

Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

Eda Fett, Renata Golemović

**ODREĐIVANJE OPTIMALNOG OBLIKA TEMELJA
VJETROAGREGATA**

Zagreb, 2020.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc.dr.sc. Lovorke Librić dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2019./2020.

POPIS KRATICA

KRATICA	OBJAŠNJENJE
MW	megavat
GW	gigavat
GWh	gigavatsat
VE	vjetroelektrana
EWEA	Europsko udruženje za energiju vjetra
MWh	megavatsat
HAWT	Horizontal axis wind turbine
VAWT	Vertical axis wind turbine
SAD	Sjedinjene Američke Države
kWh	kilovatsat
NIMBY	Not in my back yard
BANANA	Build absolutely nothing anywhere near anyone
ALARA	As low as reasonable achievable
EU	Europska Unija
PEO	Zahtjev za energetske odobrenje
HDMZ	Državni hidrometeorološki zavod
h	dubina temelja
B	Širina temelja
q_0	Jednoliko površinsko opterećenje
q	Opterećenje od temelja
q_f	Nosivost tla
c, ρ	Parametri Mohr-Coulombovog zakona čvrstoće
γ	Jedinična (volumenska) težina tla
N_c, N_γ, N_q	Faktori nosivosti, funkcije parametra ρ
s	Faktor oblika
d	Faktor dubine
i	Faktor nagiba opterećenja koje djeluje na temelj
A'	Korisna površina temelja
R	dopušteni otpor tla
γ'	računska zapreminska težina tla
q	najmanje efektivno opterećenje u razini temeljnog dna pokraj temelja
ϕ'	računski kut posmične čvrstoće tla
c'	računska kohezija tla
sc, sq, sy	faktor oblika temelja
ic, iq, iy	faktori nagiba rezultante
DA1,1	Design Approache 1, Combination 1
DA1,2	Design Approache 1, Combination 2
DA2	Design Approache 2
DA3	Design Approache 3
A1	Djelovanja od konstrukcije

M1	svojstva materijala
R	Otpornost
σ	Normalno naprezanje
$I\sigma$	Koeficijent dodatnog naprezanja
y/b	Odnos dubine dna temelja i širine temelja
L/B	Omjer duljine i širine temelja
p	prosječni kontaktni pritisak između temelja i tla
I	koeficijent slijeganja
Em	Ekvivalentni modul elastičnosti
k	krutosti temeljnoga tla
E	modul elastičnosti
d	promjer kružnog temelja
ν	Poissonov koeficijent
I_p	Utjecajni faktor
N (SPT)	Broj udaraca u standardnom penetracijskom pokusu
Es	Modul stišljivosti
q_c	otpor pri statičkoj penetraciji
EQU	equilibrium
R_d	Proračunska otpornost
F_z	Suma vertikalnih sila koje djeluju na površinu temelja
G_t	Težina temelja
G_z	Težina zasipa
E_d	Proračunsko djelovanje
H_r	Rezultanta horizontalnih sila
M_r	Rezultantni moment
ft	feet
m	metar
gm/s ²	9,81*metar/sekunda na kvadrat
P val	uzdužni/kompresijski val
S val	poprečni/posmični val
SV val	vertikalni polarizirani poprečni val
HV val	horizontalni polarizirani posmični val
L val	Loweov val
R val	Rayleighov val
SMG	pametni geofon
SLIM	smart line interface moduls
GPR	ground penetration radar
2D	dvodimenzionalno
3D	trodimenzionalno
MHz	megaherc
GHz	gigaherc
MPa	megapaskal
CEN	Europski odbor za normizaciju
EN 1997 Eurokod 7	Geotehničko projektiranje

EN 1997-1	Geotehničko projektiranje –Dio 1: Opća pravila
EN 1997-2	Geotehničko projektiranje –Dio 2: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla
EQU	equilibrium - ravnoteža
STR	structural - konstrukcijski
GEO	geotechnical – geotehnički
UPL	uplift - uzgon
HYD	hydraulic - hidrotehnički
STR/GEO	tri pristupa za granična stanja STR i GEO
PP1	Proračunski pristup 1
PP2	Proračunski pristup 2
PP3	Proračunski pristup 3
GGU-FOOTING	Geotechnical Software za analizu nosivosti prema DIN 4017 i slijeganja prema DIN 4019
GGU - SLAB	Geotechnical Software za analizu elastično pridržanih ploča temeljenih na modulu reakcije podgrade i metode graničnog modula primjenom metode konačnih elemenata
V_T	Volumen temelja
w	Pomak točke dobiven iteracijom

SADRŽAJ RADA

1. UVOD	1
2. CILJ I HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA	3
2.1. CILJ ISTRAŽIVANJA	3
2.2. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA	3
3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA I STRUKTURA RADA	4
4. POVIJEST VJETROELEKTRANA	5
5. VRSTE VJETROELEKTRANA	8
5.1. VJETROELEKTRANE U SVIJETU	11
5.2. VJETROELEKTRANE U EUROPI	13
5.3. VJETROELEKTRANE U HRVATSKOJ	17
6. KONCEPT RADA VJETROAGREGATA	19
6.1. PODJELA VJETROAGREGATA	21
6.2. SUVREMENA TEHNOLOŠKA RJEŠENJA	23
7. UTJECAJ VJETROELEKTRANA NA OKOLIŠ	26
7.1. SMJERNICE ZA SMJEŠTAJ VJETROELEKTRANA U OKOLIŠ	29
8. PREDNOSTI I NEDOSTACI VJETROELEKTRANA	33
9. PROJEKTIRANJE VJETROELEKTRANA	35
9.1. PROSTORNO-PLANSKI PREDUVJETI	35
9.2. OPĆENITO O TEMELJIMA	39
9.3. NOSIVOST TEMELJNOG TLA PLITKIH TEMELJA	42
9.4. OTPORNOST NA KLIZANJE	51
9.5. SLIJEGANJE PLITKIH TEMELJA	52
9.6. OTPORNOST NA PREVRTANJE	56
9.7. TEMELJ VJETROAGREGATA	60
10. VJETROELEKTRANE ZADAR 2 I ZADAR 3	62
10.1. OPIS PODRUČJA	62
10.2. TERENSKI ISTRAŽNI RADOVI	64
10.2.1. GEOFIZIČKA ISPITIVANJA TERENA	64
10.2.2. SEIZMIČKE METODE ISTRAŽIVANJA	65
10.2.3. GPR METODA – Ground Penetration Radar	70
10.2.4. REZULTATI TERENSKIH ISTRAŽNIH RADOVA	72
10.2.5. KARAKTERISTIKE TEMELJNOG TLA – STIJENE I ODABIR GEOTEHNIČKIH PARAMETARA	75
11. ANALIZE I PRORAČUNI TEMELJA VJETROAGREGATA	77

11.1. PRIMIJENJENI PROPISI I STANDARDI.....	77
11.2.1. ODABIR KARAKTERISTIČNIH I PRORAČUNSKIH PARAMETARA MATERIJALA	77
11.2.2. GEOTEHNIČKI PRORAČUNI.....	80
11.2. PRORAČUN DOBIVANJA POTREBNIH DIMENZIJA ZA ODABRANU GEOMETRIJU TEMELJA	85
11.2.1. EKVIVALENTNA POVRŠINA.....	85
11.2.2. GEOMETRIJA TEMELJA	87
11.3. PRORAČUNI MEHANIČKE OTPORNOSTI I STABILNOSTI TEMELJNE KONSTRUKCIJE	88
11.3.1. PRORAČUN NOSIVOSTI TEMELJNOG TLA.....	88
11.3.2. PRORAČUN PREVRTANJA TEMELJA	94
11.3.3. PRORAČUN KLIZANJA TEMELJA	96
11.3.4. PRORAČUN SLIJEGANJA	98
12. USPOREDBA SA KRUŽNIM TEMELJEM	106
12.1. PRORAČUN NOSIVOSTI TEMELJNOG TLA	107
12.2. PRORAČUN PREVRTANJA TEMELJA	109
12.3. PRORAČUN KLIZANJA TEMELJA	112
12.4. PRORAČUN SLIJEGANJA TEMELJA.....	114
13. ZAKLJUČAK	116
ZAHVALA.....	117
POPIS SLIKA	118
POPIS TABLICA.....	121
POPIS DIJAGRAMA	122
LITERATURA.....	123
SAŽETAK.....	128
SUMMARY	129

1. UVOD

Današnji svijet suvremene tehnologije i napretka čovječanstva u pogledu razvoja informacijskih znanosti, umjetne inteligencije i sl., utječe na rast potražnje i potrebe za održivim sustavima energije kao i njihovoj prilagodbi. Prirodni resursi su već u značajnoj mjeri iskorišteni, te njihovim daljnjim iscrpljivanjem ozbiljno se šteti kako okolišu tako i eko sustavu, samim time i opstanku čovječanstva, iz toga razloga je neophodna promjena te prelazak na obnovljive izvore energije. Vjetroelektrane su najperspektivniji izvor energije budućnosti, kao i značajan izvor električne energije kako sadašnjosti tako i u budućnosti. Globalni ekološki problemi i problemi energetskeg deficita s kojim se danas susrećemo, možemo promatrati kao jedinstven problem dobivanja čiste energije u skladu s principima održivog razvoja. Pod održivim razvojem podrazumijeva se razvoj kojim se ne ugrožava ispunjavanje potreba sadašnjosti i ne ugrožava se mogućnost narednih generacija da ispune svoje buduće potrebe. Gledajući trend izgradnje i korištenje obnovljivih izvora energije, najveći tehnološki napredak, kao i napredak izgradnje imaju u posljednjih dvadeset godina upravo vjetroelektrane; koriste energiju vjetra kao obnovljivi izvor energije. Energija vjetra se tako promovirala u najbrže rastuću granu industrije na svijetu. Može se zaključiti da kada se otplati kapitalna investicija u vjetroelektrane, uz solarne elektrane to će biti najjeftiniji izvor energije. Troškovi goriva su nepostojeći, a troškovi pogona i održavanja minimalni [1].

Vjetroelektrana jest tehnologija koja upotrebljava kinetičku energiju vjetra, uz pomoć jedne ili niza vjetroturbina s električnim generatorima, za proizvodnju električne energije. Može se reći da je to sustav s mnogo vjetroagregata smještenih na istoj lokaciji (vjetropark). Da bi vjetroelektrane bile što iskoristivije poželjno ih je graditi na lokacijama gdje je prosječna brzina vjetra veća od 4,5 m/s, uz što stalnije strujanje vjetra bez turbulencija te s minimalnom vjerojatnosti naglih olujnih udara vjetra. Na odabir lokacije utječu mnogi faktori, a neki su utjecaj vjetroelektrane na ljepotu krajolika, problem buke zbog okretanje krila na staništa različitih vrsta ptica i šišmiša, zalijetanje ptica u vjetroelektrane (Slika 2) te štetnog utjecaja na okoliš. Instalacije vjetroelektrane razlikuju se ovisno o tome nalazi li se vjetroelektrana na kopnu ili u priobalju. Kopnene instalacije vjetroelektrana, onshore, najčešće su na vrhovima brda ili padina, pri čemu se najbolje iskorištava ubrzanje koje vjetar dobiva prelazeći preko uzvisine (Slika 1). Priobalne lokacije nalaze se na obali (do 3 km od mora) ili na moru (do 10 km od obale), offshore, te su pogodne zbog vjetrova koji nastaju pri različitom zagrijavanju kopna i mora (Slika 3). Prednosti lokacija vjetroelektrana na moru, udaljenih više od 10 km od

kopna, su povoljniji vjetrovi te manji utjecaj izgled krajolika, ali su pritom skuplje za izgradnju i održavanje [2].



Slika 1. Primjer kopnene vjetroelektrane [1]



Slika 2. Zbog vjetroturbina godišnje pogine milijun ptica [3]



Slika 3. Primjer priobalne vjetroelektrane [1]

Vjetroelektrane se tako mogu podijeliti na kopnene vjetroelektrane, priobalne vjetroelektrane, plutajuće vjetroelektrane i zračne vjetroelektrane [3]. U ovome radu će se najveći naglasak dati na kopnene i priobalne vjetroelektrane.

2. CILJ I HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA

2.1. CILJ ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja je razvoj postupaka određivanja optimalnih temelja vjetroagregata koji se planiraju izgraditi u krškom stijenskom masivu priobalnog područja Republike Hrvatske. To se može postići usporedbom kritičnih faktora sigurnosti na klizanje i prevrtanje vjetroagregata dobivenih za različite dimenzije i oblike poprečnog presjeka temelja.

2.2. HIPOTEZA ISTRAŽIVANJA

Osnovna hipoteza istraživanja je da se promjenom oblika poprečnog presjeka temelja vjetroagregata približno jednake površine mogu povećati faktori sigurnosti na klizanje i prevrtanje.

3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA I STRUKTURA RADA

Metodologija znanstvenog istraživanja uključuje cijeli niz metoda istraživanja koje se namjeravaju provesti u cilju određivanja optimalnog oblika temelja vjetroagregata.

U početnom dijelu objasnit će se osnovni način funkcioniranja vjetroelektrane, načini i mogućnosti korištenja, kratki uvid u povijest i napredak vjetroelektrana.

U glavnom dijelu rada bit će prikazano rješenje u sljedećim računalnim software-ima za određeni problemski zadatak: Microsoft Office Excel, CAD program za 3D modeliranje Rhinoceros, GGU-Footing, GGU-Slab i AutoCad.

Način rada svakog pojedinog software-a te analiza podataka s objašnjenjima rezultata detaljnije će biti objašnjeni na konkretnom primjeru kako bi bilo jednostavnije i lakše pratiti dobivene rezultate.

Rad je podijeljen u 10 glavnih cjelina:

1. Povijest vjetroelektrana
2. Vrste vjetroelektrana
3. Koncept rada vjetroagregata
4. Utjecaj vjetroelektrana na okoliš
5. Prednosti i nedostaci vjetroelektrana
6. Projektiranje vjetroelektrana
7. Vjetroelektrane zadar 2 i zadar 3
8. Analize i proračuni temelja vjetroagregata
9. Usporedba sa kružnim temeljem i
10. Zaključak

4. POVIJEST VJETROELEKTRANA

Povijesno gledano, drvo i energija vjetra su prvi oblici primarne energije, pri čemu prvi pisani tragovi korištenja vjetrenjača su iz 200. godine p.n.e, a korištene su za mljevenje žita u tadašnjoj Persiji. Ljudi su koristili energiju vjetra za plovidbu, postavivši jedra na brodove te time pokrenuli eru istraživanja i prijenosa robe te dobara na velike udaljenosti.

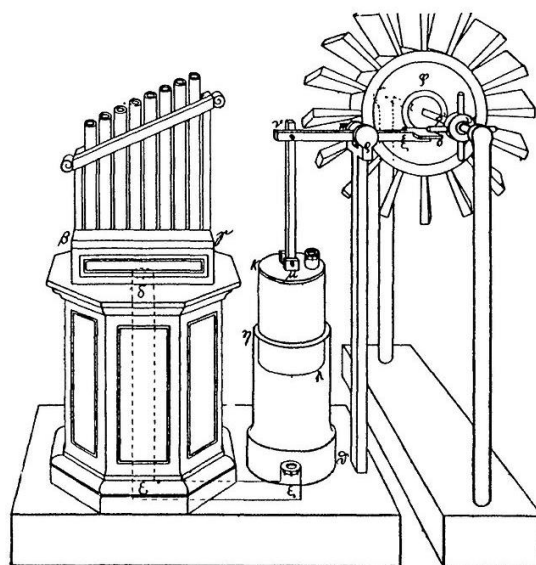
Iskoristivši energiju vjetra za plovidbu, uslijedilo je korištenje energije vjetra za obavljanje mehaničkog rada u mlinovima (Slika 4) te za pokretanje vodenih pumpi (posebice u Nizozemskoj, na srednjem zapadu SAD-a i u zabačenim dijelovima Australije).

Kasnije izumom električne energije, počinje značajnije upotrebljavanje vjetroelektrana, iako s odmakom zbog zagađenja okoliša, pri čemu su njihove pozitivne strane prepoznate tek kasnije, unazad dva desetljeća [3].



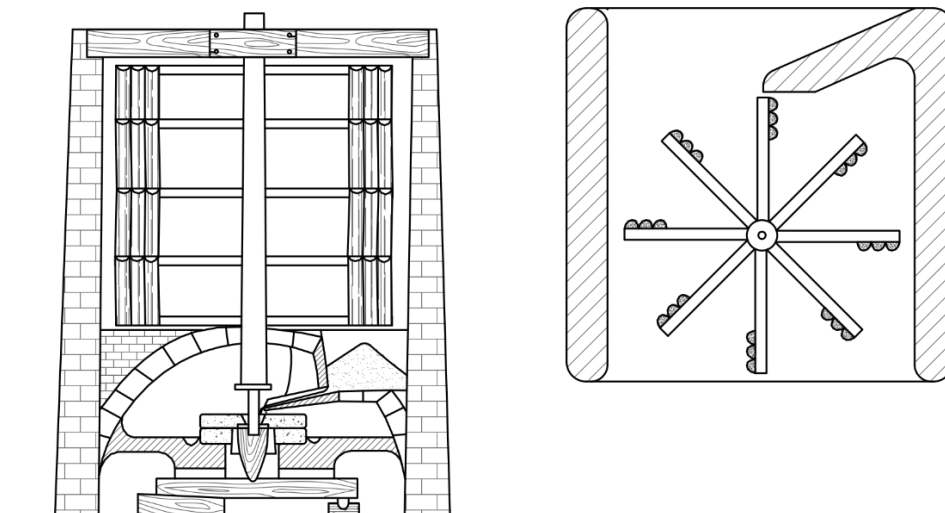
Slika 4. Drevna vjetroturbina za mljevenje žita [4]

Najraniji poznati slučaj korištenja energije vjetra za pokretanje stroja putem rotora izdvaja se Heronova vjetrenjača koja je pokretala orgulje, iz 1. stoljeća prikazana na donjoj slici, (Slika 5) [3].



Slika 5. Heronova vjetrenjača koja je pokretala orgulje [3]

Poznato je kako je Heron iz Aleksandrije prvi koristio energiju vjetra za pokretanje svojih strojeva. Vjetrenjača je prvi puta spomenuta 644 godine. Jedna od najranijih konstrukcija vjetrenjača prikazane su na Slici 6.



Slika 6. Perzijska vodoravna vjetrenjača [3]

Tijekom prošlosti u inovacijama poboljšanja i korištenja vjetrenjača najviše su se istaknuli Holandanci, koji vjetrenjače koriste za pokretanje pumpi za vodu radi isušivanja močvara. Preko njihovih doseljenika, započinje daljnje napredovanje vjetrenjača u Americi, polovicom 18.st. Američke vjetrenjače imale su više metalnih lopatica i manju površinu rotora, a u periodu od

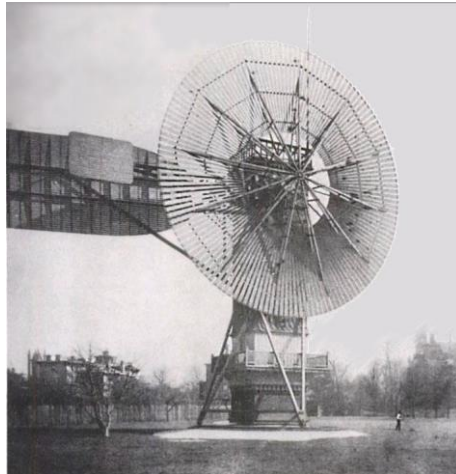
1850.-1930. godine instalirano ih je više od 6 milijuna diljem Amerike. Osim u Americi, vjetroelektrane su bile pozitivni napredak i u europskim općinama, gdje su korištene kao tehnički uređaji za područja koja nisu imala tekuće vode tijekom cijele godine. Tako su vjetrenjače zamijenile nekadašnje radove za koje su korišteni volovi. Nedostaci su bili vrlo visoki troškovi [3] [4].

Daljnji razvoj rezultirao je konstrukcijom osmerokutne vjetrenjače, poznate kao "Nizozemska vjetrenjača" (Slika 7.), gdje je zidani toranj zamijenjen drvenim okvirom koji je obično bio prekriven trskom, šindrom ili bakrenim pločama čime se konstrukcija olakšala i bila praktičnija za drenažu, posebice u područjima s nestabilnim tlom [5].



Slika 7. Nizozemske vjetrenjače Kinderdijka [3]

Do preporoda vjetrenjača dolazi tijekom 1970. i 1980. kada su vjetroagregati prešli s kućne i agrikulturalne uporabe na masovniju upotrebu u vjetroelektranama. Prvi vjetroagregati s namjenom proizvodnje električne energije razvijeni su u razmaku od cca 7 godina, ovisi o autorima. U SAD-u je izgrađen prvi vjetroagregat 1890.godine od strane Charlesa F.Brush (Slika 8.), dok je u Europi 1891. godine (prema autoru Đurišić Ž. *Vjetroelektrane*), u nekim literaturama za Europu se spominje 1897.godina, (Šimić, Ž. *Korištenje vjetra za proizvodnju električne energije*), prvi vjetroagregat izradio Danac Poul La Kur, često ga nazivaju "Ocem vjetroturbina", (Slika 9.) [5] [6].



Slika 8. Vjetroagregat Chalresa Brusha iz 1888. [5]



Slika 9. Prof. Poul La Cour ispred svoje eksperimentalne vjetroturbine [5]

5. VRSTE VJETROELEKTRANA

S obzirom na položaj instalacije vjetroelektrane dijelimo na koprne vjetroelektrane, priobalne vjetroelektrane, plutajuće vjetroelektrane i zračne vjetroelektrane [3]. Detaljniji opis svake vrste dan je u nastavku teksta:

- **Koprne vjetroelektrane** grade se na čvrstom tlu i najčešći su oblik vjetroelektrana. Primjer takve vjetroelektrane dan je na Slici 10.



Slika 10. Vjetroelektrana Roscoe- druga najveća kopnena vjetroelektrana u svijetu [3]

- **Priobalna vjetroelektrana (engl. Offshore wind park)** je vrsta vjetroelektrane s čvrstim temeljima građenima na moru (i na jezerima), pri čemu dubina vode je obično manja od 60 metara (udaljenost od obale najviše 50 kilometara). Skuplje od kopnenih iz sljedećih razloga: morske instalacije vjetroagregata su skuplji, tornjevi su viši (kada se uračuna dio ispod vode) što posljedično poskupljuje samu izgradnju, proizvedena električna energija do kopna se prenosi putem podmorskog kabela, održavanje je skuplje, problem zaštite od korozije što iziskuje upotrebu dodatnih premaza i katodne zaštite. Vjetroelektrane smještene na moru mogu imati i više od 100 vjetroagregata. Pozitivno jest što su takve turbine najveće u pogonu i predviđa se da će njihova veličina (i instalirana snaga) i dalje rasti (preko 6 MW). Primjer priobalne vjetroelektrane dan je na Slici 11.



Slika 11. Priobalna vjetroelektrana Lillgrund (Švedska) [9]

- **Plutajuća vjetroelektrana ili pučinska vjetroelektrana** je vrsta vjetroelektrane koja se postavlja na plutajuću strukturu u dubljem moru (tamo gdje nije moguće postaviti priobalnu vjetroelektranu). Složenije su i zahtijevaju veće početne troškove, ali zbog njihovih mogućnosti da pristupe snažnijim vjetrovima dalje na moru imaju veću isplativost primjene. Više plutajućih vjetroagregata povezuju se zajedno u vjetroelektranu kako bi se koristio zajednički podvodni kabel za prijenos električne struje. Primjer plutajućeg vjetroagregata dan je na Slici 12.



Slika 12. Plutajući vjetroagregat Hywind [9]

- Koncept **visinskih vjetroelektrana** se zasniva na iskorištenju energije vjetra u višim slojevima atmosfere. Dizajnirani koncept vjetroelektrana je na različite načine podignut

u visinu bez potpore tornja. Dije se u dvije skupine: one za iskorištavanje vjetra na nižim visinama i na one koje to mogu na višim visinama. Visinske vjetroelektrane mogu proizvoditi električnu energiju 90% vremena, za razliku od onih na zemlji koje to čine maksimalno 35% vremena. Posljedično njihovo korištenje rezultira pojeftinjenjem električne energije i zahtjeva manje vjetroelektrana za istu količinu električne energije. Primjer visinske vjetroelektrane dan je na Slici 13.



Slika 13. Primjer visinske vjetroelektrane [9]

5.1. VJETROELEKTRANE U SVIJETU

Trenutno u svijetu naglo raste popularnost vjetroelektrana. Najveća kopnena vjetroelektrana u svijetu je Gansu vjetropark u Kini čiji je cilj postići kapacitet od 20 000 MW instalirane snage do kraja 2020. godine. Vjetropark se nalazi u gradu Jiuquan, na rubu Gobi pustinje. Projektiranja je kao 18 ujedinjenih vjetroparkova te broji više od 7000 vjetroturbina. (Slika 14) [9].



Slika 14. Vjetropark Gansu u Kini [9]

Najveća priobalna vjetroelektrana u svijetu, a i u Europi je u Londonu. Sastoji se od 175 Siemens vjetroagregata ukupnog kapaciteta 630 MW čime je moguće električnom energijom opskrbiti čak 470 000 kućanstava. S radom je počela početkom 2013. (Slika 15) [9].



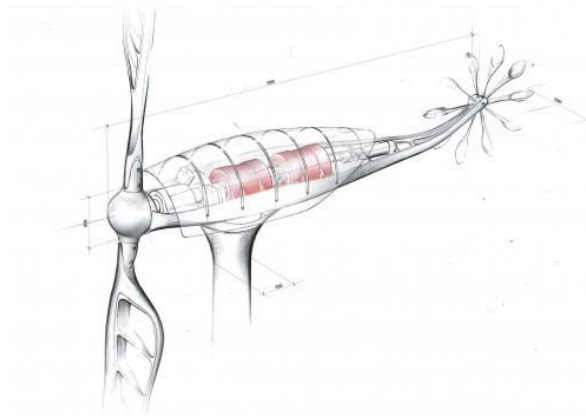
Slika 15. London Array [9]

U svijetu su se počeli razvijati "Quiet Revolution" vjetroagregati koji su mali rezidencijalni vjetroagregati koji omogućuju ljudima da sami proizvode električnu energiju iz vjetra. Lopatice ovakvog vjetroagregata orijentirane su oko vertikalne osi i imaju samo jedan pomični dio. Održavanje ovako projektiranog vjetroagregata je iznimno jednostavno te se može svesti na jednogodišnju inspekciju. Ima vrlo nisku razinu buke kako bi što manje ometao život ljudi jer se većinom nalazi u manjim urbanim sredinama. (Slika 16) [9].



Slika 16. Quiet Revolution vjetroagregat [9]

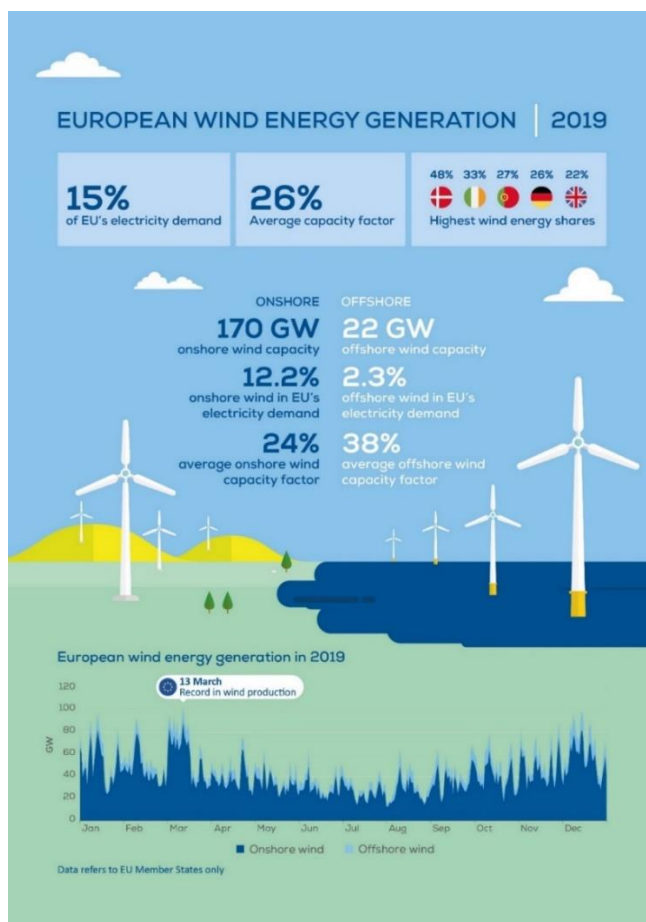
Još jedan zanimljivi koncept vjetroagregata dizajniran je od talijanskog arhitekta Renza Piana. Vjetroagregat je inspiriran fizikom vilin – konjica. Mini vjetroagregat idealan je za gradski i prigradski okoliš te se može koristiti na mjestima gdje vjetar puše brzinom otprilike 1,8 m/s. (Slika 17) [9].



Slika 17. Vjetroagregat "vilin konjic" [9]

5.2. VJETROELEKTRANE U EUROPI

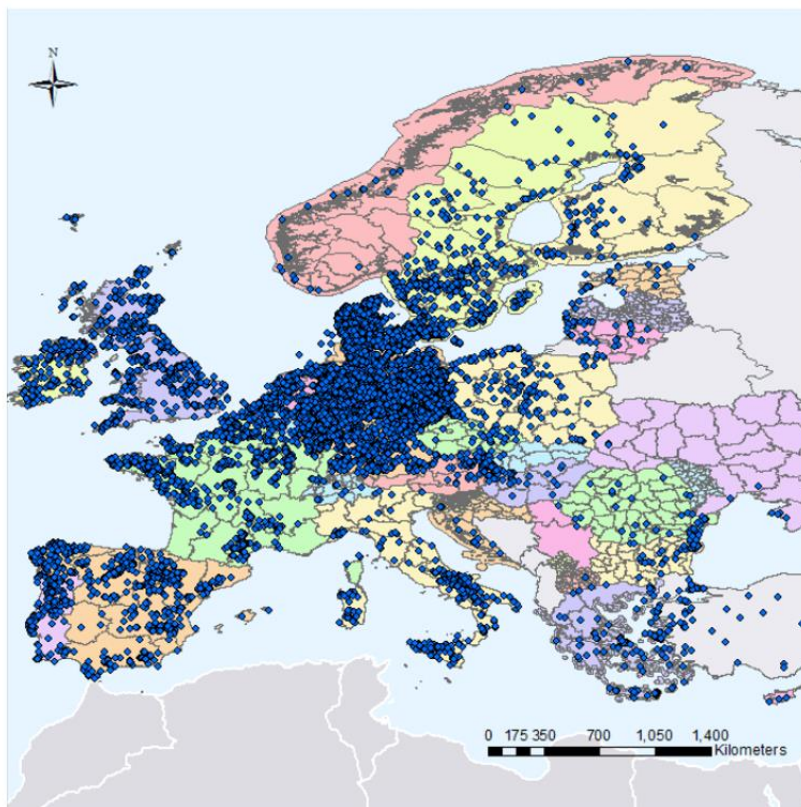
Vjetroelektrane u Europi postale su jedna od vodećih industrija proizvodnje električne energije i razvijanja novih kompetencija za svijet budućnosti. Europsko udruženje za energiju vjetra (EWEA) predviđa kako bi vjetar mogao pokriti čak 80% potrebe čovječanstva za električnom energijom do 2050. godine. Vodeći proizvođači električne energije u svijetu 2018. godine su Danska, Irska, Portugal, Njemačka i Engleska. (Slika 18) [8].



Slika 18. Vjetroelektrane u Europi [8]

Do 2030. Europska Unija predviđa da će kapacitet vjetroelektrana biti 323 GW, od čega će kopnene vjetroelektrane obuhvaćati 253 GW, a priobalne 70 GW. Prvi val izgradnje kopnenih vjetroelektrana je trenutno na svom vrhuncu. Do kraja 2020. godine 28% kopnenih vjetroelektrana će biti stare preko 15 godina. U Danskoj je 2019. godine već 174 vjetroagregata stavljeno izvan pogona. S novim trendom izgradnje priobalnih vjetroelektrana moguće je graditi veće vjetroagregate, no time i njihova dekomisija postaje kompliciranija i skuplja. Vodeće države u Europi koje se bave uslugama dekomisije vjetroagregata su Njemačka, Danska i Španjolska [10].

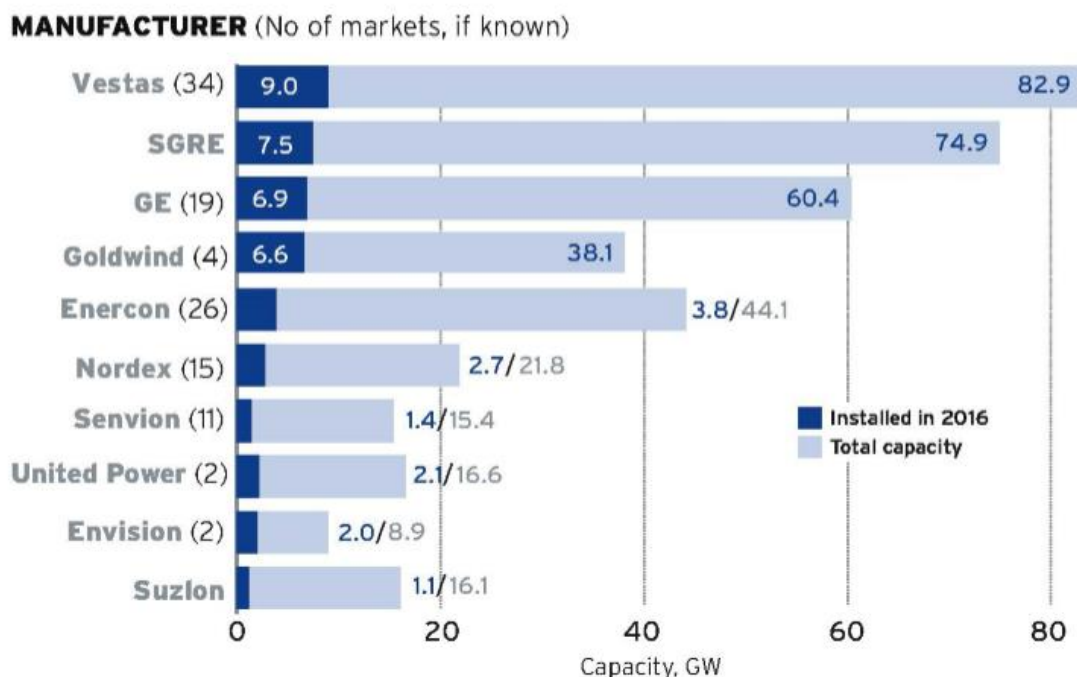
Iako trenutno europske vjetroelektrane u prosjeku mogu zadovoljiti 11% potreba za električnom energijom, njihova učinkovitost uvelike ovisi o količini i brzini vjetra te temperaturi zraka. U srpnju 2018. godine izlazni kapacitet europskih vjetroelektrana bio je 2128 GWh što je zadovoljilo 75% potrebe za električnom energijom. S druge strane, u srpnju iste godine izlazni kapacitet bio je samo 512 GWh što zadovoljava 6,2% potreba za električnom energijom. Time je jasno vidljivo kako je sama učinkovitost vjetroelektrana veoma varijabilna i ovisi o vremenskim prilikama [10].



Slika 19. Farme vjetroelektrana u Europi [10]

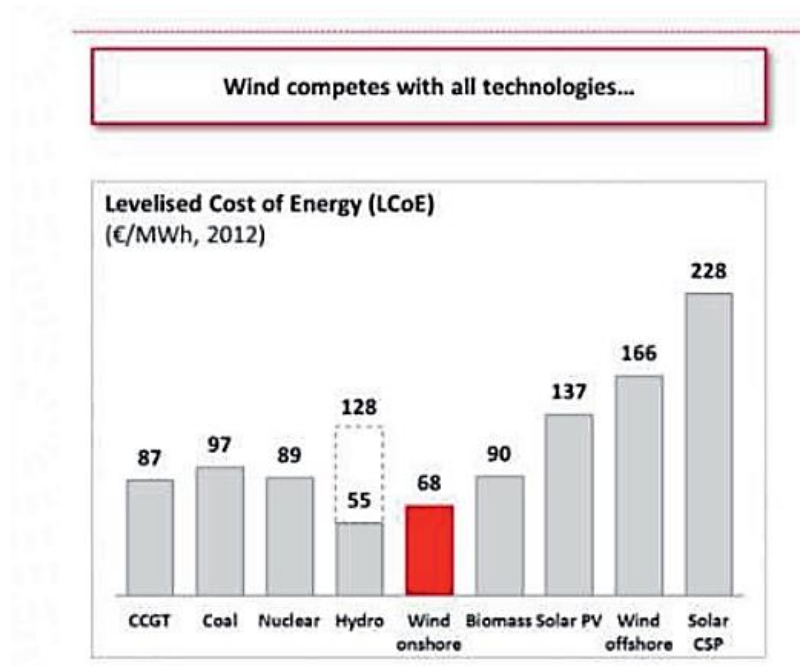
Kao što je vidljivo sa Slike 19., vjetroelektrane su smještene na mjestima s čestim vjetrovima kao što su Alpe, Apeninski i Skandinavski planinski predjeli te u priobalnim zonama kao i na Sjevernom i Baltičkom moru. Takva područja su povoljna za izgradnju farmi vjetroelektrana zbog klimatskih obilježja, koja ih čine najefikasnijima te mogu proizvoditi najviše električne energije tijekom cijele godine. Vodeći proizvođač vjetroturbina u svijetu je trenutno europska tvrtka Vestas sa sjedištem u Danskoj, a također raste i popularnost njemačkoga Enercona. (Slika 20) [10].

Top ten turbine makers of 2017



Slika 20. Vodeći proizvođači vjetroturbina u svijetu [10]

Razlog zbog kojega u zadnje vrijeme naglo raste popularnost vjetroelektrana kako u svijetu tako i u Europi je u tome da su vjetroelektrane u usporedbi s ostalim izvorima električne energije "zeleno" rješenje te ne štete okolišu u tolikoj mjeri kao npr. termoelektrane. Međutim, u posljednje vrijeme sve se više govori o ekonomičnosti te činjenici kako su vjetroelektrane jeftinije rješenje. Troškovi vjetroelektrane jest ono što je potrebno potrošiti kako bi se proizvela električna energija. Trenutačna cijena troškova vjetroagregata je oko 70€ po MWh čime su vjetroelektrane ekonomičnije od tradicionalnih izvora električne energije (Slika 21) [11]. Zaključno, popularnost vjetroelektrana opravdano raste u Europi i u cijelome svijetu, a nadamo se da će i u Republici Hrvatskoj u budućnosti biti planirano, izgrađeno i ostvareno više projekata vjetroelektrana.



Slika 21. Nivelirani troškovi energije za najčešće izvore električne energije [11]

5.3. VJETROELEKTRANE U HRVATSKOJ

Hrvatska je smještena, gledano prostorno-planski, na izrazito povoljnoj poziciji te zbog toga ima izvrsne prirodne predispozicije za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora energije. Obiluje energijom vjetra na obalnom dijelu i otocima, te zahvaljujući snažnoj buri u dalmatinskom zaleđu (područje Senja, Obrovca, zaleđe Dubrovnika i sl.) [7].

Ključna značajka vjetroelektrane je njezin položaj u odnosu na količinu vjetra, upravo položaj direktno utječe na isplativost i iskoristivost vjetroelektrane, točnije vjetropotencijal. Odabir odgovarajuće lokacije uvjetuje razvoj vjetroelektrane, ali ujedno predstavlja prvu fazu projektiranja. Vrhovi planina predstavljaju područje većeg energetskeg potencijala vjetra; najpovoljniji položaji za odabir lokacije budućeg projekta su obale mora i oceani (priobalna vjetroelektrana), pučine mora (plutajuća vjetroelektrana) te područja većih nadmorskih visina. U Hrvatskoj područja s najmanjeg vjetra su Ličko polje, Istra te Ploče, a na Velebitu su izražene velike srednje brzine vjetra zbog bure (najjači vjetar u Hrvatskoj). Nedostatak kod odabira adekvatne lokacije u Hrvatskoj jest manjak atlasa vjetrova i karte vjetra, zbog toga kod određivanja položaja vjetroelektrana moraju se dogovarati posebna mjerenja. Kako bi se moglo provesti adekvatno projektiranje i odabir odgovarajućih dijelova vjetroelektrana, nužno je proučiti kako je brzina vjetra za određeno područje raspoređena tijekom cijele godine, te za

odabranu lokaciju u periodu od najmanje 6 mjeseci, imati točna mjerenja anemometrom. Za mjerenje brzine i smjera vjetra u Hrvatskoj je zadužen Državni hidrometeorološki zavod. HDMZ svojom mrežom postaja, koje su postavljene po cijeloj državi, mjeri brzinu i smjer pomoću anemometra, postavljenih na 10 m visine na otvorenom prostoru. Pomoću prikupljenih podataka kroz duži period, cca 10 godina, moguće je odrediti srednja brzina vjetra [3] [7] [8].

Vjetroelektrane u Hrvatskoj su počele se graditi 1988., kada je Končar postavio prvi vjetroagregat u brodogradilištu Uljanik, međutim razvoj je obustavljen. Prema podacima iz 2018.godine u Hrvatskoj ima 20 vjetroelektrana koje su u normalnom radu (rujan 2018.) i koje isporučuju električnu energiju u elektroenergetski sustav Hrvatske. Instalirana snaga svih vjetroelektrana je 570 MW, u radu je 254 vjetroagregata koji isporučuju godišnje oko 1 475 GWh električne struje. Prva vjetroelektrana izgrađena u Hrvatskoj jest Vjetroelektrana Ravna 1, na predjelu Ravne na otoku Pagu iznad paške solane, (Slika 22.) [3] [8].



