

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 1769

PROCEDURALNO GENERIRANJE MODELA ZGRADA

Maksimilijan Hižman

Zagreb, lipanj 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 1769

PROCEDURALNO GENERIRANJE MODELA ZGRADA

Maksimilijan Hižman

Zagreb, lipanj 2025.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 1769

Pristupnik: **Maksimilijan Hižman (0036547407)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija i Računarstvo
Modul: Računarstvo
Mentorica: prof. dr. sc. Željka Mihajlović

Zadatak: **Proceduralno generiranje modela zgrada**

Opis zadatka:

U proceduralno generiranim gradovima pa tako i u realistično generiranim gradovima obično nedostaju podaci o zgradama i pročeljima zgrada. Proučiti mogućnosti proceduralnog generiranja sadržaja s posebnim osvrtom na problematiku proceduralnog generiranja zgrada. Razraditi izradu modela zgrada proceduralnim načinom koji omogućuje parametarsku kontrolu dobivenih rezultata. Posebice obratiti pažnju na izgled pročelja zgrada. Načiniti testiranje i usporedbu na nizu primjera. Analizirati i ocijeniti ostvarene rezultate. Diskutirati upotrebljivost ostvarenih rezultata kao i moguća proširenja. Izraditi odgovarajući programski proizvod. Rezultate rada načiniti dostupne putem Interneta. Radu priložiti algoritme, izvorne kodove i rezultate uz potrebna objašnjenja i dokumentaciju. Citirati korištenu literaturu i navesti dobivenu pomoć.

Rok za predaju rada: 23. lipnja 2025.

Sadržaj

1.	Uvod	1
2.	Osnovni koncepti iza geometrijskih čvorova	2
2.1.	Podaci u Blenderu	2
2.2.	Što su geometrijski čvorovi?	3
2.3.	Struktura i tipovi čvorova	4
3.	Modeliranje osnovne geometrije zgrada	5
3.1.	Osnovni modeli	5
3.1.1.	Modeliranje prozora i komponenti prizemlja	5
3.1.2.	Modeliranje krova	7
3.1.3.	Modeliranje stupova	7
3.2.	Materijali modela	8
4.	Izrada geometrijskog čvora	9
4.1.	Plan izrade i parametri	9
4.2.	Dodavanje Zida	10
4.2.1.	Osnovna geometrija	10
4.2.2.	Selekcijski proces dijelova zida	12
4.3.	Dodavanje materijala	14
4.4.	Ostali parametri	16
4.5.	Povezivanje zidova u cjelinu	17
4.6.	Dodavanje vrha krova	18
4.7.	Normiranje pozicije i visine zgrade	19
5.	Evaluacija	20
5.1.	Rezultati i usporedba	20
5.2.	Ograničenja i proširenja	21
6.	Zaključak	22
	Literatura	23

1. Uvod

Proceduralno generiranje je tehnika u računarstvu kojom se algoritamski stvaraju podaci koji se korisniku čine potpuno nasumično stvoreni. Iza tih algoritama stoje pravila koje programer definira da bi doveo red u nasumičnost. Glavna značajka proceduralnog generiranja leži baš u toj sposobnosti za preoblikovanjem. Programeri su ti koji imaju potpunu kontrolu nad dodavanjem pravila i njihovom parametrizacijom. Fundamentalno se kombiniraju sadržaji koje ljudi stvore da se dobije nešto novo, jedinstveno i promjenjivo[2]. Proceduralni način razmišljanja i programiranja se razlikuje od običnog programiranja u tome što su konkretni rezultati odmah i vidljivi na ekranu, u smislu da ako mi promijenimo neko pravilo generiranja to pravilo će se odmah odraziti na objektu koji se generira. Tehnika proceduralnog generiranja se najprije pojavljuje u području razvoja videoigara gdje se koristila za generiranje labirinata, prostorija i mapa u žanru igara inspiriranih sa igrom *Dungeons & Dragons*[1]. U današnje vrijeme se funkcionalnost i primjena proceduralnog generiranja znatno povećala. Koristi se u području arhitekture za generiranje zgrada i cjelovitih gradova, u području računalne grafike se koristi za generiranje tekstura i vegetacije, u filmskoj industriji se koristi za generiranje efekata vezanih uz veliku količinu ljudi kao što su bitke između vojska, u proizvodnji se koristi za generiranje velikih količina različitih primjeraka nekog proizvoda, njegove analize i planiranja proizvodnje[1]. U kontekstu dizajniranja građevina na računalu postoje dvije glavne metodologije kojima se vode alati za izradu[2]. Prva je računalno potpomognuto dizajniranje (CAD) koje služi za manualno dizajniranje, projektiranje, modeliranje i vizualizaciju dvodimenzionalnih i trodimenzionalnih objekata građevina pomoću prostorno definiranih točaka, pravaca, ravnina, krivulja, ploha[3]. Druga metodologija je generativno dizajniranje (GD) koje se temelji na proceduralnom generiranju i iterativnog je karaktera. Računalo generira izlazne vrijednosti koje su stvorene na temelju prethodno definiranih pravila i dizajner promjenom parametara dobiva nove izlazne rezultate građevina[4]. Fokus rada će biti na proceduralnom generiranju građevina i kako je ono definirano u grafičkom alatu Blender pomoću sustava *Geometry Nodes* na verziji 4.3.2. Cilj je izraditi građevinu kojom se ostvaruje generativno dizajniranje.

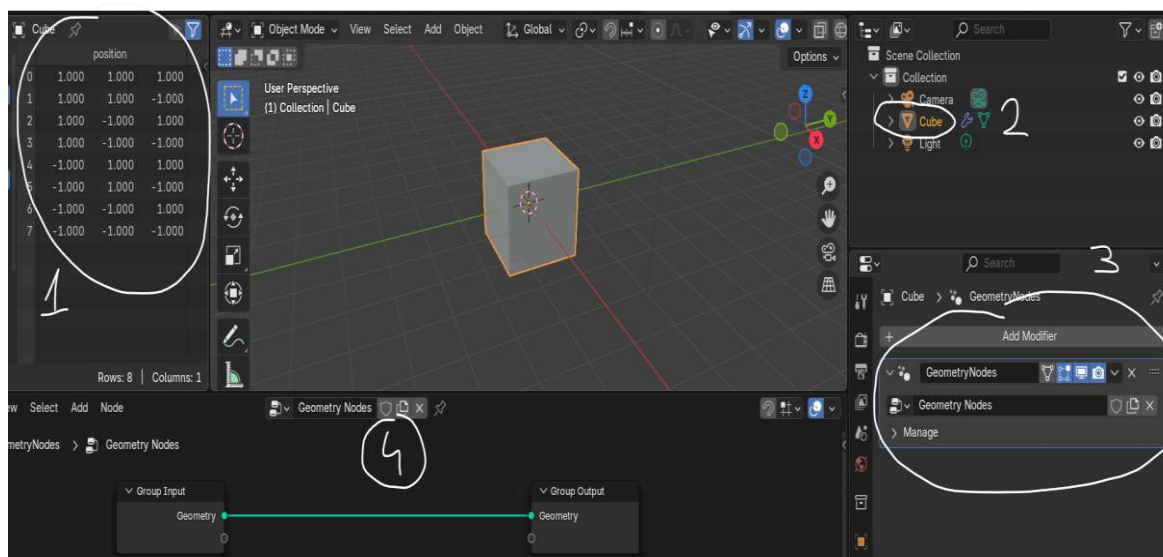
2. Osnovni koncepti iza geometrijskih čvorova

2.1. Podaci u Blenderu

Grafički alat Blender korisniku nudi veliki niz mogućnosti za stvaranje unikatnih geometrija, scena, animacija i mnogo više. Korisnik kada učita aplikaciju ima već unaprijed napravljenu scenu s određenim objektima. Ti objekti su jednostavna 3D kocka, jedan izvor svjetlosti i kamera. Objekti u Blenderu se sastoje od dva dijela, objekt kao cjelina odnosno informacije o njegovoj poziciji, rotaciji, veličini u odnosu na izvorišnu točku (eng. origin point). Drugi dio su sami podaci o strukturi objekta koji su definirani ovisno o tipu objekta. Tipova objekata ima mnogo u Blenderu, no najbitniji koji su potrebni za shvaćanje postupka izrade proceduralno generirane građevine su mreže (ili 3D mreža ili poligonalna mreža) (eng. mesh) i kolekcije instanca (eng. collection instance). 3D mreža je klasičan tip spremanja podataka u kojemu neko geometrijsko tijelo opisujemo pomoću geometrijskih primitiva. U računalnoj grafici se primarno za primitive koriste trokuti kojima se pamte podaci o vrhovima(eng. vertex), bridovima(eng. edge), a na razini tijela pamtimo također lica(eng. face) tijela. Blender nudi mnogo opcija za dodavanje novih *Mesh type* objekata koji su standardno definirani u alatu poput kocke, sfere, valjka, stošca i rešetke(eng. grid). Objektima se također mogu definirati liste materijala koje su zadužene za dodjeljivanje boje i tekstura određenim dijelovima objekta, ali i definiraju način interakcije svjetlosti s površinom dijelova objekta u sceni. Drugi relevantni tip podatka je kolekcija instanca koja predstavlja listu mogućih instanca koje se mogu generirati iz odabrane kolekcije. Instanca predstavlja pokazivač na druge objekte, kolekcije i geometriju unutar geometrijskih čvorova. Instanca ne sprema stvarne podatke, već služi kao način dupliciranja postojeće geometrije i spremanje u neki objekt bez da se dupliciraju stvarni podaci iz mreže [5].

2.2. Što su geometrijski čvorovi?

