



»Projekt je prejel sredstva iz raziskovalnega in inovacijskega programa Evropske unije Obzorje 2020 v skladu s sporazumom o dodelitvi sredstev št. 723916.«



Inovativni predizdelani elementi, ki vsebujejo različne odpadne gradbene materiale za zmanjšanje energijske porabe stavb in zmanjšanje okoljskih vplivov

PRIROČNIK ZA USPOSABLJANJE

KOORDINATOR



VSEBINA

1. Uvod	4
1.1. Konzorcij	4
1.2. Opis projekta	4
1.3. Faze projekta InnoWEE	7
2. Razvoj novih materialov in plošč	8
2.1. Predelava in uporaba odpadkov	8
2.2. Razvoj InnoWEE geopolimerov	13
2.3. Razvoj plošč	16
2.4. Preskušanje učinkovitosti in trajnosti razvitih plošč v laboratoriju	20
2.5. Certificiranje razvitih izdelkov	23
3. Pilotni obrat in nadgradnja laboratorijske proizvodnje novih plošč	25
3.1. Pilotni obrat – glavne značilnosti	25
3.2. Opredelitev strategije nadgradnje laboratorijske proizvodnje	25
3.3. Potek strategije nadgradnje laboratorijske proizvodnje	27
3.4. Idejni projekt	28
3.5. Projekt za izvedbo	38
3.6. Analize in izboljšave – proizvodni podatki	40
4. Vgradnja, sistem spremljanja in ocenjevanje učinkovitosti na dejanskih pilotnih stavbah	44
4.1. Pilotna hiša, raziskovalno središče CNR v Padovi, Italija	44
4.2. Stara mestna hiša v Občini Voula – blizu Aten (Grčija)	47
4.3. Dom za ostarele Don Orione v Bukarešti (Romunija)	50
4.4. Stanovanjska ekohiša v mestu Putte-Mechelen (Belgija)	51
5. Energijsko modeliranje stavb (BEM) in virtualna pilotna mesta	53
5.1. Ocenjevanje tehnologij vgradnje/odstranitve ter metodologij in spremljanja plošč	53
5.2. Modeliranje eenergijske učinkovitosti različnih izdelkov	56
5.3. Higrotermalna ocena	65
5.4. Dosežki InnoWEE in projekt za vsako pilotno mesto	67
6. Analiza življenjskega cikla	69
6.1. LCA metodologija	69
6.2. Okoljski inventar (LCI)	70
6.3. Presoja vpliva na okolje (LCIA)	71
6.4. Interpretacija LCA	72
6.5. Stroški življenjskega cikla izdelka – LCC	74

7. Sklepne ugotovitve.....	77
Reference	79
Seznam kratic in simbolov	81
Kratice.....	81
Simboli	82
Partnerji projekta in sodelavci na projektu	83

1. Uvod

Ta dokument predstavlja strukturo in rezultate projekta InnoWEE (Program R&I Obzorje 2020, razpis EeB-04-2016, pogodba o donaciji št. 723916) in podaja pregled njegovih glavnih faz in dosežkov.

1.1. Konzorcij

InnoWEE je raziskovalni in inovacijski projekt, ki ga financira Evropska komisija in ga realizira deset partnerjev, ki predstavljajo raziskovalne inštitute, mala in srednja podjetja, industrijska podjetja in občine iz šestih držav članic Evropske unije (Slika 1).



PARTNERS	
 	COORDINATOR CNR-ISAC, Italy CNR-ITC, Italy CNR-ICMATE, Italy
	Advanced Management Solutions, Greece
	R.E.D SRL., Italy
	Tecnalia Research & Innovation, Spain
	Guidolin Giuseppe – Eco. G. srl, Italy
	S.C Pietre Edil S.R.L, Romania
	IZNAB Spolka z Ograniczona Odpowiedzialnoscia, Poland
	Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Slovenia
	Magnetti Building SpA, Italy
	Municipality Varis-Voulas-Vouliagmenis, Greece

Slika 1: Konzorcijski partnerji projekta InnoWEE

1.2. Opis projekta

Skupna količina odpadkov v Evropski uniji znaša 2,5 milijarde ton (2016, EU-28), gradbeni sektor pa prispeva več kot tretjino vseh. Gradbenih odpadki in odpadki pri rušenju (CDW; ang. Construction and Demolition Waste) predstavljajo velik del teh (približno 335 milijonov ton v letu 2016) in imajo velik potencial za recikliranje, čeprav je znaten del še vedno odložen na odlagališča ali uporabljen v aplikacijah z nizko dodano vrednostjo, npr. nasipi cest in temeljev.

Poleg tega zgradbe predstavljajo približno 40% celotne porabe energije v Evropski uniji in se štejejo kot strateške za izboljšanje energijske učinkovitosti, konkurenčnosti in trajnosti v Evropi.

V okviru projekta in v skladu s krožnimi ekonomskimi pristopi k trajnosti je bil projekt InnoWEE usmerjen v razvoj predizdelanih arhitekturnih plošč za izboljšanje energijske učinkovitosti stavb, izdelanih iz inovativnih geopolimernih veziv, sposobnimi vezanja velikih količin agregatov iz gradbenih odpadkov in odpadkov pri rušenju (Slika 3). Te plošče so bile zasnovane tako, da imajo nizek vpliv na okolje, nizko utelešeno energijo, nizke emisije CO₂ in visoko toplotno zmogljivost. Ciljne aplikacije InnoWEE so vključevale obstoječe stavbe, potrebne obnove, s posebnim poudarkom na stavbah, ki so del kulturne dediščine.

Geopolimeri so anorganska veziva, ki so zaradi nižjega ogljičnega odtisa in možnosti uporabe različnih odpadkov ali sekundarnih surovin (SRM; ang. Secondary Raw Materials) kot reagenta, večinoma bolj zelena kot materiali na osnovi portlandskega cementa. V sklopu InnoWEE projekta sta bila razvita dva geopolimerna materiala, to je tekoča malta, ki vsebuje 50 ut% recikliranih

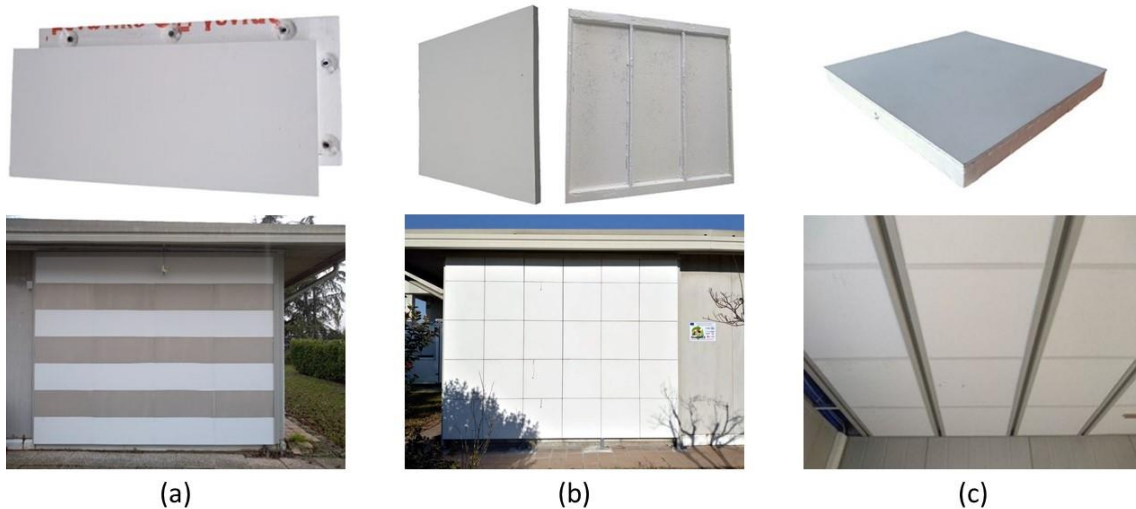
anorganskih odpadkov in geopolimerna lesna iverna plošča, ki vsebuje 40 ali 50 ut% recikliranega lesa. Del raziskav je bil namenjen oceni izvedljivosti metod za predelavo gradbenih odpadkov in odpadkov pri rušenju za pridobitev primernih recikliranih agregatov.

Razvite so bile tri vrste predizdelanih plošč (Slika 2), dve za zunanjo uporabo:

- Plošče za kontakte izolativne fasade podobne zunanjim toplotnoizolacijskim sestavljenim sistemom (ETICS);
- plošče za prezračevane fasade;

in ena za notranji sistem ogrevanja in hlajenja:

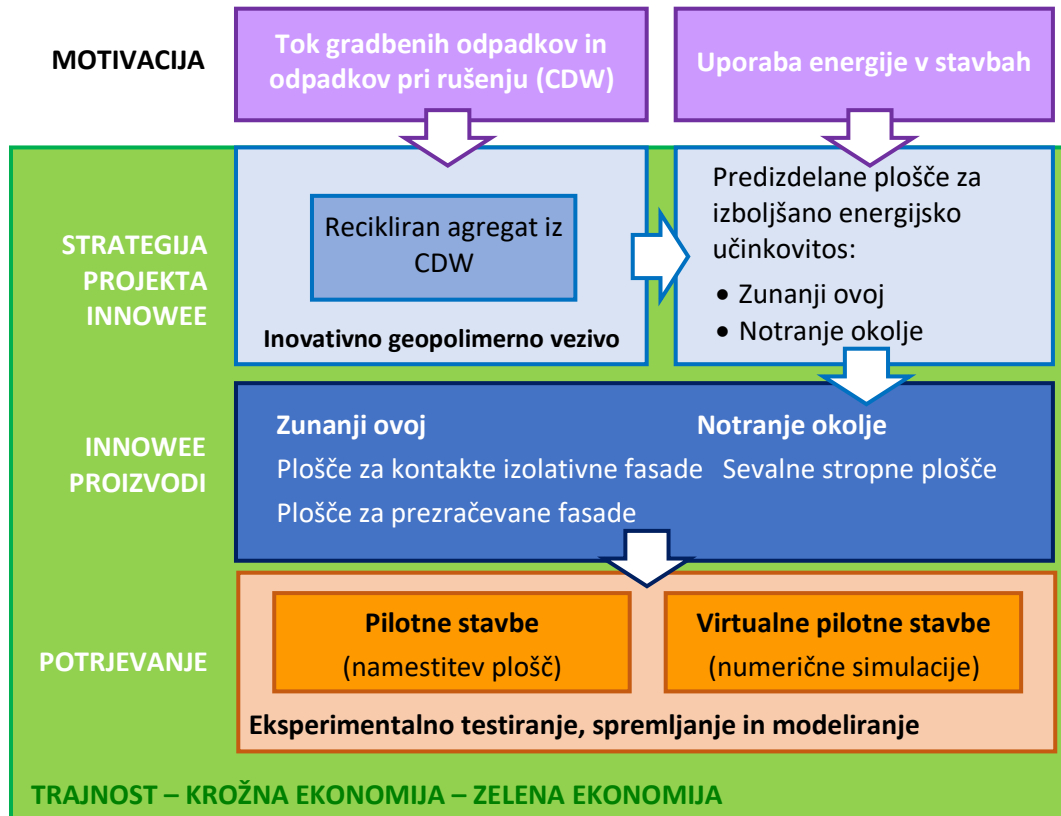
- sevalne stropne plošče za ogrevanje / hlajenje (razvite tudi v dodatni različici, prirejene za uporabo na navpični steni, ki je bila preizkušena samo v laboratoriju).



Slika 2: InnoWEE plošče nameščene na pilotni hiši v Padovi (Italija): (a) plošče za kontaktne izolativne fasade podobne ETICS-om, (b) plošče za prezračevane fasade in (c) sevalne stropne plošče

Postavljen je bil obrat za pilotno proizvodnjo (TUPP; ang. Technology Upscaling Pilot Plant), ki je omogočil izdelavo približno 400 plošč, vključno s poskusi za prilagoditve za industrijsko proizvodnjo, ploščami za testiranje njihovih učinkovitosti in trajnosti, ter ploščami za vgradnjo v resnične pilotne stavbe.

Izdelane plošče so bile nameščene na štirih pilotnih stavbah, na katerih se je preverjalo različne načine namestitve in določalo toplotno učinkovitost in trajnostne lastnosti. Poleg tega so se izvedle numerične simulacije toplotne učinkovitosti razvitih plošč na virtualnih primerih stavb.



Slika 3: Pregled projekta InnoWEE

Dejavnosti projekta InnoWEE se izvajajo z namenom doseganja sledečih ciljev:



Razviti realistične in stroškovno učinkovite rešitve z inovativnimi izdelki za nove in obstoječe zgradbe.



Obnova, demontaža in izbira CDW za pridobivanje primernih sekundarnih surovin in razvoj novih visokozmogljivih predizdelanih geopolimernih plošč.



Določitev učinkovitosti plošč nameščenih na pilotnih objektih in s simulacijo izpostavljenosti dejanskih pilotnih objektov in virtualnih pilotnih objektov različnim klimatskim pogojem, da dobimo različne scenarije izpostavljenosti.



Na tržišču predstaviti nove gradbene proizvode in tehnične rešitve za nove in obstoječe stavbe, s čemer se bodo ustvarile nove poslovne priložnosti.



Razvoj smernic za vgradnjo proizvodov, usposabljanje o novih rešitvah ter razširjanje rezultatov.

1.3. Faze projekta InnoWEE

Projekt InnoWEE je bil načrtovan po sledečih fazah:

1. V prvi fazi projekta, je bila izvedena identifikacija primernih neorganskih in lesnih gradbenih odpadkov in odpadkov pri rušenju za razvoj in oceno ustreznosti postopkov predelave odpadkov za pridobitev primernih recikliranih agregatov in s tem preoblikovanje CDW v sekundarne surovine. Ta faza je vključevala nadgradnjo obstoječega obrata za obdelavo CDW, katera omogoča drobljenje odpadka na velikost delcev ≤ 2 mm.
2. V nadaljevanju je potekal razvoj dvehgeopolimernih materialov: geopolimer visoke gostote z agregatom iz CDW (HDG; ang. High Density Geopolymer) in geopolimer z lesnim agregatom (WG; ang. Wood Geopolymer). HDG je bil glavni sestavni del vseh plošč med tem, ko je bil WG uporabljen za izdelavo polnila za plošče za prezračevane fasade in komponente stenskih sevalnih plošč. Optimizacija geopolimernega veziva je vključevala izboljšanje svežih lastnosti mešanice za lažjo izvedbo pilotne proizvodnje in obsežno testiranje mehansko – fizikalnih lastnosti strjenega materiala za izdelavo plošč zadovoljive kakovosti.
3. Faza razvojaplošč, ki se je delno prekrivala z razvojem veziv in postavitvijo obrata za pilotno proizvodnjo, je bila namenjena določitvi glavnih lastnosti plošč (oblika, velikost, ipd.), predhodnemu testiranju njihovih lastnosti in zagotavljanju potrebnih informacij pri načrtovanju obrata za pilotno proizvodnjo. V tej fazi je bil izveden preizkus namestitve zunanjih fasadnih plošč na izoliran armiranobetonski zid v prostorih CNR.
4. Po doseženih pozitivnih rezultatih v laboratoriju je AMS v Grčiji izvedel pilotno proizvodnjo InnoWEE plošč v posebej za ta namen spremenjenem obratu za pilotno proizvodnjo (TUPP). Lesne geopolimerne plošče (WGP) so bile proizvedene v laboratoriju inštituta CNR v Italiji. Ta faza je vključevala oceno ustreznosti proizvodnje v skladu s pristopi vodenja kakovosti v industriji. Izdelanih je bilo približno 400 plošč, vključno s tistimi za vgradnjo v pilotne stavbe in tistimi za testiranje učinkovitosti in trajnosti.
5. Plošče so bile nameščene na štiri demonstracijske stavbe, na katerih so bile pred in po namestitvi plošč natančno nadzorovane toplotne lastnosti v dejanskih klimatskih pogojih. Na nameščenih ploščah so bile spremljane tudi trajnostne lastnosti. Rezultati meritev so bili uporabljeni pri numeričnih simulacijah, izvedenih na virtualnih demonstracijskih objektih, da bi potrdili učinkovitost nameščenih plošč.
6. V zadnji fazi se je izvedla ocena vpliva na okolje vseh predlaganih rešitev z oceno življenjskega cikla (LCA) proizvodov. Dejavnosti na projektu so se zaključile z analizo stroškov življenjskega cikla (LCCA) ter z razvojem industrijskega in poslovnega načrta za opredelitev tržnega potenciala.

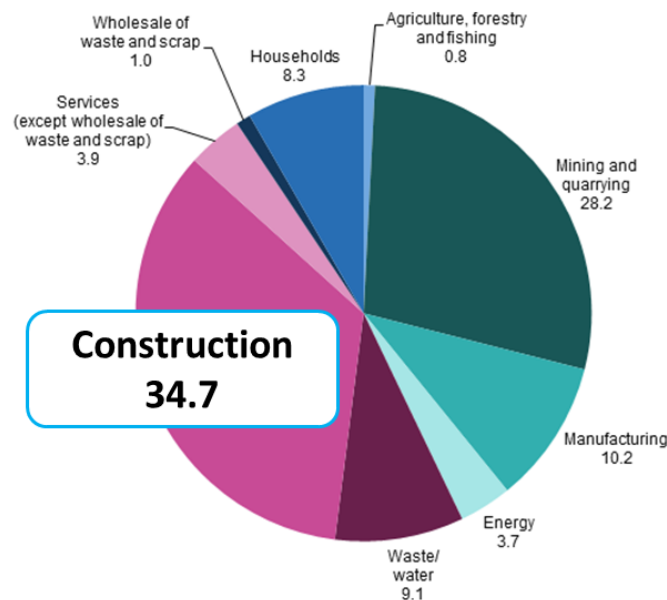
2. Razvoj novih materialov in plošč

V tem poglavju so predstavljene raziskave, izvedene z namenom: (i) identifikacije in predelave odpadkov pri gradnji in rušenju (CDW) za pridobivanje recikliranih agregatov, primernih za geopolimerne materiale, ki so glavna komponenta InnoWEE proizvodov; (ii) razvoja geopolimerih veziv, ki bodo ustrezala zahtevam pilotnega obrata, ki bo sposoben proizvesti plošče zadovoljive kakovosti; (iii) oblikovanja in prilagoditve lastnosti plošč ter načinov vlivanja/strjevanja.

2.1. Predelava in uporaba odpadkov

Gradbeni odpadki in odpadki iz rušenja objektov (CDW)

V geopolimerni material, ki je bil uporabljen za izdelavo InnoWEE proizvodov, je vgrajenih 50% suhe teže anorganskih recikliranih agregatov pridobljenih iz CDW. CDW običajno vsebuje poleg inertnih mineralnih materialov (beton, opeko, ploščice in keramiko itd.) tudi manjše količine ostalih odpadkov (npr. les, steklo, mavčne plošče, bitumenske mešanice in katran). CDW predstavlja približno tretjino vseh odpadkov ustvarjenih v EU (Slika 4), kar nanese približno 0,8-1 milijarde ton na leto.



Slika 4: Delež gradbenih odpadkov med vsemi ustvarjenimi odpadki v EU (Eurostat).

Pri delu z odpadnimi materiali in pri recikliranju le-teh v nove proizvode je potrebno upoštevati različne zakonodajne dokumente. Pri InnoWEE projektu, kjer smo se ukvarjali s CDW in ga reciklirali v gradbene proizvode, smo upoštevali naslednje dokumente:

- Zakonodaja na temo odpadkov;
- Zakonodaja v zvezi z novimi (gradbenimi) proizvodi (odsek 2.5).

Zakonodaja EU na temo odpadkov in pretvorbo odpadkov v SRM

Obstaja poseben seznam dokumentov, ki opredeljuje trenutno ravnanje z odpadki in postopke za pridobivanje sekundarnih surovin.

Splošna zakonodaja o odpadkih:

- Direktiva o odpadkih 2008/98/EC;
- Evropski seznam odpadkov (COM 2000/532/EC);
- Sklep komisije 2011/753/EU;

- Uredba o pošiljkah odpadkov 1013/2006/EC;
- Direktiva o odlaganju odpadkov na odlagališča 1999/31/EC;
- Odločba o sprejemanju odpadkov na odlagališčih 2003/33/EC;
- Uredba o organskih onesnaževalih št. 850/2004.

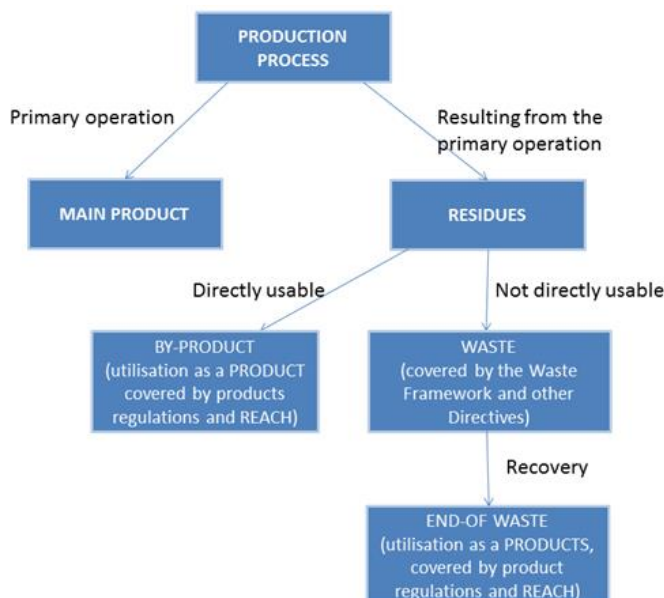
Splošna zakonodaja o materialih:

- Uredba o gradbenih proizvodih 305/2001 (CPR; ang. Construction Products Regulation));
- Uredba REACH 1907/2006;
- Uredba CLP št. 1272/2008.

Kot primer: pri primarnem proizvodnem procesu je neizogibno, da nastajajo tudi proizvodni ostanki. Čeprav ostanki niso glavni tržni proizvod procesa, so lahko koristni na številne druge načine. Kot je prikazano na Slika 5, se lahko uporabijo takoj po pridelavi ali na dolgi rok po predelavi. V prvem primeru je treba ostanke obravnavati kot stranske proizvode in nikoli ne kot odpadke; v drugem primeru ostanki po predelavi ne bi smeli biti odpadki in postanejo proizvodi na mestu predelave.

Lastnosti gradbenih proizvodov, vključno z proizvodi iz recikliranih materialov, obravnav CPR - Uredba o gradbenih proizvodih (CPR (EU) št. 305/2011).

Odpadni materiali po predelavi v proizvode in ob izpolnjevanju številnih posebnih kriterijev prenehajo biti odpadki. Tehnične zahteve za uporabo CDW za gradbene namene so opredeljene v CPR.



Slika 5: Življenjski cikel proizvoda



Slika 6: Razlika v uporabljeni zakonodaji glede na odpadke ali proizvode

Preglednica 1: Razvrstitev odpadkov, ki se uporabljajo v projektu InnoWEE, v skladu z Evropskim seznamom odpadkov

Vrsta odpadkov v skladu z Evropskim seznamom odpadkov	Stanje odpadka	Koda odpadka
Beton	Ne-nevaren	17-01-01
Opeke	Ne-nevaren	17-01-02
Mešanica betona, opeke, ploščic in keramike	Ne-nevaren	17-01-07
Les- neobdelan	Ne-nevaren	17-02-01
Steklo - nekontaminirano	Ne-nevaren	17-02-02

Identifikacija odpadkov, ločevanje in zbiranje virov

EU se zaveda, da “boljše zbiranje materiala za ponovno uporabo in recikliranje zahteva tudi selektivno rušenje in primerne postopke na gradbišču”. Protokol EU za ravnanje z gradbenimi odpadki in odpadki iz rušitve objektov (2016) je usmerjen v povečanje “zaupanja v postopek ravnanja z odpadki pri gradnji in rušenju (C&D; ang. *Construction and Demolition*)” in “zaupanja v kakovost C&D recikliranih materialov”.

Obstajajo štiri glavni koraki za doseg cilja racionalnega upravljanja CDW-ja za pridobitev SRM-ja:

1. Presoja pred rušenjem – Vsi pridobljeni materiali morajo biti identificirani in ocenjene morajo biti njihove količine. Razumljivo mora biti določeno, kaj mora biti ločeno pri viru (npr. nevarni odpadki), kaj se lahko ponovno uporabi oz. reciklira in kako ravnati z odpadki. Presoja pred rušenjem mora biti opravljena pred vsakim projektom obnove ali rušenja, za vsak material, ki je namenjen ponovni uporabi in recikliranju in za nevarne odpadke, da se olajša “identifikacija ustvarjenih gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov, izvede ustrezna demontaža ter natančno opredelijo prakse razstavljanja in rušenja”.



Slika 7: Primer gradnje za selektivno rušenje

2. Načrt gospodarjenja z odpadki – Načrt mora vsebovati informacije o tem kako se bodo izvajali različni koraki rušenja in definira kdo jih bo izvajal. Določati mora katere materiale se bo selektivno zbralo pri viru, kako se jih bo transportiralo in kaj bo reciklirano, ponovno uporabljeno ali končno obdelalo ter kako si morajo slediti definirani postopki. Prav tako mora načrt pojasniti, kako se lotiti vprašanj varnosti in varovanja ter kako omejiti vplive na okolje.

3. Selektivno rušenje in demontaža – V skladu z omenjenim protokolom EU za upravljanje CDW bi moral biti postopek naslednji:

- a) Ločevanje nevarnih odpadkov;
- b) demontaža (razstavljanje, vključno z ločevanjem stranskih proizvodov in materialov za fiksiranje);
- c) ločevanje materialov za fiksiranje;
- d) strukturno ali mehansko rušenje.

(Ročna) demontaža vključuje široko paleto materialov, kot so na primer steklo, okenski okvirji, elementi iz marmorja, dragocene lesne vrste, sanitarna oprema, grelci, kovinske komponente, izolacijska pena itd. Omenjeno izboljšuje čiščenje glavnega toka odpadkov, kakor tudi možnost ponovne uporabe. Glavne tokove odpadkov (npr. beton, opeka, zidne konstrukcije, ploščice in keramika) je potrebno voditi ločeno.



Slika 8: Slike z gradbišč z izvedenim selektivnim rušenjem

4. Predelava in obdelava odpadkov – Kot poudarja protokol, “upoštevanje hierarhije ravnanja z odpadki zagotavlja daljnosežne koristi z vidika učinkovite rabe virov, trajnosti in prihrankov pri stroških”. Priprava na ponovno uporabo je prednostna možnost kadar je to le mogoče, saj proces zahteva malo ali nič predelave zato okoljski vplivi povezani s predelavo ne nastajajo. Po drugi strani bi moralo biti odlaganje na odlagališčih na splošno zadnja izbira. V skladu s hierarhijo ravnanja z odpadki obstaja veliko možnosti, kot so:

- a) priprava za ponovno uporabo;
- b) recikliranje;
- c) materialna predelava;
- d) energetska predelava;
- e) ostale predelave;
- f) odlaganje na odlagališčih.

Obdelava CDW-ja za pridobivanje SRM-ja v sklopu projekta InnoWEE

Ko se izbrani CDW transportira v predelovalni obrat, se tam najprej izvede vizualni pregled, da se odstranijo neželeni ostanki (plastika, leseni deli itd.). Preostali material se premeša, preseje in shrani okoli dvignjenega nasipa (Slika 9). Nato se material dodaja na transportni trak, kateri transportira drobir skozi magnetni separator, da se odstranijo morebitni kovinski delci. Groba frakcija se transportira v čeljustni drobilnik, kjer se material podrobi na manjše delce. Podrobljen material se transportira skozi magnetni separator in združi z ostalim materialom. Obdelan material se shrani, kjer počaka na potrebno kontrolo lastnosti, katera potrdi primernost materiala za trg.



Slika 9: Prvi korak obdelave CDW - drobljenje in magnetno ločevanje

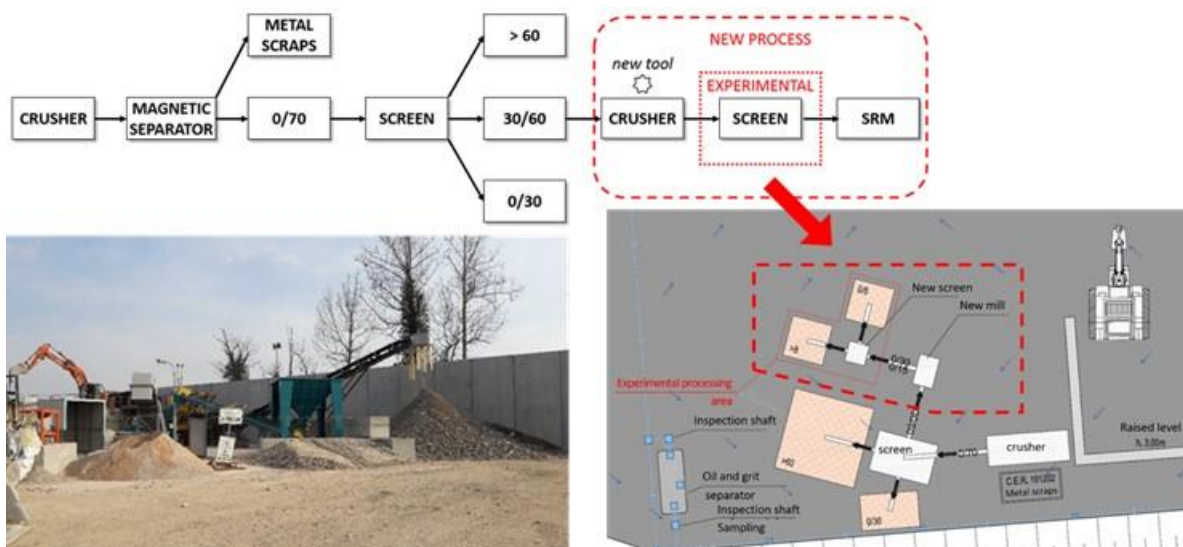
Iz procesa drobljenja in sejanja dobimo tri frakcije: > 60 mm, 30–60 mm in < 30 mm. Za proizvodnjo SRM-ja v okviru projekta InnoWEE je bila izbrana frakcija z velikostjo delcev 30–60 mm, zaradi nizke vsebnosti zemljin, organskih snovi itd.. Ta frakcija je bila transportirana v dodaten drobilnik v katerem se je material podrobil na frakcijo ≤ 2 mm (Slika 10).



Slika 10: Agregati s premerom zrna < 2 mm, pridobljeni s predelavo CDW-ja

Za upoštevanje okoljskih predpisov iz dovoljenja, ki so ga izdale italijanske lokalne oblasti za dograditev obrata, so bile izvedene naslednje izboljšave (Slika 11):

- **zvočno-absorpcijska pregrada** blizu območja obdelave;
- **nova podlaga in sistem za čiščenje vode**, da se zagotovi skladnost z lokalnim načrtom varstva voda;
- dodatni **sistem za zmanjšanje nastajanja prahu**.



Slika 11: Obrat za predelavo CDW-ja

Merila za določitev, kdaj odpadke preneha biti odpadke

Za izpolnjevanje meril za določitev, kdaj odpadke preneha biti odpadke, so bile pridobljene sekundarne surovine analizirane v laboratoriju, da se je preverilo, ali izpolnjujejo predpisane fizikalne in kemijske zahteve, ki jih posebej določijo italijanske lokalne oblasti. Omenjeno testiranje se izvaja po posebnih postopkih opisanih v standardih, ki so prikazani v Preglednica 2.

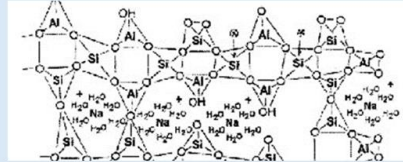
Preglednica 2: Postopki, ki se uporabljajo za analizo različnih lastnosti agregatov

CDW	ANALIZA	POSTOPEK
Agregat (beton, opeka, steklo)	Morfologija, vrsta in oblika agregata	Mikroskopija
	Elementna analiza	XRF
	Določitev mineralnih faz	XRD
	Specifična površina	Površina
	Raztapljanje v alkalnih medijih (reaktivnost geopolimerov)	Si, Al koncentracija v alkalni raztopini z ICP MS
	Določevanje vsebnosti karbonatov	EN 12620, EN 196-2
	Sejalna analiza (finost)	Sita (opcijsko laserska granulometrija za fino frakcijo)
	Vpivanje vode	EN 12620, EN 1097-6
	Gostota in nasipna prostornina	EN 1097-3
	Tlačna trdnost	EN 1097-11
	Težke kovine	Izluževanje
	Kloridi	EN 1744-1, EN 1744-5
	Sulfati	EN 1744-1
	Različne organske spojine (TOC, PCB, PAH)	

2.2. Razvoj InnoWEE geopolimerov

Geopolimeri so anorganski polimeri, pridobljeni z reakcijo alumosilikatov z vodno alkalno raztopino (Slika 12). Spadajo v širši razred kemijsko aktiviranih keramikalijskih, katere so obsežno preučili Davidovits in drugi raziskovalci.

R = ions (K⁺, Na⁺, ...)
n = degree of policondensation
w = bound water
z = 1,2,3...related to the network (< 3 for 3D network)



Slika 12: Kemična zgradba geopolimerov

Šteje se, da je ogljični odtis takih materialov nižji kakor pri Portlandskih cementih. Uporaba gradbenih odpadkov in odpadkov iz rušenja objektov (CDW) v alkalno aktiviranih materialih (AAM; ang. Alkali Activated Materials) in geopolimernih vezivih kot inertni agregat ali kot delno reaktivni material, je bila v zadnjih letih raziskana s spodbudnimi rezultati. AAM / geopolimeri so se izkazali kot perspektivni pri uporabi številnih vrst različnih industrijskih odpadkov in stranskih proizvodov in zdi se, da ponujajo obetavno alternativno možnost recikliranja tudi za CDW-je. Poleg omenjenega so tudi obstojni na visokih temperaturah.

Sestavine InnoWEE geopolimernega veziva

Uporabljen geopolimerni material za izdelavo InnoWEE plošč vsebuje 50 ut% anorganskega recikliranega agregata iz CDW-ja, ali 40 - 50 ut% odpadnega lesa iz CDW-ja. Razvito geopolimerno vezivo z visoko gostoto (HDG), ki je glavna sestavina plošč, temelji na reagentih kot so metakaolin, grobozrnata plavžna žindra, elektrofiltrski pepel, kalijev ali natrijev silikat in anorganski agregati, dobljeni iz CDW. Sestavine zmešane skupaj (npr. z betonskim mešalnikom) v pravih razmerjih bodo ustvarile material, ki zveže pri sobni temperaturi in je utrjen podoben običajni malti ali betonu, odvisno od velikosti agregata (Slika 13).



Metakaolin. Pucolanski material, ki nastane pri kalcinaciji kaolinita (t.j. kitajska glina), minerala mehke gline ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), ki se uporablja predvsem kot dodatek betonu. Mineral segrevamo pri 600-800 °C, nato zmeljemo.



Žindra. Granulirana grobozrnata plavžna žindra je amorfen stranski proizvod, pridobljen med proizvodnjo kovin iz rude in koksa, na splošno bogat s CaO, SiO₂ in Al₂O₃. Dobi se s hitrim hlajenjem žindrine taline pri temperaturi pod 800 °C, s čemer izboljšajo reaktivnost in hidravličnost, da se lahko uporabljajo kot dodatek v betonih.



