

# Razvoj metode za procjenu robusnosti i sposobnosti djelovanja sustava autonomnih agenata

---

Ćosić Lesičar, Jelena

Doctoral thesis / Disertacija

2018

*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:235:606180>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-20**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Jelena Ćosić Lesičar

**RAZVOJ METODE ZA PROCJENU  
ROBUSNOSTI I SPOSOBNOSTI  
DJELOVANJA SUSTAVA AUTONOMNIH  
AGENATA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2018.



Sveučilište u Zagrebu

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Jelena Ćosić Lesičar

**THE DEVELOPMENT OF METHOD FOR  
ASSESSING THE ROBUSTNESS AND  
CAPABILITY OF THE SYSTEM OF  
AUTONOMOUS AGENTS**

DOCTORAL THESIS

Zagreb, 2018.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

Jelena Ćosić Lesičar

**RAZVOJ METODE ZA PROCJENU  
ROBUSNOSTI I SPOSOBNOSTI  
DJELOVANJA SUSTAVA AUTONOMNIH  
AGENATA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: Prof. dr. sc. Josip Stepanić

Zagreb, 2018.



Sveučilište u Zagrebu

Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture

Jelena Ćosić Lesičar

**THE DEVELOPMENT OF METHOD FOR  
ASSESSING THE ROBUSTNESS AND  
CAPABILITY OF THE SYSTEM OF  
AUTONOMOUS AGENTS**

DOCTORAL THESIS

Supervisor: Prof. dr. sc. Josip Stepanić

Zagreb, 2018.

*I never saw a wild thing sorry for itself.  
A small bird will drop frozen dead from a bough  
without ever having felt sorry for itself.*

*D. H. Lawrence*

## Podatci za bibliografsku karticu

UDK

Ključne riječi:	sustav autonomnih agenata, sposobnost sustava, robusnost sustava, bespilotne letjelice, prijenos tereta
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor:	prof. dr. sc. Josip Stepanić
Broj stranica:	211
Broj slika:	109
Broj tablica:	-
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	62
Datum obrane:	30. svibanj 2018.
Povjerenstvo:	prof.dr.sc. Biserka Runje, predsjednik Povjerenstva; izv.prof.dr.sc. Josip Kasać, član; doc.dr.sc. Tomislav Radišić, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, član
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

## Zahvala

Prvo, bih željela izraziti najveću zahvalnost mentoru, prof. dr. sc. Josipu Stepaniću, za njegovo nesebično vodstvo i stalnu potporu tijekom dosadašnjih istraživanja koja su rezultirala ovim doktorskim radom.

Zahvaljujem članovima povjerenstva, prof.dr.sc. Biserki Runje, dr.sc. Josipu Kasaću i doc.dr.sc. Tomislavu Radišiću, za pronalaženje vremena za pregled ovog rada, te za sve komentare i primjedbe koje su poboljšale njegovu kvalitetu.

Posebna zahvala svim bliskim kolegama s Fakulteta strojarstva i brodogradnje za njihove rasprave, diskusije i nesebičnu potporu tijekom svih ovih godina.

Željela bih izraziti zahvale mojoj majci Verici i ocu Marku, kao i sestri Ivani za beskrajnu podršku tokom svih godina studiranja i tokom izrade ovog rada.

Posebna zahvala ide mom mužu Tomislavu i sinu Mihaelu na ukazanom povjerenju i golemom strpljenju, koje se pokazalo neophodno za završetak ovog rada. Ujedno ovaj rad posvećujem njima.

Jelena Ćosić Lesičar

Zagreb, 2018.



## Sažetak

Uporaba sustava autonomnih agenata uključuje brojne primjene u širokom spektru aktivnosti u kojima se nastoji izbjeći prisustvo ljudi. Pri tom je sustav cjelina složena od elemenata međusobno vezanih relacijama, koji ima određenu funkciju u okolini s kojom povezano mijenja iznose atributa. Element sustava je funkcionalno nedjeljiva cjelina. Kao takav može se sastojati od jednog ili više objekata opisanih unutarnjim relacijama. Pojedini element sustava karakteriziraju mjerljiva svojstva iskazana atributima. Relacija među elementima je kauzalnošću povezana promjena atributa. Ona se očituje tokom mase, energije i/ili informacije. Funkcija sustava je karakterističan/izdvojen način djelovanja sustava u okolini. Okolina je cjelina u fizičkom ili drugačije definiranom prostoru. Dijelovi okoline nisu uključeni u dijelove sustava. Atribut je mjerljivo svojstvo elementa sustava ili okoline. Može biti promjenjivo ili nepromjenjivo. Autonomni agenti su objekti koji samostalno i bez ljudske intervencije izvršavaju postavljeni zadatak uz određene moguće modifikacije i izvještavaju o tijeku djelovanja. Primjeri autonomnih agenata su atomi, molekule, zupčanci, spojnice, ljudi, životinje, virusi, kemijski elementi, strojevi, vozila, letjelice objekti, elektroni, protoni, neutroni, neuroni, trombociti, leukociti, krv, ljudski ili životinjski organi i drugo. U djelatnosti koje autonomni agenti obavljaju ulaze aktivnosti koje se smatra opasnim po ljude, iscrpljujućim ili dosadnim. Primjeri primjene autonomnih agenata su transport robe i ljudi između više lokacija, beskontaktna i nerazorna pretraga područja, praćenje prirodnih pojava, podvodna istraživanja, kontrola prometa, implementacija komunikacijskih mreža u nepovoljnim okruženjima i drugo.

Težište ovog rada postavljeno je na prijenos tereta sustavom bespilotnih letjelica. Analiza problema provedena je na sustavu dvije identične letjelice koje prenose ovješeni teret. Za tako postavljeni sustav numeričkim simulacijama analizirane su nekoliko kvalitativno različite mogućnosti izvedbi sustava. Ovim radom prikazana su tri karakteristična slučaja prijena tereta. Prvi slučaj je prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama. Drugi slučaj je prijenos tereta mase usporedive s masom letjelica. Treći slučaj je prijenos relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa. Svi navedeni slučajevi promatrani su za različite operativne režime rada sustava, odnosno za različite režime leta. Osim utjecaja mase tereta na sustav analizirano je i kako načini upravljanja djeluju na mogućnost izvršenja postavljenog zadatka, odnosno na sposobnost sustava za prijenos tereta. Sustav je analiziran u nekarakteriziranoj okolini.

Sukladno tome analizirani su utjecaju okoline na djelovanje sustava, odnosno analizirana je robusnost sustava uslijed pojave neočekivanih događaja uzrokovanih promjenama okoline.

**Ključne riječi:** *sustav autonomnih agenata, sposobnost sustava, robusnost sustava, bespilotne letjelice, prijenos tereta.*

# Sadržaj

EXTENDED ABSTRACT.....	VIII
POPIS OZNAKA .....	XI
POPIS SLIKA.....	XIV
1 UVOD .....	1
1.1 Struktura rada .....	3
2 OSNOVE ZNANOSTI O SUSTAVIMA.....	5
2.1 Osnovni pojmovi.....	5
2.1.1 Sustav .....	5
2.1.2 Interakcija sustava i okoline .....	6
2.1.3 Adaptivnost .....	7
2.1.4 Robusnost.....	7
2.2 Model sustava.....	8
2.3 Simulacije.....	9
2.3.1 Numeričke simulacije .....	9
2.3.2 Modeliranje pomoću agenata .....	10
2.3.2.1 Agenti.....	11
2.3.2.2 Vrste agenata.....	11
2.3.2.3 Okolina.....	15
2.3.2.4 Pravila .....	16
2.3.2.5 Odabir vrste agenata modela .....	17
3 OSNOVE STATISTIČKE MEHANIKE.....	21
3.1 Teorija informacija.....	21
3.1.1 Informacijski kanal.....	25
3.1.2 Slučajni događaji i sadržaj informacije.....	27

3.2	Informacijska entropija .....	28
3.3	Statistička mehanika .....	29
3.3.1	Entropija i vjerojatnost .....	32
3.3.2	Ergodska hipoteza .....	33
3.3.3	Srednje vrijednosti mjerljivih svojstava elemenata .....	34
4	HIPOTEZE, CILJEVI I ZNANSTVENI DOPRINOS RADA .....	36
4.1	Hipoteze rada.....	36
4.2	Ciljevi i svrha rada.....	36
4.3	Znanstveni doprinos.....	38
5	KONCEPTUALNO MODELIRANJE.....	39
5.1	Broj letjelica.....	39
5.2	Pogon i napajanje letjelica .....	40
5.3	Svojstva okoline .....	40
5.4	Načini upravljanja.....	41
5.5	Opća svojstva tereta .....	42
5.6	Vrsta veza .....	43
6	PRELIMINARNO MODELIRANJE .....	46
6.1	Svojstva tereta .....	46
6.2	Svojstva veze između bespilotne letjelice i tereta .....	46
6.3	Svojstva letjelica.....	47
7	DETALJNO MODELIRANJE.....	49
7.1	Upravljanje konfiguracijom .....	51
7.2	Upravljanje iznosima potisaka.....	55
7.3	Upravljanje kutovima otklona potisaka .....	62
7.4	Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 1 .....	67
7.5	Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 2 .....	68

7.6	Energetska učinkovitost sustava .....	69
7.7	Slobodna energija sustava .....	71
8	REZULTATI ISTRAŽIVANJA .....	74
8.1	Upravljanje konfiguracijom .....	74
8.2	Upravljanje iznosima potisaka .....	89
8.3	Upravljanje kutovima otklona potisaka .....	96
8.4	Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 1 .....	114
8.5	Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 2 .....	132
8.6	Energetska učinkovitost sustava .....	150
8.7	Slobodna energija sustava .....	168
9	DISKUSIJA .....	171
9.1	Upravljanje konfiguracijom .....	172
9.2	Upravljanje iznosima potisaka .....	183
9.3	Upravljanje kutovima otklona potisaka .....	187
9.4	Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 1 .....	190
9.5	Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 2 .....	192
9.6	Energetska učinkovitost sustava .....	193
10	ZAKLJUČAK .....	195
11	LITERATURA .....	197
	PRILOG .....	202
	ŽIVOTOPIS .....	210
	CURRICULUM VITAE .....	211

## Extended abstract

The use of systems of autonomous agents cover numerous applications in a number of activities. Thus, the system of autonomous agents is composed of agents that are interconnected to each other so that the system acts in the envisaged way in the environment. Autonomous agents are objects that independently and without human intervention execute the task set with some possible modifications and report on the course of action. Examples of autonomous agents are stationary or mobile robots, sailboats, unmanned aerial vehicles, agents in a virtual environment, and other types of agents that perform a smaller number of simpler operations. Activities performed by autonomous agents involve activities that are considered dangerous to humans, exhausting or boring. Examples of the use of autonomous agents are transport of goods and people between multiple locations, contactless and irrational search of sites, monitoring of natural phenomena, underwater research, traffic control, implementation of communication networks in adverse environments, and so on. While operating, agents in such systems constantly measure certain parameters related to their states or to the state of their environment. A general accompanying characteristic of these measurements is that they are processed with statistical limitations in real time.

The dynamics of the system of autonomous agents follows several essential problems. The first problem is the lack of ways to determine the ability of the autonomous agents system. It is not known which combinations of dynamic characteristics of autonomous agents can accomplish the required action and achieve the given goal. Another problem is the impossibility of determining the robustness of such a system of autonomous agents. The ability to comprehensively assess the robustness and ability of the system will help solve the above mentioned problems.

The ability of the system is defined as the ratio of the required range and the implemented system characteristics. The system is considered capable if this ratio is large enough. Accordingly, from the ability assessment of the system based on agent parameters, it is possible to determine which combination of agents are needed to achieve the target. The system's robustness refers to the system and environment relationship and indicates systems whose performance does not change significantly for a particular change in the environment [1-3].

The general characteristics of research system of autonomous agents is their empirical character and incompleteness. This is why a relatively small number of examples of the use of autonomous agent systems in real situations. Agents are constantly measuring more than one size during work. Intermediate communication and measurements get additional sizes. Collected sizes need to be processed in real time with all statistical constraints. If the system's capacity is empirically determined, it is necessary to carry out multiple tests, with the combined cost of time and energy consumption on average with higher environmental pollution and consequently higher cost of research. Due to the disadvantages of the current approach to the problem there is no complete scientific assessment of the robustness and ability of the system. Numerical simulations are relatively little represented in the relevant literature, and the results are based on repeated attempts and errors.

Some authors consider and define the application of agents at a general level with examples of application [4-10] while other authors concentrate on specific applications [11-15]. Dorigo et al., based their research on the development of Ant Colony Optimization algorithm [4-6]. The same researchers apply systems agents for modeling and optimizing different systems such as the Ant Colony Optimization Algorithm for Continuous Optimization from Algorithmic Components [7] and solving the problem of a salesman traveler. In further research, the system of agents is applied to model a structured robotic group [8, 9]. Furthermore, they introduced Swarmanoid as a new concept in the application of a group of robots. They have developed hardware and software for the integration of different robots on the platform, i.e. the ability to join the group. The obtained compatibility of different robots enabled them to explore different coordination mechanisms and strategies in the heterogeneous group [10]. In the field of robotics research, Mataric applies a system of agents for the control and management of mobile robots in cooperative load transportation [11, 12]. Cooperative load loading was also investigated within the Aerial Robotics Cooperative Assembly system project. In the literature the authors focus on the construction and management of a group of mobile agents. Cooperative activities of the group were investigated by Mathew, Smith and Waslander and analyzed the ability of the group to deliver load. They analyzed cooperation between vehicle (truck) and unmanned aircraft (quad) in urban environment [13]. The path optimization was defined by the solution of the generalized problem of a salesman traveler. The activity of a group of autonomous agents to search and map the area was explored by Ducho et al. [16]. Co-operative activity of the group was also investigated by authors Hui et al. [15] and validated by Monte Carlo-simulation. Including consideration of capacity assessment system various authors [14, 17] apply Monte-

Carlo simulations [18] to validate realized modeled measurement uncertainty of the measuring system. The application of Markov's decision-making system to collective decision-making and collaboration between unmanned aerial vehicles was explored by Capitan et al. [19]. Inter-agency communication allows for self-organization in a dynamic environment, resulting in more stable navigation. The system is robust for errors in the operation of a smaller number of agents and is able to autonomously find the optimal path [20]. The scope of application of the system of agents system illustrates the exploration of natural phenomena such as the monitoring of wildlife migration by radio signals. In his research, Korner et al. use the unmanned aviation system to track migration on inaccessible terrains [21]. The use of unmanned aerial vehicles under such defined conditions ensures better connectivity, easier reading of signal strength, easier communication, faster locating of animals and easier recording of measured dimensions. In order to explore and map the areas due to the flood, Balta and his associates cite the cooperative application of unmanned aerial vehicles [22]. Except for soil surface research, agitation systems are also used in underwater research, so Sun et al. configure unmanned underwater vehicles as a system of agents [23]. The research has defined unmanned underwater vehicles system for underwater monitoring and avoidance of real-time obstacles. In most literature, systems are modeled, or empirically tested, as a group of agents. Thus, the starting quantities are defined for the individual agents and their averaging yields the size of the system. A qualitatively different approach is to use the size defined for the system, e.g. an interdisciplinary approach to socio-thermodynamic potentials [24, 25].

Analysis of the research area suggests that the determination of the ability of autonomous agent systems can be determined from the known dynamic characteristics of the agents and the characteristics of the environment in which the system operates. Taking into account the statistical measures associated with the characteristics of autonomous agents and the existing combination of set rules of communication as the input size, the question is how to in silico determine the ability of the system for a particular environment? Determining the system's ability to start up by setting the system model, which continues the numerical simulations of the set models. The ability to comprehensively assess the robustness and system abilities would remove the aforementioned drawbacks of the empirical approach and allow the operation of a larger number of systems in qualitatively different environments.

**Keywords:** *system of autonomous agents, the ability of the system, the robustness of the systems, unmanned aerial vehicles, load transfer.*



# Popis oznaka

## Latinične oznake

$A, A_r$	-	područje pokriveno rotorima bespilotne letjelice
$B$	-	volumen faznog prostora
$D$	-	udaljenost prve i zadnje točke trajektorije
$E, E_{\min}$	-	energija
$F$	-	slobodna energija
$G_0, G_1, G_2$	-	težina
$H_0, H(\Omega)$	-	informacijska entropija sustava
$H_m(\Omega)$	-	maksimalna informacijska entropija sustava
$I(\Omega)$	-	vlastiti sadržaj informacije
$K$	-	neovisna termodinamička veličina sustava
$L$	-	duljina konopca
$N_1, N_2$	-	napetost konopaca
$P, P_1, P_2, P_{\min}, P_r$	-	snaga
$R_0, R_1, R_2$	-	sila otpora
$R_{0x}, R_{1x}, R_{2x}$	-	horizontalna komponenta sile otpora
$R_{0y}, R_{1y}, R_{2y}$	-	vertikalna komponenta sile otpora
$S$	-	entropija sustava
$S_1, S_2$	-	površina letjelica
$S_{0x}, S_{0y}$	-	komponente površine tereta
$T, T_1, T_2, T_r$	-	potisak
$U$	-	unutarnja energija
$Z$	-	particijska finkcija

$c_{0x}, c_{0y}, c(\beta)$	-	koeficijent otpora
$d$	-	horizontalna udaljenost između letjelica
$f(E)$	-	funkcija raspodjele
$f_E$	-	energijski faktor
$f_P$	-	faktor snage
$g$	-	gravitacijska konstanta
$h$	-	vertikalna udaljenost između letjelica
$m_0, m_1, m_2$	-	masa
$n$	-	broj rotora
$p(x_i)$	-	vjerojatnost
$p(x_i, y_j)$	-	združena vjerojatnost
$p(x_i/y_j)$	-	uzajamna vjerojatnost
$r_1, r_2$	-	horizontalna udaljenost između tereta i pojedine letjelice
$v, v_x, v_y, v_E$	-	brzina leta
$z_1, z_2$	-	vertikalna udaljenost između tereta i pojedine letjelice

**Grčke oznake**

$\Gamma$	-	ukupni otpor sustava
$\Gamma_x, \Gamma_y$	-	komponente ukupnog otpora sustava
$\Theta$	-	modul raspodjele
$\Phi$	-	fazni volumen
$\alpha_1, \alpha_2$	-	kutovi između konopaca i vertikalne osi
$\beta_1, \beta_2$	-	kutovi koje zatvara vektor potiska s vertikalnom osi
$\gamma_1, \gamma_2$	-	kutovi između aerodinamičke sile otpora i vertikalne osi
$\varepsilon$	-	minimalna energija

$\pi$	-	trenutna snaga
$\rho$	-	gustoća zraka
$\sigma$	-	statička osjetljivost
$\sigma_d, \sigma_h$	-	komponente statičke osjetljivosti
$\tau$	-	potisak jedne bespilotne letjelice
$\varphi_1, \varphi_2$	-	koeficijent geometrijskog ograničenja
$\psi$	-	kut otklona ukupnog otpora sustava

## Popis slika

Slika 1. Osnovna podjela vozila je po vrsti agregatnog stanja okoline u odnosu na koju se vozilo giba.....	12
Slika 2. Osnovna podjela kopnenih vozila.....	12
Slika 3. Osnovna podjela vodenih vozila.....	13
Slika 4. Osnovna podjela zračnih lebdjelica.....	14
Slika 5. Osnovna podjela zračnih vozila.....	15
Slika 6. Relacija trokuta.....	19
Slika 7. Utjecaj brzine leta na vektor ukupnog otpora sustava preko kuta otklona $\psi$ .....	20
Slika 8. Informacijska entropija sustava.....	22
Slika 9. Diskretna obrada.....	23
Slika 10. Odnos između obrađene informacije i informacijske entropije.....	24
Slika 11. Shematski prikaz informacijskog sustava između dvije bespilotne letjelice.....	25
Slika 12. Shematski prikaz jednosmjernog informacijskog kanala između bespilotne letjelice i izvora.....	26
Slika 13. Shematski prikaz dvosmjernog informacijskog kanala između dvije bespilotne letjelice.....	27
Slika 14. Fazni dijagram kuglice u slobodnom padu pri elastičnom sudaru s podlogom.....	31
Slika 15. Lokalni i globalni koordinatni sustav.....	40
Slika 16. Geometrijska ovisnost komponenti sustava dvije bespilotne letjelice i tereta u globalnom koordinatnom sustavu.....	49
Slika 17. Sile reakcije na komponente sustava dvije bespilotne letjelice koje prenose teret u globalnom koordinatnom sustavu.....	50
Slika 18. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja konfiguracijom ( $d$ i $h$ ).....	52
Slika 19. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja konfiguracijom ( $d$ i $h$ ).....	54
Slika 20. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja iznosima potisaka ( $T_1$ i $T_2$ ).....	55
Slika 21. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja iznosima potisaka ( $T_1$ i $T_2$ ).....	58
Slika 22. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ; $m_{1,2}/m_0 = 1$ ; $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju lebdenja ( $\psi = \pi/2$ ) pri upravljanju iznosima potisaka ( $T_1$ i $T_2$ ).....	59
Slika 23. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ; $m_{1,2}/m_0 = 1$ ; $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju umjereno brzog horizontalnog leta ( $\psi = \pi/4$ ) pri upravljanju iznosima potisaka ( $T_1$ i $T_2$ ).....	59

Slika 24. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ; $m_{1,2}/m_0 = 1$ ; $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju brzog horizontalnog leta ( $\psi = 0$ ) pri upravljanju iznosima potisaka ( $T_1$ i $T_2$ ).....	60
Slika 25. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za konstantan omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) u različitim režimima leta ( $\psi = \pi/2$ ; $\psi = \pi/4$ ; $\psi = 0$ ). .....	61
Slika 26. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja kutovima odklona potisaka ( $\beta_1$ i $\beta_2$ ).....	62
Slika 27. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja kutovima odklona potisaka ( $\beta_1$ i $\beta_2$ ) za a) opći horizontalni let; b) lebdenje.....	64
Slika 28. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ; $m_{1,2}/m_0 = 1$ ; $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju umjereno brzog horizontalnog leta ( $\psi = \pi/4$ ) pri upravljanju kutovima odklona potisaka ( $\beta_1$ i $\beta_2$ ).....	64
Slika 29. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ; $m_{1,2}/m_0 = 1$ ; $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju brzog horizontalnog leta ( $\psi = 0$ ) pri upravljanju kutovima odklona potisaka ( $\beta_1$ i $\beta_2$ ).....	65
Slika 30. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za konstantan omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) u različitim režimima leta ( $\psi = \pi/2$ ; $\psi = \pi/4$ ; $\psi = 0$ ) pri upravljanju kutovima odklona potisaka ( $\beta_1$ i $\beta_2$ ). .....	66
Slika 31. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja vektorom potiska bespilotne letjelice 1 ( $T_1$ i $\beta_1$ ). .....	67
Slika 32. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja vektorom potiska bespilotne letjelice 1 ( $T_1$ i $\beta_1$ ).....	68
Slika 33. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja vektorom potiska bespilotne letjelice 2 ( $T_2$ i $\beta_2$ ). .....	69
Slika 34. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja vektorom potiska bespilotne letjelice 2 ( $T_2$ i $\beta_2$ ).....	69
Slika 35. Sile reakcije na komponente sustava jedne bespilotne letjelice koja prenosi teret u globalnom koordinatnom sustavu. ....	70
Slika 36. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 0,1$ ; $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	75
Slika 37. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 1$ ; $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	75
Slika 38. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 2$ ; $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	76
Slika 39. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 0,1$ ; $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	76
Slika 40. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 1$ ; $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	77
Slika 41. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 2$ ; $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	77
Slika 42. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 0,1$ ; $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	78

Slika 43. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 1$ ; $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	78
Slika 44. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 2$ ; $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	79
Slika 45. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 0,1$ ; $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	79
Slika 46. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 1$ ; $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	80
Slika 47. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 2$ ; $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	80
Slika 48. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 0,1$ ; $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	81
Slika 49. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 1$ ; $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	81
Slika 50. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 2$ ; $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	82
Slika 51. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 0,5$ ; $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	82
Slika 52. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 1$ ; $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	83
Slika 53. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 2$ ; $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	83
Slika 54. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 0,1$ ; $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	84
Slika 55. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 1$ ; $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	84
Slika 56. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 2$ ; $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	85
Slika 57. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 0,5$ ; $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	85
Slika 58. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 1$ ; $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	86
Slika 59. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 2$ ; $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	86
Slika 60. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 0,5$ ; $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	87
Slika 61. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 1$ ; $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	87
Slika 62. Parametri sustava u ovisnosti o $d/L$ a) $T_{1,2}$ ; b) $N_{1,2}$ ; c) $\beta_{1,2}$ i d) $\alpha_{1,2}$ pri $h = 2$ ; $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2). .....	88
Slika 63. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o $T_1$ i $T_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 0$ . .....	89

Slika 64. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o $T_1$ i $T_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 0$ .....	90
Slika 65. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o $T_1$ i $T_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 0$ .....	91
Slika 66. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o $T_1$ i $T_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .....	92
Slika 67. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o $T_1$ i $T_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .....	93
Slika 68. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o $T_1$ i $T_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ .....	94
Slika 69. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o $T_1$ i $T_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ .....	95
Slika 70. Parametri sustava u ovisnosti o $\beta_1$ , i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $T_2$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . .....	97
Slika 71. Parametri sustava u ovisnosti o $\beta_1$ , i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $T_2$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . .....	99
Slika 72. Parametri sustava u ovisnosti o $\beta_1$ , i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $T_2$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . .....	101
Slika 73. Parametri sustava u ovisnosti o $\beta_1$ , i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $T_2$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ ... 103	
Slika 74. Parametri sustava u ovisnosti o $\beta_1$ , i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $T_2$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ ... 105	
Slika 75. Parametri sustava u ovisnosti o $\beta_1$ , i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $T_2$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ . .... 107	
Slika 76. Parametri sustava u ovisnosti o $\beta_1$ , i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $T_2$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . .....	109
Slika 77. Parametri sustava u ovisnosti o $\beta_1$ , i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $T_2$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . .....	111
Slika 78. Parametri sustava u ovisnosti o $\beta_1$ , i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $T_2$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . . 113	
Slika 79. Parametri sustava u ovisnosti o $T_1$ i $\beta_1$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_2$ ; d) $\beta_2$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . .....	115
Slika 80. Parametri sustava u ovisnosti o $T_1$ i $\beta_1$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_2$ ; d) $\beta_2$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . .....	117
Slika 81. Parametri sustava u ovisnosti o $T_1$ i $\beta_1$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_2$ ; d) $\beta_2$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . 119	
Slika 82. Parametri sustava u ovisnosti o $T_1$ i $\beta_1$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_2$ ; d) $\beta_2$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .... 121	
Slika 83. Parametri sustava u ovisnosti o $T_1$ i $\beta_1$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_2$ ; d) $\beta_2$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .... 123	
Slika 84. Parametri sustava u ovisnosti o $T_1$ i $\beta_1$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_2$ ; d) $\beta_2$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ ..... 125	
Slika 85. Parametri sustava u ovisnosti o $T_1$ i $\beta_1$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_2$ ; d) $\beta_2$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . .....	127
Slika 86. Parametri sustava u ovisnosti o $T_1$ i $\beta_1$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_2$ ; d) $\beta_2$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ . .....	129
Slika 87. Parametri sustava u ovisnosti o $T_1$ i $\beta_1$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_2$ ; d) $\beta_2$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ ... 131	

Slika 88. Parametri sustava u ovisnosti o $T_2$ i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $\beta_1$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .	133
Slika 89. Parametri sustava u ovisnosti o $T_2$ i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $\beta_1$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .	135
Slika 90. Parametri sustava u ovisnosti o $T_2$ i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $\beta_1$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .	137
Slika 91. Parametri sustava u ovisnosti o $T_2$ i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $\beta_1$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .	139
Slika 92. Parametri sustava u ovisnosti o $T_2$ i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $\beta_1$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .	141
Slika 93. Parametri sustava u ovisnosti o $T_2$ i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $\beta_1$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .	143
Slika 94. Parametri sustava u ovisnosti o $T_2$ i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $\beta_1$ pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ .	145
Slika 95. Parametri sustava u ovisnosti o $T_2$ i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $\beta_1$ pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ .	147
Slika 96. Parametri sustava u ovisnosti o $T_2$ i $\beta_2$ a) $d/L$ ; b) $h/L$ ; c) $T_1$ ; d) $\beta_1$ pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ .	149
Slika 97. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a) $\sigma_d$ ; b) $\sigma_h$ ; c) $\sigma$ ; d) $\sigma$ normirano pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .	151
Slika 98. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a) $\sigma_d$ ; b) $\sigma_h$ ; c) $\sigma$ ; d) $\sigma$ normirano pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .	153
Slika 99. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a) $\sigma_d$ ; b) $\sigma_h$ ; c) $\sigma$ ; d) $\sigma$ normirano pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .	155
Slika 100. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a) $\sigma_d$ ; b) $\sigma_h$ ; c) $\sigma$ ; d) $\sigma$ normirano pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .	157
Slika 101. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a) $\sigma_d$ ; b) $\sigma_h$ ; c) $\sigma$ ; d) $\sigma$ normirano pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .	159
Slika 102. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a) $\sigma_d$ ; b) $\sigma_h$ ; c) $\sigma$ ; d) $\sigma$ normirano pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 1$ .	161
Slika 103. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a) $\sigma_d$ ; b) $\sigma_h$ ; c) $\sigma$ ; d) $\sigma$ normirano pri $\psi = \pi/2$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ .	163
Slika 104. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a) $\sigma_d$ ; b) $\sigma_h$ ; c) $\sigma$ ; d) $\sigma$ normirano pri $\psi = \pi/4$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ .	165
Slika 105. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a) $\sigma_d$ ; b) $\sigma_h$ ; c) $\sigma$ ; d) $\sigma$ normirano pri $\psi = 0$ i $m_{1,2}/m_0 = 100$ .	167
Slika 106. Slobodna energija sustava u ovisnosti o $d/L$ za kontrolni parametar $\psi_0 \approx 0$ .	168
Slika 107. Prikaz povoljnog područja slobodne energije sustava u ovisnosti o $d/L$ za kontrolni parametar $\psi_0 \approx 0$ .	169
Slika 108. Slobodna energija sustava u ovisnosti o $d/L$ za kontrolni parametar $\psi_0 = \pi/4$ .	169
Slika 109. Slobodna energija sustava u ovisnosti o $d/L$ za kontrolni parametar $\psi_0 = \pi/4$ .	170



# 1 Uvod

Korištenje sustava autonomnih agenata obuhvaća brojne primjene u nizu djelatnosti u kojima se nastoji izbjeći prisustvo ljudi. Pritom je sustav autonomnih agenata cjelina sastavljena od agenata koji su međusobno povezani relacijama tako da sustav djeluje na predviđeni način u okolini. Autonomni agenti su objekti koji samostalno i bez ljudske intervencije izvršavaju postavljene zadatke uz određene moguće modifikacije i izvještavaju o tijeku djelovanja. Primjeri autonomnih agenata su stacionarni ili mobilni roboti, ronilice, bespilotne letjelice, agenti u virtualnom okruženju i druge vrste agenata koji obavljaju manji broj jednostavnijih radnji. U djelatnosti koje autonomni agenti obavljaju ulaze aktivnosti koje se smatra opasnim po ljude, iscrpljujućim ili dosadnim. Primjeri primjene autonomnih agenata su transport robe i ljudi između više lokacija, beskontaktna i nerazorna pretraga područja, praćenje prirodnih pojava, podvodna istraživanja, kontrola prometa, implementacija komunikacijskih mreža u nepovoljnim okruženjima i drugo.

Dinamiku sustava autonomnih agenata prati nekoliko suštinskih problema. Prvi problem je nepostojanje načina kojim bi se odredila sposobnost sustava autonomnih agenata. Nije poznato za koje kombinacije dinamičkih karakteristika autonomnih agenata je moguće obaviti traženu radnju i ostvariti zadani cilj. Drugi problem je nemogućnost određivanja robusnosti takvog sustava autonomnih agenata. Mogućnost sveobuhvatne procjene robusnosti i sposobnosti sustava omogućilo bi rješavanje navedenih problema.

Sposobnost sustava definirana je kao omjer zahtijevanog i realiziranog raspona karakteristika sustava. Sustav se smatra sposobnim ako je taj omjer dovoljno velik. Sukladno tome iz procjene sposobnosti sustava na temelju parametara agenata može se ustvrditi koje kombinacije agenata su potrebne za ostvarivanje zadanog cilja. Robusnost sustava odnosi se na odnos sustava i okoline te označava sustave čije se djelovanje ne mijenja značajno za određenu promjenu stanja okoline [1–3].

Opća karakteristika dosadašnjih istraživanja sustava autonomnih agenata je njihov empirijski karakter i necjelovitost. Zbog toga je relativno mali broj primjera upotrebe sustava autonomnih agenata u stvarnim situacijama. Agenti tijekom rada konstantno mjere više veličina. Međusobnom komunikacijom i mjerenjima dobivaju dodatne veličine. Prikupljene veličine potrebno je u realnom vremenu procesirati uz sva statistička ograničenja. Ako se sposobnost

sustava određuje empirijski, potrebno je provesti višestruka ispitivanja, uz popratni utrošak vremena i energenata u prosjeku s većim onečišćenjem okoliša a posljedično višim troškovima istraživanja. Zbog nedostataka dosadašnjeg pristupa problemu nema cjelovitih znanstvenih procjenjivanja robusnosti i sposobnosti sustava. Numeričke simulacije relativno su malo zastupljene u odgovarajućoj literaturi, a rezultati se temelje na opetovanim pokušajima i pogreškama.

Neki autori razmatraju i definiraju primjenu agenata na općenitoj razini uz primjere primjena [4–10] dok se drugi autori koncentriraju na specifične primjene [11–15]. Dorigo i suradnici svoja istraživanja temelje na razvoju algoritma Ant Colony Optimization [4–6]. Isti istraživači primjenjuju sustave agenata za modeliranje i optimiranje različitih sustava kao što je Ant Colony Optimization algoritam za kontinuirano optimiranje iz algoritamskih komponenti [7] te rješavanje problema trgovačkog putnika. U daljnjim istraživanjima primjenjuju sustav agenata u cilju modeliranja strukturirane grupe robota [8,9]. Nadalje, predstavili su swarmanoid kao novi koncept u primjeni grupe robota. Razvili su hardver i softver za integraciju različitih robota na platformu, odnosno sposobnost za spajanje u grupu. Dobivena kompatibilnost različitih robota im je omogućila istraživanje različitih mehanizama koordinacije i strategija u heterogenoj grupi [10]. U istraživanjima na području robotike Matarčić primjenjuje sustav agenata za kontroliranje i upravljanje mobilnim robotima pri kooperativnom nošenju tereta [11,12]. Kooperativno nošenje tereta istraživano je i u sklopu Aerial Robotics Cooperative Assembly system projekta. U dijelu literature autori se fokusiraju na konstrukciju i upravljanje grupe mobilnih agenata. Kooperativno djelovanje grupe istraživali su Mathew, Smith i Waslander te su analizirali sposobnost grupe u cilju dostavljanja tereta. Oni su analizirali kooperaciju između vozila (kamion) i bespilotne letjelice (kvadrotor) u urbanoj okolini [13]. Optimiranje putanje definirali su rješanjem generaliziranog problema trgovačkog putnika. Djelovanje grupe autonomnih agenata u cilju pretraživanja i mapiranja područja istraživali su Ducho i suradnici [16]. Kooperativno djelovanje grupe istraživali su i autori Hui i suradnici [15] te su rezultate istraživanja validirali primjenom Monte-Carlo simulacija. Uključujući razmatranje procjene sposobnosti sustava grupa autora [14,17] primjenjuje Monte-Carlo simulacije [18] za validaciju realizirane mjerne nesigurnosti modeliranog mjernog sustava. Primjenu Markovljevog sustava odlučivanja na kolektivno donošenje odluke i međusobnu suradnju grupe bespilotnih letjelica istraživali su Capitan i sur. [19]. Međusobna komunikacija među agentima omogućava samoorganizaciju u dinamičkoj okolini, a rezultat toga je stabilnija navigacija. Sustav je pritom robusan za pogreške u djelovanju manjeg broja

agenata te je u mogućnosti autonomno pronaći optimalnu putanju [20]. Širinu primjene koncepta sustava agenata ilustrira istraživanje prirodnih pojava poput praćenja migracije divljih životinja pomoću radio signala. U svom istraživanju Korner i sur. koriste sustav bespilotnih letjelica u cilju praćenja migracija na nepristupačnim terenima [21]. Primjena bespilotnih letjelica, u tako definiranim uvjetima, osigurava bolju povezanost, lakše očitavanje jačine signala, lakšu uspostavu komunikacije, brže lociranje životinja i jednostavnije bilježenje izmjerenih veličina. U cilju pregledavanja i mapiranja područja uslijed poplava Balta i suradnici navode kooperativnu primjenu bespilotnih letjelica [22]. Osim za istraživanja na površini tla sustavi agenata koriste se i u podvodnim istraživanjima pa tako Sun i sur. konfiguriraju rad više ronilica kao sustav agenata [23]. Istraživanjem su definirali sustav ronilica za podvodno praćenje i izbjegavanje prepreka u realnom vremenu. U većini literature sustave se modelira, ili empirijski testira, kao grupu agenata. Pritom su polazne veličine definirane za pojedinačne agente te se njihovim usrednjavanjem dobivaju veličine koje se odnose na sustav. Kvalitativno drugačiji pristup je korištenje veličina definiranih za sustav, npr. interdisciplinarni pristup socio-termodinamičkih potencijala [24,25].

Analiza područja istraživanja upućuje na zaključak da je određivanje sposobnosti sustava autonomnih agenata moguće odrediti iz poznatih dinamičkih karakteristika agenata te karakteristika okoline u kojoj sustav djeluje. Uzimajući u obzir statističke mjere pridružene karakteristikama autonomnih agenata te postojeće kombinacije postavljenih pravila komunikacije kao ulazne veličine postavlja se pitanje kako *in silico* odrediti sposobnost sustava za određenu okolinu? Određivanje sposobnosti sustava započinje postavljanjem modela sustava, na što se nastavljaju numeričke simulacije postavljenih modela. Mogućnost sveobuhvatne procjene robusnosti i sposobnosti sustava uklonilo bi navedene nedostatke empirijskog pristupa i omogućilo djelovanje većeg broja sustava u kvalitativno različitim okolinama.

## 1.1 Struktura rada

Rad je podijeljen u deset poglavlja. U drugom poglavlju dan je uvid u osnovne pojmove vezane uz sustav, interakciju sustava i okoline, adaptivnost te robusnost sustava. Opisane su generalne značajke modela sustava kao i numeričkih simulacija primjenjivih na sustav. Fokus ovog poglavlja je u odabiru vrste agenata za koji je provedeno daljnje istraživanje. U trećem poglavlju dan je uvid u osnovne pojmove vezane uz teoriju informacija i statističku mehaniku.

Fokus ovog poglavlja je povezivanje mjerljivih svojstava sustava sa statističkim parametrima. U četvrtom poglavlju navedene su hipoteze, ciljevi te znanstveni doprinos rada. U petom poglavlju prikazana je prva razina modeliranja sustava, odnosno provedeno je konceptualno modeliranje u kojem je određen broj i svojstva elemenata sustava kao i svojstva okoline. U šestom poglavlju prikazano je preliminarno modeliranje sustava u sklopu kojega su određena svojstva tereta koji sustav prenosi kao i svojstva veza kojima je teret uključen u sustav. U sedmom poglavlju prikazana je detaljna analitička analiza sustava, odnosno provedeno je detaljno modeliranje kao zadnja faza modeliranja sustava. Razrađeni su i analizirani pojedini načini upravljanja kao i energetska učinkovitost sustava. U osmom poglavlju prikazani su rezultati analize sustava dvije bespilotne letjelice koje prenose teret. U devetom poglavlju provedena je detaljna diskusija prikazanih rezultata. Deseto poglavlje prikazuje zaključak i plan daljnjih istraživanja.

## 2 Osnove znanosti o sustavima

### 2.1 Osnovni pojmovi

#### 2.1.1 Sustav

Sustav je cjelina složena od elemenata međusobno vezanih relacijama, koji ima određenu funkciju u okolini s kojom povezano mijenja iznose atributa. Sustave proučava znanost o sustavima, interdisciplinarno znanstveno područje. U znanosti o sustavima izdvojena su dva polazišta: kauzalnost i sveobuhvatnost. Prema definiciji [26] kauzalnost je ono što biva po uzrocima, slijed od uzroka na posljedicu ili učinak, bez obzira na moguću svrhovitost. Gledano na razini sustava kad se mijenja jedan element mijenja se bar još jedan element i možemo definirati uzrok i posljedicu promjene. Uobičajeni naziv za kauzalne promjene je interakcija ili međudjelovanje. Drugo polazište, sveobuhvatnost, se očituje u prikazu svih vezanih promjena pomoću tokova mase, energije i/ili informacije neovisno o vrsti atributa.

Element sustava je funkcionalno nedjeljiva cjelina. Kao takav može se sastojati od jednog ili više objekata opisanih unutarnjim relacijama. Pojedini element sustava karakteriziraju mjerljiva svojstva iskazana atributima. Npr., vozila, zrakoplovi i brodovi su elementi prijevozničkih sustava; zupčnici, poluge i vijci su elementi mehaničkog sustava; hardver ili softver su elementi računala kao sustava; strojevi i manipulatori su elementi postrojenja kao sustava itd.

Relacija među elementima je kauzalnošću povezana promjena atributa. Ona se očituje tokom mase, energije i/ili informacije.

Funkcija sustava je karakterističan način djelovanja sustava u okolini.

Okolina je cjelina u fizičkom ili drugačije definiranom prostoru. Dijelovi okoline nisu uključeni u dijelove sustava. Granicu između okoline i sustava definira cilj koji sustav treba ispuniti. Iako cilj je sustava jasno definiran zbog sveobuhvatnosti pristupa znanosti o sustavima ponekad je gotovo nemoguće postaviti jasnu granicu.

Atribut je mjerljivo svojstvo elementa sustava ili okoline. Može biti promjenjivo ili nepromjenjivo. Atributi mogu biti fizikalne veličine (količina, masa, vanjske dimenzije, tlak,

temperatura, snaga); kemijske veličine (topljivost, kiselost, lužnatost); mehanička svojstva (plastičnost, žilavost, tvrdoća, čvrstoća, zamor materijala); tehnološka svojstva (zakaljivost, prokaljivost, kovnost, zavarljivost, otpornost na habanje, korozivnost); nosivost tereta; istrajnost leta i drugo.

## 2.1.2 Interakcija sustava i okoline

Interakcija sustava i okoline ostvaruje se tokom mase, energije i/ili informacije. Ostvareni tokovi uzrokuju kauzalno vezane promjene atributa. Prema vrstama interakcije sustave dijelimo na

- izolirani sustav,
- zatvoreni sustav i
- otvoreni sustav.

Izolirani sustav je sustav u kojem nema interakcije s okolinom. To je idealizacija koja se koristi u istraživanjima. Potpuno izolirani sustavi u stvarnosti ne postoje. Unutar takvog sustava ukupni iznos mase, energije i informacije je konstantan.

Zatvoreni sustav je sustav koji sa svojom okolinom izmjenjuje energiju i informacije, ali ne i masu. Primjer zatvorenog sustava je sustav brodskog prijevoza kontejnera. Nakon napuštanja pomorske luke u kojoj su kontejneri smješteni na brod smatramo da je taj sustav zatvoren. Sa svojom okolinom brod izmjenjuje samo informacije i energiju, dok je izmjena mase nepoželjna odnosno ako dođe do izmjene mase smatramo da jedan takav brod nije izvršio zadani zadatak u cijelosti. Izmjena energije s okolinom se očituje u emisijama topline, buke i ostalih tvari pri sagorijevanju goriva. Izmjena informacija se očituje u raznim mjerenjima koje senzori postavljeni na brodu očitavaju direktno iz okoline te u informacijama koje brod izmjenjuje s lučkom kapetanijom.

Otvoreni sustav je sustav koji sa svojom okolinom izmjenjuje masu, energiju i informacije. Primjer otvorenog sustava je sustav prijevoza putnika zrakoplovima. Zrakoplov kao jedan od elemenata tog sustava leta potrošnjom goriva za pogon izmjenjuje energiju s okolinom. Prije, tijekom i nakon leta zrakoplov izmjenjuje informacije o svojoj poziciji, stanju i mjerenjima koja vrši u okolini s kontrolnim tornjevima. Izmjena mase s okolinom se očituje u broju putnika koji koriste zrakoplov za prijevoz.

### 2.1.3 Adaptivnost

Kod otvorenih sustava uslijed utjecaja iz okoline prilikom izmjene mase, energije i informacija može doći do poremećaja u samom sustavu. Zbog toga je potrebno odrediti koliko je jedan takav sustav adaptivan, odnosno jednostavnije rečeno koliko je prilagodljiv. Adaptivnost kao pojam nema uniformnu definiciju primjenjivu na sve sustave. Stoga za različite sustave postoje različite definicije adaptivnosti.

Najopćenitija definicija adaptivnosti je prema [27] - Adaptivni program je onaj koji mijenja svoje ponašanje kao odgovor na njegovu okolinu.

U sferi bioloških znanosti prema [28] - Adaptabilnost je sposobnost organizma da se samostalno regulira s obzirom na granice vlastite održivosti. Sustav se smatra dobro adaptiranim ako je u mogućnosti regulirati svoje stanje uslijed interakcije s okolinom.

U sferi fotografije za sustav obrade slika svrha adaptivnosti je ujednačenje razinu šuma na cijeloj slici. Fokusiranjem na najproblematičnija područja smanjuje se rizik da se završi situacija u kojoj su neki dijelovi slike čisti, a neki drugi su i dalje mutni čak i nakon mnogih prolaza ili dugog vremena ekspozicije (kao što su sjene ili refleksija) [29].

### 2.1.4 Robusnost

Robusnost je maksimalni stupanj ispravne funkcije sustava u prisutnosti ulaznih parametara koji su bitno različiti od očekivanih [30]. U općem slučaju, prema [31], robustan sustav nesmetano nastavlja obavljati rad u širokom rasponu radnih uvjeta. Robusnost, prema [32] i [33], jamči održavanje određenih željenih karakteristika sustava unatoč fluktuacijama ponašanja njegovih sastavnih dijelova ili okoline. Odnosno prema [33], robusnost sustava se definira za određeni skup značajki sustava, uz određeni niz perturbacija koji se primjenjuju na sustav.

Prema [34] robusnost je svojstvo koje omogućuje da sustav održava svoje funkcije protiv unutarnjih i vanjskih perturbacija.

Gledano u sferi biologije prema [35] robusnost je sposobnost održavanja performansi uslijed perturbacija i nesigurnosti i ujedno je priznato ključno svojstvo živih sustava.

Prema [36], u farmaceutskoj industriji, robusnost analitičkog postupka je mjera njegove sposobnosti da ostane nepromijenjen uslijed malih, ali namjerno izazvanih promjena

parametara postupka, a ujedno je i pokazatelj pouzdanosti postupka tijekom njegove normalne uporabe.

## 2.2 Model sustava

Model je pojednostavljenje sustava. Kao takav omogućuje analizu sustava uz izostavljanje sitnih detalja koji nisu ključni u analizi sustava. Npr. za model zrakoplova u zračnom tunelu nije potrebno imati model s potpuno uređenom unutrašnjošću.

Modeli mogu biti mentalni, verbalni, vizualni, fizikalni (softverski i/ili materijalni). U području tehnike i tehnologije najčešće je primijenjen fizikalni model sustava. Prema definiciji [37] fizikalni model je skup pretpostavki kojima se opisuje neki fizikalni sustav, pojednostavnjena predodžba stvarnoga sustava koja omogućuje lakše razumijevanje opaženih procesa, lakše osmišljavanje mjerenja kojima bi se mogla potvrditi ili opovrgnuti neka hipoteza, definiranje odnosa među fizikalnim veličinama i stvaranje novih modela. Gledano po svojstvima dinamike fizikalni modeli su podijeljeni na statičke ili dinamičke.

Budući da je model pojednostavnjena predodžba stvarnoga sustava pogodan je za provedbu raznih istraživanja. Tokom istraživanja moguće je odrediti trend ponašanja postavljenog modela i na temelju rezultata mjerenja predvidjeti ponašanje u stvarnom okruženju. Dinamika sustava se provodi u skraćenom vremenu. Uporaba modela omogućava ponavljanje ispitivanja, ukoliko je to zbog složenosti rezultata ili preciznije analize potrebno, u relativno kratkom vremenu. Nakon postavljanja modela potrebno ga je validirati. Validacija je potvrđivanje objektivnim dokazima da su zahtjevi za predviđenu određenu uporabu ili primjenu ispunjeni [38].

Primjer modela sustava je ispitivanje opstrujavanja objekta u aerodinamičkom tunelu. Npr. za objekt uzmimo zrakoplov. Zrakoplov u cjelini je sustav pa je njegova umanjena verzija u aerodinamičkom tunelu model. Aerodinamički tunel omogućava ispitivanje aerodinamičkih svojstava tijela tj. određivanje slike strujanja fluida te sila i momenata koji na tijelo kada se ono nalazi u struji fluida. Osim za zrakoplove aerodinamički tunel kao model se primjenjuje i za analizu strujanja oko motornih vozila, brodskih nadgrađa, dalekovodnih stupova, televizijskih antena, zgrada, industrijskih dimnjaka. Osim aerodinamičkog tunela primjeri modela su komore za određivanje utjecaja korozije, bazeni i kavitacijski tuneli za ispitivanje hidrodinamike brodova, RC modeli zrakoplova, vibracijski stolovi, model gibanja robota u prostoru, model



širenja pukotine u stijenci cijevi, model strukture materijala na razini atoma, model urbanizacije gradova, ergonomske modeli medicinskih pomagala, biološki modeli ponašanja ljudi i životinja, biološki modeli rasta biljaka, model adaptacije novih vrsta u okolini i drugo.

## 2.3 Simulacije

Simulacija je eksperimentalna metoda koja omogućuje proučavanje stvarnog procesa pomoću njegovog modela. To je široko primjenjiv pristup u kojem se neka pojavnost promatra kao sustav, koji se dalje može proučavati uz pomoć modela. Simulacije su primjenjive na složene modele sustava koji se sastoje od velikog broja elemenata i veza gdje neke veličine imaju vjerojatnosni karakter ili čak nisu ni poznate. U tehničkim i tehnološkim primjenama simulacije se provode na fizikalnim modelima. U tom aspektu podijeljene su na materijalne i softverski generirane. Materijalne simulacije se provode u vidu eksperimenata, dok su numeričke simulacije primijenjene za softverski generirane modele. Neovisno o načinu modeliranja simulacije se provode radi istraživanja, projektiranja i edukacije. Simulacija omogućava da se dinamika modela sustava odvije u kraćem vremenu nego što traje odgovarajuća dinamika sustava. Osim skraćivanja vremena simulacija omogućava jeftinija i ponovljivija istraživanja.

Primjer jedne materijalne simulacije je određivanje utjecaja za stvaranje korozije na površini materijala. Da bi odredili tijek nastajanja korodiranog sloja materijal postavimo u zatvorenu komoru za određivanje utjecaja korozije. U komori postavimo parametre okoline te na taj način simuliramo tijek nastajanja korodiranog sloja. Postavljanjem parametara okoline utječemo na vrijeme trajanja eksploatacije. Na taj način umjesto da promatramo materijal u realnom vremenu slijedećih 30 ili više godina vrijeme trajanja možemo znatno smanjiti i za nekoliko mjeseci odrediti parametre nastanka korodiranog sloja.