Postoji suptilna, ali važna razlika između pojmova geometrije i objekta koju Blender definira. Geometrija predstavlja samo sirove podatke o nekom objektu odnosno njegove vrhove, bridove i strane, a objekt stvara stvarnu poveznicu između sirovih podataka i prostoru scene. Primjerice, geometrija može biti mreža koji definira kocku, a objekt je i ta mreža i stvarni prikaz u sceni koji se može translirati, rotirati, skalirati i kojemu je moguće dodati modifikatore. Modifikatori u Blenderu predstavljaju automatske operacije koje su sustavno definirane da bi se nad podacima o samome objektu odnosno nad njegovoj geometriji mogle napraviti promjene bez uništavanja objekta. Modifikatori fundamentalno mijenjaju izgled samog objekta i način na koji se on iscrtava. Blenderov sustav geometrijskih čvorova (eng. Geometry Nodes) je modifikator. Način na koji geometrijski čvorovi mijenjaju objekt su definirani pomoću predodređenih čvorova kojima se manipulira nad geometrijom nekog objekta. Svako stablo geometrijskih čvorova koje je povezano s objektom predstavlja grupu čvorova (eng. Node Group). Objekti mogu imati više nanizanih modifikatora s različitim grupama čvorova. Svaki novo kreirani geometrijski čvor dolazi standardno sa čvorovima grupnog ulaza (eng. Group Input) i grupnog izlaza (eng. Group Output) [5]. Na slici (Slika 2.1) možemo vidjeti osnovne koncepte razrađene i prikazane u stvarnoj sceni u Blenderu. Pod brojem 1 imamo podatke o geometriji kocke (mesh), pod 2 imamo objekt kocke u sceni, pod 3 imamo prikazan izbornik modifikatora u kojemu smo stvorili novi geometrijski čvor, a pod 4 imamo standardni izgled nanovo stvorenog geometrijskog čvora.



Slika 2.1 Standardni prikaz geometrijskog čvora

2.3. Struktura i tipovi čvorova

Čvorovi se sastoje od funkcija koje obavljaju, ulaznih i izlaznih utičnica (eng. socket). Utičnice definiraju tipove ulaza/izlaza koje čvorovi primaju/predaju. Količina toga što je sve moguće je urnebesno velika. Moguće je da neki čvor prima/predaje instance, geometrije, materijale, pojedine koordinate vrhova, konstante i mnogo više, stoga će fokus biti na isticanju najkonkretnijih čvorova za razumijevanje proceduralnog generiranja građevina. Najprije ćemo spomenuti tipove čvorova grupnog ulaza i grupnog izlaza. Oni su među najvažnijima po tome zato što definiraju ono što uvodimo u geometrijski čvor i ono što iz njih izlazi i nama se prikazuje na ekran. Grupni ulaz standardno sadrži geometriju objektnog tijela nad kojim je postavljen modifikator geometrijskih čvorova. Moguće je odvojiti utičnicu između grupnog ulaza i izlaza te nam se time makne geometrija tijela koja je prikazana. Na ovaj način nismo uništili postojeći objekt, već smo sakrili njegov prikaz. U grupni ulaz je moguće uvesti nove utičnice s raznim vrijednostima koje modifikator može primati na ulaz. Takve ulaze nazivamo parametrima te su oni glavni način kako postizemo korisnički unos u sustav geometrijskih čvorova. Sljedeći tip čvorova su tipa geometrije (eng. Geometry). Oni su među najvažnijima zbog toga što su oni ti koji nam dopuštaju manipulaciju nad geometrijama koje dobivamo na ulazu ili nad geometrijama koje mi sami stvaramo unutar geometrijskih čvorova. Zaduženi su za čitanje, pisanje, stvaranje primitiva, pretvaranje mreža u druge tipove zapisa, razdvajanje i spajanje geometrije. Najbitnije utičnice za njih su *geometry* koji prima geometriju, *selection* koji služi kao filter za određivanje dijela geometrije kojem želimo pristupiti te *instances* koji je zadužen za razdvajanje pojedinih instanica u zasebne geometrije. Posljednja važna skupina čvorova je *Utilities*. Ona u sebi sadrži razne matematičke operacije, logičke operacije, upravljanje tekstom, poljima, matricama, vektorima koje nam generalno služe za razvijanje neke metode selekcije određenih dijelova geometrije. [5]

3. Modeliranje osnovne geometrije zgrada

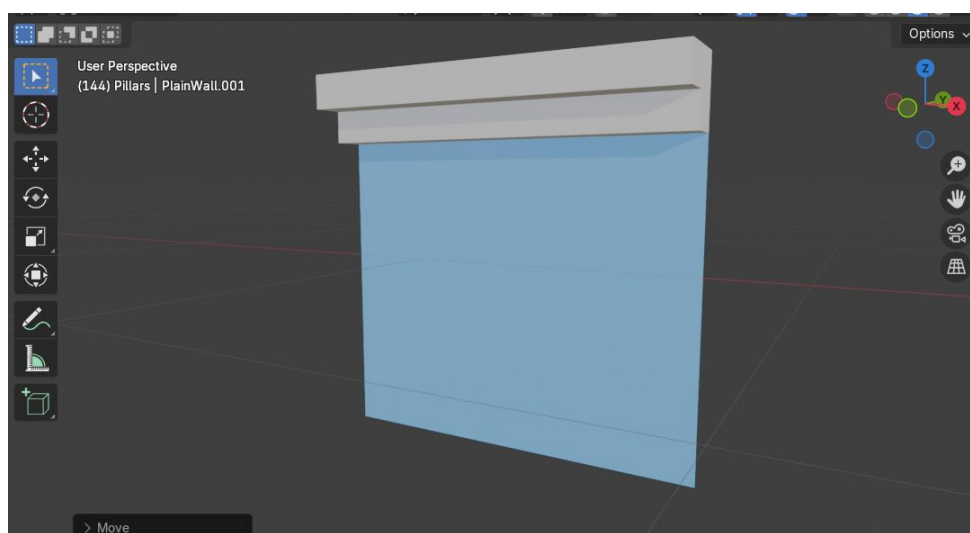
3.1. Osnovni modeli

U proceduralnom načinu izrade građevina pomoću geometrijskih čvorova pokušava se smanjiti broj potrebnih modela kako bi napravili veći broj građevina koje izgledaju drukčije, no u bazi koriste jednake osnovne modele za izgradnju. Za potrebe rada će se napraviti podjela osnovnih modela u nekoliko kolekcija: prozori, prizemlje, krov i stupovi. Ključna stvar na koju se mora pripaziti jest da nakon modeliranja treba svakome modelu postaviti izvorišnu točku (eng. origin point) na donju lijevu točku radi načina računanja transformacija u geometrijskome čvoru. Cijela teorijska pozadina iza modeliranja u sustavu Blender je uzeta iz dokumentacije sustava [5].

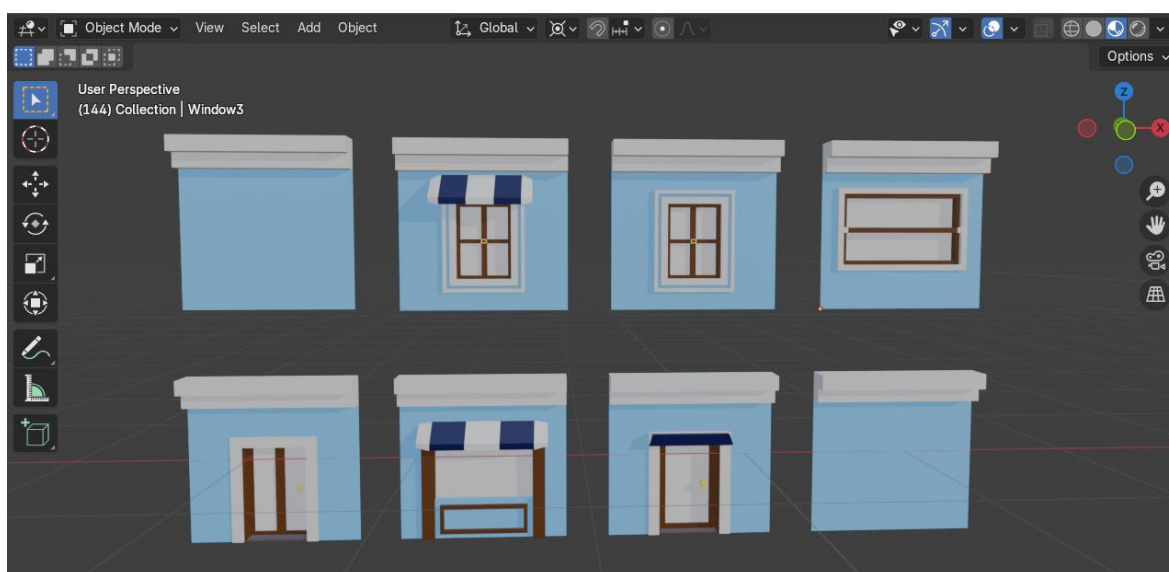
3.1.1. Modeliranje prozora i komponenti prizemlja