Elektrofiltrski pepel. Produkt izgorevanja uprašenega premoga ujet na filtrih dimnih plinov peči v elektrarnah. Uporablja se kot pucolanski dodatek ali kot delno nadomestilo portlandskega cementa v betonih. Sestavljajo ga sferični delci med 0.5 in 300 μm, z različnimi komponentami (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, ...). Elektrofiltrski pepel razreda F ima manj kot 7 % vsebnosti CaO.



Raztopine alkalijskih silikatov. Običajno se proizvajajo iz kremenčevega peska, alkalnih karbonatov, kot so natrijev karbonat (Na_2CO_3) ali kalijev karbonat (K_2CO_3), alkalijskih hidroksidov (npr. NaOH , KOH), vode in goriv. Uporabljajo se lahko na več področjih, od konstrukcij (npr. pri premazih za beton in maltah za zidanje) do industrijskih procesov.



Reciklirani agregati (SRM). Anorganski odpadki, ki nastanejo pri selektivnem rušenju stavb, predelani za pridobivanje primernih recikliranih agregatov.



Slika 13: Sestavine anorganskih mešanic HDG

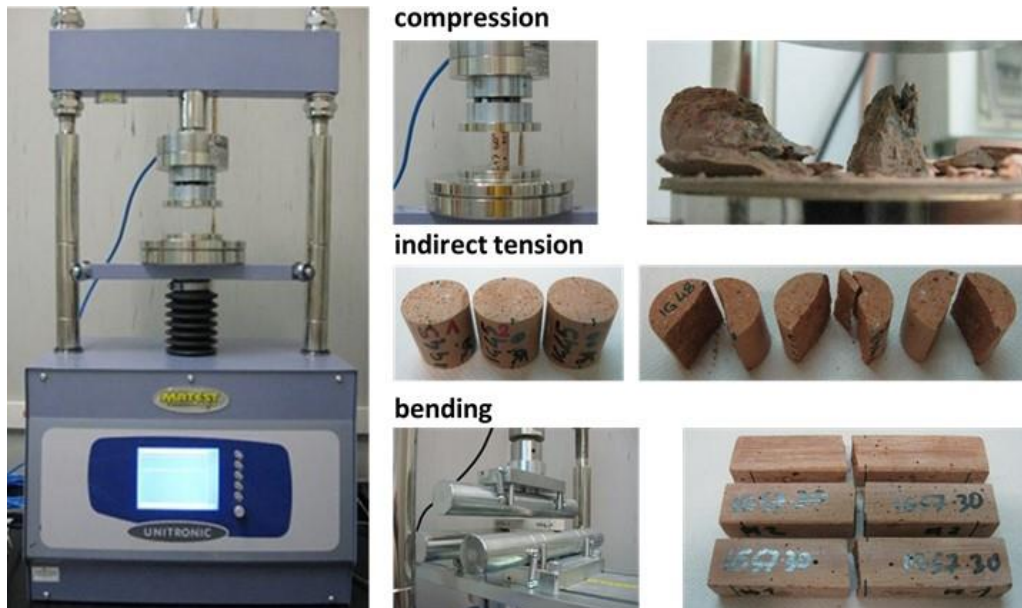
Agregati so bili v mešanici obravnavani kot skoraj inertni materiali kar pomeni, da ne sodelujejo v geopolimerni reakciji. Med anorganske odpadke spadajo beton, malte in žgana glina, ploščice in drugi nenevarni ostanki, pridobljeni s selektivnim rušenjem stavb.

Optimizacija geopolimernega veziva

Značilnosti najbolj obetavnih mešanic so bile preskušane v prototipih plošč, da bi opozorili na morebitne težave, ki niso razvidne iz materialnih vzorcev. Optimizacija vezave je hkrati vključevala doseganje:

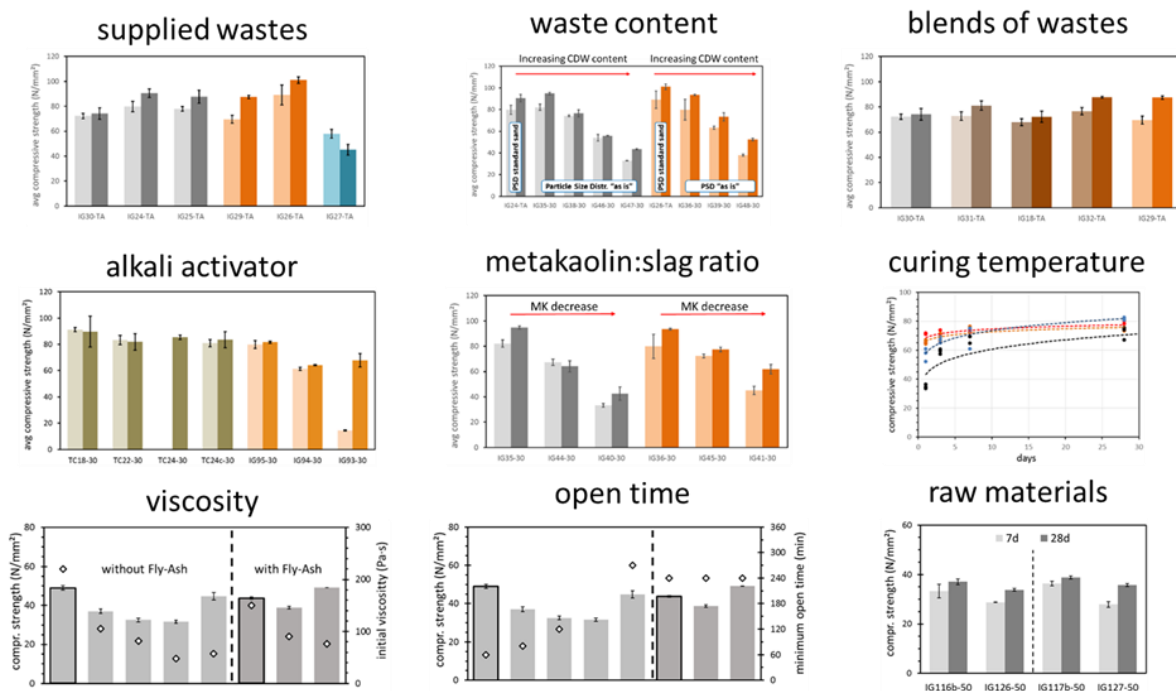
- tehnoloških lastnosti sveže paste, primerne za razpoložljivo pilotno napravo (glede na viskoznost, čas vezanja, itd.);
- mehanskih lastnosti utrjenega materiala (merjeno s tlačno, cepilno in upogibno trdnostjo), ki ustreza kakovosti plošč;
- fizikalnih lastnosti (npr. skrčki pri sušenju) v kombinaciji z mehanskimi zmogljivostmi, primerne za preprečevanje nastanka večine napak na ploščah, kot so izkrivljanje oblike, razpoke, itd.

Preiskava je bila izvedena hevristično in je kombinirala obsežne eksperimentalne preizkuse na vzorcih materialov (Slika 14) in prototipe plošč v realnem merilu.



Slika 14: Preskusna lastnost: mehanska trdnost

Z namenom določitve ustrezne sestave recepture, so bile raziskane številne lastnosti posameznih receptur. Tlačna trdnost je bila ena osnovnih parametrov. Tekom raziskave je bilo sistematično merjeno tudi več drugih lastnosti kot so natezna trdnost, skrčki pri sušenju, gostota materiala, odprta poroznost, viskoznost in čas vezanja.



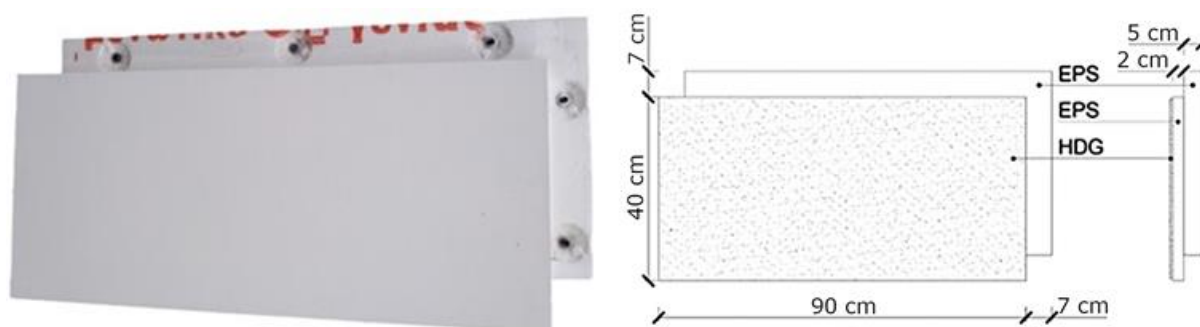
Slika 15: Primeri spremljanih lastnosti HDG-ja

Kot primer (Slika 15) lahko navedemo nekatere raziskane parametre, kot so: vrsta odpadnih snovi, njihovo količino in sestavo mešanic; temperatura med negovanjem, vrsta in količina aktivatorja, razmerje metakaolin/žlindra, količina elektrofiltrskega pepela in porazdelitev velikosti delcev recikliranih agregatov.

2.3. Razvoj plošč

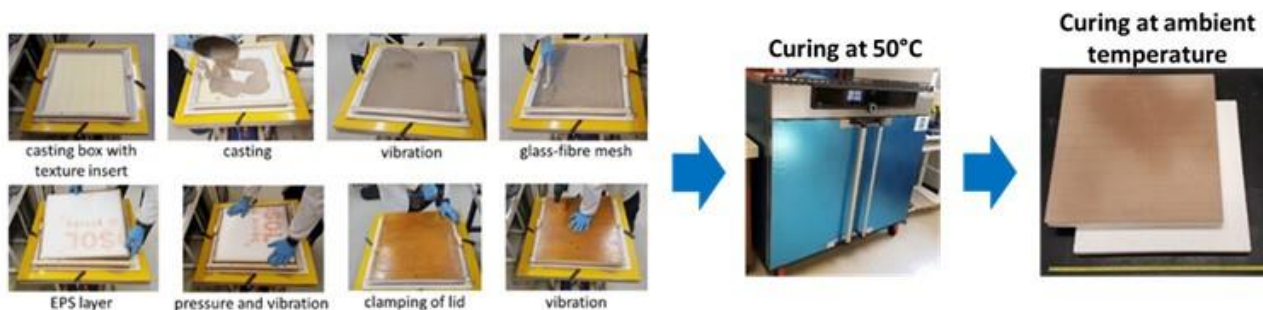
InnoWEE plošče za kontaktne izolativne fasade

InnoWEE plošče za kontaktne izolativne fasade, podobne zunanjim toplotnoizolacijskim sestavljenim sistemom (ETICS) (Slika 16), dimenzij 40 cm × 90 cm in so bile zasnovane kot modularna predizdelana rešitev za zunanjo izolacijo. Plošče so sorazmerno lahke (6.5 kg/plošča, tj. približno 18 kg/m²), sestavljene pa so iz 8 mm debelega sloja geopolimera visoke gostote (HDG), ki pokriva izolacijski sloj iz ekspandiranega polistirena (EPS) debeline 20 + 50 mm. V tanek sloj HDG-ja je vgrajenega 50 ut% agregata iz CDW-ja (drobljen beton, opeka, keramika). Plošče se lahko proizvajajo z različnimi površinskimi teksturami, njihova površina pa je zaščitena s prozornim ali barvnim premazom.



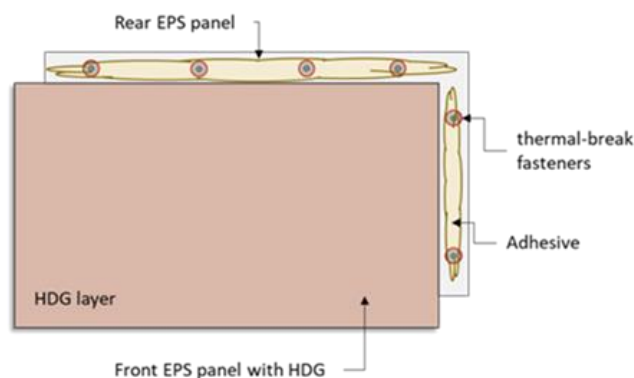
Slika 16: Končna zasnova plošč za kontaktne izolativne fasade

Prvi sloj InnoWEE plošče je izdelan z neposrednim vlivanjem HDG sloja na EPS izolacijsko ploščo. V sloj HDG-ja je bila vgrajena mrežica iz steklenih vlaken, za večjo odpornost plošče na udarce.



Slika 17: Laboratorijska proizvodnja prototipa plošče za kontaktne izolativne fasade

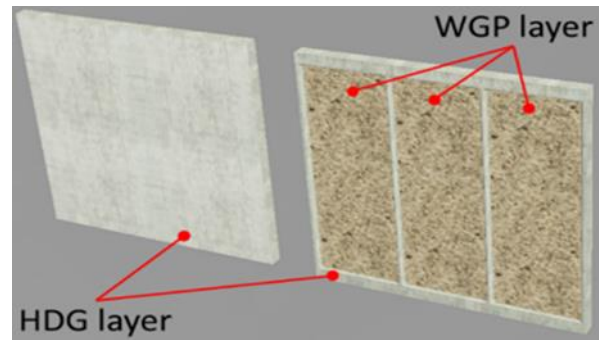
Fasadne plošče se na podlago pritrjujejo z običajnim fasadnim lepilom in sidri (Slika 18). Ocenjena je bila skladnost z zahtevami Eurokoda za obremenitve zaradi potresa in vetra, skupaj z odtržno trdnostjo med posameznimi sloji.



Slika 18: Način pritrjevanja InnoWEE plošč za kontaktne fasade

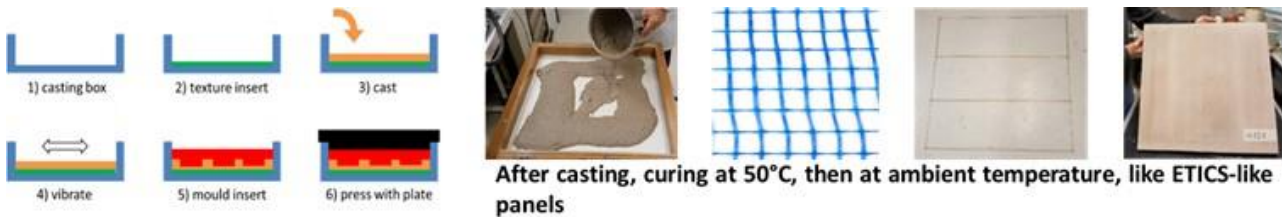
Plošče za prezračevane fasade

InnoWEE plošče za prezračevane fasade (Slika 19) so dimenzij 59,5 cm × 59,5 cm, kar ustreza modularni namestitvi na vsakih 60 cm. Plošče so zahvaljujoč svoji zasnovi relativno lahke (9 kg/plošča, to je približno 25 kg/m²). Sestavljene so iz 8 mm debelega sloja HDG z rebri, med katera so pritrjene lesne geopolimerne plošče (WGP) debeline 7 mm. Lesne geopolimerne plošče so sestavljene iz 40 % neobdelanega lesenega agregata iz gradbenih odpadkov (palete, tesarske plošče, itd.) povezanega z geopolimernim vezivom. Kakor pri InnoWEE ploščah za kontaktne izolativne fasade, se tudi tukaj lahko izvedejo različne teksture površine. Površina pa se lahko zaščiti s prozornim ali barvnim premazom.



Slika 19: Končna zasnova plošč za prezračevane fasade

Izdelava plošče poteka z ulivanjem HDG-ja v kalup, ki omogoča oblikovanje reber. Za večjo odpornost plošče na udarce, se je v sloj HDG-ja vgradila mrežica iz steklenih vlaken in v rebra jeklena vrvica ultra visoke natezne trdnosti (UHTS; ang. Ultra-High Tensile Strength). WGP je bila izdelana posebej in po negovanju HDG sloja prilepljena med rebra. Njen namen je ojačati sloj HDG.



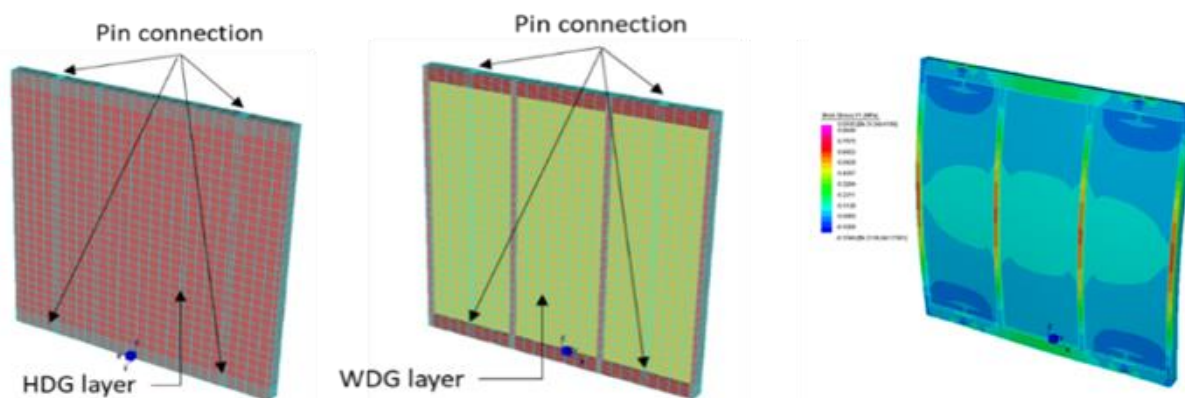
Slika 20: Laboratorijska izdelava protitipa InnoWEE plošč za prezračevane fasade

Plošče je mogoče pritrditi na podokvir ali neposredno na steno s tržno dostopnimi sidri. Sidra se na plošče namestijo z vrtnanjem lukenj v 3 cm debela glavna rebra, bodisi med izdelavo plošč ali na kraju samem.



Slika 21: Sistem pritrjevanja

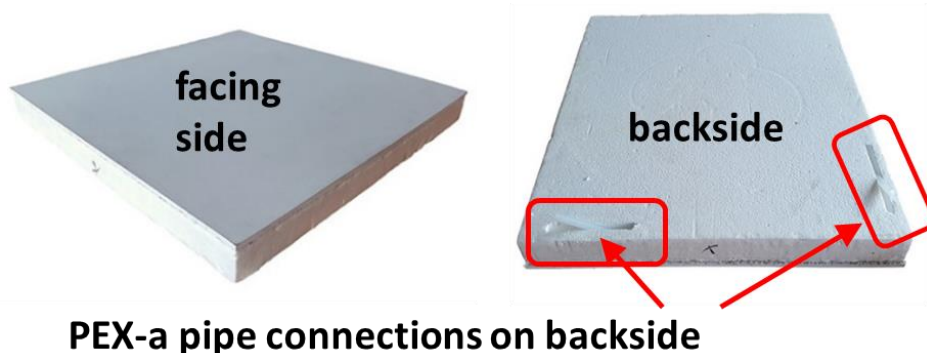
Da bi preverili skladnost razvitih plošč z zahtevami Evrokodov (obremenitve z vetrom in potres), je bil odziv plošč preverjen s 3D modeliranjem po metodi končnih elementov (FEM; ang. Finite Element Method). Poleg tega je bila nosilnost sidrnega sistema eksperimentalno preizkušena po postopku iz standarda ASTM C135.



Slika 22: Ocena odziva plošče na potresno in vetrno obremenitev po metodi končnih elementov

Sevalne stropne plošče

InnoWEE sevalne stropne plošče so dimenzij 59,5 cm × 59,5 cm, da ustrezajo dimenzijam običajnih modularnih spušenih stropov. Teža posamezne plošče je 7,6 kg brez vode in 8,1 kg z vodo. V plošče je vgrajena 6,5 m dolga PEX cev debeline 10 mm. Cev je po plošči napeljana v razmiku 5 cm.

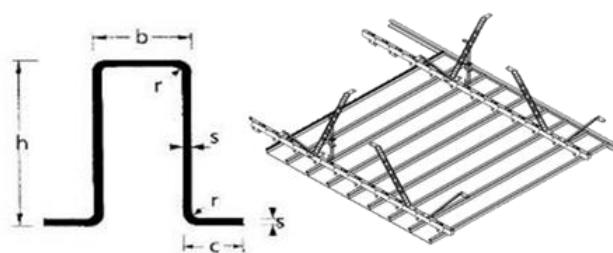


PEX-a pipe connections on backside

Slika 23: InnoWEE sevalne stropne plošče

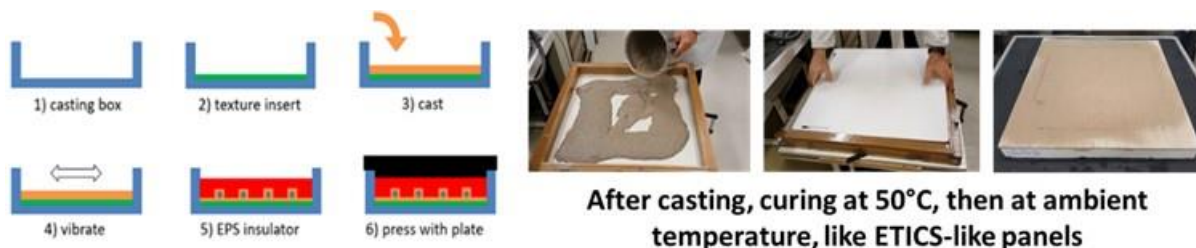
Plošče se namestijo na kovinske profile, ki se uporabljajo za nameščanje običajnih spušenih stropov. Pri izbiri kovinskih profilov je potrebno biti pozoren, da njihova nosilnost ustreza teži InnoWEE sevalnih stropnih plošč.

Povezovanje cevi na zadnji strani plošče je mogoče izvesti s katerim koli sistemom združljivim z PEX cevjo debeline 10 mm.



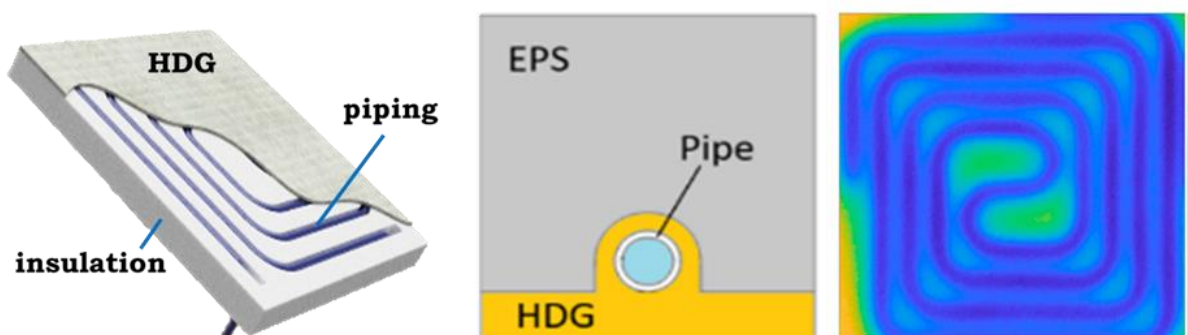
Slika 24: Kovinski stropni profili

Cevi so popolnoma vgrajene v geopolimerni sloj, kar omogoča maksimalen prenos toplote in tako zagotavlja dober temperaturni profil in izjemen toplotni izkoristek, zahvaljujoč toplotni prevodnosti geopolimera, ki znaša $0.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Toplotno izolacijo plošče predstavlja 50 mm debel sloj EPS, ki je homogeno vezan na 6 mm debelo plast HDG-ja. Plošče so izdelane s preprostim postopkom ulivanja geopolimernega veziva na EPS podlago, na katero so predhodno nameščene cevi.



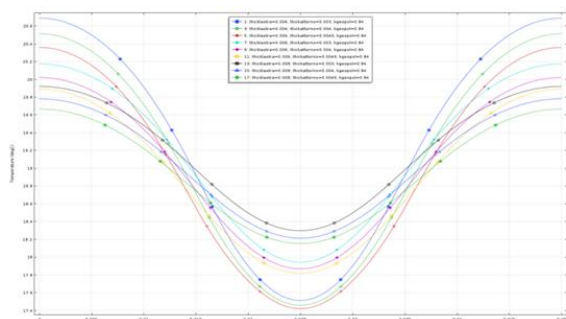
Slika 25: Laboratorijska izdelav prototipov sevalnih stropnih plošč

Izbrana debelina HDG-ja, razmik med cevmi in oddaljenost cevi od površine so bili določeni na podlagi izvedenih številnih simulacij. Izvedene so bile 2 – dimenzionalne parametrične študije in parametrično modeliranje po metodi končnih elementov (FEM).

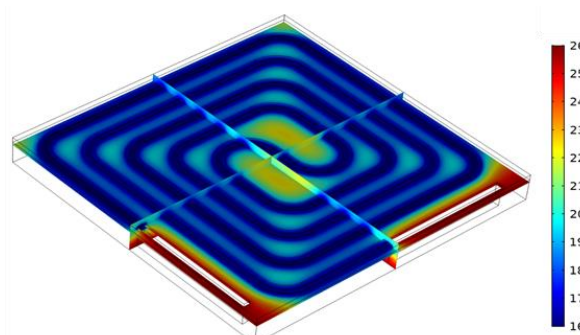


Slika 26: Zasnova InnoWEE sevalnih stropnih plošč

Simulacije FEM so pokazale dobro ujemanje ocenjenih vrednosti spremljanih parametrov z rezultati eksperimentalnih testov.



2D parametric simulations



Full 3D FEM simulations

Slika 27: Izvedene simulacije za zagotavljanje primerne oblikovanja sevalnih stropnih plošč

Lesne geopolimerne plošče (WGP)

Razvite lesno geopolimerne plošče so podobne cementno-ivernim ploščam. Izdelane so iz lesnih sekancev neobdelanega odpadnega lesa (npr. palete, tesarske plošče, itd.), ki so utrjeni z geopolimernim vezivom in stisnjeni v ploščo. Plošče so v primerjavi s komercialnimi cementno-ivernimi ploščami izdelane na sobni temperaturi in imajo zaradi uporabe geopolimernega veziva namesto cementnega hitrejši čas vezanja, saj je geopolimerno vezivo dokaj



Slika 28: Izgled lesno geopolimernih plošč

neobčutljivo na sproščanje lignina. Slednje tudi omogoča uporabo ostankov različnih lesnih vrst pri izdelavi plošč. Pri preverjanju požarne zaščite, spada WGP v razred gorljivosti B.



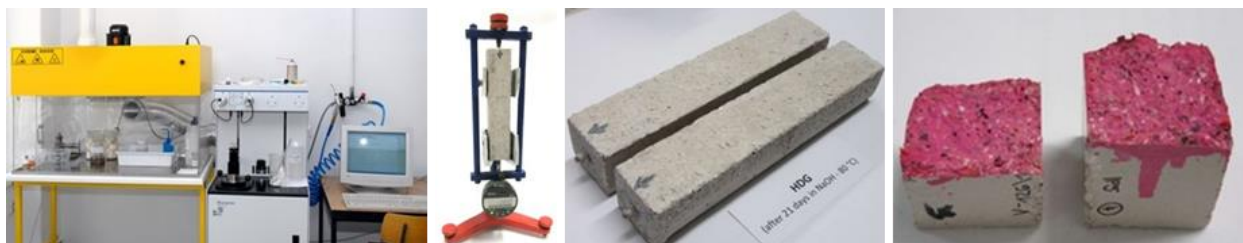
Slika 29: Proces izdelave lesno geopolimernih plošč

2.4. Preskušanje učinkovitosti in trajnosti razvitih plošč v laboratoriju

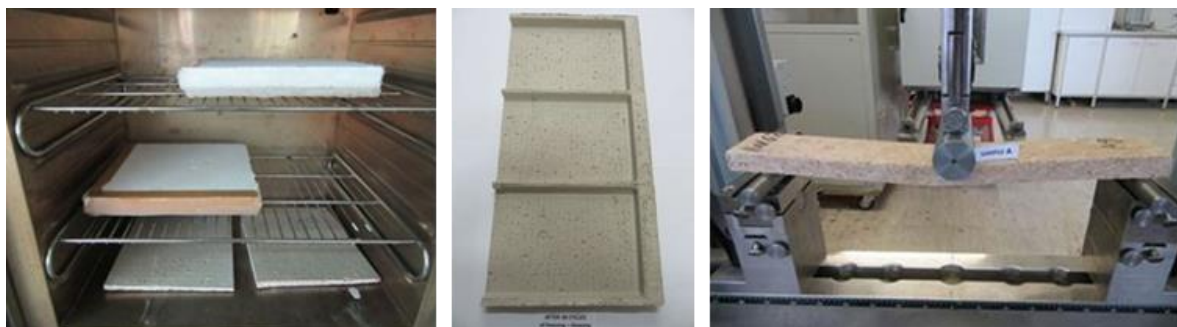
Opravljen je bilo obsežno preskušanje izbranih karakteristik razvitih materialov in plošč, pri čemer je bilo treba upoštevati tudi trajnostne lastnosti, odpornost na udarce (plošče predvidene za zunanjo uporabo) in toplotno zmogljivost.

Ocena trajnosti je vključevala obsežno preskušanje fizikalnih in mehanskih lastnosti zmesi HDG in WG, kot so:

- poroznost;
- vpijanje vode (kapilarni test);
- prepustnost vodne pare;
- odpornost na zmrzovanje in tajanje;
- odpornost na zmrzovanje in tajanje ob prisotnosti soli;
- odpornost na karbonatizacijo;
- alkalno – silikatna reakcija agregata (ASR);
- določanje lahkih organskih spojin (VOC);
- odpornost na termične šoke;
- odtržna trdnost med HDG in EPS slojema (plošče za kontaktne izolativne fasade);
- odpornost na udarce plošč za kontaktne izolativne fasade in plošč za prezračevane fasade;
- upogibna trdnost plošč WG pred in po izpostavitvi ciklom zmrzovanja;
- požarni test WG plošč.



Slika 30: Preskusna oprema in vzorci za preskušanje materiala (Hg-porozimetrija, sprememba dolžine pri ASR testu, odpornost na karbonatizacijo)

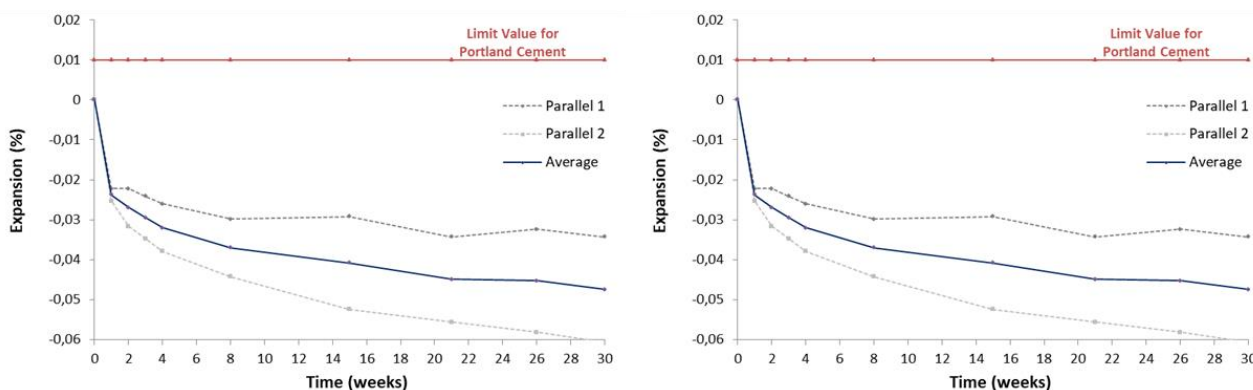


Slika 31: Primeri preskušanja razvitih plošč (določanje avpijanja vode, odpornosti na zmrzovanje in tajanje, upogibni test)

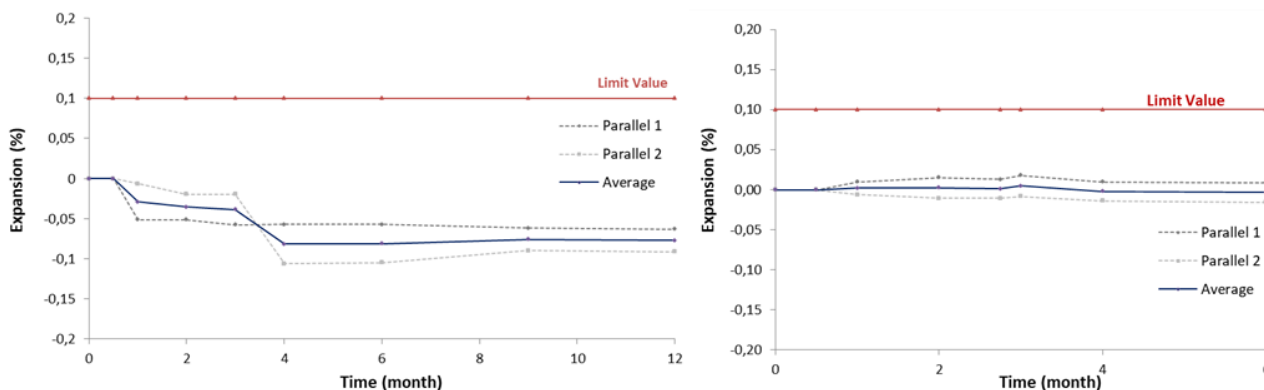
Preskušanje je bilo najprej izvedeno na laboratorijskih vzorcih plošč in kasneje še na vzorcih plošč iz pilotne proizvodnje. Večina rezultatov preskušanja lesno geopolimernih plošč je bilo primerljivih z vrednostmi parametrov določenih na komercialno dostopnih cementno-ivernih ploščah.

Pri določevanju vpijanja vode na ploščah za kontaktne izolativne fasade je bila vrednost nekoliko višja (1.02 kg/m^2) kakor je predpisana po ETAG 004 ($< 1.00 \text{ kg/m}^2$). V primeru povišanih vrednosti vpijanja vode ETAG 004 predpisuje obvezno določevanje odpornosti materiala na zmrzovanje in tajanje. Plošče so bile izpostavljene 30 ciklom zmrzovanja in tavanja in po končanem testu je bilo potrjeno z vizualno kontrolo, da med izpostavo niso nastale vidne poškodbe.

Z namenom izboljšanja odpornosti plošč na udarce je bila v sloj HDG-ja vgrajena mrežica, ki je izboljšala odpornost plošč na udarce iz predhodno določene cone III v cono II kar pomeni, da so plošče primerne za uporabo v območjih, kjer lahko pride do udarcev s težkimi predmeti ali brcanja, vendar mora višina postavitve plošč omejevati moč udarcev.



Slika 32: Sulfatna odpornost vzorcev iz laboratorijske proizvodnje (levo) in iz pilotne proizvodnje (desno) – preskušano v skladu s standardom ASTM C 1012/C1012 M)



Slika 33: Alkalno silikatna reakcija vzorcev iz laboratorijske proizvodnje (levo) in iz pilotne proizvodnje (desno) – preskušano v skladu s standardom ASTM C 227-10)

Kemijska odpornost razvitega materiala je bila preverjena s preskušanjem alkalno silikatne reakcije (ASR), odpornosti na karbonatizacijo in odpornosti na sulfate. Rezultati preiskav so pokazali, da je material odporen na karbonatizacijo in na prisotnost kemijskih raztopin sulfatov in alkalij, katere ne povzročajo širjenja materiala preko dovoljenih vrednosti predpisanih v standardih za materiale na cementni osnovi (Slika 32 in Slika 33).

