

# Proračun hidrostatičkih karakteristika pučinske plutajuće vjetroelektrane

---

**Damjanović, Jakov**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:161311>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-08**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Jakov Damjanović**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Student:

Jakov Damjanović

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanja stečena na fakultetu.

Želim se posebno zahvaliti svom mentoru izv. prof. dr. sc. Ivanu Čatipoviću na volji, ustrajnosti, strpljenju, trudu i vremenu koje je uložio za pomoć oko izrade završnog rada i znanju koje mi je prenio kroz izradu istog kao i kroz sam studij.

Jakov Damjanović



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNIZADATAK

Student: **Jakov Damjanović** JMBAG: **0035222700**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proračun hidrostatičkih karakteristika pučinske plutajuće vjetroelektrane**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calculation of the hydrostatic properties of the floating offshore wind turbine**

Opis zadatka:

Europska Unija planira instalirati nove vjetroelektrane ukupne snage 320 GW do 2050. godine. Očekuje se da će dio od 66 GW biti proizveden pomoću pučinskih vjetroelektrana. Za postizanje ovog cilja biti će potrebno značajno povećanje broja pučinskih vjetroelektrana tijekom idućih 30 godina tj. povećanje kapaciteta za proizvodnju energije iz pučinskih vjetroelektrana trebat će biti 15 puta veće u odnosu na sadašnje stanje.

Kroz rad potrebno je provesti proračun plovnosti i stabiliteta plutajuće pučinske vjetroelektrane nazivne snage u iznosu od 15MW prema predlošku iz literature.

Zadatak obuhvaća:

- Analizu dostupne literature i upoznavanje s pravilima odabranog klasifikacijskih društava za određivanje hidrostatičkih karakteristika plutajućih vjetroelektrana.
- Proračun plovnosti i stabiliteta plutajuće vjetroelektrane prema odabranim pravilima.
- Određivanje utjecaja osnovnih izmjera plutajuće vjetroelektrane na pripadne hidrostatičke karakteristike.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

20.4.2023.

Datum predaje rada:

**2. rok (izvanredni):** 12. 7. 2023.  
**3. rok:** 21. i 22.9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

**2. rok (izvanredni):** 14. 7. 2023.  
**3. rok:** 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Čatipović

## SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	Evaluacija stabiliteta.....	2
2.1.1	Kriteriji evaluacije stabiliteta.....	2
3	Kvazistatička evaluacija stabiliteta.....	3
3.1	Opterećenje vjetrom.....	3
4	Stabilitet u neoštećenom stanju.....	6
4.1	Kriterij za proračun stabiliteta u neoštećenom stanju.....	6
4.2	Projektne slučajeve opterećenja (DLC) prema DNV-ST-0437.....	7
5	Poluga prekretnog momenta.....	8
6	Proračun stabiliteta.....	9
6.1	Podaci o pučinskoj plutajućoj vjetroelektrani.....	9
6.2	Proračun stabiliteta za projektne slučajeve opterećenja DLC 1.1.....	11
6.3	Proračun stabiliteta za projektne slučajeve opterećenja DLC 1.1, zakrenuto za 30°.....	15
6.4	Proračun stabiliteta za projektne slučajeve opterećenja DLC 6.3.....	21
6.5	Proračun stabiliteta za projektne slučajeve opterećenja DLC 6.3, zakrenuto za 30°.....	25
7	Optimizacija forme pontona plutajuće pučinske vjetroelektrane.....	31
8	Proračun stabiliteta optimizirane forme.....	35
8.1	Proračun stabiliteta za projektne slučajeve opterećenja DLC 1.1.....	35
8.2	Proračun stabiliteta za projektne slučajeve opterećenja DLC 1.1, zakrenuto za 30°.....	38
8.3	Proračun stabiliteta za projektne slučajeve opterećenja DLC 6.3.....	43
8.4	Proračun stabiliteta za projektne slučajeve opterećenja DLC 6.3, zakrenuto za 30°.....	46
9	ZAKLJUČAK.....	50

**POPIS SLIKA**

Slika 1 Pučinska plutajuća vjetroelektrana [1] .....	1
Slika 2 Krivulja momenta [2].....	2
Slika 3 Koeficijent potiska ovisan o brzini vjetra na visini glavčine rotora vjetroturbine [2] ..	4
Slika 4 Opći plan pučinske plutajuće vjetroelektrane [1] .....	10
Slika 5 Tlocrt vjetroturbine i os rotacije 1.....	11
Slika 6 Dijagram poluge stabiliteta 1 .....	14
Slika 7 Dijagram puta stabiliteta 1 .....	14
Slika 8 Tlocrt vjetroturbine i os rotacije 2.....	15
Slika 9 Dijagram poluge stabiliteta 2 .....	17
Slika 10 Dijagram puta stabiliteta 2 .....	17
Slika 11 Dijagram poluge stabiliteta 3 .....	20
Slika 12 Dijagram puta stabiliteta 3 .....	20
Slika 13 Dijagram poluge stabiliteta 4 .....	23
Slika 14 Dijagram puta stabiliteta 4 .....	23
Slika 15 Dijagram poluge stabiliteta 5 .....	27
Slika 16 Dijagram puta stabiliteta 5 .....	27
Slika 17 Dijagram poluge stabiliteta 6 .....	29
Slika 18 Dijagram puta stabiliteta 6 .....	29
Slika 19 Nacrt [1] .....	33
Slika 20 Bokocrt [1] .....	33
Slika 21 Tlocrt [1] .....	33
Slika 22 Dijagram poluge stabiliteta 7 .....	36
Slika 23 Dijagram puta stabiliteta 7 .....	36
Slika 24 Dijagram poluge stabiliteta 8 .....	39
Slika 25 Dijagram puta stabiliteta 8 .....	39
Slika 26 Dijagram poluge stabiliteta 9 .....	42
Slika 27 Dijagram puta stabiliteta 9 .....	42
Slika 28 Dijagram poluge stabiliteta 10 .....	44
Slika 29 Dijagram puta stabiliteta 10 .....	44
Slika 30 Dijagram poluge stabiliteta 11 .....	47
Slika 31 Dijagram puta stabiliteta 11 .....	47
Slika 32 Dijagram poluge stabiliteta 12 .....	49
Slika 33 Dijagram puta stabiliteta 12 .....	49

**POPIS TABLICA**

Tablica 1 Vrijednosti koeficijenta $C_S$ [3] .....	5
Tablica 2 Vrijednosti koeficijenta $C_h$ [3] .....	5
Tablica 3 Parametri pučinske plutajuće vjetroturbine [1] .....	9
Tablica 4 Matrica projektnih slučajeva opterećenja [1] .....	11
Tablica 5 Karakteristike stabiliteta [6] .....	12
Tablica 6 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 1 .....	13
Tablica 7 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 2 .....	16
Tablica 8 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 3 .....	19
Tablica 9 Matrica projektnih slučajeva opterećenja [1] .....	21
Tablica 10 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 4 .....	22
Tablica 11 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 5 .....	26
Tablica 12 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 6 .....	28
Tablica 13 Promjene dimenzija prije i poslije optimizacija .....	32
Tablica 14 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 7 .....	35
Tablica 15 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 8 .....	38
Tablica 16 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 9 .....	41
Tablica 17 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 10 .....	43
Tablica 18 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 11 .....	46
Tablica 19 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 12 .....	48



**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$GZ$	m	poluga stabiliteta
$\varphi$	°	kut nagiba broda
$F_{thrust}$	N	sila potiska na rotor
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća zraka
$U_{10min}$	m/s	10-minutna srednja brzina vjetra na visini glavčine rotora vjetroturbine
$C_T$	/	koeficijent potiska
$A_{rotor}$	m <sup>2</sup>	„pometena“ površina rotora
$R$	m	radijus rotora vjetroturbine
$F$	N	sila vjetra
$C_S$	/	koeficijent oblika
$C_h$	/	visinski koeficijent
$V$	m/s	brzina vjetra
$A$	m <sup>2</sup>	projicirana površina svih izloženih površina u uspravnom stanju
$\alpha_{start}$	°	početni kut
$\Delta$	t	istisnina
$g$	m/s <sup>2</sup>	gravitacijska konstanta
$\gamma_{stability}$	/	faktor sigurnosti
$A_A$	m <sup>2</sup>	površina ispod krivulje momenta preokretanja
$A_B$	m <sup>2</sup>	površina ispod krivulje momenta uspravljanja
$\theta$	°	kut naplavljivanja
$M_{wind}$	Nm	moment nagiba vjetra
$l$	m	krak poluge
$h$	m	visina stupa
$r$	m	polumjer stupa
$h(w)$	m	poluga preokretnog momenta
$A(GZ)$	m <sup>2</sup>	površina ispod $GZ$ krivulje
$A(h(w))$	m <sup>2</sup>	Površina ispod $h(w)$ krivulje
$\varphi_I$	°	kut statičkog stabiliteta
$\varphi_{Ds}$	°	kut dinamičkog stabiliteta
$U_{1G}$	m/s	ekstremna brzina vjetra s povratnim od jedne godine na visini glavčine rotora vjetroturbine
$\rho_W$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća morske vode
$F_B$	N	sila uzgona
$Z_{CB}$	m	težište uzgona mjereno od osnove
$W_T$	kg	ukupna masa
$Z_{CG}$	m	težište mase mjereno od osnove

---

$\iint x^2 * dS$	m <sup>4</sup>	moment tromosti vodne linije
$T_t$	N	sila potiska na vjetroturbini
$h_t$	m	visina glavčine rotora iznad vodne linije
$\varepsilon_5$	°	kut nagiba podatak iz literature
$A_{VL}$	m	površina vodne linije
$MB$	m	metacentarski radijus
$A_{STEEL1}$	m <sup>2</sup>	površina limova prije optimizacije
$A_{STEEL2}$	m <sup>2</sup>	površina limova nakon optimizacije

**SAŽETAK**

U ovom završnome radu je proveden proračun stabiliteta pučinske plutajuće vjetroelektrane u neoštećenom stanju po pravilima Det Norske Veritas-a (DNV). U obzir su uzeta pravila koja se odnose na metode proračuna stabiliteta te kriteriji koje pučinska plutajuća vjetroelektrana mora zadovoljiti vezano za prekretni moment uzrokovan vjetrom. Sam model izrađen je najprije u Rhinoceros-u, a zatim je uređen i pripremljen za proračun stabiliteta u Maxsurf-u. Pučinska plutajuća vjetroelektrana ima jedno stanje krcanja za koje se provjeravao stabilitet, ali za više smjerova puhanja vjetra. Nakon što smo utvrdili da je stabilitet zadovoljen, napravljena je optimizacija forme. Na kraju je dan zaključak o rezultatima proračuna.

Ključne riječi: stabilitet, neoštećeno, kut nagiba, DNV, stanje krcanja, naplavljenost, vjetroelektrana.

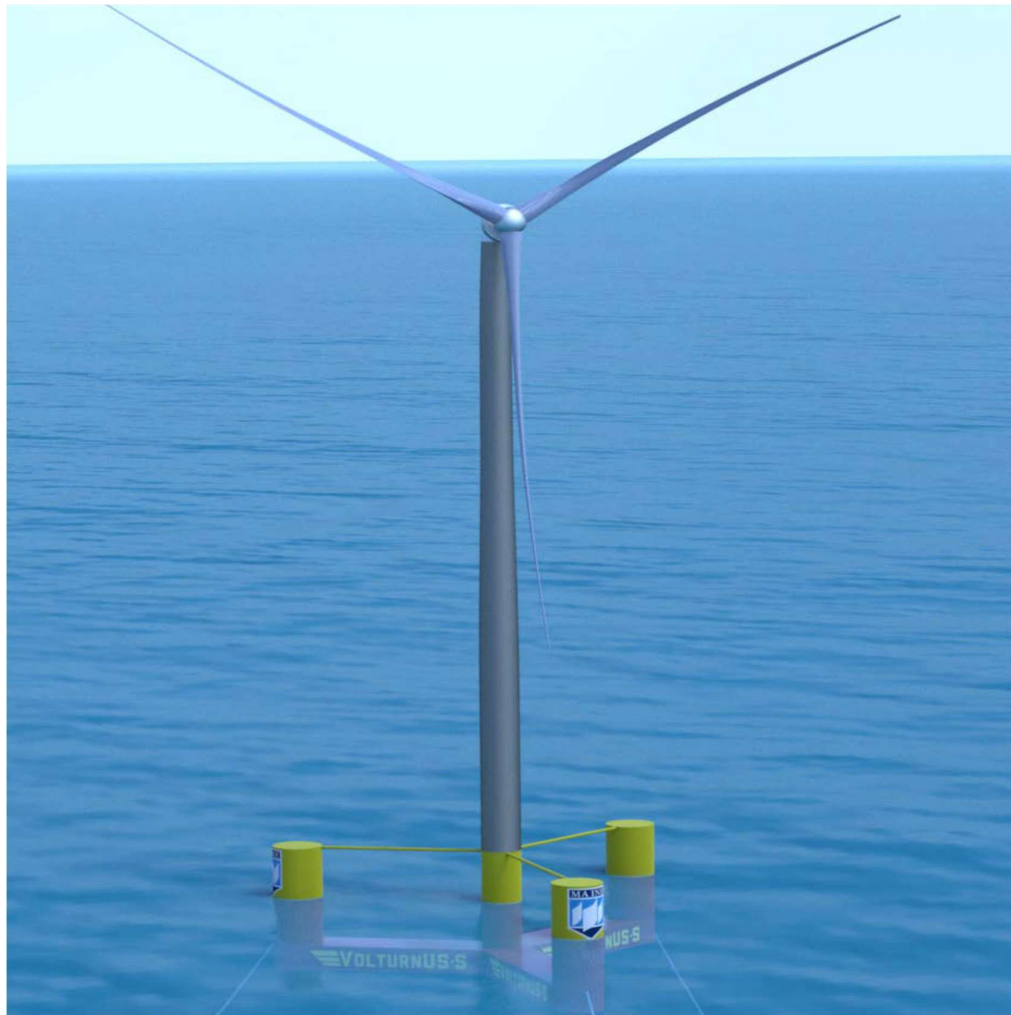
**SUMMARY**

This final paper includes the stability calculation of an offshore wind turbine in intact conditions. The rules are given by Det Norske Veritas (DNV). Stability evaluation will be guided by the rules. Rules will give stability criteria for the offshore wind turbine, which must be met for righting and heeling moment. The model was created in Rhinoceros software and was later imported into Maxsurf software for stability evaluation. The offshore wind turbine has one load case for which we will do stability evaluations. Wind will be superimposed from many directions. After the stability criteria were met, the form of the semisubmersible platform was optimised. The conclusion was given regarding the calculation results.

Keywords: stability, intact, righting moment, criterion, load case, heeling moment, DNV, optimised, Maxsurf, Rhinoceros, offshore wind turbine.

## 1 UVOD

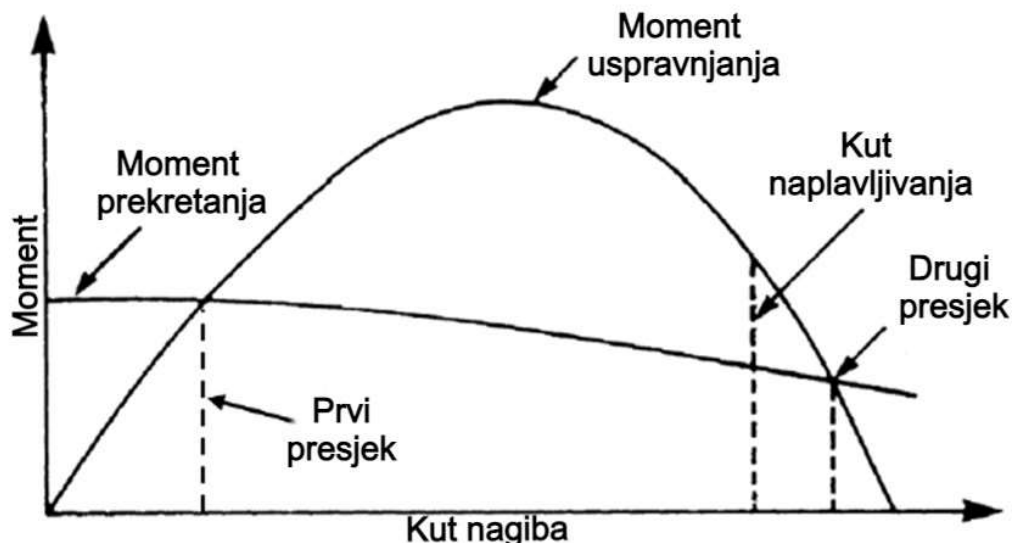
Pučinska plutajuća vjetroelektrana je vjetroelektrana koja se nalazi na pontonu koji pluta na moru. Ponton je definiran kao poluuronjiva jedinica sa tri kraka, na čijim se krajevima nalaze tri uspravna cilindrična stupa i jedan koji se nalazi u sredini, na njemu se nalazi stup vjetroelektrane. Provjeravat ćemo stabilitet za dva slučaja. Prvi slučaj je kada je turbina u radnom stanju, drugi slučaj je kada su ekstremne brzine vjetra, to je slučaj u kojem je rotor vjetroturbine zakočena ili u praznom hodu. Cilj ovoga rada je provesti proračun stabiliteta u neoštećenom stanju. Proračun ćemo provest u programskom paketu MaxSurf. Sam model je izrađen najprije u Rhinoceros-u. Zatim je uređen i pripremljen za proračun stabiliteta u Maxsurf-u. Pučinska plutajuća vjetroelektrana ima jedno stanje krcanja za koje se provjeravao stabilitet, ali za dva smjera puhanja vjetra. Slika 1 prikazuje pučinsku plutajuću vjetroelektranu.



