

Садржај

САДРЖАЈ.....	1
1. УВОД.....	3
2. 3D МОДЕЛИРАЊЕ	5
2.1 Први прототип – Држач елемената полице	6
2.2 Други прототип – Столарско помагало	7
2.3 Трећи прототип – Перфорирани поклопац лампе	10
2.4 Програмски пакет <i>Google SketchUp</i>	11
2.4.1 Историјски развој	11
2.4.2 Хардверска и софтверска захтевност програма	12
2.4.3 Корисничко окружење.....	13
2.4.4 <i>FILE</i> мени	15
2.4.5 <i>EDIT</i> мени	17
2.4.6 <i>VIEW</i> мени.....	19
2.4.7 <i>CAMERA</i> мени	19
2.4.8 <i>DRAW</i> мени	20
2.4.9 <i>TOOLS</i> мени	21
2.4.10 <i>WINDOW</i> мени.....	22
2.4.11 <i>RUBY</i> скрипте и додаци за <i>Google SketchUp</i>	23
2.4.12 <i>BEZIERSPLINE</i> скрипта	25
2.4.13 <i>CURVILOFT</i> скрипта	31
2.5 Резултати моделирања прототипова	32
3. КОНВЕРЗИЈА И ПРЕНОС ПОДАТАКА.....	34
3.1 Конверзија модела у <i>.stl</i> формат.....	34
3.2 Пренос података о моделима	37
4. ПРОВЕРА И ПРИПРЕМА	37
4.1 Поправка грешака у <i>.stl</i> фајловима	38
4.2 Планирање израде	39
4.2.1 Припрема за израду прототипова на 3D штампачу <i>RapMan</i>	40
4.2.2 Припрема за израду прототипа на глодалици <i>Modela MDX-20</i>	42

5. ИЗРАДА ПРОТОТИПОВА	45
5.1 Моделирање депоновањем топљеног материјала (<i>FDM</i> технологија)	45
5.1.1 Принцип рада	46
5.1.2 Општи поступак израде модела	47
5.1.3 Материјали за депоновање	49
5.1.4 Предности и недостаци <i>FDM</i> технологије	50
5.1.5 Примене <i>FDM</i> технологије	51
5.1.6 Комерцијална решења	52
5.1.7 Истраживање и развој	53
5.2 Израда прототипова на 3D штампачу <i>Rap Man</i>	54
5.3 <i>CNC (Computerized numerical control mashine)</i> обрада	58
5.4 Израда прототипа на <i>CNC</i> глодалици <i>Roland modela MDX-20</i>	59
6. ПОСТПРОЦЕСИРАЊЕ	64
7. ЗАКЉУЧАК	69
ПРИЛОГ РАДУ 1	70
ПРИЛОГ РАДУ 2	88
ЛИТЕРАТУРА	112

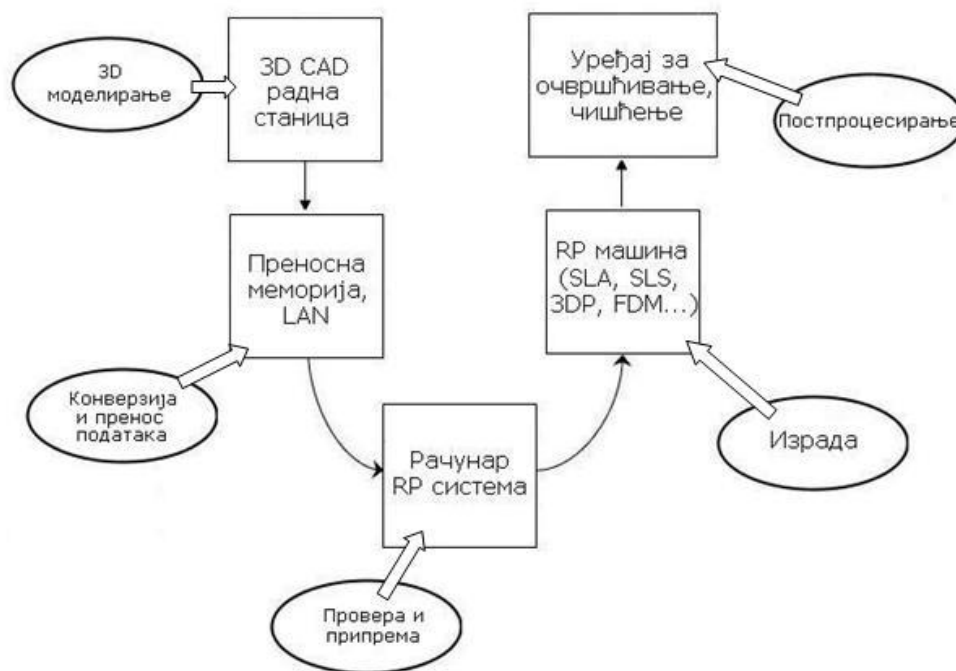
1. УВОД

Низ околности које су последица развоја нових рачунарских система, опреме и производних технологија, допринеле су великом броју ситуација у којима се различите инжењерске дисциплине међусобно преплићу и допуњују. Створене су могућности за формирање нових интердисциплинарних области које обједињују различите научне и истраживачке правце. У оквиру информационих технологија усмерених ка индустријској пракси, може се установити област брзе израде прототипова (енгл. *Rapid Prototyping / RP*), која представља скуп повезаних процеса који се одвијају од почетка до краја развојног пута прототипа једног производа.

Сврха израде прототипа је да апроксимира производ пре његове серијске производње, у функцији раног тестирања и уочавања конструктивних грешака од стране учесника развојног циклуса - дизајнера, инжењера, инвеститора и свих осталих чинилаца у пројекту. Коначан циљ је брза и конкретна размена идеја и благоверемена оптимизација дизајна и технологије, ради уштеде времена и новца. Важно је уочити проблеме у раним фазама развоја, јер што је производ ближи финалној производњи промене на пројекту су скупље.

Примена *CAD/CAM* софтвера за *3D* запреминско моделирање омогућава аутоматизацију процеса, поступака и активности у развојним фазама израде прототипа, чиме се врше уштеде у времену, смањује могућност грешака и свеукупно подиже ниво квалитета прототипа. Физички прототип се директно израђује на основу дигиталног геометријског модела, који може бити добијен коришћењем *CAD* софтвера или *3D* скенирањем постојећег објекта техникама реверзибилног инжењеринга. Четири главна аспекта *RP* технологија су врста извора улазних података (геометријски или физички), метод израде прототипа (субтрактивни, адитивни, формативни), материјал израде и врста примене. У ланцу *RP* система (Слика 1.) постоји 5 главних корака: 1) *3D* моделирање, 2) конверзија и пренос података, 3) провера и припрема, 4) израда и 5) постпроцесирање. У корацима 3) и 5) респективно, процес се може итеративно понављати до достизања задовољавајућег квалитета модела или прототипа.

У овом раду је кроз три примера описан и заокружен циклус развоја прототипа на основу почетне идеје (менталне слике производа) и жељене намене, до функционалог тестирања. Паралелно са описом поступака у ланцу настајања конкретних прототипова, описане су теоријске основе релевантне за те процесе и употребљена софтверска и хардверска решења. Након постављања генералне концепције израде на основу задатих типова делова, одабран је софтвер у коме ће се вршити главно моделирање (*Google SketchUp*), методе којима ће модели бити произведени (*CNC* обрада и екструдирање топљеног материјала) и уређаји који могу одговарајуће изградити modele прототипова. За модел који је од алуминијума употребљена је *CNC* машина *Roland modela MDX-20*. За друга два модела коришћен је *3D* штампач *RapMan*, који ради на принципу екструдирања топљеног материјала. На крају су модели испитани, функционално тестирани и донесени су закључци о успешности процеса и утрошеном времену. У прилозима раду су објашњени конкретни кораци при моделирању произведених прототипова у програму *Google SketchUp*.



Слика 1. – Ланац RP процеса

2 3D МОДЕЛИРАЊЕ

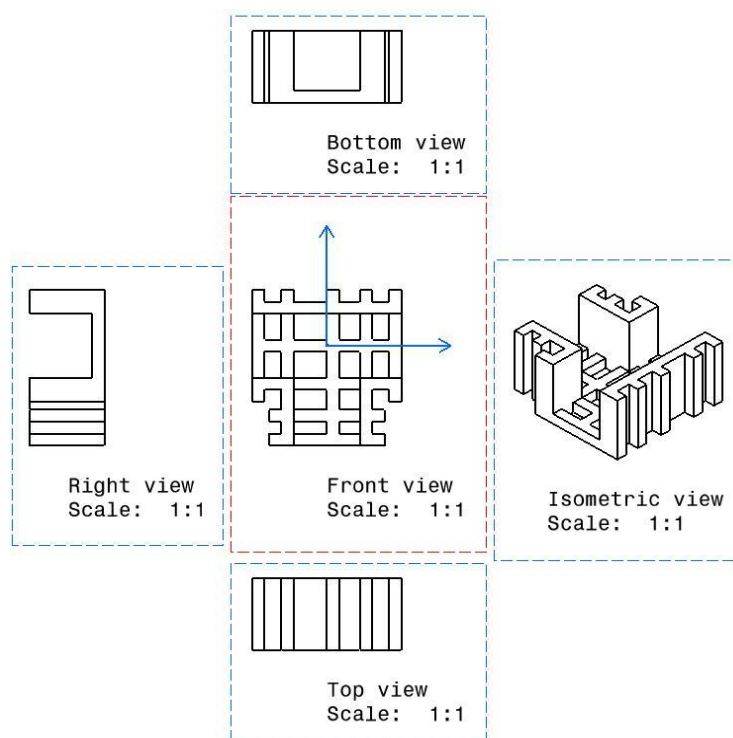
Савремени *CAD/CAM* софтвери у коме се креирају геометријски модели будућих прототипова садрже специјализоване наменске модуле у којима се може обављати анализа напона, *FEM* анализа, планирање производње, укључивање *NC* програмирања итд. Услед постојања различитих система и машина којима се израђује прототип, избор оптималних *CAD* алата је од великог значаја за успешност *RP* процеса. Дизајнери морају константно да уче и стичу искуство у раду са *RP* системом, јер различите структуре модела захтевају одабир правилне оријентације за израду, креирање потребних ослонаца и израду тешко изводљивих структура као што су танки зидови, мали прорези и отвори итд.

Тродимензионални геометријски модел који се добија моделирањем у неком *CAD* програму мора бити представљен затвореним површинама које одређују запремину предмета, тј. подацима морају бити дефинисани унутрашњост, спољашњост и границе предмета. Затворени тродимензионални геометријски модели обезбеђују да сви хоризонтални пресеци буду затворене површине, што је суштински важно за исправност *RP* процеса.

На избор *CAD* софтвера у коме ће се дизајнирати модели будућих производа, поред функционалних особина програма и структура уграђених алата, битан утицај има и цена софтверског пакета. Професионална софтверска решења имају скупе лиценце за коришћење, јер поред основних алата за моделирање, нуде далеко комплексније модуле који обезбеђују напредне могућности управљања прототипом кроз цео његов животно циклус. Међутим, у овој области се све чешће могу наћи бесплатни софтвери који, захваљујући отвореном коду и могућностима надоградње, могу сасвим задовољавајуће одговорити захтевима. Један од таквих је програмски пакет *Google SketchUp*, који је надограђен напредним алатима писаним у *RUBY* програмском језику у виду скрипти и коришћен је за моделирање сва три прототипа у овом мастер раду.

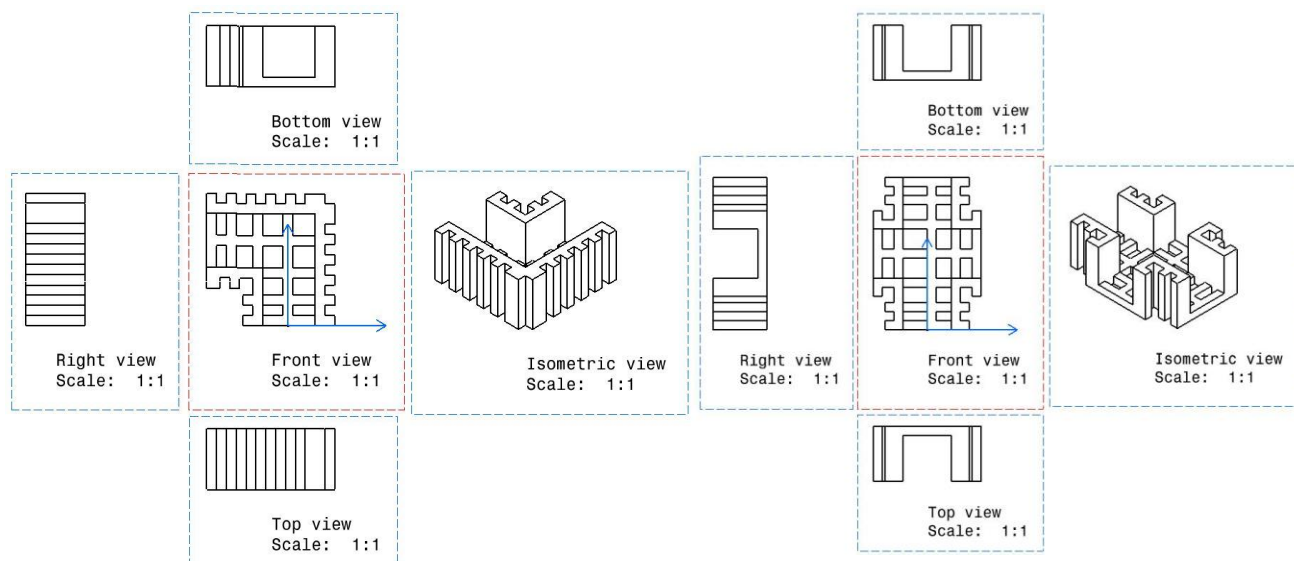
2.1 Први прототип – Држач елемената полице

Као први задатак у овом мастер раду постављен је проблем израде прототипа универзалног држача који може да омогући спајање дрвених сегмената полице. Идеја је била да се пронађе решење за брзу монтажу и демонтажу различитих дрвених елемената за полицу, који су стандардне дебљине 16mm. На основу идеје и грубе скице, закључак је да унутрашњи отвор држача од 16mm треба да буде у облику слова Т, са извесном еластичношћу ради чвршћег контакта са плочама (Слика 2.).



Слика 2. – Технички цртеж држача елемената полице у облику слова „Т“

На телу држача су ради постизања еластичности остављене решеткасте шупљине, а са спољашње стране као ојачање додата ребра. Накнадним поступком израђена су још два типа елемента, унакрсни и угаони, који су допринели бољим естетским и функционалним карактеристикама полице (Слика 3.). Прототипови ових држача ће бити израђени методом екструдирања топљеног материјала. Кораци при моделирању овог модела у *Google SketchUp*-у објашњени су у првом прилогу овог мастер рада.



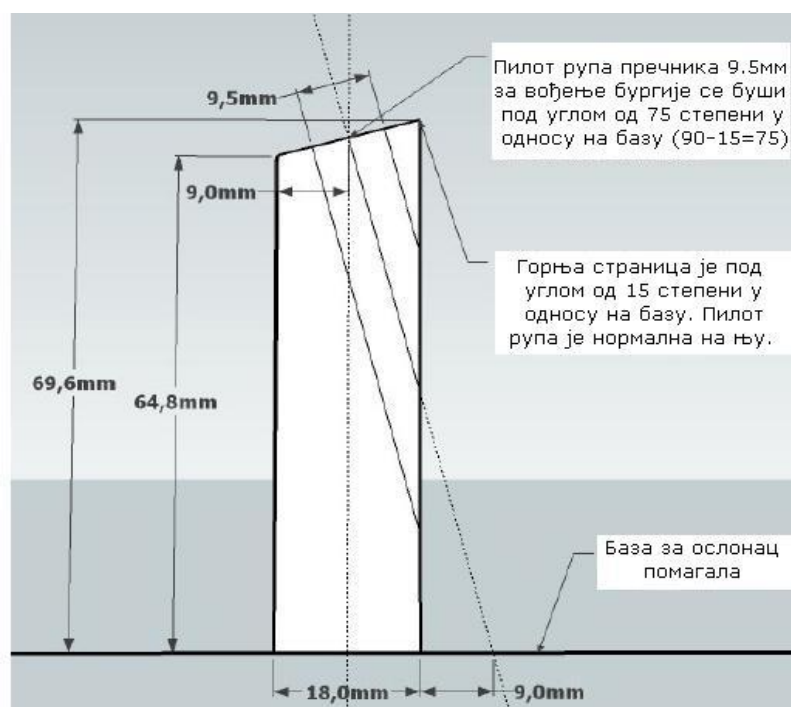
Слика 3. – Технички цртежи држача елемената полице – угаони и унакрсни

2.2 Други прототип – Столарско помагало

Други задати проблем се односи на конструисање прототипа столарског помагала које омогућава остваривање најчврће могуће везе вијцима између дрвених елемената намештаја. Ово помагало практично обезбеђује да се отвор, кроз који се завија самоурезујући вијак при спајању дрвених елемената, буши под углом од 15 степени у односу на даску и практично обезбеђује идеалан положај вијка. Бушење под овим углом и тачну дубину отвора би било немогуће извести без овог помагала, које практично представља вођицу за бургију која прави отвор. Поред правилног угла, потребно је задовољити услов да вијак уђе на тачно одређено место у даскама које се спајају и да вијак мора бити тачно одређене дужине и конструкције. Помагало које је овде конструисано намењено је за спајање дасака дебљине 18mm, док се прорачун за остале дебљине дасака може извести на основу конструкције овог помагала. Оваква веза између дрвених елемената је до 35% чвршћа у односу на класичну.

Веза између дасака може се остварити када су даске које се спајају у истој равни – „I“ веза, и када су даске у равнима које су међу собом нормалне – „L“ веза. Прво се мора конструисати основа, тј. „срце“ помагала, чије спољашње димензије и облик се могу касније мењати и имати разне форме. При изради основне геометрије помагала (Слика 4.) морају се уважити следећа правила:

- Основа (доња страница) треба да буде минимално димензија 18x18mm ради лакшег уклапања у финалну конструкцију,
- Центар пилот рупе мора да се налази у пресеку дијагонала горње површине, која је под углом од 15 степени у односу на основу,
- Висину помагала одређује позиција врха бургије на растојању од 9mm ($18/2=9$) од бочне странице помагала, у равни основе помагала (половина даске у коју се буши пилот рупа),
- Пречник пилот рупе мора бити 9mm, јер су на тржишту углавном доступне „цоловне“ специјализоване бургије од 3/8". Ове бургије имају важну конструкцијску особину да им је пречник врха нешто већи од 4mm, а дужине је око 15mm. Прелазак са већег на мањи пречник је оштар како би се омогућила равна површина на коју треба да легне доња површина равне главе вијка.



Слика 4. – Графички приказ геометрије помагала за даске дебљине 18mm

Вијци који се користе за спајање дасака ових димензија (*Слика 5.*) морају испуњавати следеће конструкцијске особине:

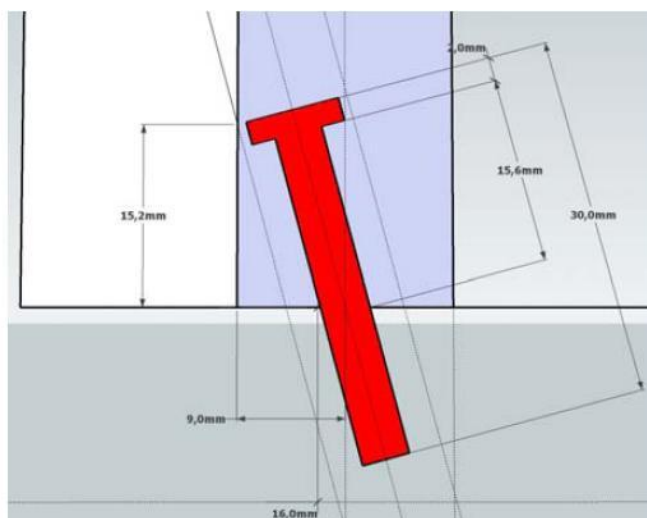
- Вијак мора бити самоурезујући, с обзиром да пробушена пилот рупа у првој дасци дефинише путању, а у другу даску се вијак урезује,

- Глава вијка треба да буде што равнија са доње стране како би се остварио што бољи контакт са даском у равном дну пилот рупе,



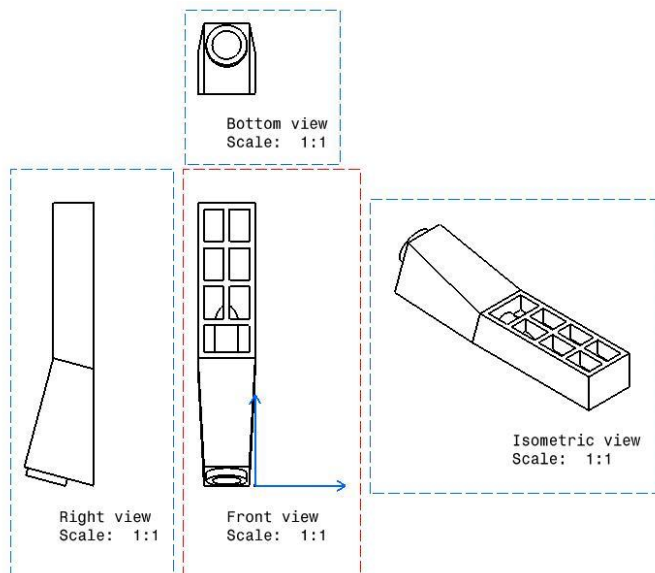
Слика 5. – Изглед бургије са два пречника профила бушења: 9.5mm и 4.4mm и самоурезујући вијци: 4x25mm, 4x30mm, 4x40mm и 4x60mm

- Називна мера вијка треба да буде 4mm, док је пречник ужег дела врха нешто већи; навој вијка не би требало да има контакт са даском која се буши,
- Дужина вијка у „L“ вези треба да буде 30mm, док у „I“ вези (друга даска у односу на помагало обавезно поравната са спољном страном даске која се буши) максимално износи 40mm; дужи вијци могу да оштете комаде који се спајају, а краћи могу бити узрок слабије везе,
- Ход навоја вијка зависи од врсте дрвета: мекше дрво – већи ход, тврдо дрво – мањи ход,
- На телу вијка, испод главе, треба да има минимум 15mm без урезаног навоја како се не би створили џепови између елемената који се спајају, а које вијак треба да притегне један уз други.



Слика 6. – Идеалан положај вијка у односу на даску дебљине 18mm при „L“ вези

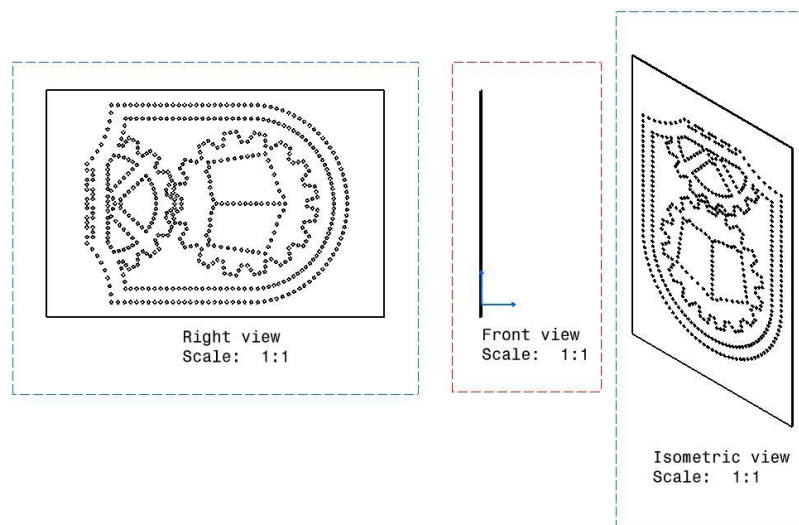
Уважавајући предходне смернице, конструисан је предлог модела прототипа помагала са јединственом спољашњом формом, које је приказано на слици 7. Израда прототипа је предвиђена методом екструдирања топљеног материјала.



Слика 7. – Технички цртеж модела прототипа столарског помагала

2.3 Трећи прототип – Перфорирани поклопац лампе

Трећи производ чији прототип је потребно произвести је перфорирани алуминијумски поклопац лампе, чији отвори при позадинском осветљењу образују контуру логоа машинског факултета (Слика 8.). Моделирање је сведено на планиран распоред отвора на алуминијумској табли дебљине 0.25mm. Израда прототипа је предвиђена CNC обрадом на машини *Roland Modela MDX-20*.



Слика 8. –
Технички цртеж
модела прототипа
перфорираног
поклопца лампе

2.4 Програмски пакет *Google SketchUp*

SketchUp је програм намењен за 3D моделирање, који је развила компанија *Last Software*, основана 1999. године од стране Бреда Шела и Џо Еша. Намењен је за дизајн у области архитектуре, цивилног инжењерства и машинског инжењерства, а користи се и за израду филмова, игара и сл. Програм који је конципиран као алат за једноставну употребу, у основној намени омогућава постављање модела на интернет, унутар апликације *Google Earth*. Модели се постављају на веб сајт *Google 3D Warehouse* и омогућују осталим корисницима да прегледају и преузимају постављене моделе. Основна верзија програма може се бесплатно преузети са интернета.

2.4.1 Историјски развој

Прва верзија програма се појавила у августу 2000, као 3D алатка за моделирање намењена најширој заједници. Поред тога што је намењен почетницима у свету 3D дизајна, он је окренут и професионалцима који желе да цртају на начин којим би то радили користећи оловку и папир, у једноставном и елегантном окружењу које се лако учи. Програм је освојио награду *Community Choice Award* на својој првој изложби 2000. Године. Кључ успеха и популарности овог програма је у кратком времену учења у поређењу са другим 3D алатима, а делом и захваљујући јединственој “*Push/Pull*” технологији, која је и патентирана од стране њених аутора.

Компанија *Google* је преузела *Last Software* 14. марта 2006, да би *SketchUp* у верзији 6 са новим алатима изашао 9. Јануара 2007. Нови *Google SketchUp LayOut* укључује 2D векторске алате, као и изглед страница (A3 *Landscape*, A4 *Portrait...*), који имају намену да се лакше презентују радови без коришћења екстерних алата у те сврхе. Фебруара 2007. покренуто је одржавање, односно ажурирање софтвера, што је исправило велики број грешака, али није донело нове могућности и алате.

Са изласком *SketchUp*-а верзије 7 у новембру 2008, добијени су нови лако употребљиви алати и интеграција *SketchUp* компоненти за преглед у виду апликације *Google 3D Warehouse*, нове динамичке компоненте и побољшане перформансе *Ruby API*.

Септембра 2010, излази верзија 8 *Google SketchUp*-а, чија побољшања укључују коришћење глобалног позиционирања модела уз помоћ *Google maps* апликације, прецизније терене, *Building Marker* интеграцију (алат за моделирање зграда) и преглед сцена. Коначно, 1. Јуна 2012. компанија *Trimble Navigation* преузима развој програма од *Google*-а, те 21. маја 2013. године избацује актуелну верзију *SketchUp Pro 2013*, праћену са новим изгледом сајта, екстензијама и додацима.

Бесплатна верзија *SketchUp*-а омогућава да се 3D модели могу извести и сачувати у *.dae* и *.KMZ* формату. Pro верзија нуди далеко већи број подржаних формата: *.3ds*, *.DWG*, *.dxf*, *.FBX*, *.obj*, *.XSI*, и *.WRL*. *SketchUp* такође може извести слику модела, тј. "screenshot" као *.BMP*, *.png*, *.jpg*, *.tif*, док PRO верзија подржава *.pdf*, *.eps*, *.erx* и још неке формате графике.

Бесплатна варијанта *SketchUp*-а подржава *Ruby* скрипте, што је дало могућност да се заобиђу претходно поменуте баријере приликом увоза, извоза и конверзије модела. Од верзије 4 и касније, сам програм може се проширити додацима који су писани у *Ruby* програмском језику, са циљем да се повећају могућности *SketchUp*-а. Програмери имају могућност креирања својих додатака и алата, које потом објављују на многим форумима и омогућавају широкој заједници да их преузима. *SketchUp* има интегрисану *Ruby* конзолу, која омогућава окружење у којем програмери могу експериментисати са *Ruby* наредбама и методама.

Захваљујући поменутиим могућностима, проширивости, релативно једноставној и брзој инсталацији и чињеници да се ради о практично бесплатном софтверу, *Google SketchUp* се намеће као алат са веома великим потенцијалом у области брзе израде прототипова.

2.4.2 Хардверска и софтверска захтевност програма

Препоручени Софтвер:

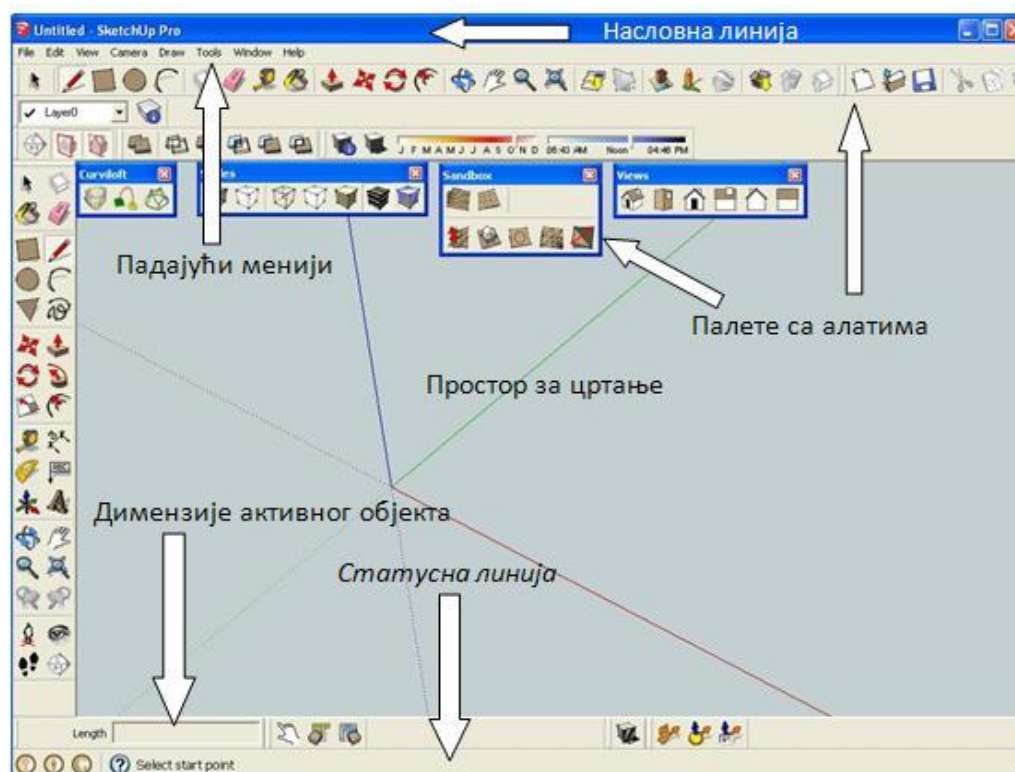
- *Microsoft Internet Explorer 7.0* или новији,
- *.NET Framework верзије 2.0*,
- *SketchUp* ће се радити на 64-битној верзији оперативног система, али ће се извршавати као 32-битна апликација.

Препоручени хардвер:

- 2 + GHz процесор,
- 2 + GB RAM меморије,
- 500 MB слободног простора на тврдом диску,
- 3D класа видео картица са 512 + MB меморије или више,
- Графичка картица која подржава *OpenGL* верзије 1.5 или више.

2.4.3 Корисничко окружење

Кориснички интерфејс *SketchUp* - а дизајниран је да буде једноставан и лаган за коришћење. Главни делови корисничког интерфејса су насловна линија, падајући менији, палете алата, подручје за цртање, статусна линија и поље за унос димензија (Слика 9.).



Слика 9. - Изглед основног корисничког окружења програма Google sketchUp

Простор за цртање је подручје где се реализује приказ креираног модела. 3D простор подручја за цртање је дефинисан визуелно помоћу оса. Падајући менији се налазе испод насловне линије. Већина *SketchUp* алата, наредби и подешавања су доступни унутар ових менија. Менији који се појављују као подразумевани су: *File, Edit, View, Camera, Draw, Tools, Window, Plugins* и *Help*. *Geolocation* дугме приказује информације о локацији активног модела. Ако се кликне на дугме приказаће се дијалог који пружа информације о локацији, а овде се може дефинисати локација ако то није претходно учињено. Кликком на дугме *Credits* подешавају се ауторска права модела који се креира. *Google* дугме се користи за пријављивање на постојећи *Google* налог. *Instructor* дугме отвара прозор који представља интерактивни дијалог помоћи кориснику.

Алат за димензије приказује информације о димензијама за време цртања. Такође могу се уносити вредности за дужину линије, дужину страница правоугаоника, релативне координате, апсолутне координате итд.

Палете са алатима се могу налазити испод менија и дуж леве стране и садрже од стране корисника дефинисани скуп алата и контрола. По подразумеваним поставкама, *Google SketchUp* приказује једну траку са алаткама испод менија. Додатне траке са алаткама се налазе у *View>Toolbars* подменију. Насловна линија садржи стандардне контроле оперативног система *Microsoft Windows* (*Close, Minimize* и *Maximize*) и назив тренутно отвореног фајла. Празан простор за цртање се појављује када се покрене *SketchUp*, при чему је име фајла на насловној линији "*Untitled*", што значи да још није сачуван текући рад.

По подразумеваној поставки, мерна алатка се налази на десној страни статусне линије. Мерна линија са алаткама приказује информације о димензијама за време цртања. Такође се може унети вредност, рецимо дужина линије која се тренутно црта. Ова алатка садржи следеће могућности:

- Може се откуцати вредност у пољу за унос пре или после операције, али све док се не започне нова операција,
- Мора се притиснути *Enter* тастер ради потврде откуцане вредности,
- Може се променити вредност геометрије више пута пре него што се започне нова операција,
- Мерна алатка се не може поново користити за унос вредности за наредбу када се напусти та наредба,

- *SketchUp* ће приказивати знак тилда (~) пре вредности у случају када вредност у пољу за унос није прецизна,
- Није потребно да се кликне на поље за унос пре укуцавања жељене димензије.
- Може се откуцати вредност у пољу за унос помоћу алтернативног мерног система у односу на подразумевани мерни систем. *SketchUp* ће конвертовати вредност у подразумевани систем,
- Мора се користити одговарајући знак за раздвајање координата за одређени регион у *Toolbar*-у за мерење. Раздвајање се користи зависно од регионалних поставки: енглески и шпански језик региона (САД, Велика Британија, Јужна Америка, Средња Америка) користе зарез. Европске земље користе тачка-зарез.

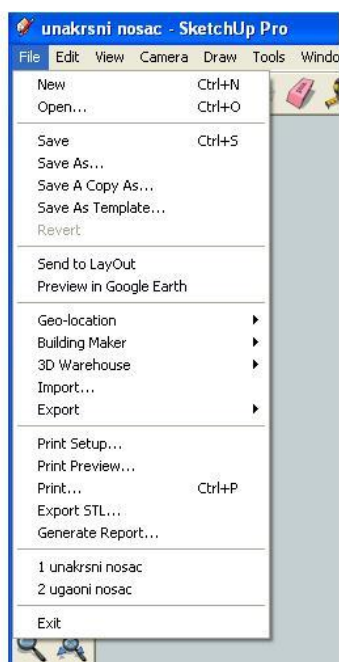
Као што је раније поменуто, може се уносити дужина, апсолутна координата и релативна координата, када се врши дефинисање тачке геометрије на следећи начин:

- Дужина - после постављања полазне тачке линије. Пример: *200 mm* или само *200* ако се ради у окружењу у ком су подразумевана јединица *mm*,
- Апсолутна координата – уноси се три броја одмах после постављања почетне тачке линије за идентификацију завршне тачке у односу на координатни почетак. Пример: [*30mm, 40mm, 70mm*],
- Релативне координате – уноси се три броја одмах после постављања почетне тачке линије за идентификацију завршне тачке, у односу на координате почетне тачке. Пример: <*1.5m, 4m, 2.75m*>.

2.4.4 **FILE** мени

Мени *File* садржи опције које се односе на *SketchUp* фајлове, укључујући и команде за креирање, отварање, чување, штампање, увоз и извоз фајлова модела (*Слика 10.*).

New опција менија се користи за затварање тренутног документа и приказује празан простор за цртање, тј. када се започиње нови модел. Пречица на тастатури: *CTRL+N*.



Слика 10. - Опције менија
FILE програма Google
SketchUp

Open опција менија омогућава отварање претходно сачуваног *SketchUp* фајла. Корисник ће бити упитан да сачува измене ако је модел већ отворен, јер само један фајл може бити отворен у *SketchUp* -у. Више фајлова се може отворити само ако се покрене више *SketchUp* програма. Пречица на тастатури: **CTRL + O**.

Save опција менија чува тренутно активни *SketchUp* модел. Када се затвори несачуван документ, или покуша излазак из програма, *SketchUp* ће затражити да се рад сачува пре наставка. Пречица на тастатури: **CTRL + S**.

Save as опција менија отвора дијалог који се користи да би се сачувао тренутни модел као нови документ. Овом опцијом фајлу се може доделити ново име, нова локација, а може се сачувати и у некој од претходних верзија програма *SketchUp*. Нови фајл ће бити приказан у прозору за цртање а претходни ће се аутоматски затворити.

Save copy as опција менија служи како би се сачувао нови фајл на основу тренутног модела. Ова опција неће заменити или затворити тренутни фајл и корисна је за прављење инкременталне копије рада.

Save as Template опција менија служи да би се сачувао тренутно активан *SketchUp* документ као шаблон (енг. *Template*), од кога се може увек почети приликом креирање новог фајла. Ова опција менија покреће дијалог где се може дати име шаблону и подесите шаблон као подразумевани шаблон. тј. да се учита сваки пут када се покрене *SketchUp*.

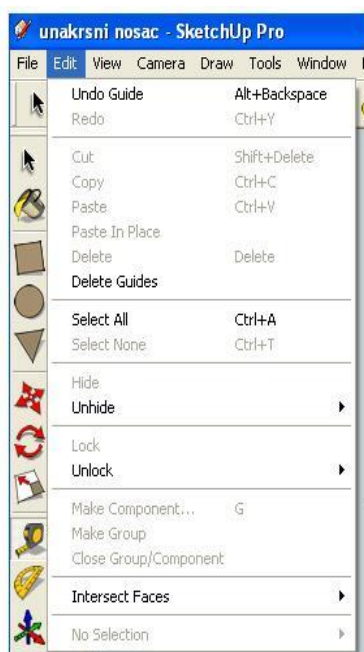
Revert опција се користи за враћање тренутног документа у последње сачувано стање. У *Pro* верзији *SketchUp*-а постоји опција *Send to LayOut* која служи како би се послао активни модел *LayOut*-у. *Preview in Google Earth* опција се користи за преглед у програму *Google Earth*.

Show Terrain служи за прелаз из *2D* и *3D* погледа на слику терена из *Google Earth*-а.

Export подмени се користи за извоз модела из *SketchUp*-а у формат који је разумљив другим програмима, што је корисно за дељење радова са другим људима или извоз цртежа за употребу у другим апликацијама. Може се извести као 3D модел, 2D графика или анимација.

Додатни формати фајлова су доступни за извоз када се користи *Google SketchUp Pro*. *Import* опција служи за увоз спољних фајлова, тј. за отварање модела креираних у другим програмским пакетима.

2.4.5 EDIT мени



Слика 11. - Опције менија
EDIT програма Google
SketchUp

Edit мени садржи опције које омогућавају да се изврше измене *SketchUp* геометрије (Слика 11.). Међу овим опцијама су и оне за креирање и измену група и компоненти, операције приказа, и стандардне команде *Cut*, *Copy* и *Paste*.

Undo се користи да би се опозвале последње измене цртежа или последња команда. *SketchUp* омогућава да се пониште све операције које су извршене, једна по једна, да се врати стање у којем је сачувана датотека. Број могућих секвенцијалних команди *Undo* је ограничен на 100 корака. *Redo* поништава последњу *Undo* команду и враћа модел у стање пре његовог извршавања.

Cut уклања изабрани елеменат из модела и ставља у *Clipboard* тј. радну меморију оперативног система. Садржај *Clipboard*-а онда може бити уметнут у било који отворен *SketchUp* документ помоћу *Paste* опције менија.

Copy сместа копију изабраних елемената модела у *Clipboard* без брисања елемента из модела. Садржај *Clipboard*-а онда може бити уметнут у било који отворен *SketchUp* документ помоћу *Paste* команде.

Paste команда служи да би се налепио садржај *Clipboard*-а у активни *SketchUp* документ. На овај начин додата геометрија ће бити везана за курсор миша и постављена у документ тек када буде изабрана жељена позиција.

Paste in Place опција служи како би се поставио елемент на исто место са ког је претходно уклоњен опцијом *Cut* или само ископиран опцијом *Copy*.

Delete уклања изабрани елемент из тренутно активног *SketchUp* модела. *Delete Guides* опција менија служи за брисање свих помоћних линија које се налазе у области за цртање.

Select all служи да би се изабрали сви ентитети у моделу. Геометрија која је претходно сакривена опцијом *Hide* не може бити изабрана овом наредбом. *Select None* поништава активни избор елемената.

Hide служи како би се сакрили изабрани модели. Опција је корисна како би се поједноставио тренутни приказ тј. преглед што је корисно приликом рада са великим моделима. Супротна опција *Unhide* поништава опцију *Hide*, и она нуди три подменија: *Selected*, *Last* и *All* који омогућавају да се прилажи тренутно изабрани скривени елемент (може се видети активирањем опције *View>Hidden Geometry*), последњи сакривен опцијом *Last* или све скривене елементе у активном документу, опцијом *All*.

Опција *Lock* се користи за блокирање било које компоненте или групе која не жели да се помера или измени. *Unlock* даје две подопције *Selected* и *All*. Прва служи како би се откључале изабране компоненте и групе, а друга да би се откључале све закључане компоненте и групе у активном документу.

Make Component... служи за креирање компоненте од изабраног елемента. *Make Group* креира групу од изабраних ентитета.

Close Group/Component опција се користи да би се изашло из групе, или компоненте, тј. када се заврши са изменама.

Intersect Faces опција служи како би се креирала линија пресека два објекта. Последња опција као и њене подопције у овом падајућем менију ће се мењати у зависности од тога који тип објекта је изабран, рецимо када је селетована површина биће насловљена са *Surface* и нудиће опције за манипулисање са површинама. Истим опцијама може се приступити и десним кликом миша на селетовану површину. Ако је тренутно изабрана компонента или група понудиће се опције за измене или узвоз изабраног објекта.

2.4.6 VIEW мени



Слика 12. - Опције менија VIEW програма Google SketchUp

У менију *View* опције менија су намењене за мењање приказа ентитета у оквиру модела. *Toolbars* подмени садржи све палете алата (Слика 12.). У оквиру овог подменија могу се изабрати палете треба да буду приказане, а које не. Последња опција овог подменија је *Large Buttons*, која приказује велике иконе у палетама алатки што је корисно код екрана мале резолуције.

Scene Tabs укључује приказ картица сцена. *Hidden Geometry* опција се користи када се приказује скривена геометрија која је сакривена помоћу *Hide* опције дајућег менија *Edit*. Скривена геометрија приказује у радном делу прозора унакрсне шрафуре (ивице су приказане испрекиданом линијом), чиме је омогућен изабер геометрије. *Section Planes* укључује приказ пресека ентитета.

