

Velika kupola Florence - statika i intuicija u 15. stoljeću

Posvećeno Jürgenu Hoefeldu, u povodu šezdesete godine života

Udo Peil

Ključne riječi

*Firence,
katedrala St. Maria
del Fiore,
velika kupola,
ljuska,
Filippo Brunelleschi,
intuitivno rješenje*

Key words

*Florence,
cathedral of St. Mary of
the Flower,
big dome,
shell,
Filippo Brunelleschi,
intuitive solution*

Mots clés

*Florence,
cathédrale de Sainte-
Marie-de-la-Fleur,
grande coupole,
coque,
Filippo Brunelleschi,
solution intuitive*

Ключевые слова

*Флоренция,
кафедральный собор
Св. Марии дель Фиоры,
большой купол,
оболочка,
Филиппо Брунеллески,
интуитивное решение*

Schlüsselworte

*Florenz,
Dom von St. Maria del
Fiore,
grosse Kuppel,
Schale,
Filippo Brunelleschi,
intuitive Lösung*

U. Peil

Velika kupola Florence – statika i intuicija u 15. stoljeću

Posvećeno Dr.-Ing. Jürgenu Hoefeldu, u povodu šezdesete godine života

Velika kupola katedrale St. Maria del Fiore u Firenci pripada najznačajnijim kulturnim spomenicima svijeta. Skoro 100 m visoka kupola s promjerom od oko 42 m sagrađena je u potpunosti bez nosive skele prema idejama i pod vodstvom Filippa Brunelleschija početkom 15. stoljeća. Prikazane su povijesne aktivnosti koje su prethodile gradnji. Opisani su i objašnjeni statički i konstrukcijski problemi koje je Brunelleschi intuitivno ispravno riješio. Rad završava prikazom današnjih problema koji se javljaju zbog stoljećima postojećih pukotina, te opisuju razmatranja o mogućoj sanaciji.

U. Peil

From the journal Bautechnik

The large cupola in Florence – structural design and intuition in the 15th century

Consecrated to Dr. Jürgen Hoefeld, on the occasion of the sixtieth anniversary of his birth

The large dome (cupola) of St. Maria del Fiore at Florence is one of the most significant buildings of the cultural heritage of the world. The nearly 100 m high dome with a diameter of about 42 m was built without any scaffolding following the ideas and under the supervision of Filippo Brunelleschi at the beginning of the 15th century. The historical background is sketched and the problems of the design and static behaviour solved intuitively by Brunelleschi are explained. The paper ends with a description of the problems caused by major cracks and explains the considerations of a possible rehabilitation.

U. Peil

Du journal Bautechnik

Grande coupole de Florence - statique et intuition au 15^e siècle

Consacré à Jürgen Hoefeld, docteur ès sciences, à l'occasion de la soixante anniversaire de sa vie

La grande coupole de la cathédrale de Sainte-Marie-de-la-Fleur à Florence est incluse parmi les monuments culturels les plus importants au niveau mondial. La coque de la coupole de presque 100 m de hauteur, et d'environ 42 m de diamètre, a été bâtie sans aucune aide de l'échafaudage portante, selon les idées et sous la guidance de Filippo Brunelleschi au début du 15^e siècle. Les activités historiques qui se sont déroulées avant la construction sont présentées. Les problèmes statiques et structurels, résolus correctement par Brunelleschi à l'aide de seule intuition, sont décrits et expliqués. L'ouvrage termine par présentation des problèmes courants qui apparaissent à cause de fissures qui sont là depuis des siècles, et par quelques idées sur les possibilités de la remise en état.

У. Пейл

Из журнала Bautechnik

Большой купол Флоренции – статика и интуиция в 15-ом столетии

Посвящается Др.- Инж. Юргену Хёфелду, по поводу шестидесятилетия жизни

Описанный в работе большой купол кафедрального собора Св. Марии дель Фиоры во Флоренции принадлежит к одному из самых значительных памятников мировой культуры. Высотой почти в 100 м оболочка купола, диаметром около 42 м, выстроена полностью без строительных лесов по идеям и под руководством Филиппа Брунеллески в начале 15-ого столетия. Описаны исторические активности, предшествующие строительству. Описаны и объяснены статические и конструкционные проблемы, которые Брунеллески решил интуитивно. Работа заканчивается обзором сегодняшних проблем, возникающих, из-за столетий, существующих трещин, а также описываются рассуждения о возможной санации.

U. Peil

Aus der Zeitschrift Bautechnik

Die große Kuppel von Florenz – Statik und Intuition im 15. Jahrhundert

Herrn Dr.-Ing. Jürgen Hoefeld, Aachen, zur Vollendung des sechzigsten Lebensjahres gewidmet

Die große Kuppel des Doms von St. Maria del Fiore zu Florenz gehört zu den bedeutenden kulturellen Denkmälern der Welt. Die fast 100 m hohe Kuppelschale mit einem Durchmesser von cca 42 m wurde völlig ohne unterstützende Lehrgerüste nach den Ideen und unter der Leitung von Filippo Brunelleschi zu Beginn des 15. Jahrhunderts erbaut. Es wird der geschichtliche Hintergrund dargestellt, nach dem der Bau erfolgte. Die statischen und konstruktiven Probleme, die von Brunelleschi intuitiv richtig gelöst wurden, werden beschrieben und erläutert. Der Bericht schließt mit einer Darstellung der heutigen Probleme, die sich durch die seit Jahrhunderten vorhadenden Risse ergeben und schildert kurz die Überlegungen zur möglichen Sanierung.

Autor: Univ. Prof. Dr.-Ing. Udo Peil, Institut für Stahlbau, Technische Iniversität Braunschweig, Braunschweig

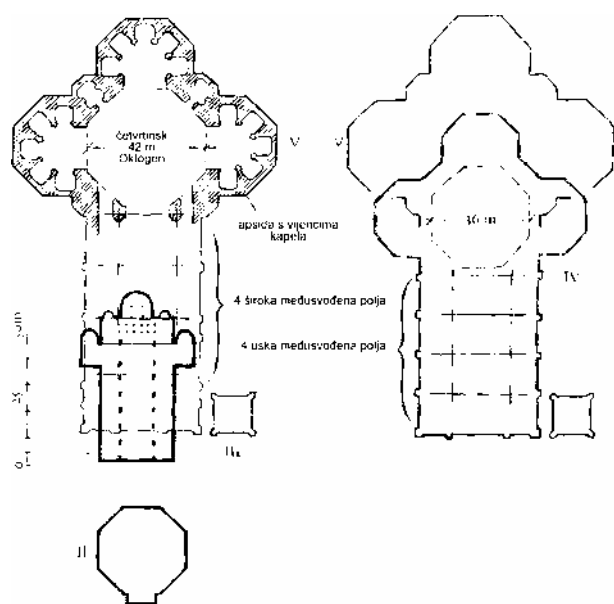
1 Prethodni projekti i odluka o gradnji

1.1 Prvi projekti

Velika kupola crkve St. Maria del Fiore dominira svojim jasnim k nebu usmjerenim oblikom nad gradskom panoramom Firence, bez obzira na to iz kojeg se smjera približavamo gradu (slika 1.). Ovaj još i danas prisutni dojam vjerojatno je bio vizija pri projektiranju kupole o kojoj nitko od sudionika nije znao kako i je li uopće moguće ostvariti taj projekt.



