

Povezava informacijskega modeliranja gradenj in izračuna toplotne kapacitete energetskih kablov

Andrej Hrvatin, Borut Zemljarič², Valentin Ažbe²

Kolektor Igin, Brnčičeva ulica 19G, 1231 Ljubljana-Črnuče, Slovenija

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: andrej1.hrvatin@gmail.com

Povzetek. Z naraščajočo potrebo po uporabi digitalnih pristopov pri načrtovanju in vodenju projektov se v zadnjem desetletju vse bolj uveljavlja informacijsko modeliranje gradenj, tudi v elektroenergetiki. Pri načrtovanju elektroenergetskih omrežij je zaznati stalno rast uporabe kabelskih sistemov za prenos električne energije, pri čemer je ustrezno dimenzioniranje teh sistemov ključnega pomena za njihovo zanesljivo in učinkovito delovanje. Pri tem je ena pomembnejših analiz izračun tokovne zmogljivosti kablov preko izračuna temperaturnih razmer. Čeprav je na trgu na voljo več namenskih programskih rešitev za dimenzioniranje kablov, večina teh ne omogoča neposredne integracije z orodji za informacijsko modeliranje gradenj.

V prispevku je predstavljena možnost povezave modela informacijskega modeliranja gradenj visokonapetostnega kabelskega sistema s programom za izračun toplotnih razmer, razvitim v okolju FreeFEM preko namensko razvitega programskega vmesnika. Tako je prikazano, da je mogoče model informacijskega modeliranja gradenj učinkovito vključiti oziroma povezati s poljubnim specializiranim programom za izračun temperaturnih razmer kablov. Analiza vpliva različnih dejavnikov na polaganje energetskih kablov je pokazala, da so dobljeni rezultati dobro primerljivi z rezultati namenskih programskih orodij, kar potrjuje ustreznost in uporabnost razvitega pristopa.

Ključne besede: Informacijsko modeliranje gradenj, BIM, energetski kabli, termična analiza, metoda končnih elementov

Building information modeling and power cable thermal capacity calculation

With the growing need for digital approaches in project planning and management, the past decade has witnessed a significant rise in the adoption of Building Information Modeling (BIM) which is now expanding into numerous professional fields. In the power engineering, there has been a steady increase in the use of cable systems for the electric power transmission, where the proper dimensioning of such systems is essential to ensure their reliable and efficient operation. Although several dedicated software solutions for cable dimensioning are available on the market, most do not offer a direct integration with the BIM tools.

The paper investigates the possibility of linking a BIM model of a high-voltage cable system with a program developed in the FreeFEM environment, an open-source software tool for numerical solving thermal states using the finite-element method. The connection between the BIM model and FreeFEM systems is enabled using the Python programming language that employs the open-source IfcOpenShell library.

Thermal analysis of the cable system was compared with the results of dedicated commercial cable dimensioning program.

The final part of our paper presents a practical case study of selecting an appropriate power cable based on a real-world engineering example. Using a custom-developed interface, the BIM model can be effectively integrated or linked with any specialized program for calculating the cable thermal states. Our analysis of the impact of various factors on the power cable installation confirm that the obtained results are highly comparable to those generated by dedicated software tools, thereby validating the accuracy and applicability of our approach.

Keywords: Building Information Modeling, BIM, power cables, thermal analysis, finite-element method

1 UVOD

Uporaba informacijskega modeliranja gradenj (angl. Building Information Modeling, BIM) je široko uveljavljena kot tehnično orodje za vizualizacijo, optimizacijo in koordinacijo v fazah načrtovanja, izvedbe ter obratovanja gradbeno-inženirskih objektov na globalni ravni. Še zlasti pomembno vlogo ima v gradbeništvu in arhitekturi, kjer je prispevala k doseganju pomembnih gospodarskih koristi.

Prejet: 20. september, 2025

Odobren: 21. maj, 2026



Avtorske pravice: © 2026
Creative Commons Attribution 4.0
International License

V Sloveniji je bila zahteva po obvezni uporabi pristopa BIM uvedena s 1. januarjem 2025, in sicer v Gradbenem zakonu (GZ-1) [1], [2], [3], ki določa, da je uporaba pristopa BIM obvezna za elektrarne z nazivno električno močjo nad 10 MW ter za elektroenergetske vode z napetostjo 110 kV ali več, skupaj s pripadajočimi funkcionalnimi objekti.

Ena od ključnih prednosti pristopa BIM je izboljšano sodelovanje med različnimi strokami – arhitekturo, gradbeništvo, strojništvo in elektrotehniko –, saj omogoča sočasno delo na skupnem modelu, ki je dostopen vsem udeležencem v katerikoli fazi projekta. Po drugi strani pa se je treba zavedati, da posamezne stroke pri projektiranju pogosto uporabljajo specializirane programske rešitve, ki niso v celoti integrirane v okolje BIM. V takih primerih je v praksi treba vzpostaviti povezavo med okoljem BIM in programom za strokovne izračune ter omogočiti prenos podatkov v obe smeri.

Tradicionalni način projektiranja z uporabo orodij 2D CAD [5] vse pogosteje nadomešča 3D projektiranje na osnovi pristopa BIM, pri čemer je bil zabeležen znaten razvoj na področju načrtovanja, projektiranja, gradnje in vzdrževanja razdelilnih transformatorskih postaj (RTP) [6].