Axes укључује приказ оса. *Guides* приказује помоћне линије. *Shadows* опција активира сенке. *Fog* опција активира маглу. *Edge Style* подмени садржи опције за приказивање ивица. *Face Style* подмени садржи опције за подешавање приказа равних површина. *Component Edit* подмени садржи команде за промену приказа компоненти. *Animation* подмени нуди неколико опција у вези са управљањем сценама и анимацијом.

2.4.7 CAMERA мени

Camera падајући мени нуди опције за мењање приказа модела у радном делу прозора (Слика 13.). *Previous* опција враћа на претходни поглед, а опција *Next* приказује следећи сачувани поглед.

Standard Views опција омогућава приступ стандардним приказима: *Top*, *Bottom*, *Front*, *Right*, *Back*, *Left* и *Isometric*. Избор било које од ових модела приказа ће одмах бити примењени у активном прозор за цртање.

Parallel Projection омогућава прелазак у поглед паралелне пројекције. *Perspective* опција менија служи за приказ модела уперспективи.

Two-Point Perspective је начин приказа у коме ће се појавити све вертикалне линије на моделу. *Orbit* опција менија позива истоимени алат који омогућава да се ротира поглед.

Pan опција менија позива алат који служи за померање погледа. *Zoom* опција менија покреће алатку којом се врши зумирање. *Field of View* служи да се позове алат помоћу ког се може манипулисати са пројекцијом, проширити или сузити видно поље.

Zoom Window опција покреће алатку помоћу које се бира који део тренутно активног приказа се жели видети у пуном приказу. *Zoom Extens* приказује комплетан модел у пуном приказу.

Position Camera покреће алат који омогућава да се истраже фиксни прикази модела. Ова опција се често користи са *Walk* алатом да би се у нивоу очију прегледао цео модел. *Look Around* је алат који ротира камера око одабране стационарне тачке.



Слика 13. - Опције менија CAMERA програма Google SketchUp

2.4.8 DRAW мени



Draw падајући мени садржи све *SketchUp* алатке за цртање и обезбеђује алтернативу за њихово коришћење (Слика 14.). Исти алати се могу користити избором са панела са алаткама или одговарајућих пречица на тастатури.

Line опција менија позива алат за цртање линије ентитета, или ивица. *Arc* опција менија позива истоимени алат за цртање лукова. Лук се састоји од више повезаних правих линија тј. сегмената чији је број могуће дефинисати.

Freehand опција у менију позива алат који служи за креирање неправилних линија. *Rectangle* опција у менију позива алат за цртање правоугаоних елемената. *Circle* опција у менију позива алат за цртање круга.

Слика 14. - Опције менија DRAW програма Google SketchUp

Polygon опција менија позива алат за креирање правилних многоуглова (у које можемо уписати кружницу), који се може састојати од 3 до 100 страница.

2.4.9 TOOLS мени



Слика 15. - Опције менија TOOLS програма Google SketchUp

У менију *Tools* постоји приступ свим алатима за измену постојеће геометрије активног *Google SketchUp* документа (Слика 15.). Овај мени представља један од три механизма за приступ овим алаткама (додатни механизми су панели са алатима и пречице на тастатури).

Select позива истоимену алатку која омогућава одабир једног или више елемената модела.

Eraser опција позива алат који омогућава брисање елемената из области за цртање. *Point Bucket* се користи за додељивање материјала на површине модела. *Move* омогућава премештање, манипулацију и копирање геометрије. Ова алатка се може користити и за ротирање компоненти ентитета.

Rotate је алат за ротирање једног или више елемената у изабраној равни ротације. *Scale* опција покреће истоимени алат који омогућава промену величину одабране геометрије у односу на друге елементе у *SketchUp* документу.

Push/Pull алат се користи за манипулисање површинама модела. *Follow Me* алат се користи за извлачење површине дуж неке путање као што су ивице или линије. *Offset* опција менија позива алат који се користи за креирање копије линија и површина које су на дефинисаном растојању удаљене од оригиналне линије или површине.

Tape Measure опција позива алат који се користи за мерење димензија пре операција цртања. Овом наредбом могу се креирати помоћне линије ради лакшег конструисања елемената. Овом наредбом могу се и проверавати готови елементи тј. њихове димензије.

Protractor алат омогућава премештање углова или прављење помоћне линије под задатим углом. *Axes* алатка омогућава премештање осе цртежа. Ова алатка се често користи при изградњи правоугаоних објеката који су искривљени у односу на други, или како би се омогућило тачније скалирање ентитета који нису оријентисани дуж подразумеваних координатних оса.

Dimension опција у падајућем менију *Tools* позива алат који се користи за постављање димензија на модел. *Text* алат се користи за уметање текста на модел. Ова опција је корисна за стављања коментара на самом моделу.

3D Text се користи за креирање жељеног текста у тродимензионалном приказу. *Section Plane* опција покреће алат који омогућава да се изабере раван пресека у којој је потребно пресећи модел.

2.4.10 WINDOW мени

Window мени садржи опције за подешавања модела и менаџера за управљање приказа модела (Слика 16.). Ово подразумева дијалоге за подешавања поставки које утичу на модел, као што су сенке, подешавања екрана, информација о моделу. Менаџери су дијалози који управљају одређеним аспектима модела као што су сцене, материјали и компоненте.

Model Info опција приказује дијалог који пружа информације о моделу и окружењу у ком је конструисан. *Entity Info* опција приказује информације о тренутно изабраном објекту активног *SketchUp* документа.

Materials отвара дијалог који нуди листу доступних материјала које је могуће мењати пре почетка цртања. *Components* опција приказује претраживач компоненти и користи се за управљање компонентама.

Styles опција позива дијалог који садржи опције у вези са стиловима, као што су стилови ивица и стилови рендеровање површина тј. лица објеката. *Layers* служи за управљења слојевима.



Слика 16. - Опције менија *WINDOW* програма *Google SketchUp*

Outliner опција менија позива дијалог који се користи за приказивање компоненти и група у хијерархији.

Match Photo позива истоимени дијалог који служи за креирање прецизних 3D модела од слика. *Soften Edges* позива дијалог који се користи да се омекшају ивице модела. *Instructor* позива алат који се користи за приказивање информација о тренутно активном алату у форми интерактивног дијалога.

Preferences позива дијалог где се могу подесити различити параметри *SketchUp* програма. *Hide/Show Dialogs* опција менија служи да би се сакрили или показали сви тренутно активни дијалози. *Ruby Console* опција менија приказује конзолу у којој се може управљати *Ruby* скриптама. *Components Options* се користи за конфигурисање динамичких компоненти. *Components Attributes* опција менија користи се за развој динамичних компоненти. *Photo Texture* се користи за снимање текстура са фотографија и примену истих на тренутно активну површину.

2.4.11 **RUBY** скрипте и додаци за Google SketchUp

Ruby је интерпретирајући скриптни језик за брзо и једноставно објектно-оријентирано програмирање. *Google SketchUp Ruby API* је начин на који *Ruby* програмер може проширити могућности *SketchUp*-а како би се омогућиле опције које могу да поправе. Стварањем скрипти тј. текстуалних фајлова и копирањем истих у *SketchUp* фолдер *Plugins*, можемо унапредити *SketchUp* и омогућити многе додатне операције, које нису могуће у основној верзији. Нека од унапређења су следећа:

- Дизајнирање нових алата за цртање геометрије,
- Приписивање атрибута креираној геометрији, попут цене, имена добављача, итд.,
- Прелиставање атрибута пре генерисања извештаја, нпр. табеле коришћених материјала,
- Аутоматизовање уобичајених задатака као што су генерисање сцена из скупа ротација,
- Анимирање елемената, од цртања елемената до позиција камере,
- Комбинацијом претходно поменутих могућности може се доћи до многих додатних побољшања.

Да бисмо користили *Ruby* скрипте довољно је да фајл са екстензијом **.rb* или **.rbs* ископирамо у *c:\Program files\Google\Google SketchUp 8\Plugins* и скрипта ће бити аутоматски додата и доступна у окружењу *Google SketchUp*-а. При сваком покретању програм скенира директоријум *Plugins* и увози све доступне скрипте. Скрипте које немају горе поменућу екстензију ће бити игнорисане.

Importer интерфејс омогућава рад са разним форматима фајлова. Он нам пружа могућност креирање скрипте која може да увози читљив формат записа. На почетку се мора направити подкласа *Importer*-а и применити метода која ће обезбедити да се *Importer* појави у листи подржаних формата у дијалог прозору *Import* из падајућег менија *File*. То ће касније омогућити читавање фајла и креирање потребне геометрије у *Google SketchUp* окружењу. Најпре је потребно дефинисати суб-класу *Textimporter*, затим је неопходно дефинисати тип фајла, затим екстензију, а онда и *ID* фајла који се увози. Након тога дефинишу се опције које се нуде у десном делу дијалог прозора за увоз фајлова. У наставку скрипте кориснику се путем поруке враћа путања до фајла. Последња линија кода региструје *Importer* да би он био видљив за *SketchUp*.

Постоји велики број скрипти које се могу наћи на интернет сајтовима/форумима посвећених *SketchUp*-у и могуће је увести скоро сваки формат фајла у окружење *Google SketchUp*.

STL Import for SketchUp је *Importer* за **.STL* фајл формат који даје могућност *SketchUp*-у да увезе геометрију из *ASCII* и бинарног **.STL* фајла. *STL Import* чита податке о полигонима из **.STL* фајлова и увози их у *SketchUp*. Подаци о полигонима су уствари групе троуглова са координатама темена и нормалама. Овај *Plugin* је врло једноставно користити јер чим се ископира у фолдер *Plugins* инсталационог фолдера *SketchUp* га аутоматски препознаје приликом подизања програма и додаје нови подржани формат увоза у *Import* дијалог прозору.

2.4.12 **BEZIERSPLINE** скрипта

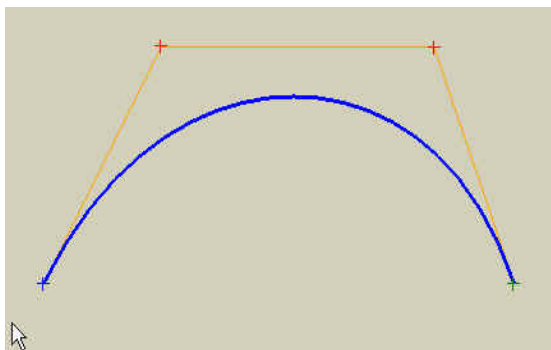
Овај *Ruby Script* је надоградња оригиналне *Bezier.rb* скрипте коју је развила компанија *Last software*. Ова скрипта отвара нове могућности у *Google SketchUp*-у тј. отвара нови спектар комплексних модела које је могуће моделирати. Основа коју је скрипта преузела је показала многа ограничења (на пример није било могуће променити број сегмената једне контуре или користити механизам ограничавања померања контролних тачака дуж само једне осе).

Аутор ове скрипте је у њу уградио следеће могућности:

- *Cubic Bezier spline* опцију са контролним тачкама на контури,
- *Uniform B-Spline* опцију са апроксимацијом заобљења контура,
- *Polylines* опцију тј. могућност да дефинишемо контуру од сегмената са слободним померањем тачака,
- Подешавање прецизности, уз могућност дефинисања броја сегмената приликом креирања контура као и измена дефиниција контура,
- Додавања и брисање контролних тачака у моду за измене,
- Креиране контуре могу бити затвореног и отвореног типа,
- Могућност затварања контура аутоматски,
- Закључавање померања тачака дуж само једне равни током креирања контура и дуж осе и равни током измене дефиниције контуре,
- Конверзија свих типова контура у други тип контуре,
- Поништавање последње акције приликом креирања и измене контуре,
- Превођења корисничког интерфејса на различите језике.

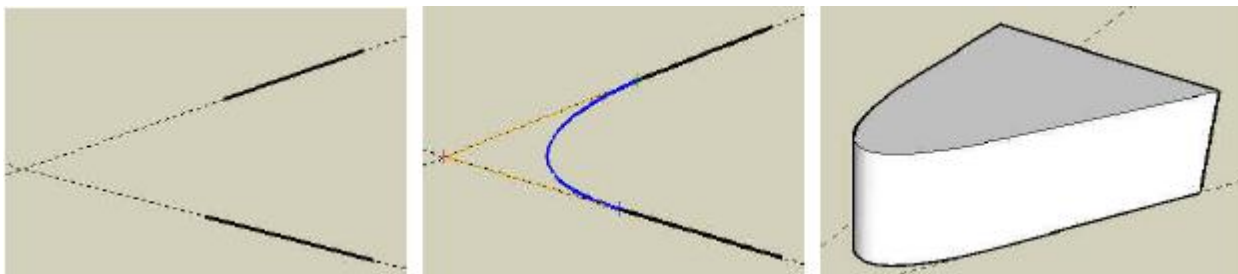
Скрипта је компатибилна са верзијама *SketchUp*-а верзије 5 и новијим, било да ли се ради о бесплатном издању или професионалној верзији. Тестиран је и без проблема ради на *Windows XP* и *Windows 7 32bit* и *64bit*-ној верзији оперативног система.

Bezier-ове криве су математички објекти који су дефинисани помоћу контролних тачака. Контролне тачке се дефинишу кликом левог тастера миша након активирања одабраног типа контуре. Степен *Bezier*-ове криве је број контролних тачака минус један ($n-1$).



Слика 17. - Classic Bezier-ова крива

Код класичне *Bezier*-ове криве са 4 контролне тачке (степен је 3), можемо приметити да постоји само почетна и крајња тачка на самој контури, док су остале тачке ван контуре (Слика 17.). Омогућено је постојање само једне контролне тачке поред почетне и крајње, што у оригиналној верзији није било могуће. Овај тип кривих може бити врло користан за спајање две копланарне праве (Слика 18.), с тим што се једна контролна тачка налази тачно у пресеку две линије. Ово је услов да крива тангира обе праве линије, поред тога да су почетна и крајња тачка на двема правама.

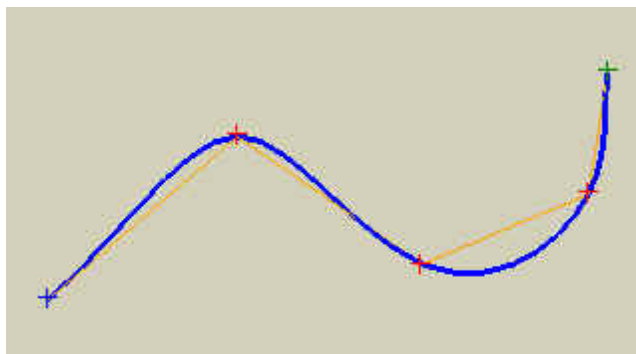


Слика 18. - Спајање две копланарне праве кривом

Главни проблем са овим типом кривих што није баш лако испратити жељени облик тј. шаблон. Ово се може постићи после доста вежбања са правилним позиционирањем контролних тачака. У пракси се *Bezier*-ове криве често користе у архитектури када се врши заобљавање профила које није могуће урадити помоћу лукова.

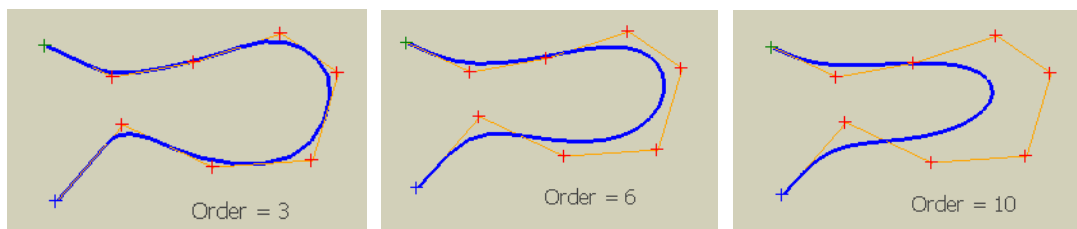
Cubic Bezier-ове криве су потпуно другачији математички објекти (Слика 19.). Оне су такође дефинисане помоћу групе контролних тачака, али математички алгоритам који стоји иза њих има тежњу да задржи контролне тачке на самој контури. Са њима је много лакше обликовати контуре и са више прецизности него код традиционалних *Bezier*-ових кривих, јер контролне тачке једноставно остају на контури.

За ову операцију потребан је већи број контролних тачака да би се постигао жељени резултат, што није проблем јер је могуће креирати десетине или стотине тачака (горња граница је 500).



Слика 19. - Cubic Bezier-ова крива

Uniform B-Spline криве су по дефиницији негде између *Bezier*-ових и *Cubic Bezier*-ових кривих. Овде контролне тачке нису на креираној контури и облик контуре може бити подешаван преко промене параметара, што генерално дефинише колико је заобљена крива. Тежина (енг. *Order*), дефинише колико ће контура да се налази близу контролне тачке (Слика 20.). Кључна карактеристика *B-Spline* кривих је што се променом позиције контролних тачака утиче само на локалну промену облика криве, док се генерално облик криве неће много променити.

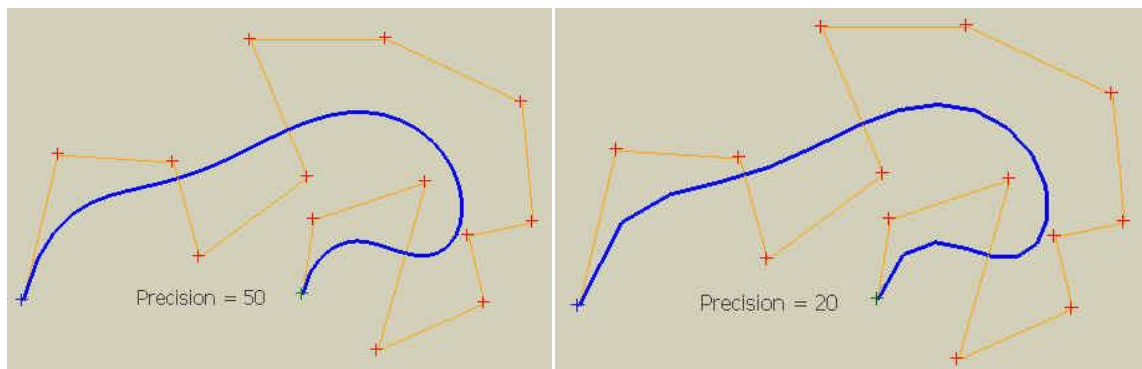


Слика 20. – Пример контуре са различитим тежинама

Имајући у виду да је у *SketchUp*-у све направљено од сегмената линија, приликом моделирања мора се дефинисати нови параметар који је назван „прецизност“, а од ког зависи колико прецизно цртеж одговара кривој која треба да буде креирана.

За *Classic Bezier* -ове криве прецизност је уствари укупан број сегмената приказане контуре. Овај број је независан од броја контролних тачака. На слици 21. се види *Classic Bezier*-ова крива са 15 контролних тачака.

Може се приметити да је облик криве у глобалу исти, али да је у првом случају при прецизности подешеној на 50 финији облик криве, због веће прецизности. Мењајући параметар прецизности може се подесити визуелни приказ модела без креирања превише комплексних кривих.



Слика 21. - Classic Bezier-ова крива са 15 контролних тачака

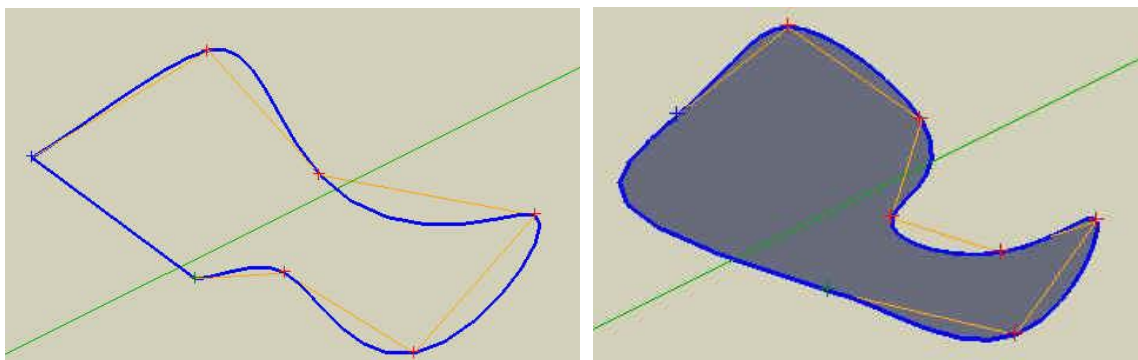
Код *Cubic Bezier* -ових кривих прецизност је број сегмената између две контролне тачке. Ако постоји 10 контролних тачака и прецизност је вредности 5, укупан број сегмената на кривој ће бити $(10-1)*5=45$. По подразумеваним вредностима прецизност је подешена на 5, што даје финији визуелни ефекат, али се може догодити да се добије велики број сегмената за комплексније криве. Мењајући прецизност могуће је фино подешавати резултујућу криву и наћи компромис између визуелног и рационалног броја сегмената на кривој.

Ако се послатрају затворене криве линије, *Bezier*-ова и *Cubic Bezier*-ова крива нису најбоље решење за њихово креирање. Разлог за то је што чак и ако се изабере да је последња тачка једнака почетној, ништа у математичком алгоритму који их дефинише неће обезбедити да њих две буду повезане заобљеном линијом. Аутор ове скрипте је креирао алгоритам који ће урадити фино повезивање кривом линијом, тј. алгоритам ће обезбедити да постоји јединствена тачка за почетак и крај контуре. Ако се контура налази у равни овај алгоритам ће да осигура да крива ограничава јединствену површину.

Контура се може затворити на два начина, и то помоћу једног сегмента тј. линије или помоћу групе сегмената, тј. контуре. Први начин може бити коришћен када су крајња и почетна тачка довољно близу или ако је потребна права линија која их повезује. Друга опција користи део *Bezier*-овог алгоритма који креира криву која тангира почетну и крајњу тачку на контури.

Архива која садржи додатак за *SketchUp* има неколико фајлова који треба да буду ископирани у *Plugins* фолдер *SketchUp* инсталационог фолдера.

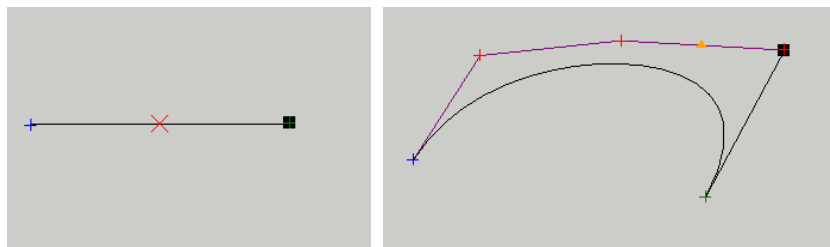
Фајл *bezierspline.rb* је главни скрипт фајл у коме су лоцирани главни алати и алгоритми. Фајл *LibTraductor.rb* је задужен за преводе *Plugin*-а, а подфолдер *BZ_Dir_12* садржи екстензије за посебне типове кривих, сет иконица за *toolbar* и документацију.



Слика 22. – Два начина затварања контура

Контуре се могу цртати као затворене и отворене. Код цртања кривих програм ће почетну тачку означавати са плавом бојом а крајњу са зеленом. Контролне тачке које се налазе између ће бити означене црвеном бојом. Приликом цртања може се приметити да се на сегменту налази црвени крстић, који показује да се тај сегмент неће налазити на полигонима који дефинишу криву. Крива линија може се дефинисати тако што ће се задати прва и последња тачка криве, па затим контролне међутачке.

Други начин цртања кривих је тако што се задају контролне тачке редом почев од прве, док се крајња тачка криве задаје последња. Да би се прешло из једног начина цртања у други, потребно је два пута брзо притиснути тастер *Shift*, и то се може учинити у току креирања криве.



Слика 23. - Дефинисање тачака криве линије

Пошто су дефинисане контролне тачке криве потребно је завршити криву. То се може урадити на неколико начина. Двокликом на последњу контролну тачку завршава се креирање криве и прелази се у мод за измену дефиниције криве.

Избором контекстуалног менија, (десни клик мишем) пружа се неколико опција за завршетак цртања. У случају да се достигне максимални број контролних тачака крива ће аутоматски бити завршена и прелази се у мод за измену дефиниције криве.

Опција *Undo* у *SketchUp*-у ће поништити целу креирану контуру, што може бити иритирајуће када се ради са комплексним контурама. Да би се избегла ова ситуација, у оквиру скрипте је понуђена опција *Undo Last Change* у контекстуалном менију, која спречава ову ситуацију и има исти učinak као притисак тастера *Esc* на тастатури.

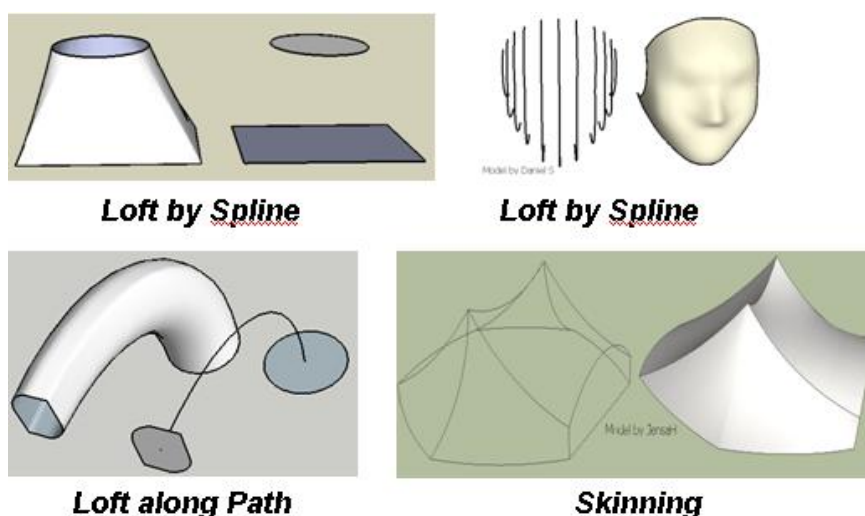
Као што је раније споменуто, аутор скрипте је уградио врло корисну могућност ограничавања померања контролних тачака дуж равни или дуж равни и оса (енг. *Plane Lock*). Ова опција је врло корисна јер није лако померати тачку дуж неке равни у *2D* репрезентацији *3D* простора. Постоји неколико начина ограничавања померања:

- У оквиру исте равни у којој леже прве три тачке. Скрипта назначавала да је корисник у овом моду са малим црним квадратом поред курсора. Ово је подразумевани мод јер се претпоставља да је већина кривих планарна.
- Дуж једне од равни координатног система, тако што се притисне један од тастера који одговара одређеној оси. Ограничење ће важити за раван управну на одабрану осу. Ако се притисне тастер *Up*, који одговара плавој или вертикалној оси, ограничење ће важити за хоризонталну раван. Ово ограничење се може искључити притиском на тастер *Down* који не одговара ниједној од оса.
- Могу се искључити сва ограничења притиском на тастер *CTRL*. Уз курсор ће се појавити празан квадрат. У овом моду неће бити ограничења која се могу поново укључити поновним притиском на тастер *CTRL*.

2.4.13 CURVILOFT скрипта

Curviloft Script још увек је у фази развоја, те коришћење *Beta* верзије носи ризик појаве нестабилности програма и губитка комплетног рада који није сачуван. Аутор скрипте препоручује често коришћење *Save* опције, пре покретања неке од команди које се овим додатком нуде.

У коришћеној верзији *1.1a* понуђене су следеће наредбе: *Loft By Spline*, *Loft Along Path* и *Skinning*. Аутор такође напомиње да команда *Loft Along Path* тренутно није комплетирана и да може правити проблема приликом употребе.



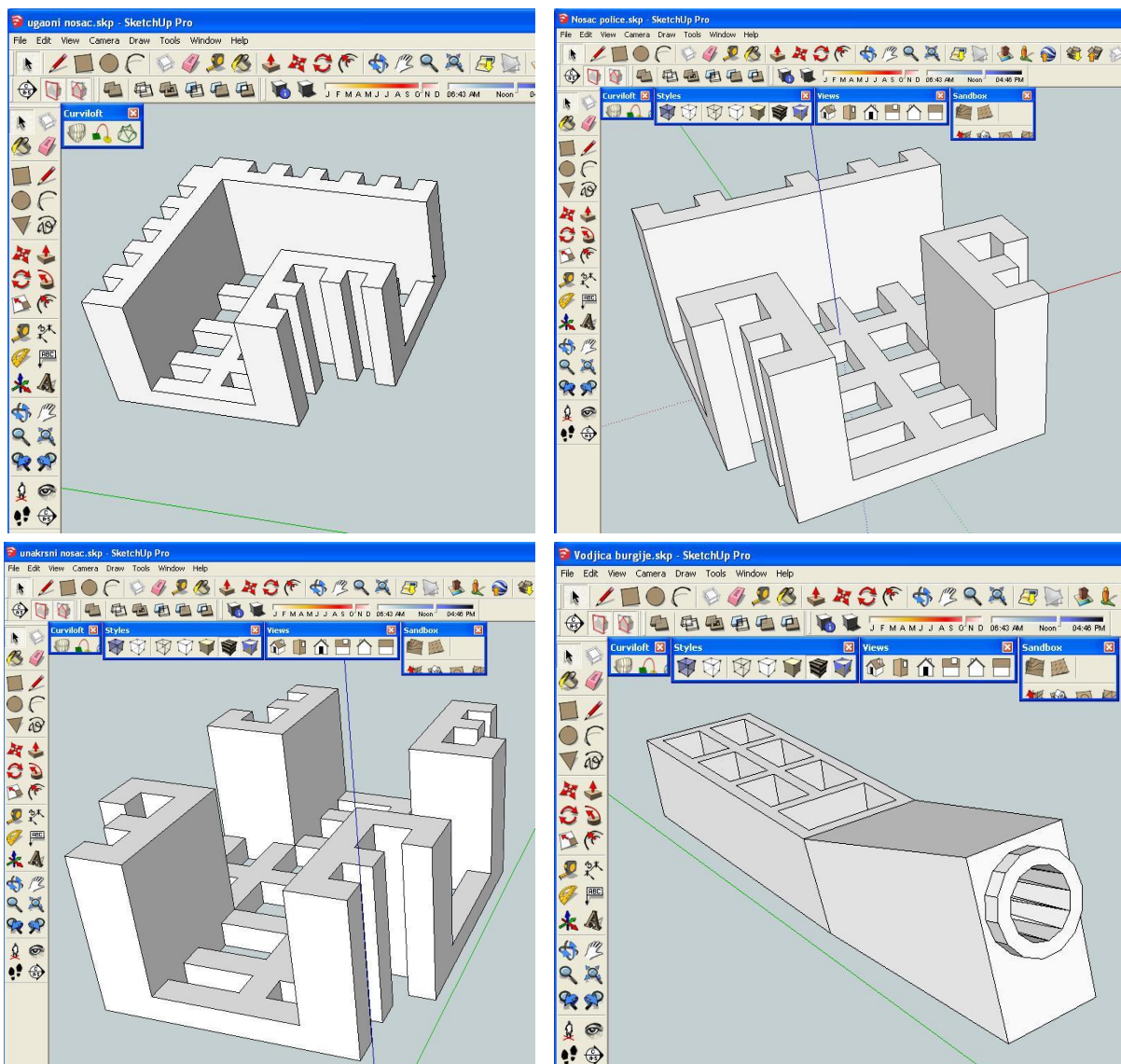
Слика 24. – Примери примене *Curviloft* скрипте

Ова скрипта је намењена за креирање површина између одабраних контура. *Loft By Spline* спаја међусобно раздвојене контуре, отворене или затворене, финим заобљеним површинама. *Loft Along Path* такође спаја контуре али дуж одабране линије водиле. Последња опција *Skinning* креира површине између 3 или 4 повезане контуре.

Скрипта се користи тако што се најпре изаберу контуре које се желе спојити, а затим опција *Loft By Spline*. Такође се може прво изабрати опција, па онда одабрати криве које треба спојити површином. Криве ће бити означене бојама и бројевима по којима ће се пратити редослед приликом креирања површина. Потврђивање избора контура се постиже кликом било где ван површине. Приликом спајања контура по водилји потребно је прво одабрати водилју, па затим две или више контура које се желе спојити.

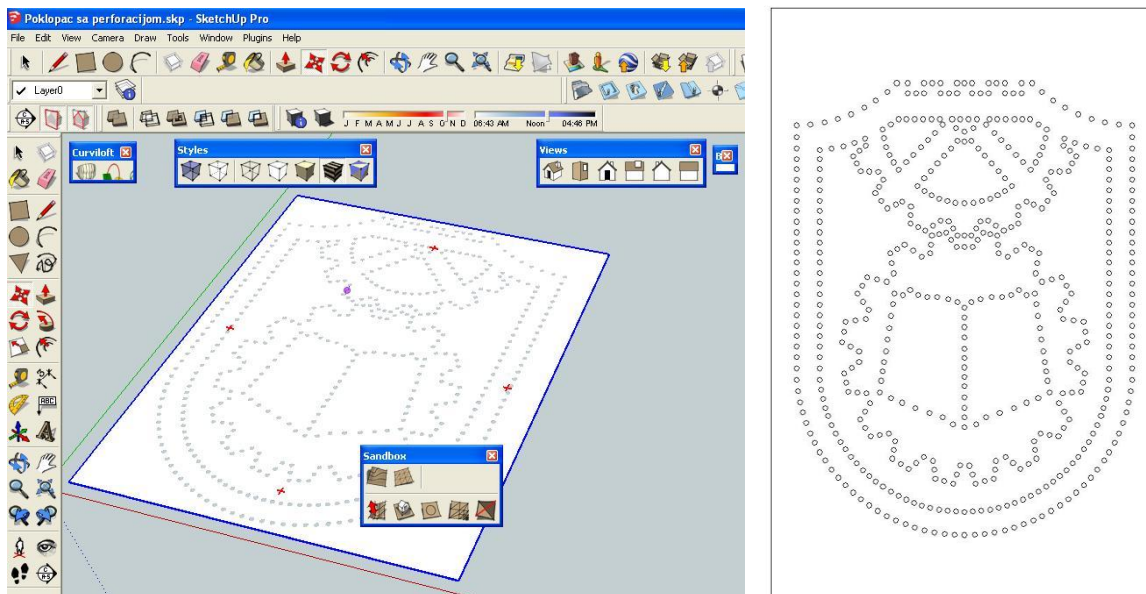
2.5 Резултати моделирања прототипова

Користећи део предходно описаних опција и алата *Google SketchUp*-а, добијени су готови модели прототипова у .skp формату. С обзиром да структуре модела нису претерано захтевне и да нема потребе за посебном структурном анализом, може се рећи да је њихово моделирање у програму протекло веома елегантно и брзо. На слици 25. су приказане 3 варијанте првог задатог прототипа држача елемената полице и модел прототипа столарског помагала након успешног моделирања.



Слика 25. – Модели прототипова држача елемената полице и столарског помагала израђени у програму *Google SketchUp*

Модел поклопца са перфорацијом такође је брзо и успешно креиран у програму *Google SketchUp* и сачуван као *.skp* фајл (слика 26.). Пошто се ради о *CNC* обради, модел перфорираног поклопца такође је сачуван и у *.DXF* формату, који ће бити подесан за учитавање у софтвер у коме ће касније бити креирана путања алата у виду одговарајућег *CNC* кода. Предходно је као додатак за *SketchUp* инсталиран *Plugin* који омогућава овакво експортовање модела у *.DXF* формату из програма.



Слика 26. – Модел прототипа поклопца са перфорацијом израђен у програму *Google SketchUp* и изглед експортираног фајла у *.DXF* формату

Конкретни кораци у *SketchUp*-у при моделирању два приказана модела прототипова, са описом алата који су при томе коришћени, приказани су у првом и другом прилогу овог мастер рада.

3 КОНВЕРЗИЈА И ПРЕНОС ПОДАТАКА

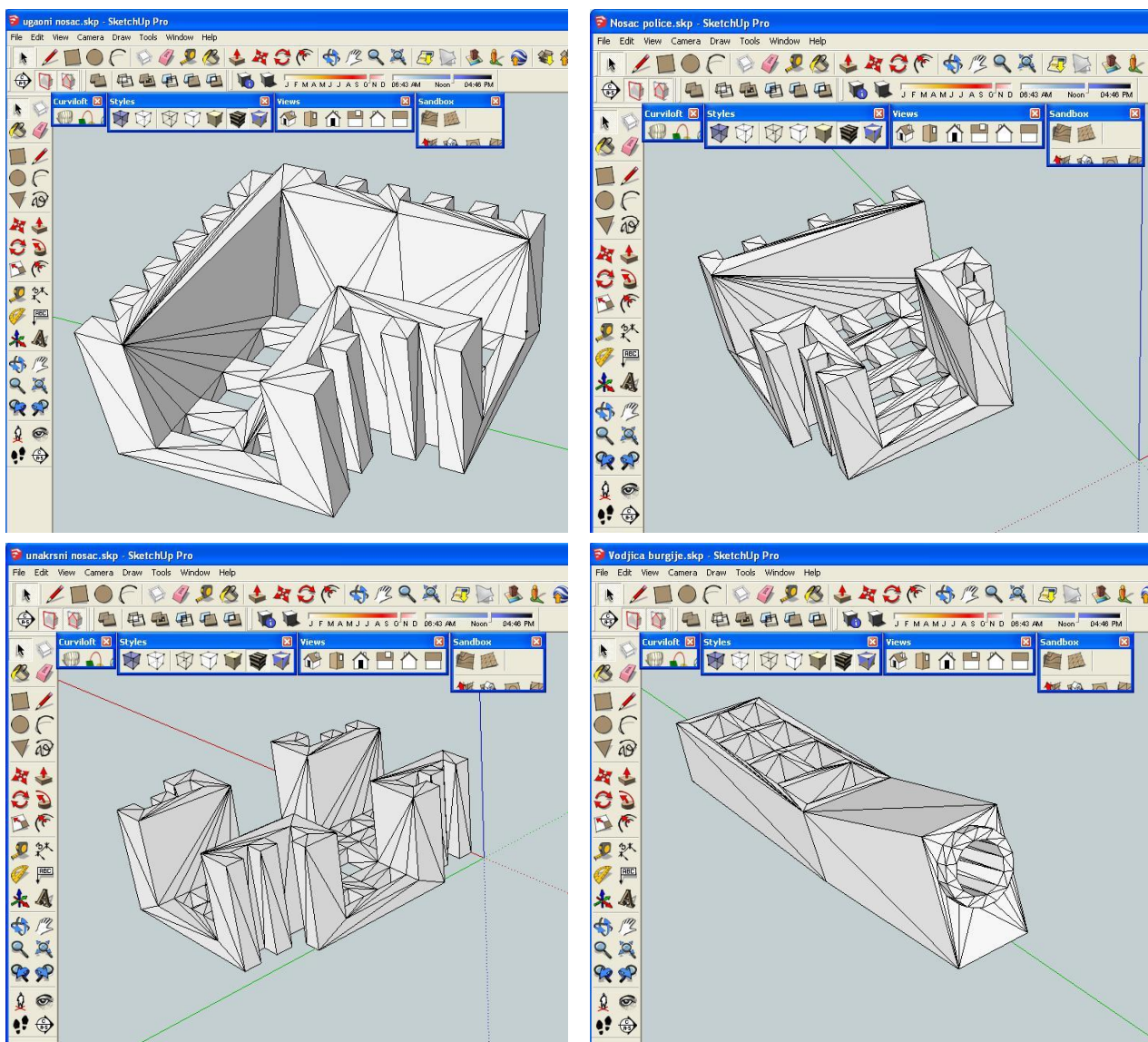
Након завршеног процеса моделирања прототипа, следећи корак у *Rapid Prototyping* ланцу је конверзија, а затим и пренос модела у формату који је читљив на уређају који врши физичку израду прототипа. Најзаступљенији формат у којем се површински или солид модели учитавају у софтвер машине је *.stl* формат (*Stereolithography*), који одређује површине модела тако што је дели на велики број троуглова. У случају *CNC* обраде модел се учитава у софтвер у којем се директно на основу модела одређују параметри резања, или се у неким случајевима (у случају прототипа из овог рада) на основу модела прототипа најпре у посебном софтверу креира путања алата (*toolpath*), који се у виду кода шаље на машину и управља алатима за обраду. Сачуване и одговарајуће конвертоване фајлове потребно је пребацити са рачунара на коме је вршено моделирање на рачунаре *RP* система, који су повезани са машинама. Овај корак конверзије и преноса је најкраћи и релативно најједноставнији у целом *RP* ланцу.

3.1 Конверзија модела у *.stl* фајл формат

STL формат је индустријски стандард за опис геометријских модела прототипова, који је компаније *3D Systems Inc.* предложила 1989. године. Ова спецификација омогућује да се дигитални запремински модел креиран у неком *CAD* систему опише помоћу низа полигона и поступком тесалације површина коначно одреди, ради прослеђивања уређају за брзу израду прототипа. Трансформација геометријског модела прототипа (и евентуално потребне носеће структуре) у полигонални модел се ради у циљу лакшег израчунавања попречних пресека слојева. Подаци о овим слојевима објекта се директно користе за управљање уређајима приликом градње прототипа.

Конверзија у *.stl* формат модела прототипова урађених у програму *Google SketchUp* обавља се одабиром опције *Export STL...* из менија *File*. Када се тако сачувани модели поново увезу у *SketchUp* одабиром опције *Import...* из менија *File*, на површинама модела се сада може уочити мрежа троуглова (слика 27.) која одређује границу између унутрашњости модела и његове околине. Поступак формирања ове мреже троуглова се назива тесалација (триангулација). Да би се знало која страна троугла је окренута ка унутрашњости, а која ка околини, за сваки троугао се задаје његова оријантација.

Спецификација оријентације троуглова се може дефинисати помоћу нормале на површину тругла која је усмерена ка околини или помоћу листе ознака темена.



Слика 27. – Модели прототипова након тесалације, учитани у .stl формату

Овакви модели са дефинисаним површинама у .stl формату морају да задовоље правило по коме једна ивица троугла треба да буде заједничка само са једном ивицом суседног троугла, тј. теме једног троугла не може да лежи унутар ивица суседног троугла. Такође, треба водити рачуна да координате свих тачака модела буду позитивни бројеви, односно модел се мора налазити у октанту чије су све осе позитивне.

У софтвер машине која израђује прототип је имплементиран алгоритам за исецање (енгл. *Slicing Algorithm*), који од улазног модела сачуваног у *.stl* формату генерише серију попречних пресека, где је сваки пресек направљен у односу на предходни на удаљености једнакој задатој дебљини слоја. Постоје прости и робусни алгоритми, зависно од начина пресецања модела (хоризонталним равнима, простирањем зрака - енгл. *RayCasting*, покретним равнима - енгл. *SweepPlane...*), а најпознатији су: *3D Lightyear (SLA)* и *LS (SLS)*, фирме *3D Systems*, *Insight (FDM)*, фирме *Stratasys*, *Zprint (3DP)*, фирме *Zcorporation*, итд. Ови пакети могу слати податке о попречним пресецима директно на уређај за израду или у неком од стандардних формата – *CLI*, *SLI*, *SLC*, *SSL*.

Предности употребе *.stl* формата се огледају у једноставности којом се јасно описују *3D CAD* подаци, затим што за одређене облике даје мале и прецизне фајлове лаке за пренос и коначно он представља стандард који је подржан од већине *CAD* и *RP* система.