Izrada prozora i prizemlja se svodi na uređivanje i doradu osnovnog modela koji će se koristiti za oboje, a prikazan je na slici (Slika 3.1). Postupak izrade počinje s time da se stvara pomoću pritiskom tipka Shift+A objekt s mrežom ravnine koji će predstavljati objekt zida. Sljedeći korak je da se selektira taj objekt zida, pritisne se tipka N i dobije se prozor svojstva (eng. Properties). Pod rotacijom se postavi rotacija za 90 stupnjeva s obzirom na x-os. Nakon toga pritisne se Ctrl+A da bi se primijenila (eng. apply) promjena nad komponentom rotacije od objekta zida. Sljedeći korak je da pod komponentom dimenzija (eng. Dimensions) se zamijene vrijednosti pod x i z od 2 metara na 1 metar[6]. Ta promjena će izazvati da se skala za X i Z postavi na 0.5 što nije idealno, stoga je potrebno ponovo pritisnuti Ctrl+A da bi se primijenila promjena na skalu objekta zida. Nakon što su se definirale osnovne postavke trebamo još dodati razdjelni vijenac za cjelokupne zgrade na vrhu zida. Pritiskom tipke Tab mijenjamo način prikaza iz objektnog u način editiranja gdje će se raditi promjene na razini geometrije objekta zida. Potrebno je pritisnuti Ctrl+R da bi se mogla napraviti podjela geometrije odnosno dodavanje više bridova. Kada se namjesti miš u ravnini s x-osi se pojavi žuta linija koja predstavlja brid koji će se dodati. Skrolanjem miša se dodaje više bridova, stoga je potrebno jednom skrolati za podjelu te se tada pritisne lijevi klik miša da se napravi podjela. Pritiskom na

tipku S i zatim pritiskom na Z definira se skaliranje odnosno udaljenost između ta dva nova brida i treba ih smanjiti na željenu udaljenost te ih se može s pritiskom na G nakon skaliranja pomaknuti prema gore. U gornjem izborniku postavi se način editiranja da gleda strane geometrije umjesto bridova ili točaka te se označe nove strane koje su dobivene dodavanjem bridova. Pritiskom na tipku E radi se ekstruzija (eng. extrusion) i pomiču se strane unaprijed. Postupak se ponovi, ali samo za gornju stranu. Rezultat cijelog postupka je osnovni zid koji se koristi za definiranje ostalih modela na prizemlju s vratima ili prozorima i definiranje modela iz skupine prozora. Za izradu ostalih modela (Slika 3.2) se koristio niz naredba podjela geometrije, ekstruzija i još jedne tehnike zvane uvlaka (eng. inset). Uvlaka stvara novi skup bridova i lica unutar svakog odabranog lica na način da se originalno lice „uvuče“ unutar tog novog skupa.



Slika 3.1 Osnovni model za izradu modela prozora i prizemlja



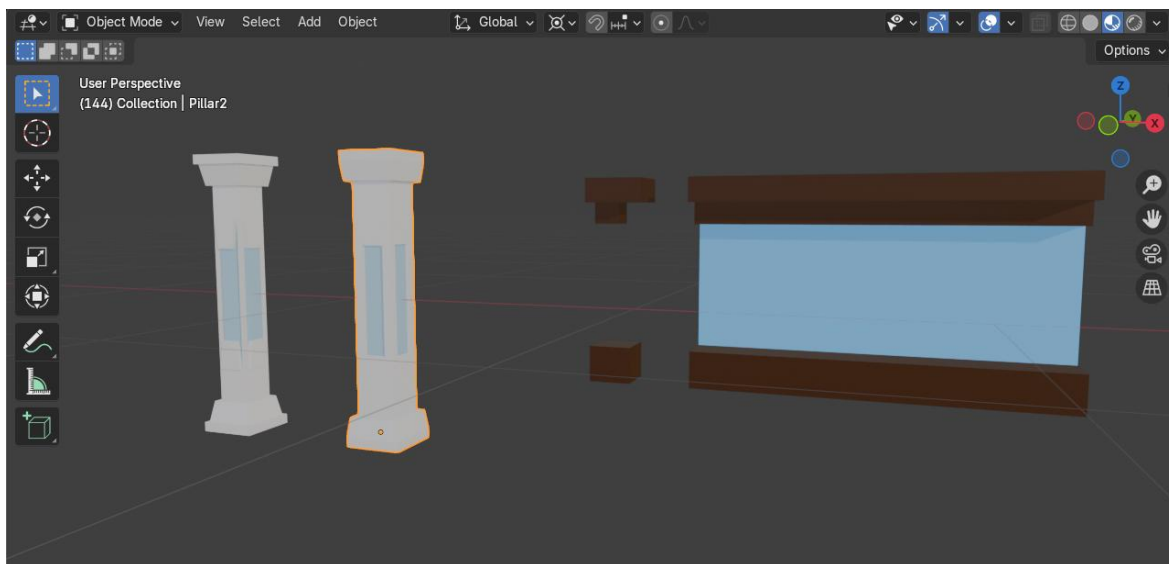
Slika 3.2 Modeli prozora(gornji red) i modeli prizemlja(donji red)

3.1.2. Modeliranje krova

Modeliranje krova je manje zahtjevno, no može se podijeliti na osnovni model krova i rubni model. Za model krova može se iskoristiti osnovni model zida samo mu se treba na dno dodati razdjelni vijenac kao što je bio izrađen s gornje strane. Visina krova je fleksibilna i može se namjestiti na bilo koju vrijednost manju ili jednaku od 1 metra [6]. Za model ruba krova se preporuča napraviti model od desnog ruba zbog izrade građevine koja će biti kasnije opisana. Treba stvoriti tri osnovna modela krova i staviti prvog kraj drugog, a trećeg koristiti kao presjek s jednim od prije navedenih. Cilj ovdje je da se vizualno može odrediti presjek te geometrija koja se mora maknuti i dodati pomoću ekstruzija da bi dobili efekt spajanja prva dva zida odnosno da bi dobili rub krova. Rezultat je prikazan na slici(Slika 3.3).

3.1.3. Modeliranje stupova

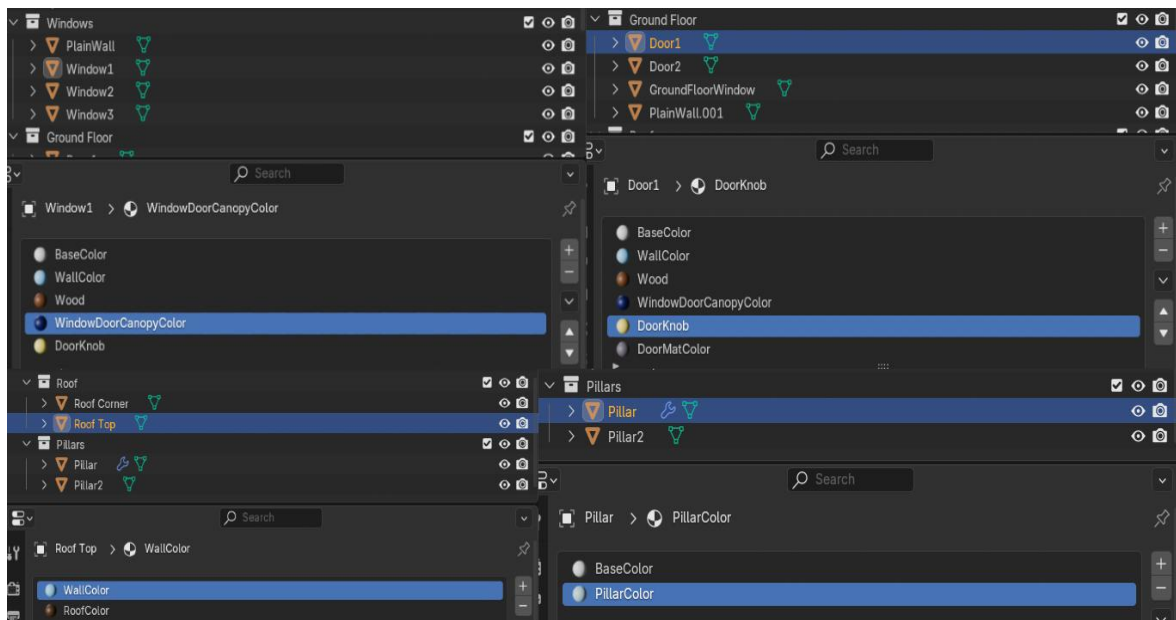
Izrada stupa kreće od novog objekta s mrežom tipa kocke. Promjene mu se dimenzije za x i y na 0.2 metara, a z ostaje 1 metar [6]. Primijeni se promjena na komponenti skaliranja na objektu. Nakon toga dizajniranje samog stupa se svodi ponovo na niz operacija ekstruzije i uvlačenja. Rezultat je prikazan na slici (Slika 3.3).



Slika 3.3 Modeli stupova (lijevo) i modeli krova(desno)

3.2. Materijali modela

Materijali modela u kontekstu ovog rada će predstavljati samo boju iako mogu i više toga promijeniti u Blenderu. Svaka skupina modela će imati jednaki popis materijala kojima će se bojati različiti dijelovi njihovih geometrija. Taj dio je vrlo važan zbog načina na koji će se kasnije parametarski definirati bojanje pojedinih dijelova građevina, osim toga u slučaju dijelova koji se neće parametarski bojati, oni će imati barem neku konstantnu boju dodijeljenu. Podjela je vidljiva na slici (Slika 3.4) i svaki dio se može usporediti s pojedinim vrstama modela: prozori (Slika 3.1), prizemlje (Slika 3.1), krov (Slika 3.3), stup (Slika 3.3).



Slika 3.4 Prikaz popisa materijala za pojedine skupine modela

4. Izrada geometrijskog čvora

4.1. Plan izrade i parametri

Objašnjenja iza pojedinih funkcijskih čvorova u sustavu Blender je napisana na temelju Blender dokumentacije[5]. Osnovna implementacija geometrijskog čvora je inspirirana iz video materijala Youtube kanala *Chong 3D* [6]. Zgrada će se sastojati od četiri zida koji su međusobno povezana te od krova. Zidovi će biti izgrađeni pomoću izrađenih osnovnih modela. Zid će se podijeliti na tri dijela: prizemlje, katovi, krov. Kada se napravi logika iza jednog zida može se dobivena geometrija kopirati za ostale zidove. Zidovi se grupiraju u dvije grupe međusobno paralelnih zidova zbog načina povezivanja pojedinih zidova u cjelinu. Kroz cijeli proces dodaju se pojedini parametri iz tablice (Tablica 1). Na kraju, dodaje se krov i materijali da bi se zgrada mogla obojati. Proces izrade će se opisati korak po korak po logičkim komponentama.