Rezultati preskušanja laboratorijsko in pilotno proizvedenih vzorcev so pokazali dobro medsebojno korelacijo, kar dokazuje, da je bil postopek pilotne proizvodnje dobro načrtovan.

Preskušanje toplotne učinkovitosti

Modularni sevalni elementi so bili preskušani v izoliranem prostoru z prostornino 130 m³, ki vsebuje preskusno sobo velikosti 40 m³, oblikovano v skladu s standardom EN 14240. Preskušanje toplotne moči se je izvedlo v stacionarnih pogojih: moč, ki jo oddaja ali absorbira sevalna plošča, uravnotežijo toplotne lutke ali aktivni sistem. Merjenje časovne konstante se izvede s prehodno metodo, s katero se na površino plošče namesti stopenjsko ogrevanje in izmeri toplotni odziv.

Za plošče za kontaktne izolativne fasade je toplotna odpornost določena z napravo Taurus TLP 800 z vročo ploščo v skladu s standardom UNI EN ISO 8302 (ocenjena napaka 3%). Izmerjeni so bili štirje vzorci:

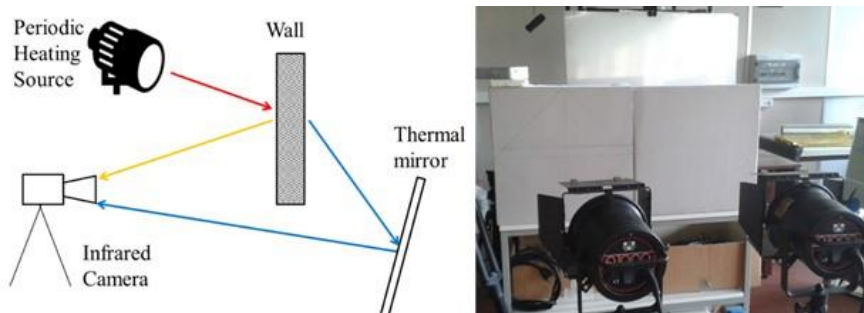
- dva vzorca plošč za kontaktne izolativne fasade, 26A (AMS serija 6 2018/06/26) in 26B (CNR-ICMATE serija 2018/08/01),
- dve EPS plošči (nominalne debeline 50 in 20 mm).

Preglednica 3: Rezultati toplotnih preskusov vzorcev plošč za kontaktne izolativne fasade

Vzorec	Debelina [mm]	Toplotna odpornost pri 10°C [m ² K ⁻¹ W ⁻¹]	Toplotna odpornost pri 30°C [m ² K ⁻¹ W ⁻¹]
26A	79.1	2.04	1.88
26B	78.4	2.05	1.89
Durosol #1	50.0	1.51	1.40
Durosol #2	19.6	0.61	0.56

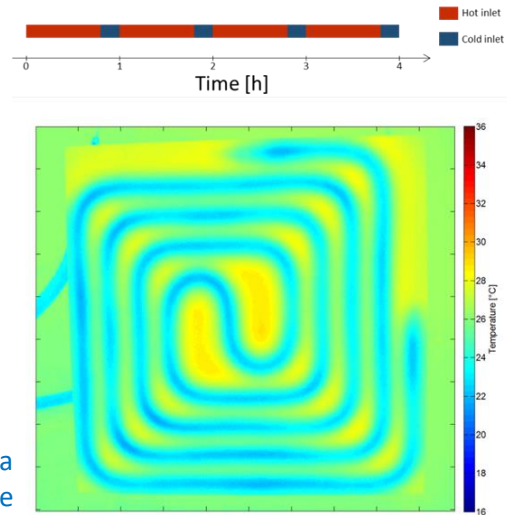
Pri preskušanju toplotnih lastnosti plošč za kontaktne izolativne fasade, standard ISO 13786: 2018 opisuje način izračuna toplotnih dinamičnih značilnosti sten. Trenutno ni na voljo nobenih standardov za laboratorijsko merjenje teh količin. Zato smo predlagali metodo za testiranje plošč InnoWEE.

Izmerjeni temperaturni profili toplotnega zaporedja so centrirani, pomanjšani in opremljeni s sinusoidnim modelom. Časovni premik se izračuna kot časovna razlika med največjo vrednostjo, zabeleženo na sprednji in zadnji strani vzorca. Končni rezultat je povprečje povprečja paralelk. Z izmerjeno vrednostjo je mogoče rezultate razširiti na obdobje 24 ur.



Slika 34: InnoWEE metoda za preskušanje toplotnih lastnosti plošč za kontaktne izolativne fasade

Uporabil se je nov preskus za preverjanje trajnosti geopolimernih sevalnih plošč, ki temelji na prehodnih razmerah. Obremenitveni test je izveden z izmeničnim prečrpavanjem tople in hladne vode skozi ploščo v določenih časovnih ciklih, s čemer se simulira dejanska uporaba plošče. Infrardeča termografija in vizualno spremljanje sta pokazala, da je bilo stanje plošče pred in po ponovitvi sto ciklov nespremenjeno.



Slika 35: Obremenitveni test za sevalne plošče

2.5. Certificiranje razvitih izdelkov

V skladu s predpisi EU je pridobitev oznake CE obvezna za proizvode zajete v Uredbi o gradbenih proizvodih (CPR; ang. Construction Products Regulations) za katere obstajajo harmonizirani standardi (hENs). To je lahko težava za novo razvite produkte za katere ni na voljo harmoniziranih standardov.

Proizvajalci inovativnih izdelkov, ki niso zajeti v hENs in jih proizvajalec želi dati na trg v državah članicah EU, lahko oznako CE pridobijo z Evropsko tehnično oceno (ETA; ang. European Technical Assessment), kjer se definira tudi Ocena in preverjanje nespremenljivosti lastnosti (AVCP; ang. Assessment and Verification of Constancy of Performance).

Organ za tehnično ocenjevanje (TAB; ang. Technical Assessment Body) izda Evropsko tehnično oceno na podlagi Evropskega ocenjevalnega dokumenta (EAD), ki ga je sprejela Evropska organizacija za tehnične ocene (EOTA). V omenjenem postopku se obravnavajo bistvene zahteve podane v CPR:

1. mehanska odpornost in stabilnost,
2. varnost pred požarom,
3. higienska in zdravstvena zaščita ter zaščita okolja,
4. varnost pri uporabi,
5. zaščita pred hrupom,
6. varčevanje z energijo in ohranjanje toplote,
7. univerzalna graditev in raba objektov,
8. trajnostna raba naravnih virov.

ETA tako vključuje informacije o predvideni uporabi in lastnostih izdelka.

V primeru, da za določen gradbeni proizvod ni na voljo harmoniziranega evropskega standarda (hEN), je treba upoštevati postopek za pridobitev ETA na podlagi EAD. V kolikor EAD ne obstaja, je potrebno zaprositi EOTA za pripravo in izdelavo novega EAD. Proizvajalec zaprosi za ETA pri TAB, TAB pa obvesti EOTA in po potrebi pripravi seznam ustreznih bistvenih značilnosti, ki jih je treba obravnavati v EAD. Pri EOTA skupina zainteresiranih TAB, opredeli ustrezne bistvene značilnosti v skladu z osnovnimi zahtevami iz CPR. Pripravljen EAD se obravnava v okviru EOTA, dokler se vsi komentarji ne obravnavajo na zadovoljiv način. ETA je izdana in vključuje podatke o predvideni uporabi in lastnostih izdelka. Po izdaji prvega ETA se EAD objavi in se nadalje uporablja kot usklajena tehnična specifikacija (podobno kot usklajeni standard); omogoča pridobitev oznake CE.

Izdelke je mogoče dati na trg tudi z nacionalnim postopkom ocenjevanja, ki je v pristojnosti držav članic, in se lahko razlikujejo med različnimi državami. V primeru nacionalne tehnične ocene je treba upoštevati nacionalno zakonodajo, vendar s postopkom pridobitev oznake CE ni mogoča.

3. Pilotni obrat in nadgradnja laboratorijske proizvodnje novih plošč

Za proizvodnjo plošč InnoWEE HDG je bila potrebna ustrezna proizvodna linija. Grška družba AMSolutions je izvedla poglobljeno analizo potreb in zahtev ter projektirala pilotno proizvodno linijo. Metodologija 6 σ (šest sigma) je bila uporabljena za zagotovitev najboljše mogoče zasnove in učinkovitega proizvodnega procesa.

3.1. Pilotni obrat – glavne značilnosti

Najsodobnejšo, najpreprostejšo in najpravilnejšo opredelitev izraza pilotni obrat lahko povzamemo, kot sledi:

Pilotni obrat je prilagodljiv predkomercialni proizvodni sistem, ki uporablja laboratorijske rezultate nove tehnologije, da bi nadgradil laboratorijsko proizvodnjo in/ali proizvedel majhne obsege izdelkov, ki temeljijo na novi tehnologiji, zlasti z namenom spoznavanja nove tehnologije.

Z zgornjo preprosto razlago lahko določimo uporabo in glavne cilje pilotnega obrata, ki so večplastni, saj se tako pridobljeno znanje nato uporabi za projektiranje proizvodnih sistemov polne proizvodne zmogljivosti in tržnih izdelkov ter določitev nadaljnjih raziskovalnih ciljev, poleg tega pa je to znanje odlična podlaga za sprejemanje odločitev o naložbah.

Treba pa se je zavedati, da pilotni obrat od svojega začetka do končne izvedbe zahteva zapleten in zahteven razvoj. Investitor mora upoštevati vsa tveganja, povezana s proizvodnjo in odvisna od narave izdelka, katerega laboratorijsko proizvodnjo želimo nadgraditi. Poleg tega je treba obravnavati tudi finančna (strošek pilotnega obrata) in seveda tudi okoljska vprašanja, ki bi se lahko pojavila med delovanjem obrata. Ta naložba postane še težja, saj je treba v številnih primerih v projektiranje in razvoj pilotnega obrata vključiti zapletene proizvodne procese ter le-te prilagoditi. Zato je v večini primerov prožnost proizvodnih linij, ki omogočajo prilagajanje glede na potrebe vsakega proizvodnega in preizkusnega procesa, temeljni in ključni dejavnik, ki ga je treba resno obravnavati.

Posledično je jasno, da konstruiranje pilotnega obrata ni preprosta naloga, poleg tega pa je vzdrževanje takega obrata drago in zahtevno brez zelo izkušenih in visokokvalificiranih delavcev.

3.2. Opredelitev strategije nadgradnje laboratorijske proizvodnje

Nadgradnja laboratorijske proizvodnje plošč iz geopolimera visoke gostote (HDG) je bila vse prej kot lahka naloga. Od samega začetka je bilo jasno, da bo treba za doseganje želenih rezultatov sodobne metodologije in tehnike prilagoditi.

Zato se je AMS na podlagi izkušenj, pridobljenih iz prejšnjih pilotnih obratov, odločil za proizvodnjo plošč HDG uporabiti metodologijo 6 σ , ki jo je v osemdesetih letih prejšnjega stoletja razvila in predstavila družba Motorola, pri čemer je metodologija znana pod kratico DMAIC: **definiraj, meri, analiziraj, izboljšaj, nadzoruj; (Define, Measure, Analyse, Improve, Control)**.

Preprosto povedano, metodologija DMAIC predstavlja »postopek, ki temelji na konkretnem primeru in se uporablja za izboljšanje in/ali optimiziranje in/ali nadgradnjo procesov ter na koncu za proizvodnjo izdelkov z NIČ napakami«.

Definiraj (ang. Define): Prvi korak je določitev vseh zahtev za izdelke in proizvodnjo, ki posledično določajo zahteve in okvir projektiranja. Ta korak je izjemno pomemben, saj te zahteve usmerjajo projektantski tim v smislu postopkov in tehnik, ki zagotavljajo varen razvoj končne zasnove bodisi proizvodne linije bodisi izdelka ter na koncu izvedbo pilotnega obrata.

Meri (ang. Measure): Ko je prvi korak zaključen ter so vse potrebne proizvodne linije in oprema postavljene in preizkušene, se v pilotnem obratu proizvede določena količina vzorčnih izdelkov ter preizkusijo njihove lastnosti. Namen te faze ni le preizkusiti izdelkov, ampak tudi delovanje proizvodne linije in opreme. Zato je treba na podlagi začetnih preizkusnih rezultatov v preizkusnem oz. nastavitvenem obdobju (obdobju »poskusov in napak«) določiti najboljšo mogočo nastavitvev proizvodnih linij, ki zagotavlja najvišjo kakovost izdelka.

Analiziraj (ang. Analyze): V celotnem preizkusnem obdobju (»poskusov in napak«) se vsi rezultati zberejo in analizirajo v smislu resnosti, ponovljivosti in kakovosti, nato pa se pripravi baza statističnih podatkov, katere cilj je določiti področja, na katerih se pojavljajo napake, in sicer za vsak vidik procesa povečanja proizvodne zmogljivosti.

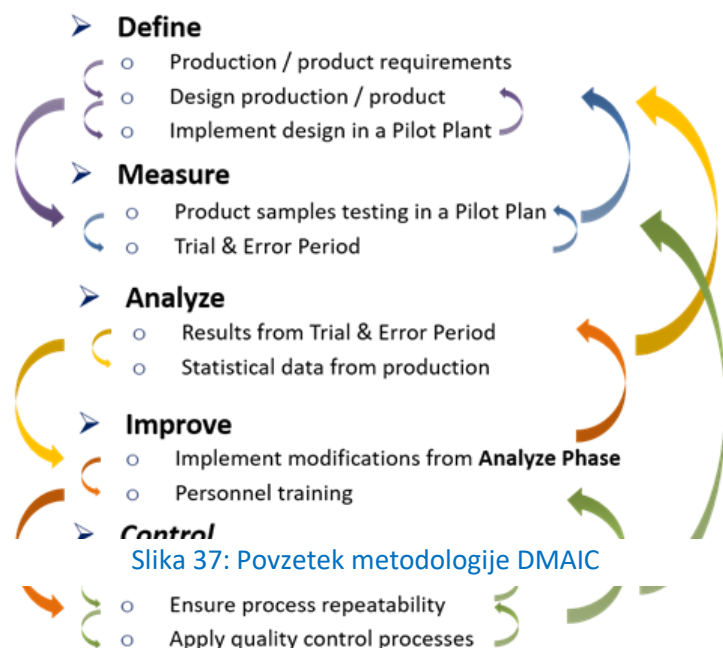
Izboljšaj (ang. Improve): Rezultati faze analiziranja in narava napak, izpustitev, zakasnitev, težav s kakovostjo, ki bi lahko nastale, itn. predstavljajo vhodne podatke za projektantski tim in/ali vodstveni tim bodisi pri preoblikovanju določenih delov ali elementov oziroma procesov v proizvodni liniji ali po potrebi tudi samega končnega izdelka, nato se začne novo obdobje »poskusov in napak«, ki sledi enakim procesom kot v fazah »meri« in »analiziraj«. Tak cikel lahko ponavljamo tako dolgo, da se doseže želeni izdelek in/ali proces. Ko je vse na zadovoljivi ravni, usposobimo osebe za upravljanje procesov.

Nadzoruj (ang. Control): V tej fazi se določijo merila kakovosti za končni izdelek, v celotnem procesu se izvajajo politike zagotavljanja kakovosti, da se doseže stalna ponovljivost vseh procesov, ki bodo na koncu uporabljeni za proizvodnjo izdelka, tako da bo proizvajalec vsako serijo izdelka izdelal v skladu z istimi standardi kakovosti.

Metodologija DMAIC je izjemno dinamična in lahko bi rekli, da gre za samoučenje o proizvodnem procesu zaradi nenehnih povratnih zank med seboj povezanih učinkov med koraki procesa, katerih cilj je izboljšati napake, zakasnitve ali izpustitve na vsaki stopnji procesa.



Slika 36: Metodologija DMAIC



Slika 37: Povzetek metodologije DMAIC

3.3. Potek strategije nadgradnje laboratorijske proizvodnje

Za vsak proces nadgradnje laboratorijske proizvodnje je potreben časovni načrt, pomemben vidik pa je tudi določitev slabosti in prednosti izdelka, saj to posledično določa vsak korak v procesu povečanja proizvodne zmogljivosti.

Da bi bolje razumeli izdelke InnoWEE, smo izvedli več razprav in sestankov z razvijalci veziva HDG ter določili naslednje:

- materiale, potrebne za proizvodnjo veziva HDG;
- laboratorijsko raven proizvodne metodologije;
- približno trajanje procesov (na laboratorijski ravni);
- nekatere za procese značilne zahteve, npr. viskoznost veziva, vlažnost surovin itn.;
- določeno potrebno opremo;
- glavne značilnosti izdelka, npr. oblika, geometrija, dimenzije itn.

Pred začetkom proizvodnje je bilo še vedno veliko težav, povezanih s proizvodnjo v pilotnem obratu, ki jih je bilo treba rešiti. Spodaj navajamo nekaj najpomembnejših težav, ki jih je bilo treba nujno določiti in rešiti:

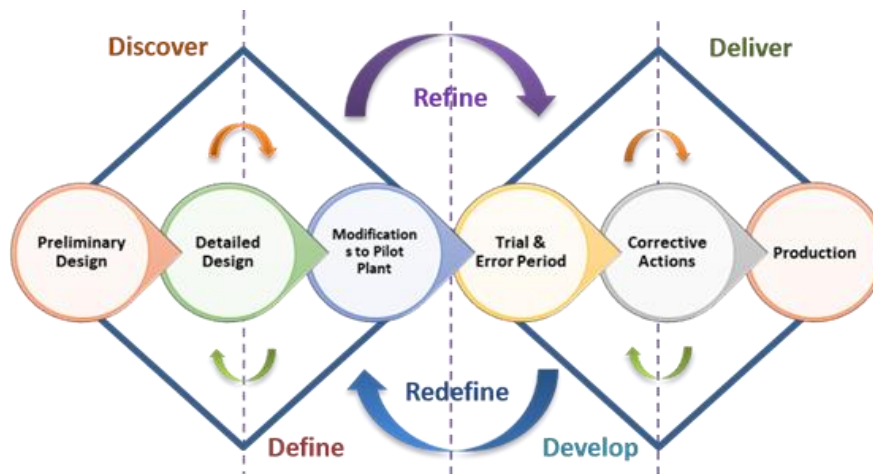
- pomožni procesi in energenti (kateri drugi procesi bi bili potrebni za proizvodnjo veziva HDG, npr. stisnjen zrak, dušik, skladiščna oprema itn.);
- ključne naloge (katere naloge so določale proizvodne čase in jih ni bilo mogoče prilagoditi);
- naloge, ki vplivajo na druge proizvodne naloge (katere naloge so vplivale na druge proizvodne naloge in kakšen je bil ta vpliv);
- razmerja med procesi (npr. kakšen bi bil učinek, če bi se en proces ustavil, in kako bi to vplivalo na druge proizvodne procese);
- vključevanje osebja (koliko delavcev potrebujemo za izvedbo proizvodnje veziva HDG, delovne postaje in kako lahko izboljšamo storilnost delavcev med proizvodnjo);
- vprašanja varnosti in zdravja pri delu;
- pogoji za proizvodnjo (kaj je potrebno za zagon proizvodnje, npr. skladiščni prostor za surovine, atmosferski pogoji na proizvodni liniji itn.);
- najpomembneje je bilo določiti morebitne skrite napake, ki bi se že lahko pojavljale in ključno vplivale na proces nadgradnje laboratorijske proizvodnje pilotnega obrata.

Izkazalo se je, da sta uspešna določitev vseh parametrov za vse omenjene težave in iskanje rešitev za še neznan proces nadgradnje laboratorijske proizvodnje zelo zahtevna procesa, zlasti zaradi števila in narave neznanih dejavnikov in parametrov, ki jih je bilo treba upoštevati.

Zato smo se odločili znova uporabiti metodologijo 6σ in iskati rešitve za nabor orodij ter prilagoditi orodje 4D oziroma Double Diamond in tako celoten proces razdelili na šest faz:

1. idejni projekt (kjer smo določili vse težave, povezane z zasnovo);
2. projekt za izvedbo (kjer smo natančno projektirali celotno proizvodnjo in opremo);
3. prilagoditev v pilotnem obratu (vse prilagoditve projekta za izvedbo so bile uporabljene v pilotnem obratu);
4. obdobje »poskusov in napak« (preizkušanje proizvodne linije in proizvodnih procesov);
5. popravni ukrepi (vsi popravni ukrepi, ki so bili izvedeni na proizvodni liniji in pri procesih, kot so bili določeni v obdobju »poskusov in napak«);
6. kot zadnja faza – dejanska proizvodnja veziva HDG.

Z orodjem 4D smo razvili zaporedje interaktivnih ukrepov med proizvodnimi fazami, ki se nenehno izvajajo v povratni zanki ukrep-preizkušanje-popravni ukrep-proizvodnja-preizkušanje.



Slika 38: Šest faz proizvodnega procesa

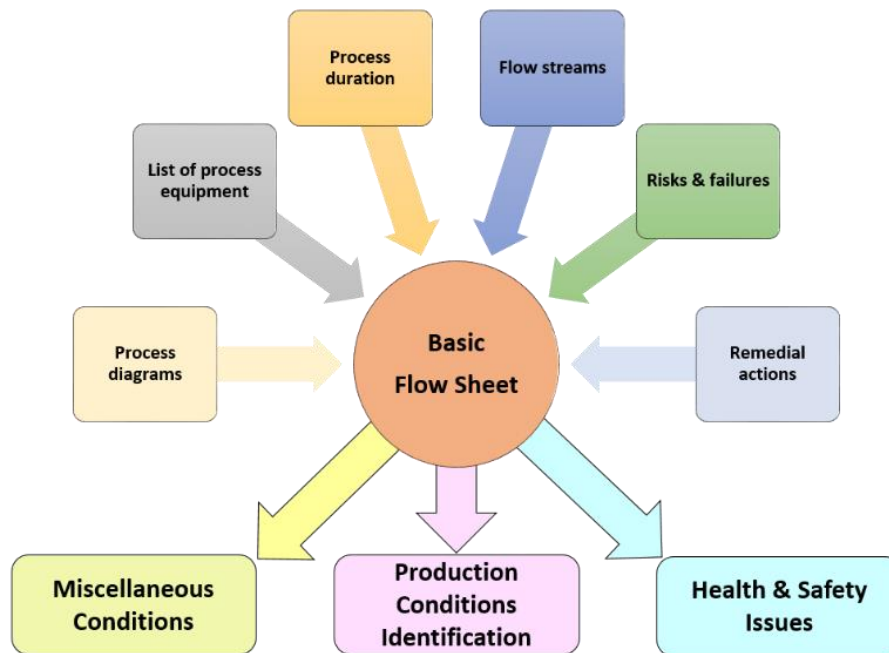
3.4. Idejni projekt

Osnovni diagram poteka

Najpomembnejši dokument za celotno zasnovo proizvodne linije v pilotnem obratu je osnovni diagram poteka. V njem so zbrani vsi podatki in rezultati iz proizvodnje na laboratorijski ravni, ki so združeni v bloke ali polja, ki kažejo njihova medsebojna razmerja in potek proizvodnje, kot bo opisano v nadaljevanju.

Osnovni diagram poteka projektantom omogoča določitev naslednjega:

- potrebna proizvodnja in njeno trajanje,
- oprema, ki se uporabi,
- potrebni energenti,
- morebitni pomožni procesi,
- vloga osebja,
- predpogoji za proizvodnjo,
- za zasnovo specifične zahteve,
- dejavniki, ki vplivajo na zasnovo,
- morebitna vprašanja varnosti in zdravja pri delu,
- politika zagotavljanja kakovosti,
- mesta ustavitve proizvodnje (kje in kako se proizvodnja ustavi v primeru okvare ali izdelkov z napako),
- popravni ukrepi, ki se izvedejo v primeru kakršne koli okvare.



Slika 39: Struktura idejnega projekta

Poudariti je treba, da osnovni diagram poteka predstavlja celovit načrt v okviru procesa nadgradnje laboratorijske proizvodnje.

Ne glede na to, kaj bi se zgodilo v prihodnosti, npr. če bi se investitor odločil dodatno nadgraditi laboratorijsko proizvodnjo veziva HDG, bi sledili procesu iz osnovnega diagrama poteka.

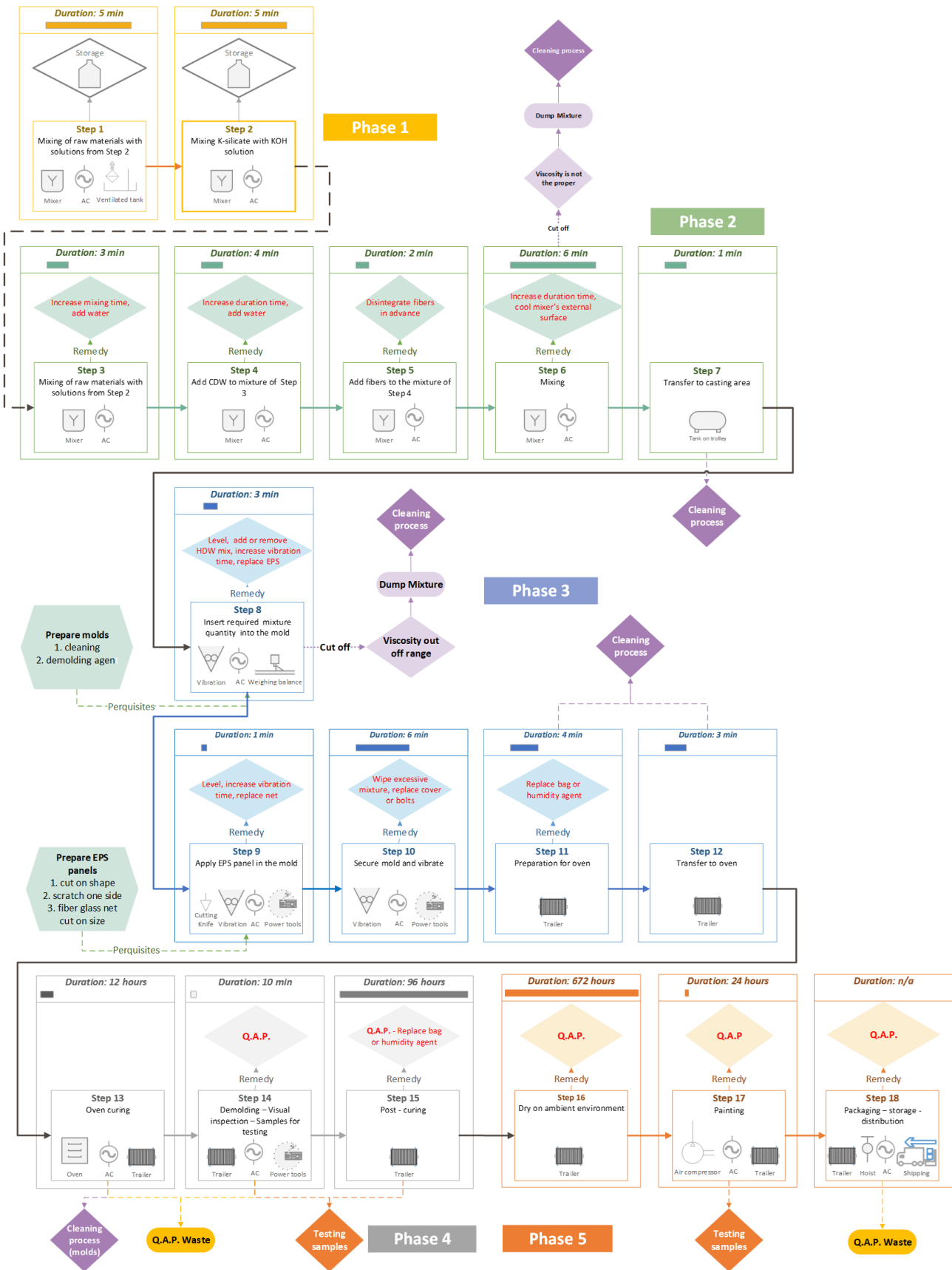
Zato velja, da je diagram generični dokument in da bi bila vsakršna proizvodnja veziva HDG močno odvisna od procesov, opisanih v njem.

Analiza osnovnega diagrama poteka

Kot že omenjeno, osnovni diagram poteka sledi značilnemu formatu blokov/polj, ki navajajo informacije za vsak posamezen proces.

V spodnjem osnovnem diagramu poteka (Slika 40) lahko preprosto vidimo naslednje:

- na vrhu je navedeno ocenjeno trajanje procesa;
- v večjih blokih spodaj je navedena oprema; energenti in pomožni procesi, ki se uporabljajo med proizvodnim procesom;
- zahteve pred zagonom proizvodnje;
- mesta ustavitve proizvodnje v primeru napake ali okvare;
- in najpomembnejše – popravni ukrepi za vsak proces.



Slika 40: Osnovni diagram poteka

Preglednica 4: Primeri okvar v proizvodnem procesu in načini za njihovo reševanje

Mogoča okvara in/ali tveganje	Popravni ukrep
Teža zmesi ni skladna z recepturo.	Zmes dodajte v kalup oziroma jo odstranite iz njega.
Površina zmesi je neenakomerna.	Uporabite zidarsko žlico in zmes izravnajte in/ali podaljšajte čas vibriranja.
Ob vibriranju se na površini zmesi ne pojavljajo zračni mehurčki.	Povečajte hitrost vibriranja, dokler se na površini ne pojavijo zračni mehurčki, oziroma podaljšajte čas vibriranja.
Napake na stiroporni plošči – EPS (odlomljeni robovi, neobrušena stran itn.)	Zamenjajte stiroporno ploščo – EPS.
Videti je, da zmes ni prave viskoznosti.	Izvedite preizkus viskoznosti.
Proces umerjanja ni v pripravljenosti.	Odljite zmes.
Nizka viskoznost	Dodajte vodo.
Visoka viskoznost	Sorazmerno povečajte količine surovin.
Zmes ni homogena.	Podaljšajte trajanje mešanja, da dosežete popolno homogenizacijo. (Če to ni navedeno že v koraku 3.)
Zmes postaja med mešanjem vroča.	Zmanjšajte obrate na minuto mešalne lopatice in/ali shladite zunanjo površino mešalnika.
Barva na površini je neenakomerna.	Sledite Politiki zagotavljanja kakovosti (QAP).
Barva ni pravilno nanesena.	
Barva ni ustreznega odtenka.	
Barva se ne posuši v predvidenem času.	

V naslednjem bloku osnovnega poteka so rezultati te analize v obliki povzetka preglednice 5, npr.:

- zahteve za opremo in kako te zahteve vplivajo na njeno zasnovu;
- tveganja v trenutnem procesu;
- minimalne zahteve in vprašanja, ki jih je treba obravnavati za energente, ki se uporabljajo v določenem procesu;
- objekti in storitve, potrebni za nemoteno izvajanje tega procesa;
- minimalne zahteve glede varnosti in zdravja v procesu;
- vpliv tega procesa na druge proizvodne procese in potrebe, ki jih je treba upoštevati v fazi projekta za izvedbo.

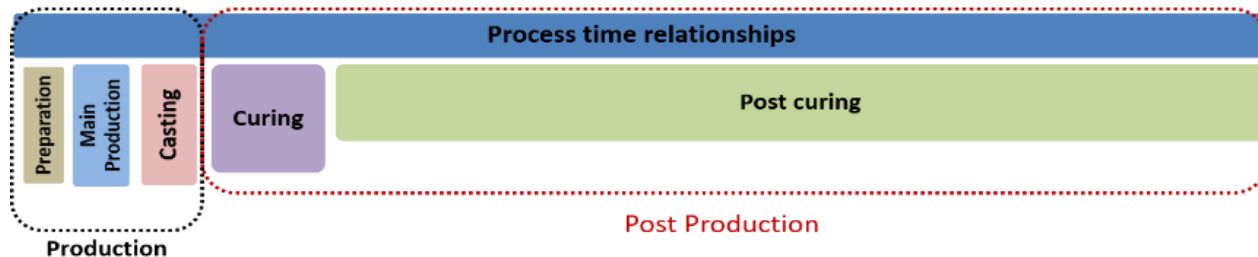
Preglednica 5: Zahteve proizvodnje linije

Naloga	Vprašanja, ki jih je treba upoštevati
Izbira ustreznega vsebnika za shranjevanje trdnih surovin (npr. posode, rezervoarji, silosi, vreče itn.)	Masa
	Teža
	vpijanje vode
	Odpornost proti rjavenju
	Toksičnost
	Granulometrija – morfologija
	Druge posebne kemične lastnosti
	Prašenje
	Aglomeracija
Atmosferske razmere	Temperatura
	Vlaga
	Zračni pretok – prezračevanje
Vzdrževanje – čiščenje	Preprostost dostopa
	Preprostost upravljanja
Skladiščne kapacitete	Po seriji – na zahtevo
Manipuliranje	Dvigala, žerjavi, viličarji, palete itn.
Pomožna oprema in storitve	Podtlak za čiščenje
	Stisnjeni zrak za čiščenje
	Oskrba z vodo za čiščenje
	Odvod sanitarne vode
Drugi vključeni procesi	Zagotavljanje kakovosti (NZK)
	Preizkusni vzorci
Osebnna varovalna oprema	V skladu z načrtom varnosti in zdravja pri delu
<i>Dejavniki, ki vplivajo na zasnovo</i>	<i>Geometrija skladiščnega prostora</i>
	<i>Vrsta surovin</i>
	<i>Atmosferske razmere</i>

Simulacije proizvodnje in razmerja med ključnimi procesi

Iz izidov, povzetih iz zgoraj predstavljenih preglednic, ter z različnimi simulacijami in modelirnimi matrikami nam je uspelo:

1. določiti kritične poti celotnega procesa in razviti diagram PERT, ki kaže razmerja med njimi;
2. izdelati diagram delovnih postaj, pri čemer vsak zaposleni natančno ve, kaj je treba storiti in kako;
3. analizirati razmerja med proizvodnimi procesi (kako in v kolikšnem obsegu vsak proces vpliva na drugega).



Slika 41: Razmerja med trajanjem procesov

Predvideni izid je bil:

- določiti pogoje in omejitve proizvodne linije;
- sprejeti pogoje in omejitve za pilotni obrat;
- ugotoviti okvare in tveganja med samo proizvodnjo.