Као недостатак се истиче то што је величина *.stl* фајла много пута већа од оригиналног *CAD* модела због честе редуваности и мултиплицирања података. Такође је услед недовољне робусности алгоритама изражена могућност геометријске грешке. Због несавршености *CAD-STL* интерфејса, комплексности дискретизације сечених површина, пробоја површина и нумеричких грешака, могу се јавити следеће геометријске грешке:

- празнине (пукотине, рупе), тј. недостајући полигони,
- дегенерисани полигони (где су све ивице полигона колинеарне),
- преклапајући полигони,
- вишезначност у топологији.

Исецање већих фајлова може дуго да потраје, што се донекле може превазићи могућношћу система да врши исецање слојева док истовремено израђује предходне пресеке. Такође се, поред формата које су произвођачи наменски развијали само за своје системе (*SLC* - *3D Systems*, *CFL* – *Cubital*), користе и формати који нису били предвиђени за *Rapid Prototyping* системе. У Јапану се користи *HPGL* формат, који је првобитно употребљаван на плотерима, а сасвим добро описује контуре попречног пресека за поједине слојеве модела. Следећи формати који се највише користе за опис *3D* модела и такође представљају незваничне стандарде у *RP* индустрији су *CLI* и *VRLM*.

3.2 Пренос података о моделима

Сви важнији *CAD/CAM* софтверски пакети садрже *CAD-STL* интерфејс који омогућава конверзију модела из изворног у *.stl* формат. Након ове конверзије *.stl* фајл се са радне станице која је обично лоцирана у пројектном бироу, преноси на рачунар *Rapid Prototyping* система који се налази у радионици или лабораторији. Пренос података између рачунара се врши преко преносних меморијских уређаја (преносна флеш меморија, *CD*), рачунарске мреже (*LAN*) или коришћењем неког интернет сервиса уколико су рачунари на већим физичким удаљеностима. Овај поступак је најпростији и најкраћи у *RP* ланцу, при чему се не врши провера исправности фајлова.

У овом случају пренос модела у *.stl* формату, који су предвиђени за израду методом екструдирања топљеног материјала, до радне машине (штампач *RapMan*) обављен је коришћењем *SD* флеш меморијске картице.

Модел чија је израда предвиђена *CNC* обрадом на *RP* уређају *Roland Modela MDX-20* није конвертован у *.stl*, већ је најпре у *.DXF* формату учитан у софтвер *ArtCAM*. У овом програму је генерисан *CNC* код, којим је одређена путања алата за бушење перфорације и који је на крају процеса сачуван са екстензијом *.md2*. Овај *CNC* код се назива *RML-1* код, разликује се од најчешће коришћеног *G-code*, а читљив је на машинама чији је произвођач фирма *Roland*. Након обраде модела у софтверу *ArtCAM*, овај код је коришћењем *USB* флеш меморије прекопиран на радну станицу, тј. на рачунар који је повезан са машином.

4 ПРОВЕРА И ПРИПРЕМА

Успешност и квалитет процеса моделирања и израде модела прототипа зависи од правилно одабраног *CAD* система у коме се врши моделирање, квалитета *CAD-STL* интерфејса који обавља конверзију, правилне одређености параметара понашања алата код *CNC* обраде, нивоа обучености оператера и квалитетног поступка постпроцесирања. Грешке које настају у процесу израде на основу *.stl* презентације најчешће су последица лоше постављених параметара алгорита за исецање, што доводи до појаве рупа, зазора и напрстина на моделу.

Документација у којој су дефинисани параметри за израду мора садржати јасно одређене позиције објеката у радној запремини машине и правилно одабрану оријентацију и распоред ослонаца. У случају *CNC* кода који управља путањама алата, односно контролише брзине кретања алата и број обртаја, битно је познавати типове алата, особине материјала који се обрађује и генерално особине машине.

4.1 Поправка грешака у *.stl* фајловима

Неисправни *STL* фајлови могу се поправити генеричким поступком или употребом специјалних поступака за одређене случајеве. Мануелно поправљање је напоран и временски захтеван посао, који може негативно да се одрази на цену и остале предности поступка. Циљ алгорита за аутоматску поправку модела је проналажење и издвајање граница празнина на моделу, да би се генерисали одговарајући полигони који затварају празнине. Генерички алгоритам има способност да на основу *.stl* фајла генерише податке тако да задовољи следећа два услова:

- оријентација нормала генерисаних полигона је исправна и у складу са осталим полигонима на моделу
- свака контура модела испраћена је генерисаним полигонима, услед уметања ситнијих полигона. Ово је супротно од мануелне поправке мреже, где се умеће мањи број крупнијих полигона који немогу да испрате контуре модела.

У специјализованом *RP* софтверу се врше поправке неисправних *.stl* фајлова, адаптације модела сходно потребама поступка израде, бојење модела и друге операције које утичу на коначни резултат израде. Због великог броја троуглова којима је апроксимиран објекат и велике редуваности, датотеке са *.stl* моделом могу да буду јако велике. Приликом поступка тесалације изражена је могућност грешке због тога што *.stl* репрезентација не укључује тест конзистентности и компетентности, услед чега се на моделу јављају неправилности у виду преклопљених троуглова, нецеловитих елемената и нетачних оријентација нормала.

Због наведених недостатака *.stl* фајл формата, који за последицу имају успорење процеса израде, постоје покушаји да се омогуће специјални уноси података о моделу и другим репрезентацијама.

Неки произвођачи уређаја за брзу израду прототипова развили су формате који описују моделе, као што су *IGES*, *STEP*, *HP/GL* и *CT (Computerised Tomography)*. Интуитивни софтвери умногоме олакшавају посао оператеру, јер су аутоматизовани многи параметри који су захтевали ручно уношење. При провери исправности *.stl* модела који су израђивани у овом мастер раду нису уочене грешке.

4.2 Планирање израде

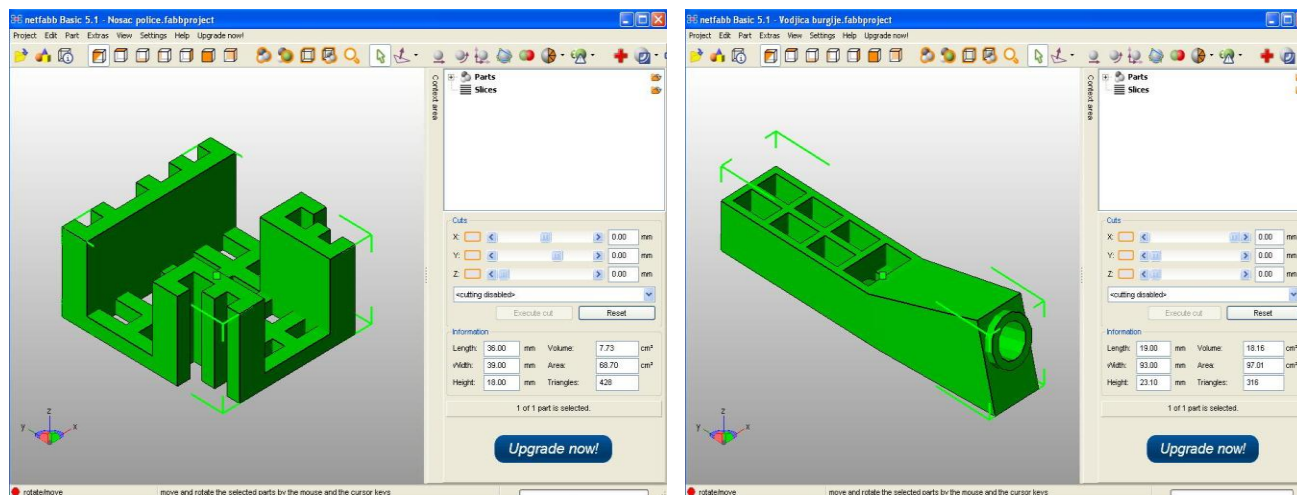
Подаци о попречним пресецима *.stl* модела се шаљу управљачком програму, који затим комуницира са машином и манипулише материјалом од кога се модел израђује, тако да се наноси слој по слој, подизањем или спуштањем радне платформе. Управљачки програм у општем случају наводи систем, било да се ради о оптичком вођењу ласерског зрака, или глави за депоновање материјала или везива. На основу података о актуелном попречном пресеку, управљачки софтвер генерише путање система и шаље податке на *RP* машину, тако да се секвенцијалном обрадом слојева на крају добија физички модел. Код *RP* поступака заснованих на *CNC* обради битно је да операције које су дефинисане *G* кодом (резање, бушење, глодање итд.) буду задаване машини у правилном редоследу.

Припрема параметара за израду може бити врло сложена без добре документације. Ова сложеност се огледа у одлучивању о разним могућностима оријентације и распореда објеката у радној запремини, израде ослонаца и подешавањима параметара исецања. Такође, треба изабрати технолошке параметре као што су дубина очвршћавања, снага ласера, број обртаја и брзина кретања алата и сл. То значи да је интуитиван софтвер намењен за управљање *RP* поступком веома користан за оператера и умногоме може олакшати ова подешавања.

4.2.1 Припрема за израду прототипова на 3D штампачу *RapMan*

При припреми за израду модела држача елемената полице и модела столарског помагала, узете су у обзир специфичности методе екструдирања топљеног материјала на чијем принципу ради *RapMan* штампач. *RapMan* штампач захтева да се процес припреми у одговарајућем *CAM* програму. *CAM* програм анализира 3D објекат и припрема команде за управљање *RapMan*-ом. За управљање се користи стандардни језик за *CNC* машине (*G-code*). За *RapMan* постоје 2 основна *CAM* пакета. Први је *Skeinforge*, представља потпуно „*open source*“ решење и ради на свим данас доступним оперативним системима. Овај програм нуди велике могућности за оптимизацију процеса штампе, али је прилично компликован за коришћење јер нема никакав кориснички интерфејс.

Други *CAM* пакет је *AXON*, софтвер који као бесплатно решење нуди фирма *Bits From Bytes*. Заснован је на *Skeinforge* пакету, али има свој графички интерфејс. *AXON* ради само на *Microsoft Windows* оперативном систему.

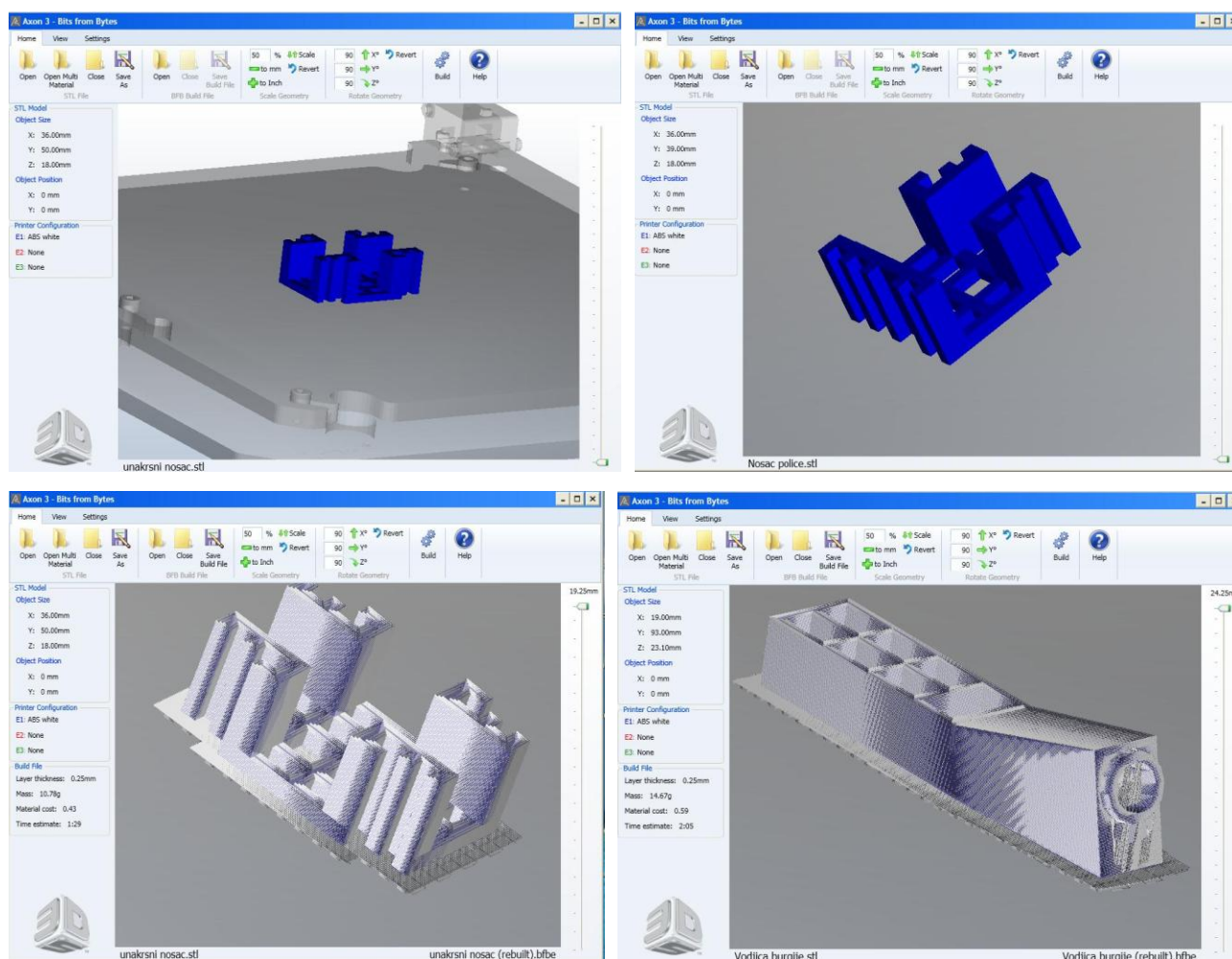


Слика 28. – Моделу у .stl формату, учитани у софтвер Netfabb Studio basic

Уобичајен поступак израде прототипа подразумева следеће кораке: израду 3D дигиталног модела, чување модела у формату који *CAM* пакети умеју да препознају (.stl), уклањање могућих неправилности у .stl фајлу, превођење *CAM* пакетом у *G*-код и на крају штампање модела.

Приликом увоза *.stl* формата може доћи до проблема који су последица неких недостатака приликом самог моделирања објекта. Грешке у *.stl* фајлу је могуће отклонити у апликацији *Netfabb Studio* (верзија „*basic*“ је слободно доступна, док се „*professional*“ верзија плаћа). Радно окружење апликације *Netfabb Studio Basic* приказано је на слици 28. *Netfabb Studio* апликација се може користити за решавање једноставнијих проблема са *.stl* фајловима, док се озбиљнији проблеми морају решавати помоћу специјалних апликација.

Након поправки евентуалних неправилности *.stl* фајла врши се његово учитавање у *AXON* софтвер. Интерфејс радног окружења програма *AXON* са учитаним моделима приказан је на слици 29.



Слика 29. – Учитани модели у *.stl* формату и припрема у софтверу *AXON*

Најзначајнији параметри процеса који се могу подесити у овом софтверу су: „*Layer Thickness*“ – дебљина слоја, „*Temperature*“ – радна температура екструдовања материјала, „*Support option*“ – ослонци при штампима за делове у ваздуху.

Након подешавања параметара израде у наведеним програмима, врши се аутоматско превођење сваког појединачног фајла у G-код. Тако добијени фајл се пребацује на SD картицу, са које се читава на *RapMan* штампач и коначно се покреће израда прототипа.

4.2.2 Припрема за израду прототипа на CNC глодалици *Modela MDX-20*

Прототип алуминијумског поклопца лампе је замишљен тако да на њему буде избушен низ отвора, који образују перфорацију и при светлости чији је извор у унутрашњости лампе формирају лого Факултета инжењерских наука у Крагујевцу. Узимајући у обзир радну запремину глодалице *Modela MDX-20* и геометрију логоа, моделиран је поклопац правоугаоног облика димензија $133mm \times 160mm$, дебљине $0,25mm$ и са отворима пречника $1mm$. Припремљена је алуминијумска табла наведених димензија, која је помоћу дуплофан траке причвршћена за постоље машине и позиционирана тако да се у левом доњем углу равна са ивицом мреже која је осликана на постољу. Треба обратити пажњу да обрадни комад буде постављен паралелно са ивицом мреже, у односу на коју ће се вршити позиционирање алата које је дефинисано G кодом. Чврсто пријањање на постоље обрадног комада је обезбеђено коришћењем дуплофан траке, која је лепљива са обе стране.

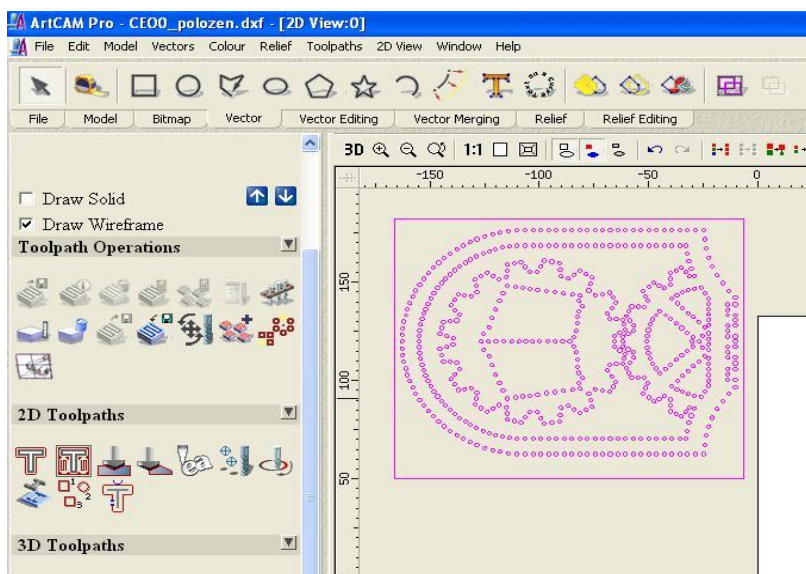
Позиционирање се, зависно од облика обрадног комада и површине која се обрађује, може извршити у четири угла правоугаоне мреже или у самом центру. На постољу уређаја *Modela MDX-20* се у сва четири угла налазе рупе пречника $3mm$, које представљају почетне и фиксне координате у односу на које је помоћу софтвера могуће постављати релативне координате положаја алата. У зависности од избора почетних апсолутних координата (*Origin Point*), алат се може на почетку процеса глодања налазити изнад једне од 5 рупа на платформи.

С обзиром да пречник отвора који се праве на поклопцу износи 1mm , морала је бити употребљена бургија неведеног пречника. Футер на машини у коме се учвршћује бургија је фабрички предвиђен да бургија која се ставља може бити пречника најмање 3mm , услед чега није било могуће монтирати потребну бургију. То је решено употребом додатног мањег футера (Слика 30.), који се монтира у постојећи и на глодалици омогућава причвршћење бургија пречника 1mm .



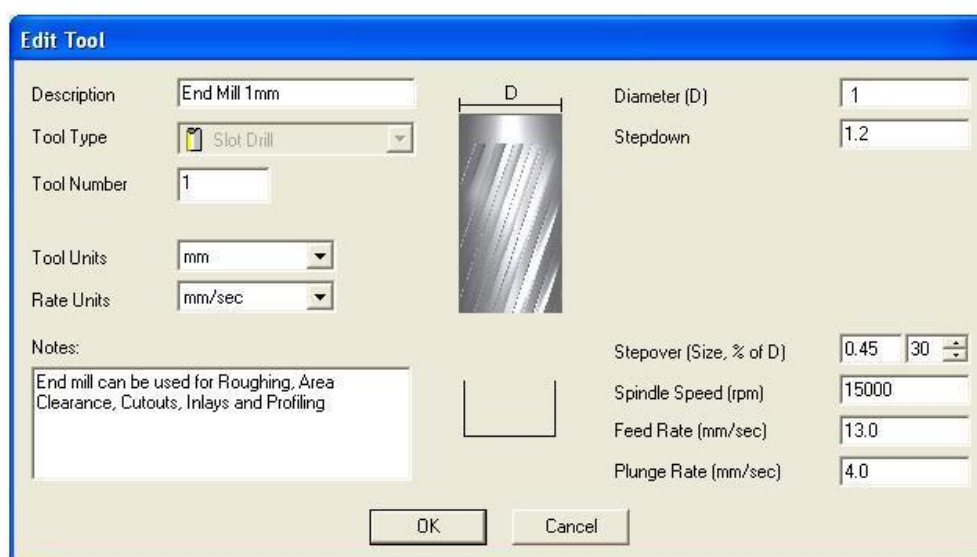
Слика 30. – Футер намењен бургијама пречника 1mm

Дигитални модел прототипа поклопца је након експортовања из *SketchUp*-а у *.DXF* формат, увезен у програм *ArtCAM* (слика 31.), у којем је затим, на основу координата центара кругова који формирају перфорацију, формиран „*toolpath*” (путања алата - бургије).



Слика 31. – Модел поклопца учитан у софтвер *ArtCAM*

Ова путања и параметри алата се формирају у виду одговарајућег *CNC* кода (*RML-1* код), који је специфичан за глодалице чији је произвођач фирма *Roland*. При формирању кода који дефинише путање алата за бушење перфорације, поред аутоматских инструкција и путања које је софтвер дефинисао на основу модела, мануелно су дефинисани параметри који су приказани на слици 32. Пошто је генерисана путања алата у *ArtCAM*-у, сачувана је у фајлу са екстензијом *.md2* (формат намењен глодалицама *MDX-20* и *MDX-15*). Затим је овако припремљен фајл учитан у програм *Print2File*, софтвер који омогућава да се текстуални фајл са кодом директно пошаље на глодалицу, чиме је заокружен процес припреме за бушење перфорације.



Слика 32. – Параметри алата за бушење перфорације дефинисани у софтверу *ArtCAM*

Уз глодалицу *Modela MDX-20* се испоручује софтвер „*Modela Player 4*“, који омогућава виртуелни приказ процеса глодања и процену времена глодања, што може да користи код оптимизације процеса израде предмета. У овом случају употреба овог софтвера се показала непрактичном, из разлога што не постоји опција за једновремено уношење координата свих отвора који се буше, већ је једино могуће уносити координате сваког отвора појединачно. Услед овог недостатка фабричког софтвера, примењено је решење које је предходно описано.

5 ИЗРАДА ПРОТОТИПОВА

Као што је на почетку речено, израда прототипова три производа која су задата у овом мастер раду биће реализована методама екструдирања (депоновања) топљеног материјала и методом *CNC* обраде. При одабиру уређаја у обзир су узета ограничења радне запремине машине, време трајања процеса и карактеристике прототипова. Као и код већине *RP* система, након процеса планирања и припреме, сам корак израде је потпуно аутоматизован. Процес може трајати више сати, зависно од величине и броја делова који се израђују. У случају модела чија је израда приказана у овом раду, било је потребно од 3 до 5 сати за прототипове рађене *FDM* технологијом и око 30 минута за модел израђен *CNC* поступком.

5.1 Моделирање депоновањем топљеног материјала (*FDM* технологија)

Према стању полазног материјала *RP* технологије се могу поделити на оне које користе материјал у течном, прашкастом, чврстом облику, листове (папир, фолије), као и гас и атоме. Друга подела се врши на основу методе градње физичког модела: фото-очвршћивањем, синтеровањем, топљењем, екструдирањем, штампањем, сечењем, ливењем, замрзавањем, електро-платирањем, заваривањем и распрскивањем.

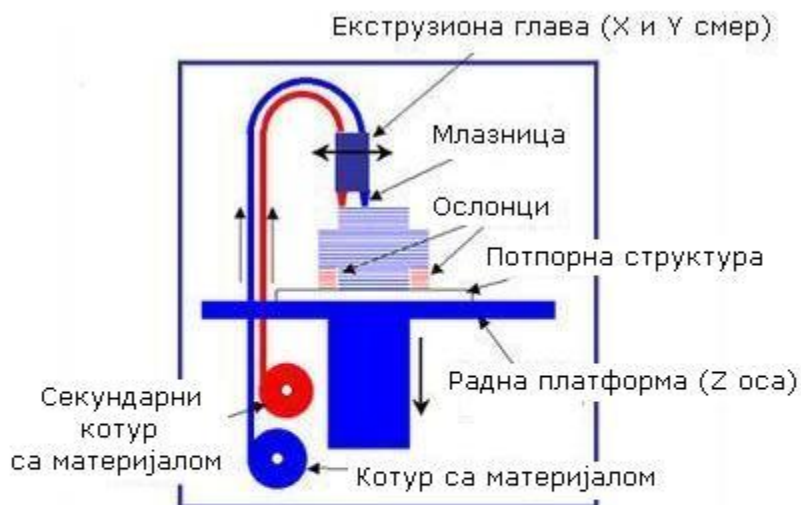
Екструдирање или депоновање је процес у коме се материјал у чврстом стању континуално доводи у комору за загревање, где се топи, а затим се истискује кроз профилисани отвор. Материјал се загрева док се не достигне потребни вискозитет, при чему се елиминишу меморијски ефекти који постоје код материјала у чврстом стању. Ово се посебно односи на пластичне материјале. У случају примене у *RP* системима, истопљени материјал се наноси на предходни слој, и готово тренутно се хлади и стврдњава. Површински термички процеси омогућавају мешање материјала и спајање новог слоја за предходни.

Разни материјали се могу екструдирати, пре свега пластика и гума, али се у новије време екструдирају и композити, алуминијум и разне легуре. Неке од технологија користе прецизно контролисано заваривање, које, из угла израде прототипова, делује на начин сличан екструдирању.

Поступак моделирања екструдирањем истопљеног материјала (енгл. *Fused Deposition Modeling / FDM*), познатог и под називом *FDM* техника, развио је *Scott Crump* 1988. године, а патентиран је 1992. године у Сједињеним Америчким Државама. Овај метод спада у технологије које израђују прототипове од чврстог материјала. Компанија која производи и развија *FDM* системе је „*Stratasys Inc*”, из Минесоте, САД. Основана је 1989. године, а први комерцијални *FDM* систем под називом *3D Modeler* се појавио 1992. године. Ова технологија брзе израде прототипова по заступљености је на другом месту у свету, одмах после стереолитографије.

5.1.1 Принцип рада

Основни принцип *FDM* технологије се реализује тако што се материјал у облику танке жице (нити) доводи са намотаја до специјално дизајниране главе, која га топи и екструдира на радну површину (Слика 33.). Након екструдирања материјал се хлади и очвшћава, тако да формира модел дуж путање главе, у једном слоју. Као и код осталих *RP* технологија модел се израђује из низа слојева. Параметри који утичу на перформансе и функционалност система су: модул еластичности материјала, вискозитет материјала, тачност позиционирања, брзина депоновања, ширина пута, запремински проток, пречник отвора главе, температура загревања и геометрија дела.

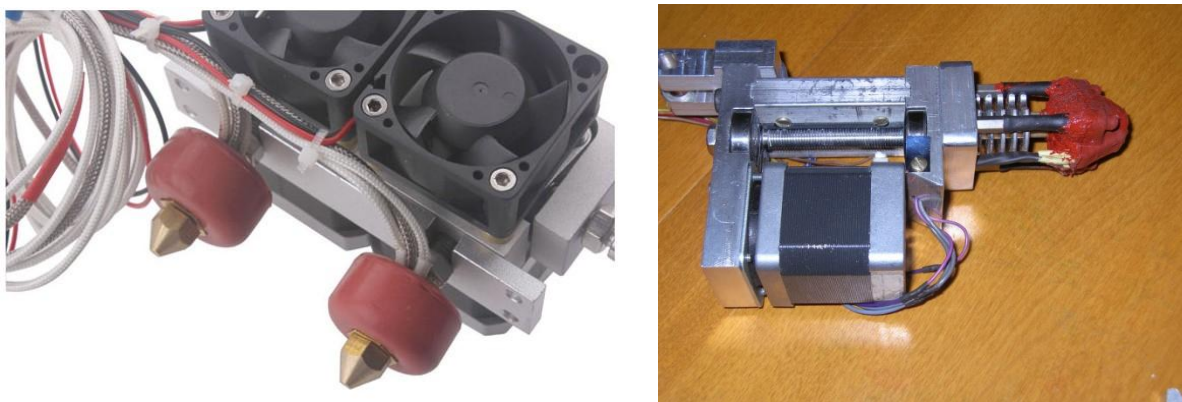


Слика 33. – Принципи рада *FDM* технологије

5.1.2 Општи поступак израде модела

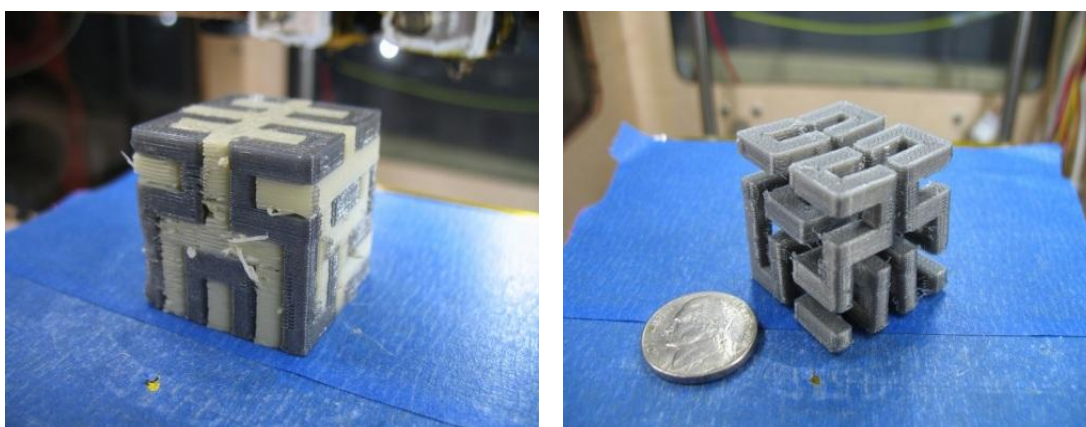
У овом патентираном процесу геометријски модел се креира у *CAD* софтверу, који даје *IGES* или *STL* формат фајлова. Затим се преноси на радну станицу, где се процесира у специјалном софтверу. Овај софтвер поседује могућности аутоматског генерисања ослонаца, врши оријентацију модела у оптималну позицију за израду и дели модел на хоризонталне слојеве. Дебљина слојева може бити од $0,172$ до $0,356\text{ mm}$, зависно од намене модела. На крају се генеришу путање главе за процес израде и оне се шаљу на *FDM* машину.

Делови се израђују од слојева формираних истискивањем нити растопљеног воска или пластике. Материјал је у облику танких нити, пречника $1,27\text{ mm}$, који се уводе са калема у екструзиону главу (Слика 34.). Нити су сачињене од обрадивог или ливачког воска, или од термопластичних полимера (полиестера, *ABS*-а, еластомера, полиолефина или полиамида). У екструзионој глави нит се загрева до температуре топљења, а онда се убризгава кроз млазницу. Кретање екструзионе главе је нумерички управљано. Глава се креће унутар контуре попречног пресека који се тренутно израђује. При том се растопљени материјал наноси на платформу (ако се ради први слој) или на предходни слој и, обзиром да се атмосфера у комори за израду држи испод температуре топљења, он очвршћава брзо, тј. за једну десетинку секунде.



Слика 34. – Екструзионе главе за депоновање материјала

После наношења сваког слоја елеватором се врши подешавање растојања између платформе екструзионе главе тако да је могуће нанети следећи слој на предходне слојеве. Важно је одржавати константним температуру и брзину главе, као и померање између слојева, чиме се спречава појава видљивих шавова и неправилности површине. Употребом два отвора на глави остварује се депоновање два материјала за израду. Основни материјал је намењен за израду предмета, док је секундарни намењен за израду ослонаца (Слика 35.). Секундарни материјал се везује за основни и скида се након израде предмета.



Слика 35. – Изглед прототипа израђеног FDM технологијом пре и након уклањања ослонаца

Носеће структуре су већи проблем код FDM-а него код било које друге комерцијалне SFF технологије. Обзиром да нема течног полимера или слоја праха да причврсти највиши слој који се наноси, носећа структура биће потребна свуда где је највиши слој шири од предходног слоја. FDM софтвер генерише густу, очврслу носећу структуру за све ове површине, покушавајући да уравни јачину носеће структуре са лакоћом њеног отклањања. Да би се олакшало отклањање носеће структуре, може се користити друга екструзиона глава за постављање кртог граничног слоја од посебног материјала између дела и носеће структуре. Ломљењем на местима са кртим материјалом лако се одваја носећа структура од модела. Делови који имају унутрашње отворе са хоризонталним површинама тешко се израђују FDM технологијом јер не постоји начин за отклањање носеће структуре.

У циљу изградње физичког модела, *Stratasys*-ов *FDM* систем може да учита запремински, површински или жичани *3D* модел. Програм *QuickSlice* који је базиран на *NURBS*-у претвара ове моделе у формат који је погодан за израду *STL* модела. Делови израђени *FDM*-ом не садрже вештачке полигоне који се често могу видети код делова израђених у другим *SFF* системима.

Недостатак овог система је да сви режњеви морају бити дефинисани пре почетка саме израде. Тек тада се подаци о кретању екструзионе главе за сваки пресек пребацују јединици за нумеричко управљање кретања главе. С друге стране, ово може да буде и предност, јер корисник помоћу програма *QuickSlice* може ручно да измени путању кретања алата.

5.1.3 Материјали за депоновање

Неки од комерцијалних материјала који се користе у процесу моделирања депоновањем топљеног материјала (*FDM*) су:

ABS (P400). Неке карактеристике овог материјала су:

- дуготрајна врста пластике,
- служи за израду прототипова у сврху функционалних испитивања,
- расположив у више боја (бела, црна, црвена, плава, зелена, жута),
- даје могућност завршне обраде (бушење, пескарење, превлачење итд...).

ABSi (P500). Неке карактеристике овог материјала су:

- дуготрајна пластика са већом отпорношћу од нормалног *ABS*-а,
- посебна врста *ABS* материјала који је отпоран на ударна оптерећења,
- отпоран је на хемијски активне медије,
- производ је најчешће прозиран,
- најчешћу примену има у медицини и ауто индустрији.

Медицински ABSi. Неке карактеристике овог материјала су:

- Није токсичан, расположив у више боја.

PC (Поликарбонат). Неке карактеристике овог материјала су:

- има широку примену у ауто индустрији, ваздухопловству, медицини и др.,
- има бољу стабилност и издржљивост од осталих,
- много боље механичке карактеристике од ABS-а и других термопласта,
- PC ISO има велику примену при паковању хране и лекова.

E20 (еластомер на бази полиестера).

- Сличан материјал се користи за изолације, цеви итд.

ICW06 (восак за прецизно ливење).

- врло мали удео пепела (0,004%).

5.1.4 Предности и недостаци FDM технологије

Главне предности FDM технологије су следеће:

Израда функционалних делова. FDM поступком могуће је израђивати прототипове од материјала сличних или истих као за израду правог производа. Употребом ABS пластике добијају се функционални делови који имају 85% чврстоће готовог производа. Ово је посебно корисно за развој производа који захтева брзу израду прототипова за финално тестирање.

Минимум отпада. Израда делова FDM поступком врши се екструдирањем материјала на предходно формиране слојеве. Тако се троши тачно толико основног материјала, колико је потребно за израду дела, и секундарног материјала, колико је неопходно за израду ослонаца, па се ствара минимална количина отпада. Такође, нема пуно вишка материјала за уклањање.

Лакоћа уклањања ослонаца. Употребом техника за израду ослонаца под називом *Break Away Support System (BAAS)* и *WaterWorks Soluble Support System*, ослонци се могу лако уклонити или испрати. Ово знатно олакшава корисницима да брзо дођу до прототипа, а да нема пуно посла око постпроцесирања.

Лакоћа промене материјала. Материјали за израду, у виду намотане жице (или у кертриџима), су згодни за руковање и могу се брзо заменити када понестану у експлоатацији. Ово поједностављује употребу система и чини одржавање лакшим.

Материјали нису токсични. Материјали које *FDM* користи нису токсични тако да су погоднији за употребу у односу на *SLA* технологију.

Нема ласера и није потребно посточвршћивање. Ово знатно смањује време израде у односу на методе код којих је посточвршћивање неопходно.

Главни недостаци *FDM* технологије су следећи:

Ограничена тачност. Облик и димензије жице основног материјала одређују максималну тачност *FDM* процеса. Углавном је пречник жице 1,27mm, па сходно томе постоје границе тачности за израду делова.

Спорост процеса. Процес израде је спор, јер се цела површина попречног пресека мора попунити материјалом. Брзина израде је ограничена брзином екструдирања или запреминским протоком материјала кроз главу машине. Како су вискозитети основног материјала, који је углавном нека врста пластике, прилично високи, следи да се процес не може значајно убрзати.

Непредвидиво скупљање. Пошто се у *FDM* поступку материјал екструдира кроз главу и нагло хлади при депоновању, напони који се јављају услед брзог хлађења напрежу моде. Тако је честа појава скупљања и кривљења, а само уз велико искуство корисник може да предвиди такве појаве и компензује их подешавањем параметара поцеса.

5.1.5 Примене *FDM* технологије

Предмети који се израђују *FDM* поступком се могу користити у следеће сврхе:

- Модели за концептуализацију и презентацију. Модели се могу пескирати, бојити, етикетирати и бушити, па се може добити изглед крајњег производа.
- Прототипови за дизајн, анализу и функционална испитивања. Могу се произвести потпуно функционални прототипови од *ABS* пластике. Такви делови имају 85% чврстоће крајњег производа.

- Шаблони и мастер модели за израду алата. Модели се могу користити за прецизно ливење, ливење у песку и ливење под притиском.

FDM је један од неколико система који се може користити у канцеларијским условима, мада температура просторије треба да буде строго контролисана. Модели се праве од обрадивог и ливачког воска.

5.1.6 Комерцијална решења

Обзиром да је *Stratasys* најзначајнији произвођач *FDM* система у свету, овде ће бити приказане карактеристике следећих система из њихове понуде: *FDM 2000*, *FDM 8000*, *FDM Quantum*, *Prodigy plus*, *FDM Vantage*, *FDM Titan* и *FDM Maxum*.

FDM 2000 је намењен за израду концептуалних модела. Обзиром на релативно чист поступак, на стандардно електрично напајање и да није потребна вентилација радног простора, машину је могуће инсталирати у канцеларији. Могуће је користити следеће материјале: *ABS (acrylonitrile/butadiene/styrene)*, високо отпорни *ABS* (метил метакрилат *ABS*), ливачки восак и еластомере. Измена материјала се обавља за мање од једног минута.

FDM 3000 систем има већи радни простор у односу на *FDM 2000* и допуњен је *WaterWorks* системом. *WaterWorks* омогућава решење на бази воде за отклањање носеће структуре и истовремено глачање и чишћење површине модела.



Слика 36. – *FDM* системи фирме *Stratasys*: *FDM 8000* и *FDM Maxum*

FDM 8000 систем користи две екструзионе главе (*Слика 36.*). Једна служи за екструзију материјала од кога се гради модел, а друга за екструзију материјала носеће структуре. Носећа структура се касније врло лако отклања, а модел је мање храпав. Овај систем има и *FastBuild* подсистем који омогућава бржу градњу модела.

FDM Quantum System је највећи *Stratasys*-ов уређај који има радну запремину од $600 \times 500 \times 600 \text{ mm}$, која је погодна за велике или више мањих делова. Код овог уређаја је примењена патентирана *MagnaDrive* технологија која користи високо брзински електромагнетни погон за брзо и прецизно померање екструзионе главе. Вођење главе је изведено помоћу ваздушног јастука, тако да је кретање главе униформно и стабилно. Тиме је обезбеђена већа брзина градње модела (код овог уређаја до 180 mm/s), уз истовремено повећање тачности. И овај систем има две екструзионе главе, једну за градњу модела и другу за градњу носеће структуре.

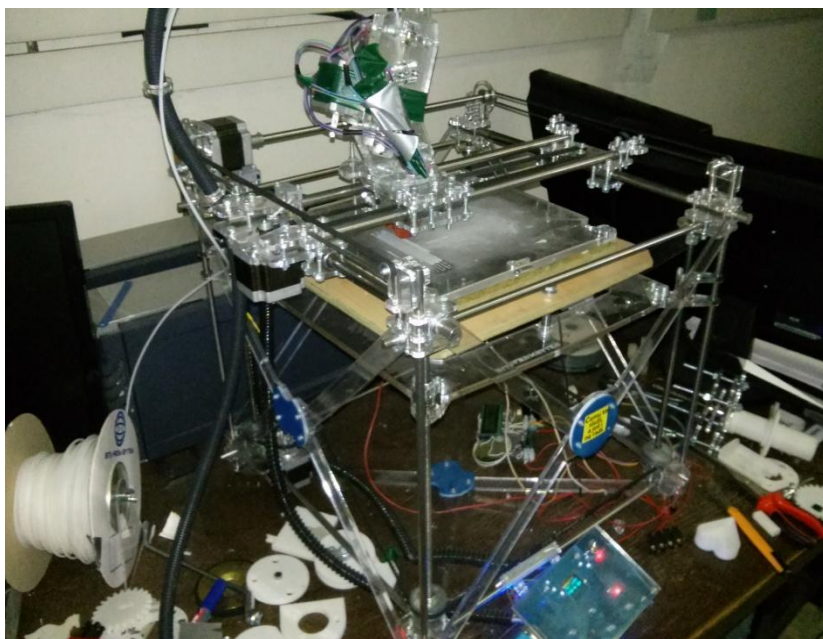
FDM Vantage производи се у варијантама *I*, *S* и *SE*, које се разликују само по максималним димензијама дела.

5.1.7 Истраживање и развој

Компанија *Stratasys* своја истраживања усмерава ка проналажењу нових материјала који ће побољшати механичке карактеристике и издржљивост делова, као и перформансе система. Тако је недавно приказан нови материјал који је мешавина поликарбоната и *ABS* пластике, под називом *PC-ABS*. Овај материјал комбинује флексибилност *ABS* пластике и чврстоћу поликарбоната. Користи се за израду делова у аутомобилској и електронској индустрији, телекомуникацијама и индустрији играчака. Такође, компанија *Stratasys* стално развија нове *FDM* системе са бољом тачношћу, већом брзином израде и вишим нивоом детаља израђених делова.

5.2 Израда прототипова на 3D штампачу *RapMan 3.1*

У оквиру пројекта названог *RepRap* на *Bath* универзитету из Велике Британије, развијена је технологија коју је компанија „*Bits From Bytes*“ даље усавршила и 2005. године тржишту понудила свој 3D штампач *RapMan*. Прве верзије *RapMan 3D* штампача су имале само механички део док се од клијента очекивало да управљање механиком осмисли сам, тј. да искористи решења представљена *RepRap* пројектом. „*Bits From Bytes*“ је 2009. године представио верзију *3.0 RapMan* штампача (у овом раду је коришћена верзија *3.1*) који је био прва верзија која је садржала електронику и која је дала *RapMan*-у могућност самосталног штампања. Примерак 3D штампача *RapMan* верзије *3.1* у употреби је у Центру за информационе технологије Факултета Инжењерских наука у Крагујевцу (Слика 37.).