Slika 1. Panorama Firenze gledana s Piazzale Michelangelo



Slika 2. Usporedba projekata Arnolfa di Cambija s kasnijom izvedbom

Godine 1294., prema prvom projektu i pod vodstvom Arnolfa di Cambija, započela je gradnja nove katedrale jer je dotadašnja romanička katedrala St. Reparata, postala premala. Arnolfo di Cambio je Caputmagister, dakle s tehničke i oblikovne strane voditelj društva graditelja katedrale Opera del Duomo. On je u isto vrijeme u Firenci gradio i crkvu St. Croce i Palazzo Vecchio. Tijekom građenja srušena je gotovo cijela gradska četvrt oko buduće katedrale, a ulice su se spuštale na nižu kotu da bi se katedrali osigurala dostojna i uzvišena pojavnost [1], [2], [5]. To se doduše u tijeku stoljeća opet promijenilo.

Slika 2. prikazuje rekonstrukciju tlocrta projekta Arnolfa di Cambija zajedno s kasnije izvedenom građevinom i crkvom St. Reparata [2]. Katedrala u Firenci ima mjesta za približno 3000 vjernika. Ona je po veličini četvrta kršćanska crkva na svijetu, nakon bazilike Sv. Petra u Rimu, katedrale Sv. Pavla u Londonu i katedrale u Milanu.

Odgovornost za gradnju preuzeli su obrtnički cehovi grada. Godine 1331. imućni ceh trgovaca vunom (Arte della Lana) preuzeo je vođenje Operom del Duomo, ona je dakle svjetovna a ne crkvena institucija. Opera del Duomo postavila je 1334. slikara Giotto za Caputmagistera ili talijanski: capomaestra. Giotto međutim ne nastavlja gradnju katedrale, vjerojatno i zbog rasprava o budućem obliku koje su se u međuvremenu vodile, nego započinje gradnju Campanila koji je po njegovim nacrtima trebao biti visok 122 m. Od danas 84 m visokog Campanila do njegove je smrti dovršen samo najdonji kat.

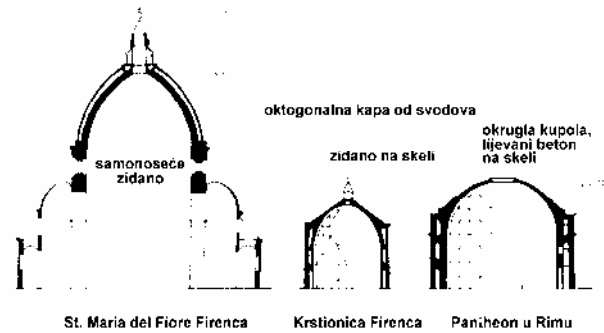
Godine 1346. prestaje najveći dio financiranja gradnje katedrale jer su financijeri, bankarske kuće Bardi i Peru-

zzi, pale u stečaj zbog nesolventnosti engleske kraljevske kuće, čemu je uzrok stogodišnji rat između Engleske i Francuske [1]. Sljedeća je godina još gora, u Firenci se pojavljuje kuga. U samo dvanaest mjeseci umrlo je četiri petine stanovništva. U tom se vremenu gradnja katedrale nastavlja, ali vrlo usporeno. To je vjerojatno povezano i sa svađom o oblikovanju katedrale do koje je došlo u to vrijeme.



Slika 3. Slika projekta katedrale A. di Bonaiuta

Uzrok tome je projekt capomaestra Giovannija di Lapo Ghinija, koji je podložan ukusu svog vremena: talijanskoj gotici s tankim zidovima, kontraforima i lukovima za podupiranje kupole, koji je i danas vidljiv kod katedrale u Milanu. Taj je projekt međutim naišao na mnogobrojne kritike, on je Firentincima previše povezan s ukusom tradicionalnih neprijatelja Firence - Milaneza, Nijemaca i Francuza, dakle Gota koji su pola Europe preplavili svojim graditeljskim stilom. Zbog toga Opera del Duomo izdaje jednoj nezavisnoj ekspertnoj grupi, koju vodi Neri di Fioravanti, nalog za izradu novoga projekta (u obliku modela). Njegov projekt više ne sadrži elemente gotike, a kupola se još jednom osjetno povećava. Ova se kontroverzija oko graditeljskog stila jasno vidi na jednoj slici A. di Bonaiuta (slika 3.) koja se nalazi u tzv. španjolskoj kapeli crkve St. Maria Novella u Firenci. Vidi se građevina s kontraforima uz crkveni brod, ali nema kontrafora kupole i tzv. tamboura, kasnijega podnožja kupole. Nerijev projekt iz 1367. ne sadrži nikakve tehničke upute za gradnju kupole kakva u toj veličini još nikada nije bila izgrađena. Nije postojala nikakva predodžba kako bi se to moglo izvesti. Usprkos tome, Opera del Duomo odlučila se za taj projekt, dapače odluku je potvrdila velika većina od 500 odabranih građana Firence. Takvo je glasovanje bilo do tada jedinstven postupak. Što je bila osnova te hrabrosti da se prihvati projekt protivan praktičnom razumu, projekt o kojem nitko nije znao može li se uopće ostvariti?



Slika 4. Usporedba veličina [2]

Ova problematika postaje jasna ako se pogledaju veličine i metode građenja do tada postojećih kupola. Krstionica neposredno ispred firentinske katedrale, kao i oko 1000 godina prije sagrađen Pantheon (hram svih bogova) sagrađeni su na skelama (slika 4.). Kako je poznato, taj je princip bio već u doba Rimljana odavno poznat, o čemu svjedoče mnoge značajne konstrukcije lukova iz tog doba.

Odgovor je vjerojatno u numeričkoj usklađenosti Nerijeva projekta koji je u potpunosti odgovarao srednjovjekovnoj mistici brojeva. Brojevi su za čovjeka srednjeg vijeka bili nešto bitno, bili su puni značenja i unutarnje snage. Na primjer broj 3 pripadao je Svetom Trojstvu, broj 4 četirima arkandjelima, četirima elementima, četirima stranama svijeta. 3×4 daje 12, a 12 na kvadrat je 144. Zidovi biblijskoga grada Jeruzalema bili su visoki 144 lakta (Apokalipsa po Ivanu 21,17). Povezati se s ispravnim brojevima značilo je ispravno se uklopiti u stvaranje, u svemir.

Da se u antici i srednjem vijeku polazi baš od četiriju elemenata može biti povezano s izuzetnim pridavanjem vrijednosti broju 4, što proizlazi iz činjenice da zbroj pojedinih sastavnih elemenata tog broja daje točno 10:

$$1 + 2 + 3 + 4 = 10$$

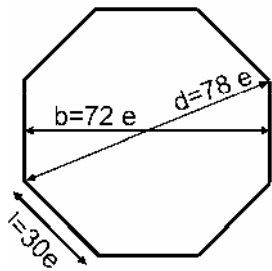
te da je zbroj vanjskih članova niza istovjetan zbroju unutarnjih:

$$1 + 4 = 5 = 2 + 3$$

Broj 10 također se smatrao brojem savršenosti, a kako su brojevi 1 do 4 vodili do te savršenosti zamišljalo se dijelove bilo čega kao grupe od četiri člana (četiri strane svijeta, četiri temperamenta, četiri doba života, četiri godišnja doba itd.).

Srednjovjekovni graditelji htjeli su (ili mogli) računati samo s cijelim brojevima (u prvom redu s parnim brojevima). Nerijev je projekt u najvećoj mjeri izrađen samo s cijelim brojevima: promjer je kupole 78 lakata, širina kupole 72 lakta, vanjska duljina segmenta 30 lakata, visina kupole kao i duljina crkvenog broda 144 lakta. Je-

dini mogući oktagon kod kojeg su promjer d i širina b parni brojevi jest ovaj projektirani (slika 5.).

