BIBLID 0350–1426 (206)

Примена златног угла и биофилијског пројектовања у енергетски ефикасној архитектури на примеру архитектуре Лепенског Вира

Application of the golden angle and the biophilic design in energy-efficient architecture with the example of Lepenski Vir architecture

Ненад МИЛОРАДОВИЋ ЈКП Београдске електране, Београд

Ključne reči: *биофилијско пројектовање; златни угао; енергетска ефикасност; одржива архитектура; Лепенски Вир;*

Математички обрасци за хијерархијски организоване односе у природи су Фибоначијев низ и златна пропорција. Златни угао од око 137,5° је златна пропорција примењена на круг и овај угао је оптималан за прилив сунчеве светлости у листове биљака због фотосинтезе и филотаксије (распоред листова на стабљици). Поред тога, златни угао се, због чињенице да сунчево зрачење даје и светлост и топлоту, користи и за прорачуне у грејању и енергетској ефикасности (тј. његова приближна вредност од 135°): у виду додатка на стране света – Zs, у прорачуну трансмисионих топлотних губитака током зиме кроз спољашње зидове просторија које су различито оријентисане.

Користећи приближну, али веома прецизну конструкцију златног угла, могућа је његова примена и у архитектури. На основу претходно наведеног, аутор је недавно на 10. конференцији и изложби „О архитектури – филозофија архитектуре“ приказао идејни биофилијски модел станишта Лепенског Вира, као један од могућих изгледа тих настамби. Лист бршљана, на коме се уочава место златног угла, одабран је за узор биофилијског плана основе станишта Лепенског Вира већ на самом почетку пројектовања. Бршљан је веома стара и отпорна, коровска биљка која је присутна у Ђердапу као терцијарни реликт.

Изглед тих кућа је заснован на одговору на питање: „Зашто су куће грађене на такав начин?“ Сунце и сунчево зрачење су веома важни за разумевање сврхе архитектуре Лепенског Вира. Остаци ове архитектуре представљају остатке енергетски ефикасне архитектуре, о чему је аутор раније писао. Они се могу разумети само када се посматрају унутар природног (географског, климатског, биљног и астрономског) окружења. То је разлог зашто аутор користи биофилијски узор и златни угао у конструкцији ових кућа.

Пројектовање се одвија у неколико фаза, а коначни изглед модела станишта Лепенског Вира, уграђеног у земљиште, има пирамидални облик. Архитектура Лепенског Вира, сматрамо, била је архитектура златног угла. Та архитектура је обликовала простор који „чита“ и „говори“ језик природе. Овај археолошки локалитет је веома важан за разумевање одрживог развоја на планети у светлу енергетске ефикасности у зградарству и одрживе и климатски свесне архитектуре у савременом добу.

Key words: *biophilic design; golden angle; energy efficiency; sustainable architecture; Lepenski Vir*

Hierarchically organized relationships in nature are based on the Fibonacci sequence and the golden ratio as mathematical patterns. If we apply this to a circle this ratio is the golden angle (about 137.5°) and this angle is optimal light capture for maximal photosynthetic activity in the leaves and for phyllotaxis: the arrangement of leaves on a stalk. Having in mind that solar radiation gives both light and heat, the golden angle has apply in heating and energy efficiency (i.e. its approximate value of 135°): HVAC engineers estimate conduction heat loads in winter due to the influence of different intensities of solar radiation on the walls of the room, which are oriented towards individual parts of the world with the addition of Zs.

If we use approximate, but very precise construction of the golden angle, we can apply it in architecture too. Based on the above, the author recently presented at the 10th conference and exhibition "On architecture – philosophy of architecture" a conceptual biophilic model of the Lepenski Vir habitat, as one of the possible appearances of those dwellings. The ivy leaf, on which the place of the golden angle can be seen, was chosen as a model of the biophilic plan of the base of the Lepenski Vir habitat at the very beginning of the design. Ivy is a very old and resistant, weedy plant that is present in Djerdap as a tertiary relic.

The appearance of those houses is based on the answer to the question: "Why were the houses built in this manner?" The sun and solar radiation are very important for understanding the purpose of the architecture of Lepenski Vir. The remains of this architecture represent the remains of energy-efficient architecture, which the author wrote about earlier. They can only be understood when observed within their natural (geographical, climatic, vegetal and astronomical) environment. This is the reason why the author uses the biophilic model and the golden angle in the construction of these habitats.