### 2.3.1 Numeričke simulacije

Numeričke simulacije reproduciraju ponašanje softverski generiranih modela. One omogućuju matematičko modeliranje složenih sustava. Primjenjuju se na modele za koje je nemoguće ili previše složeno generiranje analitičkog rješenja. Osnovna prednost numeričkih simulacija je skraćivanje vremena trajanja procesa, odnosno omogućavaju uvid u rezultate stvarnih događaja u realnom vremenu bez primjene materijalnih sredstava. Osim skraćenog vremena trajanja procesa, numeričke simulacije nam omogućavaju i lakše izmjene u samom modelu u toku

provođenja simulacije što dodatno štedi potrebno vrijeme za analizu sustava. Analizirajući dobivene rezultate i uspoređujući ih s željenim rezultatima, moguće je mijenjati geometriju, ponovno vršiti proračun, nove rezultate uspoređivati sa starima, te tako brzo postaviti novi model bez potrebe za izradom materijalnog modela za svaki prototip. Zbog sveobuhvatnosti generiranja numeričkih modela ovaj tip simulacija je primjenjiv na široki spektar, tehničkih i ne tehničkih, postavljenih modela.

### 2.3.2 Modeliranje pomoću agenata

Modeliranje pomoću agenata (engl. *Agent based modeling*) je jedan od pristupa numeričkih simulacija. Najčešća primjena ovog pristupa je na kompleksne modele. Kompleksni modeli su modeli koji su sastavljeni od više smisleno povezanih dijelova. Za razliku od kompleksnih modela, komplicirani modeli zbog svoje složenosti/zamršenosti nisu primjenjivi. Ovaj pristup za rješavanje problema koristi agente. Iako ne postoji općenito dogovorena definicija onoga što je "agent", pojam se obično koristi za opisivanje samostalnih programa koji mogu kontrolirati vlastite akcije zasnovane na njihovoj percepciji svog radnog okruženja [39]. Cilj ovog pristupa je generirati modele koji „inteligentno“ djeluju s okolinom. Sukladno tome softverska podrška zasnovana je na umjetnoj inteligenciji, odnosno na distribuiranoj umjetnoj inteligenciji [40,41]. Modeliranje pomoću agenata kao pristup primjenjiv je na kibernetiku [42,43]; kognitivnu znanost [44]; distribuiranu umjetnu inteligenciju [45]; stanične automate [46–48]; genetske algoritme [49]; genetsko programiranje [50,51]; *artificial life* [52–55]; biologiju [56,57] i društvene znanosti [58].

Opseg primjene agenata definira njihova svojstva, a to su

- autonomija - agenti djeluju samostalno te imaju izravnu kontrolu nad svojim djelovanjem i unutarnjim stanjem,
- društvene sposobnosti - agenti stupaju u interakciju s drugim agentima,
- reaktivnost - agenti su u mogućnosti percipirati svoju okolinu i reagirati na podražaje iz okoline. Okolina može biti fizička, virtualna ili simulirana koja uključuje druge agente i
- proaktivnost - agenti su sposobni preuzeti inicijativu te usmjeriti svoje djelovanje prema ostvarenju cilja.

Temeljem svojstava agentima dodjeljujemo atribute

- znanje i uvjerenje,
- sposobnost procesiranja,

- težnja ostvarenju cilja ili više njih i
- interakcija među agentima.

Znanje i uvjerenje - Agenti svoje postupke temelje na temelju znanja o svojoj okolini. Informacije koje posjeduju mogu biti rezultat neispravne percepcije, pogrešnog zaključka ili nepotpunih podataka. Tu vrstu informacija nazivamo „vjerovanje“ i razlikujemo od točnih informacija.

Sposobnost procesiranja - S obzirom na unutarnje znanje agenti su sposobni procesirati osnovna svojstva okoline i drugih agenata.

Težnja ostvarenju cilja – Agenti su generirani ako autonomne i svrhovite jedinice vođene potrebom za zadovoljenjem postavljenog cilja. Neovisno o naknadno stečenim pod-ciljevima moraju biti u mogućnosti odlučiti o važnosti cilja. Taj problem najčešće je riješen „ugradnjom planera“ u pojedinog agenta.

Interakcija među agentima – Interakcija u sustavu se ostvaruje između agenata i/ili između agenta i okoline. Očituje se kroz tokove mase, energije i informacije. Uslijed tih tokova pojedini agent može prekinuti interakciju s nekim od agenata, odnosno jedan agent može isključiti drugog agenta. Ujedno agent može trajno ili privremeno prekinuti interakciju s okolinom.

U konačnici, modeliranje pomoći agenata se ostvaruje pomoću agenata, okoline i pravila [58].

### **2.3.2.1 Agenti**

Agenti su osnovna sastavnica postavljenog modela sustava. Svaki agent posjeduje unutarnje stanje i pravila ponašanja. Neka stanja su fiksna u toku cijelog izvedbenog procesa. Ostala stanja se mijenjaju uslijed interakcije s ostalim agentima ili s okolinom. Sve promjene vezane uz agente (njihovo gibanje, interakcija jednog agenta s drugim ili s okolinom te promjene unutarnjeg stanja) ovise o pravilima ponašanja postavljenim na agente i na okolinu. Na sustav agenata postavlja se cilj koji sustav kao cjelina treba ispuniti.

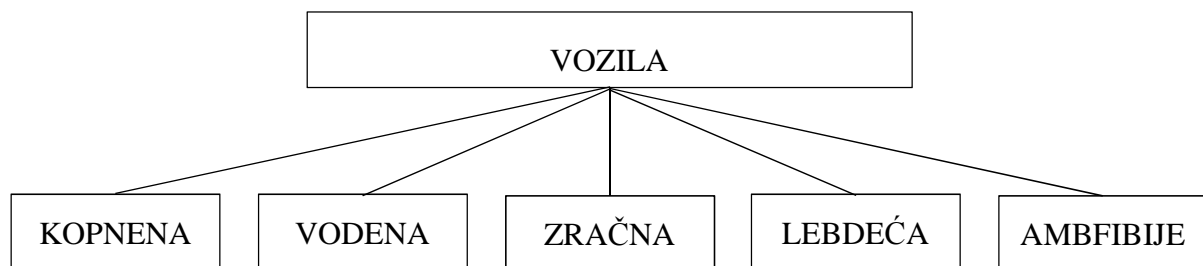
### **2.3.2.2 Vrste agenata**

Modeliranje pomoću agenata je tip numeričke simulacije koji je primjenjiv na široki spektar modela. Zbog te raznolikosti primijenjeni agenti mogu biti atomi, molekule, zupčanici,

spojnice, ljudi, životinje, virusi, kemijski elementi, strojevi, objekti, elektroni, protoni, neutroni, neuroni, trombociti, leukociti, krv, ljudski ili životinjski organi i drugo.

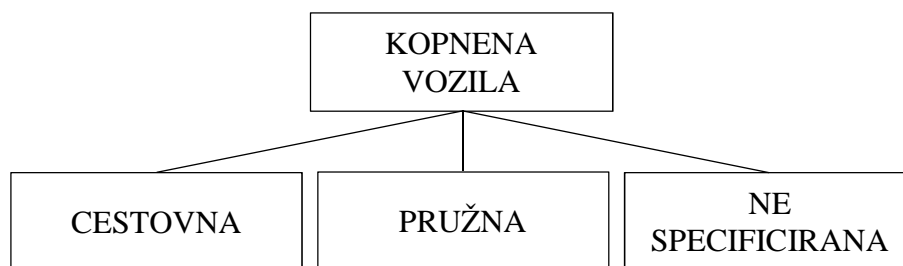
Kao jedan od primjera agenata su vozila. Prema definiciji vozilo je bilo koji objekt u gibanju s mogućnosti prijevoza ljudi ili tereta. Osnovna podjela vozila (Slika 1) je po vrsti agregatnog stanja okoline u odnosu na koju se vozilo giba. Po toj podjeli vozila mogu biti kopnena (suhozemna), vodena te zračna. Posebnu kategoriju vozila čine lebdeća vozila i amfibije.

Osnovna podjela kopnenih vozila je na cestovna, pružna i nespecificirana. Neka od cestovnih vozila su bicikl, motocikl, osobni automobil, autobus, kamioni različitih izvedbi te roboti različitih izvedbi.

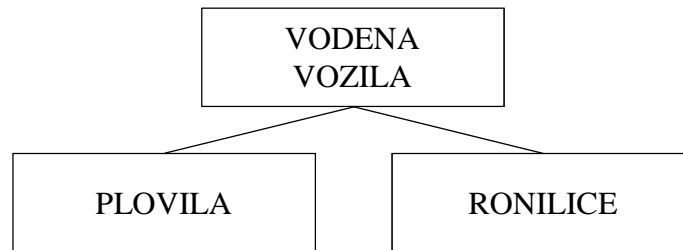


Slika 1. Osnovna podjela vozila je po vrsti agregatnog stanja okoline u odnosu na koju se vozilo giba. Pružna vozila, uz pretpostavku da se gibanje ostvaruje na dvije tračnice, razlikujemo po vrsti tračnica po kojima se kreću (glatke ili nazubljene) i čine ih tramvaji, vlakovi i vučena prijevoznička vozila.

U kategoriju nespecificiranih kopnenih vozila ulaze terenska vozila, tzv. *off-road* vozila i roboti krtice (rovalice).



Slika 2. Osnovna podjela kopnenih vozila. Osnovna podjela vodenih vozila je na plovila i ronilice, a neka od njih su čamci, brodovi s ljudskom posadom ili autonomni, podmornice i besposadne ronilice.



Slika 3. Osnovna podjela vodenih vozila. Prema osnovnim načelima postizanja sposobnosti letenja ili održavanja u zraku razlikuju se tri vrste zračnih vozila

- zrakoplovi lakši od zraka
- zrakoplovi teži od zraka i
- hibridni zrakoplovi.

Zrakoplovi lakši od zraka osiguravaju aerodinamičku silu uzgon po Arhimedovom zakonu, a gustoća im je manja od gustoće okolnog zraka kojeg istiskuju. U ovu vrstu zrakoplova ubrajaju se baloni.

Zrakoplovi teži od zraka su zrakoplovi čija je težina veća od težine istisnutog zraka i lete na osnovi postojanja aerodinamičke sile uzgona koja se suprotstavlja djelovanju vlastite težine letjelice. Zrakoplove teže od zraka dijelimo u dvije skupine

- zrakoplovi s čvrstim krilima i
- zrakoplovi s pomičnim krilima.

Kod zrakoplova s čvrstim krilima krila su nepomična i spojena s trupom. Aerodinamička sila uzgona se ostvaruje opstrujavanje okolnog zraka oko profila krila. Ova vrsta zrakoplova može biti bez motornog pogona i onda govorimo o zračnim jedrilicama. Zrakoplove s čvrstim krilima koje pogoni vlastiti motor nazivamo avionima.

Zrakoplove s pomičnim krilima dijelimo na zrakoplove s rotirajućim krilima i ornicoptere. Zrakoplovi s rotirajućim krilom podijeljeni na zrakoplove s rotorom koji omogućava gibanje zrakoplova po horizontalnoj osi i na zrakoplove s rotorom koji omogućava gibanje zrakoplova po vertikalnoj osi.

U zrakoplove s rotorom koji omogućava gibanje zrakoplova po horizontalnoj osi ubrajamo zrakoplove s klipnim motorima. Takav zrakoplov može imati jedan motor smješten najčešće u nos zrakoplova ili više motora ravnomjerno raspoređenih po napadnoj ivici krila.

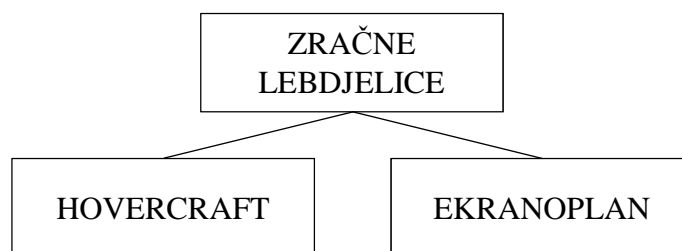
U zrakoplove s rotorom koji omogućava gibanje zrakoplova po vertikalnoj osi ubrajamo zrakoplove koji aerodinamičku silu uzgona ostvaruju vrtnjom propelera rotora. Takvi zrakoplovi mogu imati jedan, dva ili više rotora. Zrakoplove s jednim rotorom nazivamo

helikopterima. Helikopteri mogu biti s ljudskom posadom ili bespilotni. Zrakoplovi s dva rotora mogu biti takozvani tiltrotor zrakoplovi ili bespilotne letjelice pogonjene s dva motora. Zrakoplovi pogonjeni s više od dva rotora su najčešće bespilotne letjelice. Trenutno najzastupljenija vrsta bespilotnih letjelica su letjelice pogonjene s četiri rotora, takozvani kvadrotori ili dronovi.

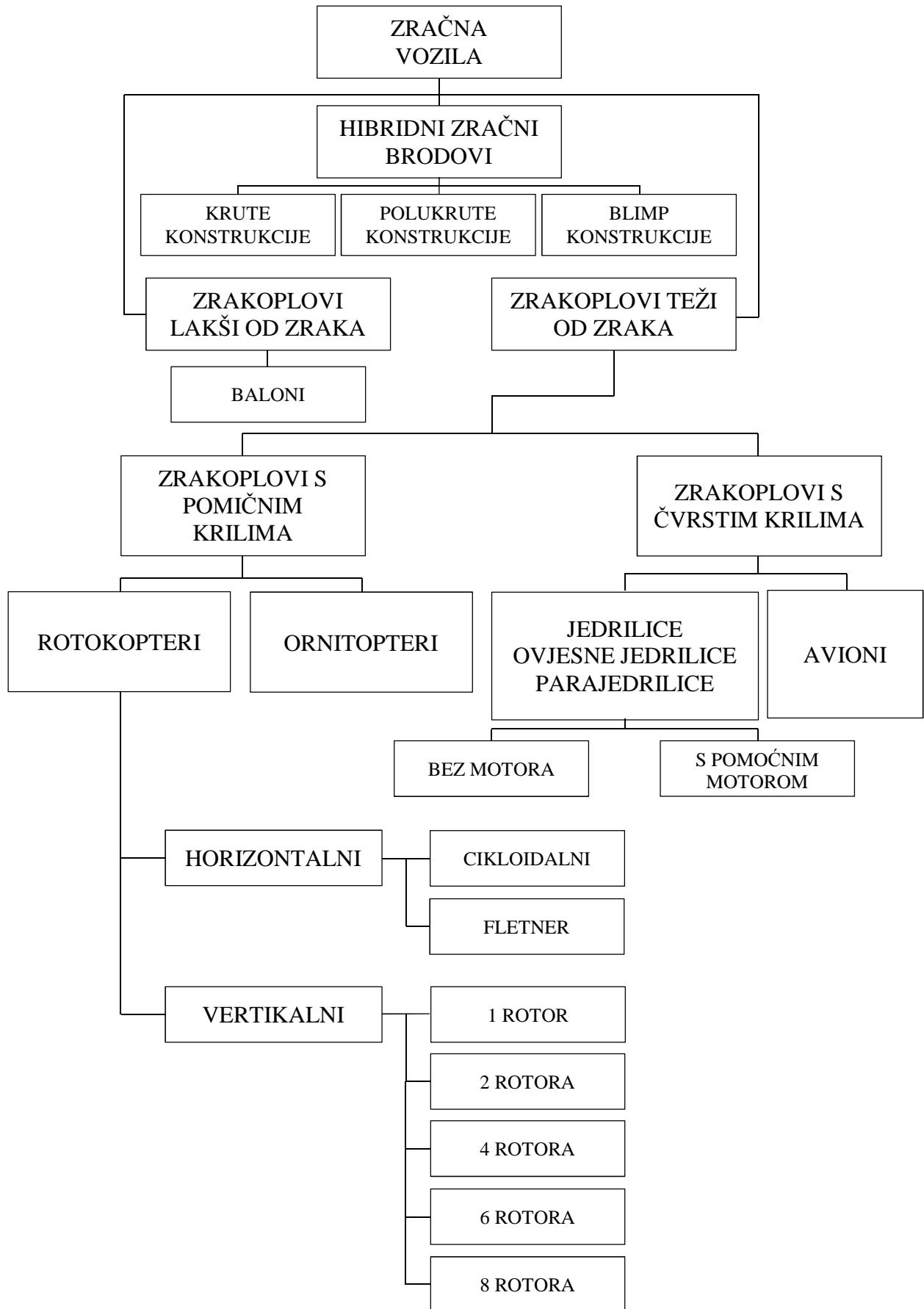
Ornicopteri su zrakoplovi koji za ostvarenje aerodinamičke sile uzgona mahanjem krila. Konstruirani su na način da oponašaju kretanje ptica, šišmiša i insekata kroz zrak. Zbog zahtjevnosti na izradu pogonske skupine za postizanja sile uzgona najčešće su bespilotni.

Hibridne zrakoplove čine zračni brodovi. Prema definiciji [59] zračni brod je upravljiva zračna letjelica lakša od zraka s vlastitim pogonom. Čini ga tijelo aerodinamičkoga vretenasta oblika od tekstilne ili limene ovojnice, koja se isprva ispunjavala vodikom, a danas se puni helijem ili vrućim zrakom. Tijelo može biti s krutom konstrukcijom, koja mu daje stalan oblik bez obzira na okolne uvjete, ili bez takve konstrukcije, kada se oblik zadržava nadtlakom plina unutar tijela. Zračni brod opremljen je motorom s propelerom, sustavom za upravljanje s aerodinamički oblikovanim pokretnim plohamama te gondolom s prostorom za posadu i putnike.

Zadnja kategorija vozila su lebdeća vozila. Prema definiciji [60] lebdeća vozila su prometna vozila koja se kreću i lebde iznad površine (lebdjelice) ili posebnih pruga (lebdeća pružna vozila). Prema vrsti pogona razlikuju se zračni i elektromagnetski uređaji za lebdjenje. U skupinu zračnih lebdjelica spadaju hoverkraft i ekranoplani. Lebdeća vozila koja koriste elektromagnetne efekte danas postoje kao lebdeća pružna vozila.



Slika 4. Osnovna podjela zračnih lebdjelica.



Slika 5. Osnovna podjela zračnih vozila. *Okolina*

Okolina je prostor u kojem agenti ostvaruju postavljeni cilj. Definirana je u odnosu na model sustava agenata koji treba izvršiti postavljeni cilj. Okolina mora biti modelirana na način da zadovoljava uvjete interakcije agenata međusobom koji djeluju u njoj ili interakcije agenata s okolinom. Okolina može biti strukturirana ili nestrukturirana. Strukturirana okolina je okolina s unaprijed zadanim međuovisnostima između pojedinih dijelova okoline. Djelovanje agenata u ovakvoj okolini je pojednostavljeno te je moguće unaprijed predvidjeti sve moguće prepreke a ujedno su izvanredne situacije gotovo isključene. Nestrukturirana okolina je okolina u kojoj nisu jasno precizirane sve međuovisne veze između pojedinih dijelova okoline. Ovaj tip okoline je složeniji za modeliranje jer je potrebno predvidjeti i najrjeđe događaje kao jednako vrijedne. Djelovanje agenata u ovako postavljenoj okolini je puno složenije i zahtjeva njihovu autonomnost.

Kako bi percipirali svoje lokalno susjedstvo i sredinu u kojoj se nalaze agentima su potrebni senzori. Pomoću senzora se odvija komunikacija među agentima ili između pojedinog agenta i okoline. Komunikacija među agentima, ako nisu međusobno vezani, ostvaruje se kroz okolinu te okolina mora omogućiti taj prijenos od pošiljatelja do primatelj poruke.

Npr. okolina može biti prometna mreža nekog grada, komunikacijska mreža, zračni prostor u kojem operativno djeluju zrakoplovi, komore za ispitivanje korozivnosti, laboratoriji za provedbu mjerenja, šume, gradovi, ljudi i drugo.

#### **2.3.2.4 Pravila**

Pravilo je skup unaprijed postavljenih odrednica po kojima je precizirano ponašanje agenata i okoline. Pravilo može biti postavljeno samo na jednog agenta ili na cijeli sustav. Ujedno pravilo postavljeno na okolinu ne mora biti postavljeno i na agenta, ali utječe na izmjenu mase, energije i/ili informacije između agenta i okoline ili između agenata.

Kao primjer pravila za interakciju agenta i okoline je opći primjer gibanja u okolini u svrhu preživljavanja: Osvrni se oko sebe i pogledaj da li se u tvojoj okolini nalazi područje bogato hranom, pomakni se u to područje i jedi.

Pravila se sastoje od dva dijela: uvjetnog dijela koji određuje kada će pravilo biti pokrenuto i akcijskog dijela koji precizira što se dogodi nakon pokretanja pravila. Na primjer, agent robota može uključivati pravilo „ako (a) vaša ruka je podignuta i (b) cilj je pokupiti objekt i (c) objekt je na stolu, zatim spustite ruku“. Da li je pravilo u svakom trenutku zadovoljeno određuje se



promatranjem radne memorije agenta koja pohranjuje činjenice kao što je mjesto ruke, trenutni cilj robota i njeno znanje stanja okoliša.

Pojedino pravilo će biti aktivno dok god se agent ne nađe u drugoj situaciji za koju je potrebno pokrenuti novo pravilo.

### **2.3.2.5 Odabir vrste agenata modela**

Kako bi se odredila vrsta agenata potrebnih za modeliranje sustava najprije je potrebno definirati cilj koji agenti moraju ispuniti. Budući da je cilj ovog istraživanja postaviti metodu za procjenu robusnosti i sposobnosti djelovanja sustava autonomnih agenata najprije je potrebno izdvojiti vrstu agenata za koju je moguće postaviti opći model sustava koji će uz minimalne izmjene samog sustava biti primjenjiv neovisno o vrsti agenata.

Sustav agenata za koji se postavlja metoda treba izvršiti prijevoz teškog tereta nedefiniranog oblika od mjesta A do mjesta B. Udaljenost između mjesta A i mjesta B je velika te je vezana uz površinu Zemlju. Uzimajući to u obzir odlučeno je da će vrsta agenata primijenjenih u simulacijama biti vozila. Okolina u kojoj agenti djeluju je nestrukturirana i lako promjenjiva uslijed fizikalnih promjena (kao što je npr. zapuh vjetrova). Infrastrukturne izmjene okoline nisu prihvatljive jer prijevoz mora biti ostvaren uz minimalne troškove.

Fokus istraživanja u sklopu ovog doktorskog rada je postavljen na sustave vozila bez ljudske posade, odnosno na takozvane bespilotne sustave, odnosno sustave koji ne uključuju ljudsku posadu koja upravlja vozilom. U daljnjim razmatranjima nisu isključena vozila koja prevoze putnike.

Budući da prijevoz tereta mora biti vezan uz površinu Zemlje iz daljnjih razmatranja isključujemo sva vodena vozila.

Iako su na neki način lebdeća, pružna i nespecificirana kopnena vozila vezana uz površinu Zemlje zbog ograničenja radijusa kretanja ovi tipovi vozila nisu uključeni u skupinu autonomnih vozila stoga ih isključujemo iz razmatranja.

Cestovna vozila imaju široku primjenu u prijevozu ljudi i roba. Glavno ograničenje koje je vezano uz njihovo gibanje je mogućnost kretanja unutar proizvoljnog radijusa. Uzimajući u obzir prethodno navedeno ograničenje o autonomnosti vozila iz široke palete prethodno navedenih cestovnih vozila za daljnje razmatranje izdvojeni su

- osobni automobili i motocikli,

- roboti s gusjenicama,
- roboti člankonošci i
- puzajući roboti.

Autonomni osobni automobili su suvremeni koncept automobila koji na osnovu vlastitih sustava senzora osmatraju okolinu, upravljaju i donose odluke korištenjem naprednih algoritama zasnovanim na tehnologijama umjetne inteligencije. Zbog njihovih karakteristika možemo reći da su oni jedna vrsta robota s kotačima. Glavni nedostatak jednog ovakvog vozila je vezanost uz infrastrukturu okoline. Osim robota s kotačima uz samu infrastrukturu okoline vezane su i ostale autonomne vrste cestovnih vozila. Prvi problem koji se javlja je zadovoljenje pravila o neinvazivnom djelovanju na infrastrukturu okoline. Npr. potrebno je prenijeti teret preko visokog planinskog lanca na kojem već ranije nije izgrađena cestovna infrastruktura. Dva su rješenja problema: prvo izgraditi cestu preko planinskog lanca ili izgraditi tunel. U oba slučaja potrebno je uložiti značajna financijska sredstva, a ujedno bismo invazivno djelovali na infrastrukturu okoline. Osim toga ako je riječ o hitnom slučaju gdje je teret unesrećena osoba bilo kakva izmjena infrastrukture zahtjeva dug vremenski period.

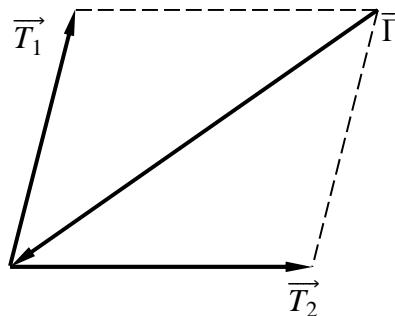
Vozila koja jedina zadovoljavaju postavljeni uvjet za neinvazivno djelovanje u okolini su zračna vozila jer su jedini tip vozila koji leti. Let je upravljivo gibanje tijela kroz plinoviti medij. Stoga su zračna vozila u mogućnosti kroz atmosferu doći od bilo kojeg mjesta A do mjesta B te na taj način prevesti teret. Svaki promatrani let koji bilo koje zračno vozilo izvrši dijeli se na tri segmenta

- polijetanje,
- let u užem smislu i
- slijetanje.

Budući da su zračna vozila podijeljena u nekoliko vrsta: zrakoplovi lakši od zraka, zrakoplovi teži od zraka i hibridni zrakoplovi postavlja se pitanje koja vrsta bi u potpunosti zadovoljila kriterije postavljene na opći model sustava za određivanje robusnosti i sposobnosti djelovanja. Po kriteriju zastupljenosti i dostupnosti na tržištu odlučeno je u daljnja razmatranja uzeti zrakoplove teže od zraka. S obzirom da zrakoplovi moraju zadovoljiti uvjet autonomnosti koji je fokus ovog istraživanja odlučeno je da će agenti koji čine sustav biti bespilotne letjelice. Iako u današnje vrijeme primjenom *fly-by-wire* tehnologije konvencionalne zrakoplove možemo svrstati u skupinu autonomnih letjelica jer većinu letačkih operacija obavlja računalo, odnosno autopilot, no zbog njihovih dimenzija u ovoj fazi istraživanja neće biti razmatrani.

Bespilotne letjelice se razlikuju preko aerodinamičkog koeficijenta otpora  $c(\beta)$ . Ujedno nam on služi za grupiranje pojedinih letjelica stoga ne moramo svaku vrstu promatrati pojedinačno. Trenutno najzastupljenija vrsta bespilotnih letjelica su letjelice pogonjene s četiri rotora, takozvani kvadrotori ili dronovi.

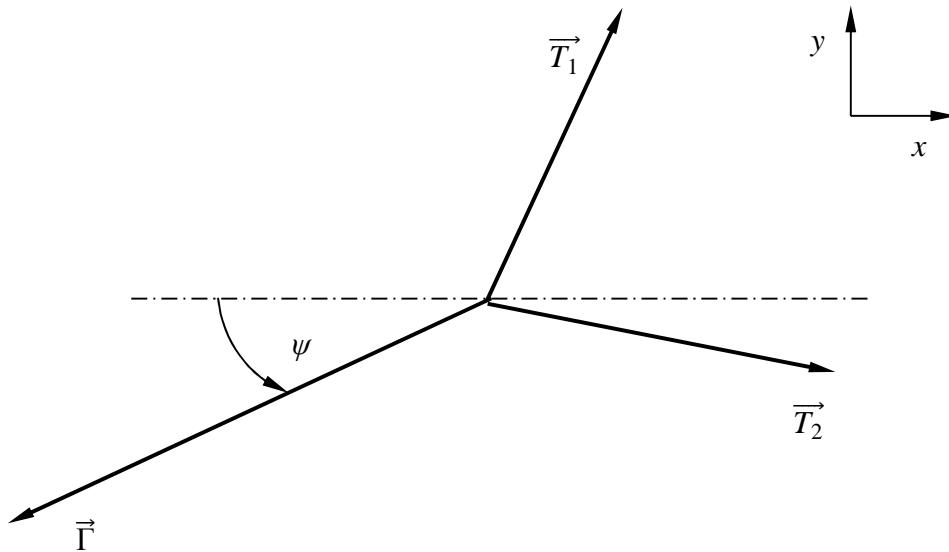
Gledajući karakteristike sustava on mora biti sastavljen od minimalno dva dijela, odnosno agenta. Ako uzmemo da su ti agenti dva kvadrotora prvi uvjet koji sustav mora zadovoljiti je prikazan slikom (Slika 6). To je relacija trokuta i govori nam da zbroj ostvarenih potisaka ( $T_1$  i  $T_2$ ) kvadrotora mora biti u mogućnosti svladati ukupni koeficijent opterećenja sustava  $\Gamma$ .



Slika 6. Relacija trokuta.  $\vec{T}_1 + \vec{T}_2 = \vec{\Gamma}$ . (1)

Za sustav koji tijekom cijelog vremena izvršavanja postavljenog zadatka uslijed iznenadnih promjena ukupnog opterećenja  $\Gamma$  zadovoljava uvjet postavljen jednažbom (1) smatramo da je u mogućnosti obavljati funkciju, odnosno da ima povoljnu zalihost energije. Za sustav koji je samo u pojedinim trenucima u mogućnosti u potpunosti zadovoljiti jednažbu (1) kažemo da ima zalihost snage. Iz ovog možemo zaključiti da je relacija trokuta prikazana jednažbom (1) kvantitativna mjera koju sustav mora ispuniti kako bi obavljao zadanu funkciju.

Ukupno opterećenje sustava ovisi i o brzini leta. Njen utjecaj vidljiv je kroz kut otklona  $\psi$  ukupnog otpora sustava  $\Gamma$  prikazanog na slici 7. U općem slučaju uzima se za slučaj lebdenja (engl. *hovering*) otklon vektora ukupnog otpora  $\Gamma$  je  $\psi = 90^\circ$ . Za slučaj umjereno brzog horizontalnog leta (engl. *moderate level flight*) kut otklona je  $\psi \approx 45^\circ$ . Za slučaj brzog horizontalnog leta (engl. *fast level flight*) kut otklona je  $\psi \approx 0^\circ$ .



Slika 7. Utjecaj brzine leta na vektor ukupnog otpora sustava preko kuta otklona  $\psi$ . Iz slike 7 slijedi ovisnost vektora ukupnog otpora sustava  $\vec{\Gamma}$  o pripadnim komponentama

$$\vec{\Gamma} = \Gamma(\hat{x} \cos \psi + \hat{y} \sin \psi). \quad (2)$$

Zašto su kvadrotori najbolje rješenje u odabiru vrste agenata najjednostavnije je prikazati na prethodnom primjeru prijevoza tereta preko planinskog lanca. Ako se teret, u ovom slučaju unesrećena osoba kojoj treba pružiti hitnu medicinsku skrb, nalazi s jedne i potrebno ju je prevesti na drugu strani planinskog lanca kvadrotori su u mogućnosti bez mijenjanja okoline ostvariti zadani cilj prelijetanjem planinskog lanca. Također im za polijetanje i slijetanje nije potrebna pista jer je polijetanje, kao i slijetanje vertikalno.

## 3 Osnove statističke mehanike

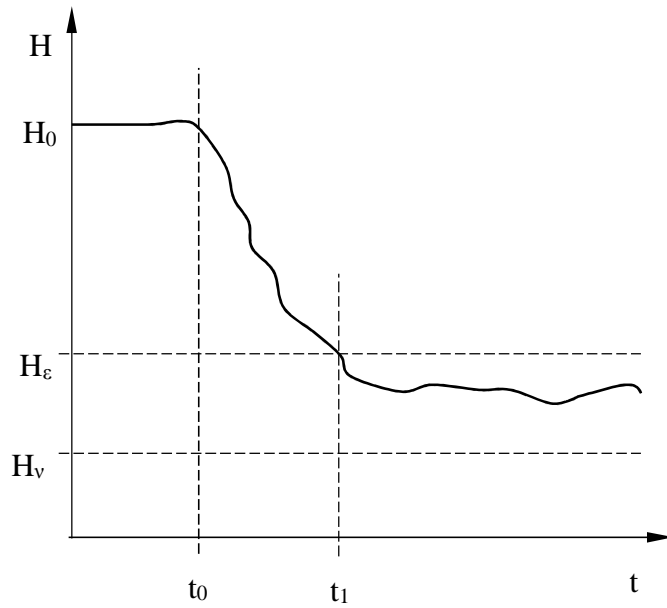
### 3.1 Teorija informacija

Sustavima se može efikasno upravljati odgovarajućom organizacijom informacijske mreže. Informacijska mreža obavlja funkciju prikupljanja, pohranjivanja, prijenosa, usmjeravanja i obrade informacija za sve elemente sustava. Na sva stanja i procese koji se odvijaju u informacijskom kanalu utječu smetnje i poremećaji. Ti poremećaji dovode do pojave greške u prijenosu pa ih treba uzeti u obzir prilikom postavljanja uvjeta za informacijski kanal. Kvantitativnu ocjenu o stanju sustava dajemo na osnovu stanja pojedinih parametara procesa. Poznavajući fizikalnu prirodu pojedinih procesa u sustavu možemo reći da u stvarnosti ne postoje potpuno determinantni procesi, odnosno vrijednost parametara koji određuju stanje sustava slučajni su. Uvođenjem upravljanja sustavom pomoću informacijskog kanala u većoj ili manjoj mjeri smanjujemo neodređenost sustava. mjera neodređenosti sustava kvantitativno se određuje informacijskom entropijom  $H$ . U skladu s tim razlikuju se tri stanja sustava: stanje uz prekinutu informacijsku povratnu vezu (stanje bez povratne veze); stacionarno stanje uz povratnu informacijsku vezu i prijelazno stanje (prijelaz iz neupravljivog u upravljivo stanje i obrnuto), slika 8.

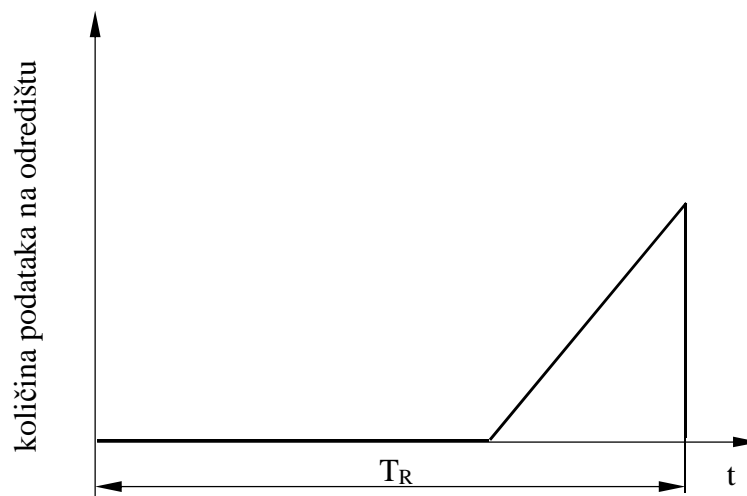
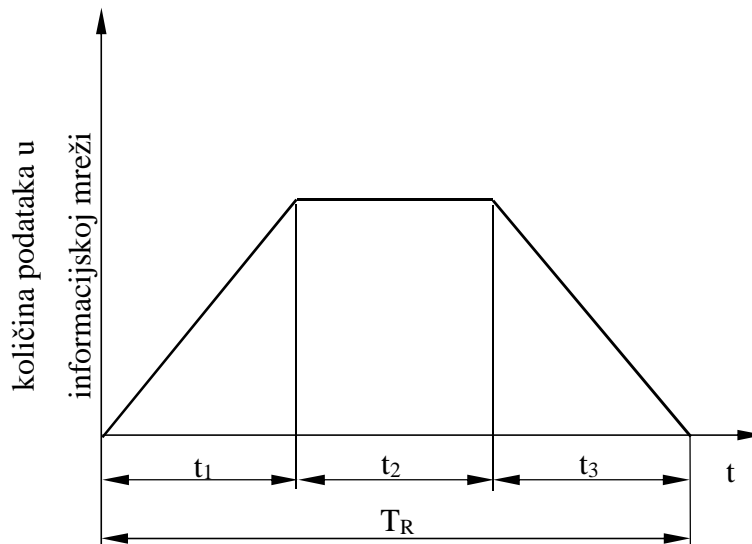
Kao što je vidljivo sa slike 8 stanje sustava uz prekinutu informacijsku povratnu vezu kvantitativno prikazujemo kroz informacijsku entropiju  $H_0$ , a određujemo ju na osnovu vrijednosti koje poprimaju parametri sustava kada je on prepušten samo djelovanju slučajnih smetnji i poremećaja. U tom stanju neodređenost sustava je najveća. Uvođenjem upravljanja tu neodređenost smanjujemo i dovodimo u područje gdje je informacijska entropija u granicama između  $H_e$  i  $H_v$ .

Stacionarno stanje s upravljanjem određeno je razlikom graničnih vrijednosti informacijske entropije  $H_e - H_v$ . Na iznos ukupne informacijske entropije sustava utječemo unosom nove količine informacije u sustav. To znači da sustav za obradu informacije mora za vrijeme prijelaznog procesa obraditi sadržaj informacije

$$I_x = H_0 - H_e. \quad (3)$$



Slika 8. Informacijska entropija sustava.



Slika 9. Diskretna obrada. Mogućnosti informacijske mreže su ograničene odnosno konačne.

Stoga sadržaj informacije ne možemo prenijeti u beskonačno kratkom vremenu pa uvijek moramo uzeti u obzir prijelazno vrijeme  $t_1 - t_0$ .

U stacionarnom stanju sustava obrađena količina informacije mora zadovoljiti uvjet da potrebna informacijska entropija ne izlazi iz granica razlike  $H_e - H_v$ . Uslijed prekida povratne veze sustav će ponovno, pod utjecajima smetnji, doći u stanje bez upravljanja, odnosno informacijska entropija sustava će biti  $H_0$ .

U suštini uvijek moramo promatrati sustav kao cjelinu. U većini slučajeva govorimo o sustavima s diskretnim djelovanjem, odnosno informacijska mreža sustava ne može u kratkom intervalu dati rezultat obrade podataka. Ukupno djelovanje informacijske mreže podijeljeno je na tri intervala: uzimanje podataka, obradu podataka i predaju rezultata u određenom vremenu djelovanja  $T_R$  (slika 9). Nakon svakog intervala  $T_R$  u sustav je unesena nova količina informacija, a unutar intervala sustav ima tendenciju povećanja entropije.

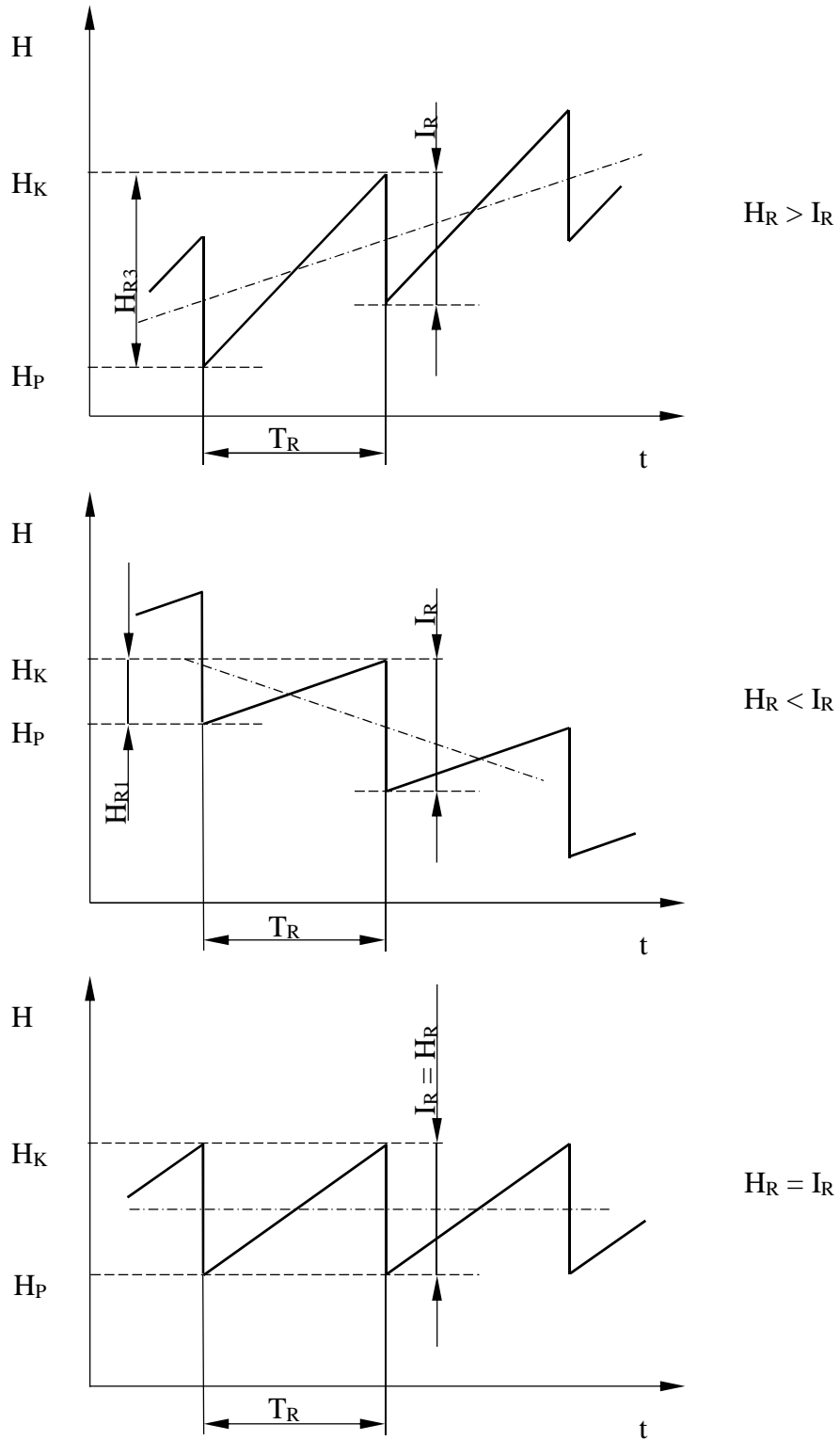
Količina informacije  $I_R$  koja se predaje u sustav kao rezultat obrade podataka nakon intervala  $T_R$  može prema prirastu entropije biti u različitim odnosima (slika 10).

Ako je  $I_R < H_R = H_K - H_P$  unesena količina informacije nije dovoljna da se sustav drži u predviđenoj granici točnosti upravljanja i on neće težiti povećanju entropije.

Ako je  $I_R > H_R = H_K - H_P$  unesena količina informacije je prevelika za odabranu točnost i sustav će težiti smanjenju entropije.

Uvjet stacionarnog stanja bit će zadovoljen samo ako je  $I_R = H_R = H_K - H_P$ .

Iz ovoga slijedi zaključak da ti uvjeti ovisnosti određuju iskoristivost pojedinog informacijskog kanala. U slučaju nedovoljne količine informacije  $I_R$  potrebno je proširiti informacijski volumen sustava, odnosno u suprotnom slučaju taj volumen nije dovoljno iskorišten.



Slika 10. Odnos između obrađene informacije i informacijske entropije.



### 3.1.1 Informacijski kanal

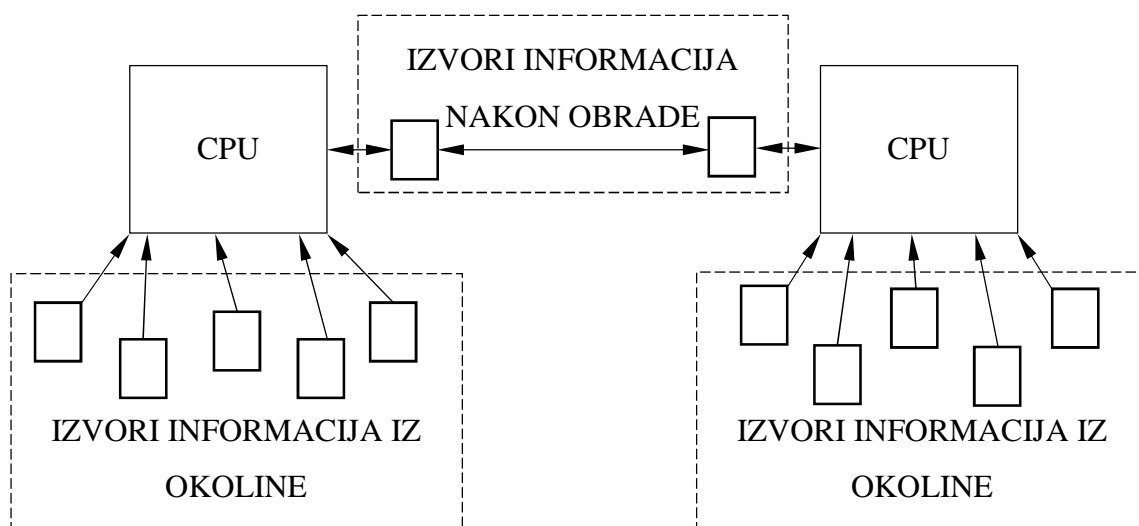
Osnovni zadatak komunikacijskog kanala je efektivni prijenos informacija između elemenata sustava. Efektivnost prijenosa očituje se u predaji što više istinitih podataka u zadanom vremenskom intervalu putem komunikacijskog sustava.

Izvor informacije je bilo kakav objekt ili operator koji generira informacije. Informacija o stanju nekog sustava ili bilo kojeg događaja iz okoline može sadržavati razne podatke i oblike. Prema obliku informacije su podijeljene na: impulsne, kontinuirane i kombinirane.

Impulsne informacije izražavaju se nizovima sastavljenim od konačnog broja elementarnih simbola. Tipičan primjer impulsnih informacija je telegrafija. Tu su elementarni simboli dva ili više različitih elementarnih impulsa. Pomoću njih prikazujemo znakove abecede koji opet čine poseban diskretni skup. Impulsni oblik podataka primjenjiv je i na različita mjerenja sustava u kojima onda impulsi sadržavaju brojke.

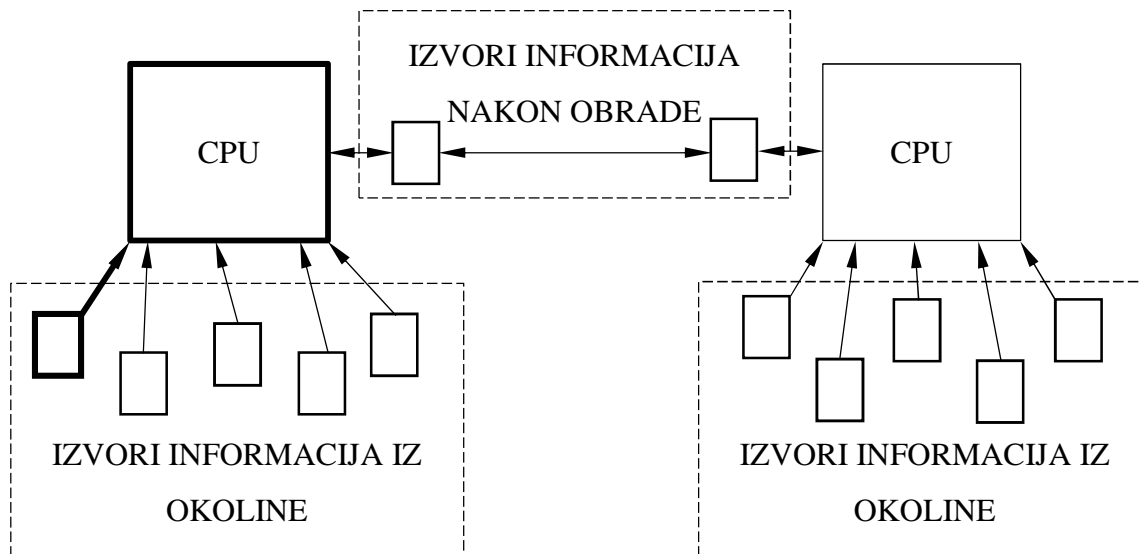
Kontinuirane informacije izražavaju se vremenskim funkcijama koje poprimaju neprekinuti skup vrijednosti. Primjeri kontinuirane informacije su prijenos govora ili glazbe, prijenos mjerenih podataka čija je promjena kontinuirana i dr. kontinuirane informacije možemo s određenom greškom pretvoriti u impulsne, a primjer toga je prijenos govora pomoću pulsno-kodne modulacije.

Shema jednog informacijskog sustava prikazana je na slici 11.



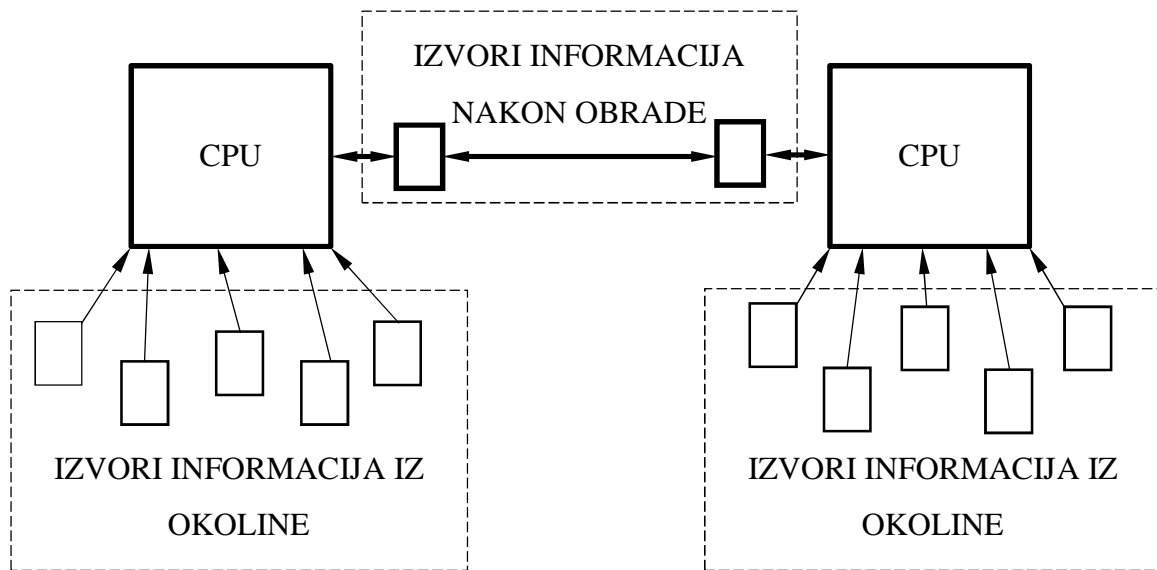
Slika 11. Shematski prikaz informacijskog sustava između dvije bespilotne letjelice. U slučaju dvije autonomne letjelice koje prenose teret ostvarena komunikacija između njih može se ostvariti shemom prikazanom na slici 11. Sa slike 11 vidimo da izvor informacija može biti

više postavljenih senzora. Svaki od tih senzora očitava određenu vrstu informacije i šalje ju u centralno računalo (engl. *Central Processing Unit*). Osim senzora izvor informacije je i antena.



Slika 12. Shematski prikaz jednosmjernog informacijskog kanala između bespilotne letjelice i izvora. Ako pogledamo jedan izvor, koji je na slici 12 označen podebljanom linijom, on s centralnim računalom tvori jednosmjerni informacijski kanal. Informacija koju izvor prikupi iz svoje okoline može biti iznos temperature, iznos tlaka, vlažnost zraka, koncentracija CO<sub>2</sub>, termografska slika, video zapis, ultrazvučni signal, infrazvučni signal i dr. Nakon primitka informacije iz izvora centralno računalo obrađuje podatke. Obradeni podatci pomoću antene ili nekog drugog izvora su prosljeđeni drugoj letjelici (slika 13).

Sa slike 13 vidimo da je informacijski kanal između dvije bespilotne letjelice dvosmjerni. Osim dvosmjernog informacijskog kanala u različitim slučajevima upravljanja kanal može biti jednosmjerni. Tu situaciju susrećemo u slučajevima kad je jedna bespilotna letjelica vođa (engl. *master*), a druga bespilotna letjelica sljedbenik (engl. *slave*). Vrsta informacijskog kanala ovisi i o vrsti informacije koja se šalje, odnosno da li je pojedina informacija potrebna za normalan rad obje letjelice. Neovisno o vrsti informacijski kanal može biti ostvaren žičanom ili bežičnom vezom.