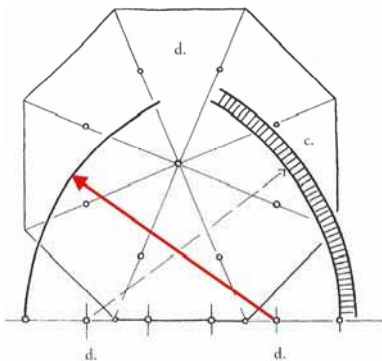


Slika 5. Dimenzije kupole

Projekt je prihvaćen s oduševljenjem, *Nerijev* je model postao predmet općeg divljenja. Svake su se godine capomaestri morali zakleti da će taj projekt egzaktno ostvariti. *Neri* je oblikovao kupolu s dvostrukom ljuskom, ali ne kao polukuglu nego strmije usmjereno prema nebu (slika 6.). Određivanje oblika pri tome slijedi konstrukciju gotičkih prozora koji se projektiraju prema tzv.



Slika 6. Kupola



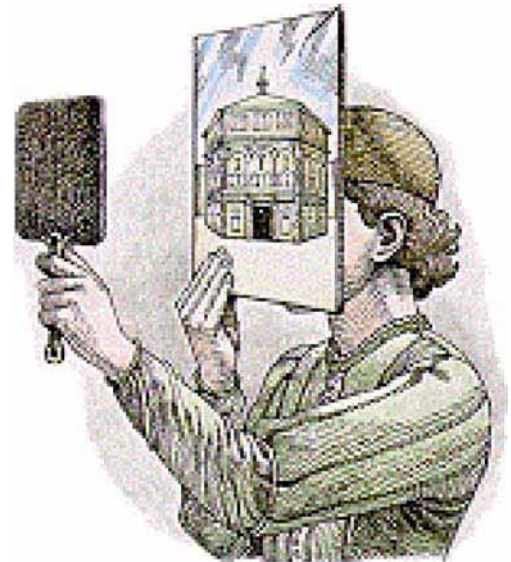
Slika 7. Projekt *Quinto acuto*

Quinto-acuto mjerilu: središte kružnice pomiče se za svaku polovicu luka u 4/5-sku točku baze (slika 7.). Time se istodobno smanjuju horizontalni potisci kupole.

1.2 Odluka o građenju kupole

Do tada međutim još uvijek nije bilo odgovora na pitanje kako bi kupolu trebalo sagraditi. Skela pri visini od gotovo 100 m nije dolazila u obzir, za nju bi trebalo dobiti oko 700 debelih stabala, što nije bilo ostvarivo. Pojavio se niz osebujnih prijedloga: jedan od njih bio je da se unutarnjost potpuno ispuni pijeskom tako da bi se kupola gradila na pješčanoj posteljici. U pijesak je trebalo umiješati srebrni novac, kako bi se građane Firence stimuliralo da pijesak besplatno iznesu van.

U toj se situaciji Opera del Duomo odlučila raspisati natječaj za gradnju kupole. Pobjednik je trebao dobiti 200 zlatnih fiorina, što je bila višegodišnja zarada dobro plaćenog obrtnika. Na natječaju je pobijedio dvadesetčetverogodišnji *Fillipo Brunelleschi*, izučeni zlatar, koji je Operu del Duomo uvjerio, između ostalog i uz pomoć jednog trika, tada prilično novim vjernim prikazom – središnjom perspektivom. Na slici 8. prikazan je taj princip: perspektivna slika (u ovom slučaju) krstionice promatra se kroz rupicu u ogledalu. Ako se na odgovarajućem mjestu stoji ispred krstionice i gleda s ogledalom i bez njega kroz rupicu čini se da su slika i stvarnost istovjetni.



Slika 8. Demonstracija promatranja perspektivne slike

U okviru navedenoga natječaja izrađivani su modeli, *Brunelleschi* je, primjerice izradio model u mjerilu 1:8 (!) po kojem se moglo hodati. Za izgradnju modela upotrijebljene su standardne opeke.

Brunelleschijeve ideje uvjerile su Operu del Duomo više nego ideje njegova dvadesetjednogodišnjega konkurenta

Lorenza Ghibertija, ljevača bronce, koji je na natječaju za brončana vrata krstionice pobijedio Brunelleschija. Iako je prihvaćen Brunelleschijev revolucionarni prijedlog da se kupola izgradi bez skele, Operu del Duomo je i dalje mučila velika sumnja. Zbog toga su Brunelleschiju za izvedbu kupole postavljeni inspektori, među njima i njegov konkurent, nešto oprezniji Lorenzo Ghiberti.

Izvanredna i široka nadarenost Brunelleschija već je rano uočena, pa mu je zbog toga otac omogućio naobrazbu u znanstvenim disciplinama. U kasnom srednjem vijeku to su bile tzv. Artes liberales - slobodne umjetnosti. Sastojale su se od dva dijela, a apsolviranjem osposobljavalo se za službu suca, bilježnika ili svećenika:

Trivium:

gramatika
retorika
(govorne umjetnosti)
dijalektika

Quadrivium:

aritmetika
geometrija
(matematičke umjetnosti)
glazba
astronomija

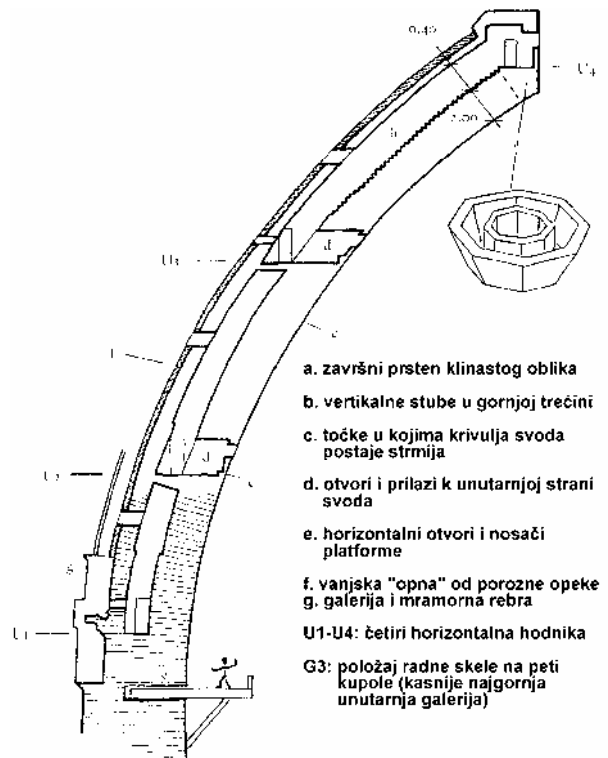
Brunelleschi je bio genijalan čovjek, izvanredno elokventan, "vir eloquentissimus", govorio je latinski kao svoj materinji jezik. Njegove su strasti bile geometrija, matematika i sve u svezi s mehanikom.

Kako je izgubio na spomenutom natječaju za vrata krstionice od svog vječitoga konkurenta Lorenza Ghibertija, Brunelleschi je krenuo na studijsko putovanje u Rim da kao samouk studira graditeljstvo. Pri tome je intenzivno analizirao sve velike građevine grada tako dugo dok ih nije potpuno razumio. To mu je dalo podlogu za kasniju smionu ideju građenja kupole u Firenci.