Slika 22. Šest od sedam vjetroagregata iz sustava Vjetroelektrane Ravne 1 na Pagu [7]

Najviše vjetroelektrana jest izgrađeno na području Zadarske županije, njih 6, prema podacima iz 2018.godine, pri čemu su 2019. godine otvoreni radovi na novoj vjetroelektrani VE Korlat, koja je ujedno najveća investicija Hrvatske elektroprivrede (HEP-a). Prikjučna snaga vjetroelektrane iznositi će 58 MW, što je više snage od trenutno najveće vjetroelektrane u pogonu u Hrvatskoj. [43] Upravo na području Zadarske županije jest izgrađen i stavljen u uporabu prvi vjetropark u Republici Hrvatskoj - vjetropark Ravna 1 na Pagu. Vjetroelektrana s najviše trenutno instalirane snage na tome području jest VE Poštak, 44.2 MW s godišnjom proizvodnjom od 100 GWh (2018.). Slijedi Splitsko-dalmatinska županija s izgrađenih 6 vjetroelektrana (2018.) Vjetroelektrana s najviše trenutno instalirane snage jest VE Lukovac, 48 MW s godišnjom proizvodnjom od 110 GWh. Treća županija s najviše zastupljenim

vjetroelektranama jest Šibensko-kninska županija s 5 vjetroelektrana. Vjetroelektrana s najviše trenutno instalirane snage na tome području jest VE Danilo, 43.7 MW s godišnjom proizvodnjom od 100 GWh (2018.) [3] [8].

Hrvatska je po statistikama do 2020. godine trebala instalirati 1200 MW vjetroelektrana. U kolovozu 2018. ukupna instalirana snaga 569,55 MW. Unatoč značajnim potencijalima energije vjetra Hrvatska u tome poprilično zaostaje, najviše radi administrativne procedure i nedorečenom zakonskom okviru jer je tek nekolicina upisanih projekata dobila mogućnost priključenja na elektroenergetsku mrežu. Razmišljanje koje prevladava u Hrvatskoj je kako su obnovljivi izvori energije potrebni za ispunjavanje određenih ciljeva i normi koje nameće Europska Unija. Nažalost, takvo razmišljanje nimalo ne potiče razvoj obnovljivih izvora. Slično stanje je i u drugim zemljama regije, posebno u Srbiji i Bosni i Hercegovini [8].

6. KONCEPT RADA VJETROAGREGATA

Vjetroelektrana je niz vjetroagregata smještenih jedan pored drugoga na zajedničkoj lokaciji. Izloženi su istim klimatskim uvjetima odnosno utjecajima vjetra te su zajedničkim rasklopnim uređajem priključeni na električnu mrežu. Vjetroturbina jest stroj koji stvara mehaničku energiju pomoću kinetičke energije vjetra. Pomoću električnih generatora iz te mehaničke energije dobiva se električna energija. Tijekom procesa stvaranja električne energije rotor vjetroturbine i električnog generatora nalaze se na istom vratilu. Glavni dijelovi vjetroagregata su rotor, generator, kućište i stup (Slika 23.) [12].

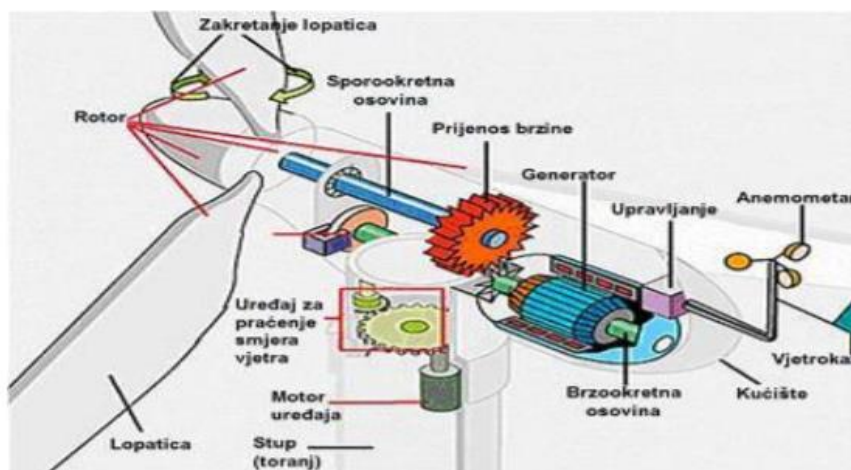
Rotor se sastoji od glavčine i lopatica. Ovisno o načinu regulacije napadnog kuta rotor može biti izveden na dva načina. Prvi način je rotor s pomičnim lopaticama gdje se regulacija napadnog kuta vrši zakretanjem lopatica tako da se položaj lopatica, ovisno o smjeru i intenzitetu puhanja vjetra namjesti u optimalni položaj. Rotor izveden na takav način je složen i skup, a primjenjiv je za lopatice dužine 25 do 30 metara. Drugi način izvedbe rotora je da se regulacija snage vjetroturbine vrši pomoću aerodinamičkog efekta. Promjenom brzine vjetra dolazi do poremećaja trokuta brzina te se na aeroprofilu mijenja napadni kut struje zraka. Lopatice takvog rotora imaju unaprijed namješten položaj kuta za područje brzina za koju je vjetroagregat projektiran. Takav način izvedbe je jeftiniji i jednostavniji. **Lopatice** rotora također se mogu izvesti na dva načina – lopatice sa zakretnim vrhovima ili lopatice s krilcima.

Kod lopatica s krilcima, krilca se odvajaju od površine i time se smanjuju aerodinamičke značajke profila. To je ujedno i sekundarni kočioni sustav koji se aktivira u slučaju otkazivanja primarnog kočionog sustava. Lopatice s krilcima ili zakretnim vrhovima stvaraju moment kočenja i rasterećuju generator u slučaju prevelikog intenziteta puhanja vjetra. [12]

Generatori vjetroagregata pretvaraju mehaničku energiju u električnu energiju. Generatori za vjetro turbine imaju posebnu konstrukciju jer zbog promjene u puhanju vjetra moraju imati varijabilnu snagu. Postoje dvije vrste generatora koji se koriste za vjetroagregate – sinkroni i asinkroni. Za slabu ili prijenosnu mrežu koriste se sinkroni generatori, a za jaču distribucijsku mrežu koriste se asinkroni generatori [12].

Kućište stroja nazive se još i gondola ili kabina. Nalazi se na vrhu stupa i ima dvojaku funkciju. S jedne strane štiti generatorski sustav od štetnih utjecaja okoliša, a s druge strane štiti okoliš od negativnih utjecaja generatorskog sustava [12].

U podnožju **stupa** nalazi se **transformator** koji povezuje vjetroagregat sa srednje naponskom mrežom. Stup se većinom izvodi cjevastog oblika jer kao takav ima veću čvrstoću i veću otpornost na vibracije. Može biti još teleskopski, rešetkasti, učvršćeni ili povezani. Unutar cjevastog stupa nalaze se stube, a kod većih konstrukcija može se ugraditi i dizalo [12].



Slika 23. Dijelovi vjetroagregata [12]

6.1. PODJELA VJETROAGREGATA

Vjetroagregati se dijele s obzirom na položaj osi rotora, na vjetroturbine s horizontalnom osi rotora i vjetroturbine s vertikalnom osi rotora [12].

Vjetroagregati s horizontalnom osi rotora (Slika 24), poznati pod nazivom **HAWT** (Horizontal axis wind turbine), mogu imati lopatice smještene sa zavjetrinske ili privjetrinske strane stupa. Lopatice su najčešće smještene s privjetrinske strane stupa jer smještanje sa zavjetrinske strane ima brojne nedostatke. Sve više dolazi do razvoja privjetrinskih vjetroturbina s dvije lopatice zbog manje cijene, jednostavnije izvedbe i veće pouzdanosti. Vjetroturbine se trebaju smjestiti na velike visine kako bi se omogućio pristup većim brzinama vjetra, tada se lopatice trebaju izvoditi s mogućnosti zakretanja kako bi se poboljšala stabilnost. Time je omogućeno namještanje optimalnog kuta i iskoristivost vjetroturbine je maksimalna. Nedostatak vjetroagregata s horizontalnom osi rotora je u tome što se trebaju izvoditi sa sustavom za zakretanje turbine što značajno poskupljuje izvedbu. Pojavljuje se i problem transporta zbog visokih tornjeva i dugačkih lopatica rotora turbine. Zbog vrlo skupih i visokih dizalica sama izvedba takve vjetroturbine je kompliciranija, a zbog izloženosti vibracijama manji im je vijek trajanja. Unatoč tome, zastupljenije su od vjetroagregata s vertikalnom osi rotora. Većinom se izvode s 3 lopatice [12].



Slika 24. Vjetroagregat s horizontalnom osi rotora [12]

Vjetroagregati s vertikalnom osi rotora – VAWT (Vertical axis wind turbine) učinkovita je i bez direktnog puhanja vjetra što je pogodno na lokacijama gdje je smjer puhanja vjetra promjenjiv. Izvode se bez stupa te su primjenjive kod izvedbi malih vjetroturbina. Pristupačnije su za održavanje jer se izvode bliže tlu bez visokih tornjeva. Nedostatak im je taj što imaju slabu iskoristivost s obzirom na to da su brzine puhanja vjetra pri tlu male. Blizu tla dolazi do vibracija i bržeg trošenja ležajeva. Rješenje se djelomično pronašlo u tome da se vjetroagregati s vertikalnom osi rotora postavljaju na krovove kuća i tako im se omogući pristup većim brzinama vjetra. U budućnosti bi mogle pronaći velik primjenu u priobalnim/plutajućim vjetroelektranama. Glavna značajka im je vertikalana os vrtnje, a dijele se na **Darrieusove** i **Savoniusove** turbine.

Darrieusova turbina sastoji se od dvije ili tri lopatice koje su spojene na vrhu i na kraju vertikalne osi rotora u obliku slova C. Imaju slab početni okretni moment te im je potreban vanjski izvor struje radi pokretanja. Imaju dobru iskoristivost, ali zbog značajnih cikličkih naprezanja slabiju pouzdanost. Rade na principu flotacije (Slika 25) [12].



Slika 25. Darrieusova turbina [12]

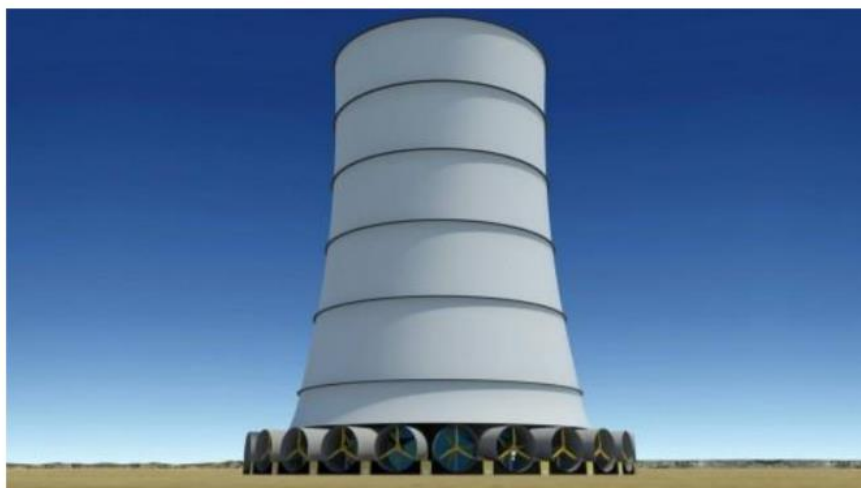
Savoniusova turbina ima oblik slova S. Kinetička energija vjetra se na rotirajućem trubu Savoniusove turbine pretvara u moment. Pretežito se koriste za kućanstva jer ne mogu stvoriti velike količine električne energije (Slika 26) [12].



Slika 26. Savoniusova turbina [12]

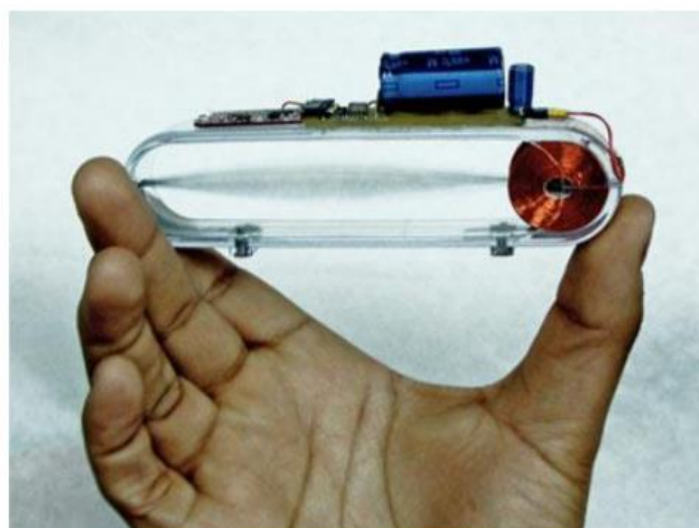
6.2. SUVREMENA TEHNOLOŠKA RJEŠENJA

Osim tradicionalnih vjetroagregata u novije vrijeme počinju se razvijati nove tehnologije pretvorbe kinetičke energije vjetra u električnu energiju. **Solarni stup koji provodi vjetar** (Slika 27.) osmišljen je u Sjedinjenim Američkim Državama. Na dno cjevastog stupa postavlja se turbina koja pomoću vode proizvodi vjetar tijekom cijele godine. Stup se postavlja u sredinu sustava i proizvodi vjetar u smjeru prema dolje. Osim toga, stupovima se dodatno mogu ugraditi vertikalne vjetrulje koje mogu hvatati postojeće vjetrove i usmjeravati ih u stup. Prednost tako dizajniranog vjetroagregata je u tome što mogu raditi neprekidno bez da proizvode ugljični dioksid ili stvaraju otpad. Najveći nedostatak leži u činjenici da je tijekom zime proizvodnja znatno manja tako da su solarni stupovi primjenjivi u zemljama u kojima je suho i toplo tijekom cijele godine (SAD, dio Afrike, Australija i Bliski Istok). Još jedan nedostatak je što su za potrebe proizvodnje vlastitog vjetra potrebne velike količine vode što se pokazalo neekonomičnim [12].



Slika 27. Solarni stup koji provodi vjetar [12]

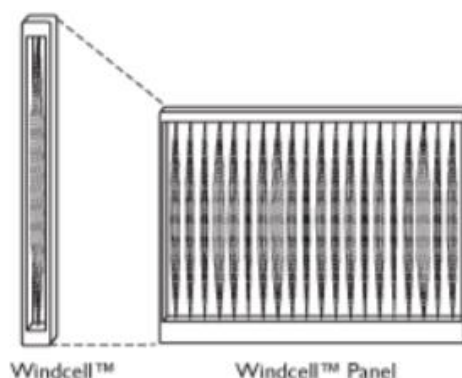
Humdingerov **Windbelt** (Slika 28.) je uređaj koji kinetičku energiju vjetra pretvara u električnu pomoću aeroelastičnog treperenja. U uređaju se nalazi opna koja pod pritiskom treperi i hvata energiju iz vjetra. Pomoću pobudnih generatora energija opne koja nastaje treperenjem pretvara se u električnu energiju. Glavna prednost uređaja je da ne proizvodi gotovo nikakvu buku. Postoje tri osnovne izvedbe Windbelta : microBelt, Windcells i Windcell Panel. Revolucionarnost **microBelt** tehnologije najbolje se može objasniti usporedbom s klasičnim AA baterijama. Jedna microBelt jedinica može proizvesti više električne energije nego nekoliko desetaka do stotina AA baterija [12].



Slika 28. MicroBelt [12]

Windcells uređaji (Slika 29) su nešto jednostavniji, duljine oko 1 metar. Koriste se za napajanje bežičnih repetitora ili oceanskih bolova za navigaciju. Mogu se koristiti pojedinačno ili u

grupama. **Windcell Panels** su sastavljeni od 20 Windcellova dimenzije 1x1 metar. Slični su vertikalno postavljenim solarnim panelima, a mjesečno proizvode oko 7,2 KWh električne energije ako je prosječna brzina vjetra 6 m/s [12].



Slika 29. Windcell Panel [12]

Tehnologija koja bi se prvotno koristila za smanjenje potrošnje goriva brodova su **energetski brodovi**. Takvi brodovi testirani su još 1920. godine tako da ideja nije nova, no Njemački znanstvenici trenutno rade na tome da brodovi, osim za svoje potrebe, proizvode dodatnu energiju. Pomoću kinetičke energije broda pokretale bi se turbine koje bi proizvodile električnu energiju. Električna energija bi se zatim pomoću elektrolize mogla pretvoriti u sintetički plin. Sintetički plin mogao bi se u rezervoarima dopremiti na obalu gdje bi se koristio za ponovnu proizvodnju električne energije. Štetan utjecaj energetskog broda bio bi gotovo zanemariv, a emisija ugljičnog dioksida smanjila bi se na najmanju mjeru. Sva oprema za proizvodnju električne energije nalazila bi se na brodu [12].

Suvremena tehnološka rješenja u području korištenja kinetičke energije vjetra za dobivanje električne energije su obećavajuća. Najveća prednost je što suvremena rješenja imaju minimalan utjecaj na okoliš što je danas veoma značajno kada se govori o projektiranju, izvedbi i eksploataciji proizvodnih pogona. Korištenje obnovljivih izvora energije za potrebe proizvodnje resursa nužnih za normalan život ljudi u budućnosti će postati neophodno, a energija vjetra jedna je od perspektivnih načina u vidu "zelenog" rješenja.

7. UTJECAJ VJETROELEKTRANA NA OKOLIŠ

Kao i svaka industrija, vjetroelektrane tijekom svoje izvedbe i eksploatacije utječu na okoliš. Većinom se poziva na studije koji tvrde da postoje značajni negativni utjecaji na izgled krajobraza, biljni i životinjski svijet. Europska Unija je na tu temu donijela dvije direktive, Direktivu o pticama i Direktivnu staništima čija je svrha upravo zaštititi vrijedna područja i ograničiti utjecaj vjetroelektrana na okoliš [8].

Vjetroelektrane tijekom pripreme i građenja utječu na tlo, zrak, stvaraju buku, utječu na biološku raznolikost i ekološku mrežu, utječu na ptice i krajobraz te stvaraju otpad. No koliki je zapravo intenzitet negativnih utjecaja, još uvijek nije poznato. Postoje države u kojima se ni nakon 30 godina od postavljanja vjetroelektrana još nije utvrdilo postojanje negativnih posljedica za prirodu, ali u Španjolskoj i Škotskoj, neke su zatvorene upravo zbog toga što se utvrdilo da radi njih stradavaju orlovi i bjeloglavi supovi [8].

Utjecaj na tlo očituje se u fizičkom uklanjanju tla s kamene podloge na mjestima gradnje te se može javiti tijekom postavljanja vjetroagregata, odnosno uslijed mogućeg neprimjerenog smještaja goriva i maziva. Onečišćenje tla može se značajno smanjiti korištenjem ispravne mehanizacije i strojeva i pridržavanjem propisanih mjera [8].

Do **utjecaja na zrak** može doći tijekom ispuštanja onečišćenih tvari u zrak iz građevinskih strojeva i vozila, međutim te emisije su ograničene na uže područje i radni dio dana. To su kratkotrajna vršna opterećenja koja predstavljaju vrlo malu emitiranu količinu tvari i nemaju utjecaj na kvalitetu zraka. [8]

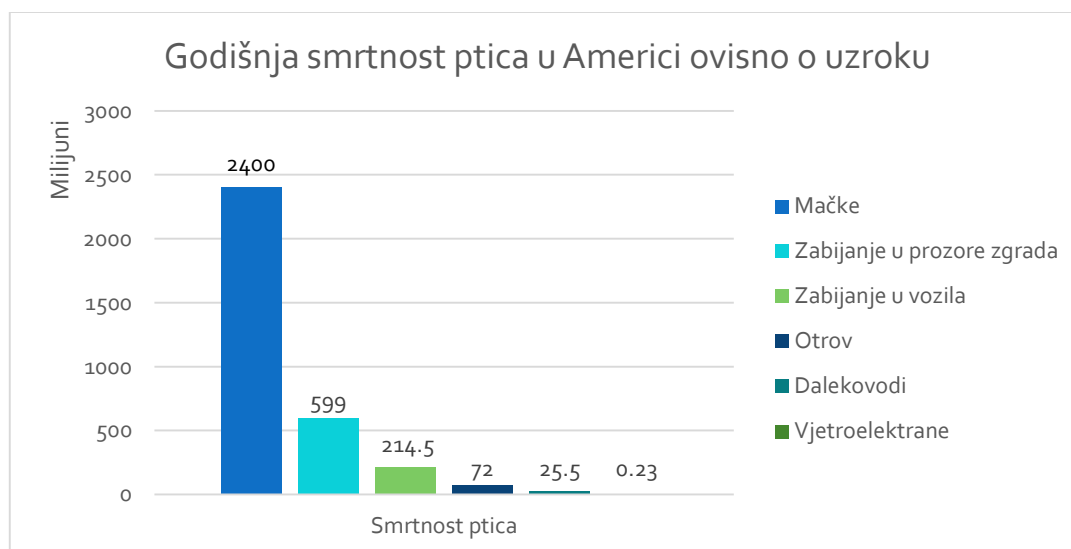
Tijekom izgradnje vjetroelektrane dolazi do **privremenog povećanja buke** od građevinske mehanizacije kao i kod svakog drugog građevinskog zahvata. Povećana razina buke na lokaciji zahvata je neminovna, ali je privremenog karaktera i predstavlja kratkotrajni utjecaj. Najviše dopuštene razine buke se moraju kontrolirati i biti u prihvatljivim granicama. S druge strane, buka koju proizvodi rad vjetroelektrane nastaje iz dva razloga. Prva je mehanička buka nastala radom pokretnih dijelova vjetroagregata, a druga je aerodinamička buka nastala gibanjem lopatica elise kroz zrak. U novim izvedbama vjetroagregata mehanička buka je vrlo mala te se ne smatra kritičnom pri projektiranju i nema značajnijeg utjecaja na okoliš [8].

Utjecaj na biološku raznolikost i ekološku mrežu nešto je značajniji zbog nazočnosti ljudi i strojeva te buke, vibracija i detonacija. Procjenjuje se da će se stanje staništa i vegetacije

izmijeniti uslijed izgradnje potrebne infrastrukture No, po dovršetku izgradnje oko vjetroelektrane svi migracijski putevi životinjskih vrsta će ostati otvoreni tako da nema prostornih ograničenja za njihovo kretanje što omogućuje njihov povratak na lokaciju [8].

U društvu se smatra kako se možda najveći negativni utjecaj vjetroturbine na okoliš očituje **ubijanjem ptica i šišmiša**. To se događa njihovim zalijetanjem među elise i zbog nagle promjene tlaka zraka iza turbine koji izaziva oštećenje njihovih unutarnjih organa. Problem zalijetanja ptica u rotore pokazao se puno manjim od očekivanog jer ptice percipiraju pokretne predmete i reagiraju izmicanjem, stoga su dalekovodi za ptice daleko opasniji. [8] Prema istraživanju "United States Fish and Wildlife Service" zapravo su mačke puno veća opasnost za ptice nego vjetroelektrane (*Dijagram 1.*) [13].

Dijagram 1. Godišnja smrtnost ptica u Americi ovisno o uzroku [13]



Za vrijeme građenja vjetroelektrane nastaje **otpad** od ostataka građevinskog materijala i ambalaže, te komunalni otpad kao posljedica rada i boravka osoba na gradilištu. Najveće količine opasnog otpada nastaju za vrijeme održavanja sustava – otpadna ulja i otpadni zauljeni materijali, istrošeni kondenzatori, akumulatori i slično. Tijekom gradnje, redovitog rada i održavanja pogona nastaju sljedeće vrste otpada :

- Otpadna mineralna ulja
- Zauljene krpe
- Miješani metalni otpad
- Miješani građevinski otpad
- Ambalažni otpad

Najčešći otpad koji nastaje tijekom rada vjetroelektrane su otpadna ulja. Pri izmjeni ulja za podmazivanje prijenosnog mehanizma nastaje nekoliko stotina litara otpada po proizvodnoj jedinici. Pridržavanjem mjera za zbrinjavanje otpada sukladno Zakonom o otpadu i na temelju njega usvojenim Pravilnikom o vrstama otpada i Pravilniku o gospodarenju otpadom negativni utjecaji na okoliš se mogu minimalizirati [8].

Između ostalog, postoji mišljenje kako vjetroelektrane zauzimaju veliki dio zemljišta. Površina koju prosječni vjetroagregat zauzima je oko 30 m², a površina koja je potrebna za postavljanje vjetroagregata je 1500-2000 m². Pristupni putevi koji se grade do vjetroelektrana često poslije služe u drugoj svrsi, a sama zemljišta na kojoj se grade vjetroelektrane su često nepristupačna i nisu poljoprivredna zemljišta [14].

Vjetroelektrane ne proizvode štetne plinove, niti na jednom se nije dogodila havarija opasna za zdravlje ljudi, a svaki vjetropark mora, po pitanju buke, zadovoljiti nivo koji je propisan Zakonom o zaštiti okoliša. Također, vjetroelektrane se ne izgrađuju na mjestima migracijskih puteva ptica. Najveća opasnost za ptice i njihovu populaciju su klimatske promjene, a ne vjetroelektrane. Ne postoje dokazi da je i jedna vjetroelektrana izazvala bilo koji veći štetan efekt po ptice, veći od neke zgrade ili npr. aerodroma, a istraživanja u Danskoj pokazuju da su stradavanja ptica od vjetroagregata zanemariva u odnosu na broj koji ih strada u naletima na automobile [14].

Proizvodnjom električne energije iz vjetra zapravo se smanjuje proizvodnja CO₂. Proizvodnjom električne energije iz vjetra u Europskoj Uniji u 2009. godini izbjegnuto je ispuštanje 160 milijuna tona CO₂ što je ekvivalent kao da je na prometnicama bilo 25% manje automobila.

Vjetroelektrane su trenutno u prosjeku najekonomičnija tehnologija iskorištavanja obnovljivih izvora energije. Vjetar je nestalan, ali predvidljiv izvor energije što znači da nije točno kako vjetroelektrane negativno utječu na sigurnost opskrbe električnom energijom. U većini slučajeva, ako na nekim lokacijama vjetra nema – ima ga na drugim lokacijama [14].

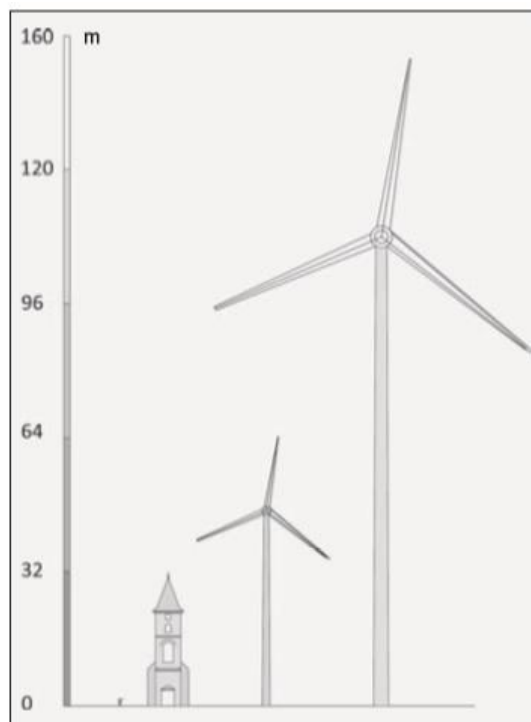
Uzevši u obzir negativne utjecaje vjetroelektrana na okoliš te, s druge strane, njihove prednosti u odnosu na druge izvore električne energije, možemo zaključiti kako su vjetroelektrane obećavajuća budućnost opskrbe električnom energijom u cijelome svijetu. Smatra se kako je puno manji utjecaj vjetroelektrana na fizički izgled krajolika, nego što su to klimatske promjene koje izazivaju ostali pogoni za proizvodnju električne energije. Također, nakon njihove

demontaže, krajolik je moguće u potpunosti vratiti u prvotni izgled, a u neke ekosustave mogu se vrlo dobro uklapati te stvarati i pozitivnu percepciju [15].

7.1. SMJERNICE ZA SMJEŠTAJ VJETROELEKTRANA U OKOLIŠ

S brzim razvojem vjetroelektrana raste i pritisak na okoliš. Vjetroelektrane postaju razvijenije, s većim brojem vjetroagregata, a vjetroagregati postaju sve veći. Europska Unija s jedne strane potiče razvoj iskorištavanja energije vjetra kao "zelenije" rješenje dobivanja električne energije, no s druge strane kontrolira njihov razvoj u cilju što manjeg narušavanja prirodnog izgleda okoliša. U ovom kontekstu može se govoriti o okolišu u kojem su vjetroelektrane rijetkost, okolišu s vjetroelektranama i "okolišu vjetroelektrana". U Republici Hrvatskoj najveći je pritisak na Primorje, Dalmaciju i Liku jer su to područja s najvećim vjetropotencijalom u državi. Problem leži u tome što su to područja od najvećeg turističkog značaja, a potreba zaštite područja uz more (pojas od 1000 m uz obalu mora) već je pokrenulo određene rasprave. Aitchison je utvrdio kako će turisti posjetiti neko područje bez obzira ima li u njemu vjetroelektrana ili nema, a jedna škotska studija pojašnjava kako većina turista smatra da adekvatno smještena vjetroelektrana neće narušiti izgled krajolika, no ne bi htjela imati pogled na vjetroelektranu iz svoje hotelske sobe [15].

Utjecaj vjetroelektrana na okoliš je dvojak. Očituje se u fizičkoj promjeni, ali i u promjeni percepcije promatrača. Upravo je ovaj drugi utjecaj značajniji, jer stvara određenu društvenu odbojnost prema vjetroelektranama zbog njihove visine i isticanja u odnosu na ostale krajobrazne elemente i građevine (Slika 30). Vjetroagregate je zbog svojih visinskih karakteristika nemoguće zakloniti, no pomoću određenih smjernica moguće ih je uklopiti u okoliš. Iako se vjetroelektrane mogu smjestiti u bilo koji ekosustav u kojemu postoji zadovoljavajuća razina vjetropotencijala, nije svaki takav ekosustav pogodan za smještaj vjetroelektrane [15].

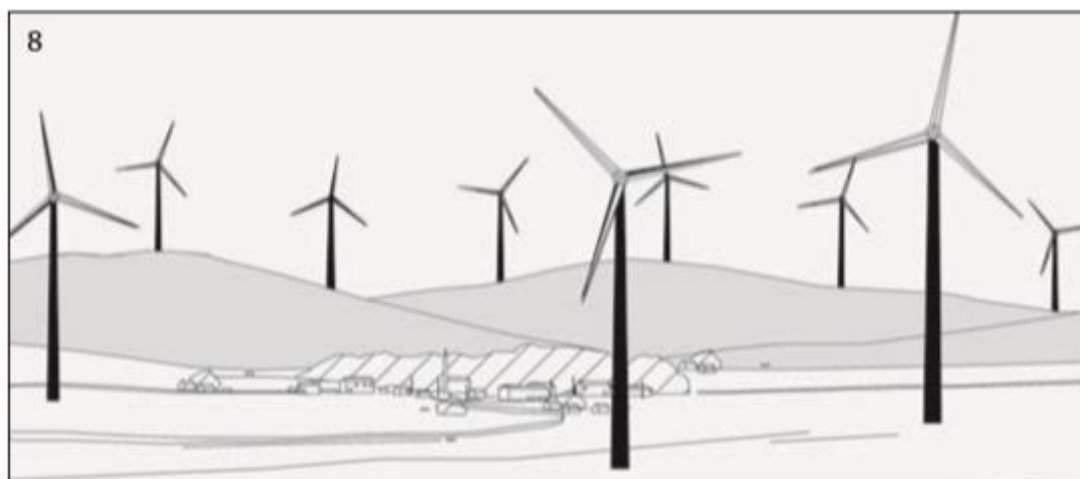


Slika 30. Odnos visine vjetroagregata i drugih elemenata ekosustava [15]

Međudnos okoliša i vjetroelektrane ovisi o elementima okoliša (mjerilo, tip, složenost, kulturni značaj, kapacitet nosivosti) i elementima vjetroelektrane (veličina vjetroagregata, njihov broj i prostorni raspored, izgled servisnih puteva). Tome se dodaje i činitelj percepcije odnosno način na koji se međudnos okoliša i vjetroelektrane doživljava od strane promatrača. Neka istraživanja pokazuju da je stav javnosti prema izgradnji vjetroelektrana pozitivniji nego što se misli, posebice ako se o vjetroelektranama razgovara kao o obnovljivom izvoru energije. Time se filozofije NIMBY (Not in my back yard) i BANANA (Build absolutely nothing anywhere near anyone) o kojima se često govori kada je tema mišljenje javnosti o vjetroelektranama, djelomično mogu odbaciti. Neka domaća istraživanja pokazuju da su stavovi društva zapravo u najvećoj mjeri neutralni. Dokument Europskog vijeća navodi kako je percepcija jednog vjetroagregata u okolišu uglavnom pozitivna, no da je problematično prihvaćanje cjeline [15].

Kada se govori o smještaju vjetroelektrane u okoliš govori se o dva kapaciteta koja krajolik posjeduje. **Kapacitet upijanja promjena** (Absorption capacity) je opseg promjena koje određeni krajolik može prihvatiti bez narušavanja njegovoga prirodnoga izgleda. **Kapacitet nosivosti** (Carrying capacity) je prostorni koncept odnosno pitanje koliko vjetroagregata krajolik može prihvatiti bez vizualnog preopterećenja. Kada je krajolik preopterećen promatrač

ima dojam zasićenosti i cijelu percepciju cjeline preuzimaju vjetroagregati (Slika 31.). Taj je koncept vrlo važan u stambenim ili turističkim područjima gdje je izgled krajolika jedan od presudnih čimbenika za korištenje toga prostora. Preporučuje se pristup "ALARA" - As low as reasonable achievable [15].



Slika 31. Primjer preopterećenog krajolika [15]

Nakon odabira lokacije za smještaj vjetroelektrane potrebno je učiniti mikrolociranje i detaljnu analizu krajobraza. To je postupak prilagodbe položaja svih elemenata vjetroelektrane. Osnovna načela optimizacije uklopljenosti vjetroelektrane u okoliš su jednostavnog izgleda i racionalno korištenje zemljišta [15].

Neke od smjernica za smještaj vjetroelektrana u okoliš su: [15]

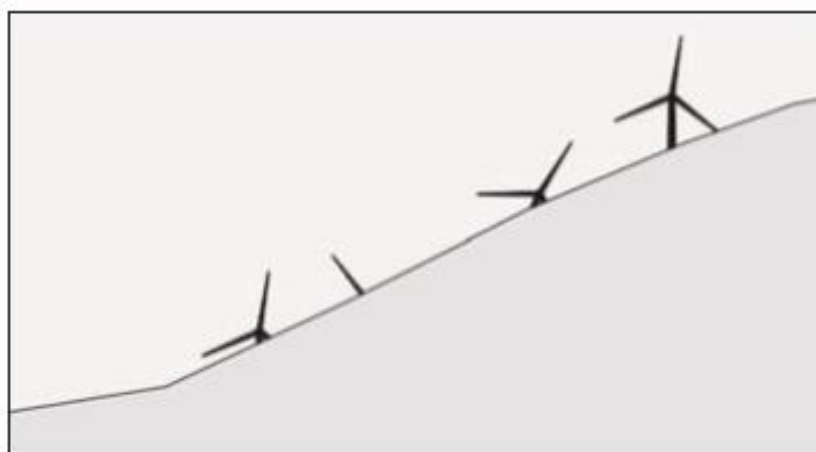
- Svi vjetroagregati koji se nalaze u istom vidnom polju trebali bi imati iste karakteristike – ista veličina, promjer lopatica, boja i baza stupa
- Boja vjetroagregata trebala bi biti bijela ili svijetlosiva zbog preklapanja s nebom
- Temelji stupa trebaju biti ispod razine postojećeg zemljišta Treba izbjegavati terene s velikim nagibima (Slika 32)
- Visina vjetroagregata ne smije nadmašiti visinu uzvisine na kojoj je smještena
- Izbjegavati krajolik koji već ima izražene elemente (Slika 33)
- Izbjegavati djelomičnu vidljivost vjetroagregata (Slika 34)



Slika 32. Smjernice za smještaj vjetroelektrane u okoliš (a) [15]



Slika 33. Smjernice za smještaj vjetroelektrane u okoliš (b) [15]



Slika 34. Smjernice za smještaj vjetroelektrane u okoliš (c) [15]

Osim načina smještaja vjetroagregata, treba voditi računa i o svim ostalim elementima vjetroelektrane. Za izvedbu **platoa** vjetroelektrane treba koristiti minimalne površine kako bi se izbjegli veći zahvati postojećeg terena. Ukupnu dužinu **servisnih puteva** potrebno je maksimalno reducirati i u što većoj mjeri koristiti postojeće puteve. **Odlagališta otpada** treba smjestiti na vizualno što manje izloženo mjesto i na što ravniji teren, a sav otpadni materijal

nakon izvedbe elektrane treba ukloniti. Najneugodnijim elementom vjetroelektrane kada se govori o međudjelovanju elektrane i okoliša smatra se **trafostanica** te ona treba imati visok standard oblikovanja i lociranja. Za smještaj trafostanice treba izbjegavati uzvišene dijelove terena gdje bi se ona mogla najviše isticati i time ometati vidno polje promatrača. **Vodove energije** između vjetroagregata i od vjetroagregata do trafostanice treba postavljati uz pristupne putove i trebaju biti podzemni [15].

Iako su vjetroelektrane jedan od neobičnijih i upečatljivijih elemenata krajobraza, koristeći preporučene smjernice i uvažavajući kapacitet apsorpcije promjene i kapacitet nosivosti okoliša, ne samo da se mogu nesmetano postaviti u krajobraz, nego čak mogu imati i pozitivan učinak. Strateškim pristupom projektiranja vjetroelektrana i odabirom njihove lokacije vjetroelektrane su zasigurno jedno od najboljih rješenja budućnosti za proizvodnju električne energije.

8. PREDNOSTI I NEDOSTACI VJETROELEKTRANA

Prednosti vjetroelektrana su [5], [21], [22]:

1. Korištenje vjetra kao glavnog posrednika ima prednosti u tome što je to obnovljiv izvor (na povoljnim lokacijama svake godine može se očekivati relativno ujednačeni dotoci vjetra) i potencijal iskoristivosti vjetra jest velik;
2. Izravnija pretvorba prirodnog oblika energije vjetra u električni oblik energije, za proces se može reći da je "besplatan";
3. Energetska postrojenja tijekom rada ni kemijski ni biološki ne onečišćuju okoliš (nema izgaranja goriva)
4. Mogućnost raspršenog instaliranja te zauzimanje znatno manjih površina u odnosu na druga energetska postrojenja istog kapaciteta;
5. Vjetroelektrane su energetska postrojenja bez štetnih emisija (staklenički plinovi). Ne emitiraju onečišćivače u zrak, ne ispuštaju efluente, ne stvaraju značajniji otpad i nisu radioaktivne; vjetroelektrana može imati umjeren pozitivan utjecaj na smanjenje snage vjetra u područjima koja su inače izložena suviše jakim vjetrovima;
6. Borba protiv globalnog zatopljenja (Protokol iz Kyota);

7. Troškovi pri dobivanju izvornog oblika i troškovi izvornog transporta ne postoje, a kod elektrana na fosilno gorivo taj je trošak značajan – rudnici, eksploatacijska polja nafte i plina, etc. pri čemu se tako smanjuje nacionalna ovisnost o uvozu fosilnih goriva uz smanjivanje specifičnih troškova investicije (napredak tehnologije i državne subvencije/naknade);
8. Diverzifikacija proizvodnje i sigurnost opskrbe
9. Razvitak gospodarstva, razvoj domaće industrije uz otvaranje novih radnih mjesta i tehnološki razvitak države

Nedostaci vjetroelektrana su : [5], [21], [22]

1. Površinska gustoća energije je mala, ukupna iskoristivost vjetropotencijala je niska (oko 30 %);
2. Povremenost pogona zbog površinske distribucije. Niska iskoristivost maksimalne snage vjetroelektrane koja zavisi o meteorološkim karakteristikama određenog područja (parametri vjetra kao što su brzine, intenzitet i trajanje, variraju od područja do područja);
3. Nestalnost proizvodnje ima nepovoljan utjecaj na karakteristike elektroenergetskog sustava te unutar tehničkih rješenja elektroenergetskog sustava ujedno moraju biti riješeni problemi promjene u snazi vjetra kako bi spriječilo oštećenje vjetrenjače pri olujnoj snazi te mogla izvući maksimalna snaga pri slabom vjetru, što automatski poskupljuje rješenja;
4. Tehničku izvedbu također poskupljuje multikator s automatskom regulacijom brzina generatora koji je potreban za usklađivanje broja okretaja vjetroturbine s brojem okretaja ugrađenog generatora;
5. Potrebno je veliko zemljište ako je gustoća energije vjetra mala na određenom području jer za proizvodnju 1000 megavata potrebno je područje od 50 do 150 četvornih kilometara što uzrokuje dodatno povećanje troškova
6. Troškovi održavanja te potreba za subvencijama i naknadama zbog još nekonkurentne proizvodne cijene po kilovatsatu
7. "Estetsko zagađenje" u slučaju velikih vjetroelektrana
8. Ne smanjuje se potreba za izgradnjom drugih (konvencionalnih) tipova elektrana
9. Buka

9. PROJEKTIRANJE VJETROELEKTRANA

9.1. PROSTORNO-PLANSKI PREDUVJETI

Kao početak razvoja investicija u obliku korištenja obnovljivih izvora energije, uključujući i vjetroelektrane, uzima se 2007. godina. Kako bi se zadovoljili zakonski uvjeti, za izgradnju vjetroelektrana nužno je imati građevinsku i lokacijsku dozvolu. Propisi koji se primjenjuju za izgradnju vjetroelektrane su iz područja prostornog uređenja i gradnje. Prije same gradnje, nužno je proći nekolicinu propisa i zadovoljiti određene kriterije prije nego se može krenuti na projektiranje. Tako se u početnoj fazi, mora izraditi detaljna procjena utjecaja na okoliš u okviru propisa iz područja zaštite okoliša, odrediti pravo na zemljište na kojim se planira gradnja vjetroelektrane tj. odrediti pravo građenja na zemljištu u vlasništvu privatnih osoba odnosno prava građenja na državnom zemljištu [23].