Slika 13. Shematski prikaz dvosmjernog informacijskog kanala između dvije bespilotne letjelice. **Slučajni događaji i sadržaj informacije**

Intuitivno možemo zaključiti da informaciju primamo ako saznamo za događaj čiji nastup nije bio unaprijed određen. Određenost nastupa pojedinog događaja određujemo njegovom vjerojatnošću. Što je nastup događaja vjerojatniji to ćemo manje informacije primiti nakon što se on realno dogodi. Ovo svojstvo vjerojatnosti je kvalitativno svojstvo informacije.

Promatramo li prijenos informacije kroz odijeljene blokove sustava, tada je bit prijenosa u najjednostavnijem slučaju u tome da se od  $n$  simbola na ulazu izabere neki simbol  $x_i$  za koji se na izlazu očitava simbol  $y_j$ . Na osnovu primljenog simbola  $y_j$  moguće je odrediti koji simbol  $x_i$  je na početku poslan. Veći dio informacija koje koristimo ponašaju se po nekim statističkim zakonitostima. Razumljivo je da skup informacija mora biti potpun

$$\sum_{i=1}^n p(x_i) = 1. \quad (4)$$

Budući da komunikacijski sustav promatramo na realnim slučajevima u obzir moramo uzeti i smetnje te slučajna izobličenja. Budući da isti simbol  $x_i$  može prijeći u različite simbole  $y_j$ , govorimo o vjerojatnosti istovremene pojave parova  $(x_i, y_j)$ , odnosno o združenoj vjerojatnosti  $p(x_i, y_j)$ . Prema teoremu o množenju vjerojatnosti slijedi

$$p(x_i, y_j) = p(x_i)p(y_j/x_i) = p(y_j)p(x_i/y_j) \quad (5)$$

Za poznate fizikalne mehanizme transformacije  $x_i$  u  $y_j$  mogu se izračunati uvjetne vjerojatnosti  $p(y_j/x_i)$ . Samim time mogu se odrediti vjerojatnosti  $p(x_i, y_j)$  ako su apriorne vjerojatnosti  $p(x_i)$  poznate. Za tako postavljene skupove vrijede relacije

$$p(x_i) = \sum_{j=1}^m p(x_i, y_j); p(y_j) = \sum_{i=1}^n p(x_i, y_j); \sum_{i=1}^n p(x_i) = \sum_{j=1}^m p(y_j) = 1. \quad (6)$$

Iz ovoga slijedi da pojava događaja  $y_j$  mijenja vjerojatnost pojave događaja  $x_i$  iz apriorne  $p(x_i)$  u aposteriornu  $p(x_i/y_j)$ . Aposteriornu vjerojatnost određujemo kombiniranjem jednadžbi (5) i (6)

$$p(x_i/y_j) = \frac{p(x_i, y_j)}{p(y_j)} = \frac{p(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^n p(x_i, y_j)}. \quad (7)$$

Kako bi odredili sadržaj informacije najprije moramo definirati uzajamni sadržaj informacije  $I(x_i; y_j)$  koji se odnosi na događaj  $x_i$  dobiven pojavom događaja  $y_j$  kao logaritam aposteriorne vjerojatnosti  $p(x_i/y_j)$  i apriorne vjerojatnosti  $p(x_i)$

$$I(x_i; y_j) = \log \frac{p(x_i/y_j)}{p(x_i)}. \quad (8)$$

Sa stajališta tehnike najprikladnija je primjena logaritma za bazu dva (dualni logaritam), stoga množenjem izraza (8) s  $p(y_j)$  uz uvjet da su događaji informacija neovisni i fiksnu vjerojatnost  $p(x_i)$  slijedi izraz za maksimalnu vjerojatnost

$$I(x_i) = -\text{ld } p(x_i). \quad (9)$$

Jednadžba (9) predstavlja izraz za vlastiti sadržaj informacije pojedinog događaja, odnosno događaj kada  $y_j$  jednoznačno opisuje  $x_i$ . Veličina  $I(x_i)$  predstavlja sadržaj informacije koju donosi događaj  $x_i$  ili bilo koji drugi događaj koji je jednoznačno vezan s njim.

## 3.2 Informacijska entropija

Vlastiti sadržaj informacije pojedinog događaja je onaj iznos informacije koji je potreban za jednoznačno opisivanje tog događaja. Po analogiji sa srednjim uzajamnim sadržajem informacije određen je srednji vlastiti sadržaj informacije  $I(\Omega)$

$$I(\Omega) = \sum_{i=1}^n p(x_i)I(x_i) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \text{ld} p(x_i) = H(\Omega). \quad (10)$$

Srednji sadržaj informacije je onaj iznos informacije koji je u prosjeku potreban za određivanje bilo koja pojedinačna informacija iz skupa  $\Omega$  mogućih prenesenih informacija. Veličinu  $I(\Omega)$  označava informacijsku entropiju i prema izrazu (10) označavamo ju kao  $H(\Omega)$ .

Informacijsku entropiju možemo promatrati kao kvantitativnu mjeru neodređenosti neke informacije prije nego je primljena, odnosno kao iznos informacije koji se mora u prosjeku predati kako bi se prepoznala bilo koja informacija iz skupa  $\Omega$ .

Informacijska entropija ne može biti negativna veličina budući da je vlastiti sadržaj informacije uvijek

$$I(x_i) = -\ln p(x_i) \geq 0. \quad (11)$$

Prema tome će informacijska entropija biti jednaka nuli samo ako je jedna od vjerojatnosti jednaka jedinici, a sve ostale su jednake nuli. Sukladno tome kada je vjerojatnost neke informacije jednaka jedinici, a sve ostale vjerojatnosti su nula, može se predati samo ta informacija koja je od ranije poznata. Nakon prijema takve sigurne informacije ne dobiva se nikakav novi sadržaj. Iz toga slijedi

$$H(\Omega) \leq \ln n, \quad (12)$$

gdje je  $n$  broj svih mogućih događaja  $x_i$ . Maksimalni iznos informacijske entropije je

$$H_m(\Omega) = \ln n. \quad (13)$$

Maksimalni iznos informacijske entropije je prosječni sadržaj informacije koji može biti dobiven nekim skupom informacija  $\Omega$ .

### 3.3 Statistička mehanika

Statistička mehanika je znanstvena disciplina koja primjenom statističkih metoda opisuje dinamiku sustava za velik broj mogućih stanja, broj čestica ili sve zajedno pomoću veličina koje se ne mijenjaju u vremenu. Statistička mehanika polazi od pretpostavki dinamike na razini elementa sustava (mikrorazina) te nastoji izvesti izraze za sustav u cjelini, a to su najčešće termodinamičke veličine na makrorazini. Statistička mehanika objašnjava termodinamičko ponašanje velikih sustava, odnosno sustava izgrađenih od velikog broja elemenata. Zakoni mehanike na razini mikrosvijeta primjer su Newton-ove dinamike dakle ne sadrže pojmove poput temperature, topline ili entropije; međutim, statistička mehanika pokazuje kako ti koncepti proizlaze iz prirodne neizvjesnosti o stanju sustava kada je taj sustav u stvarnoj okolini. Makroskopsko ponašanje sustava predočeno je statističkom raspodjelom elemenata po energetske nivoima. Primijenjeni statistički zakoni odnose se na cijeli sustav.

U termodinamici sustava promatramo i mjerimo makroskopske veličine sustava, odnosno gledamo sustav kao cjelinu. Mikroskopske veličine koje su vezane uz pojedini element ne razmatramo, ali svako makroskopsko stanje sustava može biti rezultat različitih mikroskopskih stanja. Da bi odredili stanje cijelog sustava sačinjenog od  $N$  elemenata moramo odrediti

statističke težine pojedinog mikroskopskog stanja, odnosno moramo odrediti koliko pojedino mikrostanje utječe na sustav u cjelini. Što je veći broj mogućnosti ostvarenja nekog makrostanja to je veća vjerojatnost da ćemo sustav naći u tom stanju.

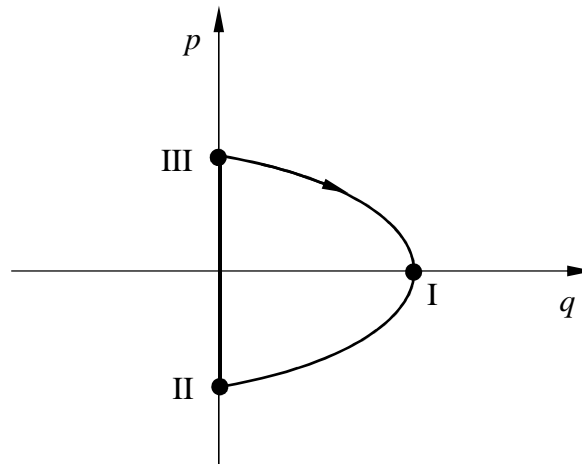
Za određivanje makrostanja kako u Newton-ovoj tako i u statističkoj mehanici za svaki element sustava potrebno je odrediti položaj, odnosno stanje, u realnom, euklidskom prostoru. Polazište statističke mehanike je jednoznačno određivanje stanja elementa na temelju svih mjerljivih veličina elementa i poznatih stopa promjene tih veličina. Kako je već navedeno u poglavlju Osnove znanosti o sustavima element sustava mogu biti atomi, molekule, vozila, zrakoplovi, brodovi, bespilotne letjelice, zupčanici, poluge, vijci, strojevi, manipulatori itd. Za navedene elemente mjerljiva veličina elementa je njegov položaj, a stopa promjene se očituje u brzini pojedinog elementa. Osim brzine koja je usko vezana uz položaj mjerljiva veličina elementa se može očitovati u promjeni stanja pojedinog elementa kao što je npr. stanje napunjenosti baterije, količina prenesene informacije u komunikacijskom kanalu, kutovi zakreta i kutne brzine za kruto tijelo i dr.

Sva stanja pojedinog elementa sustava predstavljaju broj stupnjeva slobode. Stoga, ako sa  $s$  označimo broj stupnjeva slobode pojedinog elementa onda je njegovo gibanje određeno sa  $2s$  kanonskih jednadžbi. Gibanje tako postavljenog elementa, odnosno sustava elemenata promatramo u poopćenom faznom prostoru.

Fazni prostor je hiperprostor razapet mjerljivim veličinama elementa i stopama promjena tih veličina. Dimenzija faznog prostora cijelog sustava ovisi o broju elemenata u sustavu. Stoga, svaki stupanj slobode ili parametar sustava predstavljen je kao os višedimenzijskog prostora. Jednodimenzionalni prostor se naziva faznom linijom, a dvodimenzionalni prostor faznom ravninom. Putanju gibanja elementa predočena je faznim dijagramom. Npr. jednoatomna molekula ima 3 stupnja slobode translacijskog gibanja, a dvoatomna molekula, kod koje se udaljenost između atoma ne mijenja, ima 3 stupnja slobode translacije težišta i dva stupnja slobode rotacije molekule. U slučaju jednoatomne molekule fazni prostor je šesterodimenzionalan, a u drugom slučaju je deseterodimenzionalan.

Radi lakše ilustracije primjer faznog dijagrama prikazan je na slici 14. Element sustava je kuglica konstantne mase koja se nalazi u polju sile teže. U početnom trenutku kuglica je podignuta na određenu visinu na kojoj miruje (točka I). Iz početnog ravnotežnog položaja kuglica je puštena i slobodnim padom se giba prema podlozi. U kontaktu s podlogom (točka II) kuglica ostvaruje potpuno elastični sudar bez gubitaka. Nakon sudara (točka III) kuglica se giba

vertikalno prema gore do početne pozicije (točka I). Koordinata kuglice na dijagramu je predočena općom koordinatom  $q$ , a brzina kuglice općom koordinatom promjene položaja  $p$ .



Slika 14. Fazni dijagram kuglice u slobodnom padu pri elastičnom sudaru s podlogom. Kako je ranije navedeno da bi odredili stanje sustava potrebno je odrediti sve mjerljive veličine elemenata i poznatih stopa promjena tih veličina, odnosno potrebno je odrediti svojstva sustava. Svojstva sustava mogu biti intenzivna ili ekstenzivna. Intenzivna su ona svojstva koja ne ovise o veličini sustava i jednaka su u svim dijelovima sustava. U intenzivna svojstva ubrajamo temperaturu, gustoću, napetost površine i dr. Ekstenzivna svojstva ovise o veličini sustava, odnosno preciznije o množini tvari u njemu. U ekstenzivna svojstva ubrajamo masu, volumen, ukupnu energiju i dr. budući da se statistička mehanika temelji na pretpostavci kako je stanje makrorazine sustava ovisno o stanju mikrorazine slijedi zaključak da sva stanja sustava koja su vezana uz njegove intenzivne veličine moraju biti jednako vjerojatna. Taj uvjet naziva se termičkom ravnotežom. Stoga bilo koji promatrani sustav u faznom prostoru je u termičkoj ravnoteži. Iz toga slijedi da su sva stanja sustava jednako vjerojatna. Slučajni gubitci energije su zanemarivi pa gledano za sustav u cjelini njegova ukupna energija  $E$  je konstantna. Iz tog razloga stanje pojedinog elementa sustava prikladno je iskazivati njegovom energijom. Za sustave s više elemenata uvodi se pojam raspodjele energije,  $f(E)$ , koja govori koliko elemenata sustava ima istu energiju.

Vjerojatnost da se element nalazi u nekom dijelu faznog prostora ovisit će o energiji samog elementa, odnosno o umnošku funkcije raspodjele  $f(E)$  i faznog volumena  $d\Phi$

$$dp = f(E)d\Phi. \quad (14)$$

Prema Boltzmannovoj raspodjeli funkcija raspodjele je

$$f(E) \sim e^{-\frac{E}{\theta}}, \quad (15)$$

gdje je  $\Theta$  modul raspodjele. Modul raspodjele također nazivamo generaliziranom temperaturom. Prema Liouvilleovom teoremu

$$\frac{df}{dt} = 0. \quad (16)$$

Iz 15 i 16 slijedi uzimanjem u obzir normiranje raspodjele

$$dp = \frac{e^{-\frac{E}{\Theta}} d\Phi}{\int e^{-\frac{E}{\Theta}} d\Phi}. \quad (17)$$

### 3.3.1 Entropija i vjerojatnost

Za svaki element faznog prostora poznavanjem početnih uvjeta, odnosno početnog stanja sustava, moguće je potpuno odrediti poziciju elementa u bilo kojem trenutku.

U klasičnoj mehanici za potpuno određivanje smjera kretanja sustava dovoljno je uzeti inverziju vremena. Budući da se statistička mehanika temelji na termodinamičkim zakonitostima tu inverziju vremena ne možemo primijeniti.

Za određivanje makroskopskog stanja sustava najprije moramo odrediti njegovu entropiju. Iz drugog zakona termodinamike slijedi da je  $dS \geq 0$ , odnosno u ireverzibilnim transformacijama sustava entropija se povećava, a u reverzibilnim ostaje konstantna. Iz aspekta statističke mehanike možemo reći u reverzibilnim transformacijama termodinamičke vjerojatnosti su jednake, a u ireverzibilnim transformacijama vjerojatnost početnog stanja je manja u odnosu na vjerojatnost završnog stanja. Vjerojatnost nekog stanja određena je brojem različitih permutacija koje danu raspodjelu ostvaruju.

Kako bi odredili entropiju sustava najprije moramo odrediti stanje unutarnje energije sustava. Prema (17) vidimo da povećanjem temperature sustava on teži višem energetskeg nivou. Energija sustava, a ujedno i energije pojedinog elementa čine kontinuum pa se zagrijavanje elementi kontinuirano pomiču prema višim energetskeg nivoima. Samo to pomicanje elemenata utječe, odnosno uzrokuje promjene unutarnje energije. Iz termodinamike je poznato da je unutarnja energija sustava zbroj dovedene topline u sustav i obavljenog rada ( $\Delta U = W + Q$ ). Iz drugog zakona termodinamike slijedi da je mala količina topline podijeljena apsolutnom temperaturom, odnosno temperaturom sustava jednaka iznosu entropije sustava

$$\delta S = \frac{\delta' Q}{\Theta}, \quad (18)$$



Ako entropiju izrazimo preko logaritamske funkcije slijedi

$$S \approx \log B, \quad (19)$$

gdje je  $B$  volumen faznog prostora. Jednadžba (19) je fundamentalna relacija između entropije i vjerojatnosti te ujedno dokaz da drugi zakon termodinamike ima statistički karakter. Zakon povećanja entropije temelji se na težnji da sustav dosegne stanje maksimalne vjerojatnosti, odnosno vjerojatnost stanja maksimalne entropije je najveća, no postoje i male fluktuacije oko ravnotežnog stanja.

### 3.3.2 Ergodska hipoteza

Za sustav elemenata određene energije koji se nalazi u termodinamičkoj ravnoteži svaka termodinamička veličina  $K$  ovisi o nizu koordinata i impulsa koji se s vremenom mijenjaju. Ta promjena uvjetuje vremensku ovisnost promatrane veličine. Stvarni eksperimentalni podatak koji dobivamo o veličini  $K$  jednak je vremenskom prosjeku mjerenja

$$\langle K \rangle = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{t_0 - \frac{\tau}{2}}^{t_0 + \frac{\tau}{2}} K(q, p) dt, \quad (20)$$

gdje  $t_0 - \frac{\tau}{2}$  označava vrijeme početka mjerenja, a  $\tau$  njegovo trajanje. Budući da se promjene stanja na mikrorazini odvijaju u kratkom vremenu možemo pretpostaviti da je trajanje eksperimenta beskonačno dugo.

Da bi odredili vremenski prosjek veličine  $K$  moramo znati sve pozicije kroz koje reprezentativni element prođe u faznom prostoru. Primjenom metoda statističke mehanike na statistički ansambl identičnih sustava opisanih distribucijskom funkcijom  $f(E)$  iz jednadžbe (20) možemo odrediti statističku srednju vrijednost veličine  $K$ . Stanje termodinamički izoliranog sustava uvijek se nalazi na hiperplohi faznog prostora gdje je energija konstantna. Reprezentativno stanje sustava s vremenom prolazi iz jedne točke faznog prostor u drugu uz uvjet konstantne energije. Vremenski prosjek  $\langle K \rangle$  općenito će ovisiti o tome na kojoj stazi faznog prostora se nalazi sustav. Međutim, ako svaka fazna putanja kroz dovoljno dugo vrijeme prođe kroz sve točke energetske hiperplohe među putanjama iščezavaju razlike. U tom slučaju staze se međusobno razlikuju samo u vremenu kada prolaze kroz pojedine točke, a s obzirom na uvjet da  $\tau \rightarrow \infty$  ta činjenica ne utječe na vremenski prosjek. U tom slučaju sve putanje su ekvivalentne, odnosno vremenska srednja vrijednost jednaka je statističkom prosjeku

$$\langle K \rangle = \bar{K}. \quad (21)$$

Jednadžba (21) predstavlja ergodsku hipotezu te prema njoj vremensku srednju vrijednost neke termodinamičke veličine možemo izjednačiti sa statističkom srednjom vrijednosti iste veličine samo ako reprezentativna stanja sustava prolaze kroz sve točke hiperplohe na kojoj je energija konstantna. U realnim procesima potpuno ergodski sustavi ne postoje. Realni sustavi se ponašaju kao kvaziergodski sustavi, a njihova reprezentativna stanja prolaze dovoljno blizu svakoj točki na energetskej hiperplohi.

### 3.3.3 Srednje vrijednosti mjerljivih svojstava elemenata

Za sustave koji se nalaze u termodinamičkoj ravnoteži s okolinom određujemo vjerojatnost prema jednadžbi (17). Na osnovu te raspodjele mogu se proračunati srednje vrijednosti različitih fizikalnih veličina. Stoga uzmemo li neku opću fizikalnu veličinu  $G$  koja ovisi o generaliziranim koordinatama i impulsima svih elemenata sustava možemo odrediti njenu srednju vrijednost

$$\bar{K} = \int K dW = \frac{\int K e^{-\frac{E}{\Theta}} d\Phi}{\int e^{-\frac{E}{\Theta}} d\Phi}. \quad (22)$$

Integral u nazivniku predstavlja particijsku funkciju sustava. Particijska funkcija omogućava izravno povezivanje termodinamičkih i statističkih veličina. Množeći integral iz nazivnika jednadžbe (23) s konstantom  $A$  slijedi izraz za particijsku funkciju

$$Z = A \int e^{-\frac{H}{\Theta}} d\Phi. \quad (23)$$

Kako bi povezali izraz za particijsku funkciju s drugim zakonom termodinamike, odnosno entropijom sustava u sustav moramo unijeti toplinu. Unosom topline u sustav mijenjamo njegovu unutarnju energiju pa sukladno prvom zakonu termodinamike i uvjetu iz jednadžbe (23) slijedi

$$TdS = dU + \sum_i R_i dr_i, \quad (24)$$

gdje suma označava rad koji izvrši opća sila  $R_i$  uslijed povećanja unutarnje energije. Slobodna energija sustava  $F$  jednaka je razlici unutarnje energije  $U$  i umnoška temperature sustava  $T$  i entropije  $S$

$$F = U - TS. \quad (25)$$

Iz jednadžbi (23) i (25) slijedi

$$F = -\Theta \log Z, \quad (26)$$

gdje je  $\Theta$  modul raspodjele,  $Z$  particijska funkcija sustava, a  $F$  slobodna energija koju sustav posjeduje. Temeljem dobivenih izraza određujemo ukupnu unutarnju energiju sustava

$$U = -\frac{\partial}{\partial \beta} \log Z. \quad (27)$$

## 4 Hipoteze, ciljevi i znanstveni doprinos rada

### 4.1 Hipoteze rada

Opća hipoteza ovog rada glasi:

**H0)** moguće je postaviti i potvrditi opću metodu za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava bespilotnih letjelica za prijenos tereta.

Vjerodostojno preslikavanje stvarnih kompleksnih načina prijenosa tereta moguće je izdvajanjem bitnih karakteristika elemenata sustava. Procjena robusnosti i sposobnosti sustava provodi se na modelu. Potvrđivanje opće hipoteze dovodi do zaključka da je model sustava primjenjiv na stvarne sustave. Navedena opća hipoteza dijeli se na sljedeće specifične hipoteze:

**H1)** moguće je postaviti simulacijski model sustava autonomnih agenata koji vjerno predstavlja grupu letjelica koja prenosi teret

**H2)** može se postaviti i validirati metoda za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava autonomnih agenata.

Potvrđivanje opće hipoteze ostvareno je potvrđivanjem pojedinih izdvojenih hipoteza. Simulacijski model je postavljen kroz tri razine modeliranja: konceptualno, preliminarno i detaljno modeliranje. Analitički i numerički su riješeni i opsežno analizirani izdvojeni specifični modeli prijenosa tereta. Podudaranje rješenja analitičkog i numeričkog modela omogućilo je potvrđivanje hipoteze H1.

Metoda za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava autonomnih agenata postavljena je od prvih principa. Postavljena metoda primijenjena je na numerički model postavljenog sustava bespilotnih letjelica koje prenose teret. Slaganje rješenja numeričkog modela i rješenja dobivenih primjenom opće metode omogućilo je potvrđivanje hipoteze H2.

### 4.2 Ciljevi i svrha rada

Opći cilj ovog rada je postaviti, razviti i validirati metodu za procjenu robusnosti i sposobnosti djelovanja sustava autonomnih agenata. Cilj istraživanja ostvaren je potvrđivanjem opće hipoteze.

Svrha rada je jedinstvenim modelom sustava omogućiti uvid u planiranje i iskoristivost primjene različitih načina zračnog transporta. Na taj način bi se omogućio napredniji, a ujedno učinkovitiji i bolji zračni prijevoz tereta.

Navedeni, opći cilj rada profilira se u 7 specifičnih ciljeva:

1. izdvojiti elemente sustava,
2. izdvojiti relacije između elemenata sustava,
3. postaviti korektan matematički model sustava,
4. izdvojiti analitički rješive probleme sustava,
5. provesti numeričke simulacije modela,
6. postaviti metodu procjene robusnosti i sposobnosti sustava i
7. usporediti rezultate numeričkih simulacija s rezultatima postavljene metode.

Temelj simulacijskog modela su, kritičkom analizom znanstvene i stručne literature, dosadašnjim preliminarnim istraživanjima i iskustvom na području istraživanja, izdvojene dinamičke karakteristike sustava autonomnih agenata. Te karakteristike su primijenjene za definiranje skupa minimalnog broja dinamičkih karakteristika sustava autonomnih agenata dovoljnih za jednoznačni opis dinamike pojedinog autonomnog agenta, relacija među autonomnim agentima unutar sustava i dinamike okoline parametrizirane složenosti.

U drugom dijelu istraživanja postavljena i validirana metoda za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava autonomnih agenata. Prvo su izdvojeni svi potrebni i dovoljni parametri za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava autonomnih agenata na temelju rezultata dinamike sustava postavljenog prethodnim razinama modeliranja. Uzimajući u obzir izdvojene parametre razmotren je veći broj kvalitativno različitih djelovanja sustava autonomnih agenata. Sukladno tome, analiziran je utjecaj parametara i njihova važnost na ostvarivanje djelovanja za sustave. Odnosno, postavljena je funkcionalna ovisnost rubnih uvjeta o tim parametrima. Nakon definiranih i izvrijednjenih specifičnosti parametara i ostvarenih djelovanja provedena je analiza dinamike sustava autonomnih agenata u cilju postavljanja opće metode za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava autonomnih agenata. Postavljena metoda omogućuje procjenu ostvarivosti dinamike sustava autonomnih agenata u ranoj fazi planiranja sustava.

### 4.3 Znanstveni doprinos

Očekivani znanstveni doprinos je:

Na temelju poznatih ili procijenjenih svojstava elemenata sustava moguće je postaviti i razumjeti metodu procjene robusnosti i sposobnosti sustava u ranim fazama planiranja prijenosa tereta sustavom letjelica.

Znanstveni doprinos je ostvaren ispunjenjem općeg cilja rada. Nekoliko dodatnih doprinosa ovog istraživanja je:

1. sistematiziranje minimalnog skupa parametara agenata,
2. precizno definiranje strukovnog nazivlja i
3. primjenjivost modela u kontekstu zračnog prijevoza tereta.

U ovoj disertaciji primijenjene su tri opće razine modeliranja na sustav bespilotnih letjelica za prijenos tereta. Primijenjena metodologija temelji se na metodi modeliranja pomoću agenata.

## 5 Konceptualno modeliranje

Polazište konceptualnog modeliranja je sustav agenata koji čine bespilotne letjelice i teret. U ovom dijelu modeliranja bit će postavljen specifični model sustava i izdvojene karakteristike okoline u kojoj sustav djeluje.

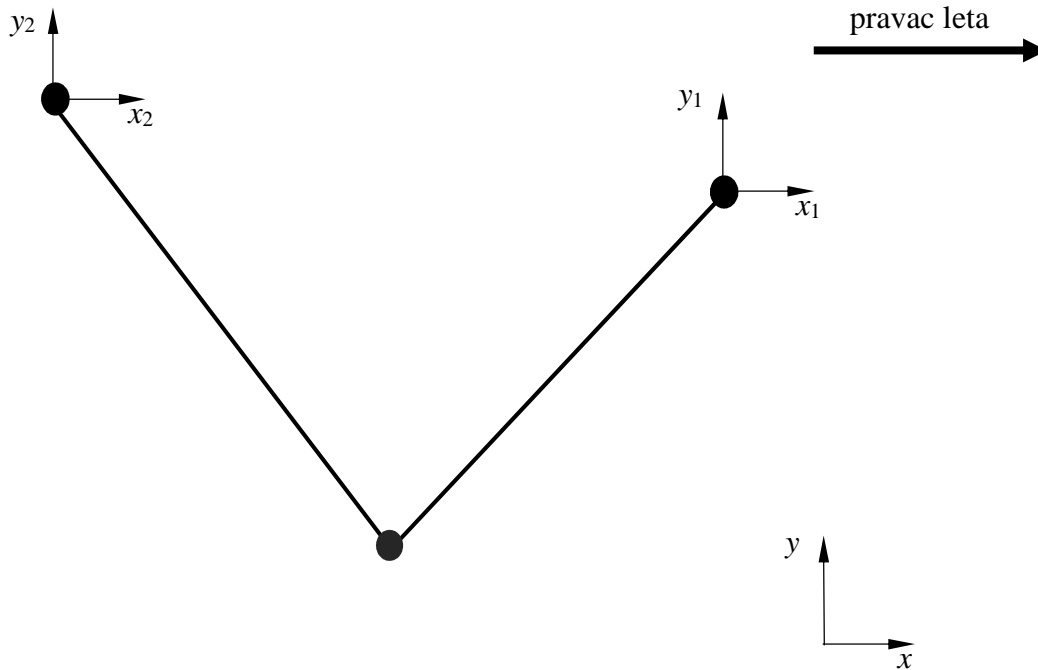
### 5.1 Broj letjelica

Specifični model sustava čine dvije bespilotne letjelice i teret. Svaka bespilotna letjelica ima svoj lokalni koordinatni sustav  $(x_1, y_1)$  i  $(x_2, y_2)$ . Budući da bespilotne letjelice djeluju kao sustav i vezane su s teretom, cijeli sustav djeluje u nekom globalnom koordinatnom sustavu  $x, y$  (slika 15).

Horizontalna os sustava je os  $x$ , a vertikalna os  $y$ . Usmjerenost osi  $z$  slijedi pravilo desne ruke te izlazi iz ravnine  $xy$  prema nama. Jednaka usmjerenost vrijedi za lokalne odnosno za globalni koordinatni sustav. Zbog pojednostavljenja problema u ovoj fazi istraživanja sustav će uvijek biti postavljen u ravnini  $xy$ . Pravac leta je u smjeru pozitivno usmjerene osi  $x$ .

Kako je ranije spomenuto let se sastoji od 3 faze. Sve navedene faze leta uključuju linearnu putanju sustava bespilotnih letjelica i tereta. Let se odvija po horizontalnoj putanji (engl. *level flight*). Polijetanje i slijetanje su definirani vertikalnim ili pravocrtno rastućim putanjama. U specifičnom modelu sustava faze polijetanja i slijetanja bit će postavljene odgovarajućim vrijednostima vertikalnih i horizontalnih komponenti brzine.

U specifičnom modelu sustava broj letjelica je konstantan. Zbog simetrije oko vertikalne osi  $y$  uzimamo da je postav letjelica također konstantan, a iz toga, sukladno slici 15, proizlazi da je gledano u pravcu leta letjelica 1 uvijek prednja letjelica.



Slika 15. Lokalni i globalni koordinatni sustav.

## 5.2 Pogon i napajanje letjelica

Pogon bespilotnih letjelica je ostvaren motorima s unutarnjim izgaranjem ili elektromotorima. Pripadno napajanje se ostvaruje tekućim gorivima, baterijama, solarnim panelima ili termikama. Jedan od razloga zašto su kvadrotori uzeti kao tip agenata za postavljenje modela sustava je njihov pogon.

Većina kvadrotora je pogonjena elektromotornim pogonom suhim baterijama. Ovaj tip letjelica je pogodan jer je pretpostavka da im se potrošnja energije raspoložive za pogon ne mijenja skokovito i možemo pretpostaviti da letjelice u svakom trenutku imaju jednaku masu odnosno težinu. Za letjelice pogonjene tekućim gorivima to ne vrijedi. U narednim istraživanjima biti će uključena i ova vrsta letjelica u razmatranje s ciljem postavljanja općeg modela konfiguracije sustava autonomnih agenata.

## 5.3 Svojstva okoline

Svojstva okoline su konstantna stoga se let odvija u atmosferi s konstantnom gustoćom i drugim termodinamičkim svojstvima. Specifični model sustava promatramo u područjima u kojima je



Iako ostvariv vizualni kontakt sa samim sustavom. Temeljem toga, predviđeni let se odvija u nižim slojevima atmosfere.

Većinu vremena promatrana atmosfera je statična, no do prekida statičnosti dolazi uslijed zapuha vjetra. Smjer zapuha je paralelan smjeru brzine leta. Smjer vjetra uzimamo implicitno u smislu da preciziramo geometriju nastalu ravnotežnim položajima bespilotnih letjelica i tereta tijekom leta. Realni letovi se izvode unutar segregiranih ili ne segregiranih zračnih prostora [61]. U specifičnom modelu sustava takvi aspekti leta su zanemareni i u daljnja istraživanja su uzete samo mehaničke i energetske promjene.

Također je pretpostavka da se sustav nalazi u ne urbanom prostoru pa su utjecaji lokalnih termika zanemareni, što u daljnjim istraživanjima svakako treba uzeti u razmatranje.

## 5.4 Načini upravljanja

Bespilotne letjelice mogu biti upravljane na 3 načina: direktno (ne autonomno), indirektno (polu-autonomno) i autonomno.

Direktni način upravljanja se ostvaruje izravno, pomoću niti žičanom (ili nekom drugom fizičkom vezom) vezom između bespilotne letjelice i pilota/operatora. Ovaj način upravljanja nije pogodan za transport tereta jer ograničava radijus kretanja bespilotne letjelice, ali je pogodan za elektrane.

Indirektni način upravljanja je ostvaren radiovezom. Ovim načinom upravljanja operater pomoću daljinskog upravljača (engl. *remote controller*) ostvaruje vezu i upravlja s bespilotnom letjelicom i na taj način ostvaruje gibanje. Ostvarena veza između letjelice i operatera je kontinuirana, odnosno komunikacija je neprekidna tijekom cijelog leta. Ovaj način upravljanja je ograničavajući zbog dosega veze.

Autonomni način upravljanja se ostvaruje bez ikakvog, žičanog ili bežičnog, kontakta s operaterom tijekom leta. Potpuno autonomni sustavi za sad nisu razvijeni nego govorimo o kvazi-autonomnom načinu upravljanja. Kod ovog načina upravljanja operater unaprijed odredi putanju letjelice. Ovaj način upravljanja je pogodan za letove na velikim udaljenostima i u ne karakteriziranim okolinama.

## 5.5 Opća svojstva tereta

Teret u općem smislu mogu biti ljudi, životinje ili proizvodi koji se prevoze nekim dijelom puta. Kako je već navedeno u poglavlju Osnove znanosti o sustavima (stranica 12) prijevoz tereta može biti ostvaren različitim vrstama vozila, odnosno agenata.

Na primjeru prijevoza tereta brodovima detaljnije će biti objašnjena podjela tereta po karakteristikama. Opća podjela tereta je na homogene (istovrsne) i heterogene (raznovrsne) terete. Uzimajući tu podjelu u obzir terete dijelimo na suhi teret; tekući teret i opasni teret.

U suhi teret ubrajamo opći; rasuti; glomazni i osjetljivi. U skupini općih tereta ubrojani su tereti koji se pakiraju u kutije; vreće; sanduke; bačve; bale; ali mogu biti i automobili te strojevi i alati. Rasuti teret je nepakirani homogeni teret koji se prevozi u rasutom stanju, a može biti više ili manje usitnjen, čak i u gromadama. U rasuti teret ubrajamo ugljen; žitarice; sol; šećer; rudače; pijesak; šljunak i ostale slične materijale. Glomazni teret je vrsta tereta koja se zbog njegovih gabarita prevozi posebno ojačanim brodovima. U glomazne terete ubrajamo velika vozila (oklopna vozila i ostali radni strojevi); dijelove konstrukcija (npr. mostovi) i ostalo. Osjetljivi teret su tereti koji se zbog svojih prirodnih svojstava trebaju prevoziti u posebno prilagođenim mikroklimatskim uvjetima.

Tekući tereti su tereti koji se prevoze u tankovima i posebnim spremnicima kako ne bi došlo do njihovog izlivanja. Posebna pažnja se posvećuje konstrukciji takvih spremnika budući da u tekuće terete ubrajamo sirovu naftu; teško ulje; benzin; plinsko ulje; kerozin; benzol; biljna ulja; prehrambene tekućine i vodu. U posebnu kategoriju prijevoza tekućih tereta se ubrajaju i sredstva za gašenje požara, ali kod njih uvjet očuvanja prevezene mase ne smije biti zadovoljen.

Opasni teret je kategorija tereta koja postavlja visoke uvjete na sigurnost prijevoza zbog svojih svojstava (eksplozivnost, otrovnost, zapaljivost, korozivnost, oksidativnost i sl.) mogu ugroziti zdravlje ili život ljudi, prouzročiti materijalnu štetu ili ugroziti i oštetiti okoliš. Zbog svojih svojstava ova vrsta tereta je strogo zakonom klasificirana u 9 klasa i to: **klasa 1** – eksplozivi; **klasa 2** – plinovi; **klasa 3** – zapaljive tekućine; **klasa 4** – zapaljive krutine, tvari podložne samozapaljenju, tvari koje u kontaktu s vodom tvore zapaljive plinove; **klasa 5** – oksidirajuće tvari i organski peroksidi; **klasa 6** – otrovne i zarazne tvari; **klasa 7** – radioaktivne tvari; **klasa 8** – korozivne tvari i **klasa 9** – razne tvari za koje je iskustvo pokazalo da mogu biti opasne. Svaka od navedenih klasa dijeli se u još nekoliko kategorija, ali zbog njihove opsežnosti nisu detaljnije razmatrane.

Ključnu ulogu u prijevozu tereta ostvaruje i stanje površne samog tereta. U slučajevima kad je površina ne obrađena, odnosno hrapava dolazi do povećanja koeficijenta otpora a ujedno i do povećanja potrošnje energije kojom sustav raspolaže kako bi savladao dodatni otpor.

U prijevozi tereta letjelicama, a taj slučaj je i razmatran ovom disertacijom, značajnu ulogu na koeficijent otpora ostvaruje i orijentacija tereta u globalnom koordinatnom sustavu. Npr. prilikom prijevoza ploče debljine zanemarive u odnosu na ostale dimenzije ključno je da li je ploča okrenuta tako da je veća ili manja površina usmjerena u pravcu leta. U slučaju da je veća površina usmjerena u pravcu leta generira se viša sila otpora koju sustav treba svladati, odnosno sustav troši više energije za svladavanje otpora nego u slučaju da je ploča okrenuta na način da je manja površina usmjerena u pravcu leta.

Važnost položaja težišta tereta u odnosu na veze kojima je teret uključen u sustav očituje se u stabilnosti sustava zbog mogućnosti zanošenja tereta uslijed zapuha vjetra. Ovo je ključan parametar prilikom prijenosa rasutih i opasnih tereta kako ne bi došlo do gubitaka na masi samog tereta, ali i u slučaju prijenosa ozlijeđenih osoba ili životinja kako ne bi došlo do dodatnih ozljeda.

Uzimajući u obzir raznolikost tereta koji se prevoze dolazimo do zaključka da prilikom odabira tereta za daljnju analizu sustava treba razmotriti nekoliko ključnih svojstava koja utječu na sustav s cjelini a to su: masa tereta; dimenzije tereta; svojstva površine; orijentacija tereta u globalnom koordinatnom sustavu te položaj težišta tereta u odnosu na veze kojima je teret uključen u sustav.

## 5.6 Vrsta veza

Za promatrani sustav dvije bespilotne letjelice i tereta veze se dijele na

- vezu između bespilotne letjelice i tereta,
- vezu između 2 bespilotnih letjelica i
- vezu između bespilotne letjelice i okoline.

Prema ranije navedenom pristupu znanosti o sustavima (poglavlje 2) veze imaju maseni, energetski i informacijski aspekt. Generalno gledano tok informacije nije ostvariv ako ujedno ne dođe do toka energije ili mase. Iz toga slijedi da je prijenos energije ili mase nužan ali ne dovoljan uvjet za prijenos informacije. S obzirom na trajnost svi aspekti mogu biti kontinuirani

ili impulsni. Maseni aspekt se ostvaruje kontinuirano. Energetski i informacijski aspekti mogu biti ostvareni na oba načina.

Veza između pojedine bespilotne letjelice i tereta ostvaruje se sa sva 3 aspekta. Tok mase očituje se u fizičkoj vezi između pojedine letjelice i tereta. Ta veza može biti ostvarena nitima, konopcima, polugama, sajlama, štapovima i dr. Za bespilotnu letjelicu kao i za teret pojedina veza može biti pričvršćena pomičnim osloncem, krutim osloncem, okretnim zglobovima ili klizačem. Utjecaj koji pojedina veza ostvaruje je statički ili dinamički. Statički utjecaj se očituje kroz masu i oblik. Sam utjecaj oblika veze vidljiv je kroz realizirani aerodinamički otpor. Dinamički utjecaj se ostvaruje kroz reakcije uslijed vibracija pojedine veze. Osim navedenih utjecaja značajnu ulogu nose i utjecajni parametri kao što su istezljivost, krutost veze, konstantna ili promjenjiva duljina, hrapavost površine te smetnje koje mogu prouzročiti metalni dijelovi pojedine veze. Tok informacije između pojedine bespilotne letjelice i tereta očituje se u prijenosu informacijskih paketa koje teret šalje letjelici uslijed očitavanja u okolini i obrnuto. Ovaj tok može biti periodički ostvaren ako je teret opremljen potrebnim sensorima, ali u pojedinim slučajevima ga uopće ni nema.

Veza između bespilotnih letjelica ostvarena je tokovima energije i informacije. Tok energije očituje se tokom strujanja zraka uslijed vrtnje pojedinog propelera. Ovaj tok je nepovoljan za samu konfiguraciju odnosno prostorni raspored bespilotnih letjelica jedne u odnosu na drugu. U daljnjim razmatranjima ovaj utjecaj će imati značajnu ulogu u ograničavanju prostornog djelovanja sustava. Tok informacija između bespilotnih letjelica ostvaruje se kontinuiranim informacijskim vezama ili ne kontinuiranim informacijskim vezama odnosno informacijskim paketima. Da li će ostvareni tok biti kontinuiran ili ne ovisi o tehničkim karakteristikama pojedine letjelice, ali i o vrsti postavljenog zadatka prijenosa tereta koji sustav mora izvršiti.

Veza između bespilotnih letjelica i okolina ostvarena je tokom energije i informacije. Tok energije očituje se u izvršenom radu koji pojedina bespilotna letjelica ostvaruje uslijed savladavanja utjecaja parametara okoline. Najznačajniji utjecaji je utjecaj koji nastaje uslijed prekida statičnosti atmosfere zbog zapuha vjetrova. U tim slučajevima bespilotne letjelice moraju ostvariti dodatni potisak zbog savladavanja nastalih promjena. Posljedica toga je veća potrošnja energije, odnosno smanjenje zalihosti energije a ujedno i skraćenje vremena trajanja leta. Tok informacija se ostvaruje kontinuiranom informacijskom vezom uslijed očitavanja atmosfere koja pojedina bespilotna letjelica mjeri tokom cijelog vremena trajanja leta. Osim očitavanja atmosfere kontinuirana veza može biti i između letjelice i operatera koji upravlja letjelicom. Ne kontinuirana informacijska veza ostvaruje se povremenim očitavanjima stanja okoline ili

povremenom komunikacijom s operaterom. Da li će ostvareni tok biti kontinuiran ili ne ovisi o sensorima koji su postavljeni na pojedinu bespilotnu letjelicu, ali i o vrsti postavljenog zadatka prijenosa tereta koji sustav mora izvršiti.

## 6 Preliminarno modeliranje

Polazište preliminarnog modeliranja je specifični model sustava dvije autonomne bespilotne letjelice i konopcima pričvršćeni teret. Sustav djeluje u okolini konstantnih karakteristika. U ovom dijelu modeliranja precizirat ćemo mjerljiva svojstva letjelica, svojstva veza kojima su teret i letjelice pričvršćene kao i mjerljiva svojstva tereta.

### 6.1 Svojstva tereta

Uzimajući sva svojstva koja teret može imati opisana u poglavlju Opća svojstva tereta odlučeno je da će promatrani teret imati slijedeće karakteristike opisane ovim poglavljem.

Promatrani teret je zanemarivih dimenzija mase  $m_0$ . Zanemarivanje dimenzija je omogućeno kroz neizravnu vezu dimenzija i faktora otpora  $c$ . Svi detalji oblika tereta uključeni su u raspone sile otpora  $R$ . Stanje površine uzimamo da je potpuno glatko. Teret je za letjelice vezan konopcima koji su vezani u centru mase tereta. Iz tog razloga zakretni momenti su jednaki nuli.

### 6.2 Svojstva veze između bespilotne letjelice i tereta

Budući da želimo održati vezu između tereta i letjelica konstantnu analizom dostupnih vrsta i načina spajanja zaključeno je da ta veza treba biti ostvarena konopcima. Kako bi se izbjegao dodatni faktor utjecaja otpora na sustav pretpostavka je da su konopci zanemarive mase i otpora. Zbog određivanja utjecaja broja potrebnih bespilotnih letjelica u sustavu postavljena je pretpostavka da letjelice u svakom trenutku moraju nositi dio tereta, a to je jedino ostvarivo ako su konopci kojima je teret pričvršćen za letjelicu stalno napeti.

Pričvršćenje tereta može biti izvedeno na kopnu dok bespilotna letjelica i teret miruju ili bespilotna letjelica u lebdenju hvata teret manipulatorima [62]. Zbog cjelovitosti istraživanja proučeni su svi navedeni načini pričvršćivanja tereta, ali u radu nisu detaljno razmatrani. Razmatrana pretpostavka je da je teret već pričvršćen za letjelice.

### 6.3 Svojstva letjelica

Mjerljiva svojstva bespilotnih letjelica su masa  $m$ , ostvareni potisak  $T$ , aerodinamička sila otpora  $R$ , površina opstrujavanja  $A$ , koeficijent opterećenja  $\Gamma$  te realizirana snaga  $P$ .

U analizi sustava uzeto je da su bespilotne letjelice identičnih masa ( $m_1 = m_2$ ) cijelo vrijeme leta. Konstrukcijski gledano letjelice su u potpunosti identične što znači da su im i snage motora jednake. Također gledano iz aspekta konstrukcije letjelice pogodno je da su letjelice identične jer je sustav održavanja pojednostavljen. Osim sustava održavanja značajnu ulogu ima i potreba da letjelice tokom leta čim lakše postignu potrebnu konfiguraciju ne ovisno o tome da li ju je potrebno samo održavati ili postići uslijed vanjskih utjecaja iz okoline (npr. zapuh vjetara).

Iako postoji niz različitih konstrukcijskih rješenja bespilotnih letjelica pogonjenih s četiri rotora i opterećenja u vezi s njihovim oblicima. U svim slučajevima njihovi koeficijenti otpora ulaze u model u cijelosti pomoću aerodinamičnih sila otpora  $R$ . Dakle, u daljnjem razmatranju ne analiziramo izričito koeficijente otpora. Umjesto toga različita konstrukcijska rješenja bespilotnih letjelica i njihova pripadna opterećenja obuhvaćamo općim iznosom aerodinamičke sile otpora.

Ukupni potisak ostvaren po pojedinoj bespilotnoj letjelici,  $T$ , u slučaju bespilotnih letjelica pogonjenih s više rotora ( $n$ ) je kombinacija potisaka ostvarenih po pojedinom rotoru  $T_r$

$$T = nT_r. \quad (28)$$

U slučaju gdje su rotori u potpunosti identični ukupnu realiziranu snagu bespilotne letjelice,  $P$ , možemo dobiti preko  $n$  rotora koristeći slijedeći izraz

$$P = nP_r, \quad (29)$$

gdje je  $P_r$  snaga realizirana na pojedinom rotoru. U (29) uzimamo da su rotori jednakih tehničkih karakteristika i zanemarujemo posljedice smetnji uslijed opstrujavanja pojedinog rotora. Rotacija bespilotnih letjelica oko horizontalne osi je zanemarena. Snaga na pojedinom rotoru ovisna je o potisku pojedinog rotora  $T_r$ , a povezane su slijedećim izrazom

$$P_r = \sqrt{\frac{T_r^3}{2\rho A_r}}, \quad (30)$$

gdje  $A_r$  označava područje koje pokriva jedan rotor.

Kombiniranjem jednadžbi (28) i (30) slijedi izraz za ukupne snage za svaku pojedinu bespilotnu letjelicu

$$P_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{2\rho A}} \cdot T_{1,2}^{3/2}. \quad (31)$$

Površina opstrujavanja svih rotora pojedine bespilotne letjelice je

$$A = nA_r. \quad (32)$$

Ukupna trenutna snaga koju generiraju obje bespilotne letjelice istovremeno je

$$P = P_1 + P_2 = \sqrt{\frac{1}{2\rho A}} \cdot \left( T_1^{\frac{3}{2}} + T_2^{\frac{3}{2}} \right), \quad (33)$$

gdje je iznos snage za bespilotnu letjelicu jedan  $P_1$ , odnosno iznos snage za bespilotnu letjelicu dva  $P_2$ .

Ukupna potrošena energija sustava  $E$  pri konstantnom iznosu snaga generiranih na pojedinoj bespilotnoj letjelici za maksimalnu udaljenost prijeđenog puta  $D$  iznosi

$$E = D \frac{P}{v} \quad (34)$$

Od posebne važnosti je minimalna potrošena energija  $E_{min}$  u iznosu

$$E_{min} \approx \min \frac{P}{v}. \quad (35)$$

U ovom slučaju je uvedena pretpostavka da je minimalna potrošena energija  $E_{min}$  proporcionalna maksimalnoj udaljenosti prijeđenog puta  $D$ .

Općenito gledano, mijenjanjem tehničkih karakteristika pojedine bespilotne letjelice na način da im zamijenimo baterije možemo utjecati na promjenu mase pojedine bespilotne letjelice. Nadalje pretpostavljamo da fiksna baterija može bespilotnoj letjelici osigurati dovoljnu energiju unutar raspona potrebnih energija kako bi bespilotna letjelica u konačnici ostvarila postavljeni cilj. Stoga isključujemo mogućnost promjenjivih masa pojedine bespilotne letjelice za različite moguće geometrije i pripadne energije.

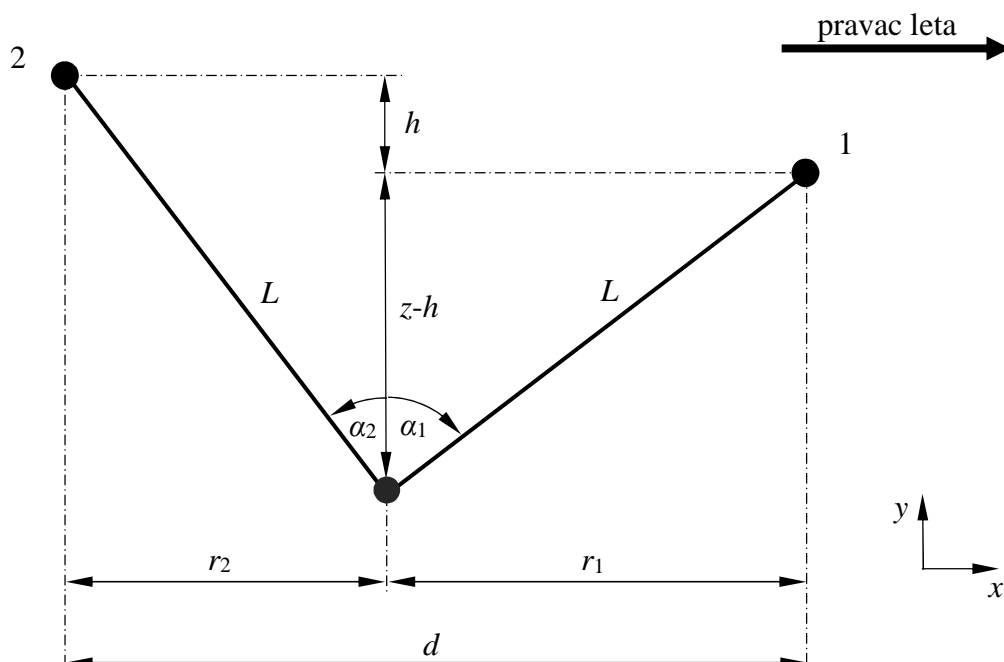
Umjesto eksplicitnog iznosa brzine  $v$  u proračun je uzet iznos  $\sqrt{R_x}$  uz dodatnu pretpostavku da se aerodinamički koeficijenti otpora (33-35) značajno ne mijenjaju. Sukladno tome, promjena iznosa aerodinamičkog koeficijenta otpora  $R_x$  uključuje promjenu nastalu uslijed promjene geometrije te promjenu ukupne brzine pri horizontalnom letu.