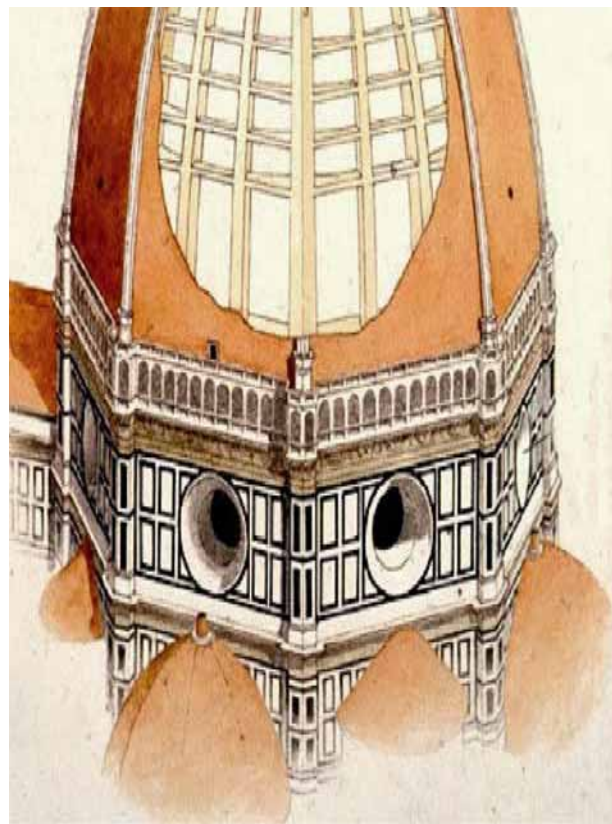
1.3 Projekt kupole

Brunelleschi se u projektu kupole strogo pridržavao natječajnoga projekta Nerija di Fioravantija. Kupola se sastoji od dvije zidane ljuske, unutarnja je nosiva a vanjska uglavnom namijenjena zaštiti od atmosferskih utjecaja. Između njih nalazi se uzlaz do visine lanterne (slika 9.). Osam uglova oktogona oblikovani su s osam glavnih rebara, od kojih svako stoji na jednome glavnom stupu (slika 10.). Šesnaest sekundarnih rebara oslanja se na tzv. tambour (zbog oblika nalik na bubanj) koji djeluje kao divovski punostijeni nosač i prenosi sile od sekundarnih rebara na glavne stupove. U tambouru se nalaze veliki okrugli prozori radi rasvjete.

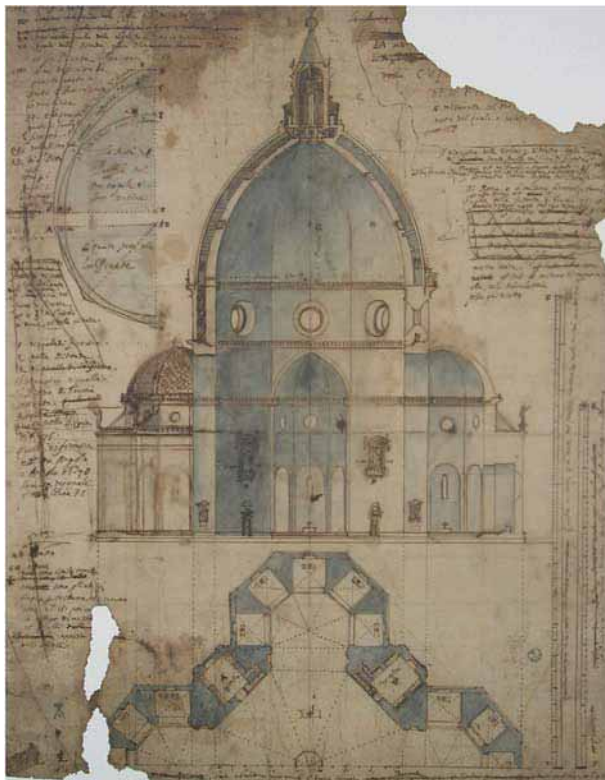
Na vrhu kupole nalazi se lanterna koja osigurava svjetlo i dovod zraka. Ispod tamboura razmještene su bočne kapele koje su trebale sudjelovati u prijenosu radijalnoga horizontalnog potiska kupole. Na slici 11. nalazi se jedan crtež iz projekta koji se može kupiti kao plakati u Museo del Opera di Duomo neposredno iza Duoma – posjet tom muzeju u Firenci je vrsta obveze.



Slika 9. Presjek polovice kupole [2]



Slika 10. Struktura kupole s djelomično otvorenom vanjskom ljuskom

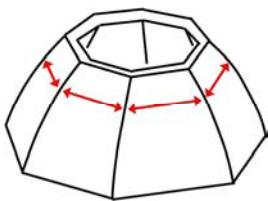


Slika 11. Crtež iz projekta

2 O statici građenja kupole

Brunelleschijeva ideja da se kupola kao samostalno nosiva gradi sloj po sloj počevši od tamboura, svakako mora počivati na nekom promišljanju. Za razumijevanje ponašanja glede nosivosti korisno je razlikovati ponašanje tijekom građenja od ponašanja u konačnom stanju kad je izvedena i lanterna [2].

- a) Tijekom građenja nosivost se postiže prostornim sustavom sila, kako je prikazano na slici 12. Slika 12. to dodatno pojašnjava, tlačne sile na slici 12. su tlačne sile u rukama grupe ljudi na slici 13.



Slika 12. Shema nosivog sustava u gradnji



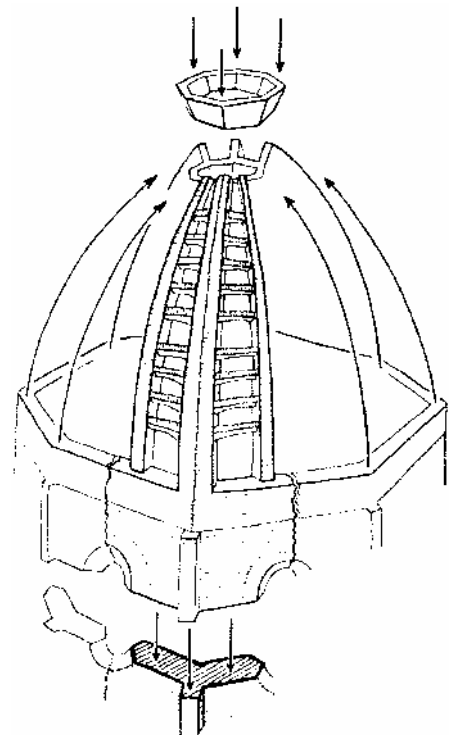
Slika 13. Simulacija nosivoga sustava

Poznato je da svaki svod i svaka kupola na svom donjem rubu proizvodi horizontalne tlačne sile koje donji dio građevine mora preuzeti jer, u protivnom kupola nije nosiva. Na slici 13. to je zorno prikazano. Horizontalna radijalna sila "ljudske kupole" koja

djeluje prema van prenosi se trenjem između noge i poda u tlo. Kad bi "gimnastičari" nosili koturaljke ne bi se horizontalna sila mogla prenijeti u tlo i "konstrukcija" bi se srušila.

Horizontalne sile javljaju se dakako i tijekom građenja i u konačnom stanju. U ranom projektu *Nerija di Fioravanti* prisutno je njegovo razmišljanje da se horizontalne sile prihvate vlačnom zategom u obliku zatvorenoga prstena od željeza ili drveta.

- b) U konačnom stanju s "nasađenom" lanternom dominira sustav rebraste kupole kod koje se opterećenje prenosi preko četiriju ukrštenih lukova na osam stupova (slika 14.). To se odnosi na stanje opterećenja koje se pojavljuje nakon zatvaranja svoda. Kako je kupola opterećena lanternom težine oko 500 tona, dolazi do kombinacije obaju sustava prijenosa sila.