Slika 1 Pučinska plutajuća vjetroelektrana [1]

## 2 Evaluacija stabiliteta

Načelo koje stoji iza evaluacije stabiliteta sastoji se u primjeni krivulje momenta preokretanja i krivulje momenta uspravljanja. To vrijedi za evaluaciju stabiliteta u neoštećenom stanju. Moment preokretanja predstavlja opterećenje koje nastaje djelovanjem vjetrova. Krivulje momenta preokretanja i momenta uspravljanja se mogu vidjeti na slici 2.



Slika 2 Krivulja momenta [2]

Za sliku vrijedi:

- $x$  os počinje od neutralnog kuta nagiba bez vanjskog momenta
- prvi presjek daje kut statičkog stabiliteta kada se pučinski objekt nalazi u stanju stabilne statičke ravnoteže
- drugi presjek daje kut statičkog stabiliteta ali nestabilne ravnoteže [2].

### 2.1.1 Kriteriji evaluacije stabiliteta

Sljedeći kriterij stabiliteta primjenjuje se za sva stanja i sve slučajevne opterećenja:

- Vodonepropusnost mora biti osigurana na prvom presjeku (slika 2) (1.1)
- Krivulja momenta uspravljanja mora biti pozitivna između početnog kuta nagiba i drugog presjeka ili kuta naplavlivanja (slika 2) [2]. (1.2)

### 3 Kvizistatička evaluacija stabiliteta

Za ovakvu evaluaciju stabiliteta primjenjuje se integracija momenata s obzirom na kut nagiba. Ovo je standardni izračun stabiliteta izravno temeljen na površinama ispod krivulja momenta prekretanja i momenta uspravljanja. Viskozno prigušenje na trupu ili na vjetroturbini ne uzimamo u obzir, stoga je kvazistatička metoda konzervativnija naspram metode u vremenskoj domeni [2].

#### 3.1 Opterećenje vjetrom

Za evaluaciju stabiliteta krucijalno je određivanje opterećenja uzrokovano vjetrom. Ovo opterećenje vjetrom sastoji se od opterećenja vjetrom na rotor u kombinaciji s opterećenjem vjetra na toranj i na druge dijelove donje konstrukcije izložene vjetru. Opterećenje vjetrom može se izračunati na pojednostavljen način metodom danom u DNV-OS-C301 Ch.2 Sec.1 [3]. Dodatno se procjenjuje sila potiska na rotor  $F_{thrust}$  vjetroturbine koja radi. Potisak rotora može se izračunati prema sljedećem izrazu:

$$F_{thrust} = \frac{1}{2} \rho * C_T * A_{rotor} * U_{10min}^2 \quad (1)$$

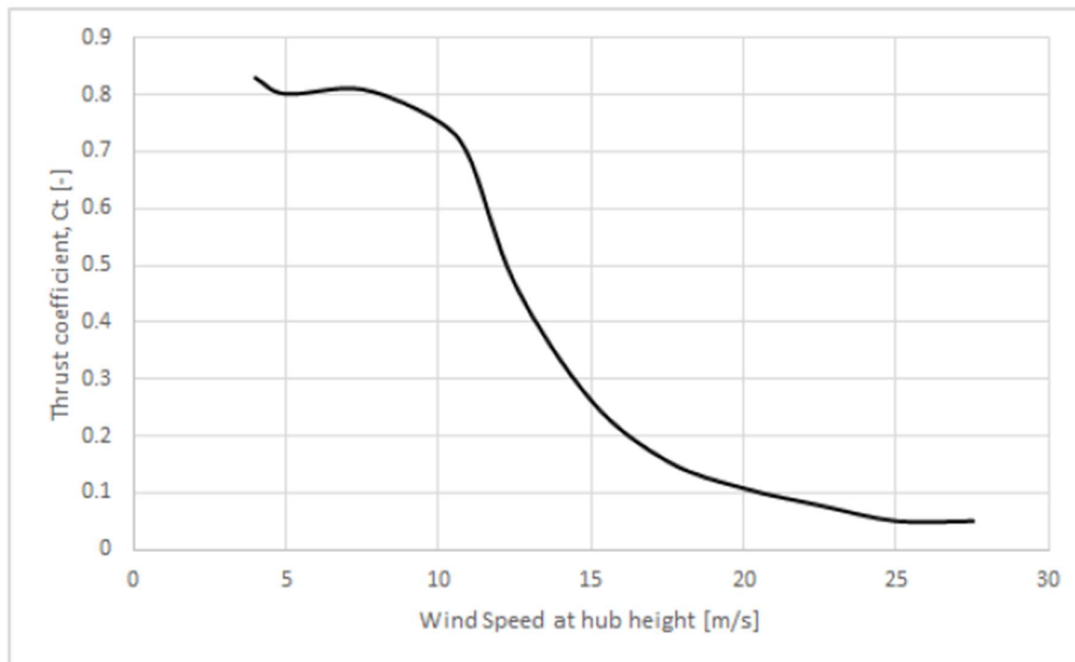
gdje su:

- $\rho$  – gustoća zraka 1.222 kg/m<sup>3</sup>
- $U_{10min}$  – 10-minutna srednja brzina vjetra na visini glavčine rotora vjetroturbine (m/s)
- $C_T$  – koeficijent potiska, odredi se prema slici 3
- $A_{rotor}$  – predstavlja „pometenu“ površina rotora (m<sup>2</sup>), a nju dobijemo izrazom:

$$A_{rotor} = \pi R^2 \quad (2)$$

$R$  predstavlja radijus rotora vjetroturbine (m) [2].

Koeficijent potiska  $C_T$  možemo odrediti prema slici 3.



**Slika 3** Koeficijent potiska ovisan o brzini vjetra na visini glavčine rotora vjetroturbine [2]

Opterećenje vjetrom prema DNV-OS-C301 Ch.2 Sec.1. uzeli smo za stup vjetroelektrane, a sila vjetra  $F$  se odredi prema:

$$F = 0,5 * C_S * C_h * \rho * V^2 * A \quad (3)$$

gdje su:

- $C_S$  – koeficijent oblika koji ovisi o obliku konstrukcijskog elementa izloženog vjetru, odredi se prema tablici 1
- $C_h$  – visinski koeficijent, ovisi o visini konstrukcijskog elementa izloženog vjetru iznad razine mora, odredi se prema tablici 2
- $\rho$  – gustoća zraka 1.222 kg/m<sup>3</sup>
- $V$  – brzina vjetra (m/s)
- $A$  – projicirana površina svih izloženih površina u uspravnom stanju (m<sup>2</sup>) [3].



Koeficijent oblika  $C_s$  možemo odabrati prema tablici 1.

<i>Shape</i>	$C_s$
Spherical	0.4
Cylindrical	0.5
Large flat surface (hull, deckhouse, smooth under-deck areas)	1.0
Drilling derrick	1.25
Wires	1.2
Exposed beams and girders under deck	1.3
Small parts	1.4
Isolated shapes (crane, beam, etc.)	1.5
Clustered deckhouses or similar structures	1.1

**Tablica 1** Vrijednosti koeficijenta  $C_s$  [3]

Visinski koeficijent  $C_h$  možemo odrediti prema tablici 2.

<i>Height above sea level (metres)</i>	$C_h$	<i>Height above sea level (metres)</i>	$C_h$
0 - 15.3	1.00	137.0 - 152.5	1.60
15.3 - 30.5	1.10	152.5 - 167.5	1.63
30.5 - 46.0	1.20	167.5 - 183.0	1.67
46.0 - 61.0	1.30	183.0 - 198.0	1.70
61.0 - 76.0	1.37	198.0 - 213.5	1.72
76.0 - 91.5	1.43	213.5 - 228.5	1.75
91.5 - 106.5	1.48	228.5 - 244.0	1.77
106.5 - 122.0	1.52	244.0 - 256.0	1.79
122.0 - 137.0	1.56	Above 256	1.80

**Tablica 2** Vrijednosti koeficijenta  $C_h$  [3]

## 4 Stabilitet u neoštećenom stanju

Ovo poglavlje pokriva i statički i dinamički stabilitet. Zahtjevi za stabilitetom su temeljeni na određivanju krivulja momenta uspravljanja i prekretanja. Stabilitet je određen kvazistatičkom evaluacijom. Projektni slučajevi opterećenja (eng: Design Load Cases, DLC) uzimaju se iz DNV-ST-0437 [4]. Za svaki slučaj opterećenja potrebno je odrediti najkritičniju os nagiba vjetroturbine. Položaj ove osi, može varirati kao i funkcije momenta uspravljanja i momenta prekretanja.

Zahtjevi stabiliziranja moraju biti ispunjeni za sljedeće načine rada:

- Rad, odnosno radno stanje vjetroturbine koja radi
- Stanje preživljavanja, odnosno stanje ekstremnih oluja kod kojih je vjetroturbina zaključana ili u praznom hodu

Slučaj opterećenja je stacionaran. Odnosi se na statička svojstva koja se ne mijenjaju u vremenu. To su slučajevi opterećenja uslijed proizvodnje energije i stanje ekstremnih oluja [2].

### 4.1 Kriterij za proračun stabiliziranja u neoštećenom stanju

Za proračun stabiliziranja nužno je odrediti početni kut  $\alpha_{start}$ . On predstavlja početak integracije krivulje momenata s obzirom na kut nagiba.

Sljedeći kriterij koristi se za kvazistatičku evaluaciju stabiliziranja. Faktor sigurnosti,  $\gamma_{stability}$ , definiran je između područja dostupnog za uspravljanje ( $A_B$ ) i područja koje proizlazi iz pobude ( $A_A$ ):

$$A_B \geq \gamma_{stability} * A_A \quad (1.3)$$

Faktor sigurnosti definiran je za neoštećeni stabiliziranje hidrostatički stabiliziranih konstrukcija i on iznosi,  $\gamma_{stability} = 1.3$ . Interpretacija područja  $A_B$  i  $A_A$  za stacionarne slučajeve opterećenja glasi:

$A_B$  je površina ispod krivulje momenta uspravljanja, dok je  $A_A$  površina ispod krivulje momenta prevrtanja. Integracija počinje od početnog kuta nagiba  $\alpha_{start}$  do drugog presjeka ili kuta naplavlivanja  $\theta$ , ovisno o tome koji je manji [2].

---

**4.2 Projektni slučajevi opterećenja (DLC) prema DNV-ST-0437**

Promatrat ćemo rad, odnosno stanje proizvodnje energije i stanje preživljavanja, odnosno stanje ekstremnih oluja kod kojih je vjetroturbina zaključana ili u praznom hodu.

Radno stanje – DLC 1.1

- Uzima se 10-minutna srednja brzina vjetra na visini glavčine rotora vjetroturbine za geografsko radno područje vjetroturbine
- Pretpostavlja se da vjetroturbina konstantno radi i da je spojena na mrežu

Parkirano stanje – DLC 6.3

- Rotor je u stanju mirovanja ili u praznom hodu
- Uzima se ekstremna brzina vjetra s povratnim od jedne godine na visini glavčine rotora vjetroturbine [4].

## 5 Poluga prekretnog momenta

Prema standardu DNV-OS-J103 [8], stabilnost plutajućeg sustava mora biti osigurana tijekom rada pri najvećem potisku rotora. To se događa pri nazivnoj brzini vjetra ili u situaciji kvara. Za vjetroturbine s cilindričnim pontonima, zahtjev za neoštećenu stabilnost je pozitivan moment uspravljanja od početnog položaja do drugog presjeka krivulje momenta uspravljanja i krivulje prekretnog momenta uzrokovanog vjetrom ili do kuta naplavljivanja.

Pošto je kut naplavljivanja manji od drugog presjeka krivulje momenta uspravljanja i krivulje prekretnog momenta, njega uzimamo kao projektni referentni kut, iako poluuronjiva platforma nema otvore. Moment nagiba vjetra određuje se za maksimalnu silu potiska, dobivenu pri nazivnoj brzini vjetra, i izraženu u jednadžbi kao funkciju kuta nagiba  $\varphi$ .

$$M_{wind} = F_{thr} * l * \cos^2(\varphi) \quad (4)$$

Krak poluge  $l$  je udaljenost između točke primjene sile, uzete u glavčini rotora vjetroturbine i točke rotacije. Točka rotacije je varijabilna za pokretni poluuronjeni plutajući sustav. Odabrali smo točku rotacije u središtu uzgona kao konzervativan pristup određivanje ove poluge [5].

## 6 Proračun stabiliteta

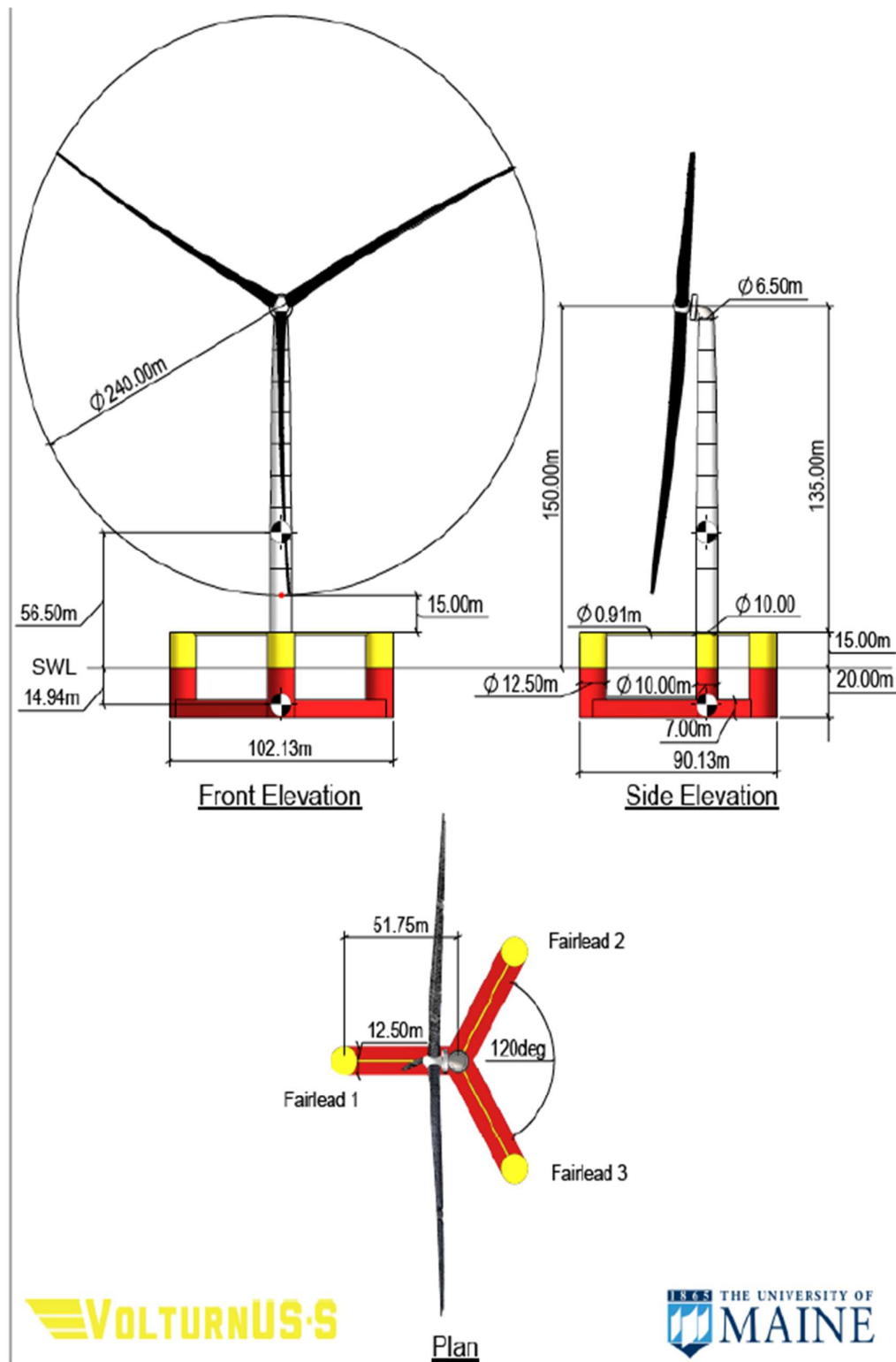
### 6.1 Podaci o pučinskoj plutajućoj vjetroelektrani

U tablici 3 su ispisani osnovni podaci pučinske plutajuće vjetroturbine.