Designing takes place in several steps, and the final appearance of the Lepenski Vir habitat model, embedded in the soil, has a pyramidal shape. The architecture of Lepenski Vir, we consider, was the architecture of the golden angle. That architecture shaped a space that "reads" and "speaks" the language of nature. This archaeological site is very important for understanding sustainable development on the planet in the light of energy efficiency in buildings and sustainable and climate-conscious architecture in the contemporary age.

1. Увод

На самом почетку важно је поменути речи троје великана науке: Драгослава Срејовића, Михајла Пупина и Софије Коваљевскаје. У својој најзначајнијој књизи о Лепенском Виру, српски археолог Д. Срејовић је записао: „Због изразите „неисторичности" архитектуре Лепенског Вира, пада се у искушење да се изузетност њених облика објасни специфичним одликама терена и простора, тј. природном средином. Веза између архитектуре и амбијента је заиста очигледна. (...) Архитектура Лепенског Вира само „чита" своју средину, преводи њене замршене, згуснуте садржаје на лако разумљив језик..." [13] О том „читању" и „превођењу" језика природе и средине говорио је још раније и М. Пупин: „Језик природе је неисцрпан извор сазнања, човек га мора научити, а онима који поседују његово значење откриће мудрост и разумевање." [14] Иако су такође написана пре открића Лепенског Вира, сродна овоме су и запажања руског математичара С. Коваљевскаје из XIX века: „Приметимо: примарни су садржај, идеје и концепти, а секундарни су форма и формуле." [12]

2. О значају биофилијског пројектовања и његовој повезаности са енергетском ефикасношћу

Амерички биолог Едвард О. Вилсон дао је *теорију биофилије* у својој књизи „Биофилија" 1984. године [10]. Идеја о биофилијском пројектовању у архитектури настала је нешто раније: према идеји српског физичара и инжењера Бранка Лаловића, објављеној у његовој књизи „Насушно Сунце" 1982. године, он је записао: „Основни принцип пасивног коришћења сунчане енергије састоји се у томе да се кућа гради тако да се понаша као цвет, као лала или бела рада, тј. да се отвара и окреће према сунцу, када га има, а да се затварањем штити када су спољни услови неповољни." [1]

Биофилија је тек однедавно постала атрактивна за примену у архитектури. Постоје многе дефиниције биофилије, али је сигурно да она није само интеграција биљака у зграде и куће. Неколико стратегија је најважније у биофилијском пројектовању у архитектури. Према бразилском архитекти Сами Меири, неке од њих су и природни облици и природни обрасци: „Хијерархијски организовани односи у природи заснивају се на Фибоначијевом низу и златној пропорцији као математичким обрасцима. (…) Уколико их применимо на круг, та пропорција је златни угаоΔ(око 137.5°). То је приближна вредност угла у листовима, где се сунчева светлост користи на најефикаснији начин." [3] У биофилијском пројектовању, златни угао $\varphi = 137.507764\ldots°$ (златна пропорција у кругу) односи се на еволуциону тежњу оптималног прилива светлости за максималну активност фотосинтезе.

Листови у биофилијском пројектовању имају важну улогу, управо зато што због прилагођавања и опстанка својом дизајном оптимално искоришћавају сунчеву светлост ради максималне активности фотосинтезе: „Наше симулације потврђују претходне резултате који указују на то да је златни угао од 137.5° заиста оптималан за прилив светлости и да морфолошке особине утичу на криву прилива светлости." [8] Такође, слична је ситуација и са филотаксијом – распоредом листова на стабљици. „Шта је основни узрок филотаксије? Одговор је једноставан. Испоставило се да је то тип распореда листова којим се постиже максимални прилив сунчеве енергије у биљку." [11]

Слика 1. Златна пропорција у кругу – златни угао: $\varphi \approx 137.5°$ [5]

Лист бршљана је представљен на слици 2, где се може препознати златни угао (или некиугао веома близак њему). Може се уочити и место златног угла, који је зато одабран за узор биофилијског плана основе станишта Лепенског Вира већ на самом почетку пројектовања. Већи део листа је окренут према сунцу и стога најефикасније користи сунчеву светлост.