Za odabir potencijalne lokacije potrebno je imati bazu atlasa vjetra i to nacionalnog, regionalnog i lokalnog s najvećom prosječnom brzinom vjetra. Kako bi se adekvatno iskoristila energija vjetra, te ispoštovali kriteriji u pogledu zaštite okoliša i isplativosti samog projekta, pronalaženje najbolje lokacije za izgradnju vjetroelektrana predstavlja ključan čimbenik za realizaciju projekta. Vjetroelektranu tvori više vjetroagregatskih jedinica odgovarajuće raspoređenih u prostoru (s obzirom na topografiju i smjer vjetra) uobičajeno se koriste vjetroagregati istog tipa, povezani i priključeni na elektroenergetski sustav preko odgovarajućeg priključnog voda i transformatorske stanice. Ono što čini idealnu lokaciju jest povoljan režim vjetra, dobar cestovni pristup, blizina elektroenergetske mreže s dobrom mogućnošću evakuacije snage te da bude u skladu s uvjetima zaštite okoliša. Za lakšu detekciju povoljnih potencijalnih zona za smještaj vjetroelektrana, Europska agencija za okoliš izradila je detaljnu kartu vjetroenergije za prostor EU (na kopnu i na moru) kako bi pomogla zemljama članicama da odrede optimalne lokacije za izgradnju vjetroelektrana. Kopneno područje s puno vjetroenergije je koncentrirano uglavnom na poljoprivrednom i industrijskom području Sjeverozapadne Europe, a najveći offshore potencijal se može vidjeti na području zona malih dubina na Sjevernom moru, Baltičkom moru i Atlantskom oceanu uz male lokalne potencijale na području Mediterana i Crnog mora. Kako bi se što adekvatnije uskladilo što više uvjeta, pristupa se multidiscipliniranom pristupu uz uvažavanje većeg broja relevantnih parametara koji mogu utjecati na razvoj projekta. Pri izradi takve baze atlasa koriste se razni softveri, a multidiscipliniranim odnosno iterativnim postupkom od nekoliko lokacija

izabire se jedna. Na temelju prikupljenih podataka radi se preliminarna procjena godišnje proizvodnje te analiza isplativosti, ako na temelju takvih analiza, odabrana lokacija zadovoljava, donosi se odluka o postavljanju mjernih stupova te započinje mjerenje vjetropotencijala na toj lokaciji. Također za izgradnju postrojenja potrebno je podnijeti zahtjev za energetske odobrenje (PEO), upisati projekt u registar projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije i kogeneracije. Kada je projekt upisan u sve registre, dobiva se pravo za postavljanje mjernih stupova. Nakon dobivanja PEO i postavljanja mjernih stupova kreće se u fazu mjerenja koja traje najmanje godinu dana kako bi se prikupilo što više reprezentativnih podataka. Prikupljeni podaci se statistički obrađuju, a potom se radi korelacija podataka s podacima iz referentne meteorološke postaje da bi se napravila procjena dugoročnog režima vjetra na poziciji mjernog stupa. Prostor za obavljanje ispitivanja mora biti definiran geodetskim točkama (Gauss-Krugerova projekcija). U *Tablici 1.* prikazani su kriteriji za utvrđivanje veličine potrebnog prostora ispitivanja za postrojenje vjetroelektrane.

Tablica 1. Kriterij za utvrđivanje veličine potrebnog prostora ispitivanja za postrojenje vjetroelektrane[16]

Instalirana snaga (MW)	Površina tlocrtne projekcije prostora ispitivanja (km ²)
0-10	0-4
10-20	4-8
20-50	8-20
50-100	20-40

Nakon što se dobije procjena režima vjetra i digitalno topografska mapa terena na odabranoj lokaciji izrađuje se mapa vjetropotencijala iterativnim postupkom. Vjetropotencijal je najvažniji element za izbor lokacije vjetroelektrane. Predstavlja karakteristike vjetra (srednja godišnja brzina vjetra na određenoj visini iznad tla) na određenoj lokaciji. Na temelju podataka iz mape vjetropotencijala određuje se veličina, tip i broj vjetroagregata. Potrebno je optimizirati njihov položaj na lokaciji i uračunati gubitke zbog terena. Nakon izračunatog optimalnog položaja vjetroagregata procjenjuje se godišnja proizvodnja vjetroelektrane i analiziraju se

nesigurnosti oko gubitaka na godišnjoj razini proizvodnje. Nakon što su sakupljeni svi gore navedeni podaci, kreće se s izradom idejnog projekta te uz dokumentaciju Studija utjecaja na okoliš za vjetroelektranu, prometnice i sl. izdaje se zahtjev za izdavanje lokacijske dozvole.

Sastavni dio lokacijske dozvole s kojom se izdaje potvrda glavnog projekta jest idejni projekt koji predstavlja skup međusobno usklađenih nacрта i dokumenata kojima se daju osnovna oblikovno-funkcionalna i tehnička rješenja građevine te smještaj građevine na građevinskoj čestici na odgovarajućoj geodetskoj podlozi. Također sadrži i idejno-tehničko-tehnološko rješenje u skladu s objedinjenim uvjetima zaštite okoliša te druge nacрте i dokumente koji su značajni za izradu glavnog projekta. Dijelovi glavnog projekta su [23]:

- Opći dio, s potrebnim mapama i uvjetima gradnje iz lokacijske dozvole
- Toranj vjetrogeneratora s temeljem
- Kućište vjetrogeneratora s potrebnom opremom i gromobranskom zaštitom
- Servisni putovi i površine
- Situacija građevine.

U sklopu projekta izrađuju se [23]:

- Geotehnički elaborat
- Elaborat o zaštiti od buke,
- Elaborat zaštite na radu,
- Elaborat zaštite od požara,
- Program kontrole i osiguranja kvalitete.

Odabir lokacija se ne temelji samo na tehničkim parametrima kao što su snaga i smjer vjetra, pristupačnost elektroenergetskoj mreži, već i na ekološkim parametrima kao što su izbjegavanje zaštićenih područja prirode, kulturno-povijesne baštine i sl.. Zakonom o prostornom uređenju i gradnji definirano je da se vjetroelektrane ne mogu graditi na području otoka i 1000 m od morske obale. Zakonom o energiji i Zakonom o tržištu električne energije određene su temeljne

smjernice za izgradnju i eksploataciju vjetroelektrana te njihovo povezivanje s prijenosnom i distributivnom elektroenergetskom mrežom. Preduvjet za izgradnju vjetroelektrana je njihovo definiranje u dokumentima prostornog uređenja. Dokument temeljem kojeg se provodi čitav postupak pripreme za gradnju vjetroelektrana je Pravilnik o korištenju obnovljivih izvora energije i kogeneracije. Prije nego se izdaje lokacijska dozvola za izgradnju vjetroelektrane potrebno je izraditi i prihvatiti već spomenutu Studiju utjecaja vjetroelektrane na okoliš.

Ocjena potencijalne lokacije za vjetroelektranu provodi se kroz dva koraka: odabir mogućih lokacija eliminiranjem neprimjerenih zona te potom usporedno vrednovanje potencijalnih lokacija. Glavni cilj eliminacijskih kriterija jest eliminirati što veći dio područja koji potencijalno ne odgovaraju, te se tako pojednostavlja postupak pronalaženja adekvatnih potencijalnih lokacija. Za vrednovanje potencijalnih lokacija koriste se usporedni kriterij te se pri njihovom određivanju nastoji da oni budu neovisni jedan o drugome te da su njima obuhvaćene sve različitosti između vrednovanih lokacija: tehničko-tehnološke, ekološke, sigurnosne i ekonomske. Konačna odluka o tome gdje se i kako može smjestiti vjetroelektrana mora biti rezultat cjelovite analize i procjene kojom se ispituje svaka prihvatljiva lokacija u određenom području. Za rješavanje tog složenog problema koristi se sustavni pristup izbora lokacije koji za cilj ima primijeniti prihvatljivu metodologiju kojom se izabire najbolja kompromisna lokacija na osnovi karakteristika sustava, raspoloživih podataka, postavljenih kriterija i ograničenja. Ključne faze projekta mogu se podijeliti u grupe kako bi se omogućilo izvršenje navedenih aktivnosti u provođenju projekta: [16]

1. preliminarni izbor lokacija
2. obilazak lokacija, prikupljanje terenskih podataka, redefiniranje šireg izbora lokacija
3. primjena eliminacijskih kriterija i definiranje užeg izbora lokacije
4. prikupljanje relevantnih podataka za lokacije iz užeg izbora uključujući rezultate modela strujanja te informacije i mišljenja o stanju mreže
5. detaljan opis lokacija užeg izbora te ocjenjivanje po unaprijed definiranim kriterijima
6. matrica evaluacije, rangiranje lokacija i zaključak
7. sveobuhvatni utjecaji – dodatno vrednovanje usklađenosti novih elemenata s prostornim planom.

Podaci i podloge koji su potrebni za ranije spomenutu višekriterijsku analizu podrazumijevaju prikupljanje svih raspoloživih podloga i podataka bilo analizom dostupnih podataka ili obilaskom terena pri čemu se misli na [16] :

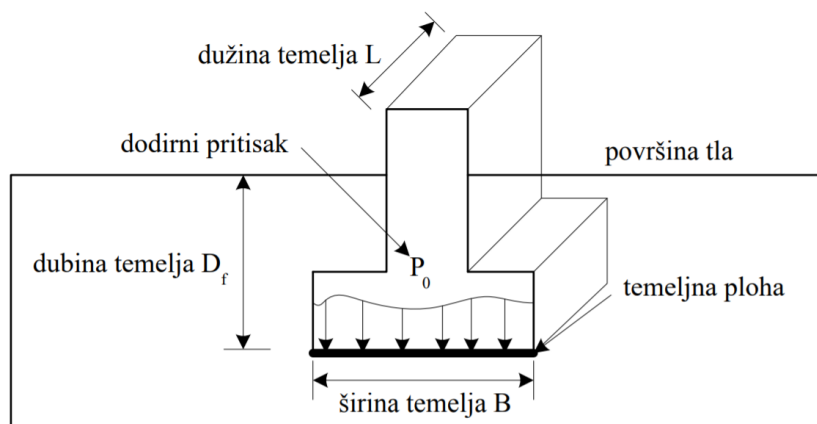
1. atlas vjetra/kartu vjetra radi izdvajanja područja s dobrim vjetro potencijalom
2. topografske i satelitske snimke za identifikaciju područja koja svojim orografskim oblikom i topografskim obilježjima podržavaju ideju gradnje vjetroelektrane
3. karte staništa i zaštićenih područja te područja nacionalne ekološke mreže
4. prostorne planove koji određuju namjenu, uvjete korištenja i zaštite prostora te time i mogućnost i dopustivost gradnje vjetroelektrane na nekom području
5. podloge o stanju električne mreže i mogućnosti evakuacije snage
6. digitalni model terena

Rezultati istraživanja znanstveno i metodološki dokazuju isplativost sustavnog planiranja te potrebu za izradom kvalitetnih stručnih podloga kao temeljnih dokumenata za izradu strateške prostorno planske dokumentacije. Može se zaključiti da je kvalitetnim preliminarnim ispitivanjima uz korištenje kompleksne višekriterijske analize moguće odrediti optimalne lokacije za smještaj mjernih mjesta za određivanje vjetro potencijala za potrebe izgradnje vjetroelektrana. Također, iako su početna ulaganja projekta veća što su istražni radovi detaljniji, pažljivom i kvalitetnom analizom prostora izgradnje, veća je sigurnost i manji rizik od nepredviđenih događaja koji mogu veoma povećati cijenu cijelog projekta. Nakon dobivanja lokacijske dozvole te potvrde glavnog projekta odnosno građevinske dozvole potrebno je ishoditi uporabnu dozvolu [16] [23].

9.2. OPĆENITO O TEMELJIMA

Dio konstrukcije koji prenosi opterećenja ostalih dijelova konstrukcije u tlo, tj. odnosno dijelovi konstrukcije preko kojih se ona oslanja o tlo, te preko kojih se djelovanja na konstrukciju prenose na tlo, nazivamo temelj. Kako je tlo dosta lakši, mekši i slabiji materijal od materijala od kojih je konstrukcija izgrađena, temelji tako predstavljaju prijelazni dio unutar kojega se unutrašnje sile iz vitkih i tankih elemenata konstrukcije preraspodjeljuju i prenose u široku zonu tla. Temelj je sastavni dio svake građevine, a na njegov oblik i debljinu utječe vrsta građevine koju on treba "nositi" kao i vrsta tla u kojem se temelj izvodi. Uobičajena podjela temelja jest

po načinu prijenosa opterećenja u tlo: plitki i duboki te njihova kombinacija. Osnovni pojmovi vezani za temelj prikazani su na Slici 35 [17] [18] [24] [25] [26] [27] [28].

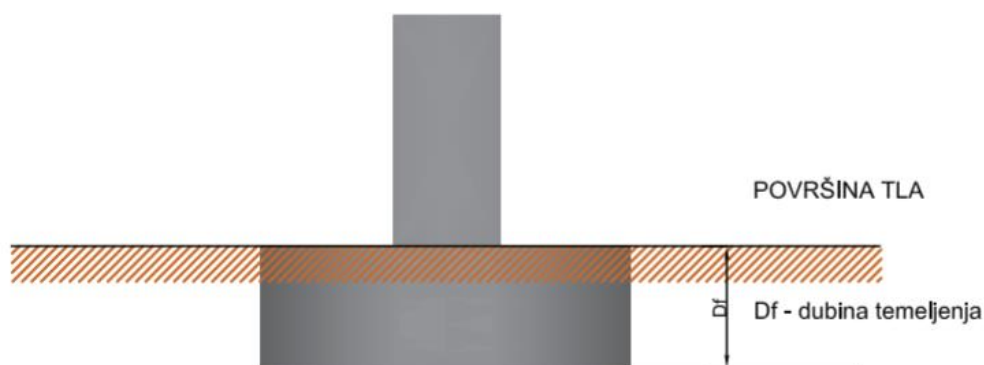


Slika 35. Osnovni pojmovi kod temelja

Ako se tlo zadovoljavajućih geotehničkih svojstava nalazi u blizini površine, govori se o plitkom temeljenju. Ovdje će naglasak biti na plitkim temeljima, jer se upravo takvi izvode kod vjetroelektrana. Plitki temelji, (Slika 36.), prenose opterećenja u plitke slojeve tla, dok duboki prenose opterećenje ili u dublje slojeve ili u sve slojeve duž njihove visine. Granica između plitkih i dubokih temelja nije strogo određena, ali se kao gruba podjela može prihvatiti ona po kojoj su odnos dubine na kojoj temelj prenosi opterećenje na tlo (h) i širine temelja (b) manji od 4 do 5 ($\frac{h}{b} < 4 - 5$).

Plitko temeljenje može se podijeliti na više vrsta oblika temelja, tako podrazumijevamo temeljenje na temeljima samcima, trakama, roštiljima, pločama i elastičnim nosačima. Razlika između ovih temelja i dubokih je u načinu prenošenja opterećenja. Ovi temelji prenose opterećenje u tlo dodirnom plohom temelj – tlo, dok duboki temelji osim dodirnom plohom prenose opterećenje i trenjem po plaštu. S obzirom na to da konstrukcija, temelj i tlo čine jedinstveni sustav, opterećenje temelja će u pravilu biti rezultat mehaničke interakcije (kompatibilnosti sila, pomaka, deformacija, naprezanja na sučeljima dijelova sustava) među dijelovima tog sustava, pri čemu su to statički neodređeni sustavi. Provođenje interakcije konstrukcija – tlo dobivamo realniji proračun, uzimamo u obzir realne krutosti kako konstrukcije tako i tla kroz koeficijent reakcije podloge te dobivamo realnu preraspodjelu unutarnjih reznih sila unutar našeg sustava. Realna slika ne omogućava da proračun temelja ne bude predimenzioniran ili da bude poddimenzioniran, omogućava nam sigurniju i adekvatniju

izvedbu. Također kako bi bili zadovoljeni uvjeti nosivosti i slijeganja za građevinu kojoj je temelj namijenjen, osim odgovarajuće dubine temelja mora se paziti da temelj bude ispod granice smrzavanja za određenu klimatsku zonu kako ne bi došlo do pojave ledenih leća, koje se, kada bi došlo toplije vrijeme, otope i uzrokuju diferencijalno slijeganje temelja, time i cijele konstrukcije.



Slika 36. Plitko temeljenje

Osnovni smisao plitkog temeljenja može se u globalu reći, jest da se opterećenje s građevine na tlo prenosi preko kontaktne plohe, odnosno isključivo pritiskom temeljne plohe na tlo. Ova definicija uključuje teorije razvijene na Prandtlovom modelu, Terzaghijevim dopunama sa stvarnim tlom i Meyerhofovom prijedlogom modela za plitke temelje i temelje na kosini, o kojima će više biti rečeno u sljedećem poglavlju. Pravilno projektiranje podrazumijeva omogućavanje predviđenih uvjeta oslanjanja konstrukcije, prijenos opterećenja u dopuštenim naprezanjima tla uz dopuštena slijeganja i minimalnu neravnomjernost. Dubina temelja mora biti prilagođena uvjetima u tlo, zato je nužno provesti geotehničke istražne radove, kako bi se osiguralo da uvjeti zadovoljavaju zahtjevima sigurnosti protiv sloma tla, a slijeganja u odgovarajućim granicama. Kod plitkih temelja često je kriterij slijeganja presudan od kriterija nosivosti zbog same širine temelja. Ograničavanjem ukupnih slijeganja ograničavaju se diferencijalna slijeganja i bilo kakve kasnije opasnosti. „Općenito su slijeganja plitkih temelja kao što su temelji samci ili trakasti temelji ograničena na 25 milimetra.“ [26] [27] [28].

9.3. NOSIVOST TEMELJNOG TLA PLITKIH TEMELJA

Nosivost temeljnog tla spada u granično stanje nosivosti, proračunsku situaciju GEO, a mehanizam sloma jest slom temeljnog tla. Ako se prekorači nosivost formira se klizna ploha u tlu, dolazi do rotacije temelja, on propada, okolno tlo se izdiže i rezultat te reakcije jest slom temeljnog tla.

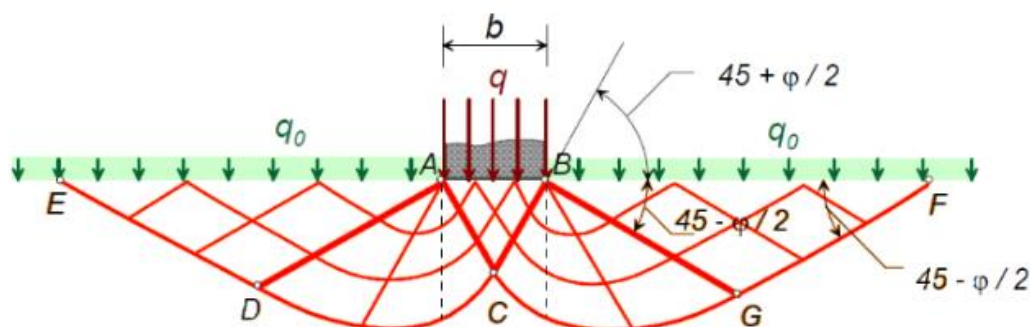
Prandtl je 1921. godine proučavao ponašanje tvrdih i mekih materijala, odnosno plastični slom u metalu, čeličnu kocku utiskivao je u spužvu, te se to rješenje može iskoristiti kao simulacija prodora temelja u tlo, ali bez rotacije. Time je došao do izraza nosivost (bez kohezije). Matematički je dokazao utiskivanjem tvrdog materijala u meki, oblik ploha po kojima dolazi do sloma (logaritamska spirala). Plastificirane zone u tlu prema Prandtlovom rješenju prikazane su na donjoj slici (Slika 37). Prandtl je ustanovio 3 zone prema teoriji plastičnosti : zonu plastifikacije ABC (aktivna zona), linearni dio AC i zonu radijalnog sloma GF (pasivne zone ADE i BGF). Između aktivne i pasivne zone ustanovio je da postoji i tzv. prijelazna zona, zona u obliku logaritamske spirale koja je također pasivna. Do formiranja ovih zona, mogu se nazvati i klinovi, dolazi na plohama gdje je dosegnuta posmična čvrstoća, zato što se tlo lomi u posmiku. Prandtl ovim postupkom podrazumijeva pretpostavke da je homogeno i izotropno tlo bez težine ($\gamma = 0$), te da je temelj krut i potpuno gladak. [30]

Definicije pojmova na slici:

q_0 -jednoliko površinsko opterećenje

B- širina temelja

q- opterećenje od temelja

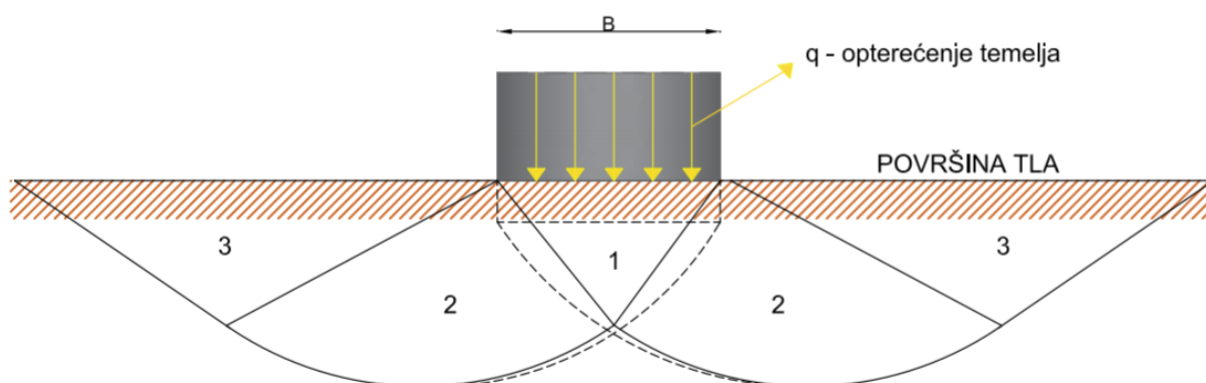


Slika 37. Model plastičnog sloma ispod plitkog temelja [30]

Uz pomoć Prandtlovog rješenja, Terzaghi je proširio rješenje nosivosti tla na centrično opterećene temeljne trake. Uveo je šest pretpostavki:

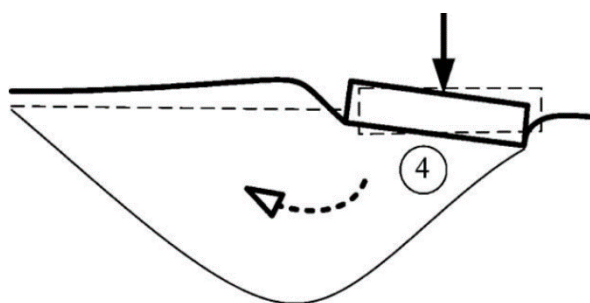
1. Tlo se razmatra kao homogeni izotropni poluprostor
2. Problem je dvodimenzionalan
3. Baza temelja je hrapava
4. Mehanizmi sloma zahvaća širu regiju tla
5. Opterećenje je vertikalno i simetrično
6. Površina tla je horizontalna

Analizom Prandtlovog rješenja te korištenjem gore navedenih pretpostavki, analizirao je klizanje po kliznim plohama te uzeo u obzir utjecaj težine tla, učinke kohezije (c) i trenja (φ) između temelja i tla. Iz njegovog proučavanja proizašli su izrazi za plitki temelj i za temelj na površini. Definirao je izraze koji doprinose povećanju posmične čvrstoće na kontaktima klinova, granicama formiranih zona. Najmanja nosivost tla jest na rubu temelja te na tome mjestu prvo dolazi do plastifikacije. Terzaghijev model prikazan je na Slici 38.



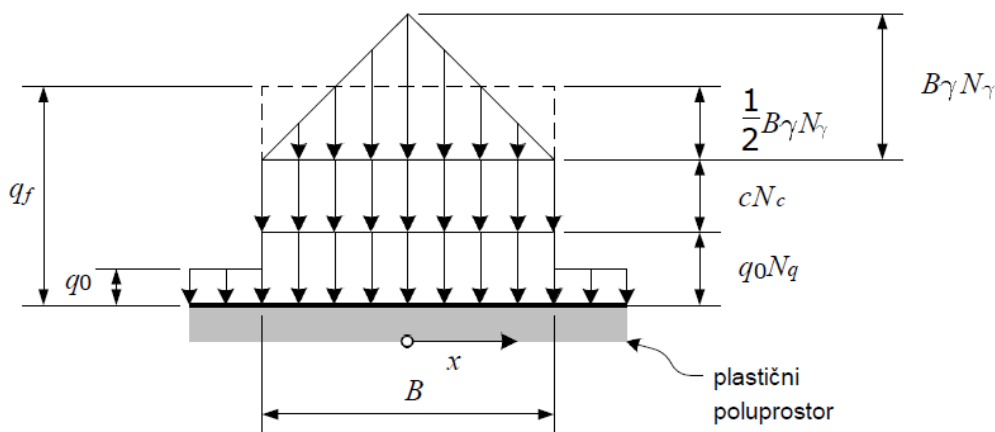
Slika 38. Terzagijev model

Terzaghijev model također se sastoji od 3 zone. Kada je dosegnuta nosivost tla q_f znači da je dosegnuta čvrstoća temeljnog tla te se ispod temelja formira (plastični klin) zona aktivnog tlaka, stvoren je I klin. Time je stvoren preduvjet za formiranje drugog klina (II zona-zona radijalnog pritiska). I klin se sliježe s tlom i nastoji se izbiti u jednu stranu, daljnjim pritiskom on nema gdje otići te nastaju dvije dodane zone. Kako je preduvjet za nastanak II klina, prisustvo I klina, tako II klin je preduvjet za nastanak III klina (III zona – pasivnog otpora) i formira se klizna ploha (Slika 39) [30].



Slika 39. Oblik sloma tla prema Terzaghiju [31]

Proširenjem Prandtlovog rješenja nosivosti tla ispod centrično opterećene temeljne trake, Terzaghi dolazi do sljedećeg izraza (Slika 40).



Slika 40. Nosivost tla ispod centrično opterećene temeljne trake [30]

$$q_f = c \cdot N_c + \frac{1}{2} \cdot B_\gamma N_\gamma + q_0 \cdot N_q \quad (9.1)$$

Definicije oznaka:

q_f - nosivost tla (prosječno trokutasto opterećenje koje izaziva slom u tlu)

c, ρ – parametri Mohr-Coulombovog zakona čvrstoće

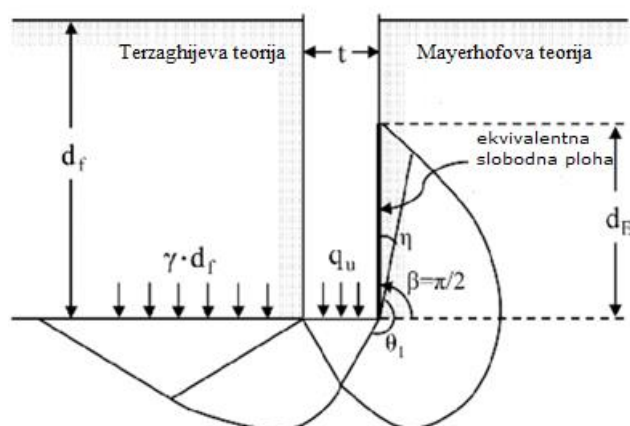
γ – jedinična (volumenska) težina tla

q_0 – jednoliko podijeljeno normalno opterećenje

B – širina temeljne trake

N_c, N_γ, N_q – faktori nosivosti, funkcije parametra ρ

Nakon Terzaghija, Mayerhof uvodi 3 nova faktora **s**, **i**, **d** za izraz nosivosti temeljnog tla. Uvodi faktor oblika **s** (Terzaghi je izraz razvio za temeljnu traku, temelj određene širine **d** i praktički jako velike duljine, problem je razmatrao dvodimenzionalno). Uvođenjem faktora oblika cijeli izraz može poslužiti i za kvadratne temelje, kružne, pravokutne i sl.. Faktor oblika prilagođava izraz za različite oblike temelja. Osim faktora oblika uvodi faktor dubine. Terzaghi je rekao da se slom javlja do razine temelja, ali Mayerhof uzima u obzir i dio površine tla i to je taj doprinos **d**. Faktor **i** je faktor nagiba opterećenja koje djeluje na temelj. [30] Usporedba Mayerhofovog i Terzaghijevog rješenja dana je na Slici 41.

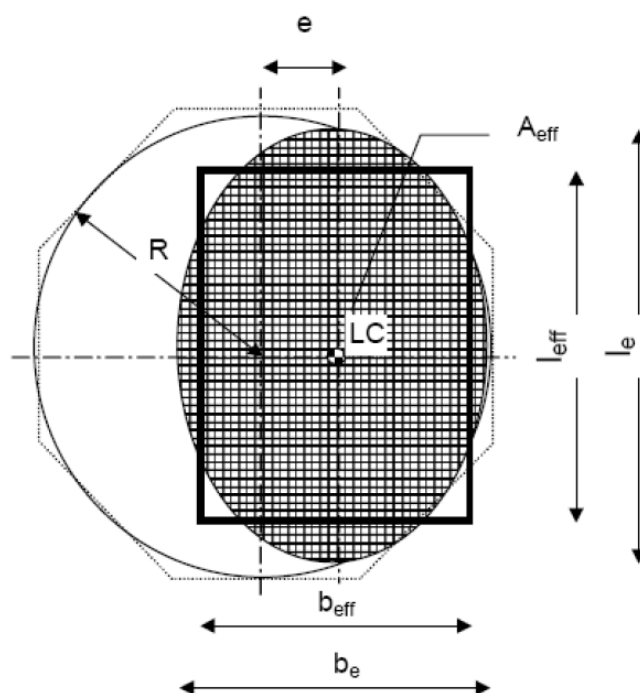


Slika 41. Usporedba Mayerhofovog i Terzaghijevog rješenja [38]

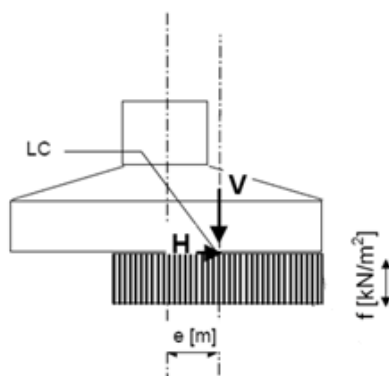
Mayerhofova ispitivanja su pokazala da se ploha temelja pri ekscentričnom opterećenju mora reducirati tako da sila, koja djeluje na temelj, djeluje u sredini. Ako imamo koso ekscentrično opterećenje na temelj radi se o trodimenzionalnom problemu. Ako imamo temelj koji je cijeli opterećen tlačnom silom u sredini, on će cijeli biti u tlaku, u svakoj točki njegove površine u odnosu na temeljno tlo, međutim kada imamo silu koja ne djeluje u centru već pod nekim kutem tada se cijela efektivna površina praktički pomiče. Efektivna površina je onaj dio temeljne plohe koji je cijeli u tlaku, te za taj dio temeljne plohe koji je u tlaku računamo nosivost temeljnog tla. Međutim, ako je temeljna ploha u vlaku dolazi do odizanja u tom dijelu. Efektivna površina temelja određuje se na temelju opterećenja na temelj, na temelju horizontalnih sila. Iz ekscentriciteta slijedi efektivna duljina i širina temelja, što je ključno za određivanje nosivosti. Vertikalne sile su nepovoljne jer generiraju veće kontaktno opterećenje, o kojem će kasnije biti više toga objašnjeno, a horizontalne sile su također nepovoljne jer veće horizontalno opterećenje posljedično uzrokuje manju efektivnu površinu. Horizontalna sila utječe na

vertikalnu nosivost tla jer što je ona veća, manja je efektivna površina temelja, a time je manja površina ispod temelja u tlaku što povlači manju vertikalnu nosivost temeljnog tla [30].

Prikaz efektivne površine i nosivost oko jezgre poprečnog presjeka date su na donjoj slici (Slika 42.) za kružni temelj, jer su tog oblika najčešće temelji vjetroelektrane, iako će se u ovome radu raditi proračun za osmerokutni temelj, čija ekvivalentna površina bit će prikazana u zasebnom poglavlju zajedno s usporedbom osmerokutnog i kružnog temelja [18].



Slika 42. Nosivost oko jezgre poprečnog presjeka za kružni temelj [18]



Slika 43. Djelovanje horizontalnog i vertikalnog opterećenja na temelj [18]

Na Slici 43. može se vidjeti situacija, ako horizontalne sile guraju vertikalnu silu van središta, ali da je hvatište i dalje unutar prve jezgre, znači da će nam cijeli temelj biti u tlaku. Ako je horizontalno opterećenje toliko da gura vertikalnu silu tako da je resultantno hvatište unutar druge jezgre, znači da je dio temelja u vlaku dio u tlaku. Kada bi hvatište sile bilo van druge jezgre, došlo bi do potpunog odizanja temelja [18].

Izrazi za određivanje efektivne površine kružnog temelja:

$$A' = 2 \left[R^2 \arccos \left(\frac{\theta}{R} \right) - e \sqrt{R^2 - e^2} \right] \quad (9.2.)$$

efektivna površina ovisi o radijusu i ekscentricitetu.

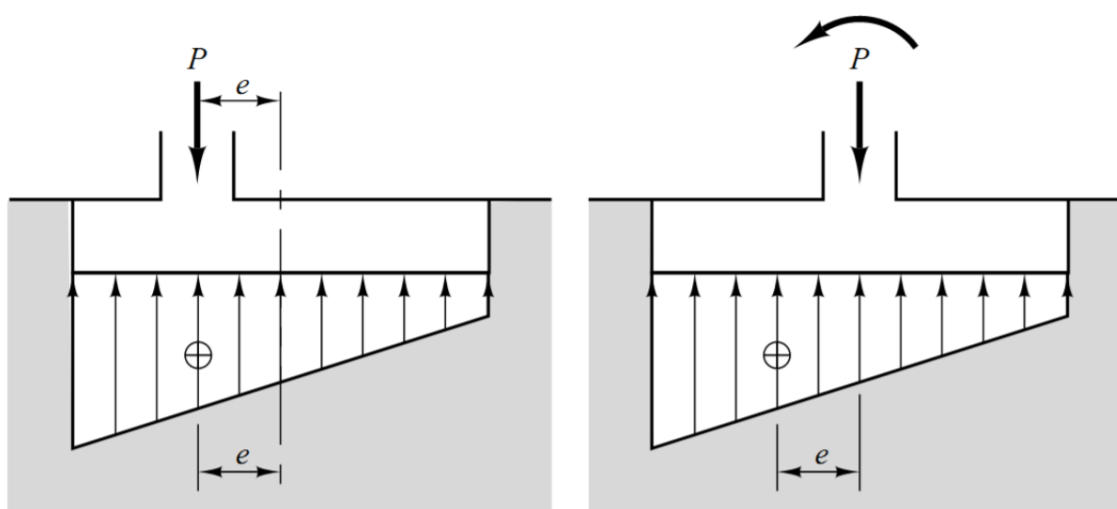
$$be = 2(R - e) \quad (9.3.)$$

$$i_c = 2R \sqrt{1 - \left(1 - \frac{be}{2R}\right)^2} \quad (9.4.)$$

$$l' = \sqrt{A' \cdot \frac{le}{be}} \quad (9.5.)$$

$$b' = \frac{l'}{le} \cdot be \quad (9.6.)$$

Raspodjela naprezanja i utjecaj na ekscentricitet dani su na Slici 44.



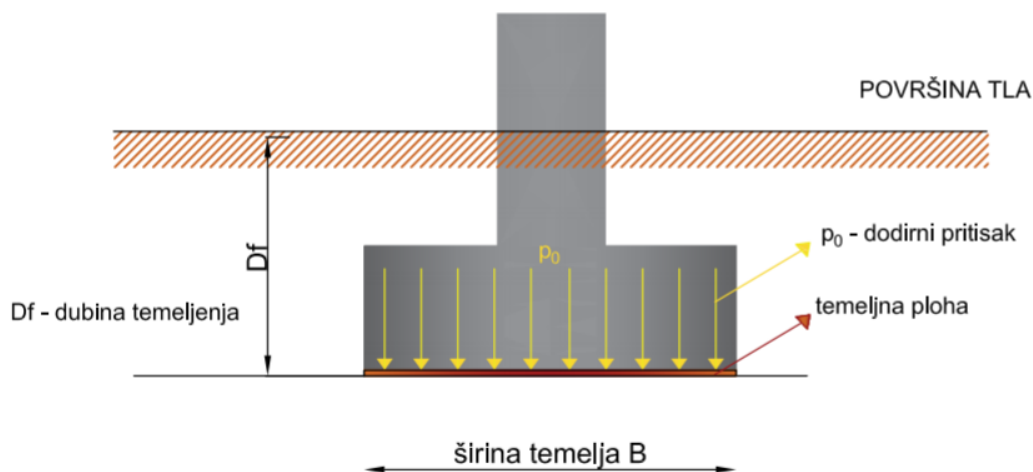
Slika 44. Raspodjela naprezanja [30]

Pomoću izraza za l' (9.5) i b' (9.6.) dobiva se ekvivalentna površina pravokutnog temelja što odgovara ekvivalentnoj površini kružnog temelja. Ekvivalentna površina za osmerokutni temelj data je u poglavlju 4. Analize i proračuni temelja vjetroagregata.

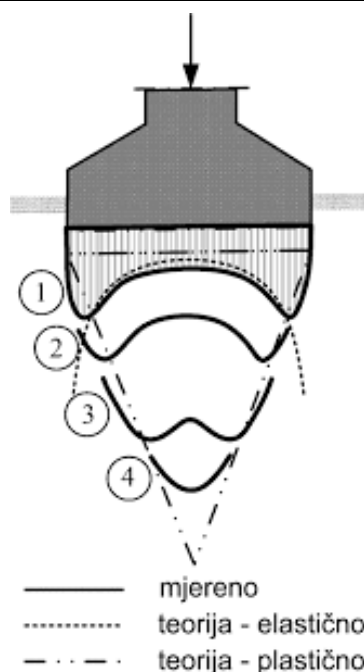
Na temelju Terzaghijevog rješenja Brinch – Hansen (1961) je izveo rješenje u kojem je u obzir uzeo ekscentricitet i horizontalnu komponentu sile koja djeluje na temelj te faktore oblika temelja. Uvodi se faktor nagiba dna temeljne plohe, b faktor (temelj se može izvoditi pod nagibom radi klizanja), te faktor g koji označava da površina tla ne mora biti horizontalna (može biti neka berma) [30].

Također kod plitkih temelja treba se uzeti u obzir kontaktno naprezanje ispod pravokutnog plitkog temelja. Kako temelj pritišćemo nekom silom, tako se raspodjela kontaktnih naprezanja u tlu mijenja. Raspodjela naprezanja na kontaktnoj plohi ovisi o krutosti temeljnog tla i krutosti same temeljne konstrukcije. Njihov odnos definira kakva će raspodjela kontaktnih naprezanja na dnu temeljne plohe biti.

Kontaktno naprezanje dato je na Slici 45., a njegova raspodjela dana je na Slici 46 [30].



Slika 45. Kontaktno naprezanje



Slika 46. Kontaktno normalno naprezanje trend raspodjele [29]

Iz gornje slike može se uočiti da prilikom opterećenja, pri relativno malim naprezanjima u rubovima su relativno velika kontaktna naprezanja (točka 1), po teoriji elastičnosti to su beskonačna naprezanja te u njima prvo dolazi do plastifikacije, mala naprezanja i slijeganja. Kako opterećenje na temelj sve više raste na temeljnom tlu, iz područja elastičnosti (gdje su najveća naprezanja u rubovima), lagano središnji dio kontaktnih naprezanja ("trbuh") postaje sve veći. Što se više približavamo graničnom stanju nosivosti, raspodjela naprezanja sve više odgovara rješenju po teoriji plastičnosti (takav je trend raspodjele naprezanja). Nakon 4.faze nastupa slom.

Danas se za projektiranje koristi Eurokod, izvodi se iz spomenute teorije plastičnosti i eksperimentalnih rezultata. Korišten je uzet iz Terzagijevog izraza i dati je prijedlog za opći oblik nosivosti uz korištenje tri dodatna faktora **b,s,i**, nije prihvatio faktor **d** s kojim bi bili na još većoj strani sigurnosti. Nosivost plitkog temelja se tako definira kao maksimalna vrijednost primijenjenog opterećenja za koje neće doći do sloma tla ispod temeljne konstrukcije [24].

Prema Eurokodu 7 izrazi za nosivost tla ispod plitkog temelja s pravokutnom temeljnom plohom:

- za nedrenirano stanje:

$$\frac{R}{A} = q_f = (\pi + 2)c_u b_c s_c i_c + q \quad (9.7.)$$

- za drenirano stanje:

$$\frac{R}{A} = q'_f = c' N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + \frac{1}{2} \gamma' b' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma \quad (9.8.)$$

Definicije pojedinih oznaka:

$A' = B' L'$ - korisna površina temelja, tj. dio ukupne površine osnovice temelja koji je rezultatnom silom centrički opterećen

R - dopušteni otpor tla

γ - težina tla ispod razine temeljnog dna

γ' - računski zapreminska težina tla

q - najmanje efektivno opterećenje u razini temeljnog dna pokraj temelja

ϕ' - računski kut posmične čvrstoće tla

c' - računski kohezija tla

N_γ i N_c - faktori nosivosti

b_c, b_q, b_γ - faktori nagiba temeljne plohe

s_c, s_q, s_γ - faktor oblika temelja

i_c, i_q, i_γ - faktori nagiba rezultante

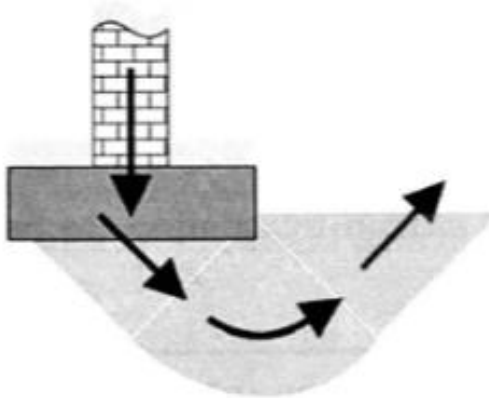
Dopuštene su sljedeće grupe parcijalnih faktora: Projektni pristup 1, kombinacija 1 - DA1,1, koeficijenti ($A1+M1+R1$); DA1,2 ($A2+M2+R1$); DA2 ($A1+M1+R2$); DA3 ($A1$ ili $A2+M2+R3$). Parcijalni faktori sigurnosti prema Eurokodu 7 dani su u *Tablici 2*.