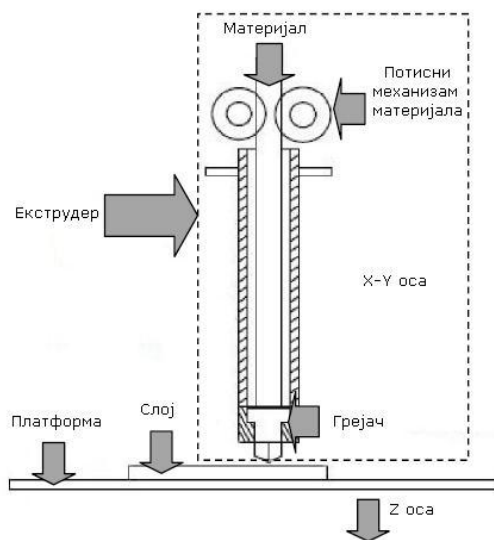


Слика 37. – 3D штампач *RapMan*

Технологија коју користи уређај *RapMan* спада у поступке који користе принцип наношења топљеног материјала (*FDM*) у простору и његовог слагања по слојевима након чега се формира жељени објекат. Као материјал се користе разни типови пластике различитих боја. Најчешћи материјали у употреби су *ABS* и *PLA*, од којих се *ABS* добија из нафте (као већина пластичних полимера) док се *PLA* прави од скроба и биоразградив је у благо киселом компосту на температури од 60 целзијусових степени.

Поред ова два наведена материјала користе се и остали термопласти (*LDPE, HDPE, PP, uPVC, PVC, Nylon6, PMMA* и многи други). Постизањем задате температуре у зависности од врсте пластике врши се њена екструзија у виду танке „нити“ којом се „исцртава“ слој по слој и тако врши штампање објекта-модела.

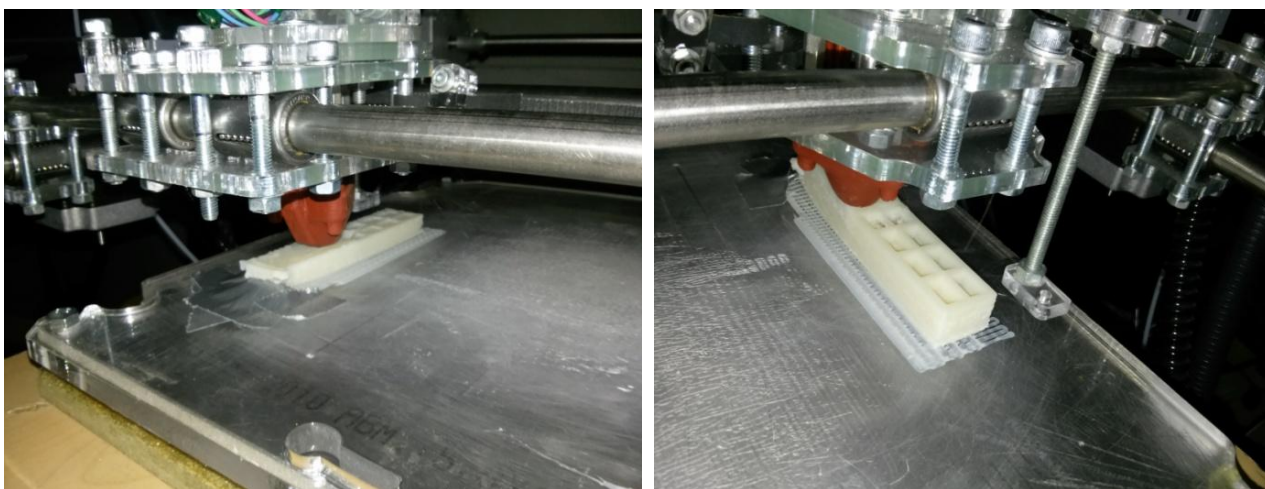
На слици 38. је приказан принцип штампања у поступку 3D штампе. На овом приказу треба уочити следеће делове: екструдер и платформу. Екструдер (истискивач) преко потисног механизма доводи материјал до грејача где постизањем радне температуре истискује пластику образујући слој (*layer*) на платформи. Екструдер поседује могућност кретања по X и Y координатама. Након завршене прве операције долази до спуштања платформе у правцу Z осе за дебљину слоја и све је спремно за наредни циклус. Екструдер као и радну платформу покрећу степ мотори којима се управља електроником. Путем ове електронике се врше подешавања параметара температуре, брзине истискивања материјала, дебљине слоја, као и позиционирање главе грејача у односу на платформу.



Слика 38. – Принципијални поступак штампања једног слоја поступком 3D штампе

Модел прототипова који су рађени у овом раду и чија је израда предвиђена на уређају *RapMan* су три варијанте држача елемената полице и прототип напредног столарског помагала. После успешног моделирања у програму *Google SketchUp*, конверзије у *.stl* формат и припреме у CAM софтверу *AXON*, модели ових прототипова су учитавањем са *SD* картице пуштени у штампу. За штампање сваког од модела било је потребно 3-5 сати.

У току процеса штампања јављао је се проблем са одлепљивањем почетних доњих слојева модела услед брзог хлађења екструдованог материјала. Платформа на којој се образују два почетна носећа слоја (*layera*) је направљена од метала, чија хладноћа је пребрзо одводила топлоту са нити истиснутог материјала. Овај проблем је решен помоћу грејача који су уграђени у платформу на којој се штампа модел, која грејући модел одоздо омогућава спорије и равномерније хлађење. Различити облици и величине објеката који се штампају подразумевају различите температуре, која се регулише помоћу додатног контролера температуре платформе.

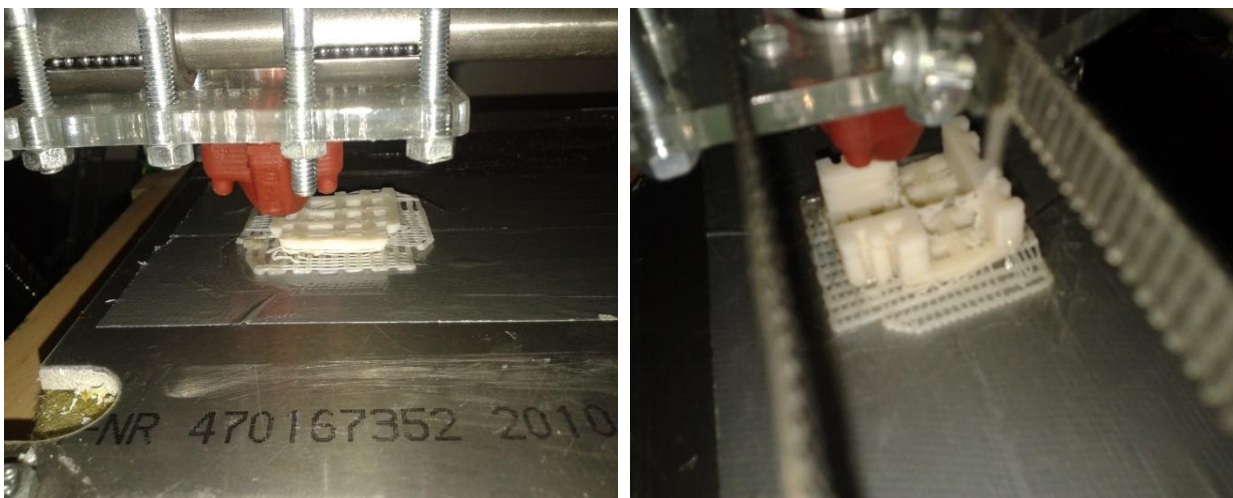


Слика 39. – Израда прототипа столарског помагала на 3D штампачу RapMan

Након скидања са радне платформе основно постпроцесирање састоји се у пажљивом уклањању ослонца (енгл. *support*). Извршено је поређење димензија добијеног модела са моделом генерисаног софтвером и утврђено је задовољавајуће димензионо слагање.

Овако добијени делови 3D штампом могу имати различите примене, почев од концепцијских, па све до функционалних делова. При томе имају могућност додатног постпроцесирања, које се углавном своди на инфилтрирање модела цијаноакрилатним лепком који поспешује издржљивост модела. Стално се ради на усавршавању поступка 3D штампе, као и на новим материјалима који се могу користити за штампу. Као добар показатељ континуираног усавршавања је и последња верзија RapMan штампача под називом BFB 3000 која користи до три екструдера са три различита материјала.

Намена одштампаних прототипова, чија је израда на 3D штампачу *RapMan* задата у овом раду, је директно тестирање и испитивање ергономских карактеристика, функционалности, дизајна и исправности димензија производа.



Слика 40. – Израда носача елемената полице на 3D штампачу *RapMan*

За разлику од професионалних 3D штампача, скупих по свим параметрима почев од материјала које користе до одржавања, коришћење 3D штампача *RapMan 3.1* пружа добру полазну основу у процесима едукације. Његовом употребом сваки корисник за кратко време може овладати основним техникама брзих производних технологија. Малобројне предности у односу на професионалне 3D штампаче огледају се у вишеструко нижој цени, начину одржавања и пре свега ефикасности употребе као едукативног средства.

5.3 *CNC (Computerized numerical control mashine) обрада*

Рачунарска нумерички управљана машина (РНУ, енгл. *CNC - Computerized numerical control mashine*) је врста обрадне машине која користи рачунарску контролу да би обавила одређени сет операција на обрадном делу. Програм учитан у рачунар *CNC* машине садржи све инструкције потребне за обраду или обликовање одређеног објекта.

Главне предности РНУ машина у односу на традиционалне су аутоматска операција и прилагодљивост. Аутоматска операција значи да није потребно присуство човека у току израде, што убрзава рад, чини производ јефтинијим и омогућује рад са опасним материјама и у условима непогодним за човека. Прилагодљивост је од великог значаја јер се једна иста машина може користити за производњу различитих врста делова. Тада је једноставним мењањем програма могуће израђивати делове потпуно различитих димензија и облика.

CNC код представља скуп функција које се користе за контролу обрадних операција машине, тј. скуп параметара који врше померање и промену брзине алата или објекта при бушењу, глодању, варењу и другим операцијама при обради. *CNC* код није у потпуности стандардизован, због чега произвођачи машина користе команде и спецификације које су прилагођене различитим платформама *CNC* обраде.

Трећи прототип који је предвиђен да се изради *CNC* обрадом у овом раду је модел поклопца лампе са перфорацијом. После моделирања поклопца у *Google SketchUp*-у, модел је сачуван у *.skp* и *.DXF* формату, а затим учитан у софтверски пакет *ArtCAM*. У овом програму је одређена путања алата за бушење перфорације и генерисан је *CNC (RML-1)* код, који је коришћењем *USB* флеш меморије прекопиран на радну станицу машине. На овом рачунару, који је директно повезан са уређајем *Roland Modela MDX-20*, инсталиран је програм *PrintFile* који је искоришћен да се помоћу њега на машину пошаље *RML-1* код са инструкцијама и параметрима алата за израду перфорације.

5.4 Израда прототипа на *CNC* глодалици Roland Modela MDX – 20

Roland Modela MDX-20 је модел машине који поред стандардних *CNC* операција (бушење, сечење, глодање, итд.), има могућност 3D скенирања физичког модела контактном методом (Слика 41.). Овим поступком скенирања, који спада у област реверзибилног инжењеринга, се од готовог физичког објекта добија дигитални 3D модел, који се даље може кориговати и преправљати у неком *CAD* софтверу за 3D моделирање.

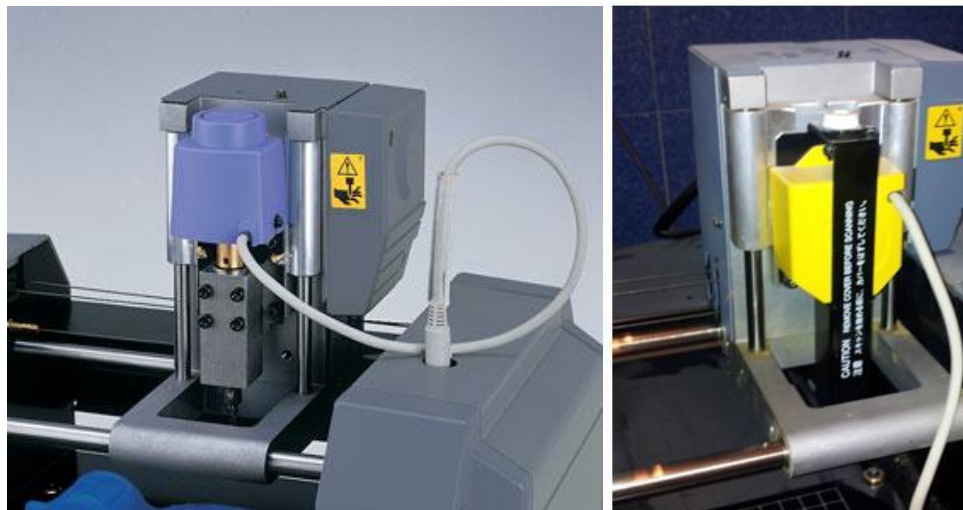
Машина користи један од два модула, у зависности да ли је потребно скенирање објекта или обрада. Модули се разликују по боји и по начину монтирања на машину. Скидање модула за скенирање и његова монтажа на уређај се разликују од монтирања модула за резање по томе што уз модул за скенирање иде и заштитни поклопац игле (пипалице).

Овај уређај спада у ред *All-in-One* уређаја за скенирање и глодање, који је намењен брзој изради и дизајнирању прототипова, производа, амбалаже, функционалних модела, калупа и накита. Може се користити за тестирање и дораду дизајнираних модела, смањење грешака, времена и трошкова производње. Због своје величине и компактности може се користити на сваком радном столу, при чему се конекција са рачунаром успоставља као са обичним штампачима.



Слика 41. – Глодалица Roland Modela MDX-20

Заштитни поклопац се скида након монтирања модула на машину, као што се модул скида са машине након монтирања поклопца на њега. Овај начин заштите је уведен због велике осетљивости *R.A.P.S. (Roland Active Piezo Sensor)* сензора и његовог лаког оштећења. Монтирање оба модула се врши истим алатом који је добијен уз куповину машине, причвршћивањем помоћу инбус завртњева. Конекциони каблови оба модула су истог облика и са истим бројем пинова.



Слика 42. – Изглед модула за глодање (лево) и модула за скенирање (десно)

Везу са рачунаром уређај остварује путем серијског порта (RS-232C), док максималне димензије објекта са којим се ради износе 203,2mm X 152,4mm X 60,5mm.

Roland Modela MDX - 20	
XY Величина стола	8-5/8"(X). x 6-1/4"(Y) ,(220 mm x 160 mm)
Максимална величина за рад	8 "(X) x 6 " (Y) x 2-3/8" (Z), (203.2mm x 152.4mm x 60.5mm)
Интерфејс	Serial (RS-232C)
Спољне димензије	476.8 mm x 381.6 mm x 305 mm

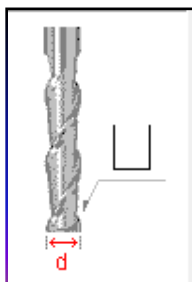
Табела 1. – Основни подаци о машини Roland Modela MDX - 20

Подаци о интерфејсу машине и начину комуникације са рачунаром дати су у следећој табели:

Roland Modela MDX - 20	
Комуникациони стандард	RS-232C спецификација
Тип размене података	Асинхрони, duplex data пренос
Брзина размене података (DR. Picza)	9600 bps
Провера упарености уређаја	Нема
Data bits	8 bits (fixed)
Stop bits	1 bits (fixed)
Handshake	Hardwire

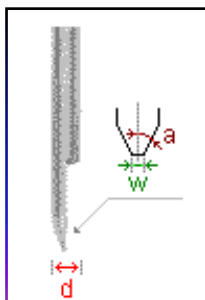
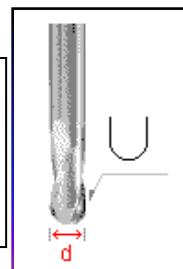
Табела 2. – Подаци о интерфејсу машине Roland Modela MDX-20 и начину комуникације са спољним уређајима

За сваки алат, тип глодала или бургије који се користи у процесу обраде, мора постојати предходно формиран код који генерише путању главе. Алати и пречници алата који могу да се користе код ове машине без предходног подешавања кода за генерацију путаље ножа су дати на следећим сликама.



Овај алат се односи на алате са равним врхом (*Square endmilles*) и софтвером понуђени пречници су: 6mm, 5mm, 4mm, 3mm, 2mm, 1mm.

Овај алат се односи на алате са заобљеним врхом (*Ball endmilles*) и софтвером понуђени пречници су: 3mm, 2.5mm, 2mm, 1.5mm, 1mm, 0.5mm.



Овај алат се односи на алате са коничним врхом (*Conical endmilles*) и софтвером понуђени пречници су: 0.2mm (за доста фину обраду).

Пре софтверског подешавања и почетка израде прототипа, потребно је упознати командне и сигурносне тастере који се налазе на предњем делу кућишта машине. „Power“ дугме служи за укључивање и искључивање машине, „View“ дугме служи за паузирање ради провере или чишћење обрадног комада, и у хитним случајевима за прекидање процеса глодања; „Up and Down tool“ тастери служе за позиционирање алата по Z-оси пре почетка процеса глодања, као и за брисање целокупне меморије (енгл. *Buffer*) машине, која садржи податке о путањи ножа у случају када се покрене процес који се не жели.

Процес резања неће почети у случају да заштитни поклопац није на свом месту, јер он притиска заштитни микропрекидач. Такође процес не може почети у случају када је LED лампица поред тастера „View“ упаљена, која се гаси притиском на истоимени тастер.

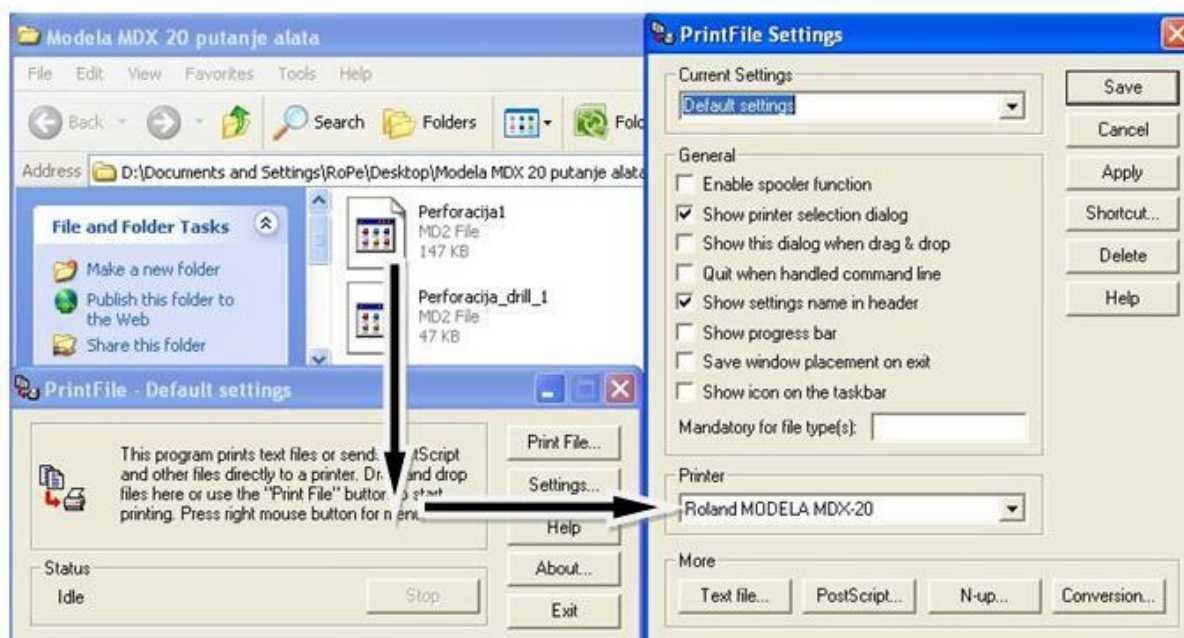
Приликом прикључивања резног модула на машину након укључења, уочава се да на машини светли дугме „Modeling“, што је индикатор да је модул исправно повезан. Такође је врло битно да у случају рада са модулом за резање конекција између машине и рачунара буде без USB конектора, дакле директна RS-232C веза.

Прикључна глава (футер)	6 mm пречник
Мотор који покреће алат	10 W (DC Motor)
Резолуција софтвера	0.025 mm/кораку
Резолуција машине	0.00625 mm/кораку
Брзина окретања главе	6500 rpm (Обртаја у минути)
Брзина глодања	0.1 do 15 mm/секунди
Материјали који могу да се обрађују	Дрво, пластика, индустријска смола, хемијско дрво, алуминијум, месинг
FEDFB3 прихватљив алат	Глодала, бургије

Табела 3. – Подаци о машини Roland Modela MDX-20 везани за могућности глодања

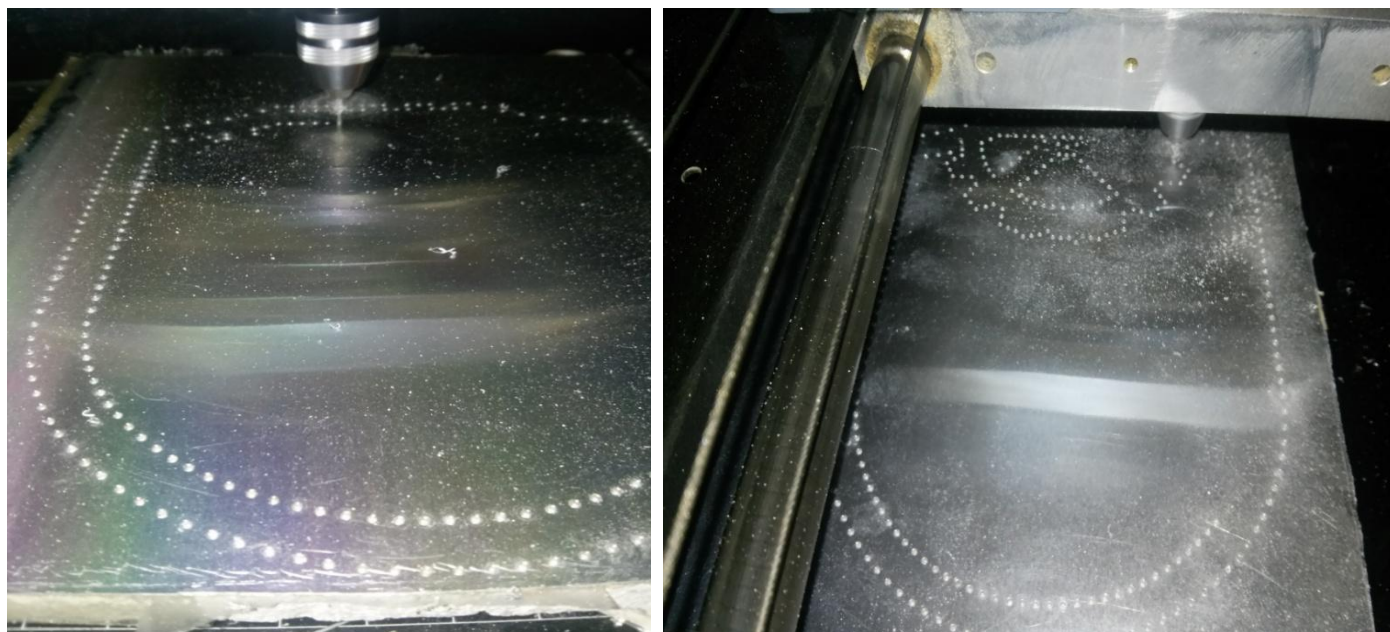
Пошто је извршена припрема за израду прототипа поклопца са перфорацијом, сама израда је потпуно аутоматизована. Као што је већ објашњено, након моделирања, конверзије и припреме модела, као резултат смо добили фајл у *.md2* формату који је намењен уређајима *Roland Modela MDX-20* и *MDX-15*. Овај фајл је у ствари *CNC (RML-1)* код, добијен помоћу софтвера *ArtCAM*, који представља дефиницију параметара и путање алата (бургије) за израду отвора који чине перфорацију прототипа.

Након што је коришћењем *USB* флеш меморије овај фајл прекопиран на радну станицу (рачунар који је повезан са глодалицом *Roland Modela MDX-20*), на исти рачунар је инсталиран програм *PrintFile*. Овај програм представља елегантно решење које омогућава да се извршни фајлови у *RML* формату проследи *Roland*-овој машини без коришћења фабричког софтвера. У овом случају је довољно да се *.md2* фајл простом „*Drag and Drop*” техником прекопира у прозор програма и пошаље машини која аутоматски почиње са извршавањем (слика 43.).



Слика 43. – Слање фајла у *.md2* формату на глодалицу *Roland Modela MDX-20*

Након ове радње поступак се одвија потпуно аутоматизовано до самог краја и радње које евентуално треба да обавља оператер за то време (усисавање струготине, хлађење алата и сл.) спадају у стандардне поступке при *CNC* обради.



Слика 44. – Израда прототипа поклопца са перфорацијом на глодалици *Roland Modela MDX-20*

6 ПОСТПРОЦЕСИРАЊЕ

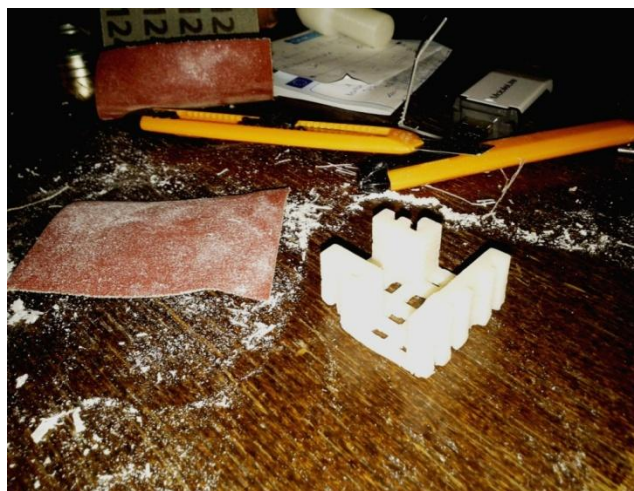
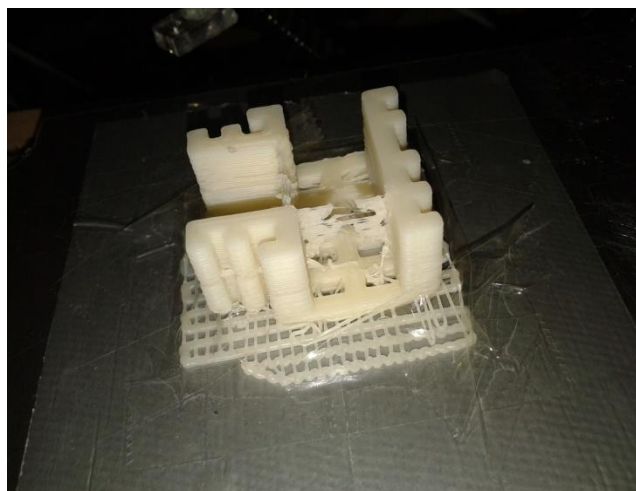
Крајњи корак ланца *RP* процеса је постпроцесирање, у коме се углавном обављају мануелне операције као што су чишћења, очвршћавање, финиширање, и сл. При овим поступцима највећу одговорност за успешност процеса сноси оператер. У зависности од примењене технологије при изради модела, завршна обрада може подразумевати различите операције постпроцесирања. Услед широког спектра могућности којима се удовољава потребама купца, вршење бенчмарк тестова радних станица, опреме, *RP* система, *CNC* машина и сл. постала је апсолутна нужност. Динамични развој и све шири избор комерцијално доступних *RP* система захтева објективно одлучивање при одабиру система за креирање прототипова производа.

У завршној фази ланца *RP* процеса анализира се тек израђени прототип, при чему се морају обавити одређена мерења и испитивања, која укључују визуелну инспекцију, мерење димензија и додатну обраду. У случају делова добијених *SLA* поступком, поред операције очвршћивања и потенцијалних деформација делова који имају танке зидове, обавља се чишћење сувишног материјала, што се односи на уклањање заробљене течности из рупа, уклањање ослонаца и вишка праха (као и у случају *3DP* поступка).

RP технологије					
Постпроцесирање	SLS	SLA	3DP	FDM	LOM
1.Чишћење	да	да	да	не	да
2.Очвршћавање	не	да	по потреби	не	не
3.Финиширање	да	да	да	да	да

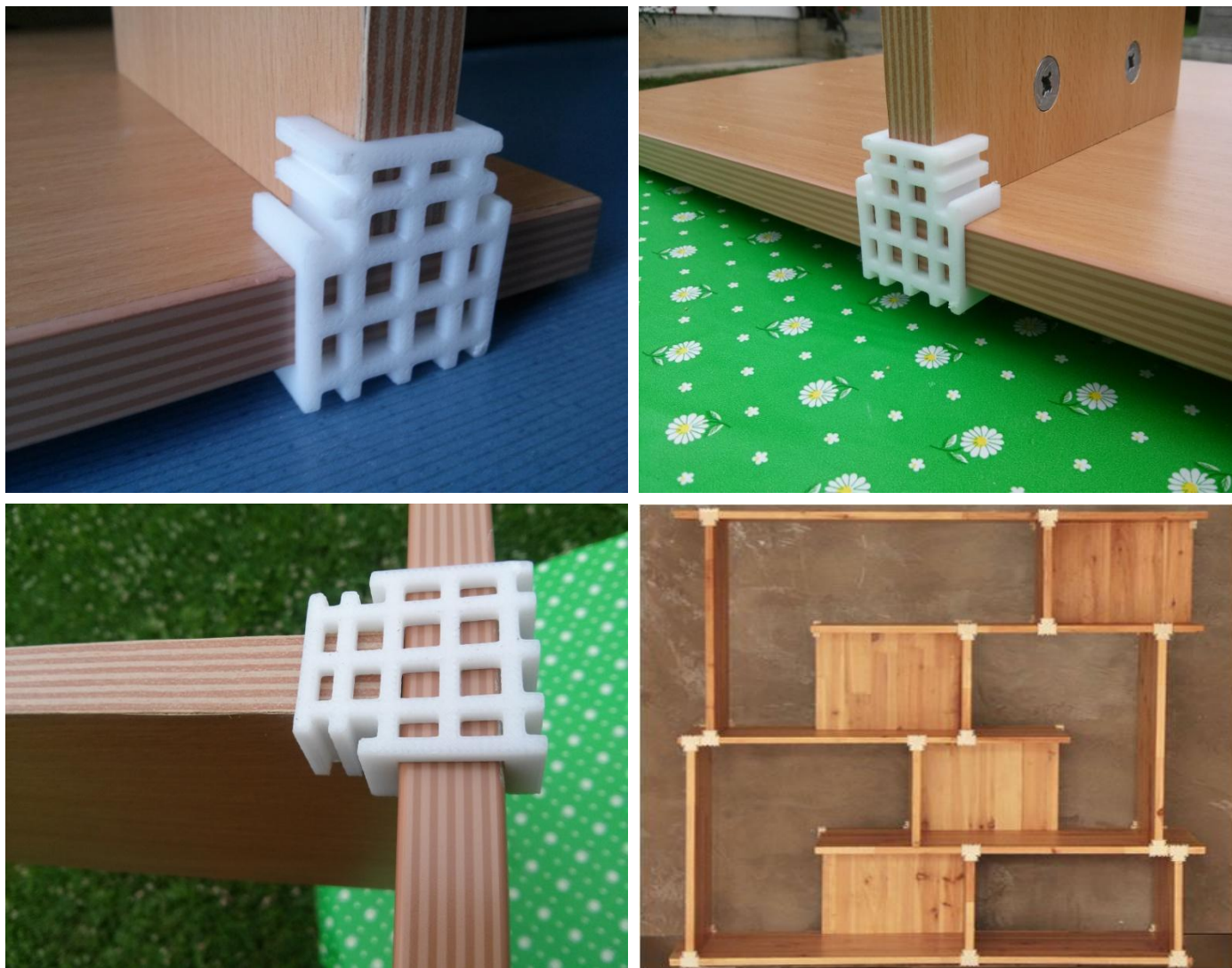
Табела 4. – Операције постпроцесирања за разне *RP* процесе

Код *LOM* технологије у поступку постпроцесирања потребно је ручно отклонити носећу структуру и изгладити површине. У случају стереолитографије део се обавезно излаже *UV* зрачењу како би потпуно очврснуо. Операција финиширања (потребна код *FDM* поступка детаљно описаног у овом раду) се односи на секундарне процесе попут пескарења или бојења, а са циљем естетских побољшања прототипа. Побољшање механичких карактеристика се реализује машинском обрадом дела, у шта спада бушење, глодање, урезивање навоја итд...



Слика 45. – Прототип носача елемената полице пре и након обраде шмирглањем

Прототипови носача елемената полице који су у овом раду израђени *FDM* поступком, у процесу финиширања су обрађени уклањањем ситних неравнина шмирглањем (Слика 45.). У случају модела прототипа столарског помагала, поред обраде шмирглањем, употребљен је и оштар нож – скалпел, помоћу кога је одвојен носач у отвору модела. Мерење димензија добијеног прототипа задовољило је толеранције предвиђене при моделирању.



Слика 46. – Тестирање и употреба прототипа носача елемената полице



Слика 47. – Тестирање и употреба прототипа столарског помагала

Прототип поклопца лампе са перфорацијом који је израђен операцијом бушења у *CNC* поступку, није захтевао никакву додатну обраду, ако изузмемо прање остатака лепка од дуплофан траке, која је коришћена за фиксирање поклопца на радну плочу глодалице *Modela MDX-20*. Димензије и распоред отвора толеранцијски су задовољиле мере задате при моделирању поклопца.



Слика 48. – Финални изглед прототипа поклопца лампе

7. ЗАКЉУЧАК

Технологије за брзу израду прототипова су данас присутне у широком спектру индустријских области због бројних предности које нуде. Иако је *Rapid Prototyping* релативно нова појава у индустрији, ове савремене технологије су за кратко време омогућиле достизање низа циљева које модерно тржиште дефинише, као што су примарни захтеви скраћења времена до појаве производа на тржишу и смањење цене производње. Виши степен визуализације прототипа у раним фазама пројектовања, откривање грешака пројектовања пре израде алата и брза израда алата за производњу физичких прототипова, главне су предности које се постижу применом *RP* технологија. Развој ове технологије довео је до тога да се данас њиховом појединачном и комбинованом употребом могу остварити и брза израда алата (енгл. *Rapid Tooling – RT*) и брза производња (енгл. *Rapid Manufacturing – RM*). Циљ овог рада је био да се кроз конкретне примере практично прикаже цео процес у настајању прототипа, тј. да се опишу све операције почевши од саме идеје изгледа и функције производа, па све до финалне израде и тестирања прототипа. Да би корисници који припадају најширој заједници што јефтиније могли да понове неке од наведених фаза градње прототипова, коришћене су најјефтиније или бесплатне верзије софтвера које могу задовољити постављеним захтевима и које су доступне на интернету.

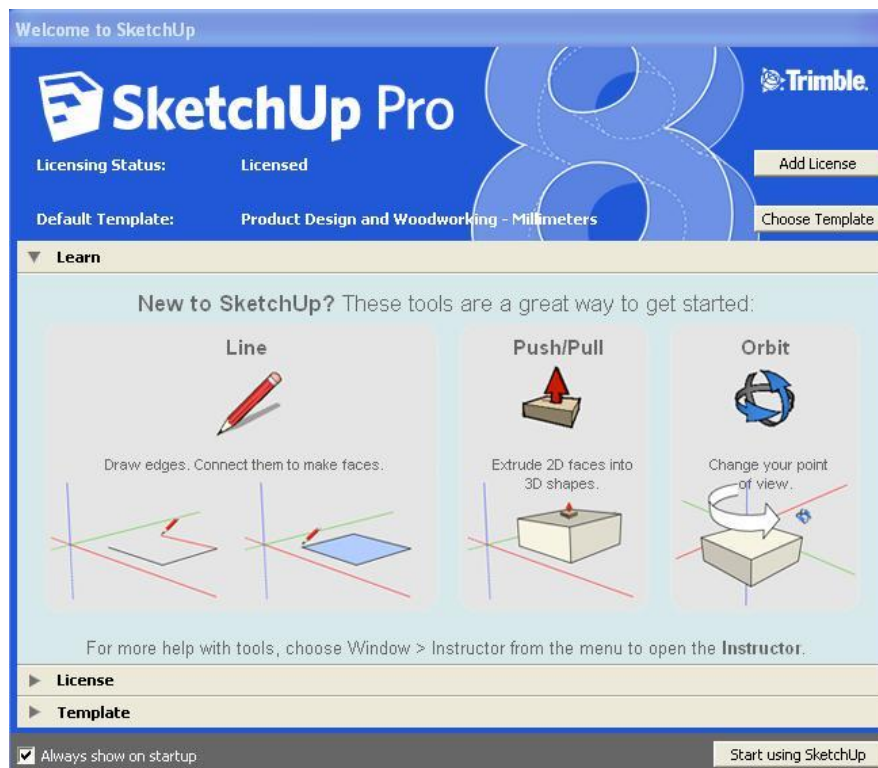
Анализом описаних етапа у настајању функционалних прототипова у овом раду, могу се извести општи закључци применљиви у случају употребе других техника и софтвера за моделирање, конверзију, пренос, проверу, припрему и израду прототипова. Узевши у обзир динамику и брзину појаве нових софтвера за моделирање (напредни алгоритми за исецање, скрипте које проширују могућности софтвера итд...), уређаја за брзу израду прототипова и нових материјала од којих се граде модели, јасно је да се ова област изузетно брзо развија и од корисника захтева константно учешће и учење нових техника производње прототипова.

Rapid Prototyping технологије и поступци су незаобилазни део савремене индустријске праксе. У данашњим тржишним условима који су диктирани кретањима на глобалном нивоу, успех и ефикасност у отклањању недоумица и питања везаних за оптимизацију у дизајну будућих производа се не може очекивати без употребе напредних техника за брзу и квалитетну израду прототипова.

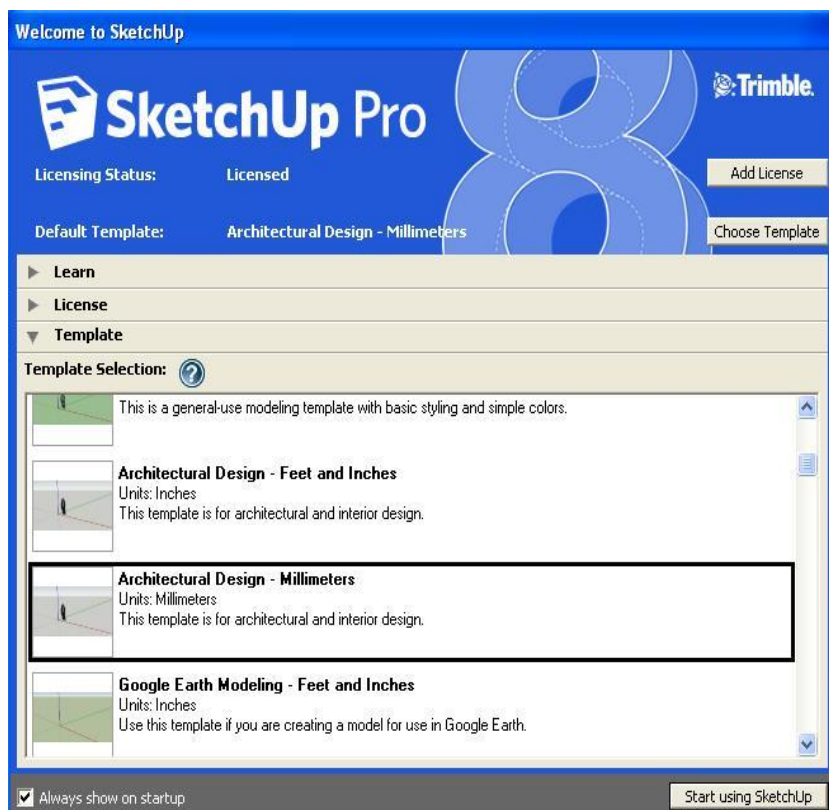
Прилог раду 1 – Кораци при моделирању прототипа држача елемената полице у програму *Google SketchUp*

У овом прилогу су приказани кораци који су прављени у програму *Google SketchUp* при моделирању једног од прототипова рађених у овом мастер раду (Носач елемената полице), као и опис опција и алата који су при томе коришћени. Циљ овог прилога је да се кориснику који нема искуства у моделирању објеката у овом програму, следећи упутство корак по корак, омогући да самостално измоделира приказани прототип. Такође ће се практично приказати употреба јединственог „*Push/Pull*” система додавања запремине моделу, на који се овај програм углавном ослања. Користећи се алатима овог софтвера и неким напреднијим опцијама које су омогућене кроз додатне скрипте, могуће је изградити прототипове са далеко компликованијим и захтевнијим формама од конкретно приказаног прототипа.

Двоструким кликом миша на икону софтверског пакета *Google SketchUp*, која се налази на десктопу рачунара на коме је програм инсталиран, приступа се почетном прозору (Слика 1.).

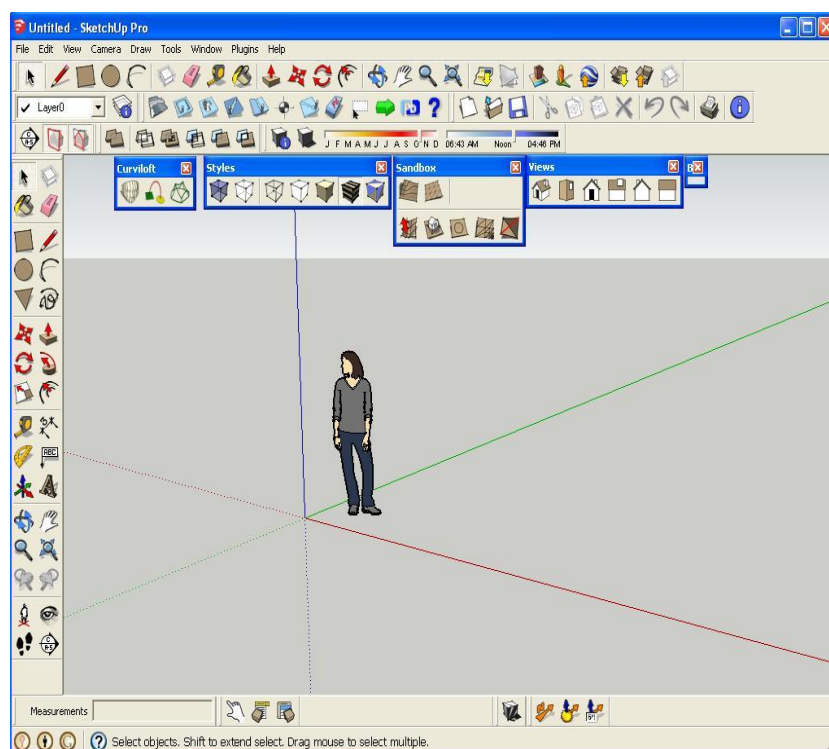


Слика 1. – Почетни прозор програма *Google SketchUp*



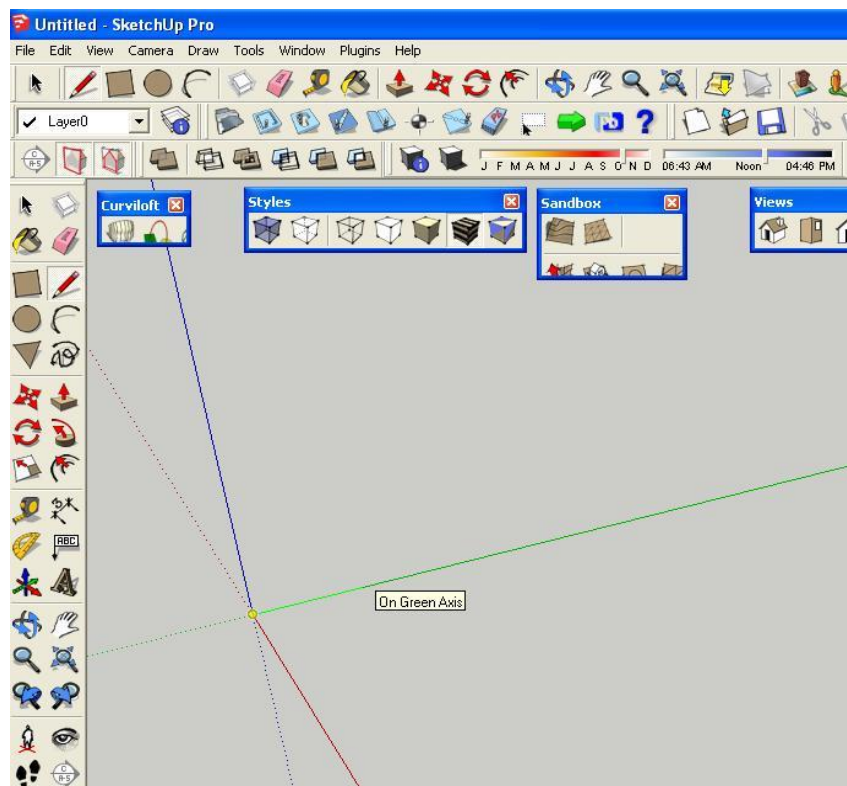
Слика 2. – Прозор у коме се бирају мерне јединице

Кликом на опцију „*Choose Template*” отвара се прозор у коме треба одабрати мерне јединице, у овом случају милиметре (Слика 2.).