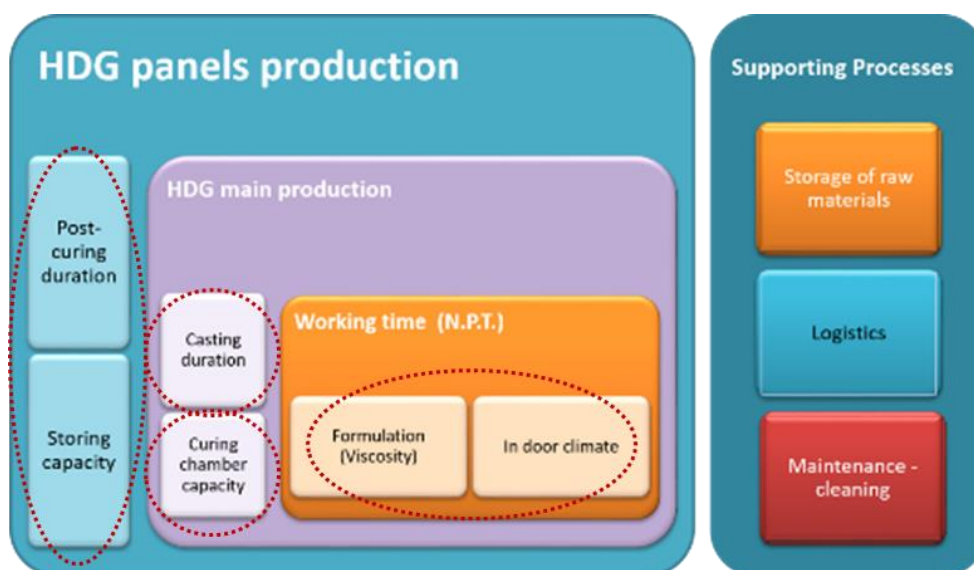
Za zaključek smo določili in poudarili najpomembnejše dejavnike in parametre, ključne za nadgradnjo laboratorijske proizvodnje plošč HDG.

Zaradi narave veziva HDG je bil kot najpomembnejši dejavnik neto proizvodni čas (NPT). Povedano drugače, čas, ko je vezivo HDG mogoče preoblikovati, preden se strdi. Ta čas je bil določen v trajanju 120 min, v poznejših fazah projekta pa ga je inštitut CNR dodatno izboljšal. V vseh laboratorijskih preizkusih je bilo dokazano, da je NPT odvisen od:

- viskoznosti recepture (bolj ko je vezivo viskozno, krajši je NPT);
- razmer v hali v času proizvodnje (toplejša temperatura zraka v hali med proizvodnjo pomeni krajši NPT).

Ulivanje je bilo dejansko najzahtevnejši proces tako v smislu trajanja kot virov. Za ulivanje in nego plošče za kontaktne izolativne fasade je na primer potrebnih vsaj 5 minut, medtem ko je za ploščo za prezračevano fasado potrebnih vsaj 7 minut.

Fazi nege in dodatne nege zahtevata veliko več časa za dokončanje kot drugi procesi, npr. ploščo za kontaktne izolativne fasade je mogoče izdelati v skupaj 20 min (do litja), medtem ko je za dokončanje procesa nege in dodatne nege za isto ploščo potrebnih 108 ur (tj. 6480 min).



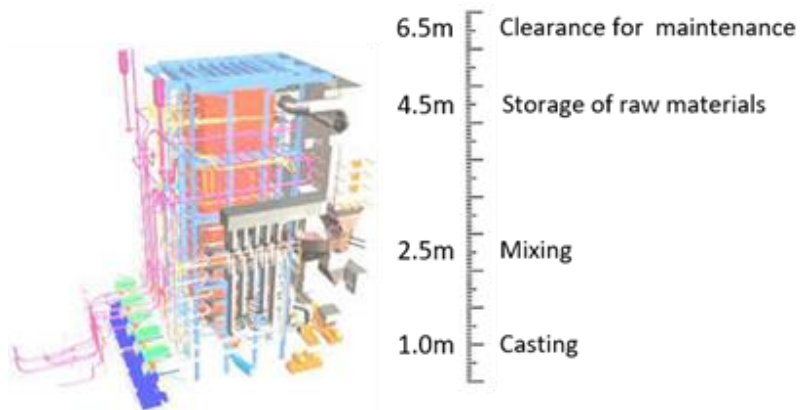
Slika 42: Razmerja med ključnimi proizvodnimi procesi

Ta pogoj resno vpliva na način proizvodnje v pilotnem obratu. V tem primeru je treba delovanje pilotnega obrata zasnovati v serijskem proizvodnem načinu (proizvodnja plošč v serijah), in ne v kontinuiranem načinu (neprekinjena proizvodnja). Poleg tega je stranski učinek celotnega procesa nadgradnje laboratorijske proizvodnje obsežen vpliv na logistiko proizvodnje. Za velike količine proizvedenih plošč bi potrebovali večje peči oziroma večjo opremo za nego, kakor tudi večje skladiščne kapacitete za poznejšo nego, zaradi česar je treba zagotoviti ravnovesje med procesi, vse te parametre pa je treba upoštevati v fazi proizvodnje.

Koncept projektiranja nadgradnje proizvodne linije

Za proizvodnjo poltekočih (v obliki veziva) materialov se običajno uporabljata dve različni metodologiji proizvodnje:

1. Gravitacijska oziroma stolpna proizvodnja, pri kateri so surovine postavljene v skladiščne prostore ena nad drugo in obdelane na dnu skladiščnih prostorov, da se izdela končno vezivo. To metodo je inštitut AMS uspešno implementiral v okviru projekta LEEMA, ki uporablja metodologijo, ki je zelo podobna, a ne enaka tisti, ki jo uporablja InnoWEE.



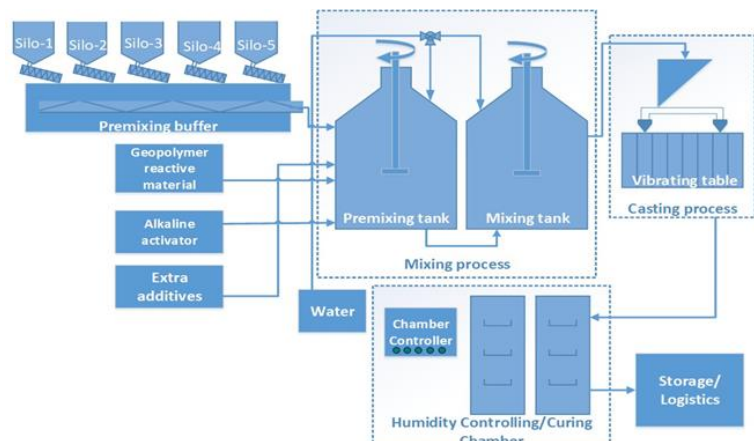
Slika 43: »Stolpna« oziroma »gravitacijska« izvedba obrata



Slika 44: Proizvodna linija pri projektu LEEMA

2. Modularna zasnova, pri kateri so moduli postavljeni na različne lokacije ali območja v pilotnem obratu in tvorijo proizvodno linijo, pri čemer se v vsakem modulu izvaja ločen proces, za katerega je modul programiran.

Za proizvodnjo veziva HDG smo pri InnoWEE izbrali modularno zasnovo. Pri odločitvi smo izhajali iz spoznanj v okviru projekta za izvedbo.



Prva omejitev pilotnega obrata AMS je nadgradnja tehnologije (TUPP) ne je potrebna za zasnovo stolpa (kot je

**Slika 45: „Modular“
production line concept**

bila višina. Pilotni obrat za omogoča višine 7 metrov, ki prikazano na Slika 43 zgoraj).

Tudi če bi bila zadostna višina za pilotni obrat v stolpni izvedbi, te možnosti ne bi izbrali. Potrebovali smo namreč prožno proizvodno linijo, ki bi omogočala hitro in preprosto prilagoditev opreme in/ali procesov, česar pa stolpni pilotni obrat ne omogoča. Poleg tega je bilo zaradi negotovosti proizvodnje veziva HDG (ker tehnologija ni potrjena v okviru industrijske serijske proizvodnje, kar bi omogočilo zbiranje podatkov o obnašanju in delovanju linije) očitno, da bodo take prilagoditve in spremembe potrebne. Zato (kot se je pozneje tudi izkazalo) je bila pozneje potrebna vrsta prilagoditev za zagotovitev optimalnega delovanja proizvodne linije, ki so nam omogočile proizvodnjo bodisi v načinu serijske bodisi načinu kontinuirane proizvodnje.

Z izkušnjami iz projekta LEEMA in stolpnega pilotnega obrata, ki je bil uporabljen pri tem projektu, smo vedeli, da je bil tako za upravljanje kot vzdrževanje proizvodne linije potreben preprost dostop do proizvodne linije, česar pa pri projektu LEEMA nismo zagotovili, zato je bilo upravljanje in vzdrževanje stolpnega pilotnega obrata zelo zahtevno.

Zaradi modularne zasnove upravljanje proizvodne linije temelji predvsem na avtomatizaciji, ki je nujna zaradi narave procesov, zaradi česar je stopnja človeškega posredovanja v proizvodnem procesu zmanjšana na najmanjšo mogočo raven, kar posledično izboljša nadzor in zmanjša število zastojev, napak ali izpustitev med samo proizvodnjo.

Koncept »modularne« zasnove

Na začetku projekta InnoWEE in po prejemu rezultatov iz idejnega projekta je bila prvotna zamisel pilotni obrat zgraditi modularno v načinu za proizvodnjo ene serije, pri čemer bi bila ena serija 350 kg.

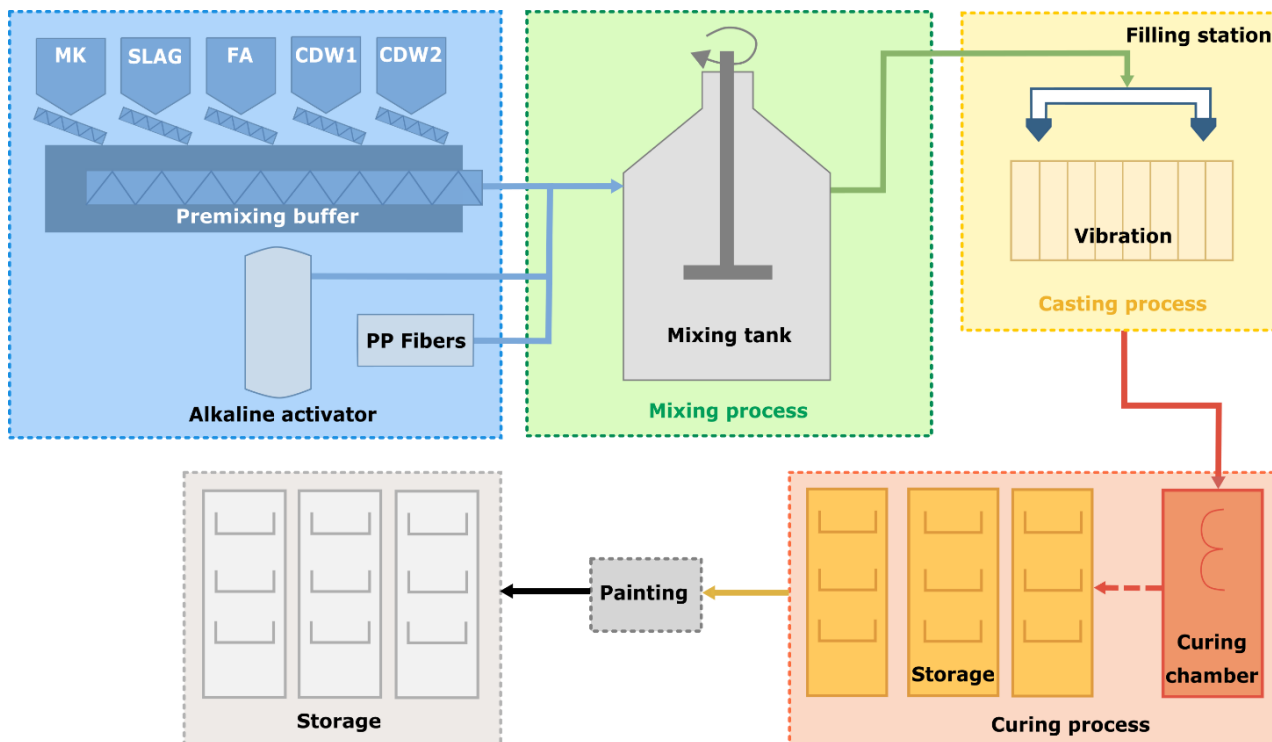
Rezultati iz projekta za izvedbo so pokazali naslednje:

- v 3. modulu ni bil potreben predhodni mešalnik;
- 2. modul ni bil potreben;
- najpomembnejše spoznanje je bilo, da proces čiščenja ni ustrezno obravnavan oziroma rešen. Omeniti je treba, da je čiščenje zelo pomemben proces med proizvodnjo HDG, saj je ustrezno čiščenje mešalnikov, črpalk in cevi potrebno, da preprečimo zamašitve ali poškodovanje opreme zaradi hitrega strjevanja veziva HDG.

Zato je novi in končni koncept proizvodne linije v pilotnem obratu naslednji:

- odločili smo se za modularno delovanje glede na omejitve TUPP, npr. gabaritne omejitve, geometrija prostora itn.;
- 2. mešalnik je bil prilagojen in se uporablja kot sekundarna proizvodna linija v primeru okvare glavnega mešalnika;
- uporabljena metodologija proizvodnje predpostavlja proizvodnjo do 700 kg veziva HDG na serijo (± 60 – 80 plošč);
- če zgoraj navedeno kapaciteto serije preračunamo na en dan proizvodnje (8-urna izmena), je kapaciteta pilotnega obrata do 2800 kg (± 240 – 320 plošč);
- takšna nastavitvev po potrebi omogoča delovanje v kontinuiranem načinu proizvodnje;
- večina procesov (skoraj 80 %) je avtomatiziranih oziroma polavtomatiziranih;
- tako je človeško posredovanje med samo proizvodnjo minimizirano.

Vseeno pa je treba poudariti, da nadgrajeno delovanje pilotnega obrata, npr. štiri serije na dan, v okviru TUPP ni bilo izvedljivo, saj je prineslo druge stranske učinke, zlasti v logistiki proizvodnje, npr. v procesih nege in dodatne nege zaradi velike količine proizvedenih plošč, kot je razloženo zgoraj.



Slika 46: Modularna proizvodnja HDG

Pilotna proizvodnja vključuje naslednje korake: priprava materialov (stiroporne plošče – EPS, kalijev silikat), predhodno mešanje (predhodno mešanje kalijevega silikata s polipropilenski vlakni, polnjenje trdnih surovin v zalogovnik mešalnika, prenos trdnih surovin v glavni mešalnik), mešanje, ulivanje, nega, dodatna nega, sestavljanje plošč, barvanje in čiščenje. Podrobnosti o nadgrajeni proizvodnji vseh treh vrst plošč HDG si lahko ogledate v videu na spodnji povezavi: <https://www.youtube.com/watch?v=OTSx2FAvktc>.



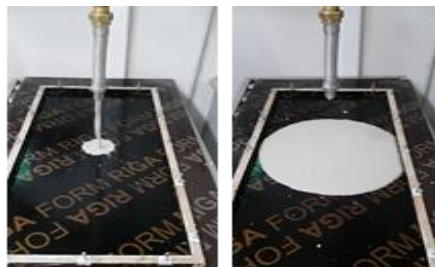
Slika 47: Predhodno mešanje trdnih surovin v zalogovniku mešalnika



Slika 48: Polnjenje kalijevega silikata v glavni mešalnik



Slika 49: Mešanje polipropilenskih vlaken s kalijevim silikatom v glavnem mešalniku



Slika 50: Polnilna postaja



Slika 51: Ulivanje



Slika 52: Komora za nego

Delovanje TUPP je bilo nad pričakovanji, saj je bilo v zelo natančno določenem času izdelanih več kot 400 plošč HDG (plošč za kontaktne izolativne fasade, plošč za prezračevane fasade in sevalnih stropnih plošč). Proizvodnja plošč HDG je sorazmerno preprosta, če upoštevamo specifične proizvodne pogoje in omejitve, povezane z lastnostmi materialov (predvsem čas obdelave in nege HDG).

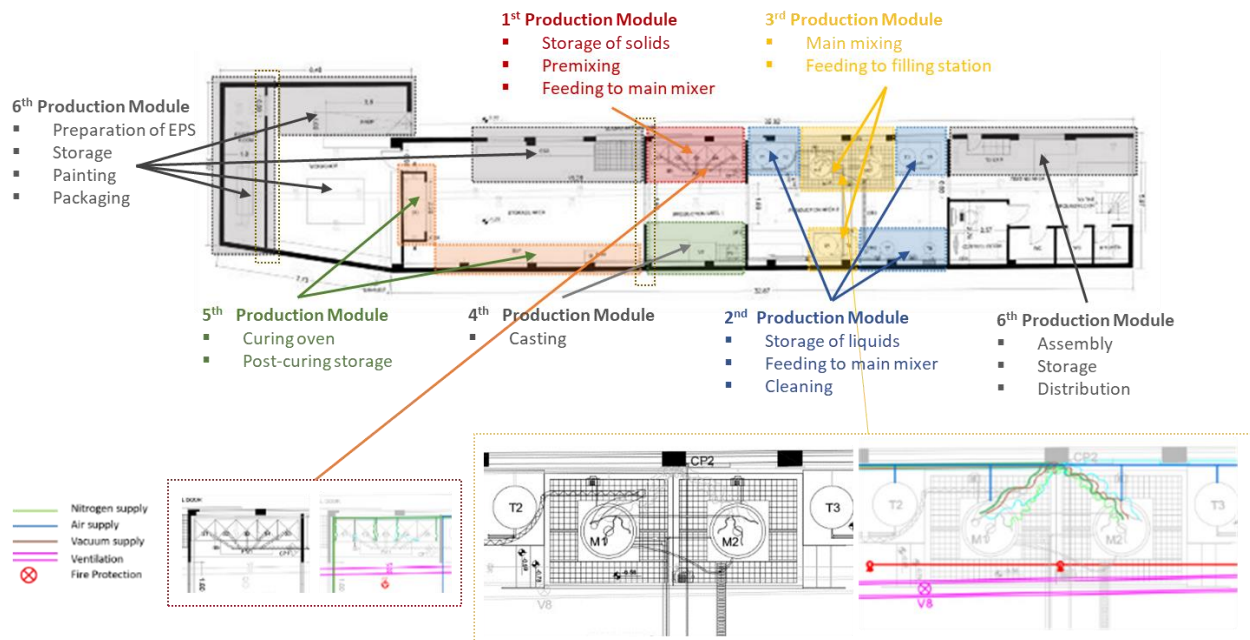


Slika 53: Nadgrajena proizvodnja plošč za kontaktne izolativne fasade

3.5. Projekt za izvedbo

Pilotni obrat za nadgradnjo tehnologije (TUPP)

Pilotni obrat AMS je 22 km severno od Aten v predmestju Acharnes in se razteza na 552 m².



Slika 54: Razporeditev modulov TUPP

Pilotni obrat je opremljen, kot sledi:

1. vsa potrebna infrastruktura (elektrika, informacijsko modeliranje gradbenih objektov – BIM, oskrba z vodo in deionizirano vodo, odvod sanitarne vode, oprema za gašenje, napreden prezračevalni sistem, distribucija plinov in omrežje za zaznavanje napak, komprimirani zrak itn.);
2. pomožni sistemi (sistemi za pomožno električno napajanje, kot so sistem za neprekinjeno napajanje (UPS) in generatorji/električni agregati, namenski strežniki za nadzor informacijskega modeliranja gradbenih objektov – BIM, spremljanje in nadzor sistemov itn.);
3. popolnoma opremljen laboratorij za široko paleto preizkusov;
4. širok nabor strojev in opreme, npr. mešalniki, transportni trakovi, rezervoarji, polžni transporterji, motorji, prostor za barvanje itn.

TUPP je bil razdeljen na šest različnih modulov, pri čemer 1. modul omogoča skladiščenje trdnih surovin ter vse procese, ki vključujejo trdne surovine, kot so predhodno mešanje in polnjenje v glavni mešalnik. 2. modul omogoča skladiščenje tekočih surovin ter vse procese, ki vključujejo tekoče surovine, kot so polnjenje v glavni mešalnik in čiščenje. Srce pilotnega obrata je v 3. modulu, kjer se izvajata glavno mešanje in transport veziva HDG v polnilno postajo. 4. modul je namenjen izključno litju, saj je to najzahtevnejši proces proizvodnje v smislu delovne sile in virov. Peč za nego (sušenje) in velik skladišni prostor za dodatno nego izdelanih plošč sta v 5. modulu, medtem ko so vse ostale dejavnosti, ki niso povezane s proizvodnjo veziva HDG, kot so priprava stiropornih plošč – EPS, lesa, sestavljanje, barvanje embalaže, izvajajo v modulu št. 6.

Za podrobno razumevanje zasnove vsakega modula, so v posnetku zaslona 1. modula prikazane nekatere storitve, ki so bile določene in prilagojene zahtevam vsakega modula.

Simulacije in modeliranje proizvodne linije

Ko gre za delovanje pilotnega obrata v modularnem načinu je treba že v fazi projektiranja zagotoviti, da bo proizvodna linija delovala po pričakovanjih, pri tem pa ne bo negativno vplivala na druge procese oziroma ne bo neskladna s predpisi, ki bi lahko veljali zanjo. Najpomembnejše pa je, da je med delovanjem varna za osebe in okolje.

Zato smo z dovršeno programsko opremo (Pipe flow) izvedli serijo simulacij in modeliranj vseh ključnih procesov v proizvodnji. Simulacije so vključevale:

1. simulacijo polnilne linije tekočih surovin (cevovod in črpalke);
2. simulacijo vroče in mrzle vode za proizvodnjo veziva HDG (cevovod, črpalke in grelniki);
3. simulacijo procesa mešanja (obnašanje cevovoda, mešalnih lopatic in črpalke);
4. simulacijo dovoda dušika, ki se uporablja za skladiščenje trdnih surovin (za zagotovitev prilagojene atmosfere v silosu za preprečevanje onesnaženja, vlage itn.);
5. simulacijo celotnega delovanja črpalke, ko delujejo istočasno;
6. na koncu pa verjetno najpomembnejšo simulacijo procesa čiščenja celotne proizvodne linije, ki je določila parametre in omejitve, ki omogočajo, da se proizvodna linija ves čas ohranja v delujočem stanju.

Prilagoditve zasnove proizvodne linije in opreme

Med projektiranjem proizvodne linije smo proizvodno linijo in TUPP ter pripadajočo opremo prilagodili zahtevam proizvodnje veziva HDG. Na primer:

- prilagojen je bil glavni mešalnik (dvakrat);
- dodan je bil zalogovnik mešalnika;
- polnilni polži so bili nastavljeni na pravo višino;
- tehtnice so bile preoblikovane in umerjene;
- programirljivi logični krmilniki so bili reprogramirani (trikrat – za optimizacijo procesov);
- razvita je bila nova tehtnica za glavni mešalnik;
- razvita je bila bolj dovršena polnilna celica z natančnostjo 10 g.

V skupnem smo pred preizkusnim obdobjem (poskusi in napake) izvedli več kot 200 prilagoditev obstoječe linije. Izvajanje prilagoditev TUPP se je začelo v maju 2018, ko je AMS zagnal proizvodnjo plošč HDG v okviru projekta InnoWEE.



Slika 55: Časovnica prilagoditev zasnove proizvodne linije in opreme

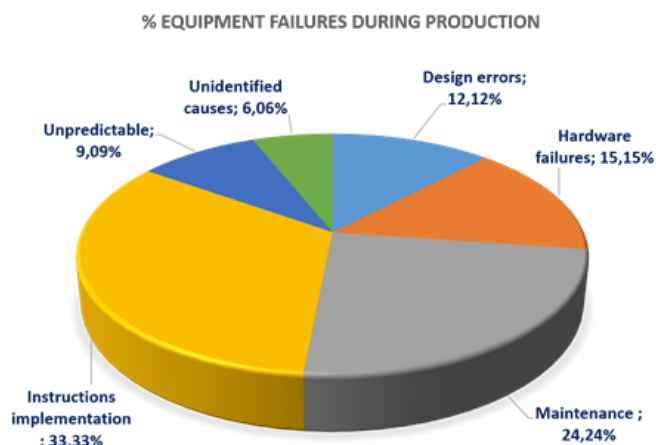
3.6. Analize in izboljšave – proizvodni podatki

Proizvodnja – statistični podatki

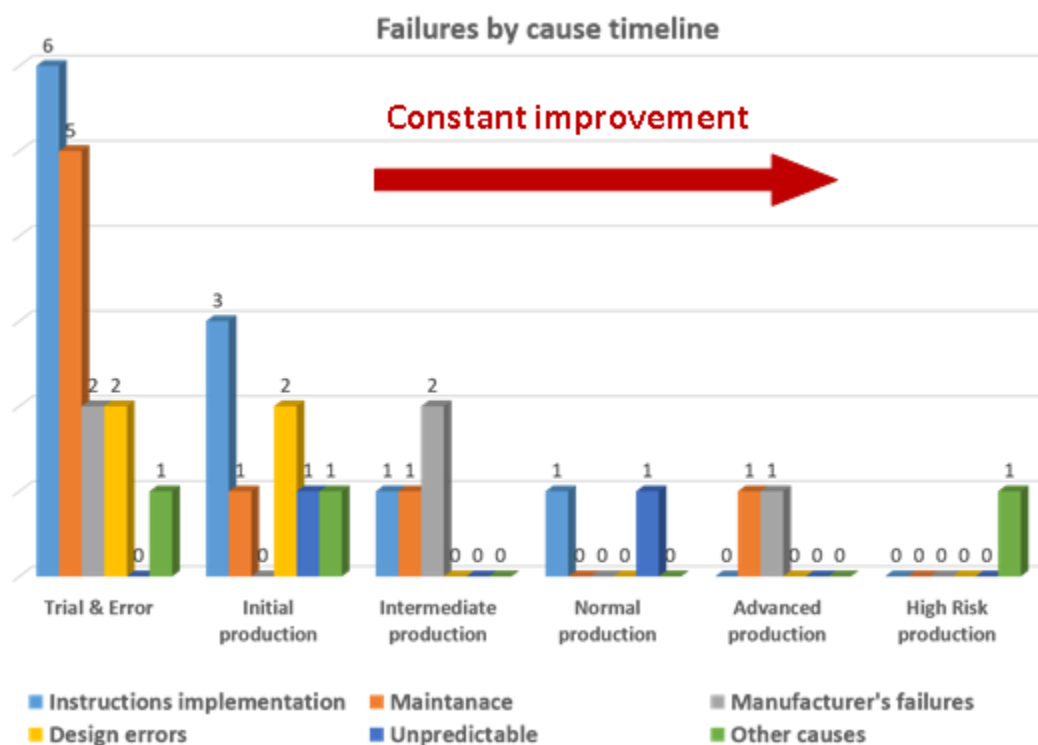
Ena ključnih točk v metodologiji 6σ je, kot je navedeno zgoraj, zbiranje podatkov. Ti podatki, ki so bili zbrani v vseh proizvodnih procesih (Slika 56), kažejo:

- 57,57 % (19 okvar) – človeško posredovanje (izvajanje navodil 11, kar predstavlja 33,33 % okvar, in pomanjkljivo vzdrževanje 8, kar predstavlja 24,24 % okvar);
- 12,12 % (4 okvare) – napake zasnove;
- 15,15 % (5 okvar) – okvare proizvajalčeve strojne opreme;
- 9,09 % (3 okvare) zaradi nepredvidljivih ali drugih vzrokov, kot so lokalni izpadi elektrike v predmestju Acharnes;
- 6,06 % (2 okvari) – vzrokov ni bilo mogoče določiti, nanašata pa se na okvare komponent.

Nadaljnja analiza teh podatkov je pokazala, da se v proizvodnih fazah nenehno uvajajo izboljšave, in sicer prek faze »poskusov in napak« do proizvodne faze z velikim tveganjem. Skoraj 84,8 % okvar se je zgodilo v obdobju izvajanja nastavitve pilotnega obrata (faza »poskusov in napak«, začetne serije in serije polizdelkov), 6,06 % okvar pa med normalno proizvodnjo plošč HDG.



Slika 56: Distribucija mehanskih okvar ali okvar opreme



Slika 57: Časovnica okvar glede na vzrok

Poleg tega smo med analizo nastalih okvar opazili, da je bilo 64,5 % okvar majhnega pomena in le 7,75 % okvar z velikim tveganjem (omeniti je treba, da so se zgodile med splošnim izpadom elektrike zaradi vremenskih razmer po celotnem mestu v fazi proizvodnje).

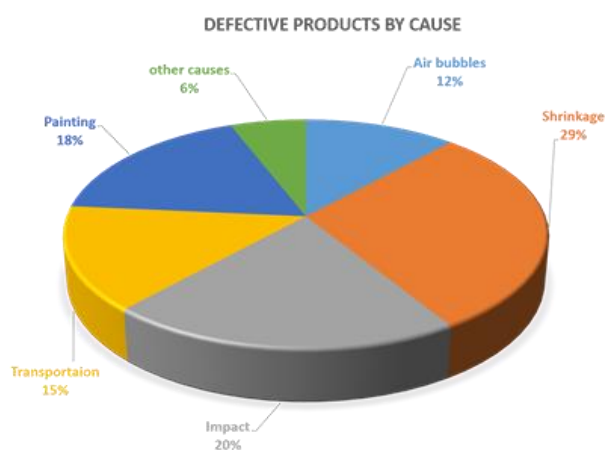
Najpomembnejši vidik statističnih podatkov pa je verjetno skupna proizvodna statistika:

- izdelanih je bilo 416 plošč (vključno z laboratorijskim preizkušanjem);
- predelanih je bilo več kot 3000 kg geopolimernega veziva;
- dejansko trajanje proizvodnje je bilo 53 dni (27 dni v nočni izmeni zaradi ekstremnih vremenskih razmer – poletna vročina v Grčiji).

Celotno učinkovitost proizvodnje na podlagi metodologije 6σ dokazuje delež izdelanih plošč z napako, tj.:

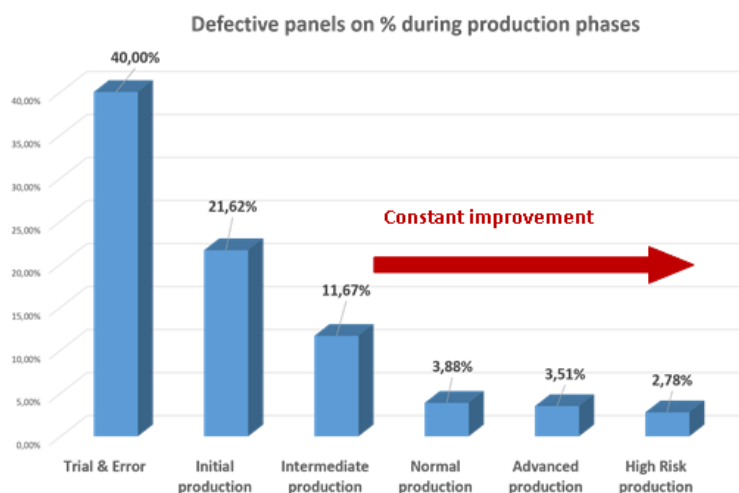
- pri proizvodnji plošč za kontaktne izolativne fasade: 2,1 %;
- pri proizvodnji plošč za prezračevane fasade: 0,63 %;
- pri sevalnih stropnih ploščah: 0,33 %.

Analiziranje vzrokov za nastale napake je pokazalo, da so običajne v vsaki proizvodnji gradbenih materialov, kot so napake zaradi udarcev, med prevozom, zaradi krčenja itn., omeniti pa je treba, da je skoraj polovica napak (49 %) posledica človeškega posredovanja, ki je potrebno v proizvodnem procesu.



Slika 58: Izdelki z napako glede na vzrok

Čeprav je iz podatkov analize nastanka napak očitno, da jih večina (67,64 %) nastane v fazah nastavljanja proizvodnega procesa, ko proizvodni postopki še niso dokončno nastavljeni in osebje še ni seznanjeno s proizvodnjo veziva HDG, pa v poznejših fazah proizvodnje število napak strmo upade, kar kaže na nenehne izboljšave.



Slika 59: Odstotek plošč z napako po fazi proizvodnje

Ocena v skladu s 6σ

Kot že omenjeno, je cilj metodologije 6σ proizvodnja izdelkov z nič napakami. V večini primerov, zlasti v proizvodnji v pilotnem obratu, to ni izvedljivo, kar velja za visokotehnološko proizvodnjo, npr. aeronavtika, elektronika itn., kjer je človeški dejavnik omejen. V našem primeru je dejanski namen uporabe metodologije 6σ nenehno izvajanje samoizboljšav proizvodnih procesov in vzdrževanje kakovosti izdelanih izdelkov na enaki ravni.

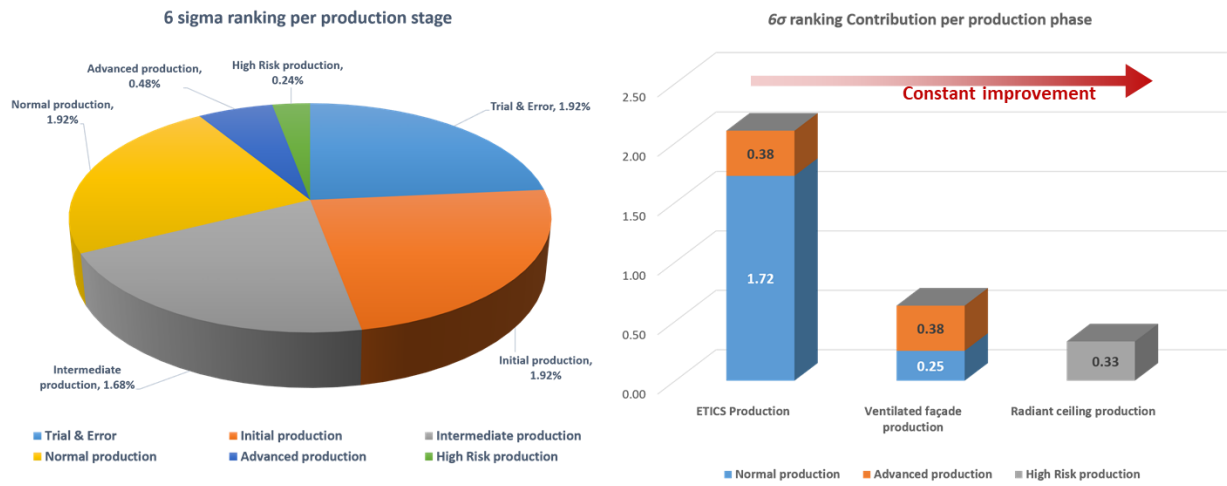
Sigma level	Sigma shift	Defective Parts Per Million	Percent defective	Percentage yield
1	Initial Start -0.5	691,462	69%	31%
2	0.5	308,538	31%	69%
3	1.5	66,807	6.7%	93.3%
4	End of ETICS Production 2.5	6,210	0.62%	99.38%
5	3.5	233	0.023%	99.977%
6	6σ TARGET 4.5	3.4	0.00034%	99.99966%
7	5.5	0.019	0.000019%	99.999981%

Slika 60: Ocena delovanja TUPP po metodologiji 6σ za proizvodnjo plošč za kontaktne izolativne fasade

Ko se je proizvodnja plošč HDG začela, je bila učinkovitost pilotnega obrata v poskusni fazi (»poskusov in napak«) na ravni med 1 in 2, pri proizvodnji plošč za kontaktne izolativne fasade pa je učinkovitost narasla na raven med 3 in 4 ter to raven obdržala med proizvodnjo vseh vrst plošč.

Iz številčnih podatkov pa je jasno, da se je število izdelkov z napako v vsaki fazi zmanjšalo, kar kaže na nenehno izboljševanje proizvodnega procesa.