Pri projektiranju VN-kabelskih sistemov se v strokovni literaturi pogosto omenjata umestitev kablov v prostor ter priprava projektne dokumentacije z uporabo pristopa BIM, vendar termična analiza ni vključena kot sestavni del BIMa [7], [8]. Kabelski sistemi zahtevajo skrbno načrtovanje z vidika tokovno toplotnih obremenitev, saj lahko nezadostno odvajanje toplote povzroči pregrevanje, skrajša življenjsko dobo ali celo privede do poškodb kablov.

Za izvedbo termične analize kablov se uporabljajo različni pristopi in programska orodja, ki omogočajo oceno segrevanja glede na električno obremenitev in okoljske pogoje. Osnovne smernice za dimenzioniranje podajajo strokovni standardi in priporočila [9], [10], ki opredeljujejo lastnosti kablov, pogoje polaganja ter uporabo ustreznih korekcijskih faktorjev za prilagoditev referenčnega toka kabla glede na način polaganja in ozemljitve zaslonov kabla.

Na voljo so tudi različni namenski programi za termično dimenzioniranje kablov, kot so Cableizer [11], COMSOL [12], Cymcap [13] in ETAP [14]. Ti programi temeljijo na standardu IEC 60287, priporočilih CIGRE ali numeričnih metodah. Večinoma ne omogočajo neposredne povezave z okolji BIM, izjema je program COMSOL. Kot alternativa namenskim programom se za izračune toplotnih razmer VN-energetskih kablov v literaturi pogosto omenja uporaba metode končnih elementov [15], [16]. Kljub tehnični ustreznosti pa je povezava tega pristopa z okoljem BIM še vedno razmeroma redko obravnavana.

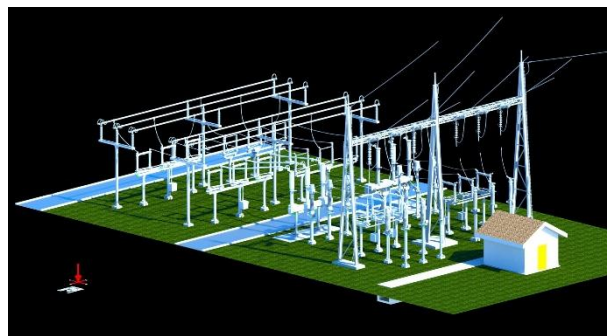
V prvem delu članka je predstavljen proces izdelave modela BIM VN-kabelskega sistema, skupaj z opisom osnovnih značilnosti njegovih elementov. Sledi opis vmesnika, razvitega v programskem jeziku Python, ki omogoča pretvorbo podatkov med orodjem BIM in

programskim odprtokodnim orodjem za reševanje matematičnih problemov s pomočjo metode končnih elementov FreeFEM [4]. Za izračune temperaturnih razmer kablov je uporabljena metoda končnih elementov (FEM), podprta v programskem okolju FreeFEM, ki je namenjeno reševanju sistemov diferencialnih enačb z uporabo variacijskega računa. V sklepnem delu sta predstavljena praktični primer uporabe razvitega programa na realnem primeru dimenzioniranja VN-kabelskega sistema in zaključek.

2 INFORMACIJSKO MODELIRANJE GRADENJ

Informacijsko modeliranje gradenj (BIM) je metoda, ki temelji na digitalnem modeliranju. Ključna prednost tega pristopa je končni informacijski model, ki ne vključuje zgolj 2D- ali 3D-predstavitev, temveč tudi digitalni dvojček objekta. Digitalni dvojček vsebuje vse potrebne informacije za celoten življenjski cikel objekta – od načrtovanja in gradnje do vzdrževanja in morebitne odstranitve [17], [18].

Z razvojem BIM se je pojavila potreba po uvedbi standardizacije, kar je privedlo do oblikovanja mednarodnega standarda ISO 19650. Ključno vlogo ima pri tem t. i. Common Data Environment (CDE) – enotno digitalno okolje za upravljanje projektnih podatkov, ki izboljšuje sodelovanje, zmanjšuje možnost napak in omogoča boljši nadzor nad informacijami. S centraliziranim dostopom do podatkov lahko projektna ekipa lažje zagotavlja pravilnost in ažurnost dokumentacije, kar vodi k učinkovitejšemu izvajanju projektov [19]. Primer rezultata načrtovanja stikališča 110/20 kV v okolju BIM s programskim orodjem [20] je prikazan na sliki 1.



Slika 1: Primer 3D-informacijskega modela BIM stikališča 110/20 kV.

V praksi se pristop BIM kaže kot izredno učinkovito orodje za vizualizacijo in koordinacijo med udeleženci gradnje. Tak primer je načrtovanje lokacijskega poteka energetskih kablov po objektu. Na sliki 2 je prikazan model dveh vzporednih kabelskih sistemov, izdelan v okolju BIM, ki služi kot primer za dimenzioniranje, opisano v naslednjih poglavjih. Kljub temu pa povezava med okoljem BIM in obstoječimi specializiranimi programi za dimenzioniranje tehnološke opreme še ni ustrezno implementirana.



Slika 2: Model BIM prikaza vmesnika.

V tem prispevku je za izdelavo modela BIM VN-kabelskega sistema uporabljeno programsko okolje Autodesk Revit [21].

3 VMESNIK MED OKOLJEM BIM IN TERMIČNO ANALIZO KABLOV

3.1 Namen vmesnika

Ker programi BIM, vključno z Revitom, ne omogočajo neposrednega izračuna temperaturnih razmer VN-kablov, je treba podatke iz modela izvoziti, predelati in prilagoditi za nadaljnjo obdelavo. Pri tem se pojavi težava, da so izvozne datoteke iz okolij BIM sicer standardizirane, vendar niso nujno neposredno združljive z orodji za numerične analize.