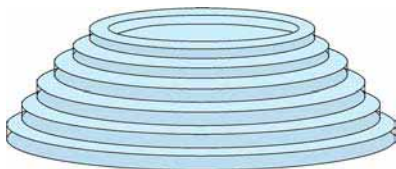


Slika 14. Nosivi sustav u konačnici

Zbog porasta nagiba kupole prema lanterni raste naprezanje u zidu kupole zbog vlastite težine okomito na njegovu ravninu. U slučaju položenijega nagiba moglo bi se zide urušiti prema unutra. Za prijenos sila okomito na zide bila bi idealna kružna kupola. Takve su kružne konstrukcije sposobne preuzeti radijalne tlačne sile (usporedimo kokoške jaje koje je tijekom procesa nesjenja izloženo velikim tlačnim silama). Na slici 15. prikazan je *Brunelleschi* pri demonstraciji pred Operom del Duomo, gdje na primjeru kokošnjega jajeta objašnjava nosivi sustav.

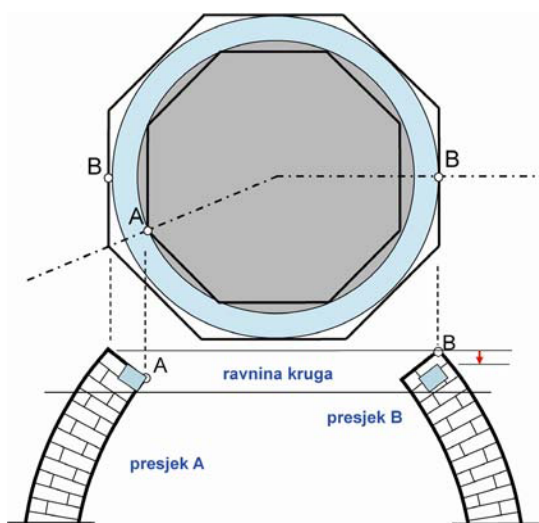


Slika 15. Brunelleschi na kokošjem jajetu pokazuje zašto se njegova kupola neće srušiti



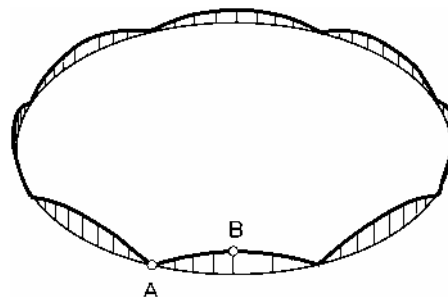
Slika 16. Zamišljeni nadomjestak kupole sustavom pojedinačnih prstena

Na tome se zasniva genijalna ideja *Brunelleschija* s kojom je taj graditelj bio daleko ispred svog vremena: ako se oktagon uspije oblikovati tako da se u njemu mogu u zidu formirati prsteni, koji leže jedan iznad drugoga (s promjerom koji opada s porastom visine), svaki će pojedini prsten sam u sebi preuzeti radijalne tlačne sile, nastaje samo tlačno opterećenje a ne i savijanje (opterećenje membrane), pa ne dolazi do urušavanja zida. Dijelovi zida koji leže izvan kružnoga luka za ovo razmatranje predstavljaju "mrtvo" gradivo koje ne sudjeluje u prijenosu opterećenja.



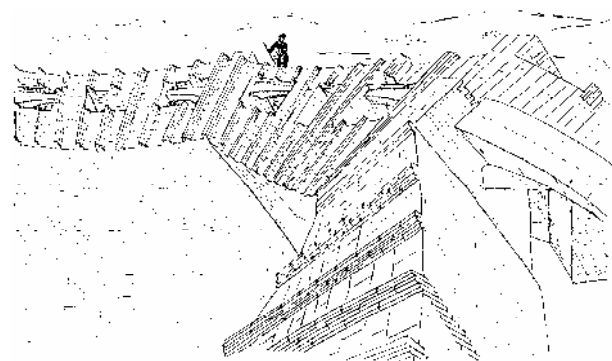
Slika 17. Položaj prstena u tlocrtu i presjeku

Pitanje je kako se takva prstenasta struktura može graditeljski ostvariti u zidu? Za odgovor treba baciti pogled na sliku 17. Potpuno u zidu zatvoreni kružni prsten prenosi tlačne poprečne sile zbog vlastite težine zida membranskim djelovanjem. Prsten s jedne strane dodiruje uglove unutarnjega oktogona, a s druge strane dira vanjski oktagon na sredinama stranica. To znači da prsten unutar zida nije svagdje u istoj poziciji.



Slika 18. Promjena kružnoga prstena pri zidanju u horizontalnoj ravnini

Pri uobičajenoj izvedbi zida kamen na kamen s ravnim bi se gornjim bočnim bridovima zamišljeni prsten kao girlanda podizao od kuta (točka A) do sredine stranice (točka B) (slika 18.), ali to više nije kružni prsten. Takav prsten više nije u stanju prenijeti poprečne sile samo membranskim silama. Da bi se prsten poravnao treba dakle zide između kutova poligona sniziti za razliku u visini (strelica na slici 17.). Nastala krivulja u obliku girlande uostalom odgovara i krivulji koja se pojavljuje na šesterokutnoj olovci pri šiljenju, gdje šesterokutni plašt olovke prelazi u stožac.



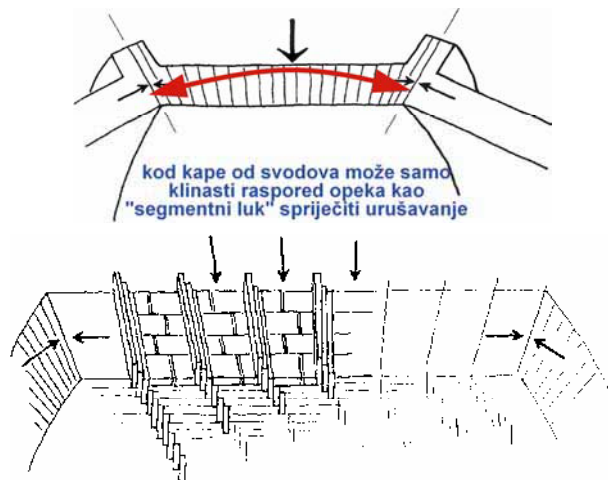
Slika 19. Kupola u fazi gradnje

Zide kupole je tako i izvedeno. Na slici 19. prikazana je crtačka rekonstrukcija kupole u stadiju gradnje. Može se raspoznati da je *Brunelleschi* zide zaista oblikovao tako da su dijelovi između kutova oktogona spušteni kao girlanda; efekt koji je prikazan na slici 18. na taj je način kompenziran. Da bi se navedeni povoljni nosivi efekt kružnoga prstena postigao i kod vanjske ljuske i horizontalnih rebara, *Brunelleschi* je predvidio oble vute

na horizontalnim rebrima u području kutova, tako da se i tamo oblikuje prsten. To se vidi na desnoj strani slike 19.

Da bi se *Brunelleschijeva* ideja mogla dostojno cijeniti treba uzeti u obzir da je nama danas općepoznata pojava membranskoga stanja gdje je to moguće - prema zakonu o minimumu energije - u njegovo vrijeme bila samo u domeni intuicije.

Daljnji problem pri gradnji pojavio se na dijelovima kupole bliže vrhu, gdje zbog povećanoga nagiba postoji opasnost da slojevi opeke kliznu po svježem mortu poradi vlastite težine. Da bi to spriječio, *Brunelleschi* je primijenio poseban oblik veza, uzorak "riblja kost". Nekoliko je opeka postavljeno vertikalno, a susjedne opet horizontalno (slika 20.).