Na koncu so bile ocene v skladu s 6σ, kot sledi: 3,06 % med ravnema 3 in 4, medtem ko je običajna ocena za pilotno proizvodnjo med ravnema 2 in 3, kar dokazuje, da je proizvodnja plošč HDG v TUPP nad panožnimi standardi in da je delovanje TUPP preseglo pričakovane rezultate učinkovitosti.



Slika 61: Analiza proizvodne faze v skladu z oceno po 6σ

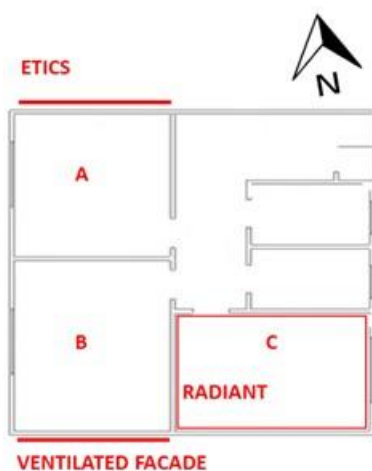
4. Vgradnja, sistem spremljanja in ocenjevanje učinkovitosti na dejanskih pilotnih stavbah

Po nadgradnji proizvodnje v Grčiji s strani AMSolutions so bile plošče transportirane in vgrajene v štiri pilotne stavbe za demonstracijo v Padovi (Italija), Atenah (Grčija), Bukarešti (Romunija) in mestu Putte-Mechelen (Belgija). Izvedeno je bilo obširno spremljanje pred vgradnjo in po njej, da bi ocenili toplotno učinkovitost v dejanskih razmerah, pri čemer smo opazovali tudi trajnost. Rezultati spremljanja so bili uporabljeni tudi za simulacije, izvedene na virtualnih pilotnih stavbah za demonstracijo, da bi potrdili vpliv in učinkovitost posega. Izvedli smo naslednje vgradnje:

- pilotna hiša v Padovi (Italija) – plošče za kontaktne izolativne fasade, plošče za prezračevane fasade in stropne sevalne plošče;
- stara mestna hiša blizu Aten v Občini Voula (Grčija) – plošče za kontaktne izolativne fasade in plošče za prezračevane fasade;
- dom za ostarele Don Orione v Bukarešti (Romunija) – plošče za kontaktne izolativne fasade;
- stanovanjska ekohiša v mestu Putte-Mechelen (Belgija) – stropne sevalne plošče.

4.1. Pilotna hiša, raziskovalno središče CNR v Padovi, Italija

V pilotno hišo so bile vgrajene tri vrste plošč: plošče za kontaktne izolativne fasade, plošče za prezračevane fasade in sevalne plošče (Slika 62). Zaradi posebnih značilnosti montažnih konstrukcij, katerih stene sestavljajo sendvič plošče s kovinsko zunanjo stranjo, so bile metode vgradnje prilagojene in se lahko po pilotnih mestih razlikujejo.



Slika 62: Lokacija vsake vrste plošč v tlorisnem pogledu pilotne hiše v Padovi, katere južna in vzhodna fasada sta prikazani na desni

Vgradnja plošč za kontaktne izolativne fasade

vgradnja pločevinaste obrobe za zaščito zgornjih in stranskih robov fasadnega sistema.



Na severni fasadi je bilo vgrajenih 28 plošč za kontaktne izolativne fasade (Slika 63) po naslednjem postopku:

Slika 63: Plošče za kontaktne izolativne fasade, vgrajene na severno steno pilotne hiše

- poravnava plošč s spodnjim kovinskim profilom;
- nanos ustreznega lepila na pločevinasto konstrukcijo;
- postavitve plošč in uporaba pritrdilnih sider skozi zid in njihovo vijačenje z matico na zunanji strani;
- izravnavanje stikov med ploščami z ustreznim prožnim lepilom;

Vgradnja plošč za prezračevane fasade

Na južni steni je bilo vgrajenih 30 plošč za prezračevane fasade (Slika 64), in sicer na namenskem jeklenem okviru, sidranem v zemljo, pri čemer je na stavbi pritrjen le na vrhu, da se omeji vrtnanje lukenj v steno:

- pritrnitev štirih stebrov jeklenega okvirja z vijaki z matico;
- vrtnanje v plošče na štirih točkah (dve luknji na zgornji in dve na spodnji strani);
- pritrjevanje pritrdilnih vijakov v vodoravne profile okvirja;
- vgradnja plošč s sidri;
- vgradnja pločevinaste obrobe za zaščito zgornjih in stranskih robov fasadnega sistema.



Slika 64: Plošče za prezračevane fasade, vgrajene na južno steno pilotne hiše

Vgradnja sevalnih stropnih plošč

V notranji prostor je bilo vgrajenih 30 sevalnih stropnih plošč, ki so bile nameščene na sedem jeklenih omega profilov, ki so bili podlaga za spuščeni strop iz mavčnih plošč (Slika 65). Za zagotovitev prave temperature in pretoka, potrebnega za sistem sevalnih stropnih plošč, je bil sistem za dovod vode prilagojen. Dodana sta bila dva nova cevovoda, eden za sevalno stropno ploščo in drugi za razvlažilnik. Plošče so bile povezane v sistem Tichelmann (povratna zanka), da bi bile izgube tlaka tako v dovodnem kot tudi povratnem krogu enake. Pet serij po šest plošč je bilo povezanih vzporedno.

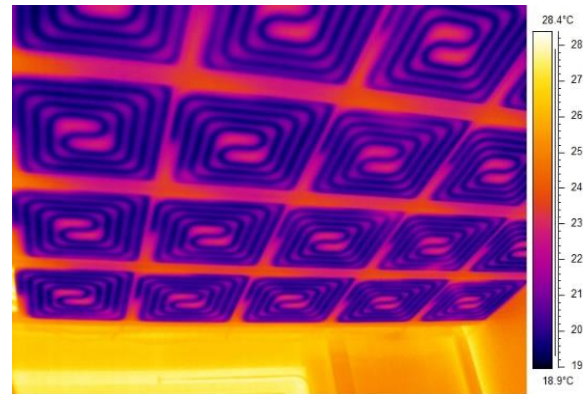


Slika 65: Predhodno vgrajen spuščeni strop (levo), zamenjan s sevalnimi stropni ploščami InnoWEE (desno)

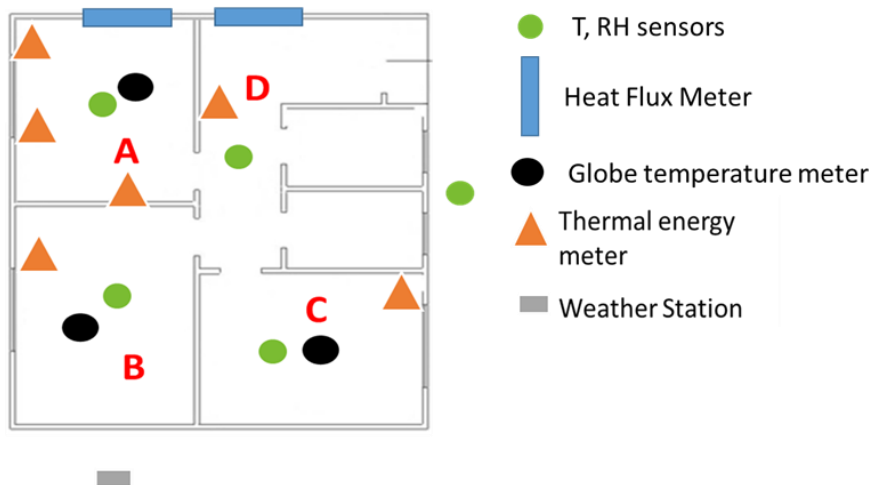
Spremljanje učinkovitosti in trajnosti

Sistem za spremljanje so sestavljali naslednji elementi:

- en merilnik toplotne prehodnosti je bil vgrajen v severni zid stavbe za izračun toplotne prehodnosti stene pred vgradnjo plošč za kontaktne izolativne fasade in po njej;
- šest merilnikov toplotne energije (merilnik toplotne prehodnosti, merilnik temperature vstopne in izstopne vode), eden za vsak vgrajen ventilatorski konvektor za merjenje energije, porabljene v vsakem prostoru, eden za sevalne plošče in eden za razvlažilnik;
- štiri različna mikroklimatska tipala v prostorih za določitev notranjih toplotnih razmer;
- posebne naprave za *namensko* ocenjevanje toplotne učinkovitosti zidu in stropa;
- zunanja vremenska postaja za spremljanje zunanje temperature in klimatskih razmer;
- globus termometer za meritve pozimi in poleti, in sicer pred vgradnjo in po njej, za izračun toplotno-higrometričnih razmer v notranjosti (indeksa PMV in PPD).

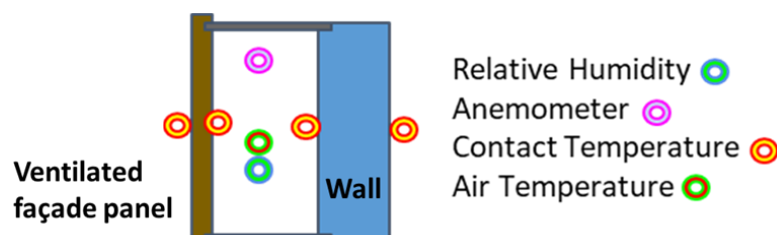


Slika 66: Sevalne stropne plošče med delovanjem v hladilnem načinu



Slika 67: Lokacija opreme za spremljanje plošč za kontaktne izolativne fasade in sevalne stropne plošče v načrtu stavbe

Lokalno nameščena oprema za spremljanje plošč za prezračevane fasade je bila sestavljena iz kontaktnega temperaturnega tipala, tipala sobne temperature zraka, tipala zračnega pretoka in tipala vlage. Infrardeče tipalo je kazalo tudi učinkovitost vgrajenih sevalnih stropnih plošč v primerjavi s predhodno vgrajenim stropom. Distribucija površinske temperature je primerljiva z laboratorijskimi preskusi, izvedenimi pred vgradnjo na pilotnem mestu.

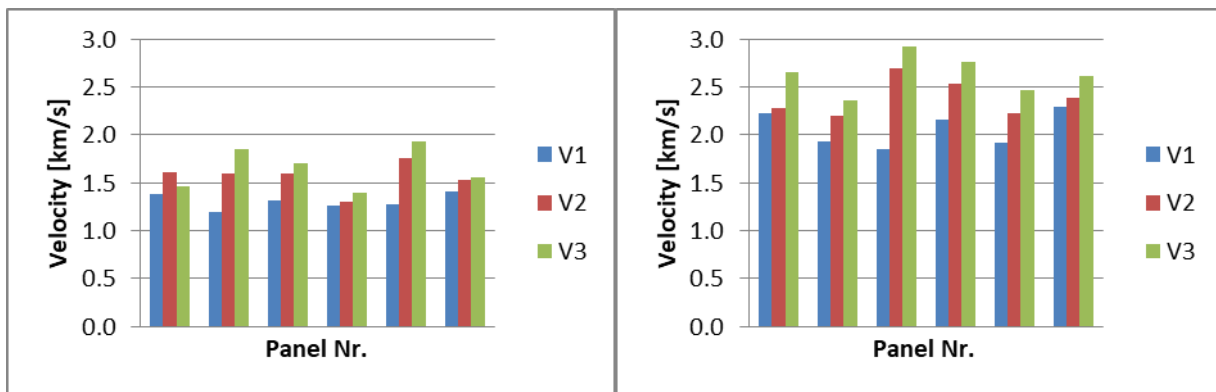


Slika 68: Vgrajena oprema za spremljanje učinkovitosti plošč za prezračevane fasade

Preiskovali smo tudi trajnost tovrstnih sistemov »in-situ«. Za uporabo na lokaciji smo na podlagi predhodnih laboratorijskih preiskav izbrali naslednje preizkusne metode: površinska absorpcija vode (SWA), površinska trdnost (SHT), čas prehoda ultrazvočnega impulza (UPV) in merjenje lastne (resonančne) frekvenca (EFT).

Na preskusni lokaciji v Padovi smo spremljali trajnost in odpornost plošč za prezračevane fasade nameščene na južni strani in plošč za kontaktne izolativne fasade nameščene na severni strani stavbe. Do zdaj so bile izvedene tri serije meritev: spomladi 2019, jeseni 2019 in ob koncu poletja 2020, da smo dosegli celoletno izpostavljenost okoljskim vplivom.

Na Slika 69 so kot primer predstavljeni rezultati merjenja časa prehoda ultrazvočnega impulza skozi prezračevano fasado in kontaktno izolativno fasado.

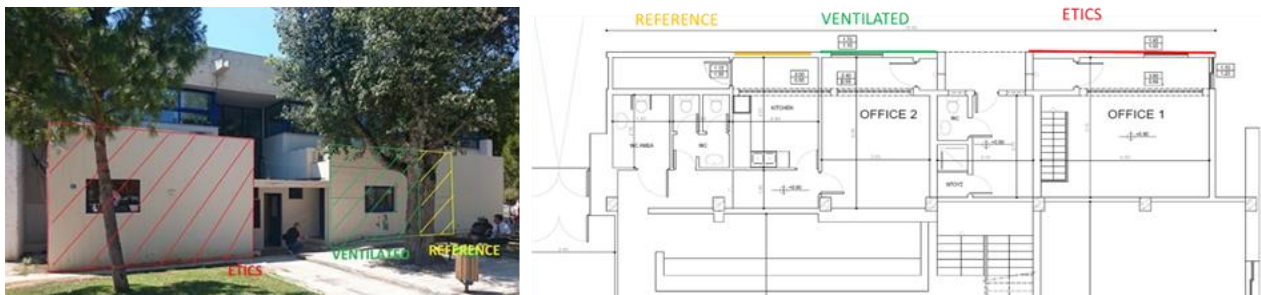


Slika 69: Rezultati merjenja časa prehoda ultrazvočnega impulza skozi prezračevano fasado (levo) in kontaktno izolativno fasado (desno)

Rezultati neporušitvenih testov testiranj v treh sklopih so med seboj primerljivi, zaradi česar sklepamo, da poletja 2019 ni bilo poslabšanja zaradi zunanjih vplivov. Tako prezračevane fasade kot kontaktne izolativne fasade dajejo dobre rezultate.

4.2. Stara mestna hiša v Občini Voula – blizu Aten (Grčija)

Rešitve za zunanjo uporabo so bile vgrajene v grško pilotno stavbo, tj. plošče za kontaktne izolativne fasade in plošče za prezračevane fasade (Slika 70).



Slika 70: Lokacija vsake vrste plošče na pilotnem mestu

Vgradnja plošč za kontaktne izolativne fasade

Za vgradnjo plošč za kontaktne izolativne fasade je bil zid pripravljen, tako da so bili odstranjeni kabli, cevi in druge inštalacije, kakor tudi stara barva in mavec. Jeklen nosilec v obliki črke L je bil pritrjen na zid kot spodnji nosilec. Začeli smo na vzhodni strani in plošče za kontaktne izolativne fasade pripravili za vgradnjo. Debelo plast nizkoekspandirajoče poliuretanske pene (PU) smo nanесли v vzorcu cikcak na zadnjo stran in nato ploščo postavili na mesto ter jo na zid pritrdili spritrdilnimi

sidri. Za naslednje vrste je bila uporabljena enaka tehnika vgradnje kot pri prvi vrsti plošč razen korakov pritrditve nosilca.

Za zapolnitev stikov med ploščami je bilo uporabljeno elastično tesnilo. Aluminijasti profil s 3-centimetrsko prirobnico v obliki črke L je bil uporabljen za pokrivanje okenskega okvirja. Nizkoekspandirajoča poliuretanska pena je bila nanescena na zadnjo stran, nato je bila pritrjena z vijaki in pritrtilnimi vijaki. Na koncu so bili robovi zatesnjeni z elastičnim tesnilom za stike in pobarvani z večfunkcijskim premazom AMS. Slika 71 kaže zid pred vgradnjo in po njej.



Slika 71: Plošče za kontaktne izolativne fasade, vgrajene na grško pilotno mesto

Vgradnja plošč za prezračevane fasade

Za vgradnjo plošč za prezračevane fasade je bil zid izvrtan čim bolj naravnost s svedrom M22, vstavljenim v udarni vrtnik, in sicer do globine 150 mm. Dvokomponentna smola je bila z mehansko pištolo vbrizgana v luknjo za sidro. Nato so bila v luknje vstavljena sidra 1. plošče (vse štiri). Enak proces je bil ponovljen za vse ostale plošče v vseh vrstah, pri čemer je bilo zagotovljeno dovolj časa za delno utrditev smole, da se zagotovi natančno uravnavanje trnov. Odvečna smola je bila odrezana z nožem.

Podobno je bil uporabljen aluminijasti profil s 3-centimetrsko prirobnico v obliki črke L za pokrivanje okenskega okvirja. Nizkoekspandirajoča poliuretanska pena je bila nanescena na zadnjo stran, nato je bila pritrjena z vijaki in pritrtilnimi vijaki. Na koncu so bili robovi zatesnjeni z elastičnim tesnilom za stike in pobarvani z večfunkcijskim premazom AMS. Slika 72 kaže zid pred vgradnjo in po njej.



Slika 72: Plošče za prezračevane fasade, vgrajene na grško pilotno mesto

Spremljanje učinkovitosti in trajnosti

Sistem spremljanja sestavljajo naslednji elementi:

- dva merilnika toplotne prehodnosti sta bila vgrajena v dva prostora v severnem zidu stavbe za izračun toplotne prehodnosti stene pred vgradnjo novih tehnologij in po njej; temperaturna tipala, vgrajena v zid, so koristna, saj zagotovijo podatke o notranji in zunanji površinski temperaturi zunanjih zidov;

- dve različni mikroklimatski tipali v prostorih za določitev notranjih toplotnih razmer;
- vremenska postaja, vgrajena v streho stavbe;
- globus termometer za meritve pozimi in poleti za izračun toplotno-higrometričnih razmer v notranjosti (indeksa PMV in PPD).

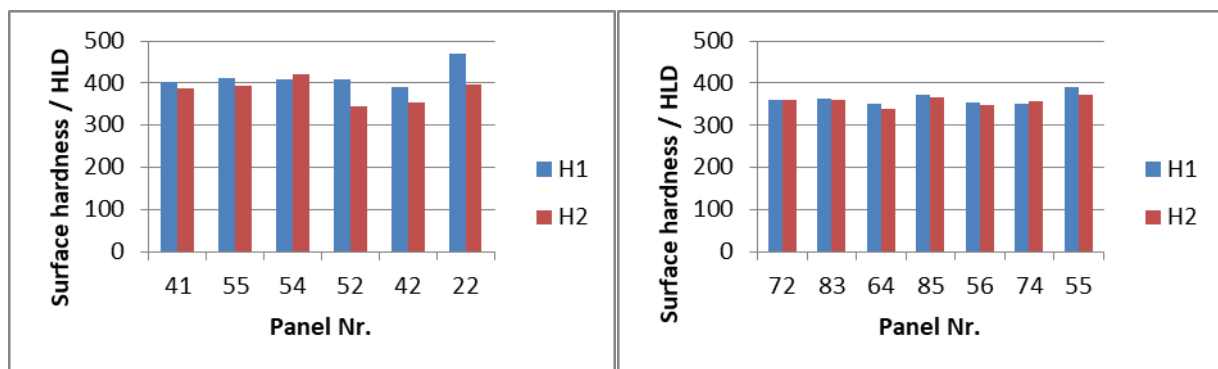
Spremljanje prezračevane fasade je podobno tistemu s pilotnega mesta, opremo sestavljajo kontaktno temperaturno tipalo, tipalo sobne temperature zraka, tipalo zračnega pretoka in tipalo vlage.

Ko gre za trajnost in odpornost rešitev za zunanjo vgradnjo, je glavni cilj preizkusne lokacije v Atenah podoben tistim na lokaciji v Padovi, tj. preizkusiti trajnost plošč za kontaktne izolativne fasade in prezračevane fasade, vendar v vročem mediteranskem podnebnju.

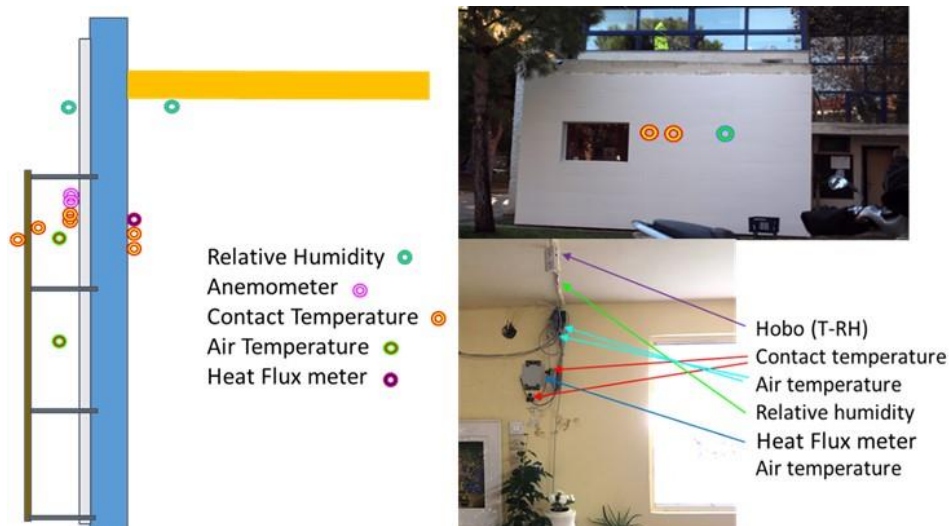
Uporabljene so bile enake preizkusne metode: površinska absorpcija vode (SWA), površinska trdnost (SHT), čas prehoda ultrazvočnega impulza (UPV) in merjenje lastne (rezonančne) frekvence (EFT). Na preizkusni lokaciji v Atenah sta bili prezračevana fasada in kontaktna izolativna fasada na isti strani stavbe. Do zdaj sta bili izvedeni dve seriji meritev: spomladi 2019 in jeseni 2019. Nadaljnje ocene stanja, predvidene za celoletno izpostavljenost, ni bilo mogoče izvesti zaradi omejitev potovanj ob upoštevanju ukrepov zaradi Corona virusa.

Na Slika 73 so kot primer predstavljeni rezultati preizkušanj površinske trdote prezračevane fasade in kontaktne fasade.

Podatki neporušitvenih testov 2. sklopa testiranj so primerljivi s testnimi rezultati 1. sklopa testiranj, zaradi česar sklepamo, da poleti 2019 ni bilo poslabšanja. Tako prezračevane fasade kot kontaktne izolativne fasade dajejo dobre rezultate.



Slika 73: Rezultati merjenja časa prehoda ultrazvočnega impulza skozi prezračevano fasado (levo) in kontaktno fasado (desno)



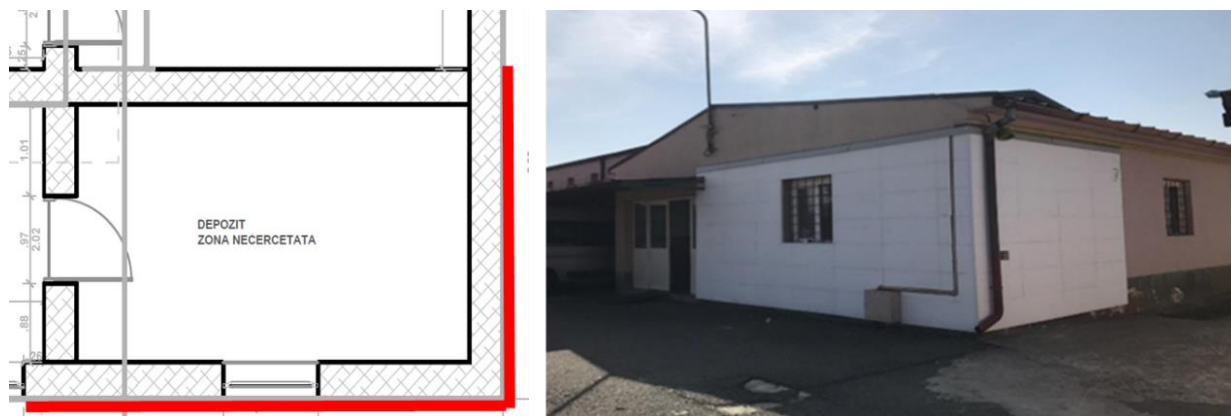
Slika 74: Oprema za spremljanje preizkušanja prezračevane fasade (levo), kontaktne izolativne fasade (zgoraj desno) in klimatskih razmer v notranjosti (spodaj desno)

4.3. Dom za ostarele Don Orione v Bukarešti (Romunija)

Vgradnja plošč za kontaktne izolativne fasade

Na romunskem pilotnem mestu so bile plošče za kontaktne izolativne fasade vgrajene na dveh fasadah enonadstropne stavbe, tj. zidovih na SV- in SZ-strani (Slika 75).

Vgradnja 77 plošč za kontaktne izolativne fasade je bila izvedena s pritrditvijo L-profila na zid, tako da deluje kot spodnji nosilec. Vgradnja se je začela s spodnjo desno ploščo. Vsaka plošča je bila vgrajena z malto in pritrdilnimi sidri. Pred vgradnjo 5. vrste plošč je bil na zid pritrjen L-profil (50 x 90 mm) po obodu okna. Za zaščito pred vdorom vode je bila na zgornji strani fasade vgrajena aluminijska obroba. Stiki med ploščami so bili zatesnjeni z ustreznim lepilom.



Slika 75: Plošče za kontaktne izolativne fasade, vgrajene na pilotno mesto v Bukarešti

Spremljanje učinkovitosti in trajnosti

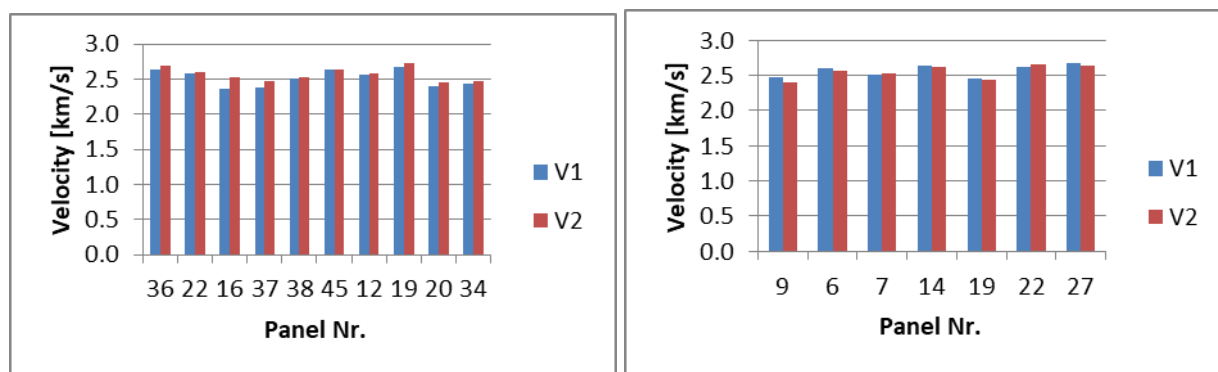
Sistem spremljanja sestavljajo naslednji elementi:

- en merilnik toplotne prehodnosti je bil vgrajen v prostor severnega zidu stavbe za izračun toplotne prehodnosti stene pred vgradnjo plošč za kontaktne izolativne fasade in po njej;
- dve različni mikroklimatski tipali v notranjih prostorih za določitev notranjih toplotnih razmer in eno blizu zunanega zidu;
- temperaturna in ultrazvočna tipala, vgrajena na zunanji strani, za spremljanje zunanjih razmer;

- merilnik porabe elektrike za spremljanje porabe za sistem ogrevanja in hlajenja;
- globus termometer za meritve pozimi in poleti za izračun toplotno-higrometričnih razmer v notranjosti (indeksa PMV in PPD).

Ko gre za trajnost in odpornost, je pilotno mesto v Bukarešti tretje tako mesto, katerega cilji so enaki kot tisti na predhodnih dveh lokacijah, tj. preizkusiti trajnost plošč za kontaktne izolativne fasade in prezračevane fasade, vendar v kontinentalnem podnebjju z mrzlimi zimami in vročimi poletji. Uporabljene so bile enake preizkusne metode kot za lokaciji v Padovi in Atenah. Do zdaj sta bili izvedeni dve seriji meritev: spomladi 2019 in jeseni 2019. Med prvo in drugo opravljeno meritvijo je bila opazovana fasada prebarvana. Nadaljnje ocene stanja, predvidene za celoletno izpostavljenost, ni bilo mogoče izvesti zaradi omejitev potovanj ob upoštevanju ukrepov zaradi Corona virusa.

Na Slika 76 so kot primer predstavljeni rezultati merjenja hitrosti prehoda ultrazvočnega impulza prezračevane fasade in kontaktne fasade iz katerih je razvidno, da prebarvanje fasade nima bistvenega vpliva na rezultate meritev.



Slika 76: Ultrasonic pulse velocity test results of the north (left) and west (right) facade

Ker je bila med prvim in drugim ocenjevanjem fasada prebarvana, je vrednotenje preizkusnih rezultatov vprašljivo, čeprav do zdaj še nismo zaznali večje škode – plošče za kontaktne izolativne fasade dajejo dobre rezultate.

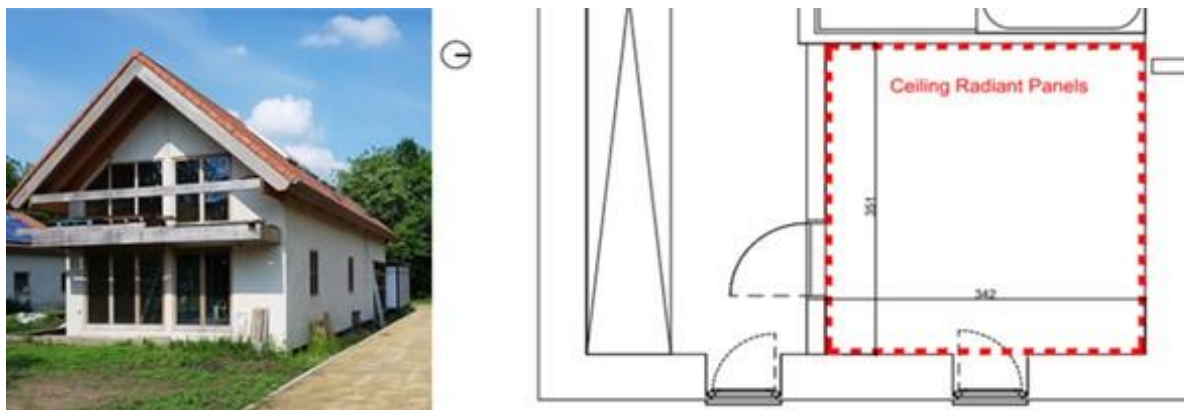


Slika 77: Oprema za spremljanje preizkušanja plošč za kontaktne izolativne fasade

4.4. Stanovanjska ekohiša v mestu Putte-Mechelen (Belgija)

Vgradnja plošč

V tem primeru stanovanjske ekohiše so bili stropne sevalne plošče InnoWEE vgrajene skupaj s konkurenčnim izdelkom (Slika 78), da bi dobili neposredno primerjavo glede ogrevanja in hlajenja.



Slika 78: Stanovanjska ekohiša in prostor, kjer so bile vgrajene plošče

Izbrana tržna rešitev je zahtevala dve plošči z dimenzijami 1,2 m × 2,0 m. Za vgradnjo rešitve InnoWEE (15 plošč v skupinah po pet v treh vrstah) je bila zgrajena ločena nosilna konstrukcija, da ne bi vplivali na leseno konstrukcijo stavbe. Montažni deli so bili pritrjeni s sidri. Vseh osem kovinskih stebrov je bilo pritrjenih z metričnimi vijaki. Nosilec je bil postavljen in zavarjen po celotnem obodu. Po dokončanju kovinske konstrukcije so bile vgrajene plošče. Da bi imeli dovolj prostora za povezavo vodnih cevi, je bil med ploščami in stropom puščen 600-milimetrski odmik. Po postavitvi vsake plošče so bile cevi za vodo povezane.



Slika 79: Konkurenčni izdelek (levo) in sevalne plošče InnoWEE (desno), vgrajene na strop

Spremljanje učinkovitosti

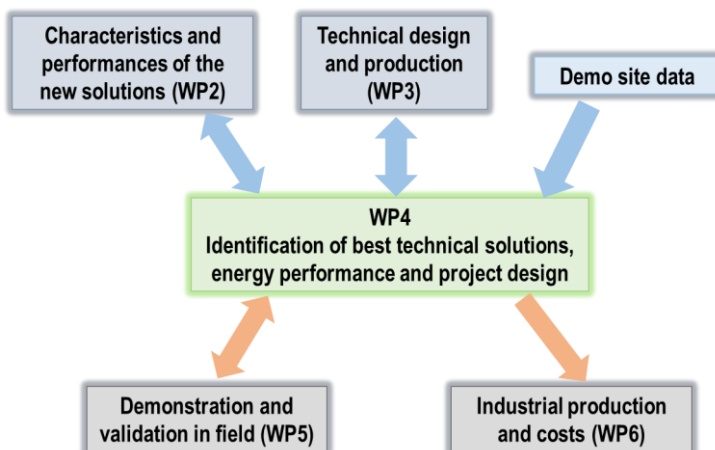
Sistem spremljanja je sestavljen iz mikroklimatskega tipala (temperatura in vlaga), merilnika toplotne energije (merilnik pretoka, temperatura vstopnega in izstopnega toka) za sevalni sistem in vremenske postaje na vrtu zunaj stavbe. Globus termometer za meritve pozimi in poleti za izračun toplotno-higrometričnih razmer v notranjosti (indeksa PMV in PPD).



Slika 80: Oprema za spremljanje za merjenje učinkovitosti stropnih sevalnih plošč

5. Energijsko modeliranje stavb (BEM) in virtualna pilotna mesta




Glavni cilj naloge, povezane z energijskim modeliranjem stavbe pri projektu InnoWEE, je bil določiti najboljše rešitve za preprosto vgradnjo in odstranitev plošč na podlagi arhitekturne ocene in stroškov. V ta namen je treba izvesti ustrezno zbiranje podatkov in določiti končne zahteve dejanskih pilotnih mest. Podatki se uporabljajo za optimizacijo rešitev z modeliranjem njihove energijske učinkovitosti za izdelavo projekta za vsako pilotno stavbo. Dejavnosti so bile izvedene v delovnem sklopu 4 v okviru projekta, to pa je zahtevalo sodelovanje z drugimi delovnimi sklopi, kot je predstavljeno na Slika 81.



Slika 81: Odnosi med WP4 in drugimi WP projekta InnoWEE

5.1. Ocenjevanje tehnologij vgradnje/odstranitve ter metodologij in spremljanja plošč

V štiri pilotne stavbe so bile vgrajene tri vrste geopolimernih plošč InnoWEE. Vsaka vgradnja je bila analizirana in ocenjena v smislu časa in stroškov za izvedbo procesa.