Ker je za termično analizo uporabljeno odprtokodno programsko okolje FreeFEM, namenjeno numeričnemu reševanju sistemov parcialnih diferencialnih enačb, je nujna povezava med omenjenima sistemoma. Za povezavo med okoljem Revit in FreeFEM je bil razvit vmesnik v programskem jeziku Python z uporabo odprtokodne programske knjižnice IfcOpenShell [25], ki deluje kot posredniška točka za pridobitev geometrije in informacij o kabelskem sistemu iz modela BIM.



Slika 3: Osnovni princip delovanja vmesnika.

Iz modela BIM se izvozijo geometrijski podatki ter del podatkov o uporabljenih materialih. Vmesnik te podatke prebere in jih prilagodi zahtevam za vnos vhodnih parametrov, potrebnih za izvedbo termične analize v programskem okolju FreeFEM.

3.2 Opis vmesnika v okolju Python

Kot je bilo že omenjeno, programsko okolje FreeFEM, v katerem se izvaja analiza termičnih razmer, ne omogoča neposrednega branja tridimenzionalnega (3D) modela BIM. Zato je potrebno 3D-geometrijo predstaviti s parametri, potrebnimi za izvedbo toplotnih izračunov. Postopek poteka tako, da se iz orodja BIM Autodesk Revit izvozi datoteka IFC, ki vsebuje model VN-kabelskega sistema, prikazan na levi strani slike 4. S pomočjo razvitega vmesnika se iz te datoteke pridobijo geometrijski in snovni podatki, ki se nato zapišejo v strukturirano besedilno datoteko z določenim zapisnim formatom in zaporedjem, kot prikazuje desna stran slike 4.

Delovanje algoritma vmesnika obsega štiri podsklope. V prvem podsklopu se izvede uvoz datoteke IFC v programsko okolje Python. Drugi podsklop se nanaša na branje geometrijskih podatkov, ki niso vključeni v podatkovne nize (Psets). Eden izmed takih parametrov je globina polaganja VN-kabelskega sistema, ki ne predstavlja konstantne oziroma privzete vrednosti, kot velja za večino drugih podatkov. Tretji podsklop algoritma obravnava postopek pridobivanja oziroma branja podatkov iz podatkovnih nizov (Psets). V tem koraku se preberejo vsi podatkovni nizi, ki pripadajo izbranemu tipu elementa, ter filtrirajo glede na niz IFC. V četrtem podsklopu se pridobljeni podatki iz modela zapišejo v besedilno datoteko, ki je vhodna datoteka v namenski program za izračun toplotnih razmer kablov.



Slika 4: Izmenjava podatkov med BIM in FreeFEM.

4 ENERGETSKI KABLI V OKOLJU BIM

Za razumevanje delovanja razvitega vmesnika moramo poznati osnovno strukturo modela v okolju Revit (BIM), ki sloni na glavnem modelu in knjižnicah, imenovanih družine (angl. families).

Glavni model, shranjen v datoteki s končnico .rvt, vključuje vse družine in projektne podatke, vključno z arhitekturnimi, konstrukcijskimi in inštalacijskimi komponentami. Vsi pogledi, kot so tlorisi, prerezi in tridimenzionalni pogledi, so neposredno povezani z istim modelom. Vsaka sprememba, izvedena v kateremkoli

delu modela, se samodejno odrazi v vseh povezanih pogledih in količinskih izpisih.

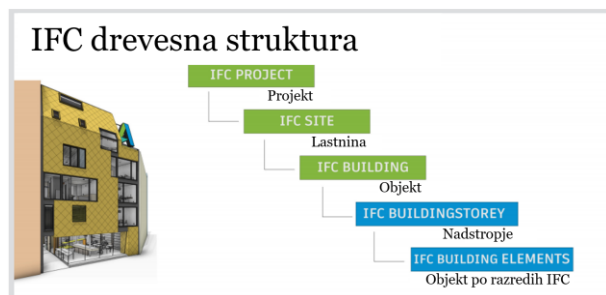
Ključni del strukture Revita so tudi knjižnice parametričnih komponent, ki omogočajo ponovljivo uporabo različnih gradnikov v projektu. Naložljive družine so shranjene kot ločene datoteke .rfa, ki jih je mogoče ustvariti, uvoziti ali prilagoditi glede na potrebe projekta.

Vsak element (družina) v modelu BIM ima določene lastnosti, ki so lahko tipske ali instančne (angl. instance). Tipiski parametri veljajo za vse primerke določenega tipa elementa; primer takšnega podatka je nazivna napetost kabla, ki je enaka za vse različice istega tipa kabla. Instančni parametri pa se nanašajo na posamezen primerek elementa, na primer na specifičen presek kabla.

Vsak element v modelu Revit ima dodeljeni dve vrsti podatkov, in sicer geometrijske ter snovne oziroma električne lastnosti.

Za termično analizo VN-kabelskega sistema so ključni podatki o termičnih in električnih lastnostih uporabljenih materialov, kot so toplotna prevodnost, nazivna napetost, presek kabla, električna upornost in kapacitivnost, ki jih vključuje posamezna knjižnica elementa.