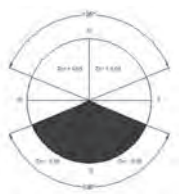
Слика 2. Лист бршљана (Hedera helix), његове жиле и место златног угла [5]

Бршљан је веома стара и отпорна биљка, приступна у Ђердапу као терцијарни реликт. Он је, обично, отпорна биљка која воли сунце. Бршљан, као стара биолошка врста, стално је био присутан у људском окружењу, те због тога људи добро познају његове особине. Пошто се сматра коровском биљком, људи су упознати са његовом отпорношћу и флексибилношћу, а ове особине су важне за прилагођавање и преживљавање бршљана.

Листови бршљана увек налазе пут до извора светлости и тако опстају. Они имају ексцентричну грађу, углавном због прилива светлости за фотосинтезу. Са друге стране, сунце даје светлост и топлоту из различитих праваца. Ово је веома важно за термичку стабилност куће и примене пасивних захвата сунчеве енергије. Због тога би кућа требало да има сличну грађу као и лист, тј. требало би да буде ексцентрична. [6] То је разлог због кога аутор користи лист бршљана и златни угао у конструкцији подова станишта. У изгледу станишта Лепенског Вира који се представља, биофилијски узор и златни угао коришћени су у конструкцији не као декорација, већ имају функцију остваривања термичке стабилности и пасивног захвата сунчеве енергије.

У енергетској ефикасности, на пример, инжењери који пројектују постројења за грејање, због утицаја различитих интензитета сунчевог зрачења на зидове просторије који су оријентисани према појединим странама света, процењују трансмисионе топлотне губитке током зиме помоћу додатка на стране света Zs. [9] За угао од 135°, који обухвата оријентације Ј, ЈИ и ЈЗ зидова, користи се вредност Zs = – 0.05. Графички приказ вредности додатка на стране света Zs је на слици 3.

Поменути угао је приближне вредности као и златни угао. Због тога се архитектонска кострукција која садржи златни угао може сматрати енергетски ефикасним обликом. Компактност облика је такође важна.



Слика 3. Графички приказ додатка на стране света Zs

3. Зашто су станишта Лепенског Вира грађена баш на овакав начин?

Остаци архитектуре Лепенског Вира (старе око 8.000 година) указују на препознатљиве мере за повећање енергетске ефикасности у зградарству, а које су примењене током осмишљавања и грађења кућа и насеља на овом локалитету, о чему је аутор већ раније писао. [7]

Током зиме, трансмисиони топлотни губици су смањени компактним омотачем, сушењем зидова и побољшањем термоизолационих карактеристика материјала коришћених за зидове применом сунчевог зрачења, због чега је коришћена повољна оријентација кућа. Вентилациони топлотни губици су смањени повољним аеродинамичним обликом, оријентацијом и укопавањем (у земљиште). Избор локације, стрмо залеђе, оријентација, укопавање и биљно окружење омогућавају пријатне услове за живот и током лета. „Производња“ енергије (топлотни и светлосни приливи од сунчевог зрачења) и „потребе“ за енергијом (најниже су дневне спољне температуре ујутру, и као потребе за сушењем зидова, после јутарње росе) добро су усклађене, што се огледа у избору оријентације. [7]

4. Приближна конструкција златног угла и његова примена у изгледу станишта праисторијског Лепенског Вира

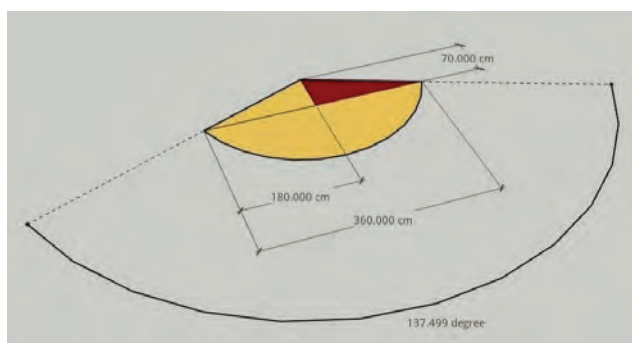
Биофилијски образац могао би да буде модел-узор за један од могућих модела станишта Лепенског Вира. У даљем тексту се објашњава конструкција таквог модела станишта. Треба одмах указати да то није реконструкција неког специфичног појединачног станишта Лепенског Вира, већ модел-узор према којем су, претпостављам, тамошње куће грађене. Коначни изглед станишта Лепенског Вира, уграђеног у земљиште, има пирамидални облик.