Tablica 2. Parcijalni faktori sigurnosti prema Eurokodu 7

Parametar	Simbol	EQU	GEO/STR - Grupe parcijalnih faktora							
			A1	A2	M1	M2	R1	R2	R3	
Stalno djelovanje (G)	Nepovoljno	$\gamma_{G, dst}$	1,1	1,35	1,0					
	Povoljno	$\gamma_{G, stb}$	0,9	1,0	1,0					
Pokretno djelovanje (Q)	Nepovoljno	$\gamma_{Q, dst}$	1,5	1,5	1,3					
	Povoljno	-	-	-	-					
Akcidentno djelovanje (A)	Nepovoljno	$\gamma_{A, dst}$	1,0	1,0	1,0					
	Povoljno	-	-	-	-					
Koeficijent posmičnog otpora ($\tan\phi'$)	γ_ϕ	1,25			1,0	1,25				
Efektivna kohezija (c')	$\gamma_{c'}$	1,25			1,0	1,25				
Nedrenirana posmična čvrstoća (c_u)	γ_{c_u}	1,4			1,0	1,4				
Jednoosna tlačna čvrstoća (q_u)	γ_{q_u}	1,4			1,0	1,4				
Zapreminska težina (γ)	γ_γ	1,0			1,0	1,0				
Otpor nosivosti (R_v)	γ_{Rv}						1,0	1,4	1,0	
Posmični otpor (R_n)	γ_{Rn}						1,0	1,1	1,0	
Otpor tla (R_t)	γ_{Rt}						1,0	1,4	1,0	

9.4. OTPORNOST NA KLIZANJE

Otpornost na klizanje je granično stanje GEO. Za plitke temelje opterećene tangencijalnom komponentom sile u temeljnoj plohi, odnosno silom koja leži u ravnini temeljne plohe, treba provesti proračun za otpornost na klizanje temelja po tlu na koje prenosi opterećenje. Do klizanja dolazi kada sila koja izaziva klizanje dosegne granično stanje otpornosti na klizanje na kontaktnoj plohi (Slika 47.). Mjerodavni parametri za proračun otpornosti na klizanje proizlaze iz Mohr-Coulombovog zakona $\tau_f = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \rho$ (9.9.) čvrstoće, to su parametri čvrstoće c i φ te normalno kontaktno naprezanje σ na temeljnoj plohi [30].



Slika 47. Klizanje temelja [30]

Otpornost na klizanje računa se po efektivnoj površini temelja A' te za proračun posmične čvrstoće pretpostavlja se da je raspodjela normalnog naprezanja na sučelja tla i temelja jednaka prosječnom normalnom naprezanju $\sigma = N/A'$, gdje je N normalna komponenta opterećenja na razini temeljne plohe. Prema Eurokodu otpornost na klizanje plitkog temelja treba zadovoljiti sljedeći izraz:

$$H_d \leq R_d + R_{pd} \quad (9.10.)$$

Pri čemu je:

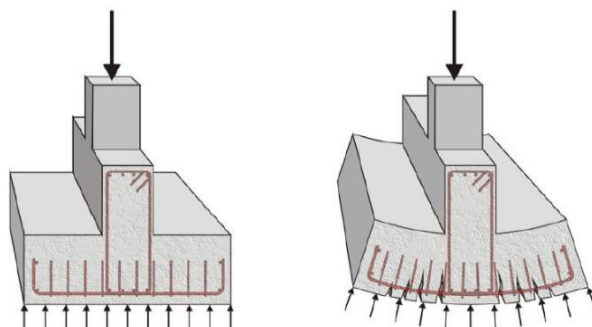
H_d – proračunska vrijednost svih komponenti opterećenja koji djeluju u ravnini temeljne plohe

R_d - proračunska otpornost na klizanje

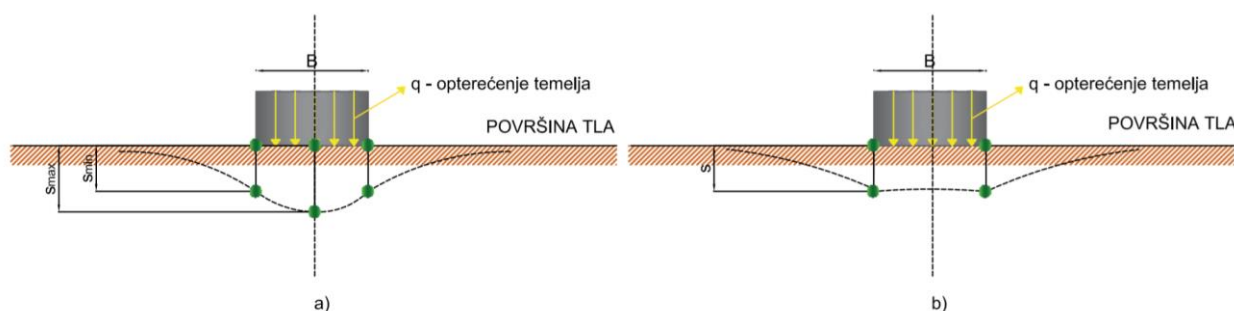
R_{pd} – proračunska otpornost tla na stranama temelja

9.5. SLIJEGANJE PLITKIH TEMELJA

Kod prethodno spomenute analize nosivosti, dovodimo tlo u ekstremno stanje plastifikacije (stanje sloma) dok kod analize slijeganja smo u području malih naprezanja, pa se koristi teorija elastičnosti. Modeli koji se koriste za analizu jesu linearno-elastični. U pogledu analize slijeganja postoje brojni nedostaci, koji se mogu djelomično smanjiti uvođenjem povećanja opsega laboratorijskih i terenskih pokusa, te se uvode određene pretpostavke. Proračun slijeganja za centrično opterećene temelje računa se s pretpostavkom da je opterećenje savitljive temeljne stope ravnomjerno raspoređeno. U tom slučaju raspodjela dodatnih naprezanja u tlu je neravnomjerna pa se proračun slijeganja ne izvodi za cijelu opterećenu površinu, već za njezine pojedine točke: kutne, središnje točke stranica i središnju točku temelja. Karakteristične točke temelja su točke u kojoj je jednaka linija apsolutno krutog i apsolutno fleksibilnog temelja (relevantna točka) (Slika 48, 49) [26] [30] [31].

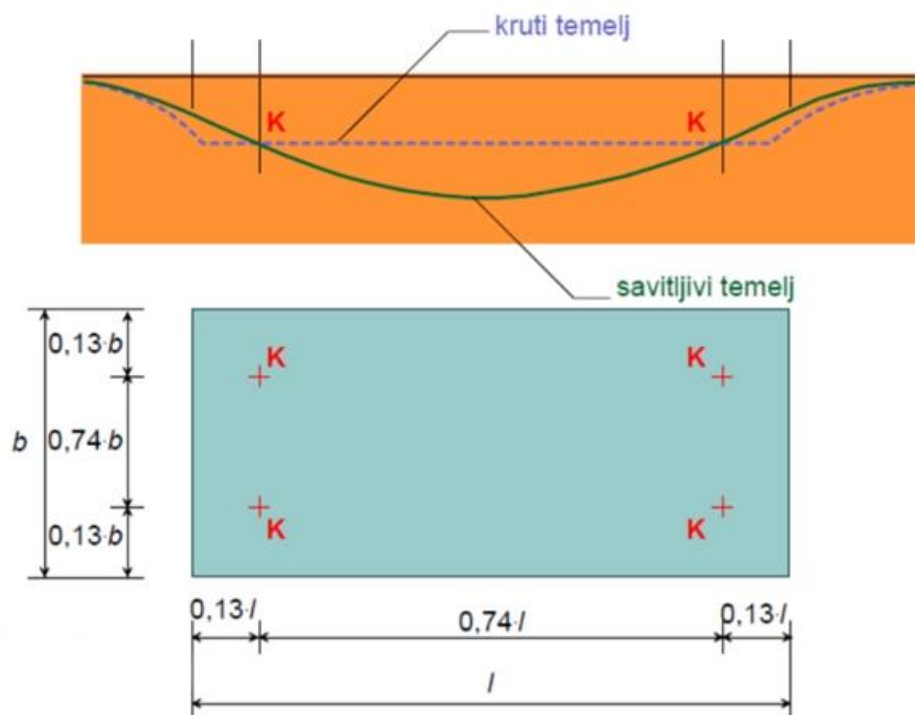


Slika 48. Kruti i fleksibilni temelj samac [30]



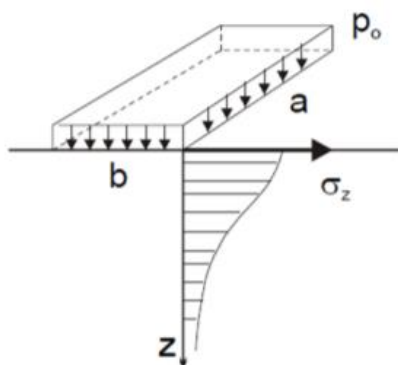
Slika 49. Utjecaj krutosti temelja na kontaktu s temeljnom plohom, a) kruti temelj, b) fleksibilni temelj

Karakteristične točke govore da kakvu god krutost temelja imali, znamo da će se u karakterističnoj točki tlo slegnuti za određenu vrijednost određenu uz pomoć grafa. Kanny je dao kriterij za karakteristične točke unutar temelja eliminirajući krutost temelja. To su točke na 13% širine temelja od ruba gledajući odozgo, 4 karakteristične točke (Slika 50).



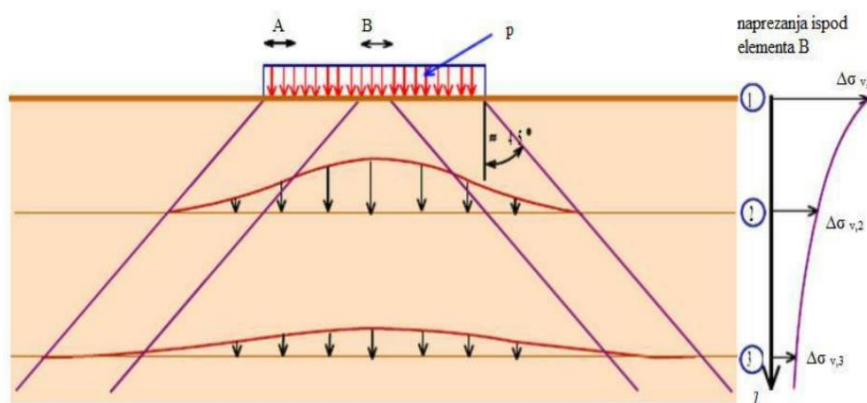
Slika 50. Karakteristične točke prema Kanny-u [31]

Steinbrenner je dao kriterij za određivanje slijeganja u rubnim točkama za određeni odnos y/b (dubine dna temelja i širine) (Slika 51.). Te širine i duljine mogu se odrediti pomoću koeficijenta dodanog naprezanja $I\sigma$. Steinbrenner je izradio dijagram za određivanje naprezanja po dubini za bilo koji omjer (L/B) temelja, koji je dobio integracijom Boussinesqovog izraza za raspodjelu naprezanja u dubini poluprostora opterećenog na površini koncentriranom silom.



Slika 51. Raspodjela dodatnog naprezanja po Steinbrenneru u rubnoj točki temelja [31]

Razlika između Kanny-a i Steinbrennera jest u tome što po Steinbrenneru koeficijent dodatnog naprezanja može biti najviše $\frac{1}{4}$ nametnutog naprezanja, a kod Kanny-a može ići do 1. Po tome se može zaključiti da udaljavanjem od ruba temelja, dodatna naprezanja u tlu u centru rastu, a smanjuju se prema vrhovima temelja. Širenje dodatnih vertikalnih naprezanja u tlu kreću se po principu 2:1, prikazan na Slici 52.



Slika 52. Širenje dodatnih naprezanja u tlu [30]

Prema Eurokodu 7 slijeganje plitkog temelja pod vertikalnom osnom silom manjom od nosivosti tla određuje se iz teorije elastičnosti prema sljedećem izrazu [29]:

$$p = \frac{pBl}{E_m} = \frac{p}{k} \quad (9.11.)$$

Pri čemu je u izrazu:

p - prosječni kontaktni pritisak između temelja i tla

B - širina temelja

I - koeficijent slijeganja koji ovisi o obliku temelja, njegovoj dubini ukopavanja te debljini sloja tla

E_m - odgovarajući (ekvivalentni) modul elastičnosti koji će prema izrazu (9.11.) dati približnu veličinu slijeganja za tlo koje nije linearno elastično

k - krutosti temeljnoga tla, ponekad se naziva Winklerovim koeficijentom podloge

Davis i Poulos navode da uz laboratorijsko određivanje ekvivalentnog modula elastičnosti za raspon naprezanja u tlu, teorija elastičnosti može se primijeniti za izračun slijeganja. U slučaju potpuno krutog kružnog temelja, krutost temeljnoga tla k za slijeganje u središtu kružnog površinskog opterećenja, dana je sljedećim izrazom [29]:

$$k = \frac{4}{\pi} \frac{E}{(1-\nu^2)d} \quad (9.12.)$$

Pri čemu navedene oznake označavaju sljedeće:

E – modul elastičnosti

d - promjer kružnog temelja

ν – Poissonov koeficijent

Potrebno je uzeti u obzir da se slijeganje može podijeliti na trenutno slijeganje, slijeganje uslijed konsolidacije te slijeganje uslijed puzanja. Može se reći da je slijeganje integral vertikalnih deformacija po dubini (9.13.).

$$s = \int_0^z \varepsilon_z \quad (9.13.)$$

Slijeganja se računaju preko izraza:

$$s = \frac{pB}{E_s} \cdot I_p \quad (9.14.)$$

za koje se iz dijagrama (prema Kanny-u ili Steinbrenneru) odrede vrijednosti za utjecajni faktor I_p i modul E_s preko N (SPT). Modul E_s može se procijeniti grubo preko q_c otpora pri statičkoj penetraciji ($E_s = 2,5 q_c$ za kvadratni temelj, $E_s = 3,5 q_c$ za temeljnu traku) ili preko dijagrama u ovisnosti o N (SPT), a nakon njega određuje se iz dijagrama utjecajni faktor I_p [30].

9.6. OTPORNOST NA PREVRTANJE

Za prevrtanje se koristi granično stanje nosivosti, EQU. Parcijalni koeficijenti za proračun prikazani su na sljedećoj *Tablici 3*.

Tablica 3. Parcijalni koeficijenti za prevrtanje - EQU

DJELOVANJE		PARCIJALNI KOEFICIJENT
STALNO	POVOLJNO	0.9
	NEPOVOLJNO	1.1
PROMJENJIVO	POVOLJNO	0
	NEPOVOLJNO	1.5

Kod proračuna potpornih konstrukcija, potporni zidovi se dimenzioniraju na aktivni pritisak jer se smatra da mogu podnijeti deformaciju tla koja će izazvati takvo stanje u tlu. Ako to nije moguće dimenzioniraju se na pritisak mirovanja. Temelj proračuna jest određivanje faktora sigurnosti za svako stanje stabilnosti.

Kod proračuna temelja na prevrtanje kod vjetroelektrana proračun prevrtanja provodi se tako da se uspoređuju stabilizirajući momenti s destabilizirajućim momentima te se pri tome faktoriziraju s odgovarajućim parcijalnim faktorima iz skupine za granično stanje EQU – 0.9 za trajna i povoljna djelovanja, 1.1 za trajna nepovoljna, 1.5 za prolazna nepovoljna te 0 za prolazna povoljna. Moment prevrtanja uslijed vjetra raste s kvadratom visine stupa (H^2) [42].

Primjer prevrtanja temelja vjetroagregata dana je na Slici 53.



Slika 53. Prevrtanje vjetroagregata [23]

Granično stanje prevrtanja mjerodavno je kod potpornih konstrukcija te se zamišlja kao mogućnost prevrtanja krute konstrukcije pod opterećenjem aktivnog tlaka i drugih opterećenja na temelj oko točke na vanjskom rubu temeljne plohe. Također bit će i mjerodavno kod proračuna vjetroagregata, ali bez uzimanja aktivnih i pasivnih pritisaka s obzirom na to da su temelji često djelomično ukopani. Prevrtanju se suprotstavlja vlastita težina zida potporne konstrukcije, te u manjoj mjeri pasivni otpor ispred zida koji se često zanemaruje zbog mogućnosti otkopavanja toga dijela. Pretpostavlja se da je podloga ispod temelja kruta pa nosivost tla ispod temelja u tom graničnom stanju ne sudjeluje. Potporna konstrukcija, kao i vjetroagregat, mora biti tako dimenzioniran da je opasnost od prevrtanja zanemariva. Provjerava se usporedbom destabilizirajućih učinaka opterećenja (momenata sile aktivnog tlaka oko odabrane kritične točke) u odnosu na stabilizirajuće učinke sila (momenata vlastite težine zida i eventualno momenata sile pasivnog otpora, odnosno njegove reducirane vrijednosti na razinu one koja je kompatibilna s prihvatljivim pomacima zida) [18] [41] [42].

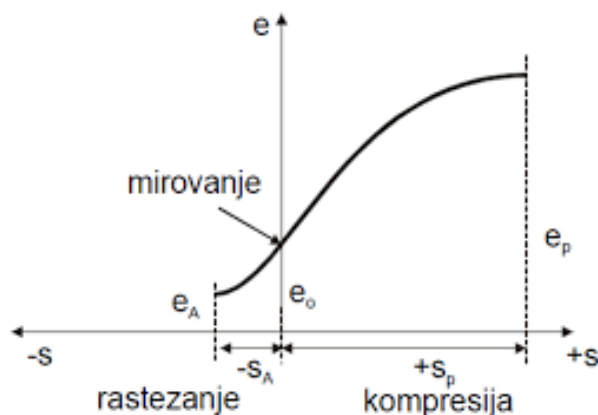
U samom tlu, generalno gledajući samo tlo, javljaju se naprezanja u vertikalnom i horizontalnom smjeru kao posljedice jedinične težine tla. Kada se u tlu nalazi voda, onda se uvažava njezino djelovanje na normalna naprezanja te se svi proračuni provode s efektivnim naprezanjima. Za određivanje pritiska tla na konstrukciju postoje dvije teorije. Rankineova teorija, koja se odnosi na naponska stanja plastične ravnoteže za rastezanje i zbijanje elastičnog poluprostora paralelno njegovoj površini; i Coulombova teorija koja se odnosi na slučaj zida koji nije vertikalna, kada postoji trenje između zida i tla te kada je ploha sloma tla iza zida ravna. Obje teorije zasnivaju se na određivanju koeficijenata bočnog djelovanja koji su posljedica djelovanja tla, a njihovo djelovanje mora se uzeti u obzir prilikom izračuna proračuna na prevrtanje. Odmicanje temelja od tla izaziva pad horizontalnih tlakova od tla, a pritisak zida na tlo izaziva njihov porast. Time se definiraju sljedeći pojmovi:

1. Aktivni slom- slom u tlu izazvan smanjenjem horizontalnog naprezanja, a pripadajuće horizontalno naprezanje naziva se aktivni tlak
2. Pasivni slom- slom u tlu izazvan porastom horizontalnog naprezanja, a pripadajuće horizontalno naprezanje naziva se pasivni otpor

Odnos horizontalnog i vertikalnog naprezanja u stanju aktivnog sloma i pasivnog otpora određuje koeficijent horizontalnog tlaka za ta stanja, te se time definiraju tri različita

koeficijenta horizontalnog tlaka : koeficijent tlaka mirovanja, koeficijent aktivnog tlaka i koeficijent pasivnog otpora.

Njihov međusobni odnos može se prikazati pomoću krivulje (Slika 54).

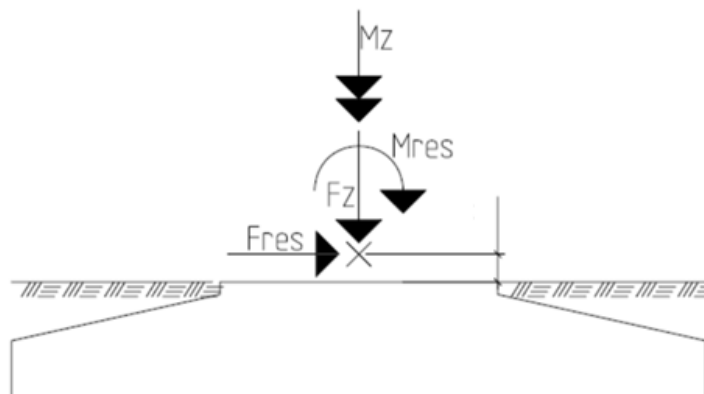


Slika 54. Promjena koeficijenta bočnog naprezanja s pomakom zida [25]

Iz priloženog dijagrama možemo zaključiti da je za postizanje pune vrijednosti aktivnog pritiska potreban puno manji pomak nego za pasivni otpor. Aktivni tlak je najmanji horizontalni tlak koji izaziva slom u tlu, a pasivni otpor je najveći horizontalni tlak koji izaziva slom u tlu, za nepromjenjivo vertikalno naprezanje. Ako je omogućeno da se zid zarotira odnosno pomakne, relaksira se područje tla iza njega koje se naziva aktivni klin. Raspodjela aktivnog naprezanja po visini zida je proporcionalna porastu vertikalnih naprezanja. Iz raspodjele se može odrediti ukupna sila aktivnog pritiska i njezin položaj. Za stabilnost zida važan je ne samo intenzitet (veličina) sile, već i njezin položaj jer s povećanjem visine raste i moment kojim aktivni pritisak djeluje na zid. Ako tlo ima koheziju, utjecaj kohezije na pritisak je povoljan jer ono smanjuje aktivno naprezanje [18] [41].

Za proračun na prevrtanje temeljna je pretpostavka da se zid može pomaknuti tako da se iza njega aktivira aktivni pritisak. Svi utjecaji od raznih opterećenja iza zida svode se na aktivno stanje.

Temelj proračuna za vjetroagregat jest proračun faktora sigurnosti, koji predstavlja omjer momenta sila otpora prevrtanju s obzirom na relevantnu promatranu točku i momenta aktivnih sila s obzirom na tu istu točku. Pri tome momenti i sile koje doprinose stabilnosti su: stup, gondola, rotor, temelj, tlo. Sile i momenti koji doprinose nestabilnosti su: rezultatni moment i rezultanta horizontalnih sila (Slika 55).



Slika 55. Prikaz djelovanja na temelj vjetroagregata potrebnih za uzeti u obzir prilikom proračuna na prevrtanje [18]

Uvjet stabilnost nosive konstrukcije na prevrtanje određen je izrazom:

$$R_d \geq E_d \quad (9.15)$$

Gdje je:

R_d – proračunska otpornost koju čine sljedeće sile : F_z, G_t, G_z

F_z – suma vertikalnih sila koje djeluju na površinu temelja

G_t – težina temelja

G_z – težina zasipa

E_d – proračunsko djelovanje koje se sastoji od H_r i M_r

H_r – rezultanta horizontalnih sila

M_r – rezultatni moment

Faktor sigurnosti se tada određuje kao:

$$FS = \frac{R_d}{E_d} \quad (9.16)$$

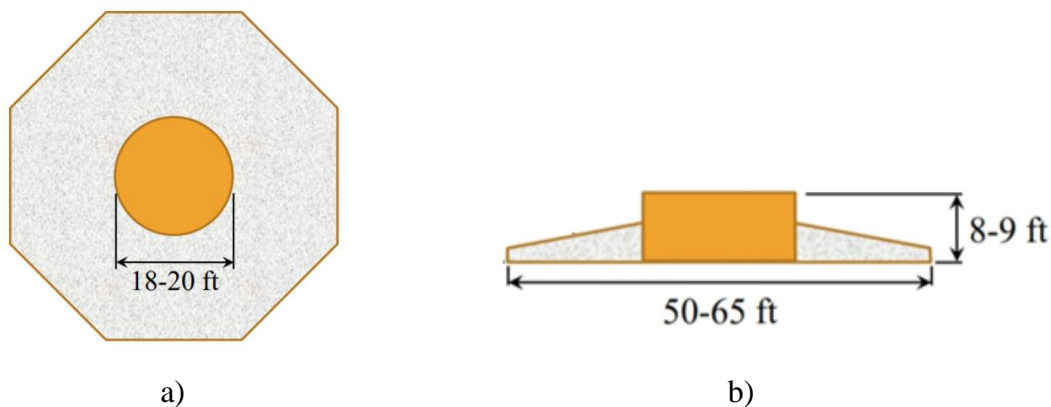
9.7. TEMELJ VJETROAGREGATA

Temelj vjetroagregata nosi cjelokupni vjetroagregat te mora osigurati njegovu stabilnost. Dijelovi od kojih se sastoji jedan vjetroagregat su sljedeći:

1. Temelj s temeljnim segmentom stupa
2. Montažni stup
3. Montažna gondola
4. Rotor vjetroturbine

Temelj vjetroturbine je dio koji preuzima opterećenja od rotora. Osnovne njegove zadaće su da osigura stabilnost stupa i održavanje specifičnih pritisaka na tlo. Radi boljeg učvršćivanja konstrukcije koriste se čelična sidra koja se umeću u bušotinu, a potom zalijevaju betonom radi postizanja čvršće veze. Zadaća stupa je preuzimanje svih opterećenja koja dolaze na lopaticama rotora i odvođenje tih opterećenja na temelj. Na vrhu stupa nalazi se rotor i kućište vjetroturbine. Najčešće su cjevaste izvedbe izgrađene od čelika, ali mogu biti i od armiranog betona, pri čemu su unutar njega postavljene električne instalacije. Prosječna visina stupa je 1,5 do 2 puta veća u odnosu na promjer lopatica. Materijal od kojeg se izrađuju lopatice je plastika ojačana staklom, za namote generatora upotrebljava se bakar, beton služi za izradu temelja, a noseći stup se izrađuje od čelika [31] [32] [33].

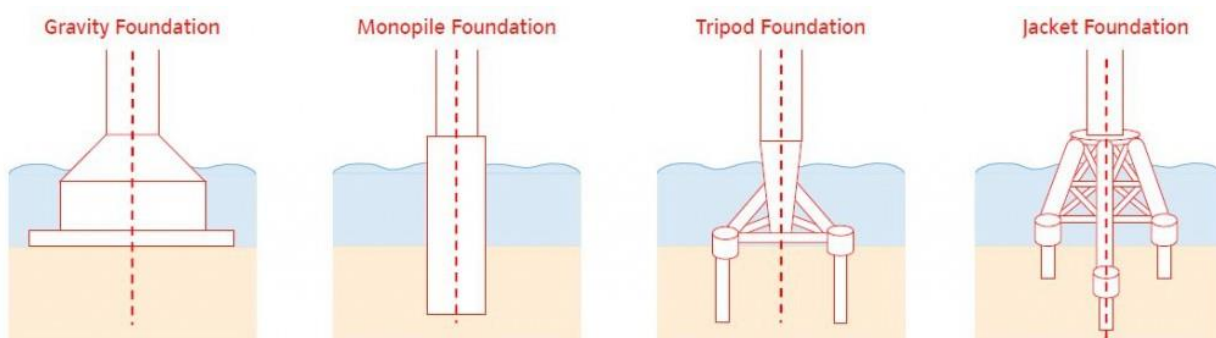
Tipične dimenzije osmerokutnog temelja za vjetroelektrane koji će se izvoditi za ovaj projekt dane su na Slici 56. Širina temelja kreće se između 15-65 ft (15 do 20 m). Otvor za stup kružnog je promjera u rasponu od 18-20 ft (5.4 do 6 m), a ukupna visina se kreće u rasponu 8-9 ft (2.4 do 2,7 m).



Slika 56. a) Oblik baze temelja b) Poprečni presjek temelja [21]

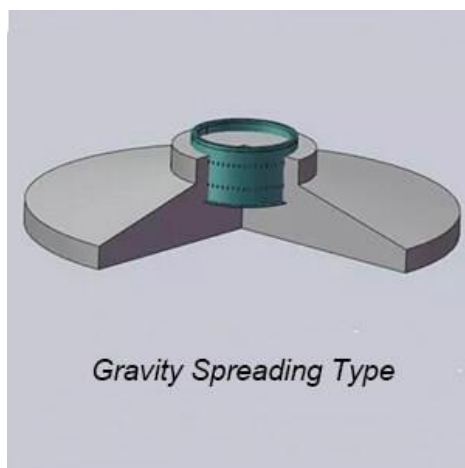
Temelji se također mogu podijeliti prema načinu izvođenja, pa tako razlikujemo nekoliko vrsta (Slika 57):

1. Gravitacijski temelji
2. Cjevasti pilot
3. "Tripod" pilot
4. "Jacket" pilot



Slika 57. Vrste temelja vjetroagregata [18]

U ovome radu bit će dati proračun za gravitacijski osmerokutni temelj uz usporedbu s kružnim gravitacijskim temeljem pri čemu je uzdužni okomiti presjek za kružni gravitacijski temelj dan na Slici 58.

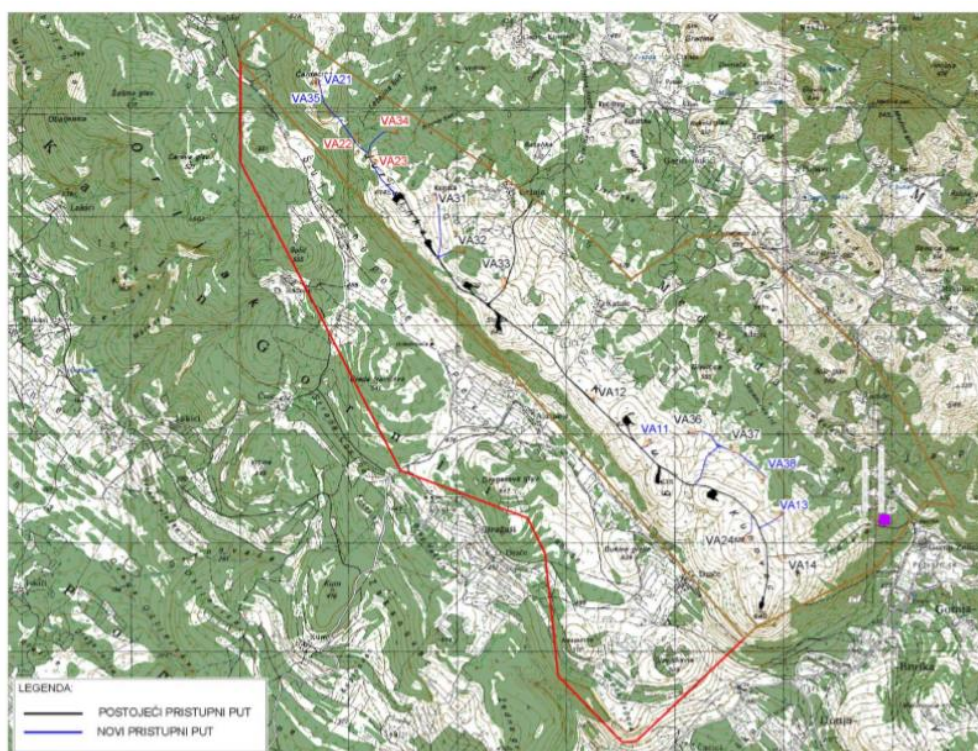


Slika 58. Presjek gravitacijskog temelja [34]

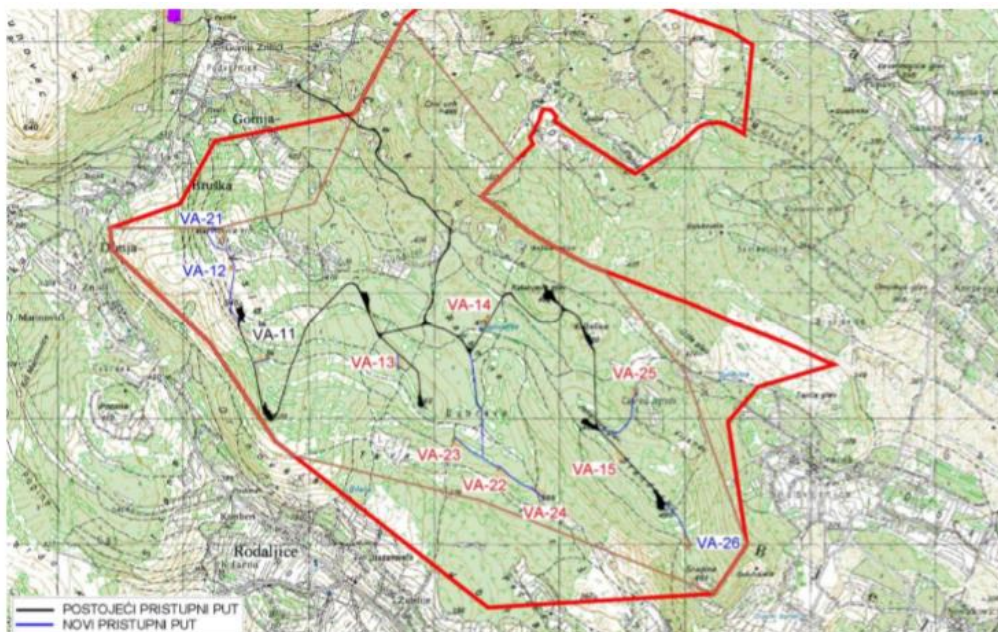
10. VJETROELEKTRANE ZADAR 2 I ZADAR 3

10.1. OPIS PODRUČJA

Na području krškog dijela Ravnih Kotara i Bukovice planirana je izgradnja dvije nove vjetroelektrane Zadar 2 i Zadar 3. U sklopu vjetroelektrane Zadar 2 nalazit će se 16 novih vjetroagregata koji će biti smješteni sjeverozapadno od već postojećih 8 vjetroagregata (Slika 59.). U sklopu vjetroelektrane Zadar 3 gradit će se 11 novih vjetroagregata koji će se nalaziti oko 8 već izgrađenih vjetroagregata vjetroelektrane Zadar 3 (Slika 60.) [35] [36].



Slika 59. Smještaj novih vjetroagregata na lokaciji Zadar 2 [35]

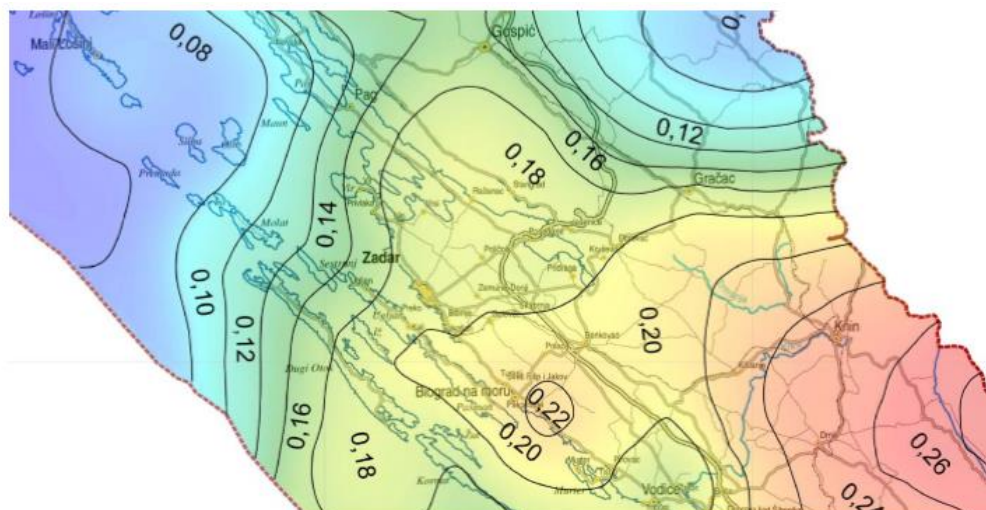


Slika 60. Smještaj novih vjetroagregata vjetroelektrane Zadar 3 [36]

Reljefna obilježja područja karakteriziraju brdoviti predjeli i krška polja te snažni utjecaji vjetra. Činjenica zbog koje je ovaj prostor posebno pogodan za smještaj vjetroelektrana je ta da zbog strmog krškog terena to područje nema uvjete za stalno naseljavanje te izgradnja vjetroelektrane ne utječe na život ljudi.

S geološke strane gledano, prostor je izgrađen od karbonata i klastita srednjeg i gornjeg eocena i oligocena ili tzv. Promina naslaga koje su taložene kontinuirano blago nagnute prema Sjeveroistoku. Odstupanje od osnovne građe ima obilježja prilagođavanja strukturalnoj građi kredne i paleogenske podloge. Promina naslage izgrađene su od litokalkarenita i konglomerata. Litokalkareniti se javljaju u svim dijelovima promatranog područja no konglomerati su dominantni u odnosu 85% prema 15%. Konglomerati su dobro uslojeni, a debljina slojeva je 0,2 – 5 m. Imaju vrlo visok postotak kalcijevog karbonata. Bukovački bazen klastičnih karbonatnih stijena ima Dinarski pravac pružanja. One spadaju u propusne karbonatne naslage koje sadrže tipične krške oblike (kaverne, špilje, ponore, jame) te su česti prodori vode. Površinskih tokova vode nema, a stalna razina podzemne vode očekuje se na dubinama od više stotina metara.

Što se tiče seizmičnosti, područje Bukovice spada u peti stupanj (Mercali – Cancani – Sieberg), maksimalnih magnituda 3 do 4° po Richteru akceleracije na površini terena $a = 0,2 \text{ gm/s}^2$ (Slika 61).



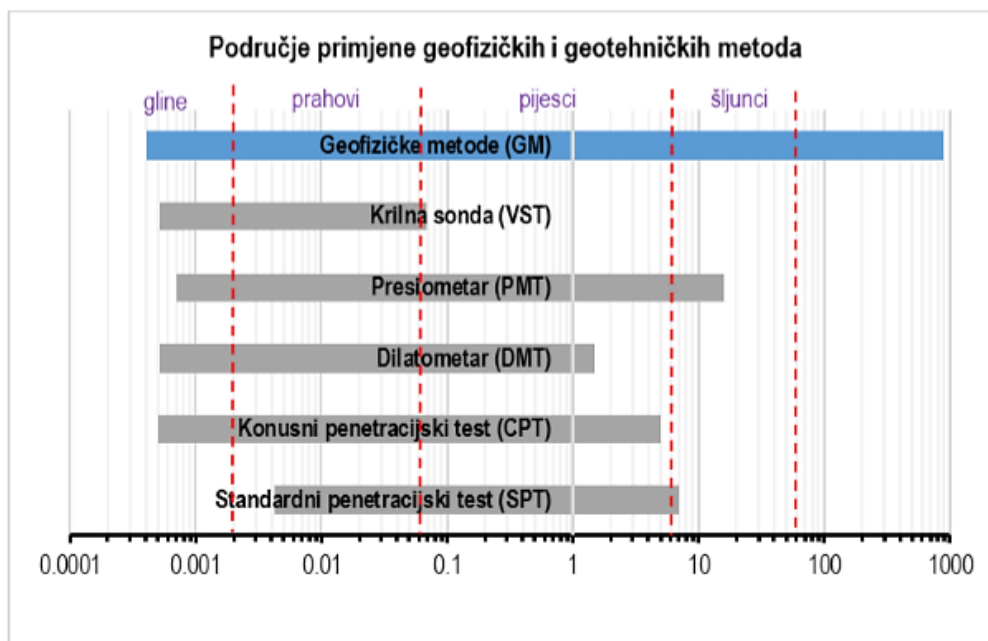
Slika 61. Seizmička karta područja [35] [36]

10.2. TERENSKI ISTRAŽNI RADOVI

Za potrebe geotehničkog projektiranja za svaku lokaciju novoplaniranih vjetroagregata izrađena je jedna geotehnička sonda metodom površinskog sondiranja. Istražne sonde rađene su ručno do dubine srasle stijene. Za vjetroelektranu Zadar 2 izrađeno je ukupno 16 geotehničkih sondi dubine od 0.0 do 6.0 m, a za lokaciju Zadar 3 11 geotehničkih sondi na dubini 0.0 do 0.5 m. Izvršena je i inženjerskogeološka prospekcija terena oko svakog budućeg vjetroagregata – prikupljanje podataka na terenu za utvrđivanje geološke građe i inženjersko – geoloških karakteristika terena. [35] [36]

10.2.1. GEOFIZIČKA ISPITIVANJA TERENA

Geofizičke metode se sve više koriste kao nadopunjujuće metode standardnim istražnim radovima te imaju široko područje primjene u odnosu na neke druge istražne radove (krilna sonda, presiometar, dilatometar...) (Slika 62). Najbolji su izbor u fazi preliminarnih istraživanja te pomažu u donošenju odluka o daljnjem programu istražnih radova. Koriste se za istraživanje plitkih geoloških formacija, a pomoću njih je moguće odrediti parametre različitih geoloških formacija. Mjerenja se uglavnom izvode s površine terena ili iz bušotina. U sklopu istražnih radova za izvedbu vjetroelektrane Zadar 2 i Zadar 3 izvedeni su istražni radovi seizmičke refrakcije i GPR metode.



Slika 62. Područje primjene geofizičkih i geotehničkih metoda [37]

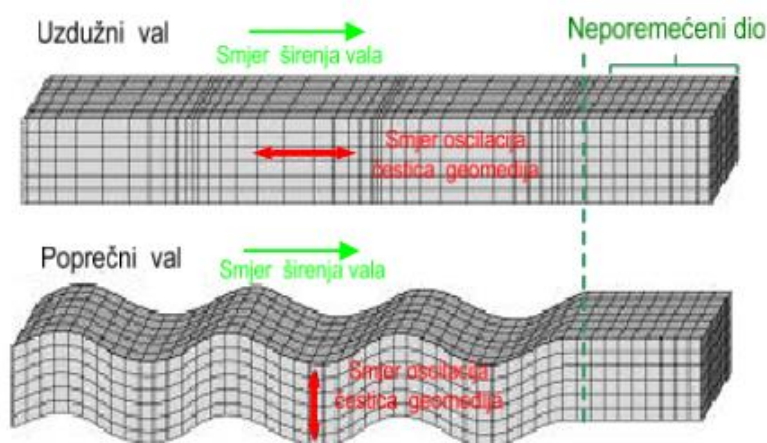
10.2.2. SEIZMIČKE METODE ISTRAŽIVANJA

Seizmičke metode istraživanja temelje se na mjerenju brzine širenja potresnih valova kroz medij (tlo ili stijenu). Valovi se generiraju na površini terena udarcem čekićem o metalnu ploču, zračnom puškom ili eksplozivom u bušotinama. Pretpostavlja se kako je medij homogen i izotropan, a seizmički valovi elastični s obzirom na to da su deformacije koje izazivaju vrlo male. Seizmički valovi registriraju se pomoću senzora koji su smješteni na površini ili u bušotini. Cilj seizmičkih metoda je određivanje brzine širenja seizmičkih valova pomoću kojih se zatim mogu odrediti granice geoloških formacija i geotehnički model tla ili stijene potreban za projektiranje. Brzina širenja seizmičkih valova generalno raste s dubinom, a nailaskom na materijal veće brzine valovi se lome. Određuju se iz podataka o vremenu putovanja valova od izvora do senzora (geofona) i udaljenosti geofona i izvora – geometrija mjerenja [37].