Ker pri načrtovanju sodelujejo strokovnjaki različnih strok, je treba model ustrezno pripraviti za interoperabilnost med različnimi programskimi okolji. Standardiziran način upravljanja podatkov določa mednarodni standard ISO 16739-1:2024 [22], ki opredeljuje format IFC (angl. Industry Foundation Classes). IFC je odprt standard za izmenjavo podatkov BIM – geometrije, materialov, lastnosti in povezav med elementi – o stavbah in infrastrukturi med različnimi programi. Shema drevesne strukture podatkov je prikazana na sliki 6.



Slika 6: Drevesna struktura podatkov IFC [23].

V nadaljevanju se osredotočimo na definiranje podatkov v hierarhiji drevesa IFC na najnižji ravni, tj. IFC building elements. V standardu je opredeljenih več kot 1.300 različnih entitet, ki določajo posamezne tipe elementov. V obravnavanem primeru so uporabljeni naslednji tipi elementov:

- IfcCableSegment so VN-kabli,
- IfcPipeSegment so zaščitne cevi,
- IfcSlab je armiranobetonski temelj in
- IfcBuildingElementProxy je okolica.

Poleg tipa elementa je pomembno tudi definiranje podatkovnih nizov, imenovanih Psets (angl. Property Sets), v katerih so shranjeni podatki, pripisani posameznemu elementu. Psets delujejo kot vsebniki informacij, iz katerih se z razvito programsko rešitvijo – vmesnikom – pridobivajo podatki, potrebni za izvedbo termične analize. Primer prikazuje slika 7.

Export to IFC As	IfcCableSegmentType
Family and Type	N2XS(FL)2Y: 2000 mm2
Jedro kabla	55 mm
Kapacitivnost (uF/km)	0.345000
Nazivna napetost (default)	110000
Odmik med kabli	240 mm
Odmik med sistemoma	450 mm
Type	2000 mm2
Upornost vodnika (90°C) (ohm/km)	0.015800
Zunanji premer	103 mm

Slika 7: Podatkovni set VN-kabla v datoteki IFC.

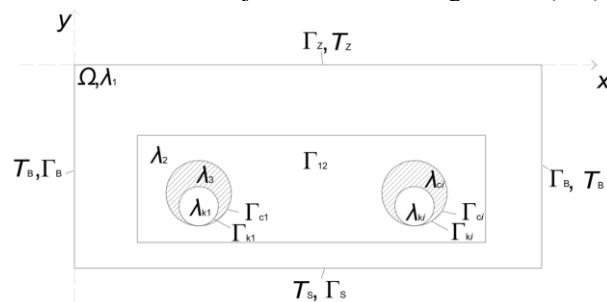
5 MATEMATIČNI MODEL IZRAČUNA TOPLOTNIH RAZMER ENERGETSKIH KABLOV

5.1 Programsko okolje FreeFEM

Za numerično reševanje toplotnih razmer obravnavanega visokonapetostnega (VN) kabelskega sistema je uporabljeno programsko okolje FreeFEM. Gre za odprtokodno integrirano razvojno okolje (IDE), namenjeno numeričnemu reševanju parcialnih diferencialnih enačb (PDE) za nelinearne sisteme v eni, dveh ali treh dimenzijah z uporabo metode končnih elementov (FEM). Program ima vgrajen lasten generator mrež, ki omogoča širok nabor možnosti za konfiguracijo mreže končnih elementov. V inženirski praksi je FreeFEM pogosto uporabljen zaradi obsežne knjižnice vgrajenih fizikalnih modelov, ki vključujejo modele za elektrostatično, magnetostatično in termodinamiko. Numerične operacije v FreeFEM-u temeljijo na programskem jeziku C++ [27].

5.2 Modeliranje termičnih razmer

Za postavitev matematičnega modela problema izračuna toplotnih razmer se najprej sklicujemo na sliko 8, ki ponazarja obravnavani primer. Na sliki je prikazana poenostavljena geometrija vkopa visokonapetostnega (VN) kabelskega sistema, načeloma poljubnega števila kablov v ceveh znotraj armiranobetonskega bloka (AB).



Slika 8: Poenostavljen model problema termičnih razmer,

Z oznako Ω je predstavljen prostor, ki ponazarja okolico vkopa kabskega sistema, pri čemer je temu območju pripisana vrednost toplotne prevodnosti λ_1 .

Robne meje obravnavanega prostora so naslednje: Γ_Z je zgornja meja, Γ_B sta bočni stranici, Γ_S pa je spodnja meja.

Z oznako Γ_{12} je označeno območje bloka AB, ki mu pripišemo vrednost toplotne prevodnosti λ_2 . Rob cevi je označen z Γ_{ci} , notranjosti pripišemo toplotno prevodnost λ_3 , medtem ko območje kabla nosi vrednost toplotne prevodnosti λ_{ki} in je omejeno z robom Γ_{ki} . Za kabel uporabimo njegov ekvivalent, ki vključuje določene poenostavitve, ki bistveno ne vplivajo na končni rezultat. Pri izračunih je kabel poenostavljen na dve plasti, vodnik ter plast s privzetimi lastnostmi preostalih plasti kabla.