Parametar	Dimenzije
Visina glavčine rotora vjetroturbine iznad vodne linije	150 m
Gaz	20 m
Nadvođe	15 m
Istisnina	20,206 m <sup>3</sup>
Masa fiksnog balasta	2,540 t
Masa tekućeg balasta	11300 t
Vertikalno težište masa mjereno od vodne linije	-14.94 m
Vertikalno težište uzgona mjereno od vodne linije	-13.63 m
Promjer rotora vjetroelektrane	240 m
Visina stupa $h$	135m
Polumjer stupa $r$	5 m

Tablica 3 Parametri pučinske plutajuće vjetroturbine [1]

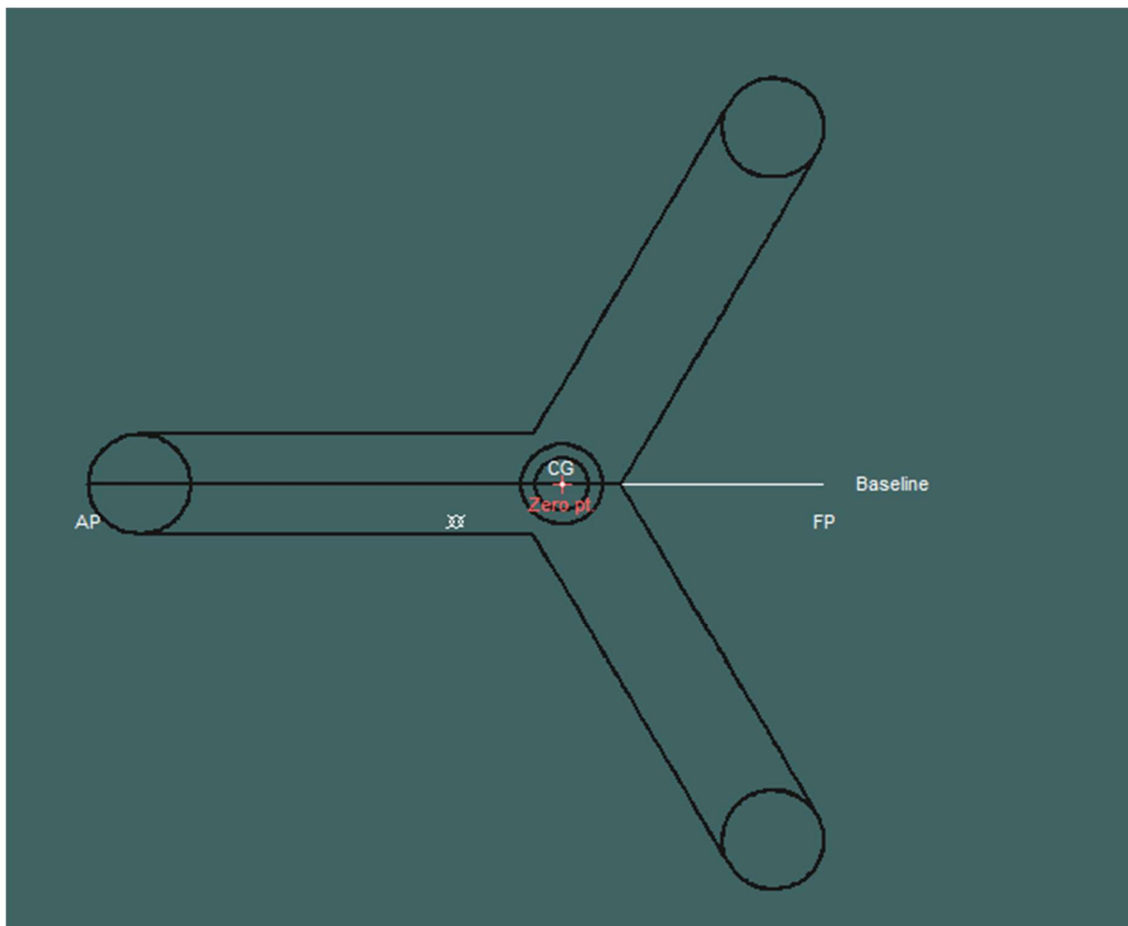
Na slici 4 su prikazane sve dimenzije pučinske plutajuće vjetroturbine.



Slika 4 Opći plan pučinske plutajuće vjetroelektrane [1]

## 6.2 Proračun stabiliteta za projektni slučaj opterećenja DLC 1.1

Proračunavamo stabilitet za ponton oko uzdužne osi, ona nam je os rotacije. Na slici 5 to bi bila crta "Baseline".



Slika 5 Tlocrt vjetroturbine i os rotacije 1

Za projektni slučaj opterećenja DLC 1.1 uzeta je 10-minutna srednja brzina vjetra na visini glavčine rotora vjetroturbine iz tablice 4.

DLC	Wind Condition	Hub Height Wind Speed (m/s)	Wind Headings (°)	Significant Wave Height (m)	Peak Period (s)	Gamma Shape Factor (-)	Wave Headings (°)	Settings	# of Seeds	Total # of Sims
1.1	NTM	4.00	0.00	1.10	8.52	1.00	0.00	-	6	6
		6.00	0.00	1.18	8.31	1.00	0.00	-	6	6
		8.00	0.00	1.32	8.01	1.00	0.00	-	6	6
		10.00	0.00	1.54	7.65	1.00	0.00	-	6	6
		12.00	0.00	1.84	7.44	1.00	0.00	-	6	6
		14.00	0.00	2.19	7.46	1.00	0.00	-	6	6
		16.00	0.00	2.60	7.64	1.35	0.00	-	6	6
		18.00	0.00	3.06	8.05	1.59	0.00	-	6	6
		20.00	0.00	3.62	8.52	1.82	0.00	-	6	6
		22.00	0.00	4.03	8.99	1.82	0.00	-	6	6
24.00	0.00	4.52	9.45	1.89	0.00	-	6	6		

Tablica 4 Matrica projektnih slučajeva opterećenja [1]

U ovom proračunu je zanemaren utjecaj valova uz sljedeće ulazne podatke:

- Početni kut  $\alpha_{start}$  definiran je kao ulazni podatak i iznosi:  $\alpha_{start} = 0^\circ$
- Očitana 10-minutna srednja brzina iz tablice iznosi:  $U_{10min} = 14$  m/s
- Radijus rotora vjetroturbine dobijemo iz tablice 3 kao polovica promjera:  $R = 120$  m
- Koeficijent potiska očitana je iz slike 3 i iznosi:  $C_T = 0.28$
- Iz jednadžbe (2) slijedi:  $A_{rotor} = 45,238.93$  m<sup>2</sup>
- Iz jednadžbe (1) slijedi:  $F_{thrus} = 1,516,937.47$  N

Prema tablici 5 odabrali smo referencu za kut naplavljivanja. Odabrali smo da nam je kut naplavljivanja  $\theta = 23^\circ$ . Kut naplavljivanja nam je ulazni podatak. Proračun stabiliteta vršimo do kuta naplavljivanja jer nam je taj kut manji od drugog kuta presjeka krivulje momenta prekretanja i krivulje momenta uspravljanja.

	Heeling angle in calm sea (deg)	Down flooding angle (deg)	Metacentric height (ft)
Intact case at 0° wind heading	0	20.5	53
Intact case at 30° wind heading	0	22.5	53
Damaged case at 0° wind heading	4.5	18	38

**Tablica 5 Karakteristike stabiliteta [6]**

Krak poluge  $l$  je visina od težišta istisnine do glavčine rotora vjetroturbine. Prema tome krak poluge iznosi 163.73 m. Ostali parametri proračuna definirani su kako slijedi:

- Istisnina s kojom ćemo napraviti proračun dobivena je iz Maxsurf-a prema modelu s kojim je provedena simulacija, ona iznosi:  $\Delta = 20,500$  t = 201,105,000 N
- Polugu prekretnog momenta dobijemo:  $h(w) = \frac{M_{wind}}{\Delta}$
- $M_{wind}$  dobijemo iz jednadžbe (4) za svaki kut nagibanja
- Krivulja poluge stabiliteta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 6.



$\varphi$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$GZ$	0.00	0.44	0.89	1.33	1.78	2.22	2.67	3.12	3.57	4.02	4.47
$A(GZ)$	0.00	0.22	0.89	1.99	3.55	5.54	7.99	10.88	14.22	18.01	22.26
$h(w)$	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22	1.21	1.20	1.20
$A(h(w))$	0.00	1.24	2.47	3.70	4.93	6.16	7.39	8.61	9.82	11.03	12.24

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
4.93	5.39	5.85	6.32	6.79	7.27	7.75	8.17	8.45	8.54	8.59
26.96	32.12	37.74	43.83	50.39	57.42	64.93	72.89	81.22	89.72	98.28
1.19	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12	1.10	1.09	1.08
13.44	14.63	15.81	16.99	18.15	19.31	20.46	21.60	22.72	23.84	24.94

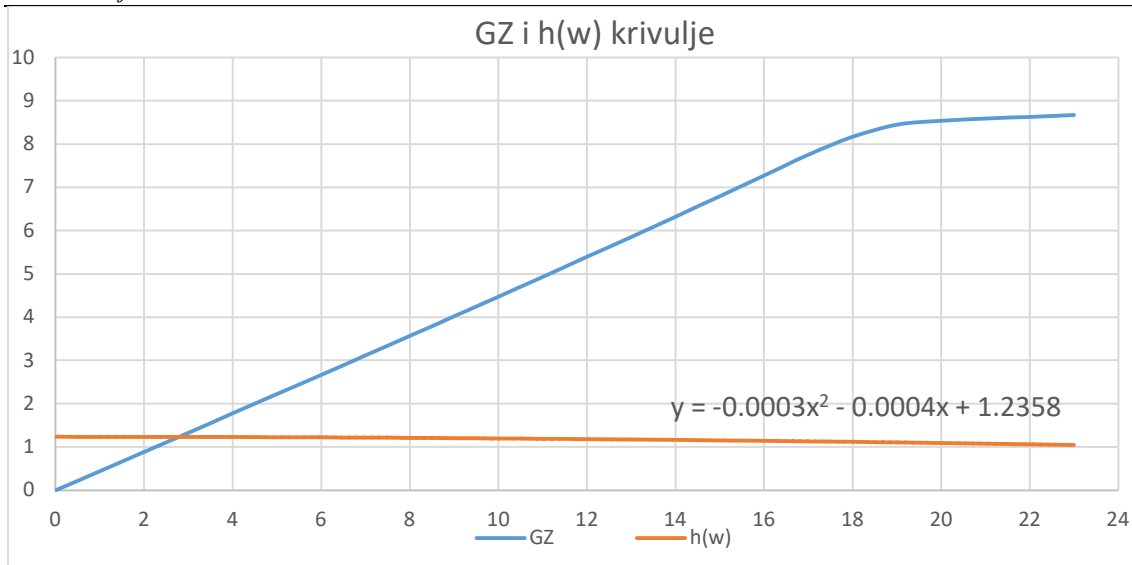
22	23
8.63	8.67
106.89	115.54
1.06	1.05
26.03	27.10

**Tablica 6** Karakteristike pučinske plutajuće vjetro turbine pri kutevima nagiba 1

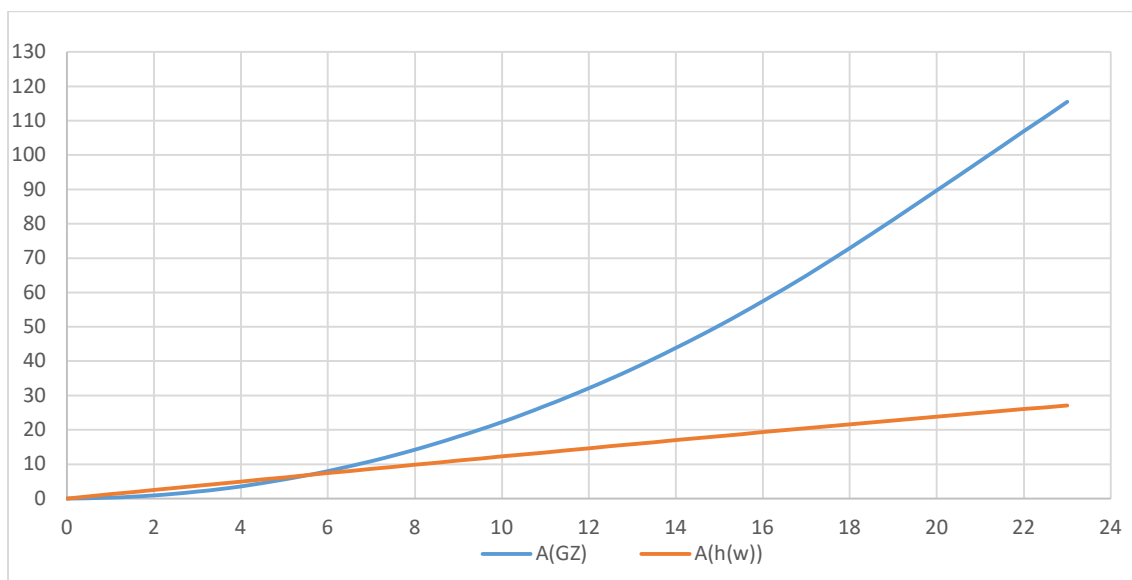
Površina ispod krivulje poluge prekretnog momenta dobivena integracijom jednadžbe sa slike 6:  $y = -0.0003x^2 - 0.0004x + 1.2358$  s granicama od početnog kuta  $\alpha_{start}$  do kuta naplavlivanja  $\theta$ .

Slika 6 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 6 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .

Slika 7 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 6 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



Slika 6 Dijagram poluge stabiliteta 1



Slika 7 Dijagram puta stabiliteta 1

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 6:  $\varphi_I = 2.85^\circ$

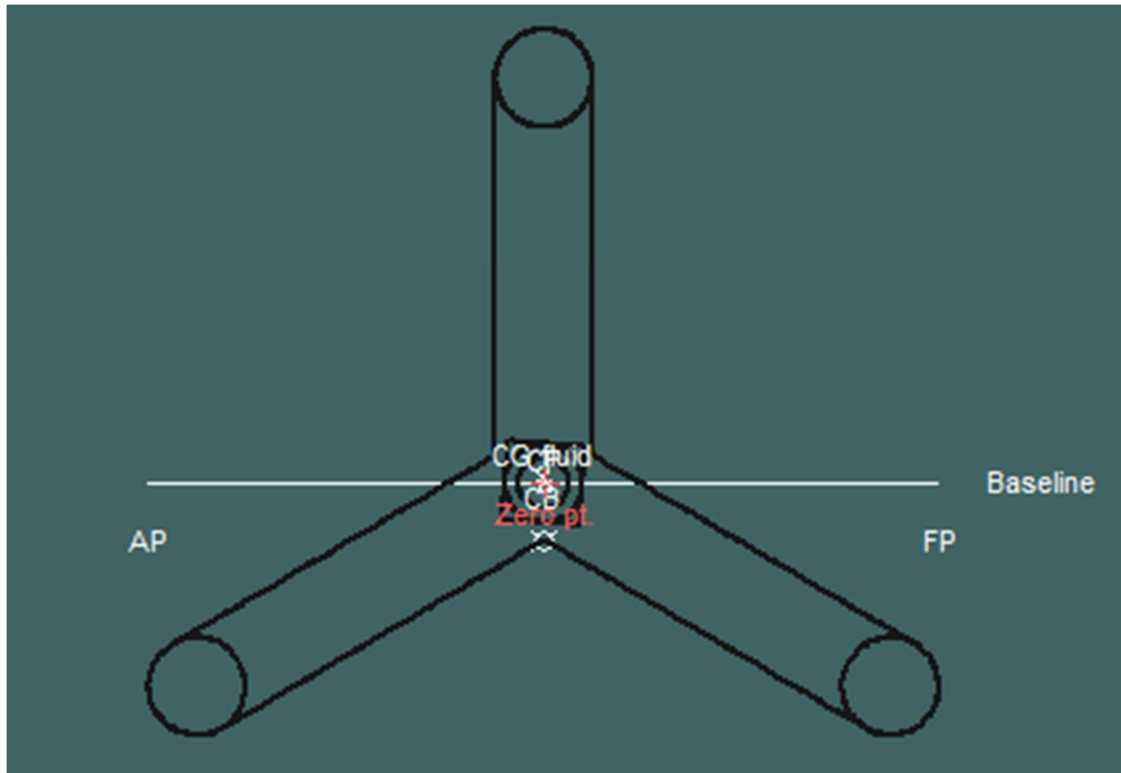
Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 7:  $\varphi_{Ds} = 5.45^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  $A_A = 27.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 35.23 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $12.6^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!

### 6.3 Proračun stabiliteta za projektni slučaj opterećenja DLC 1.1, zakrenuto za 30°

Proračunavamo stabilitet za ponton kojem je os rotacije oko crte "Baseline" kao što je prikazano je na slici 8. Zbog asimetrije provjerit ćemo nagibanje na jednu i na drugu stranu. Nagibanje na desnu stranu odnosi se na nagibanje na stranu na kojoj su dva kraka.



Slika 8 Tlocrt vjetroturbine i os rotacije 2

Za projektni slučaj opterećenja DLC 1.1 uzeta je 10-minutna srednja brzina vjetra na visini glavčine rotora vjetroturbine iz tablice 4.

U ovom proračunu je zanemaren utjecaj valova uz sljedeće parametre:

- Početni kut  $\alpha_{start}$  definiran je kao ulazni podatak i iznosi:  $\alpha_{start} = 0^\circ$
- Očitana 10-minutna srednja brzina iz tablice 4 iznosi:  $U_{10min} = 14 \text{ m/s}$
- Radijus rotora vjetroturbine dobijemo iz tablice 3 kao polovica promjera:  $R = 120 \text{ m}$
- Koeficijent potiska očitana je iz slike 3 i iznosi:  $C_T = 0.28$
- Iz jednadžbe (2) slijedi:  $A_{rotor} = 45,238.93 \text{ m}^2$
- Iz jednadžbe (1) slijedi:  $F_{thrus} = 1,516,937.47 \text{ N}$

Prema tablici 5 odabrali smo referencu za kut naplavljivanja. Odabrali smo da nam je kut naplavljivanja  $\theta = 23^\circ$ . Kut naplavljivanja nam je ulazni podatak. Proračun stabiliteta vršimo do kuta naplavljivanja jer nam je taj presjek manji od kuta presjeka krivulje momenta prekretanja i krivulje momenta uspravljanja.

Krak poluge  $l$  je visina od težišta istisnine do glavčine rotora vjetroturbine. Prema tome krak poluge iznosi 163.73 m. Ostali parametri proračuna definirani su kako slijedi:

- Istisnina s kojom ćemo napraviti proračun dobivena je iz Maxsurf-a prema modelu s kojim je provedena simulacija, ona iznosi:  $\Delta = 20,500 \text{ t} = 201,105,000 \text{ N}$
- Polugu prekretnog momenta dobijemo:  $h(w) = \frac{M_{wind}}{\Delta}$
- $M_{wind}$  dobijemo iz jednadžbe (4) za svaki kut nagibanja
- Krivulja poluge stabiliteta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 7.