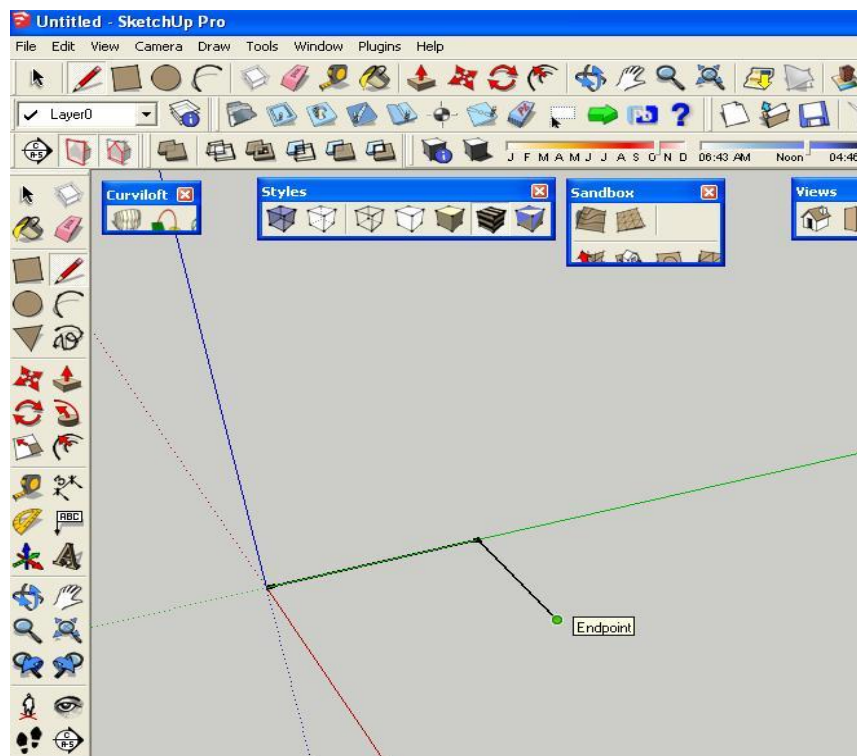
Слика 3. – Основно корисничко окружење

Кликом на дугме „*Start using SketchUp*” потврђују се милиметри као мерна јединица и отвара се корисничко окружење програма *Google SketchUp* (Слика 3.).



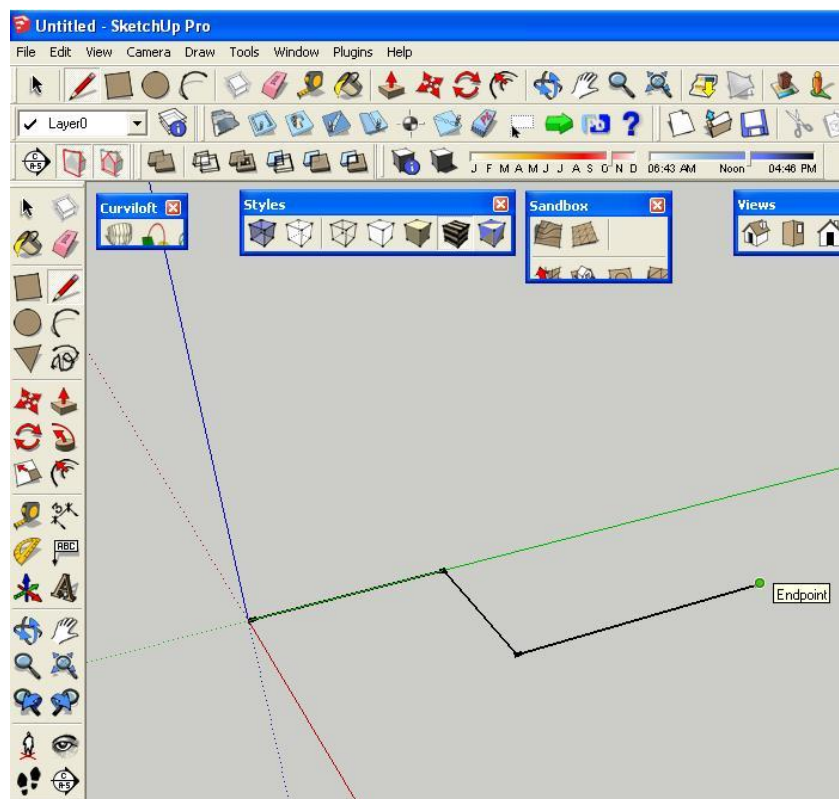
Слика 4. – Цртање прве линије

Левим кликом миша одабрати опцију „Line”, а затим довести курсор у координатни почетак и повући га у смеру X осе (зелена линија). У поље „Length” уписати „3”, и потврдом на тастер „Enter” добија се прва линија дужине 3mm, која се поклапа са X осом (Слика 4.).



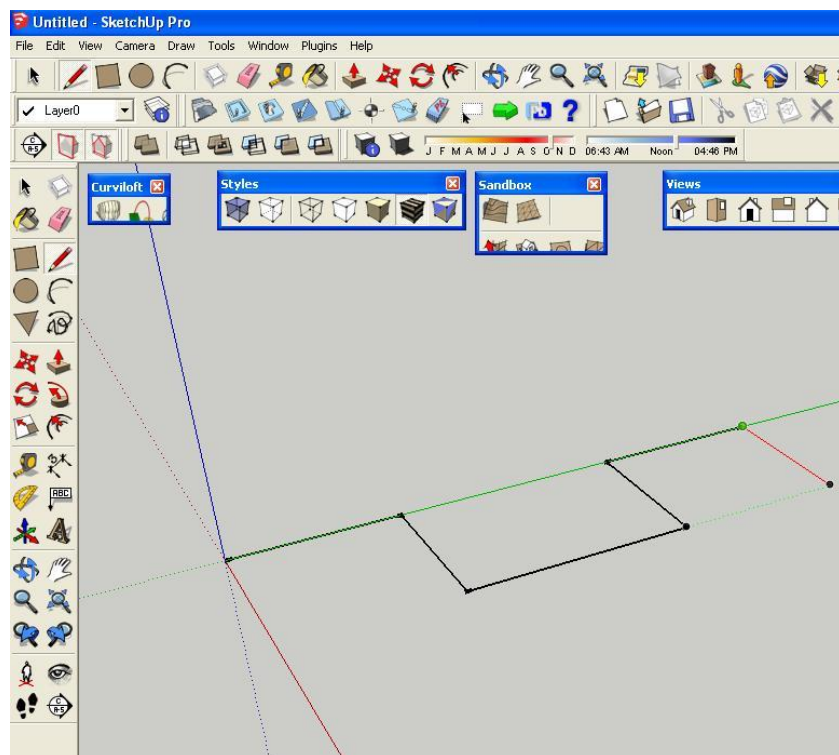
Слика 5. – Цртање друге линије

Кликнути на крајњу тачку добијене линије и курсор миша повући паралелно са Y осом (црвена линија). У поље „Length” уписати „3”, и потврдом на тастер „Enter” добија се следећа линија, паралелна са Y осом (Слика 5.).



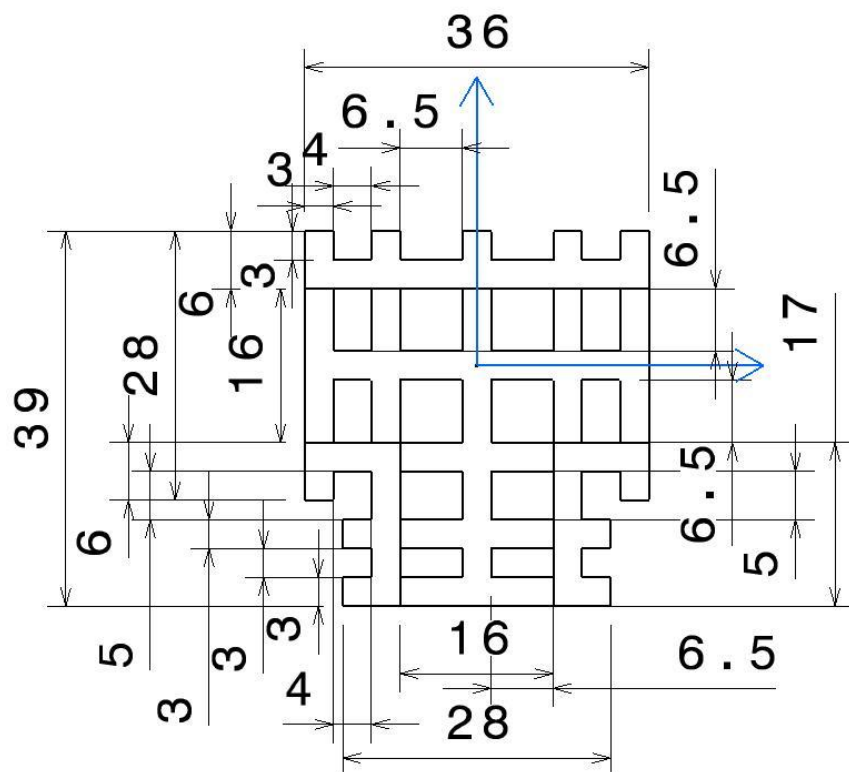
Слика 6. – Цртање треће линије

Кликнути на крајњу тачку друге линије и курсор миша повући паралелно са Х осом (зелена линија). У поље „Length” уписати „4”, и потврдом на тастер „Enter” добија се следећа линија (Слика 6.).



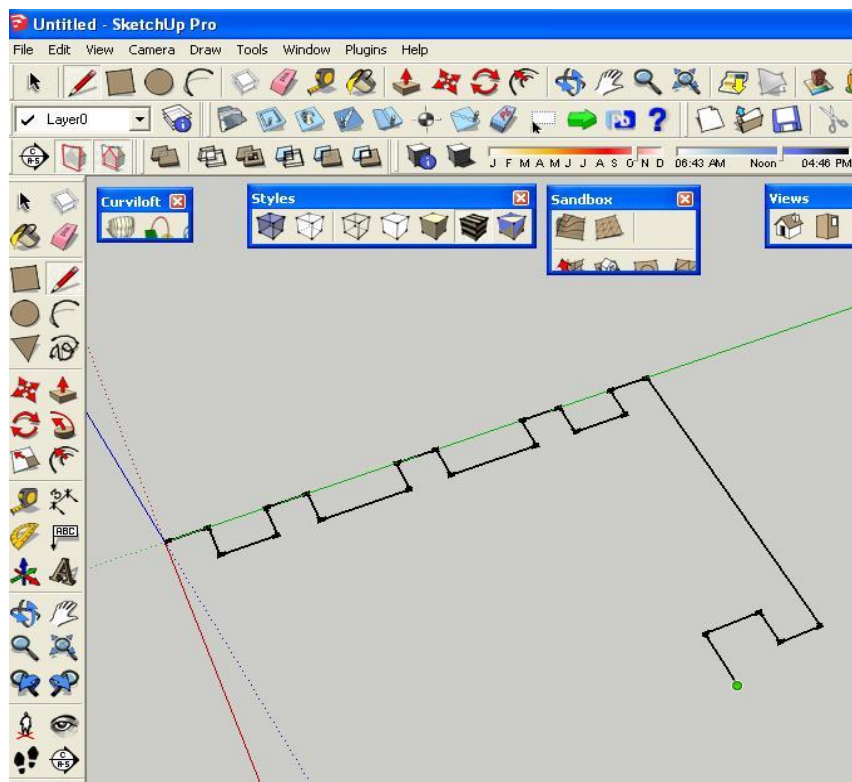
Слика 7. – Помоћна зелена испрекидана линија

На слици 7. се види помоћна испрекидана зелена линија, која олакшава цртање крајње тачке, означавајући паралелност линије са Х осом. Користећи се техничким цртежом прототипа (Слика 8.), овим поступком се цртају све линије које образују контуру основе модела.



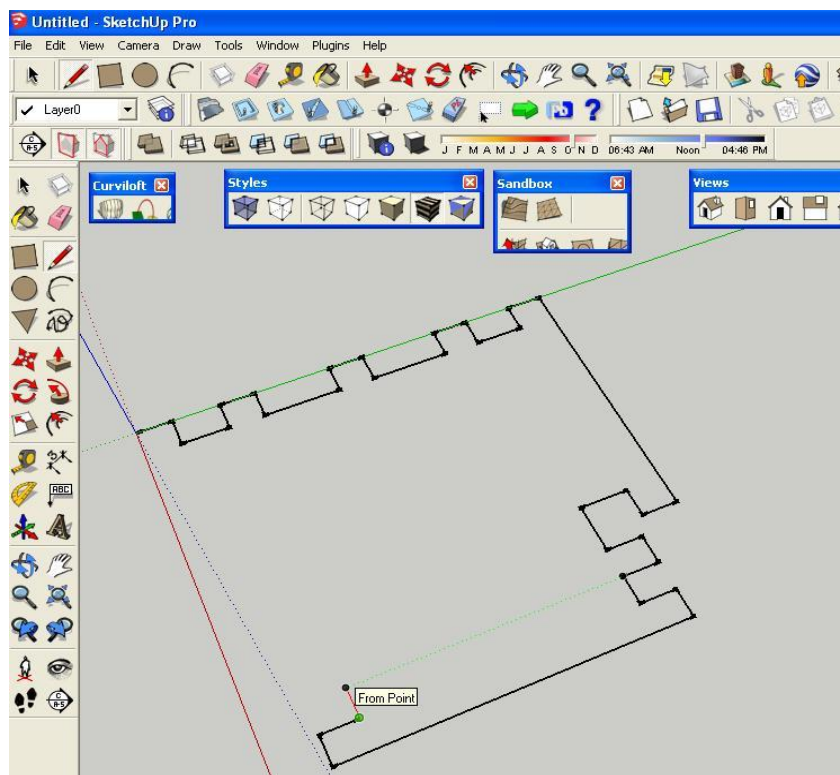
На слици 8. су дате димензије основе модела прототипа носача полице, који је симетричан по Y осе.

Слика 8. – Димензије основе модела



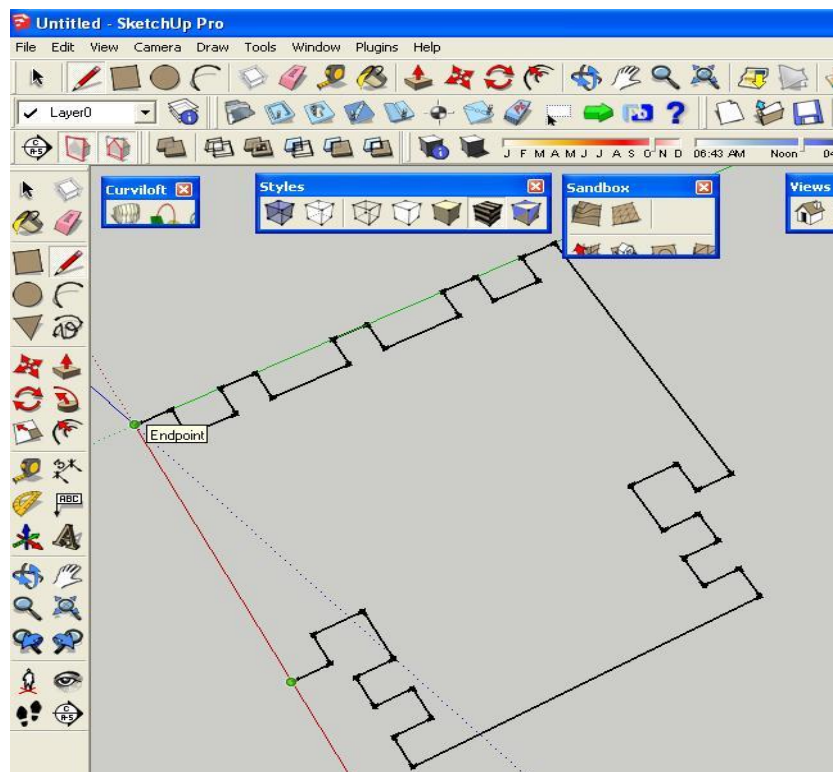
Изглед контуре основе модела прототипа након цртања 22. линије (Слика 9.).

Слика 9. – Изглед контуре основе након 22. линије



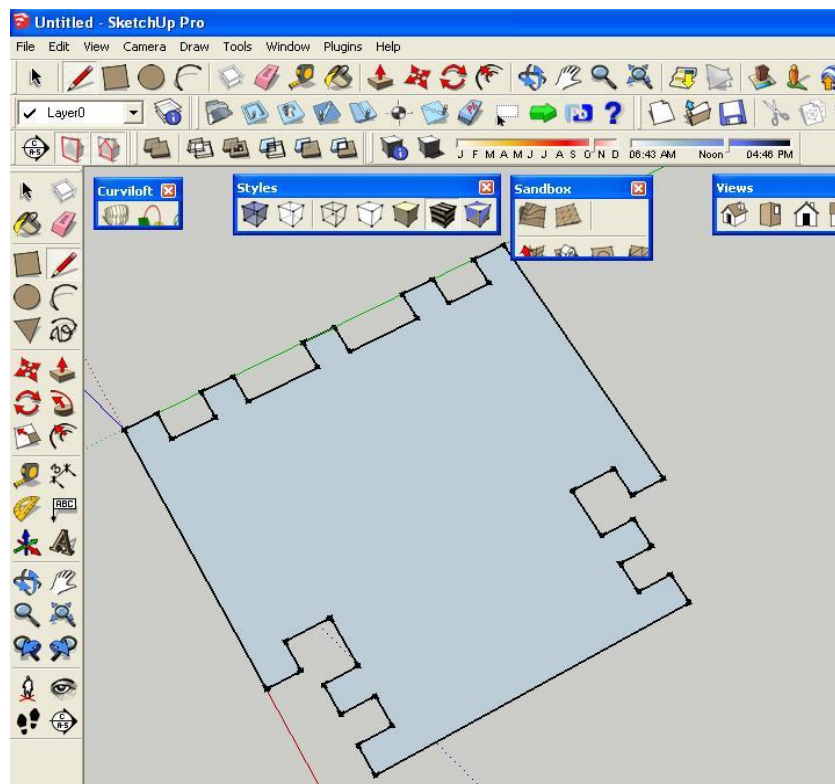
Слика 10. – Изглед контуре основе након 32. линије

Изглед контуре основе модела након цртања 32. линије (Слика 10.).



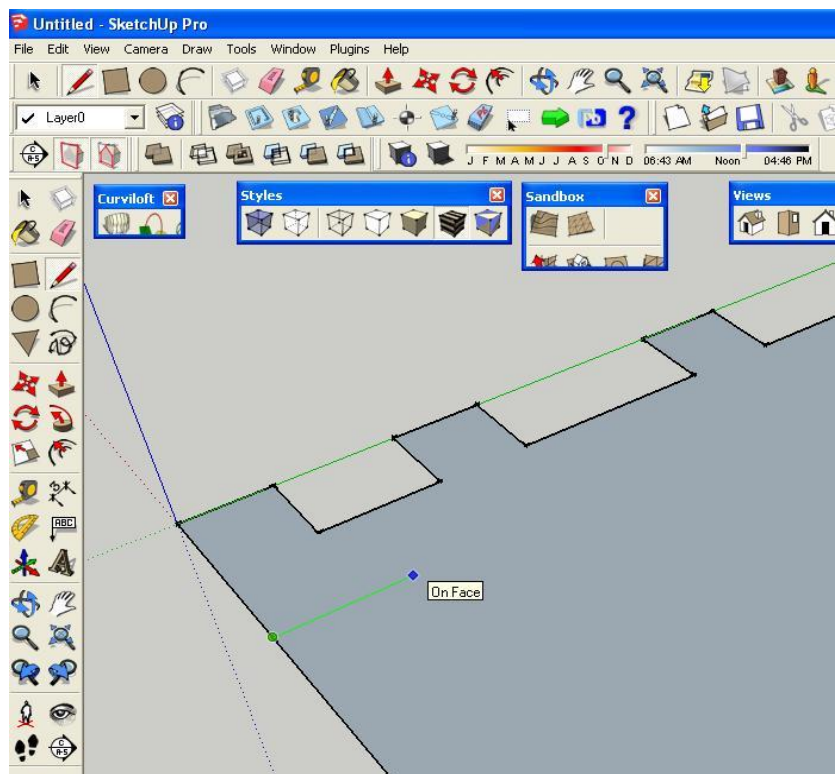
Слика 11. – Изглед контуре основе након 39. линије

Изглед контуре основе модела након цртања 39. линије (Слика 11.).



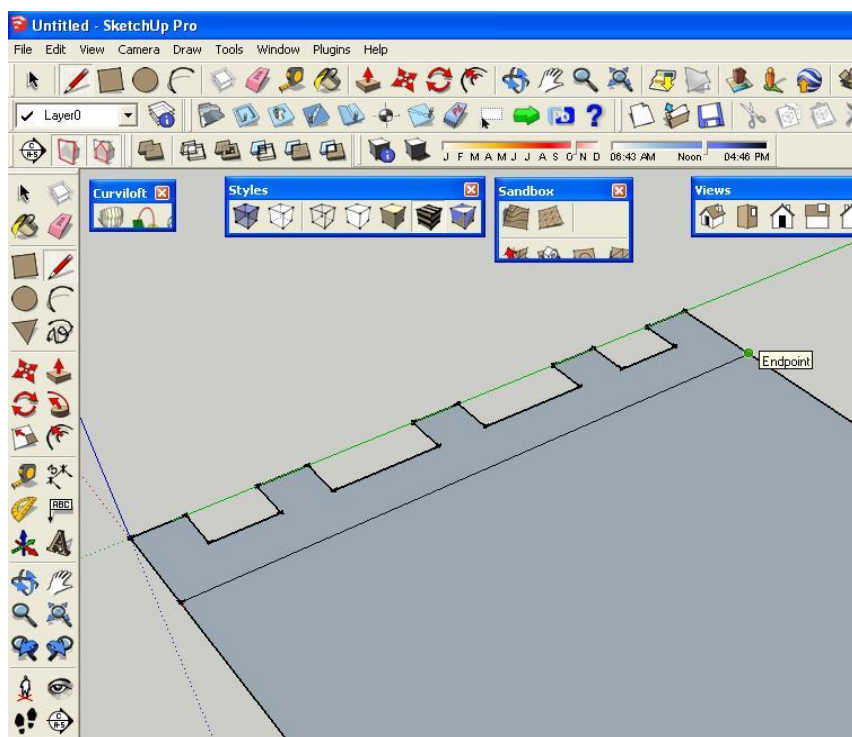
Слика 12. – Затворена контура (основа модела)

Повлачењем завршне линије формира се затворена контура која чини основу запремине модела прототипа, која се сада од окружења издваја бојом. (Слика 12.).



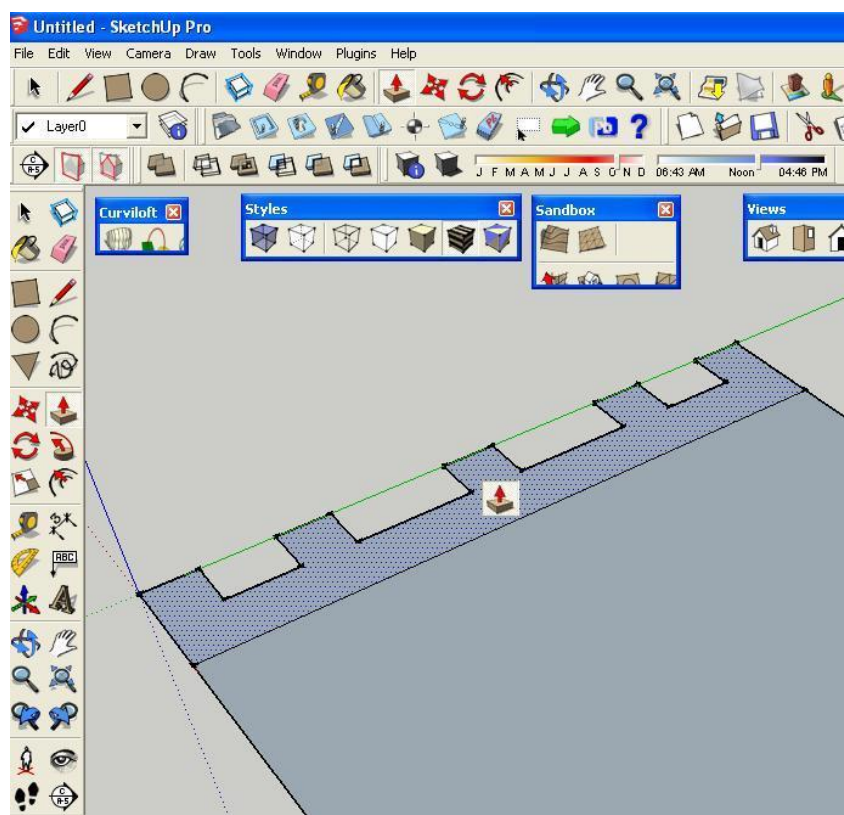
Слика 13. – Повлачење линије паралелно са X осом

На удаљености $6mm$ од координатног почетка на Y оси црта се прва тачка дужи и повлачи се курсор у смеру паралелном са X осом (Слика 13.).



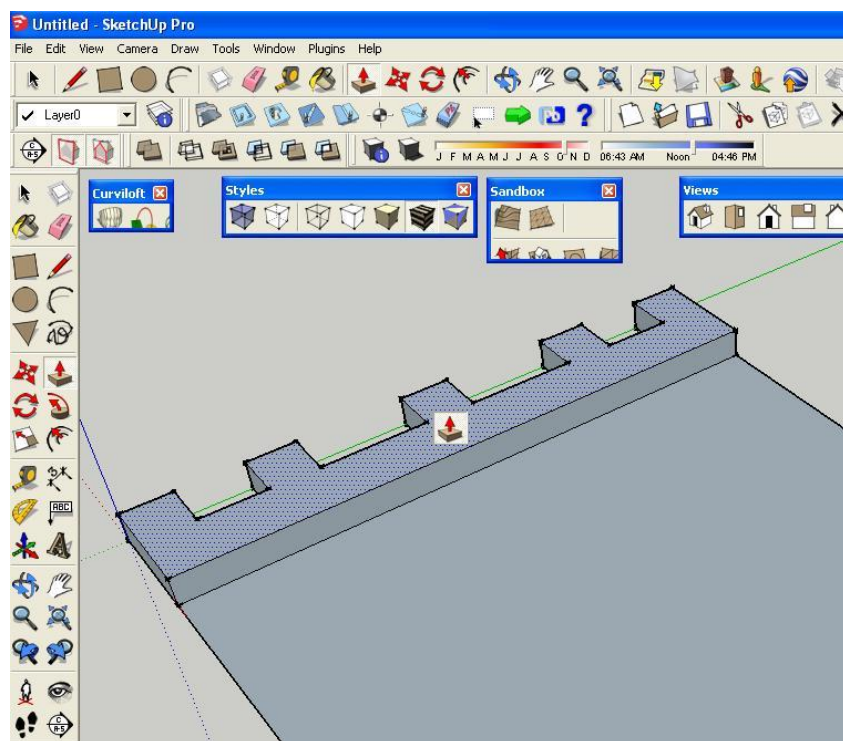
Слика 14. – Цртање дужи на основи модела

Дуж се завршава на линији контуре основе, у складу са димензијама датим на техничком цртежу на слици 8. Овим је основа подељена на две површине (Слика 14.).



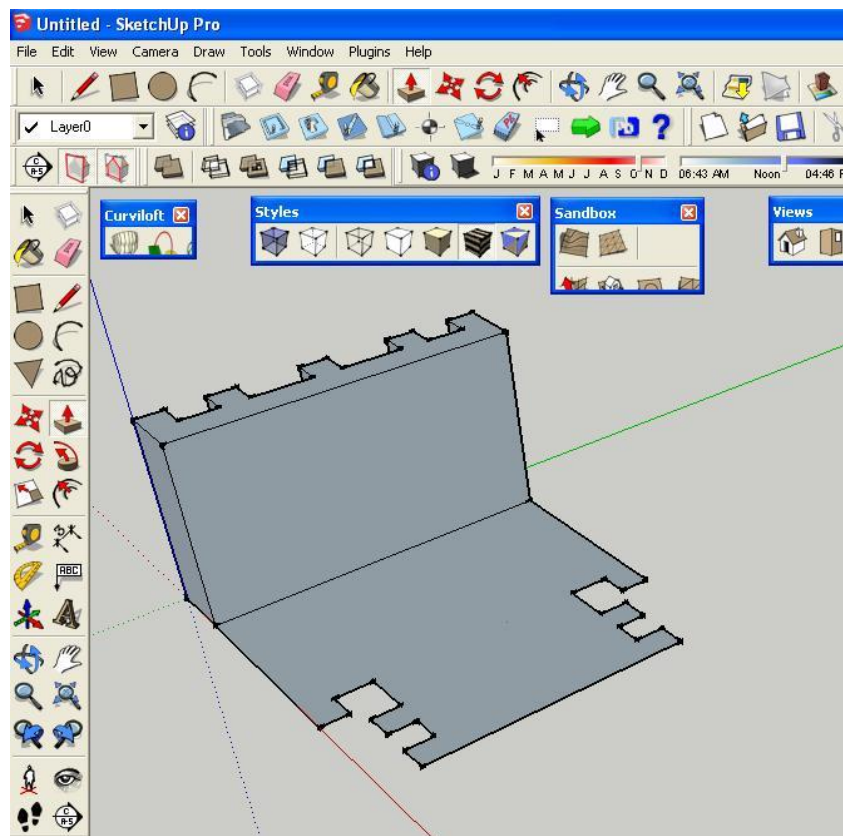
Слика 15. – Одабир „Push/Pull” алатке

Из палете алата бира се „Push/Pull” алатка, која служи за манипулисање површинама модела (Слика 15.).



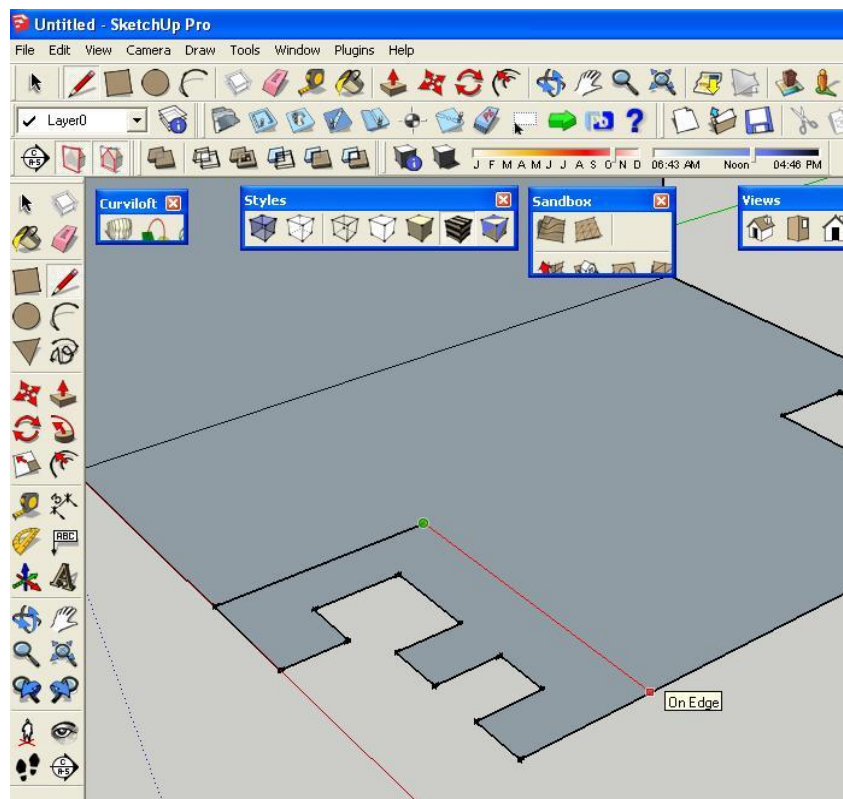
Слика 16. – Повлачење површине у смеру Z осе

Левим кликом миша на површину коју смо одредили у предходном кораку, врши се њено повлачење у позитивном смеру Z осе (плава линија) (Слика 16.).



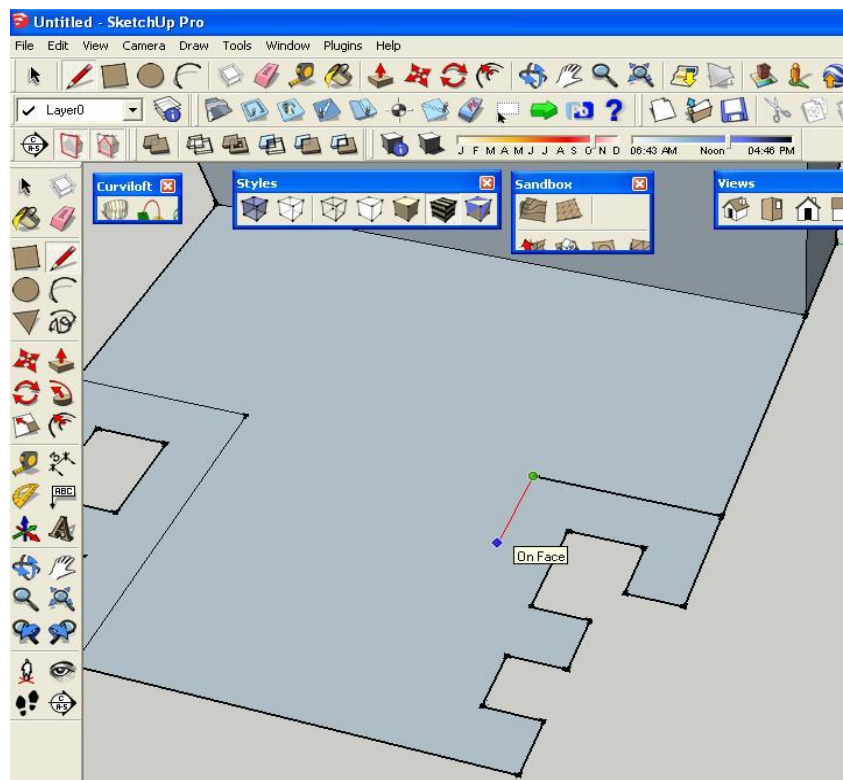
Слика 17. – Креирана запреминска форма висине 18mm

У поље „Distance” уноси се вредност 18mm, којом се одређује удаљеност нове површине од површине дефинисане у основи модела. Овим се ствара потребна прва запреминска форма (Слика 17.).



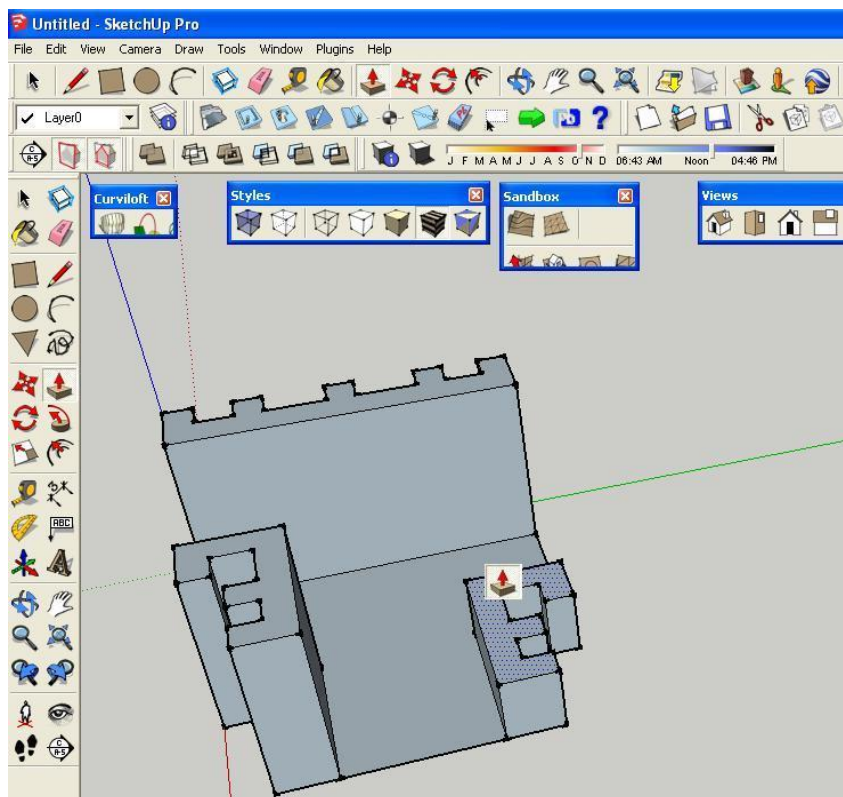
Слика 18. – Подела основе на две нове површине

Врши се повлачење линија у складу са димензијама цртежа којима се основа модела дели на нове две површине. (Слика 18.).



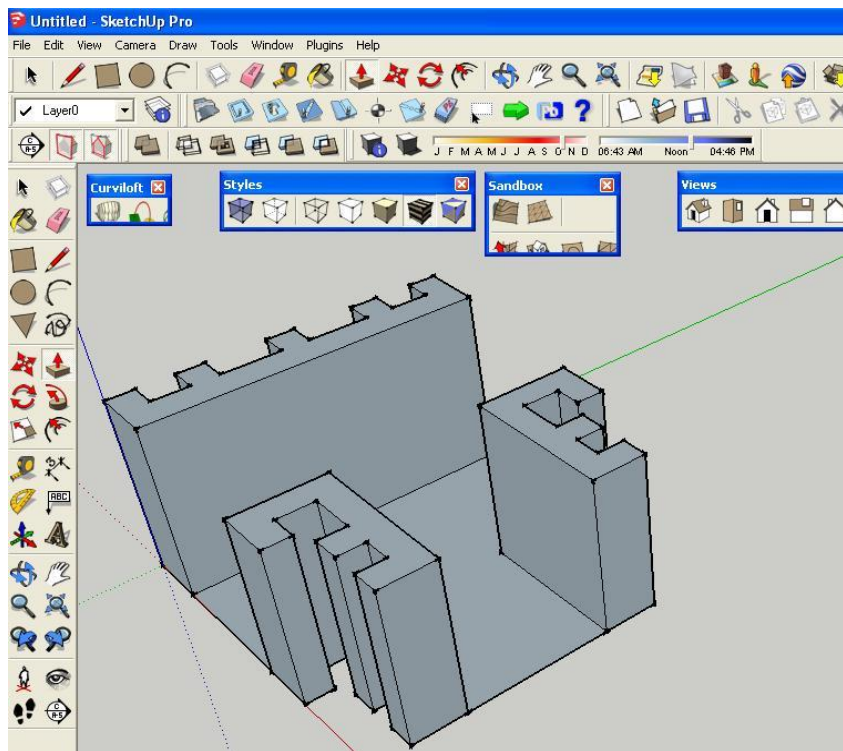
Слика 19. – Подела основе на три нове површине

Врши се повлачење линија у складу са димензијама цртежа којима се основа модела дели на три нове површине (Слика 19.).



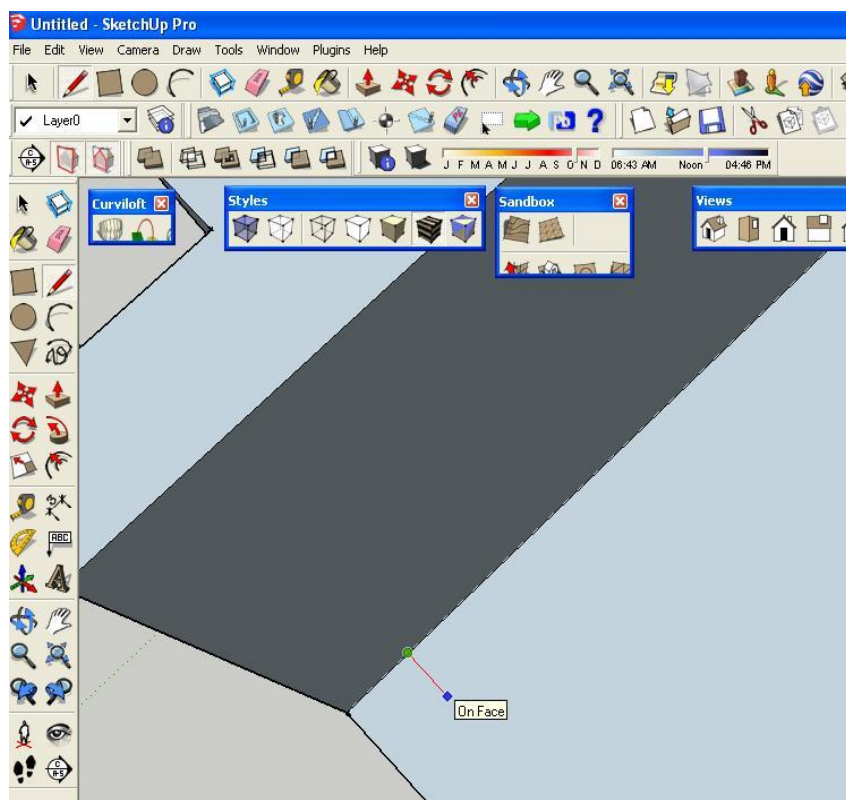
Из палете алата бира се „Push/Pull” алатка, а затим се кликом на две мање површине на основи врши повлачење у позитивном смеру Z осе и у поље „Distance” се уносе вредности од 18mm, чиме су креиране нове две потребне запреминске форме (Слика 20.).