Za pravilno oblikovanje geotehničkog modela potrebno je dobro poznavati interakciju seizmičkog vala i geološkog medija. Seizmički valovi su po svojoj prirodi tranzijentni no u praksi se radi jednostavnosti obrade podataka pretpostavlja da su harmonijski. Seizmički valovi se dijele na P i S valove. P valovi su uzdužni ili kompresijski i longitudinalni su kao valovi zvuka. Imaju najveće brzine i najznačajniji su za seizmička istraživanja. S valovi su poprečni

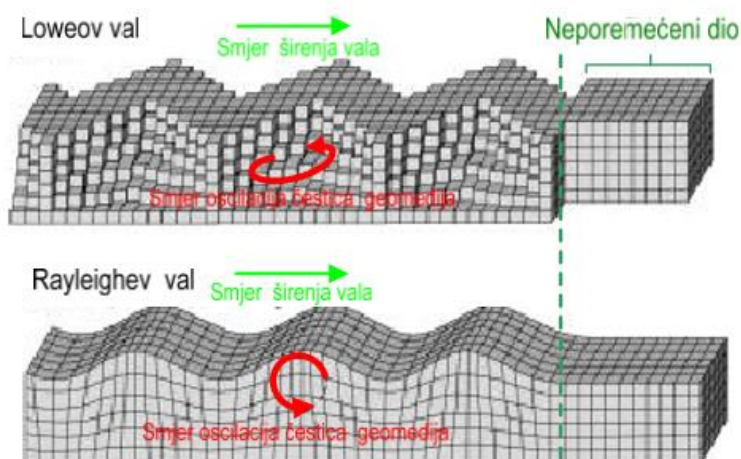
ili posmični valovi, transverzalni su i polarizirani su kao elektromagnetski valovi (Slika 63) [37].

Kada P val prolazi granicom geoloških formacija reflektira se i lomi kao P val i vertikalno polarizirani posmični val SV. Horizontalno polarizirani posmični val SH na granici medija se reflektira i lomi samo kao horizontalno polarizirani te je značajan za određivanje svojstva elastičnosti medija kroz koji se širi. P valovi nastoje promijeniti volumen tijela i šire se kroz sva tijela svih agregatnih stanja. S valovi, s obzirom na to da su posmični, nastoje prominenti oblik tijela i svojstveni su samo za kruta tijela jer tijela u ostalim agregatnim stanjima nemaju posmičnu čvrstoću. Dok su P valovi zbog velikih brzina značajni za seizmička istraživanja, S valovi su važni za istraživanja u geoinženjerstvu [37].



Slika 63. P i S seizmički valovi [37]

Osim valova unutar zemlje, prilikom seizmičke aktivnosti javljaju se i površinski valovi (Slika 64.). Oni su znatno sporiji od P i S valova te su posljednji koji su zabilježeni pomoću mjerne opreme. Mogu se eliptički i retrogradno prostirati okomito na smjer širenja u horizontalnoj ravnini (L-Loweovi valovi) ili u smjeru širenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini istodobno (R-Rayleighovi valovi).



Slika 64. Površinski posmični valovi [37]

Seizmičke metode koje se najčešće koriste su površinske i bušotinske. U površinske metode se ubrajaju :

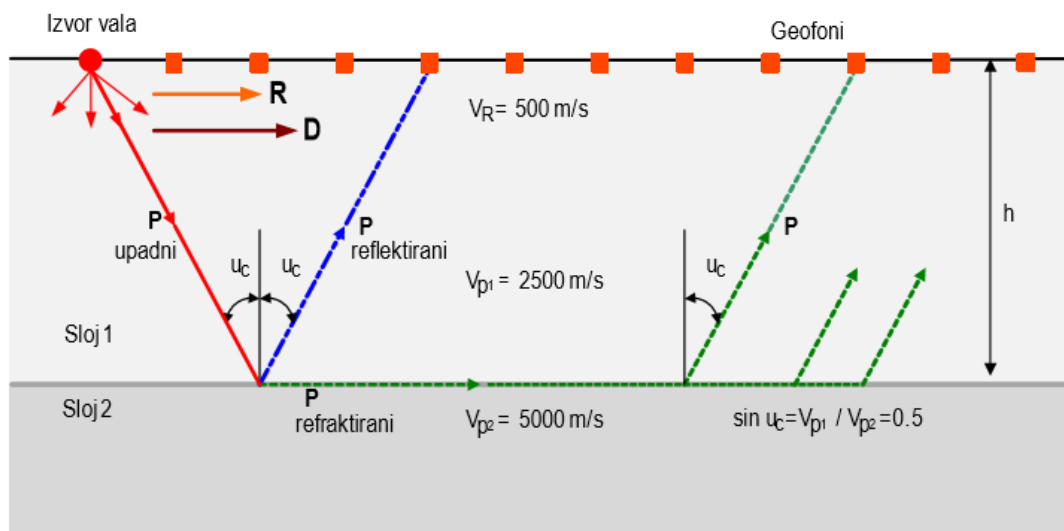
- Seizmička refrakcija
- Seizmička refleksija
- Spektralna analiza površinskih valova
- Višekanalna analiza površinskih valova

Bušotinske metode su :

- Niz bušotinu / Uz bušotinu
- Između bušotina
- PS mjerenje u suspenziji
- Seizmički penetracijski pokus
- Zvučna karotaža

S obzirom na to da se za potrebe izvedbe vjetroelektrane Zadar 2 i Zadar 3 koristila metoda seizmičke refrakcije, ona će biti detaljnije opisana u tekstu [37].

Seizmička refrakcija je metoda koja se koristi ponajprije za određivanje projektnih modula elastičnosti jer omogućava određivanje seizmičkih brzina kao funkcije dubine. Metoda je primjenjiva samo u slučaju kada brzina širenja valova raste s dubinom. Ako jedan od slojeva ima brzinu manju od sloja iznad njega, val se lomi prema okomici i nema pojave refraktiranog vala. Takav sloj se naziva slijepi sloj te može znatno utjecati na vjerodostojnost rezultata ispitivanja. Korekcija je moguća samo ako se raspolaže podacima o tom sloju iz drugih izvora (npr. istražnih bušotina) Također, ako se u seriji slojeva nalazi sloj koji je u usporedbi s njegovom dubinom tanak, postoji mogućnost da ga se s prvim nailaskom posmičnih valova uopće ne može otkriti. Iako postoje metode seizmičke refrakcije koje su primjenjive i pri jako velikim dubinama, u geoinženjerstvu se koristi relativno plitka seizmička refrakcija na nekoliko metara do više desetaka metara dubine [37].



Slika 65. Princip ispitivanja medija metodom sseizmičke retrakcije [37]

Oprema za ispitivanje metodom seizmičke refrakcije je relativno jednostavna i sastoji se od :

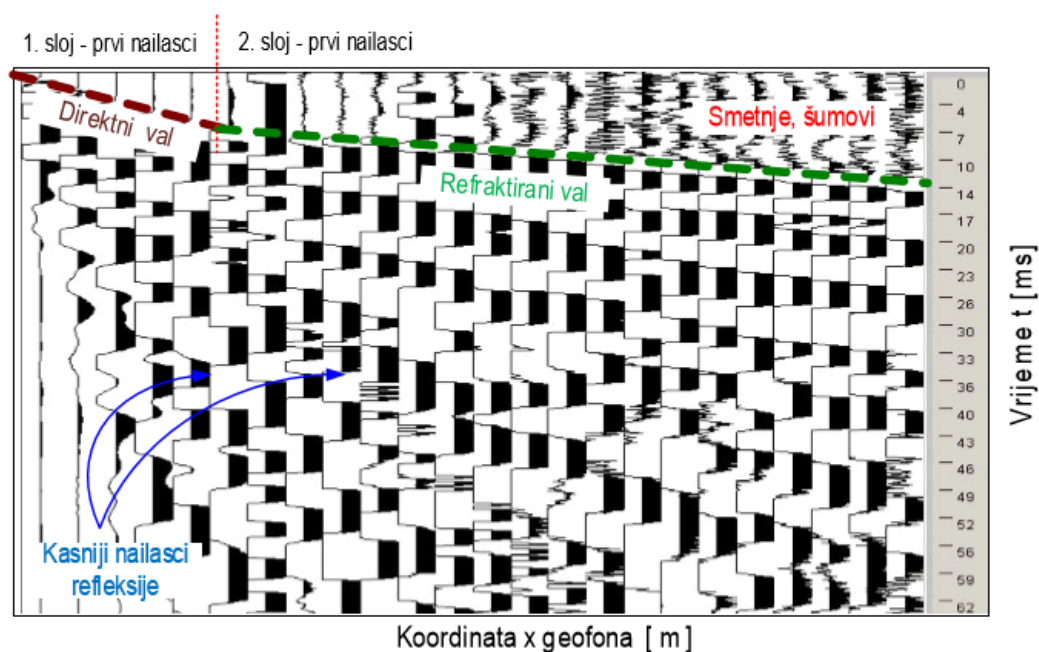
- "Pametnih geofona" SMG
- Kompleta geofona spojenih u niz
- Smart Line Interface Modules (SLIM)
- Centralne jedinice
- Kablova za spajanje SLIM-ova
- Laptop

Na površinu terena postavljaju se geofoni u liniju na jednakoj udaljenosti. Linije na koje se postavljaju geofoni predstavljaju profile ispitivanja. Seizmička energija se uglavnom generira

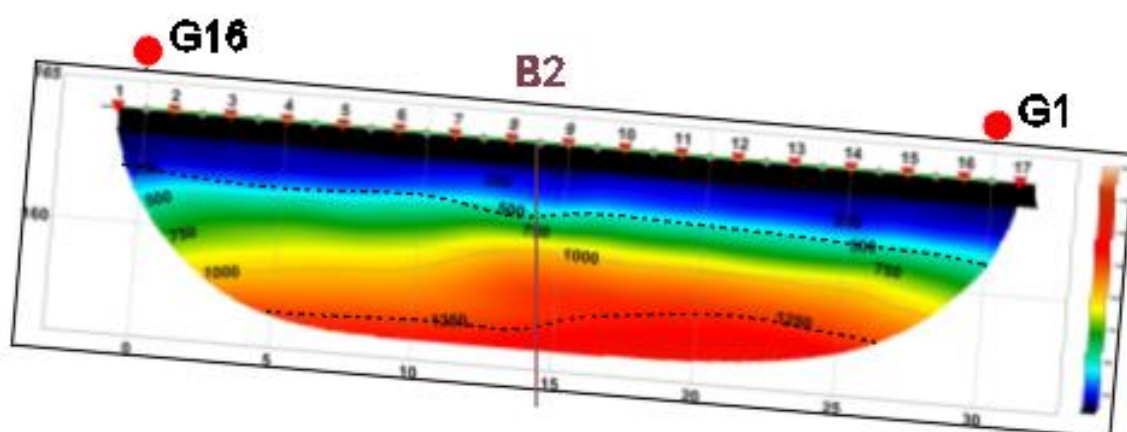
udarcem čekića po metalnoj ploči postavljenoj na tlo ili eksplozivom u plitkim bušotinama (Slika 65.). Zatim se mjere nailasci P ili S (H) vala (Slika 66.). P valovi zbog veće brzine ranije stižu do geofona te je vrlo teško u praksi točno razlučiti vrijeme nailaska S vala. Zbog toga je pažnja usmjerena samo na pojavu prvih nailazaka seizmičke energije pa se odnos udaljenosti izvor – geofon (x) i vrijeme nailaska vala (t) koristi za interpretaciju slojeva tla ili stijene

Najveće ograničenje ispitivanja terena metodom seizmičke refrakcije je nemogućnost detektiranja tankih slojeva male brzine između slojeva većih brzina. Što se tiče detekcije razine vodnog lica, treba obratiti pažnju na to da brzina P vala u blizini vodnog lica ovisi o stupnju saturacije tla, dok brzina S vala o tome ne ovisi.

Prednost metode je da je relativno jednostavna i da ne zahtijeva nikakve dodatne korekcije prilikom obrade podataka. Jedino je na terenima s velikim visinskim odstupanjima od horizontale potrebno korigirati vremena nailazaka za razliku visine pojedinog geofona od odabrane referentne ravnine. Nakon formiranja dijagrama ovisnosti dubine i brzine širenja seizmičnih valova (Slika 67) može se krenuti u interpretaciju rezultata: određivanje granice slojeva. Početni model je uvijek model s paralelnim granicama između slojeva.



Slika 66. Registracija nailaska seizmičnog vala [37]

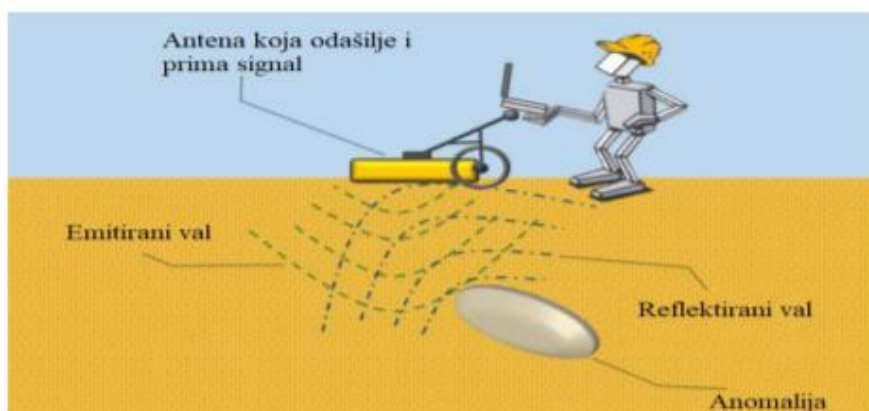


Slika 67. Primjer određivanja granice slojeva metodom seizmičke refrakcije

10.2.3. GPR METODA – Ground Penetration Radar

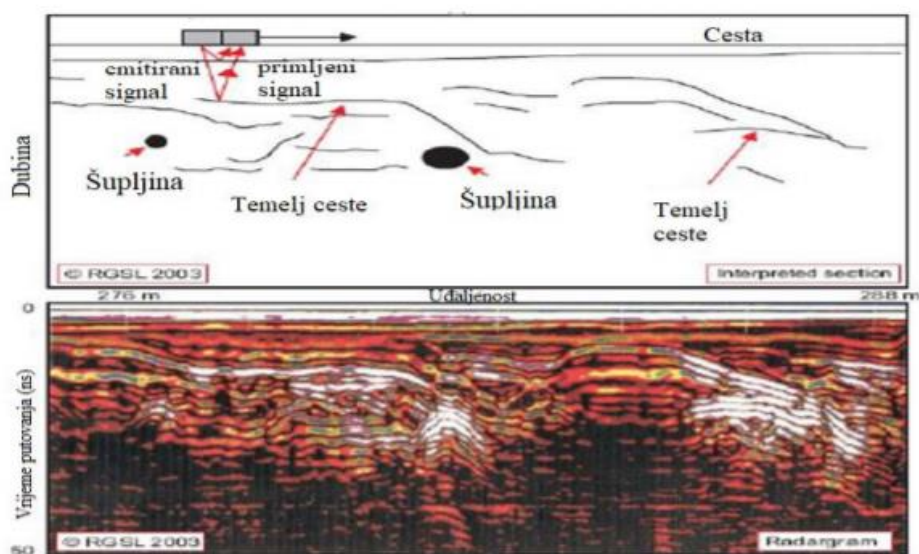
Ground penetration radar (u nastavku GPR) je geofizička metoda određivanja geoloških i geotehničkih parametara tla i stijenske mase. Metoda se primjenjivala još početkom 20. stoljeća u Austriji i Njemačkoj kada se njome utvrđivala prisutnost ukopanih metalnih objekata, debljine naslaga u površinskim kopovima, debljine snijega i leda te debljine aluvija u alpskim dolinama. Daljnji napredak događa se a za vrijeme Korejskog i Vijetnamskog rata (1950. – 1953.) kada je Amerika takvu tehnologiju koristila za pronalaženje podzemne infrastrukture i minskih sredstava. Također se takva metoda razvijala za vrijeme istraživanja Mjeseca. [38]

GPR metoda radi pomoću antene koja emitira puls elektromagnetske energije -val, u ispitivani medij. Kada emitirani val dođe do anomalije u mediju reflektira se natrag do odašiljača (antene) uz mjerenje amplitude reflektiranog vala (Slika 68.). [38] [39]



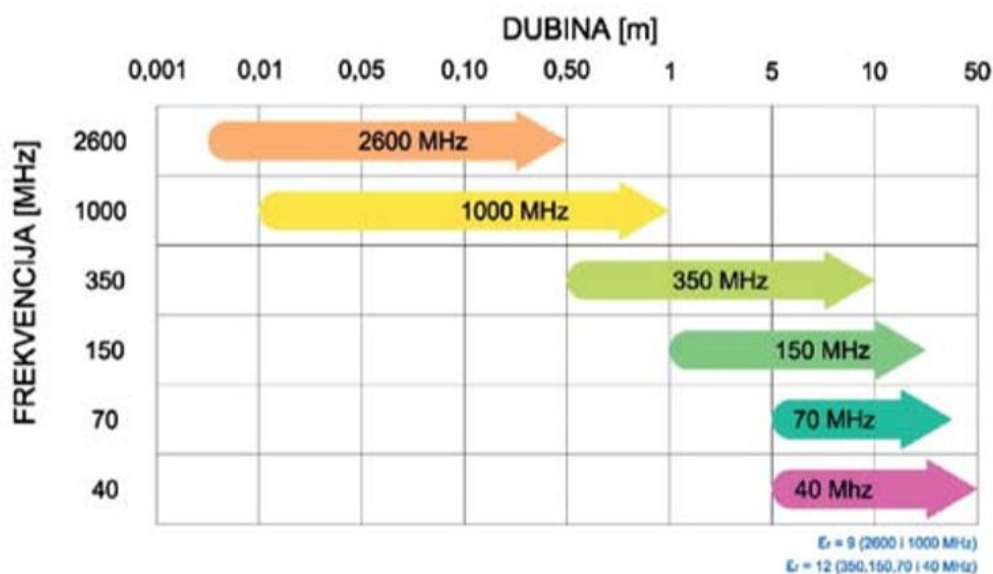
Slika 68. Princip rada georadara [38]

Analizom odaziva elektromagnetskog impulsa dolazimo do podataka koji su nam korisni za geotehničko projektiranje : uslojenost tla, položaj ploha diskontinuiteta u stijenskoj masi, kaverni, nivo podzemne vode i drugo. S obzirom da nam je brzina vala poznata, mjerenjem amplitude reflektiranog vala moguće je odrediti udaljenost anomalije od antene i time dobiti 2-D GPR profil – radargram (Slika 69.). Naknadnim numeričkim analizama moguće je dobiti i 3-D prikaz podzemlja. [38]



Slika 69. Primjer GPR profila [38]

GPR metoda ima različite mogućnosti primjene ovisno o specifičnosti područja koje se promatra. Današnji uređaji većinom rade u spektru frekvencija od 40 MHz do 3 GHz što omogućava varijaciju rezolucije i dubine penetracije. Dubina penetracije GPR uređaja je ona dubina na kojoj je odnos reflektiranog signala i šuma takav da ga je moguće detektirati radarskim prijemnikom. Koristeći visoke frekvencije moguće je dobiti izvrsnu razlučivost od svega nekoliko milimetara no medij kojim se val širi prigušuje signal, apsorbira energiju i dolazi do gubitka tijekom refleksije vala tako da su valovi visoke frekvencije primjenjivi samo za male dubine ispitivanja. Uređaji nižih frekvencija imaju lošiju rezoluciju ali je moguće ostvariti dubine i do 50 metara (Slika 70.). Dakle, dubina penetracije GPR uređaja i rezolucije obrnuto su proporcionalne zbog načina širenja generiranog vala kroz promatrani medij. [38][39]



Slika 70. Dubina penetracije GPR uređaja za rane frekvencije u vapnenačkoj stijeni [38]

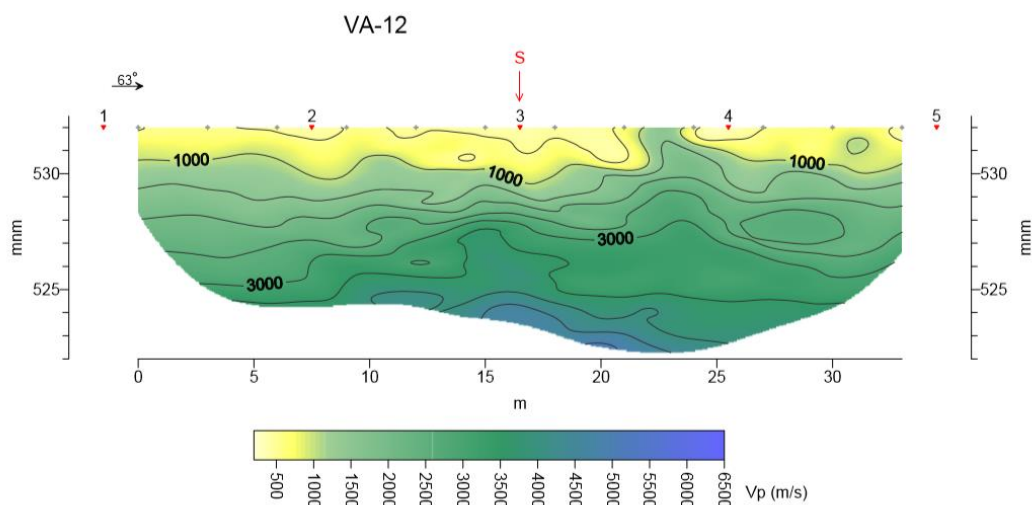
Kod GPR metode razlikuju se dvije rezolucije – vertikalna i horizontalna. Obje najviše ovise o centralnoj frekvenciji uređaja. Vertikalna rezolucija je sposobnost uređaja da razluči dvije bliske plohe po dubini i iznosi otprilike $\frac{1}{4}$ centralne frekvencije uređaja, a horizontalna rezolucija je sposobnost uređaja da razluči dva bliska objekta koji se nalaze na istoj udaljenosti od uređaja. Vertikalna rezolucija je stabilna po dubini, dok horizontalna linearno opada s dubinom. [39]

Prednost ove metode je visoka rezolucija pri malim dubinama i mogućnost prikupljanja velikog broja podataka potrebnih za geotehničko projektiranje. Najveći nedostatak leži u tome da se rezolucija smanjuje s dubinom te su moguća ispitivanja samo na relativno malim dubinama 30 – 50 m, no to je za potrebe geoinženjerstva većinom u potpunosti zadovoljavajuće.

10.2.4. REZULTATI TERENSKIH ISTRAŽNIH RADOVA

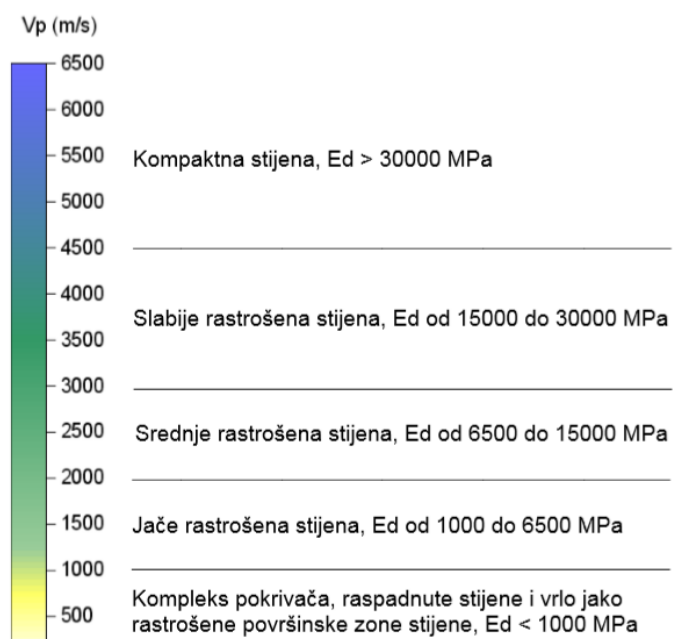
Koristeći metodu seizmičke refrakcije izrađen je 2D model brzina pomoću kojega je moguće procijeniti geotehničke parametre pojedinih slojeva te odrediti dinamički modul elastičnosti. Na lokaciji svakog vjetroagregata za vjetroelektranu Zadar 2 i Zadar 3 izveden je po jedan refrakcijski profil pomoću 12 jednoliko raspoređenih geofona. Duljina svakog refrakcijskog profila iznosi 33 m. Seizmički val generiran je na 5 mjesta duž linije profila, svaka 3 geofona. Geofoni su na razmaku 3 m. Dubina ispitivanja je 8 m. Rezultati seizmičke refrakcije pokazuju

kako se na svim lokacijama nalazi tanki površinski sloj raspadnute i vrlo trošne stijene. Osnovna stijena je heterogena čije se karakteristike poboljšavaju s dubinom.



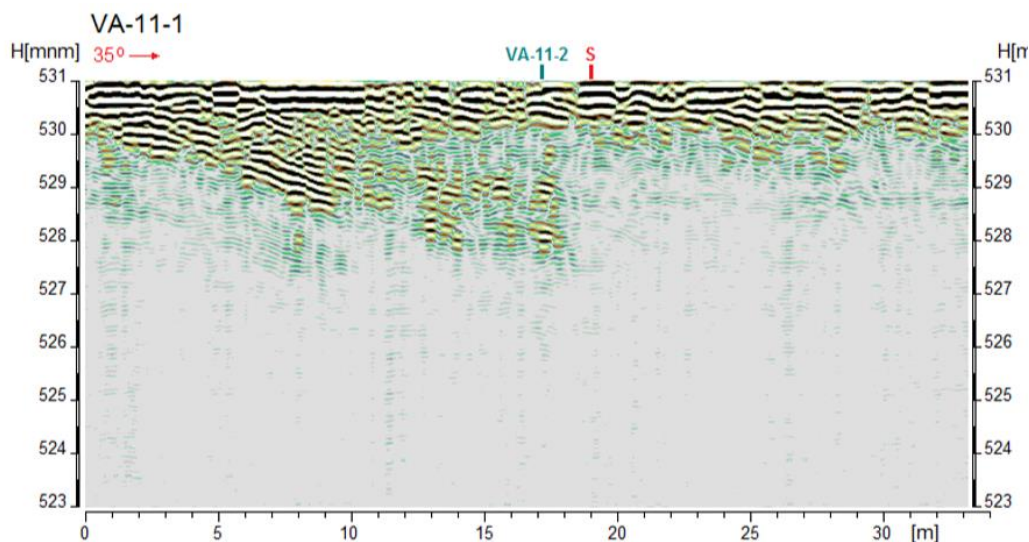
Slika 71. Primjer refrakcijskog profila za VA-12, Zadar 3 [36]

Na ovome primjeru profila brzina (Slika 71.) te prikazane legende (Slika 72) vidljivo je kako su seizmičke brzine pri površini oko 500 m/s te se s dubinom povećavaju. To znači da je stijena na površini terena trošna, a dinamički modul elastičnosti je manji od 1000 MPa. Povećanjem dubine povećava se kompaktnost stijene, a dinamički moduli elastičnosti na većini ispitivanog područja iznose od 15 000 do 30 000 MPa.

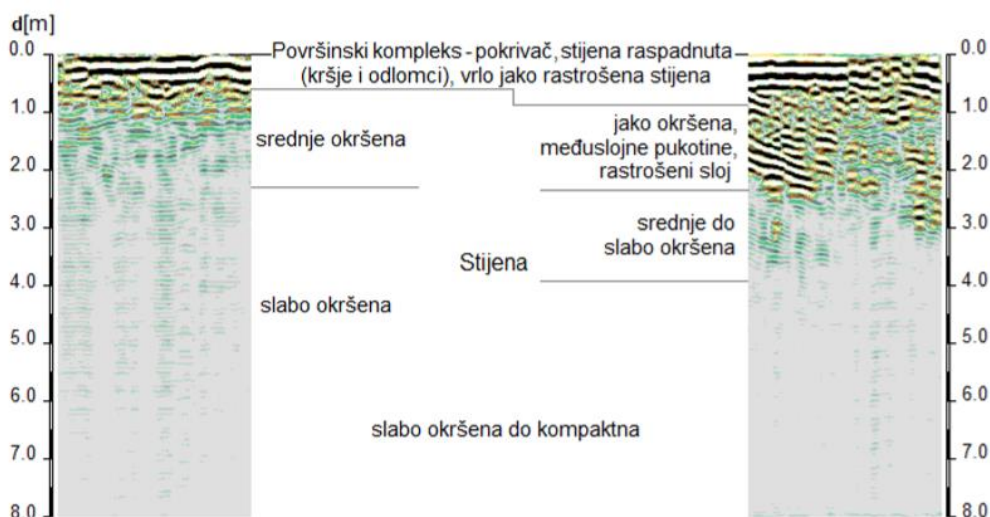


Slika 72. Legenda seizmičkog profila [36]

GPR metodom su na svakoj lokaciji vjetroagregata izvedena dva GPR profila. Jedan profil izveden je po profilu seizmičke refrakcije te njegova duljina iznosi 33 m, a drugi je duljine 18 m te je izveden poprečno na njega. Dubina ispitivanja je veća od 8 metara. Frekvencija uređaja je 500 MHz.



Slika 73. Primjer GPR profila za VA -11, Zadar 3 [36]



Slika 74. Legenda za GPR profile [36]

Pomoću primjera GPR profila i legende (Slika 73., Slika 74.) vidimo kako na ispitivanoj lokaciji postoje različite vrste površinskog kompleksa stijena. Na samoj površini stijena je raspadnuta i vrlo jako rastrošena. S dubinom joj se također karakteristike poboljšavaju te se kreću od jako do srednje okršene odmah ispod površinskog sloja od 1 do 3 m te do slabo okršene do kompaktne od 3 m do kraja istražnog profila odnosno do 8 metara.

10.2.5. KARAKTERISTIKE TEMELJNOG TLA – STIJENE I ODABIR GEOTEHNIČKIH PARAMETARA

Rezultati geofizičkih istražnih radova : seizmičke refrakcije i GPR metode su karakteristike medija na kojemu će se izvoditi nove vjetroelektrane Zadar 2 i Zadar 3 (Slika 75.). Utvrđeno je kako se područje sastoji od dva sloja. Prvi sloj je glina s kamenom drobinom koji se javlja mjestimično i zanemariva je za potrebe geotehničkog projektiranja. Nalazi se na debljini od 0,0 do 0,5 metara. Nakon njega slijedi sloj vapnenca koji je uslojen, slabo raspucan do kompaktan, bijele do sivo bijele boje. Prostire se do većih dubina te je značajan za geotehničko projektiranje. Pretpostavlja se kako je tlo povoljnih karakteristika za izgradnju temelja vjetroagregata te da će zadovoljavati potrebe nosivosti i slijeganja. S obzirom na to da se na najvećem dijelu sloj gline ne pojavljuje ili je zanemarive debljine, temelj vjetroagregata izvodit će se u cijelosti u sloju vapnenca. [35] [36]

VA-11



Slika 75. Izgled terena na mjestu vjetroagregata VA- 11, Zadar 3 [36]

Na temelju obrade podataka geotehničkih istražnih radova dobiveni su sljedeći parametri [35][36]:

1. SLOJ – GLINA

Zapreminska težina $\gamma = 19,0 \text{ kN/m}^3$

Kut unutrašnjeg trenja $\varphi = 26^\circ$

Kohezija $c = 5 \text{ kN/m}^2$

Modul stišljivosti $M_s = 8 \text{ MN/m}^2$

2. SLOJ – VAPNENAC

Zapreminska težina $\gamma = 24,0 \text{ kN/m}^3$

Kut unutrašnjeg trenja $\varphi = 31^\circ$

Kohezija $c = 85 \text{ kN/m}^2$

Modul stišljivosti $M_s = 4000 \text{ MN/m}^2$

U sljedećem poglavlju bit će prikazan proračun temelja vjetroagregata.

11. ANALIZE I PRORAČUNI TEMELJA VJETROAGREGATA

11.1. PRIMIJENJENI PROPISI I STANDARDI

Članice CEN-a (Europskog odbora za normizaciju) da će se projektiranje odvijati pomoću preporuka odnosno norma, uz posebnosti, čime svaka članica za svoje područje izdaje posebne dodatke koji su specifični za projektiranje u tom području, unose se kroz Nacionalni dodatak. Karakteristično za Eurokodove jest da svaka građevina tijekom njenog izvođenja kao i korištenja mora zadovoljiti bitne zahtjeve. Bitni zahtjevi, ima ih pet, su nosivost, uporabivost, trajnost, pouzdanost i otpornost na požar. Ono što je specifično za Eurokod jest da građevinu tretira kao ekonomsku kategoriju odnosno kao nešto što ima svoj vijek trajanja. U tom periodu građevina mora moći podnijeti predviđena opterećenja za koja je konstruirana bez bitnih oštećenja. Tako se s građevinom postupa kao s proizvodom koji ne traje vječno već određeni uporabni vijek.

Sustav Eurokodova se sastoji od 10 normi, a za projektiranje geotehničkih konstrukcija koristi se Eurokod 7, punog naziva EN 1997 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje. sastoji se iz dva dijela: EN 1997-1 Geotehničko projektiranje – Dio 1: Opća pravila, te EN 1997-2 Geotehničko projektiranje – Dio 2: Istraživanje i ispitivanje tla.

Svi eurokodovi imaju pristup proračunima koji se temelje na korištenju parcijalnih faktora sigurnosti za opterećenja i za sva svojstva gradiva od kojih se građevina izvodi. Detaljni prikazi proračuna uz korištenje Eurokoda 7 i odgovarajućih parcijalnih koeficijenata bit će dani u sljedećim poglavljima. [40] [42]

11.2.1. ODABIR KARAKTERISTIČNIH I PRORAČUNSKIH PARAMETARA MATERIJALA

Opisi lokacija na kojima će se izvoditi vjetroagregati u sklopu vjetroelektrana ZD2P i ZD3P dani su u poglavlju 3. (Prostorna obilježja lokacije). Izvedene su istražne bušotine do dubine 0.6 m, te provedena geofizička ispitivanja metodom seizmičke refrakcije površinskih valova i to po jedan profil na svakoj lokaciji. Time je dobivena raspodjela brzina širenja valova, generiranih površinskim udarcem i registrirani pomoću velikog broja postavljenih geofona te dobivene granice slojeva u stijenskoj masi i njezine krutosne karakteristike. Provedeno je i istraživanje georadarom, kako bi se otkrile anomalije u podzemlju te nehomogenosti pomoću

širenja elektrokemijskih valova. Pomoću provedenih istražnih radova ustanovljeno je da je profil po dubini približno jednak na svakoj lokaciji vjetroagregata te se sastoji od površinskog rastrošnog sloja stijene dubine oko 0.5 m, ispod se nalazi relativno homogeni sloj kompaktne stijenske mase. Karakteristični parametri slojeva dani su u *Tablici 4* [36].

Tablica 4. Karakteristični parametri materijala

SLOJ	γ_k [kN/m ³]	ρ_k [°]	c_k [kPa]	M_k [MPa]
1.SLOJ -RASTROŠNA STIJENA	19	26	5	8
2.SLOJ -KOMPAKTNA STIJENSKA MASA	24	31	85	4000

Gornji sloj je dosta lošiji materijal do donjeg kompaktnijeg sloja te se taj sloj iskopava prilikom izgradnje temelja. Dubina ukopavanja temelja bit će 3.5 m te se stoga površinski sloj može zanemariti. Svi daljnji proračuni napravljeni su samo sa slojem kompaktne stijene.

Odabir proračunskih vrijednosti parametara materijala napravljen je prema već spomenutom: HRN EN 1997-1:2012 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004+AC:2009), HRN EN 1997-1:2012/A1:2014 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004/A1/2013) te pripadajućem nacionalnom dodatku. Eurokod 7 uvodi klasifikaciju od tri geotehnička razreda prema složenosti i rizičnosti geotehničke konstrukcije, postoji pet vrsta graničnih stanja nosivosti (EQU, STR, GEO, UPL i HYD od engleskih riječi equilibrium (ravnoteža), structural (konstrukcijski), geotechnical (geotehnički), uplift (uzgon) i hydraulic (hidraulički)). Za granično stanje nosivosti STR/GEO postoje tri proračunska pristupa. Ovdje je korišten proračunski pristup 3 (PP3), s kombinacijom parcijalnih faktora A1 ili A2 + M2 + R3, kod kojega se parcijalnim faktorima umanjuju vrijednosti parametara materijala i uvećavaju vrijednosti djelovanja, kao što je prikazano u *Tablici 5*. Pri tome se faktori u skupini A odnose na djelovanja, u skupini M na materijale te u skupini R na otpornost. Iznosi parcijalnih koeficijenata prikazani su u *Tablici 6*. Faktoriziranjem karakterističnih vrijednosti parcijalnim faktorima prema proračunskom pristupu 3, dobivaju se proračunske vrijednosti prikazane u *Tablici 7* [40] [42].

Tablica 5. Proračunski pristupi

Tri projektna pristupa za granična stanja STR i GEO: kombinacije skupina parcijalnih faktora		
Projektni pristup 1	Projektni pristup 2	Projektni pristup 3
Osno opterećeni piloti i sidra: K1 ^a : A1 + M1 + R1 K2 ^a : A2 + (M1 ^b ili M2 ^c) + R4	A1 + M1 + R2	(A1 ^d ili A2 ^e) + M2 + R3
Sve ostale konstrukcije: K1 ^a : A1 + M1 + R1 K2 ^a : A2 + M2 + R1		
^a odvojeni proračuni za K1 i K2		^d za sile od konstrukcije
^b za pilote i sidra		^e za geotehničke sile (sile od tla i sl.)
^c za nepovoljno djelovanje od negativnog trenja ili bočnog opterećenja pilota		

Tablica 6. Parcijalni faktori

(1) Parcijalni faktori djelovanja (γ_F) i učinka djelovanja (γ_E)						
Djelovanja		Simbol	A1	A2		
Trajna:	nepovoljna	$\gamma_{G,dst}$	1,35	1		
	povoljna	$\gamma_{G,stab}$	1	1		
Promjenjiva:	nepovoljna	$\gamma_{Q,dst}$	1,5	1,3		
	povoljna	$\gamma_{Q,stab}$	0	0		
(2) Parcijalni faktori svojstva materijala (tlo, stijena) (γ_M)						
Svojstvo		Simbol	M1	M2		
Tangens efektivnog kuta trenja		$\gamma_{\varphi'}$	1	1,25		
Efektivna kohezija		$\gamma_{c'}$	1	1,25		
Nedrenirana i jednoosna čvrstoća		γ_{cu} ili γ_{qu}	1	1,4		
Težinska gustoća		γ_Y	1	1		
(3) Parcijalni faktori otpora (γ_R)						
Otpornost		Simbol	R1	R2	R3	R4
Plitki temelji:	nosivost	γ_{Rv}	1	1,4	1	-
	klizanje	γ_{Rh}	1	1,1	1	-
Potporne konstrukcije:	nosivost	$\gamma_{R:v}$	1	1,4	1	-
	klizanje	$\gamma_{R:h}$	1	1,1	1	-
	otpor tla	$\gamma_{R:e}$	1	1,4	1	-
Kosine i opća stabilnost:	otpor tla	$\gamma_{R:e}$	1	1,1	1	-

Tablica 7. Dobivene proračunske vrijednosti materijala

SLOJ	$\gamma_k \left[\frac{kN}{m^3} \right]$	$\rho_k [^\circ]$	$c_k [kPa]$	$M_k [MPa]$
KOMPAKTNA STIJENSKA MASA	24	25.7	68	4000

S tako dobivenim proračunskim vrijednostima materijala provest će se svi proračuni.

11.2.2. GEOTEHNIČKI PRORAČUNI

Svi proračuni u radu obavljani su prema smjernicama iz važećih normi za geotehničko projektiranje: HRN EN 1997-1:2012 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje - 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004+AC:2009), nacionalni dodatak prethodnoj normi HRN EN 1997-1:2012/NA:2012 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje - 1. dio: Opća pravila - Nacionalni dodatak.

Kao što je spomenuto u uvodu poglavlja, Eurokod 7 razlikuje pet graničnih stanja nosivosti [41] [42]:

- EQU: gubitak ravnoteže konstrukcije ili tla razmatranog kao kruto tijelo, u kojem čvrstoća konstruktivnog materijala ili tla značajno ne doprinosi otpornosti;
- STR: slom ili velika deformacija betonske, metalne, drvene ili zidane konstrukcije ili njenog elementa, uključivo temelje, pilote, sidra i potporne zidove, u kojima čvrstoća konstruktivnog materijala bitno pridonosi otpornosti;
- GEO: slom ili velika deformacija tla pri kojoj čvrstoća tla ili stijene bitno pridonosi otpornosti; UPL: gubitak ravnoteže konstrukcije ili tla uslijed uzgona vode ili drugih vertikalnih sila;
- HYD: hidrauličko izdizanje ili hidraulički slom, interna erozija tla uzrokovana hidrauličkim gradijentima.

U Tablici 8. prikazan je način provjere stabilnosti za 5 graničnih stanja nosivosti metodom parcijalnih koeficijenata.