$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$GZ$	0.00	0.36	0.82	1.28	1.75	2.21	2.68	3.15	3.62	4.09	4.56
$A(GZ)$	0.00	0.12	0.71	1.76	3.28	5.25	7.70	10.61	13.99	17.84	22.16
$h(w)$	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22	1.21	1.20	1.20
$A(h(w))$	0.00	1.24	2.47	3.70	4.93	6.16	7.39	8.61	9.82	11.03	12.24

11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
5.04	5.52	6.00	6.49	6.98	7.97	8.49	9.07	9.68	10.33	10.96
26.96	32.24	38.00	44.26	50.96	58.44	66.69	75.46	84.84	94.84	105.49
1.19	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12	1.10	1.09	1.08
13.44	14.63	15.81	16.99	18.15	19.31	20.46	21.60	22.72	23.84	24.94

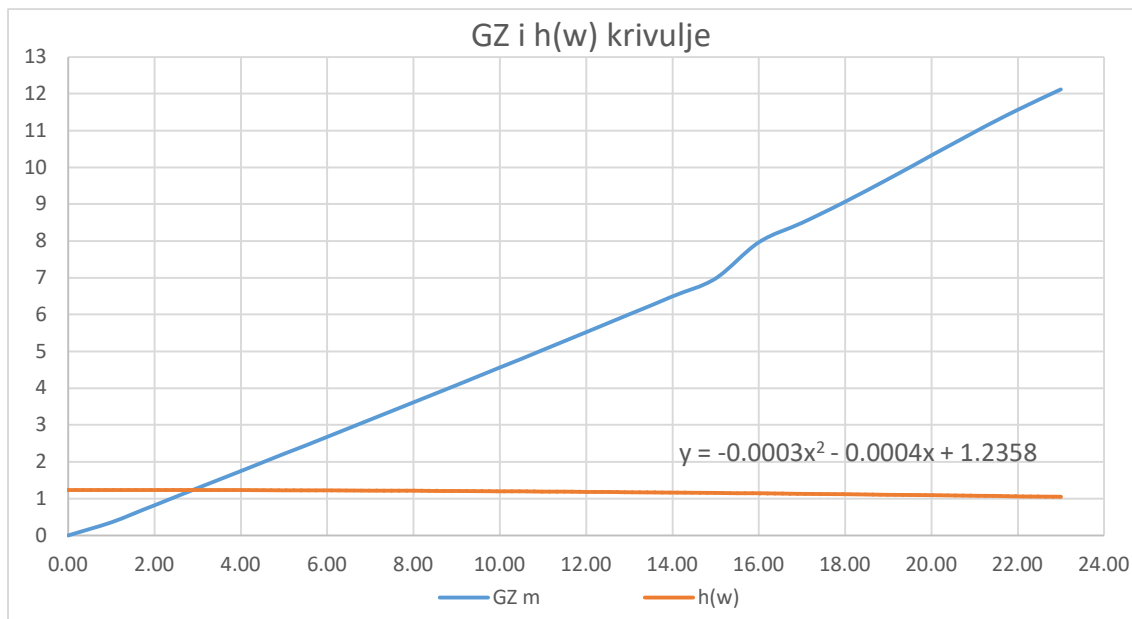
22.00	23.00
11.56	12.12
116.76	128.60
1.06	1.05
26.03	27.10

**Tablica 7 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 2**

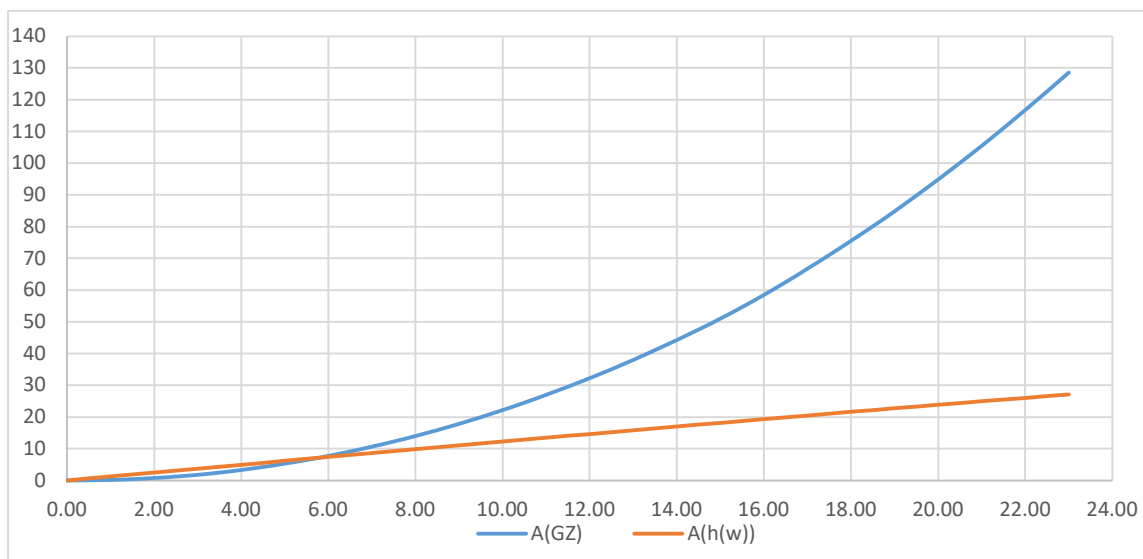
Površina ispod krivulje poluge prekretnog momenta dobivena integracijom jednadžbe sa slike 9:  $y = -0.0003x^2 - 0.0004x + 1.2358$  s granicama od početnog kuta  $\alpha_{start}$  do kuta naplavlivanja  $\theta$ .

Slika 9 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 7 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .

Slika 10 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 7 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



Slika 9 Dijagram poluge stabiliteta 2



Slika 10 Dijagram puta stabiliteta 2

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 9:  $\varphi_I = 2.90^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 10:  $\varphi_{Ds} = 6.25^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  $A_A = 27.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 35.23 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $12.6^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!

### **Nagibanje na lijevu stranu tj. nagibanje na stranu na kojoj je jedan krak.**

- Vrijede sve pretpostavke kao i za nagibanje na desnu stranu, razlikuju se podaci:
  - $GZ$  krivulje
  - Površine ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$
  - Kutevi statičkog i dinamičkog stabiliteta  $\varphi_I$  i  $\varphi_{Ds}$
  - Površine  $A_A$  i  $A_B$
  - Krivulja poluge stabiliteta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 8.

$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$GZ$	0.00	0.36	0.82	1.28	1.75	2.21	2.68	3.15	3.62	4.09	4.56
$A(GZ)$	0.00	0.12	0.71	1.76	3.28	5.25	7.70	10.61	13.99	17.84	22.16
$h(w)$	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22	1.21	1.20	1.20
$A(h(w))$	0.00	1.24	2.47	3.70	4.93	6.16	7.39	8.61	9.82	11.03	12.24

11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
5.04	5.52	6.00	6.49	6.98	7.97	8.49	9.07	9.68	10.33	10.96
26.96	32.24	38.00	44.26	50.96	58.44	66.69	75.46	84.84	94.84	105.49
1.19	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12	1.10	1.09	1.08
13.44	14.63	15.81	16.99	18.15	19.31	20.46	21.60	22.72	23.84	24.94

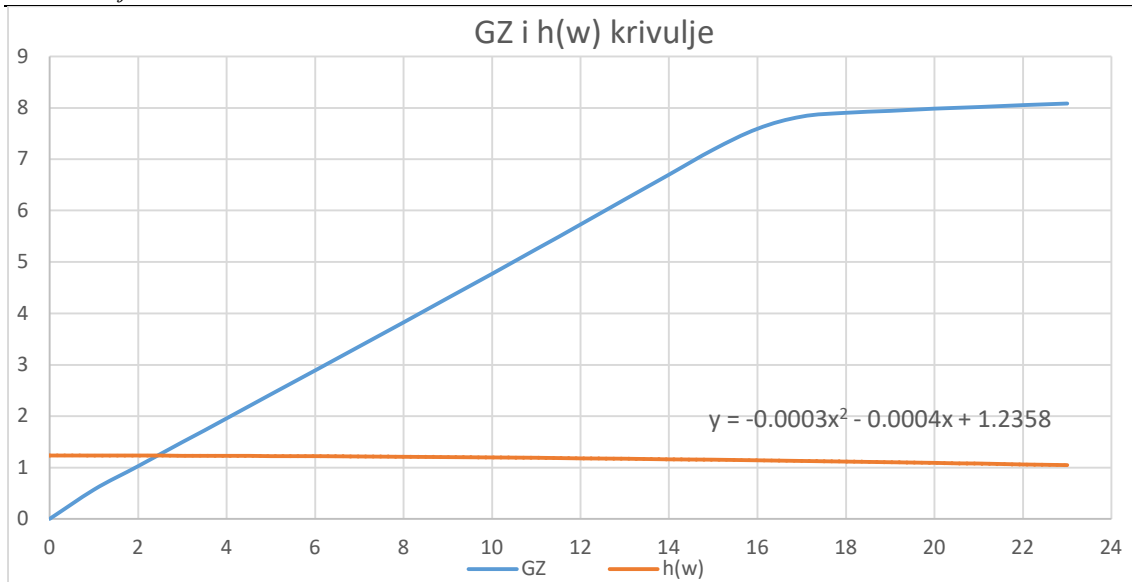
22.00	23.00
11.56	12.12
116.76	128.60
1.06	1.05
26.03	27.10

**Tablica 8 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 3**

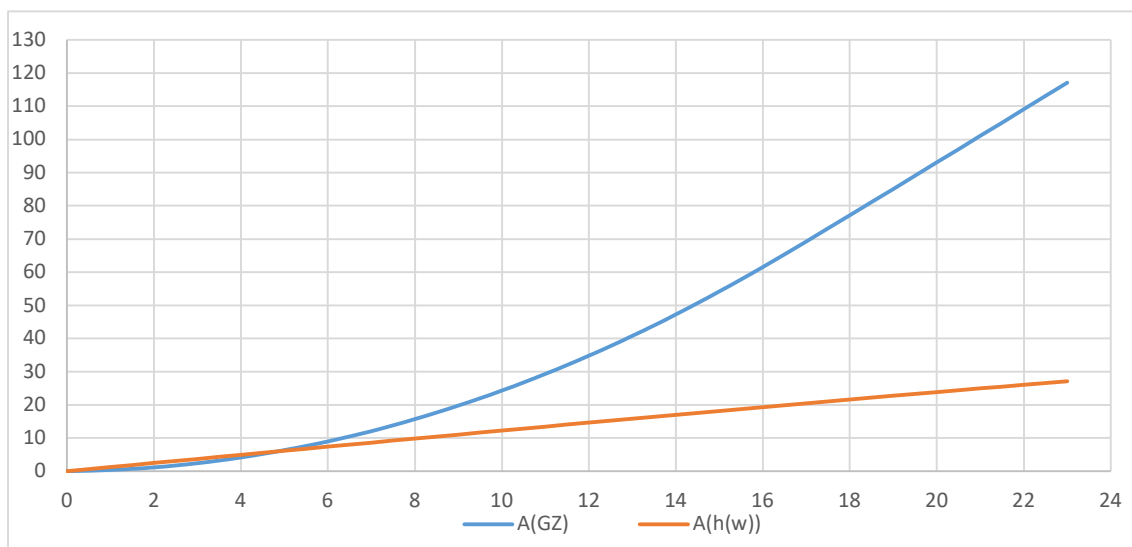
Površina ispod krivulje poluge prekretnog momenta dobivena integracijom jednadžbe sa slike 11:  $y = -0.0003x^2 - 0.0004x + 1.2358$  s granicama od početnog kuta  $\alpha_{start}$  do kuta naplavlivanja  $\theta$ .

Slika 11 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 8 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .

Slika 12 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 8 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



Slika 11 Dijagram poluge stabiliteta 3



Slika 12 Dijagram puta stabiliteta 3

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 11:  $\varphi_I = 2.50^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 12:  $\varphi_{Ds} = 4.50^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  
 $A_A = 27.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 35.23 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $12.1^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!



## 6.4 Proračun stabiliteta za projektni slučaj opterećenja DLC 6.3

Proračunavamo stabilitet za ponton kojem je os rotacije oko crte “Baseline”. Prikazano je na slici 5.

Za projektni slučaj opterećenja DLC 6.3 uzeta je je godišnja srednja 10-minutna brzina vjetra na visini glavčine rotora vjetroturbine iz tablice 9.

DLC	Wind Condition	Hub Height Wind Speed (m/s)	Wind Headings (°)	Significant Wave Height (m)	Peak Period (s)	Gamma Shape Factor (-)	Wave Headings (°)	Settings	# of Seeds	Total # of Sims
6.3	EWM 1 yr	38.00	0.00	6.98	11.70	2.75	0.00	Yaw +/- 20°	6	12

Tablica 9 Matrica projektnih slučajeva opterećenja [1]

U ovom proračunu je zanemaren utjecaj valova uz sljedeće ulazne parametre:

- Zbog ekstremnih brzina vjetra vjetroturbina ne radi
- Koeficijent oblika  $C_S$  odabrali smo iz tablice 1 za cilindar, a on iznosi:  $C_S = 0.5$
- Visinski koeficijent  $C_h$  odredili smo iz tablice 2, a on iznosi :  $C_h = 1.6$
- $\rho$  – gustoća zraka  $1.222 \text{ kg/m}^3$
- Projicirana površina izložena vjetru  $A$  računa se prema:  $A = \pi * r^2 * h = 2,120.57 \text{ m}^2$
- Polumjer stupa  $r$  iznosi:  $r = 5 \text{ m}$ , iz tablice 3
- Visina stupa  $h$  iznosi:  $h = 135\text{m}$ , iz tablice 3
- Početni kut  $\alpha_{start}$  definiran je kao ulazni podatak i iznosi:  $\alpha_{start} = 0^\circ$
- Očitana 10-minutna srednja brzina iz tablice 9 iznosi:  $U_{1G} = 38 \text{ m/s} = V$
- Iz jednadžbe (3) slijedi:  $F = 203,161.27 \text{ N}$ .

Prema tablici 5 odabrali smo referencu za kut naplavlivanja. Odabrali smo da nam je kut naplavlivanja  $\theta = 23^\circ$ . Kut naplavlivanja nam je ulazni podatak. Proračun stabiliteta vršimo do kuta naplavlivanja jer nam je taj kut manji od drugog kuta presjeka krivulje momenta prekretanja i krivulje momenta uspravljanja.

Krak poluge  $l$  je visina od težišta istisnine do težišta projicirane površine na koju djeluje vjetar.

Prema tome krak poluge iznosi 82.5 m. Ostali parametri proračunati su kako slijedi:

- Istisnina s kojom ćemo napraviti proračun dobivena je iz Maxsurf-a prema modelu s kojim je provedena simulacija, ona iznosi:  $\Delta = 20,500 \text{ t} = 201,105,000 \text{ N}$
- Polugu prekretnog momenta dobijemo:  $h(w) = \frac{M_{wind}}{\Delta}$
- $M_{wind}$  dobijemo iz jednadžbe (4) za svaki kut nagibanja
- Krivulja poluge stabiliteta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 10.

$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$GZ$	0.00	0.44	0.89	1.33	1.78	2.22	2.67	3.12	3.57	4.02	4.47
$A(GZ)$	0.00	0.22	0.89	1.99	3.55	5.54	7.99	10.88	14.22	18.01	22.26
$h(w)$	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84
$A(h(w))$	0.00	0.87	1.74	2.60	3.47	4.33	5.20	6.05	6.91	7.76	8.61

11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
4.93	5.39	5.85	6.32	6.79	7.27	7.75	8.17	8.45	8.54	8.59
26.96	32.12	37.74	43.83	50.39	57.42	64.93	72.89	81.22	89.72	98.28
0.84	0.83	0.82	0.82	0.81	0.80	0.79	0.79	0.78	0.77	0.76
9.45	10.29	11.13	11.96	12.78	13.60	14.41	15.21	16.00	16.79	17.57

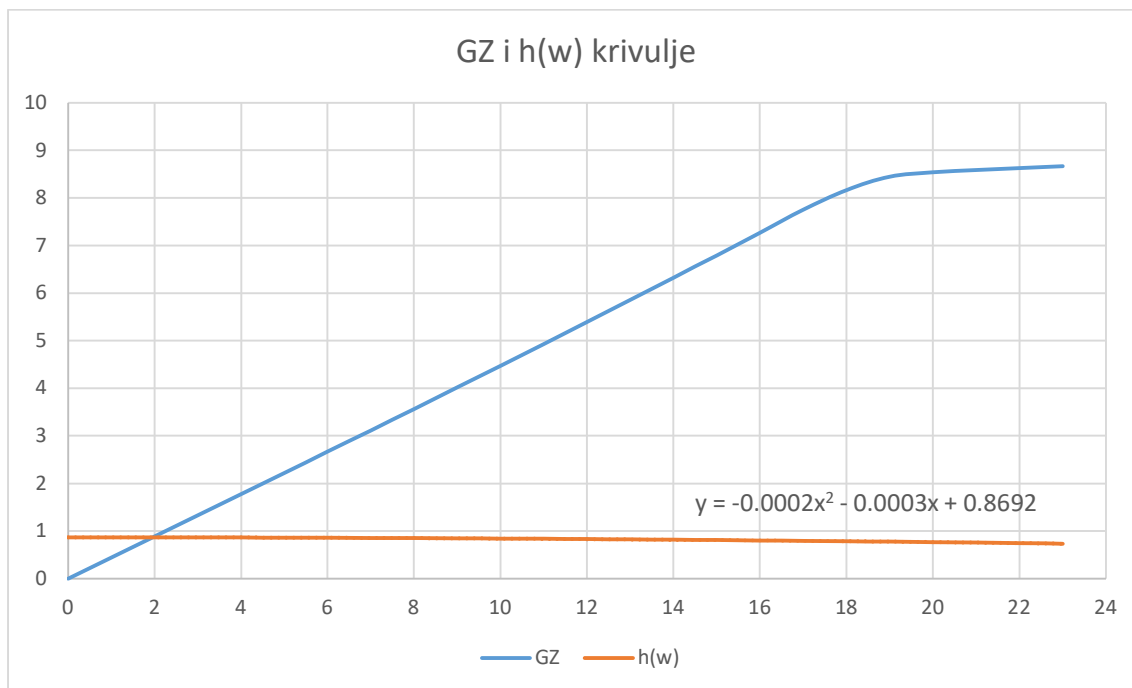
22.00	23.00
8.63	8.67
106.89	115.54
0.75	0.74
18.34	19.10

**Tablica 10 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 4**

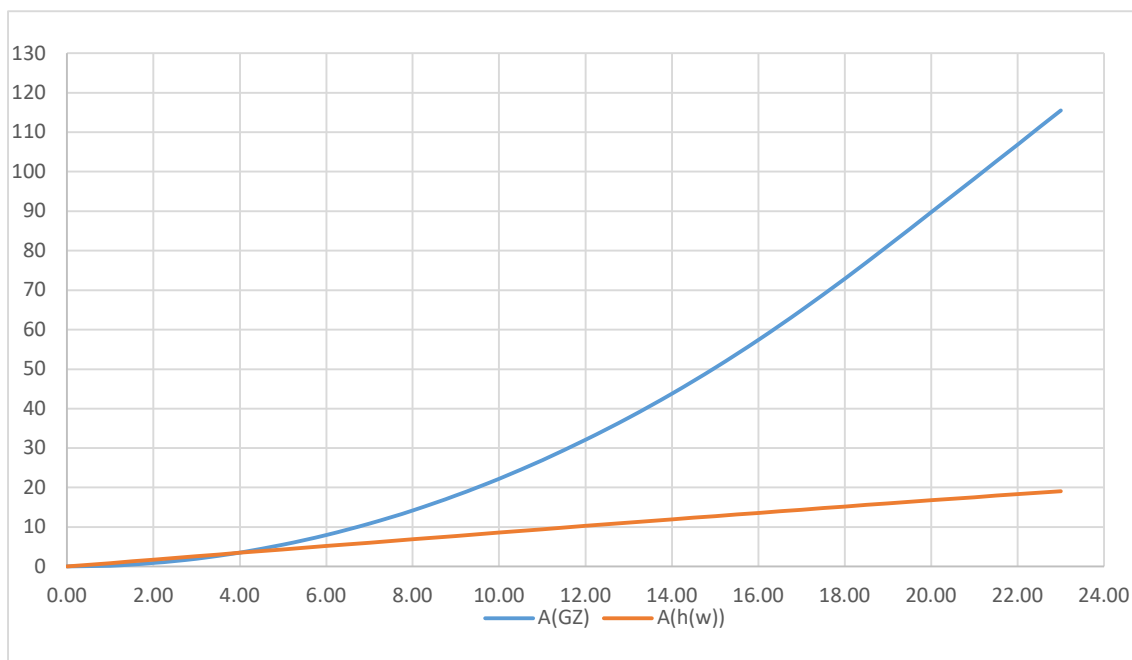
Površina ispod krivulje poluge prekretnog momenta dobivena integracijom jednadžbe sa slike 13:  $y = -0.0002x^2 - 0.0003x + 0.8692$  s granicama od početnog kuta  $\alpha_{start}$  do kuta naplavlivanja  $\theta$ .