На основу претходно наведеног, аутор је недавно приказао идејни биофилијски модел станишта Лепенског Вира, као један од могућих изгледа тих настамби [5]. Користећи приближну, али веома прецизну конструкцију златног угла, могућа је његова примена и у архитектури.

Циљ је пројектовање и материјализација једног од могућих модела станишта Лепенског Вира. Оно ће се одвијати у неколико корака (фаза), а почиње се од хоризонталне основне линије на улазу, с почетном мером 360. Укопавање у земљу иза основне линије и насипање испред ње укључено је у све кораке везане за постављање темеља. После изградње темеља може се наставити са изградњом скелета станишта. У даљем тексту биће представљене методе изградње оваквог станишта Лепенског Вира. [5]

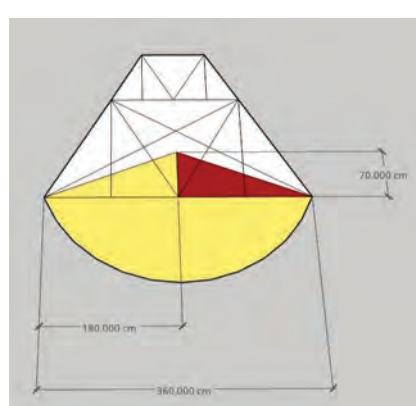
Први корак је приближна конструкција златног угла. У геометрији, тачна конструкција није могућа. Али, тамо где математички приступ не помаже, инжењерски приступ даје резултат. Користећи приближне пропорције, конструкција златног угла може бити изведена с великом тачношћу, која је прихватљива у изградњи станишта.

Правоугли троугао са катетама 180 и 70 садржи половину златног угла, са грешком мањом од 0,1‰ (види слику 4 – троугао црвене боје). Златни угао је добијен састављањем два правоугла троугла са катетама величине 18 и 7. Прецизност је таква да, изражено у целим бројевима, грешка постаје видљива тек за однос катета 18.000 и 6.998. Иста занемарљива грешка остаје при односима катета 18/7, 180/70 и 1.800/700.



Слика 4. Корак 1: Приближна конструкција златног угла [5]

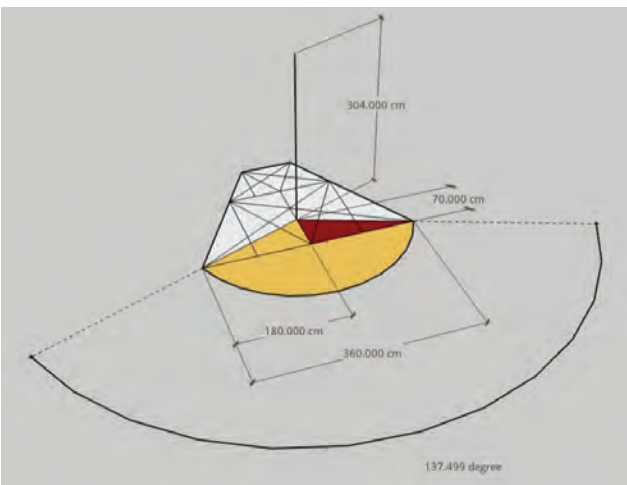
Сада имамо основну линију димензије 360. Лук златног угла је део предњег дела основе. Део основе иза основне линије може се добити уколико конструишемо једнакостраничне троуглове у два реда. Први ред чине једнакостранични троуглови величине 180; други ред су једнакостранични троуглови величине 90 (види слику 5).



