

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Mislav **Bogdan**, Marko **Briški**, Ilijana **Cvitanović**, Hrvoje **Ivaniš**, Evita **Leljak**, Ilija **Lučić**, Ines **Mijić**, Stela **Perković**, David **Plank**, Theresa **Porzelt**, Matej **Šalić**, Dino **Valetić**, Kristina **Vukušić**

nZEB KAMPUS S VISOKIM UDJELOM OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Zagreb, 2024.

Ovaj rad izrađen je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u Zavodu za energetska postrojenja, energetiku i okoliš, na Katedri za energetska postrojenja i energetiku, u Laboratoriju za energetska postrojenja pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Ankice Kovač i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2023./2024.

POPIS I OBJAŠNJENJE KRATICA KORIŠTENIH U RADU

CO ₂	Ugljikov dioksid
COP	Koeficijent učinkovitosti dizalice topline (<i>engl. Coefficient of Performance</i>)
D	Duljina
EK	Europska komisija
EPBD	Direktiva o energetske značajkama zgrada (<i>engl. Energy Performance of Buildings Directive</i>)
EU	Europska unija
nZEB	Zgrada gotovo nulte energije (<i>engl. Nearly-zero energy building</i>)
OIE	Obnovljivi izvori energije
PEM	Protonski propusna membrana
PEME	Elektrolizator s protonski propusnom membranom
FN/PV	Fotonaponski (<i>engl. Photovoltaic</i>)
PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
s	Debljina stijenke prozora
Š	Širina
U	Koeficijent prolaza topline
V	Visina
VRV	Varijabilni (promjenjivi) volumen radne tvari
VRF	Varijabilni (promjenjivi) protok radne tvari
ZEB	Zgrada nulte energije (<i>engl. Zero Energy Building</i>)

Sadržaj rada

1. UVOD	6
2. HIPOTEZA I OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA	7
2.1 Hipoteza rada	7
2.2 Opći ciljevi rada	7
2.3 Specifični ciljevi rada	7
3. METODE I PLAN RADA	8
3.1 Projektiranje zgrade kampusa gotovo nulte energije	9
3.1.1 Dimenzioniranje sunčane fotonaponske elektrane	9
3.1.2 Dimenzioniranje sunčanih toplinskih kolektora	10
3.1.3 Dimenzioniranje sustava dizalica topline	11
3.1.4 Dimenzioniranje sustava za proizvodnju i korištenje vodika	11
3.1.5 Dimenzioniranje punionica za električna vozila na baterije	15
3.1.6 Dimenzioniranje pametne rasvjete i uređenje okoliša	15
3.1.7 Dimenzioniranje pametnih prozora	16
3.1.8 Dimenzioniranje sustava za prikupljanje i korištenje kišnice	16
4. REZULTATI	18
4.1 Zgrada kampusa gotovo nulte energije	18
4.2 Sunčana fotonaponska elektrana	19
4.2.1 Sunčana fotonaponska elektrana na sjevernom krovu	19
4.2.2 Sunčana fotonaponska elektrana na južnom krovu	21
4.2.3 Sunčana fotonaponska elektrana na krovu parkirališta	23
4.2.4 Sunčana fotonaponska elektrana u dvorištu kampusa	24
4.2.5 Pregled rezultata	25
4.2.6 FN moduli	27
4.3 Sunčani toplinski kolektori	27
4.3.1 Sustav toplinskih kolektora	27
4.3.3 Sustav odabranih pločastih kolektora	29
4.4 Sustav dizalica topline	30
4.4.1 Proračun toplinske i rashladne energije	30
4.4.2 Odabrana tehnologija: VRV vanjske jedinice – integrirano rješenje sa dizalicom topline	31
4.4.3 Unutarnje jedinice	32
4.4.4 Cijevni razvod	32
4.4.5 Regulacija i upravljanje	33
4.4.6 Troškovnik	34
4.5 Sustav za proizvodnju i korištenje vodika	35
4.6 Punjači za električna vozila na baterije	41
4.7 Pametna rasvjeta i uređenje okoliša	44
4.8 Pametni prozori	47
4.8.1 Pametna sjenila	50
4.9 Sustav za prikupljanje i korištenje kišnice	51
5. RASPRAVA	54
6. ZAKLJUČCI	55

ZAHVALE.....	56
POPIS LITERATURE	57
SAŽETAK.....	60
SUMMARY.....	61
KRATKI ŽIVOTOPISI AUTORA	62

1. UVOD

Klimatske promjene trenutno su jedan od najvećih izazova s kojim se suočava ljudska populacija. Visoke temperature, suše, požari, poplave, dizanje razina mora samo su neke od posljedica klimatskih promjena [1]. Stoga su se Pariškim sporazumom zemlje obvezale poduzeti mjere za ublažavanje i prilagodbu klimatskim promjenama. Cilj je smanjiti emisije ugljikovoga dioksida (CO₂) te ograničiti porast temperature na 1,5 °C u odnosu na predindustrijsko razdoblje [2,3]. U slučaju Europske unije (EU) cilj je smanjiti emisije na najmanje 55% do 2030. godine u usporedbi s razinama iz 1990. godine, s krajnjim ciljem postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine. Kako bi se postavljeni ciljevi i ostvarili, potrebno je djelovati u svim sektorima gospodarstva na uravnotežen i pravedan način, uz očuvanje konkurentnosti EU. Iz tih je razloga Europska komisija (EK) u prosincu 2019. godine najavila Europski zeleni plan kao plan za postizanje EU klimatske neutralnosti do 2050. godine [4]. Između ostaloga, ovaj dokument naglašava važnost zgrada u tom procesu, budući da su za njihovu izgradnju, korištenje i obnovu potrebne veliki udjeli energije i resursa. Važno je naglasiti da su zgrade odgovorne za 40% potrošene energije. EK procjenjuje da postojeće zgrade zahtijevaju godišnju obnovu sa stopom dvostruko većom od trenutne (0,4 - 1,2%). Dakle, u energetskej tranziciji prema niskougljičnom gospodarstvu zgrade su jedan od ključnih čimbenika koji mogu pomoći ublažiti klimatske promjene. Zbog toga mnogi postojeći propisi imaju za cilj smanjiti potrošnju energije zgrada, te povećati njihovu učinkovitost. Jedan od takvih propisa je EU Direktiva o energetskej značajkama zgrada (EPBD) [5], kojom se za pojam zgrade gotovo nulte energije (nZEB) i zgrade nulte energije (ZEB) podrazumijeva da u znatnoj mjeri uključuje obnovljive izvore energije (OIE). U tom kontekstu, doneseno je i objavljeno niz politika za usmjeravanje i poticanje provedbe smanjenja emisija u građevinskej sektoru diljem EU. Ove politike naglasak stavljaju na ekološke prioritete, akcijske planove za zeleni razvoj i akcijske planove za poboljšanje kvalitete života uz promicanje razvoja i izgradnje nZEB i ZEB. Stoga je u ovom radu polazište dimenzioniranje zgrade kampusa koji bi bio energetskej neovisan na način da bi korištenjem OIE i čistih alternativnih goriva pokrio sve svoje potrebe za energijom (električnom, toplinskom i rashladnom). Rad je strukturiran kako slijedi: nakon uvoda kao poglavlja broj 1, u poglavlju 2 definirana je hipoteza, te opći i specifični ciljevi. Potom slijedi poglavlje 3 u kojemu su opisane metode i plan rada u sklopu kojega su navedeni postupci odabira energetskej sustava koji su se primijenili za dobivanje rezultata. U poglavlju 4 detaljno su prikazani rezultati rada u smislu ukupne energije grijanja i hlađenja, odabira tehnologije i drugih energetskej sustava. Naposljetku, poglavlja 5 i 6 donose raspravu, odnosno zaključke provedenoga istraživačkoga rada. Na samome kraju slijede zahvale, popis literature, sažetak na hrvatskej i engleskej jeziku, te kratki životopisi autora rada.

2. HIPOTEZA I OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

2.1 Hipoteza rada

Korištenje novih tehnologija temeljenih na OIE doprinosi smanjenju emisija CO₂.

2.2 Opći ciljevi rada

- Podići svijest o važnosti primjene novih tehnologija bez štetnih emisija kroz primjer modela zgrade kampusa gotovo nulte energije.
- Unaprijediti međusobnu interakciju te potaknuti samostalno razmišljanje studenata kroz razvoj vlastitih ideja i njihovu primjenu u jedinstvenome projektu kroz dinamični timski rad.

2.3 Specifični ciljevi rada

- Dimenzionirati sunčanu fotonaponsku elektranu za proizvodnju električne energije.
- Dimenzionirati sustav dizalica topline i sunčanih toplinskih kolektora za proizvodnju toplinske i rashladne energije.
- Predložiti rješenja pametnih prozora, pametne rasvjete i pametnoga uređenja okoliša.
- Dimenzionirati sustav prikupljanja kišnice za potrebe sanitarnih sustava.
- Predložiti rješenja za dekarbonizaciju transporta temeljenoga na vodik i baterijama.

3. METODE I PLAN RADA

Metode koje su se koristile u ovome radu su:

1. Metoda deskripcije pomoću koje su opisani temeljni pojmovi u sklopu ovoga rada.
2. Induktivna i deduktivna metoda, pri čemu induktivna metoda podrazumijeva analizu učinkovitosti na temelju tehničkih specifikacija raspoloživih energetske sustava, dok je deduktivnom metodom sagledana cjelokupna ideja i provjerena postavljena hipoteza.
3. Metoda klasifikacije pomoću koje je omogućena preglednost rada kao preduvjet za provođenje analize i sinteze.
4. Metode analize i sinteze pomoću kojih su najprije analizirani osnovni elementi odabranih energetske sustava, koji su na temelju dobivenih rezultata povezani u jedinstvenu cjelinu metodom sinteze.
5. Metoda modeliranja zgrade kampusa gotovo nulte energije.

Plan rada prema kojemu je izrađen ovaj rad je kako slijedi:

1. Odabir teme
 - ovaj rad izrađen je u okviru kolegija pod nazivom Nove tehnologije u energetici, kao kolegij završne godine diplomskoga studija procesno-energetskoga smjera. Stoga je ideja bila odabrati temu koja bi uključivala primjenu gotovo svih stečenih znanja tijekom studija. S obzirom da se, s energetske aspekta, u zgradama koriste mnoge različite tehnologije, odabrana je tema dimenzioniranja zgrade kampusa gotovo nulte energije.
2. Istraživanje
 - nakon odabira teme uslijedile su tjedne razmjena mišljenja na temelju istraženih mogućih rješenja.
3. Postavljanje hipoteze
 - na temelju istraživanja postavljena je hipoteza, te su definirani opći i specifični ciljevi.
4. Uspostava timova i podjela rada
 - nakon postavljene hipoteze i definiranih općih i specifičnih ciljeva, grupa je podijeljena u male timove. Svakom timu dodijeljen je zadatak kao podcjelina jedinstvenoga energetske sustava zgrade, nakon čega je uslijedilo detaljno istraživanje specifičnih sustava.
5. Praćenje napretka i pisanje rada
 - na tjednoj bazi prezentirani su ostvareni rezultati, vođene su konstruktivne diskusije, predlagale su se izmjene i poboljšanja, nakon čega je uslijedilo pisanje rada i završno usuglašavanje finalne verzije rada.

3.1 Projektiranje zgrade kampusa gotovo nulte energije

Idejna zgrada kampusa nulte energije smještena je u zagrebačkome kvartu Borongaj. Nalazi se na zemljištu veličine 9931 m². Zemljište je dio katastarske čestice 1322/40 u vlasništvu Republike Hrvatske. Omeđeno je Borongajskom cestom na južnoj strani te Savudrijskom ulicom na istočnoj strani. Zgrada gotovo nulte energije zauzima površinu od 2084 m². Ulaz zgrade usmjeren je prema Savudrijskoj ulici dok je ulaz na parkiralište s Borongajske ceste. Parkiralište zauzima površinu od 1450 m² te prekriven je fotonaponskom (FN) elektranom, a sadrži 50 parkirnih mjesta od kojih je 4 namijenjeno za osobe s invaliditetom. Na raspolaganju je i 5 punjača za punjenje električnih vozila. Sjeverno od zgrade smještene su vanjske jedinice dizalica toplina. Oprema za pohranu te sama punionica vodika nalaze se također sjeverno od zgrade. Shodno poziciji punionice vodika, predviđena su 3 parkirna mjesta, stajalište za autobus na pogon vodikom, te mjesto za odlaganje bicikala na pogon vodikom. Autobusna stanica predviđena je Savudrijskoj ulici te ima pogled na ulaz u zgradu. Ispred ulaza u zgradu nalazi se područje za odlaganje klasičnih bicikala. Okoliš zgrade uređen je sunčanim stablima te sunčanim klupama. Kao dodatan izvor energije koriste se i FN moduli postavljeni na zelenoj površini također sjeverno od zgrade nulte energije. Zgrada se sastoji od 3 dijela: sjevernoga, srednjega i južnoga. Sjeverni dio sastoji od 3 etaže u kojima se nalaze studentski restoran, predavaonice, te uredi. Srednji dio ima samo jednu etažu te mu je primarna funkcija ulaz u zgradu. U južnom dijelu zgrade smještene su predavaonica te studentska knjižnica. Zgrada je opremljena pametnim prozorima na južnoj, istočnoj, te zapadnoj strani. U samom objektu sadržan je i sustav za prikupljanje kišnice. Krovovi sjevernoga i južnoga dijela zgrade iskorišteni su za instalaciju sunčane elektrane. Na krovu srednjega dijela nalazi se vrt. Detaljan opis zgrade obrađen je u poglavlju 4.1.

3.1.1 Dimenzioniranje sunčane fotonaponske elektrane

Kao što je već spomenuto u uvodu, u EU se u sektoru zgradarstva troši gotovo 40% ukupno utrošene energije. Ukoliko se ta energija dobiva izgaranjem fosilnih goriva, sektor zgradarstva uvelike doprinosi negativnom efektu staklenika povećanjem koncentracije stakleničkoga plina CO₂ u atmosferi i posljedično klimatskim promjenama. Time se pri projektiranju zgrade nZEB kampusa opskrba električnom energijom iz OIE pokazala kao jedan od ključnih zahtjeva. S obzirom na predviđenu lokaciju zgrade u Zagrebu, točnije na Borongaju u sklopu postojećega znanstveno-učilišnoga kampusa Borongaj, sunčana FN elektrana bila je logičan izbor. Iako se tijekom procesa dobivanja silicija, jednoga od glavnih elemenata za izradu FN modula, same proizvodnje i transporta panela još uvijek troše znatne količine energije koja potječe od fosilnih goriva, gledajući cjelokupni životni ciklus FN moduli uvelike smanjuju štetne emisije CO₂ u usporedbi s procesima proizvodnje električne energije iz konvencionalnih izvora [6]. Hrvatska je među zemljama EU s najvećim sunčanim potencijalom, ali s još uvijek nedovoljno

instaliranih sunčanih kapaciteta. Naročito visoki potencijal imaju gradovi smješteni u hrvatskome primorju, ali i gradovi u kontinentalnoj Hrvatskoj poput Zagreba imaju dovoljno velik potencijal za proizvodnju električne energije iz FN elektrana. Na primjer, za 1 kWp instalirane snage u Starom Gradu na otoku Hvaru, najsunčanijem hrvatskome otoku s preko 2700 sunčanih sati godišnje, dobije se oko 1500 kWh električne energije godišnje, dok je u Gradu Zagrebu ta brojka nešto manja i iznosi 1214 kWh [7].

Sunčana FN elektrana, u sklopu virtualnoga nZEB kampusa, mrežnoga je tipa (*engl. on-grid*). Za vrijeme kada elektrana zadovoljava potrebe kampusa za električnom energijom, eventualne proizvodne viškove predaje u mrežu. U slučaju kada elektrana ne može samostalno snabdijevati kampus električnom energijom, istu povlači iz mreže. Električna se energija predana i preuzeta iz elektroenergetskoga sustava mjeri putem dvosmjernoga brojila. Prvotni je zadatak pri dimenzioniranju elektrane bio razmotriti dostupne površine za postavljanje FN modula. Odlučeno je da se FN moduli postave na ravni krov sjevernoga krila zgrade površine 42,5 m x 20,5 m, ravni krov južnoga krila zgrade jednake površine, te na natkriveno parkiralište površine 43,5 m x 34 m. Daljnjom je analizom cjelokupnoga projekta utvrđeno kako će na raspolaganju za instalaciju sunčane FN elektrane ostati i znatan prostor na sjevernome dijelu zemljišta površine 45 m x 40 m. Prilikom proračuna broja modula koji se mogu postaviti na pojedinu površinu uzet je u obzir prostor potreban za sigurnu njihovu montažu te je uračunat razmak između redova kako bi svi moduli bili izloženi sunčevom ozračenju sa smanjenim utjecajem zasjenjenja, te lako dostupni u slučaju potrebe za čišćenjem, eventualnih popravaka ili zamjene. Pomoću besplatnoga PVGIS alata dostupnoga na internetu proračunata je predviđena proizvodnja električne energije pojedinoga dijela sunčane elektrane. Izabrani su FN moduli i popratna oprema elektrane proizvođača Solvis, hrvatske tvrtke sa sjedištem u Varaždinu [8]. Za svaku od navedenih površina za instalaciju sunčane elektrane odabran je drugačiji pristup montiranja FN modula pri čemu su u obzir uzeti ograničenost prostora, želja za maksimiziranjem proizvodnje električne energije te estetika zgrade i njene okoline. Puštanjem u rad ove elektrane pokazalo bi se koji je pristup energetske i ekonomski najpovoljniji.