Slika 13 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 10 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .

Slika 14 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 10 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



Slika 13 Dijagram poluge stabiliteta 4



Slika 14 Dijagram puta stabiliteta 4

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 13:  $\varphi_I = 1.98^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 14:  $\varphi_{Ds} = 3.90^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  
 $A_A = 19.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 24.83 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $10.6^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!

## 6.5 Proračun stabiliteta za projektni slučaj opterećenja DLC 6.3, zakrenuto za 30°

Proračunavamo stabilitet za ponton kojem je os rotacije oko crte "Baseline". Prikazano je na slici 8. Zbog asimetrije provjerit ćemo nagibanje na jednu i na drugu stranu. Slijede parametri proračuna za nagibanje na desnu stranu tj. nagibanje na stranu na kojoj su dva kraka.

Za projektni slučaj opterećenja DLC 6.3 uzeta je je godišnja srednja 10-minutna brzina vjetra na visini glavčine rotora vjetroturbine iz tablice 9.

U ovom proračunu je zanemaren utjecaj valova uz sljedeće ulazne podatke:

- Zbog ekstremnih brzina vjetra vjetroturbina ne radi
- Koeficijent oblika  $C_S$  odabrali smo iz tablice 1 za cilindar, a on iznosi:  $C_S = 0.5$
- Visinski koeficijent  $C_h$  odredili smo iz tablice 2, a on iznosi :  $C_h = 1.6$
- $\rho$  – gustoća zraka  $1.222 \text{ kg/m}^3$
- Projicirana površina izložena vjetru  $A$  računa se prema:  $A = \pi * r^2 * h = 2,120.57 \text{ m}^2$
- Polumjer stupa  $r$  iznosi:  $r = 5 \text{ m}$ , iz tablice 3
- Visina stupa  $h$  iznosi:  $h = 135\text{m}$ , iz tablice 3
- Početni kut  $\alpha_{start}$  definiran je kao ulazni podatak i iznosi:  $\alpha_{start} = 0^\circ$
- Očitana 10-minutna srednja brzina iz tablice 9 iznosi:  $U_{1G} = 38 \text{ m/s} = V$
- Iz jednadžbe (3) slijedi:  $F = 203,161.27\text{N}$

Prema tablici 5 odabrali smo referencu za kut naplavljivanja. Odabrali smo da nam je kut naplavljivanja  $\theta = 23^\circ$ . Kut naplavljivanja nam je ulazni podatak. Proračun stabiliteta vršimo do kuta naplavljivanja jer nam je taj kut manji od drugog kuta presjeka krivulje momenta prekretanja i krivulje momenta uspravljanja.

Krak poluge  $l$  je visina od težišta istisnine do težišta projicirane površine na koju djeluje vjetar.

Prema tome krak poluge iznosi  $82.5 \text{ m}$ . Ostali parametri proračuna definirani su kako slijedi:

- Istisnina  $s$  kojom ćemo napraviti proračun dobivena je iz Maxsurf-a prema modelu s kojim je provedena simulacija, ona iznosi:  $\Delta = 20,500 \text{ t} = 201,105,000 \text{ N}$
- Polugu prekretnog momenta dobijemo:  $h(w) = \frac{M_{wind}}{\Delta}$
- $M_{wind}$  dobijemo iz jednadžbe (4) za svaki kut nagibanja.

Krivulja poluge stabiliteta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 11.

$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$GZ$	0.00	0.36	0.82	1.28	1.75	2.21	2.68	3.15	3.62	4.09	4.56
$A(GZ)$	0.00	0.12	0.71	1.76	3.28	5.25	7.70	10.61	13.99	17.84	22.16
$h(w)$	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84
$A(h(w))$	0.00	0.87	1.74	2.60	3.47	4.33	5.20	6.05	6.91	7.76	8.61

11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
5.04	5.52	6.00	6.49	6.98	7.97	8.49	9.07	9.68	10.33	10.96
26.96	32.24	38.00	44.26	50.96	58.44	66.69	75.46	84.84	94.84	105.49
0.84	0.83	0.82	0.82	0.81	0.80	0.79	0.79	0.78	0.77	0.76
9.45	10.29	11.13	11.96	12.78	13.60	14.41	15.21	16.00	16.79	17.57

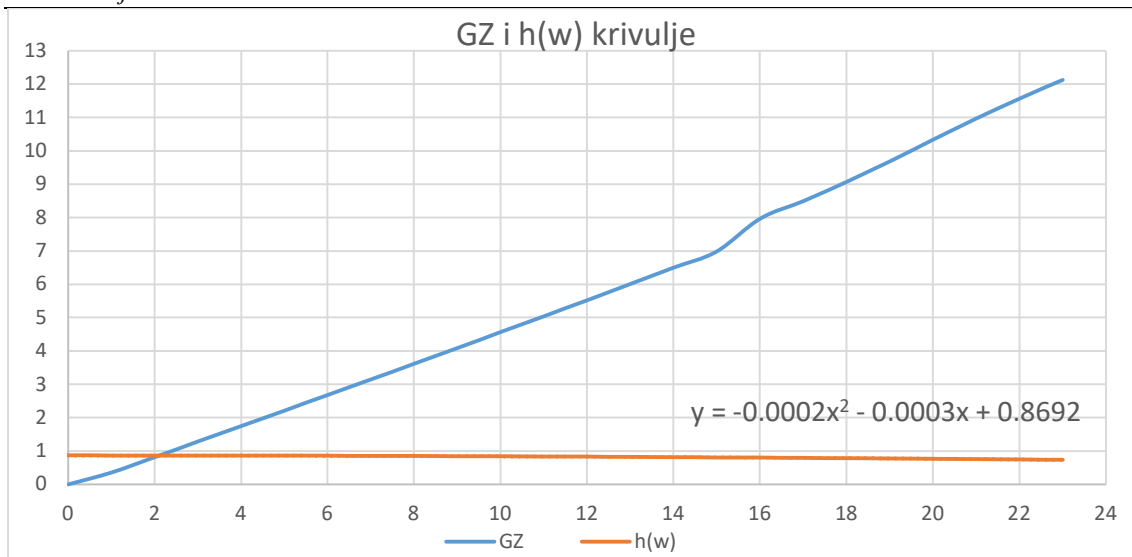
22.00	23.00
11.56	12.12
116.76	128.60
0.75	0.74
18.34	19.10

**Tablica 11 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 5**

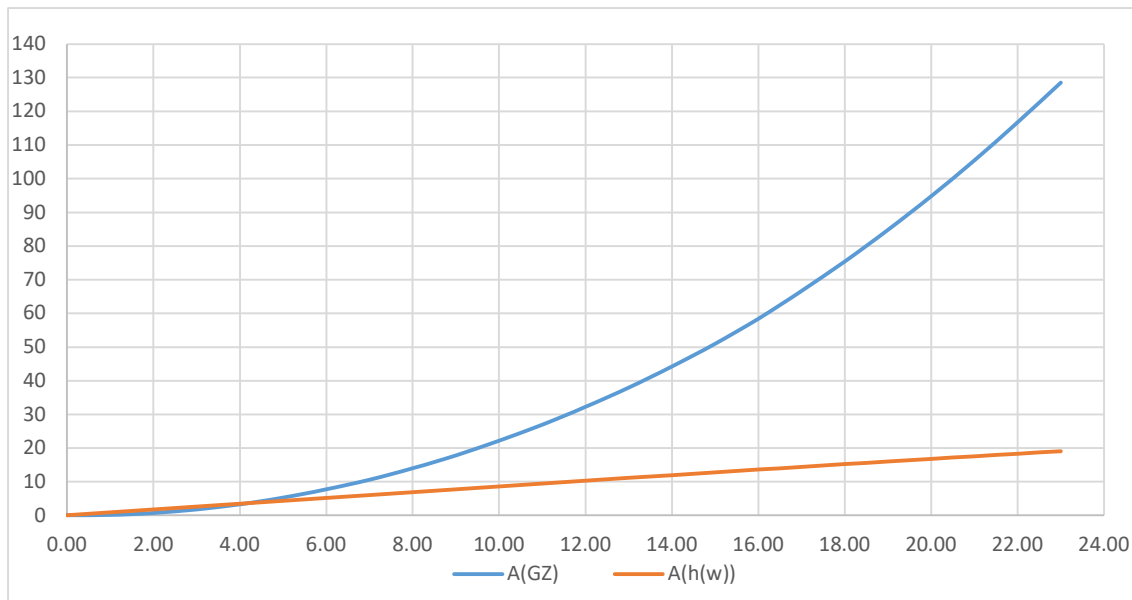
Površina ispod krivulje poluge prekretnog momenta dobivena integracijom jednadžbe sa slike 15:  $y = -0.0002x^2 - 0.0003x + 0.8692$  s granicama od početnog kuta  $\alpha_{start}$  do kuta naplavlivanja  $\vartheta$ .

Slika 15 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 11 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .

Slika 16 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 11 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



Slika 15 Dijagram poluge stabiliteta 5



Slika 16 Dijagram puta stabiliteta 5

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 15:  $\varphi_l = 2.10^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 16:  $\varphi_{Ds} = 4.00^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju (1.3) površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  
 $A_A = 19.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija (1.3) dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 24.83 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $10.6^\circ$

Time je kriterij (1.3) zadovoljen. Također su i kriteriji (1.1) i (1.2) zadovoljeni!

**Nagibanje na lijevu stranu tj. nagibanje na stranu na kojoj je jedan krak.**

Vrijede sve pretpostavke kao i za nagibanje na desnu stranu, razlikuju se podaci:

- GZ krivulje
- Površine ispod GZ krivulje  $A(GZ)$
- Kutevi statičkog i dinamičkog stabiliteta  $\varphi_I$  i  $\varphi_{Ds}$
- Površine  $A_A$  i  $A_B$
- Krivulja poluge stabiliteta GZ i površina ispod GZ krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 12.

$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
GZ	0.00	0.57	1.03	1.49	1.96	2.42	2.89	3.36	3.83	4.30	4.77
$A(GZ)$	0.00	0.34	1.14	2.40	4.13	6.32	8.97	12.10	15.69	19.75	24.29
$h(w)$	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84
$A(h(w))$	0.00	0.87	1.74	2.60	3.47	4.33	5.20	6.05	6.91	7.76	8.61

11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
5.25	5.73	6.21	6.70	7.19	7.59	7.83	7.90	7.94	7.98	8.02
29.30	34.79	40.76	47.21	54.16	61.56	69.29	77.17	85.09	93.05	101.05
0.84	0.83	0.82	0.82	0.81	0.80	0.79	0.79	0.78	0.77	0.76
9.45	10.29	11.13	11.96	12.78	13.60	14.41	15.21	16.00	16.79	17.57

22.00	23.00
8.05	8.09
109.09	117.15
0.75	0.74
18.34	19.10

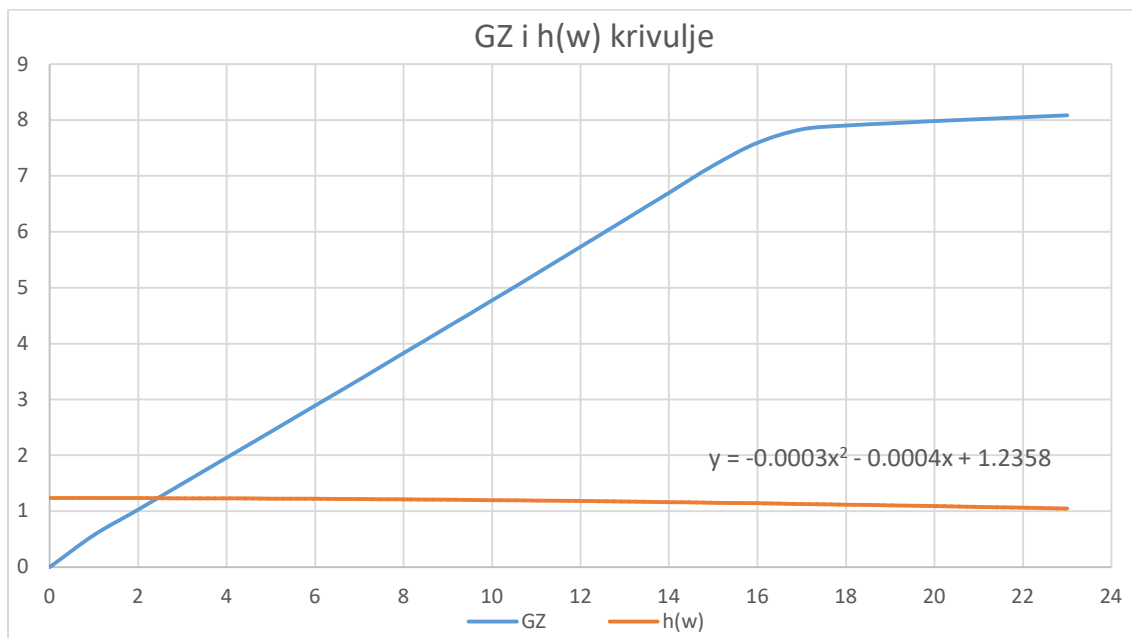
**Tablica 12** Karakteristike pučinske plutajuće vjetro turbine pri kutevima nagiba 6

Površina ispod krivulje poluge prekretnog momenta dobivena integracijom jednadžbe sa slike 17:  $y = -0.0002x^2 - 0.0003x + 0.8692$  s granicama od početnog kuta  $\alpha_{start}$  do kuta naplavlivanja  $\theta$ .

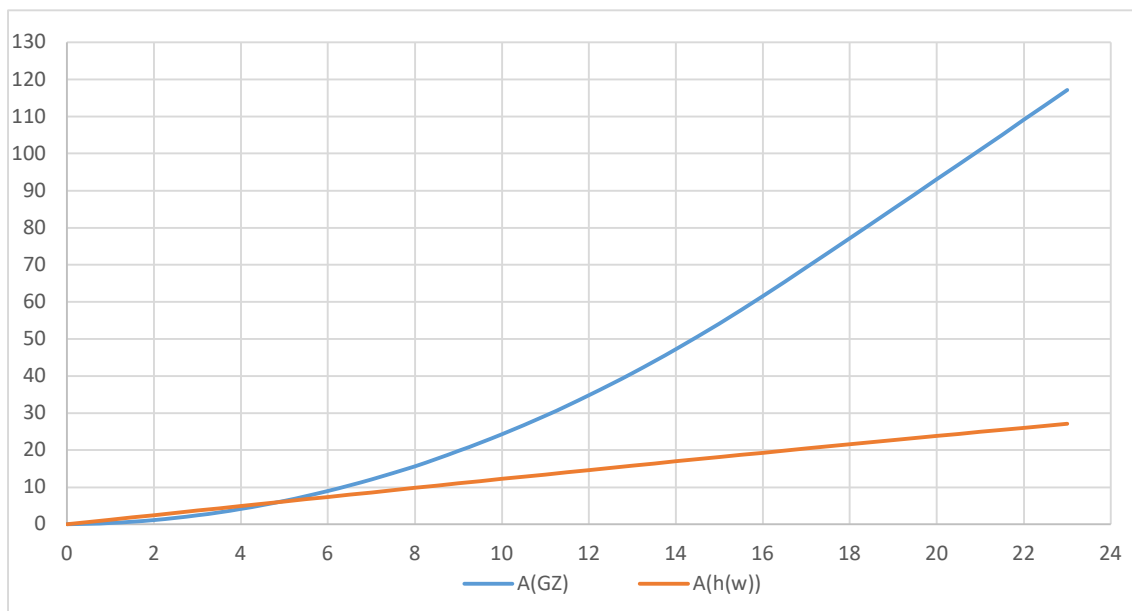


Slika 17 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 12 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .