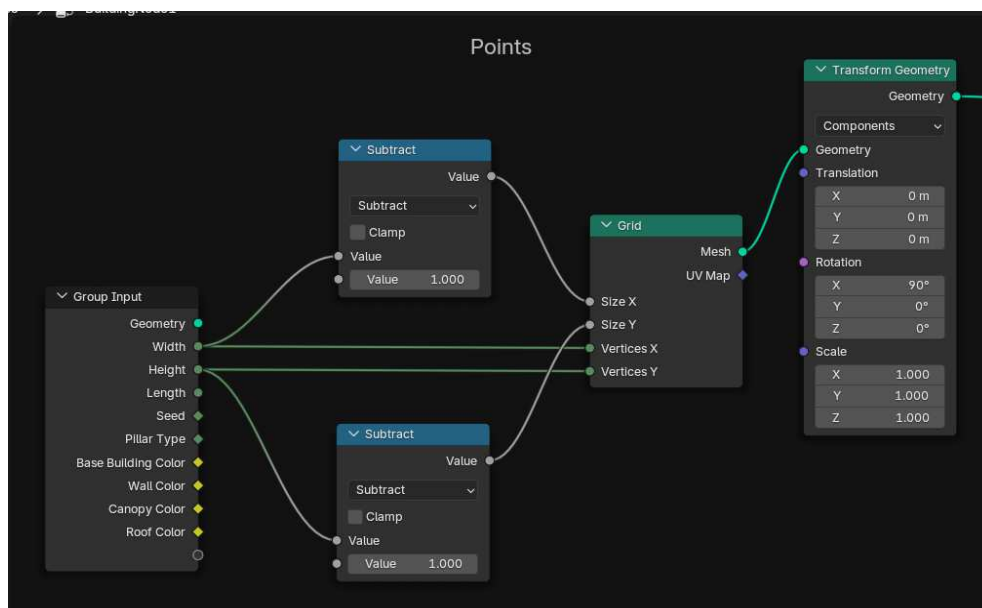
Tablica 1 Parametri proceduralno generirane zgrade

Naziv parametra	Tip parametra	Opis parametra
Width	Integer	Upravlja širinom zgrade (širenje po x-osi).
Height	Integer	Upravlja visinom zgrade (širenje po z-osi).
Length	Integer	Upravlja duljinom zgrade (širenje po y-osi).
Seed	Integer	Upravlja nasumičnim rasporedom pojedinih modela zgrade na prizemlju i u sekciji prozora.
Pillar Type	Integer	Određuje koji model stupova se koristi. Ukupno ih je dvoje.
Base Building Color	Color	Određuje osnovnu boju stupova, okvira prozora i vrata, razdjelnih vijenaca.
Wall Color	Color	Određuje boju zidova zgrade.
Canopy Color	Color	Određuje boju nadstrešnica iznad pojedinih elemenata na prizemlju i na sloju prozora.
Roof Color	Color	Određuje osnovnu boju krova.

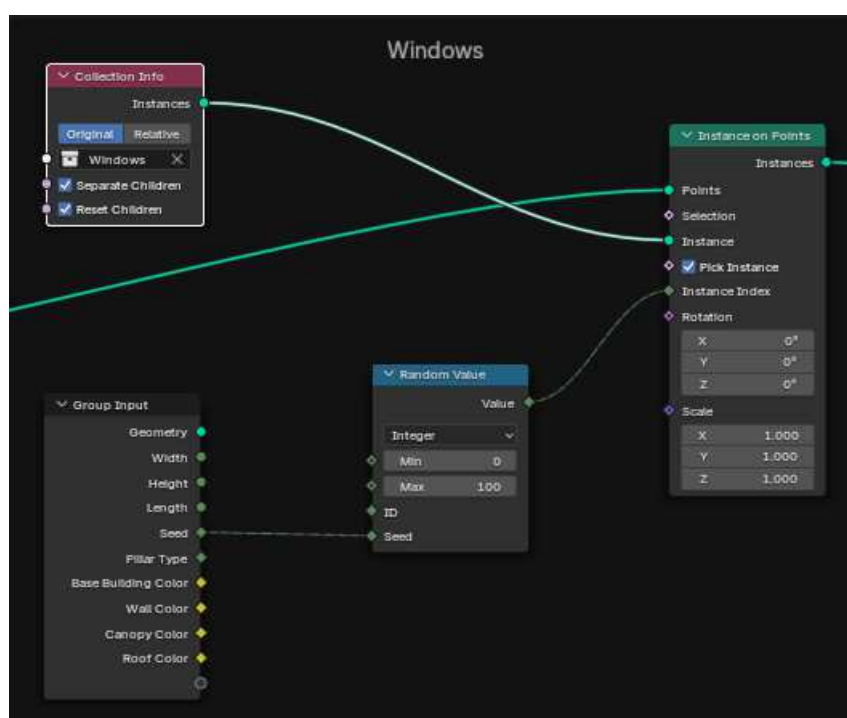
4.2. Dodavanje Zida

4.2.1. Osnovna geometrija

Najprije u novoj instanci kocke treba napraviti geometrijski čvor. Treba raskinuti utičnicu između grupnog ulaza i grupnog izlaza koji sadrži geometriju kocke. Ideja kako će se konstruirati zid je da se stvori nova geometrija. Geometrija koja će se koristiti je rešetka pomoću *Grid* čvora. Struktura rešetke je prikazana na slici (Slika 4.1). Rešetci se može definirati njena veličina (eng. size X/Y) i broj točaka (eng. Vertices X/Y). Svaka točka rešetke će predstavljati jednu instancu objekta modela koji će se koristiti za izgradnju pojedinih dijelova zida (Slika 4.2). Najprije da bi rešetka bila dosljedna koordinatnom sustavu u Blenderu gdje je z definiran kao vektor prema gore treba se napraviti rotacija oko x-osi za 90 stupnjeva nad geometrijom rešetke pomoću *Transform Geometry* čvora. Ako bi se sada spojila izlazna geometrija tog čvora s čvorom *Instance to Points*, a izlaz *Instances* od toga čvora s grupnim izlazom, dobilo bi se preklapanje instanca jer veličina rešetke nije dovoljno velika. Promjenom veličina rešetke i broja točaka može se ustanoviti veza između njih. Veličina rešetke je za jedan manja od broja točaka. Korisniku bi bilo nespretno da mora ručno u geometrijskom čvoru stalno mijenjati te iznose pa se može povući utičnica iz ulaza na točke rešetke do čvora grupnog ulaza da bi se stvorila nova utičnica parametra. Sad su ti ulazni parametri spojeni s točkama rešetke, no na veličine nema direktnog spajanja, već se treba dodati *Subtract (Math)* čvor da taj broj umanjimo za jedan. Grupe paralelnih zidova će koristiti različite parametre za vrijednosti pod X u rešetci, jedna koristi parametar duljine, a druga koristi širinu. Vrijednosti pod Y će biti jednake u obje grupe paralelnih zidova i predstavljat će parametar visine.