Tablica 8. Provjera stabilnosti za 5 graničnih stanja nosivosti metodom parcijalnih koeficijenata (Eurokod, Ivšić 2006.) [40]

Granično stanje	Provjera otpornosti	Napomene
EQU	$E_{dst;d} \leq E_{stb;d} + T_d$	$E_{dst;d}$ je destabilizirajući, a $E_{stb;d}$ stabilizirajući proračunski učinak djelovanja, a T_d je moguća otpornost tla
STR/GEO	$E_d \leq R_d$	E_d je proračunski učinak djelovanja, a R_d proračunska otpornost
UPL	$V_{dst;d} \leq G_{stb;d} + R_d$	$V_{dst;d} = G_{dst;d} + Q_{dst;d}$ je kombinacija trajnog (G) i prolaznog (Q) proračunskog destabilizirajućeg vertikalnog djelovanja, a $G_{stb;d}$ je proračunsko stabilizirajuće vertikalno trajno djelovanje; R_d je moguća proračunska otpornost tla na izdizanje konstrukcije
HYD	$u_{dst;d} \leq \sigma_{stb;d}$ ili $S_{dst;d} \leq G'_{stb;d}$	$u_{dst;d}$ odnosno $S_{dst;d}$ su proračunski destabilizirajući tlak porne vode na dnu stupca tla odnosno strujna sila u stupcu tla, a $\sigma_{stb;d}$ odnosno $G'_{stb;d}$ su ukupno proračunsko vertikalno naprezanje na dnu stupca odnosno efektivna težina stupca tla

U konkretnom slučaju, kao relevantna su razmatrana granična stanja EQU, STR i GEO. Za granična stanja nosivosti STR i GEO razvijena su, već ranije spomenuta, tri pristupa PP1, PP2 i PP3 (ujedno i prihvaćen u Hrvatskoj osim za sidra i pilote, gdje se dopušta i PP2), dok je za ostala granična stanja zadržan jedinstveni pristup. U *Tablici 9.* prikazani su parcijalni koeficijenti proračunskog pristupa 3 za granična stanja STR i GEO. Pristupi se međusobno razlikuju uglavnom po fazi proračuna u kojoj će se primijeniti parcijalni faktori: da li na ulazne podatke (djelovanja i svojstva materijala) ili na rezultate proračuna (učinke djelovanja i otpornosti). Pristupi proračunu pobliže definiraju varijante izračuna proračunskog djelovanja (E_d) i proračunske otpornosti (R_d), te daju prijedloge odgovarajućih parcijalnih koeficijenata. Proračuni su provedeni za 17 proračunskih situacija (*Tablica 11.*) za jedan karakteristični temelj, sastavljenih od kombinacija 8 osnovnih slučajeva opterećenja prikazanih u *Tablici 10*[40] [42] [44].

Tablica 9. Granično stanje STR i GEO: parcijalni koeficijenti za djelovanja i učinke djelovanja (za oznake A1 i A2) (Eurokod, Ivšić 2006)

(1) Parcijalni koeficijenti za djelovanja (γ_F) i učinke djelovanja (γ_E)				
Djelovanja		simbol	A1	A2
trajna	nepovoljna	γ_G	1.35	1
	povoljna	γ_G	1	1
prolazna (povremena)	nepovoljna	γ_Q	1.5	1.3
	povoljna	γ_Q	0	0

Tablica 10. Osnovni slučajevi opterećenja i reakcije na vrhu temelja

	Slučaj opterećenja	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
1	STALNO	0.0	0.0	2590.23	0.0	0.0	0.0
2	SILE NA VRHU STUPA (OD PROIZVOĐAČA) MaxFx	-1215.30	-18.60	2901.20	-5180.64	-120498.08	-4475.90
3	SILE NA VRHU STUPA (OD PROIZVOĐAČA) MaxMxy	-266.50	-46.70	2781.60	-104.76	-12824.30	4487.50
4	SILE NA VRHU STUPA (OD PROIZVOĐAČA) MaxMz	-254.00	17.80	2681.90	-6322.02	-21742.68	12837.00
10	VJETAR 30	-816.06	-202.18	0.0	16846.02	-41713.51	0.0
11	VJETAR 9	-55.15	-202.18	0.0	16846.02	-41713.51	0.0
16	Seismic EC 8 Direction_X	317.84	0.00	0.0	0.00	14276.53	0.0
17	Seismic EC 8 Direction_Y	0.00	317.84	0.0	14276.53	0.00	0.00

Tablica 11. Karakteristične kombinacije djelovanja i reakcije na vrhu temelja

	Kombinacija opterećenja	Fx	Fy	Fz	Mx	My
22(C)	KGS1: 1.35G + 1.5W_30+1Mxy	-1082.56	-248.88	5371.83	16741.26	-63684.885
23(C)	KGS2: 1.35G + 1.5W_30+1Mz	-1070.06	-184.38	5272.13	10524	-85984.095
24(C)	KGS3: 1.35G + 1.5W_9+1Fx	-1270.45	-220.78	5491.43	11665.38	-233648.27
25(C)	KGS4: 1.G + 1.5W_30+1Mxy	-1082.56	-248.88	5371.83	16741.26	-63684.885
26(C)	KGS5: 1.G + 1.5W_30+1Mz	-1070.06	-184.38	5272.13	10524	-85984.095
27(C)	KGS6: 1.G + 1.5W_9+1Fx	-1270.45	-220.78	5491.43	11665.38	-233648.27
28(C)	GSU1: 1G + 1W_30 + 1Mxy	-1082.56	-248.88	5371.83	16741.26	-63684.885
29(C)	GSU2: 1G + 1W_30 + 1Mz	-1070.06	-184.38	5272.13	10524	-85984.095
30(C)	GSU3: 1G + 1W_9 + 1Fx	-1270.45	-220.78	5491.43	11665.38	-233648.27
33(C) (CQC)	SEIS1: 1G + 1*3 + Ex + 0.3Ey	51.34	271.14	5371.83	14171.77	25129.02
34 (C)(CQC)	SEIS2: 1G + 1*3 + 0.3Ex + Ey	51.34	271.14	5371.83	14171.77	25129.02
35(C)(CQC)	SEIS3: 1G + 1*3 - Ex + 0.3Ey	-584.34	271.14	5371.83	14171.77	-21037.89
36(C)(CQC)	SEIS4: 1G + 1*3 + Ex - 0.3Ey	51.34	-142.052	5371.83	-4387.72	-4879.4715
37(C)(CQC)	SEIS5: 1G + 1*3 + 0.3Ex - Ey	51.34	271.14	5371.83	14171.77	25129.02
38(C)(CQC)	SEIS6: 1G + 1*3 - 0.3Ex + Ey	-584.34	271.14	5371.83	14171.77	21037.89
39(C)(CQC)	SEIS7: 1G + 1*3 - 0.3Ex - Ey	-584.34	-364.54	5371.83	-14381.3	-67204.8
40(C)(CQC)	SEIS8: 1G + 1*3 - Ex - 0.3Ey	-584.34	-364.54	5371.83	-14381.3	-67204.8

Tablica 12. Proračunske kombinacije djelovanja i reakcije na vrhu temelja

	Kombinacija opterećenja	F _x	F _y	F _z	M _x	M _y
22(C)	KGS1: 1.35G + 1.5W_30+1M _{xy}	-1490.59	-349.97	6278.41	25164.26	-75394.57
23(C)	KGS2: 1.35G + 1.5W_30+1M _z	-1478.09	-285.47	6178.71	18947.00	-84312.94
24(C)	KGS3: 1.35G + 1.5W_9+1F _x	-1298.03	-321.87	6398.01	20088.39	-124732.27
25(C)	KGS4: 1.G + 1.5W_30+1M _{xy}	-1490.59	-349.97	5371.83	25164.26	-75394.57
26(C)	KGS5: 1.G + 1.5W_30+1M _z	-1478.09	-285.47	5272.13	18947.00	-84312.94
27(C)	KGS6: 1.G + 1.5W_9+1F _x	-1298.03	-321.87	5491.43	20088.39	-124732.27
28(C)	GSU1: 1G + 1W_30 + 1M _{xy}	-1082.56	-248.88	5371.83	16741.25	-54537.82
29(C)	GSU2: 1G + 1W_30 + 1M _z	-1070.06	-184.38	5272.13	10523.99	-63456.19
30(C)	GSU3: 1G + 1W_9 + 1F _x	-1270.45	-220.78	5491.43	11665.38	-123320.87
33(C) (CQC)	SEIS1: 1G + 1*3 + E _x + 0.3E _y	51.34	48.65	5371.83	4178.20	1452.22
34 (C)(CQC)	SEIS2: 1G + 1*3 + 0.3E _x + E _y	-171.15	271.14	5371.83	14171.77	-8541.35
35(C)(CQC)	SEIS3: 1G + 1*3 - E _x + 0.3E _y	-584.34	48.65	5371.83	4178.20	-27100.83
36(C)(CQC)	SEIS4: 1G + 1*3 + E _x - 0.3E _y	51.34	-142.05	5371.83	-4387.72	1452.22
37(C)(CQC)	SEIS5: 1G + 1*3 + 0.3E _x - E _y	-171.15	-364.54	5371.83	-14381.29	-8541.35
38(C)(CQC)	SEIS6: 1G + 1*3 - 0.3E _x + E _y	-361.85	271.14	5371.83	14171.76	-17107.26
39(C)(CQC)	SEIS7: 1G + 1*3 - 0.3E _x - E _y	-361.85	-364.54	5371.83	-14381.29	-17107.26
40(C)(CQC)	SEIS8: 1G + 1*3 - E _x - 0.3E _y	-584.34	-142.05	5371.83	-4387.72	-27100.83

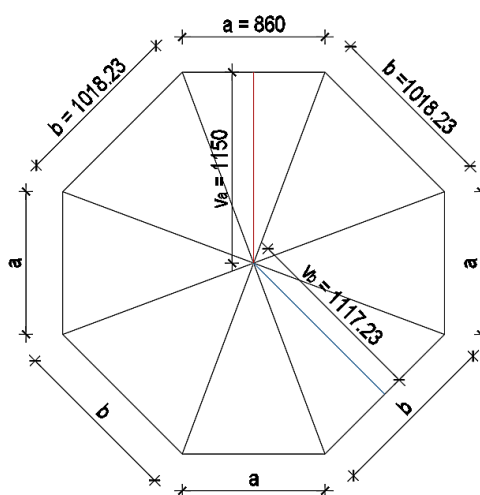
Vrijednosti prikazane u *Tablici* 12. odnose se na reakcije na vrhu temelja, te je na svaku vertikalnu silu F_z potrebno dodati težinu temelja, s odgovarajućim parcijalnim faktorom za svaku proračunsku situaciju, kao i težinu zasipa kojim se zatrpava prostor između temelja i površine terena. Proračun težine temelja te težine zasipa za osmerokutnu geometriju temelja dana je u sljedećem poglavlju.

11.2. PRORAČUN DOBIVANJA POTREBNIH DIMENZIJA ZA ODABRANU GEOMETRIJU TEMELJA

11.2.1. EKVIVALENTNA POVRŠINA

Proračun temelja za izračun nosivosti provodi se pomoću programa GGU-Footing, koji na temelju analitičkih izraza računa nosivost plitkog temelja na homogenom, izotropnom, linearno elastičnom poluprostoru. Iz toga razloga potrebno je pronaći ekvivalentne dimenzije kvadratnog temelja koje odgovaraju odabranom osmerokutnom temelju. Proračun se provodi prema jednadžbama razvijenim za pravokutni temelj, prikazana dolje u nastavku teksta. Odabrana je metoda pri kojoj se zadržava moment inercije temelja pa se na temelju toga biraju dimenzije kvadratnog oblika temelja. Za dimenzije osmerokutnog temelja $a=860$ m, $b=1018.23$ m (Slika 76), ovim putem se dobiva kvadratni presjek dimenzija 20.7 m, čija je površina 0.99% veća od površine ekvivalentnog osmerokutnog temelja (Slika 77). Odabrana dimenzija stranica jest 20 m, čija je površina 0.94% manja od površine ekvivalentnog osmerokutnog temelja. Odabir manjih dimenzija posljedično uzrokuje veću stranu sigurnosti jer će se proračun provesti na manjoj površini koja mora preuzeti predviđena opterećenja, a u stvarnosti će se temeljiti na većoj površini.

1. POVRŠINA ODABRANOG OSMEROKUTNOG TEMELJA :



Slika 76. Površina odabranog osmerokutnog temelja

Izračun površine odabranog temelja:

$$P_8 = 4 \cdot \frac{a \cdot v_a}{2} + 4 \cdot \frac{b \cdot v_b}{2} = 4 \cdot \frac{860 \cdot 1150}{2} + 4 \cdot \frac{1018,23 \cdot 1117,23}{2} = 425.3 \text{ m}^2 \quad (11.1.)$$

2. POVRŠINA EKVIVALENTNOG KVADRATNOG TEMELJA :

Proračun površine za dobivanje ekvivalentne površine:

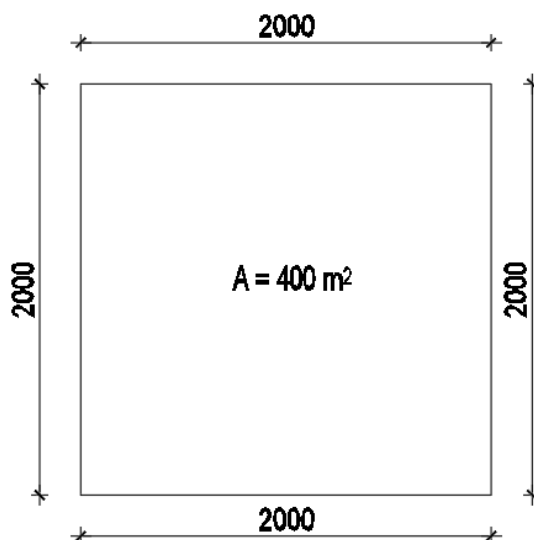
$$P_8 = P_{\square} \quad (11.2.)$$

$$425.3 = a^2$$

$$a = \sqrt{425.3}$$

$$a = 20.62 \text{ m}$$

$$a_{\text{odabrano}} = 20 \text{ m}$$

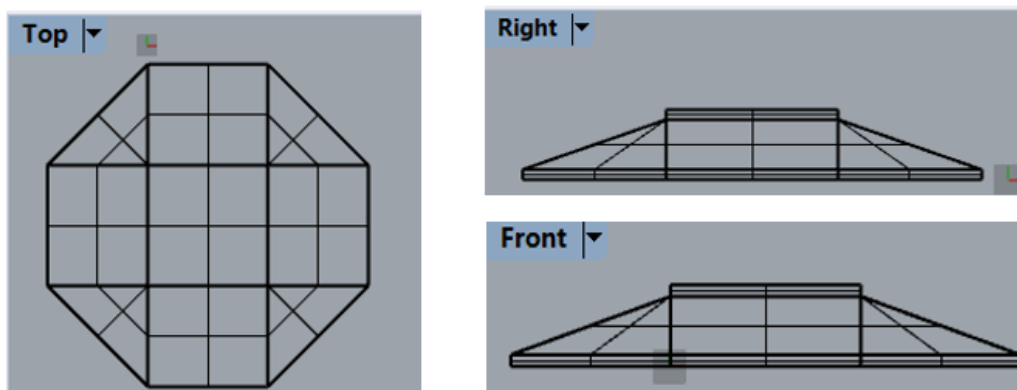


Slika 77. Odabrani ekvivalentni kvadrat od površine osmerokutnog temelja

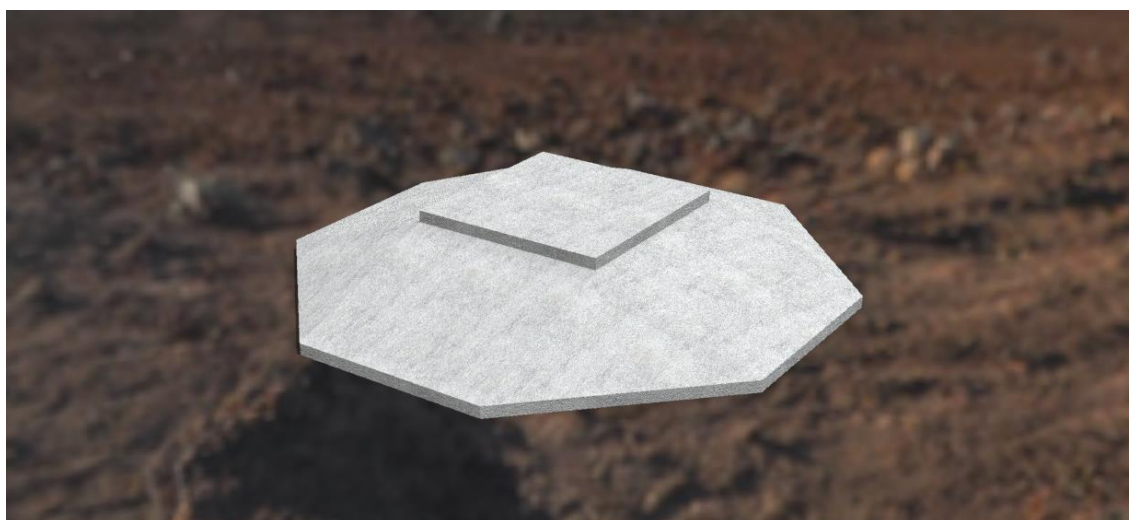
Odabrani ekvivalentni kvadrat je dimenzija stranica 20 metara i ukupne površine 400 m² što je za 25.3 m² manje od površine osmerokutnoga temelja.

11.2.2. GEOMETRIJA TEMELJA

Za potrebe izračuna volumena temelja i zasipa izrađen je model temelja u američkom CAD programu za 3D modeliranje Rhinoceros (Slika 78, Slika 79). Program se koristi za brzu izradu prototipa, 3D ispise, arhitekturu, industrijski dizajn, dizajn automobila i slično.



Slika 78. Tlocrt, nacrt i bokocrt temelja u Rhinocerosu



Slika 79. 3D prikaz temelja

Volumen temelja očitani je iz programa pomoću naredbe *Volume* i iznosi 830,54 m³. Težina temelja računa se pomoću očitanih volumena i zapreminske težine betona koja iznosi 25 kN/m³. Težina temelja potrebna za proračun nosivosti, klizanja i prevrtanja iznosi :

$$G_T = V_T \cdot \gamma_{\text{beton}} = 830,45 \cdot 25 = 20\,763,5 \text{ kN} \quad (11.3.)$$

Težina zasipa tla za potrebe proračuna izračunata je pomoću geometrije temelja i zapreminske težine tla koja iznosi 21 kN/m³. Težina zasipa tla iznosi :

$$G_Z = V_Z \cdot \gamma_{tlo} = 1020,96 \cdot 21 = 21\,440,16 \text{ kN} \quad (11.4.)$$

Tablica 13. Težine temelja i zasipa

TEMELJ	$G_T = 20\,763,5 \text{ kN}$
ZASIP	$G_Z = 21\,440,16 \text{ kN}$

11.3. PRORAČUNI MEHANIČKE OTPORNOSTI I STABILNOSTI TEMELJNE KONSTRUKCIJE

Proračuni koji će biti provedeni u ovome poglavlju za temeljnu konstrukciju obrađeni su u posebnim poglavljima redom:

1. Proračun nosivosti temeljnog tla
2. Proračun prevrtanja temelja
3. Proračun klizanja temelja
4. Proračun slijeganja temelja

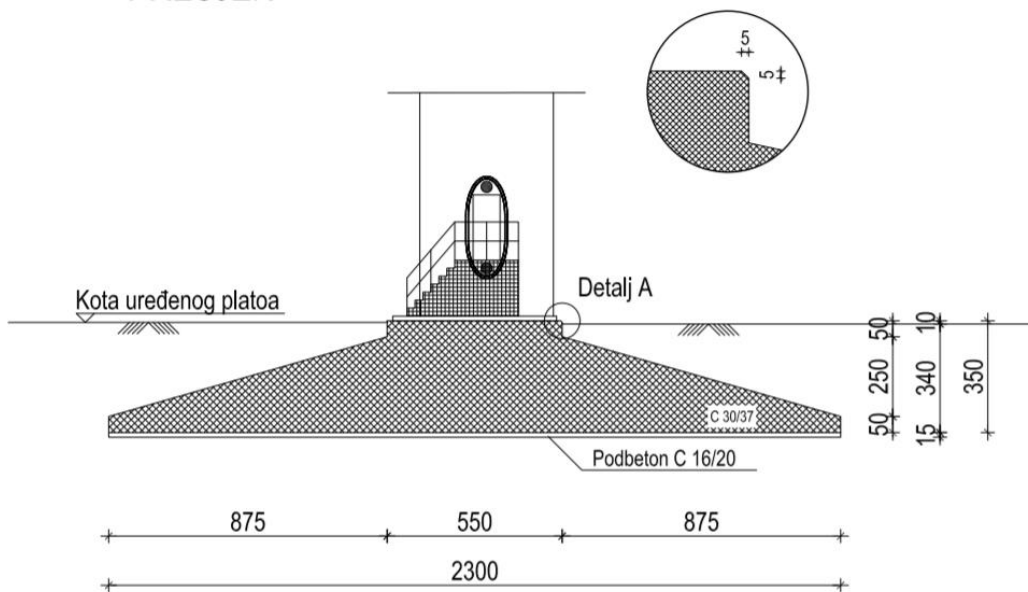
Detaljan prikaz dimenzija odabranog temelja dan je u ulaznim podacima za proračun nosivosti temeljnog tla (Slika 80.).

11.3.1. PRORAČUN NOSIVOSTI TEMELJNOG TLA

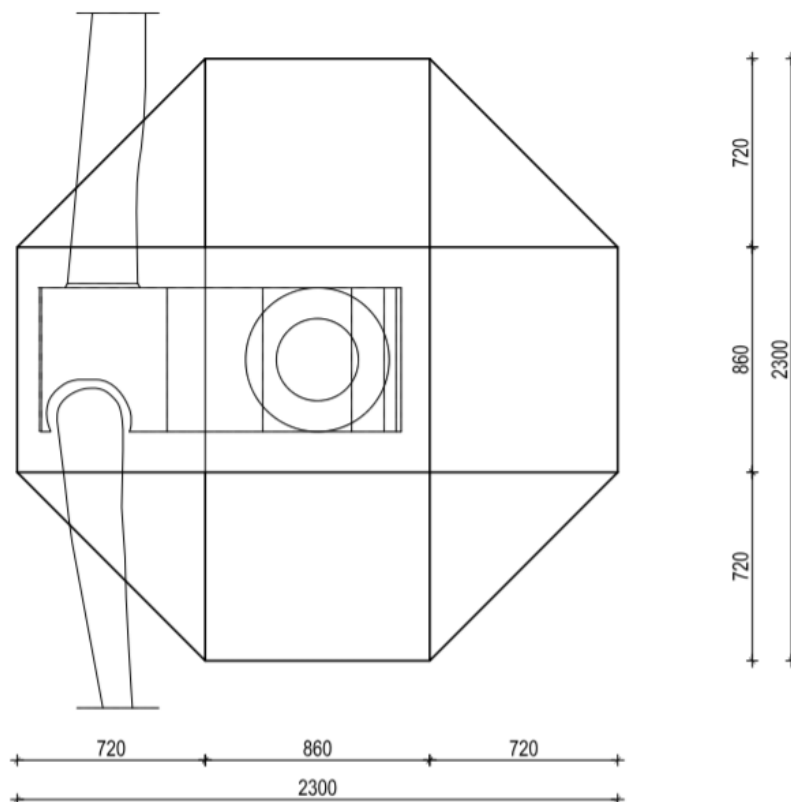
Unutar poglavlja 11.2.2., dano je 17 proračunskih situacija s različitim kombinacijama stalnih i prolaznih opterećenja te statičkih i dinamičkih uvjeta, za koje će se provodi analiza nosivosti temeljnog tla ispod karakterističnog temelja vjetroagregata s prethodno definiranim geotehničkim profilom i uvjetima temeljenja.

Temelj je oblika osmerokuta, dimenzija stranica $a=860 \text{ m}$, $b= 1018.23 \text{ m}$ i visine 3.5 m , koji se prema vrhu smanjuje do promjera 5.5 m , te je cijeli ukopan u stijenu (Slika 80). Promjer temelja uvjetovan je položajem rezultante svih sila koje na njega djeluju, kako je kasnije u proračunima prikazano.

PRESJEK



TLOCRT



Slika 80. Geometrija temelja: a) presjek b) tlocrt

Proračun nosivosti temelja proveden je pomoću programa GGU-Footing koji se temelji na korištenju analitičkih izraza za računanje nosivosti plitkog temelja na homogenom, izotropnom, linearno elastičnom poluprostoru. Proračun se provodi prema jednadžbama razvijenim za pravokutni temelj, detaljno prikazano u poglavlju 4.2. gdje je ujedno prikazano kako su dobivene ekvivalentne dimenzije pravokutnog temelja za odgovarajući osmerokutni temelj.

U programu GGU-Footing djelovanja se zadaju na razini temeljne plohe, a ne na razini vrha temelja kako je definirano u *Tablici 10*, stoga su napravljene korekcije zadanih djelovanja (Slika 81). Kako bi se postigao isti efekt, u smislu ekscentričnosti opterećenja pod djelovanjem momenata i horizontalnih sila, na momente u x i y smjeru dodani su momenti od horizontalnih sila tako što su pomnožene s odgovarajućim krakom (visinom temelja, u ovom slučaju ona iznosi 3.5 m). Horizontalne sile su i dalje zadane u programu kao da djeluju na razini temeljne plohe zato što one utječu na faktore ekscentričnosti opterećenja koji ulaze u izraz za nosivost temeljnog tla. S obzirom na to da su sva unesena djelovanja već unaprijed faktorizirana, odabran je proračun s jediničnim parcijalnim faktorima. Na Slici 82. prikazan je rezultat proračuna nosivosti temeljnog tla za prvu kombinaciju (kombinacija 22(C) u *Tablici 12*). Osim nosivosti temeljnog tla provedena je i kontrola pozicije rezultante opterećenja na temeljnoj plohi. Kako ne bi došlo do nedopustivog izdizanja ruba temelja, rezultanta trajnih opterećenja mora se nalaziti unutar prve jezgre poprečnog presjeka koja se nalazi na udaljenosti $B/6$ od središta temelja. Za kombinaciju trajnih i prolaznih opterećenja dopušteno je da se njihova rezultanta nalazi unutar druge jezgre koja se nalazi na udaljenosti $B/3$ od središta S. S obzirom na to da nisu poznati uzroci djelovanja (njihov stalni / povremeni karakter) danih od strane proizvođača za osnovne slučajeve opterećenja 2, 3 i 4, (*Tablica 10.*) kako bi bili na strani sigurnosti ona su u proračunima nosivosti temeljnog tla uzeta kao trajna opterećenja. Tako rezultanta tih sila i vlastite težina temelja i zasipa moraju upasti unutar prve jezgre poprečnog presjeka, a rezultanta svih sila zajedno s prolaznim djelovanjima od vjetra i potresa, unutar druge jezgre. Oba uvjeta su zadovoljena za svaku kombinaciju opterećenja.

Pad footing ×

Dimensions

Length L [m]: Width B [m]:

Stress

	Permanent	Changeable
Vertical force [kN]:	<input type="text" value="63253.3"/>	<input type="text" value="0.0"/>
Horizontal force (x) [kN]:	<input type="text" value="-266.5"/>	<input type="text" value="-1224.1"/>
Horizontal force (y) [kN]:	<input type="text" value="-46.7"/>	<input type="text" value="-303.3"/>
Moment (x) [kN*m]:	<input type="text" value="58.7"/>	<input type="text" value="26225.7"/>
Moment (y) [kN*m]:	<input type="text" value="-13757.1"/>	<input type="text" value="-79678.9"/>

Self weight

Automatic self weight

gamma concrete [kN/m³]:

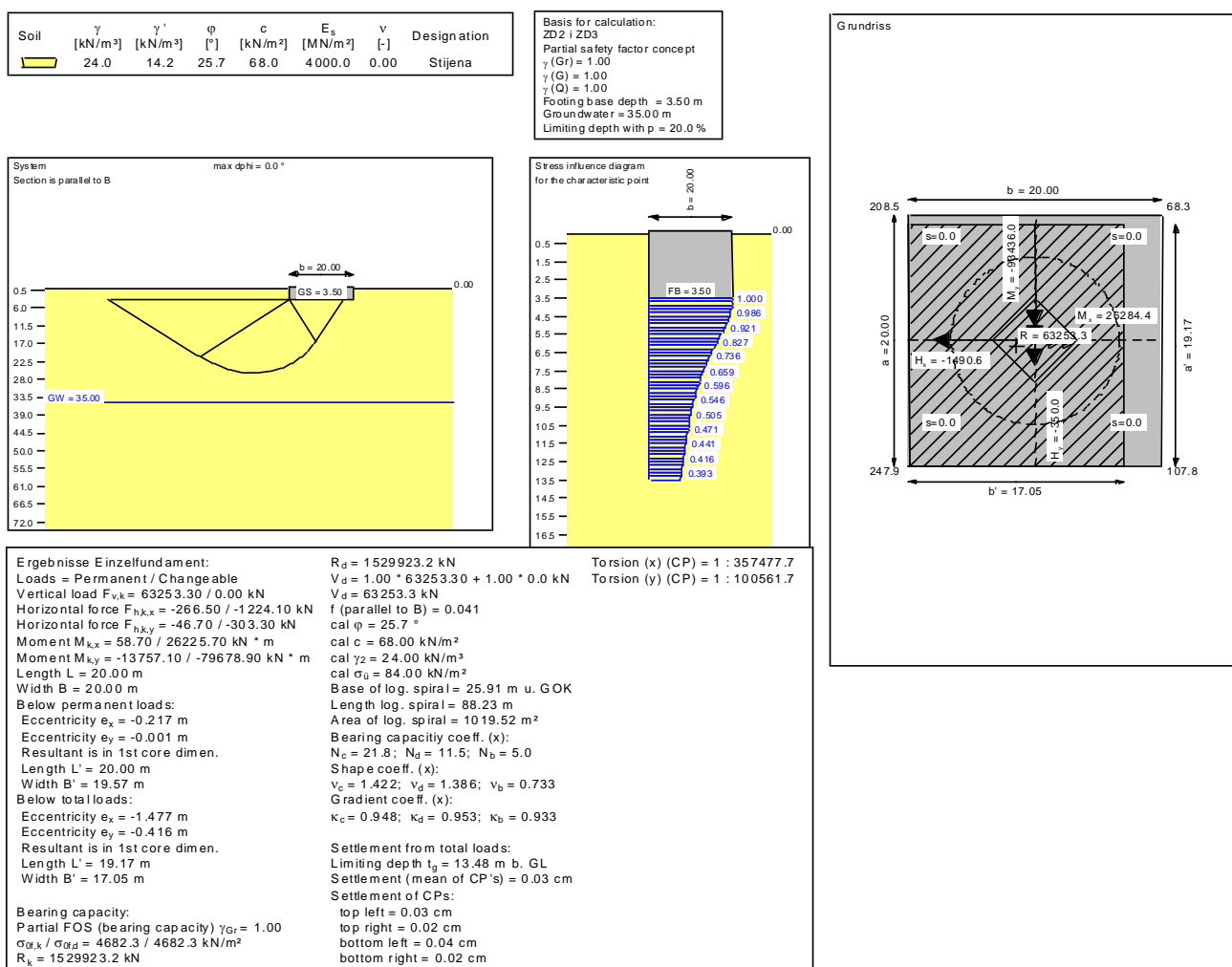
Slip resistance

Verify slip resistance

Partial FOS gamma(GI) [-]:

Slika 81. Zadavanje djelovanja u GGU-Footing za kombinaciju 22 (C)

Određivanje optimalnog oblika temelja vjetroagregata



Slika 82. Rezultat proračuna nosivosti temeljnog tla za kombinaciju 22

Iz gore navedene slike može se iščitati vrijednost faktora sigurnosti koji je za kombinaciju 22 jednak inverznoj vrijednosti faktora f , odnosno on iznosi $F_s = 24.39$.

Za ostale kombinacije opterećenja, faktori sigurnosti za proračun nosivosti proračunati su na prethodno opisan i prikazan način te navedeni u *Tablici 14*.

Tablica 14. Faktori sigurnosti za nosivost temeljnog tla pod različitim kombinacijama opterećenja i položaj rezultante unutar jezgri poprečnog presjeka

Kombinacija	Faktor sigurnosti za nosivost temeljnog tla (GEO)	Rezultanta trajnih djelovanja u 1. jezgri	Rezultanta trajnih i prolaznih djelovanja u 2. jezgri
22(C)	24.39	✓	✓
23(C)	23.81	✓	✓
24(C)	21.28	✓	✓
25(C)	28.57	✓	✓
26(C)	28.57	✓	✓
27(C)	24.39	✓	✓
28(C)	32.26	✓	✓
29(C)	32.26	✓	✓
30(C)	25.00	✓	✓
33(C) (CQC)	43.48	✓	✓
34 (C)(CQC)	40.00	✓	✓
35(C)(CQC)	37.04	✓	✓
36(C)(CQC)	41.67	✓	✓
37(C)(CQC)	41.67	✓	✓
38(C)(CQC)	38.46	✓	✓
39(C)(CQC)	38.46	✓	✓
40(C)(CQC)	37.04	✓	✓

Iz gore prikazanih rezultata analize nosivosti temeljne stijene može se zaključiti da sama nosivost temeljne stijene nije ugrožena, a promjer temelja uvjetovan je kriterijem zadržavanja trajnih djelovanja unutar 1. jezgre te trajnih + povremenih djelovanja unutar 2. jezgre. Najmanji faktor sigurnosti iznosi $F_s = 21.28$ za kombinaciju 24 (C).

11.3.2. PRORAČUN PREVRTANJA TEMELJA

Proračun prevrtanja temelja provodi se po proračunskom pristupu EQU gdje se stalna povoljna djelovanja množe s parcijalnim koeficijentom 0.9, stalna nepovoljna s 1.1, promjenjiva povoljna s 0, a promjenjiva nepovoljna s 1.5. Prilikom proračuna horizontalnih i vertikalnih sila te momenata prema kombinacijama opterećenja odgovarajuća djelovanja iz *Tablice 10* množena su s parcijalnim koeficijentima ovisno računa li se povoljna ili nepovoljna komponenta djelovanja. Za prvu kombinaciju opterećenja (22) dobiju se sljedeće vrijednosti :

Tablica 15. Proračunske vrijednosti djelovanja za proračun prevrtanja

$F_{X,d}$	$F_{Y,d}$	$F_{Z,d}$	$M_{X,d}$	$M_{Y,d}$
-1623,84	-373,32	2331,21	25111,89	-81806,72

S obzirom na to da su djelovanja već faktorizirana unutar kombinacije opterećenja, djelovanje E_d iznosi :

$$E_d = (H_R \cdot 3.5) + M_R = 91405,92 \text{ kNm} \quad (11.5.)$$

Gdje H_R predstavlja rezultantu horizontalnih sila :

$$H_R = \sqrt{1623,84^2 + 373,32^2} = 1666,2 \text{ kN} \quad (11.6.)$$

A M_R rezultatni moment :

$$M_R = \sqrt{25111,89^2 + 81806,72^2} = 85574,22 \text{ kNm} \quad (11.7.)$$

Otpornost na prevrtanje definirana je težinom temelja, težinom zasipa i vertikalnom silom F_z te krakom tih sila do najudaljenijeg dijela temelja. Taj krak iz geometrije temelja iznosi $k = 12.27$ m. Otpornost temelja na prevrtanje iznosi :

$$R_D = (G_T + G_Z + F_{Z,d}) \cdot 12,27 = 546442,82 \text{ kNm} \quad (11.8.)$$

Faktor sigurnosti definiran je omjerom stabilizirajućeg i nestabilizirajućeg momenta i iznosi:

$$F_S = \frac{R_d}{E_d} = 5,98 \quad (11.9.)$$

Faktor sigurnosti za prvu kombinaciju opterećenja (22) je veći od 1 stoga stabilnost temelja na prevrtanje nije ugrožena.

Za preostale kombinacije opterećenja faktori sigurnosti proračunati su u programu Microsoft Excel i navedeni u *Tablici 16*.

Tablica 16. Faktori sigurnosti za prevrtanje po EQU

Kombinacija	F _s sa zasipom	F _s bez zasipa
22(C)	5,98	3,10
23(C)	5,35	2,77
24(C)	2,84	1,47
25(C)	5,98	3,10
26(C)	5,35	2,77
27(C)	2,84	1,47
28(C)	5,98	3,10
29(C)	5,35	2,77
30(C)	2,84	1,47
33(C) (CQC)	23,95	12,42
34 (C)(CQC)	23,95	12,42
35(C)(CQC)	11,09	5,75
36(C)(CQC)	23,14	12,00
37(C)(CQC)	23,95	12,42
38(C)(CQC)	11,09	5,75
39(C)(CQC)	11,01	5,71
40(C)(CQC)	11,01	5,71

Iz *Tablice 16*. vidljivo je kako su faktori sigurnosti za sve kombinacije opterećenja zadovoljavajući. Najveći faktor sigurnosti daju kombinacije 33(C) i 34(C) i oni iznose 12.42, a najmanje faktore sigurnosti daju kombinacije 24(C),27(C) I 30(C) i oni iznose 1.47.

11.3.3. PRORAČUN KLIZANJA TEMELJA

Proračun klizanja provodi se prema Eurokodu za geotehničko projektiranje (EC7) koristeći proračunski pristup 3. Pri tome, za odgovarajuću kombinaciju opterećenja, djelovanja iz *Tablice 10.* pomnožena su s odgovarajućim parcijalnim koeficijentima ovisno radi li se o povoljnoj ili nepovoljnoj komponenti. Parcijalni koeficijent sigurnosti za povoljna stalna djelovanja iznosi 1.0, za stalna nepovoljna djelovanja 1.35, za prolazna povoljna djelovanja 0 te za prolazna nepovoljna djelovanja 1.5. Za prvu kombinaciju opterećenja (22) dobiju se sljedeće proračunske vrijednosti djelovanja:

Tablica 17. Proračunske vrijednosti djelovanja za proračun klizanja

$F_{X,d}$	$F_{Y,d}$	$F_{Z,d}$
-1623,84	-373,32	2590,23

S obzirom na to da su djelovanja već faktorizirana unutar kombinacije opterećenja, djelovanje E_d iznosi :

$$E_d = \sqrt{F_{x,d}^2 + F_{y,d}^2} = 1666,2 \text{ kN} \quad (11.10.)$$

Otpornost temelja na prevrtanje definirana je vertikalnim silama – težinom temelja, težinom zasipa i $F_{Z,d}$, te kutem unutrašnjeg trenja φ_d . Otpornost temelja na prevrtanje iznosi :

$$R_d = \frac{(G_T + G_Z + F_{Z,d}) \cdot \frac{2 \cdot \varphi_d}{3}}{\gamma_R} = 14334,04 \text{ kN} \quad (11.11.)$$

Faktor sigurnosti definiran je omjerom otpornosti R_d i djelovanja E_d i za prvu kombinaciju opterećenja (22) iznosi :

$$F_s = \frac{R_d}{E_d} = 8,60 \quad (11.12.)$$

Faktor sigurnosti za prvu kombinaciju opterećenja (22) iznosi 8,60, veći je od 1 te stabilnost temelja na klizanje nije ugrožena.

Za preostale kombinacije opterećenja faktori sigurnosti proračunati su u programu Microsoft Excel i navedeni u *Tablici 18.*

Tablica 18. Faktori sigurnosti za klizanje po EC7 - PP3

Kombinacija	Fs sa zasipom	Fs bez zasipa
22(C)	8,60	4,49
23(C)	8,80	4,59
24(C)	7,41	3,86
25(C)	8,60	4,49
26(C)	8,80	4,59
27(C)	7,41	3,86
28(C)	8,60	4,49
29(C)	8,80	4,59
30(C)	7,41	3,86
33(C) (CQC)	34,63	18,05
34 (C)(CQC)	34,63	18,05
35(C)(CQC)	14,83	7,73
36(C)(CQC)	25,96	13,53
37(C)(CQC)	34,63	18,05
38(C)(CQC)	14,83	7,73
39(C)(CQC)	13,87	7,23
40(C)(CQC)	13,87	7,23

Iz *Tablice* 18. vidljivo je kako su faktori sigurnosti za sve proračunske kombinacije veći od 1 te stabilnost temelja na klizanje nije ugrožena. Najveći faktor sigurnosti daju kombinacije 33(C), 34(C) i 37(C) i on iznosi 18,05. Najmanje faktore sigurnosti daju kombinacije 24(C), 27(C) i 30(C) i on iznosi 3,86.