Slika 18 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 12 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



Slika 17 Dijagram poluge stabiliteta 6



Slika 18 Dijagram puta stabiliteta 6

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 11:  $\varphi_I = 1.65^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 12:  $\varphi_{Ds} = 3.20^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  
 $A_A = 19.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 24.83 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $10.1^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!

## 7 Optimizacija forme pontona plutajuće pučinske vjetroelektrane

U ovom poglavlju provedena je optimizacija platforme. Proveli smo ju na način da smo zadržali volumen istisnine, a istovremeno promijenili dimenzije pojedinih dijelova platforme. Ograničenje koje smo postavili je kriterij (1.4) uzet iz literature [6]:

$$F_B * z_{CB} - W_T * g * z_{CG} + g * \rho_W \iint x^2 * dS \geq \frac{T_t * h_t}{\varepsilon_5} \quad (1.4)$$

gdje su:

- $g$  – gravitacijska konstanta, ista je za obje forme i iznosi  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $\rho_W$  – gustoća morske vode, ista je za obje forme i iznosi  $\rho_W = 1,025 \text{ kg/m}^3$
- $\Delta$  – volumen istisnine iz literature [1], isti je za obje forme i iznosi  $\Delta = 20,205.94 \text{ m}^3$
- $F_B$  – sila uzgona, ista je za obje forme i iznosi  $F_B = \rho_W * g * \Delta = 203,175,769.89 \text{ N}$
- $z_{CB}$  – težište uzgona mjereno od osnovice
- $W_T$  – ukupna masa, ista je za obje forme i iznosi  $W_T = \Delta * \rho_W = 20,711,087.65 \text{ kg}$
- $z_{CG}$  – težište mase mjereno od osnovice
- $\iint x^2 * dS$  – moment tromosti vodne linije
- $T_t$  – sila potiska na vjetroturbini
- $h_t$  – visina glavčine rotora iznad vodne linije
- $\varepsilon_5$  – kut nagiba podatak iz literature [6], isti je za obje forme i iznosi

$$\varepsilon_5 = 4^\circ = 0.06981317 \text{ rad.}$$

Za početnu formu iz literature [1]:

- $z_{CB} = 6.37 \text{ m}$
- $z_{CG} = 5.06 \text{ m}$
- $\iint x^2 * dS = 485,114.32 \text{ m}^4$
- $T_t = 1516937.47 \text{ N}$
- $h_t = 150 \text{ m}$

Prema navedenim podacima slijedi:

- $\frac{T_t * h_t}{\varepsilon_5} = 3,259,279,296$
- $F_B * z_{CB} - W_T * g * z_{CG} + g * \rho_W \iint x^2 * dS = 5,144,903,764$

Time je kriterij (1.4) zadovoljen!

Funkcija cilja optimizacije smanjenje površina limova vanjskih cilindara i krakova prema uzoru na literaturu [6].

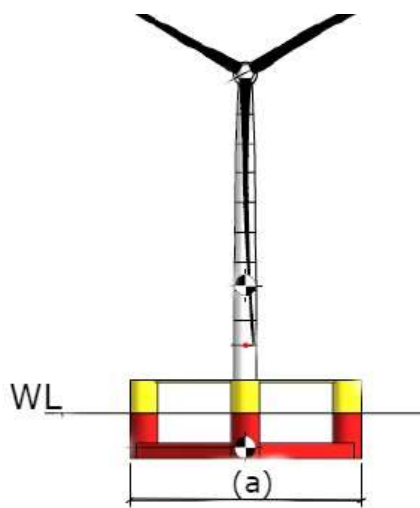
### Optimizirana forma

U tablici 13 se nalaze dimenzije prije i nakon optimizacije. Početna forma je forma iz literature [1].

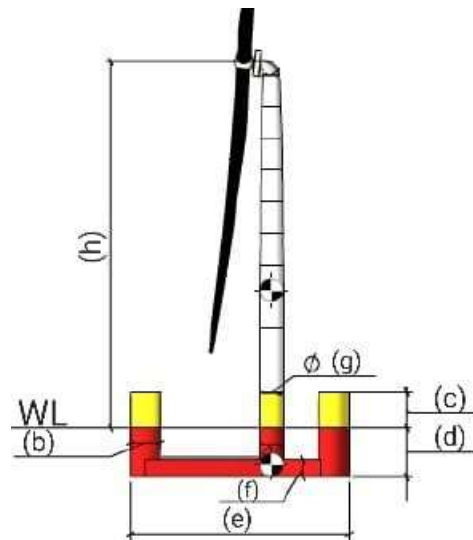
Dimenzije	Početna forma	Optimizirana forma
(a) Širina	102.13 m	88.49 m
(b) Promjer vanjskih cilindričnih stupova	12.50 m	10.95 m
(c) Nadvođe	15 m	15 m
(d) Gaz	20 m	22.84 m
(e) Duljina	90.13 m	78.11 m
(f) Visina krakova	7 m	9.84 m
(g) Promjer srednjeg cilindričnog stupa	10 m	10 m
(h) Visina od glavčine rotora do vodne linije	150 m	150 m
(i) Širina krakova	12.50 m	10.95 m
(k) Udaljenost od središta vanjskog i središnjeg stupa	51.75 m	44.77 m
Površina vodne linije $A_{VL}$	446.70 m <sup>2</sup>	361.15 m <sup>2</sup>
Metacentarski radijus $MB$	24.01 m	13.53 m

Tablica 13 Promjene dimenzija prije i poslije optimizacija

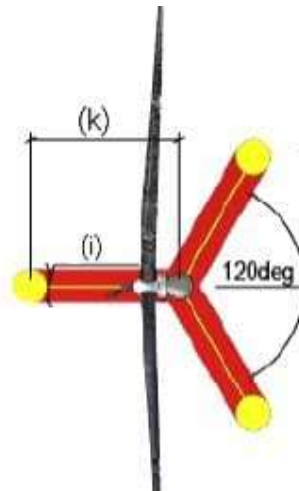
Slike 19, 20 i 21 prikazuju dimenzije navedene u tablici 13.



Slika 19 Nacrt [1]



Slika 20 Bokocrt [1]



Slika 21 Tlocrt [1]

Sama optimizacija provedena na način da smo pojedine dijelove platforme definirali kao:

- Optimizacijski prostor:
  - Gaz
  - Promjer vanjskih cilindričnih stupova
  - Visina krakova
  - Udaljenost od središta vanjskog i središnjeg stupa

Uz osnovne dimenzije pod optimizacijski prostor spadaju i parametri:

- Površina vodne linije  $A_{VL}$
- Metacentarski radijus  $MB$ .

Drugi dio je bio definiran kao:

- “implicitna ograničenja”. Taj dio se odnosio na:
  - Širina krakova
  - Promjer vanjskih cilindričnih stupova

Navedeni se dio mogao isto tako optimizirati ali je imao ograničenje. Širina krakova je morala biti jednaka promjeru vanjskih cilindričnih stupova.

Treći dio definiramo pod nazivom:

- Konstantno
  - Promjer srednjeg cilindričnog stupa
  - Nadvođe

Te dijelove nismo mijenjali.

Nakon optimizacije dobili smo uštedu površina limova vanjskih cilindara i horizontalnih elemenata od 7.91%. Površina čelika prije i poslije optimizacije:

- Prije optimizacije  $A_{STEEL1} = 10,492.03 \text{ m}^2$
- Nakon optimizacije  $A_{STEEL2} = 9,662.54 \text{ m}^2$

Za optimiziranu formu:

- $z_{CB} = 7.57 \text{ m}$
- $z_{CG} = 5.06 \text{ m}$ , ostavljamo kao konstantno
- $\iint x^2 * dS = 273,336 \text{ m}^4$
- $T_t = 1516937.47 \text{ N}$
- $h_t = 150 \text{ m}$

Prema navedenim podacima slijedi:

- $\frac{T_t * h_t}{\varepsilon_5} = 3,259,279,296$
- $F_B * z_{CB} - W_T * g * z_{CG} + g * \rho_W \iint x^2 * dS = 3,259,277,367$

Time je kriterij (1.4) zadovoljen! Mala razlika u navedenim iznosima je posljedica nesavršenosti numeričkog modela.

## 8 Proračun stabiliteta optimizirane forme

### 8.1 Proračun stabiliteta za projektni slučaj opterećenja DLC 1.1

Proračunavamo stabilitet za optimiziranu formu pontona oko uzdužne osi, ona nam je os rotacije. Na slici 5 to bi bila crta "Baseline".

Sve pretpostavke u potpoglavlju 6.2 vrijede i u ovom. Uzeta 10-minutna srednja brzina vjetra je ista kao i zanemarenja.

Krivulja poluge stabiliteta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 14.

Poluga prekretnog momenta  $h(w)$  i  $A(h(w))$  površina ispod krivulje prekretnog momenta proračunata je na isti način kao i u potpoglavlju 6.2.

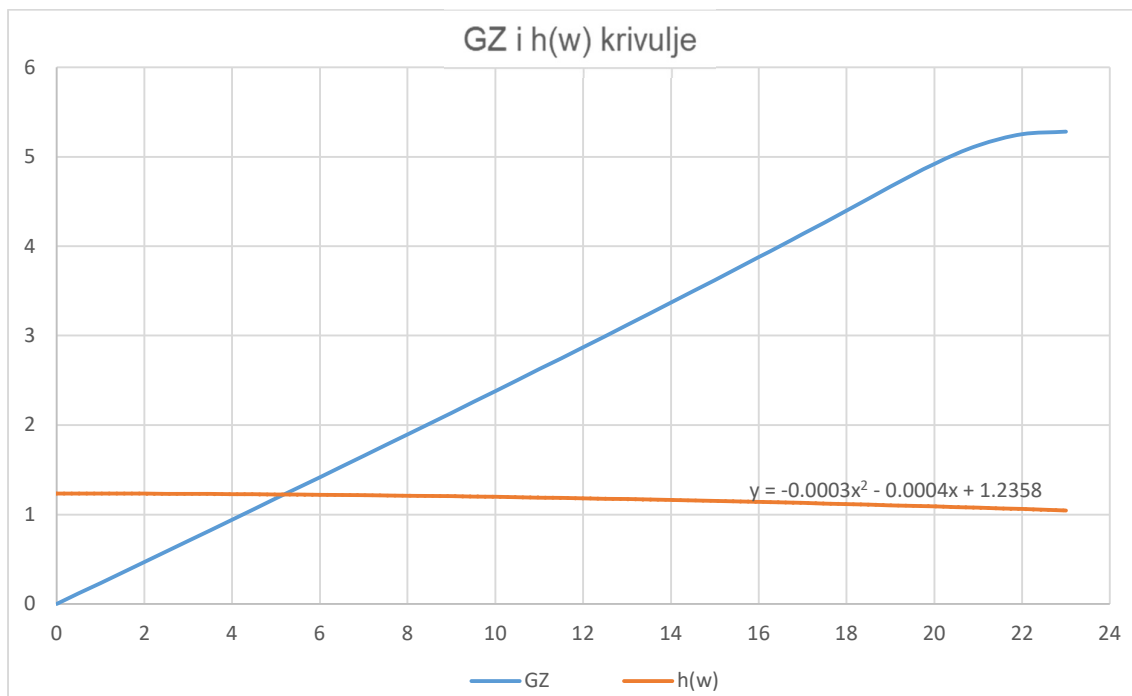
$\varphi$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$GZ$	0.00	0.24	0.47	0.71	0.94	1.18	1.42	1.66	1.90	2.14	2.38
$A(GZ)$	0.00	0.12	0.47	1.06	1.88	2.95	4.25	5.78	7.56	9.58	11.84
$h(w)$	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22	1.21	1.20	1.20
$A(h(w))$	0.00	1.24	2.47	3.70	4.93	6.16	7.39	8.61	9.82	11.03	12.24

11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
2.63	2.87	3.12	3.37	3.62	3.88	4.14	4.40	4.67	4.92	5.13
14.34	17.09	20.08	23.33	26.82	30.57	34.58	38.84	43.37	48.17	53.20
1.19	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12	1.10	1.09	1.08
13.44	14.63	15.81	16.99	18.15	19.31	20.46	21.60	22.72	23.84	24.94

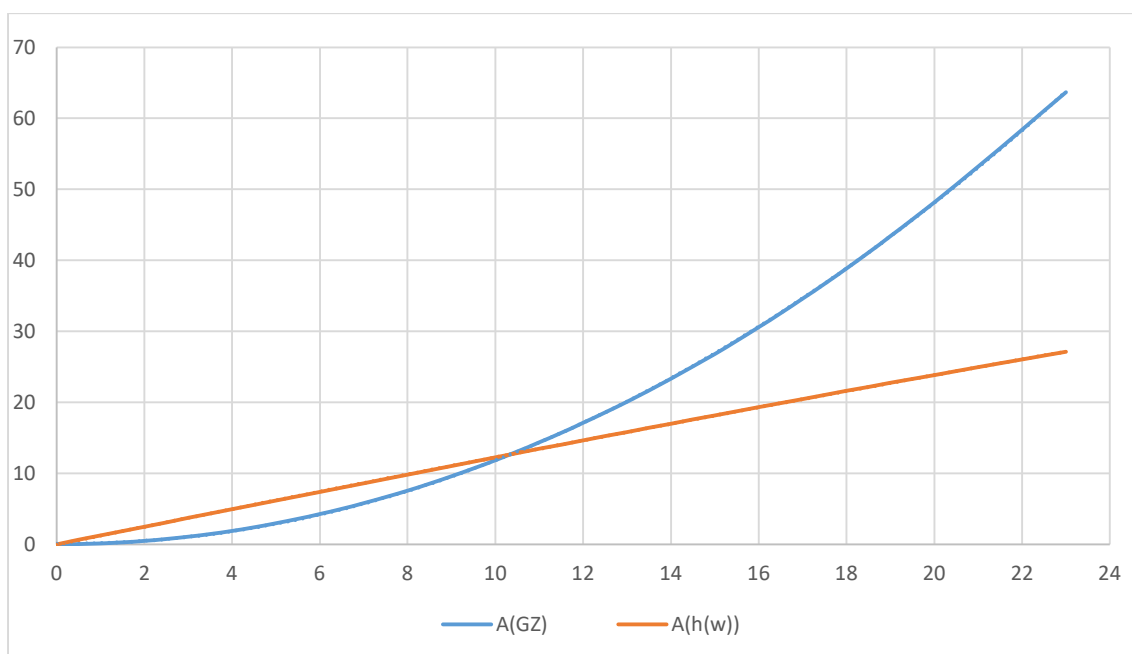
22	23
5.25	5.28
58.40	63.67
1.06	1.05
26.03	27.10

Tablica 14 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 7

Slika 22 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 14 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ . Slika 23 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 14 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



**Slika 22** Dijagram poluge stabiliteta 7



**Slika 23** Dijagram puta stabiliteta 7



Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 22:  $\varphi_I = 5.15^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 23:  $\varphi_{Ds} = 10.3^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  
 $A_A = 27.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 35.23 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $17.2^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!

## 8.2 Proračun stabilneta za projektni slučaj opterećenja DLC 1.1, zakrenuto za 30°

Proračunavamo stabilitet za ponton kojem je os rotacije oko crte "Baseline". Prikazano je na slici 8. Zbog asimetrije provjerit ćemo nagibanje na jednu i na drugu stranu. Slijedi za nagibanje na desnu stranu, nagibanje na stranu na kojoj su dva kraka.

Sve pretpostavke u potpoglavlju 6.3 vrijede i u ovom. Uzeta 10-minutna srednja brzina vjetra je ista kao i zanemarenja.

Krivulja poluge stabilneta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 15.

Poluga prekretnog momenta  $h(w)$  i  $A(h(w))$  površina ispod krivulje prekretnog momenta proračunata je na isti način kao i u potpoglavlju 6.3.