3.1.2 Dimenzioniranje sunčanih toplinskih kolektora

Ova aktivnost projekta ima za cilj projektirati i implementirati sustav sunčanih toplinskih kolektora koji će učinkovito pretvarati sunčevu energiju u toplinsku energiju s ciljem zagrijavanja vode. Sustav će biti primarno korišten za pripremu potrošne tople vode, uz ugradnju sustava pločastih kolektora i spremnika s dizalicom topline. Prvi korak bio je prikupljanje podataka o specifičnim potrebama za toplom vodom objekta, te upoznavanje s lokacijom, odnosno dostupnom površinom za optimalno postavljanje pločastih kolektora,

nakon čega je uslijedio izbor opreme. Odabrana su dva pločasta kolektora, tip Bosch FKC-2/SKN4.0 [9] uz popratnu opremu koja uključuje krovne priključke, montažne setove, odzračni pribor, sunčanu regulaciju, sunčanu stanicu, sunčanu ekspanzijsku posudu i sunčanu tekućinu. Također je odabran i spremnik s dizalicom topline, tip Ariston Nuos Plus 250 SYS [10]. Kada je sva oprema usuglašena i potvrđena, krenulo se s projektiranjem i dimenzioniranjem što je podrazumijevalo izradu detaljnoga plana postavljanja kolektora i povezivanja sa spremnikom, te dimenzioniranje sustava na temelju izračuna potrebne količine toplinske energije. Aktivnost je završena izradom plana postavljanja sunčanih kolektora na odabranoj lokaciji, ugradnja spremnika s dizalicom topline u kotlovnici objekta, te povezivanjem svih komponenti sustava na virtualnoj zgradi.

3.1.3 Dimenzioniranje sustava dizalica topline

U sklopu projekta nZEB kampusa na Borongaju potrebno je dimenzionirati te projektirati kompletan sustav grijanja i hlađenja prostora u kojima će boraviti studenti te zaposlenici fakulteta. Na tržištu postoje mnoge tehnologije za kondicioniranje prostora, no u svrhu demonstracije novih tehnologija u energetici odlučili smo se za dizalicu topline. Dizalica topline je uređaj koji koristi zrak, podzemne vode ili tlo kao ogrjevn, odnosno rashladni spremnik. Za rad dizalice topline potrebno je dovođenje električne energije koja bi se u našem slučaju u potpunosti dobivala iz OIE čineći naše dizalice topline CO₂ neutralnima te prihvatljivima za okoliš. Odlučili smo koristiti sustav grijanja i hlađenja s tehnologijom varijabilnoga (promjenjivoga) volumena radne tvari (VRV) od tvrtke Daikin koja je ujedno i začetnik ove tehnologije [11]. Sustav VRV (*engl. Variable Refrigerant Volume*) upravlja promjenjivim (varijabilnim) volumenom radne tvari osiguravajući minimalan protok te omogućava korisnicima mogućnost pojedinačne regulacije različitih klimatizacijskih zona istovremeno. Ovaj sustav sastoji se od vanjske jedinice te više unutarnjih jedinica u obliku kasteta na stropu kako bi se zauzelo minimalno prostora s dobrim uklapanjem sustava klimatizacije u prostor. U svrhu dimenzioniranja sustava potrebno je provesti proračun toplinskoga opterećenja zgrade u periodu grijanja i u periodu hlađenja. Određeni toplinski gubici proračunati su prema normi HRN EN 12831 i toplinski dobici prema VDI 2078 te je sav proračun izveden računalnim programom IntegraCAD.

3.1.4 Dimenzioniranje sustava za proizvodnju i korištenje vodika

Vodikove tehnologije su svojom širokom primjenom postale vrlo zanimljiv predmet izučavanja studenata tehničkih fakulteta. Ova primjena objedinjuje nekoliko tehničkih područja kao što su elektrotehnika, strojarstvo i kemijsko inženjerstvo te omogućava provedbu teorijski stečenih znanja u praksi. Rad s ovim tehnologijama zahtijeva visoku razinu stručnosti i opreza. Godine

2022. vodik je iznosio manje od 2% europske potrošnje energije, te je 96% vodika proizvedeno iz prirodnoga plina, što rezultira ispuštanjem štetnih emisija u okoliš. EU je stavila prioritet za razvoj čistoga vodika, te je postavljen cilj da se do 2030. proizvede 10 milijuna tona, te da uveze 10 milijuna tona vodika [12]. Emisije CO₂ u 2022. godini u Hrvatskoj iz pokretnih i nepokretnih energetske sektora su iznosile 15,6 mil. tona (preliminarni rezultati) od čega je 41,4% emisija vezano uz cestovni promet (6,439 mil. tona CO₂) [13]. Sukladno nedavno donesenoj EU regulativi o povećanju broja punionica vodika diljem Europe do siječnja 2031. godine [14], očekuje se i porast broja osobnih i komercijalnih električnih vozila na vodik u Hrvatskoj. Stoga, kao poticaj za dekarbonizaciju transporta u Hrvatskoj i orijentaciju prema korištenju ekološki prihvatljivih goriva, u ovom dijelu rada su predstavljena rješenja temeljena na vodikovim tehnologijama.

Mjere dekarbonizacije transporta u sklopu zgrade kampusa

Uz automobil na vodik i bicikle, jedno od predloženih rješenja dekarbonizacije transporta je osnivanje zasebne javne autobusne linije kojom bi se u električnom autobusu na pogon vodikom prevozili studenti i ostali građani do zgrade kampusa. Kako bi se osigurala dovoljna količina vodika, potrebno je odrediti kapacitete spremnika vodika u vozilima te izabrati odgovarajuću opremu. Za autobus i osobni automobil bi postojala jedna zasebna punionica, dok bi se za bicikl koristila druga. Potrebna oprema za punionicu uključuje sustav za proizvodnju vodika, kompresor, međuspremnik niskoga tlaka zraka i baterijski spremnik.

Kapaciteti spremnika vodika u vozilima i plan proizvodnje

Kapaciteti dijelova punionice vodika određeni su prema pretpostavci da je dnevno potrebno osigurati dovoljno vodika za punjenje dva autobusa i dva automobila, te do deset bicikala. Za spremnik vodika u autobusu je određeno da sadrži maksimalno 40 kg vodika pri tlaku od 350 bara, pri čemu s punim spremnikom može prijeći udaljenost od 500 km [15]. Spremnik osobnoga automobila pod tlakom od 700 bara sadrži 5 kg vodika s dosegom 500 km [16]. Spremnik vodika u biciklu sadrži 0,2 kg vodika pri tlaku od 300 bara te može prijeći udaljenost od 145 km bez punjenja [17]. Ukupna količina vodika koja se mora proizvesti za dnevno punjenje dobiva se zbrajanjem svih maksimalnih masa vodika u pojedinim spremnicima vozila, te iznosi 92 kg vodika dnevno.

Proizvodnja vodika

Kao element, vodik je najlakši i najzastupljeniji u svemiru, a na Zemlji se može pronaći jedino u spojevima, te ga je potrebno proizvesti. Tehnologije koje se koriste za proizvodnju vodika su elektroliza vode, reformiranje prirodnoga plina, pretvorba mikrobne biomase, itd. Proizvodnja vodika potrebna za punjenje vozila u sklopu zgrade kampusa, provodit će se elektrolizom

vode jer je to jedini proces proizvodnje vodika bez popratnih štetnih emisija. Elektroliza vode je proces proizvodnje vodika i kisika uz dovođenje istosmjernoga napona [18, 19]. Električna energija potrebna za odvijanje procesa elektrolize vode dobivat će se iz OIE priključenih na elektroenergetsku mrežu ili direktno preko sunčane FN elektrane u sklopu zgrade kampusa. Višak električne energije koji se ne bi uspio iskoristiti za proizvodnju vodika može se pohraniti u baterije. Proces elektrolize vode odvija se u elektrokemijskom uređaju koji se naziva elektrolizator [18]. Pri razmatranju odabira elektrolizatora za punionicu vodika, potrebno je odabrati elektrolizator koji može proizvesti minimalno 92 kg vodika dnevno. Nužno je zadovoljiti i uvjet kvalitete proizvedenoga vodika prema normi ISO 14687:2019, te uvjet funkcionalnosti pri rasponu radnih temperatura od -15 do 35 °C.

Kompresor za vodik

Proizvedeni vodik potrebno je komprimirati kako bi se u što većoj količini mogao pohraniti u spremnik pod tlakom. Kompresori su uređaji koji kompresijom plinovima ili parama povisuju energetska razinu [20]. Membranski kompresor se sastoji tri elastične membrane koje svojim oscilacijskim gibanjem omogućavaju kompresiju vodika. Prednost korištenja ovog tipa kompresora leži u činjenici da samo membrana i vrh komore za kompresiju dolaze u kontakt s vodikom te nema opasnosti od zagađenja vodika uljem za podmazivanje kompresora. Ovo je ključno zbog važnosti razine čistoće vodika koji napušta kompresor [21]. Drugi tip kompresora koji je najviše vezan uz komprimiranje vodika je elektrokemijski. Kompresija vodika se odvija unutar protonski propusne membrane (PEM) kompresora, koja je omeđena anodom i katodom. Elektrokemijski kompresor karakteriziraju visoka učinkovitost kompresije te lakše održavanje u usporedbi s ostalim tipovima kompresora zbog odsutnosti pokretnih dijelova i jednostavnije konstrukcije [22,23].

Za potrebe ovoga projekta, kompresor mora zadovoljiti tri nužna uvjeta:

1. kompatibilnost izlaznoga tlaka iz elektrolizatora i ulaznoga tlaka u kompresor, odnosno raspon vrijednosti ulaznoga tlaka vodika u kompresoru mora biti takav da u njega spada i raspon izlaznih tlakova vodika iz elektrolizatora.
2. kompatibilnost izlaznoga tlaka kompresora i nominalnoga tlaka međuspremnik niskoga tlaka zraka, odnosno kompresor mora moći komprimirati vodik na tlak koji će vladati u međuspremniku niskoga tlaka zraka.
3. minimalni dnevni protok vodika kroz kompresor mora biti najmanje 92 kg vodika dnevno.

Međuspremnik niskoga tlaka zraka

Vodik u plinovitom obliku, proizveden u elektrolizatoru, pod određenim tlakom ulazi u kompresor te se u kompresoru komprimira na veći tlak kako bi se u što većoj količini mogao pohraniti u međuspremnik. Vodik se iz ovoga spremnika odvodi u punionicu za autobus i automobil ili punionicu za bicikl. Maksimalni tlak pri kojemu bi vodik bio stlačen u spremniku bio bi 200 bara radi kompatibilnosti s drugim komponentama punionice vodika. Uobičajena izvedba međuspremnik vodika za potrebe punionica je pohrana u više cilindričnih boca, međusobno povezanih unutar istog okvira ili kućišta [24]. Glavni zahtjev na međuspremnik niskoga tlaka vodika odnosi se na potrebnu količina vodika u spremniku od minimalno 92 kg za potrebe dnevnog punjenja vozila.

Punionica za električni bicikl na pogon vodikovim gorivnim člancima

Za potrebe punjenja bicikla na vodik koristit će se model postojeće punionice u sklopu Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Dijelovi punionice za ovaj bicikl uključuju međuspremnik, gas booster uređaj i kompresor zraka. Iz međuspremnik vodika maksimalnoga tlaka 200 bara, vodik se dobavlja u gas booster unutar kojega se povećava izlazni tlak vodika pomoću komprimiranoga zraka. Gas booster je uređaj spojen crijevom na električni bicikl, a mora biti odabran tako da izlazni tlak vodika bude minimalno 300 bara kako bi se mogao puniti bicikl.

Punionica za autobus i osobni automobil na pogon vodikom

Punionica vodika za autobus i automobil se sastoji od komponenti koje uključuju međuspremnik niskoga tlaka, kompresor za vodik i dispencer. Za neke punionice je uobičajena i kontrolna konzola pomoću koje se osigurava sigurno punjenje [25]. Pri početku punjenja, vodik iz međuspremnik niskoga tlaka prvo ulazi u kompresor vodika. S obzirom na to da je već predodređeni maksimalni tlak u međuspremniku 200 bara, potrebno je odabrati kompresor čiji je ulazni tlak vodika u rasponu koji zadovoljava izlazni tlak vodika iz međuspremnik, što znači da izlazni tlak vodika iz kompresora mora biti u rasponu između 350 ili 750 bara.

Baterijski spremnik

Kapacitet baterijskoga spremnika bit će odabran na temelju ideje da punionice vodika za bicikl, autobus i osobni automobil mogu raditi do deset sati opskrbljeni električnom energijom iz baterije. Ovo vrijedi za slučaj da opskrba električnom energijom iz elektroenergetske mreže ili sunčane FN elektrane nije moguća.

3.1.5 Dimenzioniranje punionica za električna vozila na baterije

U sklopu kampusa potrebno je osigurati tehnologije koje omogućavaju i podržavaju korištenje održivijih načina transporta. Uz demonstraciju i korištenje električnih vozila pogonjenih vodikom, a o kojima je bilo riječi u prethodnom poglavlju, na kampusu je predviđena i ugradnja sustava za punjenje električnih vozila na baterije. Kako bi se osigurao dovoljan broj punjača za punjenje, 20% od ukupnoga broja, odnosno 10 parkirališnih mjesta, bit će rezervirano za električne automobile na baterije. Očekuje se da će ovi rezervirani kapaciteti biti dovoljni s obzirom na ukupni postotak zastupljenosti električnih i hibridnih vozila s vanjskim punjenjem od 0,66% u ukupnom broju registriranih automobila u Republici Hrvatskoj [26]. S obzirom na trend porasta broja električnih vozila na baterije, potrebno je uzeti u obzir i mogućnost instalacije dodatnih kapaciteta za punjenje u budućnosti, odnosno osigurati tehničke predispozicije za instalaciju dodatnih kapaciteta. Uz mjesta za električne automobile, mopede i motocikle, na kampusu će biti dostupna i mjesta za punjenje električnih bicikala i romobila. Ova mjesta bit će na pristupačnim lokacijama u blizini ulaza u zgradu. Predviđeno je da će se za potrebe punjenja električnih bicikala i romobila osigurati 4 mjesta. Kako bi se osigurala pouzdana i kvalitetna usluga korisnicima punjača, prilikom razrade projekta pristupilo se istraživanju tržišta punionica za električne automobile. Nakon provedene analize tržišta, ocijenjeno je da su rješenja tvrtke Stekerr d.o.o. optimalna za potrebe kampusa [27].

3.1.6 Dimenzioniranje pametne rasvjete i uređenje okoliša

U sklopu projekta bilo je potrebno dimenzionirati i urediti okoliš tako da i vanjsko uređenje odgovara zacrtanom cilju, a to je demonstracija novih tehnologija u energetici nultih emisija. Uvođenjem novih tehnologija pri vanjskome uređenju utječemo i na ukupni dojam mogućnosti postojanja nZEB kampusa. Jedno od rješenja koje je predloženo za uređenje okoliša je sunčano stablo. Sunčano stablo može imati različite primjene i nudi brojne prednosti u smislu energetske učinkovitosti i održivosti. Sunčano stablo koristi male FN članke koji su smješteni na vrhovima grana, raspoređeni na različitim visinama i pod različitim kutovima tako da imitiraju krošnju. Na taj način su u mogućnosti apsorbirati sunčevu energiju u većem intenzitetu u bilo koje doba dana. FN članci koji imitiraju lišće upijaju sunčevu energiju i pretvaraju je u električnu energiju koja se kroz središnji dio sustava nalik deblu pohranjuje u baterije. U našem okolišu primjena i funkcija stabla bit će prvenstveno za punjenje elektroničkih uređaja. Stablo je opremljeno dekorativnom rasvjetom koja noću ne služi samo za izgled već ima funkciju osvjetljenja prostora [28]. Za uređenju okoliša koristit će se i sunčane klupe, koje za prikupljanje sunčane energije također koriste FN članke koji sunčevu energiju pretvaraju električnu energiju koja se pohranjuje u baterije. Baterija je integrirana u konstrukciju klupe kako bi se pohranjena energija koristila za na primjer punjenje pametnih uređaja. Sunčane klupe su inovativne urbane instalacije koje integriraju sunčevu energiju u

javne prostore, pružajući brojne funkcionalnosti poput punjenja uređaja, besplatnog WiFi-a, i prikupljanja podataka o okolišu. One su sjajan primjer kako tehnologija može poboljšati javne prostore, čineći ih održivijim i funkcionalnijim [29, 30]. Pametne ulične rasvjete koriste sunčevu energiju, što znači da su neovisne o mrežnom napajanju. Pametna rasvjeta je uglavnom opremljena osjetnicima koji mogu detektirati prisutnost ljudi i vozila. Kada nema kretanja, svjetla se mogu automatski prigušiti ili ugasiti, čime se štedi energija. Mi ćemo pametnu rasvjetu koristiti za uređenje i korištenje u prostoru oko kampusa. Pametna sunčana rasvjeta obično koristi LED žarulje koje su energetske učinkovitije u usporedbi s tradicionalnim rasvjetnim tijelima. Iako inicijalni troškovi mogu biti viši, dugoročno dolazi da značajnih ušteda zbog smanjenih troškova električne energije i održavanja. Korištenjem sunčeve energije i smanjenjem energetske potrošnje, pametna rasvjeta doprinosi smanjenju ekološkoga otiska.