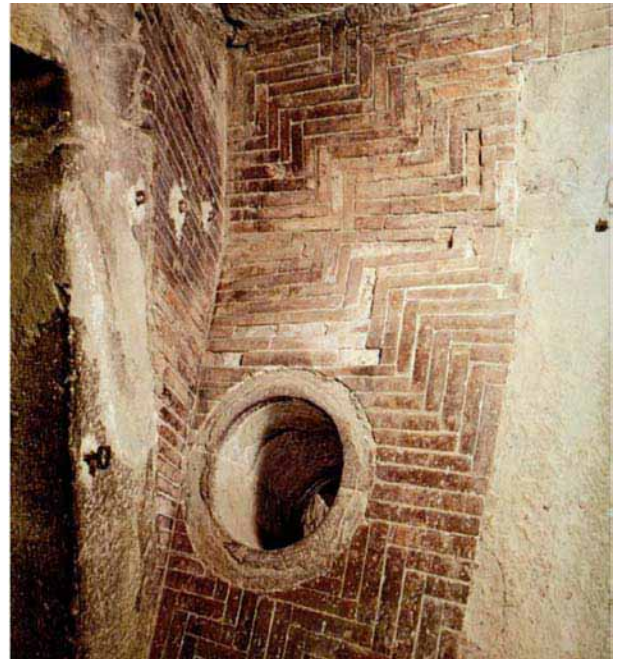
vez "riblja kost" strukturira svaki sloj klinasto; vertikalno postavljene opeke sprečavaju otkliznuće horizontalnih slojeva: zide postaje "samonosivo"

Slika 20. Povoljni oblik zida

Pri takvom se načinu zidanja može sloj opeke ukliniti među vertikalne opeke koje vire iz prethodno sazidanoga nižeg sloja pa tako ne može kliznuti. Ujedno je na taj

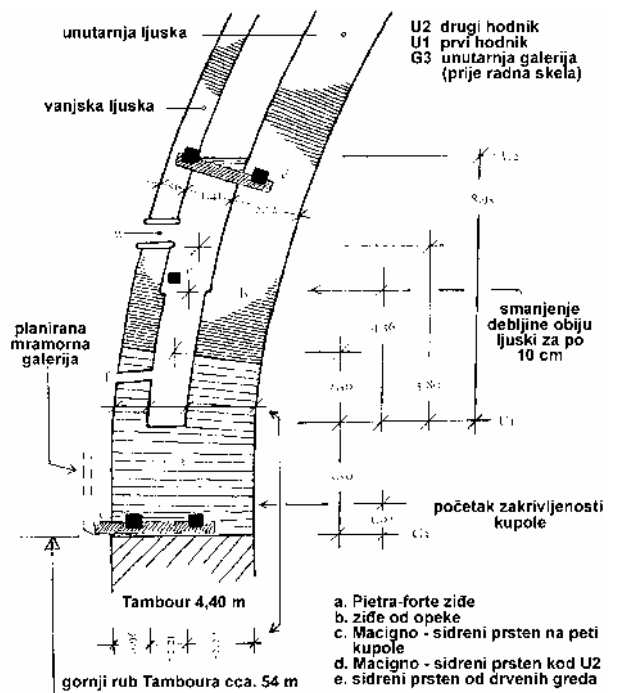


Slika 21. Zide nadvoja



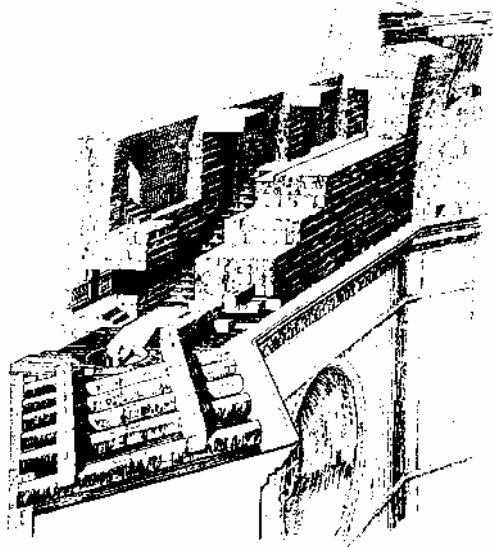
Slika 22. Zide u obliku riblja kosti

način u zidu omogućena pojava tlačnoga svoda, tako da ne dolazi do vlačnih naprezanja u sljubnicama ispunjenim mortom (slika 20.). Ovaj se način zidanja primjenjuje i danas kod nadvoja, riječ je o tzv. segmentnom nadvoju (slika 21.). Na slici 22. prikazan je pogled na vez zida "riblja kost". Jasno je da na slici 20. ucrtani tlačni luk predstavlja dio kružnoga tlačnog prstena koji je prikazan na slici 17.



Slika 23. Presjek kroz donji dio kupole

Zbog posebnosti projekta horizontalne su sile potiska kupole bile vrlo male, ali su usprkos tome potrebni kružni i nivočni prsteni. Čelični prsteni kakvi bi se danas ugradili tada nisu postojali. *Brunelleschi* je predvidio kamene zatege položene na pragove. Obje kamene zatege povezane su pocinčanim željeznim kukama (slike 23. i 24.).



Slika 24. Donji dvostruki sidreni prsten od kamena

Donja se zatega nalazi u peti kupole, a druga, slična zatega oko 13 m iznad prve. Krajevi pragova su danas vidljivi neposredno iznad tamboura (slika 26.).



Slika 25. Drveni sidreni prsten [5]

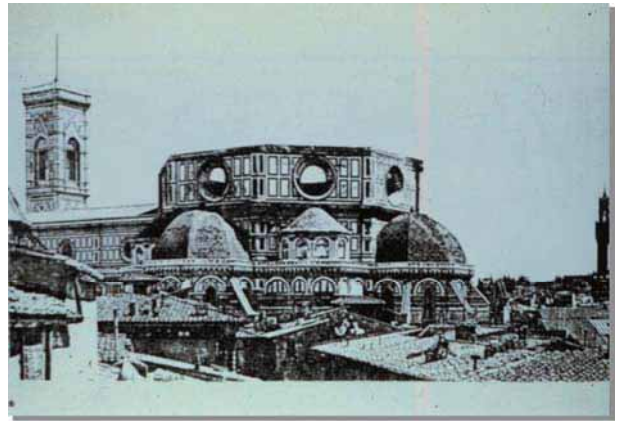


Slika 26. Vidljivi krajevi pragova između tamboura

Dodatno uz obje kamene zatege ugrađeni su i drveni prsteni, vidljivi u prostoru između vanjske i unutarnje ljuske kupole (slike 23. i 25.).

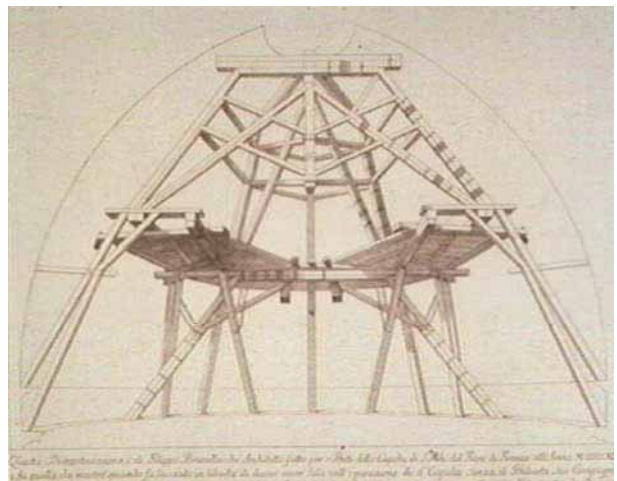
3 Građenje kupole

Godine 1420. dovršene su bočne kapelice, koje pripomažu prijenosu horizontalnoga potiska, i tambour koji raspodjeljuje opterećenje. Na slici 27. prikazana je rana snimka građevine.



Slika 27. Slika u ranoj fazi gradnje

Pri gradnji su bile potrebne samo lagane radne skele s unutarnje strane koje su usidrene na odgovarajuće predviđenim otvorima u zidu (slika 28.). One su služile i kao vizualna zaštita za zidare koji su na kraju radili na visini od gotovo 100 m, uz već vrlo jako nagnuti zid kupole.