Слика 5. Корак 2: Даља изградња темеља [5]

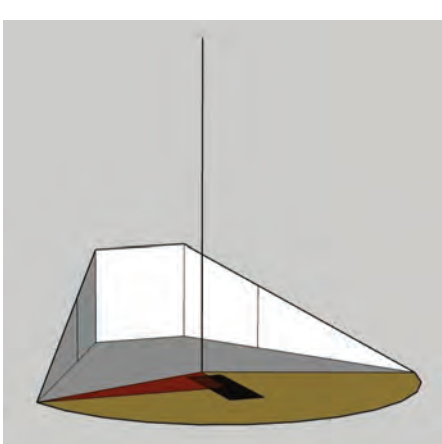
Поредећи ову основу са основом Д. Срејовића, уочава се да је предња страна представљене основе конвекснија. Конструкција почиње од основне линије и изнутра, баш како је и предлагао Д. Срејовић: „Основе кућа вероватно нису пројектоване помоћу ортогоналног система, већ неком нама непознатом методом којој би најприближније одговарао данашњи појам триангулације. Увек се почиње од одређивања распона прочеља куће (...) срж архитектуре Лепенског Вира чини основа куће, тј. унутрашњи простор. Градња увек почиње изнутра, од основе, и за њу остаје везана до краја.“ [13].

У овом тренутку спремни смо да поставимо помоћни вертикални штап (слика 6). Он припрема трећу димензију станишта Лепенског Вира. Висина штапа је висина станишта, а његов доњи крај је у темену златног угла. Овај штап је постављен строго вертикално. Његова висина добија се тако да је врх штапа такође и врх нагнутог једнакостраничног троугла величине 360. Овај нагнути једнакостранични троугао обухвата основну линију темеља. Коришћењем Питагорине теореме добија се висина овог вертикалног штапа од приближно 304 (тачно је 303,80915...), са релативном грешком од око 0,7‰. Уколико не користимо Питагорину теорему, врх је тамо где врх нагнутог једнакостраничног троугла величине 360 додирује помоћни вертикални штап из темена златног угла, који је виши него што је то неопходно.



Слика 6. Корак 3: Помоћни вертикални штап из темена златног угла [5]

Сви кораци изградње темеља станишта подразумевају укопавање у земљиште иза основне линије и насипање испред, док су пејзаж и нагиб терена такође укључени у овај облик и изглед. Насеље има стрмо залеђе. Аутор претпоставља да је задња страна била укопани квадрат величине 90, који је био део станишта. На слици 7 се могу видети темељ, нагиб терена, укопана задња страна облика квадрата, локација правоугаоног огњишта (дата црном бојом) и помоћни вертикални штап. Мера 360 је била коришћена у геометрији Лепенског Вира. Одступања су могућа у извођењу појединачних станишта услед конфигурације терена и обухватају одступања у облику и величини.



Слика 7. Корак 4: Укопавање у земљиште и задње стране станишта [5]

Следећи кораци обухватају конструкцију треће димензије станишта Лепенског Вира. Први наредни корак је конструкција скелета помоћу три штапа. Његов врх је врх строго вертикалног штапа из темена златног угла сачињеног у кораку 3. Два штапа величине 360 налазе се испред и део су нагнутог једнакостраничног троугла величине 360, који укључује основну линију. Доњи крај трећег штапа је у ортоцентру хоризонталног једнакостраничног троугла величине 360. Ортоцентар је добијен у пресеку висина већ делимично изграђеног хоризонталног једнакостраничног троугла у кораку 2, који стога није потребно изградити у потпуности. Врх трећег штапа је врх помоћног вертикалног штапа.

Други део скелета сачињен је од штапова који полазе из врха, који је почетна тачка изводница костура пирамидалног облика. Крајње тачке ових изводница су карактеристичне тачке на земљишту. Због тога је задња страна укопана као квадрат. Други део костура је иза основне линије величине 360 и садржи први део костура (види слику 9). Поглед спреда на други део скелета је једнакостранични троугао величине 360.

Трећи део скелета може да се добије повезивањем врха станишта са луком претходно конструисаног златног угла из корака 1. Овај врх је врх дела омотача праве купе или пирамиде. Штапови могу бити на лучном размаку од 15°. Улаз у станиште је 60° и нема штапове на улазу (види слику 10). Аутор сматра да овај модел треба да садржи лук златног угла. Поглед спреда је такође пирамидалан, али је веома близак облику купе.