Znotraj območja bloka AB je v splošnem mogoče modelirati poljubno število kabskih sistemov, pri čemer vsakemu posameznemu sistemu dodelimo lastne vrednosti z indeksom i . Za tako definiran sistem izračunamo temperaturno polje $T=T(x,y)$ z rešitvijo ustreznih enačb (1)

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \Delta T &= I_{th}; \text{ v celotnem prostoru } \Omega \\ T|_{\Gamma_Z} &= T_Z; \text{ zgornji rob prostora } \Omega \\ T|_{\Gamma_S} &= T_S; \text{ spodnji rob prostora } \Omega \\ T|_{\Gamma_B} &= T_Z - \frac{T_Z - T_S}{y_g} \cdot y = T_B; \text{ stranici prostora } \Omega \quad (1) \\ \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{ki}} + \alpha \cdot (T_i - T_{ei}) &= 0; \text{ rob kabla, konvekcija} \\ \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{ci}} - \alpha \cdot (T_i - T_{ei}) &= 0; \text{ rob cevi, konvekcija} \end{aligned}$$

(i gre po vseh ceveh, kabliah)

5.3 Koeficient toplotne prevodnosti

Poleg prenosa toplote s prevodom je pri modeliranju kabla, položenega v cev, pomembno upoštevati tudi konvekcijo v cevi. Pri tem procesu se mirujoči zrak, ki obdaja vodnik in je v stiku s toplejšo površino (v tem primeru z energetskim kablom) segreje, kar povzroči zmanjšanje njegove gostote in posledično vzpostavitev strujanja zračne mase znotraj cevi.

Pri izračunu koeficienta α smo predpostavili, da je kabel idealizirano nameščen v središču cevi, kar omogoča enakomerno odvajanje toplote v vse smeri [28]. Ta predpostavka v našem primeru ne velja popolnoma, saj je kabel položen na dnu cevi, kjer je odvajanje toplote manj učinkovito, posledično pa je tudi naravna konvekcija slabša. Zato je izračunana vrednost koeficienta prestopnosti za idealni primer zmanjšana za polovico in je enaka $2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Numerične analize na več izvedenih primerih kažejo, da je izbrana vrednost koeficienta toplotne prestopnosti za inženirsko uporabo povsem ustrezna.

5.4 Reševanje diferencialnih enačb

Sistem diferencialnih enačb z robnimi pogoji, opredeljen s sistemom enačb (1), je rešen s pomočjo programskega okolja FreeFEM. To okolje zahteva zapis sistema enačb (1) v variacijski obliki, pri čemer so v enačbah uporabljene ustrezne testne funkcije v . V splošnem se rešuje problem (2) s pripadajočimi robnimi pogoji.

$$\begin{aligned} F(T) &= \int_{\Omega} \lambda \cdot \nabla T \cdot \nabla v \, dx dy + \int_{\Gamma_{ki}} \alpha \cdot (T_i - T_{ei}) \cdot v \cdot \\ ds - \int_{\Gamma_{ci}} \alpha \cdot (T_i - T_{ei}) \cdot v \cdot ds &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Pri reševanju moramo upoštevati še dodatno kompleksnost. V enačbi (2) se v členu konvekcije pojavlja temperatura T_{ei} , katere natančne vrednosti pred začetkom numeričnega izračuna niso znane. Zato najprej izračunamo začetne vrednosti temperature brez upoštevanja konvekcije v ceveh. Zatem sistem enačb (2) rešujemo s pomočjo Newton–Raphsonove iteracijske metode [34].

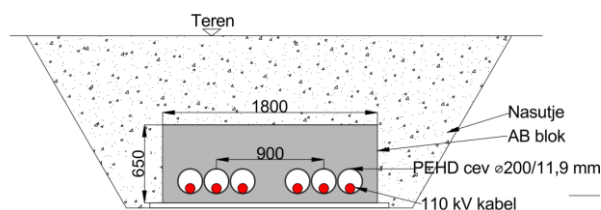
Pri definiranju dimenzij območja okolice moramo zagotoviti, da robni pogoji s fiksnimi temperaturnimi vrednostmi ne vplivajo na temperaturno polje v neposredni bližini kablov. Zato je bila velikost območja okolice izbrana tako, da se toplotni vpliv kablov do robov okolice porazgubi. V vseh obravnavanih primerih je bila po globini in širini upoštevana vrednost enaka dvakratniku globine vkopa.

6 PRAKTIČNI PRIMER

6.1 Izračun temperaturnih razmer

Kot praktični primer je obravnavan del trase kablovoda, prikazan na sliki 9. VN-kabska sistema sta nameščena v obstoječo armiranobetonsko (AB) konstrukcijo na globini približno desetih metrov pod površjem terena. Gre za netipično izvedbo, ki se bistveno razlikuje od klasičnega polaganja kablov v zemljo, kjer so običajno globine od 0,7 m do 1,2 m [9]. Zaradi tega je potrebna podrobna analiza mejne dopustne obremenitve v različnih obratovalnih pogojih. V izračune so vključeni tudi realni podatki o geometriji kabla, konstrukciji kanala ter toplotno-fizikalnih lastnostih vgrajenih materialov.

Rezultati reševanja toplotnega polja (1), pridobljeni z uporabo metode končnih elementov (FEM) znotraj okolja FreeFEM, so primerjani z rezultati, pridobljenimi z namenskim programom Cabelsizer [9], s čimer je preverjena stopnja odstopanja.



Slika 9: Prikaz vkopa kabskega sistema.