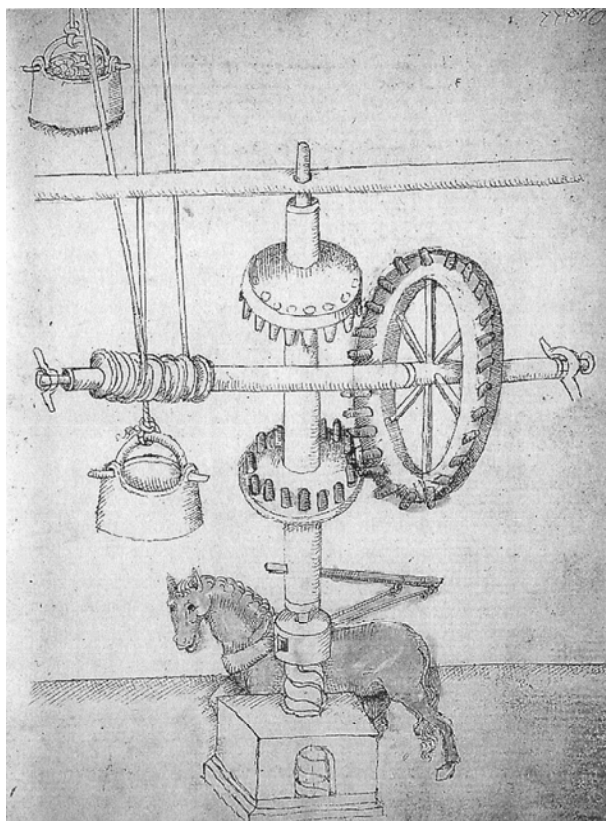


Slika 28. Radna skela i vizualna zaštita

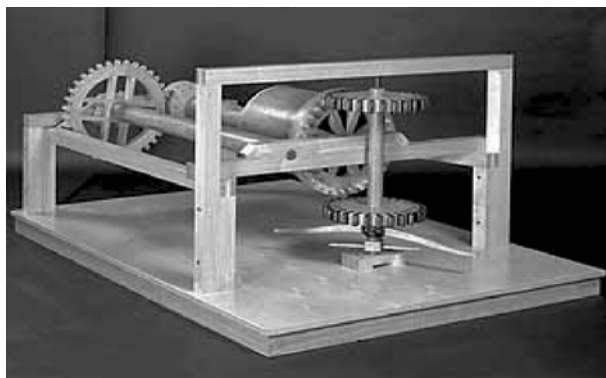
Svakog se tjedna izvodio po jedan sloj opeka. Ovo je vrijeme bilo potrebno da bi mort mogao vezati, kako ne bi došlo do klizanja pod težinom sljedećeg sloja. Navodno je *Brunelleschi* svaku pojedinu opeku vlastoručno pregledao. Mort se sastojao od vapna, pijeska i vode, dakle

nije primijenjen *pozzolano* mort starih Rimljana koji je u srednjem vijeku očito bio zaboravljen.

Za podizanje teških tereta *Brunelleschi* je projektirao i sagradio velike dizalice [1], [5]. Vrlo teški elementi dizali su se uz pomoć vitla koje su tjeroali konji ili volovi. Da se životinje ne bi morale svaki put pri dizanju i spuštanju uprezati i isprezati predviđen je mehanizam za promjenu smjera (slika 29.). To je pojašnjeno na modelu na slici 30.: vertikalna se osovina mehanizma može dizati i spuštati tako da u funkciju dolazi gornji ili donji zupčanik. Na taj se način mijenja smjer vrtnje iako se osovina uvijek okreće u istome smjeru.



Slika 29. Princip pogona dizala



Slika 30. Model pogona

U vršnom razdoblju građenja na katedrali je radilo više od 300 osoba, uključivši radnike u kamenolomu i kamenoklesare, od izlaza do zalaza sunca. Na kupoli su instalirane poljske kuhinje i zahodi, tako da je otpao dugotrajni silazak na tlo. Život je bio težak, plaćalo se samo ako se radilo, a nadnica je bila niska. Ako se radnik ozlijedio morao se sam za sebe pobrinuti. Broj nesretnih slučajeva bio je doduše neuobičajeno nizak. Zahvaljujući *Brunelleschijevim* mjerama opreza i zaštite, tijekom gradnje kupole dogodila su se svega tri smrtna slučaja.

4 Gradnja lanterne

Opera del Duomo je 1436. raspisala natječaj za projekt lanterne, taj zadatak nije *Brunelleschiju* povjeren izravnom pogodbom. To je, dakako, izazvalo njegovu veliku srdžbu, ali je iz natječaja izašao kao pobjednik. Njegov projekt slijedi poligonalni oblik kupole. Lanterna je raščlanjena na osam bočnih zidova orijentiranih u skladu s glavnim rebrima kupole (slika 31.). Prema mišljenju ocjenjivačkoga povjerenstva *Brunelleschijev* je projekt dao "najbolji oblik, najveću stabilnost i lakoću, najbolju rasvjetu i otpornost prema kiši". Lanterna visine oko 20 m sagrađena je od približno 500 t mramora i tim teretom zatvara kupolu uz efekt uklinjenja. Tako promijenjenim nosivim sustavom do sada je radijalno nosiva kupola transformirana u normalnu rebrastu kupolu.



Slika 31. Lanterna

Za gradnju lanterne trebalo je sagraditi novu dizalicu s velikim konzolnim krakom s vanjske strane kupole jer se teški blokovi mramora nisu mogli dizati u njezinoj unutrašnjosti.

Na Veliki petak, 15. travnja 1451. godine, još prije konačnoga dovršetka lanterne, *Brunelleschi* je umro. Građani Firence su ga bez oklijevanja sahranili u katedrali St. Maria del Fiore (CRIPTA di St. Reparata), što je počast kakva nije dodijeljena čak ni Michelangelu koji je sahranjen u crkvi St. Croce u Firenci.

5 Posvećenje

Dana 30. kolovoza 1435. godine, dakle još prije građenja lanterne, papa *Eugen*, koji je pobjegao u Firencu pred rimskom ruljom što ga je napadala zbog njegovih neprekidnih ratova, posvetio je katedralu St. Maria del Fiore. U pratnji 7 kardinala, 37 biskupa, 9 članova firentinske vlade i *Cosima de Medici* papa *Eugen* krenuo je iz svoje rezidencije u St. Maria Novella (preko puta današnjega kolodvora) prema katedrali. Za posljednjih 300 metara sagrađena je skela da bi se papa odvojio od mase; nekada prije takvom bi se prigodom narodu radi odvratanja pažnje bacao sitni novac. Više od sto tisuća oduševljenih ljudi prisustvovalo je posvećenju.

Ovo je posvećenje bilo početak jednoga novog vremena - bio je to kraj srednjega vijeka. *Brunelleschijevo* je djelo bilo veličanstveno, možda usporedivo s djelom *Kolumba* koji je također - oslonjen samo na svoje temeljito znanje i svoju hrabrost - prekoračio granice koje nitko prije nije ni dotaknuo [2].

6 Pukotine u kupoli

Već relativno brzo nakon dovršetka otkrivene su pukotine na kupoli koje se vide i danas (slika 32.). *Nelli* ih je opisao 1695. godine; one se otvaraju sve vrijeme, u prosjeku 7 mm u 100 godina.