## 7 Detaljno modeliranje

Polazište detaljnog modeliranja je specifični model sustava kojeg čine dvije bespilotne letjelice (kvadrotori), teret, veze između tereta i letjelica i okolina. Bespilotne letjelice obavljaju rad prijevoza tereta po pravocrtnoj putanji.

U promatranoj konfiguraciji teret je za bespilotne letjelice pričvršćen nerastezljivim konopcima stoga je udaljenost između pojedine bespilotne letjelice i tereta fiksna. Svaka od bespilotnih letjelica s teretom je povezana jednim konopcem duljine  $L$  i zanemarive mase. Za pojedino tijelo (bespilotna letjelica ili teret) konopac je pričvršćen u centru mase tijela.

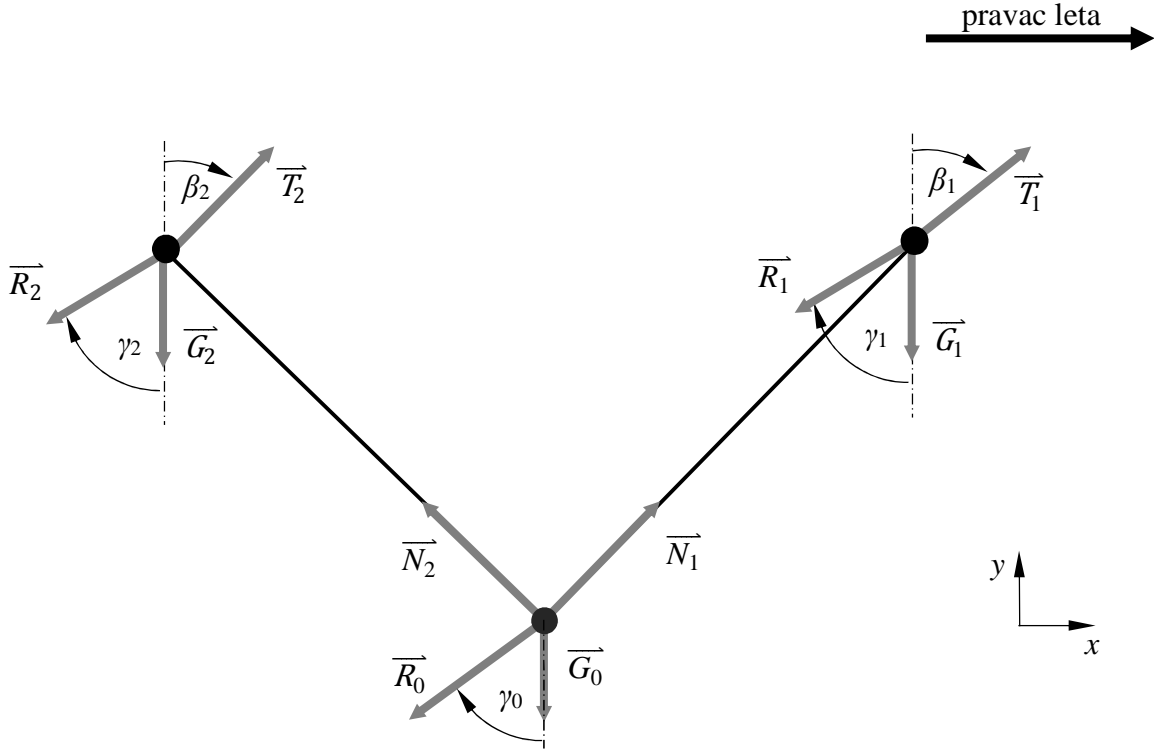


Slika 16. Geometrijska ovisnost komponenti sustava dvije bespilotne letjelice i tereta u globalnom koordinatnom sustavu.

Kao što je vidljivo iz slike 16 kutovi koje konopci zatvaraju s vertikalnom osi definirani su kao kutovi  $\alpha_1$  za letjelicu 1 i  $\alpha_2$  za letjelicu 2. Pozitivan smjer kuta  $\alpha_1$  je u pravcu pretpostavljenog leta, odnosno gledano za kut  $\alpha_2$  pozitivan smjer je suprotno od pravca leta. Visinska razlika između letjelica definirana je kao  $h$ , a horizontalna udaljenost definirana je sa  $d$ . Udaljenost između letjelice 2 i tereta definirana je kao  $z$ .

Razmatrajući autonomne letjelice pripadne sile koje se javljaju su težine  $G_{1,2}$ , sile otpora  $R_{1,2}$  s pripadnim kutom otklona od vertikalne osi  $\gamma_{1,2}$ , te potisci za pojedinu letjelicu  $T_{1,2}$  s pripadnim

kutom odklona od vertikalne osi  $\beta_{1,2}$ . Za teret su također definirane sile reakcije. Pripadne sile na teretu su težina  $G_0$  i sila otpora  $R_0$  s pripadnim kutom odklona od vertikalne osi  $\gamma_0$ . Pozitivna usmjerenost kutova  $\gamma_{0,1,2}$  je suprotno od pravca leta gledano u odnosu na vertikalnu os. Sile reakcija u konopcima definirane su kao  $N_1$  za konopac između letjelice 1 i tereta, odnosno  $N_2$  za konopac između letjelice 2 i tereta (slika 17).



Slika 17. Sile reakcije na komponente sustava dvije bespilotne letjelice koje prenose teret u globalnom koordinatnom sustavu.

Za postavljenu konfiguraciju sustava dvije bespilotne letjelice i teret postavljene su jednadžbe za stacionarno stanje leta

$$T_1 \sin \beta_1 - R_{1x} = N_1 \sin \alpha_1 \quad (36)$$

$$T_1 \cos \beta_1 - R_{1y} = N_1 \cos \alpha_1 + m_1 g, \quad (37)$$

$$T_2 \sin \beta_2 - R_{2x} = -N_2 \sin \alpha_2, \quad (38)$$

$$T_2 \cos \beta_2 - R_{2y} = N_2 \cos \alpha_2 + m_2 g, \quad (39)$$

$$N_1 \sin \alpha_1 = N_2 \sin \alpha_2 + R_{0x}, \quad (40)$$

$$N_1 \cos \alpha_1 + N_2 \cos \alpha_2 = m_0 g + R_{0y}, \quad (41)$$

$$R_{0x} = \frac{\rho}{2} v_x^2 c_{0x} S_{0x}, \quad R_{0y} = \frac{\rho}{2} v_y^2 c_{0y} S_{0y}, \quad (42)$$

$$R_{1x} = \frac{\rho}{2} v_x^2 c(\beta) S_1, \quad R_{1y} = \frac{\rho}{2} v_y^2 c(\beta) S_1, \quad (43)$$

$$R_{2x} = \frac{\rho}{2} v_x^2 c(\beta) S_2, \quad R_{2y} = \frac{\rho}{2} v_y^2 c(\beta) S_2. \quad (44)$$

Uzimajući u obzir u preliminarnom modeliranju postavljenu pretpostavku da u svakom trenutku leta pojedina letjelica mora nositi dio tereta prilikom rješavanja postavljenih jednadžbi razmatrani su samo slučajevi u kojima su obje letjelice opterećene, odnosno napetost u konopcima je pozitivna, a pripadni kutovi  $\alpha_{1,2}$  su također pozitivni

$$N_{1,2} > 0; \quad \alpha_{1,2} > 0. \quad (45)$$

Ukupnu silu reakcije sustava dvije bespilotne letjelice i tereta označavamo sa  $\Gamma$

$$\Gamma = \sqrt{\Gamma_x^2 + \Gamma_y^2}, \quad (46)$$

pri čemu su pripadne projekcije za pojedinu os iznosa

$$\Gamma_x = R_{0x} + R_{1x} + R_{2x}, \quad (47)$$

i

$$\Gamma_y = R_{0y} + R_{1y} + R_{2y} + (m_0 + m_1 + m_2)g. \quad (48)$$

Za ovako postavljeni model sustava dvije bespilotne letjelice i teret vidimo da u bilo kojoj kombinaciji parametara imamo dva slobodna parametra. Postavljanjem tih parametara ostvarujemo upravljanje sustavom. Iz kombinacije tih slobodnih parametara analizirano je pet različitih načina upravljanja:

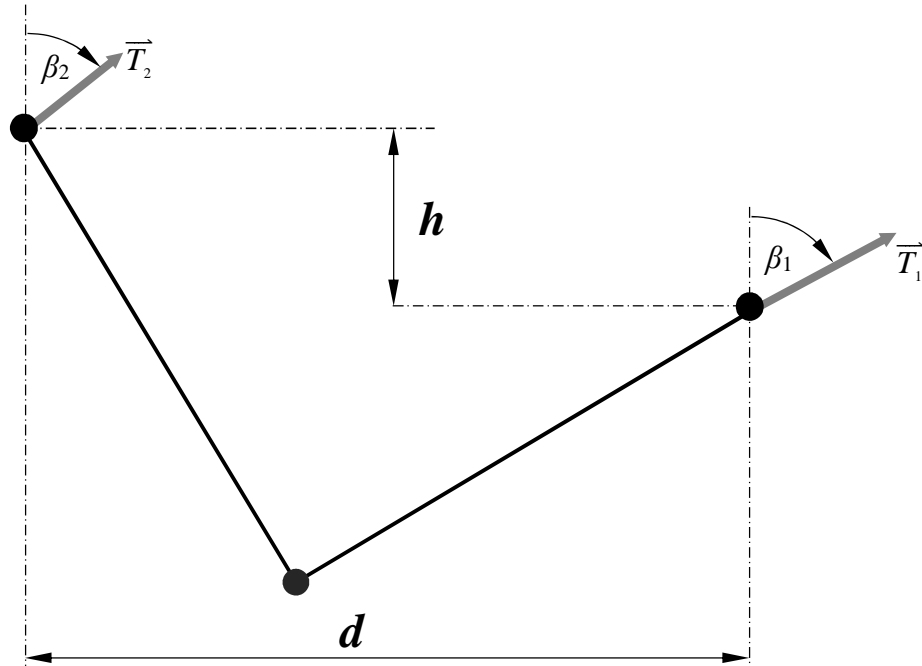
- upravljanje konfiguracijom,
- upravljanje iznosima potisaka,
- upravljanje kutovima otklona potisaka,
- upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 1 i
- upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 2.

Pojedini način upravljanja je predstavljen i analitički riješen u slijedećim poglavljima.

## 7.1 Upravljanje konfiguracijom

Ovaj način upravljanja ostvaruje se preko geometrijske ovisnosti položaja između bespilotnih letjelica. Horizontalna udaljenost između letjelica  $d$  i visinska razlika između bespilotnih

letjelica  $h$  u potpunosti su definirane. Na slici 18 masnim slovima su označene veličine upravljanja.



Slika 18. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja konfiguracijom ( $d$  i  $h$ ).

Iz ovisnosti položaja između bespilotnih letjelica određujemo položaj pojedine bespilotne letjelice u odnosu na teret  $z_{1,2}$  i  $r_{1,2}$ . Za letjelicu 1 ti odnosi su

$$z_1 = \frac{1}{2} \left[ -h + d \sqrt{\frac{4l^2 - h^2 - d^2}{h^2 + d^2}} \right], \quad (49)$$

$$r_1 = \frac{1}{2} \left[ d + h \sqrt{\frac{4l^2 - h^2 - d^2}{h^2 + d^2}} \right], \quad (50)$$

odnosno za letjelicu 2

$$z_2 = \frac{1}{2} \left[ h + d \sqrt{\frac{4l^2 - h^2 - d^2}{h^2 + d^2}} \right], \quad (51)$$

$$r_2 = \frac{1}{2} \left[ d - h \sqrt{\frac{4l^2 - h^2 - d^2}{h^2 + d^2}} \right]. \quad (52)$$

Pripadni kut otklona konopca, kojim je teret pričvršćen za bespilotnu letjelicu 1, od vertikalne osi je

$$\alpha_1 = \arccos \left\{ \frac{1}{2L} \left[ -h + d \sqrt{\frac{4L^2 - h^2 - d^2}{h^2 + d^2}} \right] \right\}, \quad (53)$$

a za odklon konopca vezan uz letjelicu 2

$$\alpha_2 = \arccos \left\{ \frac{1}{2L} \left[ h + d \sqrt{\frac{4L^2 - h^2 - d^2}{h^2 + d^2}} \right] \right\}. \quad (54)$$

Rješavanjem sustava jednadžbi (36-41) uz primjenu uvjeta (42-54) slijede izrazi za iznos i smjer pripadnih potisaka  $T_{1,2}$

$$T_1 = \frac{R_{1x} \cos \alpha_1 - (R_{1y} + m_1 g) \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \beta_1)}, \quad (55)$$

$$T_2 = \frac{(R_{2y} + m_2 g) \sin \alpha_2 + R_{2x} \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)}. \quad (56)$$

Pripadni kutovi odklona vektora potiska od vertikalne osi  $\beta_{1,2}$  su

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{R_{1x} + \sin \alpha_1 \frac{(m_0 g + R_{0y}) \sin \alpha_2 + R_{0x} \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}}{R_{1y} + m_1 g + \cos \alpha_1 \frac{(m_0 g + R_{0y}) \sin \alpha_2 + R_{0x} \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}}, \quad (57)$$

$$\operatorname{tg} \beta_2 = \frac{R_{2x} - \sin \alpha_2 \frac{(m_0 g + R_{0y}) \sin \alpha_1 - R_{0x} \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}}{R_{2y} + m_2 g + \cos \alpha_2 \frac{(m_0 g + R_{0y}) \sin \alpha_1 - R_{0x} \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}}. \quad (58)$$

Reakcije u konopcima  $N_{1,2}$  možemo odrediti iz smjera pojedine bespilotne letjelice prema teretu i iz smjera tereta prema pojedinoj bespilotnoj letjelici. Izrazi za pojedini slučaj su kako slijedi: reakcija konopca iz smjera bespilotne letjelice 1 prema teretu

$$N_1 = \frac{-R_{1x} \cos \beta_1 + (R_{1y} + m_1 g) \sin \beta_1}{\sin(\alpha_1 - \beta_1)}, \quad (59)$$

odnosno reakcija konopca iz smjera bespilotne letjelice 2 prema teretu

$$N_2 = -\frac{(R_{2y} + m_2 g) \sin \beta_2 - R_{2x} \cos \beta_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)}, \quad (60)$$

reakcija konopca iz smjera tereta prema bespilotnoj letjelici 1

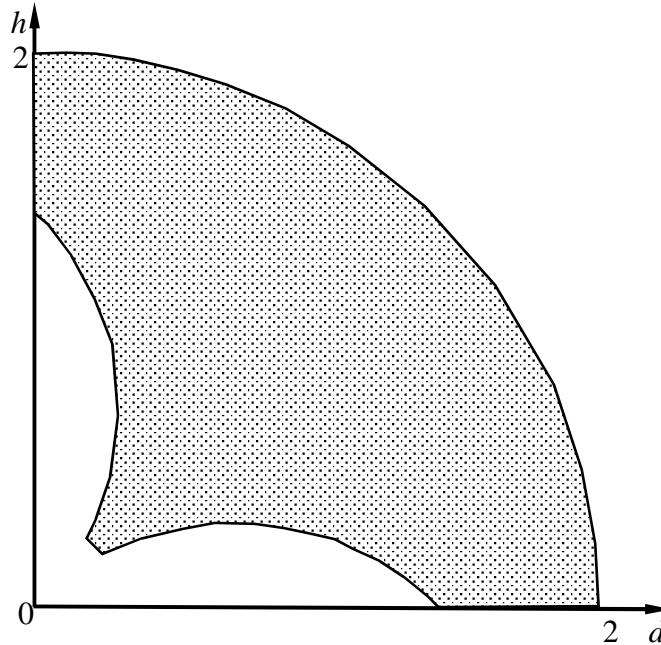
$$N_1 = \frac{(Mg + R_{0y}) \sin \alpha_2 + R_{0x} \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}, \quad (61)$$

odnosno reakcija konopca iz smjera tereta prema bespilotnoj letjelici 2

$$N_2 = \frac{(Mg + R_{0y}) \sin \alpha_1 - R_{0x} \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (62)$$

Slika 19 prikazuje dozvoljeno područje djelovanja uslijed ovog načina upravljanja. Značajan utjecaj na dozvoljeno područje ima energetska veza između bespilotnih letjelica. Kako je ranije navedeno ona nepovoljno utječe na samu konfiguraciju stoga je taj dio prostora izuzet iz razmatranja. U poglavlju o svojstvima veze navedena je pretpostavka da obje letjelice cijelo

vrijeme trajanja leta nose teret odnosno konopac kojim je pojedina bespilotna letjelica vezana za teret mora biti stalno napet. Napetost konopca očituje se u pozitivnom iznosu sile  $N_{1,2}$ . Ovo je također jedan od parametara koje konfiguracija mora zadovoljiti, stoga su područja u kojima obje letjelice ne nose teret odnosno sile  $N_{1,2}$  nisu pozitivnog iznosa su isključena iz daljnjeg razmatranja.



Slika 19. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja konfiguracijom ( $d$  i  $h$ ).

Promjenom karakteristika letjelica ili tereta dozvoljeno područje se povećava ili smanjuje sukladno postavljenim uvjetima.

U ovisnosti o karakteristikama letjelica i tereta te geometrijskoj ovisnosti  $d$  i  $h$  prema jednadžbama (33-34) određeni su iznosi snage i energije sustava. Ukupna trenutna snaga koju generiraju obje bespilotne letjelice istovremeno je

$$P(m_0, m_1, m_2, v, d, h) = P_1 + P_2 = \sqrt{\frac{1}{2\rho A}} \cdot \left( T_1^{\frac{3}{2}} + T_2^{\frac{3}{2}} \right), \quad (63)$$

Jednadžba (63) eksplicitno povezuje iznos ukupne snage s ostalim veličinama. Za različite iznose horizontalne udaljenosti  $d$  i vertikalne udaljenosti  $h$  među bespilotnim letjelicama od posebne su važnosti koeficijenti  $d_P$  i  $h_P$  za koje je minimalan iznos snage  $P_{\min}$  iznosi

$$P_{\min}(m_0, m_1, m_2, v) = P(m_0, m_1, m_2, v, d_P, h_P) = \min_{d,h} P(m_0, m_1, m_2, v, d, h). \quad (64)$$

Ukupna potrošena energija sustava  $E$  pri konstantnom iznosu snaga generiranih na pojedinoj bespilotnoj letjelici za maksimalnu udaljenost prijeđenog puta  $D$  iznosi

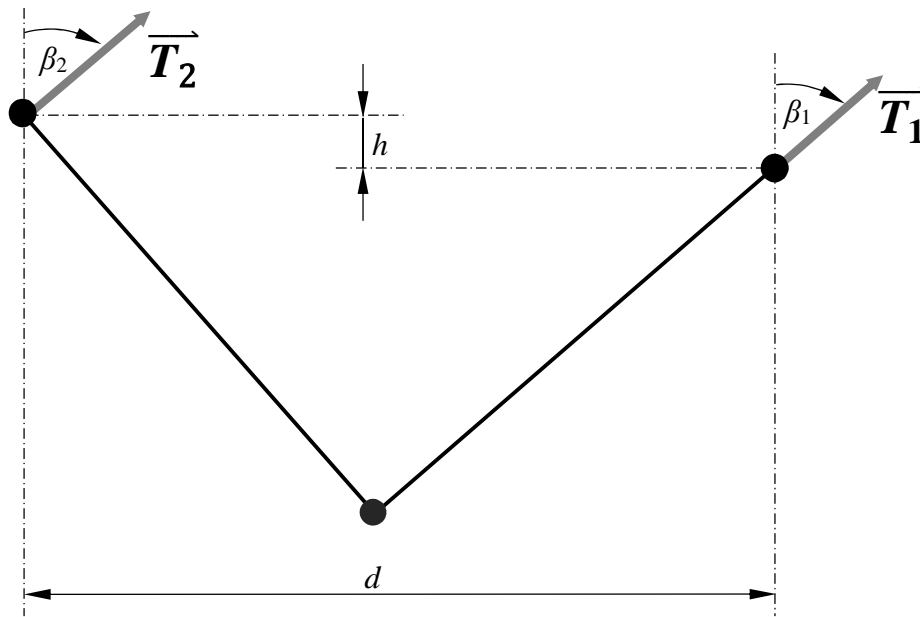
$$E(m_0, m_1, m_2, v, d, h) = D \frac{P(m_0, m_1, m_2, v, d, h)}{v} \quad (65)$$

Za različite geometrije postižu se različiti iznosi potrošene energije. Od posebne važnosti je minimalna potrošena energija  $E_{\min}$  postignuta za određenu fiksiranu horizontalnu udaljenost među bespilotnim letjelicama  $d_E$  i fiksiranu vertikalnu udaljenost među bespilotnim letjelicama  $h_E$  u iznosu

$$E_{\min} = E(m_0, m_1, m_2, v_E, d_E, h_E) \approx \min_{v, d, h} \frac{P(m_0, m_1, m_2, v, d, h)}{v}. \quad (66)$$

## 7.2 Upravljanje iznosima potisaka

Ovaj način upravljanja ostvaruje se promjenama iznosa potisaka  $T_{1,2}$ . Na slici 20 masnim slovima su označene veličine upravljanja.



Slika 20. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja iznosima potisaka ( $T_1$  i  $T_2$ ).

Temeljem iznosa potiska analitički su određeni ostali parametri sustava, odnosno sile reakcije ( $N_{1,2}$ ) i postavka geometrije ( $\beta_{1,2}$ ;  $\alpha_{1,2}$ ;  $d$  i  $h$ ).

Rješavanjem sustava jednačbi (36-41) uz primjenu uvjeta (42-54) određeni su izrazi za kutove otklona vektora potiska  $T_{1,2}$  od vertikalne osi. Za bespilotnu letjelicu 1 kut  $\beta_1$  je

$$\beta_1 = \arcsin \frac{\Gamma^2 + T_1^2 - T_2^2}{2 T_1 \Gamma} - \psi, \quad (67)$$

odnosno za letjelicu 2 kut  $\beta_2$  je

$$\beta_2 = \arcsin \frac{\Gamma^2 + T_2^2 - T_1^2}{2 T_2 \Gamma} - \psi, \quad (68)$$

gdje je  $\psi = \arctg \frac{\Gamma_y}{\Gamma_x}$ , odnosno kut odklona ukupnog otpora sustava  $\Gamma$ .

Prema slici 20 vidljivo je da postoji geometrijsko ograničenje sustava za vertikalnu udaljenost  $h$  i horizontalnu udaljenost  $d$  između bespilotnih letjelica te njihov pojedinačni maksimalni iznos ne može biti veći od  $2L$ .

Uz pretpostavku da bi zadatak trebale obaviti minimalno dvije bespilotne letjelice Uzimajući to u obzir postavljena su ograničenja područja djelovanja pojedine bespilotne letjelice preko ovisnosti potisaka  $T_{1,2}$  i koeficijenta ukupnog otpora sustava dvije bespilotne letjelice i tereta  $\Gamma$ . Postavljeni uvjet ograničenja djelovanja za bespilotnu letjelicu jedna je

$$|T_1^2 - T_2^2 + \Gamma^2| < 2 \Gamma T_1, \quad (69)$$

odnosno za bespilotnu letjelicu dva

$$|T_2^2 - T_1^2 + \Gamma^2| < 2 \Gamma T_2. \quad (70)$$

Iz jednadžbi (51) i (52) slijede koeficijenti,  $\varphi_{1,2}$ , geometrijskih ograničenja za slučaj upravljanja bespilotnim letjelicama preko pripadnih potisaka  $T_{1,2}$ . Za bespilotnu letjelicu jedan taj koeficijent je

$$\varphi_1 = \frac{T_1^2 - T_2^2 + \Gamma^2}{2 \Gamma T_1}, \quad (71)$$

odnosno za bespilotnu letjelicu dva

$$\varphi_2 = \frac{T_2^2 - T_1^2 + \Gamma^2}{2 \Gamma T_2}. \quad (72)$$

Zadovoljenjem uvjeta iz jednadžbi (71) i (72) slijedi  $\varphi_{1,2} > 0$ , u protivnom  $\varphi_{1,2} = 0$ . u slučaju zadovoljenja uvjeta, odnosno pozitivnih iznosa koeficijenata ograničenja  $\varphi_{1,2}$  slijede izrazi za kutove odklona vektora potisaka  $T_{1,2}$  za pripadnu bespilotnu letjelicu. Prema slici 20 vidljivo je da je vertikalna komponenta kuta odklona za pojedinu bespilotnu letjelicu  $\beta_{1,2}$  vezana uz kosinus kuta, a horizontalna komponenta uz sinus kuta. Temeljem toga za bespilotnu letjelicu 1 slijedi

$$\cos \beta_1 = \frac{\Gamma_x \varphi_1 + \Gamma_y \sqrt{1 - \varphi_1^2}}{\Gamma}, \quad \sin \beta_1 = \frac{\Gamma_x \varphi_1 - \Gamma_y \sqrt{1 - \varphi_1^2}}{\Gamma}. \quad (73)$$

Sukladno tome komponente kuta odklona  $\beta_2$  za bespilotnu letjelicu 2 su



$$\cos \beta_2 = \frac{\Gamma_x \varphi_2 + \Gamma_y \sqrt{1 - \varphi_2^2}}{\Gamma}, \quad \sin \beta_2 = \frac{\Gamma_x \varphi_2 - \Gamma_y \sqrt{1 - \varphi_2^2}}{\Gamma}. \quad (74)$$

Kutove odklona pojedine bespilotne letjelice ( $\alpha_{1,2}$ ) od vertikalne osi određujemo iz sustava jednačbi (36-39). Kako slijedi za bespilotnu letjelicu jedan

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{T_1 \sin \beta_1 - R_{1x}}{T_1 \cos \beta_1 - R_{1y} - m_1 g}, \quad (75)$$

odnosno za bespilotnu letjelicu dva

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{R_{2x} - T_2 \sin \beta_2}{T_2 \cos \beta_2 - R_{2y} - m_2 g}. \quad (76)$$

Iz sustava jednačbi (36-41) slijede izrazi za napetosti u pojedinom konopcu kojim je teret pričvršćen za pojedinu bespilotnu letjelicu. Za napetost između tereta i bespilotne letjelice jedan slijedi

$$N_1 = \frac{T_1 \sin \beta_1 - R_{1x}}{\sin \alpha_1}, \quad (77)$$

odnosno za napetost između tereta i bespilotne letjelice 2

$$N_2 = \frac{R_{2x} - T_2 \sin \beta_2}{\sin \alpha_2}. \quad (78)$$

Iz postavljene geometrije prema slici 20 izrazi za horizontalnu udaljenost između bespilotnih letjelica  $d$  je

$$d = L (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2). \quad (79)$$

Analognim postupkom visinska razlika između bespilotnih letjelica  $h$  je

$$h = L (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1). \quad (80)$$

Slika 21 prikazuje slučaj lebdenja (engl. *hovering*) pri čemu letjelice i teret imaju istu masu, odnosno njihov omjer  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Uvjeti koji prilikom ovog načina upravljanja moraju biti ispunjeni (**A<sub>T</sub>** – **C<sub>T</sub>**) kao i dozvoljeno područje prikazani su na slici 21. Uvjeti slijede iz relacije trokuta (poglavlje Osnove znanosti o sustavima, stranica 19) (jednačba 1). Uvjet **A<sub>T</sub>** je

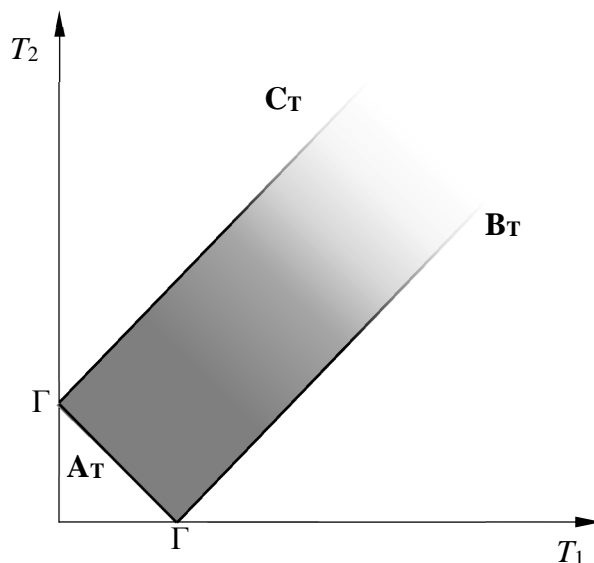
$$T_1 + T_2 = \Gamma. \quad (81)$$

Uvjet **B<sub>T</sub>**

$$T_2 = T_1 - \Gamma. \quad (82)$$

Uvjet **C<sub>T</sub>**

$$T_2 = T_1 + \Gamma. \quad (83)$$



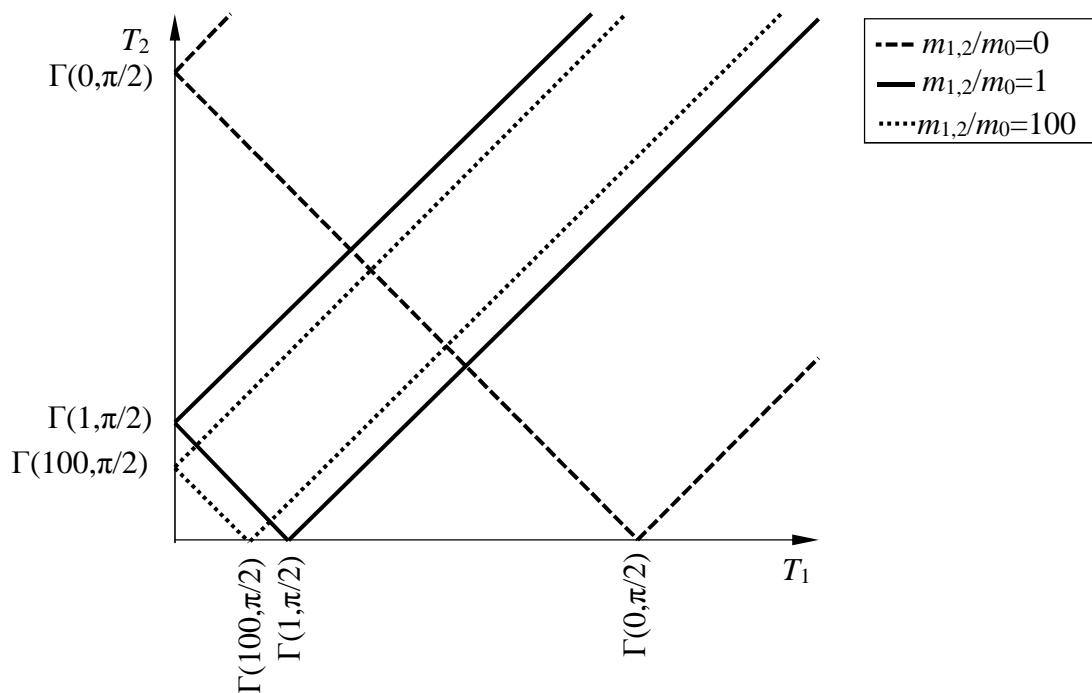
Slika 21. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja iznosima potisaka ( $T_1$  i  $T_2$ ).

Promjenom karakteristika letjelica ili tereta dozvoljeno područje se povećava ili smanjuje sukladno postavljenim uvjetima. Jedan od parametara koji znatno utječu na dozvoljeno područje je brzina leta. Njen utjecaj vidljiv je kroz kut otklona  $\psi$  ukupnog otpora sustava  $\Gamma$  prikazanog na slici 19.

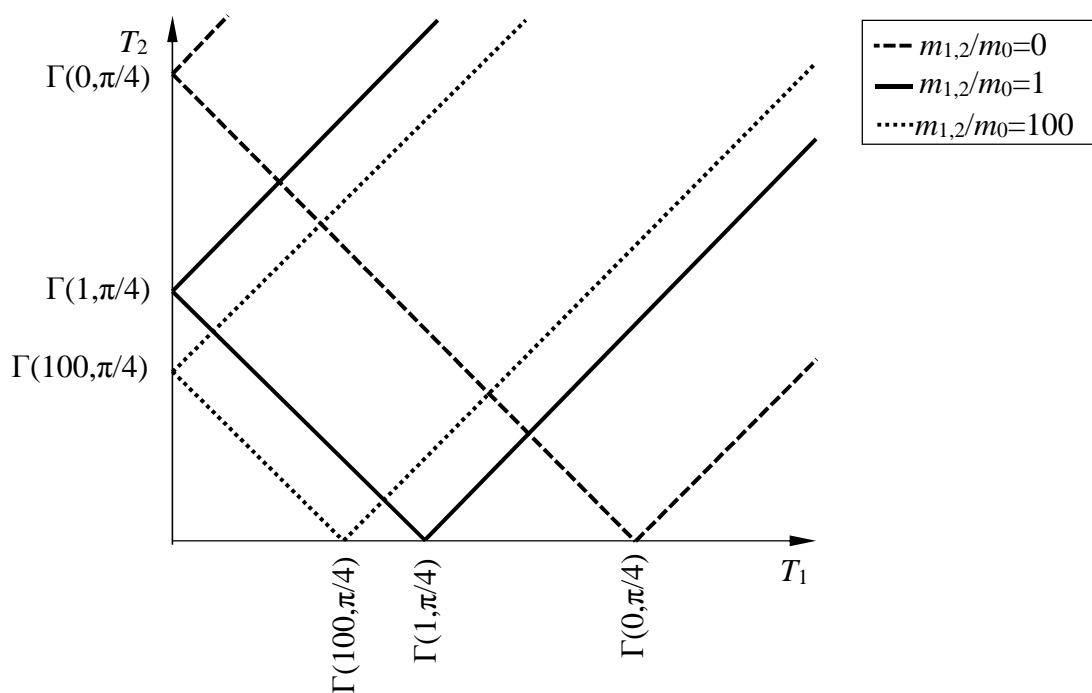
Za slučaj lebdenja (engl. *hovering*) otklon vektora ukupnog otpora  $\Gamma$  je  $\psi = 90^\circ$ . Za slučaj umjereno brzog horizontalnog leta (engl. *moderate level flight*) kut otklona je  $\psi \approx 45^\circ$ . Za slučaj brzog horizontalnog leta (engl. *fast level flight*) kut otklona je  $\psi \approx 0^\circ$ . Na dijagramima dozvoljenog područja vektora ukupnog otpora  $\Gamma$  označen je kao kombinacija omjera masa i pripadnog kuta otklona za pojedini režim leta –  $\Gamma(m_{1,2}/m_0, \psi)$ .

Slika 22 prikazuje dozvoljeno područje sustava za različite omjere masa letjelica  $m_{1,2}$  i tereta  $m_0$  za slučaj lebdenja. U ovom režimu leta kut  $\psi$  koji zatvara vektor ukupnog otpora  $\Gamma$  je  $\psi = \pi/2$ . U analizi dozvoljenog područja mase letjelica  $m_{1,2}$  uzete su kao konstante, a masa tereta  $m_0$  promjenjiva kako bi se odredio pretpostavljeni omjer. Iscrtkana linija omeđuje dozvoljeno područje za slučaj laganih letjelica koje prevoze teški teret. Puna linija omeđuje dozvoljeno područje u slučaju identičnih masa letjelica i tereta. Točkasta linija prikazuje dozvoljeno područje za slučaj prijevoza ekstremno laganog tereta. Gledano prema simetrali područja pokrivenog raspoloživim potiscima  $T_{1,2}$  smanjenje mase tereta dovodi do suženja dozvoljenog područja pri konstantnoj masi letjelica. Ujedno povećanje mase tereta dovodi do pomicanja

prema višim iznosima potrebnih potisaka  $T_{1,2}$  i proširenja područja pri konstantnoj masi letjelica  $m_{1,2}$ .

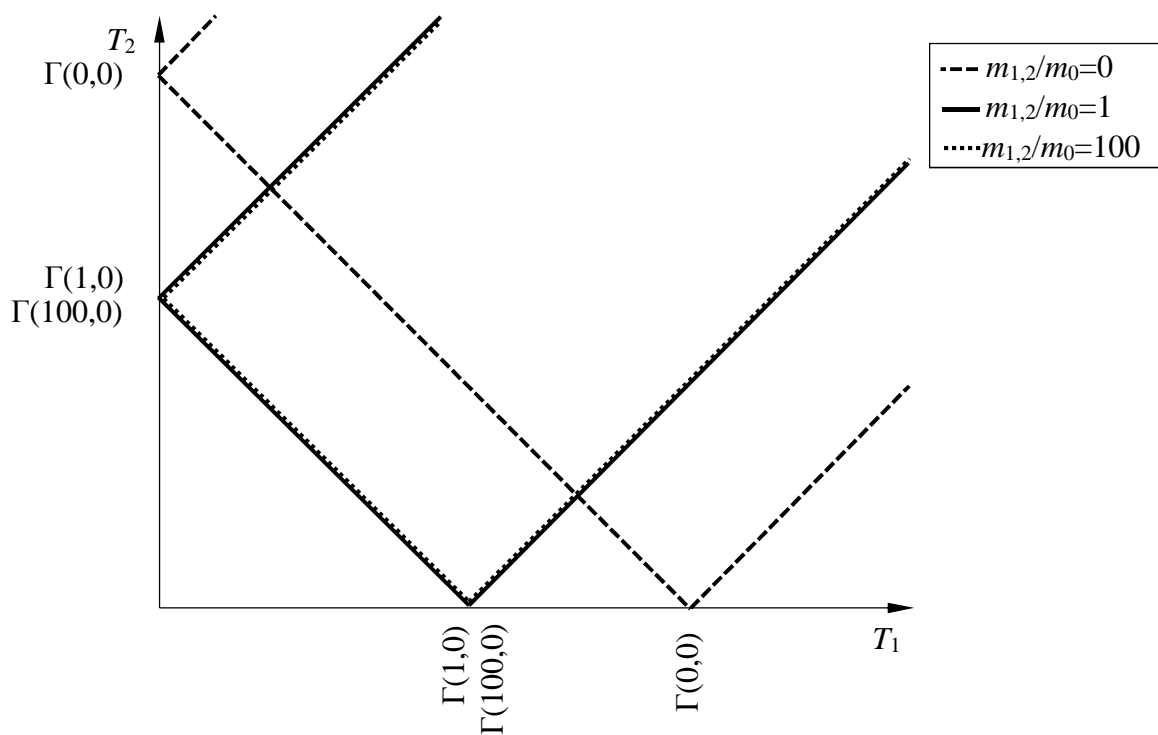


Slika 22. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 1$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju lebdenja ( $\psi = \pi/2$ ) pri upravljanju iznosima potisaka ( $T_1$  i  $T_2$ ).



Slika 23. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 1$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju umjereno brzog horizontalnog leta ( $\psi = \pi/4$ ) pri upravljanju iznosima potisaka ( $T_1$  i  $T_2$ ).

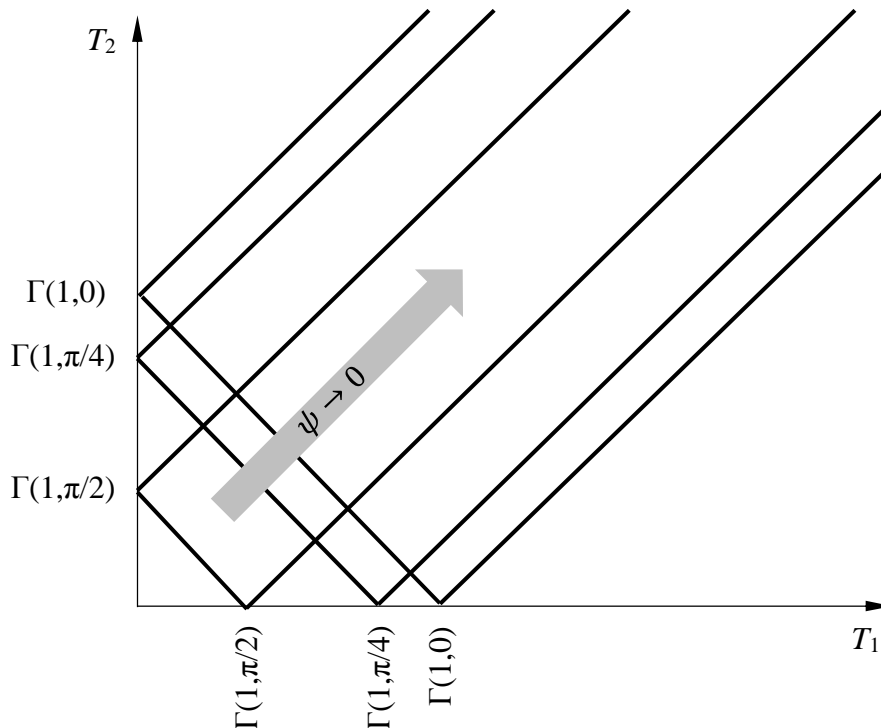
Slika 23 prikazuje dozvoljeno područje sustava za različite omjere masa letjelica  $m_{1,2}$  i tereta  $m_0$  za slučaj umjereno brzog horizontalnog leta. U ovom režimu leta kut  $\psi$  koji zatvara vektor ukupnog otpora  $\Gamma$  je  $\psi = \pi/4$ . U analizi dozvoljenog područja mase letjelica  $m_{1,2}$  uzete su kao konstante, a masa tereta  $m_0$  promjenjiva kako bi se odredio pretpostavljeni omjer. Iscrtkana linija omeđuje dozvoljeno područje za slučaj laganih letjelica koje prevoze teški teret. Puna linija omeđuje dozvoljeno područje u slučaju jednakih masa letjelica i tereta. Točkasta linija prikazuje dozvoljeno područje za slučaj prijevoza laganog tereta. Gledano prema simetrali područja pokrivenog raspoloživim potiscima  $T_{1,2}$  smanjenje mase tereta dovodi do suženja dozvoljenog područja pri konstantnoj masi letjelica. Ujedno povećanje mase tereta dovodi do pomicanja prema višim iznosima potrebnih potisaka  $T_{1,2}$ , i proširenja područja pri konstantnoj masi letjelica  $m_{1,2}$ .



Slika 24. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 1$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju brzog horizontalnog leta ( $\psi = 0$ ) pri upravljanju iznosima potisaka ( $T_1$  i  $T_2$ ).

Slika 24 prikazuje dozvoljeno područje sustava za različite omjere masa letjelica  $m_{1,2}$  i tereta  $m_0$  za slučaj brzog horizontalnog leta. U ovom režimu leta kut  $\psi$  koji zatvara vektor ukupnog otpora  $\Gamma$  je  $\psi = 0$ . U analizi dozvoljenog područja mase letjelica  $m_{1,2}$  uzete su kao konstante, a masa tereta  $m_0$  promjenjiva kako bi se odredio pretpostavljeni omjer. Iscrtkana linija omeđuje dozvoljeno područje za slučaj laganih letjelica koje prevoze teški teret. Puna linija omeđuje

dozvoljeno područje u slučaju identičnih masa letjelica i tereta. Točkasta linija prikazuje dozvoljeno područje za slučaj prijevoza ekstremno laganog tereta. U slučaju brzog leta uslijed smanjenja mase tereta dozvoljeno područje se pomiče prema nižim iznosima potrebnih potisaka  $T_{1,2}$ , proširuje i produljuje za konstantnu masu letjelica  $m_{1,2}$ . Ujedno povećanje mase tereta, odnosno prijevoz teškog tereta laganim letjelicama, dovodi do suženja operativno dozvoljenog područja djelovanja sustava.

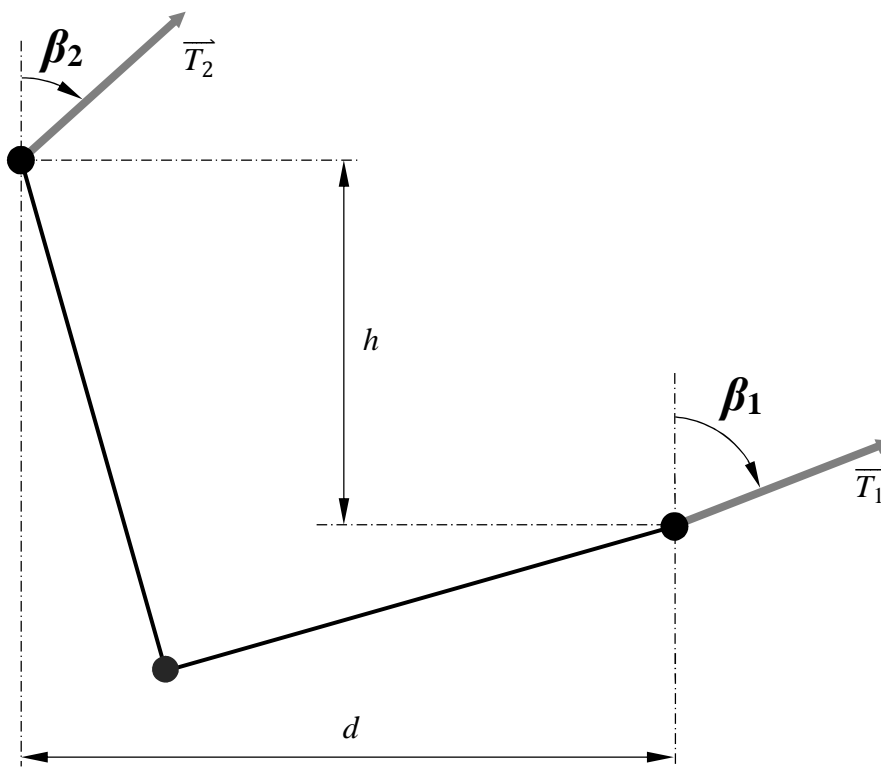


Slika 25. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za konstantan omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/ m_0 = 1$ ) u različitim režimima leta ( $\psi = \pi/2$ ;  $\psi = \pi/4$ ;  $\psi = 0$ ).Slika 25 prikazuje različite modele leta za konstantni omjer mase letjelica  $m_{1,2}$  i tereta  $m_0$ . Razmatrani omjer je  $m_{1,2}/ m_0 = 1$ . Povećanje brzine leta dovodi do pomicanja prema višim iznosima potrebnih potisaka  $T_{1,2}$ , i proširenja operativno dozvoljenog područja djelovanja sustava.

Za sve navedene slučajeve (slike 22-25) u razmatranje je potrebno uzeti i uvjet naveden u poglavlju o svojstvima veza, odnosno pretpostavku da obje letjelice cijelo vrijeme trajanja leta nose teret te su konopci kojima je pojedina bespilotna letjelica vezana za teret stalno napeti. Napetost konopca očituje se u pozitivnom iznosu sile  $N_{1,2}$ . Ovo je također jedan od parametara koje konfiguracija mora zadovoljiti, stoga su područja u kojima obje letjelice ne nose teret odnosno sile  $N_{1,2}$  nisu pozitivnog iznosa su isključena iz daljnjeg razmatranja. Na dijagramima prikazanim u poglavlju Rezultati istraživanja ti uvjeti su uključeni.

### 7.3 Upravljanje kutovima otklona potisaka

Ovaj način upravljanja ostvaruje se kutom zakretanja oko poprečne osi (engl. *pitch angle*) pojedine bespilotne letjelice u ravnini leta. Kut zakretanja bespilotne letjelice ostvaruje se pripadnim kutom otklona vektora potiska  $\beta_{1,2}$ . Na slici 26 masnim slovima su označene veličine upravljanja.



Slika 26. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja kutovima otklona potisaka ( $\beta_1$  i  $\beta_2$ ).

Temeljem postavke kuta otklona vektora potiska pojedine bespilotne letjelice u ravnini leta analitički su određeni ostali parametri sustava. Za pojedinu bespilotnu letjelicu određeni su iznosi potisaka  $T_{1,2}$ , odnosno određene su sile reakcije za cijeli sustava ( $N_{1,2}$ ) i postavka geometrije ( $\alpha_{1,2}$ ;  $d$  i  $h$ ).

Temeljne relacije postavljaju 4 uvjeta na područje djelovanja sustava. Uvjet  $\mathbf{A}_\beta$  predstavlja ovisnost kuta otklona  $\beta_1$  o omjeru projekcija opterećenja sustava  $\Gamma_x$  i  $\Gamma_y$

$$\beta_1 = \text{arctg} \frac{\Gamma_x}{\Gamma_y}. \quad (84)$$

Uvjet  $\mathbf{B}_\beta$  predstavlja ovisnost kuta otklona  $\beta_2$  o omjeru projekcija opterećenja sustava  $\Gamma_x$  i  $\Gamma_y$

$$\beta_2 = \operatorname{arctg} \frac{\Gamma_x}{\Gamma_y}. \quad (85)$$

Uvjeti  $\mathbf{C}_\beta$  i  $\mathbf{D}_\beta$  predstavljaju odnos između kutova odklona  $\beta_1$  i  $\beta_2$ . Uvjet  $\mathbf{C}_\beta$  je

$$\beta_2 = \beta_1, \quad (86)$$

odnosno uvjet  $\mathbf{D}_\beta$

$$\beta_2 = \beta_1 - \pi. \quad (87)$$

Ispunjenjem zadanih uvjeta (84-87) i rješavanjem sustava jednadžbi (36-39) uz primjenu izraza za ukupni koeficijent otpora u smjeru osi  $x$  (47), odnosno izraza ukupni koeficijent otpora u smjeru osi  $y$  (48) određeni su izrazi za potrebne ostvarene potiske po pojedinoj bespilotnoj letjelici. Stoga za bespilotnu letjelicu jedan izraz za pripadni vektor potiska  $T_1$  je

$$T_1 = \frac{\Gamma_x \cos \beta_2 - \Gamma_y \sin \beta_2}{\sin(\beta_1 - \beta_2)}, \quad (88)$$

odnosno izraz za potisak,  $T_2$ , bespilotne letjelice dva je

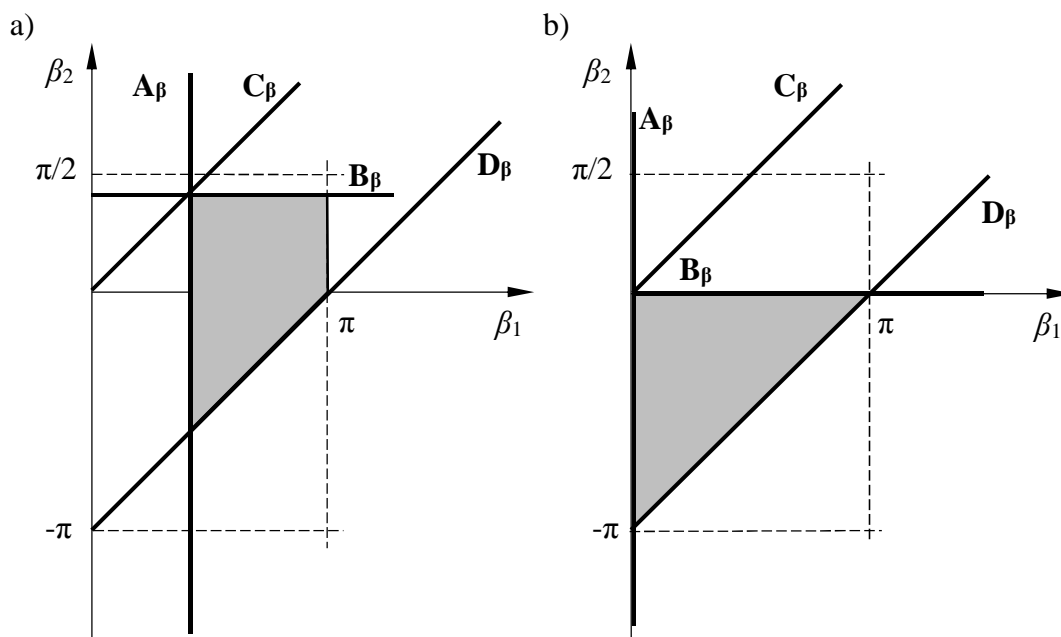
$$T_2 = \frac{-\Gamma_x \cos \beta_1 + \Gamma_y \sin \beta_1}{\sin(\beta_1 - \beta_2)}. \quad (89)$$

Kutovi odklona konopca od vertikalne osi  $\alpha_{1,2}$ , napetost u pojedinom konopcu  $N_{1,2}$  te međusobne udaljenosti između bespilotnih letjelica  $d$  i  $h$  određeni su izrazima (77-80).