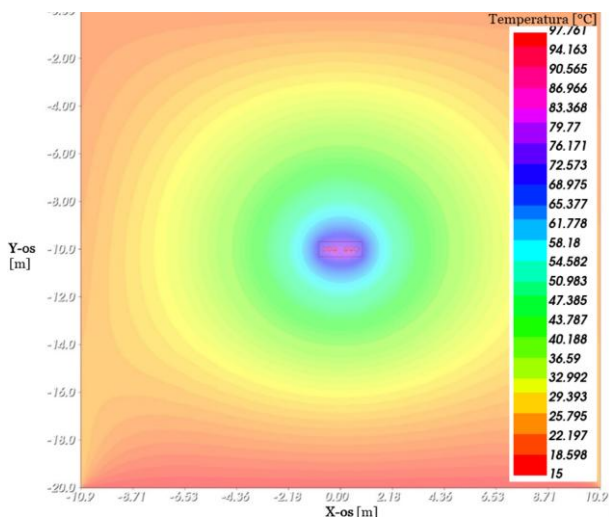
6.2 Podatki iz modela BIM

V BIM-modelu je izdelana geometrija poteka trase kabelskih sistemov ter potrebne instančne lastnosti gradnikov kabelskega sistema. Iz 3D-modela BIM, ki natančno odraža projektno predvidene razmere, je izveden prenos v vmesnik, ga po opisanem postopku pretvori ter pridobi podatke za nadaljnji izračun. Primer izvoza podatkov iz okolja BIM prikazuje tabela 1.

Tabela 1: Primer oblike podatkov besedilne datoteke za model BIM.

Podatki BIM modela	Vrednost	Podatki BIM modela	Vrednost
1 -Globina polaganja [m]	2	9 -Radij žile kabla [m]	0,03
2 -Debelina betona pod cevmi [m]	0,225	10 -Radij izolacije kabla [m]	0,056
3 -Razmik med sistemoma [m]	0,9	11 -Material jedra kabla	Cu
4 -Razmak med kabli [m]	0,22	12 -Presek kabla [mm ²]	2500
5 -Polovica širine bloka AB [m]	0,9	13 -Topl. prev. betona [W/m·K]	1,5
6 -Zunanji radij cevi [m]	0,1	14 -Topl. prev. cevi [W/m·K]	0,38
7 -Notranji radij cevi [m]	0,088	15 -Topl. prev. zemlje [W/m·K]	0,4
8 -Debelina cevi [m]	0,012	16 -El. upornost kabla [Ω/km]	0,014

V programskem okolju FreeFEM smo z uporabo lastno razvite programske kode izračunali temperaturne razmere, ki jih narekuje zahtevana tokovna zmogljivost kabelskih sistemov. Pri tem je upoštevano, da izolacija kabla iz XLPE ne sme biti trajno izpostavljena temperaturam nad 90 °C, medtem ko kratkotrajne obremenitve ne smejo presegati 250 °C.



Slika 10: Prikaz temperaturnega polja v okolici dveh kabelskih sistemov (sistem – 3 x kabel N2XS(FL)2Y 1.600 mm²). Obremenitev s faznim tokom 645 A.

V primeru, da rezultati izračuna pokažejo preseganje teh mejnih vrednosti, je treba ustrezno povečati presek kabla ali izbrati drugačen material vodnika. Primer rezultata izračuna temperaturnih razmer v grafični upodobitvi izoterm prikazuje slika 10.

6.3 Verifikacija metode

V nadaljevanju so rezultati numerične analize primerjani z izračuni, izvedenimi v komercialnem programu za dimenzioniranje kablov. Cilj primerjave je bil preveriti pravilnost rezultatov, pridobljenih z metodo končnih elementov, ter oceniti velikost odstopanj.

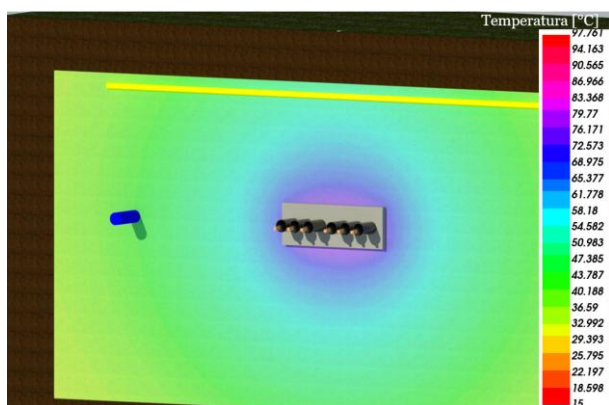
Rezultati primerjave so prikazani v tabeli 2. Za boljše preglednost so vrednosti odstopanj, manjše od 5 °C, označene zeleno, večje pa rdeče. Analiza pokaže, da se razlike med obema metodama gibljejo od 0,54 °C do 6,24 °C. Prisotna so tako pozitivna odstopanja (višje temperature v FreeFEM) kot negativna (nižja temperatura v FreeFEM). V kontekstu projektiranja so pozitivna odstopanja ugodnejša, saj pomenijo dodatno varnostno rezervo pred pregrevanjem.

Tabela 2: Primerjava rezultatov za različne globine polaganja.

Kabel	Globina	FreeFEM [°C]	Cableizer [°C]	Razlika [°C]
N2XS(FL)2Y 2.500 mm ²	2 m	52,42	54,30	- 1,88
	5 m	69,75	71,60	- 1,85
	10 m	85,97	86,80	- 0,83
N2XS(FL)2Y 1.600 mm ²	2 m	67,07	62,20	+ 4,87
	5 m	83,28	83,90	- 0,62
	10 m	97,46	103,70	- 6,24
NA2XS(FL)2Y 2.500 mm ²	2 m	55,35	54,70	+ 0,65
	5 m	72,56	73,10	- 0,54
	10 m	86,77	89,80	- 3,03

6.4 Prikaz temperaturnih razmer v okolju BIM

V zaključni fazi termične analize VN-kabelskega sistema se lahko prenese izračunani temperaturni potek nazaj v 3D-model BIM. Postopek se izvede tako, da se iz programskega okolja FreeFEM izvozi risbo temperaturnega polja v obliki slikovne datoteke, ki se jo nato uvozi v model BIM. Ključno je, da se slika ustrezno skalira glede na geometrijo modela, s čimer se zagotovi natančno prostorsko ujemanje podatkov. Primer prikazuje slika 11. Za ponazoritev dodatnih možnosti uporabe sta bila v model vključena še plinovod (rumena cev) in vodovod (modra cev). Takšen pristop omogoča celostno analizo infrastrukture v neposredni bližini kabelskega sistema ter oceno morebitnega vpliva segrevanja na okoliške komponente.