Slika 4.1 Primjer stvaranja geometrije rešetke

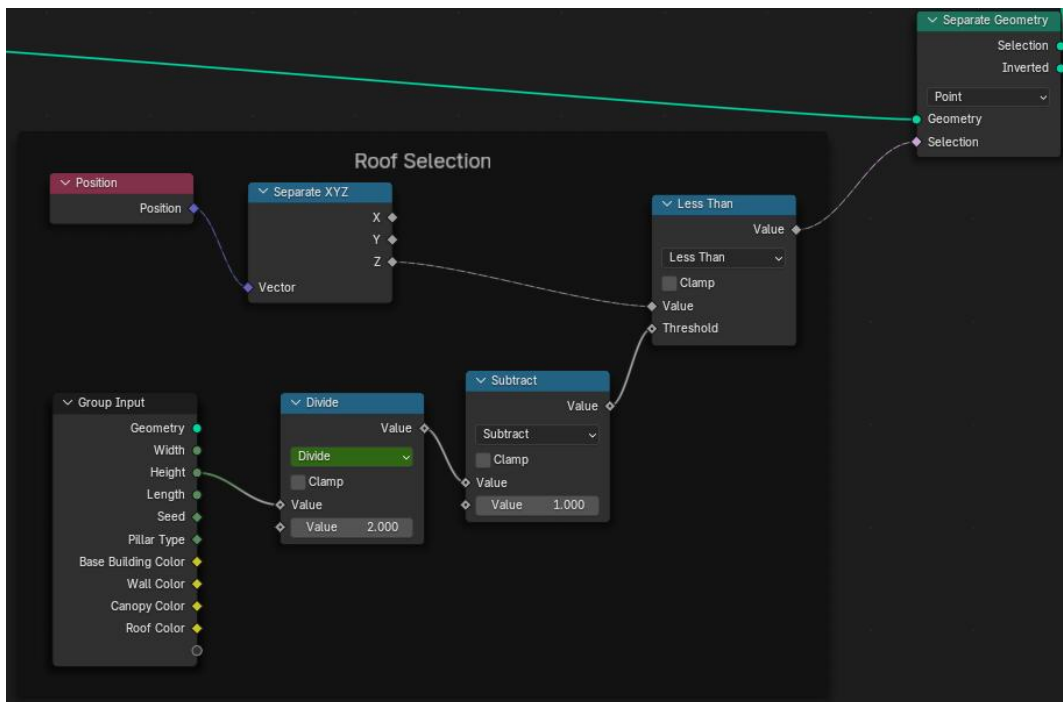


Slika 4.2 Primjer dodavanja instanca objekata nad odabranim točkama rešetke

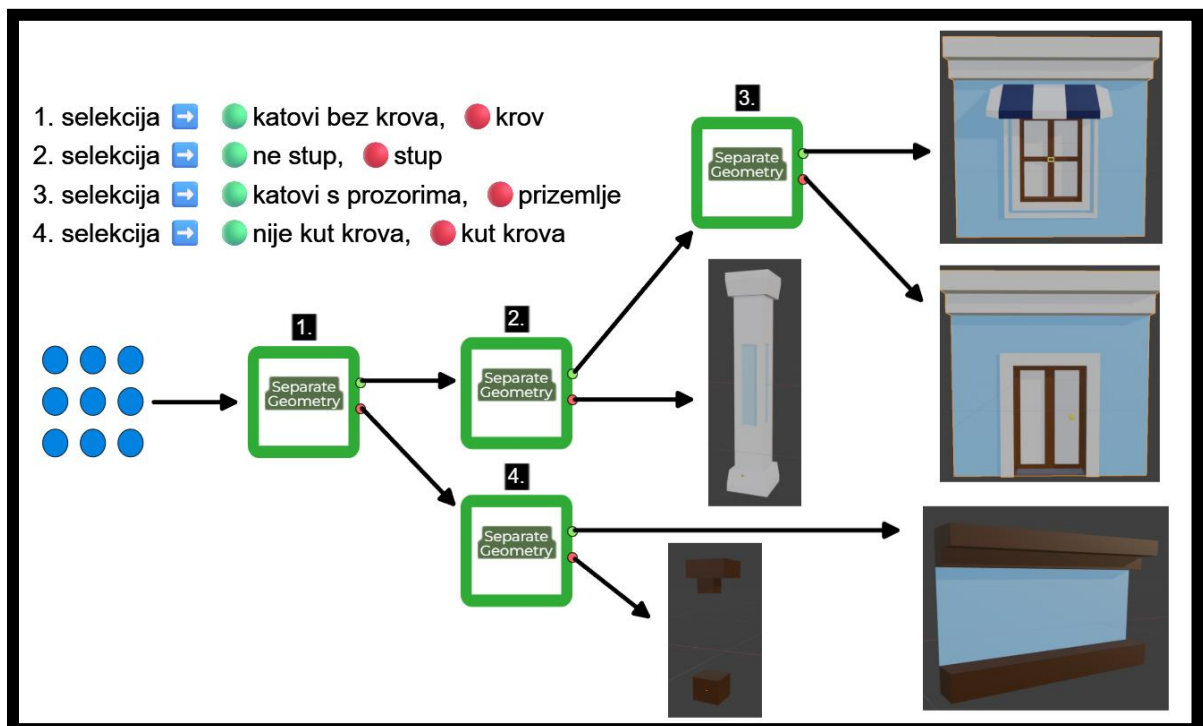
4.2.2. Seleksijski proces dijelova zida

Jednom kada su rešetke formirane, treba implementirati način kako filtrirati određene dijelove geometrije rešetke odnosno točke nad kojima će se primijeniti različiti modeli objekata. Na slici (Slika 4.3) je prikazana prva selekcija koja se radi. Seleksijska procedura se odvija pomoću čvora *Separate Geometry*. Za ulaz dobiva geometriju koju treba podijeliti na dva skupa. Geometrija se dijeli na selektirani dio i na invertirani što u prijevodu znači na dijelove koji zadovoljavaju seleksijski kriterij i oni dijelovi geometrije koji ne zadovoljavaju. Težina u seleksijskom procesu svih dijelova zgrade je u tome da treba ustanoviti što treba dostaviti seleksijskoj ulaznoj utičnici toga čvora da bi se geometrija pravilno razdvojila. U nastavku će se opisat generalni način razmišljanja i struktura seleksijske logike na primjeru prve selekcije. Prva i najjednostavnija podjela zida je prema dijelu koji nije krov i dijelu koji jest. Za invertirani izlaz *Separate Geometry* čvora se dobivaju dijelovi rešetke koji će činiti krov, a sve ostalo putem seleksijskog izlaza ide na daljnju podjelu rešetke. Izlazna logička vrijednost selekcije je definirana pomoću *Less Than (Math)* čvora. On za ulaz prima brojčani prag i vrijednost koju mora usporediti s tim pragom. Vrijednost koja se mora usporediti, je vrijednost globalne koordinate z pomoću *Separate XYZ* čvora za svaku točku rešetke. Pomoću čvora *Position* se dobiva vektor položaja svake točke lokalne geometrije koju dohvaća. Što znači da u prvoj podijeli gleda cjelokupnu rešetku, u sljedećem koraku će gledati na primjer dio rešetke koji nije dio krova. Također se mora definirati prag. Ako bi se bez dodatne logike postavio neki statični prag, vidjelo bi se da povećanjem visine zgrade, više katova zida bi bili razdvojeni kao krov umjesto samo najgornjeg dijela rešetke. Ovisnost koja se može opaziti statičnim namještanjem praga je da kada se poveća parametar visine, tada se treba povećati prag za 0.5. Dinamički prag se dobije uzimanjem parametra visine iz grupnog ulaza koji prolazi kroz *Divide (Math)* čvor te kroz *Subtract (Math)* čvor. Efektivno se prag računa tako da se uzima visina, dijeli se s dva i oduzima se jedan od rezultata dijeljenja. Potpuni redoslijed selekcija je prikazan na slici (Slika 4.4). Ako se ponovo osvrnemo na činjenicu da zidove dijelimo u dvije grupe, tada je bitno naglasiti da u ostalim seleksijskim postupcima se koriste različiti parametri od korisnika da bi se definirali pragovi koji iza sebe imaju identičnu logiku. Najbolji primjer toga je selekcija stupova gdje se uzimaju najdesnije točke geometrije rešetke nakon prve seleksijske podjele na krov i ne krov. U slučaju prve grupe će se uzeti za usporedbu praga parametar širine, a u drugoj grupi parametar duljine.

Nakon svih selekcija točaka rešetke, mora se postaviti odgovarajuća instanca objekta (Slika 4.2)



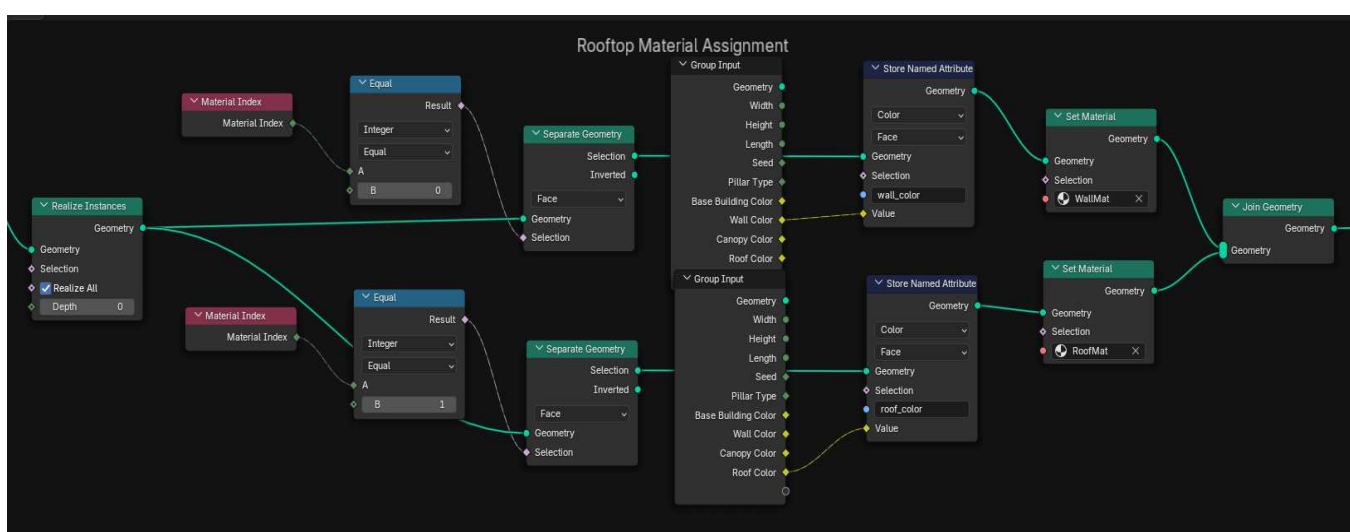
Slika 4.3 Primjer definiranja selekcijske logike za ciljanu geometriju rešetke