Promjenom karakteristika letjelica ili tereta dozvoljeno područje se povećava ili smanjuje sukladno postavljenim uvjetima. U analizi dozvoljenog područja mase letjelica  $m_{1,2}$  uzete su kao konstante, a masa tereta  $m_0$  promjenjiva kako bi se odredio pretpostavljeni omjer. Jedan od parametara koji znatno utječu na dozvoljeno područje je brzina leta. Njen utjecaj vidljiv je kroz kut odklona  $\psi$  ukupnog otpora sustava  $\Gamma$  prikazanog na slici 7.

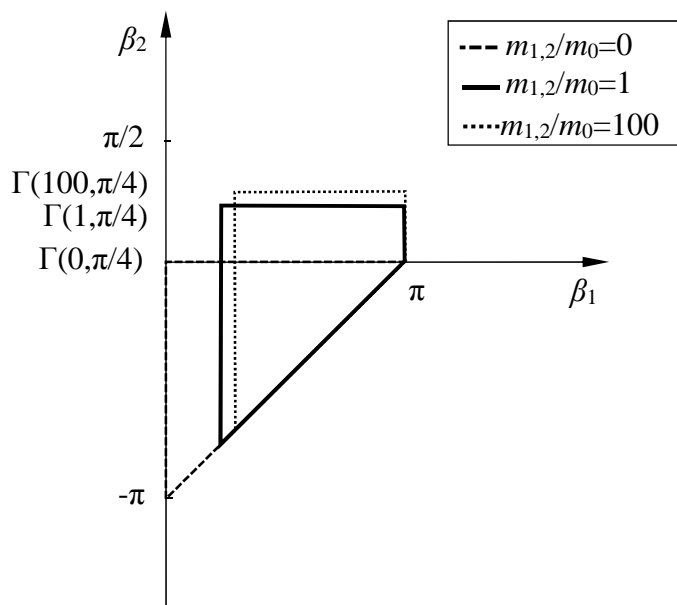
Za slučaj lebdenja odklon vektora ukupnog otpora  $\Gamma$  je  $\psi = 90^\circ$ . Za slučaj umjereno brzog horizontalnog leta kut odklona je  $\psi \approx 45^\circ$ . Za slučaj brzog horizontalnog leta kut odklona je  $\psi \approx 0^\circ$ . Na dijagramima dozvoljenog područja vektora ukupnog otpora  $\Gamma$  označen je kao kombinacija omjera masa i pripadnog kuta odklona za pojedini režim leta –  $\Gamma(m_{1,2}/m_0, \psi)$ .

Slika 27 a) prikazuje dozvoljeno područje djelovanja sustava u kojem je omjer masa letjelica i tereta  $m_{1,2}/m_0 = 1$  u slučaju općeg horizontalnog leta. Slika 27 b) prikazuje dozvoljeno područje djelovanja sustava u kojem je omjer masa letjelica i tereta  $m_{1,2}/m_0 = 1$  u slučaju lebdenja. Na oblik dozvoljenog područja utječe pomicanje uvjeta  $\mathbf{A}_\beta$  i  $\mathbf{B}_\beta$  koji su usko vezani uz kutove odklona  $\beta_{1,2}$ .



Slika 27. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja kutovima otklona potisaka ( $\beta_1$  i  $\beta_2$ ) za a) opći horizontalni let; b) lebdenje.

Analiza je pokazala da za slučaj lebdenja omjer mase letjelica i tereta ne doprinosi promjeni dozvoljenog područja. Sukladno tome dozvoljeno operativno područje djelovanja je prikazano na slici 27 b).

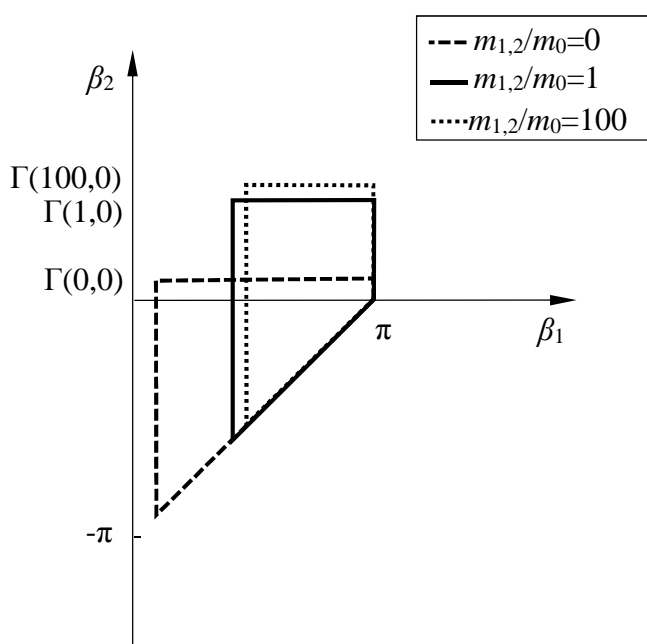


Slika 28. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 1$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju umjereno brzog horizontalnog leta ( $\psi = \pi/4$ ) pri upravljanju kutovima otklona potisaka ( $\beta_1$  i  $\beta_2$ ).

Slika 28 prikazuje dozvoljeno područje sustava za različite omjere masa letjelica  $m_{1,2}$  i tereta  $m_0$  za slučaj umjereno brzog horizontalnog leta. U ovom režimu leta kut  $\psi$  koji zatvara vektor



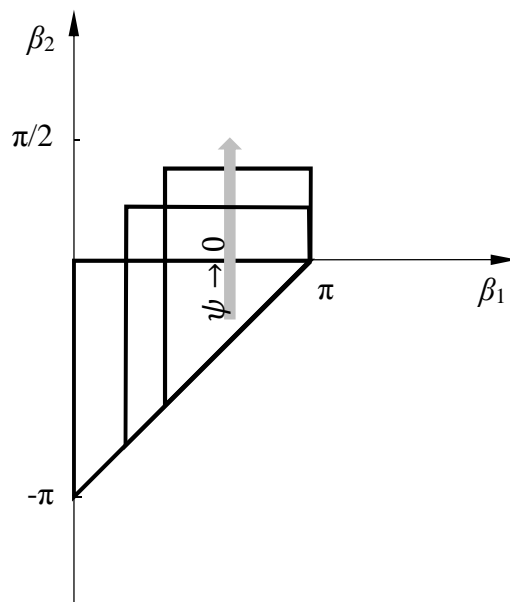
ukupnog otpora  $\Gamma$  je  $\psi = \pi/4$ . U analizi dozvoljenog područja mase letjelica  $m_{1,2}$  uzete su kao konstante, a masa tereta  $m_0$  promjenjiva kako bi se odredio pretpostavljeni omjer. Iscrtkana linija omeđuje dozvoljeno područje za slučaj laganih letjelica koje prevoze teški teret. Puna linija omeđuje dozvoljeno područje u slučaju jednakih masa letjelica i tereta. Točkasta linija prikazuje dozvoljeno područje za slučaj prijevoza laganog tereta. Smanjenjem mase tereta dozvoljeno područje pokrivaju veći iznosi kutova otklona  $\beta_{1,2}$ , odnosno povećava se nagib obiju letjelica. Ujedno područje operativnog djelovanja sustava se sužava. Za teže terete raspon dozvoljenih kutova otklona letjelice 1  $\beta_1$  pokriva cijelo područje mogućih raspona. Kut otklona letjelice 2 je samo u negativnom dijelu dozvoljenog raspona. Prema slici Slika 28 slijedi da je letjelica 2 za prijevoz teških tereta uvijek nagnuta suprotno od pravca leta.



Slika 29. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za različite omjere masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 0$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 1$ ;  $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) u slučaju brzog horizontalnog leta ( $\psi = 0$ ) pri upravljanju kutovima otklona potisaka ( $\beta_1$  i  $\beta_2$ ).

Slika 29. prikazuje dozvoljeno područje sustava za različite omjere masa letjelica  $m_{1,2}$  i tereta  $m_0$  za slučaj brzog horizontalnog leta. U ovom režimu leta kut  $\psi$  koji zatvara vektor ukupnog otpora  $\Gamma$  je  $\psi = 0$ . U analizi dozvoljenog područja mase letjelica  $m_{1,2}$  uzete su kao konstante, a masa tereta  $m_0$  promjenjiva kako bi se odredio pretpostavljeni omjer. Iscrtkana linija omeđuje dozvoljeno područje za slučaj laganih letjelica koje prevoze teški teret. Puna linija omeđuje dozvoljeno područje u slučaju identičnih masa letjelica i tereta. Točkasta linija prikazuje dozvoljeno područje za slučaj prijevoza ekstremno laganog tereta. Smanjenjem mase tereta dozvoljeno područje pokrivaju veći iznosi kutova otklona  $\beta_{1,2}$ , odnosno povećava se nagib obiju

letjelica. Ujedno područje operativnog djelovanja sustava se sužava. Za teže terete raspon dozvoljenih kutova odklona letjelice 1  $\beta_1$  se proširuje. Kut odklona letjelice 2  $\beta_2$  djelomično obuhvaća pozitivne vrijednosti i u tim slučajevima je letjelica nagnuta u pravcu leta. Za ostali raspon kutova letjelica je nagnuta suprotno od pravca leta.



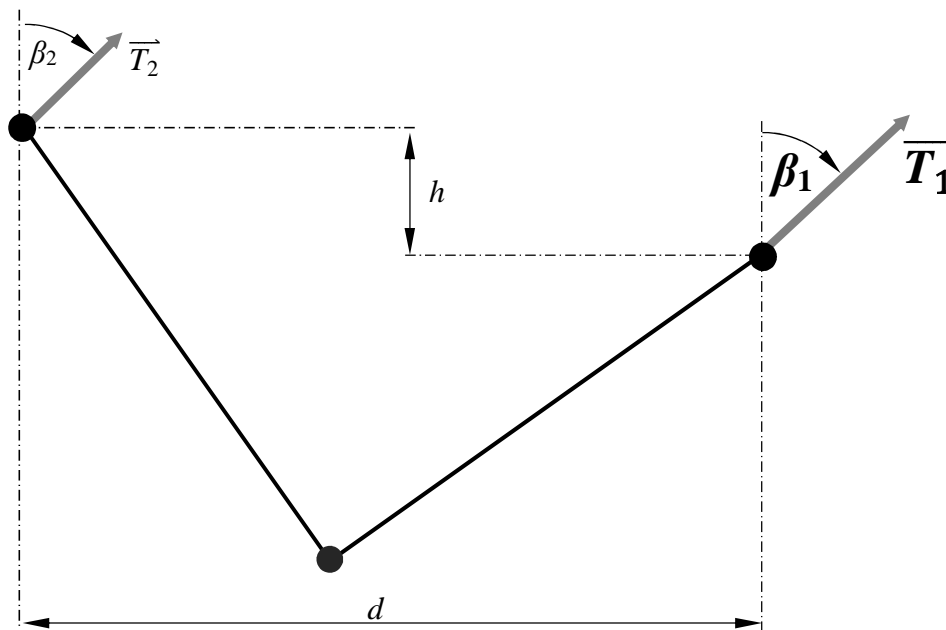
Slika 30. Grafički prikaz dozvoljenog područja sustava za konstantan omjer masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) u različitim režimima leta ( $\psi = \pi/2$ ;  $\psi = \pi/4$ ;  $\psi = 0$ ) pri upravljanju kutovima odklona potisaka ( $\beta_1$  i  $\beta_2$ ).

Slika 30. prikazuje različite modele leta za konstantni omjer mase letjelica  $m_{1,2}$  i tereta  $m_0$ . Razmatrani omjer je  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Povećanje brzine leta dovodi do suženja dozvoljenog područja, smanjenja raspona kutova nagiba letjelice 1 i proširenja područja nagiba letjelice 2 u pravcu leta i suprotno od pravca leta.

Za sve navedene slučajeve (slike Slika 27-Slika 30) u razmatranje je potrebno uzeti i uvjet naveden u poglavlju o svojstvima veza, odnosno pretpostavku da obje letjelice cijelo vrijeme trajanja leta nose teret te su konopci kojima je pojedina bespilotna letjelica vezana za teret stalno napeti. Napetost konopca očituje se u pozitivnom iznosu sile  $N_{1,2}$ . Ovo je također jedan od parametara koje konfiguracija mora zadovoljiti, stoga su područja u kojima obje letjelice ne nose teret odnosno sile  $N_{1,2}$  nisu pozitivnog iznosa su isključena iz daljnjeg razmatranja. Na dijagramima prikazanim u poglavlju Rezultati istraživanja (stranica 74) ti uvjeti su uključeni.

## 7.4 Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 1

Ovaj način upravljanja ostvaren je preko kontrolnih veličina vektora potiska, iznosa  $T_1$  i kuta otklona  $\beta_1$ . U ovom slučaju bespilotna letjelica 1 ima ulogu vođe (engl. *master*). Bespilotna letjelica 2 je samo sljedbenik (engl. *slave*) i svi iznosi karakterističnih veličina su određeni u odnosu na bespilotnu letjelicu 1. Na slici Slika 31. masnim slovima su označene veličine upravljanja.



Slika 31. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja vektorom potiska bespilotne letjelice 1 ( $T_1$  i  $\beta_1$ ).

Temeljem kontrolnih veličina vektora potiska analitički su određeni ostali parametri sustava. Za bespilotnu letjelicu 2 iznos potiska  $T_2$ , i kut otklona potiska  $\beta_2$ , odnosno određene su sile reakcije za cijeli sustava ( $N_{1,2}$ ) i postavka geometrije ( $\alpha_{1,2}$ ;  $d$  i  $h$ ).

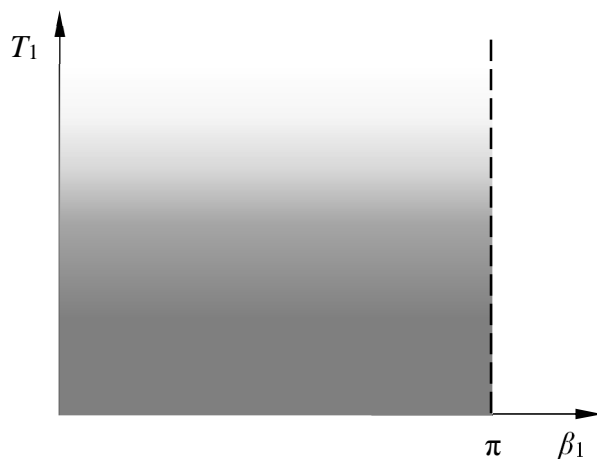
Za bespilotnu letjelicu 2 iz jednadžbi (38) i (39) određen je iznos potiska

$$T_2 = \sqrt{\Gamma^2 + T_1^2 - 2T_1(\Gamma_x \sin \beta_1 + \Gamma_y \cos \beta_1)}. \quad (90)$$

Pripadni kut otklona vektora potiska bespilotne letjelice 2,  $\beta_2$ , je

$$tg \beta_2 = \frac{T_1 \sin \beta_1 - \Gamma_x}{T_1 \cos \beta_1 - \Gamma_y}. \quad (91)$$

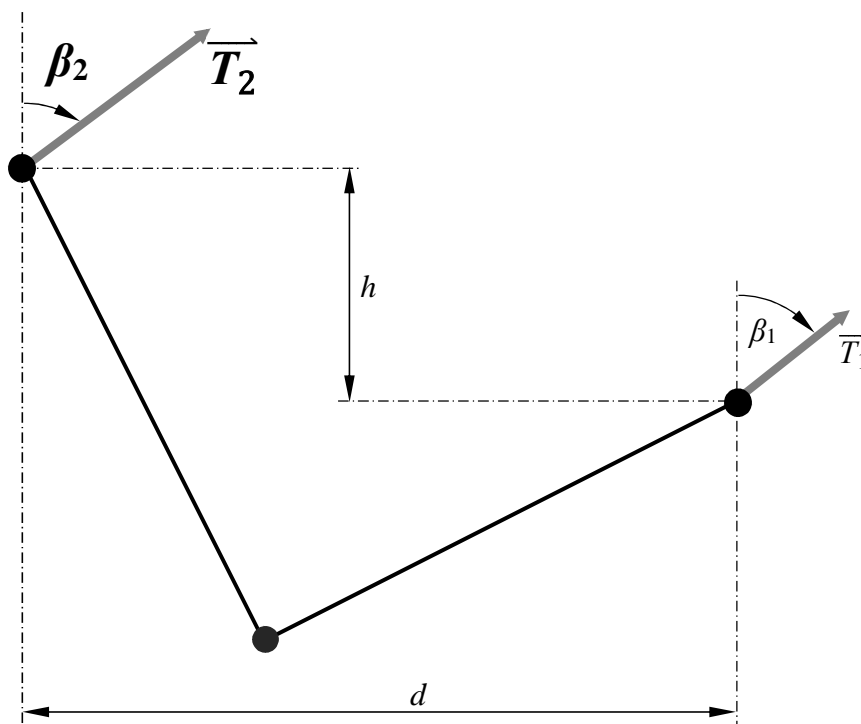
Kutovi otklona konopca od vertikalne osi  $\alpha_{1,2}$ , napetost u pojedinom konopcu  $N_{1,2}$  te međusobne udaljenosti između bespilotnih letjelica  $d$  i  $h$  određeni su izrazima (77-80).



Slika 32. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja vektorom potiska bespilotne letjelice 1 ( $T_1$  i  $\beta_1$ ).

## 7.5 Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 2

Ovaj način upravljanja ostvaren je preko kontrolnih veličina vektora potiska, iznosa  $T_2$  i kuta otklona  $\beta_2$ . U ovom slučaju bespilotna letjelica 2 ima ulogu vođe (engl. *master*). Bepilotna letjelica 1 je samo sljedbenik (engl. *slave*) i svi iznosi karakterističnih veličina su određeni u odnosu na bespilotnu letjelicu 2. Na slici Slika 33 masnim slovima su označene veličine upravljanja.



Slika 33. Shematski prikaz upravljanja sustavom dvije letjelice koje prenose teret u slučaju upravljanja vektorom potiska bespilotne letjelice 2 ( $T_2$  i  $\beta_2$ ).

Temeljem kontrolnih veličina vektora potiska analitički su određeni ostali parametri sustava. Za bespilotnu letjelicu 1 iznos potiska  $T_1$ , i kut otklona potiska  $\beta_1$ , odnosno određene su sile reakcije za cijeli sustav ( $N_{1,2}$ ) i postavka geometrije ( $\alpha_{1,2}$ ;  $d$  i  $h$ ).

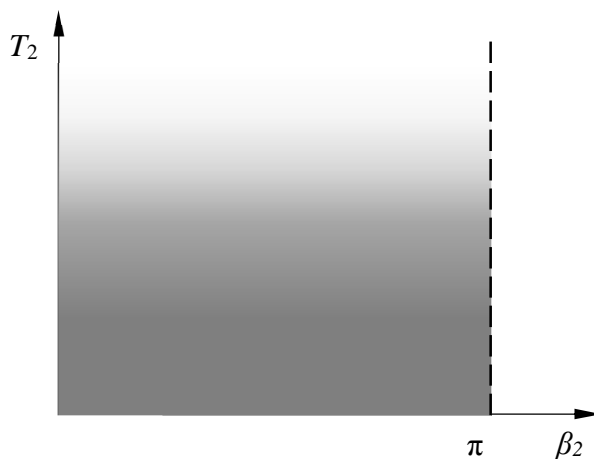
Za bespilotnu letjelicu 1 iz jednadžbi (36) i (37) određen je iznos potiska

$$T_1 = \sqrt{\Gamma^2 + T_2^2 - 2T_2(\Gamma_x \sin \beta_2 + \Gamma_y \cos \beta_2)}. \quad (92)$$

Pripadni kut otklona vektora potiska bespilotne letjelice 1,  $\beta_1$ , je

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{T_2 \sin \beta_2 - \Gamma_x}{T_2 \cos \beta_2 - \Gamma_y}. \quad (93)$$

Kutovi otklona konopca od vertikalne osi  $\alpha_{1,2}$ , napetost u pojedinom konopcu  $N_{1,2}$  te međusobne udaljenosti između bespilotnih letjelica  $d$  i  $h$  određeni su izrazima (77-80).



Slika 34. Grafički prikaz dozvoljenog područja za slučaj upravljanja vektorom potiska bespilotne letjelice 2 ( $T_2$  i  $\beta_2$ ).

## 7.6 Energetska učinkovitost sustava

Kako bi se mogli odrediti kvantitativni parametri koji opisuju korisnost sustava bespilotnih letjelica s gledišta energetske učinkovitosti, kao referentni slučaj analiziran je prijevoz tereta pomoću jedne bespilotne letjelice, Slika 35.

Za konkretni slučaj prijevoza tereta iznos potiska jedne bespilotne letjelice  $\tau$  određen je izravnim deriviranjem izraza za sustav dvije bespilotne letjelice te iznosi

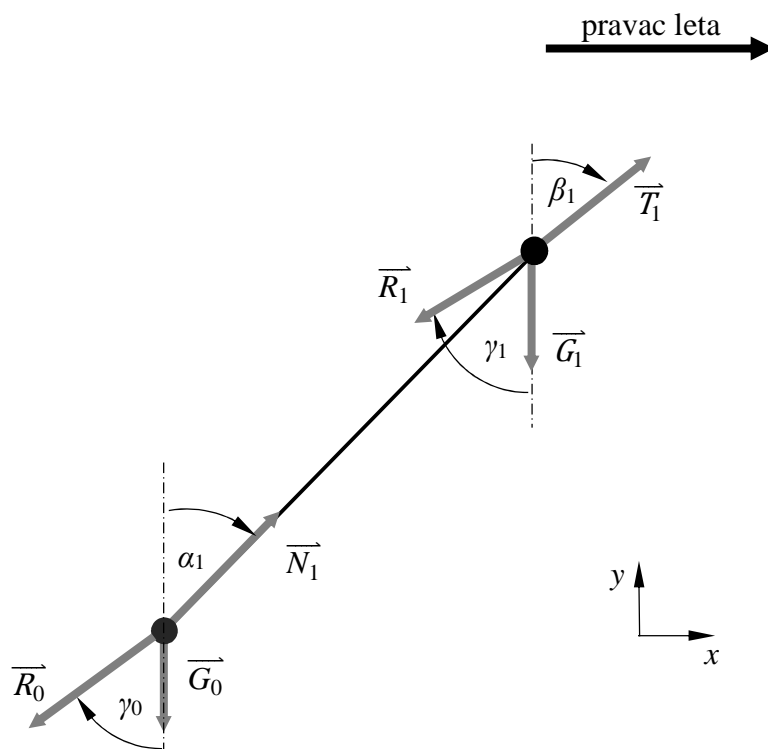
$$\tau = [R_0^2 + R_1^2 + 2(R_{1x}R_{0x} + R_{1y}R_{0y}) + 2(G_1 + G_0)(R_{1y} + R_{0y}) + (G_1 + G_0)^2]^{1/2} \quad (94)$$

Analognim postupkom kao i u slučaju prijevoza tereta s dvije bespilotne letjelice određeni su izrazi za trenutnu snagu  $\pi$  i minimalnu energiju  $\varepsilon$

$$\pi = \pi(m_0, v) = \sqrt{\frac{\tau^3}{2\rho A}}, \quad (95)$$

$$\varepsilon = \varepsilon(m_0, v_\varepsilon) = \min_v \frac{\pi(m_0, v)}{v}, \quad (96)$$

gdje  $v_\varepsilon$  označava brzinu leta pri kojoj je utrošena energija minimalna.



Slika 35. Sile reakcije na komponente sustava jedne bespilotne letjelice koja prenosi teret u globalnom koordinatnom sustavu.

Faktor snage  $f_P$  i faktor energije  $f_E$  uspoređuju generiranu snagu i utrošak energije pri transportu tereta pomoću dvije bespilotne letjelice s odgovarajućim iznosima generirane snage i utrošene energije za prijevoz jednom bespilotnom letjelicom. Izrazi za pojedini faktor su

$$f_P = \frac{P_{min}}{\pi} \quad (97)$$

$$f_E = \frac{E_{min}}{\varepsilon} \quad (98)$$

U konačnici, veličina koja opisuje cjelokupno ponašanje sustava je osjetljivost na povremene zapuhe vjetrova. Zapusi vjetrova su u ovom slučaju ograničeni na ravninu u kojoj se nalaze

bespilotne letjelice i teret. Stoga je strujanje vjetra je vodoravno, čeonu vjetar (enlg. *front wind*) ili leđni (engl. *back wind*), odnosno strujanje vjetra je vertikalno, prema gore (engl. *up-wash*) ili prema dolje (engl. *down-wash*). Pretpostavljeni odgovor sustava na promjene u bilo kojem smjeru od tih zapuha vjetra očituje se promjenom geometrijskog parametra definiranog u smjeru vanjske promjene. Kako bi osigurali očuvanje konačne geometrije potrebno je analizirati promjene u generiranoj snazi sustava bespilotnih letjelica. Ako se geometrija očuva, može se smatrati da sustav ima dovoljnu stabilnost. To očuvanje geometrije zahtjeva povećanje generirane snage. U analizi sustava dvije bespilotne letjelice i tereta prema jednadžbi (33) određeni su iznosi ukupne trenutne snage za početnu geometriju kao i za geometriju s infinitezimalnom promjenom u odnosu na početnu. Za veće razlike navedenih snaga smatramo da je sustav osjetljiviji na zapuhe vjetra.

U konačnici pretpostavljena statička osjetljivost, kao kvantitativna mjera odgovora sustava na povremene zapuhe vjetra, je

$$\sigma(d, h) = \sqrt{\left(\frac{\partial f_P}{\partial d}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_P}{\partial h}\right)^2} \quad (99)$$

Prevelika osjetljivost sustava podrazumijeva nestabilnu geometriju. Naprotiv, malena osjetljivost podrazumijeva statički stabilnu geometriju, budući da je potrebna promjena u trenutačnoj snazi relativno mala, što je po pretpostavci moguće ostvariti pomoću pogonskog sustava, odnosno motora, bespilotnih letjelica.

## 7.7 Slobodna energija sustava

Određivanjem kvantitativnih parametri koji opisuju korisnost sustava bespilotnih letjelica s gledišta energetske učinkovitosti postavlja se pitanje da li je promatrani sustav dvije bespilotne letjelice koje prenose teret u mogućnosti u potpunosti izvršiti zadani prijenos. Odnosno da li je zadovoljena sposobnost sustava. Sposobnost sustava, jedna od temeljnih mjeriteljskih kategorija, definirana je kao omjer zahtijevanog i realiziranog raspona karakteristika sustava. Sustav se smatra sposobnim ako je taj omjer dovoljno velik. Sukladno tome iz procjene sposobnosti sustava na temelju parametara agenata može se ustvrditi koje kombinacije agenata su potrebne za ostvarivanje zadanog cilja.

Mjera sposobnosti promatranog sustava dvije bespilotne letjelice i tereta je slobodna energija sustava, odnosno količina energije koju sustav ima u rezervi prilikom uobičajenog obavljanja

zadanog prijenosa. Slobodna energija sustava definirana je jednažbom (25) u poglavlju *Srednje vrijednosti mjerljivih svojstava elemenata* na stranici 34.

Iz definicije slobodne energije sustava,  $F$ , vidimo da je ona jednaka razlici unutarnje energije  $U$  i umnoška temperature sustava  $T$  i entropije  $S$ . Unutarnja energija sustava je

$$U = k_1 \cos \psi + P(\psi_{min}) - P(\psi) \quad (100)$$

gdje je  $k_1$  konstanta kinetičke energije i predstavlja udio mase,  $\cos \psi$  je omjer horizontalne komponente ukupnog otpora sustava,  $\Gamma_x$ , i ukupnog otpora sustava,  $\Gamma$ , Slika 7.  $P(\psi_{max})$  je maksimalni iznos snage sustava, a  $P(\psi)$  trenutni iznos snage sustava. Maksimalni iznos snage sustava je

$$P(\psi_{min}) = v \sqrt{\frac{1}{2\rho A}} \cdot T_{max}^{\frac{3}{2}} \equiv k_2, \quad (101)$$

gdje  $v$  označava trajanje razvijanja snage, a  $T_{max}$  maksimalni iznos potiska sustava. Trenutni iznos snage sustava,  $P(\psi)$ , je

$$P(\psi) = v \sqrt{\frac{1}{2\rho A}} \cdot \left( T_1^{\frac{3}{2}} + T_2^{\frac{3}{2}} \right) \equiv k_3 \cdot \left( T_1^{\frac{3}{2}} + T_2^{\frac{3}{2}} \right), \quad (102)$$

Gdje je  $k_3$  unaprijed definirani parametar sustava ovisan o geometriji i vremenu trajanja razvijanja snage. Supstitucijom izraza za snage sustava (jednažbe 101-102) izraz za unutarnju energiju sustava je

$$U = k_1 \cos \psi + k_2 - k_3 \cdot \left( T_1^{\frac{3}{2}} + T_2^{\frac{3}{2}} \right) \quad (103)$$

U razmatranju sustava dvije bespilotne letjelice i tereta pretpostavka je da se sustav nalazi u horizontalnom letu pri konstantnoj visini,  $R_{0y} \approx R_{1y} \approx R_{2y} = 0$ , uz slične iznose horizontalnih sila otpora,  $R_{0x} \approx R_{1x} \approx R_{2x}$ . Sukladno tome horizontalna komponenta ukupnog otpora sustava je

$$\Gamma_x = R_{0x} + R_{1x} + R_{2x} \equiv 3R_{0x}, \quad (104)$$

odnosno iznos horizontalnih komponenti sela otpora elemenata sustava je

$$R_{0x} = \frac{\Gamma}{3} \cos \psi. \quad (105)$$

Za upravljanje sustavom preko geometrije uvrštavanjem izraza (xx) slijedi

$$T_1 = \frac{R_{1x} \cos \alpha_1 - (R_{1y} + m_1 g) \sin \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \beta_1)} = \frac{\Gamma \cos \psi \cos \alpha_1 - 3m_1 g \sin \alpha_1}{3 \sin(\alpha_1 - \beta_1)}, \quad (106)$$



$$T_2 = \frac{(R_{2y} + m_2 g) \sin \alpha_2 + R_{2x} \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_2 + \beta_2)} = \frac{\Gamma \cos \psi \cos \alpha_2 + 3m_2 g \sin \alpha_2}{3 \sin(\alpha_2 + \beta_2)}. \quad (107)$$

Sukladno tome izraz za unutarnju energiju sustava je

$$U = k_1 \cos \psi + k_2 - k_3 \cdot \left( \left( \frac{\Gamma \cos \psi \cos \alpha_1 - 3m_1 g \sin \alpha_1}{3 \sin(\alpha_1 - \beta_1)} \right)^{\frac{3}{2}} + \left( \frac{\Gamma \cos \psi \cos \alpha_2 + 3m_2 g \sin \alpha_2}{3 \sin(\alpha_2 + \beta_2)} \right)^{\frac{3}{2}} \right) \quad (108)$$

Izraz za entropiju sustava izražen preko Gauss-ove normalne raspodjele glasi

$$S = - \int_{\psi_{min}}^{\pi/2} p(\psi) \ln p(\psi) d\psi, \quad (109)$$

Pri čemu Gauss-ova raspodjela glasi

$$p(\psi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2}} e^{-\frac{(\psi - \psi_0)^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (110)$$

Deriviranjem unutarnje energije i ukupne entropije sustava po kutu  $\psi_0$  određena je ukupna temperatura sustava

$$T = \frac{\frac{dU}{d\psi}}{\frac{dS}{d\psi}}. \quad (111)$$

Zbog složenosti izraza navedene derivacije i izraz za ukupnu temperaturu sustava nisu prikazani. Temeljem izraza (108-111) i izraza (25) određena je slobodna energija sustava  $F$ . Karakteristične vrijednosti prikazane su u poglavlju *Rezultati istraživanja* na stranici 74.

## 8 Rezultati istraživanja

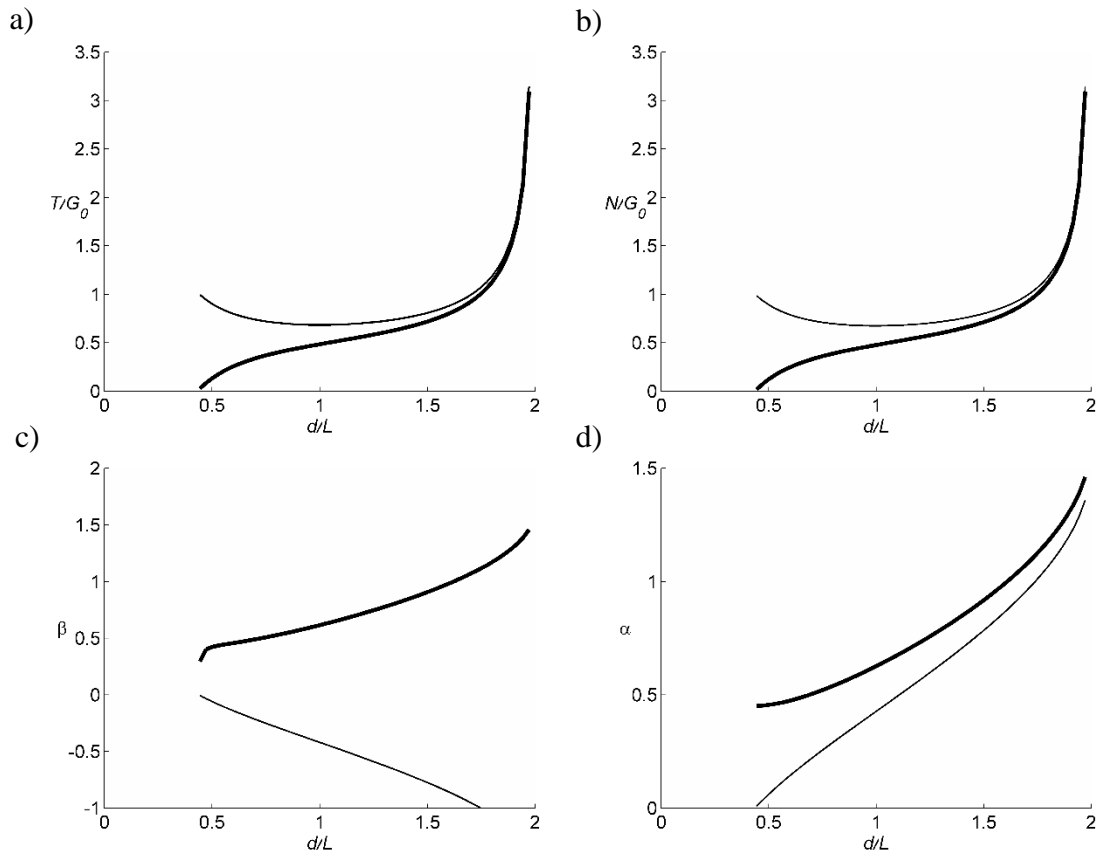
U ovom poglavlju predstavljene su rezultati istraživanja za sustav dviju autonomnih letjelica koje prenose teret. Sustav je analiziran kroz različite načine upravljanja koji su opisani poglavljem Detaljno modeliranje na stranici 49. Promatrani parametri usko su vezani uz pojedini način upravljanja, ali su detaljno analizirani za različite omjere masa letjelica  $m_{1,2}$  i tereta  $m_0$ . Omjeri masa uzeti su za 3 karakteristična slučaja: prijevoz teškog tereta laganim letjelicama; jednak omjer težina letjelica i tereta; prijevoz jako laganog tereta letjelicama identičnih masa. Uz omjer masa ključan parametar analize sustava je i brzina leta koja je očitovanja kroz kut  $\psi$  i kreće se u rasponu od  $0 - \pi/2$  (slika Slika 7.).

Tablični prikazi rezultata istraživanja prikazani su u *Prilogu* na stranicama 197-204.

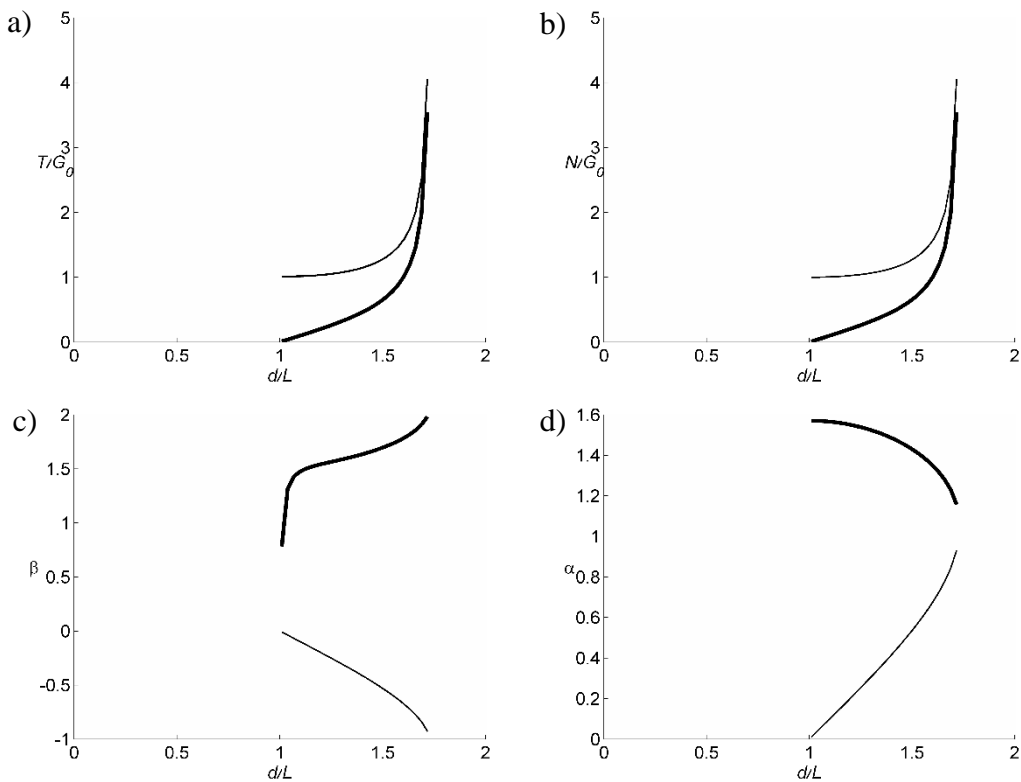
### 8.1 Upravljanje konfiguracijom

Upravljanje konfiguracijom ostvaruje se promjenama horizontalne ( $d$ ) i vertikalne ( $h$ ) udaljenosti između bespilotnih letjelica. U analizi sustava vertikalna udaljenost  $h$  razmotrena je kao konstantna varijabla te je sustav promatran za cijeli raspon horizontalne udaljenosti  $d$ . Iz slike Slika 18. i uvjeta postavljenih na konopce (poglavlje Upravljanje konfiguracijom stranica 51) vidljivo je da raspon oba parametara udaljenosti ograničen u rasponu od  $0 - 2L$ . Zbog nepovoljnog utjecaja energetske veze između bespilotnih letjelica dio vertikalne udaljenosti je izuzet iz razmatranja.

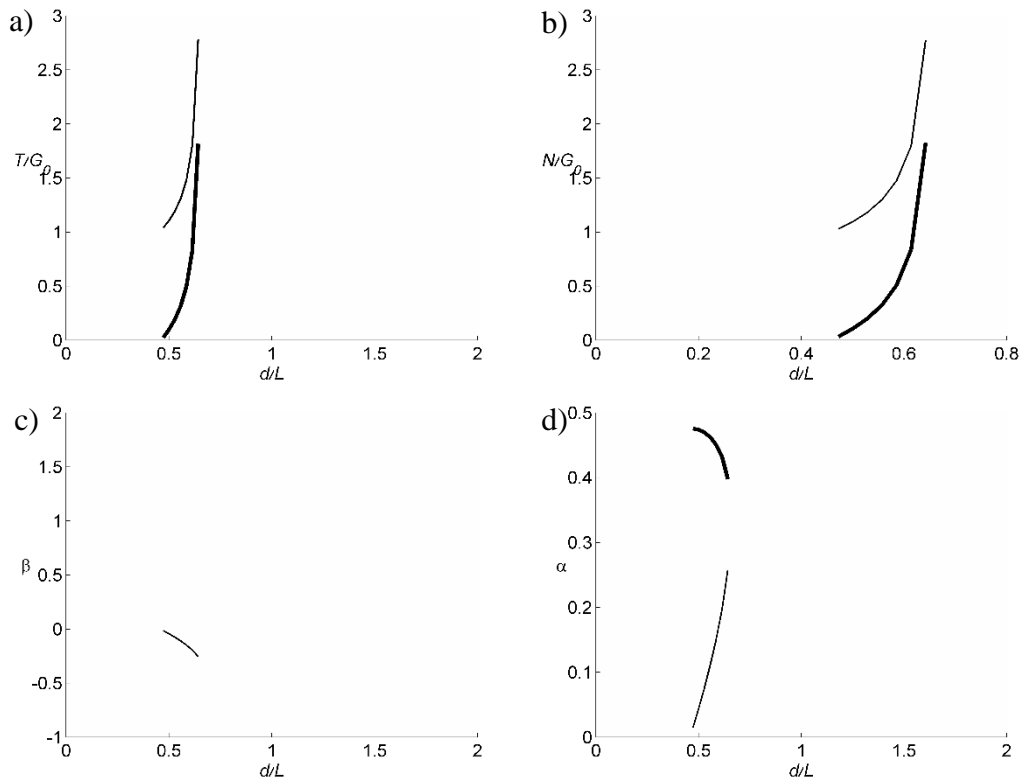
U nastavku su prikazane dijagramske ovisnosti iznosa vektora potisaka  $T_{1,2}$ ; kutova otklona potisaka  $\beta_{1,2}$ ; iznosi sile reakcije u konopcima  $N_{1,2}$  i kuta otklona konopaca od vertikalne osi  $\alpha_{1,2}$  za različite omjere masa letjelice i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ) i različite režime leta s pripadnim otklonom kuta  $\psi$ . Na slikama deblja linija označava vrijednosti vezane uz letjelicu 1. Detaljna analiza sustava razrađena je u poglavlju *Diskusija* na stranici 172. Tablični prikazi rezultata istraživanja prikazani su u *Prilogu* na stranicama 197-199.



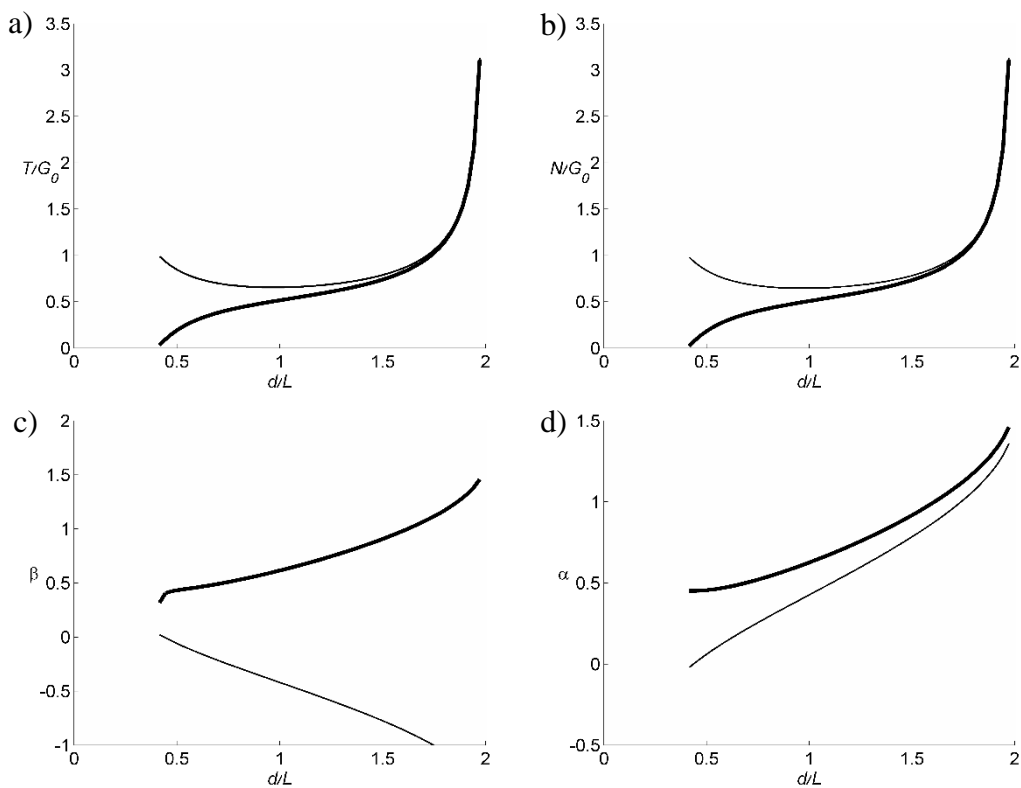
Slika 36. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 0,1$ ;  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



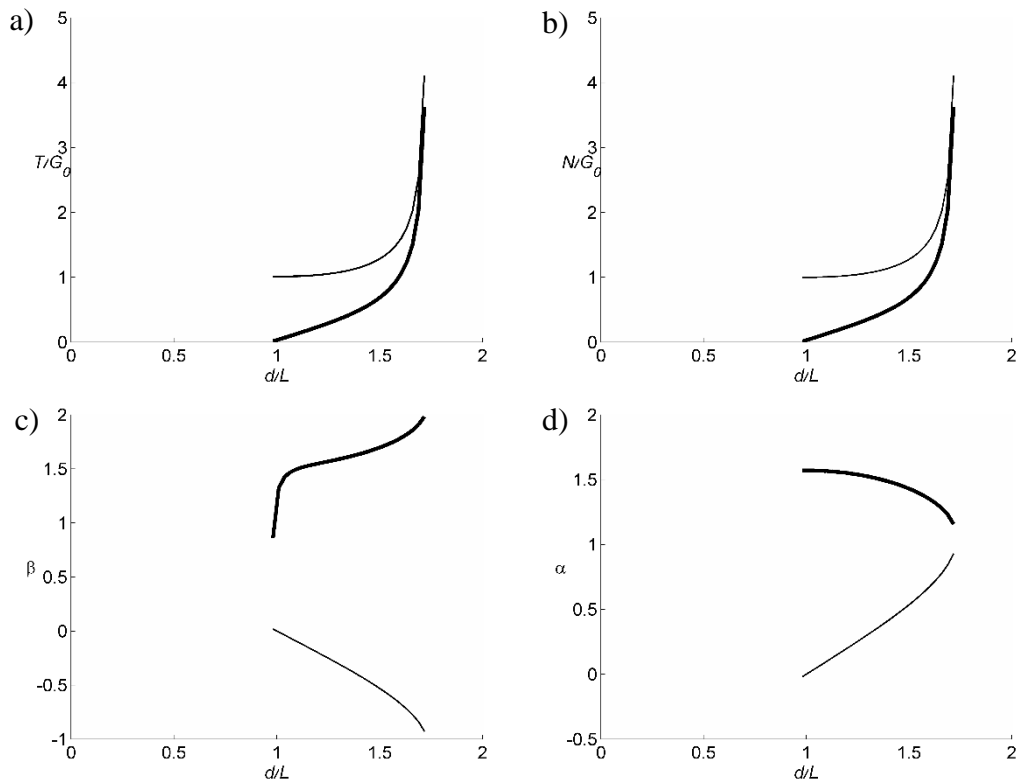
Slika 37. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 1$ ;  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



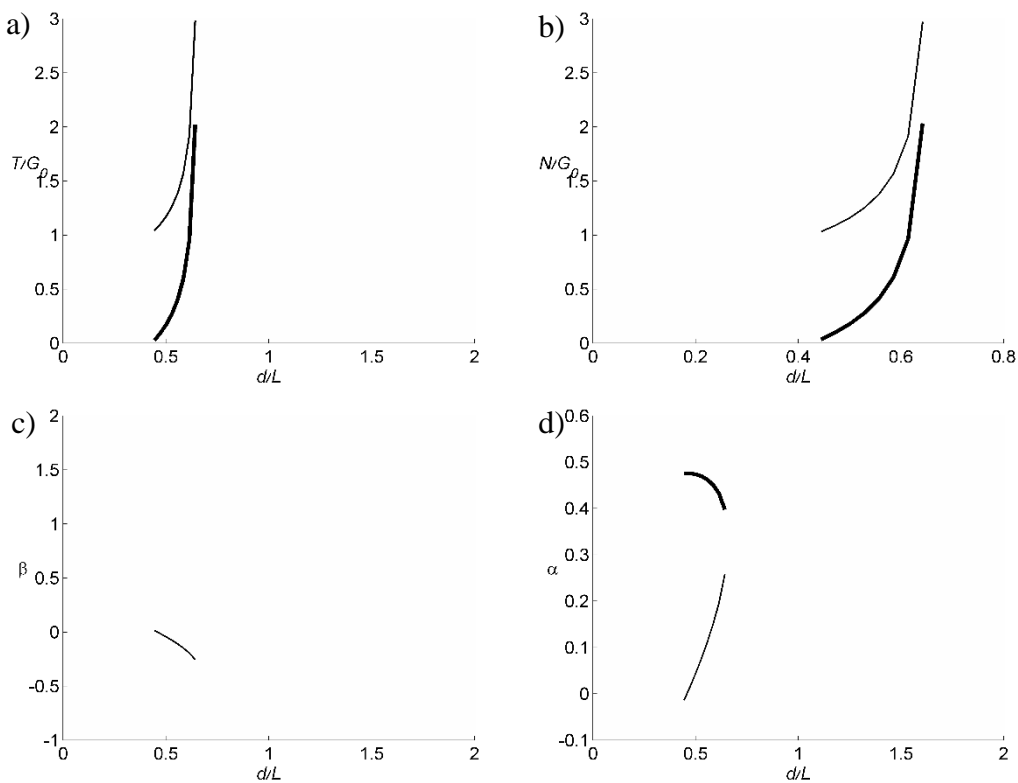
Slika 38. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 2$ ;  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



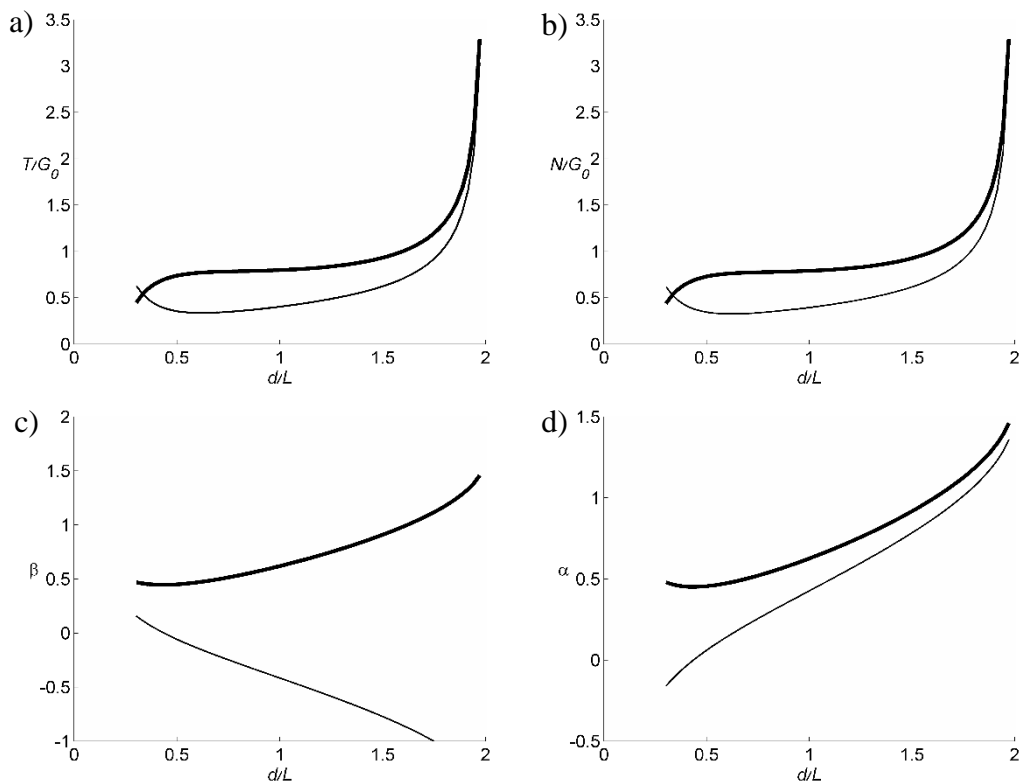
Slika 39. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 0,1$ ;  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