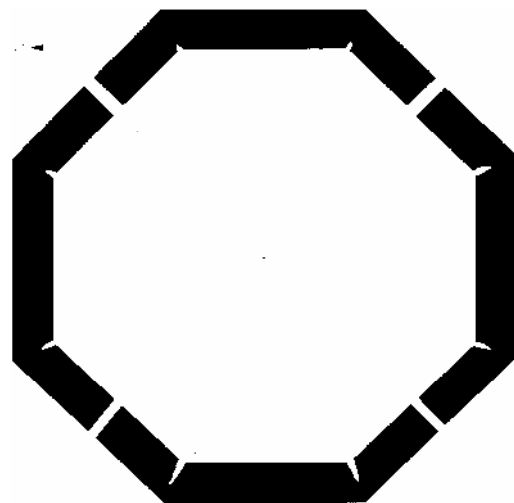


Slika 32. Vidljive pukotine u kupoli

Godine 1757. *Leonardo Ximenes* izvješćuje o promjeni geometrije kupole jer je opazio da zraka sunca jednoga određenog dana u godini ne pada na isto mjesto na podu (slika 33.). Na slici su prikazane i dvije pukotine na kupoli. Nakon točnoga ispitivanja *Ximenes* nalazi pukotine u kutovima na unutarnjoj strani kupole, tada samo dvije od kasnijih četiriju pukotina na polovinama dviju strana koje prolaze kroz čitavu debljinu kupole (slika 34.). Druge dvije takve pukotine pojavile su se kasnije u segmentima 2 i 8, dakle središnje simetrično, tako da se sada kupola sastoji od četiri gotovo nezavisna dijela.



Slika 33. Pokus Leonarda Ximenesa [5]



Slika 34. Glavne pukotine u kupoli



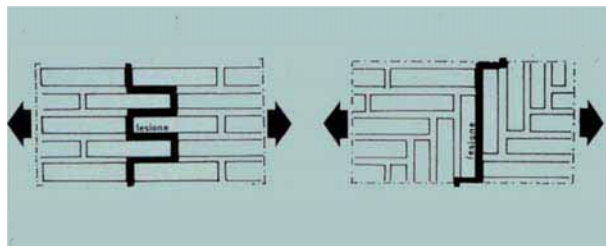
Slika 35. Tipovi glavnih pukotina u razvijenom oktogonu [5]

Tri su glavna tipa pukotina (slika 35.):

- vertikalne pukotine u stupu i segmentu kupole iznad njega
- vertikalne pukotine u segmentima kupole između stupova
- pukotine u kutovima u unutrašnjosti kupole
- kose pukotine ispod okruglih prozora tamboura.

Uzrok pukotina može se danas relativno lako objasniti, a pomoću opsežnih proračuna metodom konačnih elemenata je i dokazan [5].

Sve su pukotine očito nastale pod utjecajem vlastite težine; one se mogu pojasniti ako se tok sila točnije razmotri. U gornjem dijelu kupole, gdje nagib postaje sve veći, prisutne su tlačne sile zbog efekta "segmentnoga nadvoja" (slika 20.), tamo se dakle ne pojavljuju pukotine. U donjem području - s malim nagibom - postaju tlačne sile od "segmentnoga nadvoja" manje, ali rastu horizontalne sile usmjerene prema van, što dovodi do vlačnoga opterećenja. To opterećenje mala vlačna čvrstoća zida ne može



Slika 36. Vlačne pukotine u reškama zida

preuzeti, a sidreni prsteni su popucali ili su preslabo dimenzionirani, pa se pojavljuju pukotine u donjem području kupole. Ovdje se uostalom pokazuje i jedan nedostatak veza zida tipa "riblja kost". Pri normalnom se zidanju u slojevima vlačno opterećenje prenosi posmičnim otporom morta u reškama, a u slučaju veza "riblja kost" u širokim reškama nastaje vlačno opterećenje (slika 36.).

Unutrašnje su pukotine u uglovima oktogona posljedica savijanja koje nastaje zbog horizontalnih, prema van usmjerenih sila: središnje područje segmenata je podatljivije poduprto nego područje uz kruta uglovna rebra, i pojavljuju se sile koje iznutra razdiru uglove. To se vjerojatno može pripisati nosivom djelovanju četiriju nezavisnih dijelova kupole. Proračuni metodom konačnih elemenata pokazuju u tim područjima velike horizontalne sile.

Pukotine u stupovima nastale su preusmjerivanjem sila od golemoga opterećenja, koje su se na putu do temelja morale najprije ogibati oko okruglih prozora tamboura, a dalje kriviti oko rebara u stupovima. Zbog toga su nastale horizontalne sile koje zide tamboura i stupova nije moglo preuzeti.

Kose glavne pukotine ispod okruglih prozora tamboura potječu od momenata savijanja i poprečnih sila tamboura koji ovdje djeluje kao greda.

Pojavljuje se, dakako i pitanje stabilnosti kupole jer predviđeni nosivi sustav rebraste kupole uz te pukotine više ne postoji. Međutim, postoji još jedan nosivi sustav koji predstavlja raspucana kupola. Za to treba kupolu zamisliti kao sastavljenu od četiri dijela; svaki se dio sastoji

od stupa s pripadnom polovicom segmenta kupole s obje strane stupa i pripadajućim dijelom tamboura. Ova su četiri pojedinačna dijela na rubovima pridržani zbog uvjeta simetričnosti. Proračunom se može dokazati da je takav građevni element, tj. četvrtina kupole, stabilan [5].

7 Razmišljanja o sanaciji

Postojeći je sustav doduše stabilan pod utjecajem vlastite težine i vjetra, ali ne i protiv jakoga potresa kakav se u Toscani može pojaviti. Zbog toga se već dugo ne poduzimaju samo mjere nadzora stanja građevine i razvoja

pukotina, već se rade opsežne studije o potrebnim zahvatima za osiguranje stabilnosti i pri jakom potresu. Najbolje izgled moglo bi imati ovijanje kupole čeličnom užadi koja bi na uglovnim rebrima mijenjala smjer i tako uvelike opet uspostavila statičko ponašanje rebraste kupole. Prednost takvog zahvata jest u tome da ga se može izvesti strogo kontrolirano, te da se užad može i promijeniti, a eventualno i ukloniti. Osim toga užad ni izvana ni iznutra ne bi bila vidljiva. To bi bilo i u skladu s idejama *Nerija*, pa izvorna ideja nosivoga sustava ne bi bila narušena. *Brunelleschi* ovaj problem nije mogao predvidjeti, iako ga je možda naslutio ili ga se pribojavao.

LITERATURA

- [1] Ross, K.: *Wunder von Florenz*. Architektur und Intrige: Wie die schönste Kuppe der Welt entstand. A. Knaus-Verlag, München, 2003.
- [2] Krämer, T.: *Die grosse Kuppel von Florenz*. Verlag Freies Geistesleben. Stuttgart, 2001.
- [3] Galluzzi, P.: *Renaissance Engineers*. From Brunelleschi to Leonardo da Vinci e Museo di Storia della Scienza, Florence 1st Edition, 1996.
- [4] Settle, T. B.: *Brunelleschi's horiozntal arches and related devices*. Annali dell'Instituto e Museo di storia della scienza di Firenze, 1978, S. 65-80.
- [5] Fanelli, G., Fanelli M.: *Die Kuppel Brunelleschis – Geschichte und Zukunft eines grossen Bauwerkes*. Mandragora, 2004.
- [6] Peil, U.: *La Cupola – Ein Meistewerk für die Ewigkeit*. Merian-Heft Florenz, Dezember 2005. 54-62.
- [7] Peil, U.: *Die grosse Kuppel von Florenz – Ein Meisterstück des 15. Jahrhunderts*, Jahrbuch der Braunschweigisch-Wissenschaftlichen-Gesellschaft. Cramer-Verlag, 2005, 23-34.
- [8] Borri, C.: *Persönliche Mitteilung*, 2004.