3.1.7 Dimenzioniranje pametnih prozora

U sklopu projekta nZEB kampusa potrebno je odabrati pametne prozore, odrediti broj i poziciju prozora na zgradi, te odabrati sjenila kojima će se moći zamračiti prostori kampusa. Pametni prozori izrađeni su od FN stakla, koje integrira FN članke u građevne materijale. FN staklo građeno je od slojeva kristalnoga ili amorfnoga silicija unutar staklenih slojeva [31]. Time pametni prozori dobivaju važnu značajku proizvodnje električne energije korištenjem sunčeve energije, istovremeno zadržavajući njihovu estetsku privlačnost, zbog čega se dobro uklapaju u viziju održivosti kampusa. Prednosti FN stakla u odnosu na obična stakla su povećana energetska učinkovitost zgrade, održivi dizajn, estetski ugodna integracija FN članaka, te povećana vrijednost imovine [32]. Ovdje je važno napomenuti da će sjeverna strana zgrade i dijelovi koji su u sjeni imati normalne prozore zbog slabije izloženosti sunčevom ozračenju. S unutarnje strane prozora postaviti će se pametna sjenila, koja će omogućavati jednostavno zamračenje prostorija.

3.1.8 Dimenzioniranje sustava za prikupljanje i korištenje kišnice

Za pokrivanje potreba za toaletnom vodom u nZEB kampusu na Borongaju, planirali smo koristiti kišnicu prikupljenu s krovnih površina. Ovaj pristup je ekološki prihvatljiv i ekonomski isplativ, te se savršeno uklapa u viziju održivosti kampusa. Na temelju dostupnih podataka o klimatskim uvjetima u Zagrebu, prosječna godišnja količina padalina iznosi oko 1100 mm [33]. Površina krova iz koje bismo sakupljali kišnicu iznosi oko 1740 m². Uz pomoć ovih podataka proveli smo proračune kako bismo utvrdili koliko kišnice možemo prikupiti tijekom godine i koliko bi to zadovoljilo potrebe kampusa. Prema proračunima, prikupljena kišnica mogla bi pokriti potrebe za toaletnom vodom u prosjeku 7-10 dana svakog mjeseca. To znači da bi kampus značajno smanjio potrošnju vode, što je važan korak ka održivosti. Da bi se osigurala

dovoljna količina vode za ovaj period, bilo bi potrebno postaviti četiri spremnika za kišnicu, svaki kapaciteta 50 000 litara. Sustav bi uključivao filtre za pročišćavanje kišnice kako bi se osigurala odgovarajuća kvaliteta vode za korištenje u toaletima. Ovim se rješenjem, osim smanjenju potrošnje vode i smanjenju operativnih troškova, doprinosi i podizanju ekološke svijesti među studentima i zaposlenicima. Primjena ovakvih inovativnih i održivih rješenja ključna je za budućnost niskougličnih zgrada svih kategorija.

4. REZULTATI

4.1 Zgrada kampusa gotovo nulte energije

Sjeverni dio zgrade površine je 870 m². U prizemlju zgrade smještena je studentska menza. Na prvom katu nalaze se dvije manje predavaonice kapaciteta 46 sjedećih mjesta te jedna srednja predavaonica kapaciteta 94 sjedećih mjesta. Na najvišoj etaži smješteno je 17 ureda za osoblje fakulteta te konferencijska dvorana. Na krovu sjevernoga dijela smještena je FN elektrana. Slika 1 prikazuje sjeverni dio zgrade.



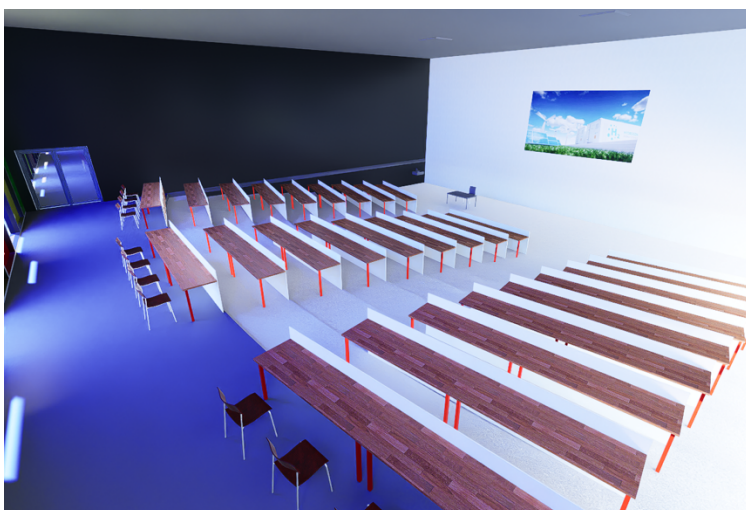
Slika 1 Sjeverni dio zgrade

Središnji dio sadrži portu ustanove. Iz ovoga dijela zgrade moguće je pristupiti sjevernome i južnome dijelu. Ulaz se nalazi s istočne strane. Zbog uvučenoga karaktera izvedbe zgrade u predjelu ispred ulaza nalazi se mjesto za odlaganje bicikala. U prilazu središnjem dijelu zgrade smješteni su pametna rasvjeta i klupe. Južni dio zgrade identične je površine kao i sjeverni u iznosu od 870 m². Analogno sjevernome dijelu, i na južnom krovu smještena je FN elektrana. Slika 2 prikazuje južni dio zgrade.



Slika 2 Južni dio zgrade

U prizemlju južnog dijela zgrade nalazi se studentska knjižnica te velika predavaonica sa 108 mjesta kako je prikazano na slici 3.



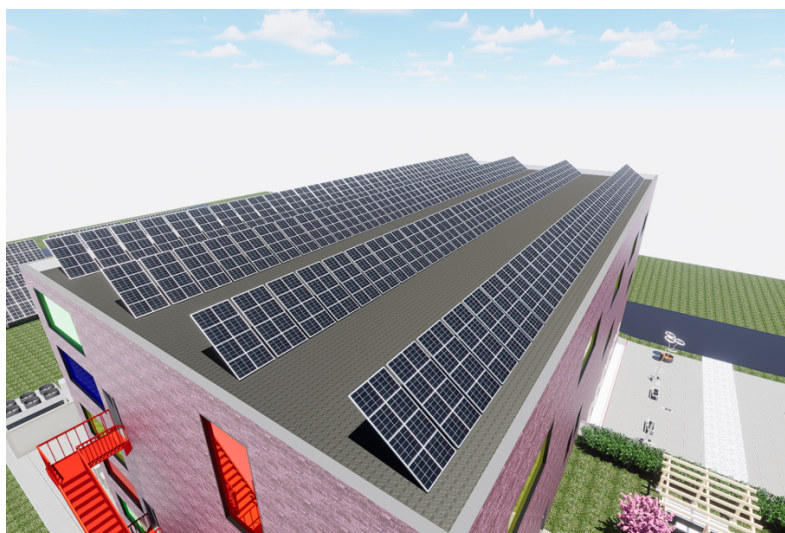
Slika 3. Predavaonica

Na prvom katu smještene su tri predavaonice: dvije manje s kapacitetom od 46 mjesta te jedna srednja sa 70 raspoloživih mjesta.

4.2 Sunčana fotonaponska elektrana

4.2.1 Sunčana fotonaponska elektrana na sjevernom krovu

Na ravnom krovu sjevernoga krila zgrade odlučeno je postaviti portretno orijentirane fiksne module pod optimalnim kutom koji za zagrebačko područje iznosi 36° . Ovako postavljeni moduli imaju maksimalnu učinkovitost pri proizvodnji električne energije (slika 4).



Slika 4 Smještaj sunčane elektrane na krovu sjevernoga dijela zgrade

Proračun koji je detaljno pojašnjen u nastavku korišten je pri određivanju broja FN modula i za ostale površine te tamo nije ponovno prikazivan. Pomoću PV Row Spacing Calculator alata dostupnoga na internetu određen je potrební razmak između redovima modula kako ne bi došlo do međusobnoga zasjenjenja. U spomenuti alat potrebno je unijeti dimenzije odabranoga FN modula, njegovu orijentaciju i kut ugradnje te na temelju pohranjenih formula dobiva se vrijednost koraka reda (*engl. row pitch*). Ta vrijednost predstavlja zbroj duljine projekcije modula ugrađenog pod određenim kutom u odnosu na ravnu podlogu i razmaka između dva reda modula.

Prilikom proračuna u obzir je uzet najnepovoljniji slučaj upada Sunčevih zraka koji se javlja na dan zimskoga solsticija. Kako bi se konačno dobio broj redova modula koje je moguće instalirati, dimenzija dužine krova je podijeljena s vrijednošću koraka reda. Prethodno je od ukupno dostupne dužine krova oduzet jedan i pol metar kako bi se predvidio određeni razmak između samih modula i rubova krova. Razmak je predviđen i na preostalim dvjema rubnim površinama kako bi se osigurala sigurna i pravilna montaža u rubnom području te mogućnost nesmetanoga pristupa u slučaju održavanja ili popravka. Broj stupaca modula ili broj modula koji stane u jedan red dobiven je dijeljenjem dimenzije širine krova s dimenzijom širine modula kojoj je nadodan mali razmak od 0,1 m predviđen za aluminijske kopče kojima su moduli međusobno povezani i pričvršćeni na podkonstrukciju.

$$\text{Broj redova panela} = \frac{\text{dužina krova} - 1,5}{\text{korak reda}} \quad (1)$$

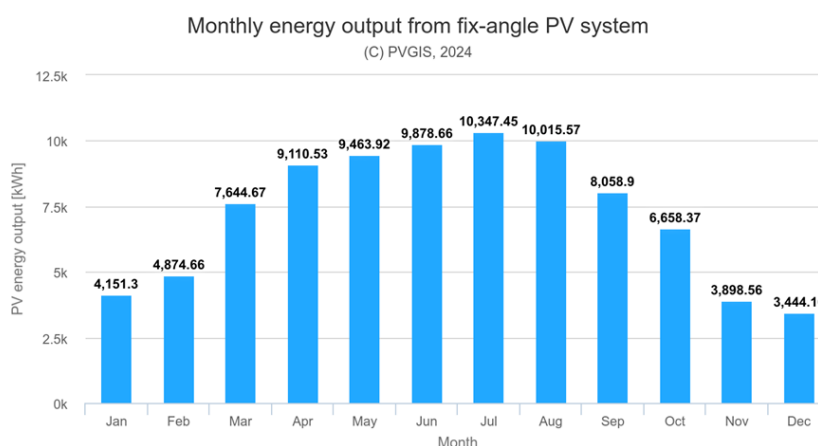
$$\text{Broj redova panela} = \frac{20,5 - 1,5}{5,664} = 3,35 \quad (2)$$

Korekcijom proračuna utvrđena je mogućnost ugradnje ukupno **4 reda** modula budući iza posljednjega reda nije potreban razmak za ugradnju sljedećeg reda.

$$\text{Broj stupaca panela} = \frac{\text{širina krova} - 1,5}{\text{širina panela} + 0,1} \quad (3)$$

$$\text{Broj stupaca panela} = \frac{42,5 - 1,5}{1,134 + 0,1} = 33,23 \quad (4)$$

Na slici 5 prikazana je procijenjena mjesečna proizvodnja električne energije na krovu sjevernoga krila zgrade.

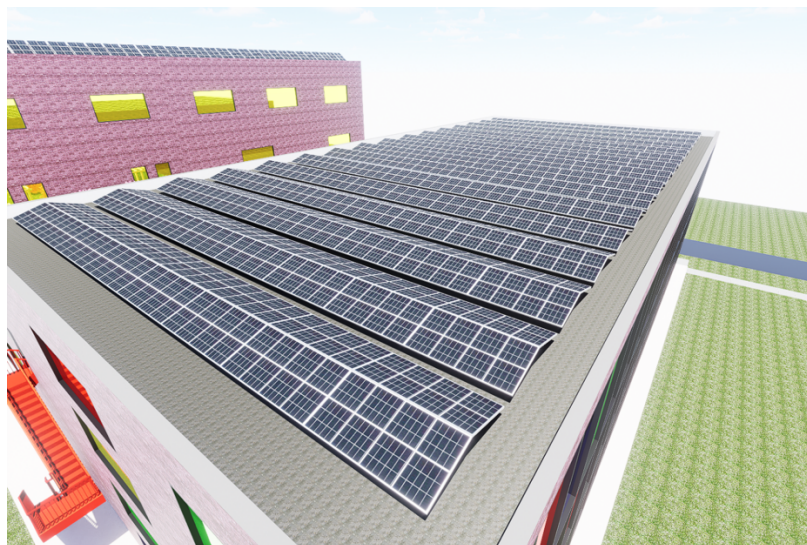


Slika 5 Proizvodnja električne energije po mjesecima na krovu sjevernoga krila zgrade

Proračunom je utvrđena mogućnost postavljanja **33 stupca** modula. Broj modula za postavljanje na ovoj krovnoj površini dobije se množenjem broja redova i stupaca što daje brojku od **132 modula** i ukupnu instaliranu snagu od **72,60 kWp**.

4.2.2 Sunčana fotonaponska elektrana na južnom krovu

Južno krilo zgrade ima jedan kat manje od sjevernoga, no upravo ovakav oblik zgrade omogućava iskorištavanje obiju krovnih površina za postavljanje FN modula. U slučaju da je južno krilo zgrade imalo jedan kat više od sjevernoga, sjeverna krovna površina bi, ovisno o dobu godine, većim dijelom dana bila zasjenjena i time manje pogodna za postavljanje sunčane elektrane. Budući je ova krovna površina u razini s posljednjom etažom sjevernoga krila zgrade, posegnulo se za ponešto diskretnijim postavom FN modula. Moduli su portretno orijentirani i postavljeni u „paru“ pri čemu se jedan panel montira na trokutastu podkonstrukciju pod nagibom od 17° prema istoku, a drugi pod istovjetnim kutom prema zapadu (slika 6).



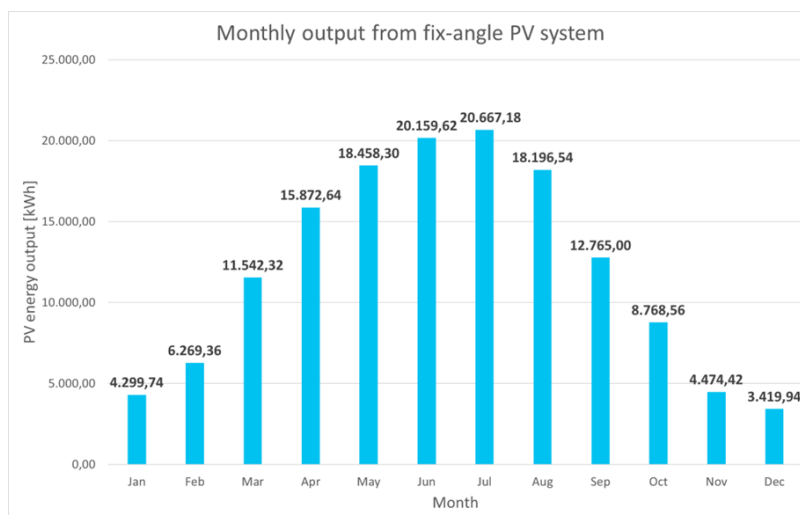
Slika 6 Položaj sunčane elektrane na krovu južne zgrade

Ovakav je način postavljanja FN modula već prisutan na nekim postojećim objektima, a jedan od primjera je i novopostavljena sunčana elektrana na krovu zgrade Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu na slici 7.



Slika 7 Sunčana elektrana na krovu zgrade Fakulteta elektrotehnike i računarstva

Spomenuti „par“ modula na trokutastoj podkonstrukciji činio je osnovu proračuna za naš nZEB kampus kojim se odredio broj modula za postavljanje na ovoj površini. Razmak između susjednih stupaca modula iznosi 0,3 m. Proračunom, koji je identičan onom prikazanom u poglavlju 4.2.1, određena je instalacija **256 modula** na krov južnog krila zgrade. Rezultati dobiveni u PVGIS-u ukazuju na podjednaku očekivanu proizvodnju električne energije FN modula zakrenutih prema istoku i zapadu, a prikazani su na slici 8.