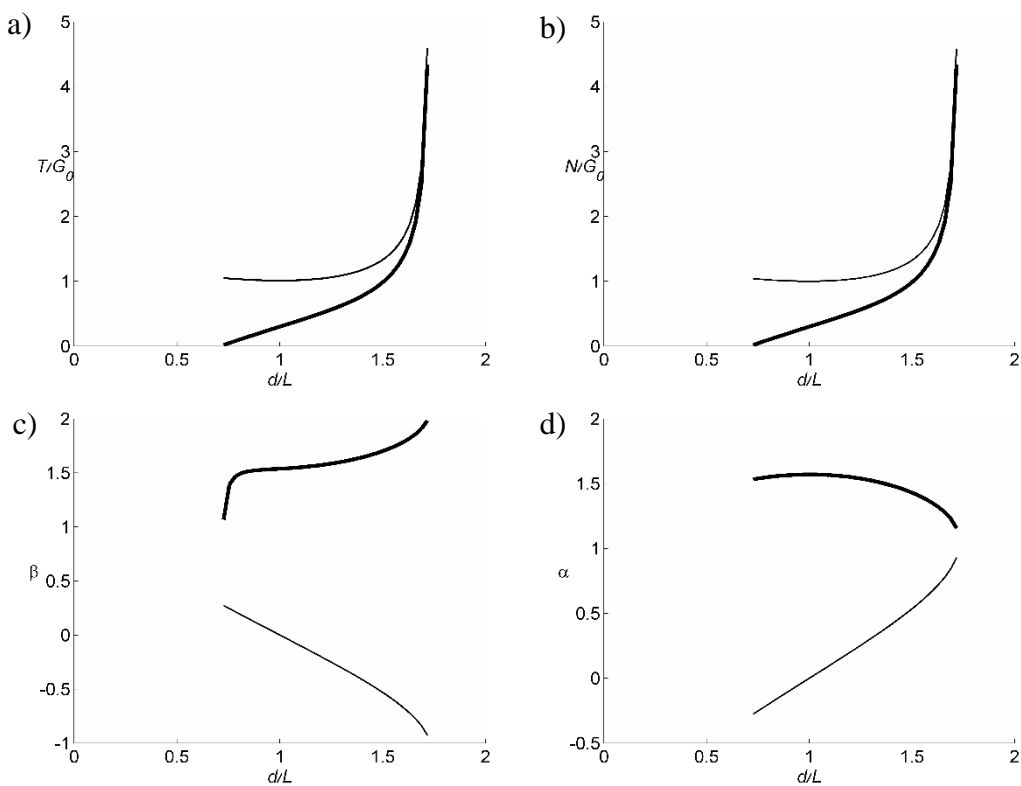
Slika 40. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 1$ ;  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



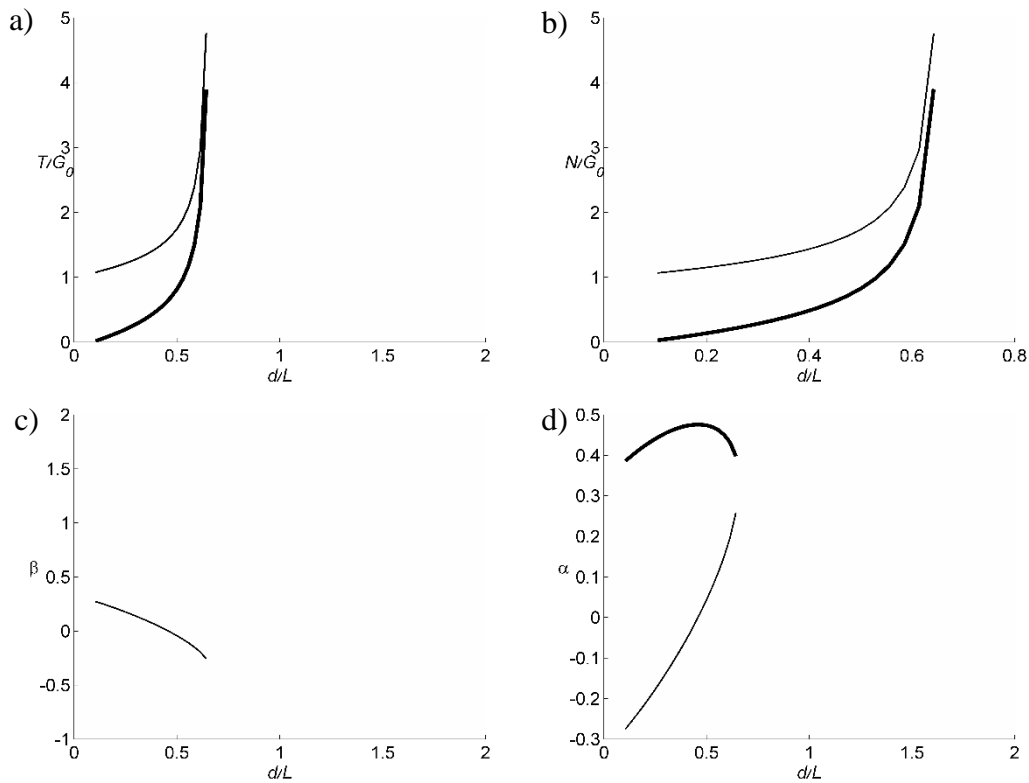
Slika 41. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 2$ ;  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



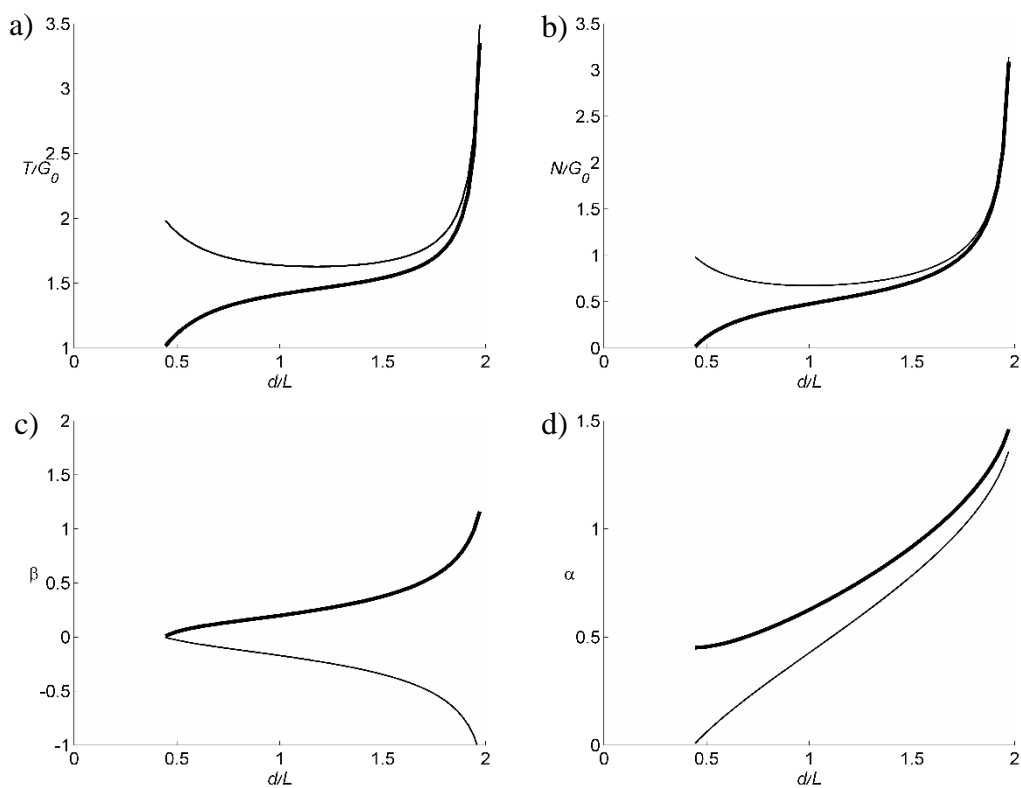
Slika 42. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 0,1$ ;  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



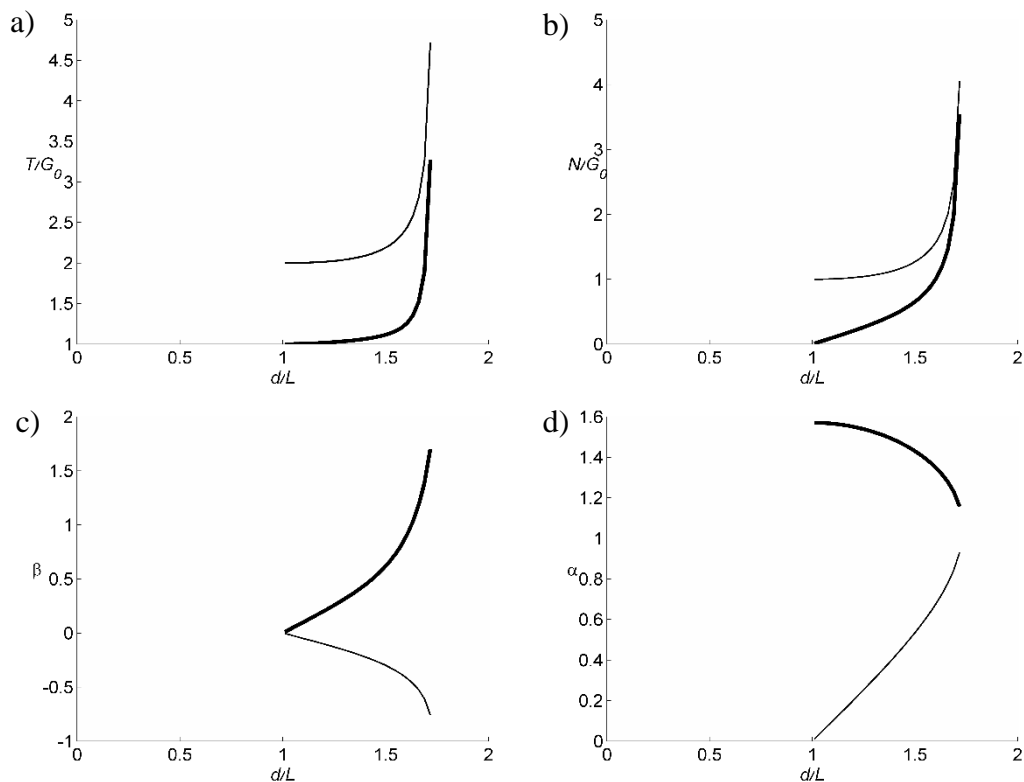
Slika 43. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 1$ ;  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



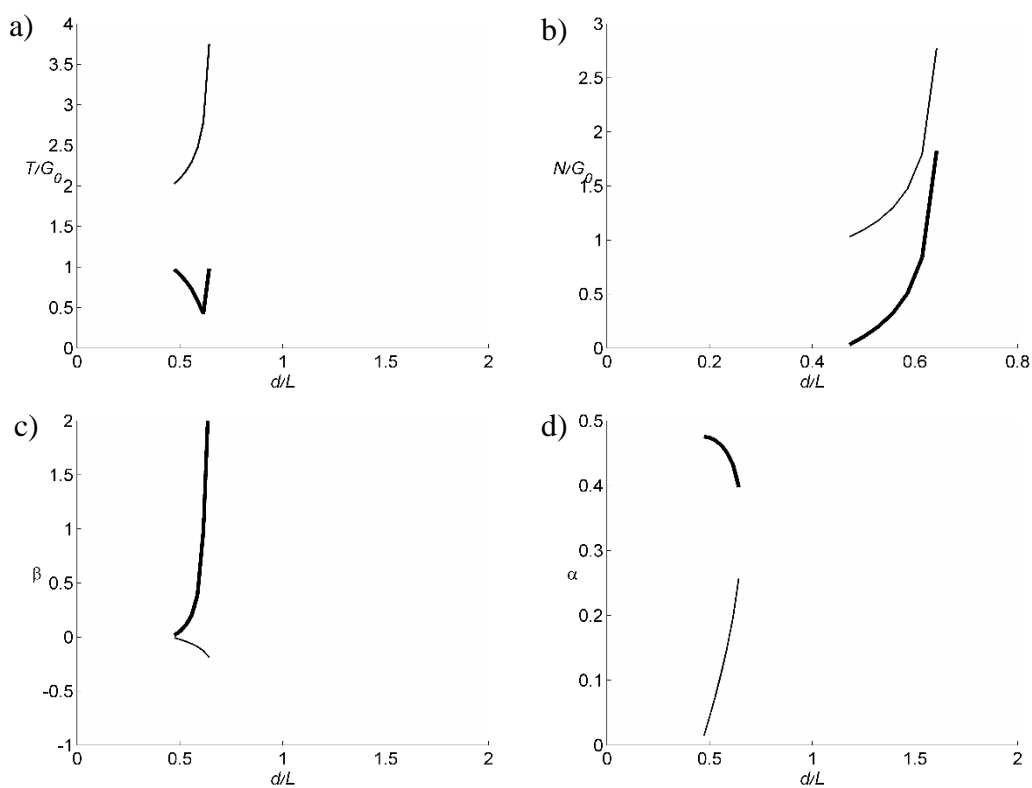
Slika 44. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 2$ ;  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



Slika 45. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 0,1$ ;  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).

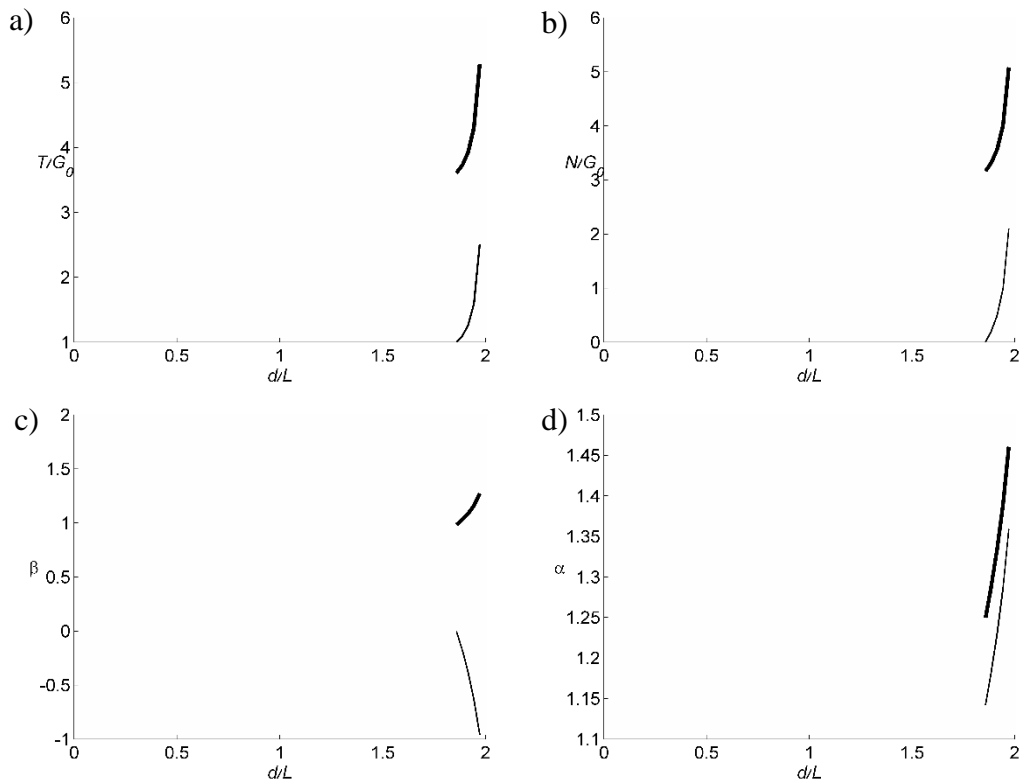


Slika 46. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 1$ ;  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).

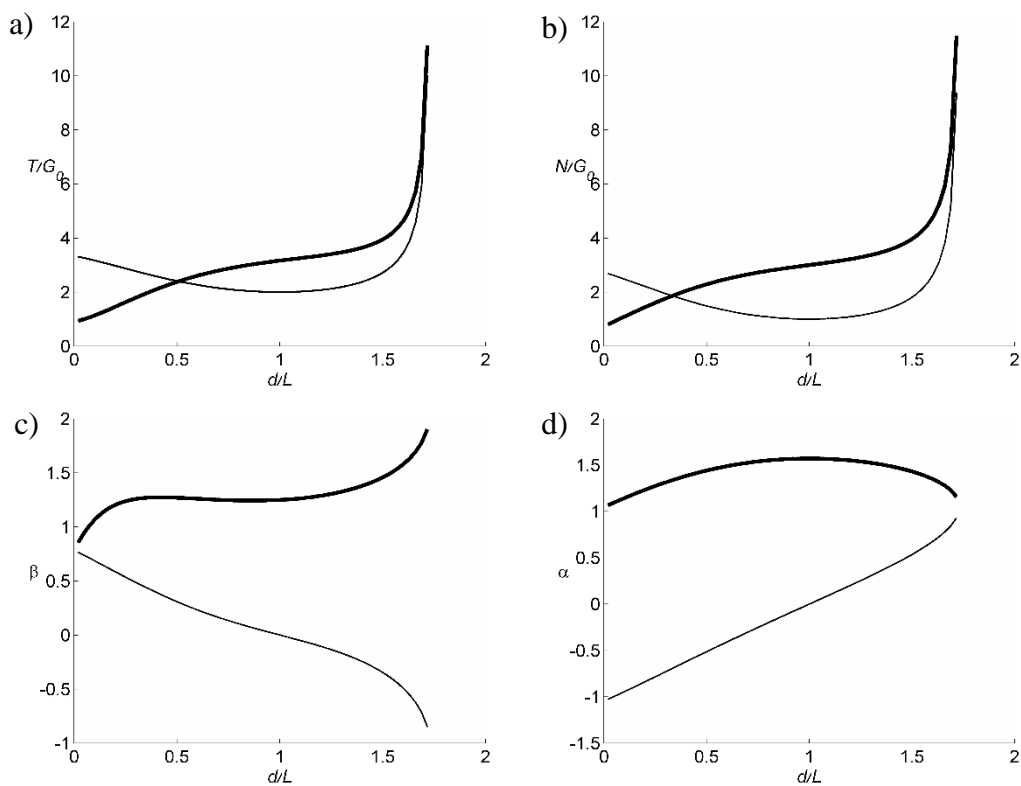


Slika 47. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 2$ ;  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).

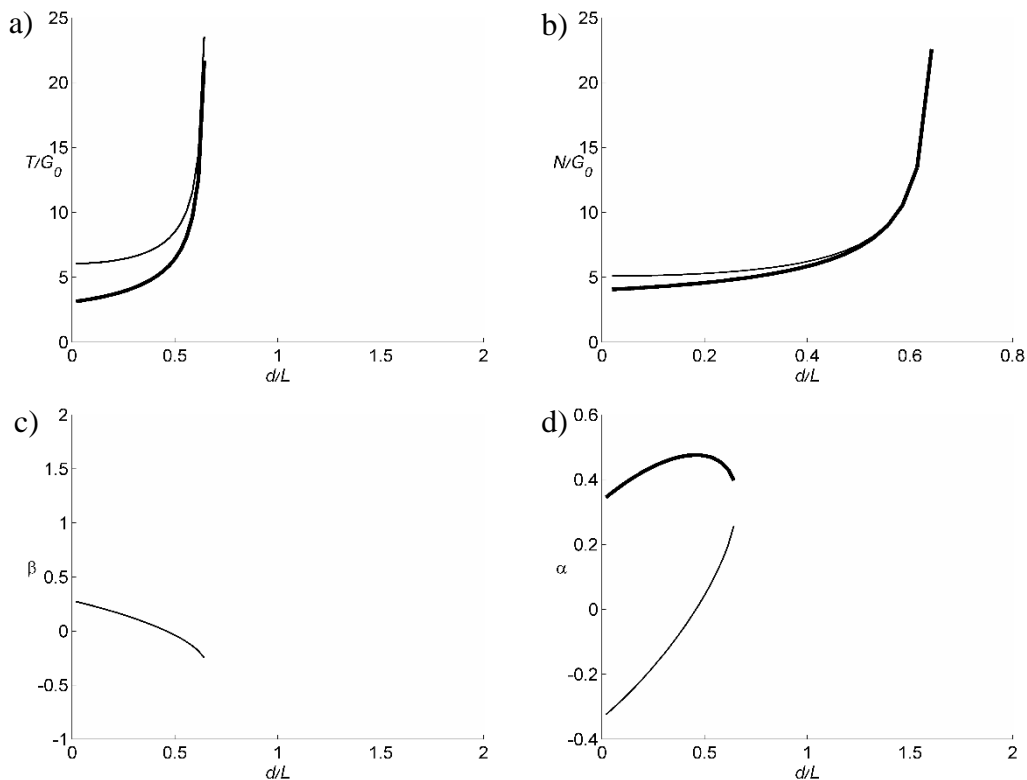




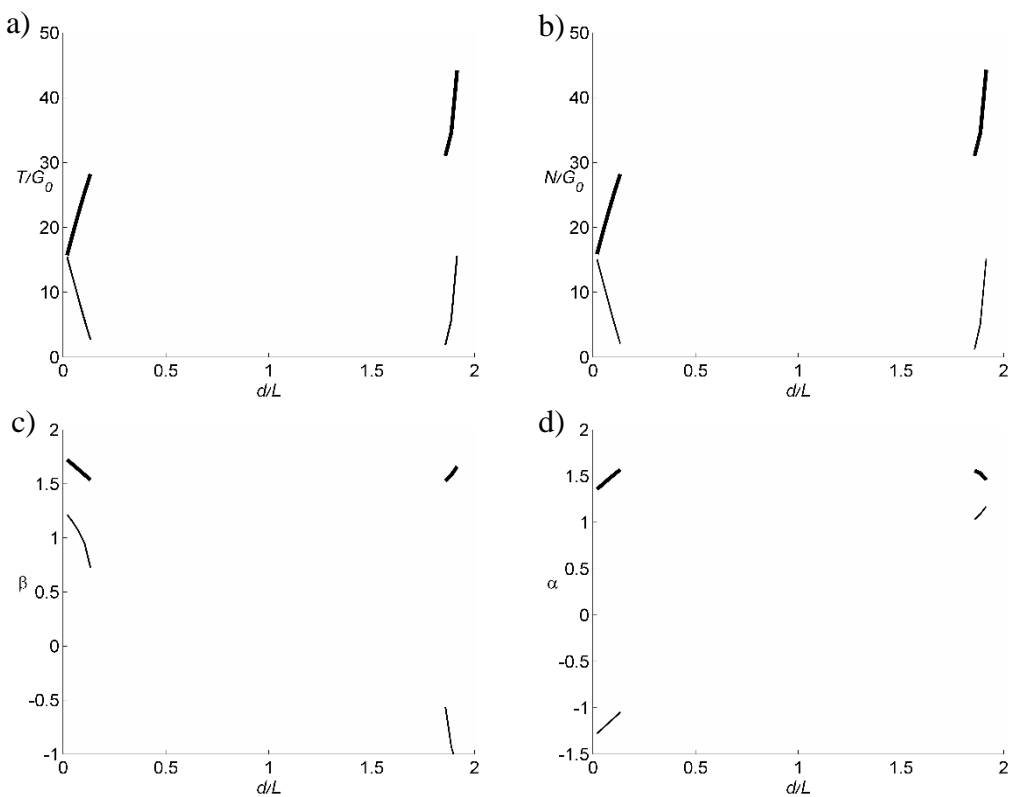
Slika 48. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 0,1$ ;  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



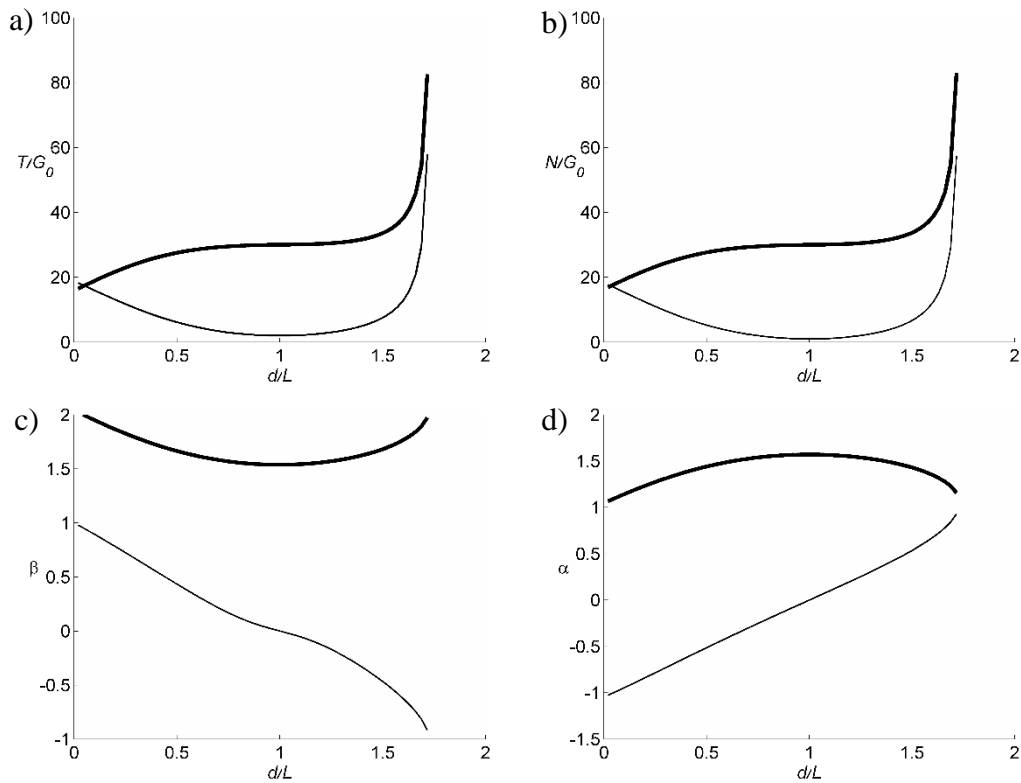
Slika 49. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 1$ ;  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



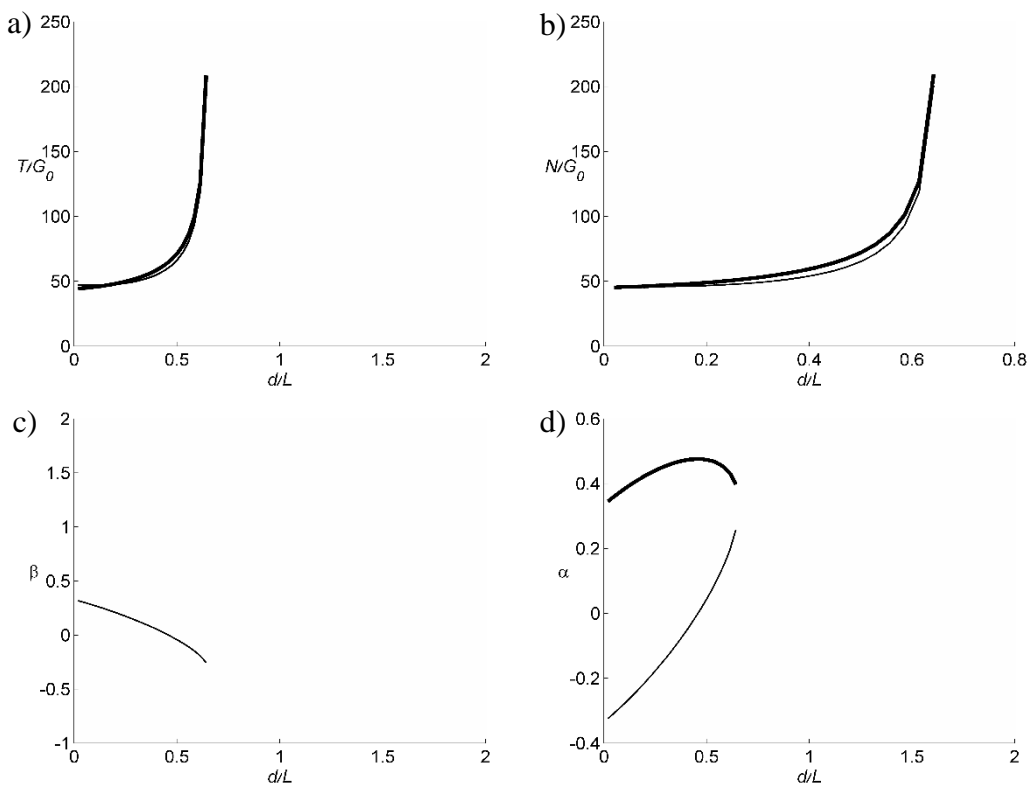
Slika 50. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 2$ ;  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



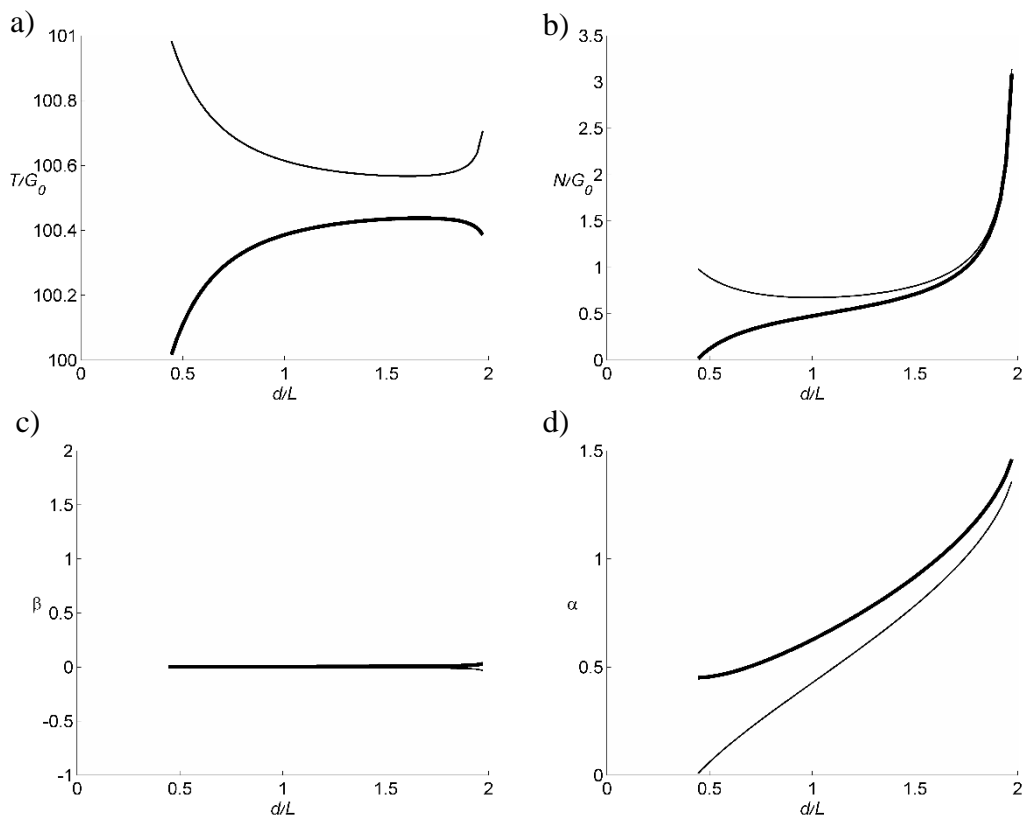
Slika 51. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 0,5$ ;  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



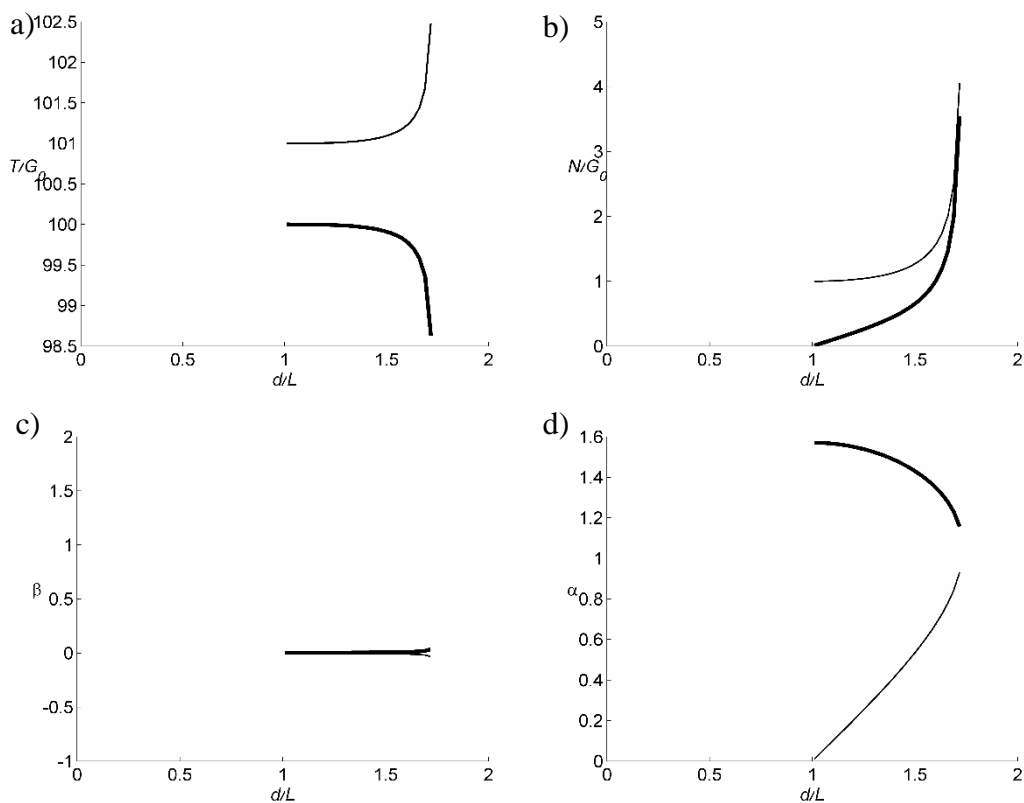
Slika 52. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 1$ ;  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



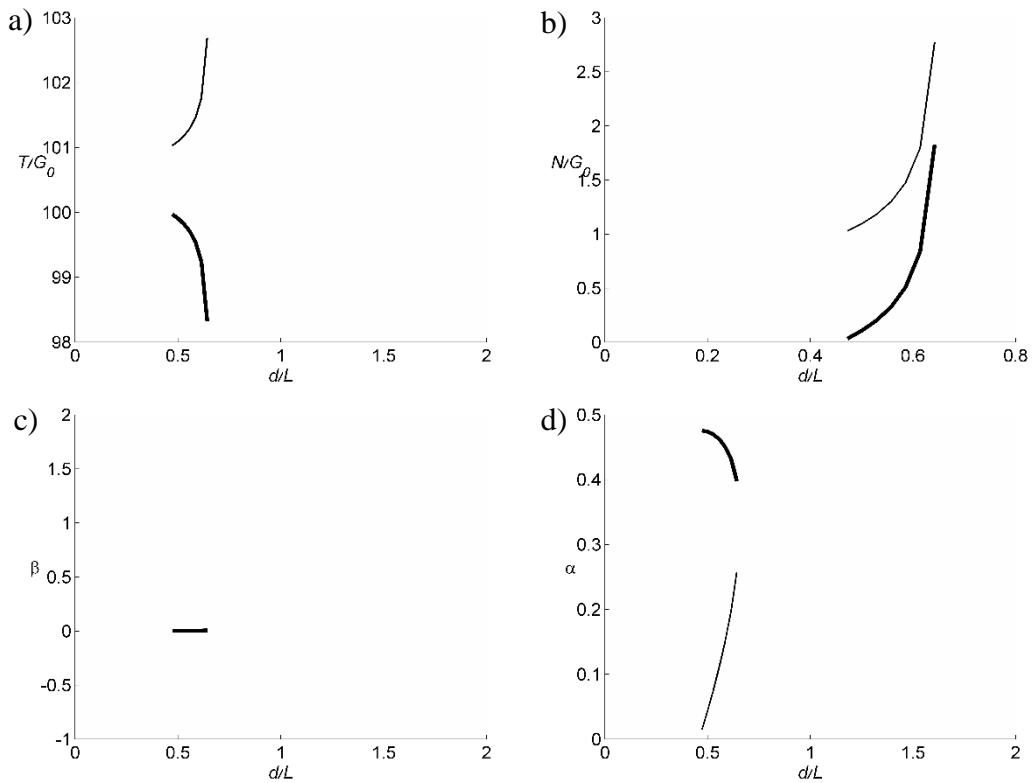
Slika 53. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 2$ ;  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



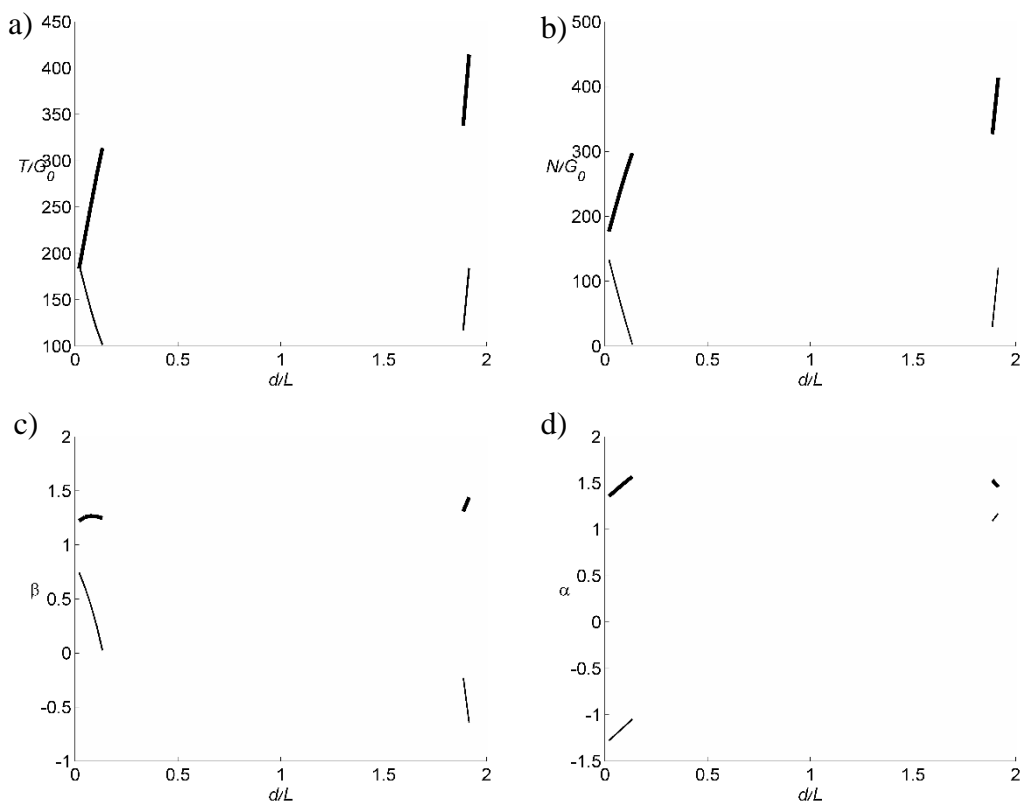
Slika 54. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 0,1$ ;  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



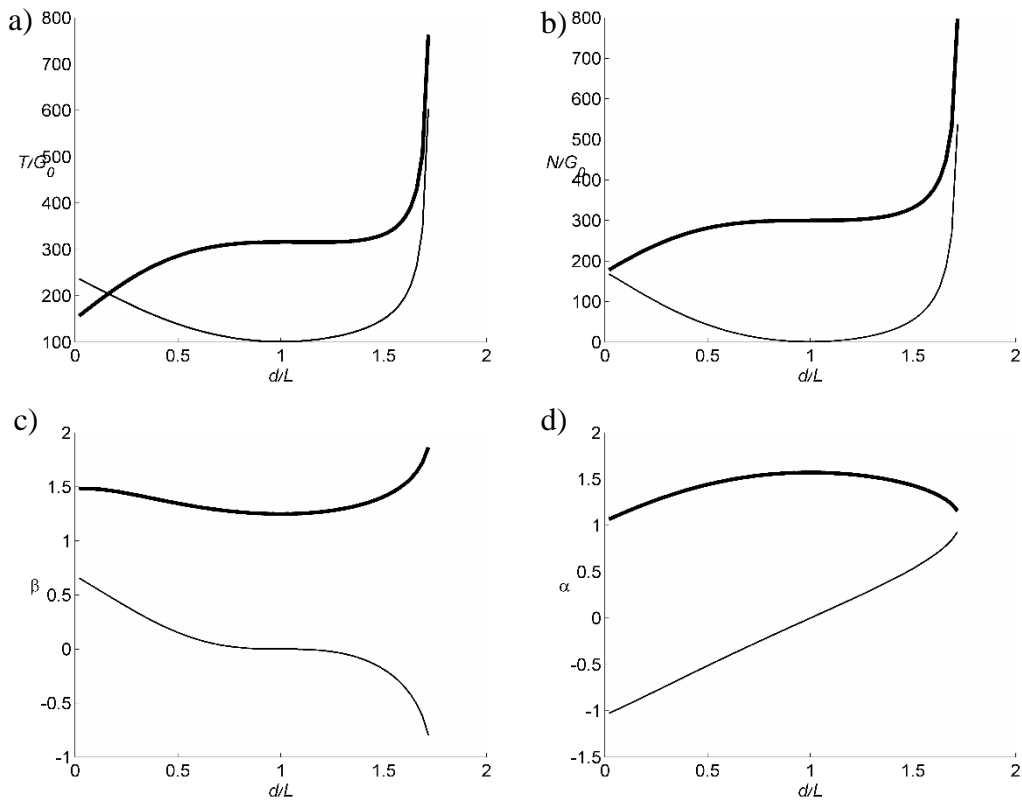
Slika 55. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 1$ ;  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



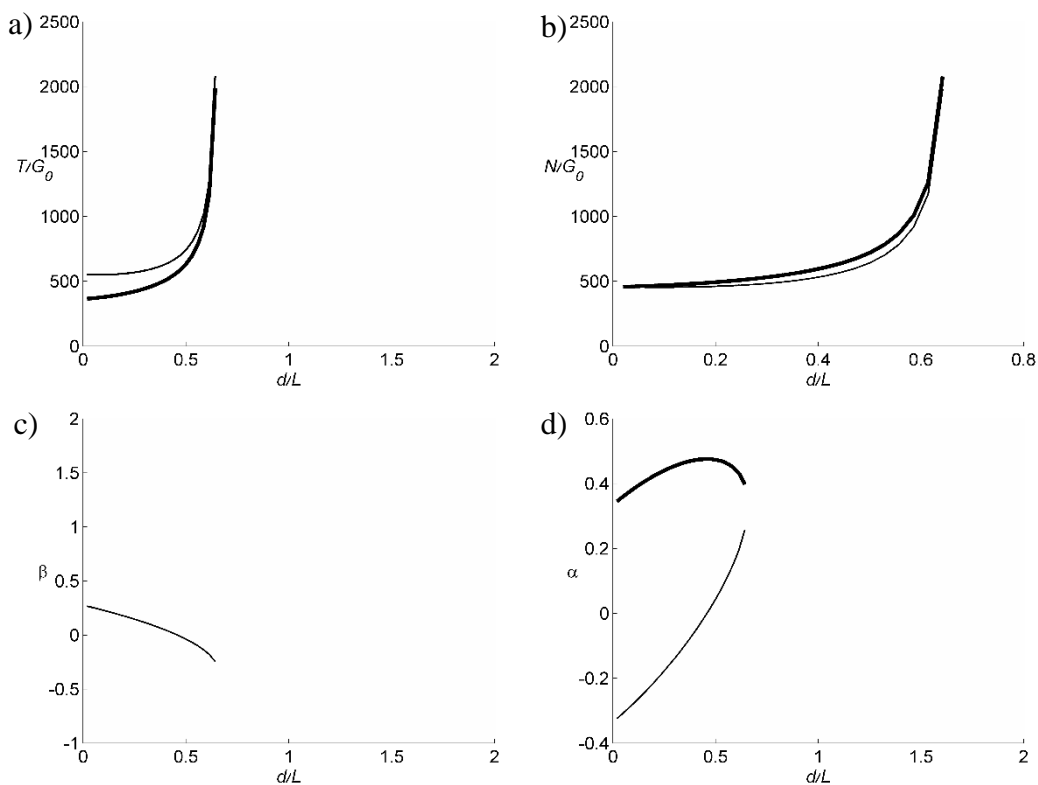
Slika 56. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 2$ ;  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



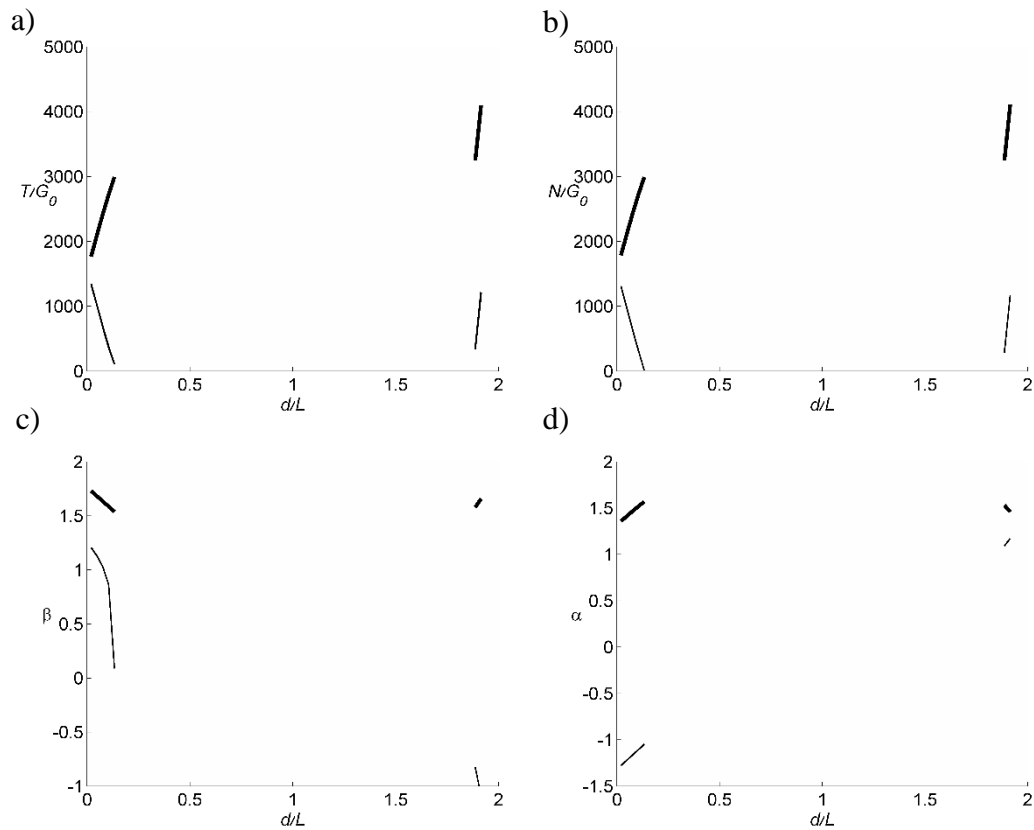
Slika 57. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 0,5$ ;  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



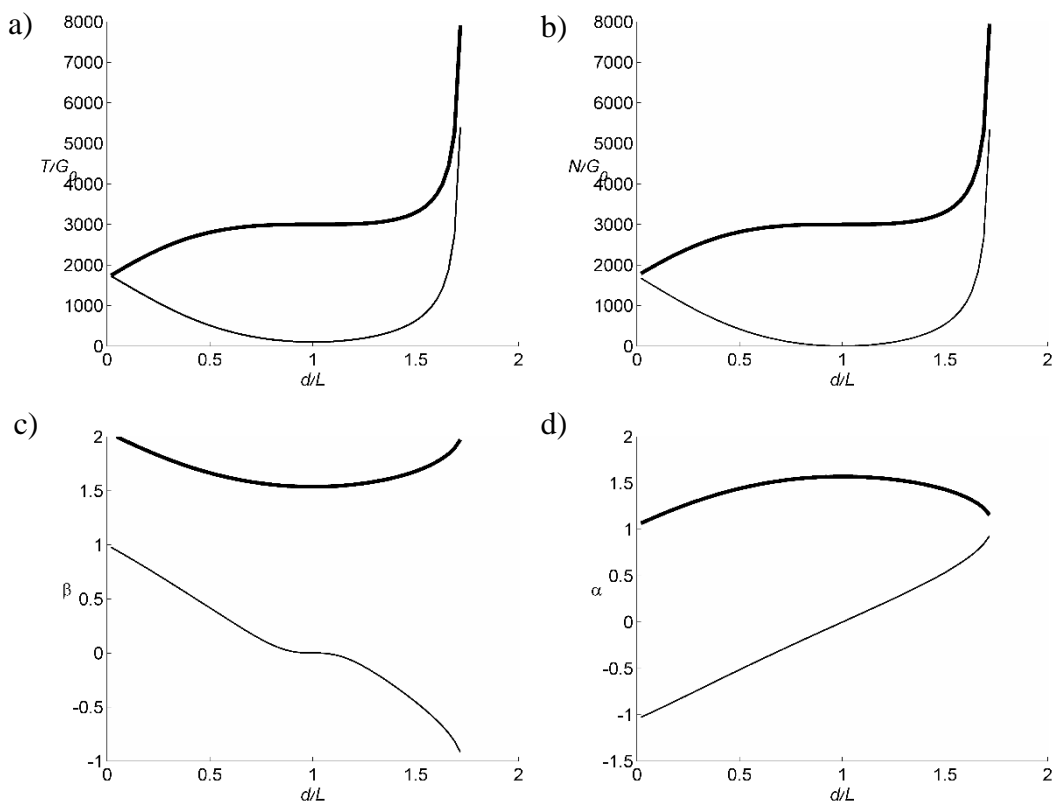
Slika 58. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 1$ ;  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



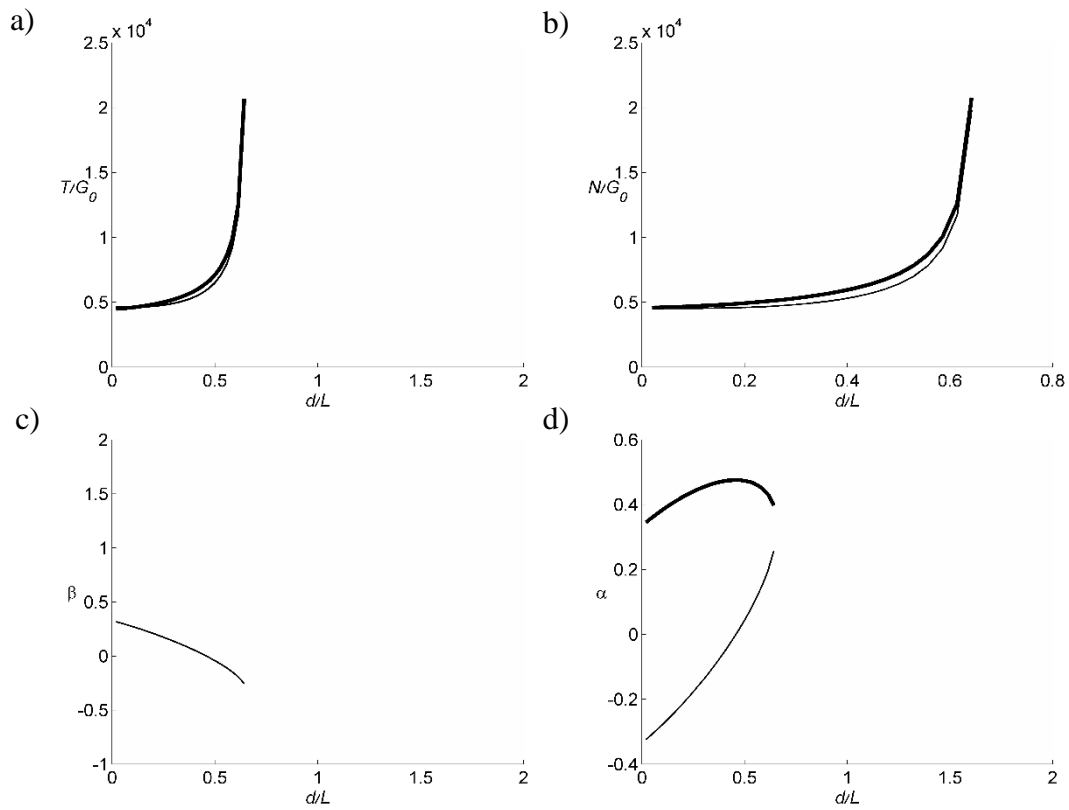
Slika 59. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 2$ ;  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



Slika 60. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 0,5$ ;  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



Slika 61. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 1$ ;  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



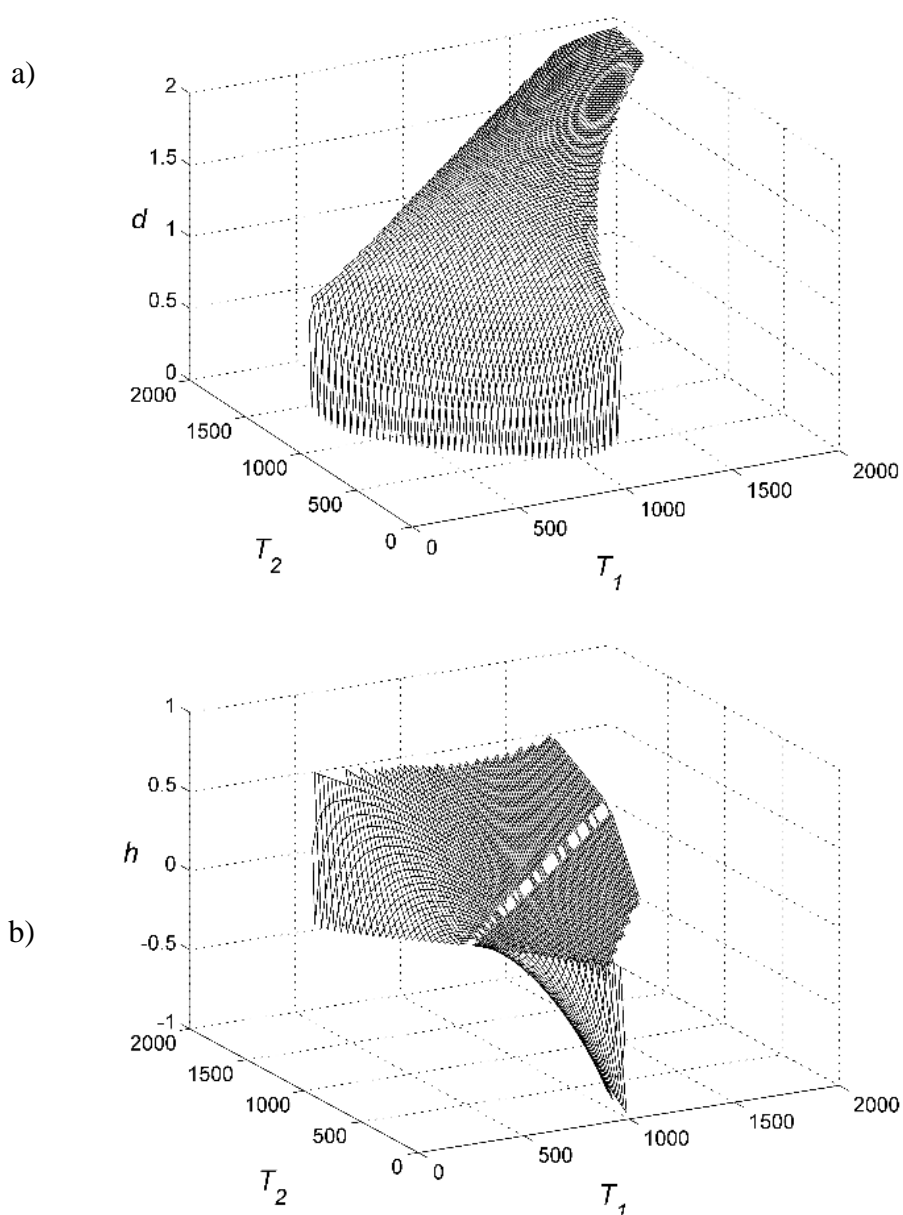
Slika 62. Parametri sustava u ovisnosti o  $d/L$  a)  $T_{1,2}$ ; b)  $N_{1,2}$ ; c)  $\beta_{1,2}$  i d)  $\alpha_{1,2}$  pri  $h = 2$ ;  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ . Deblja (tanja) krivulja označava letjelicu 1(2).