ETIC FAÇADE	VENTILATED FAÇADE	RADIANT PANELS
<ul style="list-style-type: none"> Panel to be glued on the vertical wall with mortar Mechanical fixing with thermal break fasteners Silicon sealing to cover joints between panels Metal flashing installation 	<ul style="list-style-type: none"> Wall anchoring system Panels on-site drilling Levelling and mechanical fixing of panels Metal flashing installation 	<ul style="list-style-type: none"> To be mounted in common systems for false ceilings Test installation not carried out Conventional fasteners and anchoring systems suitable
		

Slika 82: Povzetek metodologije vgradnje plošč InnoWEE

Ocenjevanje vgradnje je predstavljeno spodaj, pri čemer se stroški nanašajo le na dejavnosti vgradnje. Drugi dejavniki, ki vplivajo na končno ceno izdelkov, so: kraj vgradnje, arhitektura stavbe, status zaščite stavbe.

Za učinkovito oceno stroškov vseh dejavnikov, ki vplivajo na končno ceno izdelkov, je treba obravnavati naslednje:

- Kraj vgradnje: Vsaka od držav, v kateri so bile plošče vgrajene, ima drugačno zgodovino, običaje, poti razvoja ter politične in gospodarske vidike. Zaradi tega stroškov ni mogoče izenačiti za vse kraje, ker se razlikujejo glede na evolucijo vsakega kraja.
- Stroški dela: Stroški dela so v vsaki državi drugačni. V Belgiji so stroški dela visoki, v Italiji so zmerni, v Grčiji in Romuniji pa zelo nizki.
- Geometrija: Geometrija stavb se med primeri razlikuje. Nekatere stavbe imajo preprosto geometrijo, druge so kompleksnejše, spet druge imajo nadstreške in utore, nekatere pa vogale.
- Okna: Nekatere stavbe imajo okna na fasadi, zato je precej dela z rezanjem in pritrjevanjem plošč.

Plošče za kontaktne izolativne fasade

Plošče za kontaktne izolativne fasade so bile po preizkusni vgradnji na prostostoječem armiranobetonskem zidu, vgrajene na dveh dejanskih lokacijah. Prednosti InnoWEE plošč za kontaktne izolativne fasade so odvisne od več dejavnikov ter se spreminjajo glede na vrsto stavbe in območje, v katerem se stavba nahaja.

Prednosti InnoWEE plošč za kontaktne izolativne fasade se nanašajo na dejstvo, da je pri njih le ena faza vgradnje, sama vgradnja pa je preprostejša od običajnih plošč za kontaktne izolativne fasade. Število pritrditev je manjše, estetski rezultat pa je boljši kot pri običajnih ploščah za kontaktne izolativne fasade.

Pri vgradnji je bila ključna vloga konstrukcije stavbe povezana s časom in stroški. V Padovi, kjer je bila konstrukcija stavbe lahka in izdelana iz sendvič plošč, je bilo potrebnih veliko pritrdilnih mest in pritrdilnih palic za varno pritrditev plošč. Poleg tega je bilo treba lepilo nanesti v luknje za pritrdilne palice, da smo zagotovili ustrezno izolativnost.

V Bukarešti in Občini Voula je bila vgradnja preprostejša kot v Padovi, saj sta bili stavbi zgrajeni iz tradicionalnih opek oziroma betonskih blokov. Težave so bile povezane z geometrijo stavb – okna in vogali.

Povprečni čas vgradnje na ploščo ob upoštevanju srednjih vrednosti vgradnih časov za Padovo in Bukarešto je bil 5-10 minut na ploščo, kar je okoli 10-25 min/m². Čas vgradnje za običajne kontaktne izolativne fasade pa je okoli 40 min/m².

Stroški vgradnje rešitve InnoWEE so okoli 20–30 €/m², kar je odvisno od več dejavnikov za običajne kontaktne izolativne plošče pa okoli 30 €/m².

Ob upoštevanju posebnih dejavnikov vgradnje, kot so: gradbeni odri, stroški zagotavljanja zdravja in varnosti ter celo zasnova, naj bi se stroški InnoWEE rešitve gibali med 54,00 in 97,36 €/m².

Glavne prednosti rešitve InnoWEE v smislu časa v primerjavi z običajno rešitvijo so:

- predhodno ulite plošče,
- vgradnja plošče vključuje le nekaj korakov,
- preprosta metoda vgradnje,
- plošče so lahke, z njimi pa je preprosto ravnati zaradi majhnih dimenzij.

Plošče za prezračevane fasade

Po preizkusni namestitvi plošč na samostojno armiranobetonsko steno v Padovi, so bile plošče za prezračevane fasade nameščene na pilotno mesto v Padovi in Vouli. Prednosti plošč za prezračevane fasade so odvisne od več dejavnikov in se spreminjajo glede na vrsto stavbe in kraj, kjer se stavba nahaja.

Montaža plošč za prezračevane fasade na pilotno mesto v Padovi je trajala dlje časa kot na drugih pilotnih mestih, zaradi tipa obstoječe konstrukcije stavbe. Pilotna hiša v Padovi je izdelana iz lahkih sendvič panelov, zato je bilo potrebno zasnovati in namestiti sekundarno konstrukcijo za pritrjevanje plošč. Poleg tega je bil potreben ročen razrez plošč na mestu vgradnje. Zaradi omenjenega so se pojavili tudi višji stroški vgradnje.

Druga faza, ki je zahtevala več časa, je bila faza ročnega vrtanja plošč in je zahtevala visoko stopnjo natančnosti.

Navkljub omenjenemu je glavna prednost rešitve InnoWEE, v primerjavi s tradicionalnimi montažnimi ploščami, njihova enostavnost za uporabo zaradi majhna teža in majhnih dimenzij.

Iz izkušenj nameščanja plošč na različnih pilotnih mestih je bilo mogoče oceniti porabljeni čas in nastale stroške, katere je mogoče primerjati s časom in stroški podobnih rešitev na trgu.

Primerjava je opravljena ob upoštevanju, da so imele stavbe različne značilnosti, zato so bili pri vgradnji plošč potrebni različni koraki. Tudi stroški se razlikujejo iz več razlogov: tipologija gradnje, načini namestitve, stroški dela.

Iz pridobljenih rezultatov lahko ocenimo, da je povprečen čas namestitve $5 \div 15$ minut na ploščo, kar pomeni približno $10 \div 30$ min / m². Za izvedbo tradicionalne prezračevane fasade lahko upoštevamo čas vgradnje 20 min / m².

Tudi pri rešitvah za obloge so bili pri projektu InnoWEE upoštevani posebni dejavniki vgradnje, kot so: gradbeni odri, stroški zagotavljanja zdravja in varnosti ter celo zasnova, zato naj bi se obseg stroškov za plošče InnoWEE gibal med 54,00 in 97,36 €/m², brez upoštevanja sistema sidranja.

Glavne prednosti rešitve InnoWEE, ob upoštevanju časa vgradnje in primerjavi s tradicionalnimi rešitvami, so naslednje:

- montažne plošče,
- enostaven način vgradnje,
- enostavno rokovanje s ploščami zaradi njihovih majhnih dimenzij in nizke teže.

Prototipne plošče

Prototipne plošče smo spremljali po vgradnji na pilotna mesta, da bi ocenili vpliv zunanjih klimatskih razmer na izdelke. Razpoke na prototipih so omogočile izvedbo izboljšav in boljše rezultate v dejanskih demonstracijah izdelkov.

V tej fazi projekta smo plošče spremljali v smislu morebitnih poškodb, okvar in sprememb barve med uporabo.

Rezultate spremljanja lahko povzamemo, kot sledi:

- **Razpokanje in poslabšanje stanja materialov**
 - Plošče za kontaktne izolativne fasade: število razpok se je rahlo povečalo.
 - Plošče za prezračevane fasade: nastale so nove razpoke, prejšnje pa so se razširile.

- **Barvne spremembe**

- Plošče za kontaktne izolativne fasade: barva naravnih plošč je ostala nespremenjena.
- Plošče za prezračevane fasade: barva plošč je ostala nespremenjena.

5.2. Modeliranje eenergijske učinkovitosti različnih izdelkov

V okviru modeliranja energijske učinkovitosti so bili za vsako pilotno mesto simulirani različni scenariji:

- Scenarij 0: trenutno stanje pilotnih stavb.
- Scenarij 1: vedenje pilotnih stavb po izvedbi rešitve InnoWEE.
- Scenarij 2: optimizacija in analiza občutljivosti.

Preglednica 6: Povzetek podatkov o vsakem dejanskem pilotnem mestu

Vrsta pilotne stavbe	Opis	Lokacija	Rešitev InnoWEE
Pilotna stavba	Pilotno mesto (pilotna hiša, raziskovalno središče CNR)	Italija (Padova)	Plošče za prezračevane fasade
Sevalni strop	Stara mestna hiša v Občini Voula	Grčija (Voula)	Plošče za kontaktne izolativne fasade Plošče za prezračevane fasade
Plošče za kontaktne izolativne fasade	Stanovanjska ekohiša v mestu Putte-Mechelen	Belgija (Putte)	sevalne stropne plošče
Zgodovinska stavba	Stara mestna hiša v Občini Voula	Grčija (Voula)	Plošče za kontaktne izolativne fasade

Italijansko pilotno mesto

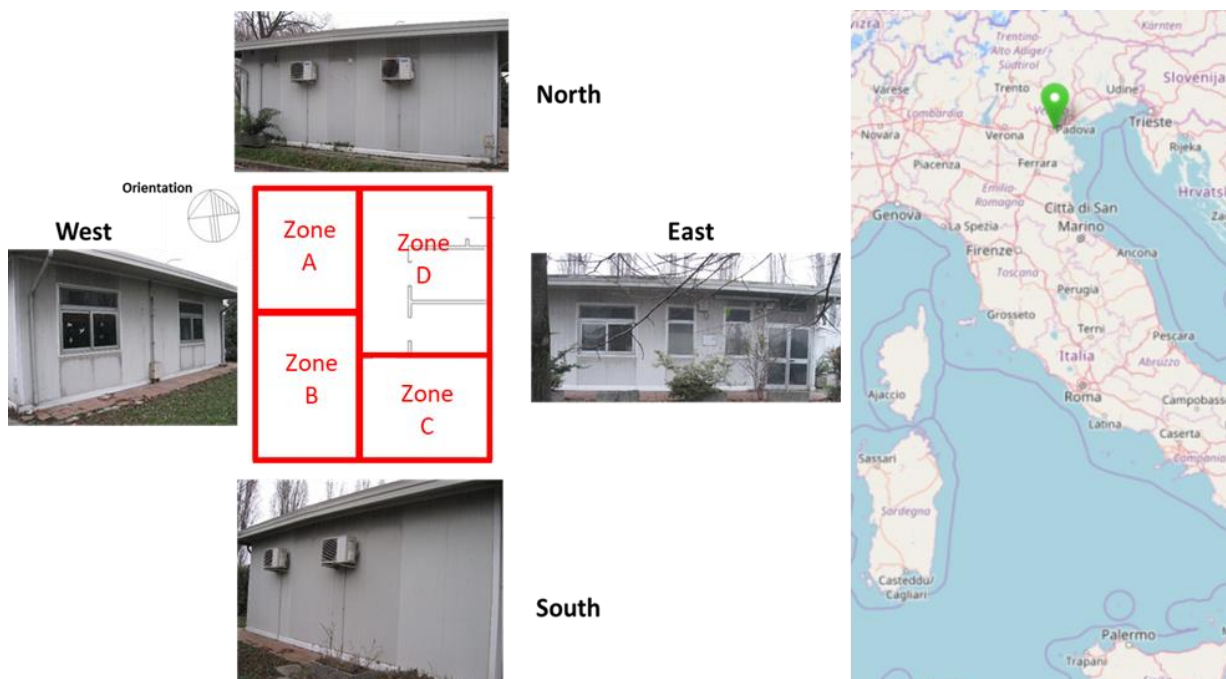
Pilotna hiša je stavba, ki je v nacionalnem raziskovalnem središču v Padovi, Italija. Zgrajena je bila leta 1993 kot enonadstropna pisarniška stavba, konstrukcija pa je iz montažnih sten. Pilotna hiša se je uporablja kot pisarna do leta 2016, ko so bili ljudje iz te stavbe preseljeni v druge stavbe v raziskovalnem središču. Tloris stavbe je skoraj kvadraten, površina je nekaj več kot 70 m², orientacija pa je skoraj popolnoma sever–jug. Stavba ima tri prostore; majhno sobo, stranišče in hodnik, pri čemer je skupna prostornina blizu 200 m³.

Prvotni tloris sestavljajo trije glavni prostori (cone A, B in C); majhna soba, stranišče in hodnik (cona D). Tloris stavbe z označenimi prostori je prikazan na Slika 83.

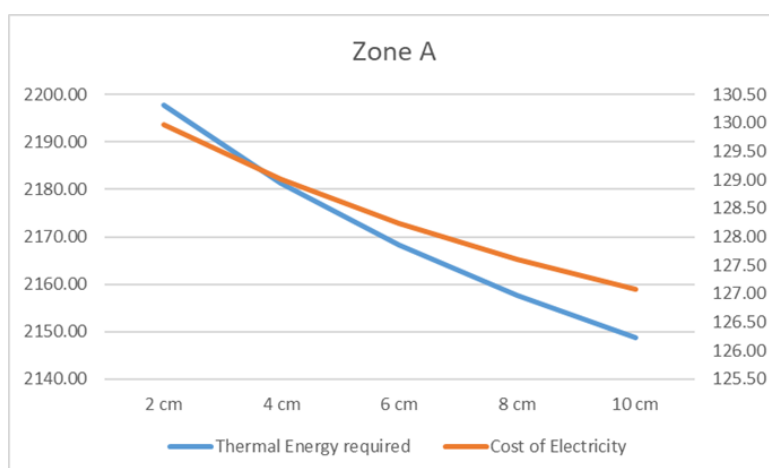
Cona A – plošče za kontaktne izolativne fasade: zmanjšanje potrebne energije za 10 % v ogrevalni sezoni in 15 % v sezoni klimatizacije.

Cona B – prezračevana fasada: 1-odstotno zmanjšanje v zimski in poletni sezoni zaradi dobre toplotne prehodnosti obstoječega zidu.

Cona C – sevalne plošče: vgrajene plošče zadostujejo za ogrevanje celotnega prostora do 20°C, potrebnih v zimski sezoni, in do 26°C, potrebnih v poletni sezoni, kar poveča zmogljivosti glede na predhodno nameščeno ventilsko tuljavo.



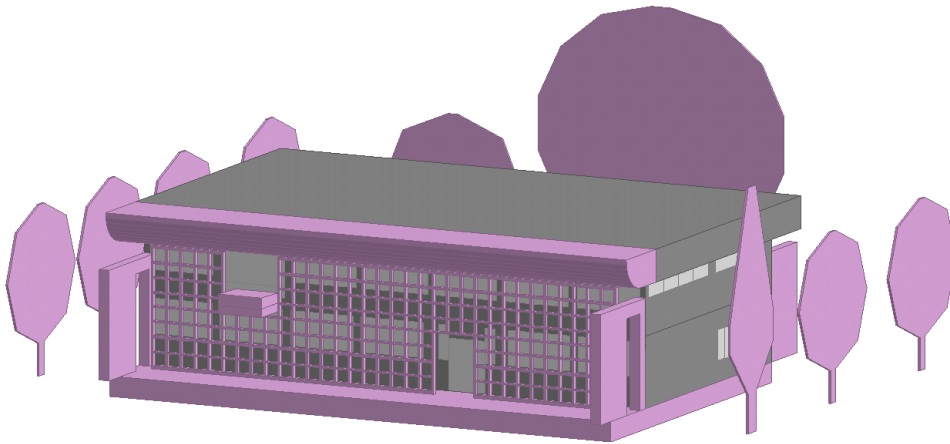
Slika 83: Cone pilotnega mesta, kjer so bile vgrajene različne plošče



Slika 84: Zmanjšanje porabe energije glede na spreminjajočo se debelino stiroporne plošče – EPS

Grško zgodovinsko pilotno mesto

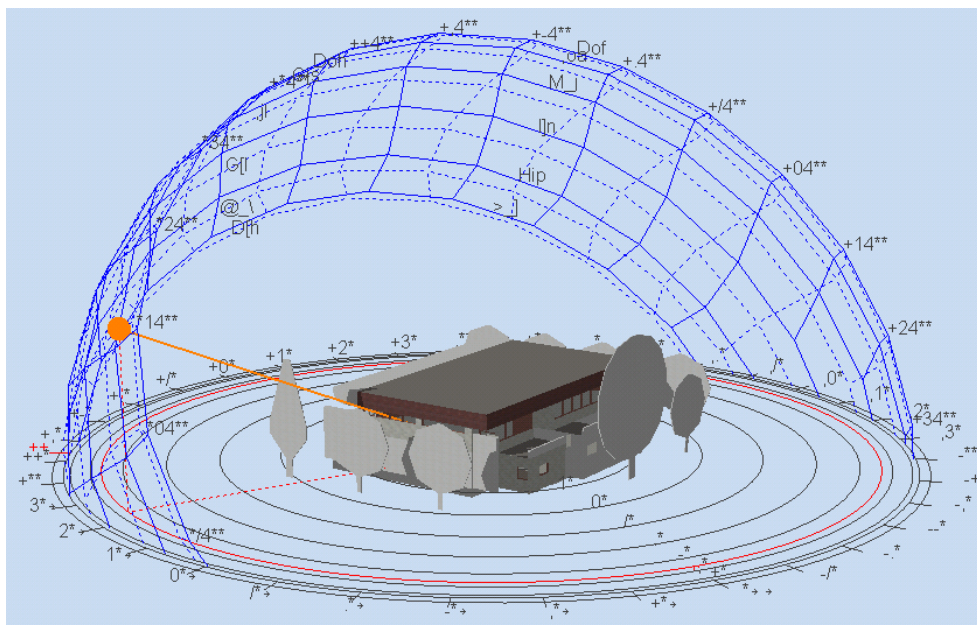
Mestna hiša v mestu Vouliagmeni je zgodovinska stavba v stanovanjski soseski Občine Voula-Vouliagmeni, Grčija. Zasnovana je bila v poznih šestdesetih letih 20. stoletja in ima dve nadstropji ter je delno podkletena. Vsi konstrukcijski podatki, ravni dejavnosti, notranji prirastki, vremenski podatki ter zasnova ogrevanja, prezračevanja in klimatizacije so bili uporabljeni v simulaciji.



Slika 85: Model stavbe – mestna hiša Voula



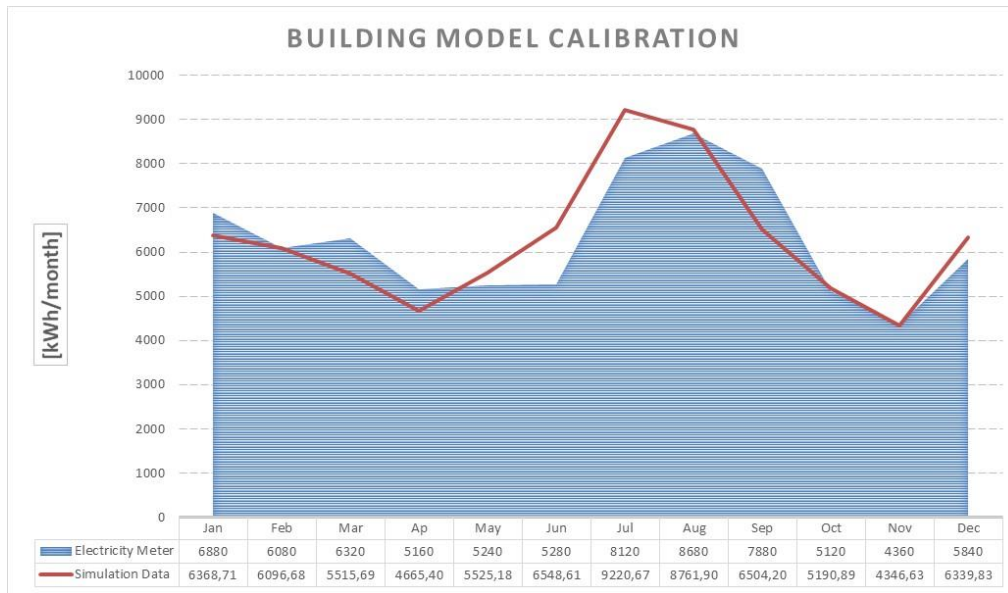
Slika 86: Obstojča mestna hiša Voula



Slika 87: Model stavbe s tirnico sonca – mestna hiša Voula

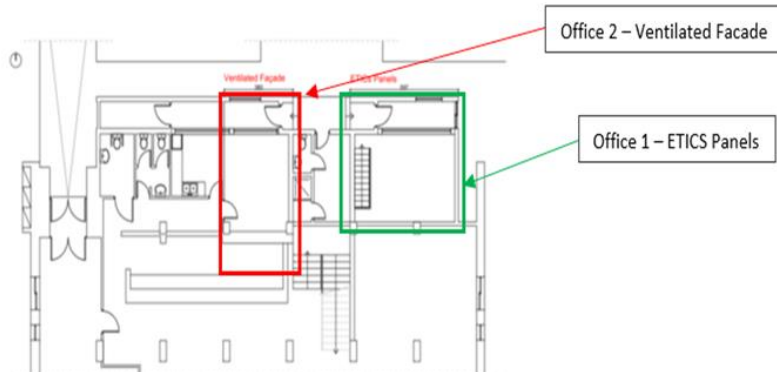
V skladu z metodologijo Mednarodnega protokola za meritve delovanja in preverjanje (IPMVP) je treba simulacijo stavbe prilagoditi, »umeriti«, da bi se rezultati ujemali s podatki o potrebah in porabi z mesečnih računov za komunalne in druge storitve ob sprejemljivih tolerancah. Znano dejstvo je, da vedenjski vzorci znatno vplivajo na dejansko porabo. Zato obstaja odstotna napaka

med izmerjenimi podatki in rezultati simulacije, ki se zanašajo na napovedne kazalnike. Za obravnavo vrzeli med računi za elektriko in modelom stavbe smo uporabili številne postopke.



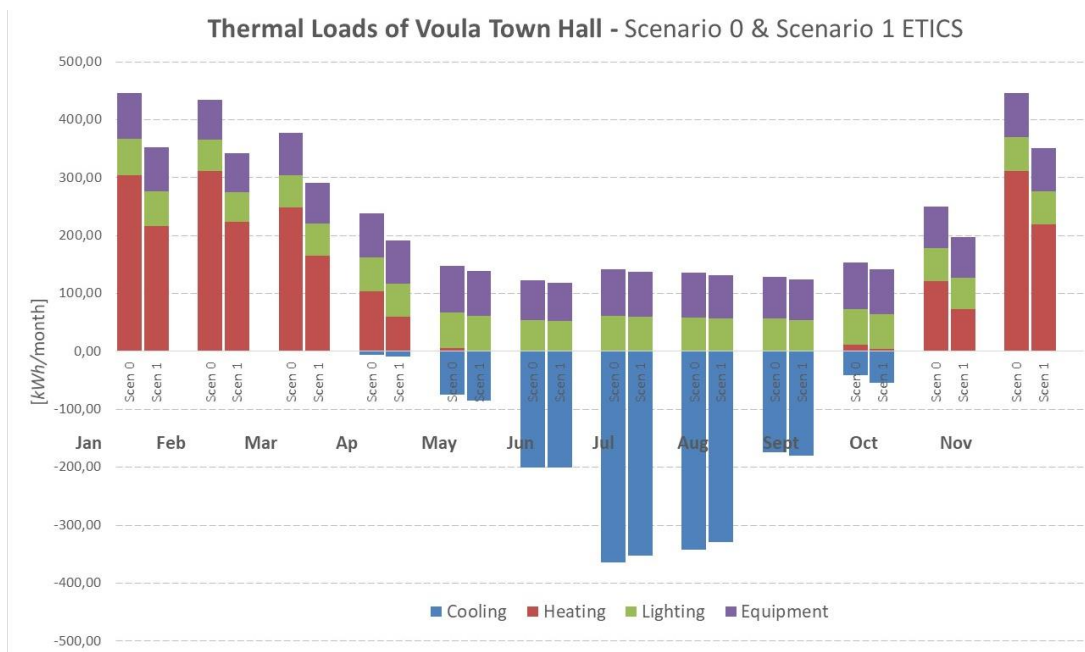
Slika 88: Umeritev modela stavbe z izmerjenimi podatki

Tako plošče za kontaktne izolativne fasade kot tudi plošče za prezračevane fasade so vključene v model obstoječe stavbe, da bi zagotovili prihranke energije iz omenjenih učinkov. Pisarna 1 in pisarna 2 v pritličju sta podani kot izbrani coni za izvedbo analize.



Slika 89: Prostori pilotnega mesta s ploščami za kontaktne izolativne fasade in prezračevane fasade na zunanjih zidovih

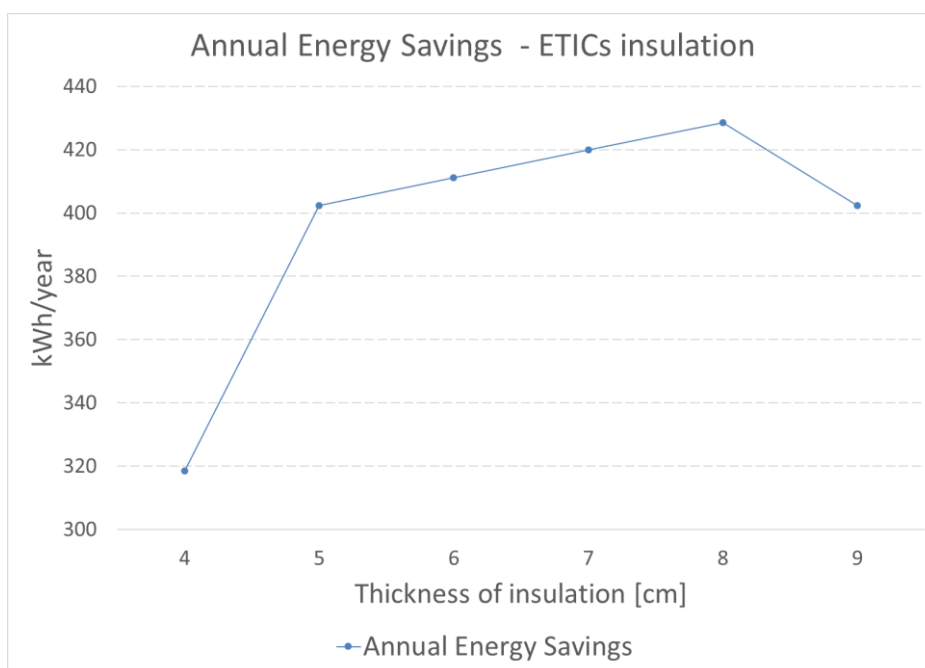
Rezultati iz primerjave obstoječega stanja stavbe s stanjem obnovljene stavbe kažejo skupno letno izboljšanje učinkovitosti za obe rešitvi. Letna dinamična simulacija kaže prihranek energije v višini 10,41 % kWh/leto za pisarno 1 in 2,44 % kWh/leto za pisarno 2.



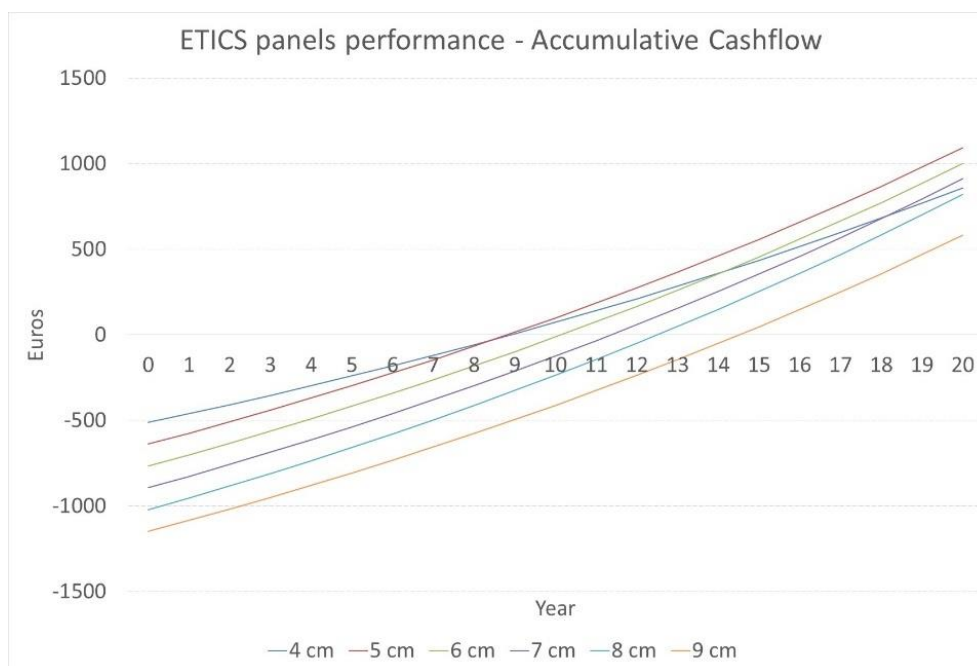
Slika 90: Toplotne obremenitve mestne hiše Voula pred vgradnjo kontaktne izolacije (ETICS) in po njej

Letni prihranki energije z različnimi ploščami za kontaktne izolativne fasade so bili izračunani v odvisnosti od debeline izolativne plasti. Glede na rezultate so bile podane spodnje trditve:

- Poraba elektrike se lahko povečuje pri več kot 8 cm izolacije zaradi povečanja potreb po hlajenju.
- 8 cm izolacije se povrne v približno trinajstih letih glede na trenutne cene. Analiza stroška in učinka rešitve upošteva naslednje vhodne podatke:
 - Strošek elektrike: 0,16 EUR/kWh.
 - Inflacija stroška elektrike: 3 %.

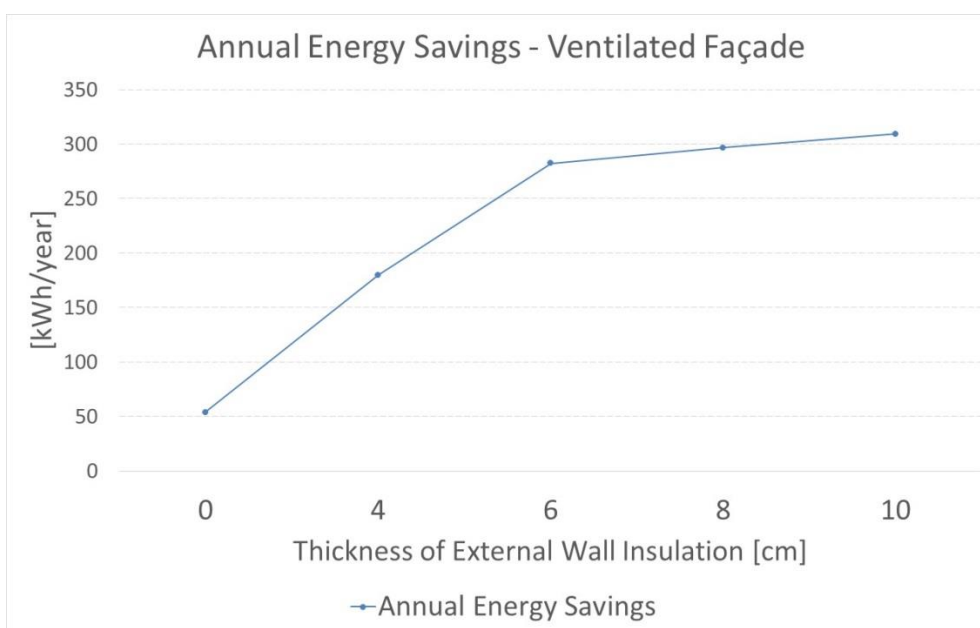


Slika 91: Letni prihranki energije glede na debelino EPS v ploščah InnoWEE za kontaktne izolativne fasade na grškem pilotnem mestu



Slika 92: Prihranki stroškov glede na debelino EPS v ploščah InnoWEE za kontaktne izolativne fasade na grškem pilotnem mestu

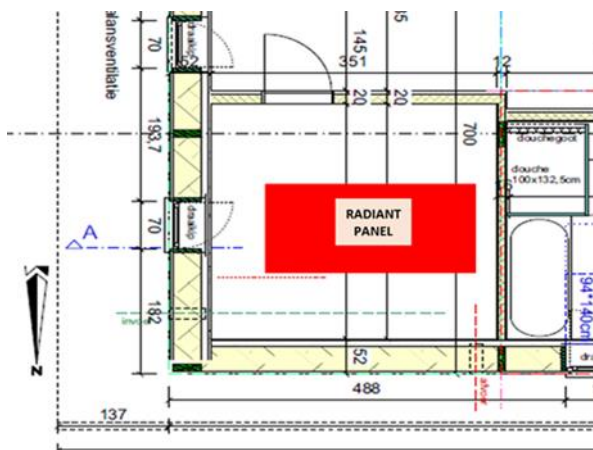
Pri prezračevani fasadi ni razumnega obdobja povrnitve naložbe, saj je prvotna finančna naložba zelo visoka v primerjavi s prihranki energije. Kot že povedano, se izolacija zunanjega zidu priporoča skupaj s prezračevano fasado zaradi preprečevanja kondenzacije. Naslednji grafični prikaz kaže potencialne prihranke energije, povezane z debelino izolacije – $\lambda = 0,038 \text{ W/mK}$. Z dodajanjem 4 in 6 cm izolacije dosežemo pomembno zmanjšanje porabe energije. Z izolacijo od 6 do 10 cm pa se prihranki povečujejo počasneje.



Slika 93: Prezračevana fasada, vključno z izolacijo zunanjega zidu

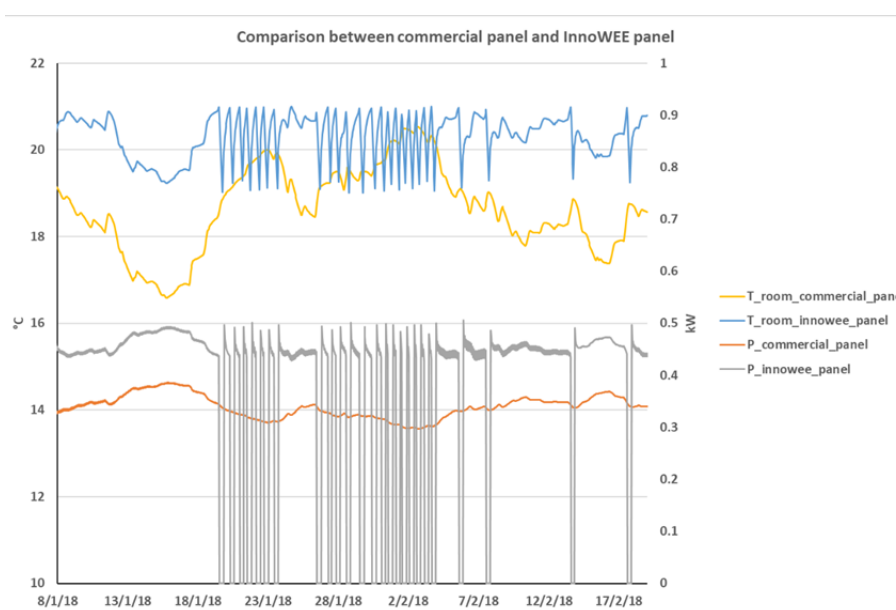
Belgijsko pilotno mesto

V ekohiši so bile konkurenčne sevalne plošče primerjane s sevalnimi ploščami InnoWEE.