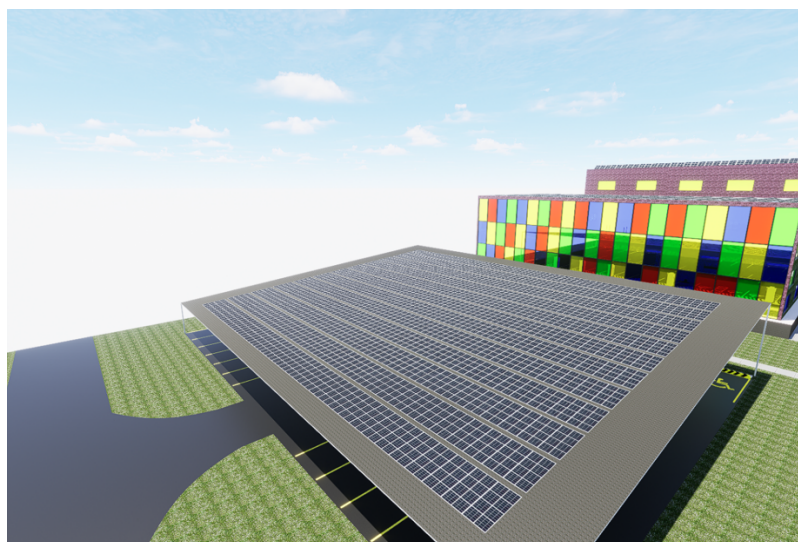


Slika 8 Proizvodnja električne energije po mjesecima na krovu južnoga krila zgrade

Ukupna proizvodnja svih modula dobivena je zbrajanjem podataka za module suprotnih nagiba i prikazana je na slici 9. Kapacitet ovog FN sustava iznosi **140,80 kWp**.

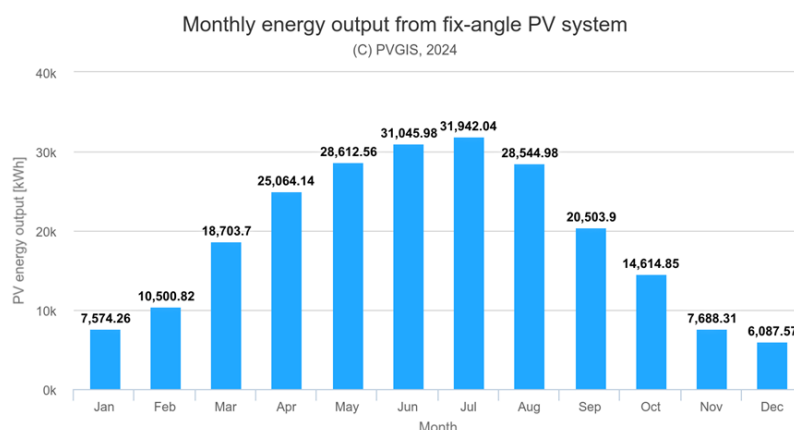
4.2.3 Sunčana fotonaponska elektrana na krovu parkirališta

Postavljanje FN modula iznad parkirališta ima dvostruku namjenu. Uz generiranje električne energije, dodatna je korist zasjenjenje parkirališne površine čime se unutrašnjost parkiranih automobila manje zagrijava. Nadalje, krovna konstrukcija štiti automobile u slučaju vremenskih neprilika poput tuče. Radi bolje estetike prostora i iskorištenja dostupne površine odlučeno je na krov parkinga postaviti pejzažno orijentirane FN module pod nagibom od 5° prema jugu (slika 9).



Slika 9 Položaj sunčane elektrane na krovu parkirališta

Konstrukcije s minimalnim nagibom poput ovoga izuzetno su stabilne i otporne na strujanja vjetra, a još uvijek zadovoljavaju uvjet odvodnje oborinske vode s površine modula čime se osigurava njegova čistoća i visoka učinkovitost. Razmak između pojedinih redova iznosi otprilike 0,3 m što proizlazi iz činjenice da pejzažno orijentirani moduli pod malim nagibom zasjenjuju znatno manju površinu. Na slici 10 prikazana je mjesečna proizvodnja električne energije na krovu parkirališta.

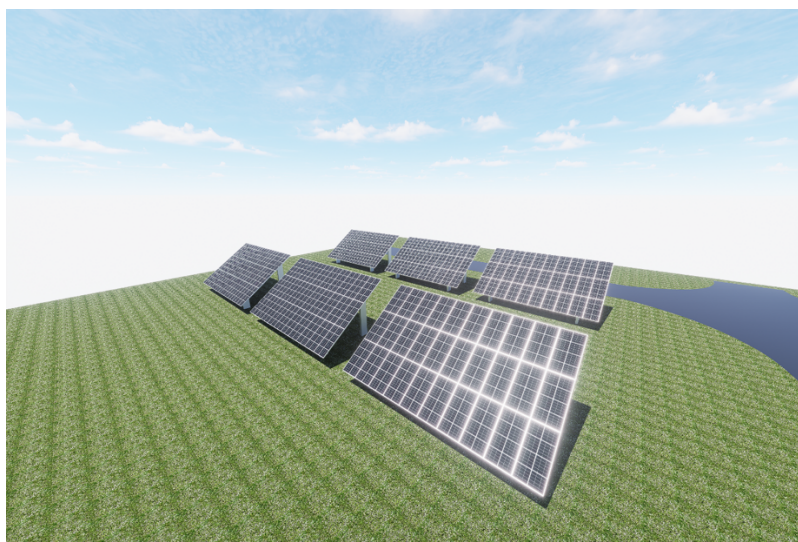


Slika 10 Proizvodnja električne energije po mjesecima na krovu parkirališta

Ovakvim rasporedom moguće je postaviti **391** modul na dostupnu površinu te je njihov ukupni kapacitet **215,05 kWp**.

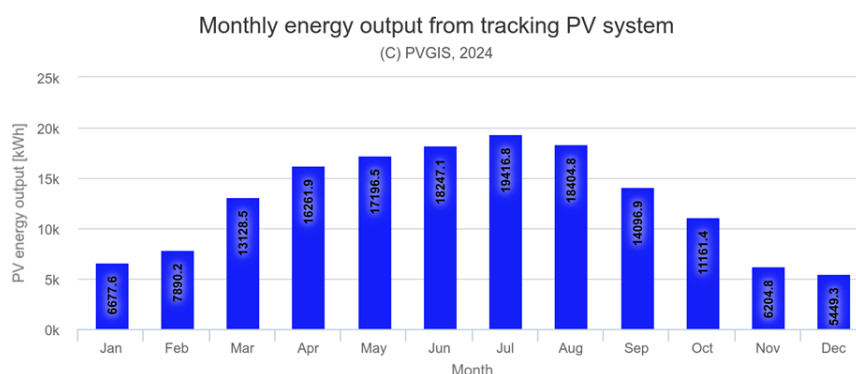
4.2.4 Sunčana fotonaponska elektrana u dvorištu kampusa

Nakon konačnoga pozicioniranja zgrade kampusa na katastarsku česticu, uočena je mogućnost instaliranja još jednoga dijela sunčane elektrane na sjevernome dijelu zemljišta. Ovaj dio elektrane je posebno zanimljiv u kontekstu nZEB kampusa kao obrazovne ustanove koja promovira i demonstrira korištenje OIE. Sunčana elektrana udaljena je od zgrade kampusa preko 30 metara te većim dijelom godine, a naročito za vrijeme najintenzivnijeg Sunčevog ozračenja u ljetnim mjesecima, neće biti negativnoga utjecaja zasjenjenja. Raspored FN modula i položaj sunčane elektrane prikazan je na slici 11.



Slika 11 Izgled sunčane elektrane instalirane u dvorištu nZEB kampusa

Podaci o kutu upada Sunčevih zraka na pojedini dan u godini istraženi su pomoću besplatnoga online alata 3D Sun-Path [34]. Za ovaj FN sustav izabrano je rješenje s velikim jednoosno-okretnim nosačima koji imaju mogućnost zakreta istok – zapad ovisno o položaju Sunca tijekom dana. Svaki nosač na sebi nosi 30 FN modula raspoređenih u 3 reda i 10 stupaca. Razmak između redova iznosi 12 m kako zbog velike visine konstrukcije ne bi došlo do međusobnoga zasjenjenja niti prilikom najnepovoljnijeg kuta upada Sunčevih zraka. Na slici 12 prikazana je mjesečna proizvodnja električne energije sunčane elektrane u dvorištu.



Slika 12 Proizvodnja električne energije po mjesecima dvorišne sunčane elektrane

Elektrana se sastoji od ukupno 6 nosača s ukupno **180 modula** čija je ukupna instalirana snaga **99,00 kWp**.

4.2.5 Pregled rezultata

U ovom je poglavlju dan kratki osvrt na rezultate dobivene u prethodnim poglavljima. Tablica 1 donosi koncept dijelova sunčane elektrane.

Tablica 1 Prikaz svih dijelova sunčane elektrane nZEB kampusa

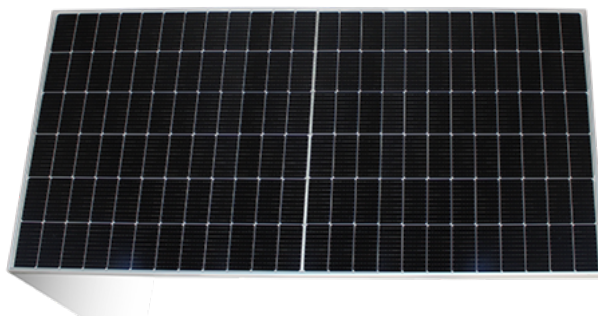
Lokacija FN sustava	Krov sjevernog krila zgrade	Krov južnog krila zgrade	Krov parkirališta	Sjeverno dvorište
Dostupna površina [m ²]	871,25	871,25	1479,00	1800,00
Način montaže modula	fiksni, optimalni kut 36°	fiksni, nagib istok 17° i zapad 17°	fiksni, nagib 5°	jednoosno okretni (istok - zapad) nosači, kut nagiba 38°
Broj FN modula	132	256	391	180
Instalirani kapacitet [kWp]	72,60	140,80	215,05	99,00
Očekivana proizvodnja električne energije [kWh]	87.546,75	144.893,62	230.883,10	154.135,20
Proizvedena električna energija/dostupna površina [kWh/m ²]	100,48	166,31	156,11	85,63
Proizvedena električna energija/modul [kWh/modul]	663,23	565,99	590,49	856,31

Iz tablice 1 vidljivo je kako se najveća proizvodnja električne energije očekuje od sunčane elektrane postavljene na krovu parkirališta zahvaljujući najvećoj dostupnoj površini i gustom postavu FN modula. Prema kriteriju najboljega iskorištenja dostupne površine ipak prednjači postav modula na trokutastu podkonstrukciju kakav je određen za krov južnog krila zgrade. Najviše električne energije po instaliranom modulu trebao bi osigurati dvorišni dio elektrane gdje zahvaljujući jednoosno okretnim nosačima Sunčeve zrake padaju okomitije na FN module što pospješuje njihovu učinkovitost u radu tijekom cijeloga dana. Očekivana godišnja proizvodnja električne energije svih dijelova sunčane FN elektrane s ukupno **959** instaliranih **modula** iznosi **617458,67 kWh**. Potrošnju energije projektirane zgrade kampusa teško je pretpostaviti, no prema dostupnim podacima o potrošnji električne energije postojećih

obrazovnih građevina sigurno je kako bi sunčana elektrana tijekom godine stvarala proizvodne viškove koji bi se slali u mrežu. Time bi se visoka investicijska ulaganja u ovakav sustav, ovisno o načinu i uvjetima financiranja, kroz određeno vremensko razdoblje isplatila.

4.2.6 FN moduli

Osnovu sunčane elektrane čine FN moduli SV144 E HCM10 tvrtke Solvis [35]. Ovi su moduli predstavnici napredne tehnologije, većih su dimenzija (2278 x 1134 x 35 mm) te je njihova izlazna snaga visokih 550 Wp. Otporni su na mehanička opterećenja do 5400 Pa. Radi se o monokristalnim silicijskim modulima koji uz visoku učinkovitost (21,29%) imaju još neke prednosti. Naime, uniformna crna površina daje moderan izgled, a ove module karakterizira i viša učinkovitost u radu u uvjetima slaboga osvjetljenja kakvo se javlja u jutarnjim i večernjim satima ili za vrijeme naoblake. Odabrani FN modul prikazan je na slici 13.



Slika 13 Monokristalni FN modul SV144 E HCM10 [35]

Prema podacima proizvođača nakon 25 godina rada dolazi do pada izlazne snage od 20%.

4.3 Sunčani toplinski kolektori

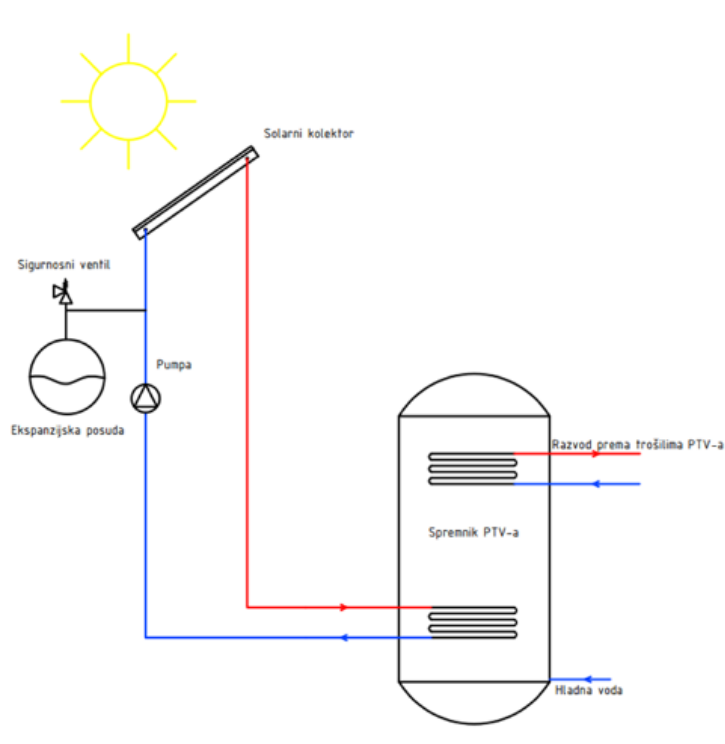
4.3.1 Sustav toplinskih kolektora

Toplinski kolektori pretvaraju energiju sunčevoga ozračenja u toplinsku energiju, zagrijavajući vodu ili neki drugi radni medij, primjerice glikolnu smjesu. Voda grijana ovim sustavom može se koristiti kao potrošna topla voda, za pomoć sustavu grijanja objekata te za zagrijavanje bazenske vode. Razlikujemo dva osnovna tipa sunčanih kolektora: pločaste kolektore i vakumske cijevne kolektore. Za ovaj projekt odlučeno je da će se koristiti sustav pločastih kolektora. Sustavi sunčanih kolektora najisplativiji su za ugradnju u obiteljske kuće, stambene zgrade i studentske domove, zbog velike potrebe za korištenjem potrošne tople vode. Premda na uredskim zgradama te na fakultetima postoji manja potreba za potrošnom toplom vodom, usporedbom sa sličnim projektima, procijenjen je dovoljan volumen spremnika od 250 litara za opskrbu ovoga objekta. Kako bi se ovim projektom prikazale nove tehnologije u području energetike, odlučeno je da će se koristiti spremnik s ugrađenom dizalicom topline za

dogrijavanje u slučaju nedostatka sunčeve energije, što se obično događa u hladnijim mjesecima u godini.

4.3.2 Princip rada

Pločasti kolektori imaju crnu apsorpcijsku površinu koja je okrenuta prema suncu. Ta površina apsorbira sunčevu svjetlost. Ispod apsorpcijske ploče nalazi se tekućina (obično voda ili glikolna smjesa, odnosno antifriz) koja prima toplinu od apsorpcijske ploče. Tekućina se zagrijava te cirkulira kroz sustav. Postoje dva glavna načina cirkulacije tekućine u sustavima sunčanih kolektora: prirodna cirkulacija, gdje se topla tekućina podiže prema gore zbog razlike u temperaturi, dok se hladna tekućina spušta prema dolje, te pumpna cirkulacija, gdje se pumpa koristi za aktivno pokretanje cirkulacije tople radne tvari kroz sustav. Topla tekućina zatim se prenosi u spremnik gdje postoji spiralni izmjenjivač topline kojim se toplina predaje vodi u spremniku. Na drugom izmjenjivaču, vodom iz spremnika zagrijava se voda koja se razvodi po objektu za specifičnu uporabu. Shematski prikaz sustava nalazi se na slici 14.



Slika 14 Shematski prikaz sustava sa sunčanim kolektorima

Moguće je ugraditi i još pokoji izmjenjivač ukoliko postoji potreba za korištenjem tople vode u više sustava, primjerice jedan izmjenjivač za razvod sustava potrošne tople vode i jedan izmjenjivač za pomoć sustavu grijanja objekta.

4.3.3 Sustav odabranih pločastih kolektora

Na temelju postojećih setova opreme, zaključeno je kako su za zagrijavanje odabranoga spremnika dostatna 2 pločasta sunčana kolektora tipa Bosch FKC-2/SKN4.0 (2 kom) s popratnom opremom kako je prikazano na slici 15.