Слика 20. – Креирање нове две запреминске форме



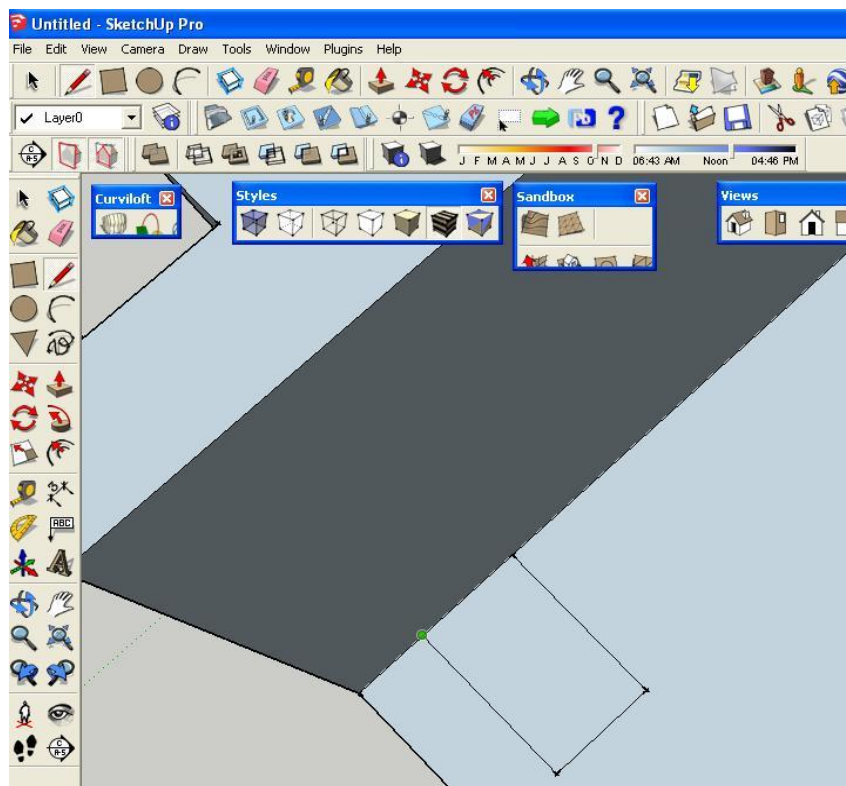
Изглед модела након креирања три запреминске форме (Слика 21.).

Слика 21. – Модел са три креиране запреминске форме



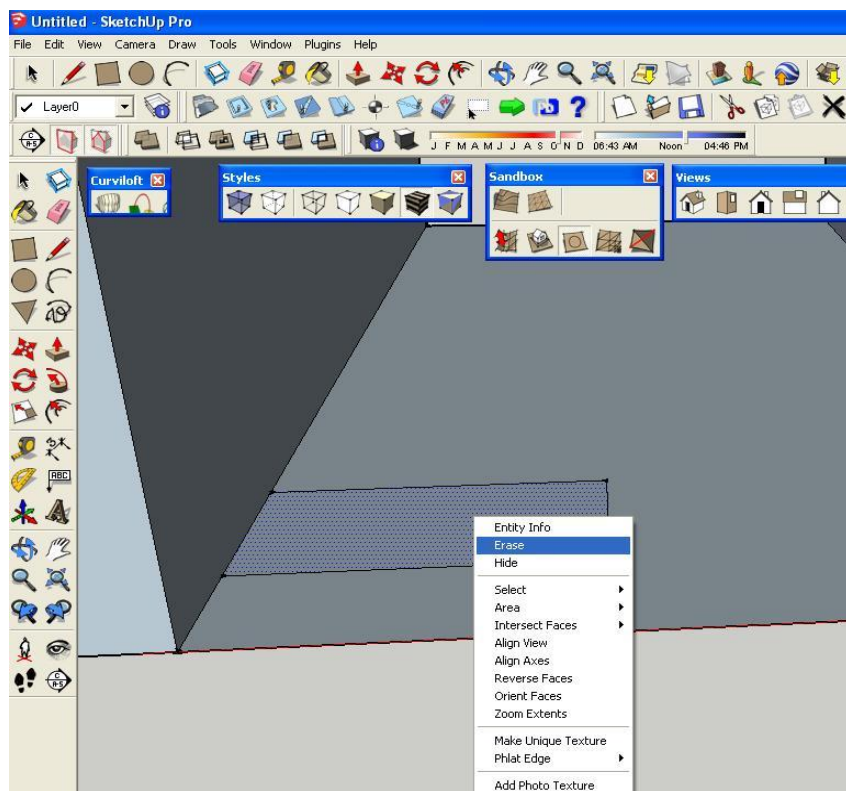
Слика 22. – Почетак креирања нове површине

У складу са димензијама на техничком цртежу, на површини основе модела повлачењем линија се формира нова површина (Слика 22.).



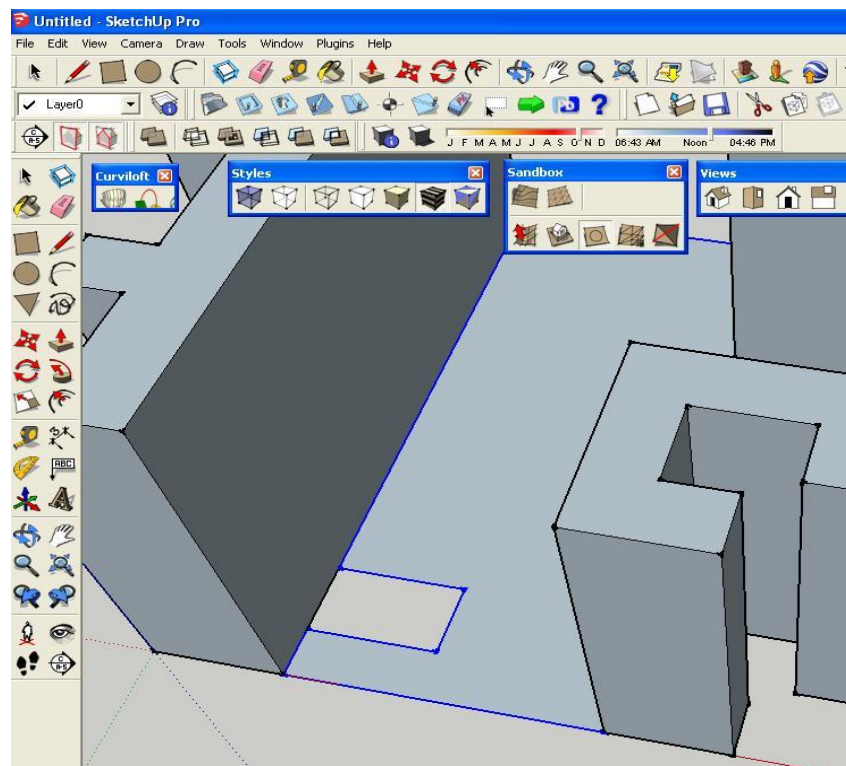
Слика 23. – Изглед креиране површине

На слици 23. види се прва креирана површина на преосталом делу површине основе модела.



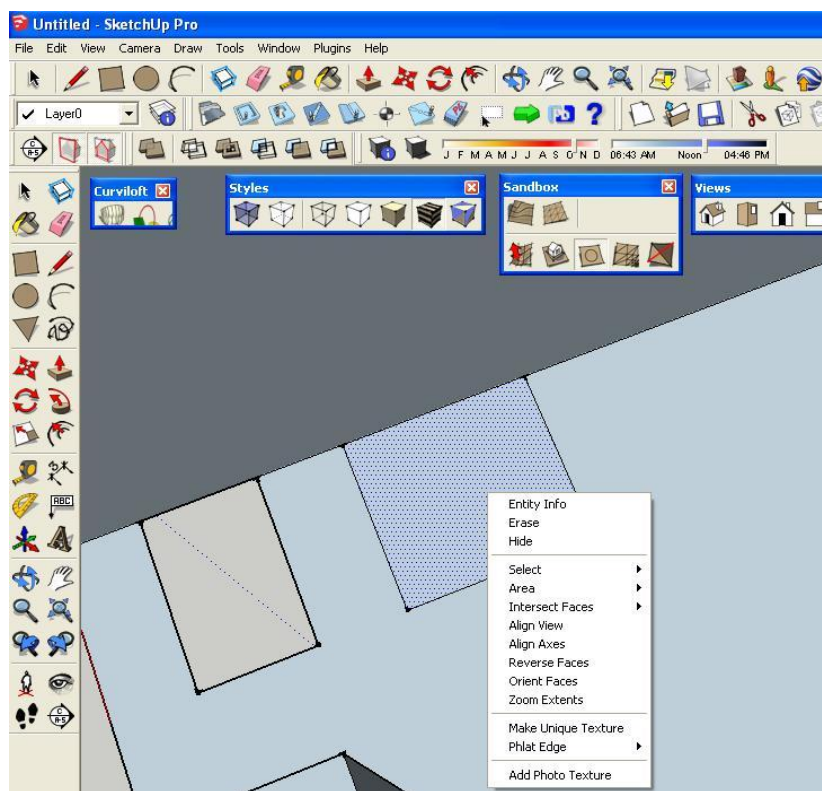
Слика 24. – Употреба опције „Erase”

Након што је површина креирана, десним кликом на њу се позива мени из којег се одабиром опције „Erase” врши њено брисање (Слика 24.).



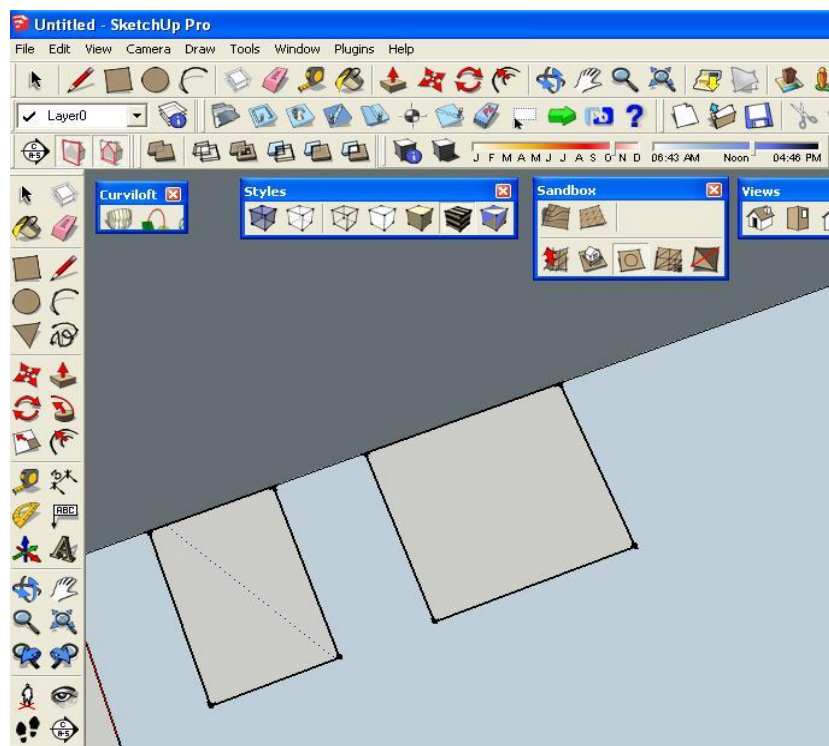
Слика 25. – Модел након брисања површине

На слици 25. се види изглед модела након брисања креиране површине на основи модела.



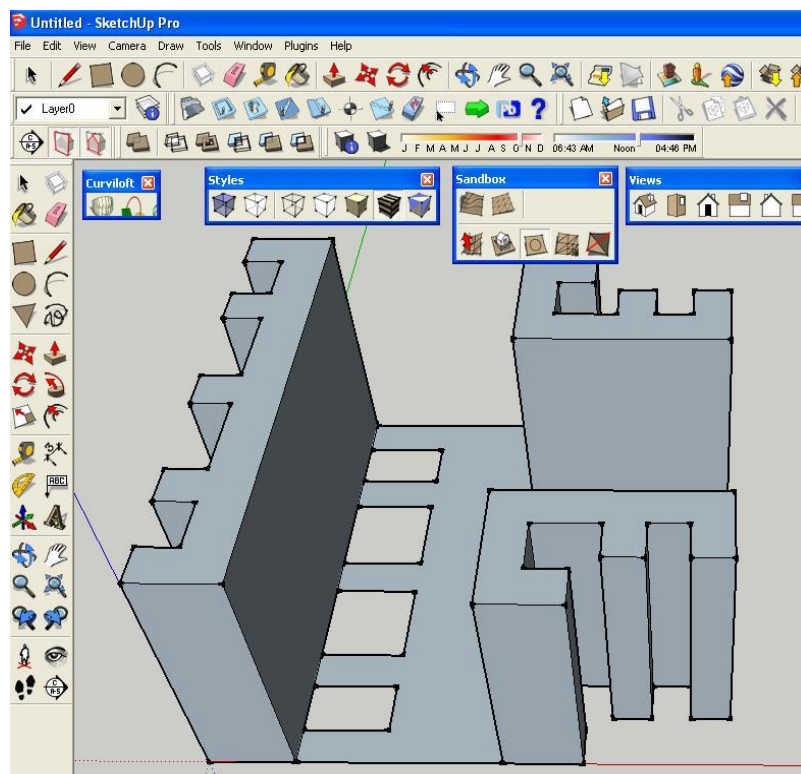
Слика 26. – Брисање друге креиране површине

На слици 26. се види употреба опције „Erase” за брисање друге креиране површине на површини основе модела.



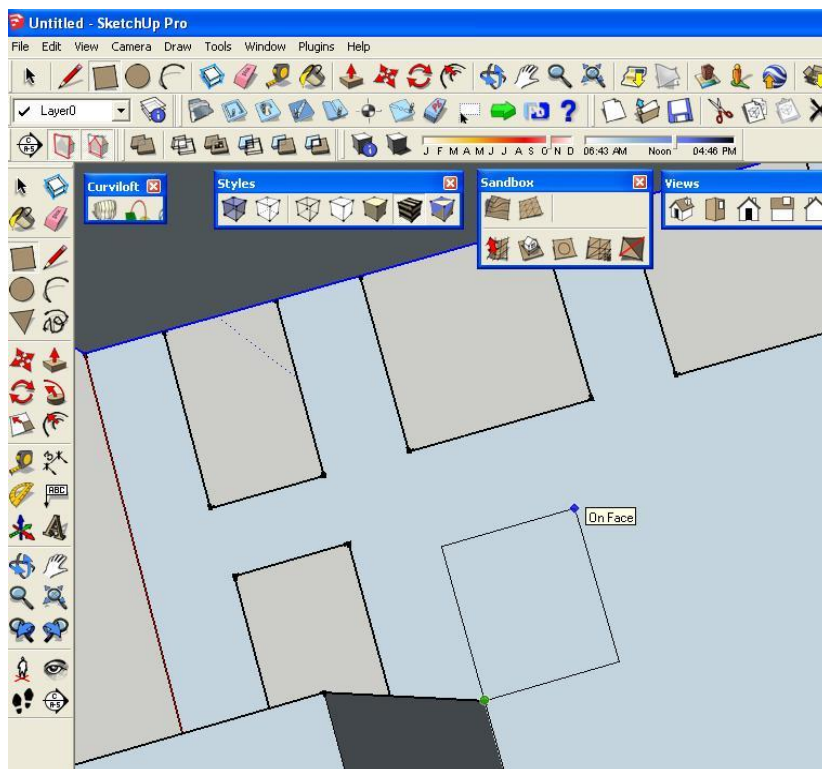
Слика 27. – Модел након брисања друге површине

Изглед модела након брисања друге креиране површине на основи модела (Слика 27.).



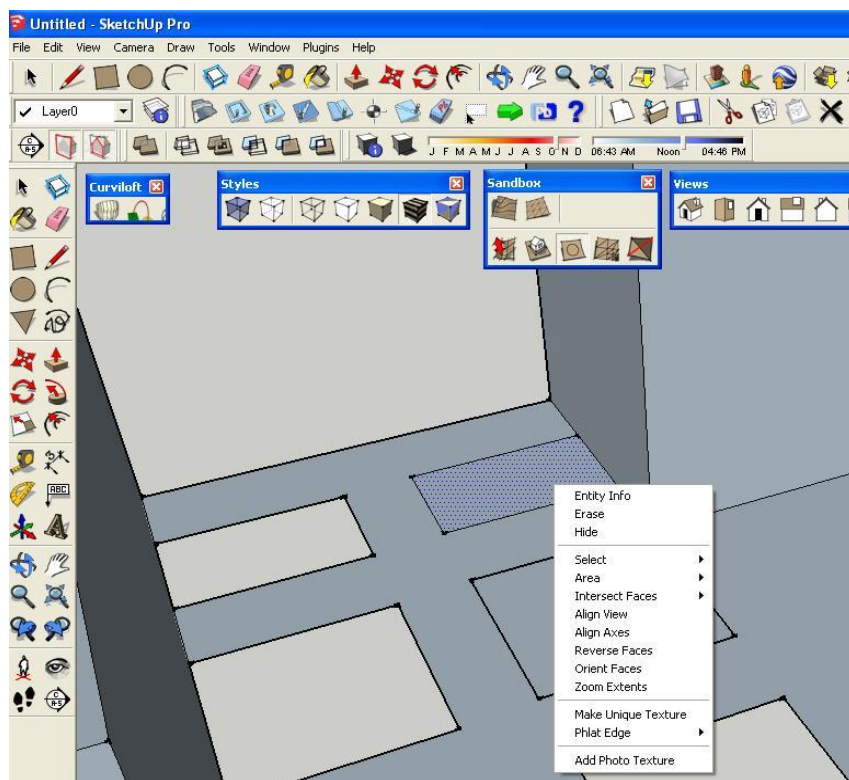
Слика 28. – Модел након брисања 4 површине

На слици 28. види се изглед модела након четири креиране и обрисане површине на површини основе модела.



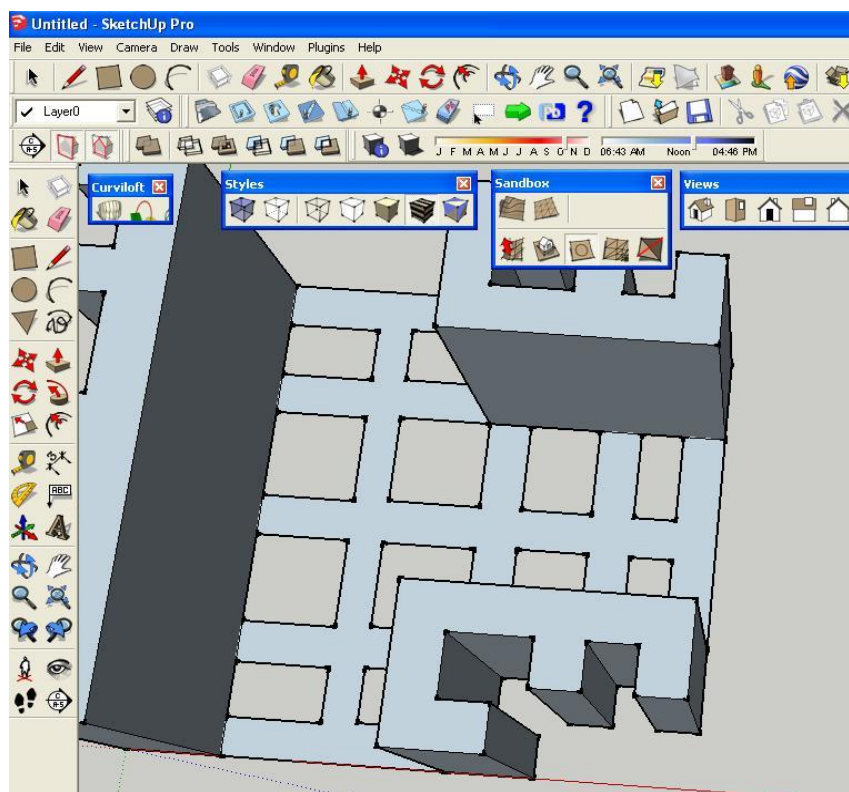
Слика 29. – Креирање шесте површине

Креирање шесте површине на површини основе модела (Слика 29.).



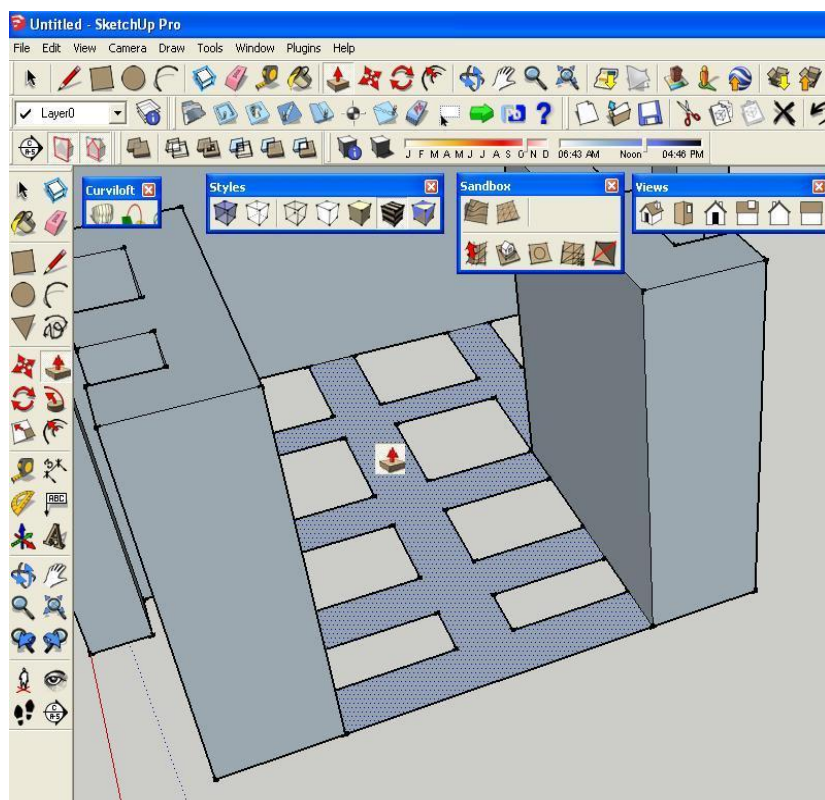
Слика 30. – Брисање површине на основи модела

На слици 30. се види брисање седме креиране површине, употребом опције „Erase”.



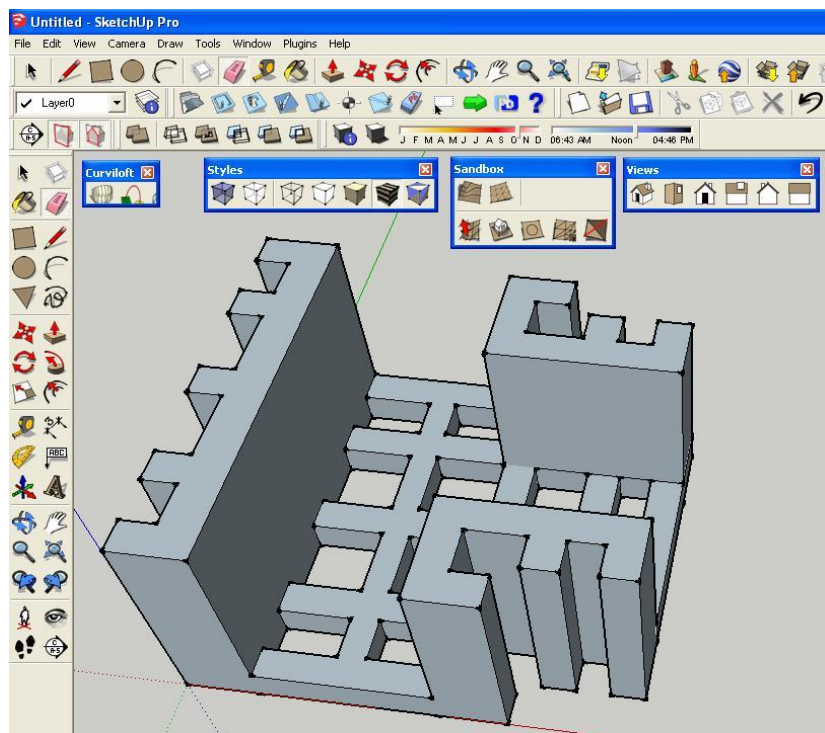
Слика 31. – Модел након брисања 12 површина

Изглед модела након 12 креираних и избрисаних површина на површини основе модела (Слика 31.).



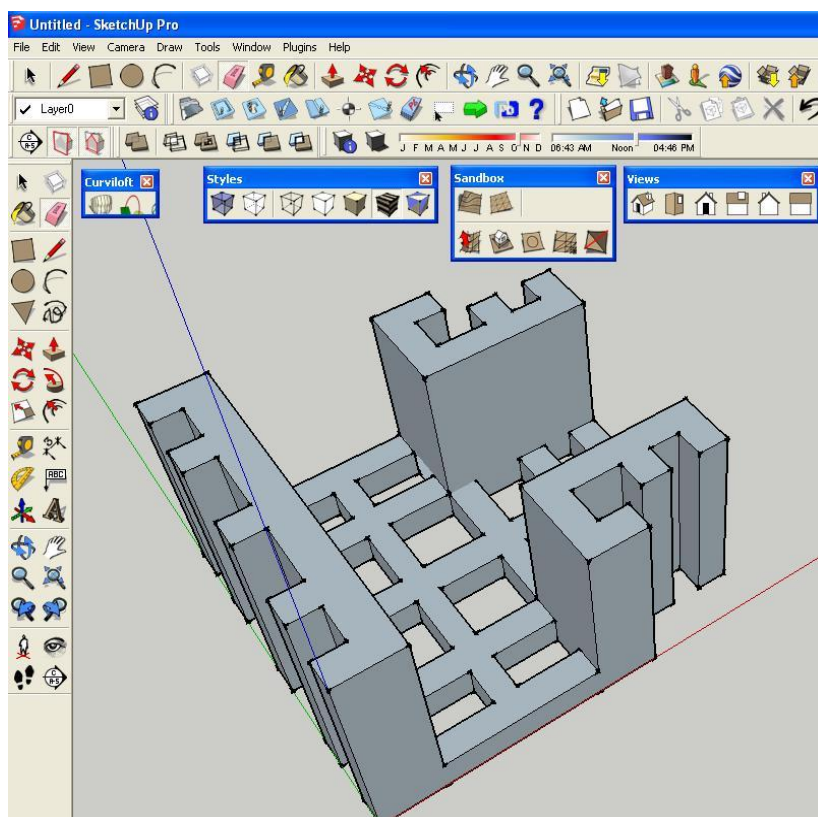
Слика 32. – Употреба „Push/Pull” алата на основи

Пошто су обрисани делови површине основе модела у складу са техничким цртежом, потребно је након одабира „Push/Pull” алата, кликнути на новоформирану јединствену површину основе. (Слика 32.).



Слика 33. – Креирање четврте моделске форме

Повлачењем површине основе у позитивном смеру Z осе и уносом вредности од 3mm у поље „Distance”, креира се четврта и последња моделска форма, чиме је моделирање завршено (Слика 33.).



Слика 34. – Коначан изглед модела

На слици 34. је приказан коначан изглед модела након моделирања. Приказани редослед и начин моделирања су један од више могућих приступа градњи овог дигиталног модела. На основу приказаног поступка, може се извести закључак да програм „Google SketchUp” представља изузетно елегантно решење када је потребно брзо израдити дигитални модел прототипа.

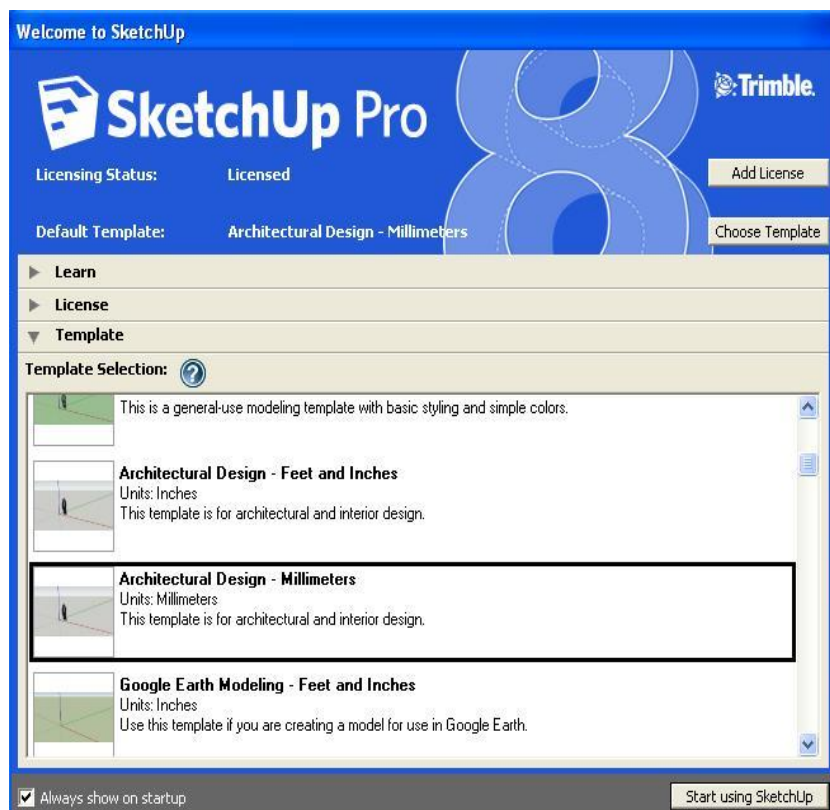
Прилог раду 2 – Кораци при моделирању прототипа столарског помагала у програму *Google SketchUp*

У овом прилогу су приказани кораци који су прављени у програму *Google SketchUp* при моделирању столарског помагала, једног од прототипова рађених у овом мастер раду, као и опис опција и алата који су при томе коришћени. Циљ овог прилога је да се кориснику који нема искуства у моделирању објеката у овом програму, следећи упутство корак по корак, омогући да самостално измоделира приказани прототип. Такође ће се, поред употребе „*Push/Pull*” система додавања запремине моделу, приказати начин постављања дужи или равни под задатим углом. Програм *Google SketchUp* представља изузетно повољно и елегантно решење за моделирање оваквих модела прототипова, јер има малу хардверску захтевност, широк избор формата за увоз и извоз, лако се надограђује напредним алатима, брзо се инсталира и увек се може бесплатно преузети инсталација са интернета.

Двоструким кликом миша на икону софтверског пакета *Google SketchUp*, која се налази на десктопу рачунара на коме је програм инсталиран, приступа се почетном прозору (Слика 1.).

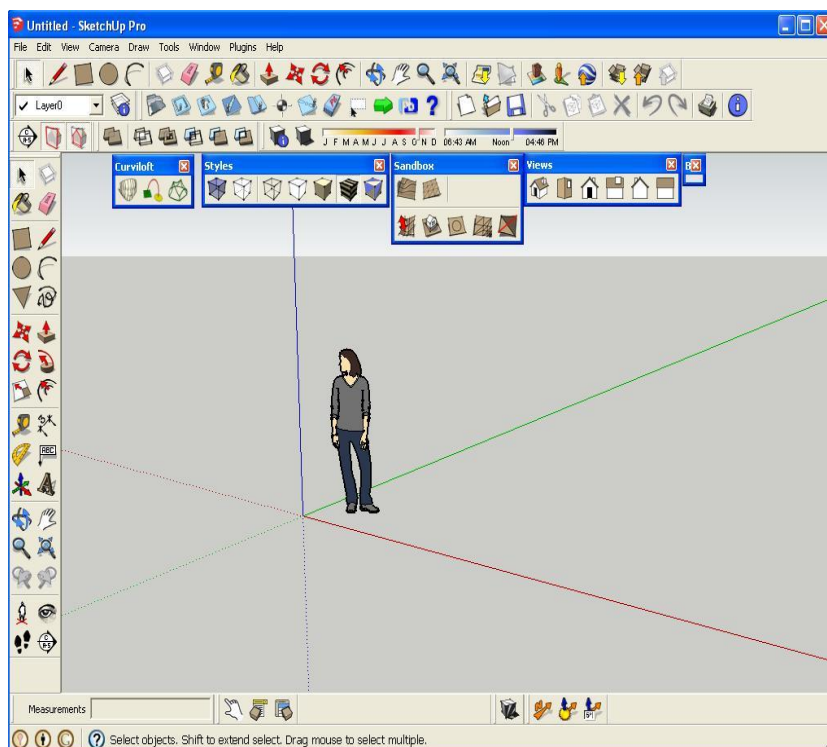


Слика 1. – Почетни прозор програма *Google SketchUp*



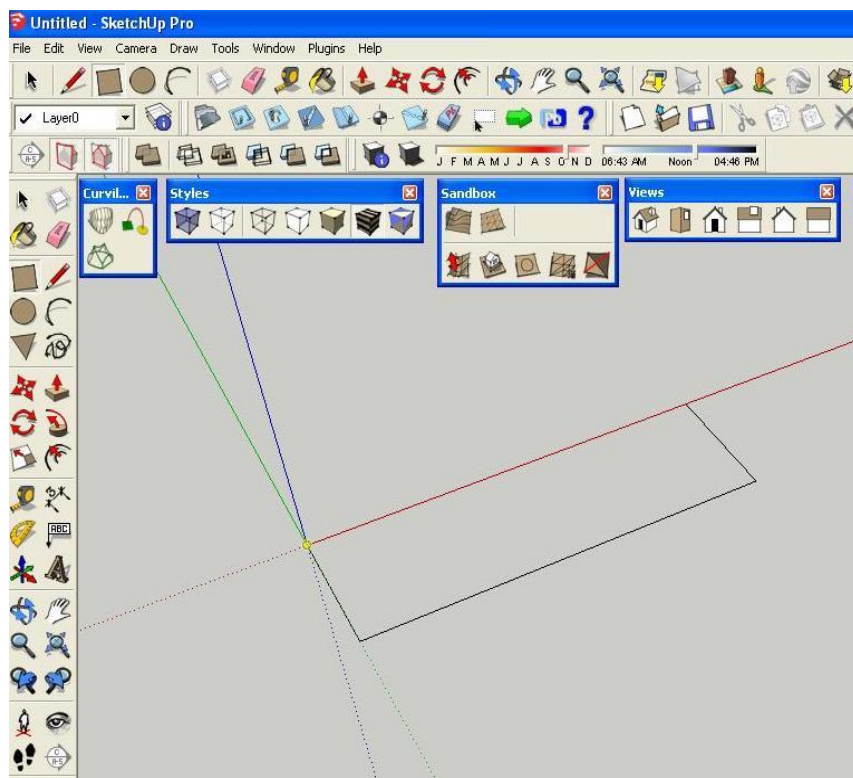
Слика 2. – Прозор у коме се бирају мерне јединице

Кликом на опцију „*Choose Template*” отвара се прозор у коме треба одабрати мерне јединице, у овом случају милиметре (Слика 2.).



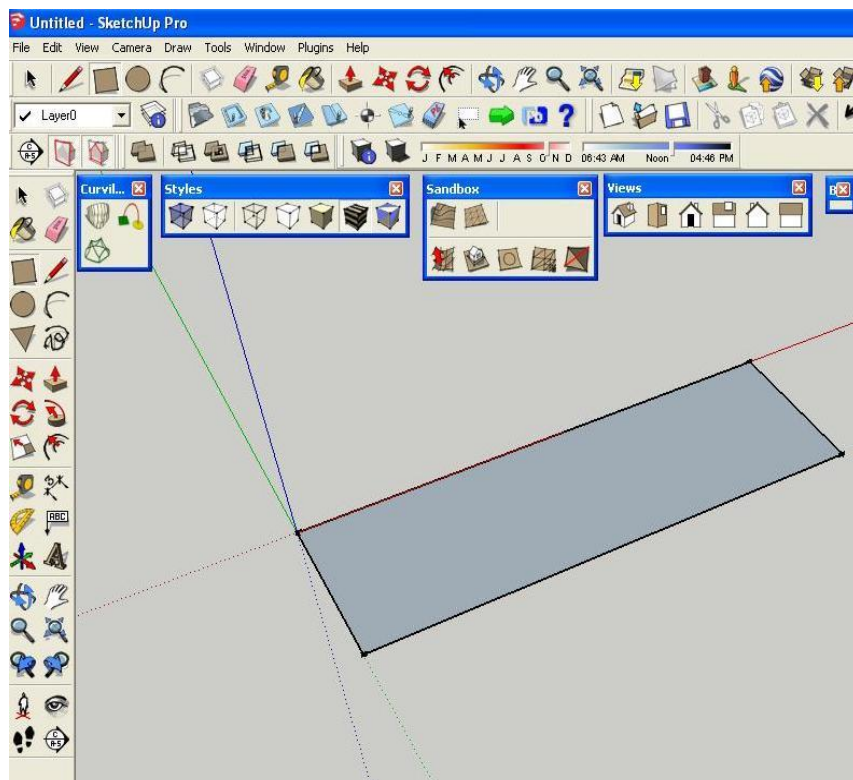
Слика 3. – Основно корисничко окружење

Кликом на дугме „*Start using SketchUp*” потврђују се милиметри као мерна јединица и отвара се корисничко окружење програма *Google SketchUp* (Слика 3.).



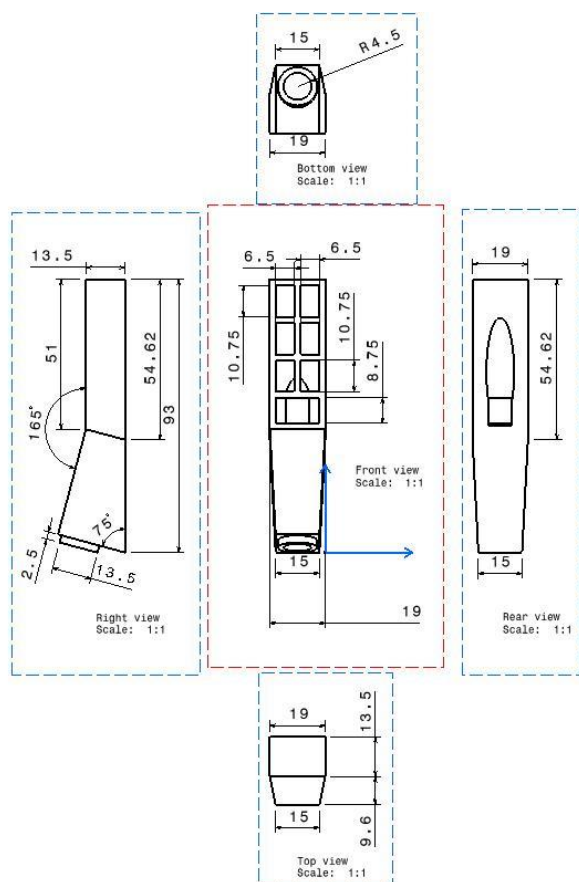
Слика 4. – Употреба опције „Rectangle”

Левим кликом миша одабрати опцију „*Rectangle*”, а затим довести курсор у координатни почетак и повући га у произвољном смеру. У поље „*Dimensions*” уписати „54.62 , 19”. (Слика 4.).



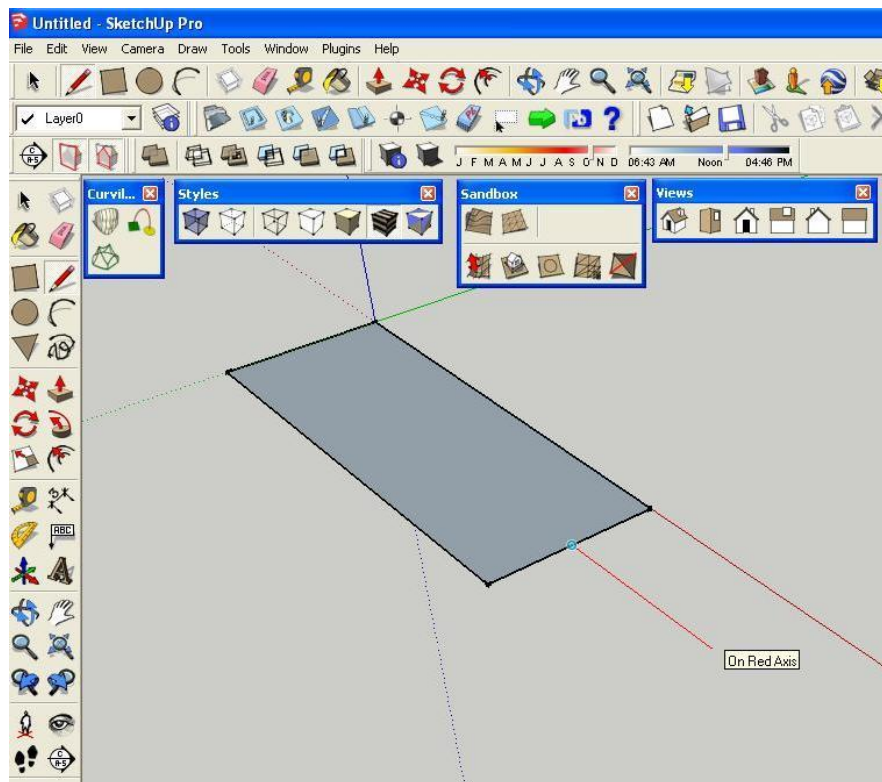
Слика 5. – Креирана правоугаона површина

Потврдити унос кликом на тастер „*Enter*”, чиме се добија правоугаона површина као на слици 5.



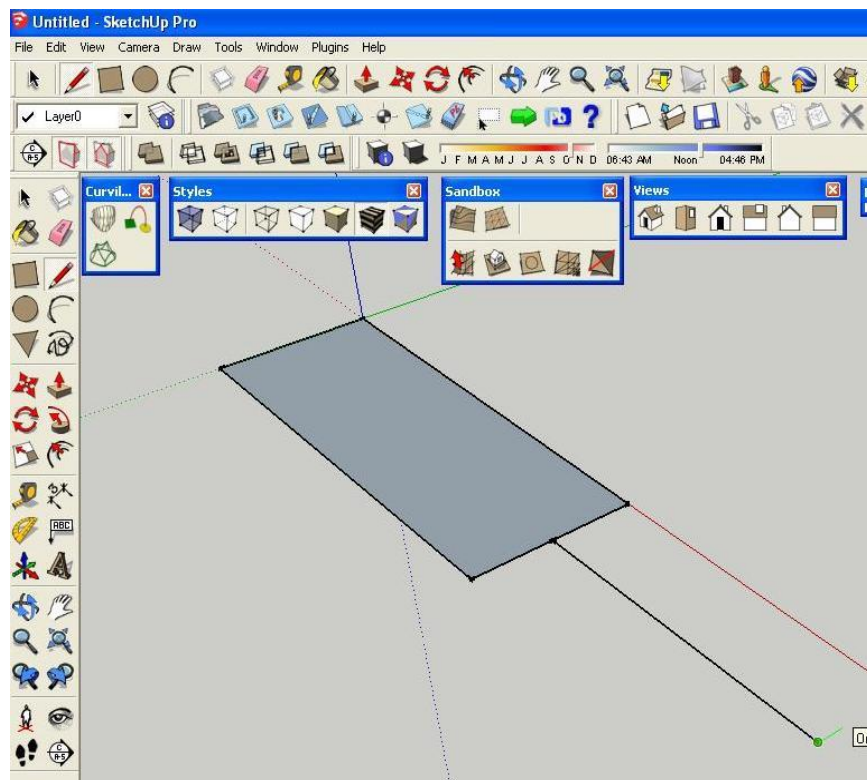
Технички цртеж са димензијама столарског помагала је дат на слици 6.