Slika 94: Analizirani prostor s sevalnimi ploščami

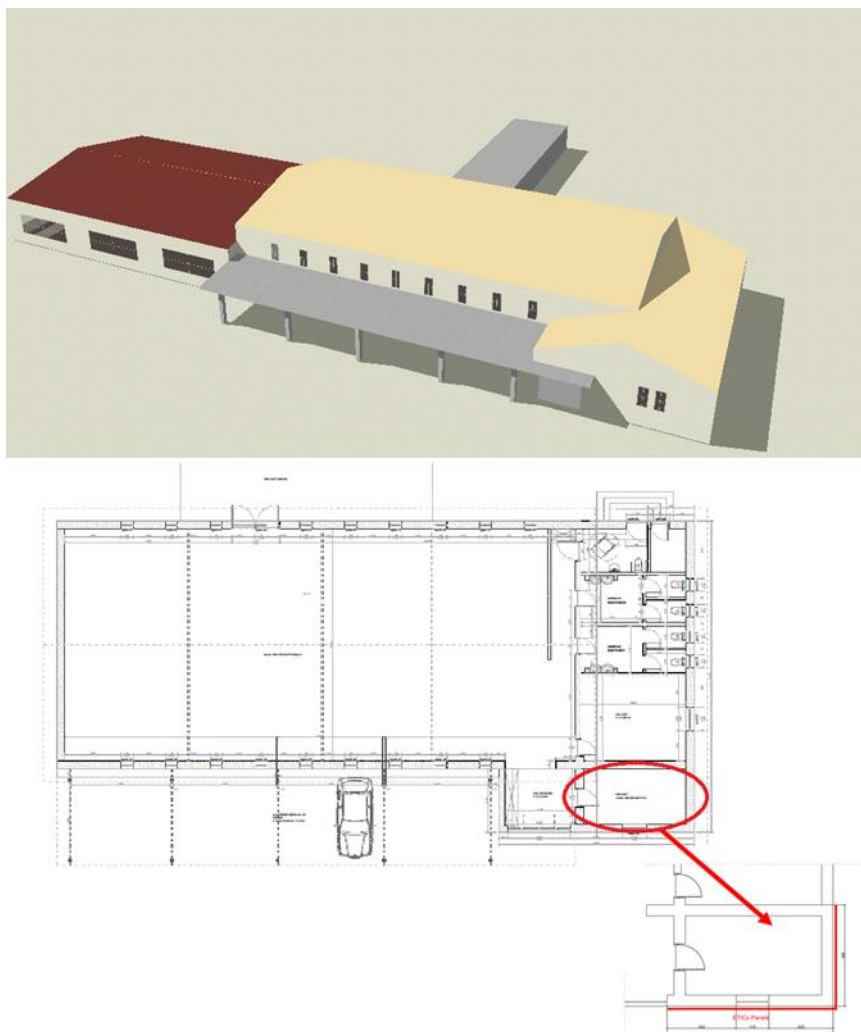
Glede na to, da je bila gradnja pilotnega mesta dokončana pred kratkim, bodo rezultati simulacij preverjeni po preizkusnem obdobju na pilotnem mestu. V obeh primerih je bil termostat v analiziranem prostora nastavljen na 20°C, iz spodnjega grafa (Slika 95) je razvidno izboljšanje energijske učinkovitosti z uporabo InnoWEE sevalnih plošč.



Slika 95: Urne vrednosti temperature prostora v grelni sezoni ob uporabi konkurenčnih plošč in plošč InnoWEE ter energije, ki jo zagotovijo plošče

Romunsko pilotno mesto

Pilotno mesto v Romuniji je bil večnamenski prostor v domu za ostarele in sirote z motnjami v telesnem razvoju in učnimi težavami. Enonadstropna stavba ima pravokotni tloris in preprosto pritlično konstrukcijo iz prednapetih nosilcev in betonskih stebrov. Na romunskem pilotnem mestu so bile plošče za kontaktne izolativne fasade vgrajene na dveh zunanjih zidovih shrambe.



Slika 96: Načrt romunskega pilotnega mesta s shrambo

Stavba nima sistema ogrevanja in hlajenja, zasedenost pa je izjemno majhna. Zato ni velike porabe in so v tem dokumentu obravnavane le potrebe. Ker ni na voljo podatkov iz merilnikov, modela stavbe ni mogoče primerjati s prejšnjimi primeri. Vendar primerjava s potrebo po ogrevanju standardne stavbe s podobnimi značilnostmi¹ v istem scenariju kaže, da je vrednost v območju veljavnosti.

Izvedba plošč za kontaktne izolativne fasade zagotovi prihranke v višini 20 % skupne energije, kot je razvidno iz spodnje preglednice.

Preglednica 7: Primerjava med potrebo po ogrevanju shrambe pred vgradnjo plošč InnoWEE (scenarij 0) in po njej (scenarij 2)

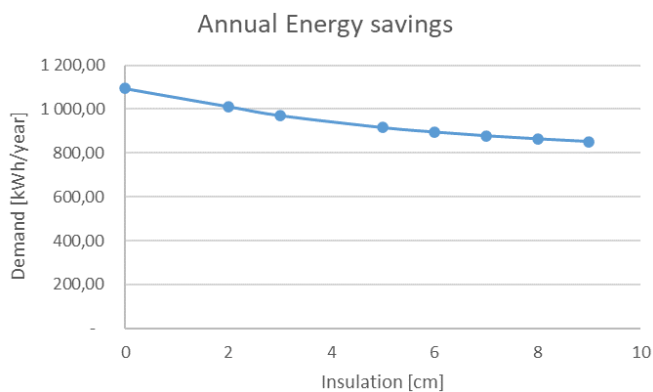
Mesec	Obstoječa shramba – scenarij 0	Shramba z vgrajenimi ploščami – scenarij 2
	Ogrevanje [kWh]	Ogrevanje [kWh]
Januar	375,09	296,80
Februar	222,16	173,97
Marec	63,08	41,61
April	1,52	1,01
Maj	0	0

¹ <http://webtool.building-typology.eu/#bm>

Junij	0	0
Julij	0	0
Avgust	0	0
September	0	0
Oktober	12,22	7,67
November	118,16	86,28
December	302,69	238,25
SKUPAJ [kWh/leto]	1094,92	845,59
SKUPAJ [kWh/m² leto]	49,77	38,43

Da bi celovito preverili potencial izboljšane zasnove, je bila ocenjena vgradnja plošč za kontaktne izolativne fasade z različnimi debelinami izolacije. Zasnovo je treba optimizirati z realističnimi in stroškovno učinkovitimi parametri ter doseči kompromis med stroški in energijsko učinkovitostjo. Zasnova temelji na:

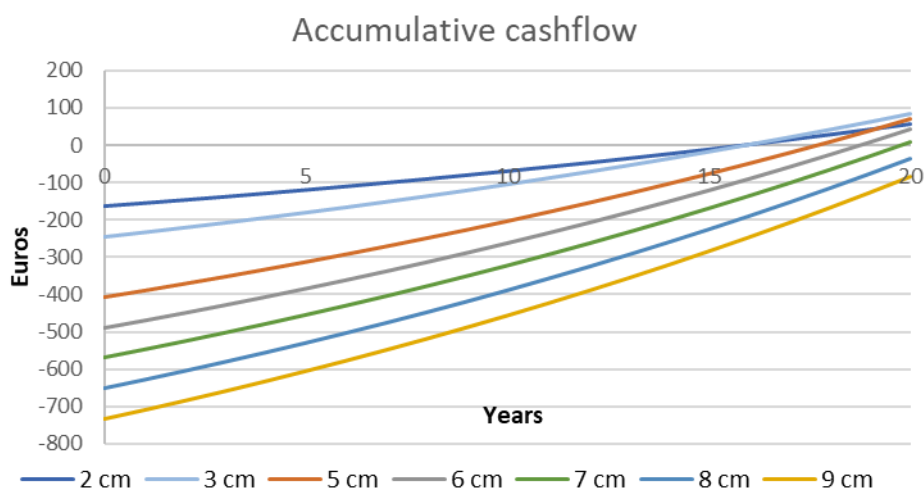
- zmanjšanju potreb po energiji,
- optimizaciji debeline izolacije,
- gospodarskih vidikov, stroških naložbe.



Debelina (cm)	Potrebe po energiji (kWh/leto)	Prihranki
0	1094,92	0,00 %
2	1011,88	7,58 %
3	971	11,32 %
5	915,47	16,39 %
6	895,24	18,24 %
7	877,89	19,82 %
8	863,87	21,10 %
9	851,31	22,25 %

Slika 97: Skupni letni prihranek za različne debeline izolacije

Prvi graf prikazuje letne prihranke energije ob različnih debelinah izolativnega materiala. Očitno je, da se s povečanjem debeline potreba po energiji zmanjša. Zmanjšanje se giblje od 7,58 % pri 2 cm do 22,25 % pri 9 cm izolacije. Vendar je s slike in iz preglednice jasno razvidno, da se ocenjeni odstotek prihranka energije opazno zmanjšuje nad 6 cm izolacije. Taki prihranki se povečajo za 2,43 % s povečanjem debeline izolacije s 7 cm na 9 cm.



Slika 98: Kumulativni denarni tok romunskega pilotnega mesta

Glede kumulativnega denarnega toka lahko zaključimo, da se vgradnja plošč za kontaktne izolativne fasade povrne v 16 letih, ko vgradimo 2 cm izolacije. Pri izolaciji nad 7 cm ne pričakujemo povrnitve naložbe.

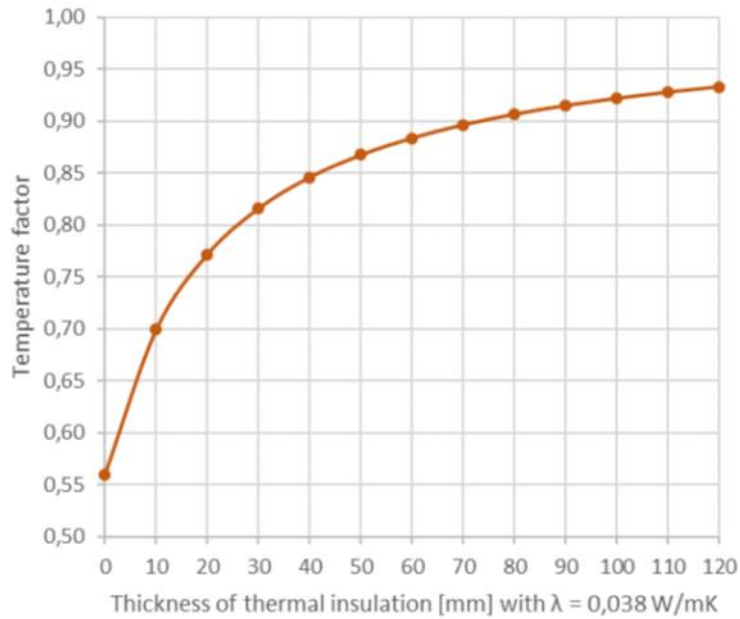
Analize so temeljile na spodnjih predpostavkah:

- Strošek elektrike: 0,099 EUR/kWh.
- Inflacija stroška elektrike: 3 %.

5.3. Higrotermalna ocena

Poenostavljeni enodimenzionalni izračuni toplotnega toka ne upoštevajo vpliva toplotnih mostov, kot so nosilci sistema InnoWEE. Za natančnejšo oceno toplotne učinkovitosti in tveganja za površinsko kondenzacijo ter nastanek plesni je bilo izvedeno tridimenzionalno numerično modeliranje. Ocenjena je bila vrsta različnih debelin izolacije, pri čemer je bila izolacija nameščena na zunanjo površino prvotnega zidu, ki je bil nasproti prezračevanega prostora.

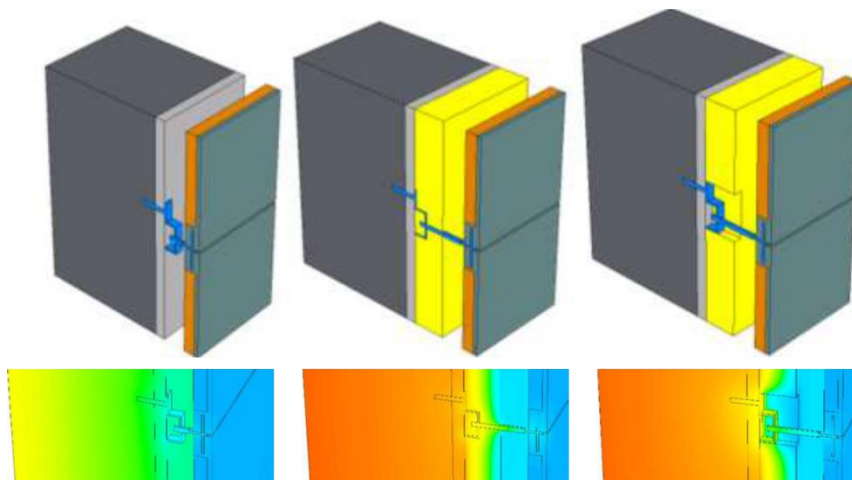
Temperaturni faktor (opredeljen v standardu ISO 13788) je bil uporabljen kot mera za ocenjevanje tveganja površinske kondenzacije in nastanka plesni. Notranja površinska temperatura je v dinamičnem ravnotežju med 0 (temperatura zunanjega zraka) in 1 (temperatura notranjega zraka), pri čemer nižje vrednosti kažejo večje tveganje kondenzacije. Meje tveganja so odvisne od zunanjih klimatskih razmer in notranjih atmosferskih razmer. Kot konservativni pristop je bila izbrana najranljivejša pilotna stavba, tj. Voula, s faktorjem 0,62 kot mejo za najslabši scenarij. Vsi primeri z izolacijo imajo temperaturni faktor nad 0,80 in se zato štejejo za netvegane.



ISO 13788 (A.1)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Temperature [°C]	20.0	20.0	20.0	20.0	23.9	25.7	27.2	26.5	24.4	22.0	20.0	20.0
Saturation vap. pressure [Pa]	2337	2337	2337	2337	2964	3300	3605	3460	3045	2642	2337	2337
Relative humidity [%]	52.3	54.5	57.4	62.5	67.8	71.4	74.4	73.0	68.7	64.0	57.9	54.4
Vapour pressure [Pa]	1222	1274	1341	1461	2010	2356	2682	2526	2092	1691	1353	1271
Critical relative humidity [%]	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Critical vapour pressure [Pa]	1528	1592	1677	1826	2512	2946	3353	3157	2615	2114	1691	1589
Min. Surf. temperature [°C]	13.3	13.9	14.7	16.1	21.2	23.8	26.0	25.0	21.8	18.4	14.9	13.9
Min. temperature factor [-]	0.62	0.61	0.58	0.48	0.55	0.56	0.56	0.56	0.55	0.55	0.58	0.61

Slika 99: Higrotermalna ocena EN ISO 13788:2012

Ko je govora o toplotni učinkovitosti, toplotni most v primeru brez zračnih rež okoli nosilcev povzroči povečanje vrednosti U v višini 8–14 %, kar šteje za sprejemljivo. Vendar se z zračnimi režami okoli sider vrednost U poveča za 25–70 %, kar povzroči pomembno zmanjšanje skupne toplotne učinkovitosti. Zato je priporočljiva uporaba prožnih izolacijskih materialov, ki se skrbno zavijejo okoli nosilcev, da se preprečijo zračne reže.



Slika 100: Prezračevana fasada: brez izolacije (levo), 60 mm izolacije brez reže okoli sidra (sredina), 60 mm izolacije z zračno režo okoli sidra (desno)

5.4. Dosežki InnoWEE in projekt za vsako pilotno mesto

V spodnjih preglednicah so predstavljeni dosežki InnoWEE v smislu prihrankov energije in izpustov CO₂.

Preglednica 8: Energijski dosežki InnoWEE proizvodov

Scenarij	Osnovni (končna energijska slika)		Obnove InnoWEE			
	Potrebe po ogrevanju [kWh/m ² ·leto]	Potrebe po hlajenju [kWh/m ² ·leto]	Heating demand [kWh/m ² ·yr]	Potrebe po ogrevanju [kWh/m ² ·leto]	Potrebe po hlajenju [kWh/m ² ·leto]	Reduction [%]
Italija (ETICS, cona A)	45,77	0,8	Italija (ETICS, cona A)	45,77	0,8	Italija (ETICS, cona A)
Italija (prezračevana fasada, cona B)	41,62	1,03	Italija (prezračevana fasada, cona B)	41,62	1,03	Italija (prezračevana fasada, cona B)
Grčija (ETICS)	52,75	40,39	Grčija (ETICS)	52,75	40,39	Grčija (ETICS)
Grčija (prezračevana fasada)	42,99	40,73	Grčija (prezračevana fasada)	42,99	40,73	Grčija (prezračevana fasada)
Romunija	49,77	0	Romunija	49,77	0	Romunija

Preglednica 9: Dosežki InnoWEE proizvodov na področju izpustov CO₂

Scenarij	Osnovni (končna energijska slika)		Obnove InnoWEE			
	Potrebe po ogrevanju [g/kWh·leto]	Potrebe po hlajenju [g/kWh·leto]	Heating demand [g/kWh·yr]	Potrebe po ogrevanju [g/kWh·leto]	Potrebe po hlajenju [g/kWh·leto]	Reduction [%]
Italija (ETICS)	339,45	6,08	Italija (ETICS)	339,45	6,08	Italija (ETICS)
Grčija (ETICS)	1088,27	920,77	Grčija (ETICS)	1088,27	920,77	Grčija (ETICS)
Grčija (prezračevana fasada)	626,61	657,92	Grčija (prezračevana fasada)	626,61	657,92	Grčija (prezračevana fasada)
Romunija	Ni na voljo	Ni na voljo	Romunija	Ni na voljo	Ni na voljo	Romunija

Za namen določitve specifičnega projekta sanacije za vsako pilotno mesto je potrebna potrditev novih izdelkov v realističnem merilu. Zato je bila izvedena analiza značilnosti vseh pilotnih mest, da bi razumeli nekatere podrobnosti za izdelavo projektov za vgradnjo plošč. Izvedena je bila na podlagi predhodno zbranih podatkov, zlasti:

- geografska lokacija,
- potresno tveganje,
- izpostavljenost,
- namembnost,
- možnosti za vgradnjo.

Poleg navedene analize je projekt vključeval tudi:

- predstavitev odobrenega scenarija vgradnje,
- predlog vgradnje za vsako pilotno mesto,

- faze vgradnje,
- uporabljeni materiali in količine,
- uporabljene plošče - število, barva,
- faze odstranitve,
- organizacija gradbišča,
- ocena tveganja varnosti in zdravja pri delu,
- vpliv na okolje in omilitveni ukrepi.

6. Analiza življenjskega cikla

Raziskovalci, oblikovalci politike in podjetja so vedno bolj osredotočeni na zmanjševanje ekološkega vpliva stavb in materialov, iz katerih so zgrajene. Analiza življenjskega cikla (LCA) je standardizirana tehnika, ki obravnava vplive na okolje, povezane z različnimi fazami življenjskega cikla izdelka. Te faze vključujejo pridobivanje surovin, prevoz le-teh v tovarno, predelavo materiala in proizvodnjo izdelka, prevoz na mesto vgradnje, vgradnjo, fazo rabe izdelka, vključno s popravili in vzdrževanjem, fazo ponovne uporabe, reciklaže ali odlaganja odpadkov ter nazadnje vplive izdelka na okolje preko sistemskih meja življenjskega cikla - v naslednjem sistemu (ISO14040: 2006, ISO14044: 2006, EN 15804). Na področju ravnanja z odpadki se LCA uporablja (i) za analiziranje uspešnosti splošnih strategij ravnanja z gradbenimi odpadki po rušenju in za analizo strategij reciklaže takih odpadkov, (ii) za primerjavo naravnega materiala z recikliranim materialom proizvedenim iz gradbenih odpadkov, (iii) za analizo različnih scenarijev izrabe gradbenih odpadkov po izteku življenjske dobe stavb in gradbenih elementov ter (iv) za vrednotenje proizvodnje električne energije iz gradbenih odpadkov (Bovea in Powell, 2016).

V študiji analize življenjskega cikla izdelka/storitve (LCA) obstajajo štiri različne faze in sicer:

- **faza opredelitve cilja in obsega analize**, ki določa kontekst študije z opredelitvijo funkcionalne oziroma deklarirane enote, sistemskih meja ter vseh predpostavk in omejitev analize;
- **faza okoljskega inventarja**, ki upošteva vhodne (voda, energija in surovine) in izhodne tokove (emisije v zrak, zemljo in vodo) v preučevanem sistemu;
- **faza presoje vplivov**, katere cilj je oceniti pomen in obseg možnih vplivov na okolje na podlagi rezultatov tj. vseh tokov pri analizi zalog;
- **faza interpretacije**, kjer so ugotovitve iz rezultatov faze analize zalog in/ali faze ocene učinka povzete in ovrednotene glede na opredeljeni cilj in obseg študije.

Analiza življenjskega cikla izdelkov je metoda z nekaj omejitvami, a je učinkovito orodje, ki ga lahko uporabimo za opredelitev nekaterih okoljskih trendov.

V primeru **recikliranih materialov na osnovi odpadkov**, ki nastanejo pri gradnji in rušenju smo se pri LCA osredotočili na:

- Modeliranje,
- Opredelitev scenarijev,
- Metodologijo,
- Različne scenarije izrabe,
- Določitev ustreznih sistemskih mej.

6.1. LCA metodologija

Cilj analize LCA v okviru projekta InnoWEE je raziskati vplive na okolje, povezane z različnimi fazami življenjskega cikla predizdelanih geopolimernih plošč iz večje količine recikliranih gradbenih odpadkov in odpadkov pri rušenju. Analizirane so bile tri različne predizdelane geopolimerne plošče: (i) montažne plošče za kontaktne izolativne fasade, (ii) plošče za prezračevane fasade in (iii) e sevalne stropne plošče.

Analiza je bila izvedena za deklarirano enoto obravnavanega izdelka. Deklarirana enota je 1m² predizdelanih geopolimernih plošč, tj. plošč za kontaktne izolativne fasade, plošč za prezračevane fasade ali sevalnih stropnih plošč.

Meje sistema so postavljene po načelu “od zibke do groba”, ki zajema vse faze življenjskega cikla izdelkov, tj. fazo proizvodnje (A1-A3), fazo vgradnje (A4-A5), fazo rabe (B1-B7), fazo po izteku življenjske dobe (C1-C4) ter fazo vpliv na okolje preko sistemskih meja (D). Moduli A1 – D so podrobneje definirani v EN 15804.

Faza proizvodnje sestoji iz faze (i) proizvodnje materialov, vključno s pridobivanjem surovin, (ii) prevoza materialov do mesta, kjer se iz njih proizvedejo plošče, (iii) proizvodnje predizdelanih geopolimernih plošč, ki vključuje mešanje sestavnih materialov, ulivanje, strjevanje, odstranjevanje iz kalupov, sušenje, sestavljanje, pakiranje in skladiščenje proizvedenih predizdelanih geopolimernih plošč. Energija za mešanje, ulivanje, strjevanje, prevoz znotraj tovarne ipd. in voda (za čiščenje ipd.) je tudi upoštevana v izračunih.

Faza vgradnje sestoji iz prevoza plošč do mesta vgradnje (modul A4) in vgradnje plošč (modul A5). Pri izračunu LCA je bila upoštevana prevožena razdalja 200 km za vse pomožne materiale, ki se jih pri vgradnji uporabi (pritrilni elementi, malta, sidra, itd.).

Ko so plošče nameščene, se začne faza rabe predizdelanih geopolimernih plošč. V 30-letni življenjski dobi plošč je potrebnih nekaj vzdrževalnih del (modul B2) in popravil (modul B3). Kot vzdrževalna dela (modul B2) je bil uporabljen scenarij čiščenja plošč z vodo in čistilom vsakih pet let. Kot scenarij popravila (modul B3) pa se predvideva manjša popravila s tesnilno maso vsakih deset let. Drugo posredovanje ni potrebno.

Kot faza po izteku življenjske dobe se upošteva scenarij, kjer je del plošče lahko recikliran in nadomešča primarne materiale v cestogradnji, medtem ko je nerekiclabilni del plošč (npr. EPS) odpeljan na odlagališče. Demontaža plošč ne predstavlja obremenitve za okolje (modul C1), saj se izvede ročno. Nerekiclabilni del plošč se odvozi na odlagališče (modul C4) oddaljeno 50 km. Stopnja recikliranja geopolimera je bila postavljena na 70%, kar pomeni, da je 70 % geopolimera po demontaži odvoženega do obrata za reciklažo (modul C3), medtem ko je ostalih 30 % odvoženih na odlagališče (modul C4). Prevožena razdalja do obrata za reciklažo (modul C2) je bila prav tako postavljena na 50 km. V obratu za reciklažo je geopolimer zdrobljen na želeno velikost delcev (modul C3).

Ko je dosežena faza po izteku življenjske dobe, se predpostavlja, da je geopolimer uporabljen v cestogradnji, s čimer se ognemo uporabi primarnih materialov. Zato vplivi na okolje preko sistemskih meja (modul D) upoštevajo prevoz sekundarnega materiala do mesta vgradnje v cesto in korist za okolje (negativen predznak pri rezultatih) zaradi menjave primarnega materiala s sekundarnim. Prevožena razdalja do mesta vgradnje v cesto je bila postavljena na 50 km. Sekundarni material (reciklirani geopolimer) nima enake kvalitete kot primarni material, zato je bil uporabljen korekcijski faktor, da se razlike izniči. Vrednost korekcijskega faktorja je 0,5, kar pomeni, da so izračunane koristi zaradi menjave primarnega materiala s sekundarnim pomnožene s faktorjem 0,5.

6.2. Okoljski inventar (LCI)

Pri izvedbi LCA študije je bila za modeliranje uporabljena programska oprema GaBi (thinktep, 2019b), saj je ta eden najpogosteje uporabljenih programov na področju modeliranja LCA (Herrmann in Moltesen, 2015). Pri modeliranju v LCA gre za kombiniranje podatkov, ki se že nahajajo v bazah podatkov (GaBi Professional in Ecoinvent) ter vhodnih podatkov o materialih, kjer se materialov življenjski cikel do uporabe v obravnavanih predizdelanih geopolimernih ploščah modelira posebej (ang. »upstream modelling«), saj jih v bazah ni moč najti. Pridobivanje in predelava surovin, predelava sekundarnega materiala, dobava materialov ter proizvodnja in oskrba

z energijo in vodo so bili torej modelirani na podlagi podatkov, podanih v podatkovni bazi GaBi Professional. Metakaolin, kalijev silikat in specifični gradbeni odpadki, uporabljeni pri proizvodnji panelov pa so bili modelirani posebej.

LCA življenjskih ciklov do rabe v ploščah, ki so bili modelirani posebej:

- **metakaolin:** proizvodnja temelji na mletju kaolina v mlinu, sušenju kaolina in nato kalcinaciji mletega kaolina v metakaolin v plavžu.
 - Glavni vhodni materiali v LCA model: kaolin in energija.
- **Kalijev silikat:** hidrotermalna proizvodnja raztopine kalijevega silikata temelji na reakciji vira silicijevega dioksida z vodno raztopino kalijevega hidroksida.
 - Glavni vhodni materiali v LCA model: kalijev hidroksid, vir silicijevega dioksida (npr. kremenčev pesek) ter energija in voda.
- **gradbeni odpadki in odpadki pri rušenju:** V študiji LCA za gradbene odpadke pri rušenju so bile uporabljene različne metode za izračun obremenitev okolja z odpadki. V končnem izračunu je bila za modeliranje recikliranih gradbenih odpadkov uporabljena metoda »cut-off«, kar pomeni, da sekundarni ali reciklirani materiali nosijo samo okoljske vplive procesov recikliranja.
 - Glavni vhodni materiali v LCA model: energija in voda.

6.3. Presoja vpliva na okolje (LCIA)

Okoljski odtisi izdelkov so bili modelirani na vmesni točki (ang. »midpoint«) s CML 2001 metodo. CML 2001 je metoda izračuna okoljskih odtisov, s katero računamo okoljske vplive življenjskega cikla proizvoda v zgodnjih fazah vzročno-posledične verige, saj so tako negotovosti pri rezultatih manjše. Rezultati so na vmesni točki združeni v skupine glede na podobne mehanizme (npr. globalno segrevanje) oziroma glede na splošno sprejeto deljenje v skupine (npr. ekotoksičnost) (Guinée, 2002). Glavni principi CML 2001 metode temeljijo na ISO 14040 in 14044 standardih. Karakterizacijski faktorji se sproti osvežujejo, glede na nova pridobljena znanja (zadnja osvežitev januarja 2016) (thinkstep, 2019b). Rezultati okoljskih odtisov izdelka so po CML 2001 metodi predstavljeni v skupinah različnih potencialnih vplivov na okolje. Ker metoda CML 2001 ne vrednoti potrebe po primarni energiji (tj. primarni energiji iz obnovljivih in neobnovljivih virov) in skupne porabe vode je ta ločeno ovrednotena s programsko opremo za modeliranje GaBi. Indikatorji okoljskih vplivov in potreba po primarni energiji in vodi, izračunani v LCA, so predstavljeni v Preglednica 10.

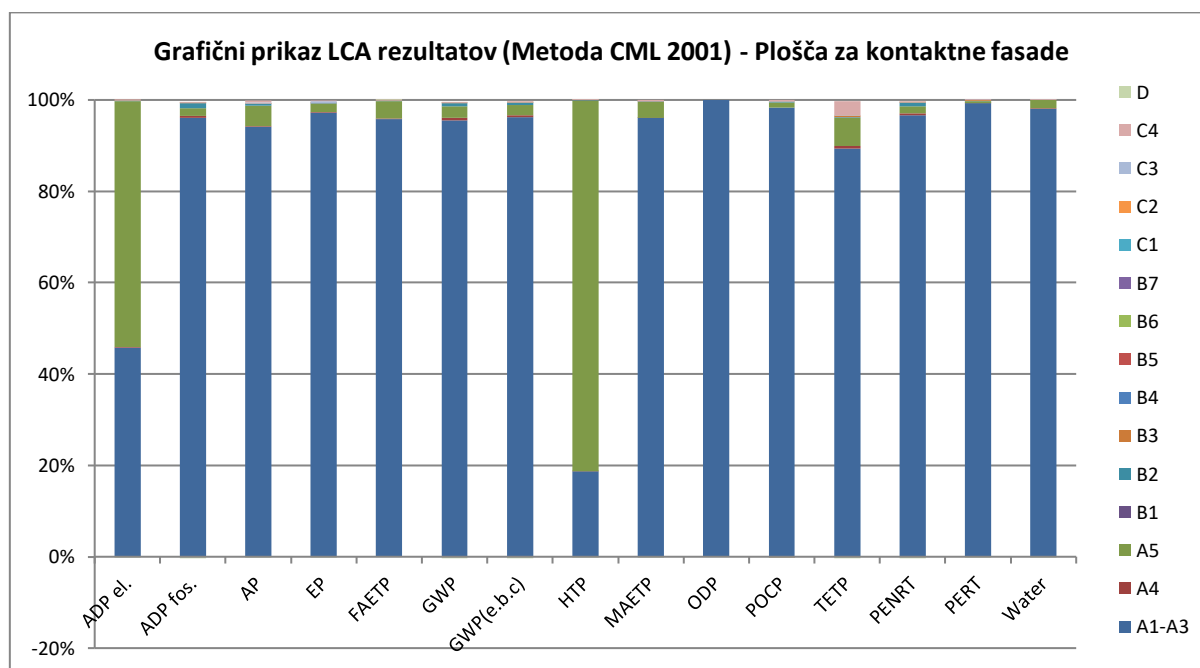
Preglednica 10: LCA indikatorji okoljskih vplivov, enote in okrajšave

Indikatorji okoljskih vplivov	Okrajšave	Enote
Potencial globalnega segrevanja	GWP	[kg CO ₂ eq.]
Potencial globalnega segrevanja vklj. biogeni ogljik	GWP excl biog. carbon	[kg CO ₂ eq.]
Potencial za zakisovanje zemlje in vode	AP	[kg SO ₂ eq.]
Potencial za evtrofikacijo	EP	[kg PO ₄ -3 eq.]
Potencial za toksičnost za ljudi	HTP	[kg DCB eq.]
Potencial za razgradnjo ozona	ODP	[kg R11 eq.]
Potencial za fotokemično nastajanje ozona	POCP	[kg Ethene eq.]
Potencial ekotoksičnosti sladke vode	FAETP	[kg DCB eq.]
Potencial ekotoksičnosti morske vode	MAETP	[kg DCB eq.]
Potencial ekotoksičnosti kopenskih sistemov	FAETP	[kg DCB eq.]

Izraba abiotskih virov (surovin)	ADP el.	[kg Sb eq.]
Izraba abiotskih virov (fosilnih goriv)	ADP fos.	[MJ]
Skupna raba primarne neobnovljive energije	PENRT	[MJ]
Skupna raba obnovljive primarne energije	PERT	[MJ]
Raba sveže pitne vode	WATER	[kg]

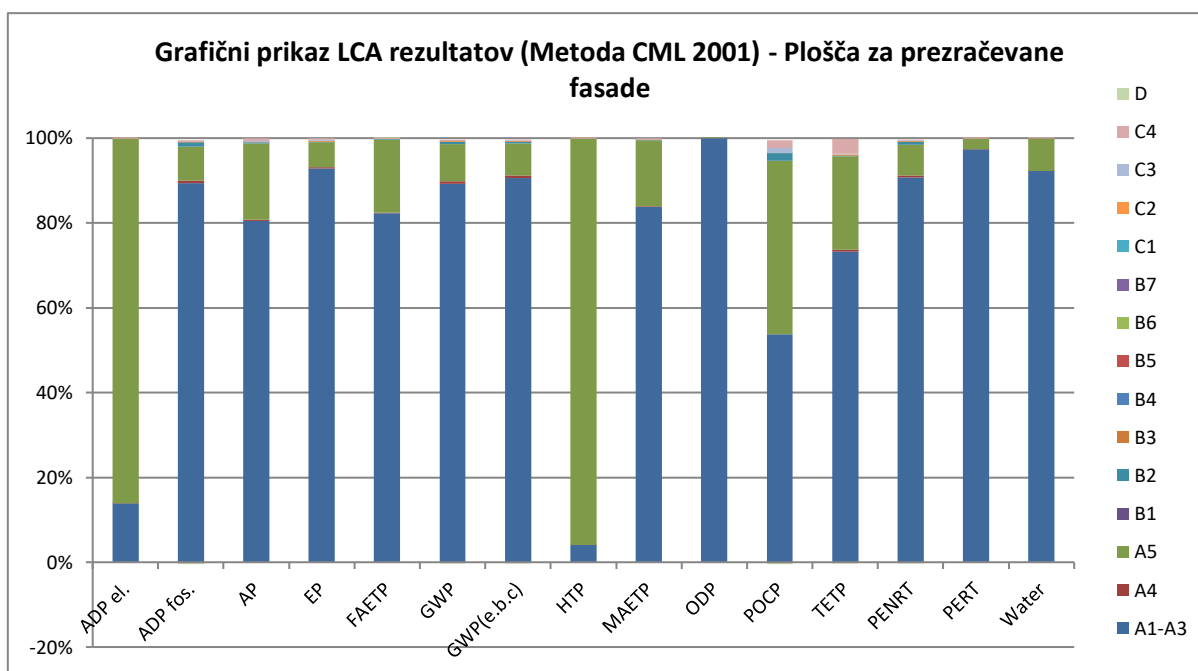
6.4. Interpretacija LCA

Slika 101 prikazuje vplive na okolje, za različne faze življenjskega cikla plošče za kontaktne izolativne fasade. Iz Slika 101 je razvidno, da faza proizvodnje (tj. Moduli A1-A3) najbolj prispeva k okoljskemu odtisu obravnavane predizdelane geopolimerne plošče. Druga faza življenjskega cikla, ki ima pomembnejši vpliv na okolje, je faza vgradnje (tj. Modul A5) predvsem pri parametrih ADP el. in HTP. Vse ostale faze življenjskega cikla predstavljajo zelo majhen delež okoljskih vplivov predizdelanih geopolimernih plošč.