Slika 11: Temperaturna razporeditev, prenesena v BIM.

7 ZAKLJUČEK

Informacijsko modeliranje gradenj povezuje različne stroke, ki sodelujejo pri načrtovanju objektov v tridimenzionalnem prostoru. Kljub številnim prednostim, ki jih tak pristop omogoča, pa trenutno še ne obstajajo celovite integracije s specializiranimi programskimi orodji, namenjenimi izvajanju ozko usmerjenih inženirskih izračunov. V predstavljenem primeru gre za izračun tokovno-temperaturnih razmer visokonapetostnih kabelskih sistemov, ki so ključni za pravilno dimenzioniranje elektroenergetske opreme.

Z razvitim vmesnikom v programskem jeziku Python je pokazano, da je iz modela BIM mogoče uspešno pridobiti in pretvoriti podatke za nadaljnjo uporabo v specializiranem programskem okolju FreeFEM, v katerem je razvit matematični model za izračun toplotnih razmer, temelječ na metodi končnih elementov.

V analizi je proučen vpliv različnih parametrov na termično obnašanje kabelskih sistemov in ovrednoten njihov pomen pri projektiranju. Rezultati so primerjani z izračuni, pridobljenimi s pomočjo namenskega programa, pri čemer so bila odstopanja v sprejemljivih mejah in praviloma pozitivne narave, kar prispeva k dodatni varnostni rezervi sistema.

Oba razvita programa – vmesniška aplikacija v Pythonu in program v FreeFEM-u za termično dimenzioniranje – sta odprtokodna ter omogočata nadaljnje nadgradnje, med drugim za analizo polaganja kablov neposredno v zemljo, modeliranje trikotne formacije polaganja ter upoštevanje izsušitve okolice z dvoconskim modelom.

V prihodnjih letih lahko pričakujemo, da bodo številna komercialna programska orodja omogočala neposredno povezavo z okoljem BIM. Do takrat pa predstavljena rešitev ponuja učinkovito alternativo, saj pokriva vse ključne faze, ki jih bodo v prihodnosti nudile tudi integrirane komercialne platforme.

LITERATURA

- [1] M. Suhadolc, Obveznost uporabe informacijsko podprtega projektiranja (BIM), Zbornica za arhitekturo in prostor Slovenije, 2024 [Na spletu]. Dostopno na: <https://zaps.si/vse-novice/obveznost-uporabe-informacijsko-podprtega-projektiranja-bim/>
- [2] BIM-smernice za modeliranje in specifikacija informacijskih zahtev, 2024. Pridobljeno: 7. julij 2025. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.gzs.si/Portals/Panoga-Gradbenistvo/BIM_Smernice%20za%20modeliranje.pdf
- [3] Priročnik za pripravo projektne naloge za implementacijo BIM-pristopa za gradnje, Inženirska zbornica Slovenije, let. april 2018.
- [4] „Programsko okolje FreeFEM“. Pridobljeno: 15. marec 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://doc.freefem.org/introduction/index.html>
- [5] H. Jin, B. Liu, X. Ma, J. Wang, in Y. Wang, „The 2D and 3D Linkage Technology of Design for Power Cable Engineering“, v 2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), okt. 2021, str. 1332–1336. doi: 10.1109/ITNEC52019.2021.9586936.
- [6] Y. Guo, Y. Zheng, B. Bai, in Y. Lu, „Application and development trend of BIM technology in electric power engineering“, v 2024 4th International Conference on New Energy and Power Engineering (ICNEPE), nov. 2024, str. 881–885. doi: 10.1109/ICNEPE64067.2024.10860553.
- [7] W. Yang, Z. Ye, in D. Wang, „Research on Cable Modeling and Calculation Method Based on Revit Secondary Development“, v 2022 9th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA), nov. 2022, str. 602–609. doi: 10.1109/IFEAA57288.2022.10038105.
- [8] J. Wang, J. Yang, D. Li, H. Jin, in Y. Wang, „Research on BIM Model Construction Method of Cable Engineering Based on Parametric Modeling“, v 2023 6th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), maj 2023, str. 264–267. doi: 10.1109/CEEPE58418.2023.10166160.
- [9] Gospodarsko interesno združenje distribucije električne energije, „Gradnja kablovodov z enožilnimi energetskimi kablji 64/110/123 kV - Tehnična smernica za material in gradnjo TS-11“.
- [10] Gospodarsko interesno združenje distribucije električne energije, „Smernice in navodila za izbiro, polaganje in prevzem elektroenergetskih kablov nazivne napetosti 1 kV do 110 kV - Tehnična smernica“.
- [11] „Cableizer - Cableizer“. Pridobljeno: 15. maj 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.cableizer.com/>
- [12] „COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs“, COMSOL. Pridobljeno: 15. maj 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.comsol.com/>
- [13] „Power cable ampacity software | Brightlayer Utilities suite“, Eaton. Pridobljeno: 15. maj 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.eaton.com/us/en-us/digital/brightlayer/brightlayer-utilities-suite/power-cable-ampacity-software.html>
- [14] „Cable Sizing Software | Cable Sizing Calculation | ETAP“, Default. Pridobljeno: 15. maj 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://etap.com/product>
- [15] Y. Wang, R. Chen, S. Lin, J. Tian, J. Li, in M. Chen, „Calculation and analysis of the current carrying capability of electric cable based on finite element method“, v 2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, okt. 2009, str. 307–310. doi: 10.1109/CEIDP.2009.5377712.
- [16] B. Zemljarič, „Izračun temperaturnih razmer obratovanja kablovodov z uporabo odprtokodnega orodja FreeFEM“, CIGRE-CIRED 2023.
- [17] M. Kokoruš, W. Eyrich, in R. Gačanović, „Implementation of Building Information Modelling (BIM) process in substation design software to increase design quality“, CIGRE 2016 B3-209, 2016.
- [18] „A critical factor for success: BIM in electrical engineering - buildingSMART International“. Pridobljeno: 21. februar 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.buildingsmart.org/a-critical-factor-for-success-bim-in-electrical-engineering/>