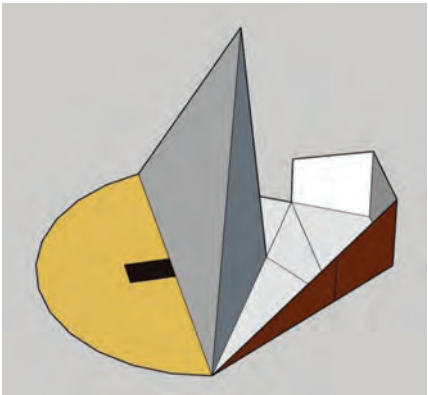
Коначни изглед станишта Лепенског Вира могао би се добити пажљивим уклањањем помоћног вертикалног штапа и штапа из ортоцентра недовршеног хоризонталног једнакостраничног троугла величине 360 (види слике 6, 7 и 8). Слике 11, 12 и 13 показују коначни изглед једног од могућих модела станишта Лепенског Вира.

На овом месту истакао бих речи Д. Срејовића: „Архитектура Лепенског Вира има у себи нечег изразито математичког, односно у свим њеним формама осећа се присуство конкретних дужи и одређених бројева. (...) Она кореспондира једино са морфологијом града далеке будућности. (...) Изненађује, међутим, једна чињеница: градитељ ових првих конструкција на Лепенском Виру зна за неку врсту мерења и поседује танано осећање за пропорције. (...) Чини се да је градњи кућа на Лепенском Виру претходила ритуална церемонија, односно да је систем размеравања кућних основа био тајна у коју је био упућен изузетно мали број лица, можда чак и само један посвећени члан заједнице.“ [13]

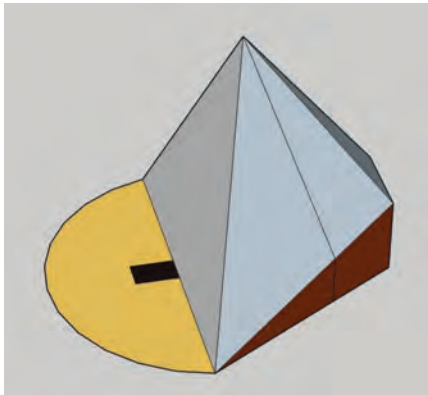
Постоји извесна разлика између основица које су предложили Д. Срејовић и аутор. По аутору, облик основице је више испупчен, али аутор такође сматра и да су, због конфигурације терена, могућа одступања у пракси од идејног модела ових кућа и њиховог стварног изведеног стања. Та одступања од ауторовог модела настају због уградње огњишта које је на улазу, чиме се боље остварује његова функција. На слици 16 основа Д. Срејовића је приказана лево, док је ауторова конструкција са златним углом дата на десној слици. У прилог ауторовој конструкцији иде важна чињеница да конструкција и шестарење не почиње од тачке C него од тачке G. У условима нагиба терена у Ђердапској клисури веома је тешко отпочети конструкцију из тачке C. У случају конструкције са златним углом, тачка C је непотребна. Треба и овде истаћи да је ауторова конструкција са златним углом модел по којем су те куће грађене, а не реконструкција неког појединачног станишта.

Закључак

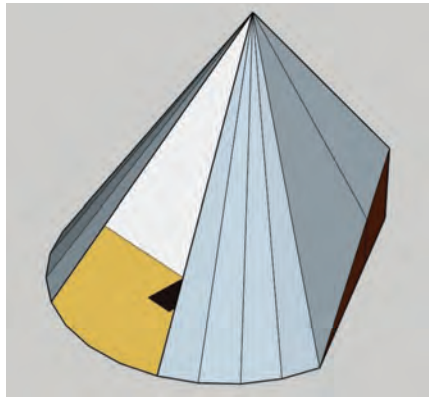
Златна пропорција, те златни угао бивају основни математички обрасци у биофилији. Такође, у енергетској ефикасности, због утицаја сунчевог зрачења, угао (од 135°) који је веома близак златном углу користи се у прорачунима



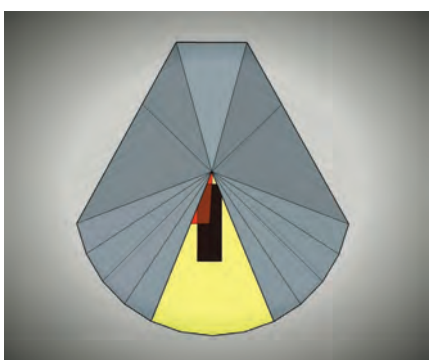
Слика 8. Корак 5: Први део скелета [5]