Slika 15 Kompletan sustav sa sunčanim kolektorima

Uključene komponente i dodatna oprema podrazumijevaju FKA3 krovni priključak (2 kom); WMT1 montažni set osnovni; WMT2 montažni set za proširenje; WFS 20, priključni set za montažu na kosi krov; ELT5, odzračni pribor; B sol 100-2, sunčana regulacija za pripremu tople vode; AGS 10-2 sunčana stanica; SAG 18 sunčana ekspanzijska posuda (18 litara); AAS 1 priključni pribor za ekspanzijsku posudu; WTF 20 sunčana tekućina (20 litara).

Spremnik tople vode s dizalicom topline

Za sustav pripreme potrošne tople vode, odnosno dogrijavanja i grijanja tople koristit će se dizalica topline s spremnikom *Ariston Nuos Plus 250 SYS*. Zapremnina spremnika je 250 litara, a COP ove dizalice topline kada je zrak na 7 °C iznosi 3,21. Kondenzator ove dizalice topline je omotan oko spremnika i direktno predaje toplinu vodi koja se nalazi u spremniku. Odabrani sustav dizalice topline prikazan je na slici 16.



Slika 16 Sustav dizalice topline [36]

Čelični spremnik je izvrsno izoliran ovojnicom od titana. Ovaj model spremnika sadrži otvore za umetanje jedne ili dvije spirale za integraciju sunčanih rješenja, bojlera ili biomase, što je idealno za ovaj projekt, gdje se namjerava umetanje spirale sustava toplinskih sunčanih kolektora.

Ugradnja

Odlučeno je da će 2 sunčana kolektora biti postavljena na područje FN elektrane, na sjevernom rubu zemljišta, dok će spremnik s dizalicom topline biti ugrađen u kotlovnicu u dvorištu zgrade zajedno s komponentama sustava grijanja, hlađenja i ventilacije.

Cijena

Cijena sunčanoga paketa Bosch iznosi 2.872,67 € (u ovom konkretnom projektu spremnik sadržan u paketu bio bi zamijenjen sa spremnikom s ugrađenom dizalicom topline) dok cijena dizalice topline sa spremnikom iznosi 2.283,75 € [36].

4.4 Sustav dizalica topline

U sklopu ovoga nZEB projekta, bilo je potrebno dimenzionirati i projektirati sustav grijanja i hlađenja za prostore namijenjene studentima i zaposlenicima fakulteta. Najprije je proveden proračun toplinske i rashladne energije, zatim je odabrana tehnologija kojom će se zgrada grijati i hladiti te je izvršen odabir opreme i izrada troškovnika projekta.

4.4.1 Proračun toplinske i rashladne energije

Provođenje proračuna za rashladnu i toplinsku energiju ključno je za optimizaciju energetske sustava, smanjenje operativnih troškova i povećanje energetske učinkovitosti u zgradama i industrijskim postrojenjima. Proračun toplinske energije napravljen je prema normi HRN EN 12831, te uključuje izračunavanje potrebne količine energije za održavanje željene temperature u prostorijama tijekom hladnih razdoblja. Ovaj proces obuhvaća analizu toplinskih gubitaka kroz zidove, prozore, vrata, krovove i podove, kao i gubitke uslijed ventilacije. S druge strane, proračun rashladne energije napravljen prema normi VDI 2078, odnosi se na određivanje količine energije potrebne za hlađenje prostora tijekom toplih razdoblja. Ovdje se analizirao utjecaj sunčevoga ozračenja, unutarnjih izvora topline, kao i toplinski dobitci zbog vanjskih temperatura. Pravilnim proračunom osigurava se optimalan rad sustava za grijanje i hlađenje, čime se postiže udobnost korisnika i smanjuje potrošnja energije. To uključuje pravilan odabir odgovarajuće opreme, što su u ovom slučaju, VRV sustavi s integriranom dizalicom topline (vanjske i unutarnje jedinice), regulacijski i upravljački instrumenti i cijevni razvod. Pored toga, uzimanje u obzir lokalnih klimatskih uvjeta, značajki objekta i navika korisnika ključno je za postizanje preciznih i učinkovitih rezultata. Prije samoga proračuna

toplinske i rashladne energije bilo je potrebno prikupiti arhitektonske podatke kao što su dimenzije prostora, raspored prostorija, debljina i materijal zidova, krovova, podova, prozora i vrata. Također su se u obzir uzeli klimatski podatci za područje građevine (Zagreb, Grič), poput vanjskih temperatura za različita godišnja doba, brzine vjetra i vlažnosti zraka, kao i podatci o korištenju objekta, uključujući broj korisnika, raspored korištenja prostorija i unutarnje izvore poput rasvjete i uređaja.

4.4.2 Odabrana tehnologija: VRV vanjske jedinice – integrirano rješenje sa dizalicom topline

VRV sustav, također poznat kao VRF (*engl. Variable Refrigerant Flow*), radi na principu promjenjivoga protoka radnoga medija kako bi osigurao grijanje i hlađenje u zgradama. Ključna značajka VRV sustava je mogućnost prilagodbe količine radnoga medija koji cirkulira kroz sustav, ovisno o trenutnim potrebama za grijanje ili hlađenje. Integrirana dizalica topline omogućava sustavu prijenos toplinske energije preuzete iz vanjskoga zraka unutar zgrade ili obrnuto. VRV sustav s integriranom dizalicom topline predstavlja naprednu tehnologiju za grijanje i hlađenje zgrade, kombinirajući učinkovitost VRV s prednostima dizalica topline. Ovi sustavi omogućavaju fleksibilnu, energetski učinkovitu kontrolu unutarnjih uvjeta, što ih čini idealnim za komercijalne, stambene i javne objekte. Vanjska jedinica sadrži kompresor koji komprimira radni medij, povećavajući njegovu temperaturu i tlak (obično se koriste inverterski kompresori koji mogu prilagođavati svoju brzinu rada, što omogućava varijabilnu kontrolu protoka radnoga medija). Radni medij u tekućem stanju putuje kroz razvodne cijevi do unutarnjih jedinica unutar zgrade. Svaka unutarnja jedinica ima ekspanzijski ventil koji smanjuje tlak radnoga medija, uzrokujući njegovo isparavanje i regulirajući protok radnoga medija s preciznom kontrolom temperature. Integrirana dizalica topline može raditi u oba smjera, odnosno apsorbirati toplinu iz vanjskoga zraka i prenijeti je unutar zgrade za grijanje ili apsorbirati toplinu iz unutrašnjosti zgrade i ispuštati je van za hlađenje. Na slici 17 prikazana je odabrana dizalica topline.



Slika 17 VRV IV – HIGH COP – tip RXYQ14U [37]

U ovom slučaju kao vanjska jedinica odabran je proizvod Daikin-a VRV IV – HIGH COP – tip RXYQ14U [37]. Vanjska jedinica izvedena je kao aerotermalna dizalica topline s ugrađenim kompresorima i izmjenjivačem. Vanjska jedinica sadrži određene komponente koje pospješuju rad poput zaslona sa sedam segmenata za brzu i točnu dijagnostiku grešaka, daljinske provjere sadržaja radne tvari, automatskoga punjenje i provjere, VRV konfiguratora koji omogućava kontinuiranu promjenu temperature isparavanja i kondenzacije.

4.4.3 Unutarnje jedinice

Unutarnje jedinice VRV sustava igraju ključnu ulogu u pružanju precizne kontrole temperature i udobnosti unutar zgrade. One su povezane s vanjskim jedinicama pomoću sustava razvodnih cijevi i služe za distribuciju ohlađenoga ili zagrijanoga zraka u prostorije. Ovdje su izabrane su kazetne jedinice (model FXFQ s dekorativnim panelima – slika 18) koje se ugrađuju u spuštene stropove, čineći ih nevidljivima i idealnima za uredske prostore i komercijalne objekte. Odabrani modeli FXFQ i FXZQ su kazetne jedinice koja pruža jedinstven ugođaj s istrujavanjem zraka od 360 stupnjeva. Okrugli dizajn omogućava modernu i elegantnu integraciju u interijer.



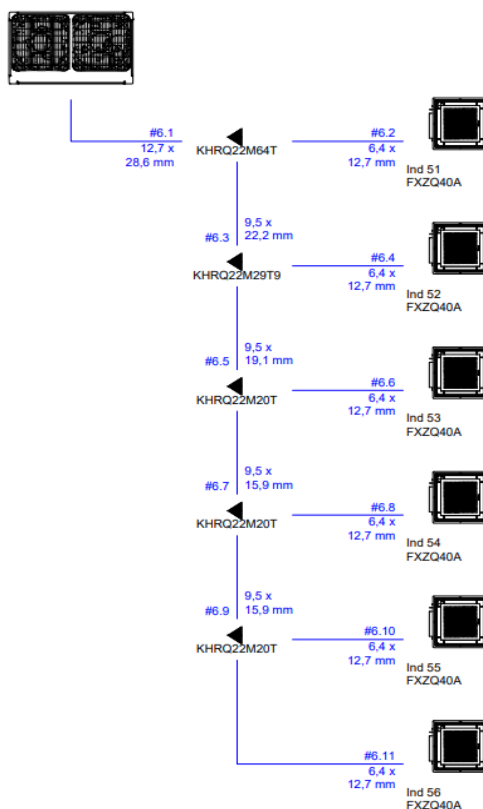
Slika 18 Prikaz odabrane unutarnje jedinice – model FXFQ s dekorativnom rešetkom

Osnovne značajke odabranoga modela su: funkcija automatskoga čišćenja koja osigurava visoku učinkovitost, fleksibilnost prema izgledu specifične prostorije, najniža visina ugradnje na tržištu, te velik izbor dekorativnih panela. Nadalje, klimatizacijski uređaj može biti korišten kao uređaj koji ventilira prostoriju bez grijanja ili hlađenja, a uključuje i sofisticirani osjetnik prisutnosti koji usmjerava zrak dalje od bilo koje osobe detektirane u prostoriji, podni osjetnik koji detektira prosječnu temperaturu poda i osigurava pravilnu distribuciju temperaturu između poda i stropa, te tihi način rada.

4.4.4 Cijevni razvod

Cijevni razvod u VRV sustavima ključan je za učinkovit prijenos radne tvari između vanjske i unutarnjih jedinica. U tu svrhu, bilo je potrebno uzeti u obzir maksimalne dozvoljene duljine cjevovoda i visinske razlike između unutarnjih i vanjskih jedinica. Cjevovodi će se postavljati između vanjske jedinice i unutarnjih jedinica prema unaprijed definiranome planu. Koriste se

bakrene cijevi zbog njihove otpornosti na koroziju i sposobnosti podnošenja visokih tlakova. Svaka unutarnja jedinica spaja se na razdjelne spojeve ili razvodnike pomoću pripadajućih cijevi za radnu tvar. Posebna pažnja posvećuje se pravilnom spajanju kako bi se osigurala nepropusnost i spriječilo curenje radne tvari. Na slici 19 prikazan je primjer spajanja unutarnjih jedinica s vanjskom jedinicom u učionici 4.



Slika 19 Prikaz sheme spajanja unutarnjih jedinica s vanjskom jedinicom učionice 4

Nakon instalacije, cijeli sustav potrebno je provjeriti na nepropusnost na način da se sustav puni radnom tvari i provjerava se rad svih unutarnjih i vanjskih jedinica. Centralizirani razvodnici i razdjelni spojevi omogućavaju jednostavno održavanje i pristup ključnim dijelovima sustava.

4.4.5 Regulacija i upravljanje

Regulacija VRV sustava provodi se preko modela DC S601 C51, ITC i-Touch kontrolera (slika 20). Odabrani sustav je centralni nadzorno upravljački model za regulaciju do 64 grupe unutarnjih jedinica VRV sustava. Montira se na zid i spaja se na vanjske jedinice VRV-a. Pomoću njega je moguće upravljati brzinama ventilatora, pozicijama lamela, grupnim ili individualnim regulacijama temperature i mnogim drugim značajkama.



Slika 20 Upravljački model DC S601 C51

Nakon instalacije, cijeli sustav potrebno je provjeriti na nepropusnost na način da se sustav puni radnom tvari i provjerava se rad svih unutarnjih i vanjskih jedinica. Centralizirani razvodnici i razdjelni spojevi omogućavaju jednostavno održavanje i pristup ključnim dijelovima sustava.

4.4.6 Troškovnik

Trenutne cijene opreme prikazane su u tablici 2.

Tablica 2 Troškovnik opreme prema trenutnom stanju cijena

Vanjske jedinice (model)	Radni medij	Komad	Cijena [€]
VRV IV – tip RXYQ14U	R-410A	3	30.000,00
VRV IV – tip RXYQ20U	R-410-A	1	16.000,00
VRV IV – tip RXYQ12U	R-410-A	4	9.500,00
VRV IV – tip RXYQ10U	R-410-A	4	7.600,00
VRV IV – tip RXYQ16U	R-410-A	3	36.000,00
VRV IV – tip RXYQ18U	R-410-A	2	26.000,00
BHFQ22P1007	-	3	300,00
Unutarnje jedinice (model)	Radni medij	Komad	Cijena [€]
VRV FXFQ40B + BYCQ140E	R-410-A	47	61.000,00
VRV FXFQ50B + BYCQ140E	R-410-A	22	28.600,00
VRV FXZQ40A + BYFQ60C2W1W	R-410-A	27	34.560,00
Regulacija i upravljanje (model)	-	Komad	Cijena [€]
BRC1H52W	-	96	16.320,00
DC S601C51	-	2	3.200,00
Cijevni razvod i puštanje u pogon	-	Komad	Cijena [€]
KHRQ22M20T	-	28	2.250,00
KHRQ22M29T9	-	19	2.280,00
KHRQ22M64T	-	31	4.495,00
KHRQ22M75T	-	8	1.360,00
BHFQ22P1517	-	2	3.000,00

Ukupna cijena projekta ugradnje opisanoga sustava dizalica topline iznosi 334.135,00 €

4.5 Sustav za proizvodnju i korištenje vodika

Elektrolizator

Odabran je PEME elektrolizator ME450 proizvođača H-TEC Systems [38]. Ovaj elektrolizator zadovoljava sve postavljene uvjete te je idealan za proizvodnju vodika za punionice. Njegov izgled prikazan je na slici 21.



Slika 21 Elektrolizator H-TEC Systems ME450 [38]

Nazivna snaga ovog elektrolizatora iznosi 1 MW te je maksimalna dnevna proizvodnja vodika 450 kg/dan. Iako ova snaga nadmašuje kapacitete potrebne za proizvodnju vodika za dnevna punjenja dva automobila, dva autobusa i deset bicikala, elektrolizator može raditi i u djelomičnom opterećenju (pri manjoj snazi od nazivne) što dodatno povećava učinkovitost proizvodnje. Kvaliteta vodika proizvedenoga ovim elektrolizatorom zadovoljena je normom ISO 14687:2019 te je radna temperatura elektrolizatora u rasponu od -20 °C do +40 °C [38]. Ukupne značajke odabranoga elektrolizatora prikazane su u tablici 3.

Tablica 3 Značajke elektrolizatora H-TEC Systems ME450 (pri nazivnoj snazi) [38]

H-TEC Systems PEME elektrolizator ME450	
Nazivna snaga	1 MW
Nazivna proizvodnja vodika	450 kg/dan 210 Nm ³ /h
Potrošnja električne energije	53 kWh/kg 4,7 kWh/Nm ³
Učinkovitost proizvodnje	75%
Kvaliteta proizvedenoga vodika	Zadovoljava normu ISO 14687:2019
Izlazni tlak vodika	20-30 bar
Dimenzije (D x Š x V)	≈13,2 x 4,0 x 5,7 m
Masa	≈36 t
Radna temperatura	-20 °C do +40 °C

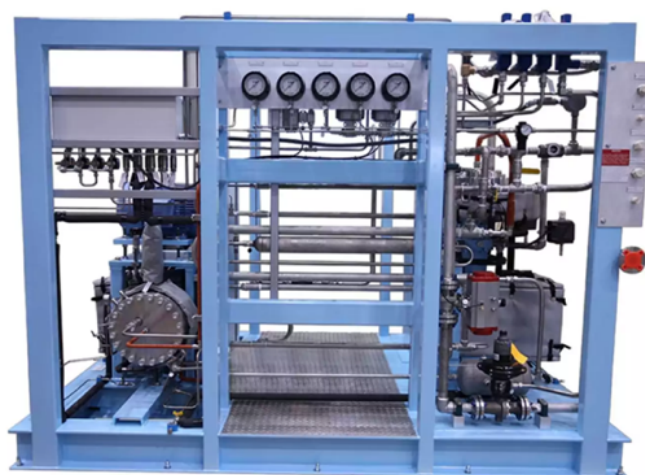
Punionica vodika za bicikl na pogon vodikom

Kompresor vodika

Za komprimiranje vodika, odabran je membranski kompresor PDC-4 (150) proizvođača PDC Machines. Ovim kompresorom moguće je komprimirati vodik u rasponu vrijednosti ulaznih tlakova od atmosferskog (1,01 bar) do 1000 bara na izlazni tlak od maksimalno 1000 bara [39]. Raspon vrijednosti izlaznog tlaka vodika iz elektrolizatora je od 20 do 30 bara, što upada u raspon vrijednosti ulaznih tlakova kompresora, čime je zadovoljen prvi nužan uvjet pri odabiru kompresora. Predodređeni tlak u međuspremniku od 200 bara također upada u raspon izlaznih tlakova kompresora te je i drugi nužni uvjet odabira kompresora zadovoljen. Maksimalni dnevni protok vodika kroz ovaj kompresor iznosi 115 kg/dan, što zadovoljava treći nužan uvjet za odabir zadovoljavajućeg kompresora [39]. Osnovne značajke odabranoga kompresora prikazane su u tablici 4, a njegov izgled na slici 22.