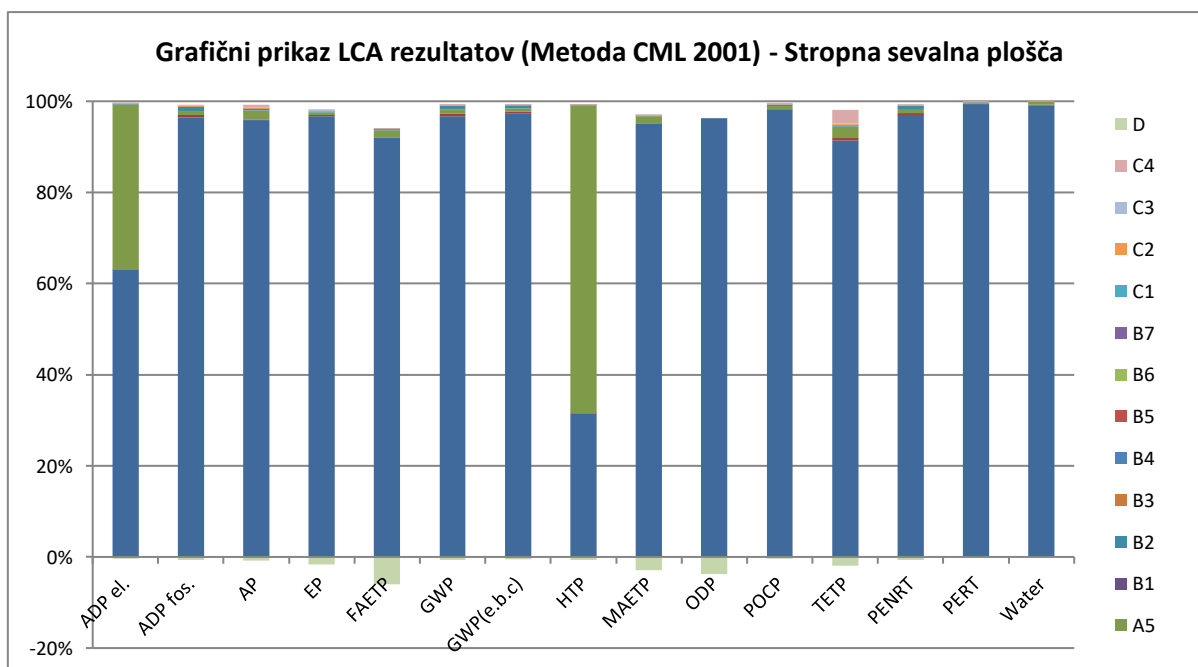
Slika 101: Rezultati LCA za plošče za kontaktne izolativne fasade

Podobno kot zgoraj, so na Slika 102 prikazani vplivi na okolje, za različne faze življenjskega cikla predizdelane geopolimerne plošče za prezračevane fasade. Faza proizvodnje (tj. moduli A1-A3) znova najbolj prispeva k okoljskemu odtisu obravnavane predizdelane geopolimerne plošče. Druga faza življenjskega cikla, ki ima pomembnejši vpliv na okolje, je faza vgradnje (tj. modul A5) predvsem pri parametrih ADP el., HTP, POCP in TETP. Vse druge faze življenjskega cikla imajo minimalen vpliv na okoljski odtis plošče.



Slika 102: Rezultati LCA za plošče za prezračevane fasade

Nazadnje je na Slika 103 prikazan še vpliv na okolje različnih faz življenjskega cikla predizdelanih geopolimernih sevalnih stropnih plošč. Faza proizvodnje (tj. moduli A1-A3) znova najbolj prispeva k okoljskemu odtisu obravnavane predizdelane geopolimerne plošče. Druga faza življenjskega cikla, ki ima pomembnejši vpliv na okolje, je faza vgradnje (tj. modul A5) predvsem pri parametrih ADP el. in HTP. Tako kot pri drugih vrstah plošč tudi pri tej vse druge faze življenjskega cikla minimalno vplivajo na okoljski odtis sevalne stropne plošče.



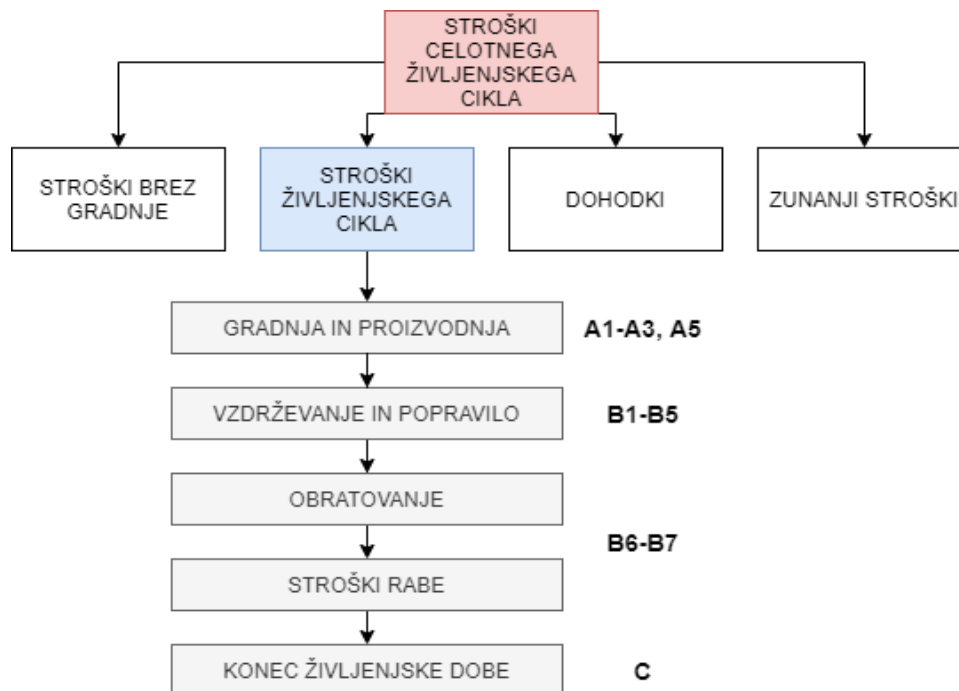
Slika 103: Rezultati LCA za stropne sevalne plošče

Predstavljeni rezultati LCA analize kažejo, da faza proizvodnje pri vseh obravnavanih tipih plošč doprinese največji delež okoljskih odtisov. Zato bi morala biti kakršnakoli potencialna optimizacija okoljskih odtisov življenjskega cikla predizdelanih geopolimernih plošč primarno naravnana na optimiziranje proizvodnega procesa.

6.5. Stroški življenjskega cikla izdelka – LCC

Stroški življenjskega cikla (LCC) se računajo, ko želimo poznati resnične stroške izdelka (ne samo proizvodnih) saj so pogosto stroški, ki nastanejo v nadaljnjem življenjskem obdobju izdelka višji od začetnih. V izračunu LCC so računani različni stroški, kot je razvidno iz Slika 104. Pristop k izračunu LCC za plošče InnoWEE je modularni, tj. z razčlenitvijo stroškov po posameznih fazah življenjskega cikla, ki so enake kot v LCA.

Na Slika 104 je predstavljena shema, ki prikazuje razmerje med stroški celotnega življenjskega cikla stavbe (WLC) in stroški življenjskega cikla izdelka (LCC). Obarvani kvadratici so bili obravnavani v LCC analizi predizdelanih geopolimernih plošč. Stroški obratovanja in rabe se ne nanašajo neposredno na izdelek InnoWEE, zato je prispevek nastavljen na nič.



Slika 104: Shema InnoWEE LCC analize

Na Slika 104 je prav tako prikazano, kako se v življenjskem ciklu upošteva modularnost. Izračuni vhodnih stroškov so ločeni za proizvodnjo (A1-A3), vgradnjo (A5), fazo rabe (B1-B5) in konec življenjske dobe (C). Stroški za fazo rabe (B6-B7) je enak nič, saj izdelek ne porablja energije ali drugih snovi (npr. vode). Prevoz (A4) je izpuščen, ker je specifičen za vsako stavbo.

Pri zunanjih stroških se ocenjujejo možni stroški emisij (emisije CO₂ bi namreč prispevale k ceni sistema, čeprav so alocirane na modul A3 - proizvodnja). Stroški so neposredno povezani z emisijami CO₂, ki se jih v LCA meri z GWP.

Za izračun LCC v InnoWEE projektu veljajo naslednje predpostavke:

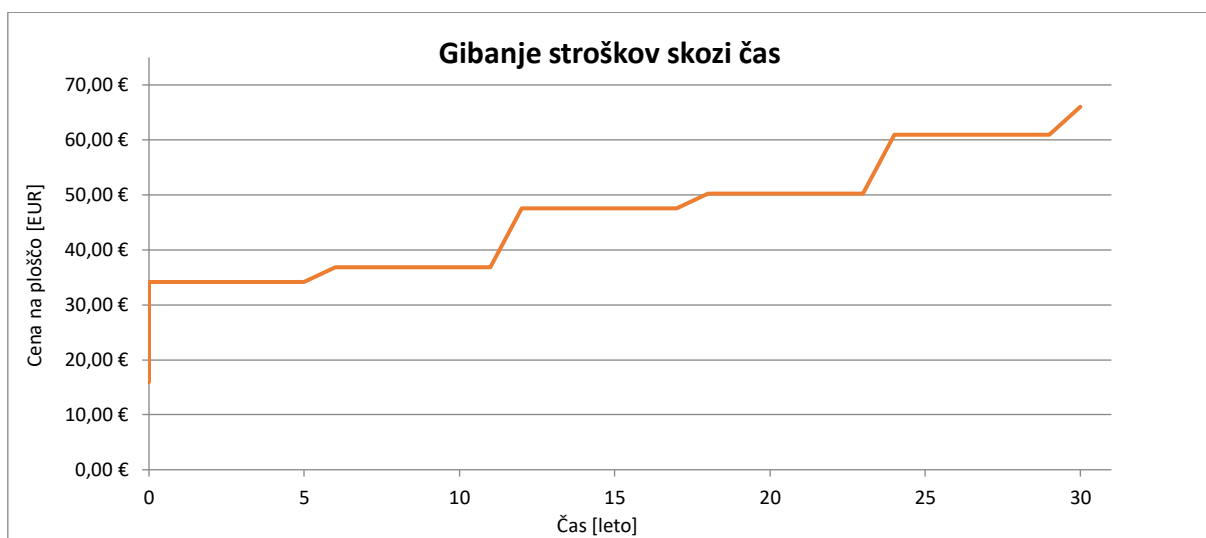
- Proizvodni stroški so znani in pri izračunih služijo kot osnova,
- Realistično je potrebno upoštevati industrializacijo,
- Stroški namestitve se upoštevajo na podlagi podatkov o projektu ter primerljivih podatkih,
- Vzdrževanje izdelkov je podvrženo različnim scenarijem in je odvisno od same lokacije ter pogojev uporabe izdelka,
- Stroški, ki so povezani s koncem življenjske dobe izdelka: stroški demontaža, stroški prevoza, pristojbine in davki (odlaganje izdelkov na odlagališčih ipd.), upoštevanje trenutnih cen,

- Stroški so zelo odvisni od lokacije posameznih odlagališč,
- Stroški odstranjevanja/demontaža so na splošno visoki,
- Upoštevati je potrebno okoljske stroške, povezane s proizvodnjo (emisije CO₂, NO/NO_x, SO₂).

Vse predpostavke temeljijo na natančno ocenjenih parametrih, kar zagotavlja realni končni rezultat izračuna stroškov.

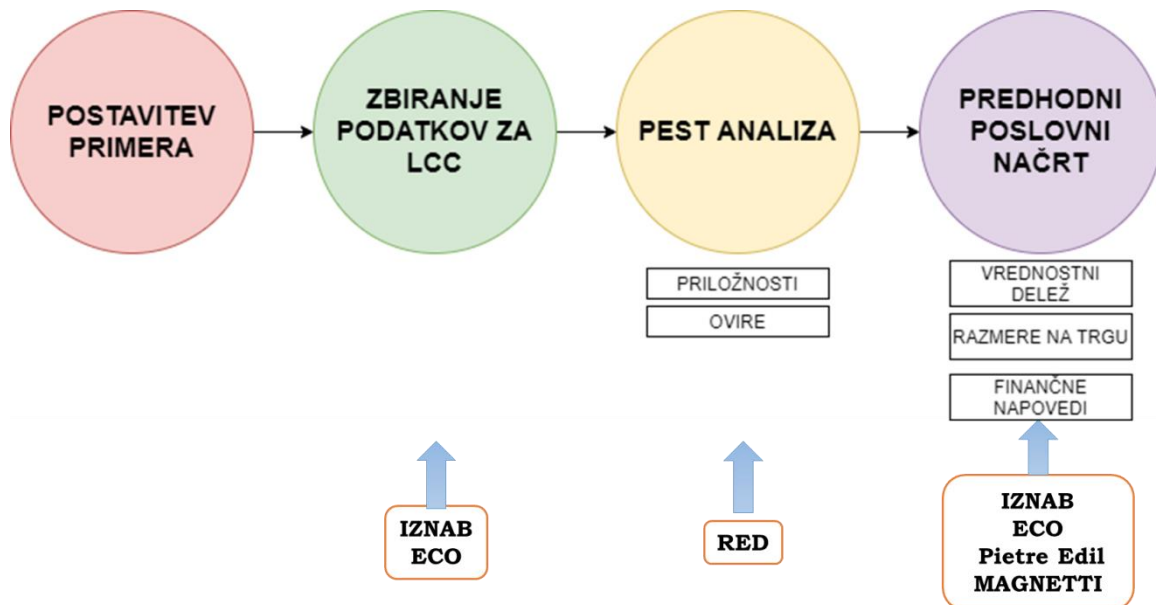
Nejasnosti, ki vplivajo na končni rezultat so stroški, povezani z lokacijo stavbe, kjer naj bi se namestili izdelki InnoWEE. Glavni dejavniki, ki so odvisni od lokacije, so stroški dela pri vgradnji (delovna sila), lokalna razpoložljivost določenih sestavnih delov in podnebne razmere, ki lahko zmanjšajo (v primerjavi s trenutnim izračunom) stroške vzdrževanja.

Pri izračunu stroški izhajajo iz dejanskih podatkov o projektu ali iz uradnih virov (npr. stroški odlagališč).



Slika 105: Stroški življenjskega cikla (LCC) - Rezultati za scenarij industrializacije

Izračun na Slika 105 prikazuje gibanje stroškov skozi čas. Vidno je, da so začetni stroški izdelka (v času 0) razmeroma nizki. Stroški vgradnje (prvo leto, označeno z dvigom LCC v letu 0) so odvisni od specifične lokacije. Če so stroški namestitve manjši (npr. cenejša delovna sila ali večja površina), se celotna krivulja premakne navzdol. Stroški, nastali v fazi uporabe (B1-B5), so izračunani tako, da so na varni strani. Nadaljnja optimizacija vzdrževanja (npr. splošni posegi v vzdrževanje stavbe namesto določenih posegov) lahko zmanjša stroške vzdrževanja. Na splošno podatki o LCC kažejo dobre rezultate za obravnavane izdelke.



Slika 106: Metodologija predhodne ocene stroškov (SRM)

Analiza obnašanja izdelka v celotnem življenjskem ciklu je sestavljena iz presoje njegove okoljske učinkovitosti z uporabo metode LCA in njegove ekonomske učinkovitosti z uporabo metode LCC. LCA je pokazal močne in šibke točke obravnavanih izdelkov InnoWEE. Kljub temu pa se zaradi nadgradnje iz razvojne faze izdelka, v kateri se trenutno nahaja, v fazo industrializacije, pričakuje nadaljnje zmanjšanje obremenitev okolja. Pri industrializaciji je namreč možna nadaljnja optimizacija virov in količine energije, potrebne za proizvodnjo izdelkov, saj proizvodna faza predstavlja največji delež okoljskih odtisov pri skoraj vseh obravnavanih kazalcih. V fazi proizvodnje je mogoče večino optimizacije opraviti z optimizacijo virov in količine energije z uvajanjem obnovljivih virov, kot je npr. sončna energija.

Iz analize stroškov je razvidno, da stroški proizvodnje niso nujno prevladujoči. Izkazalo se je, da so stroški vzdrževanja močno odvisni tudi od lokacije stavbe, cene delovne sile in od različne obremenitve izpostavljenih elementov zaradi okoljskih dejavnikov. Omeniti velja, da so ocene na varni strani glede na pogostost posegov.

V splošnem, ob upoštevanju tako okoljske kot stroškovne analize, so InnoWEE izdelki primerljivi s podobnimi izdelki na trgu. Po industrializaciji proizvodnje pa imajo InnoWEE plošče velik potencial, da primerljive izdelke na trgu presežejo.

7. Sklepne ugotovitve

V okviru politik EU za trajnost in krožno gospodarstvo se je projekt H2020 European RIA InnoWEE – »Inovativni predizdelani elementi, ki vsebujejo različne odpadne gradbene materiale za zmanjšanje energijske porabe stavb in zmanjšanje okoljskih vplivov« začel leta 2016 in razvil tri vrste arhitektonskih predizdelanih plošč za izboljšanje energijske učinkovitosti stavb, saj tako porabljena energija predstavlja okoli 40 % celotne porabe energije v EU. Ciljne aplikacije InnoWEE so vključevale obstoječe stavbe, potrebne obnove, s posebnim poudarkom na stavbah, ki so del kulturne dediščine. Plošče so bile izdelane z inovativnimi namensko razvitimi geopolimernimi vezivi, sposobnimi vezanja velikih količin agregatov iz gradbenih odpadkov in odpadkov pri rušenju, in sicer v skladu s cilji EU, ki so določeni v Okvirni direktivi za odpadke.

InnoWEE je namenoma štiri leta sledil poti gospodarske družbe, ki je pripravljena izdelek razvijati od koncepta do morebitnega trženja na trgu. Stopnja pripravljenosti tehnologije (TRL) vsake vrste plošč je bila uspešno dvignjena s 3 (potrditev zasnove) na 6/7 (demonstracija v ustreznem/delovnem okolju), pri čemer je bil razvoj celovit in je obravnaval naslednje vidike: tehnološka vprašanja, veljavne tehnične standarde in predpise, vprašanja varnosti in zdravja, možnosti trženja, industrijsko in poslovno načrtovanje ter analizo življenjskega kroga.

Tako so bili v kontekstu trajnosti in krožnega gospodarstva preverjeni in optimizirani geopolimerni materiali in industrijske metode proizvodnje plošč, da bi dosegli delujoče in stroškovno učinkovite izdelke. Primernost za namen in toplotna učinkovitost plošč sta bili preskušani v laboratoriju in na pilotnih stavbah, pozneje pa je bila izvedena potrditev z umerjenimi numeričnimi modeli. Industrijsko in poslovno načrtovanje je izkoristilo tržni potencial teh izdelkov, ocenjeni pa so bili tudi okoljski, družbeni in ekonomski vplivi.

Geopolimerni materiali, ki so glavna sestavina plošč InnoWEE in vključujejo do 50 % recikliranih agregatov iz gradbenih odpadkov in odpadkov pri rušenju (CDW), so bili predmet obsežnih preiskav, nato pa je bila izvedena hevristična optimizacija, in sicer tako, da bi izpolnili zahteve proizvodnje na industrijski ravni in zagotovili zadovoljivo kakovost končnih izdelkov. Poleg tega je bila ocenjena njihova primernost za ponovno uporabo po koncu uporabnosti v obliki recikliranih agregatov, s čimer smo predlagali mogočo izvedljivost proizvodnje po načelu zaprte zanke.

Zasnovali, prototipizirali in izdelali smo tri vrste plošč, tj. za zunanje kontaktne izolativne fasade, za prezračevane fasade in za notranje sevalne vodne sisteme ogrevanja/hlajenja, za kar smo uporabili pilotni obrat za nadgradnjo tehnologije, ki je bil uspešno zasnovan in ciljno izveden.

Plošče so bile predmet obsežnih preizkušanj v smislu njihovih mehanskih in fizikalnih lastnosti ter trajnosti, pri čemer smo sledili določbam izbranih evropskih smernic za evropska tehnična soglasja (ETAG) in evropskih standardov EN. Ocenjeni so bili naslednji parametri: kapilarno vpijanje vode, prepustnost za vodno paro, odpornost proti udarcem, trdnost, odpornost proti zmrzovanju in tajanju, odpornost protu zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli za posipanje cest, odpornost proti karbonatizaciji, alkalno-silikatna reaktivnost in sulfatna odpornost. Razen pri odpornosti proti zmrzovanju in tajanju v prisotnosti soli za posipanje cest so bili vsi drugi rezultati primerljivi s cementnimi izdelki oziroma so učinkovitost slednjih preseгли.

Vgradnja na štiri pilotne stavbe v različnih klimatskih regijah (Grčija, Belgija, Italija in Romunija), ki smo jih spremljali pred vgradnjo in po njej, nam je omogočila sistematično raziskavo toplotne

učinkovitosti v dejanskih razmerah in tako zagotovila neprecenljive podatke za numerično modeliranje. Opazovali smo tudi trajnost zunanjih aplikacij, tj. z rednim neporušitvenim testiranjem.

Dejanske pilotne stavbe so zagotovile podatke za energijsko modeliranje stavbe (BEM) za potrditev strategij simulacije in umerjanje modelov. Na podlagi podatkov iz sistemov za spremljanje in 3D-simulacij štirih virtualnih pilotnih stavb (v Italiji, Grčiji, Romuniji in Španiji) smo lahko ocenili učinkovitost plošč v različnih situacijah in dosegli optimalno zasnovo na podlagi različnih scenarijev.

Na koncu so analize v okviru ocene življenjskega kroga (LCA), izračunane za pilotni obrat, pokazale ugodne rezultate v smislu vplivov na okolje. Izpostavljena žarišča odkrivajo točke, pri katerih sta potrebni dodatna optimizacija in celovita nadgradnja, ki na koncu privedeta do skupno boljših vplivov na okolje v primerjavi z rešitvami, ki so na voljo na trgu. Stroškovna analiza ravno tako kaže potencial za konkurenčnost izdelkov, ko bodo dokončno nadgrajeni in bo proizvodnja v celoti industrializirana.

Reference

Spletna stran in socialna omrežja



www.innowee.eu



https://twitter.com/InnoWEE_H2020



<https://www.linkedin.com/company/innowee-project/>



<https://www.facebook.com/InnoWEE/>



<https://www.instagram.com/innowee/>



<https://www.youtube.com/channel/UCHBqCg99kX1XaaDttpT2ZOw>



https://zenodo.org/communities/innowee_h2020_project/?page=1&size=20



https://explore.openaire.eu/search/project?projectId=corda_h2020::ad86c8f2e07c3e2cd38388d235dc1628

Članki

- Panizza, M., Natali, M., Garbin, E., Tamburini, S., & Secco, M. (2018). *Assessment of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates as a building material*. CONSTR BUILD MATER, 181:119-133. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.018
- ZAG (2018). *Projekt InnoWEE - Razvoj Gradbenih Proizvodov s Tehnologijo Alkalijske Aktivacije*. Gradbenik. Ljubljana, Slovenia. doi.org/10.5281/zenodo.3686608
- Frankovič, A., Ducman, V., Kramar, S., Panizza, M., Tamburini, S., Natali, M., Pappa, M., Tsoutis, C., Bernardi, A. (submitted). *Up-scaling and performance assessment of façade panels produced from CDW by alkali activation technology*. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, 262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120475>
- Panizza, M., Natali, M., Garbin, E., Ducman, V. & Tamburini, S. *Optimization and mechanical-physical characterization of geopolymers with Construction and Demolition Waste (CDW) aggregates for construction products*. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, 264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120158>
- Kvočka, D., Lešek, A., Knez, F., Ducman, V., Panizza, M., Tsoutis, C., Bernardi, A. *Life Cycle Assessment of Prefabricated Geopolymeric Façade Cladding Panels Made from Large Fractions of Recycled Construction and Demolition Waste*. MATERIALS, 13 (18). <https://doi.org/10.3390/ma13183931>
- Frankovič, A. *Evaluation of innovative façade panels with a finishing layer of alkali-activated industrial and construction waste*. University of Ljubljana – Faculty of Civil and Geodetic Engineering. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4106500>

Konferenčni članki

- Ducman, V., Frankovič, A., Dolenc, S., Tamburini, S., Natali, M., Bernardi, A. Durability assessment of geopolymer façade panels based on CDW. V: Martins, I.M. (ur.), Ulsen, C. (ur.), Villagran, Y. (ur.). The Proceedings of the IV International Conference Progress of recycling in the built environment: 11-12 October 2017, Lizbon, Portugal, (RILEM Proceedings, PRO 124). PARIS: RILEM publications. 2018, pp 307-314, <https://www.rilem.net/publication/publication/492>. [COBISS.SI-ID 2425447]. doi.org/10.5281/zenodo.3268426
- Knez, N., Knez, F., Ducman, V., Tamburini, S., Natali, M., Bernardi, A. Reaction to fire properties of wood waste-based geopolymer panels. V: Martins, I.M. (ur.), Ulsen, C. (ur.), Villagran, Y. (ur.). The Proceedings of the IV International Conference Progress of recycling in the built environment: 11-12 October 2017, Lizbon, Portugal, (RILEM Proceedings, PRO 124). PARIS: RILEM publications. 2018, pp 488-495, <https://www.rilem.net/publication/publication/492>. [COBISS.SI-ID 2425703]. doi.org/10.5281/zenodo.3268462
- Bernardi, A., Tamburini, S., Failla, C., Signorini, S., Sonzogni, F. The InnoWEE Project: from waste to energy efficiency. Italian Concrete Days 2018, 13 June 2018, Milano, Italy. doi.org/10.5281/zenodo.3570999
- Fodor, L., Ducman, V., Ferrarini, G., Tamburini, S., Tsoutis, C., Becherini, F., Garrido-Marijuán, A., Mezzasalma, G., Rossi, L., Lezak, E., Bernardi, A. Innovative pre-fabricated components including different waste construction materials reducing building energy and minimising environmental impacts (InnoWEE). V: Clima 2019: built environment facing climate change, REHVA 13th HVAC World Congress, 26 - 29 May 2019, Bucharest, Romania. doi.org/10.1051/e3sconf/201911103076
- Ferrarini, G., Bison, P., Bortolin, A., Cadelano, G., Natali, M., Panizza, M., Tamburini, S. A novel experimental setup for the stress test of geopolymer-based hydronic radiant panels using infrared thermography. V: QIRT Asia 2019, 1 – 5 July 2019, Tokyo, Japan. doi.org/10.5281/zenodo.3557714
- Arregi, B., Garay, R., Garrido-Marijuan, A. Assessment of thermal performance and surface moisture risk for a rear-ventilated cladding system for façade renovation. V: SBE19-Thessaloniki: Sustainability in the built environment for climate change mitigation, 23 – 25 October 2019, Thessaloniki, Greece. doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012102

Seznam kratic in simbolov

Kratice

6σ	Metodologija Six Sigma	FEM	Modeliranje končnega elementa
AAM	Alkalijsko aktivirani materiali	GWP	Potencial globalnega segrevanja
AC	Izmenični tok	H2020	Okvirni program Obzorje (Horizon) 2020
ADP	Izčrpavanje abiotskih virov	HDG	Geopolimer visoke gostote
AP	Potencial za zakisanje	hEN	Harmonizirani standard
ASR	Alkalno-silikatna reaktivnost	HTP	Potencial toksičnosti za človeka
ASTM	<i>Ameriško</i> društvo za preizkušanje in materiale (American Society for Testing and Materials)	ICP MS	Spektrometer z induktivno sklopljeno plazmo
AVCP	Ocenjevanje in preverjanje nespremenljivosti lastnosti	InnoWEE	Inovativni predizdelani elementi, ki vsebujejo različne odpadne gradbene materiale za zmanjšanje energijske porabe stavb in zmanjšanje okoljskih vplivov
BEM	Energijsko modeliranje stavbe	ISO	Mednarodna organizacija za standardizacijo
BIM	Informacijsko modeliranje gradbenih objektov	K-sil	Kalijev silikat
C&D	Gradbeništvo in rušenje	LCA	Ocena življenjskega kroga
CDW	Gradbeni odpadki in odpadki pri rušenju	LCC	Strošek življenjskega kroga
CE	Evropska skladnost	LCCA	Ocena stroškov življenjskega kroga
CLP	Klasifikacija, označevanje in embalaža	LEEMA	Izolacijski materiali in gradbeni elementi z nizko vgrajeno energijo za energetsko učinkovite stavbe
CO₂	Ogljikov dioksid	MAETP	Potencial ekotoksičnosti morske vode
CPR	Uredba o gradbenih izdelkih	MK	Metakaolin
DMAIC	Definiraj, meri, analiziraj, izboljšaj, nadzoruj	NDT	Neporušitveno testiranje
EAD	Evropski ocenjevalni dokument	NO/NO_x	Dušikov/-i oksid/-i
EC	Evropska komisija	NPT	Neto proizvodni čas
EFT	Eigenov frekvenčni preizkus	ODP	Potencial tanjšanja ozonske plasti
EN	Evropski standard	PAH	Policiklični aromatski ogljikovodiki
EOTA	Evropska organizacija za tehnične ocene	PCB	Poliklorirani bifenil
EoW	Ukinitev statusa odpadkov	PENRT	Primarna energija iz neobnovljivih virov
EP	Potencial za eutrofikacijo	PERT	Primarna energija iz obnovljivih virov
EPS	Ekspandirani polistiren	PEST	Analiza političnih, ekonomskih, družbenih in tehnoloških dejavnikov
ETA	Evropska tehnična ocena	PEX-a	Zamreženi polietilen
ETAG	Smernice za evropska tehnična soglasja	PMV	Napovedana srednja ocena
ETICS	zunANJI toplotnoizolacijski sestavljeni sistemi	POCP	Potencial nastajanja fotokemičnih oksidantov
EU	Evropska unija	PP	Polipropilen
FA	Elektrofiltrski pepel	PPD	Napovedan odstotek nezadovoljnih
FAETP	Potencial ekotoksičnosti sladke vode		
FE	Končni element		

PU	Poliuretan	UHTS	Ultra visoka natezna trdnost
QAP	Načrt zagotavljanja kakovosti	UPS	Brezprekinitveno napajanje
R&I	Raziskave in inovacije	UPTT	Čas preleta ultrazvočnega impulza
REACH	Uredba o registraciji, evalvaciji, avtorizaciji in omejevanju kemikalij	VF	Prezračevana fasada
RH	Relativna vlažnost	VOC	Hlapna organska spojina
RIA	Raziskovalno-inovacijski projekt	WG	Lesni geopolimer
SHT	Površinska toplotna obdelava	WGP	Plošča iz lesnih geopolimerov
SO₂	Žveplov dioksid	WLC	Celoten življenjski krog
SRM	Sekundarna surovina	WP	Delovni paket
SWA	Površinska absorpcija vode	XPS	Ekstrudirani polistiren
TAB	Organ za tehnično ocenjevanje	XRF	Rentgenska fluorescenca
TETP	Potencial ekotoksičnosti za okolje		
TOC	Skupni organski ogljik		
TRL	Stopnja pripravljenosti tehnologije		
TUPP	Pilotni obrat za nadgradnjo tehnologije		

Simboli

P	moč	m²	kvadratni meter
T	temperatura	m³	kubični meter
%	odstotek	kg/m²	kilogram na kvadratni meter
°C	stopinje Celzija	N/mm²	newton na kvadratni milimeter
g	gram	W/m⁻¹·K⁻¹	vat na meter-kelvin
kg	kilogram	min	minuta
km	kilometer	kWh	kilovatna ura
m	meter	EUR	evro
cm	centimeter	kWh/leto	kilovatna ura na leto
mm	milimeter	kWh/m²·leto	kilovatna ura na kvadratni meter na leto
µm	mikrometer		

Partnerji projekta in sodelavci na projektu



CNR-ISAC

National Research Council – Institute of Atmospheric Sciences and Climate

Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova, Italy

Adriana Bernardi – Project Coordinator
Gianluca Cadelano



CNR-ICMATE

National Research Council – Institute of Atmospheric Sciences and Climate

Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova, Italy

Sergio Tamburini
Marco Natali
Matteo Panizza



CNR-ITC

National Research Council – Institute for Construction Technologies

Corso Stati Uniti 4, 35127 Padova, Italy

Paolo Bison
Giovanni Ferrarini



AMSOLUTIONS

AMS LTD. – R&D Department

Nika 15, 13671, Acharnes, Athens, Greece

Maria Sachini
Constantinos Tsoutis



RED

RED S.l.r.

Viale dell'industria 58E, 35127 Padova, Italy

Giulia Mezzasalma
Luc Pockelé



TECNALIA

TECNALIA Research & Innovation

Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Astondo Bidea
Edificio 700, 48160 Derio, Spain

Ander Romero Amorrortu
Beatriz Fraga De Cal
Antonio Garrido Marijuan
Beñat Arregi Goikolea



ECO

GUIDOLIN GIUSEPPE – ECO. G. SRL

Via per San Floriano 29, 31033 Castelfranco Veneto (TV), Italy

Giulia Ceschel
Mirco Bordignon
Magaton Tomas



Pietre Edil

SC Pietre Edil SRL

Strada Slănic 3, 030167 Bucharest, District 3, Romania

Leonardo Rossi
Loredana Fodor
Alexandru Tanase



IZNAB

IZNAB SPOLKA Z OGRANICZONA ODPOWIEDZIALNOSCIA

Al. Jana Pawła II 23, 00-854 Warsaw, Poland

Emil Lezak
Jakub Pluta



ZAG

Slovenian National Building and Civil Engineering Institute

Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenia

Vilma Ducman
Friderik Knez
Sabina Dolenc
Ana Frankovič
Nataša Knez
Anja Lešek
Davor Kvočka
Sebastjan Robič
Aljoša Šajna



MAGNETTI

Magnetti Building S.p.A.

Via Don Angelo Pedrinelli 118, 24030 Carvico (BG), Italy

Casati Anna
Signorini Sergio
Sonzogni Francesco



VOULA

Dimos Varis-Voulas-Vouliagmenis

Leoforos Karamanli 18, 16673 Voula, Greece

Dimitris Apostolopoulos
Evangelos Demetriou



www.innowee.eu



»Projekt je prejel sredstva iz raziskovalnega in inovacijskega programa Evropske unije Obzorje 2020 v skladu s sporazumom o dodelitvi sredstev št. 723916.«