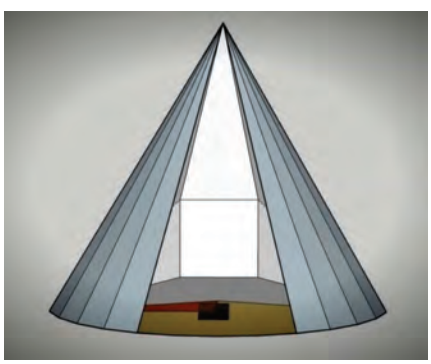
Слика 9. Корак 6: Други део скелета [5]



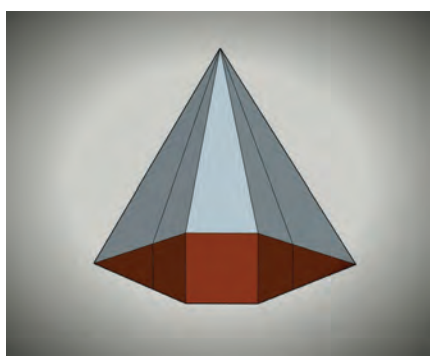
Слика 10. Корак 7: Трећи део скелета [5]



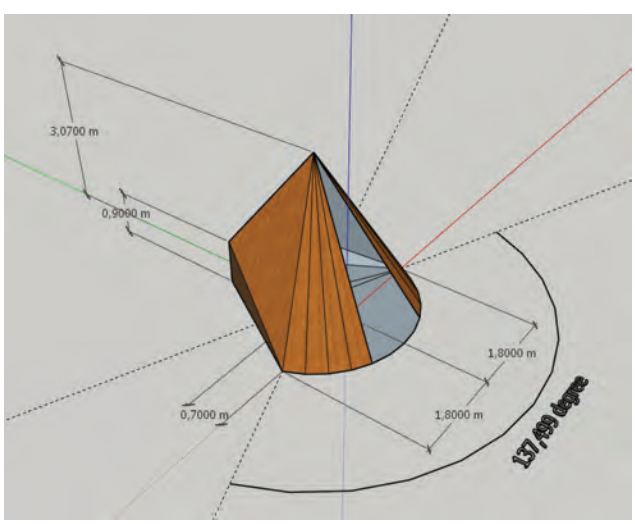
Слика 11. Поглед спреда [5]



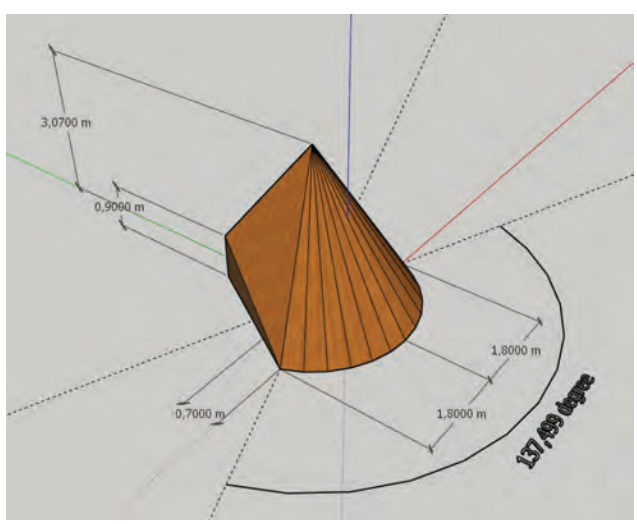
Слика 12. Поглед одгоре [5]



Слика 13. Поглед отпозади [5]



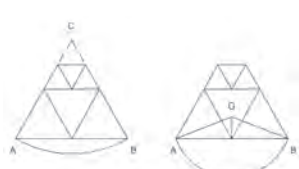
Слика 14. Поглед искоса (отворен улаз)



Слика 15. Поглед искоса (затворен улаз)

трансмисионих губитака топлоте током зиме. Због тога аутор сматра да златни угао може имати примену у архитектури и пасивним техникама захвата сунчеве енергије.