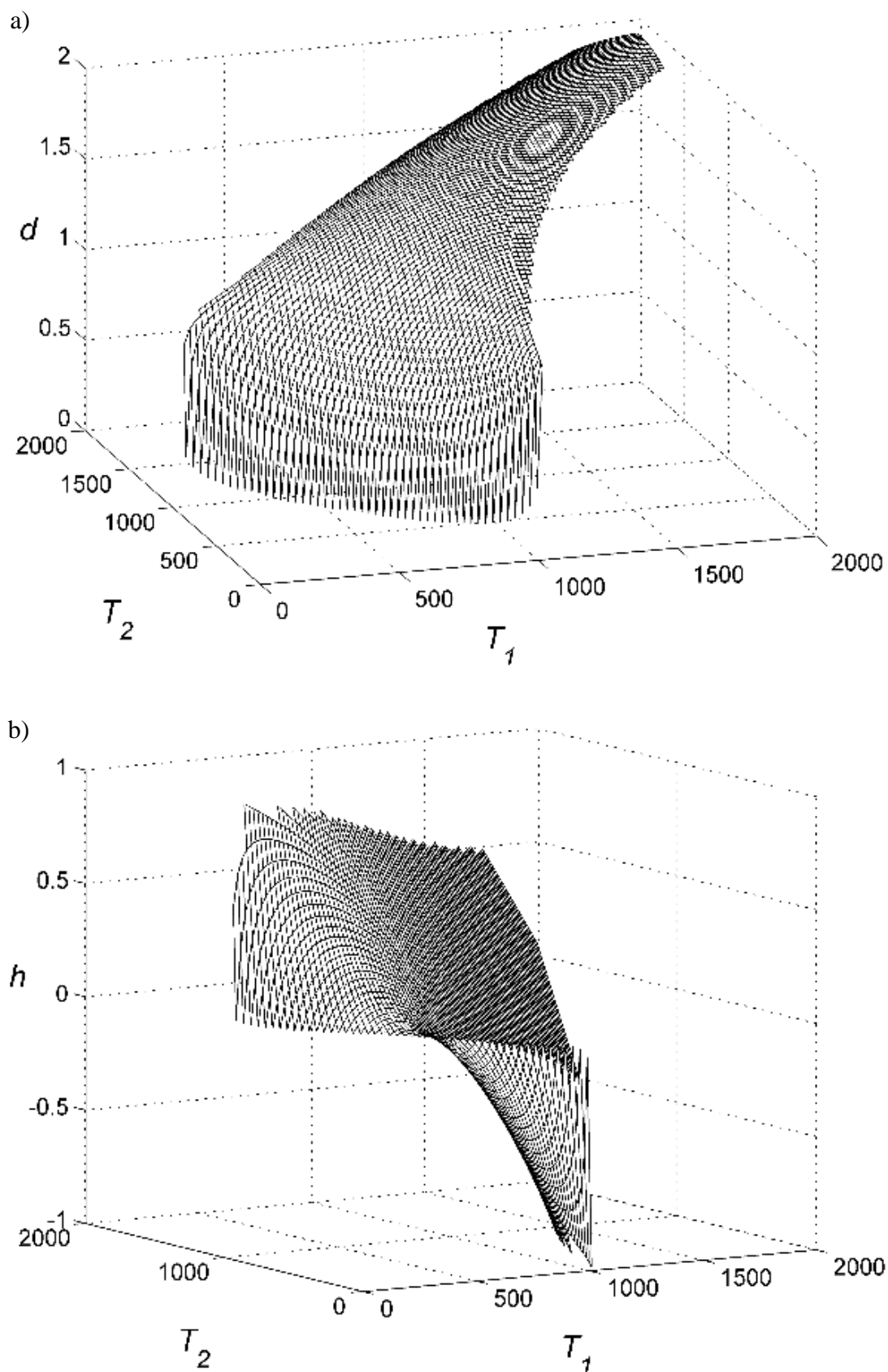
## 8.2 Upravljanje iznosima potisaka

Upravljanje iznosima potisaka ostvaruje se promjenama potisaka letjelica  $T_{1,2}$  u različitim režimima leta ( $\psi = 0 - \pi/2$ ) pri različitim omjerima masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ). U razmatranom slučaju analiziran je međusobni položaj letjelica 1 i 2.

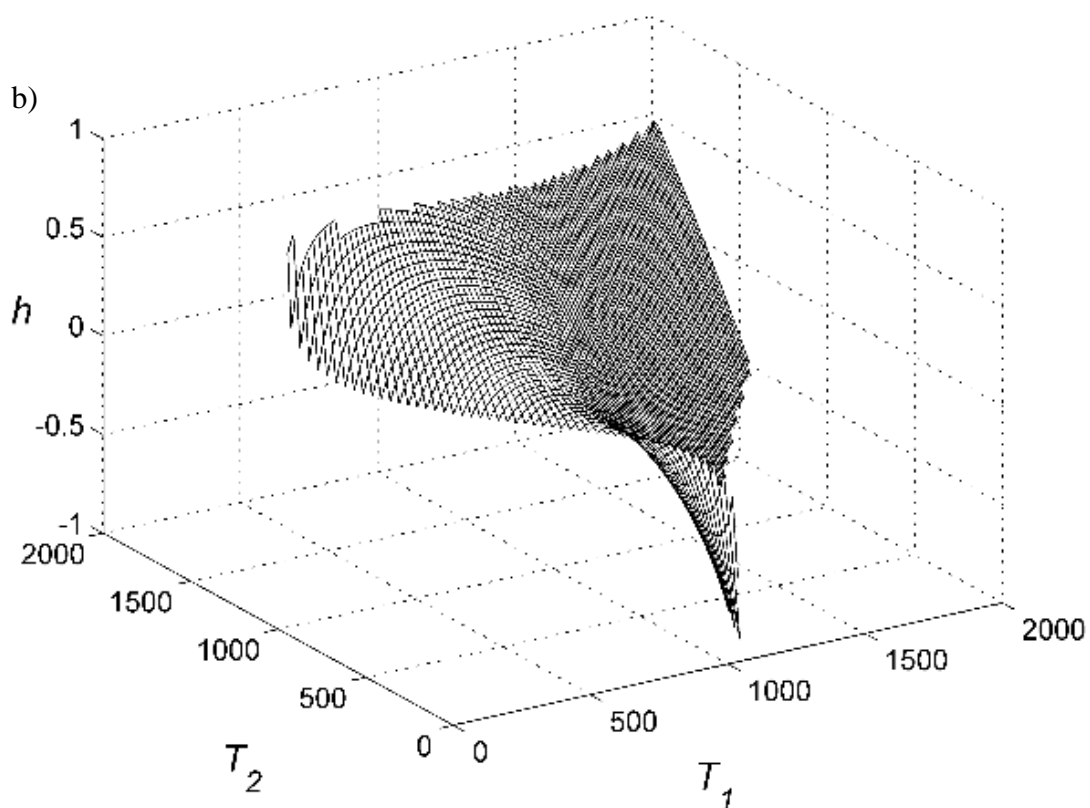
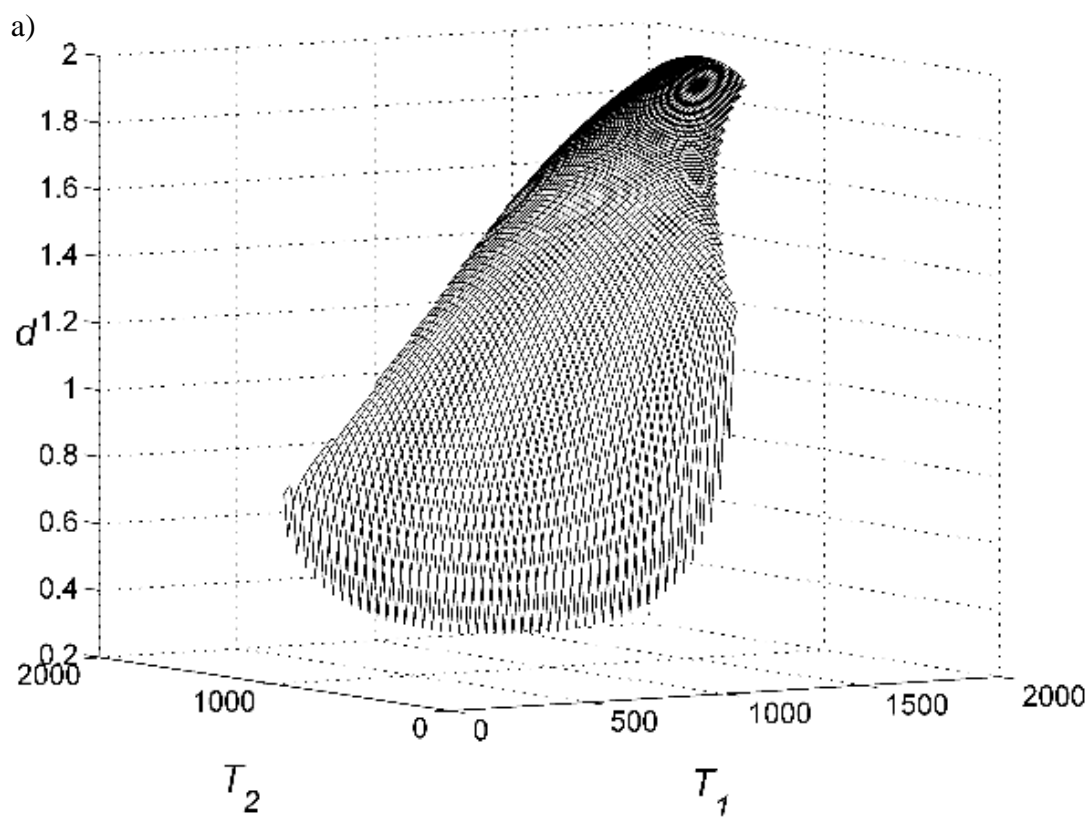
U nastavku su prikazane dijagramske ovisnosti iznosa horizontalne ( $d$ ) i vertikalne ( $h$ ) udaljenosti za različite iznose potisaka  $T_{1,2}$ . Detaljna analiza sustava razrađena je u poglavlju *Diskusija* na stranici 183. Tablični prikazi rezultata istraživanja prikazani su u *Prilogu* na stranici 200.



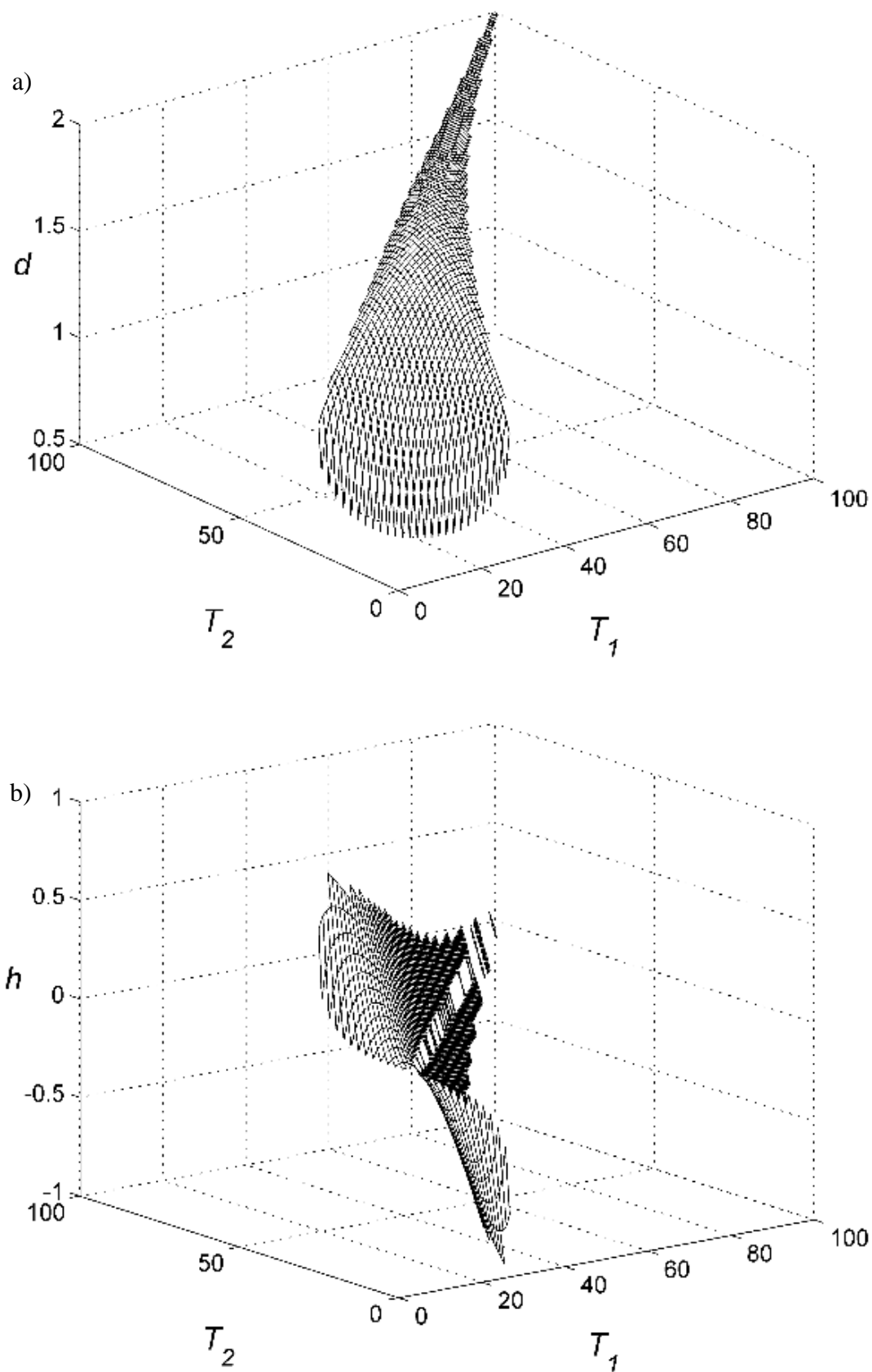
Slika 63. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o  $T_1$  i  $T_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0$ .



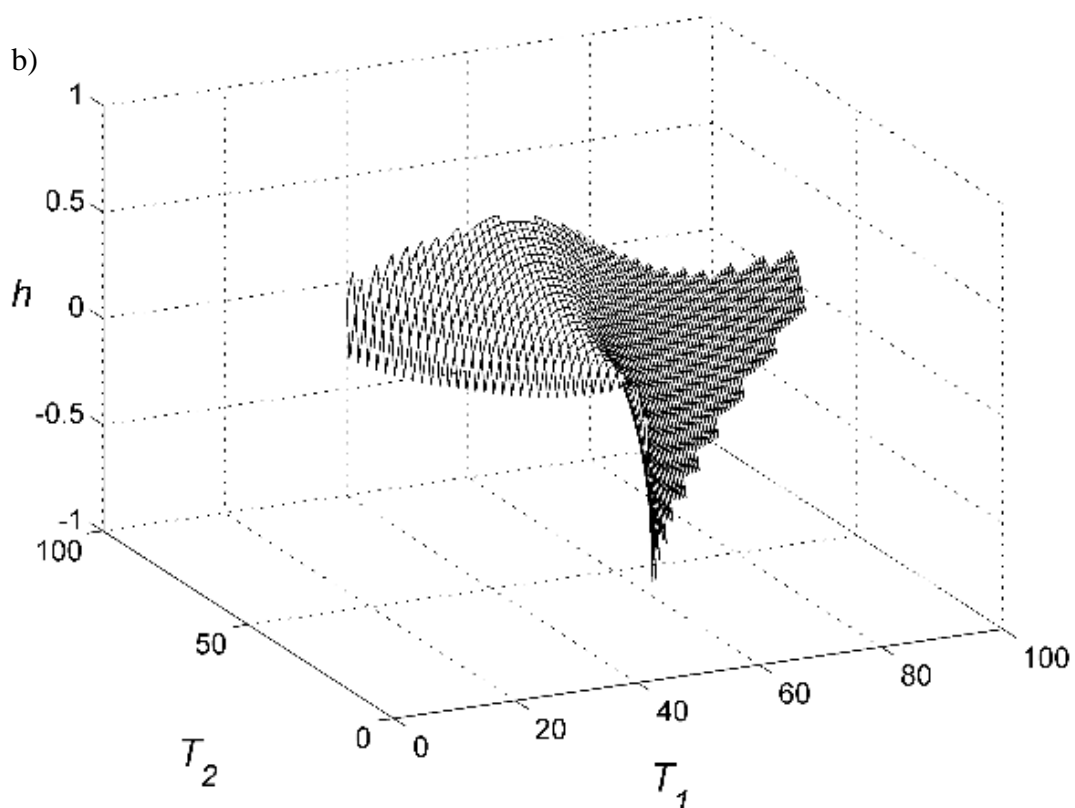
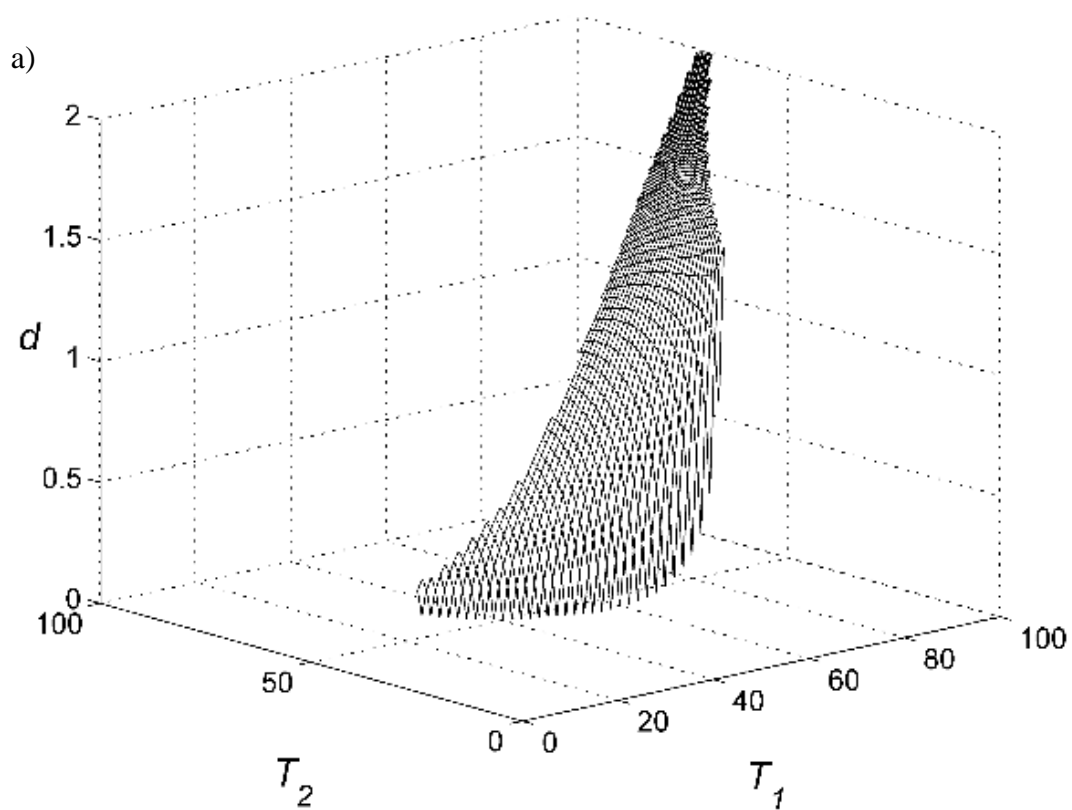
Slika 64. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o  $T_1$  i  $T_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0$ .



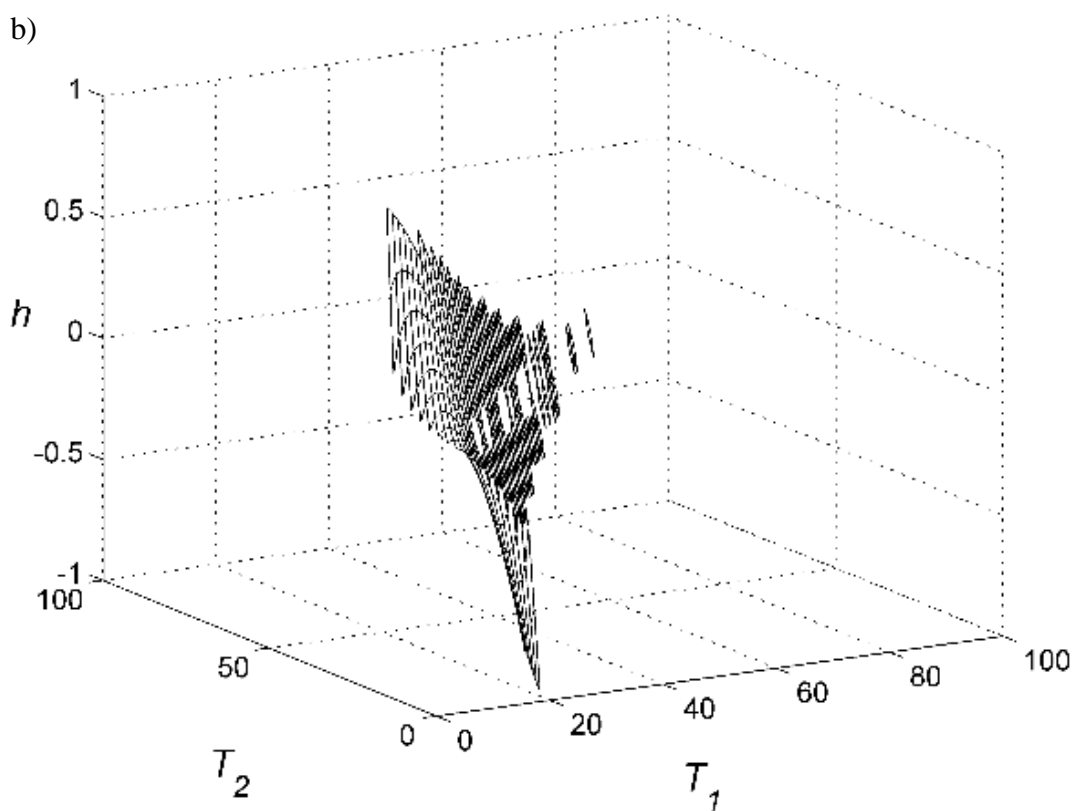
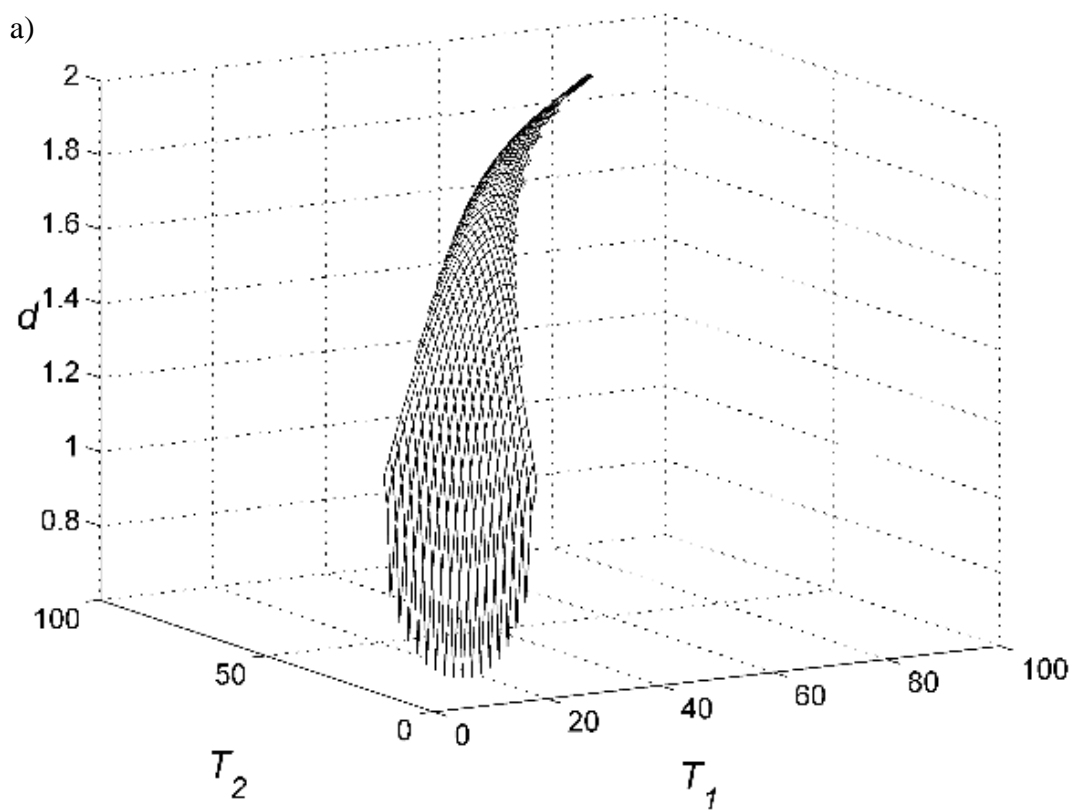
Slika 65. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o  $T_1$  i  $T_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0$ .



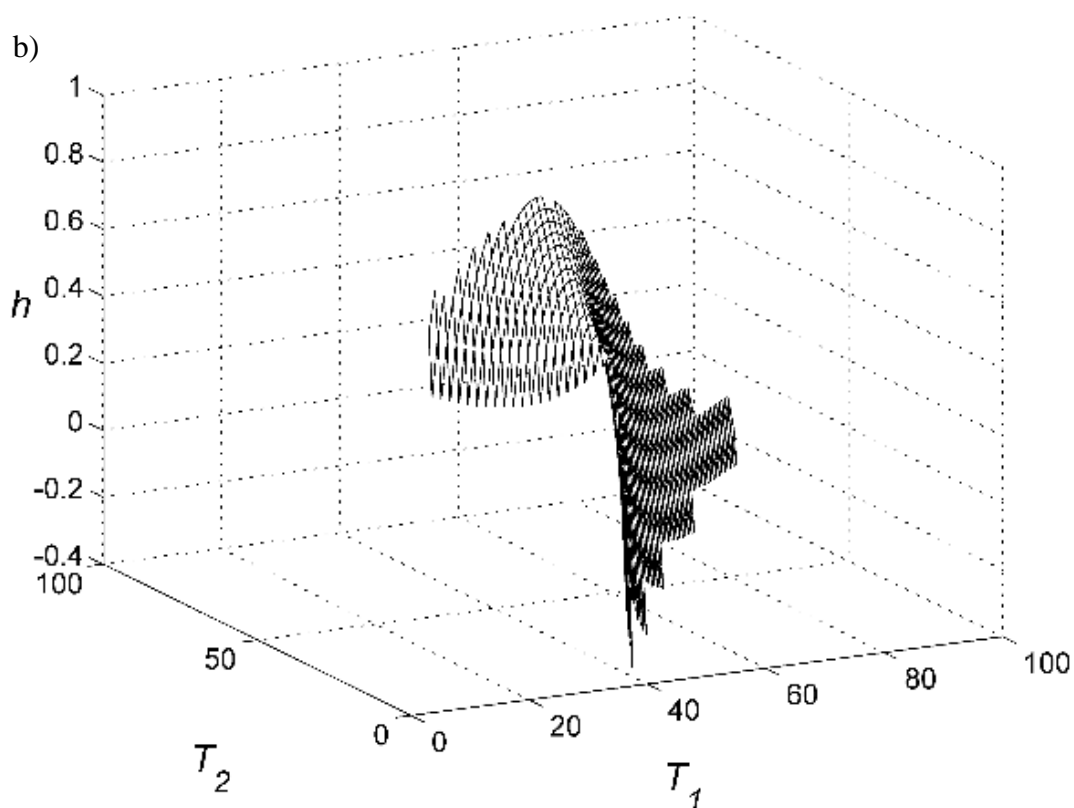
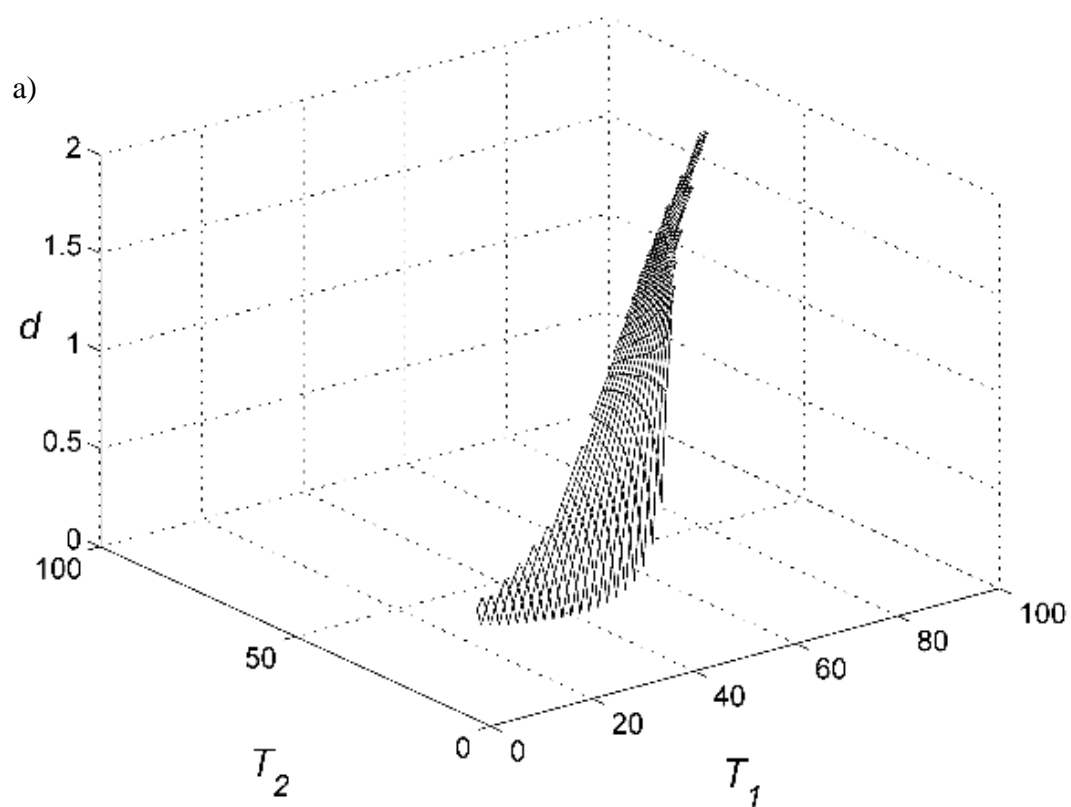
Slika 66. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o  $T_1$  i  $T_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .



Slika 67. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o  $T_1$  i  $T_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .



Slika 68. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o  $T_1$  i  $T_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

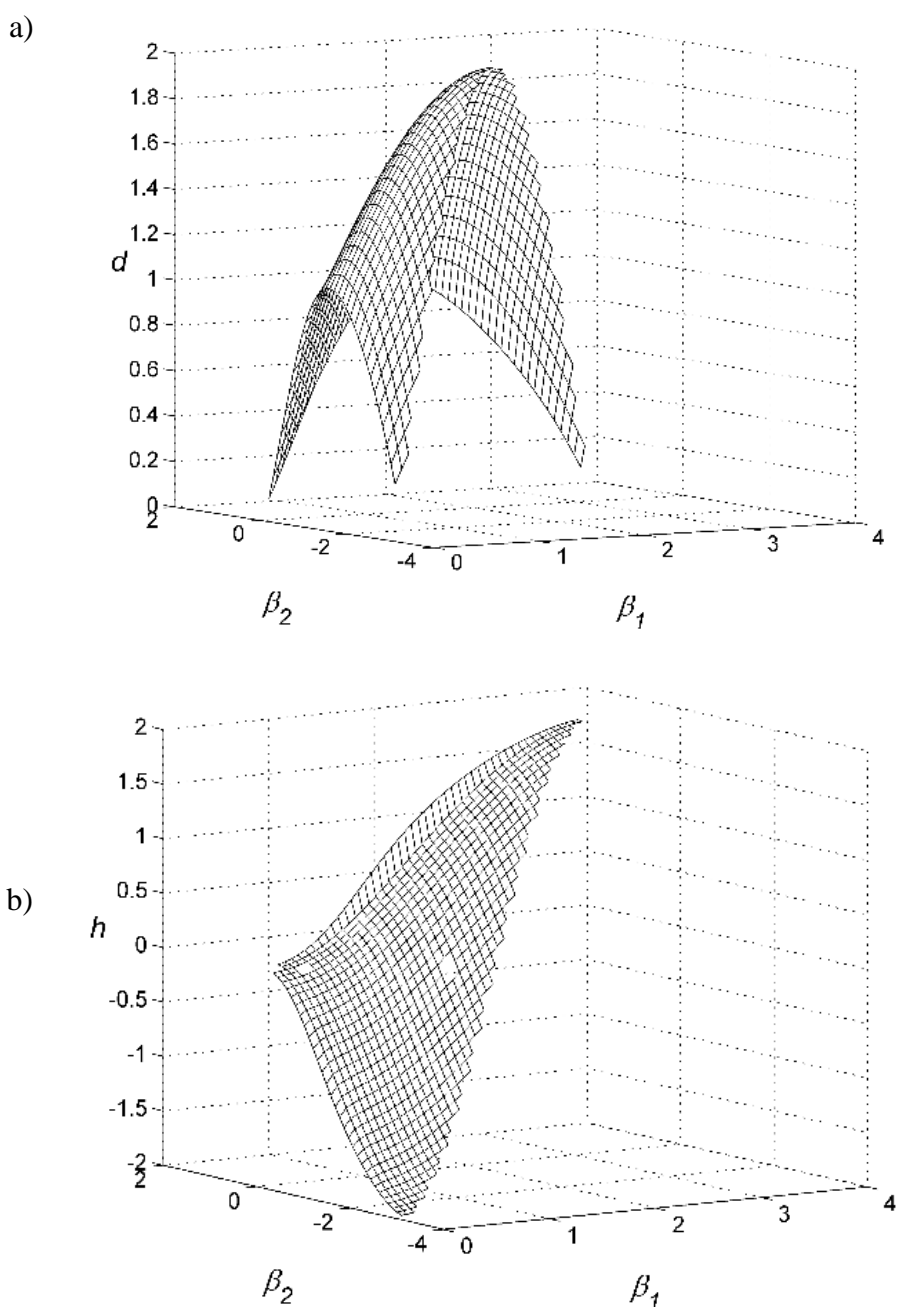


Slika 69. Geometrijske udaljenosti između letjelica u ovisnosti o  $T_1$  i  $T_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

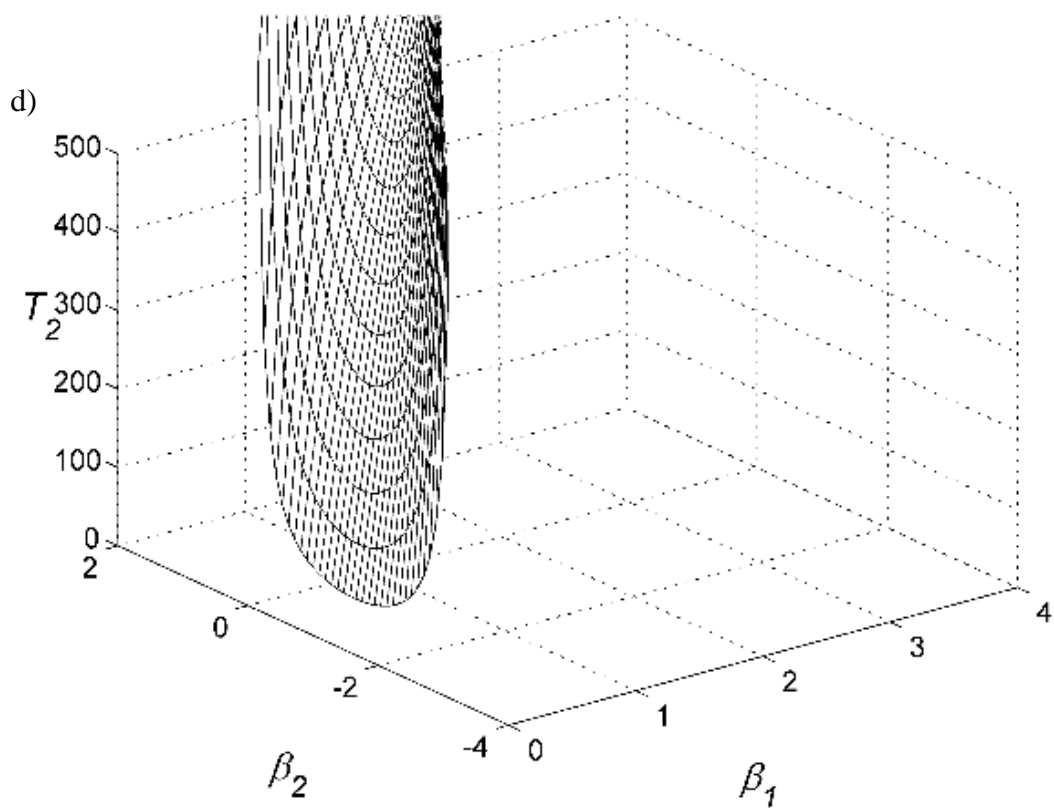
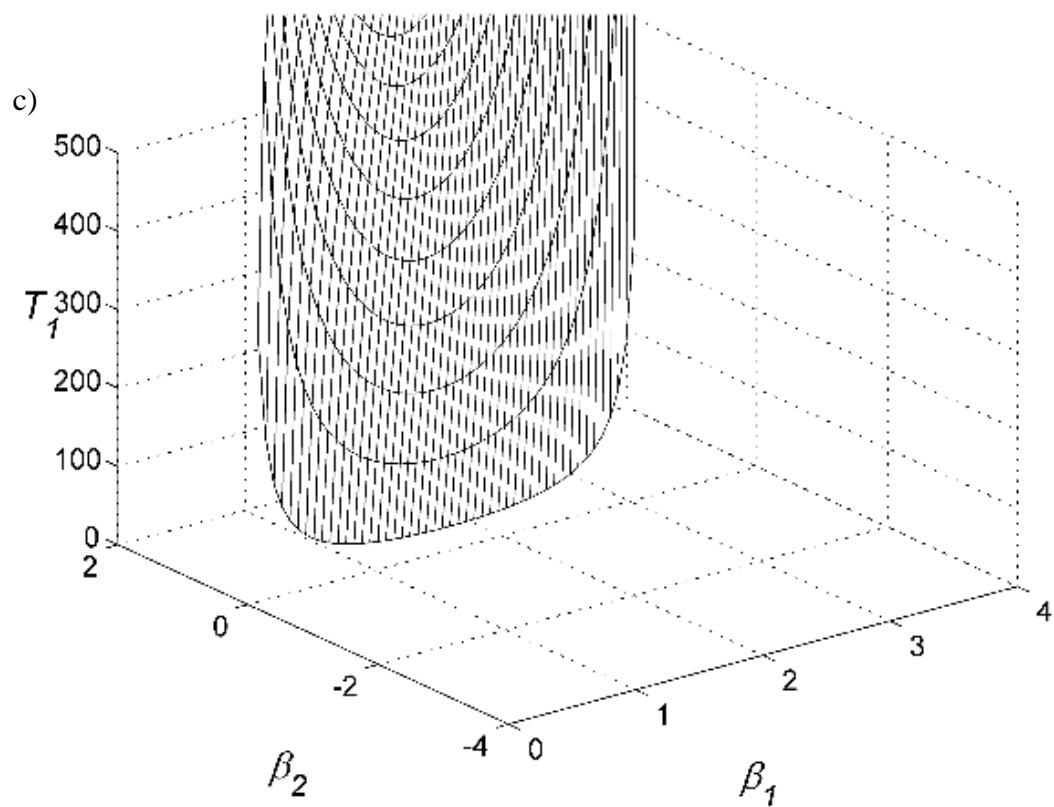
### 8.3 Upravljanje kutovima otklona potisaka

Upravljanje iznosima kutova potisaka ostvaruje se promjenama kutova otklona  $\beta_{1,2}$  u različitim režimima leta ( $\psi = 0 - \pi/2$ ) pri različitim omjerima masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ). U razmatranom slučaju analiziran je međusobni položaj letjelica 1 i 2.

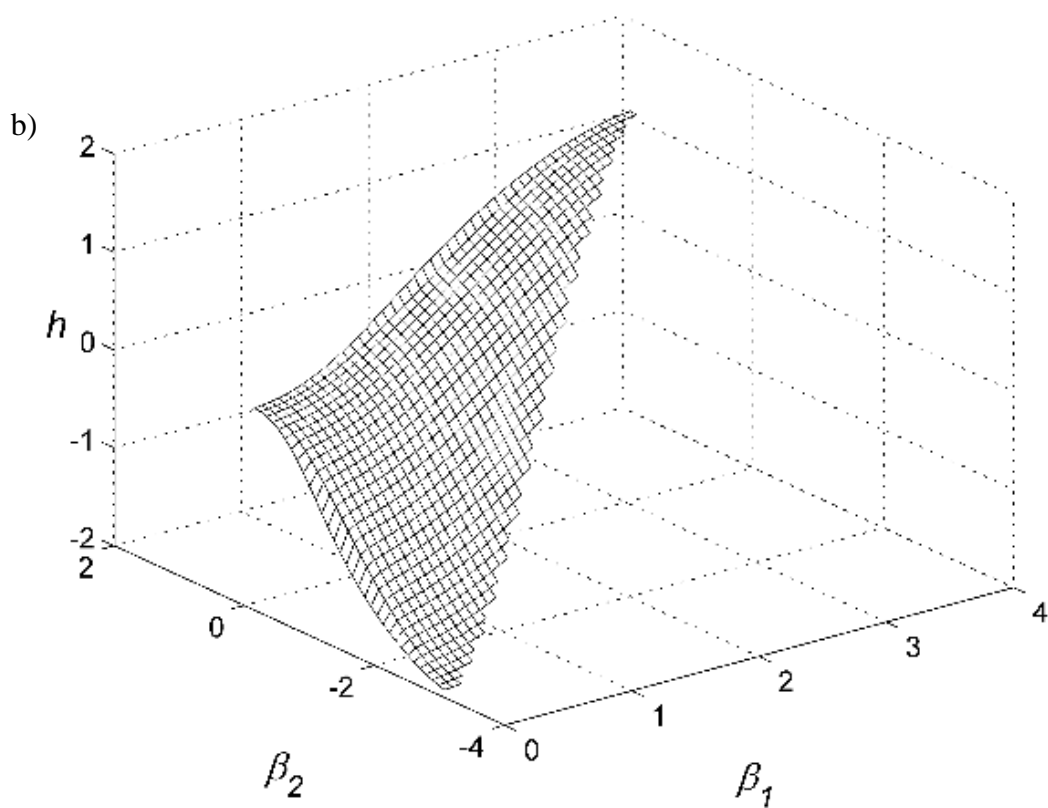
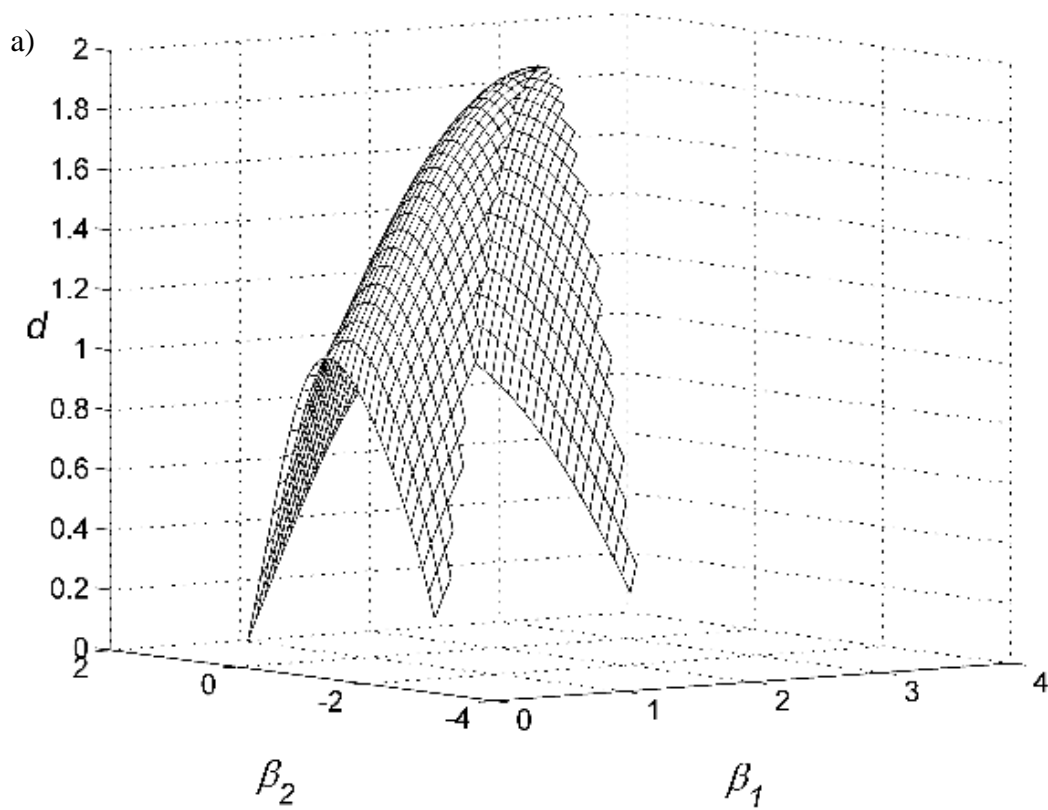
U nastavku su prikazane dijagramske ovisnosti iznosa horizontalne ( $d$ ) i vertikalne ( $h$ ) udaljenosti za različite iznose kutova otklona  $\beta_{1,2}$ . Detaljna analiza sustava razrađena je u poglavlju Diskusija na stranici 187. Tablični prikazi rezultata istraživanja prikazani su u *Prilogu* na stranici 201.