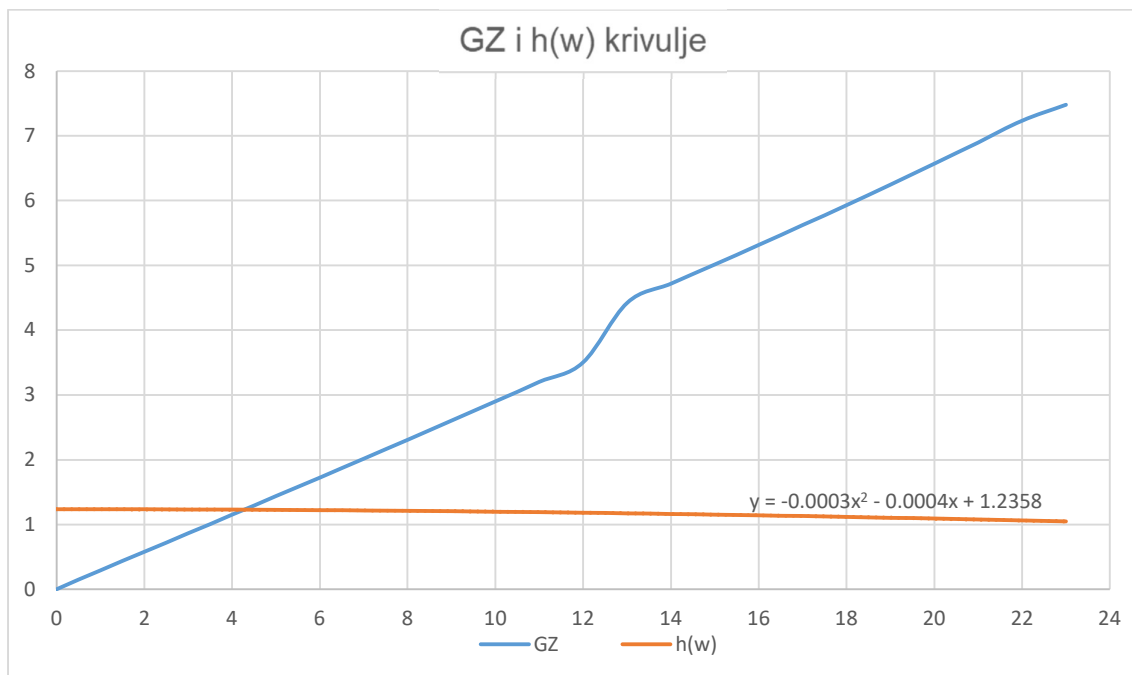
$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$GZ$	0.00	0.29	0.58	0.86	1.15	1.44	1.73	2.02	2.31	2.60	2.90
$A(GZ)$	0.00	0.15	0.58	1.31	2.31	3.61	5.19	7.06	9.22	11.67	14.42
$h(w)$	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22	1.21	1.20	1.20
$A(h(w))$	0.00	1.24	2.47	3.70	4.93	6.16	7.39	8.61	9.82	11.03	12.24

11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
3.20	3.50	4.42	4.72	5.01	5.31	5.62	5.93	6.25	6.57	6.90
17.48	20.79	24.75	29.36	34.22	39.39	44.85	50.63	56.71	63.12	69.85
1.19	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12	1.10	1.09	1.08
13.44	14.63	15.81	16.99	18.15	19.31	20.46	21.60	22.72	23.84	24.94

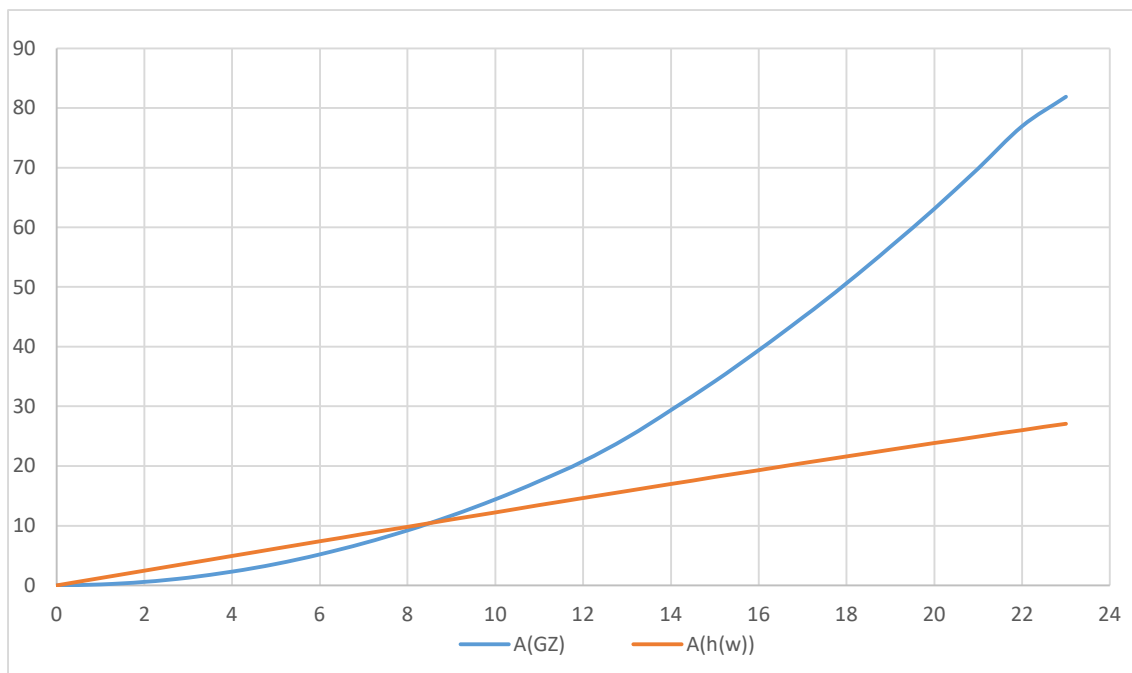
22.00	23.00
7.23	7.48
76.92	81.86
1.06	1.05
26.03	27.10

**Tablica 15** Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbinе pri kutevima nagiba 8

Slika 24 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 15 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ . Slika 25 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 15 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



**Slika 24 Dijagram poluge stabiliteta 8**



**Slika 25 Dijagram puta stabiliteta 8**

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 24:  $\varphi_I = 4.30^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 25:  $\varphi_{Ds} = 8.60^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  
 $A_A = 27.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 35.23 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $15.2^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!

### **Slijedi za nagibanje na lijevu stranu, nagibanje na stranu na kojoj je jedan krak.**

Vrijede sve pretpostavke kao i za nagibanje na desnu stranu, razlikuju se podaci:

- $GZ$  krivulje
- Površine ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$
- Kutevi statičkog i dinamičkog stabiliteta  $\varphi_I$  i  $\varphi_{Ds}$
- Površine  $A_A$  i  $A_B$
- Krivulja poluge stabiliteta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 16.

Poluga prekretnog momenta  $h(w)$  i  $A(h(w))$  površina ispod krivulje prekretnog momenta proračunata je na isti način kao i u potpoglavlju 6.3.

$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
GZ	0.00	0.27	0.56	0.84	1.12	1.41	1.69	1.98	2.26	2.55	2.83
A(GZ)	0.00	0.13	0.55	1.25	2.23	3.49	5.04	6.87	8.99	11.39	14.08
$h(w)$	1.24	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.22	1.22	1.21	1.20	1.20
A( $h(w)$ )	0.00	1.24	2.47	3.70	4.93	6.16	7.39	8.61	9.82	11.03	12.24

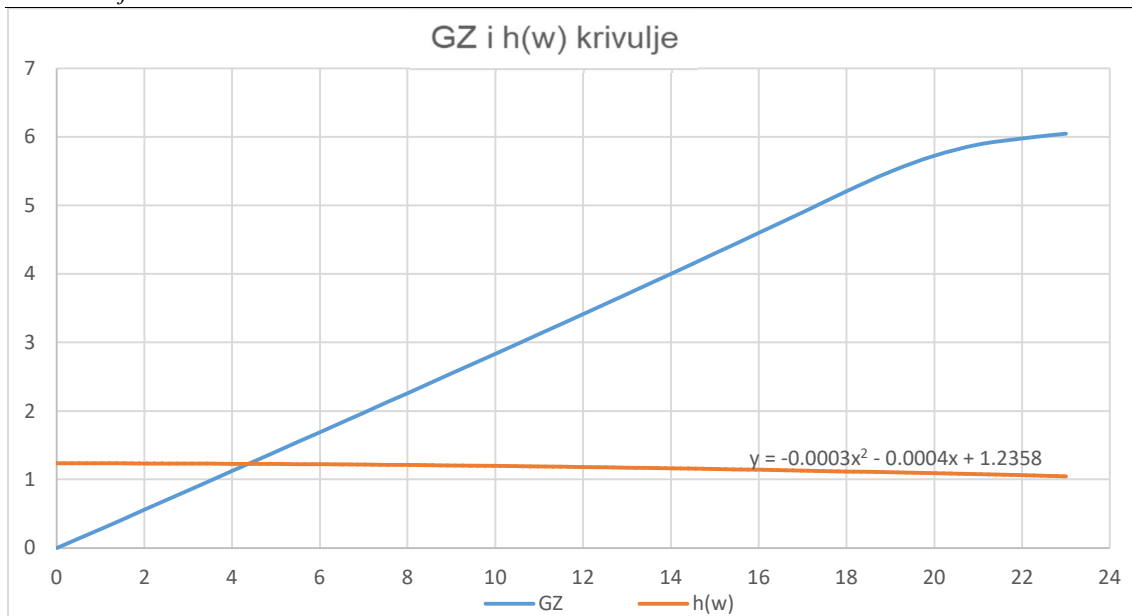
11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
3.12	3.41	3.71	4.00	4.30	4.60	4.90	5.21	5.49	5.72	5.89
17.06	20.33	23.89	27.74	31.89	36.34	41.09	46.14	51.49	57.11	62.92
1.19	1.18	1.17	1.16	1.15	1.14	1.13	1.12	1.10	1.09	1.08
13.44	14.63	15.81	16.99	18.15	19.31	20.46	21.60	22.72	23.84	24.94

22.00	23.00
5.98	6.05
68.85	74.87
1.06	1.05
26.03	27.10

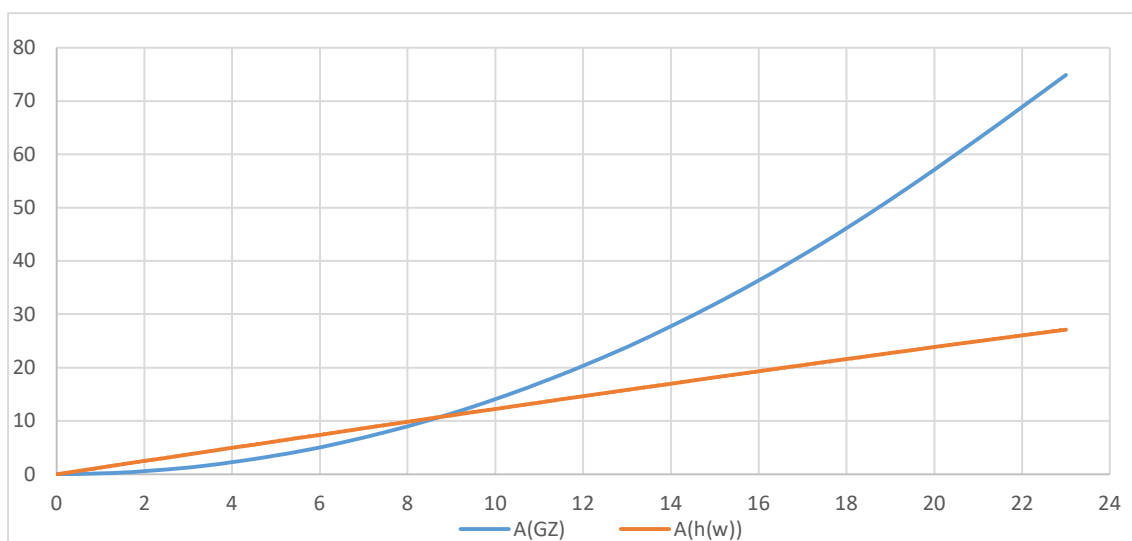
**Tablica 16** Karakteristike pučinske plutajuće vjetro turbine pri kutevima nagiba 9

Slika 26 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 16 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .

Slika 27 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 16 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



Slika 26 Dijagram poluge stabiliteta 9



Slika 27 Dijagram puta stabiliteta 9

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 26:  $\varphi_I = 4.30^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 27:  $\varphi_{Ds} = 8.70^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju (1.3) površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  $A_A = 27.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija (1.3) dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 35.23 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $12.1^\circ$

Time je kriterij (1.3) zadovoljen. Također su i kriteriji (1.1) i (1.2) zadovoljeni!

### 8.3 Proračun stabilneta za projektni slučaj opterećenja DLC 6.3

Proračunavamo stabilitet za optimiziranu formu pontona kojem je os rotacije oko crte “Baseline”. Prikazano je na slici 5.

Sve pretpostavke u potpoglavlju 6.4 vrijede i ovdje. Uzeta 10-minutna srednja brzina vjetrova je ista kao i zanemarenja.

Krivulja poluge stabilneta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 17.

Poluga prekretnog momenta  $h(w)$  i  $A(h(w))$  površina ispod krivulje prekretnog momenta proračunata je na isti način kao i u potpoglavlju 6.4.

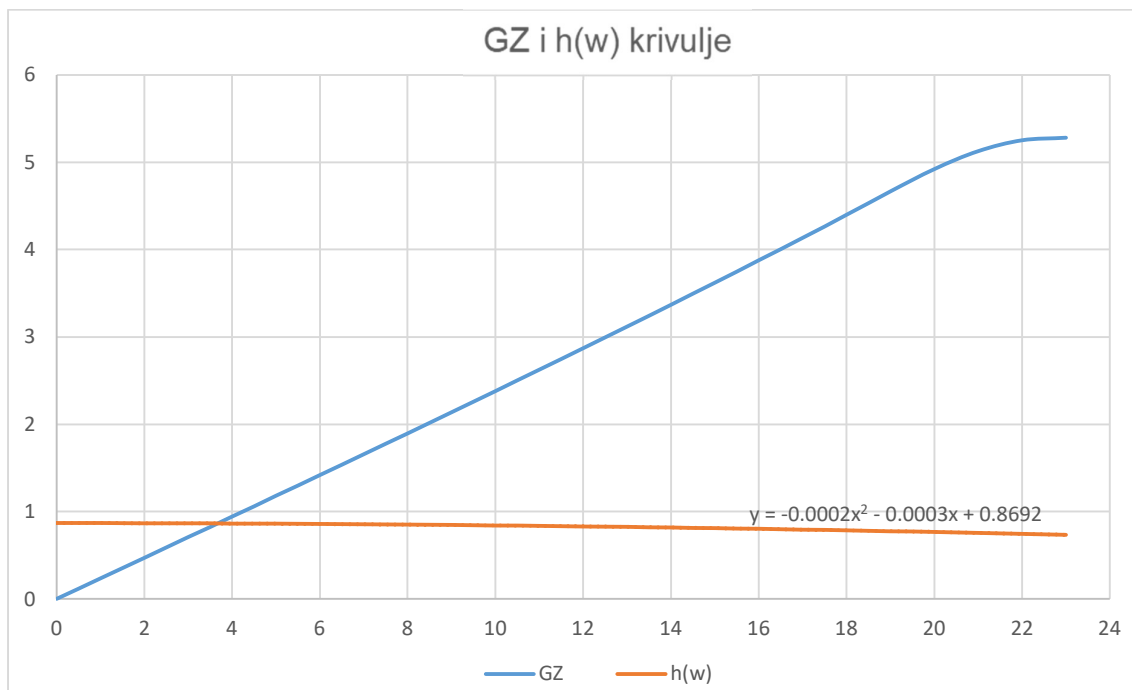
$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$GZ$	0.00	0.24	0.47	0.71	0.94	1.18	1.42	1.66	1.90	2.14	2.38
$A(GZ)$	0.00	0.12	0.47	1.06	1.88	2.95	4.25	5.78	7.56	9.58	11.84
$h(w)$	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84
$A(h(w))$	0.00	0.87	1.74	2.60	3.47	4.33	5.20	6.05	6.91	7.76	8.61

11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
2.63	2.87	3.12	3.37	3.62	3.88	4.14	4.40	4.67	4.92	5.13
14.34	17.09	20.08	23.33	26.82	30.57	34.58	38.84	43.37	48.17	53.20
0.84	0.83	0.82	0.82	0.81	0.80	0.79	0.79	0.78	0.77	0.76
9.45	10.29	11.13	11.96	12.78	13.60	14.41	15.21	16.00	16.79	17.57

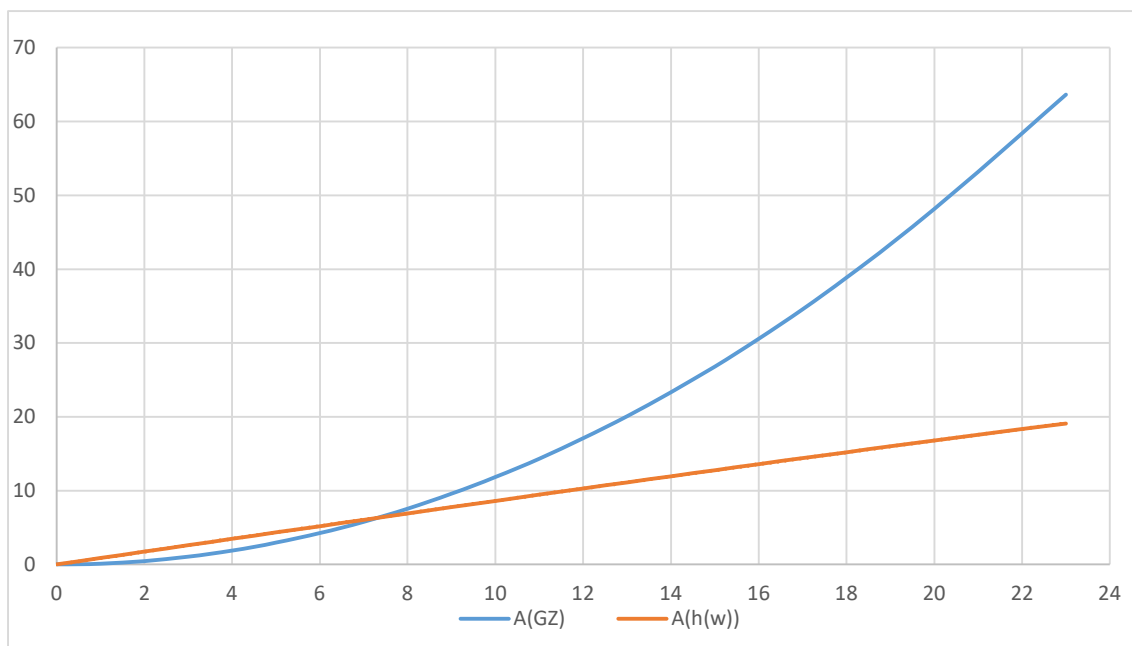
22.00	23.00
5.25	5.28
58.40	63.67
0.75	0.74
18.34	19.10

Tablica 17 Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 10

Slika 28 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 17 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ . Slika 29 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 17 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



**Slika 28 Dijagram poluge stabiliteta 10**



**Slika 29 Dijagram puta stabiliteta 10**



Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 28:  $\varphi_I = 3.70^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 29:  $\varphi_{Ds} = 7.40^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  
 $A_A = 19.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 24.83 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $14.5^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!

### 8.4 Proračun stabiliteta za projektni slučaj opterećenja DLC 6.3, zakrenuto za 30°

Proračunavamo stabilitet za ponton kojem je os rotacije oko crte "Baseline". Prikazano je na slici 8. Zbog asimetrije provjerit ćemo nagibanje na jednu i na drugu stranu. Slijedi za nagibanje na desnu stranu tj. nagibanje na stranu na kojoj su dva kraka.