Slika 4.4 Skica potpunog selekcijskog procesa

4.3. Dodavanje materijala

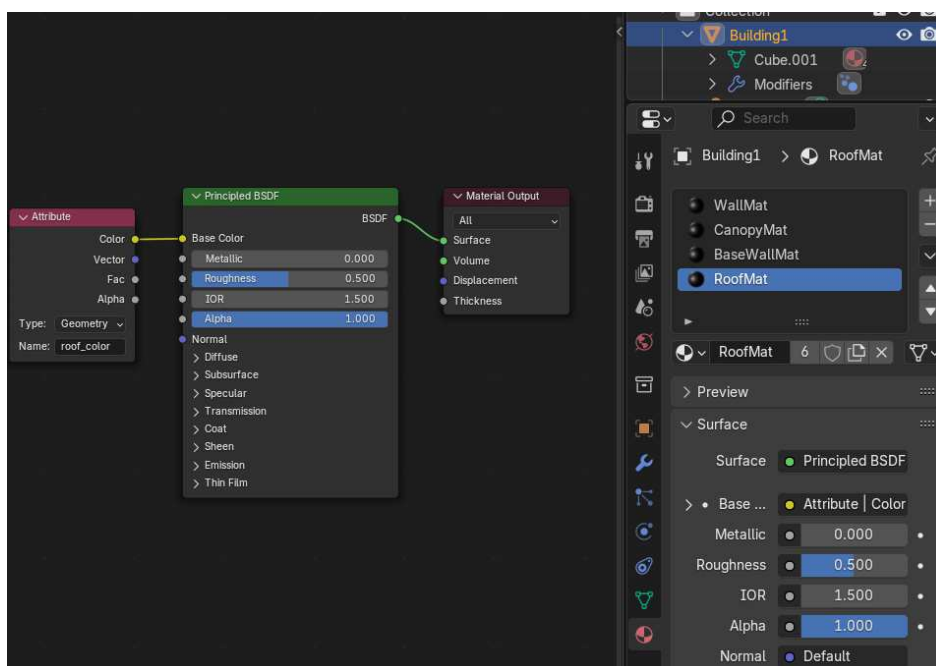
Nakon podijele svih dijelova zida i dodjele odgovarajućih instanca objekata modela na točke rešetke, sada je red na dodavanju materijala pojedinim instancama. Način dodavanja materijala objasniti će se na temelju jednog primjera. Demonstrirat će se na koji način generalno radi dodjela materijala. Primjer je na slici (Slika 4.5). Problem dodjeljivanja materijala leži u tome da iako su podaci o instancama dostupni, direktno korištenje čvora *Set Material* će dodijeliti materijal cijeloj geometriji instance što nije poželjno jer ne želimo jednoboju zgradu.



Slika 4.5 Primjer dodjele materijala

Prva stvar koju treba napraviti da bi se riješio taj problem je provući geometriju odabranih instanca kroz čvor *Realize Instances*. Njegova funkcionalnost leži u tome da pretvara danu instancu u sirove podatke odnosno mrežu. Na taj način se dobiva pristup vrhovima, bridovima i licima instanca. Blender pamti u podacima o licima nekog objekta koji materijal im se dodjeljuje pomoću takozvanog indeksa materijala. Popis materijala definiran na slici (Slika 3.4) prikazuje redoslijed materijala kojima se dodjeljuju indeksi materijala. Indeksiranje počinje od gore s vrijednosti nula, a povećava se za svaki novi materijal. Pomoću ove funkcionalnosti unutar Blendera može se iskoristiti *Separate Geometry* čvor da bi razdvojili sva lica ulazne geometrije na geometrije lica koje su povezane sa određenim indeksom materijala. Na taj način je moguće dodijeliti konkretnu skupinu materijala konkretnim licima koja su otprije definirana na modelima instanca. Postupak time postaje vrlo jednostavan i iterativan. Uzima se čvor *Material Index* te se provlači kroz *Equal (Math)* čvor. Unutar čvora se definira točni indeks materijala koji će se

koristiti za selekciju lica te se prosljeđuje na ulaz *Separate Geometry* čvora kao selekcijska logika. Trenutno opisani niz čvorova će garantirati da, ako se iskoristi *Set Material* čvor na odabranoj geometriji instance, materijal će se primijeniti na točna lica definirana prema modelu instance. Taj dio je dovoljno dobar za korištenje u nekim sporednim stvarima, kao što su okviri prozora ili boja otirača ispred vrata, no nije dovoljan ako se želi korisniku omogućiti kontrola nad bojom zidova, bojom krovišta, osnovnom bojom pročelja i bojom nadstrešnica iznad prozora i elemenata u prizemlju zgrade. Rješenje tog problema leži u korištenju *Store Named Attribute* čvora. Ideja je vrlo jednostavna, korisnik pomoću parametara o boji zida i boji krova sprema tu postavljenu boju u attribute zvane *wall_color* i *roof_color*. Pojedini atributi se spremaju u sjenčarima pojedinih materijala. Najbolja praksa za materijale jest da ih se definira na objektu koji sadrži modifikator geometrijskog čvora. Ako se odabere jedan od promjenjivih materijala i uđe se u opciju *Shading* u gornjoj traci Blenderovog izbornika, tada se otvara sjenčar koji je definiran za taj materijal. Ovdje se može dodati čvor zvan *Attribute* koji se spaja na čvor *Principle BSDF* u priključnicu *Base Color* kao što je prikazano na slici (Slika 4.6).



Slika 4.6 Primjer definiranja atributa u sjenčaru materijala

Najjednostavnije objašnjenje za ovo je da u standardne postavke materijala ubacujemo osnovnu boju tog materijala pomoću atributa kojeg definiramo za taj materijal. Drugim riječima kada korisnik promijeni parametar *Roof Color* to će se proslijediti u *Store Named Attribute* čvor, dohvatiti će se preko naziva taj atribut te će mu se promijeniti boja prema

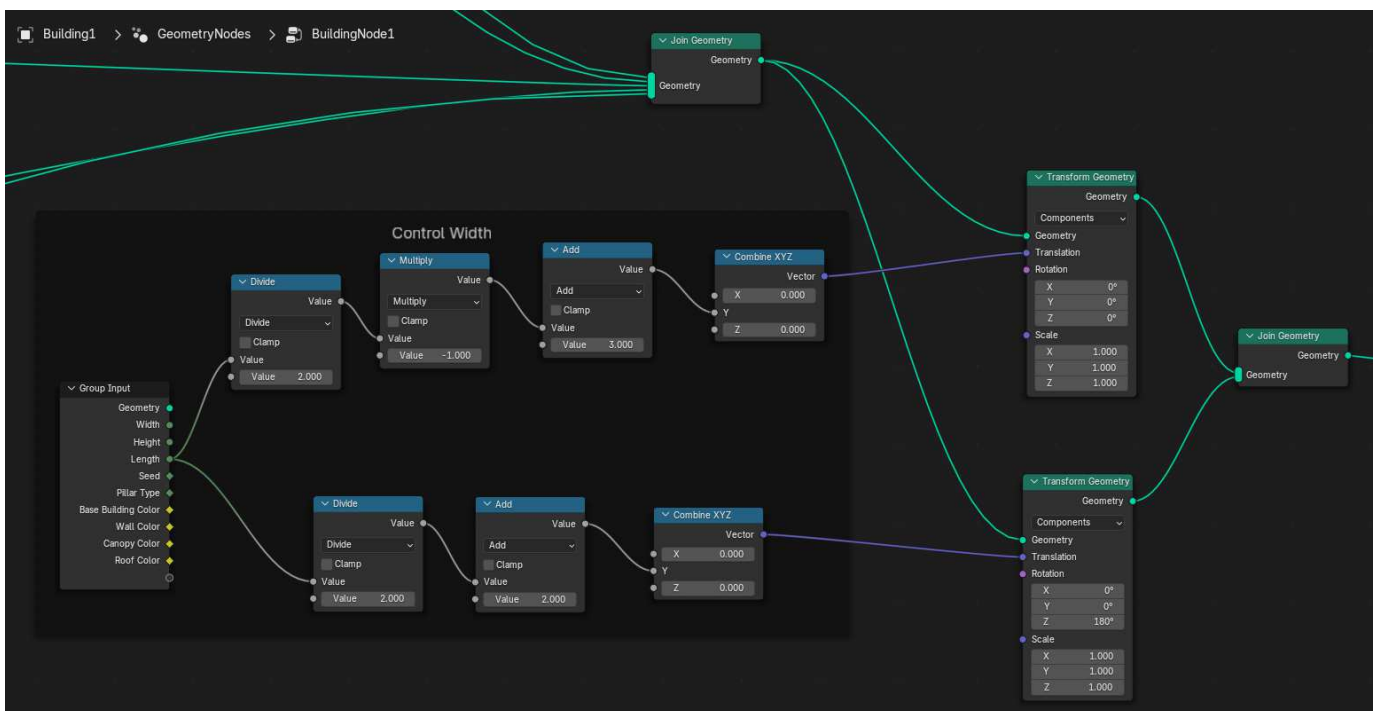
zahtjevima korisnika, a atribut će direktno onda promijeniti boju materijala u kojemu je on definiran. Ako se pogledaju primjeri sa slika (Slika 4.5 i Slika 4.6), korisnik prosljeđuje *Roof Color* parametar. On ide u atribut nazvan *roof_color*. Atribut mijenja boju materijala *RoofMat*. Prikazanom metodom se dobiva materijal koji se može staviti u čvor *Set Material*, a da korisnik ima kontrolu nad bojom dodijeljenog materijala.

4.4. Ostali parametri

Pod ostalim parametrima se misli na one koji do sada još nisu bili definirani u okviru procesa stvaranja zidova zgrade. Zajedno će se razmatrati jer im je logika vrlo slična. To su parametri *seed* i *pillar type*. Implementacija parametra *seed* je vidljiva na slici (Slika 4.2). Taj parametar se prosljeđuje čvoru *Random Value (Math)* koji ga koristi za nasumično generiranje nekog broja između 0 i 100. Pomoću utičnice *Instance Index* je moguće odrediti koja će se instanca iz korištene kolekcije iskoristiti na pojedinoj točki u čvoru *Instance on Points*. Ako se spoji parametarski dobivena nasumična vrijednost na tu utičnicu, tada se efektivno stavlja nasumična instanca na pojedinu točku rešetke. Time se dobiva nasumični raspored prozora i vrata. Ovdje bitna stvar za uočiti je da iako nema 100 vrsta instanci u kolekciji svejedno se odabire neka vrijednost. To je moguće zbog toga što Blender ciklički prolazi kroz indekse neke kolekcije. Primjerice, ako je u kolekciji četiri instanca, tada će indeks 4 generirati instancu pod indeksom 0. Za dodatnu nasumičnost se na drugoj grupi zidova stavlja čvor *Add (Math)* prije čvora *Random Value (Math)* koji povećava parametar *seed* za jedan. Logika iza parametra *pillar type* je identična, no za stupove je nužno da se generiraju konzistentne instance pa se u *Instance Index* direktno prosljeđuje dani parametar.