Tablica 4 Značajke kompresora vodika PDC Machines PDC-4 (150) [39]

PDC Machines PDC-4 (150)	
Duljina jednog takta kompresora	10,16 cm
Ulazni tlak	1,01-1000 bar
Izlazni tlak	do 1000 bar
Dnevni protok vodika	115 kg/dan
Snaga kompresora	30 kW
Kvaliteta kompresora	Zadovoljava normu ISO 9001:2015
Dimenzije (D x Š)	1,9 x 1,9 m



Slika 22 Kompresor vodika PDC Machines PDC-4 (150) [39]

Međuspremnik niskoga tlaka vodika

Za međuspremnik niskoga tlaka vodika odabran je Hy-Tank 50lt proizvođača H2 Planet (slika 23). Vodik se unutar međuspremnika nalazi pod nazivnim tlakom od 200 bara [40].



Slika 23 Međuspremnik niskoga tlaka vodika H2 Planet Hy-Tank 50lt [24]

Međuspremnik je izgrađen od materijala 34CrMo4, niskolegiranog čelika visoke čvrstoće koji je karakterističan za izradu spremnika pod tlakom [41]. Međuspremnik je bio podvrgnut i ispitnom tlaku od 300 bara (150% nazivnog tlaka) u našem laboratoriju te je zadovoljio ispitivanje. Količina vodika u jednom spremniku iznosi 0,8 kg. Kako bi se zadovoljila potreba dnevne pohrane od minimalno 92 kg vodika, potrebno je minimalno 115 spremnika [40]. U tablici 5 prikazane su značajke odabranoga međuspremnika.

Tablica 5 Značajke međuspremnika niskoga tlaka H2 Planet Hy-Tank 50lt [40]

H2 Planet Hy-Tank 50lt	
Nazivni tlak	200 bar
Količina vodika u međuspremniku	0,8 kg
Potreban broj međuspremnika za punionicu vodika	115
Materijal međuspremnika	34CrMo4
Površina jednog međuspremnika	$\approx 0,041 \text{ m}^2$
Ukupna površina potrebnih 115 međuspremnika	$\approx 5 \text{ m}^2$
Masa jednog međuspremnika	$\approx 60 \text{ kg}$

Kompresor za zrak

Odabrani kompresor za zrak je klipni kompresor proizvođača ABAC, model A29 100 CM2 (slika 24).



Slika 24 Kompresor za zrak ABAC A29 100 CM2 [42]

Ovaj kompresor može komprimirati zrak pri atmosferskom tlaku na izlazni tlak od maksimalnih 10 bara. Kapacitet spremnika komprimiranoga zraka u kompresoru iznosi 100 litara [42, 43]. U tablici 6 prikazane su osnovne značajke odabranoga kompresora za zrak.

Tablica 6 Značajke kompresora za zrak ABAC A29 100 CM2 [42]

ABAC A29 100 CM2	
Ulazni tlak	Atmosferski tlak (1,01 bar)
Izlazni tlak	Maksimalno 10 bar
Količina zraka pri usisu	255 L/min
Snaga kompresora	1,5 kW
Napon	230 V
Dimenzije (D x Š x V)	1,01 x 0,42 x 0,9 m
Masa	56 kg

Gas booster uređaj

Kao najbolji izbor za gas booster uređaj, izabran je model GU-GTC-40 tvrtke Terek (slika 25).



Slika 25 Terek GU-GTC-40 gas booster uređaj [43]

Raspon ulaznoga tlaka zraka s kojim radi odabrani kompresor je između 3 i 8 bara, dok je raspon ulaznoga tlaka vodika između 15 i 320 bara. Odabrani gas booster uređaj je kompatibilan s odabranim kompresorom zraka i međuspremnikom niskoga tlaka zraka [43]. U tablici 6 prikazane su značajke gas booster uređaja.

Tablica 6 Značajke Terek GU-GTC-40 gas booster uređaja [43]

Terek GU-GTC-40	
Ulazni tlak zraka	3-8 bar
Ulazni tlak vodika	15-320 bar
Izlazni tlak vodika	Maksimalno 320 bar
Masa	43,5 kg
Dimenzije (D x Š x V)	0,6 x 0,5 x 0,6 m

Punionica vodika za autobus i osobni automobil na pogon vodikom

Odabrana punionica vodika za autobus i osobni automobil je H2 Refuel Fleet Owner Station proizvođača Resato (slika 26).



Slika 26 Izvedba punionice Resato H2 Refuel Fleet Owner Station [44]

Punionica je izvedena tako da se sastoji od kompresijskoga modula, kontrolne konzole i dispenzera. Raspon ulaznoga tlaka vodika u kompresijski modul iznosi 30 do 300 bara, dok je izlazni tlak vodika 350 ili 700 bara [44]. Značajke punionice prikazane su u tablici 7.

Tablica 7 Značajke punionice vodika Resato H2 Refuel Fleet Owner Station [44]

Resato H2 Refuel Fleet Owner Station	
Ulazni tlak vodika	30-300 bar
Izlazni tlak vodika	350 ili 700 bar
Radna temperatura	-20 °C do +35 °C
Napon	400 V
Ukupna snaga	22 kW
Masa kompresijskoga modula	1950 kg
Masa kontrolne konzole	140 kg
Masa dispenzora	75 kg
Dimenzije kompresijskoga modula (D x Š x V)	1,545 x 1,810 x 2,500 m
Dimenzije kontrolne konzole (D x Š x V)	0,456 x 1,606 x 0,356 m
Dimenzije dispenzora (D x Š x V)	0,456 x 2,001 x 0,376 m
Certifikati	CE oznaka, ATEX certifikat

Baterijski spremnik

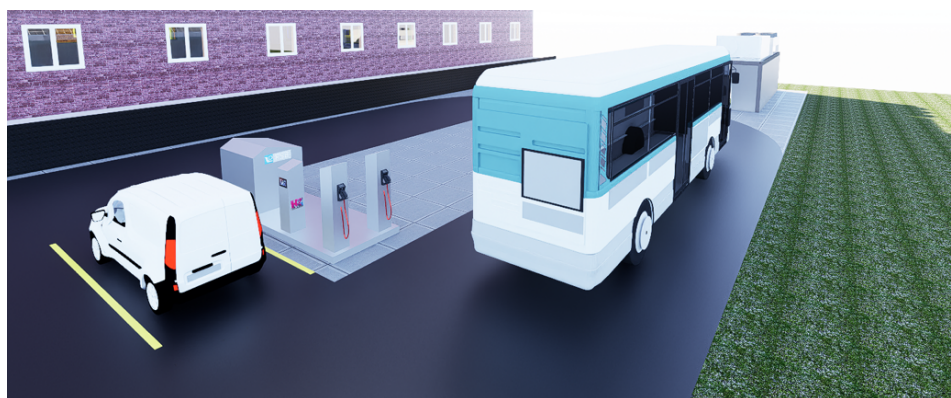
Na temelju odabrane snage kompresora zraka punionice bicikla i ukupne snage kompresijskoga modula, kontrolne konzole i dispenzera punionice za autobus i osobni automobil, pri radu trajanja deset sati, određen je kapacitet baterijskoga spremnika kapaciteta 235 kWh. Odabran je model baterijskog spremnika NEO Aio 100 kW/250 kWh proizvođača

Evo Power Pty Ltd. Kapacitet ovog baterijskog spremnika iznosi 250 kWh [45, 46]. Njegove značajke prikazane su u tablici 8.

Tablica 8 Značajke baterijskoga spremnika Evo Power Pty Ltd NEO Aio 100 kW/250 kWh [46]

Evo Power Pty Ltd NEO Aio 100 kW/250 kWh	
Kapacitet pohrane baterijskoga spremnika	250 kWh
Nazivna snaga	100 kVA/kW
Nazivni napon mreže (izmjenične struje)	400 V
Dimenzije (D x Š x V)	2,039 x 1,310 x 2,280 m
Masa	3520 kg

Nakon odabira potrebne opreme vizual na lokaciji nZEB kampusa prikazan je na slici 27.



Slika 27 Prikaz punionice vodika i vozila unutar nZEB kampusa

Osim za prijevoz studenata i profesora, ovaj sustav koristit će se i kao platforma za edukaciju gdje će se na licu mjesta demonstrirati rad pojedinih komponenti.

4.6 Punjači za električna vozila na baterije

Vlasnici električnih vozila kojima će dolaziti na kampus imat će mogućnost punjenja svojih vozila tijekom boravka na kampusu na punjačima F Serije Hrvatske tvrtke Stekerr. Ov punjači su modularni što omogućava jednostavno i brzo mijenjanje snage punjenja i u slučaju potrebe, servisiranje na lokaciji. Još jedna značajka punjača F serije je mogućnost upravljanja njihovim opterećenjem i to na dva načina, putem ugrađenoga statičkoga sustava upravljanja ili ugradnjom dodatnoga mjernoga uređaja koji omogućava dinamičko upravljanje snagom u lancu potrošača. Dinamičko upravljanje omogućava usklađivanje snage punjača ovisno o potrošnji. Na punjaču je moguće istovremeno puniti dva automobila, a tri različita tipa priključka: Tip 2, CHAdeMO i CCS 2 omogućavaju punjenje velikom broju modela električnih

automobila. Punjači su također opremljeni i sustavom za nadzor i upravljanje koji omogućava podešavanje parametara punjenja te upravljanje autorizacijskim postavkama i naplatom punjenja, uz nadgledanje u stvarnom vremenu. Iako trenutno nije predviđena naplata punjenja, vrlo je korisno imati otvorenu tu mogućnost ukoliko se pokaže potreba. Isto tako, punjači dolaze s 12-inčnim zaslonom osjetljivim na dodir koji uz prikaz informacija o radu punjača i statusu punjenja omogućava i monetizaciju oglasnoga prostora. Na slici 28 prikazan je odabrani punjač.



Slika 28 STEKERR punionica F serije

Za potrebe kampusa odabran je punjač F90 koji se u slučaju potrebe u budućnosti može nadograditi ugradnjom dodatnih ispravljačkih modula, čime bi se snaga povećala te bi punjač odgovarao specifikacijama modela F120.

Osim punjača za električne automobile, na kampusu će biti instalirana i dva punjača P serije istoga proizvođača za punjenje električnih romobila i bicikala (slika 29).



Slika 29 Stekerr P2 – rasvjetni stup i punjač za električne romobile i bicikle

Ovi punjači su samostojeći s dva priključka, a dodatna prednost je njihov dizajn koji objedinjuje uloge punjača i rasvjetnoga stupa u jedan uređaj. Punjač je izrađen od nehrđajućeg čelika i

aluminija bez plastike i boja, što minimizira potrebu za održavanjem i osigurava dugovječnost punjača. Isto kao i kod punjača F serije, ovi punjači imaju mogućnost statičkoga i dinamičkoga upravljanja snagom punjenja i to u rasponu od 1,4 do 22 kW, kompatibilne su sa svim vozilima s Tip 2 utičnicom, te omogućavaju i do deset puta brže punjenje u odnosu na kućne utičnice. Na kampusu će biti instalirana dva ovakva punjača koji će prvenstveno biti namijenjeni punjenju električnih romobila i bicikala, a putem ugrađenoga autorizacijskog RFID čitača moguće je ograničiti korištenje uređaja i punjenje samo na korisnike kampusu. Sve informacije o radu punjača prikazuju su na 4-inčnom OLED zaslonu i integriranom LED indikatoru punjenja, a moguće je uparivanje i do 50 ovakvih punjača.

Vizual punjača prikazan je slici 30.



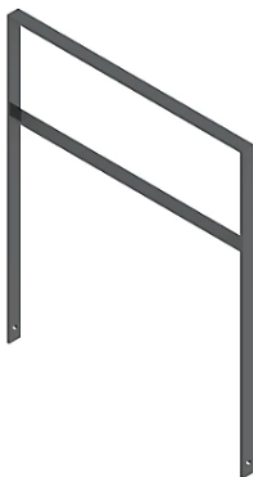
Slika 30 Raspored punjača na lokaciji nZEB kampus

Od proizvođača je zatražena ponuda za odabrane punjače. Punjači STEKERR F90 se prodaju po cijeni od 28.173,00 € (plus PDV) po punjaču plus 1.200,00 € (plus PDV) po punjaču za konfiguraciju, ugradnju i puštanje u rad, dok se punjači STEKERR P2 prodaju po cijeni od 4.187,00 € (plus PDV) po punjaču, plus 250,00 € (plus PDV) po punjaču za ugradnju i puštanje u rad. Sveukupna sredstva potrebna za nabavku i instalaciju predviđenih 5 punjača i dva rasvjetna stupa–punjače iznose 194.673,75 €, a detaljan izračun prikazan je u tablici 9.

Tablica 9 Financijska analiza odabranih punjača

Naziv	kol.	jmj	Cijena	Iznos	PDV
STEKERR F90 -CCS2, Type2	5	Kom	28.173,00	140.865,00	176.081,25
EVSE – STEKERR AC stupni P2 - 10	2	kom	4.187,00	8.374,00	10.467,50
DC usluga – konfiguracija, ugradnja i puštanje u rad	5	kom	1.200,00	6.000,00	7.500,00
AC usluga stupni – konfiguracija, ugradnja i puštanje u rad	2	kom	250,00	500,00	625,00
Ukupno s PDV–om			EUR		194.673,75

Na kampusu su predviđena i parkirališna mjesta za bicikle i električne romobile te su za tu svrhu odabrani okviri za naslanjanje bicikala Schake proizvođača Kaiserkraft (slika 31), te stalak za naslanjanje romobila tvrtke Pittman koji sadrži 9 mjesta za zaključavanje romobila (slika 32).

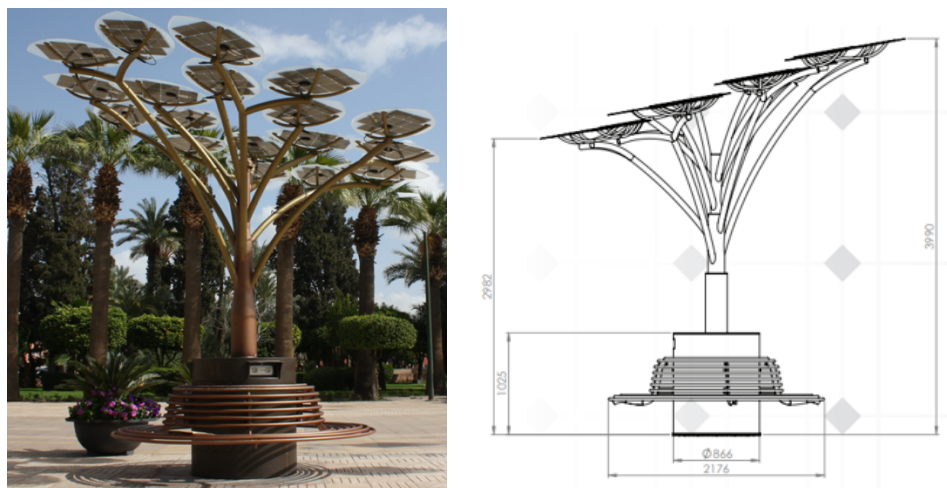
**Slika 31** Okvir za naslanjanje bicikla**Slika 32** Stalak za vezanje romobila

Cijene stalaka za parkiranje te njihove tehničke specifikacije preuzete su iz internetskih trgovina proizvođača [47, 48] Jedinična cijena okvira za parkiranje bicikala dimenzija Š x D 1000 x 50 mm iznosi 229,00 € s PDV -om, a ukupna sredstva potrebna za kupnju 20 okvira iznose 4.580,00 €. Cijena jednoga stalka za vezanje romobila iznosi 247,23 € s PDV–om, a ukupna sredstva za ove stalke iznose 494,46 €.

4.7 Pametna rasvjeta i uređenje okoliša

Solvis je hrvatski proizvođač FN modula na području Varaždina koji u svojoj ponudi ima i sunčano stablo i sunčanu klupu koja nam je potrebna za uređenje okoliša. Solvisovo sunčano stablo ima čeličnu konstrukciju s razgranatom “krošnjom” s 18 FN modula nazivne snage 810

W i dekorativnim osvjetljenjem noću. Oko stabla se nalazi pripadajuća klupa za 12 osoba s priključcima za punjenje mobitela, laptopa i električnih bicikala. Na slici 33 prikazan je izgled sunčano stabla.