Sve pretpostavke u potpoglavlju 6.5 vrijede ovdje. Uzeta 10-minutna srednja brzina vjetra je ista kao i zanemarenja.

Krivulja poluge stabiliteta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 18.

Poluga prekretnog momenta  $h(w)$  i  $A(h(w))$  površina ispod krivulje prekretnog momenta proračunata je na isti način kao i u potpoglavlju 6.5.

$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$GZ$	0.00	0.29	0.58	0.86	1.15	1.44	1.73	2.02	2.31	2.60	2.90
$A(GZ)$	0.00	0.15	0.58	1.31	2.31	3.61	5.19	7.06	9.22	11.67	14.42
$h(w)$	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84
$A(h(w))$	0.00	0.87	1.74	2.60	3.47	4.33	5.20	6.05	6.91	7.76	8.61

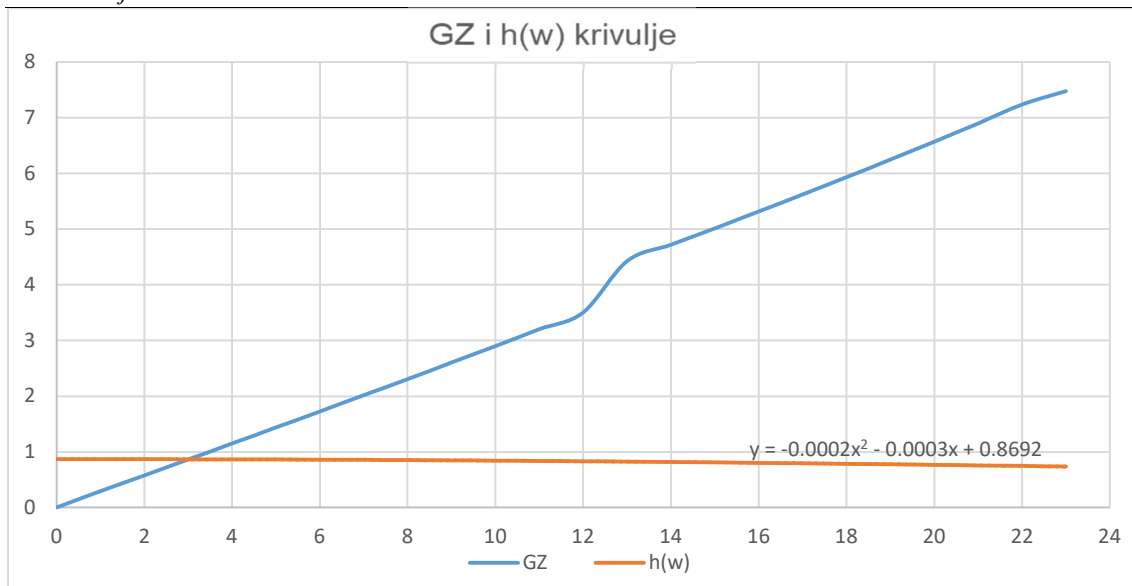
11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
3.20	3.50	4.42	4.72	5.01	5.31	5.62	5.93	6.25	6.57	6.90
17.48	20.79	24.75	29.36	34.22	39.39	44.85	50.63	56.71	63.12	69.85
0.84	0.83	0.82	0.82	0.81	0.80	0.79	0.79	0.78	0.77	0.76
9.45	10.29	11.13	11.96	12.78	13.60	14.41	15.21	16.00	16.79	17.57

22.00	23.00
7.23	7.48
76.92	81.86
0.75	0.74
18.34	19.10

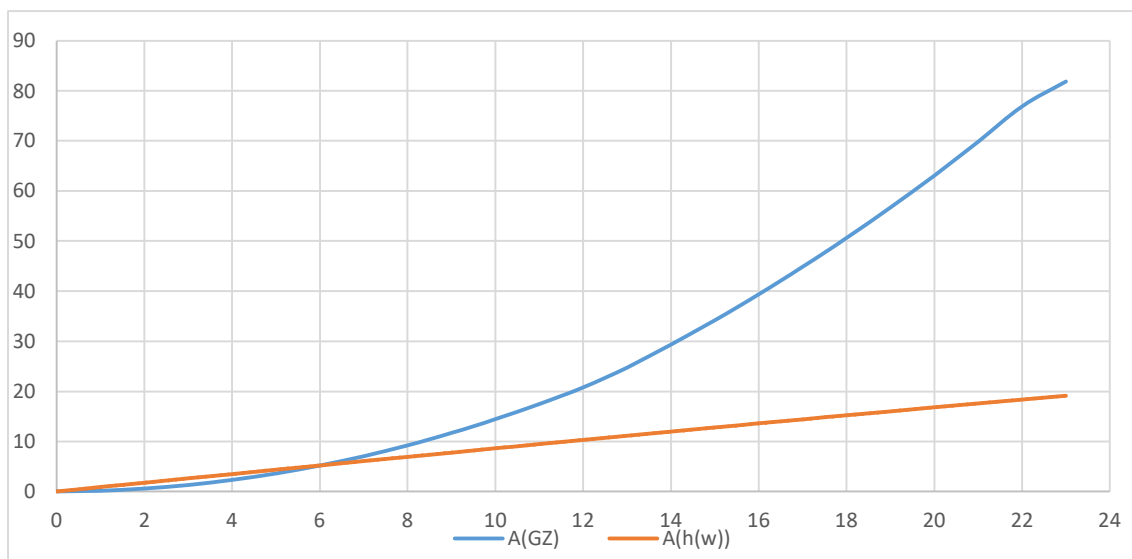
**Tablica 18** Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 11

Slika 30 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 18 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .

Slika 31 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 18 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



Slika 30 Dijagram poluge stabiliteta 11



Slika 31 Dijagram puta stabiliteta 11

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 30:  $\varphi_l = 3.10^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 31:  $\varphi_{Ds} = 6.30^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  
 $A_A = 19.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 24.83 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $13.1^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!

**Slijedi za nagibanje na lijevu stranu tj. nagibanje na stranu na kojoj je jedan krak.**

Vrijede sve pretpostavke kao i za nagibanje na desnu stranu, razlikuju se podaci:

- GZ krivulje
- Površine ispod GZ krivulje  $A(GZ)$
- Kutevi statičkog i dinamičkog stabiliteta  $\varphi_I$  i  $\varphi_{Ds}$
- Površine  $A_A$  i  $A_B$

Krivulja poluge stabiliteta  $GZ$  i površina ispod  $GZ$  krivulje  $A(GZ)$  dobiveni su u Maxsurf-u, rezultati Maxsurfa kao i proračunati podaci  $h(w)$  i  $A(h(w))$  krivulje dani su u tablici 19.

Poluga prekretnog momenta  $h(w)$  i  $A(h(w))$  površina ispod krivulje prekretnog momenta proračunata je na isti način kao i u potpoglavlju 6.5.

$\varphi$	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00	10.00
$GZ$	0.00	0.27	0.56	0.84	1.12	1.41	1.69	1.98	2.26	2.55	2.83
$A(GZ)$	0.00	0.13	0.55	1.25	2.23	3.49	5.04	6.87	8.99	11.39	14.08
$h(w)$	0.87	0.87	0.87	0.87	0.86	0.86	0.86	0.86	0.85	0.85	0.84
$A(h(w))$	0.00	0.87	1.74	2.60	3.47	4.33	5.20	6.05	6.91	7.76	8.61

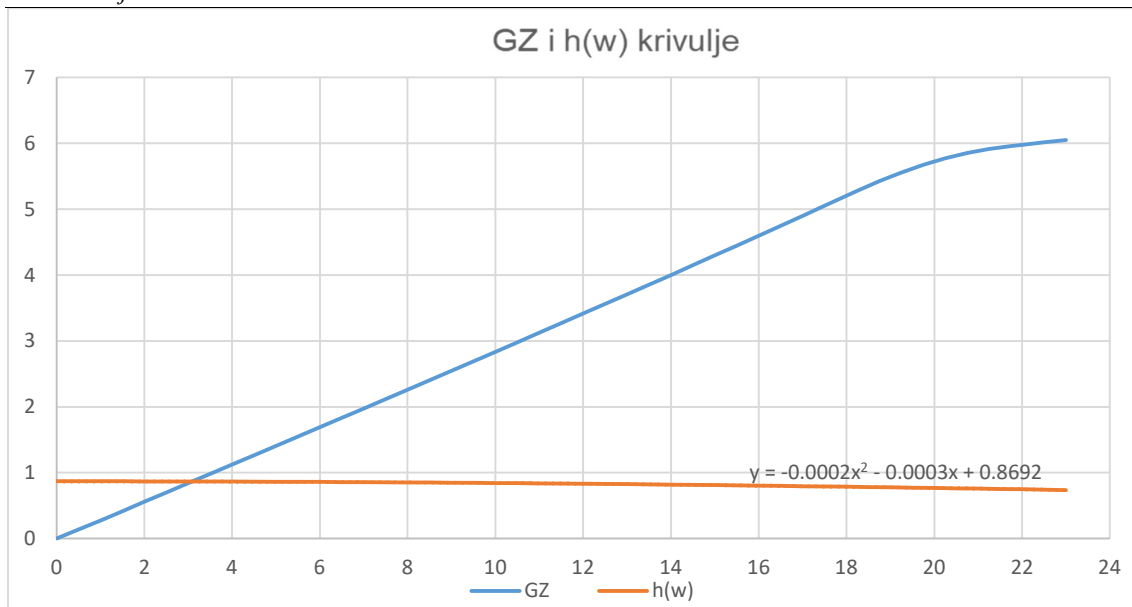
11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00
3.12	3.41	3.71	4.00	4.30	4.60	4.90	5.21	5.49	5.72	5.89
17.06	20.33	23.89	27.74	31.89	36.34	41.09	46.14	51.49	57.11	62.92
0.84	0.83	0.82	0.82	0.81	0.80	0.79	0.79	0.78	0.77	0.76
9.45	10.29	11.13	11.96	12.78	13.60	14.41	15.21	16.00	16.79	17.57

22.00	23.00
5.98	6.05
68.85	74.87
0.75	0.74
18.34	19.10

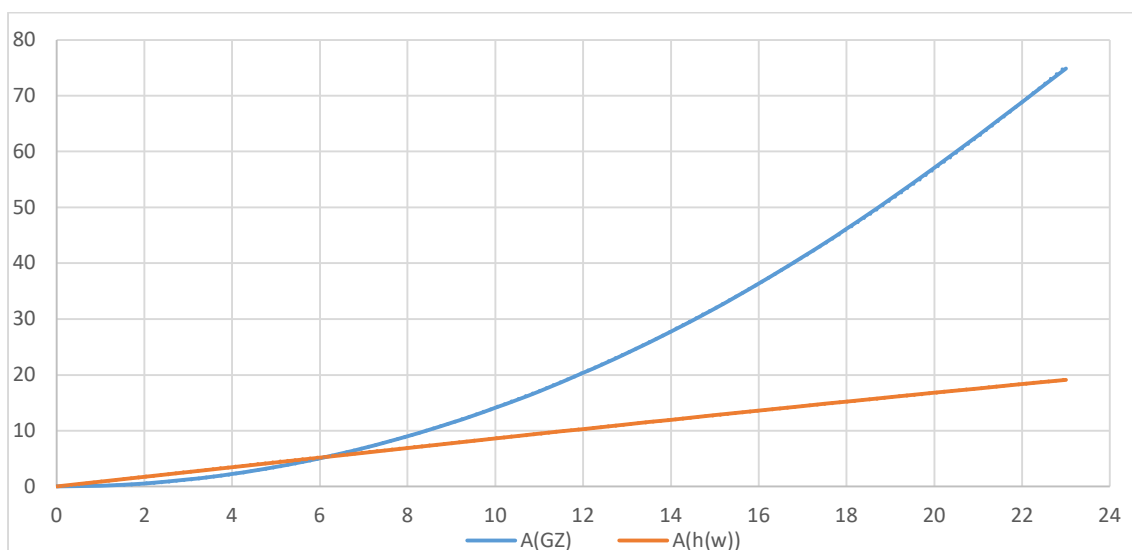
**Tablica 19** Karakteristike pučinske plutajuće vjetroturbine pri kutevima nagiba 12

Slika 32 nam prikazuje dijagram poluge stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 19 za polugu stabiliteta  $GZ$  i polugu prekretnog momenta  $h(w)$  u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .

Slika 33 nam prikazuje dijagram puta stabiliteta. Prikazani su podaci iz tablice 19 površine  $A(GZ)$  ispod  $GZ$  krivulje i površine  $A(h(w))$  ispod  $h(w)$  krivulje u ovisnosti o kutu nagiba  $\varphi$ .



Slika 32 Dijagram poluge stabiliteta 12



Slika 33 Dijagram puta stabiliteta 12

Kut statičkog stabiliteta je presjek krivulja  $GZ$  i  $h(w)$  na slici 11:  $\varphi_l = 1.65^\circ$

Kut dinamičkog stabiliteta je presjek krivulja  $A(GZ)$  i  $A(h(w))$  na slici 12:  $\varphi_{Ds} = 3.20^\circ$ , odnosno:

- Prema kriteriju **(1.3)** površina ispod krivulje prekretnog momenta  $A_A$  iznosi:  
 $A_A = 19.10\text{m}^2$
- Faktor sigurnosti hidrostatički stabiliziranih konstrukcija iznosi:  $\gamma_{stability} = 1.3$
- Iz kriterija **(1.3)** dobijemo površinu  $A_B$  i ona iznosi:  $A_B \geq 24.83 \text{ m}^2$ , to je ispunjeno za  $10.1^\circ$

Time je kriterij **(1.3)** zadovoljen. Također su i kriteriji **(1.1)** i **(1.2)** zadovoljeni!

---

## 9 ZAKLJUČAK

Nedostatkom električne energije pokušavaju se razviti uređaji koji mogu proizvoditi velike snage električne energije bez fosilnih goriva. Vjetroelektrane su savršeni primjer takvog uređaja. Iako već postoje plutajuće pučinske vjetroelektrane, nastoje se pustiti u pogon one većih snaga. Sadašnje vjetroelektrane, u pogonu imaju nazivnu snagu od 5MW dok je vjetroelektrana za koju smo provodili proračun stabiliteta ima snagu od 15MW. Cilj ovog rada je bila provedba proračuna stabiliteta za preliminarnu konstrukciju vjetroturbina od 15MW.

U ovom završnom radu izvršen je proračun stabiliteta pučinske plutajuće vjetroelektrane u neoštećenom stanju kvazistatičkom evaluacijom. Proračun stabiliteta smo proveli za dva slučaja. Prvi slučaj je bilo radno stanje vjetroelektrane. Drugi slučaj je bio slučaj ekstremnih oluja, odnosno, slučaj kada vjetroelektrana ne radi zbog prejakog vjetra. Dobivena forma pučinske plutajuće vjetroelektrane modelirana je MaxSurf-Stability. Uneseno je težište mase i istisnina za jedino stanje krcanja koje smo imali. Na temelju prethodno unesenih parametara proveli smo proračun stabiliteta. Rezultatima je prikazano da pučinska plutajuća vjetroelektrana zadovoljava sve kriterije stabiliteta za zadano stanje krcanja.

Nakon zadovoljavanja kriterija stabiliteta u neoštećenom stanju, proveli smo samu optimizaciju platforme pučinske plutajuće vjetroelektrane. Optimizacija se temeljila na tome da smo imali zadan kriterij, koji je bio više nego zadovoljen u početnom stanju, te smo smanjivali tu sigurnost koju imamo kako bismo smanjili dimenzije same pučinske plutajuće vjetroelektrane, a da kriterij ostane zadovoljen. Nakon uspješno provedene optimizacije i uštede čelika od 7.91%, provjerili smo stabilitet pučinske plutajuće vjetroelektrane. Rezultatima je prikazano da pučinska plutajuća vjetroelektrana nakon optimizacije zadovoljava sve kriterije stabiliteta za zadano stanje krcanja.

Na kraju se može zaključiti da je stabilitet pučinske plutajuće vjetroelektrane zadovoljen i da se može i sa manjim dimenzijama postići zadovoljavajući stabilitet. To bi trebalo svakako uzeti u obzir zbog same uštede.

---

**LITERATURA**

- [1] “Definition of the UMaine VoltturnUS-S Reference Platform Developed for the IEA Wind 15-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine”  
<https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/76773.pdf> (accessed July 2020.)
- [2] “DNV-ST-0119 Floating wind turbine structures”  
[https://home.hvl.no/ansatte/tct/FTP/H2023%20Marinteknisk%20Analyse/Regelverk%20og%20standarder/DnV\\_documents/DNV-ST-0119.pdf](https://home.hvl.no/ansatte/tct/FTP/H2023%20Marinteknisk%20Analyse/Regelverk%20og%20standarder/DnV_documents/DNV-ST-0119.pdf) (accessed June 2021.)
- [3] “DNV-OS-C301 Ch.2 Sec.1” <https://docplayer.net/161907095-Dnvgi-os-c301-edition-january-2017-amended-january-2018.html> (accessed January 2017.)
- [4] “DNV-ST-0437” <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-st-0437-loads-and-site-conditions-for-wind-turbines.html> (accessed November 2016.)
- [5] “Rational Upscaling and Modelling of a Semi-Submersible Floating Offshore Wind Turbine” <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2397151> (accessed May 2016.)
- [6] “J. Renewable Sustainable Energy 2, 033104” <http://dx.doi.org/10.1063/1.3435339> (accessed January 2010.)
- [7] “Preliminary design of a floating support structure for a 5 MW offshore wind turbine” <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801811002769> (accessed December 2011.)
- [8] “DNV-OS-J103” <https://pdf4pro.com/cdn/dnv-os-j103-design-of-floating-wind-turbine-structures-5b8dfe.pdf> (accessed June 2013.)