Слика 6. – Технички цртеж столарског помагала



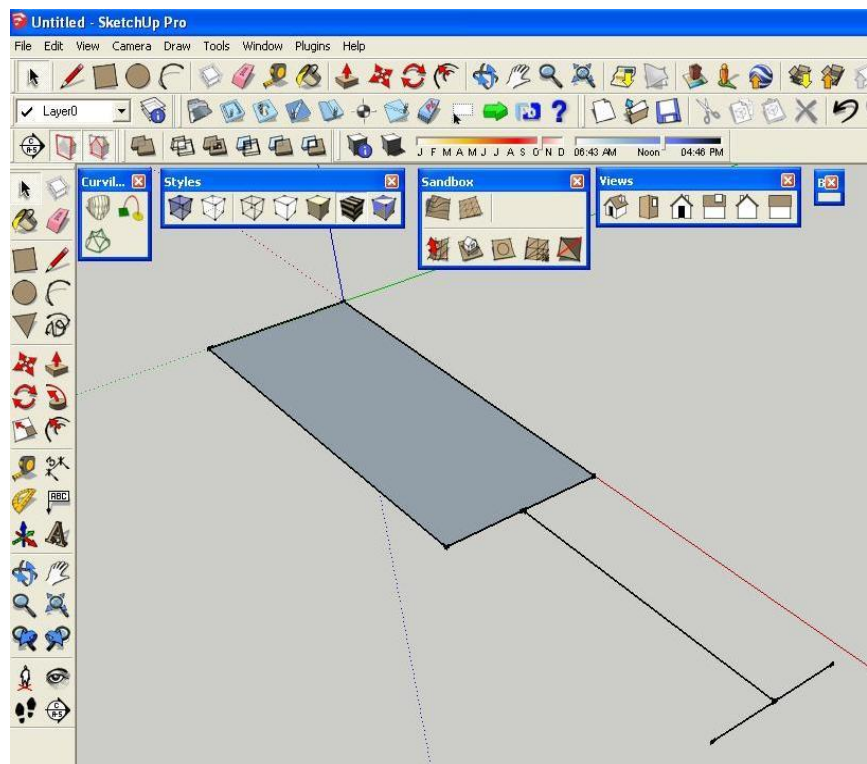
Слика 7. – Повлачење линије

Кликом на опцију „Line” и одабиром средине линије као на слици 7, повлачи се курсор у смеру паралелном са Y осом.



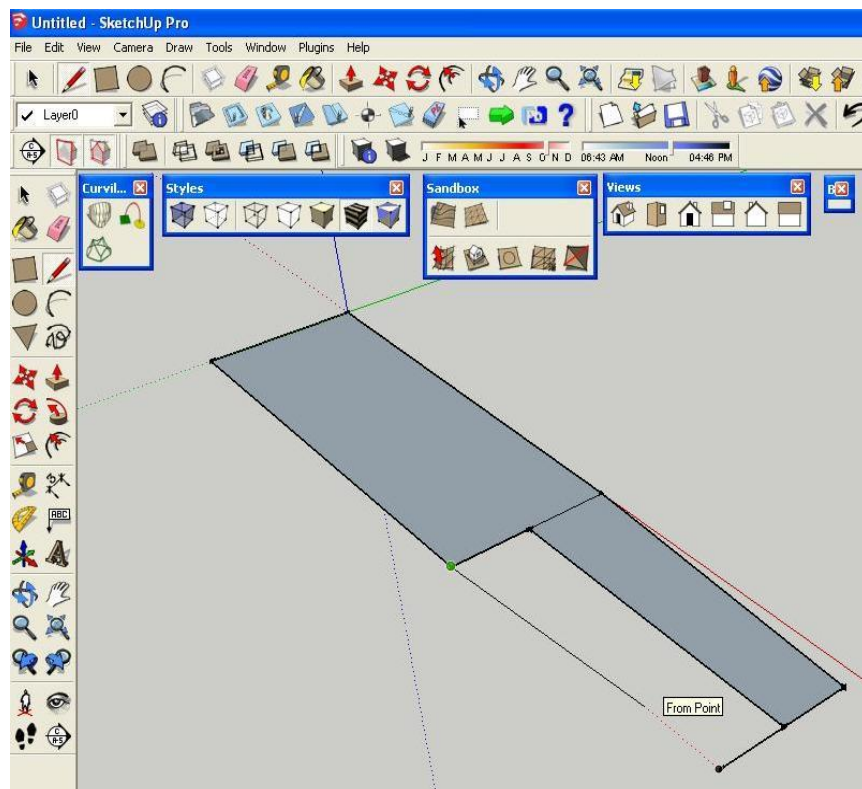
Слика 8. – Креирана помоћна дуж

У поље „Length” уноси се вредност 38.38, чиме се добија привремена помоћна дуж као на слици (Слика 8.).



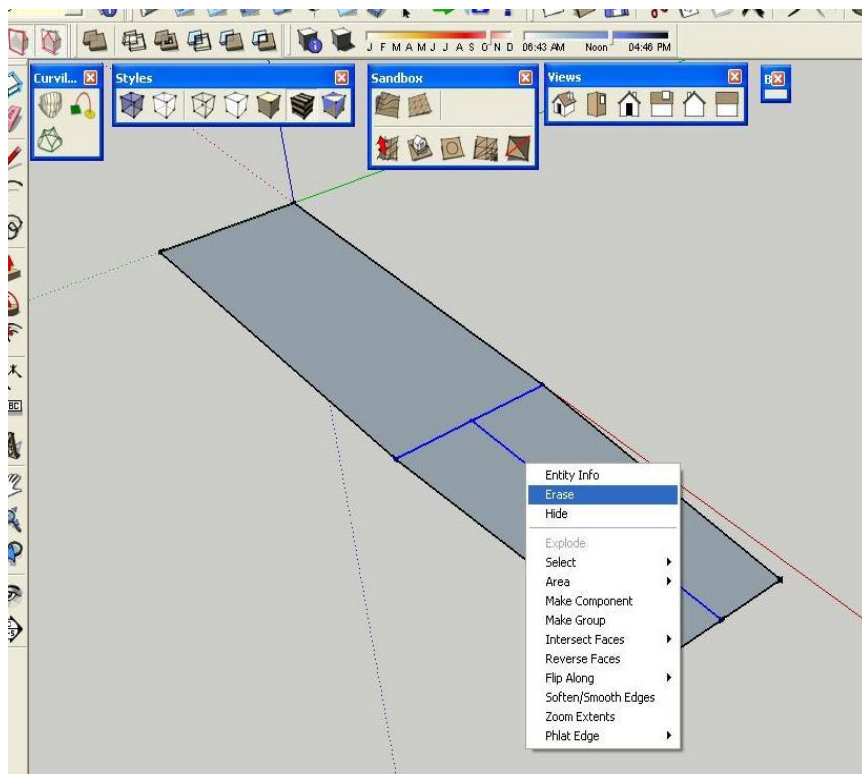
Слика 9. – Цртање три помоћне дужи

Цртају се две помоћне привремене линије дужине 7.5 mm, чији су почеци у завршној тачки предходно нацртане дужи. (Слика 9.).



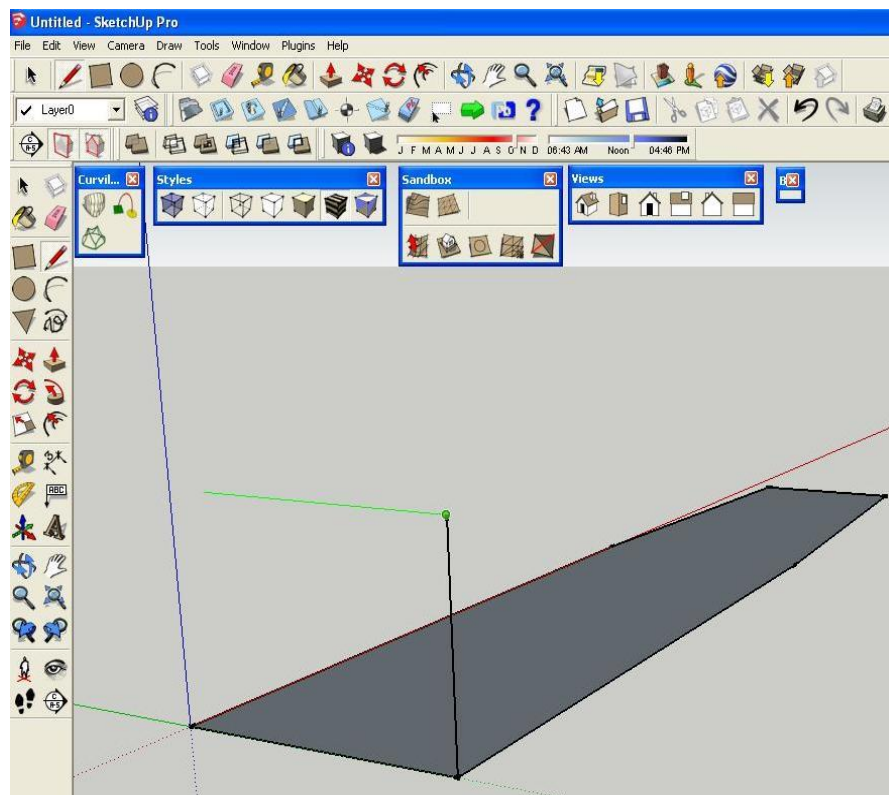
Слика 10. – Спајање одговарајућих тачака

Спајањем одговарајућих тачака као на слици 10, добија се затворена контура која представља основу запремине столарског помагала. (Слика 10.).



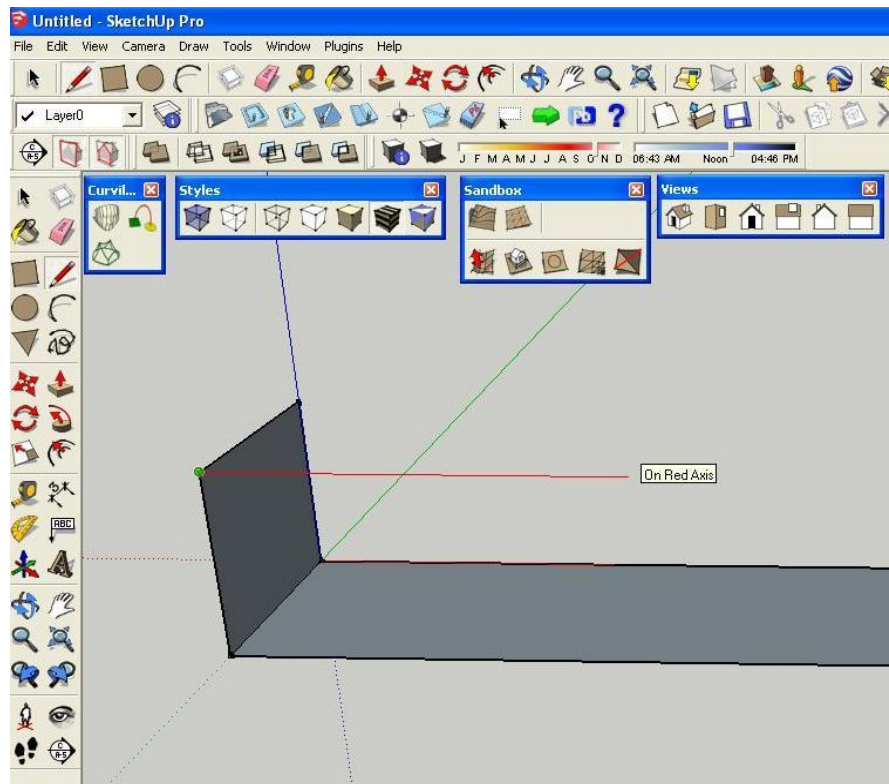
Слика 11. – Брисање непотребних дужи

Држећи тастер „CTRL” на тастатури, левим кликом миша одабрати све три помоћне линије као на слици 11, затим на десни тастер миша позвати контекстуални мени и одабиром опције „Erase” извршити њихово брисање. (Слика 11.).



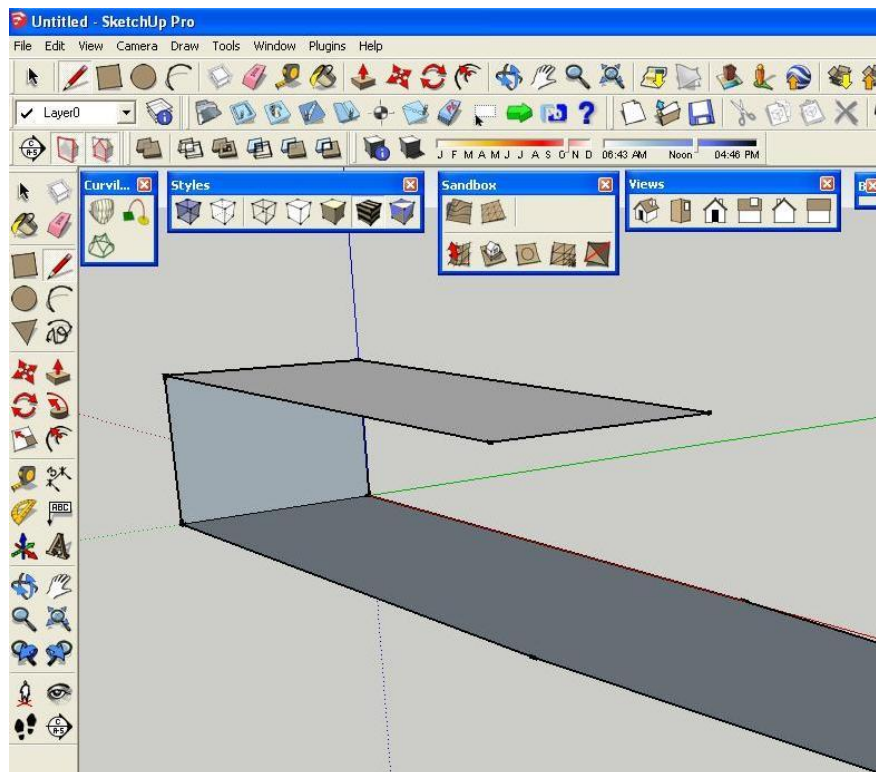
Слика 12. – Креирање предње површине

У складу са димензијама модела датим у техничком цртежу, креира се предња страница модела висине 13.5 mm. (Слика 12.).



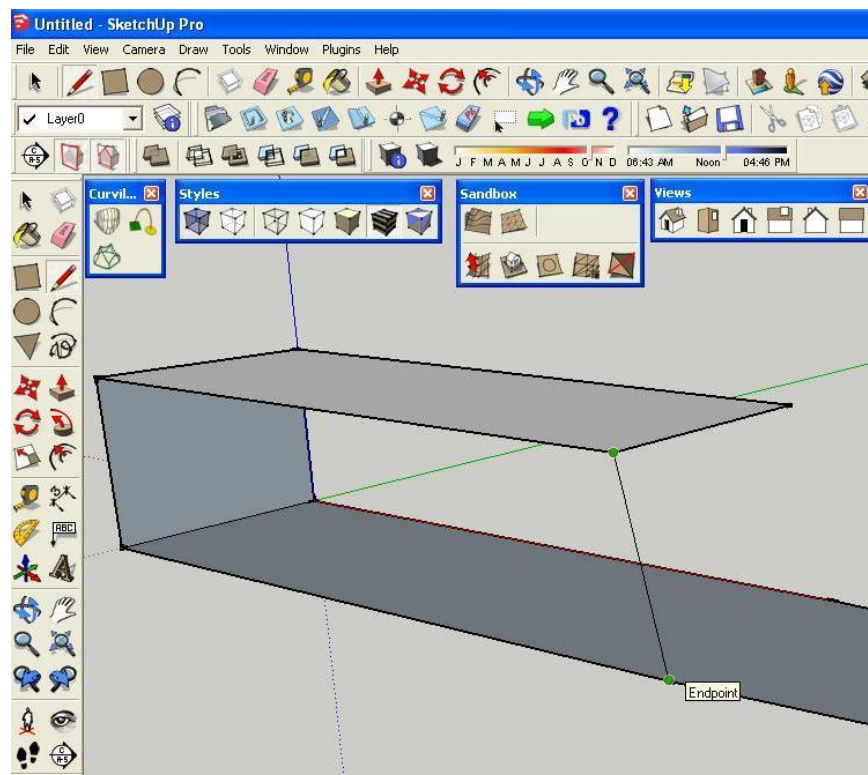
Слика 13. – Креирање горње површине

У складу са димензијама модела датим у техничком цртежу, креира се горња равна површина модела дужине 51 mm. (Слика 13.).



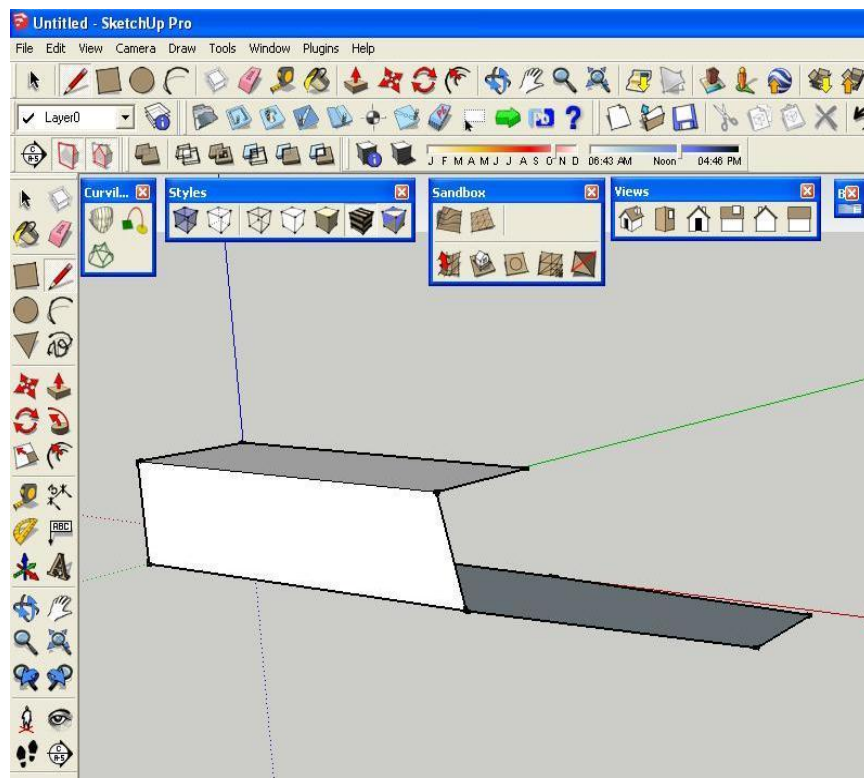
Изглед креиране горње равне површине модела (Слика 14.).

Слика 14. – Модел после три креиране површине



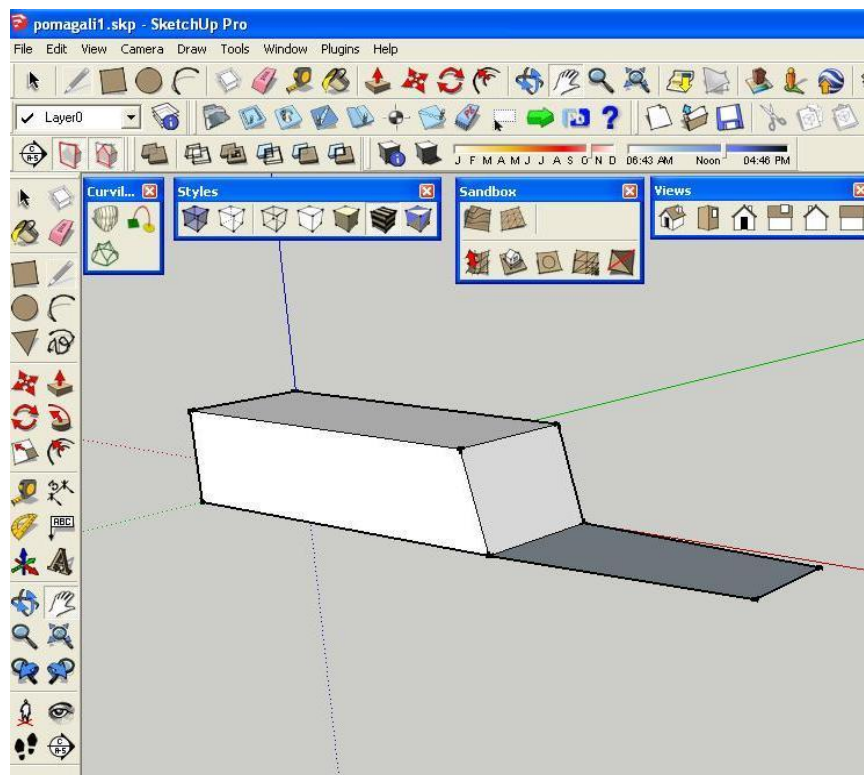
Спајањем тачака као на слици добија се прва бочна површина модела (Слика 15.).

Слика 15. – Креирање прве бочне површине



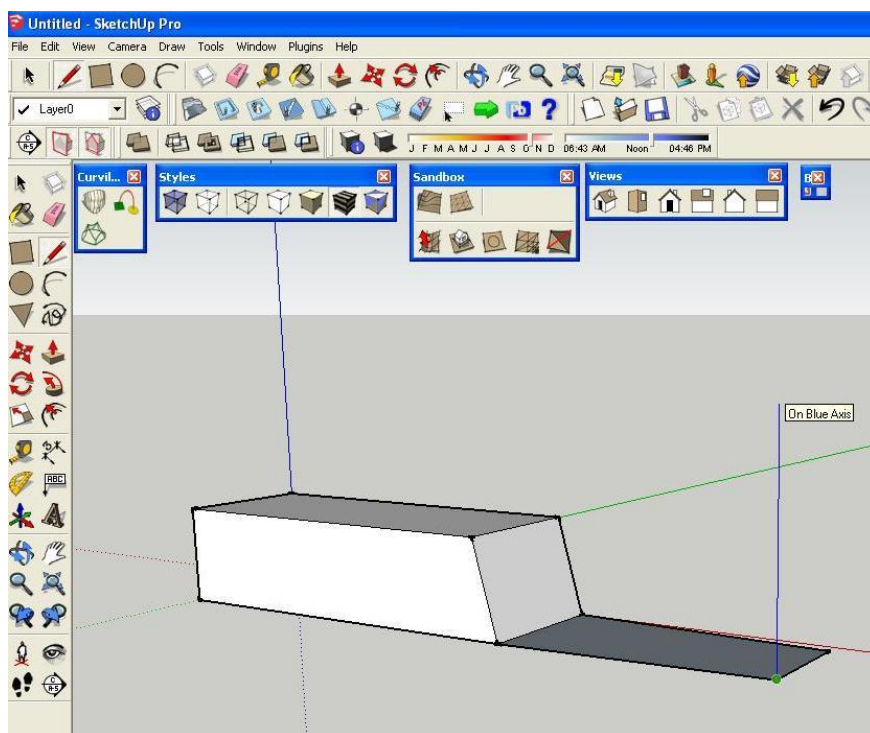
Изглед креиране бочне затворене површине модела (Слика 16.).

Слика 16. – Модел после четири креиране површине



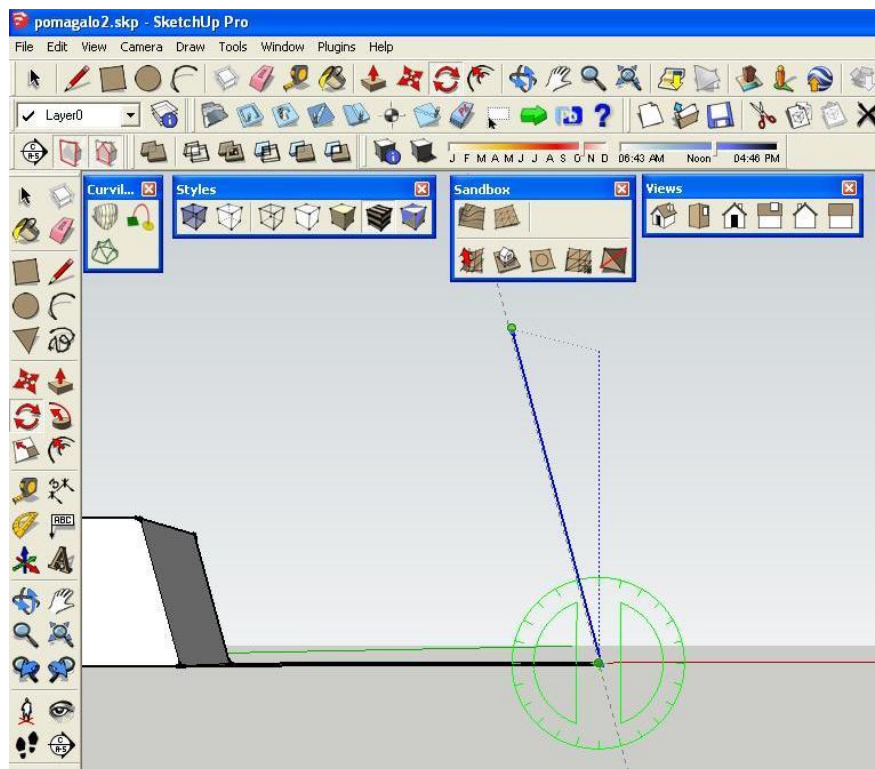
Истим поступком на другој бочној страни добијамо још две затворене површине на моделу (Слика 17.).

Слика 17. – Модел после шест креираних површина



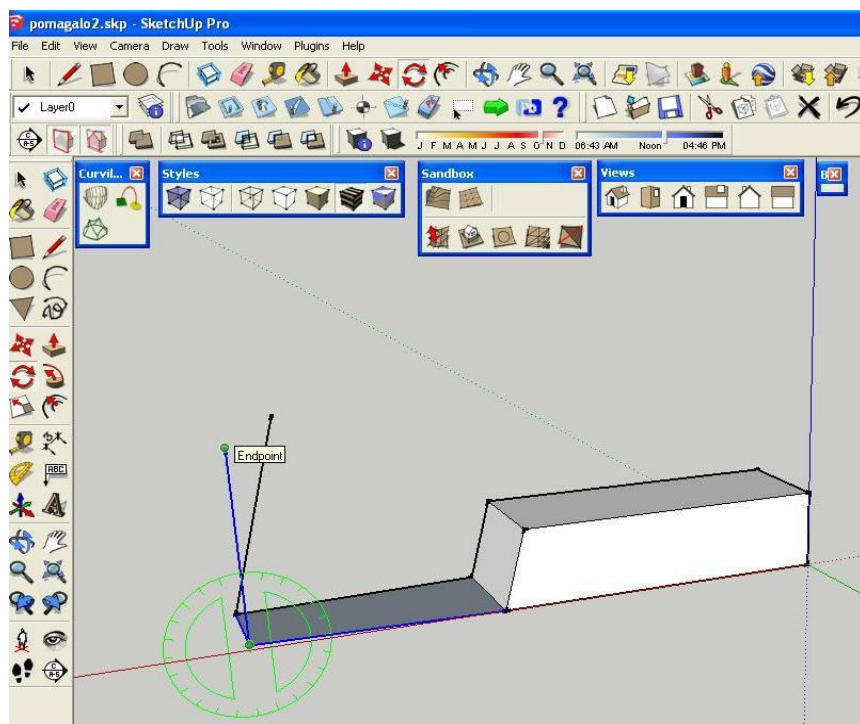
Слика 18. – Повлачење вертикалне линије

Одабрати опцију „Line”, довести курсор на тачку у темену површине основе модела, повући курсор у позитивном смеру Z осе и креирати дуж произвољне дужине која је управна на хоризонталну раван. (Слика 18.).



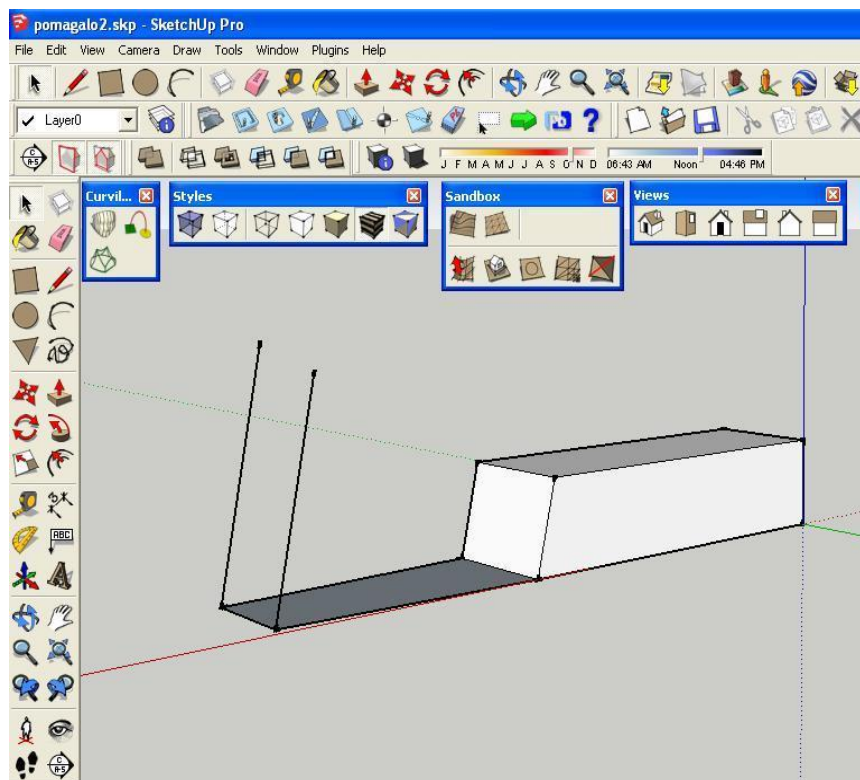
Слика 19. – Постављање дужи под угао од 15 степени

Левим тастером миша означити креирану дуж, а затим из палете алата одабрати „Rotate” алатку. Сада је потребно кликнути најпре на почетну, а затим на крајњу тачку дужи и повући курсор у смеру осе у ком је потребно да дуж стоји под углом. (Слика 19.).



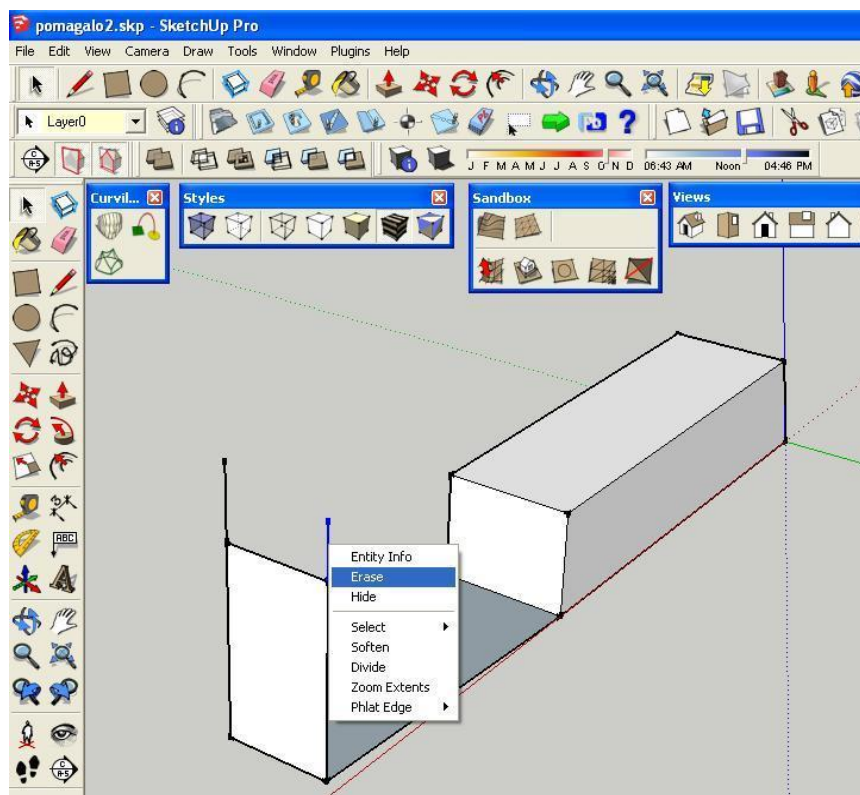
Слика 20. – Цртање друге дужи

У зависности од тога у односу на коју осу се врши подешавање угла дужи, боја курсора се мења у складу са бојом одговарајуће осе. У овом случају боја курсора је зелена, јер је правац креирања угла управан на X осу. Уносом вредности 15 у поље „Angle” и потврдом на тастер „Enter”, дуж се у односу на почетни положај обара за 15 степени у складу са техничким цртежом модела (Слика 19.).



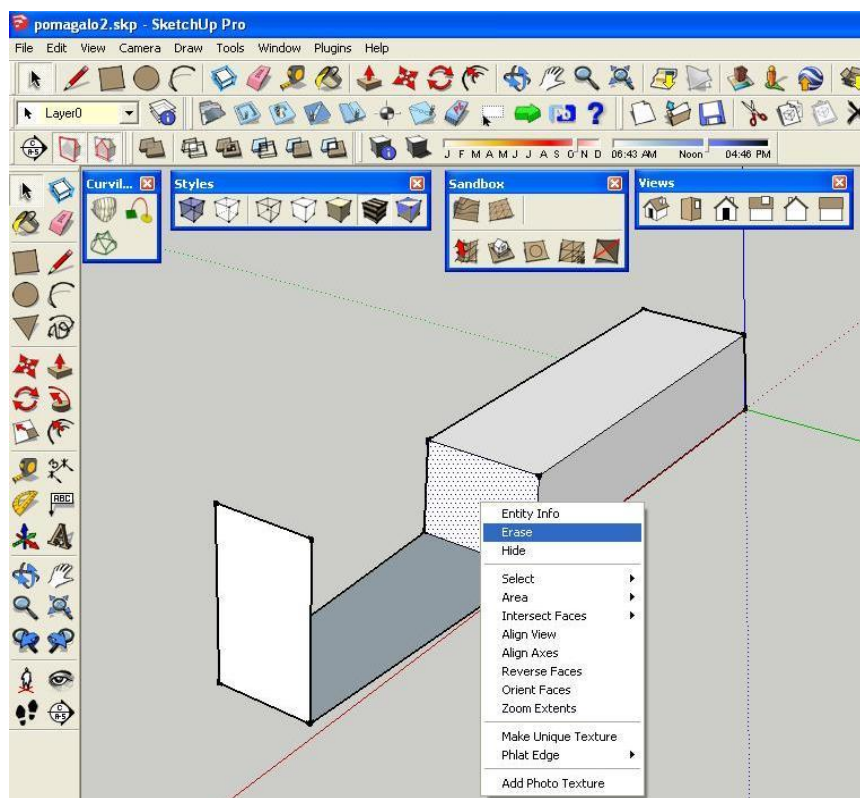
Слика 21. – Модел после цртања друге дужи под углом

Исти поступак је потребно поновити са дужи која је креирана у другом темену основе. (Слика 20.). На слици 21. је приказан модел након постављене две дужи под углом од 15 степени.



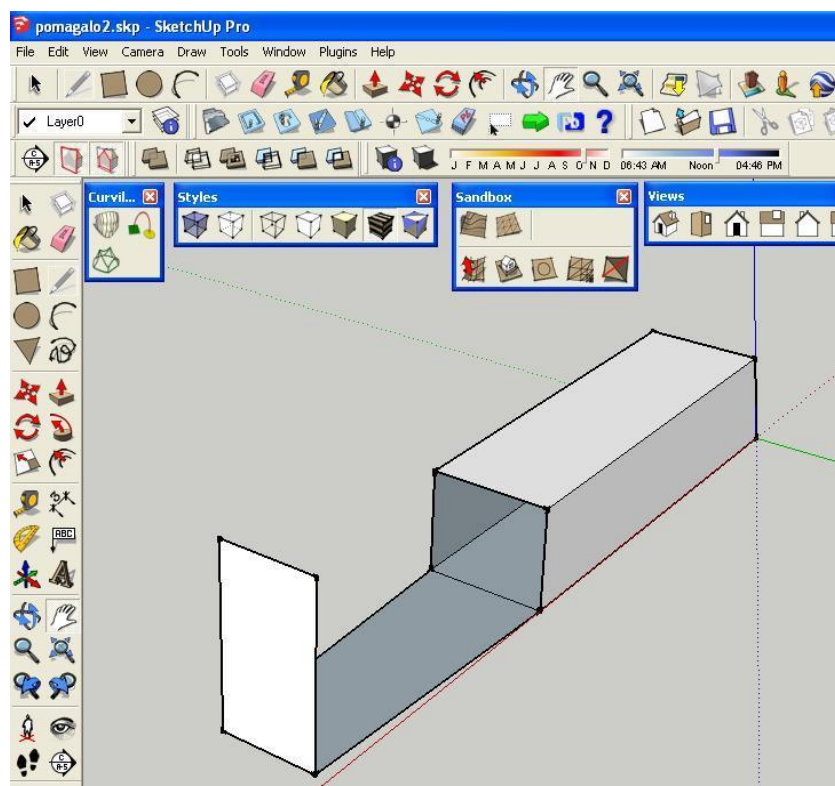
Слика 22. – Креирање косе површине

Креирати дуж која спаја предходно креиране на висини од 29,91 mm. Тиме је креирана површина као на слици 22. Крајеве дужи који се налазе ван креиране површине избрисати опцијом „Erase”.



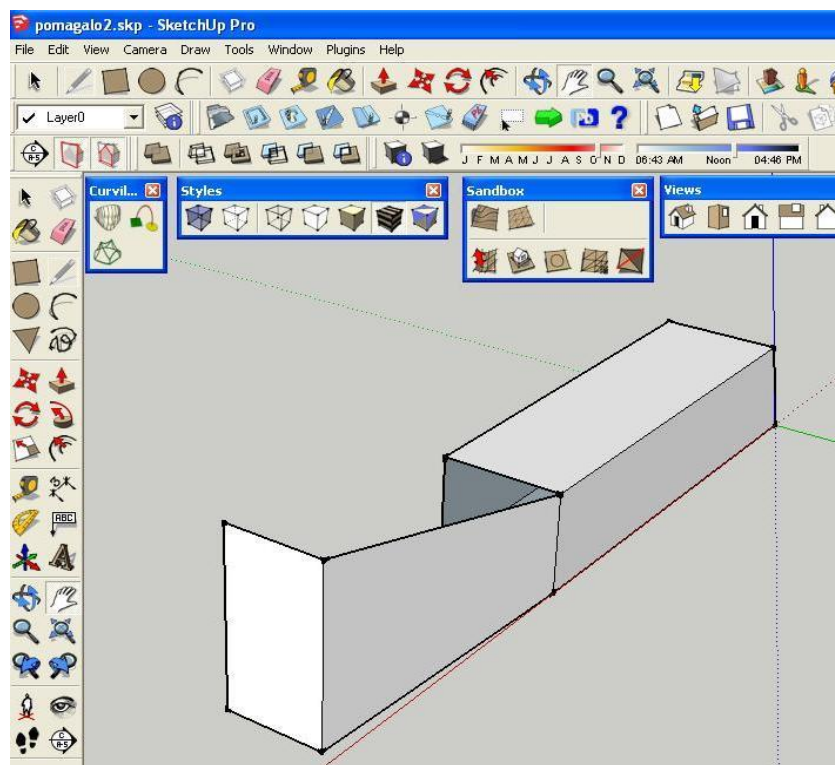
Слика 23. – Брисање сувишне површине

Употребом опције „Erase” избрисати површину приказану на слици 23.



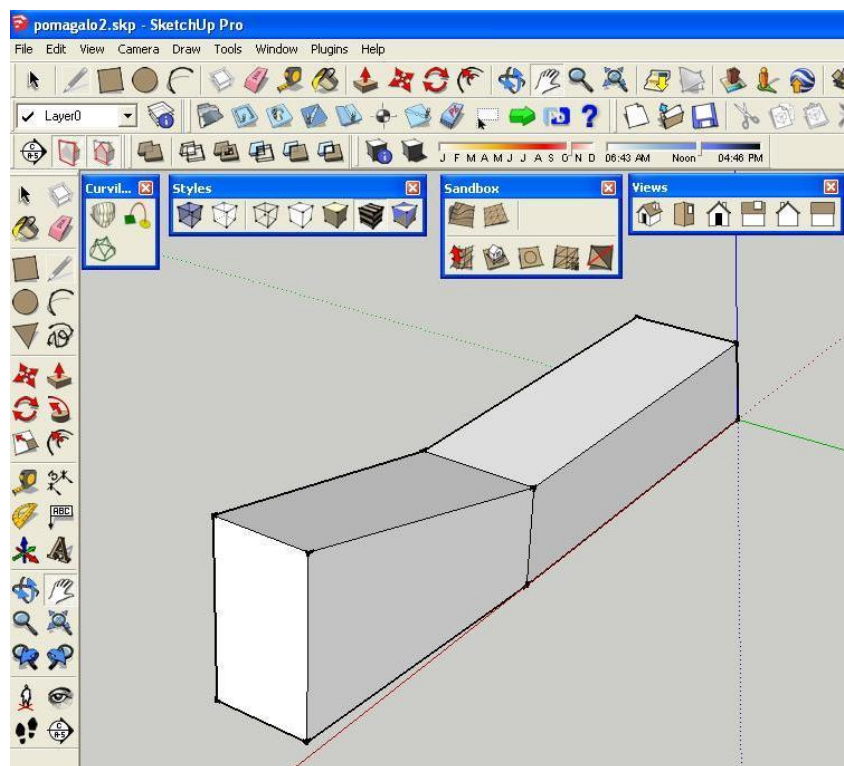
Након брисања површине модел изгледа као на слици 24.

Слика 24. – Модел након брисања непотребне површи



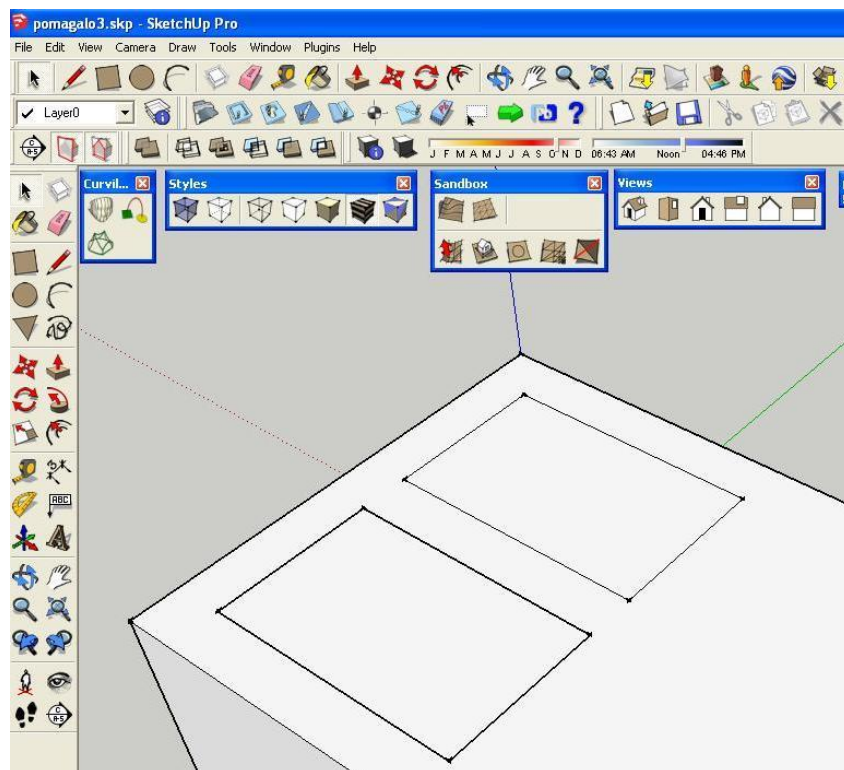
Спајањем одговарајућих темена користећи се опцијом „Line”, креира се нова бочна површина на моделу(Слика 25.).