Slika 33 Odabrano sunčano stablo

U tablici 10 prikazane su tehničke specifikacije, proizvodnja energije i utjecaj na okoliš Solvisovog sunčanoga stabla. Ukupna Cijena za Solvisovo sunčano stablo iznosi 20.000,00 € plus PDV.

Tablica 10 Usporedba iznajmljivačke sunčanoga stabla izvan mreže i na mreži

MODEL	Sunčano stablo izvan mreže	Sunčano stablo na mreži
FN moduli	18 x SV10-45 E List	
Instalirana FN snaga	810 Wp	
Inverter	1 x Hibridni inverter 1,3kW	3 x Mrežna invertera 260 W
Garancija invertera	2 godine	25 godina
Veza	Internet	Internet/Wi-fi
Baterije	2 x AGM, 12V, 145Ah(C20)	-
Garancija na baterije	2 godine	-
Punjenje mobilnih uređaja	6 x USB ulaza	
Punjenje laptopa ili bicikla	6 x Schuko utičnica	
Wi-fi router	Opcionalno	
LED osvjetljenje	18 LED svjetala, 1 W svako, pokrenut luksomatom	

Solvis u svojoj ponudi ima i sunčanu klupu kao zasebni sustav s dva FN modula (slika 34).



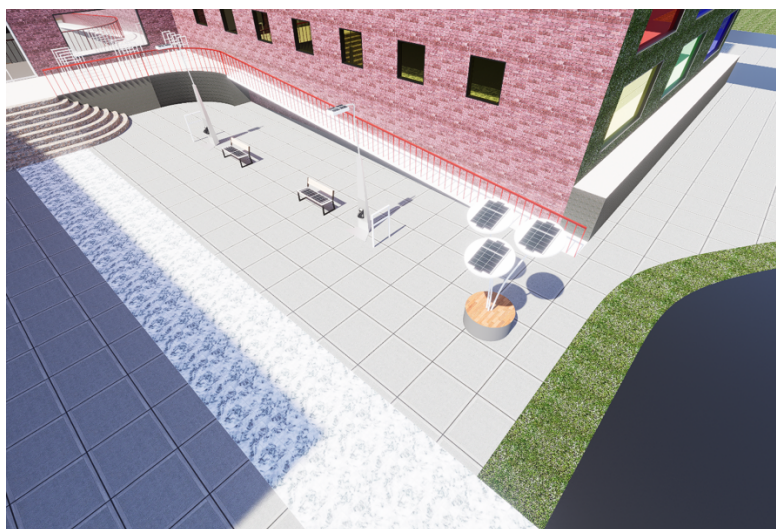
Slika 34 Odabrana sunčana klupa

Standardna oprema su USB punjači, Wireless punjač i LED svjetla. Od dodatnih opcija moguće je instalirati mobilni Wi-fi spot, osjetnike i tablet za prikaz informacija podataka. Osnovne značajke sunčane klupe prikazane su u tablici 11.

Tablica 11 Osnovne značajke sunčane klupe

Tehničke specifikacije	
FN moduli	2 x SV18(5)-50 E
Nazivna snaga	110 W
Baterije	AGM 12V, 72Ah

Vizual smještaja sunčanoga stabla i sunčanih klupa na lokaciji nZEB kampusa prikazan je na slici 35.



Slika 35 Položaj sunčanoga stabla i sunčanih klupa unutar vanjskoga dijela nZEB kampusa

Osim funkcionalnosti za rasvjetom i ospkrbom električnom energijom, ovaj sustav koristit će se i kao demonstracijski poligon inovativnih rješenja.

4.8 Pametni prozori

U sklopu nZEB projekta na Borongaju, bilo je potrebno odbrati pametne prozore i odrediti broj i poziciju prozora na zgradi. Odabrani proizvođač pametnih prozora je tvrtka Onyx Solar koja je vodeći svjetski proizvođač transparentnoga FN stakla. Pri odabiru vrste FN stakla, uzimale su se u obzir značajke stakla poput koeficijenta prolaza topline, veličine prozora i maksimalne snage. Na slici 36 prikazan je pogled na zgradu s ugrađenim FN staklom od amorfne silicija.



Slika 36 Zgrada sa ugrađenim FN staklom amorfne strukture

Postoje dvije vrste FN stakla, staklo s člancima od amorfne silicija i staklo s člancima od kristalnoga silicija. Iako staklo s člancima od kristalnoga silicija proizvodi više električne energije, odabrano je staklo s člancima od amorfne silicija zbog veće snage pri većim temperaturama i oblačnome vremenu. Također se i lakše prilagođava dizajnu zgrade.

Tehničke specifikacije

Odabrane su dvije veličine prozora, jedna je 4000x2000 mm, a druga 1849x1245 mm. Potreban broj većih prozora je 28 komada, a manjih 4 komada. Godišnja maksimalna proizvodnja prozorske sunčane elektrane je 7588.8 kWh, s dnevnom maksimalnom proizvodnjom od 20.79 kWh, što ako se pomnoži s faktorom opterećenja od 0,5 (jer sunce ne sija idealno u prozore kroz cijeli dan) dobije se da je dnevna proizvodnja električne energije oko 10.39 kWh. Potrebni kapacitet baterije je oko 30 kWh. Na tržištu postoje hibridni sustavi za pohranu energije koji se sastoje od baterija, invertera i rezervnoga strujnoga adaptera, u kojima se nalaze svi potrebni elementi za ove sustave.

Obični prozori

S obzirom da nema previše smisla stavljati prozore s FN staklom na strane zgrade koje neće biti izložene značajnom sunčevom ozračenju, na sjeverne i unutarnje strane zgrade bit će

postavljeni obični prozori s dvoslojnim staklom i ispunom od argona, standardnih dimenzija 140x140 mm. Debljina stjenke prozora $s=24$ mm, koeficijent prolaza topline $U=0.73$ W/m²K. Proračunati broj prozora je 26 komada.

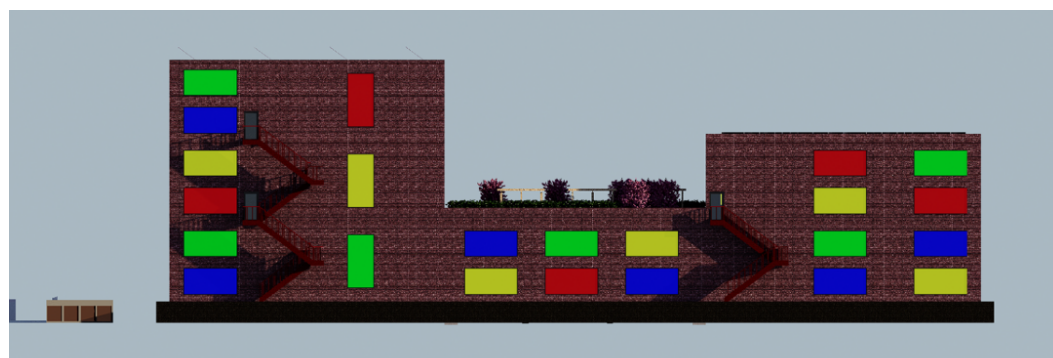
Pozicioniranje prozora

Pri pozicioniranju prozora, pazilo se na to da svaka prostorija ima barem jedan prozor, a dimenzije prozora su se odredile ovisno o veličini prostorije. U narednim slikama moći će se vidjeti pozicioniranje prozora na svakoj strani zgrade pa se tako na slici 37 može vidjeti položaj prozora na istočnoj strani zgrade.



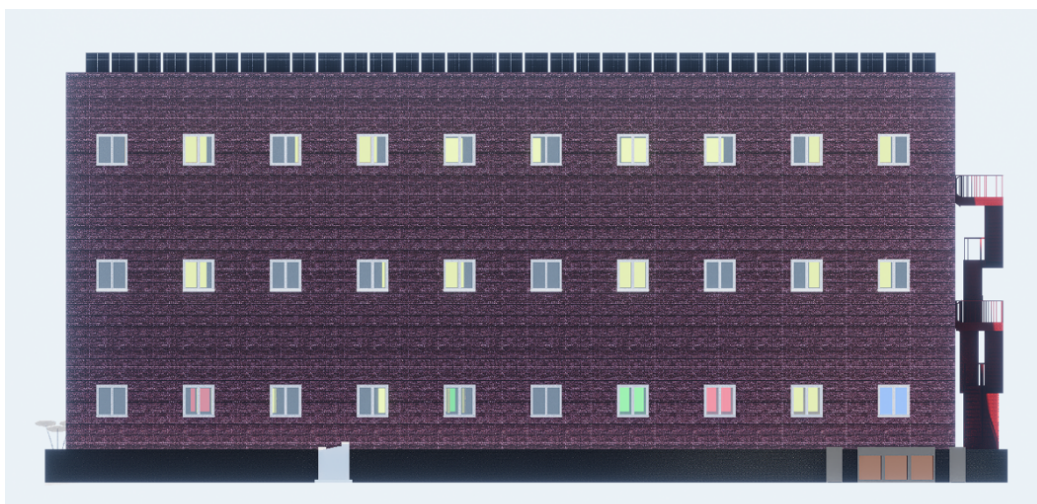
Slika 37 Istočna strana zgrade

Na istočnoj strani zgrade nalaze se prozori s FN staklom, samo će dio kod ulaza imati staklenu gredu od običnoga stakla jer će ulaz u zgradu biti u sjeni. Na slici 38 prikazan je položaj prozora na zapadnoj strani zgrade.



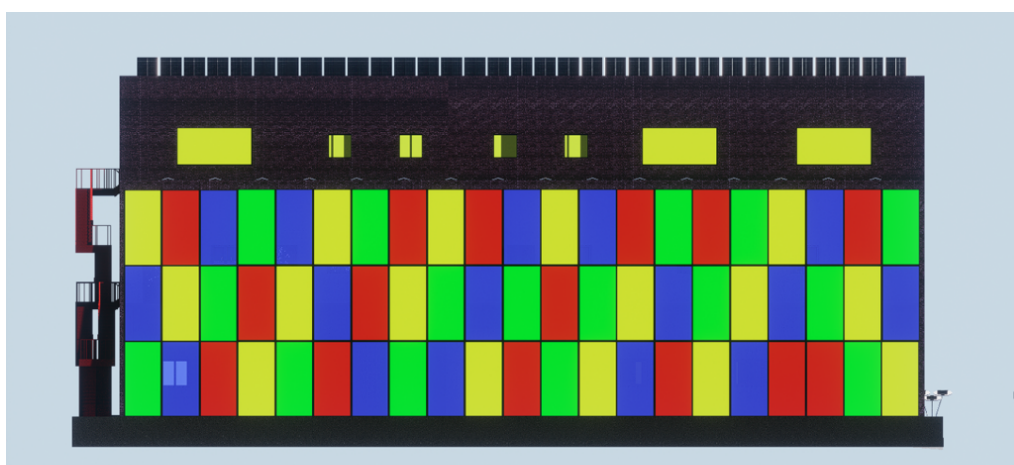
Slika 38 Zapadna strana zgrade

Na slici 39 prikazan je raspored prozora na sjevernoj strani zgrade.



Slika 39 Sjeverna strana zgrade

Na slici 40 prikazan je položaj prozora na južnoj strani zgrade.

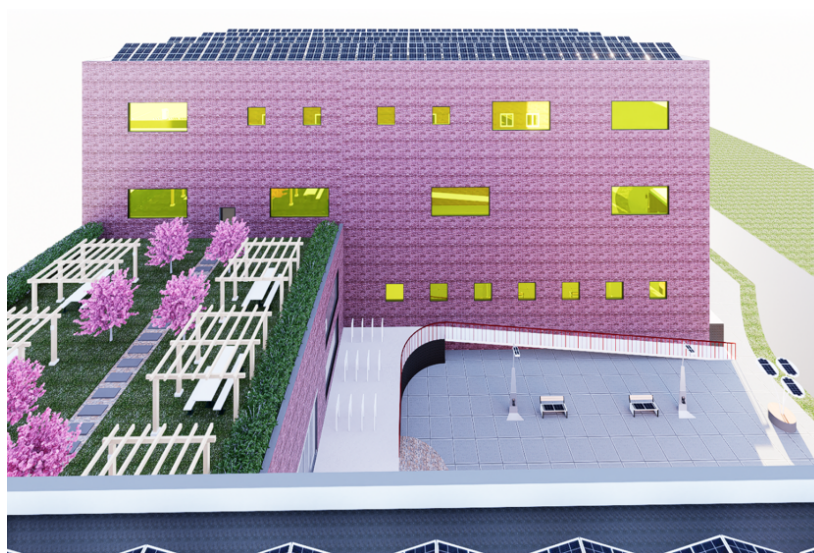


Slika 40 Južna strana zgrade.

Prednja južna strana zgrade bit će cijela od FN stakla. Na slici 41 prikazan je položaj prozora na unutarnjoj sjevernoj strani zgrade, a na slici 42 položaj prozora na unutarnjoj južnoj strani zgrade.



Slika 41 Unutarnja sjeverna strana zgrade



Slika 42 Unutarnja južna strana

Ovakav pristup rješenju može poslužiti kao primjer dobre prakse uvođenja novih tehnologija u različite segmente objekata povezujući ih u jednu funkcionalnu cjelinu.

4.8.1 Pametna sjenila

Odabrana su pametna sjenila motion, firme Solelux. Mogu se raditi po mjeri, što je pogodno za ovaj projekt jer FN staklo nije standardnih prozorskih mjera. Izuzetno su jednostavna za instalaciju i njima se može upravljati s bilo kojega mjesta i na bilo koji način. Potpuno su automatizirana i povezana, što im omogućava prilagođavanje prema temperaturi i dnevnom svjetlu kako bi se osigurala maksimalna udobnost. Na slici 43 prikazan je primjer odabranih sjenila.



Slika 43 Pametna sjenila Motion

Proračunati potreban broj sjenila je 28 komada dimenzija 4000x2000 mm, 4 komada dimenzija 1849x1245 mm i 26 komada dimenzija 140x140 mm, te složena izvedba za prednju južnu stranu koja će cijela biti ostakljena.

4.9 Sustav za prikupljanje i korištenje kišnice

Sustav navodnjavanja

U današnjem građevinarstvu, održivost i učinkovitost su ključni, posebno za projekte poput nZEB kampusa na Borongaju. Geberit Pluvia, inovativni podtlačni sustav za odvodnju kišnice, idealno je rješenje za ove potrebe. Sustav koristi princip podtlačne odvodnje, omogućavajući brži i učinkovitiji odvod vode s krovova te je odabran za naš nZEB kampus (slika 44). Sustav učinkovito odvodi velike količine kišnice, što je važno za projekte s velikim krovnim površinama. Na našem nZEB kampusu na Borongaju, Pluvia će optimizirati korištenje resursa. Odvedena kišnica bit će ponovno korištena za vodu u toaletima, čime se dodatno smanjuje potrošnja pitke vode i doprinosi održivosti kampusa. Predviđena su četiri spremnika od 50 000 litara koji će omogućiti korištenje kišnice, kao vode za toalete, sedam dana u mjesecu. Manji promjer cijevi i jednostavnija instalacija rezultiraju uštedama u materijalu i radu, dok materijali otporni na koroziju osiguravaju dugovječnost sustava.



Slika 44 Odabrani sustav za odvodnju kišnice

Ugradnja ovih sustava na kampusu predstavlja značajan korak ka održivoj budućnosti s visokom energetsom učinkovitosti i minimalnim utjecajem na okoliš.

Zeleni vrt

Zeleni vrt na krovu nZEB kampusa predstavlja inovativno rješenje koje kombinira estetiku i funkcionalnost. Sa slojem organskoga tla dubokim nekoliko centimetara, podlogom od drenažnoga sloja i slojem za zadržavanje vode, omogućava se optimalan rast biljaka. Izgled zelenoga vrta prikazan je na slici 45.



Slika 45 Prikaz vrta na krovu

Osim toga, krovna konstrukcija opremljena je sustavom za navodnjavanje kap po kap, koji omogućava precizno doziranje vode i održavanje optimalne razine vlage u tlu. Na zelenom krovu planirana je integracija biljnih vrsta koje su prilagođene lokalnim uvjetima i koje imaju visok stupanj tolerancije na sušu i vrućinu. Selekcijom biljnih vrsta koje potiču lokalni ekosustav, osigurava se održiv i ekološki osviješten prostor.

Zelena fasada

Zelena fasada s biljkom puzavi fikus na istočnom dijelu zgrade nZEB kampusa inovativno je rješenje za održivu arhitekturu. Ova biljka, poznata po svojoj sposobnosti da pokrije velike površine, ne samo da doprinosi estetskoj privlačnosti kampusa, već pruža i prirodnu izolaciju, smanjuje zagrijavanje zgrade i poboljšava kvalitetu zraka. Održavanje ove fasade olakšano je korištenjem sustava automatskoga navodnjavanja koje osigurava redovno zalijevanje biljaka održavajući njihov zdravi rast, dok periodično uklanjanje suvišnih izdanaka doprinosi održavanju njenoga urednoga izgleda.