4.5. Povezivanje zidova u cjelinu

Što se sve do sad napravilo u geometrijskom čvoru? Definirala se rešetka točaka, točke su se selekcijskim procesom razdvojile na pojedine dijelove zida, različitim cjelinama su bile dodijeljene različite instance modela, instance su bile rastavljene po licima te im se dodijelio odgovarajući materijal. U sljedećem koraku se spajaju sve razdvojene geometrije natrag u jednu geometriju zida pomoću *Join Geometry* čvora. Time smo uspjeli dobiti parametarski ovisnu geometriju jednog zida. Nadalje zidove, kao što je bilo već prije spomenuto, treba dijeliti u dvije grupe koje sadrže međusobno paralelne zidove. Iz čvora *Join Geometry* je moguće dobiti dvije geometrije tako da pustimo izlaznu utičnicu da ide kroz dva čvora *Transform Geometry*. U prvoj grupi će rotacijska polja za te čvorove biti postavljena na 0 i 180 stupnjeva, a u drugoj grupi na 90 i -90 stupnjeva obje skupine u odnosu na globalnu z-os u sustavu scene. Nakon što je uspješno generirano četiri zida koja su parametarski ovisna o duljini i širini zgrade, može se uočiti da promjenom pojedinih parametara se zidovi ne miču zajedno već dolazi do razdvajanja komponenata. Rješenje za jednu od grupa zidova je dano na slici (Slika 4.7).



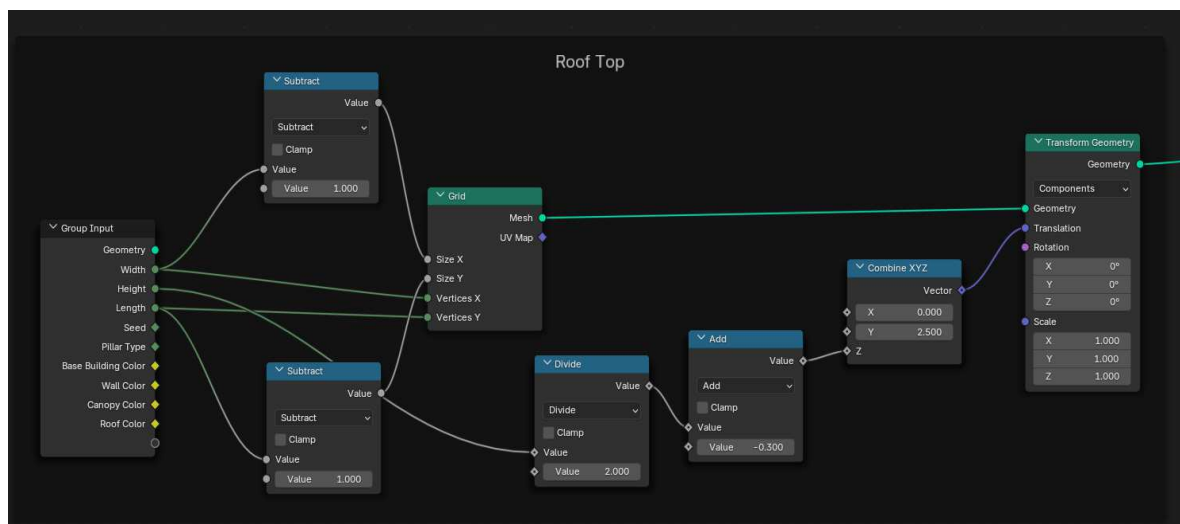
Slika 4.7 Primjer povezivanja jedne grupe zidova s drugom

Grupa zidova se mora translirati zajedno kada se mijenja parametar suprotan onome kojim je ona definirana. Konkretno grupa zidova iz slike (Slika 4.7) se povećava ili

smanjuje pomoću parametra širine (dodavanje po x-osi), a da bi bila povezana s drugom grupom koja ovisi o duljini, mora se napraviti translacija u smjeru y-osi. Pomoću čvora *Combine XYZ* definira se translirajući vektor. Na ulaz tog čvora dovodimo određenu vrijednost y komponente dok su x i z postavljeni na nula. Logika iza odabira vrijednosti translacije je dobivena izvođenjem ovisnosti koja vrijedi za povećavanje vrijednosti parametra duljine. Kada se poveća duljina za jedan, tada se od izvorišta pomaknu zidovi za $\pm 0.5\text{m}$ (jedan zid je dugačak jedan metar i širi se podjednako u oba smjera). Ako se uzme duljina i podijeli se sa 2 dobije se relativni pomak koji nam treba za translaciju. Na taj relativni pomak se dodaje konstantna vrijednost koju je moguće odrediti pomicanjem jednog od zidova u sceni i promatrajući kako promjena te konstantne vrijednosti utječe na translaciju. Za drugi paralelni zid u toj grupi je ključno još dodati umnožak sa -1 pošto je on zrcalno preslikani u odnosu na prvi zid u grupi. Slična se logika koristi i za drugu grupu zidova, samo se tamo uspoređuje parametar širine i translacija se odvija u smjeru x-osi.

4.6. Dodavanje vrha krova

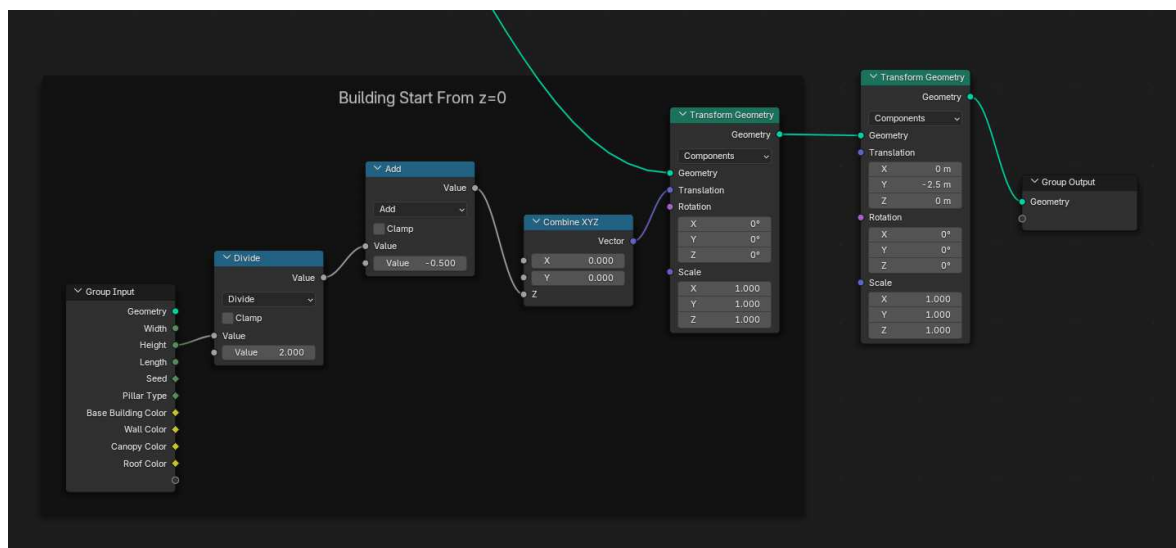
Vrh krova je jedna od zadnjih stvari koja se dodaje uz zidove, a služi primarno samo iz estetskih razloga jer nije poželjno da ako netko gleda zgradu iz ptičje perspektive da vidi da je šuplja i nema krova iznad spojenih zidova. Na slici (Slika 4.8) je prikazana geometrija krova. Koristi se od već prije definiran model rešetke, no umjesto da se rastavi rešetka na točke ona se prosljeđuje kao ravnina. Sama rešetka ovisi o promjeni parametra visine, stoga se mora primijeniti postupak povezivanja sa translacijom po Z-osi. Nakon svih promjena u geometriji se dodaje još materijal te se spaja geometrija zajedno sa zidovima pomoću finalnog *Join Geometry* čvora.



Slika 4.8 Struktura geometrije vrha krova

4.7. Normiranje pozicije i visine zgrade

Proces izrade je gotov, no još bi trebalo radi pedantnosti normalizirati zgradu tako da povećanjem parametra visine zgrada ne raste u oba smjera, već samo raste prema gore te je izvorišna točka zgrade u samome centru scene. Proces dobivanja rezultata je prikazan na slici (Slika 4.9). Postupak usklađivanja zgrade da ne raste prema dolje je sličan kao što je već bilo opisano za povezivanje zidova i povezivanje vrha krova. Uzima se parametar visine s kojim se utječe na translacijski vektor odnosno na njegovu z komponentu i time se dobiva da se zgrada pomiče prema gore za svaki dodatni kat. Na kraju svega se još primjenjuje proizvoljna translacija da bi se zgrada centrirala s obzirom na ishodište scene.