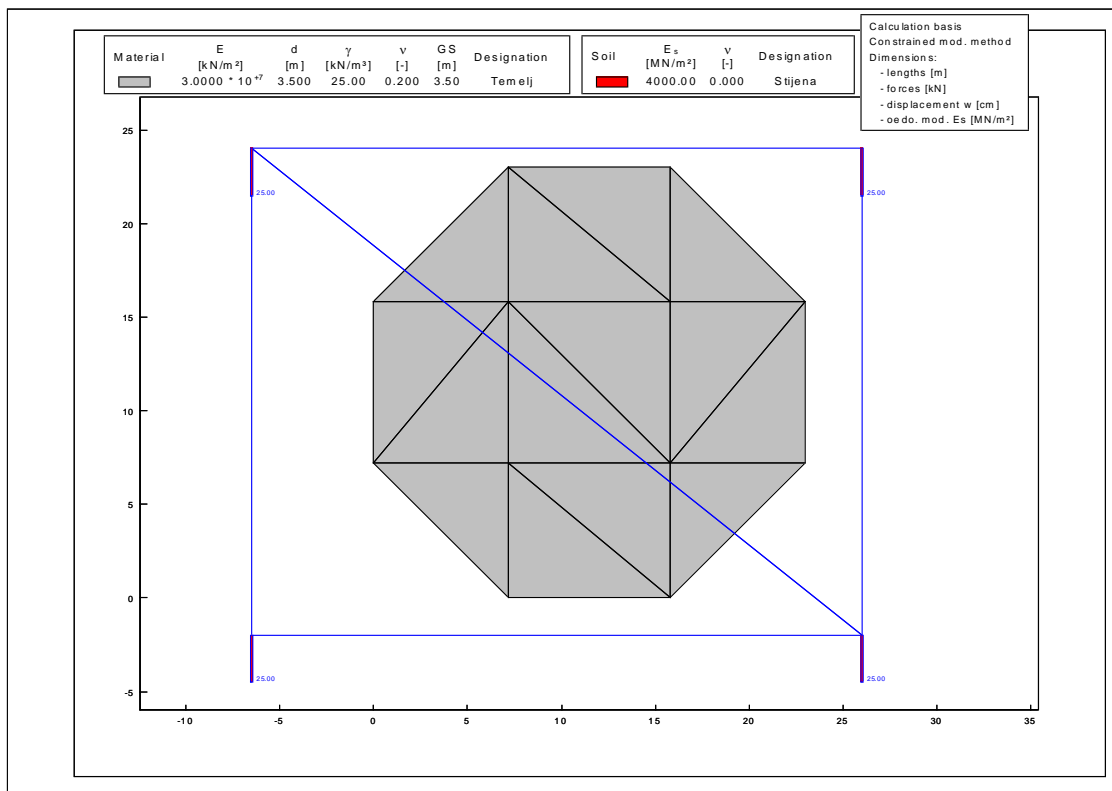
11.3.4. PRORAČUN SLIJEGANJA

Kontrola slijeganja provedena je za 3 kombinacije, navedene u poglavlju 11.2.2., koje se odnose na granično stanje uporabivosti (kombinacije 28, 29 i 30). Proračun je proveden u programu GGU-Slab koji se bazira na sprezi metode konačnih elemenata, za određivanje naprezanja na temeljnoj plohi, i analitičkih izraza, za izračunavanje dodatnih naprezanja po dubini. Slab radi na dva principa:

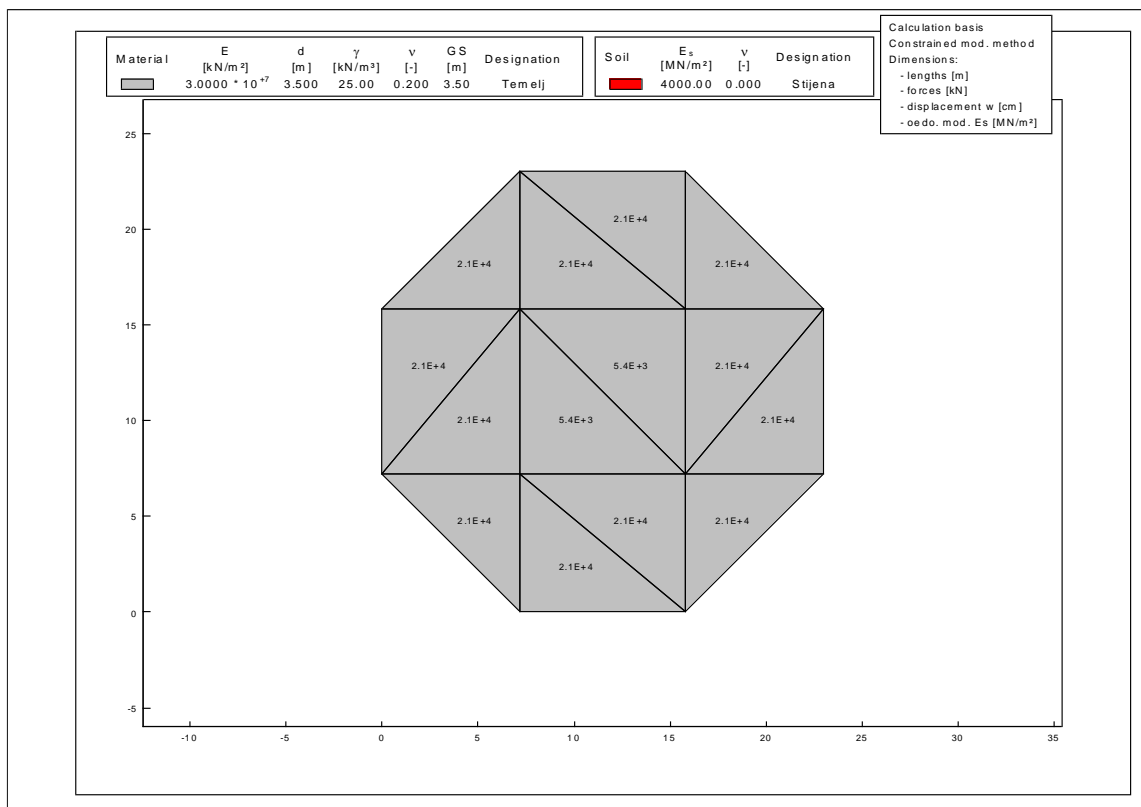
1. automatski mu se zadaju opruge određene krutosti
2. s promjenjivim koeficijentom reakcije podloge gdje mu je potrebno zadati temeljno tlo s modulom elastičnosti i Poissonovim koeficijentom

Drugi princip je vjerodostojniji jer program sam određuje krutosti kako bi mogao odrediti rezne sile u temelju. Slab se bazira na dva odvojena proračuna. Prvi proračun temelja jest korištenjem metode konačnih elemenata gdje je glavna nepoznanica vertikalni pomak svakog čvora, drugi proračun jest proračun slijeganja temeljnog tla, tj. proračun slijeganja linearno elastično homogenog izotropnog poluprostora na kojeg se postavljaju sile. To je iterativni postupak (teorija elastičnosti). Iteracije se provode sve dok pomak točke w iz iteracija i slijeganje nisu kompatibilni.

Početni korak jest zadavanje opterećenja te parametara podloge i samog temelja, za kombinaciju 28(C) prikazano je na Slici 83.,84. U prvom koraku se metodom konačnih elemenata proračunavaju pomaci temelja i naprezanja na temeljnoj plohi, ovisno o krutosti temelja i proizvoljno pretpostavljenog koeficijenta reakcije podloge. Tako dobivena naprezanja koriste se za proračun dodatnih naprezanja u tlu po dubini prema jednadžbama za linearno elastični poluprostor, iz kojih se zatim računaju slijeganja. Pomaci ploče i slijeganja tla se uspoređuju te u slučaju odstupanja se odabire nova vrijednost koeficijenta reakcije podloge iz omjera naprezanja i slijeganja tla [kN/m^3]. U drugom koraku, te svakom daljnjem, se proces ponavlja sve dok se iterativno ne dođe do točnog koeficijenta reakcije podloge te se postigne unaprijed definirano prihvatljivo odstupanje pomaka ploče i slijeganja tla. Kada su odstupanja dovoljno mala može se reći da proračunati pomaci ploče odgovaraju stvarnom slijeganju.



Slika 83. Model temelja sa zadanim bušotinama, parametrima tla i karakteristikama temelja



Slika 84. Model temelja s unesenim opterećenjima

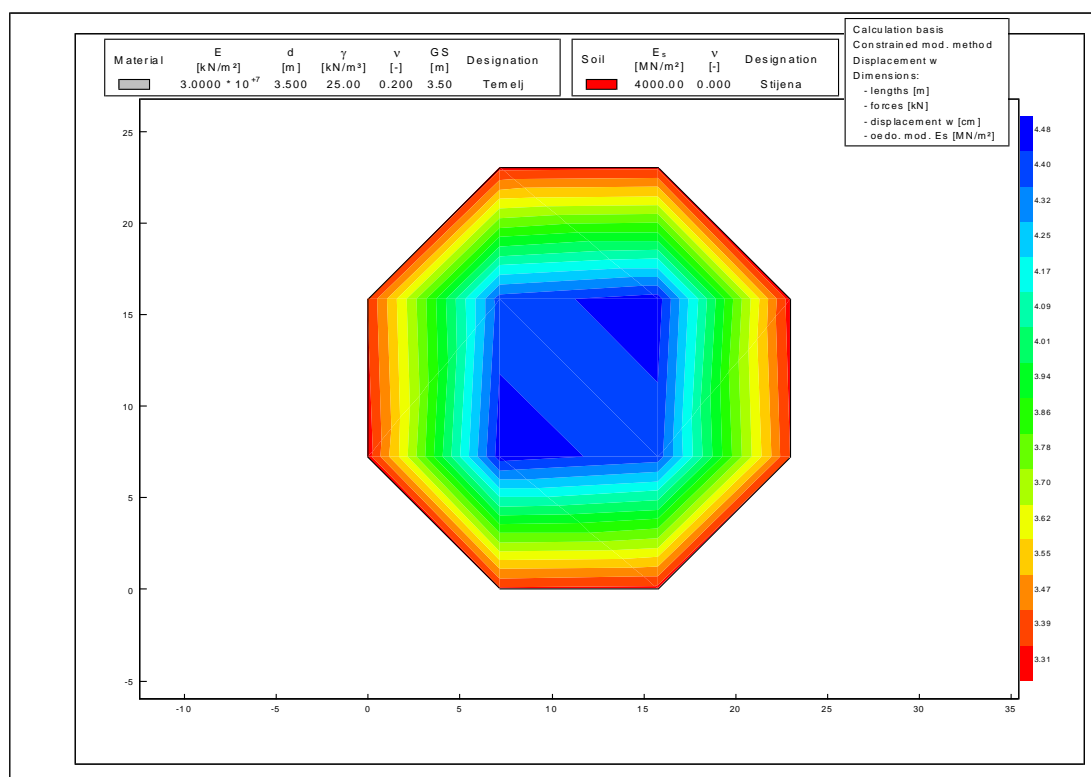
Na navedeni način uneseni su svi podaci i za preostale kombinacije, 29(C) i 30(C), te su dobiveni rezultati navedeni i prikazani dalje u tekstu.

Rezultati dobiveni u programu GGU-Slab za kombinacije 28(C), 29(C) i 30(C) prikazani su na sljedećim stranicama te je na kraju dana *Tablica 19* s dobivenim maksimalnim vrijednostima slijeganja.

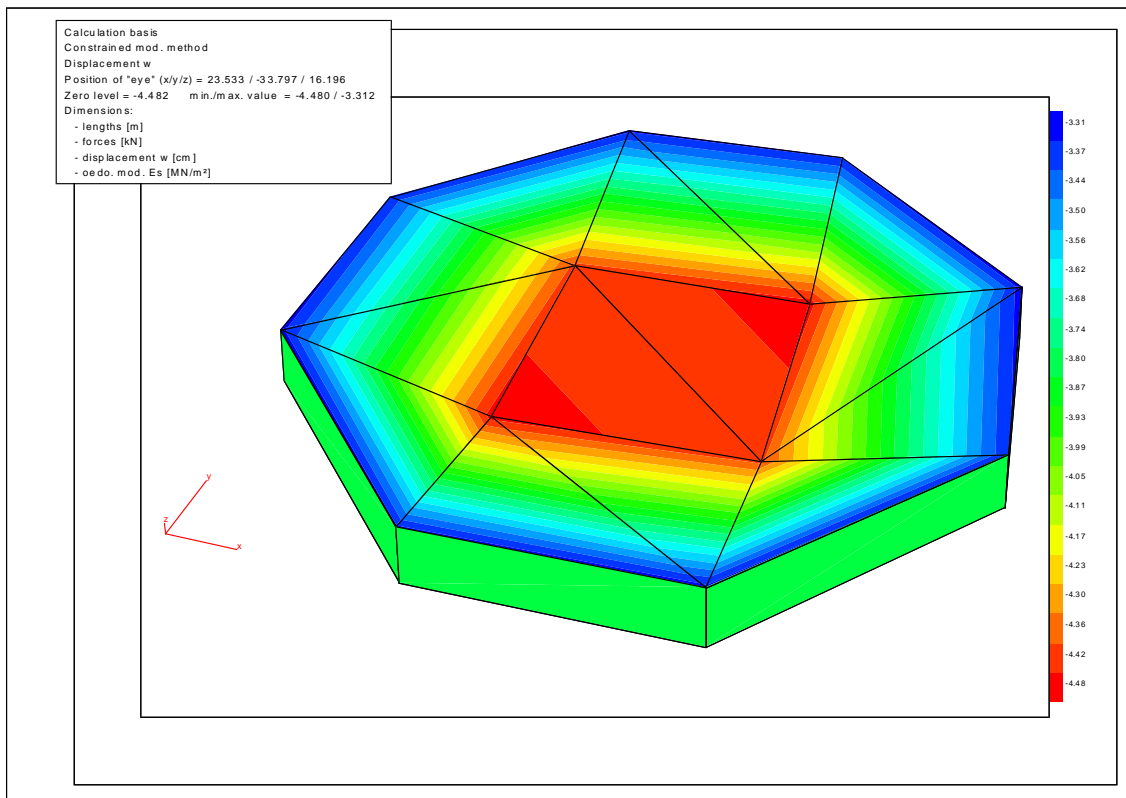
Temelj je proračunat sa promjenjivim koeficijentom reakcije podloge. Rezultati su prikazani tlocrtno, u boji, s grafičkim prikazom karakteristika materijala temelja, materijala okolnog tla te s dobivenim slijeganjima u svim zonama, različito obojenih ovisno o njihovim vrijednostima. Također dati je grafički 3D prikaz na kojem se vizualno može vidjeti odnos slijeganja temelja po određenim zonama i koeficijent reakcije podloge određen od strane programa. (Slika 85-Slika 93)

Svi rezultati slijeganja prikazani su u centimetrima (cm), a koeficijenti reakcije podloge MN/m^2 .

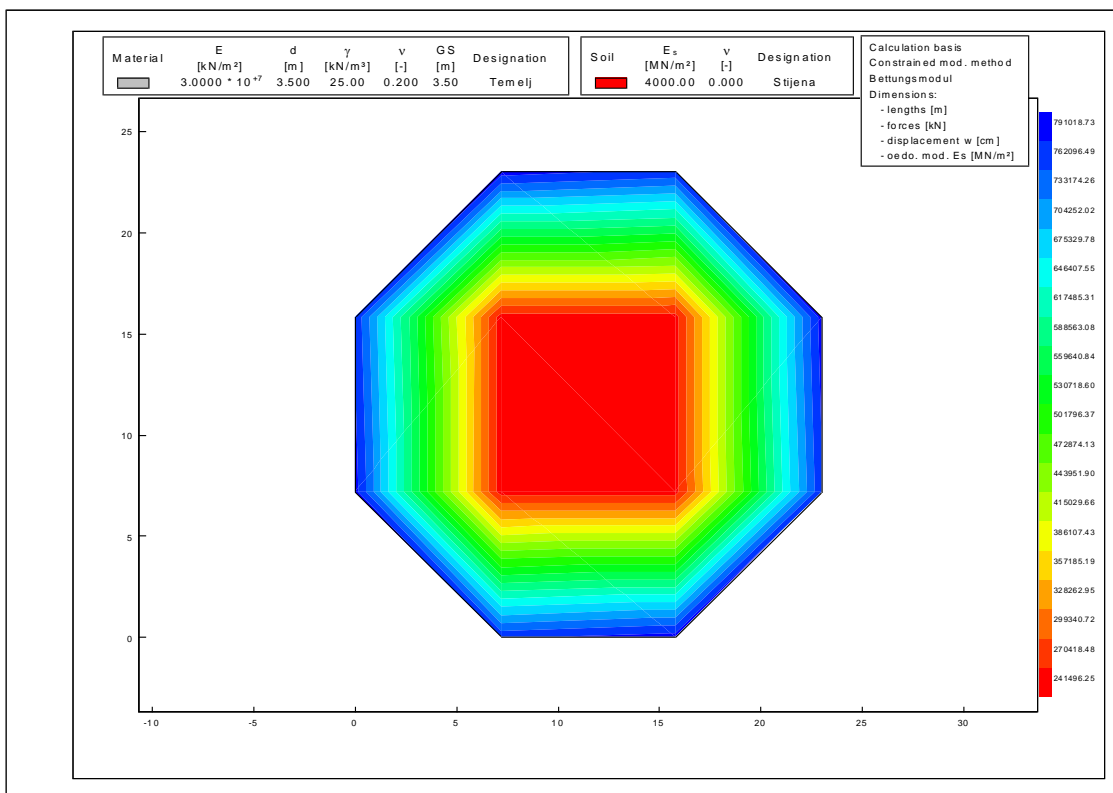
Kombinacija 28 (C):



Slika 85. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 28

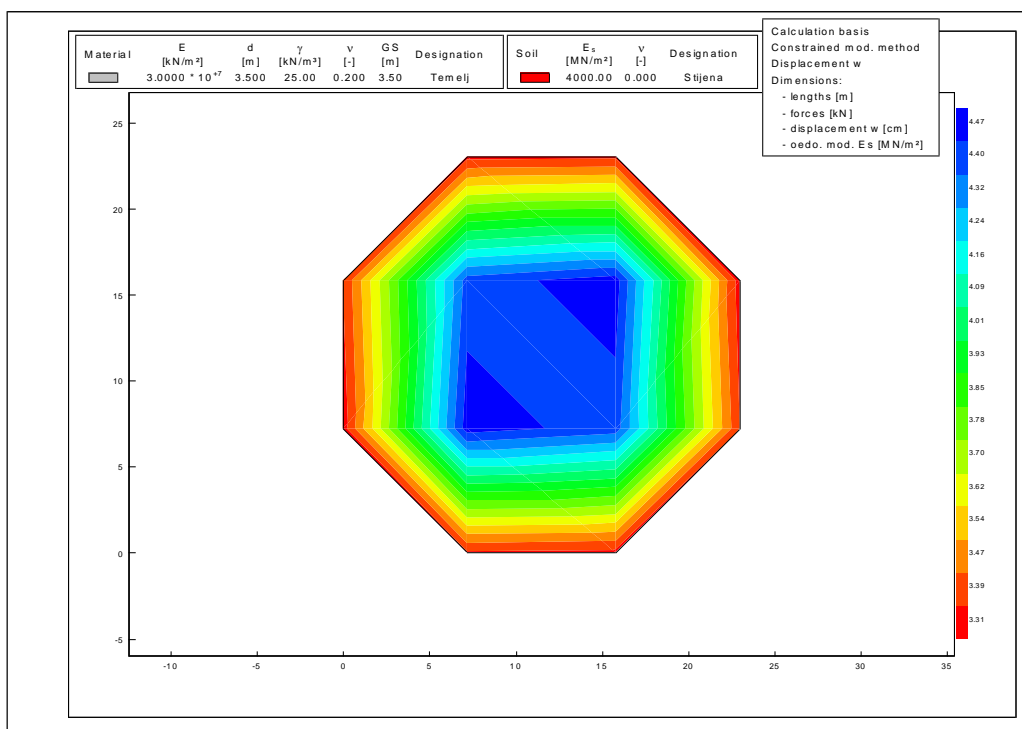


Slika 86. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijezanja za kombinaciju 28 – 3D prikaz

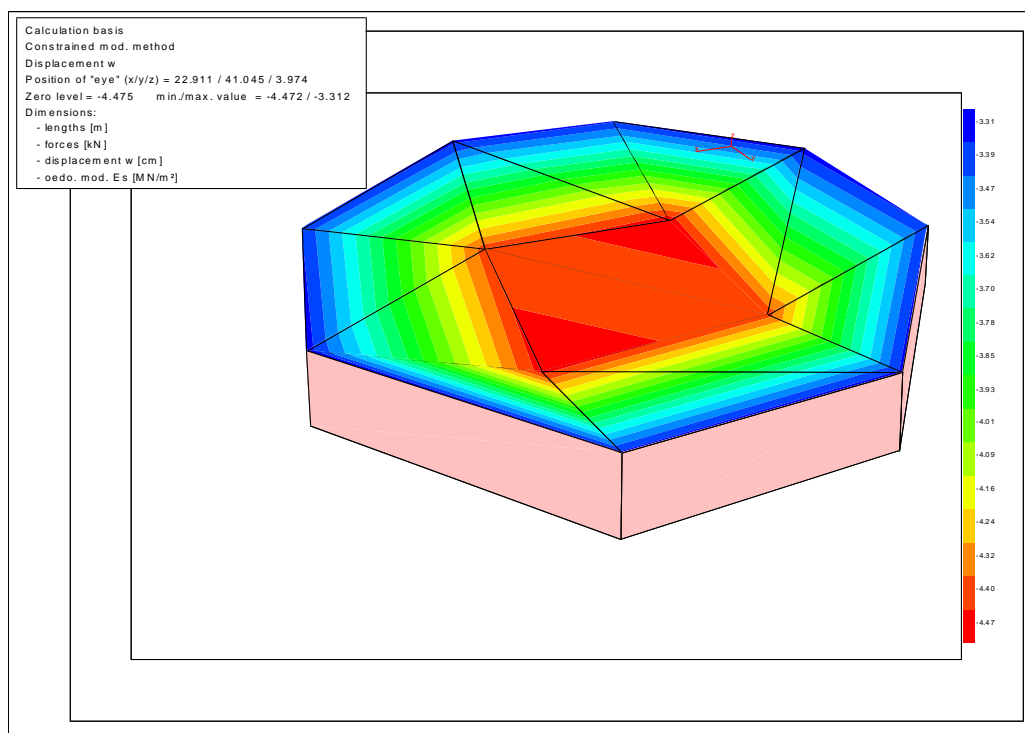


Slika 87. Koeficijent reakcije podloge za kombinaciju 28(C)

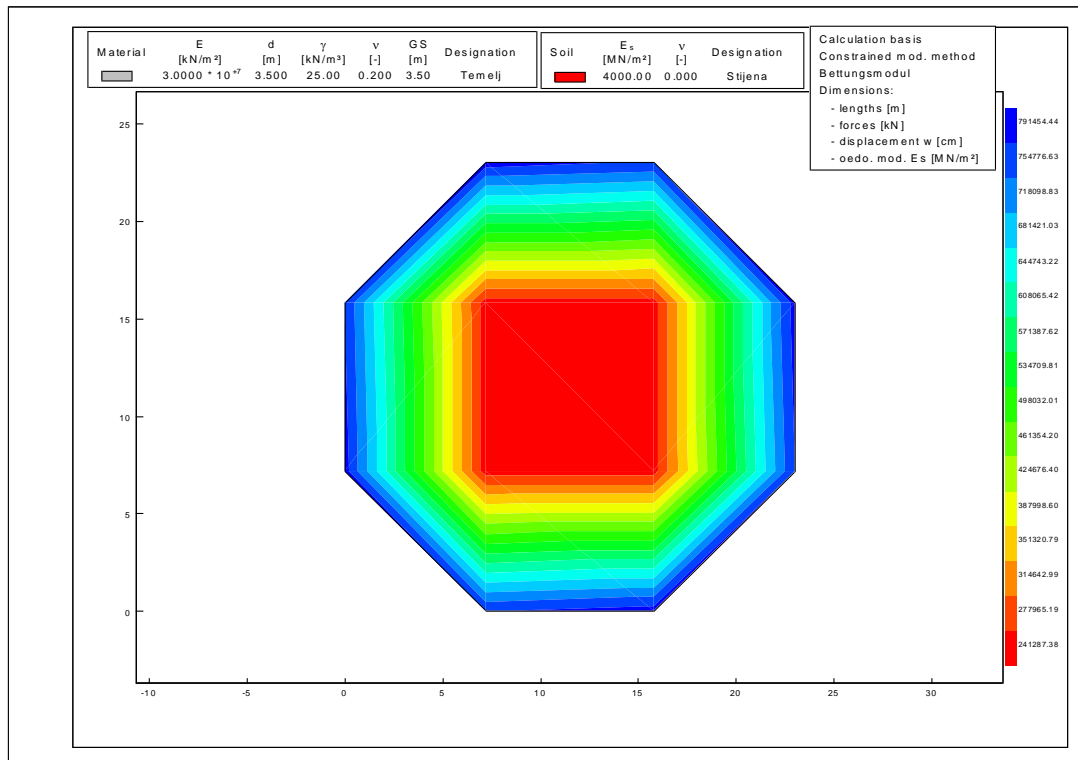
Kombinacija 29 (C):



Slika 88. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 29

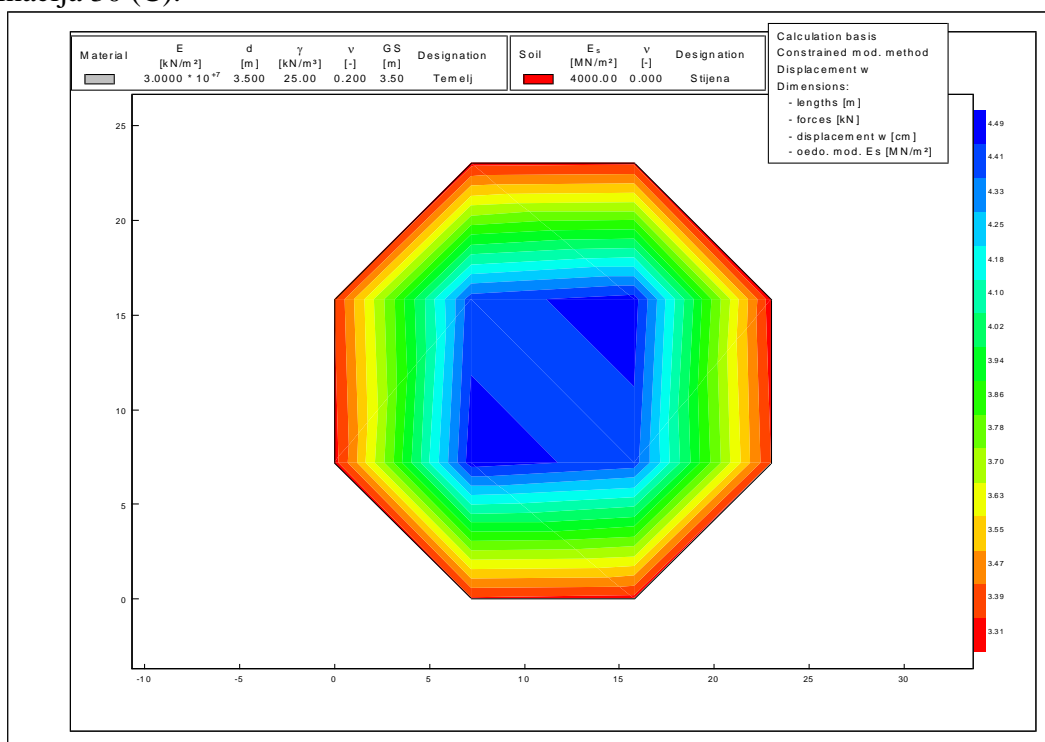


Slika 89. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 29 – 3D prikaz

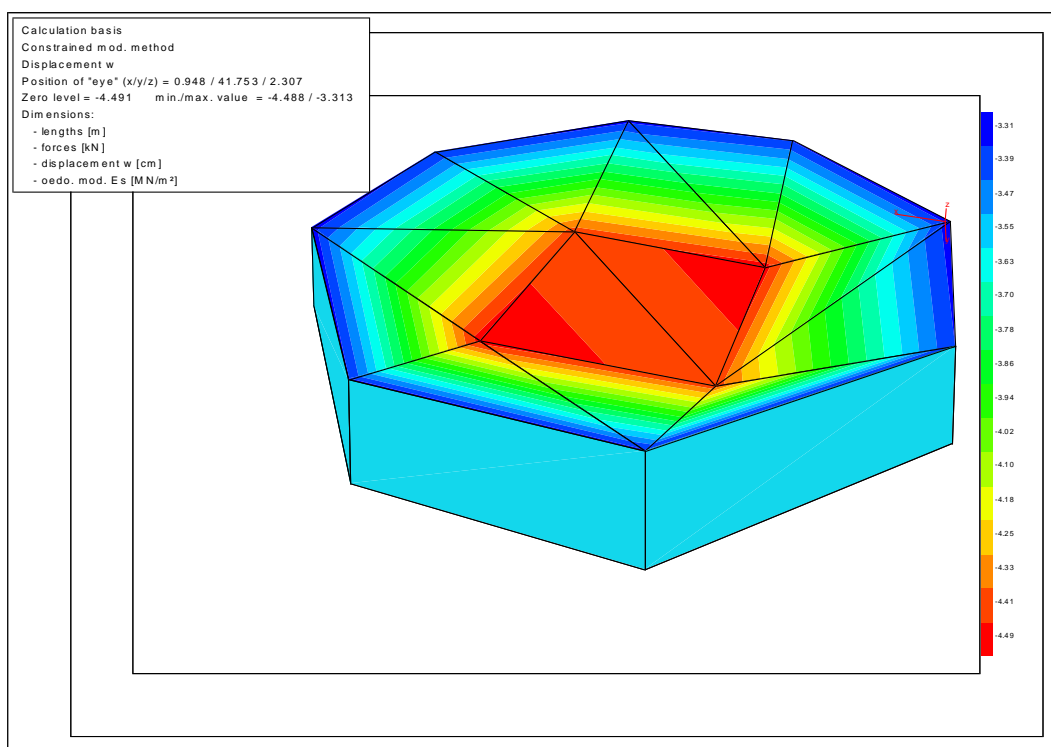


Slika 90. Koeficijent reakcije podloge za kombinaciju 29(C)

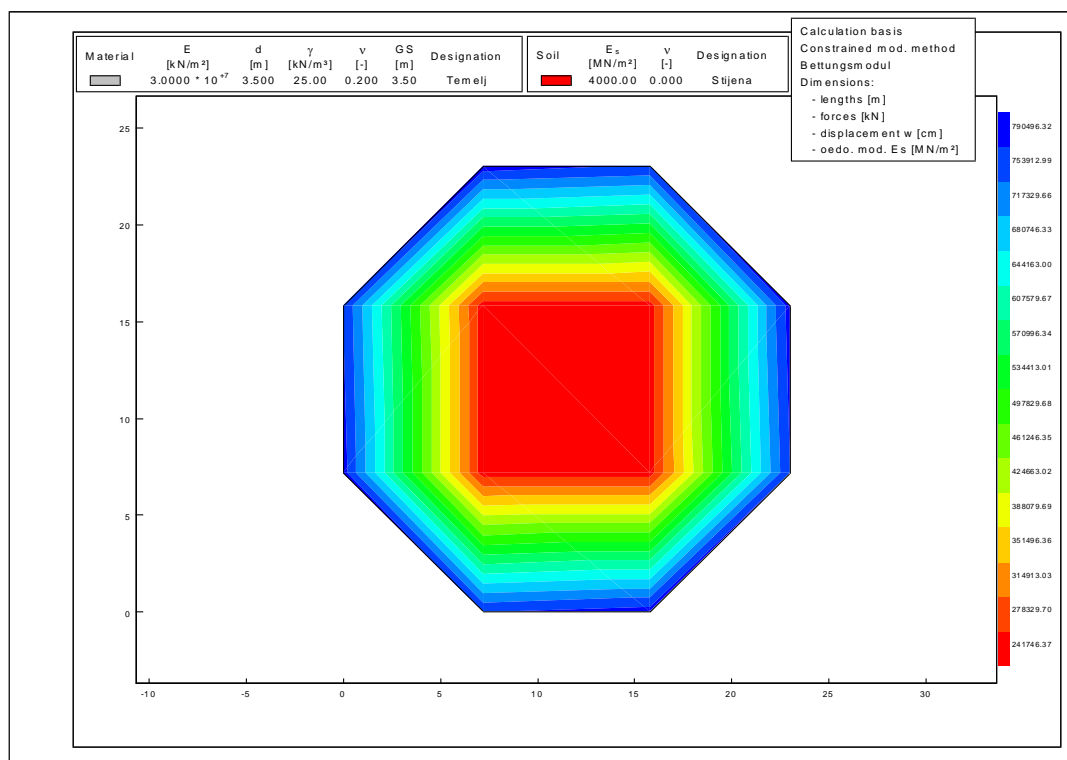
Kombinacija 30 (C):



Slika 91. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 30



Slika 92. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 30 – 3D prikaz



Slika 93. Koeficijent reakcije podloge za kombinaciju 30(C)

Sa Slika 85., 88. i 91. vidljivo je da se maksimalno slijeganje javlja u kombinaciji 30 i iznosi oko 4.49 cm, što je i očekivano uzimajući u obzir da se temeljenje vrši u sloju zdrave stijene krutosti 4 GPa.

Tablica 19. Rezultati proračuna slijeganja u programu GGU-Slab za granično stanje uporabivosti

Kombinacija	Maksimalno slijeganje (cm)
28(C)	4.48
29(C)	4.47
30(C)	4.49

12. USPOREDBA SA KRUŽNIM TEMELJEM

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu napravio je za istoimeni projekt, varijantu rješenja, Građevinski projekt vjetroagregata s kružnim temeljem. Karakteristike tla i pozicija izvođenja su jednake, kao i proračunske situacije. Karakteristike odabranog kružnog temelja dane su na sljedećoj stranici.

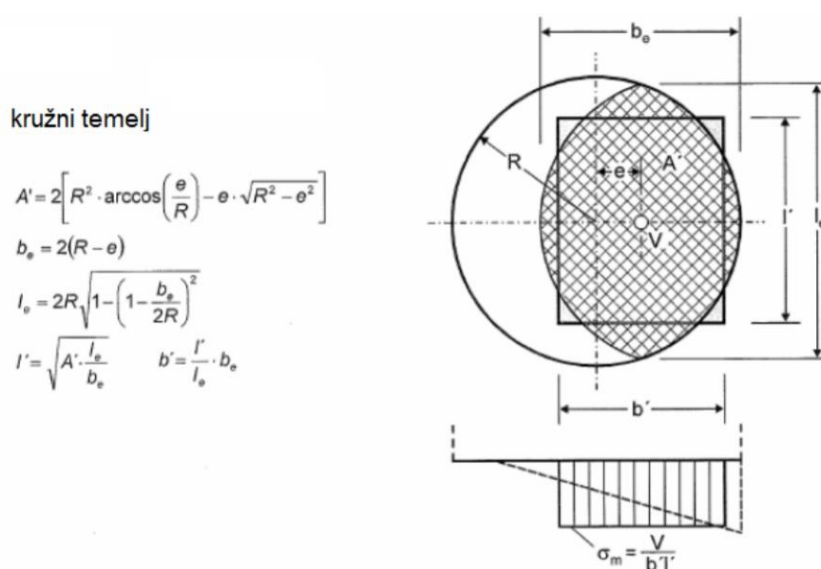
Za 17 proračunskih situacija s različitim kombinacijama stalnih i prolaznih opterećenja te statičkih i dinamičkih uvjeta, provedena je analiza nosivosti temeljnog tla ispod karakterističnog temelja vjetroagregata s definiranim geotehničkim profilom, jednakim kao u slučaju osmerokutnog temelja, i uvjetima temeljenja, proračun prevrtanja i klizanja i proračun slijeganja. Predmetni je projekt obavljen prema smjernicama iz važećih normi za geotehničko projektiranje: HRN EN 1997-1:2012 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje - 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004+AC:2009), nacionalni dodatak prethodnoj normi HRN EN 1997-1:2012/NA:2012 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje - 1. dio: Opća pravila - Nacionalni dodatak. [44]

Temelj se izvodi kružnog oblika, promjera 23 m i visine 3.5 m, koji se prema vrhu smanjuje do promjera 5.5 m, te je cijeli ukopan u stijenu (Slika 101.). Promjer temelja uvjetovan je položajem rezultante svih sila koje na njega djeluju, kako je kasnije u proračunima prikazano. [44]

Za svaki proračun dana je usporedba dobivenih rezultata s osmerokutnim temeljem te analiza rješenja.

12.1. PRORAČUN NOSIVOSTI TEMELJNOG TLA

Proračun je također proveden pomoću programa GGU-Footing, te se provodi prema jednadžbama razvijenim za pravokutni temelj, a odabir ekvivalentnih dimenzija pravokutnog temelja za odgovarajući kružni temelj dane su na Slici 94. Odabrana je metoda pri kojoj se zadržava moment inercije temelja pa se na temelju toga biraju dimenzije kvadratnog oblika temelja. Za promjer kružnog temelja od 23 m, dobiven je kvadratni presjek dimenzija 20.15 m, čija je površina 2.28% manja od površine ekvivalentnog kružnog temelja..



Slika 94. Ekvivalentna površina za kružni temelj [44]

Usporedba ekvivalentnih površina kružnog i osmerokutnog temelja dane su u *Tablici 20*.

Tablica 20. Usporedba ekvivalentne površine kružnog i osmerokutnog temelja

	KRUŽNI TEMELJ	OSMEROKUTNI TEMELJ
PROMJER/ STRANICE	23 m	a=860 m, b= 1018.23 m
KVADRATNI PRESJEK	20.15 m	20.7 m
ODABRANE DIMENZIJE STRANICE	20.15 m	20 m

Za promjer kružnog temelja od 23 m, dobiven je kvadratni presjek dimenzija 20.15 m, čija je površina 2.28% manja od površine ekvivalentnog kružnog temelja. Za dimenzije osmerokutnog temelja a=860 m, b= 1018.23 m, dobiven je kvadratni presjek dimenzija 20.7 m, čija je površina

0.99% veća od površine ekvivalentnog osmerokutnog temelja. Odabrana dimenzija stranica jest 20 m, čija je površina 0.94% manja od površine ekvivalentnog osmerokutnog temelja.

Kod osmerokutnog temelja odabrana je manja dimenzija kvadratnog presjeka za ekvivalentu površinu od dimenzija kružnog temelja. Odabirom manjih dimenzija posljedično uzrokuje veću stranu sigurnosti jer je proračun proveden na manjoj površini koja mora preuzeti predviđena opterećenja, a u stvarnosti će se temeljiti na većoj površini.

Dobiveni rezultati faktora sigurnosti za svaku kombinaciju opterećenja, za oba temelja, prikazana su u sljedećoj *Tablici 21*.

Tablica 21. Usporedba faktora sigurnosti osmerokutnog i kružnog temelja

	OSMEROKUTNI	KRUŽNI
KOMBINACIJA	F _{s,osm}	F _{s,kružni}
22 (C)	24.39	29.40
23 (C)	23.81	28.60
24 (C)	21.28	25.60
25 (C)	28.57	34.50
26 (C)	28.57	33.30
27 (C)	24.39	27.80
28 (C)	32.26	40.00
29 (C)	32.26	38.50
30 (C)	25.00	28.60
33 (C) (CQC)	43.48	52.60
34 (C) (CQC)	40.00	50.00
35 (C) (CQC)	37.04	47.60
36 (C) (CQC)	41.67	52.60
37 (C) (CQC)	41.67	50.00
38 (C) (CQC)	38.46	47.60
39 (C) (CQC)	38.46	47.60
40 (C) (CQC)	37.04	47.60

Iz *Tablice 21.* i *Dijagrama 2.* može se uočiti da su za osmerokutni temelj dobiveni manji faktori sigurnosti nego za kružni. Međutim također je uzeta manja dimenzija kvadratnog presjeka, čime smo na većoj strani sigurnosti, a faktori sigurnosti su daleko veći od propisa dozvoljenih. Prema

Eurokodu najmanji faktor sigurnosti ne smije biti manji do 1, a ovdje je najmanji faktor sigurnosti osmerokutnog temelja za kombinaciju 24(C) i on iznosi

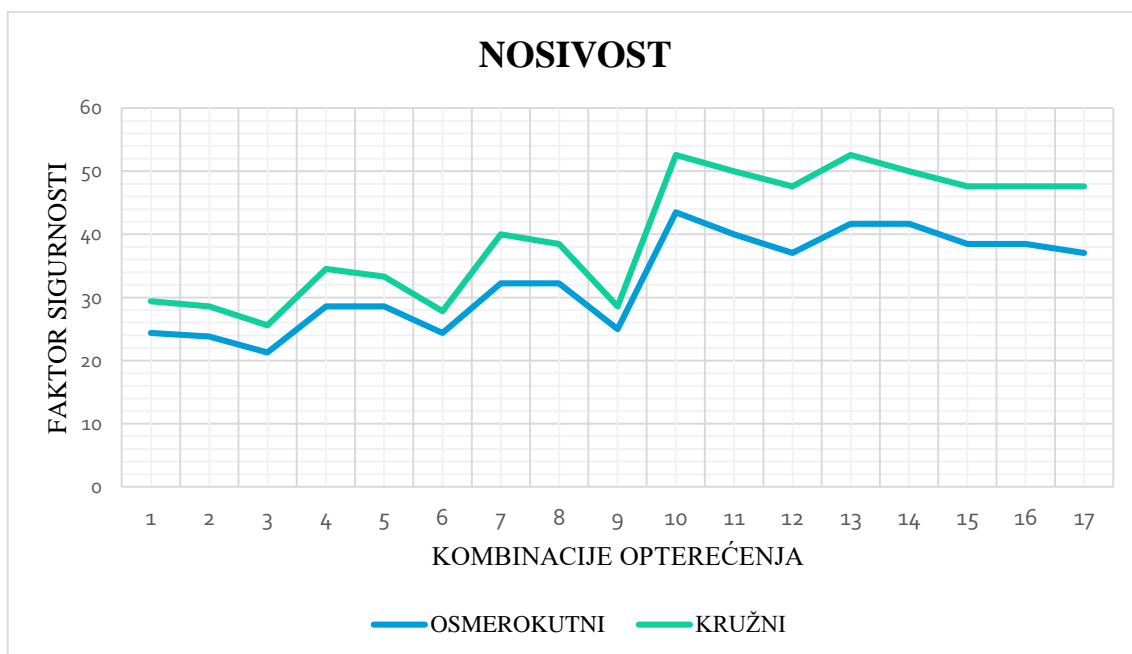
$$F_s = 21.28 .$$

Najmanji faktor sigurnosti kod kružnog temelja je također za kombinaciju 24(C) i on iznosi

$$F_s = 25.60 .$$

Može se zaključiti da temelj zadovoljava proračun nosivosti s manjim dimenzijama efektivne površine.

Dijagram 2. Usporedba faktora sigurnosti za proračun nosivosti



12.2. PRORAČUN PREVRTANJA TEMELJA

Kod proračuna prevrtanja također su uspoređivani stabilizirajući momenti s destabilizirajućim momentima te su pri tome faktorizirani s odgovarajućim parcijalnim faktorima iz skupine za granično stanje EQU – 0.9 za trajna i povoljna djelovanja, 1.1 za trajna nepovoljna, 1.5 za prolazna nepovoljna te 0 za prolazna povoljna. Iz istog razloga, radi nesigurnosti uzroka opterećenja od proizvođača, ona su uzeta kao prolazna te se množe s faktorom 1.5. Uzeta je maksimalna vrijednost rezultante horizontalnih sila. Kod proračuna otpornosti na prevrtanje

osmerokutnog temelja otpornost je definirana je težinom temelja, težinom zasipa i vertikalnom silom F_z te krakom tih sila do najudaljenijeg dijela temelja. Taj krak iz geometrije temelja iznosi $k = 12.27$ m.

Dobiveni rezultati faktora sigurnosti za svaku kombinaciju opterećenja, za oba temelja, prikazana su u sljedećoj *Tablici 22*.