Odlaganje otpada

U okviru ovoga rada naglasak je stavljen i na održavanje čistoga okoliša. Stoga bi se na svim važnim lokacijama unutar kampusa postavile tri različite kante za odlaganje otpada, svaka namijenjena za specifičnu vrstu otpada: reciklažni otpad, organski otpad i ostali otpad. Ova inicijativa potiče na odvajanje otpada i smanjenje negativnoga utjecaja na okoliš, te promovira svijest o recikliranju među studentima, zaposlenicima i posjetiteljima kampusa. Kante za odlaganje otpada bit će postavljene na ulazima u kampus, u blizini ureda, učionica, studentske menze i drugih zajedničkih prostora. Ovaj pristup upravljanju otpadom nije samo simbol održivosti, već i praktična mjera koja doprinosi stvaranju zelenijeg i čistijeg okruženja za sve korisnike kampusa. Na slici 46 prikazano je jedno od rješenja za odlaganje i odvajanje otpada.



Slika 46 Odlaganje i odvajanje otpada

Na slici su u donjem desnom kutu prikazane kante za odlaganje otpada, raspoređene ravnomjerno u hodnicima zgrade. Ovo rješenje odabrano je po uzoru na postojeće rješenje odlaganja i odvajanja otpada na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

5. RASPRAVA

Sektor zgradarstva je europski najveći potrošač energije jer oko 40% od ukupne potrošnje energije otpada upravo na ovaj sektor i zbog toga on ima veliku ulogu u postizanju klimatske neutralnosti. Prema Europskoj Direktivi o energetskej učinkovitosti zgrada, do 2030. godine sve nove zgrade imat će obvezu biti zgrade nulte emisije. Ovaj pojam zapravo definira zgradu koja na licu mjesta emitira nula emisija CO₂ i posjeduje vrlo visoke energetske značajke. ZEB zgrade podupiru fleksibilnost mreže, omogućavaju primjenu principa odgovora na potražnju, pametnoga punjenja, te smanjuju sveukupnu potrošnju energije. Sve gore navedene činjenice dovele su do ideje za izradu ovoga rada koji uz rješenje za nZEB kampus nudi i pregled svih najnovijih tehnologija dostupnih na tržištu, a koje doprinose energetskej neutralnosti objekta, ali i sadržaja koji se nude na samome kampusu. Kako bi se postigla energetska neovisnost i visoka energetska učinkovitost zgrade, nakon detaljnoga istraživanja i pregleda literature i interneta o trenutnom trendovima i napretku tehnologije, odabrani su sunčani moduli, toplinski kolektori, sustav dizalica topline i pametnih prozora, te sustav za prikupljanje i korištenje kišnice. Pri tome je najveći izazov bio doći do podataka s tehničkim specifikacijama pojedinih sustava jer je tržište novim tehnologijama izrazito konkurentno, te su proizvođači opreme prilično oprezni s davanjem informacija ukoliko se ne radi o već ugovorenome poslu. Zbog toga je odabir opreme bio relativno izazovan jer je zahtijevao višesatno istraživanje i elektronsku komunikaciju s brojnim dobavljačima dok u konačnici nisu dobivene sve potrebne informacije.

Prilikom oblikovanja idejnoga rješenja kampusa, naglasak je stavljen i na transport, a čije se emisije također žele eliminirati, odnosno smanjiti u što većoj mjeri. Zbog toga je na kampusu predviđena instalacija sustava za proizvodnju i korištenje vodika koji bi koristiti autobusi na liniji koja povezuje kampus s nekoliko ključnih frekventnih lokacija u gradu. Osim toga, svi vlasnici električnih vozila na baterije koji će posjetiti kampus imali bi mogućnost punjenja svojih vozila na modernim brzim punjačima. Okoliš zgrade je opremljen pametnim klupama, rasvjetom i sunčanim stablima koji će već prolaskom pored zgrade privući pozornost i dati naslutiti da se radi o nečemu inovativnom i drugačijem. Posjetitelji će tako na kampusu moći vidjeti i koristiti sve najnovije tehnologije, upoznati se s njihovim radom, prednostima i povoljnim utjecajima na život i planet.

6. ZAKLJUČCI

Ideja za ovaj rad rodila se na kolegiju *Nove tehnologije u energetici* u sklopu kojega je naglasak, kako mu i samo ime govori, na istraživanju, razvoju i primjeni novih tehnologija bez štetnih utjecaja na okoliš. Tijekom diskusije iskristalizirala se tema modeliranja zgrade kao jednog kompleksnog sustava na kojemu je moguće primijeniti gotovo sve trenutno raspoložive tehnologije. S obzirom na važnost obrazovnih institucija kao bazena znanja čiji su nositelji vrhunski stručnjaci u različitim područjima, odluka je pala na oblikovanje i modeliranje kampusa gotovo nulte energije. Podteme su podijeljene u nekoliko grupa, nakon čega je uslijedio intenzivan rad, diskusije, te sastanci nekoliko puta tjedno, kako bi se u konačnici došlo do jedinstvenoga rješenja unutar kojega su povezane različite tehnologije i različiti sustavi, a čija je osnova korištenje obnovljivih izvora energije u što većoj mjeri. S obzirom na položaj Zagreba, korištena je sunčeva energija. Pri tome se vodilo računa da kampus osim funkcionalnosti, bude i estetski atraktivan zbog čega se velika pažnja posvetila unutarnjem i vanjskom uređenju.

Primjenom već stečenoga znanja i u hodu usvojenih novih vještina, izrađen je model nZEB kampusa koji sve svoje potrebe za električnom, toplinskom i rashladnom energijom može zadovoljiti iz vlastite proizvodnje. Ukoliko se na Sveučilištu u Zagrebu otvori mogućnost za proširenjem prostornih kapaciteta na Borongaju, ovaj rad može poslužiti kao dobra podloga za realizaciju projekta izgradnje nZEB kampusa jer su pri proračunima uzimane stvarne dimenzije raspoloživoga zemljišnoga prostora, te su realno procijene vrijednosti potrebne energije i predviđenih kapaciteta potrebne opreme.

ZAHVALE

Zahvaljujemo izv. prof. dr. sc. Ankici Kovač koja nam je kroz kolegij *Nove tehnologije u energetici* pokazala kako je sve moguće kada se radi timski i što je bila jedna od nas. Zahvaljujemo joj što je vjerovala u nas tijekom izrade ovoga rada, dajući nam potpunu slobodu razvijanja ideja i njihove implementacije u zajedničko rješenje, potičući konstruktivne diskusije. Zahvaljujemo se i svim profesorima, docentima, asistentima i laborantima Fakulteta strojarstva i brodogradnje koji su nam prenijeli svoja neprocjenjiva znanja i iskustva kroz različite kolegije, a koja smo sada bili u mogućnosti primijeniti u ovome radu. Zahvaljujemo se i vrhunskim stručnjacima u tvrtkama navedenima u ovome radu s kojima smo komunicirali u vezi opreme i izmjenjivali mišljenja o mogućim rješenjima.

U 15 tjedana trajanja ovoga ljetnoga semestra iskusili smo kako je to biti inženjer s velikom odgovornošću i prema sebi i prema timu i prema okolišu. Taj osjećaj dao nam je vjetar u leđa za nove izazove koji su pred nama.

POPIS LITERATURE

- [1] European Commision. Climate Action, Climate Change, Consequences. Dostupno online: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_en (pristupljeno 2. svibnja 2024.)
- [2] Paris Agreement on Climate Change. Dostupno online: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/paris-agreement/> (pristupljeno 2. svibnja 2024.)
- [3] The United Nations Secretariat. United Nations Framework Convention on Climate Change. In Proceedings of the Conference of the Parties on Its Twenty-First Session, Paris, France, 30 November–13 December 2015
- [4] A European Green Deal, Striving to be the First Climate-Neutral Continent. Dostupno online https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en#documents (pristupljeno 2. svibnja 2024.)
- [5] Energy Performance of Buildings Directive. Dostupno online: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (pristupljeno 2. svibnja 2024.)
- [6] <https://www.solar.com/learn/what-is-the-carbon-footprint-of-solar-panels/> (pristupljeno 19. svibnja 2024.)
- [7] <https://nasuncanojstrani.hr/solarne-elektране-razlike-u-proizvodnji-u-razlicitim-dijelovima-hrvatske/> (pristupljeno 7. travnja 2024.)
- [8] <https://solvis.hr/en/> (pristupljeno 1. lipnja 2024.)
- [9] <https://frigo-ve.hr/bosch-solarni-paket-fkc-2k-kosi-krov> (pristupljeno 15. lipnja 2024.)
- [10] <https://www.ariston.com/hr-hr/products/dizalice-topline/dizalice-topline-za-pripremu-potrosne-tople-vode/nuos-plus-1> (pristupljeno 15. lipnja 2024.)
- [11] https://www.daikin.hr/hr_hr/about/daikin-innovations/variable-refrigerant-volume.html (pristupljeno 21. svibnja 2024.)
- [12] https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [13] https://eihp.hr/wp-content/uploads/2024/01/Energija-u-HR-22_WEB-novo.pdf (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [14] <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-25-2023-INIT/en/pdf> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [15] <https://info.ballard.com/hubfs/Premium%20Content/Hydrogen%20Fueling%20for%20Fuel%20Cell%20Bus%20Fleets/WP-Ballard-Hydrogen-Refueling-for-Fuel-Cell-Bus-Fleets.pdf> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [16] <https://h2.live/en/fuelcell-cars/toyota-mirai/> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [17] <https://pragma-mobility.com/en/vehicule/velo-alpha-neo/> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)

- [18] Kovač A., Proizvodnja vodika elektrolizom vode pomoću Sunčeve energije i fotonaponskog modula, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2013.
- [19] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [20] Andrassy M., Stapni kompresori, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2016.
- [21] <https://www.sundyne.com/how-do-diaphragm-compressors-work/> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [22] <https://hyethydrogen.com/technology/operating-principle/> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [23] Orlova S., Mezeckis N., Vasudev V. P. K., Compression of Hydrogen Gas for Energy Storage: A Review, Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, Latvian Journal of Physics and Technical Sciences (2024), 60. 4-16. 10.2478/lpts-2023-0007.
- [24] <https://stargatehydrogen.com/blog/hydrogen-storage-solutions/> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [25] <https://resato-hydrogen.com/fleet-owner-station/> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [26] <https://cvh.hr/gradani/tehnicki-pregled/statistika/> (pristupljeno 30. lipnja 2024.)
- [27] <https://stekerr.com/hr/o-nama/> (pristupljeno 2. lipnja 2024.)
- [28] <https://solvis.hr/proizvodi/eko-smart-proizvodi/solarno-stablo/>,
<https://qben.hr/portfolio/qben-solarno-drvo/> (pristupljeno 29. svibnja 2024.)
- [29] <https://solvis.hr/proizvodi/eko-smart-proizvodi/solarna-klupa/> (pristupljeno 29. svibnja 2024.)
- [30] <https://qben.hr/portfolio/pametna-klupa-qben-nebula-s-naslonom/> (pristupljeno 29. svibnja 2024.)
- [31] <https://onyxsolar.com/product-services/amorphous-pv-glass> (pristupljeno 7. lipnja 2024.)
- [32] <https://onyxsolar.com> (pristupljeno 7. lipnja 2024.)
- [33] https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci¶m=k2_1&Godina=2023 (pristupljeno 30. travnja 2024.)
- [34] <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath3d.html> (pristupljeno 19. svibnja 2024.)
- [35] <https://solvis.hr/en/products/monocrystalline-modules/sv144-e-hcm10/> (pristupljeno 19. svibnja 2024.)
- [36] https://termometal.hr/dizalica-topline-za-sanitarnu-vodu-ariston-nuos-plus-wi-fi-250-3069776-proizvod-6146/?gad_source=1&gbraid=0AAAApFcxY6ld8GBS464Wn5Fpt1qn0iYs&gclid=EAlaQobChMI8vr17peSiAMVwWVBaH30xgBsEAAYASAAEgIE2vD_BwE (pristupljeno 9. lipnja 2024.)

- [37] <https://www.daikin.com/products/ac/lineup/vrv> (pristupljeno 7. svibnja 2024.)
- [38] <https://www.h-tec.com/en/products/detail/h-tec-pem-electrolyser-me450/me450/>, (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [39] <https://www.pdcmachines.com/hydrogen-compressors-for-hydrogen-refueling-stations/>, (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [40] <https://www.h2planet.eu/en/detail/HyTank50lt> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [41] <https://www.shapecut.com.au/what-is-quenched-and-tempered-steel/> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [42] <https://www.abacaircompressors.com/en-international/about-us> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [43] <https://indors.eu/belt-driven-air-compressors/1109-compressor-abac-a29-100-cm2.html> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [44] <https://resato-hydrogen.com/fleet-owner-station/> (pristupljeno 21. lipnja 2024.)
- [45] https://www.evopower.com.au/EVO_POWER_NEO_SERIES (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [46] <https://irp.cdn-website.com/9419e862/files/uploaded/DOC-07.%20NEO%20Series%20Datasheet%20V9.3%20Feb%202024%20WEB.pdf> (pristupljeno 22. lipnja 2024.)
- [47] <https://www.pittman.ie/products/scooter-rack-9-head>
- [48] <https://www.kaiserkraft.hr/stalci-za-bicikle/stalci-za-bicikle/okvir-za-naslanjanje-bicikla/vruce-pocincana-ravna-izvedba-u-tamnosivoj-boji-s-poprecnim-stupom/p/M9446107/?articleNumber=582779>

SAŽETAK

Mislav Bogdan, Marko Briški, Ilijana Cvitanović, Hrvoje Ivaniš, Evita Leljak, Ilija Lučić, Ines Mijić, Stela Perković, David Plank, Theresa Porzelt, Matej Šalić, Dino Valetić, Kristina Vukušić

nZEB KAMPUS S VISOKIM UDJELOM OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Zgrada približno nulte energije je više otporna na klimatske promjene. Prema direktivi o energetske značajkama zgrade, nove zgrade koje su u javnom vlasništvu moraju biti zgrade gotovo nulte energije dvije godine prije svih drugih kategorija novih zgrada. Među najperspektivnijim kategorijama javnih zgrada koje bi među prvima mogle poslužiti kao *flagship* projekti su obrazovne zgrade, prvenstveno visokoškolske zgrade. To je iz razloga jer visokoškolske zgrade posjećuju različite dobne skupine koje osim studenata uključuju i učenike osnovnih i srednjih škola, njihove učitelje i nastavnike, predstavnike donositelja odluka i gospodarstva. Zato, ovaj rad se temelji na projektiranju zgrade kampusa gotovo nulte energije koja može poslužiti kao živući laboratorij. U njemu bi se na realnim sustavima u primjeni održavala predavanja i demonstrirala tehnologija. Također bi se organizirale STEM radionice i edukacijske posjete za sve zainteresirane, a sve s ciljem prijenosa znanja i podizanja ekološke svijesti i svijesti o važnosti uvođenja novih tehnologija, uštedama energije, smanjenju emisija i odgovornom ponašanju korisnika.

Ključne riječi: klimatske promjene; nulte emisije; energetska tranzicija; obnovljivi izvori energije; nove tehnologije.

SUMMARY

Mislav Bogdan, Marko Briški, Ilijana Cvitanović, Hrvoje Ivaniš, Evita Leljak, Ilija Lučić, Ines Mijić, Stela Perković, David Plank, Theresa Porzelt, Matej Šalić, Dino Valetić, Kristina Vukušić

nZEB CAMPUS WITH LARGE SHARE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Nearly-zero energy building exhibits greater climatic resilience. As to the Energy Performance of Buildings Directive, newly constructed buildings that are publicly owned must achieve nearly zero energy status two years ahead of all other categories of new buildings. One of the most promising types of public buildings that could be prioritised as flagship projects are educational buildings, specifically those for higher education. These buildings are visited by various groups, including not only students but also primary and secondary school students, their teachers, decision makers, and representatives from the economy. Thus, this work focuses on the design of a nearly-zero energy campus building that can function as a living laboratory. The building would be used for lectures and demonstration of technology on the real-life applications of systems. It would be also organized STEM workshops and educational visits for interested individuals, with the main goal of knowledge transfer and raising awareness about the environment, the significance of adopting new technologies, energy conservation, emission reduction, and responsible user behaviour.

Key words: *climate change; zero emission; energy transition; renewable energy sources; new technologies.*

KRATKI ŽIVOTOPISI AUTORA

Mislav Bogdan, Marko Briški, Ilijana Cvitanović, Hrvoje Ivaniš, Evita Leljak, Ilija Lučić, Ines Mijić, Stela Perković, David Plank, Theresa Porzelt, Matej Šalić, Dino Valetić i Kristina Vukušić

studenti su 2. godine diplomskoga studija procesno energetskog smjera. Njihovi interesi uključuju nove tehnologije koje se temelje na rješenjima sukladno zahtjevima za zaštitom okoliša i smanjenjem štetnih emisija. Pored nastavnih obveza, aktivni su i u izvannastavnim fakultetskim aktivnostima poput sporta, studentskih udruga, zatim sudjeluju u Danima otvorenih vrata Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na Smotri Sveučilišta, na Festivalu znanosti, međunarodnim konferencijama, posjetima srednjim školama promovirajući fakultet. Vole putovati, upoznavati nove zemlje, ljude i nove kulture.