Слика 25. – Креирање нове бочне површине



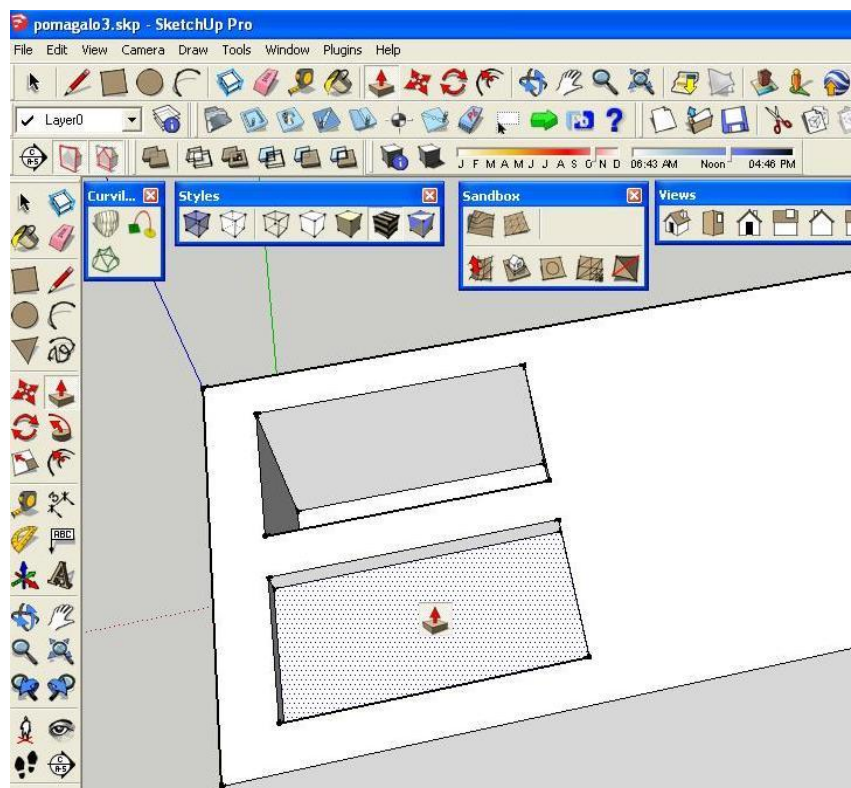
Слика 26. – Креирана основна запремина модела

Спајањем друге две тачке добијају се нове две површине, чиме се добија основна запремина модела столарског помагала (Слика 26.).



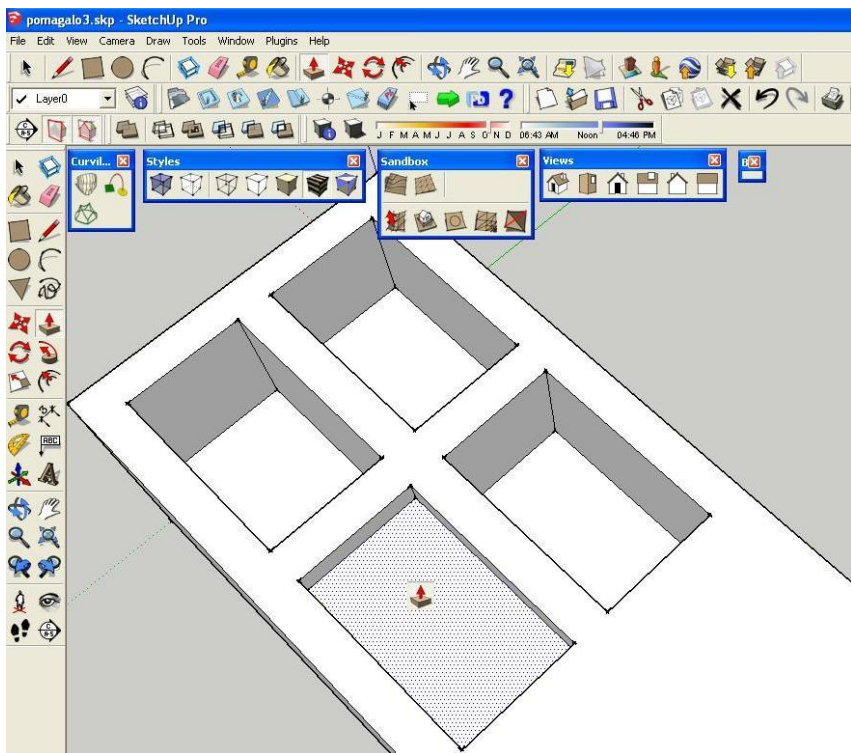
Слика 27. – Цртање затворених површина

У складу са техничким цртежом на површини модела се креирају затворене површине (Слика 27.).



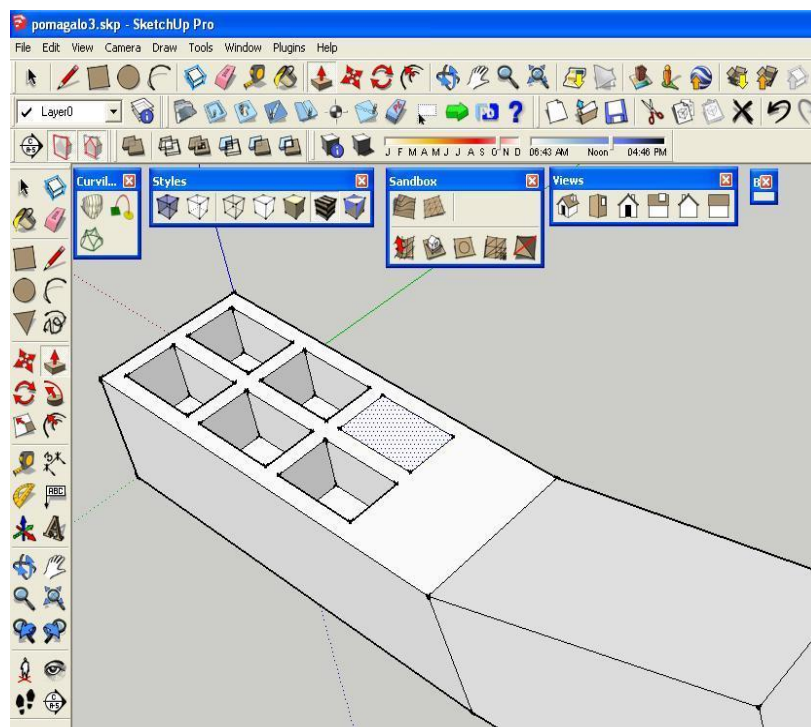
Слика 28. – Употреба опције „Push/Pull”

Коришћењем „Push/Pull” алата врши се манипулисање креираних површина и формирање удубљења од 6 mm на моделу, у складу са техничким цртежом. (Слика 28.).



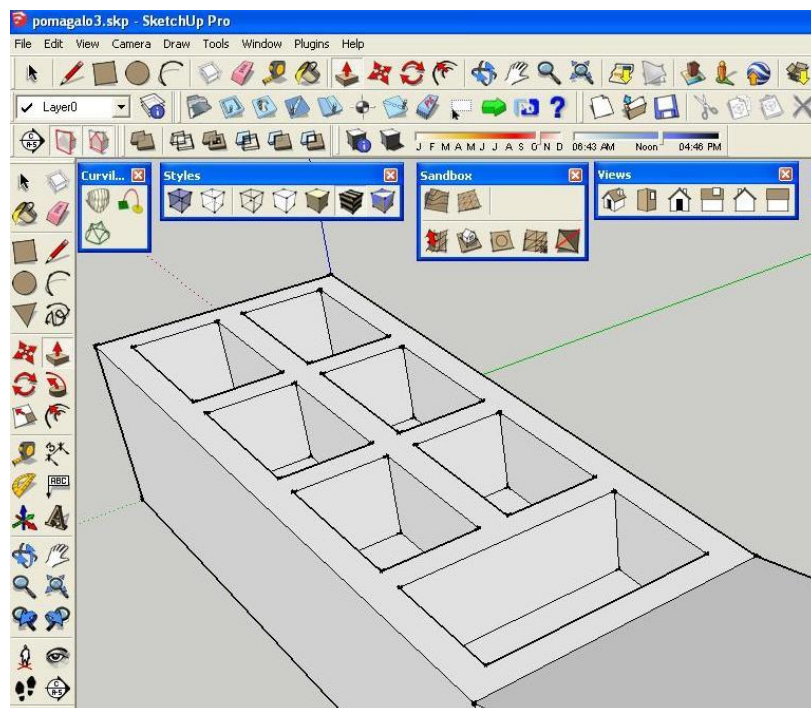
Слика 29. – Креирање четвртог удубљења

На слици 29. се види изглед модела током креирања четвртог удубљења на горњој површини запремине модела.



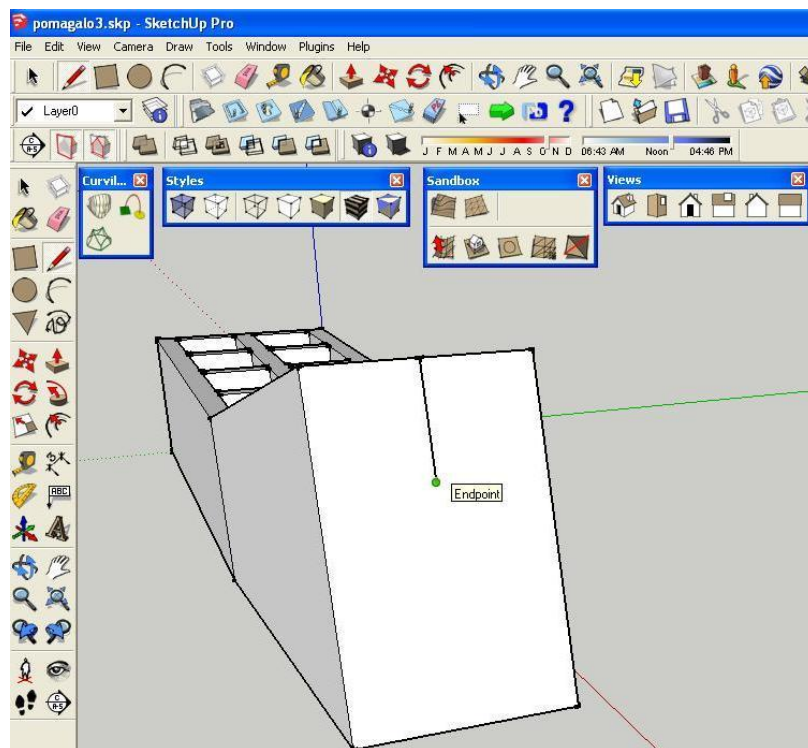
Слика 30. – Креирање шестог удубљења

На слици 30. се види изглед модела током креирања шестог удубљења на горњој површини запремине модела.



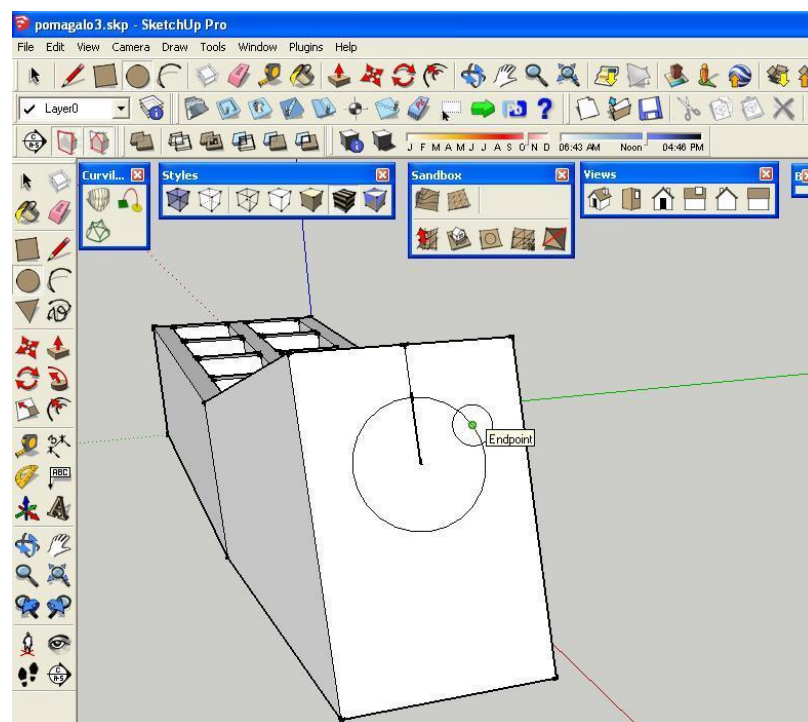
Слика 31. – Модел након креирања седмог удубљења

Изглед модела након креирања седмог удубљења, у складу са техничким цртежом (Слика 31.).



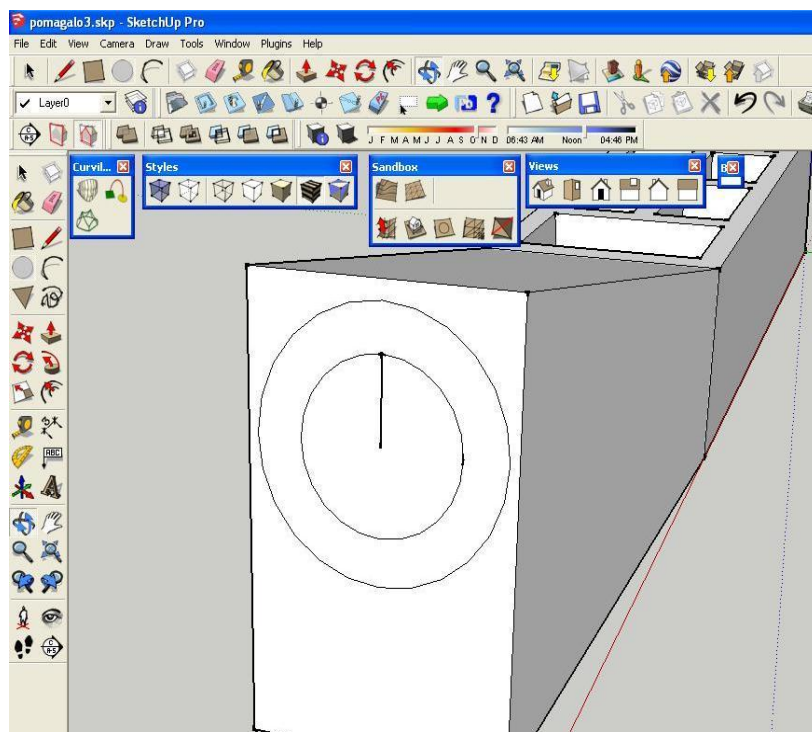
Слика 32. – Цртање помоћне дужи

На косој површини модела, од средине горње ивице повући ка средини привремену помоћну дуж дужине 7,98mm. (Слика 32.).



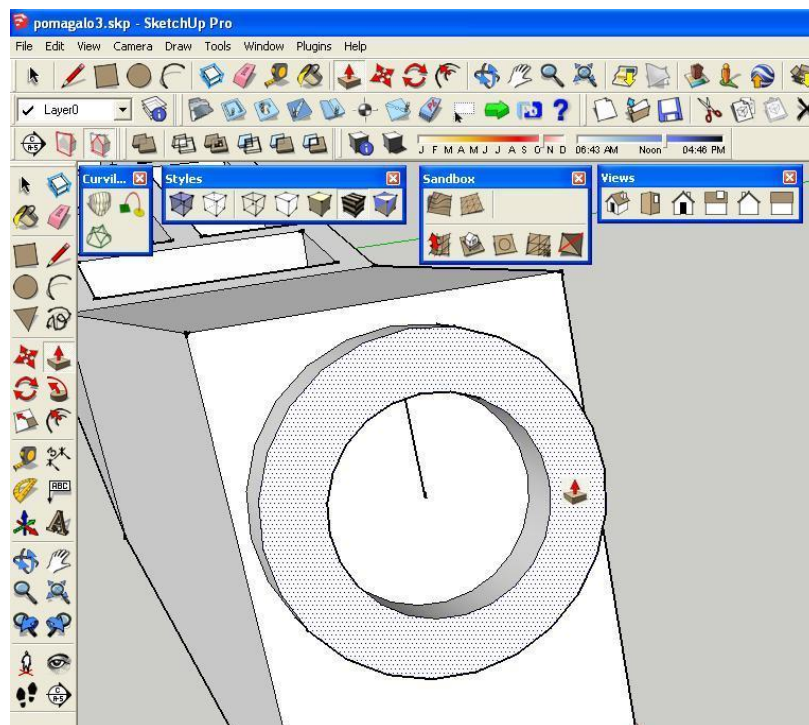
Слика 33. – Цртање прве кружнице

Употребом алата „Circle” у крајњој тачки дужи поставити центар кружнице и уносом вредности 13,5 у поље „Radius” креирати прву кружницу (Слика 33.).



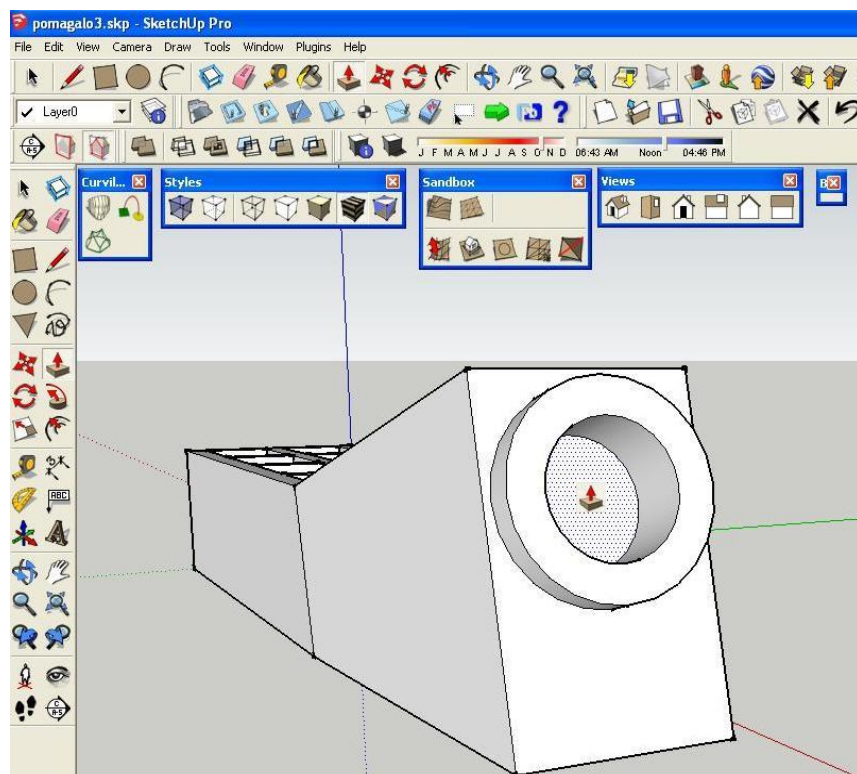
Слика 34. – Цртање друге кружнице

Употребом алата „Circle” у истом центру креирати мању кружницу чији је полупречник 4.5 mm. (Слика 34.).



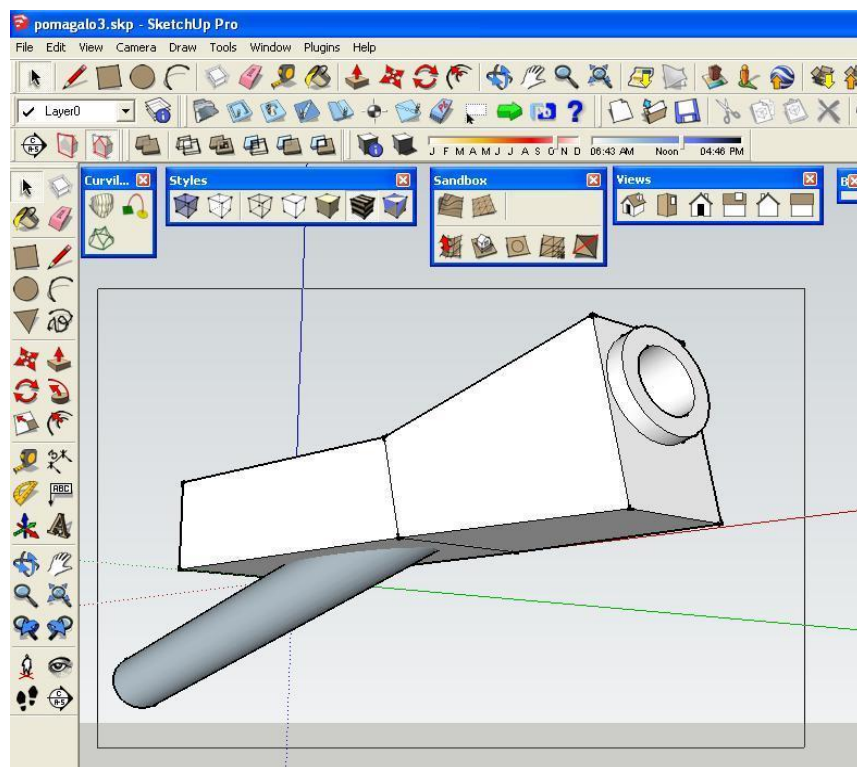
Слика 35. – Креирање нове запреминске форме

Коришћењем „Push/Pull” алата, површину коју одређују кружнице повући у смеру као на слици и у поље „Distance” унети вредност 2.5 mm, у складу са техничким цртежом, чиме је креирана нова запреминска форма (Слика 35.).



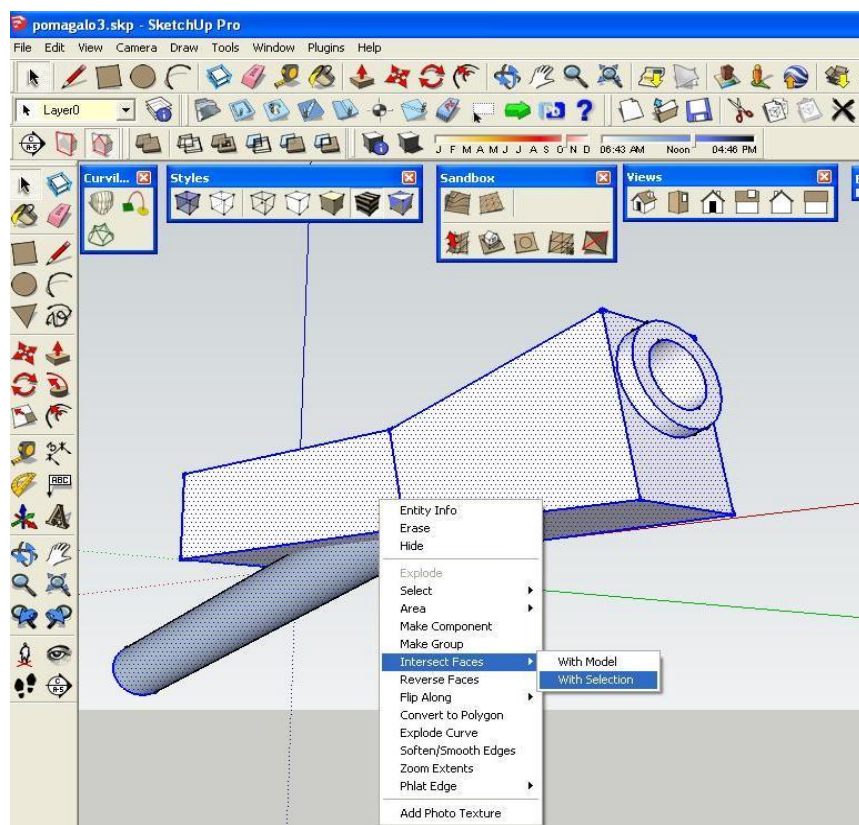
Слика 36. – Манипулисање површином на моделу

Коришћењем „Push/Pull” алата, површину коју одређује мања кружница повући у смеру ка унутрашњости модела и у пољу „Distance” унети произвољну вредност, нпр. 130 mm (Слика 36.).



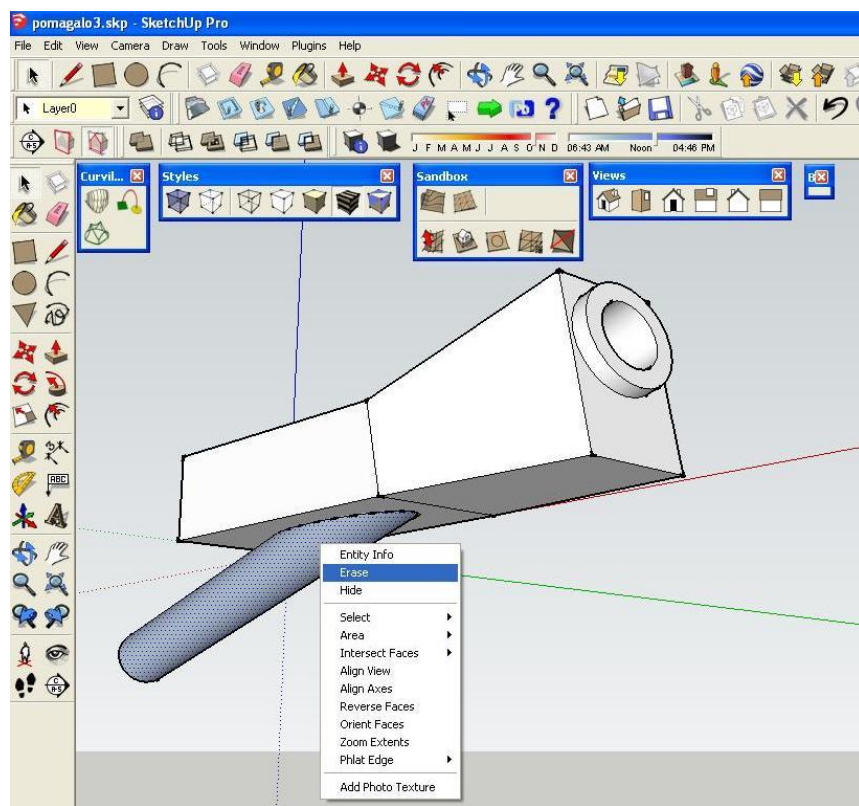
Слика 37. – Означавање свих креираних елемената

Креиране елементе обухватити и означити левим кликом миша, а затим на десни клик миша позвати контекстуални мени (Слика 37.).



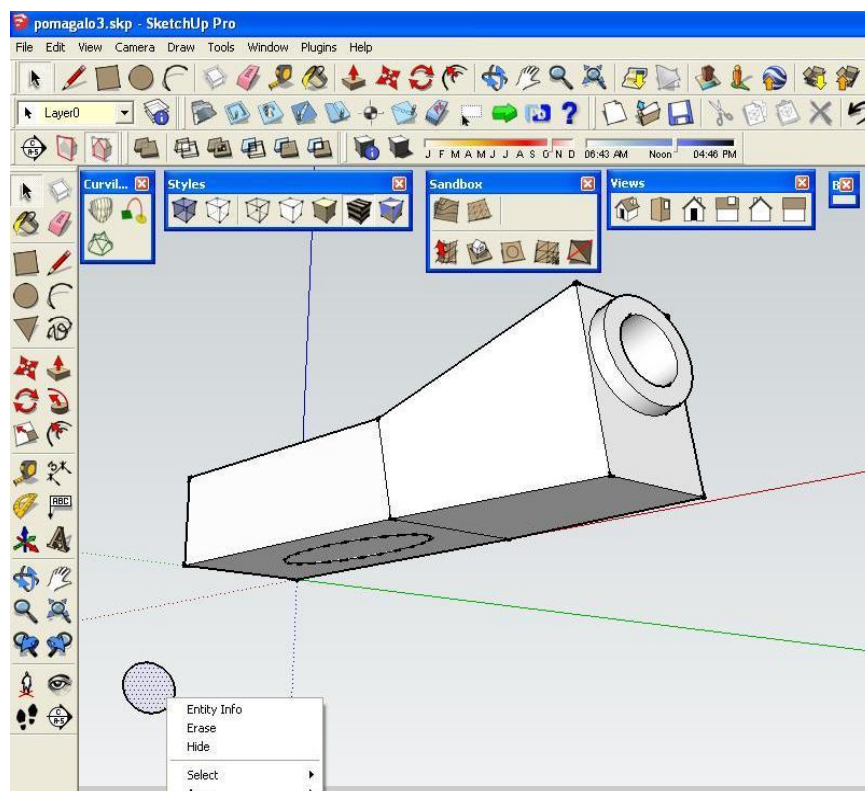
Слика 38. – Дефинисање пресека између површина

У контекстуалном менију одабрати опцију „Intersect Faces -> With Selection” (Слика 38.).



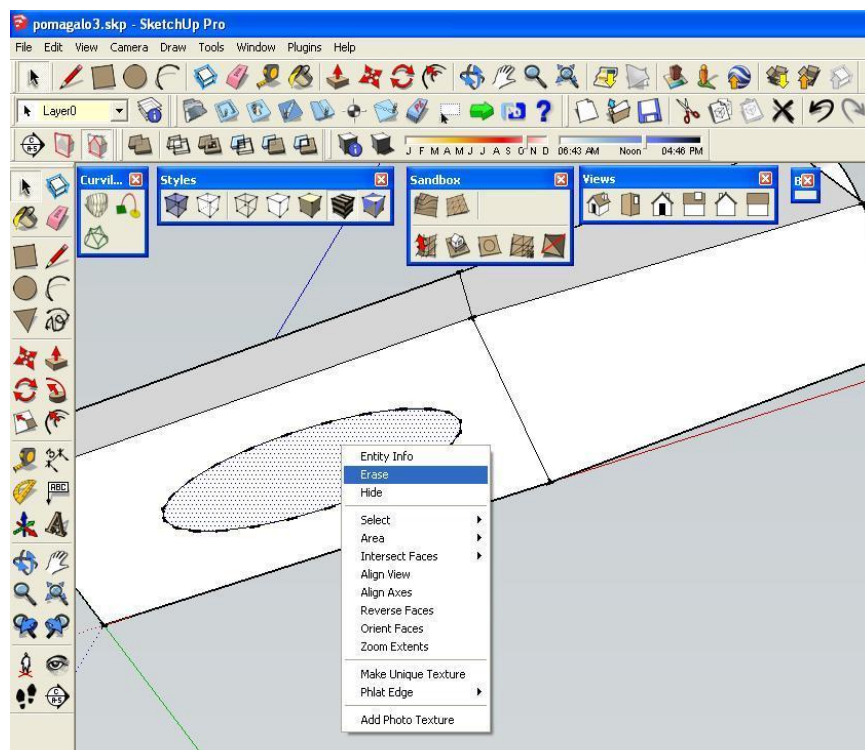
Слика 39. – Брисање непотребне површине

Користећи опцију „Erase” извршити брисање површине као на слици 39.



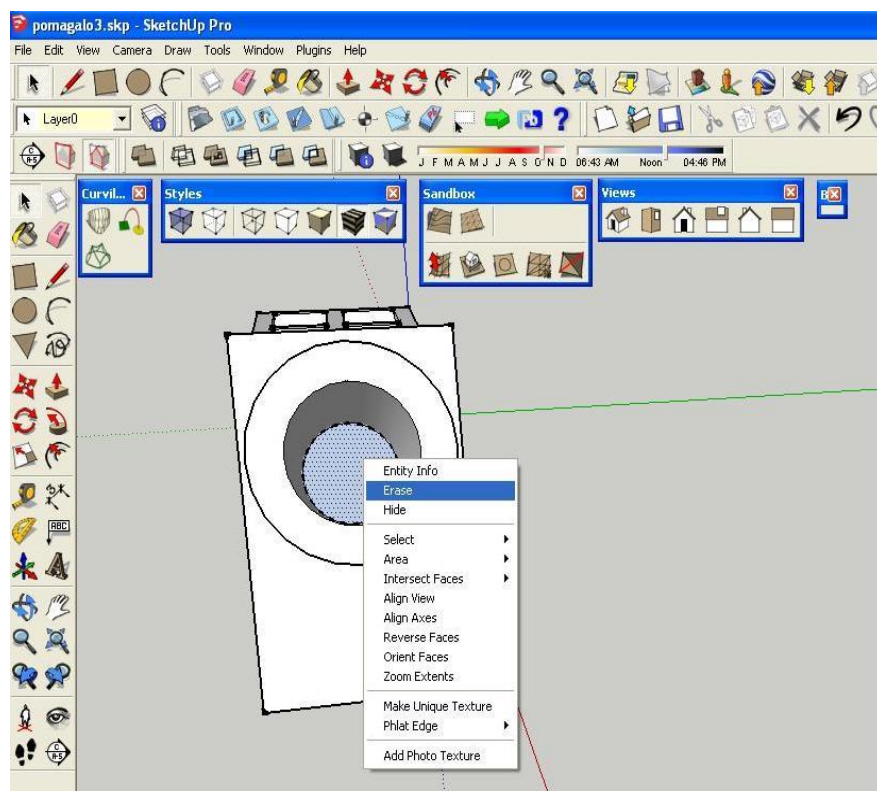
Слика 40. – Брисање непотребне површине

Користећи опцију „Erase” извршити брисање површине као на слици 40.



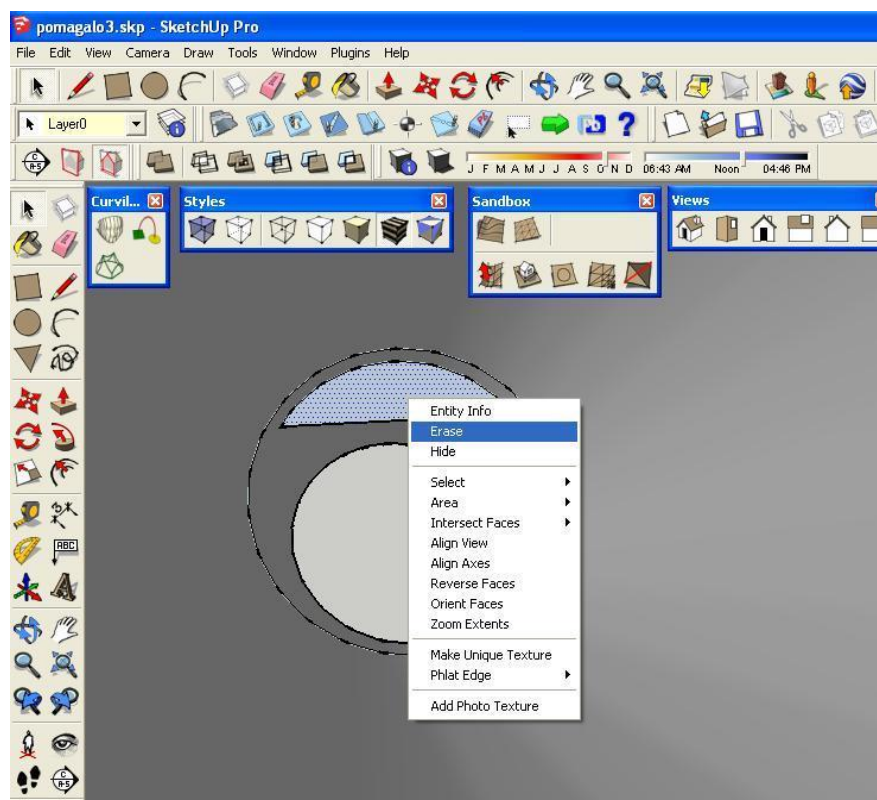
Слика 41. – Брисање непотребне површине

Користећи опцију „Erase” извршити брисање површине као на слици 41.



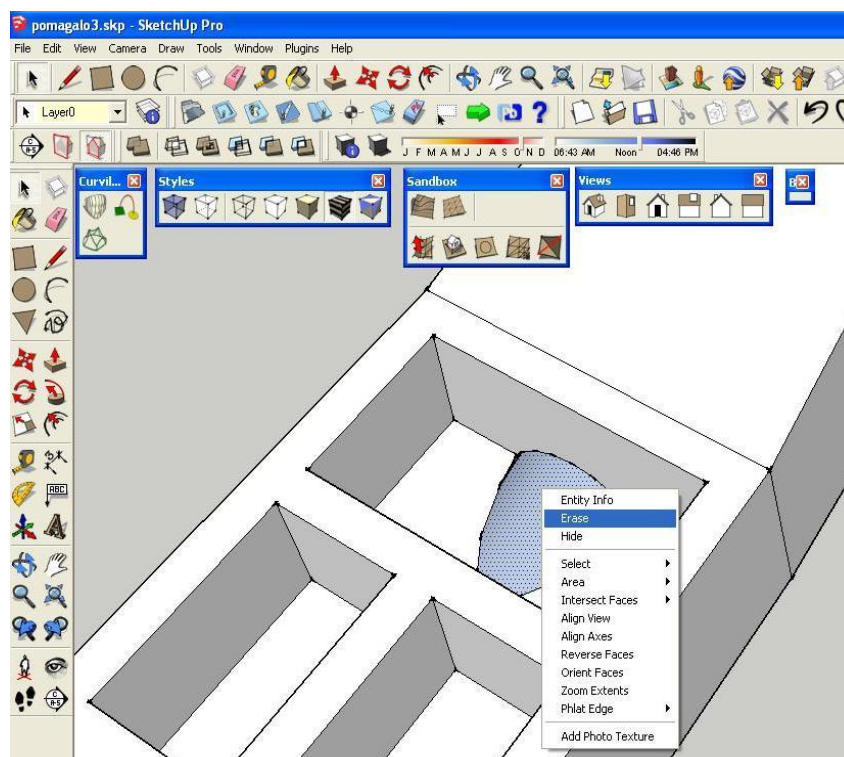
Слика 42. – Брисање непотребне површине

Користећи опцију „Erase” извршити брисање површине као на слици 42.



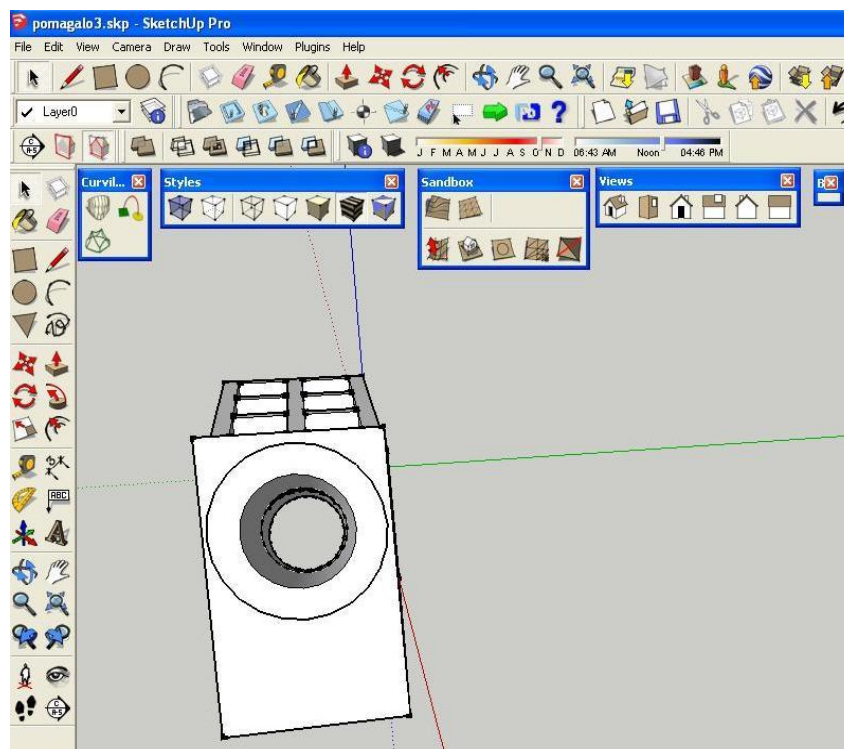
Слика 43. – Брисање непотребне површине

Користећи опцију „Erase” извршити брисање површине као на слици 43.



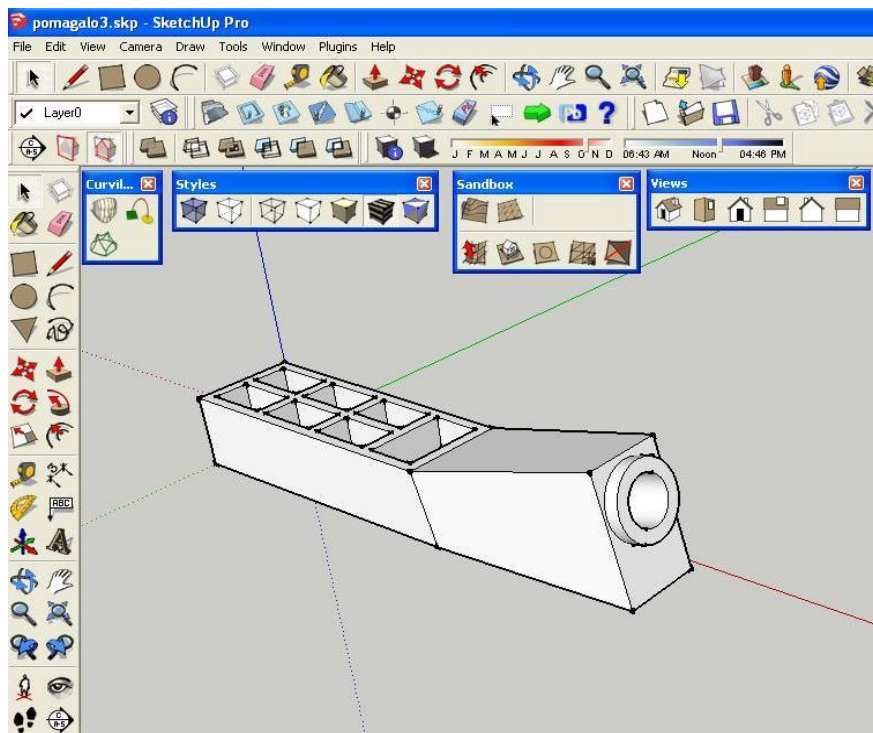
Слика 44. – Брисање непотребне површине

Користећи опцију „Erase” извршити брисање површине као на слици 44.



Слика 45. – Креирани отвор у запремини модела

Сада је креиран отвор у складу са техничким цртежом модела (Слика 45.).



Слика 46. – Коначан изглед модела

На слици 46. је приказан коначан изглед модела прототипа столарског помагала након завршеног моделирања. Приказани редослед операција при моделирању и употребљени алати представљају једно од могућих решења градње овог модела у програму *Google SketchUp*.

Литература

1. Др Ненад Грујовић. *Брза израда прототипова - Rapid Prototyping*. Крагујевац: Машински факултет у Крагујевцу, 2004.
2. Др Мирослав Трајановић, Др Ненад Грујовић, Мр Јелена Миловановић, Владимир Миливојевић. *Рачунарски подржане брзе производне технологије*. Крагујевац: Машински факултет у Крагујевцу, 2008.
3. Планчак М. *Брза израда прототипова, модела и алата – Rapid Prototyping and Rapid Tooling*. ФТН издаваштво, Нови Сад, 2004.
4. Google SketchUp. www.sketchup.com/learn, интернет презентација софтверског пакета Google SketchUp.
5. Roland Modela MDX-20 & MDX-15 user manual. www.support.rolanddga.com, упутство за употребу глодалице Roland Modela MDX-20.
6. RapMan 3.2 Build Manual. www.bitsfrombytes.com, упутство за руковање на 3D штампачу RapMan.