Tablica 22. Faktori sigurnosti za proračun prevrtanja kod osmerokutnog i kružnog temelja

KOMBINACIJA	OSMEROKUTNI		KRUŽNI	
	Fs, zasip	Fs, bez zasipa	Fs, zasip	Fs, bez zasipa
22 (C)	5.98	3.10	4.29	2.42
23 (C)	5.35	2.77	3.83	2.16
24 (C)	2.84	1.47	2.04	1.15
25 (C)	5.98	3.10	4.29	2.42
26 (C)	5.35	2.77	3.83	2.16
27 (C)	2.84	1.47	2.04	1.15
28 (C)	5.98	3.10	4.29	2.42
29 (C)	5.35	2.77	3.83	2.16
30 (C)	2.84	1.47	2.04	1.15
33 (C) (CQC)	23.95	12.42	55.93	31.56
34 (C) (CQC)	23.95	12.42	14.79	8.34
35 (C) (CQC)	11.09	5.75	8.86	5
36 (C) (CQC)	23.14	12.00	50.72	28.62
37 (C) (CQC)	23.95	12.42	14.4	8.13
38 (C) (CQC)	11.09	5.75	10.98	6.19
39 (C) (CQC)	11.01	5.71	10.82	6.1
40 (C) (CQC)	11.01	5.71	8.84	4.99

Iz *Tablice 22*. i *Dijagrama 3*. može se uočiti da su za osmerokutni temelj dobiveni veći faktori sigurnosti nego za kružni. Gledajući dimenzije temelja kao i težinu, može se zaključiti da je osmerokutni temelj masivniji od kružnog čime su posljedično i veći faktori sigurnosti. Usporedba dimenzija temelja dana je u *Tablici 23*.

Tablica 23. Usporedba težina temelja

	KRUŽNI	OSMEROKUTNI
TEŽINA TEMELJA	$G_T = 16710,98 \text{ kN}$	$G_T = 20\ 763,5 \text{ kN}$
TEŽINA ZASIPA	$G_Z = 16500,23 \text{ kN}$	$G_Z = 21\ 440,16 \text{ kN}$

Prema Eurokodu najmanji faktor sigurnosti ne smije biti manji do 1, a ovdje je najmanji faktor sigurnosti osmerokutnog temelja za kombinaciju 24(C), 27(C), 30(C) i on iznosi

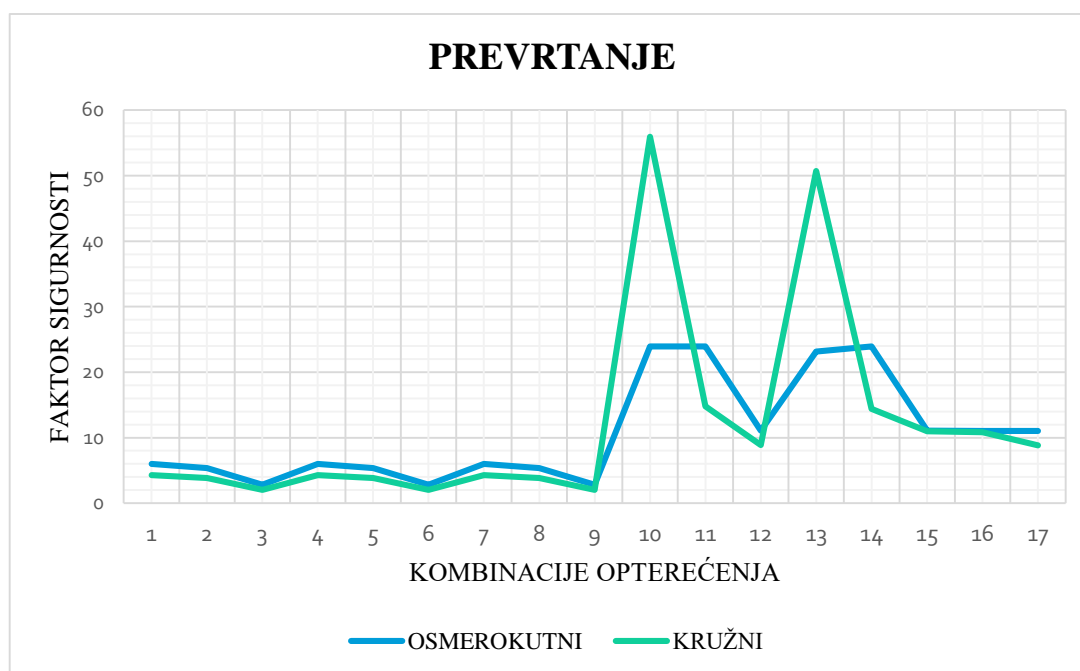
$$F_s = 1.47 .$$

Najmanji faktor sigurnosti kod kružnog temelja je također za kombinaciju 24(C) i on iznosi

$$F_s = 1.15 .$$

Može se zaključiti da temelj zadovoljava proračun na prevrtanje.

Dijagram 3. Usporedba faktora sigurnosti za proračun prevrtanja



12.3. PRORAČUN KLIZANJA TEMELJA

Proračun klizanja kružnog temelja, proveden je uz pretpostavku da su opterećenja od proizvođača prolaznog karaktera, jednako kao i kod prevrtanja. Pri tome se stalno opterećenje od težine stupa, temelja i zasipa množi s faktorom 1.0 i 2/3 tangensa proračunskog kuta trenja (trenje na kontaktu temelja i podloge), a prolazno vertikalno opterećenje od proizvođača s faktorom 0. Prolazno horizontalno opterećenje (koje definira E_d) se množi s faktorom 1.5. Aktivni tlak i pasivni otpor nisu uzeti u obzir te se faktor sigurnosti odnosi na proračun bez njih.

Dobiveni rezultati faktora sigurnosti za svaku kombinaciju opterećenja, za oba temelja, prikazana su u sljedećoj *Tablici 24*.

Tablica 24. Faktori sigurnosti za proračun klizanja osmerokutnog i kružnog temelja

KOMBINACIJA	OSMEROKUTNI		KRUŽNI	
	Fs, zasip	Fs, bez zasipa	Fs, zasip	Fs, bez zasipa
22 (C)	8.60	4.49	6.6	3.6
23 (C)	8.80	4.59	6.8	3.7
24 (C)	7.41	3.86	5.7	3.1
25 (C)	8.60	4.49	6.6	3.6
26 (C)	8.80	4.59	6.8	3.7
27 (C)	7.41	3.86	5.7	3.1
28 (C)	8.60	4.49	6.6	3.6
29 (C)	8.80	4.59	6.8	3.7
30 (C)	7.41	3.86	5.7	3.1
33 (C) (CQC)	34.63	18.05	104	56.1
34 (C) (CQC)	34.63	18.05	22.9	12.4
35 (C) (CQC)	14.83	7.73	12.5	6.8
36 (C) (CQC)	25.96	13.53	48.7	26.3
37 (C) (CQC)	34.63	18.05	18.3	9.8
38 (C) (CQC)	14.83	7.73	16.3	8.8
39 (C) (CQC)	13.87	7.23	14.3	7.7
40 (C) (CQC)	13.87	7.23	12.2	6.6

Iz *Tablice 24.* i *Dijagrama 4.* može se također uočiti da su za osmerokutni temelj dobiveni veći faktori sigurnosti nego za kružni zbog veće težine osmerokutnog temelja prikazano u *Tablici 23.*

Prema Eurokodu najmanji faktor sigurnosti ne smije biti manji do 1, a ovdje je najmanji faktor sigurnosti osmerokutnog temelja za kombinaciju 24(C), 27(C), 30(C) i on iznosi

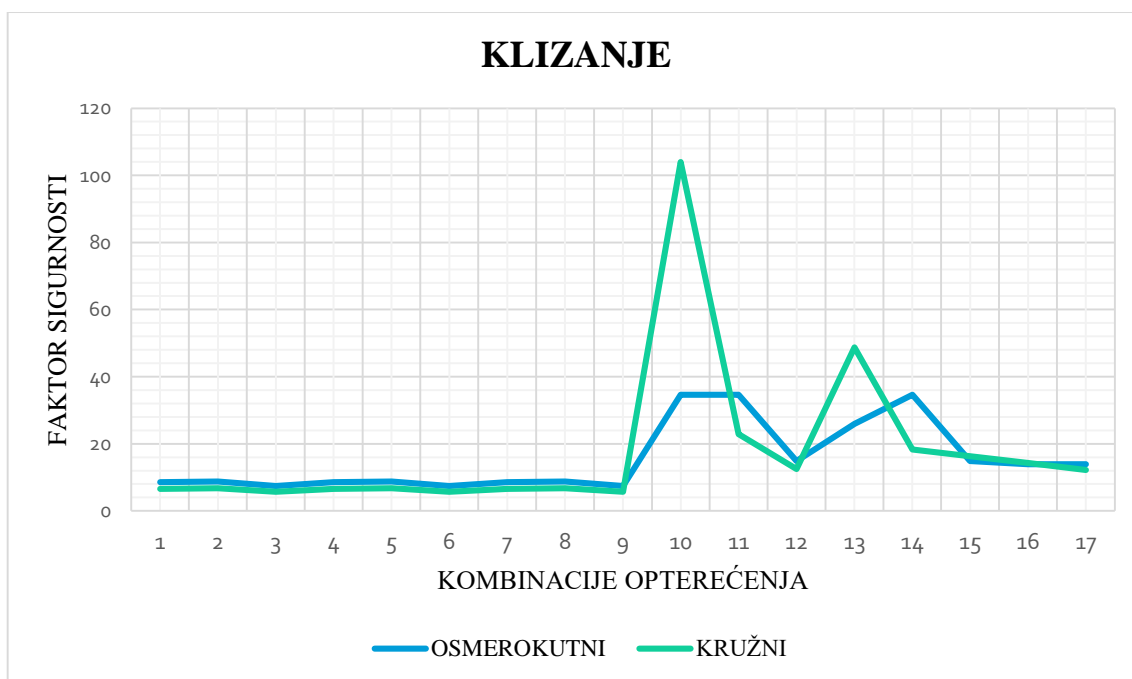
$$F_s = 3.86 .$$

Najmanji faktor sigurnosti kod kružnog temelja je također za kombinaciju 24(C) i on iznosi

$$F_s = 3.1 .$$

Može se zaključiti da temelj zadovoljava proračun klizanja.

Dijagram 4. Usporedba faktora sigurnosti za proračun klizanja



12.4. PRORAČUN SLIJEGANJA TEMELJA

Kontrola slijeganja za kružni temelj također je provedena za 3 kombinacije koje se odnose na granično stanje uporabivosti (kombinacije 28, 29 i 30) u programu GGU-Slab.

Dobiveni rezultati slijeganja temelja za svaku kombinaciju opterećenja, za oba temelja, prikazana su u sljedećoj *Tablici 25*.

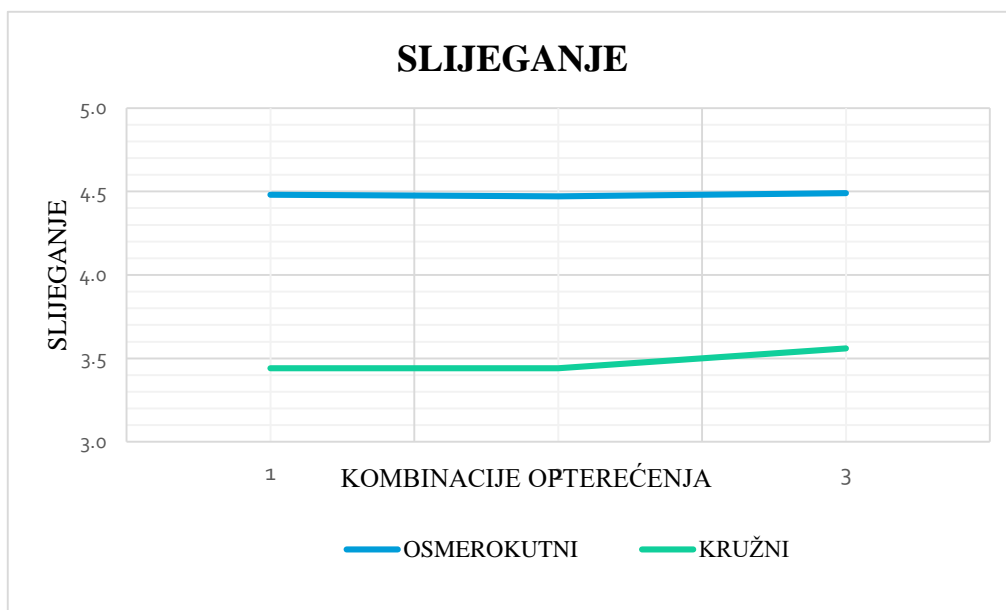
Tablica 25. Usporedba maksimalnog slijeganja temelja

Kombinacija	Maksimalno slijeganje (cm) – kružni temelj	Maksimalno slijeganje (cm) – osmerokutni temelj
28(C)	3.44	4.48
29(C)	3.44	4.47
30(C)	3.56	4.49

Iz *Tablice 25.* i *Dijagrama 5.* može se uočiti da je za osmerokutni temelj dobiveno veće maksimalno slijeganje nego za kružni temelj. Gledajući dimenzije temelja kao i težinu, može se zaključiti da je osmerokutni temelj masivniji od kružnog čime je posljedično veće slijeganje. Usporedba dimenzija temelja dana je u *Tablici 23*.

Maksimalno slijeganje javlja u kombinaciji 30 i iznosi oko 3.56 cm za kružni temelj i 4.49 cm za osmerokutni temelj, uzimajući u obzir da se temeljenje vrši u sloju zdrave stijene krutosti 4 GPa može se zaključiti da ne postoji opasnost od sloma tla uslijed slijeganja te da su dobiveni rezultati zadovoljavajući.

Dijagram 5. Usporedba slijeganja



13. ZAKLJUČAK

Briga o okolišu u današnje vrijeme predstavlja bitan dio društva. S obzirom na brzi razvoj industrije i proizvodnje, potreba za električnom energijom raste u cijelome svijetu. Stari načini proizvodnje pomoću termoelektrana postaju sve manje popularni zbog njihovog štetnog djelovanja na okoliš i dolazi do razvoja novih načina proizvodnje električne energije. Vjetroelektrane su postrojenja koja se sastoje od vjetroagregata koji pomoću energije vjetra proizvode električnu energiju te se ona pomoću elektro-energetske mreže distribuira stanovnicima. Postoji nekoliko vrsta vjetroelektrana, od klasičnih kopnenih do priobalnih i plutajućih. Osnovna podjela vjetroagregata je na vjetroagregate s vertikalnom i horizontalnom osi rotora, a postoje i suvremena rješenja kao što su solarni stupovi i energetske brodovi. Svaki od vjetroagregata određene vjetroelektrane temeljen je na masivnoj armirano betonskoj temeljnoj konstrukciji.

Cilj ovoga istraživanja je bio određivanje optimalnog oblika temelja vjetroagregata na primjeru planiranih vjetroelektrana Zadar 2 i Zadar 3 u općini Benkovac. U tu svrhu proveden je proračun mehaničke otpornosti i stabilnosti te uporabljivosti nekoliko temelja različitog poprečnog presjeka i približno iste ekvivalentne površine. Ustanovljeno je da je optimalan osmerokutni oblik poprečnog presjeka temelja ukupne širine 23 metra i debljine 3,5 metra.

Proračun nosivosti i slijeganja proveden je u programskom paketu GGU (Footing i Slab), a za analizu proračun prevrtanja i klizanja razvijeni su algoritmi za tablični proračun u programu Microsoft Excel. Proračun slijedi Europsku normu za geotehničko projektiranje – Eurokod 7. Rezultati proračuna za osmerokutni temelj uspoređeni su s rezultatima proračuna za kružni temelj približno iste površine koji se standardno primjenjuje u geotehničkoj praksi za temeljenje vjetroagregata. Zbog toga što se vjetroagregat temelji na stjenovitom tlu velike krutosti i čvrstoća, u svim proračunima su veliki faktori sigurnosti na nosivost i mala slijeganja. Uspoređeni su faktori sigurnosti na klizanje i prevrtanje. Osmerokutni temelj daje veće faktore sigurnosti na klizanje i prevrtanje.

Dakle, za temeljenje vjetroagregata vjetroelektrana Zadar 2 i Zadar 3 optimalno je, umjesto kružnog, koristiti osmerokutni temelj približno iste ekvivalentne površine kao i kružni. Takav temelj daje veće faktore sigurnosti za prevrtanje i klizanje, a faktori sigurnosti za nosivost su zadovoljavajući te puno veći od 1.

ZAHVALA

Veliku zahvalnost dugujemo mentorici doc.dr.sc. Lovorki Librić, dipl. ing. građ. na vodstvu, vrijednim savjetima i kritikama, izuzetnom zalaganju, uloženom trudu, vremenu i strpljenju uloženom u ovaj projekt te usmjeravanju tijekom cijele izrade rada.

Hvala i svima koji su na indirektan način potpomogli pisanju ovoga rada.

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer kopnene vjetroelektrane [1]	2
Slika 2. Zbog vjetroturbina godišnje pogine milijun ptica [3]	2
Slika 3. Primjer priobalne vjetroelektrane [1]	3
Slika 4. Drevna vjetroturbina za mljevenje žita [4]	5
Slika 5. Heronova vjetrenjača koja je pokretala orgulje [3].....	6
Slika 6. Perzijska vodoravna vjetrenjača [3]	6
Slika 7. Nizozemske vjetrenjače Kinderdijlka [3]	7
Slika 8. Vjetroagregat Chalresa Brusha iz 1888. [5].....	8
Slika 9. Prof. Poul La Cour ispred svoje eksperimentalne vjetroturbine [5]	8
Slika 10. Vjetroelektrana Roscoe- druga najveća kopnena vjetroelektrana u svijetu [3]	9
Slika 11. Priobalna vjetroelektrana Lillgrund (Švedska) [9].....	10
Slika 12. Plutajući vjetroagregat Hywind [9].....	10
Slika 13. Primjer visinske vjetroelektrane [9]	11
Slika 14. Vjetropark Gansu u Kini [9]	11
Slika 15. London Array [9]	12
Slika 16. Quiet Revolution vjetroagregat [9]	12
Slika 17. Vjetroagregat "vilin konjic" [9]	13
Slika 18. Vjetroelektrane u Europi [8]	14
Slika 19. Farme vjetroelektrana u Europi [10].....	15
Slika 20. Vodeći proizvođači vjetroturbina u svijetu [10]	16
Slika 21. Nivelirani troškovi energije za najčešće izvore električne energije [11]	17
Slika 22. Šest od sedam vjetroagregata iz sustava Vjetroelektrane Ravne 1 na Pagu [7].....	18
Slika 23. Dijelovi vjetroagregata [12]	20
Slika 24. Vjetroagregat s horizontalnom osi rotora [12].....	21
Slika 25. Darrieusova turbina [12]	22
Slika 26. Savoniusova turbina [12]	23
Slika 27. Solarni stup koji provodi vjetar [12]	24
Slika 28. MicroBelt [12].....	24
Slika 29. Windcell Panel [12]	25
Slika 30. Odnos visine vjetroagregata i drugih elemenata ekosustava [15].....	30
Slika 31. Primjer preopterećenog krajolika [15]	31
Slika 32. Smjernice za smještaj vjetroelektrane u okoliš (a) [15].....	32
Slika 33. Smjernice za smještaj vjetroelektrane u okoliš (b) [15].....	32
Slika 34. Smjernice za smještaj vjetroelektrane u okoliš (c) [15].....	32
Slika 35. Osnovni pojmovi kod temelja	40
Slika 36. Plitko temeljenje	41
Slika 37. Model plastičnog sloma ispod plitkog temelja [30].....	42
Slika 38. Terzagijev model.....	43
Slika 39. Oblik sloma tla prema Terzagiju [31]	44
Slika 40. Nosivost tla ispod centrično opterećene temeljne trake [30]	44

Slika 41. Usporedba Mayerhofovog i Terzaghijevog rješenja [38]	45
Slika 42. Nosivost oko jezgre poprečnog presjeka za kružni temelj [18]	46
Slika 43. Djelovanje horizontalnog i vertikalnog opterećenja na temelj [18].....	46
Slika 44. Raspodjela naprezanja [30]	47
Slika 45. Kontaktno naprezanje	48
Slika 46. Kontaktno normalno naprezanje trend raspodjele [29].....	49
Slika 47. Klizanje temelja [30].....	51
Slika 48. Kruti i fleksibilni temelj samac [30]	52
Slika 49. Utjecaj krutosti temelja na kontaktu s temeljnom plohom, a) kruti temelj, b)fleksibilni temelj	52
Slika 50. Karakteristične točke prema Kanny-u [31]	53
Slika 51. Raspodjela dodatnog naprezanja po Steinbrenneru u rubnoj točki temelja [31]	54
Slika 52. Širenje dodatnih naprezanja u tlu [30]	54
Slika 53. Prevrtnje vjetroagregata [23].....	56
Slika 54. Promjena koeficijenta bočnog naprezanja s pomakom zida [25]	58
Slika 55. Prikaz djelovanja na temelj vjetroagregata potrebnih za uzeti u obzir prilikom proračuna na prevrtanje [18]	59
Slika 56. a) Oblik baze temelja b) Poprečni presjek temelja [21].....	60
Slika 57. Vrste temelja vjetroagregata [18].....	61
Slika 58. Presjek gravitacijskog temelja [34].....	61
Slika 59. Smještaj novih vjetroagregata na lokaciji Zadar 2 [35]	62
Slika 60. Smještaj novih vjetroagregata vjetroelektrane Zadar 3 [36].....	63
Slika 61. Seizmička karta područja [35] [36].....	64
Slika 62. Područje primjene geofizičkih i geotehničkih metoda [37]	65
Slika 63. P i S seizmički valovi [37]	66
Slika 64. Površinski posmični valovi [37]	67
Slika 65. Princip ispitivanja medija metodom sseizmičke refrakcije [37].....	68
Slika 66. Registracija nailaska seizmičnog vala [37]	69
Slika 67. Primjer određivanja granice slojeva metodom seizmičke refrakcije	70
Slika 68. Princip rada georadara [38].....	70
Slika 69. Primjer GPR profila [38].....	71
Slika 70. Dubina penetracije GPR uređaja za rane frekvencije u vapnenačkoj stijeni [38].....	72
Slika 71. Primjer refrakcijskog profila za VA-12, Zadar 3 [36]	73
Slika 72. Legenda seizmičkog profila [36]	73
Slika 73. Primjer GPR profila za VA -11, Zadar 3 [36].....	74
Slika 74. Legenda za GPR profile [36]	74
Slika 75. Izgled terena na mjestu vjetroagregata VA- 11, Zadar 3 [36]	75
Slika 76. Površina odabranog osmerokutnog temelja	85
Slika 77. Odabrani ekvivalentni kvadrat od površine osmerokutnog temelja.....	86
Slika 78. Tlocrt, nacrt i bokocrt temelja u Rhinocerosu.....	87
Slika 79. 3D prikaz temelja	87
Slika 80. Geometrija temelja: a) presjek b) tlocrt	89
Slika 81.Zadavanje djelovanja u GGU-Footing za kombinaciju 22 (C)	91

Slika 82. Rezultat proračuna nosivosti temeljnog tla za kombinaciju 22	92
Slika 83. Model temelja sa zadanim bušotinama, parametrima tla i karakteristikama temelja	99
Slika 84. Model temelja s unesenim opterećenjima	99
Slika 85. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 28.....	100
Slika 86. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 28 – 3D prikaz	101
Slika 87. Koeficijent reakcije podloge za kombinaciju 28(C)	101
Slika 88. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 29.....	102
Slika 89. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 29 – 3D prikaz	102
Slika 90. Koeficijent reakcije podloge za kombinaciju 29(C)	103
Slika 91. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 30.....	104
Slika 92. Model temelja s podacima o proračunu i prikazanim konturama slijeganja za kombinaciju 30 – 3D prikaz	104
Slika 93. Koeficijent reakcije podloge za kombinaciju 30(C)	105
Slika 94. Ekvivalentna površina za kružni temelj [44]	107

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kriterij za utvrđivanje veličine potrebnog prostora ispitivanja za postrojenje vjetroelektrane[16]	36
Tablica 2. Parcijalni faktori sigurnosti prema Eurokodu 7	50
Tablica 3. Parcijalni koeficijenti za prevrtanje - EQU	56
Tablica 4. Karakteristični parametri materijala	78
Tablica 5. Proračunski pristupi.....	79
Tablica 6. Parcijalni faktori	79
Tablica 7. Dobivene proračunske vrijednosti materijala.....	80
Tablica 8. Provjera stabilnosti za 5 graničnih stanja nosivosti metodom parcijalnih koeficijenata (Eurokod, Ivšić 2006.) [40]	81
Tablica 9. Granično stanje STR i GEO: parcijalni koeficijenti za djelovanja i učinke djelovanja (za oznake A1 i A2) (Eurokod, Ivšić 2006).....	82
Tablica 10. Osnovni slučajevi opterećenja i reakcije na vrhu temelja	82
Tablica 11. Karakteristične kombinacije djelovanja i reakcije na vrhu temelja	83
Tablica 12. Proračunske kombinacije djelovanja i reakcije na vrhu temelja.....	84
Tablica 13. Težine temelja i zasipa	88
Tablica 14. Faktori sigurnosti za nosivost temeljnog tla pod različitim kombinacijama opterećenja i položaj rezultante unutar jezgri poprečnog presjeka	93
Tablica 15. Proračunske vrijednosti djelovanja za proračun prevrtanja	94
Tablica 16. Faktori sigurnosti za prevrtanje po EQU.....	95
Tablica 17. Proračunske vrijednosti djelovanja za proračun klizanja	96
Tablica 18. Faktori sigurnosti za klizanje po EC7 - PP3	97
Tablica 19. Rezultati proračuna slijeganja u programu GGU-Slab za granično stanje uporabivosti	105
Tablica 20. Usporedba ekvivalentne površine kružnog i osmerokutnog temelja.....	107
Tablica 21. Usporedba faktora sigurnosti osmerokutnog i kružnog temelja.....	108
Tablica 22. Faktori sigurnosti za proračun prevrtanja kod osmerokutnog i kružnog temelja	110
Tablica 23. Usporedba težina temelja	111
Tablica 24. Faktori sigurnosti za proračun klizanja osmerokutnog i kružnog temelja	112
Tablica 25. Usporedba maksimalnog slijeganja temelja	114

POPIS DIJAGRAMA

Dijagram 1. Godišnja smrtnost ptica u Americi ovisno o uzroku [13]	27
Dijagram 2. Usporedba faktora sigurnosti za proračun nosivosti	109
Dijagram 3. Usporedba faktora sigurnosti za proračun prevrtanja	111
Dijagram 4. Usporedba faktora sigurnosti za proračun klizanja	113
Dijagram 5. Usporedba slijeganja	115

LITERATURA

- [1] Kuzmić, S.(2018) 'Vjetroelektrane – najperspektivniji izvor energije budućnosti, ali i značajan izvor električne energije sadašnjosti', *Hrvatska katolička mreža*, 9.rujna[Online]
Dostupno:
<https://hkm.hr/zeleni-biseri/vjetroelektrane-najperspektivniji-izvor-energije-buducnosti-ali-i-znacajan-izvor-elektricne-energije-sadasnjosti/>
(Pristupljeno: 26. velječe 2020.)
- [2] Hrvatska književna enciklopedija (2020) Zagreb, Leksikografski zavod "Miroslav Krleža" [Online]
Dostupno:
<https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=64999> (Pristupljeno: 26.veljače 2020.)
- [3] Linta, S. (2015.) *Vjetroelektrane u Hrvatskoj*, Završni rad, Stručni studij strojarstva, Veleučilište u Karlovcu
- [4] Đurišić, Ž. (2019.) 'Vjetroelektrane', *Univerzitet u Beogradu*, [Online]
Dostupno: <https://www.knjizara.com/pdf/155296.pdf> (Pristupljeno: 15. travnja 2020.)
- [5] Filajdić, M. (2018.) *Pouzdanost vjetroagregata u kritičnoj fazi rada*, Diplomski rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku [Online]
Dostupno:<https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A1725/datastream/PDF/view>
(Pristupljeno: 15. travnja 2020.)
- [6] Šimić, Ž. (2010.) 'Korištenje vjetra za proizvodnju električne energije', [Predavanje na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu], 2010. [Online]
Dostupno:<http://oie.mingo.hr/UserDocsImages/Vjetar%20prezentacija.pdf>
(Pristupljeno: 14. travnja 2020.)
- [7] Simenović, D. 'Aktualna regulativa i stanje investicije u projekte vjetroelektrana u Hrvatskoj', *Zbornik radova Pravnog fakulteta u Splitu*, ožujak 2015. [Online]
Dostupno: <https://www.kps-law.com/wp-content/uploads/2016/11/Vjetroelektrane-Zbornik-PFS.pdf> (Pristupljeno: 15. travnja 2020.) [Online]
- [8] Tomašković, L.: Utjecaj vjetroelektrana na okoliš, Karlovac 2015.
Dostupno : <https://zir.nsk.hr/islandora/object/vuka%3A123/datastream/PDF/view>
(Pristupljeno 5. veljače 2020.)
- [9] Jerkić, L. (2013) 'Sedam najimpresivnijih vjetroelektrana (vjetroagregata) na svijetu', *Vjetroelektrane.com*, [Online]
Dostupno:
<https://www.vjetroelektrane.com/svijet/1618-sedam-najimpresivnijih-vjetroelektrana-vjetroagregata-na-svijetu> (Pristupljeno 11. svibnja 2020.)
- [10] Newman, N. (2018.) : 'Wind – Power in Europe', Technical report, Oxford, Ujedinjeno Kraljevstvo [Online]
Dostupno:
https://www.researchgate.net/publication/328229021_Wind-Power_in_Europe
(Pristupljeno 11. svibnja 2020.)

- [11] Jerkić, L. (2013) 'Trošak, cijena i vrijednost energije vjetra', *Vjetroelektrane.com*, [Online]
Dostupno: <https://www.vjetroelektrane.com/aktualno/2047-trosak-cijena-i-vrijednost-energije-vjetra-1-dio>
(Pristupljeno 12. svibnja 2020.)
- [12] Štefulj, A. (2015.) 'Vjetroelektrane', Završni rad, Odjel za politehniku, Filozofski fakultet, Sveučilište u Rijeci
- [13] Richter, F., (2019.) 'Wind Turbines Are Not Killing Fields for Birds', *statista*, 3. rujna [Online]
Dostupno: <https://www.statista.com/chart/15195/wind-turbines-are-not-killing-fields-for-birds/>
(Pristupljeno 1. ožujka 2020.)
- [14] Jerkić, E. (2013.) 'Mitovi o vjetroelektranama', *Vjetroelektrane.com*, [Online]
Dostupno: <https://www.vjetroelektrane.com/mitovi-faq?fbclid=IwAR2BBFN6-EohmQ7vbJhA4ra7KRzBW5HdnAaUrxwBfTmhE39HCv9t6xjiqeE>
(Pristupljeno 1. ožujka 2020.)
- [15] Aničić B, Pereković P, Tomić D. (2012.) 'Kriterij uklapanja vjetroelektrana u krajobraz', Pregledni znanstveni članak, Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu
- [16] Krpan, Lj., Jelavić, B., Horvath, L. (2012.) 'Physical Planning Preconditions for Construction of Wind Power Plants', *Strojarstvo*, vol.54, br.1, str.79-90. [Online]
Dostupno: <https://hrcak.srce.hr/93605>
(Pristupljeno: 3. ožujka 2020.)
- [17] Roje-Bonacci, T. (2008.) *Duboko temeljenje i poboljšanje temeljnog tla*, [Online]
Dostupno: <http://gradst.unist.hr/Portals/9/docs/katedre/Geotehnika/PDSG%20Posebna%20poglavlja/Duboko%20temeljenje.pdf>
(Pristupljeno: 6. ožujka 2020.)
- [18] Svensson, H. (2010.) *Design of foundations for wind turbines*, Master's dissertation, Department of Construction Sciences Lund University, Sweden
- [19] e-Savjetovanja (2019.) 'Nacrt prijedloga Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu', *e-Savjetovanja*, svibanj 2019. [Online]
Dostupno: <https://esavjetovanja.gov.hr/Econ/MainScreen?EntityId=10936>
(Pristupljeno: 16. travnja 2020.)
- [20] Prka, Marko, (2019.) 'Statistička analiza vjetra i analiza proizvodnje buduće vjetroelektrane na zadanoj lokaciji', Diplomski rad, Elektrotehnički fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku [Online]
Dostupno: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A2520/datastream/PDF/view>
(Pristupljeno: 16. travnja 2020.)
- [21] Mreža mlade generacije Hrvatskog nuklearnog društva (2013.) *Proizvodnja električne energije, Prednosti i nedostaci postojećih tehnologija* [Online], Tehnički muzej, Zagreb
Dostupno:

- http://radioaktivniotpad.org/wp-content/uploads/2015/02/Brosura_MMG_web1.pdf
(Pristupljeno: 21. travnja 2020.).
- [22] Kalea, M. (2010.) 'Vjetroelektrane u (hrvatskom) elektroenergetskom sustavu', *Izdanje na Okruglom stolu HAZO i HO CIGRE*, 4. svibnja 2010. Zagreb
- [23] Maleš, J. (2020.) 'Problematika izgradnje vjetroelektrane', Završni rad, Odjel za elektrotehniku, Sveučilište Sjever, Varaždin
- [24] Levanić, S (2012.) 'Geotehnički i geofizički istražni radovi za potrebe temeljenja trgovačkog centra "IKEA"', Diplomski rad, Geotehnički Fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin [Online]
Dostupno: http://www.gfv.hr/modules/m_gfv/zavrzni_diplomski_radovi/Silvio_Levanic_diplomski.pdf
(Pristupljeno: 24. travnja 2020.).
- [25] Kvasnička P., Domitrović D. (2007) *Mehanika tla* [Online] Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko geološko naftni fakultet
Dostupno: https://rudar.rgn.hr/~phrzen/home_phrzenjak.htm
(Pristupljeno: 24. travnja 2020.).
- [26] Trbljanić, M. (2016.) 'Dokazi graničnog stanja nosivosti plitkih temelja prema Eurokodu 7', Diplomski rad, Geotehnički Fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin [Online]
Dostupno: <https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A186/datastream/PDF/view>
(Pristupljeno: 24. travnja 2020.).
- [27] Jakovljević M. (2017.) 'Interaktivna analiza kombiniranog načina temeljenja' Diplomski rad, Geotehnički Fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin [Online]
Dostupno: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/gfv%3A209/datastream/PDF/view>
(Pristupljeno: 24. travnja 2020.).
- [28] Županić, D. (2015.) 'Diplomski rad', Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb [Online]
Dostupno: http://repozitorij.fsb.hr/4887/1/DIPLOMSKI%20RAD_Doris%20%C5%BDupani%C4%87.pdf (Pristupljeno: 24. travnja 2020.).
- [29] Lukić Kristić, I., Szavits-Nossan, V., Mišćević, P. (2016.) 'Direktan postupak za određivanje slijeganja plitkih temelja' *Građevinar*, vol.6, br.69., str. 467-477. [Online]
Dostupno: <https://pdfs.semanticscholar.org/ee5a/bfa6fae868f7757146ba640b3e4d00cb7062.pdf>
(Pristupljeno: 26. travnja 2020.).
- [30] Smajić, T. (2018.) 'Plitki temelji', Završni rad, Fakultet tehničke studije građevina, Univerzitet u Travniku, Travnik [Online]
Dostupno: <https://www.doccity.com/sr/zavrzni-rad-plitki-temelj/5366198/> (Pristupljeno: 27. travnja 2020.).
- [31] Puljić L. (2015.) 'Temeljenje objekta hotela "Stina" u Omišu', Završni rad, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu [Online]

- Dostupno:
<https://repozitorij.gradst.unist.hr/islandora/object/gradst%3A154/datastream/PDF/view>
(Pristupljeno: 27. travnja 2020.).
- [32] Križanac D., Lovrak M. (2018.) 'Analiza sustava monitoringa na stupu vjetroagregata', Rad za Rektorovu nagradu, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu [Online]
Dostupno: <file:///C:/Users/Edda/Downloads/analiza-sustava-monitoringa-na-stupu-vjetroagregat-bmGOn9Qlew.pdf>
(Pristupljeno: 27. travnja 2020.).
- [33] Grokša V. (2018.) 'Konstrukcijsko rješenje vjetroturbine', Završni rad, Održivi razvoj, Međimursko veleučilište u Čakovcu [Online]
Dostupno: <https://repozitorij.mev.hr/islandora/object/mev%3A875/datastream/PDF/view>
(Pristupljeno: 27. travnja 2020.).
- [34] Morgan, K., Ntambakwa, E., Hassan America, G. (2008.) 'Wind Turbine Foundation Behavior and Design Considerations', AWEA WINDPOWER Conference, Houston, June 2008 [Online]
Dostupno:
[http://www.academia.edu/download/36520358/Wind Turbine Foundation Behavior and Design Considerations.pdf](http://www.academia.edu/download/36520358/Wind_Turbine_Foundation_Behavior_and_Design_Considerations.pdf)
(Pristupljeno: 27. travnja 2020.).
- [35] Mihovilović M. (2015.) 'Vjetroelektrana ZD3P', Geotehnički elaborat, MOHO d.o.o., Zagreb, GEO-5 d.o.o, Rovinj
- [36] Mihovilović M. (2015.) 'Vjetroelektrana ZD2P', Geotehnički elaborat, MOHO d.o.o., Zagreb, GEO-5 d.o.o, Rovinj
- [37] Težak, T. (2016.) 'Geostatička interpretacija rezultata mjerenja refrakcijskih brzina', Diplomski rad, Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin [Online]
Dostupno:
<https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A187/datastream/PDF/view>
(Pristupljeno: 26. travnja 2020.).
- [38] Rukavina, T. (2010.) 'GPR – Ground Penetration Radar u prospekciji ležišta arhitektonskog kamena', *Klesarstvo i graditeljstvo*, br 3-4, Pučišća [Online]
Dostupno:
<https://hrcak.srce.hr/63761>
- [39] Ivaci, R. (2018.) 'Geofizičke metode visoke rezolucije i primjena u inženjerstvu okoliša', Završni rad, Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin [Online]
Dostupno: <https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A340>
(Pristupljeno: 26. travnja 2020.).
- [40] Grabovac, A. (2011.) 'Potporni zidovi na prometnicama', Završni rad, Stručni studij graditeljstva, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Zagreb [Online]
Dostupno: https://bib.irb.hr/datoteka/720598.ZAVRNI_RAD-pdf.pdf
(Pristupljeno: 17. srpnja 2020.).
- [41] Barnjak, M. (2016.) 'Trgovački centar Supetar – provjera stabilnosti potpornog zida', Završni rad, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilište u Splitu, Split [Online]

- Dostupno: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/gradst:364/preview>
(Pristupljeno: 17. srpnja 2020.).
- [42] Szavits-Nossan, A., Ivšić, T. (2006.) 'Novi Eurokod 7: geotehničko projektiranje', *Priopćenja 4. Savjetovanja HGD-a, Ojačanje tla i stijena*, str.455-470. [Online]
Dostupno: <https://www.bib.irb.hr/274040?rad=274040>
(Pristupljeno: 23. srpnja 2020.).
- [43] Zadarska županija, (2019.) 'Eko županija: Zadarska županija vodeća u proizvodnji obnovljivih izvora energije', *Zadarska županija* [Online]
Dostupno: <https://www.zadarska-zupanija.hr/novosti/item/1977-eko-%C5%BEupanija-zadarska-%C5%BEupanija-vode%C4%87a-u-proizvodnji-obnovljivih-izvora-energije>
(Pristupljeno: 23. srpnja 2020.).
- [44] Zavod za geotehniku, (2020.) Mehanička otpornost i stabilnost temeljne konstrukcije, *Građevinski projekt vjetroagregata ZD2P - 16 vjetroagregata x 3 MW*, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, str. 214.-236.

SAŽETAK

Autori: Eda Fett, Renata Golemović

Naslov rada: Određivanje optimalnog oblika temelja vjetroagregata

Iskorištavanje energije vjetra čovječanstvu je poznato još od 1. stoljeća. Danas, s porastom svjetske industrije i potrošnje električne energije, takav način proizvodnje postaje sve popularniji. Dolazi do razvitka novih vrsta vjetroagregata i izgradnje brojnih vjetroelektrana u cijelome svijetu. Sami vjetroagregati pomoću svoje mehanizacije pretvaraju energiju vjetra u električnu energiju pri čemu se iskorištavanjem prirodnih resursa potiče održiva izgradnja i briga o okolišu. Vrlo bitan element vjetroagregata je temeljna konstrukcija koja može imati razne oblike. Za projekt izgradnje vjetroelektrana na području Zadar 2 i Zadar 3 razvijena je metodologija određivanja optimalnog oblika temelja vjetroagregata. Proveden je proračun nosivosti temeljnog tla, klizanja i prevrtanja temeljne konstrukcije različitih oblika poprečnog presjeka po europskim normama za geotehničko projektiranje. Zaključeno je osmerokutni temelj daje najveće faktore sigurnosti na klizanje i prevrtanje. Rezultati proračuna za osmerokutni temelj uspoređeni su s rezultatima proračuna za kružni temelj približno iste površine koji se standardno primjenjuje u geotehničkoj praksi za temeljenje vjetroagregata. Pomoću takve usporedbe, inženjerima je omogućen uvid u prednosti i nedostatke pojedinog oblika temelja, kako inženjerskih, tako i ekonomskih.

Ključni pojmovi: vjetroagregat, vjetroelektrana, energija vjetra, temelj, proračun mehaničke otpornosti i stabilnosti

SUMMARY

Authors: Eda Fett, Renata Golemović

Title: Determining the optimal shape of the wind turbine foundation

The use of wind energy has been known to mankind since the 1st century. Today, with the rise of world industry and electricity consumption, this way of production is becoming increasingly popular. New types of wind turbines are being developed and numerous wind farms are being built all over the world. The wind turbines use their mechanization to convert wind energy into electricity, while the use of natural resources encourages sustainable building and care for the environment. A very important element of a wind turbine is the foundation, which can have various shapes. For the project of building wind farms in the area of Zadar 2 and Zadar 3, a methodology for determining the optimal shape of the wind turbine foundation has been developed. The calculation of the bearing capacity of the foundation soil, sliding and overturning of the foundation structure of different cross-sectional shapes according to European standards for geotechnical design was performed. The calculation results for the octagonal foundation are compared with the calculation results for the circular foundation of approximately the same area that is standardly applied in geotechnical practice for wind turbine foundations. The comparison gives engineers an insight into the advantages and disadvantages of each form of foundation, both engineering and economic.

Key words: wind turbine, wind farm, wind energy, foundation, calculation of mechanical resistance and stability