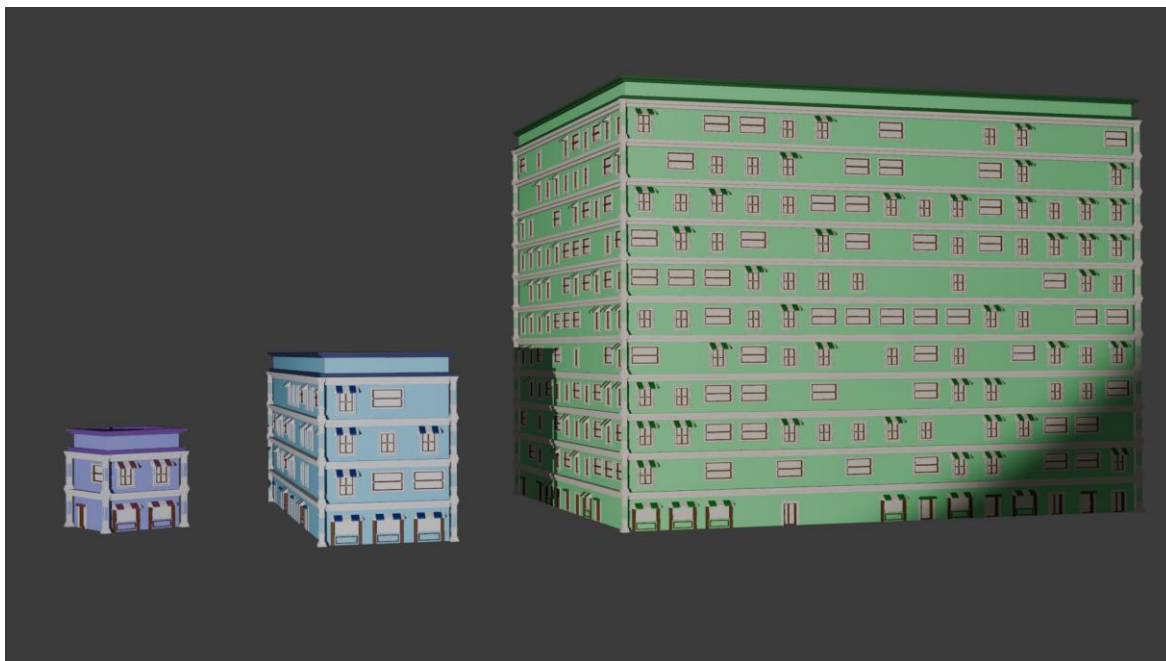


Slika 4.9 Normaliziranje parametra visine i postavljanje zgrade na $z = 0$

5. Evaluacija

5.1. Rezultati i usporedba

U sklopu rada se proučavalo proceduralno generiranje u kontekstu problematike proceduralnog generiranja zgrada. Istraživalo se kako se proceduralno generiranje može ostvariti u sustavu Blender pomoću geometrijskih čvorova. Fokus je bio na generiranju pročelja i nije bilo implementacije generiranja unutrašnjosti zgrada. Dobiveni rezultat se može vidjeti na slici (Slika 5.1). U usporedbi s originalnom implementacijom [6], trenutna verzija sadrži više opcija za korisnikove potrebe generativnog dizajniranja. Ima drukčije korištenje parametra za nasumično generiranje modela na svim katovima zgrade i dodatno su parametarski definirane boje elemenata zgrade. Također je broj osnovnih modela koji se mogu generirati puno veći nego u originalnoj implementaciji.



Slika 5.1 Primjeri zgrada generiranih pomoću geometrijskog čvora

5.2. Ograničenja i proširenja

Trenutna implementacija ima određena ograničenja. Najprije veličina zgrada se preporuča da ostaje u dimenzijama manjima od 100 x 100 x 100, bilo što više postaje vrlo sporo i računski zahtjevno za generiranjem jer se na svaku točku mora stvoriti jedan model, a promjenom jednog parametra se mora ponovo učitati cijeli objekt geometrijskog čvora. Prvo ograničenje nije potrebno mijenjati u budućim izdanjima jer u stvarnim gradovima nema situacija gdje bi generirali takve velike zgrade s toliko puno komponenta te bi se za takve veličine morala razviti potpuno drukčija logika gdje se možda katovi zgrade generiraju kao jedna cjelina umjesto puno manjih dijelova. Drugo ograničenje implementacije je da minimalna veličina zgrade će uvijek biti 2 x 2 x 2 zbog načina na koji dolazi do selekcije objekata koje je potrebno generirati na zidovima zgrade. U slučaju širine i duljine taj broj je dva zbog toga što se razdvajanjem mora dobiti barem jedan zid i barem jedan stup. Ako se postavi ručno vrijednost na jedan, vidjet će se da samo ostaje stup. U slučaju visine, ako se postavi na jedan, onda ostaje samo krov. Ako se postavi na dva, ostaju prizemlje i krov. Ovaj nedostatak također nije nešto što bi se trebalo promijeniti jer generalna selekcijska logika bi i s drugom implementacijom bila u suštini identična i ne može se izbjeći taj rubni slučaj bez neke dodatne logike za taj jedan specifični slučaj. Blender sam po sebi upozorava korisnika o toj grešci pa nema potrebe za razvijanjem zasebne logike. Treće ograničenje je nasumična logika iza generiranja pojedinih instanca modela na zidovima. Trenutno se na temelju *seeda* odabire jedna nasumična instanca bez neke logike iza toga što se smije nalaziti kraj prijašnje instance, odnosno u budućim implementacijama bi se trebalo poraditi na proširenju logike tog nasumičnog generiranja. Primjerice, korisnik želi dodati balkone umjesto prozora ili zida na višim katovima, no uvjet je da se dva balkona mogu protezati po više ćelija rešetke te ne smiju se međusobno spajati, već mora postojati barem jedna ćelija razmaka. Trenutna logika nasumičnog odabira ne bi bila u stanju podržavati ovu nadogradnju, već bi se morala proširiti. Još jedno moguće proširenje bi bilo dodavanje unutrašnjosti zgrada. Mogućnosti su velike zbog dobro strukturiranog selekcijskog procesa koji bi mogao biti koristan za generiranje dodatnih stavki uz translacije koje stavljaju te elemente unutar zgrade. Druga mogućnost bi bila da se razvije posebna logika čvora za unutrašnjost te samo spajanje za vanjskim dijelom bi bilo trivijalno. Također jedno od proširenja bi moglo biti uvođenje nepravilnosti u pojedinim modelima objekata poput prozora, vrata i krova. Temelj te ideje može biti čvor *Realize Instances* kojim je omogućen pristup osnovnoj geometriji modela.

6. Zaključak

Velika prednost proceduralnog generiranja je efikasnost. Vrijeme koje bi bilo provedeno na modeliranje potpunih gradova se može svesti na jednostavno namještanje parametara na jednome objektu sa puno manjih modela pojedinih elemenata zgrada. Rad je bio uspješan u ostvarenju zahtjeva generativnog dizajniranja. Geometrijski čvorovi u grafičkom sustavu Blender predstavljaju dobar alat za razvijanje proceduralnog oblikovanja zgrada. Sustav geometrijskih čvorova je modifikator objekta koji korisniku omogućuje da sam stvara svoj proizvoljni modifikator geometrije u nekom definiranom okruženju. Mogućnosti tog sustava su ogromne, broj funkcijskih čvorova vrlo velik, a načini kako ih međusobno povezati nebrojiv. Težina korištenja sustava je minimalna, no razumijevanje svih interakcija između čvorova i kako od ničega stvoriti nešto zahtijeva puno kreativnosti, znatiželje i mnogo uloženog vremena na usavršavanje. Rezultati rada će biti objavljeni kao .blender datoteka na stranici itch.io putem poveznice: <https://makshiz.itch.io/procedural-skyscraper>. Sadržaj datoteke je 12 osnovnih modela koji su bili spomenuti u poglavlju o modeliranju te jedan objekt nazvan *Building1*. Objekt sadrži modifikator geometrijskog čvora nazvan *Building Node 1*. Dupliciranjem objekta se dobiva više zgrada te se svakoj zgradi mogu namještatati parametri.

Literatura

- [1] Wikipedia contributors, *Procedural generation*, Wikipedia, Poveznica: https://en.wikipedia.org/wiki/Procedural_generation; pristupljeno: svibanj 2025.
- [2] Alkaim, A., *Procedural Generation for Architecture*, Poveznica: <https://web.ist.utl.pt/antonio.menezes.leitao/Rosetta/FinalReport/reports/ArturAlkaim-Report.pdf>; pristupljeno: svibanj 2025., str. 1-3.
- [3] Enciklopedija.hr, *CAD*, Enciklopedija.hr, n.d. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/cad>; pristupljeno: svibanj 2025.
- [4] Wikipedia contributors, *Generative design*, Poveznica: https://en.wikipedia.org/wiki/Generative_design; pristupljeno: svibanj 2025.
- [5] Blender developers, *Blender 4.4 Manual: Geometry Nodes*, Blender, Poveznica: https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/geometry_nodes/index.html; pristupljeno: travanj 2025.
- [6] Chong 3D, *Blender3D – Creating a semi-procedural Building with Blender 3.0 Geometry Nodes Fields (TUTORIAL)*, Youtube, (2021, prosinac). Poveznica: <https://www.youtube.com/watch?v=-rexNuTap44>; pristupljeno: travanj 2025.

Proceduralno generiranje modela zgrada

Sažetak

Ovaj rad bavi se proceduralnim generiranjem modela zgrada. Koristio se alat geometrijskih čvorova iz sustava Blender. Zgrada se generira pomoću osnovnih modela komponenata zgrade poput vrata, prozora i krova koji sačinjavaju cjeline zidova. Parametarski je definirani utjecaj na širinu, visinu i duljinu zgrade, nasumični broj koji definira razmještaj pojedinih modela na zidovima zgrade, tip stupa te razni parametri vezani uz bojanje materijala pojedinih dijelova zgrade.

Ključne riječi: proceduralno generiranje, Blender, Geometry Nodes, zgrada

Procedural generation of building models

Abstract

This work deals with the procedural generation of building models. The geometry nodes tool from the Blender system was used. The building is generated using basic component models such as doors, windows, and roofs, which form the wall sections. Parameters are defined to influence the building's width, height, and length, a random number determines the placement of individual models on the building's walls, the type of pillar, and various parameters related to the coloring of materials on specific parts of the building.

Keywords: procedural generation, Blender, Geometry Nodes, building