecture in Santiago, Chile*, International Journal of Architectural Heritage, 11 (2017) 4, pp. 519–538, DOI: 10.1080/15583058.2016.1266414

- [49] Como, M.: *Statics of Historic Masonry Constructions*, Springer International Publishing, 3rd edition, 649 pages, 2017.
- [50] Fuentes, P.: Mechanics of flying buttresses: The case of the Cathedral of Mallorca, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 13 (2018) 5, pp. 617-630.
- [51] Vannuci, P., Filippo, M., Stefanou, I.: A nonlinear approach to the wind strength of Gothic Cathedrals: The case of Notre Dame of Paris, *Engineering Structures*, 183 (2019), pp. 860-873.
- [52] Izol, R., Gürel, M.A., Pekgökgöz, R.K., Avcil, F.: Out-of-plane seismic resistance of high masonry walls having rectangular buttresses (in Turkish), *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2019) 2, pp. 1007-1023.
- [53] Marrs, J.: *The History, Mechanics, and Strength of Stone Buttresses in Canada*, Dep. of Civil Eng., Masters of Applied Science, Carleton University, Canada, 2020, 212 pages.
- [54] Elyamani, A., Roca, P., Caselles, O., Clapes, J.: Seismic safety assessment of historical structures using updated numerical models: The case of Mallorca cathedral in Spain, *Engineering Failure Analysis*, 74 (2017), pp. 54-79.
- [55] Ortega, J., Vasconcelos, G., Rodrigues, H., Correia, M., Lourenço, P.B.: Traditional earthquake resistant techniques for vernacular architecture and local seismic cultures: A literature review, *Journal of Cultural Heritage*, 27, (2017), pp. 181-196.
- [56] San Martin de Bonilla de la Sierra, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bonilla_de_la_Sierra-Colegiata.jpg, Accessed 16 April 2021.
- [57] Mattheck, C., Kappel, R., Sauer, A.: Shape optimization the easy way: The 'Method of Tensile Triangles', *International Journal of Design & Nature*, 2 (2007) 4, pp. 301-309.
- [58] Tree having buttress roots, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:_mighty_buttress_root_\(15584839434\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:_mighty_buttress_root_(15584839434).jpg), Accessed 16 April 2021.
- [59] Crook, M.J., Ennos, R., Banks, J.R.: The function of buttress roots: a comparative study of the anchorage systems of buttressed (*Aglaia* and *Nephelium ramboutan* species) and non-buttressed (*Mallotus wrayi*) tropical trees, *Journal of Experimental Botany*, 48 (1997) 314, pp. 1703-1716.
- [60] Mattheck, C.: Teacher tree: The evolution of notch shape optimization from complex to simple, *Engineering Fracture Mechanics*, 73 (2006), pp. 1732-1742.
- [61] Mattheck, C., Kappel, R., Kraft, O.: Meaning of the 45°-angle in mechanical design according to nature, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, WIT Press, 114 (2018), pp. 139-146, doi:10.2495/DN080151.
- [62] Mattheck, C., Wissner, C., Tesari, I., Bethge, K.: Easing cracks with the Method of Tensile Triangles, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, WIT Press, 138 (2010), pp. 461-467, doi:10.2495/DN100411.
- [63] Abhyankar, A.A., Raut, V., Deshmukh, G.P.: Design Optimization and Manufacturing of shoulder fillet in Waveguide LR 260 Upper of Transmission System for Stress Concentration: Case Study in VTPL industry, Mumbai, *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 9 (2017) 3, pp. 1788-1803.
- [64] Yap, K.L., Parvez, A.M., Jaganathan, J., Elleithy, W., Lau, T.L.: Feasibility Study on Replicating Tree Design Structure in Trusses Subjected to Lateral Loading, *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (2018) 3.36, pp. 84-89.
- [65] Yap, K.L., Parvez, A.M., Jaganathan, J., Elleithy, W., Lau, T.L., Wai, Y.T.: Feasibility of Replication and Optimization of Nature's Design Shapes in Civil Engineering Structures to Enhance Performance and Efficiency: A review, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8, (2019) 653, pp. 79-86.
- [66] Feng, Z., Aung, T.L., Shao, C., Lu, F., Tsutsumi, S., Ma, N.: A design method of tensile triangles and low transformation temperature weld metal for reduction of stress concentration and residual stress of welded joints, *Marine Structures*, 72 (2020) 102759, pp. 1-20.
- [67] Abaqus, Theory manual, Version 6.14-5; 2014.
- [68] Tiberti, S., Acito, M., Milani, G.: Comprehensive FE numerical insight into Finale Emilia Castle behavior under 2012 Emilia Romagna seismic sequence: Damage causes and seismic vulnerability mitigation hypothesis. *Engineering Structures*, 117 (2016), pp. 397-421.
- [69] Valente, M., Milani, G.: Non-linear dynamic and static analyses on eight historical masonry towers in the North-East of Italy. *Engineering Structures*, 114 (2016), pp. 241-270.
- [70] Cathedral of Cadiz, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cathedral_de_Santa_Cruz_-_Cadiz,_Spain_-_panoramio.jpg, Accessed 09 May 2021.
- [71] Cathedral of Siena, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Duomo_di_Siena,_Piazza_del_Duomo,_8,_53100_Siena_SI,_Italie_1.jpg Accessed 09 May 2021.
- [72] Sea Monarch Condominiums, <https://buffaloah.com/a/DCTNRY/b/butt.html>, Accessed 08 June 2021.
- [73] 20 Prince Arthur – Canada's Most Iconic Rental Building, *Building Blocks Magazine*, Greater Toronto Apartment Association, 13 (2014) 2, [https://s3.amazonaws.com/lws_lift/greenwin/files/1416498248_BB_Vol_132_October2014_52_BB_LR_\(2\).pdf](https://s3.amazonaws.com/lws_lift/greenwin/files/1416498248_BB_Vol_132_October2014_52_BB_LR_(2).pdf)