Илустрација горенаведеног може се уочити на обали Дунава у Ђердапу, у Србији, у праисторијској архитектури Лепенског Вира, насталој пре око 8.000 година, о чему је аутор већ раније писао. Архитектура Лепенског Вира, сматрамо, била је архитектура златног угла. Она је обликовала простор који „чита“ и „говори“ језик природе. Овај археолошки локалитет је веома важан за разумевање одрживог развоја на планети, у светлу енергетске ефикасности у зградарству и архитектури, потом за уштеду енергије из фосилних горива за грејање и климатизацију у зградама и архитектури, за смањење емисије гасова са ефектом ста-



Слика 16. Прикази основа по Д. Срејовићу (лево) и аутора (десно)

клене баште и превенцију ефеката климатских промена и глобалног загревања у савременом добу. [5]

Становници Лепенског Вира су нам оставили дизајн који указује на бригу о просторним односима који су отворили пут геометрији. „Геометрија је, као и бројање, имала порекло примитивне ритуалне праксе. (...) Развој геоме-

трије може исто тако бити подстакнут практичним потребама изградње (...) или естетским осећајем за дизајн и ред. (...) Јасно је да су почеци математике старији од најстаријих цивилизација.“ [4] Доказ за ову тврдњу су остаци праисторијске архитектуре културе Лепенског Вира у Србији, чији се смисао може разумети само када се она посматра унутар природног (географског, климатског, биљног и астрономског) окружења. Идеје градитеља Лепенског Вира о климатски свесној архитектури, попут отпорног бршљана, дочекале су да постану актуелне и данашњим генерацијама.

Литература

[1] **Lalović, B.** *Nasušno Sunce*, Nolit, Beograd, Jugoslavija, 1982.

[2] **Lučić, Z.** *Ogledi iz istorije antičke geometrije*, Službeni glasnik, Beograd, Srbija, 2009.

[3] **Meira, S.** (2021) *Biophilic Design Blueprint*, lectures in Green Building School powered by UGREEN, Curitiba, Brazil, 2021.

[4] **Merzbach, U.C. and Boyer, C.B.** *A History of Mathematics, third edition*, Hoboken, New Jersey, published simultaneously in Canada: Wiley, 2011.

[5] **Miloradović, N. B.** Biophilic pattern and appearance of Lepenski Vir habitats, *Proceedings of 10th International Conference and Exhibition On architecture – Philosophy of Architecture*, STRAND, Rectorate of University of Belgrade and the Gallery of science and technology of Serbian academy of sciences and arts, Belgrade, Serbia, pp.293-303, 2022.

[6] **Miloradović, N. B.** Eccentric shapes of buildings as optimal solutions for bioclimatic architecture, *Proceedings of 35th International Congress of KGH, 35(1)*, pp. 114–119, 2004, https://izdanja.smeits.rs/index.php/kghk/article/view/5887

[7] **Miloradović, N. B.** Lepenski Vir – the prehistoric energy efficient architecture, *REHVA Journal*, 53(5), pp. 54-59, 2016., https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/lepenski-vir-the-prehistoric-energy-efficient-architecture

[8] **Strauss, S., Lempe, J., Prusinkiewicz, P., Tsiantis, M. and Smith R. S.** Phyllotaxis: is the golden angle optimal for light capture?, *New Phitologist*, 225(1), pp. 499-510, 2020, https://doi.org/10.1111/nph.16040

[9] **Todorović, B.** *Projektovanje postrojenja za centralno grejanje*, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd, Srbija, 2009.

[10] **Wilson, E. O.** *Biophilia*. Cambridge: Harvard University press 1984.

[11] **Короленко, П. В. and Грушина Н. В.** *Золотое сечение и самоподобные структуры в оптике*, Книжный дом ЛИБРОКОМ, Москва, Россия, 2010.

[12] **Пуханчев, Ю. В. and Попов, Ю. П.** *Математика без формул 1*, КомКнига, Москва, Россия, 2010.

[13] **Срејовић, Д.** *Лепенски Вир, нова праисторијска култура у Подунављу*, СКЗ, Београд, Југославија, 1969.

[14] ***, Стална поставка Музеја у оквиру Завичајног комплекса Михајло Идворски Пупин у Идвору.

kgh