- [19] „ISO 19650, the Common Data Environment, and Autodesk Construction Cloud | Autodesk University“. Pridobljeno: 25. februar 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/article/ISO-19650-Common-Data-Environment-and-Autodesk-Construction-Cloud>
- [20] „primtech 3d | Efficient substation design and engineering“. Pridobljeno: 25. februar 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.primtech.com/en/software-solutions/primtech-3d>
- [21] „Autodesk Revit: BIM software to design and make anything“ Autodesk,. Pridobljeno: 7. julij 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>
- [22] „ISO 16739-1:2024“, ISO. Pridobljeno: 7. april 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.iso.org/standard/84123.html>
- [23] „Autodesk Revit: Revit IFC manual “ Pridobljeno: 7. julij 2025. [Na spletu]. Dostopno na: https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/draft/2528/180213_IFC_Handbuch.pdf
- [24] „High and extra high voltage cables “. Pridobljeno: 9. julij 2025. [Na spletu], str. 30-33. Dostopno na: https://www.telefonika.com/storage/file/core_files/2025/3/6/85c5bf07aa1dc1e78f32e00b1f69b366/High%20Voltage%20Cables.pdf
- [25] „IfcOpenShell - The open source IFC toolkit and geometry engine“. Pridobljeno: 4. april 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://ifcopenshell.org/>
- [26] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, in A. S. Lavine, Introduction to heat transfer, 5. izd.
- [27] „FreeFEM-cs - an integrated environment for FreeFEM“. Pridobljeno: 14. junij 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://www.ljll.fr/lehyaric/ffcs/#>
- [28] D. Goričanec in L. Črepinšek – Lipuš, Prenos toplote, let. 2008. UM.
- [29] ELEK Cable HV Software “Soil Drying for High Voltage Power Cable Ampacity Calculations,“. Pridobljeno: 9. junij 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://elek.com/articles/advanced-soil-drying-calculations-for-cable-ampacity/>
- [30] International Electrotechnical Commission, „Serija standardov IEC 60287“.
- [31] Gospodarsko interesno združenje distribucije električne energije, „Gradnja kablovodov z enožilnimi energetske kablji 64/110/123 kV - Tehnična smernica za material in gradnjo TS-19“.
- [32] P. K. Sah in S. S. Kumar, „Thermal conductivity and shrinkage characteristics of bentonite-fly ash and bentonite-sand backfill material“, Granul. Matter, let. 27, št. 1, str. 6, nov. 2024, doi: 10.1007/s10035-024-01482-8.
- [33] TLI group. „ Construction Methodology – 110kV Underground Cable Connection Gortahilly Wind Farm Grid Connection“. Pridobljeno: 20. junij 2025. [Na spletu]. Dostopno na: <https://gortahillyplanning.ie/wp-content/uploads/2022/09/2.4-TLI-Construction-Methodology-and-Technical-Notes.pdf>
- [34] A. Hrvatin, „Integracija toplotne analize energetskih kablov z metodo končnih elementov v informacijsko modeliranje gradenj“. Magistrsko delo. Pridobljeno: 27. september 2025. [Na spletu]. Dostopno na : <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?lang=slv&id=172859>

Andrej Hrvatin je leta 2022 diplomiral, leta 2025 pa magistriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerza v Ljubljani. Trenutno je zaposlen v podjetju Kolektor Igin kot projektant na področju primarne in sekundarne opreme elektroenergetskega sistema.

Borut Zemljarič je leta 1994 diplomiral, leta 2008 magistriral in leta 2020 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Pred zaposlitvijo na Fakulteti za elektrotehniko v letu 2024 se je ukvarjal z načrtovanjem visokonapetostnih naprav kot pooblaščen inženir IZS. Težišče njegovega raziskovalnega področja v zadnjem obdobju obsega modeliranje, simulacijo in optimizacijske postopke pri računalniško podprti numerični analizi med seboj povezanih električnih in mehansko-dinamičnih pojavov na energetskih napravah.

Valentin Ažbe je leta 1996 diplomiral, leta 2003 magistriral in leta 2005 doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leta 2000 se je zaposlil na Fakulteti za elektrotehniko kot mladi raziskovalec. Raziskovalno delo opravlja v Laboratoriju za preskbo z električno energijo. Od leta 2005 je zaposlen kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani in od leta 2015 tudi kot predavatelj. Ukvarja se z analizo elektroenergetskih sistemov in naprav FACTS.