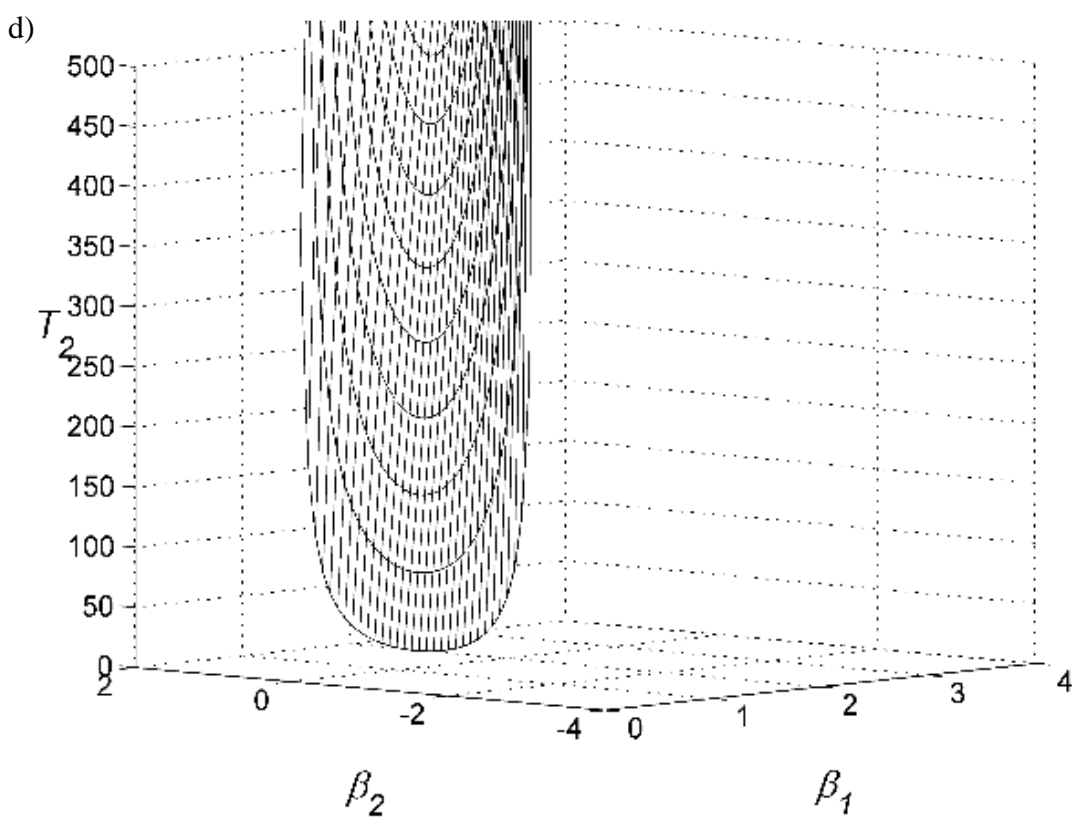
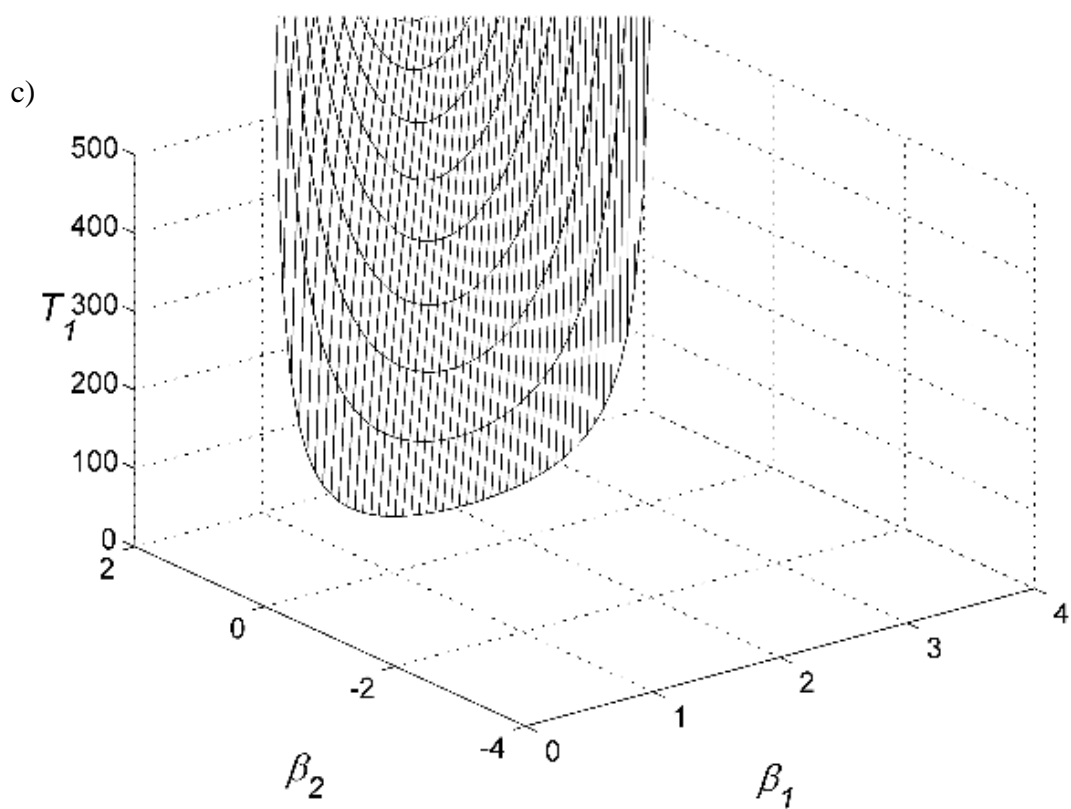




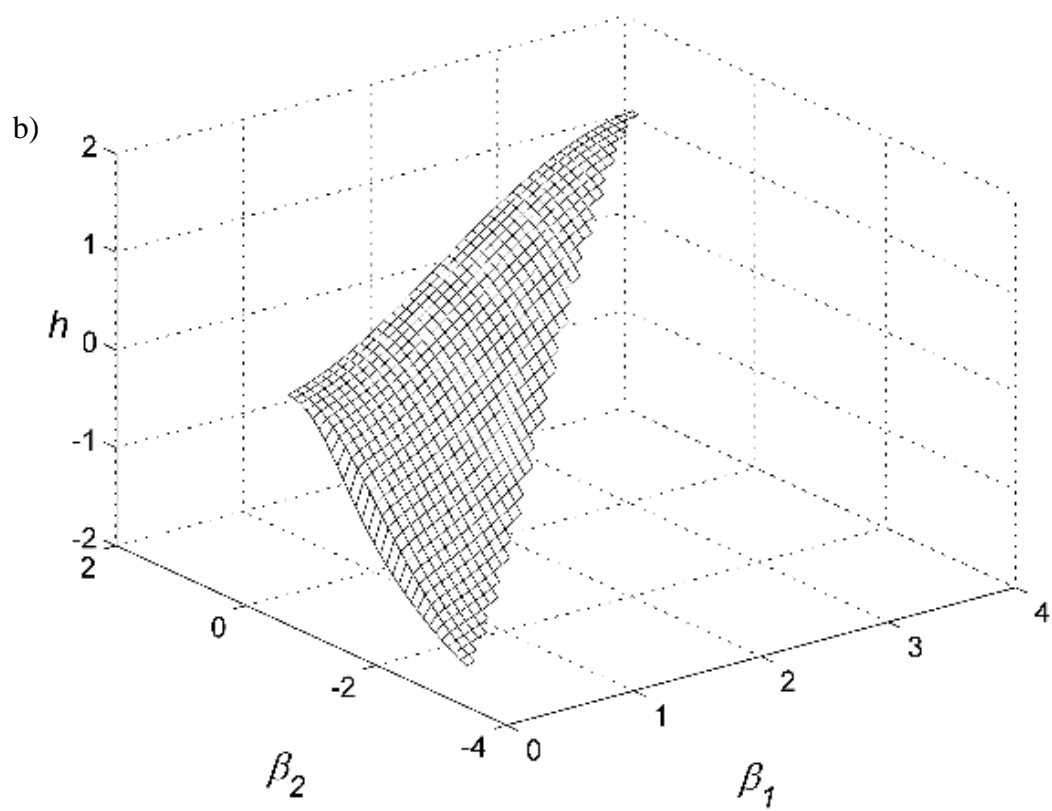
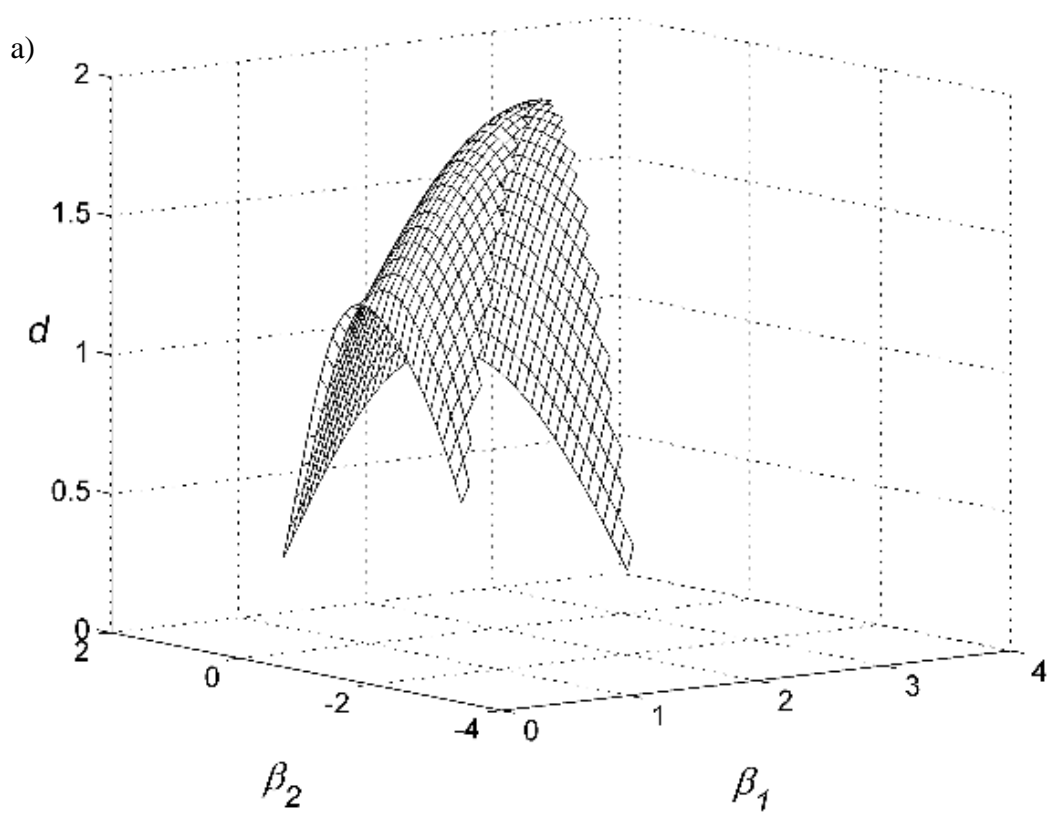


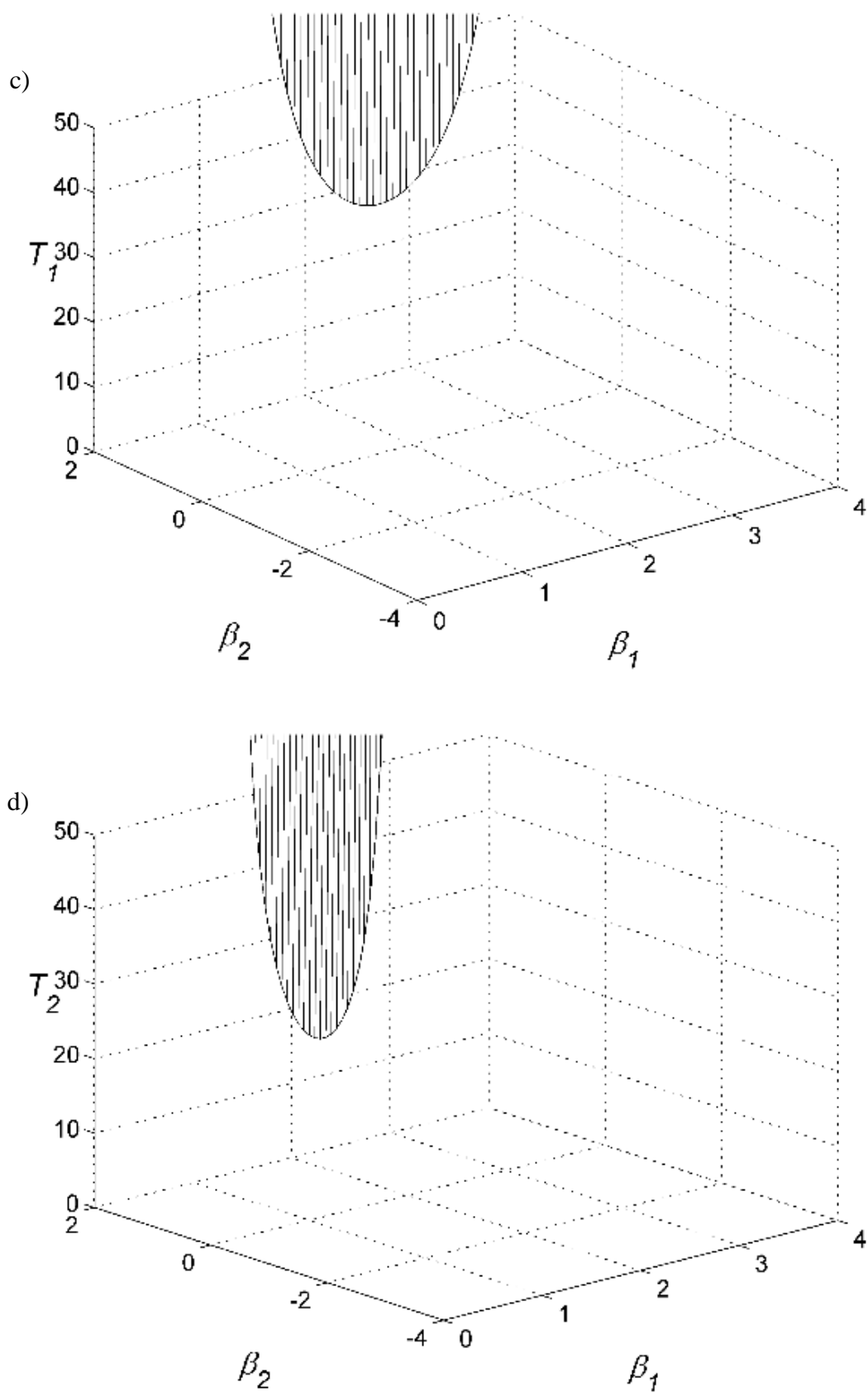
Slika 70. Parametri sustava u ovisnosti o  $\beta_1$ , i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $T_2$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .



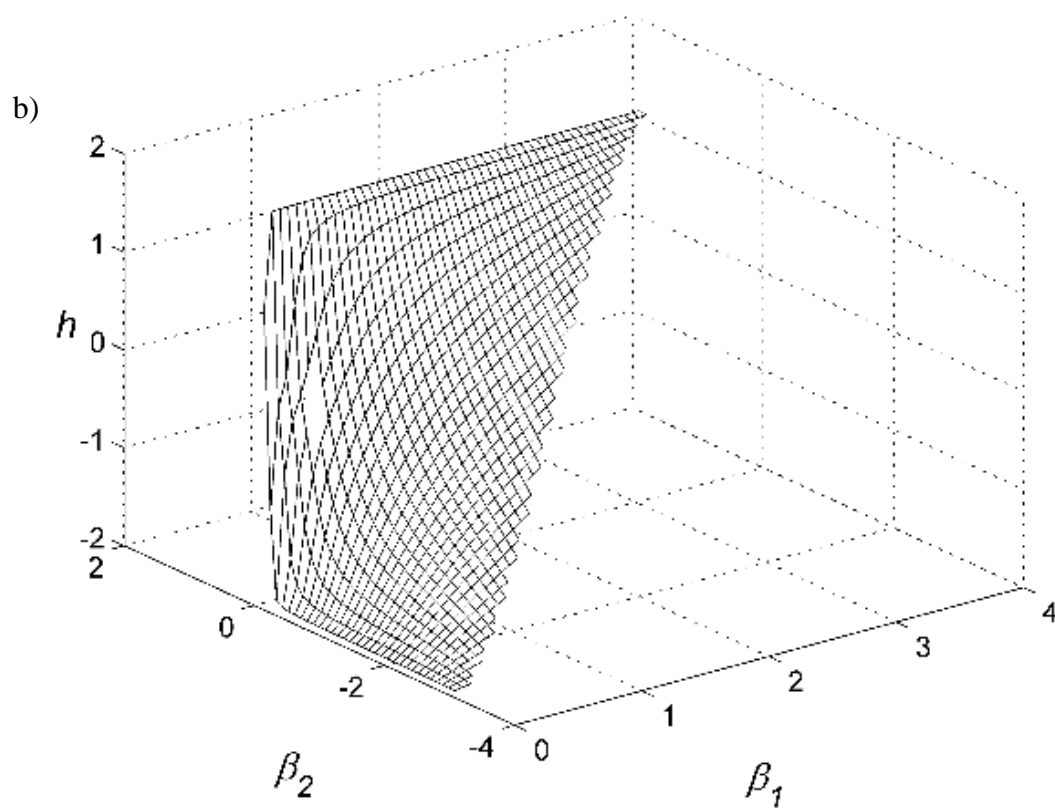
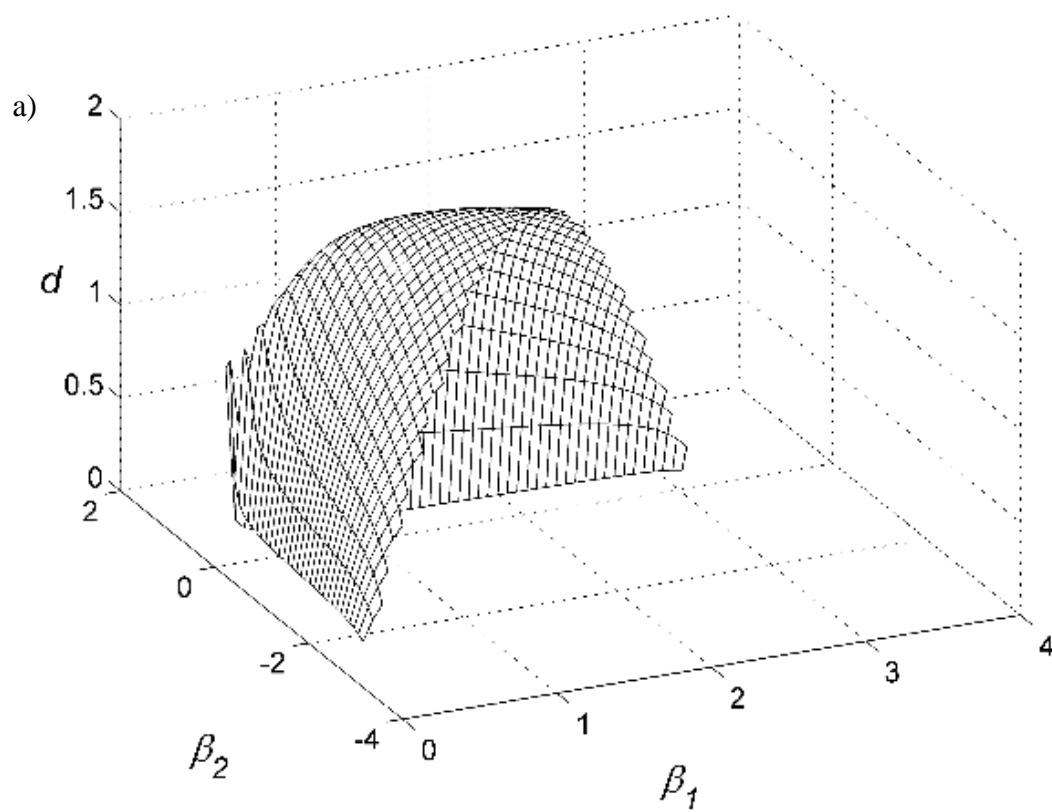


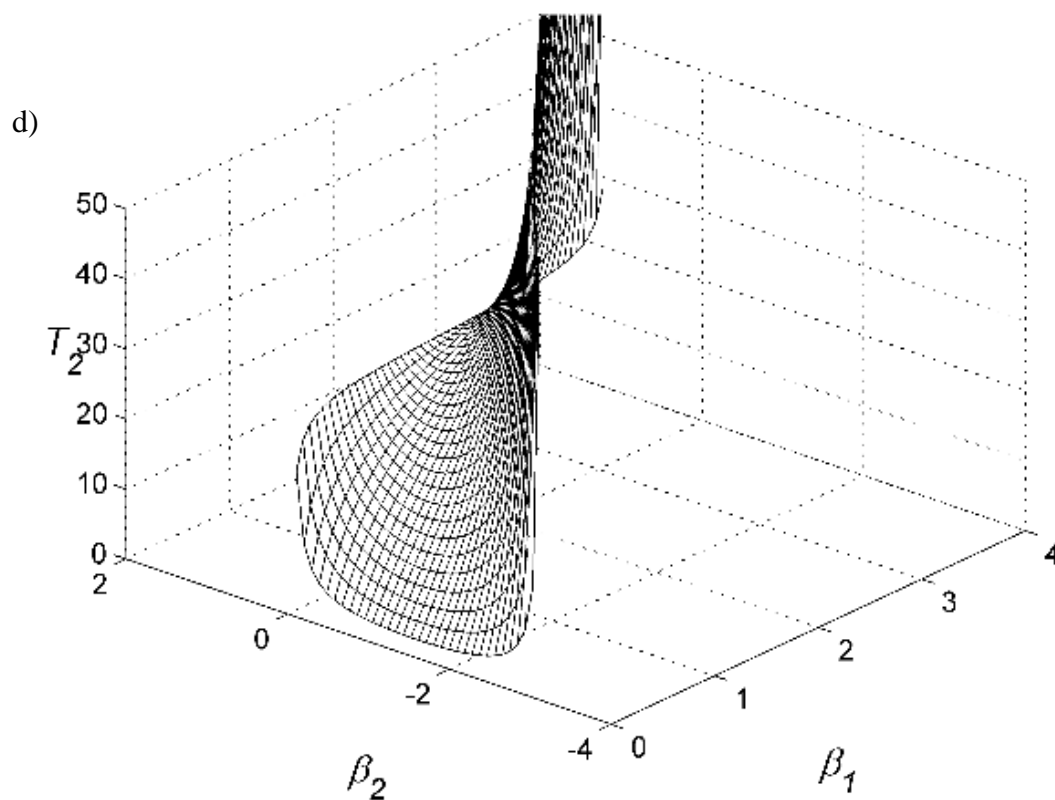
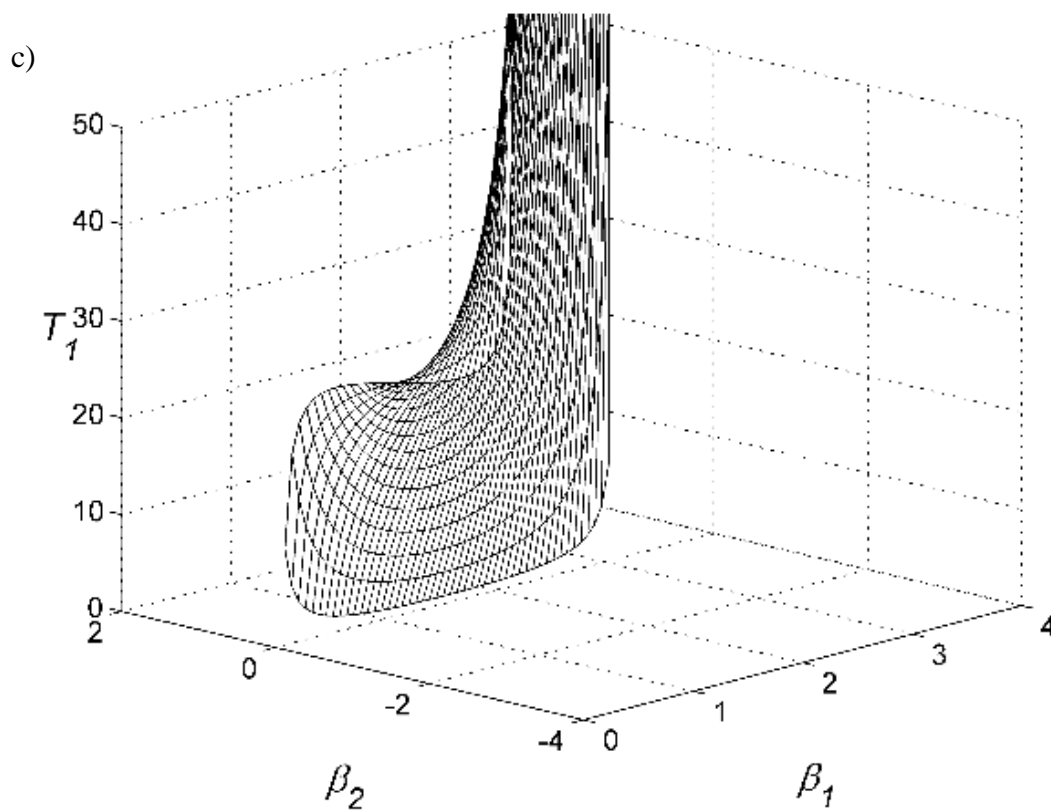
Slika 71. Parametri sustava u ovisnosti o  $\beta_1$ , i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $T_2$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .



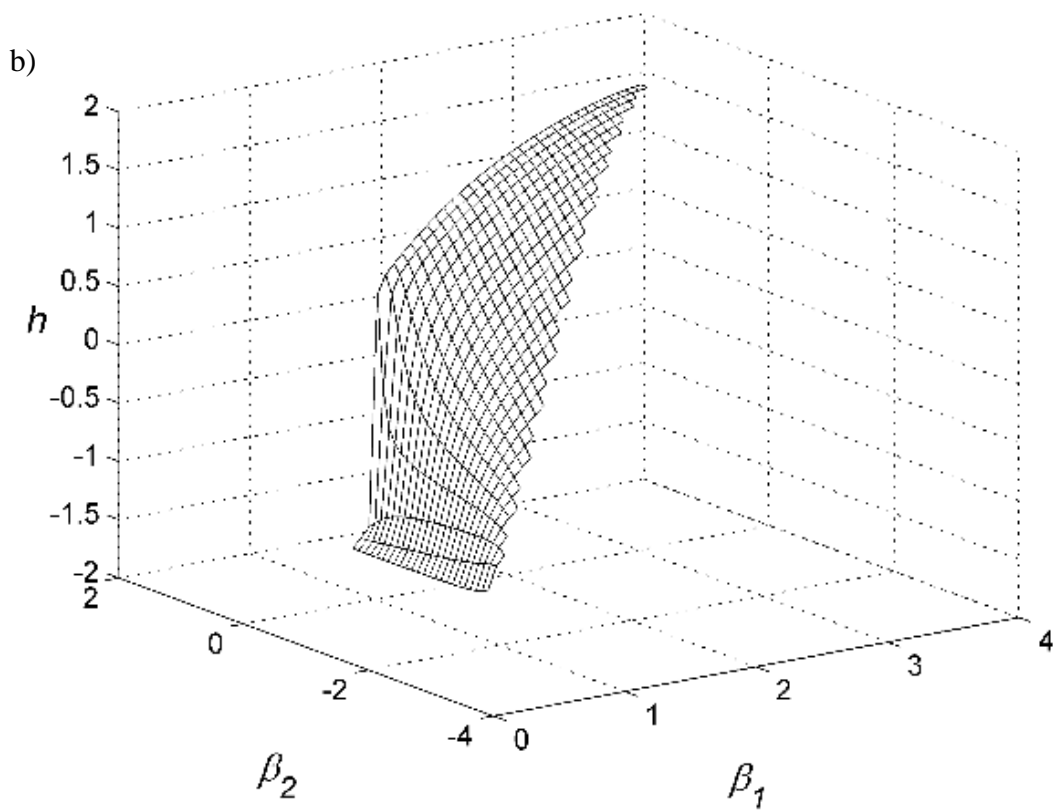
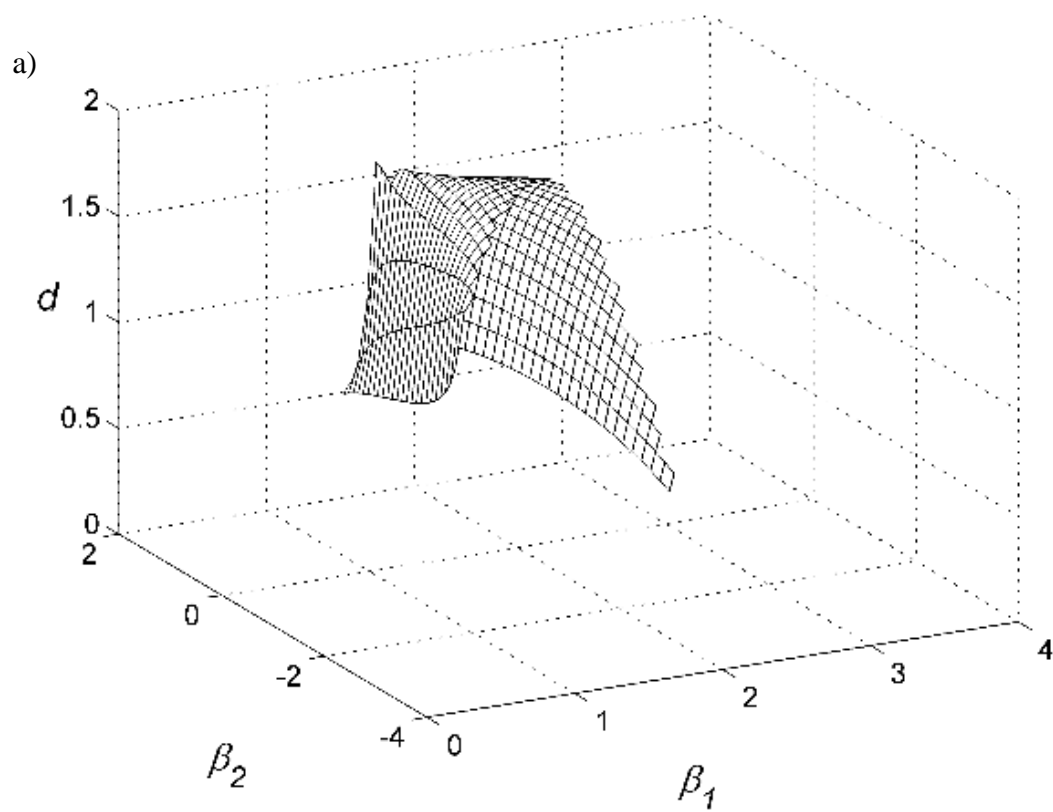


Slika 72. Parametri sustava u ovisnosti o  $\beta_1$ , i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $T_2$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .

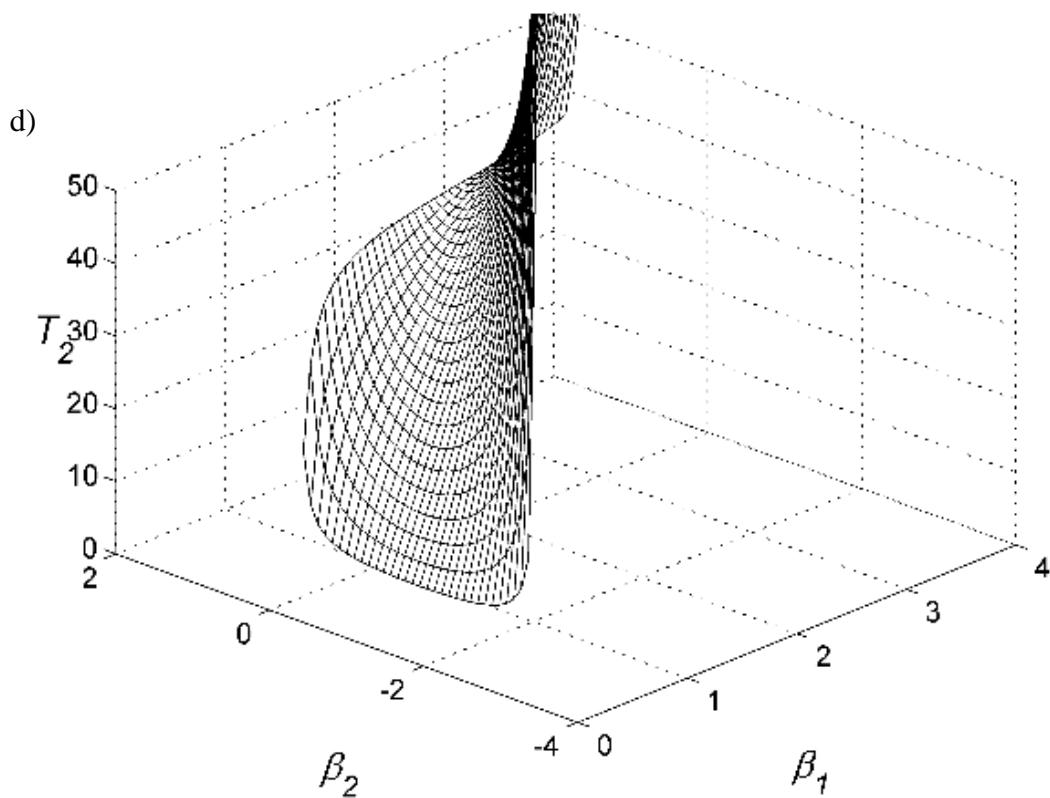
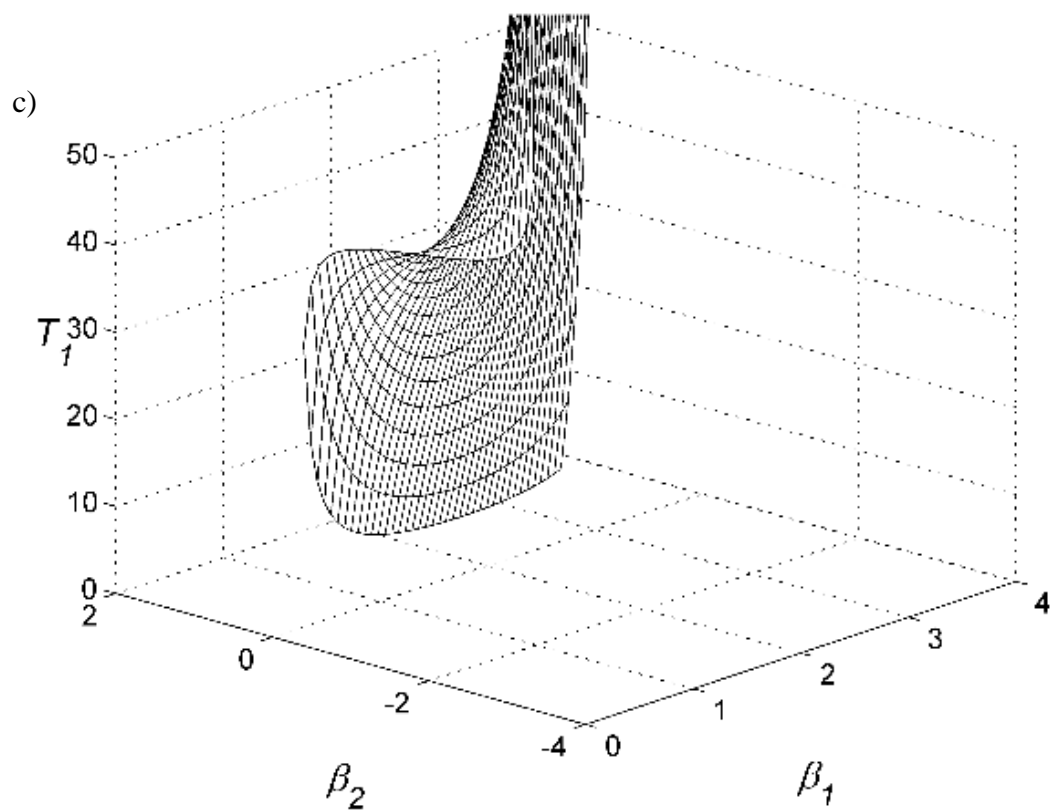




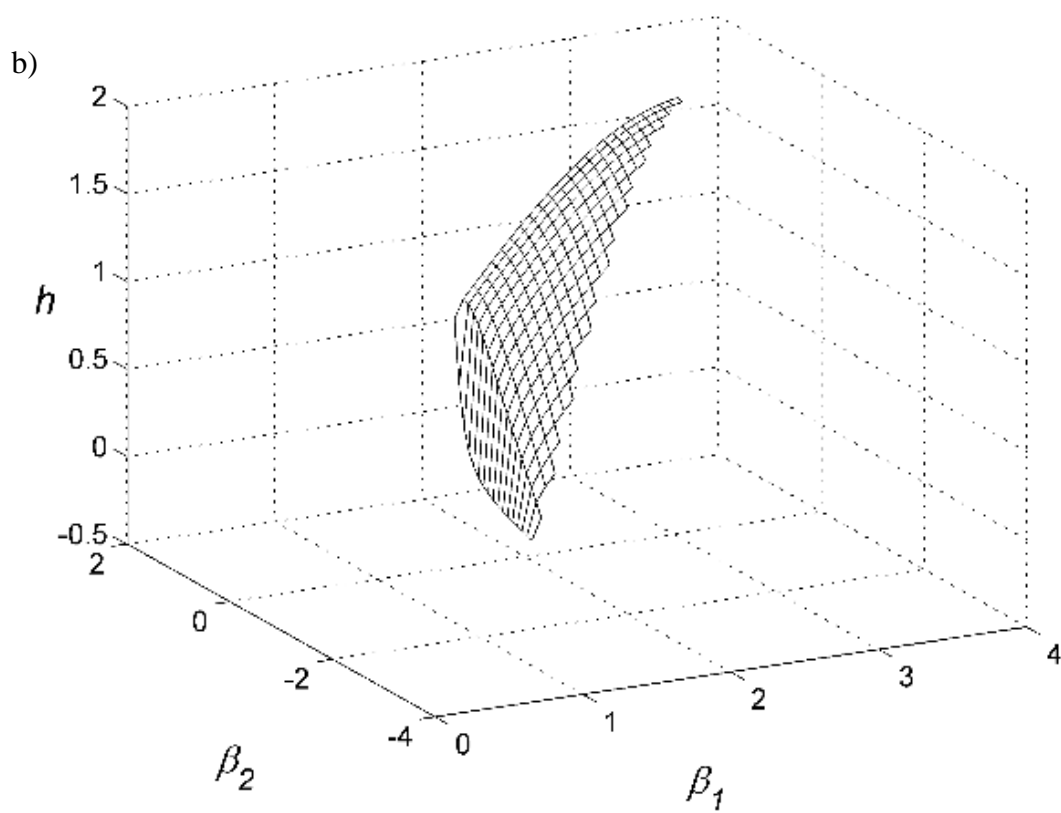
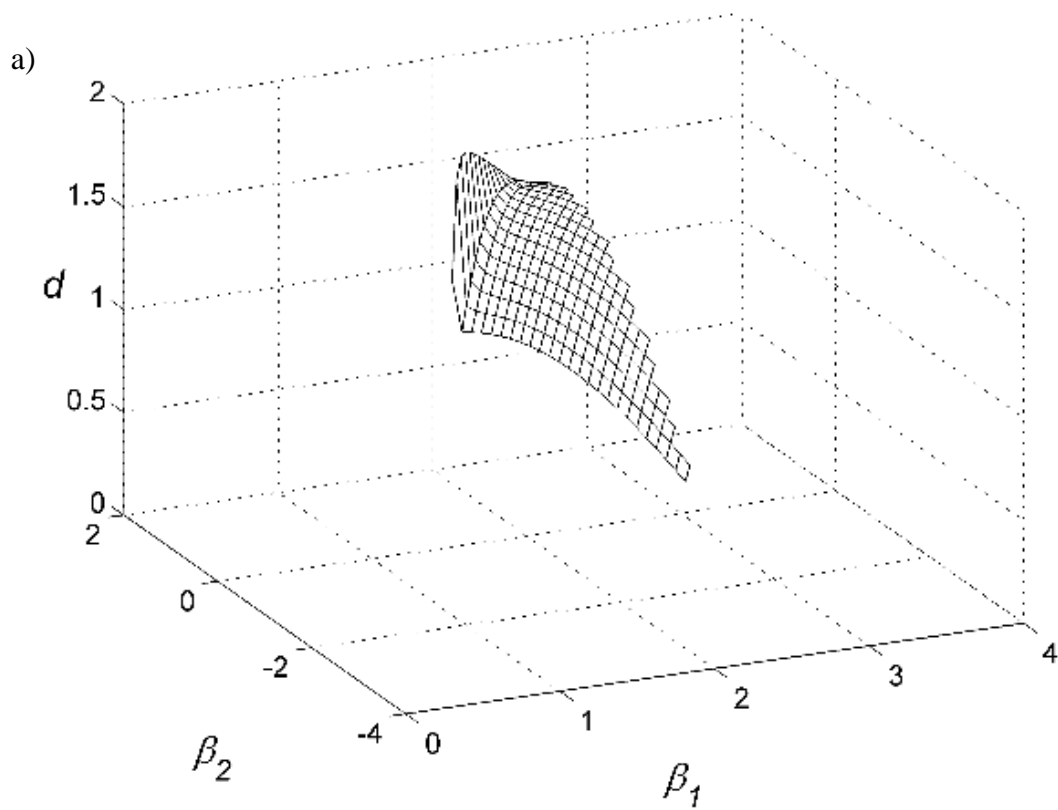
Slika 73. Parametri sustava u ovisnosti o  $\beta_1$ , i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $T_2$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .

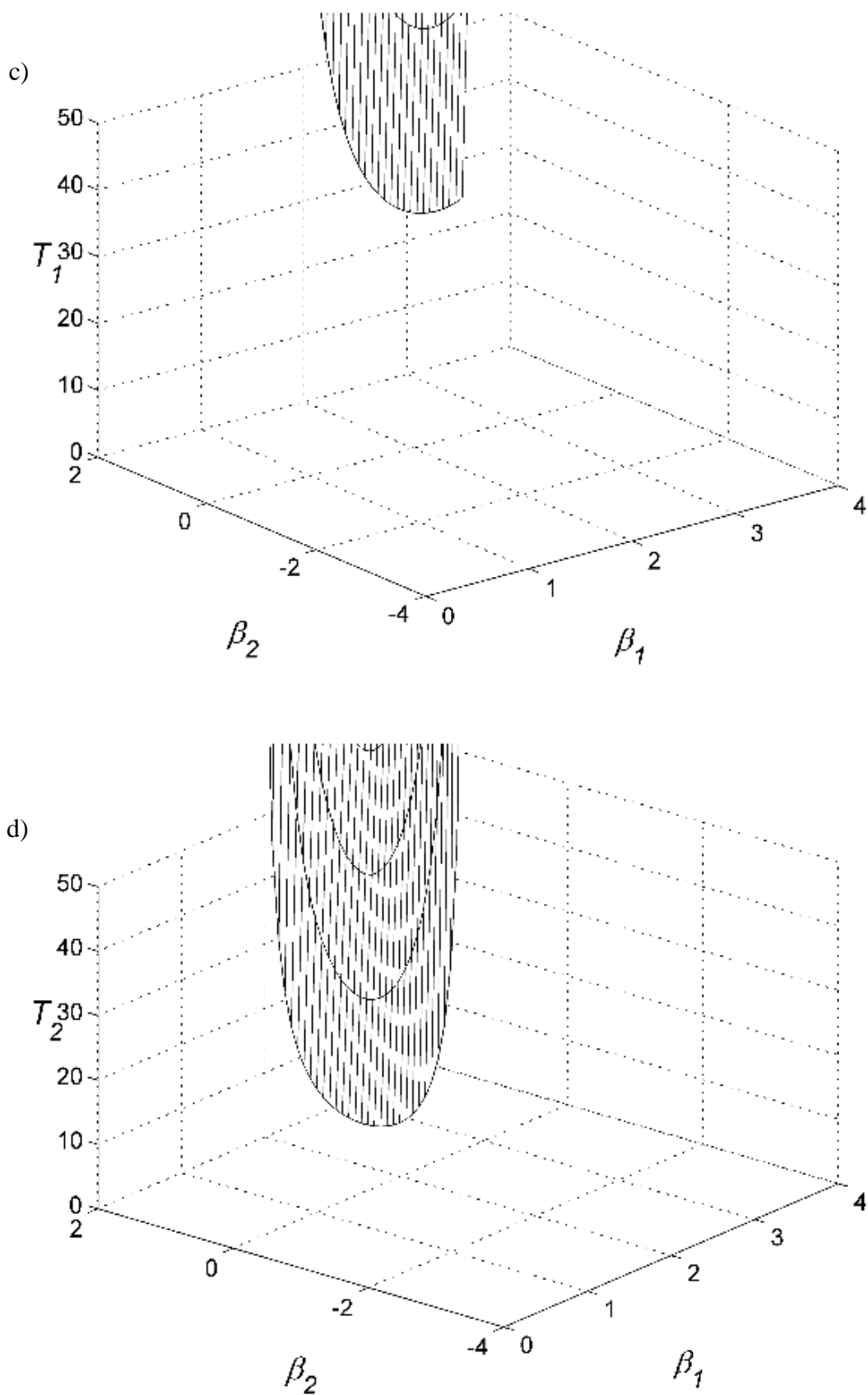




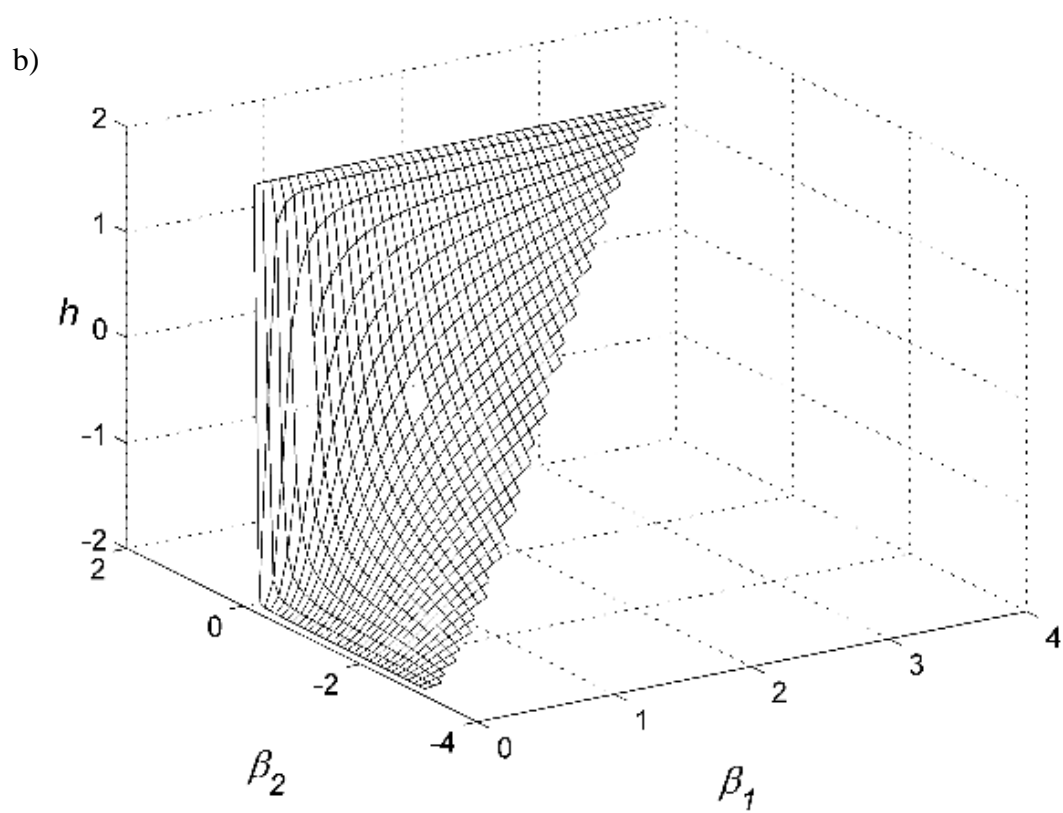
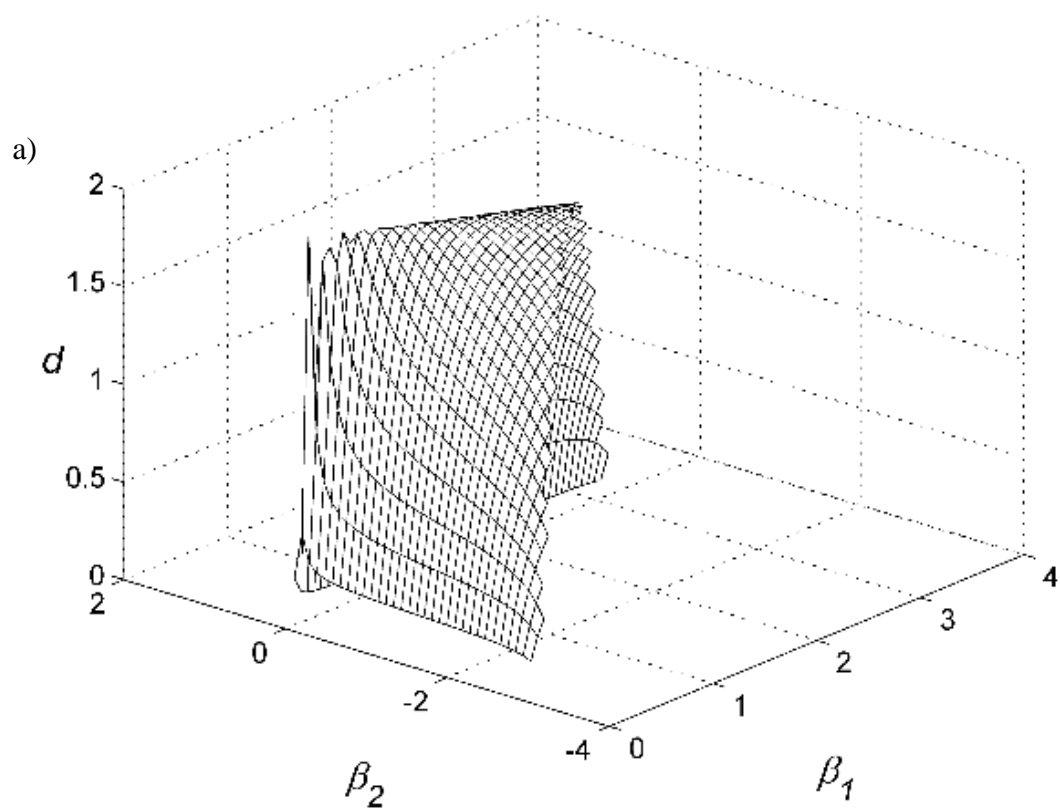


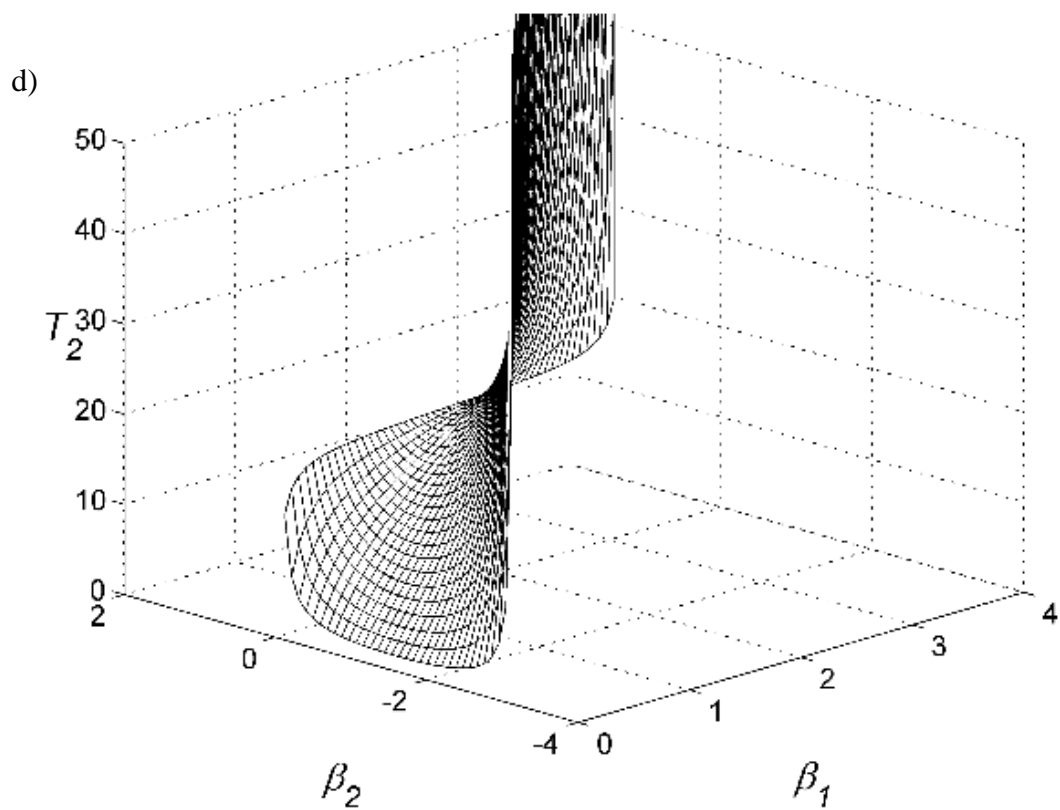
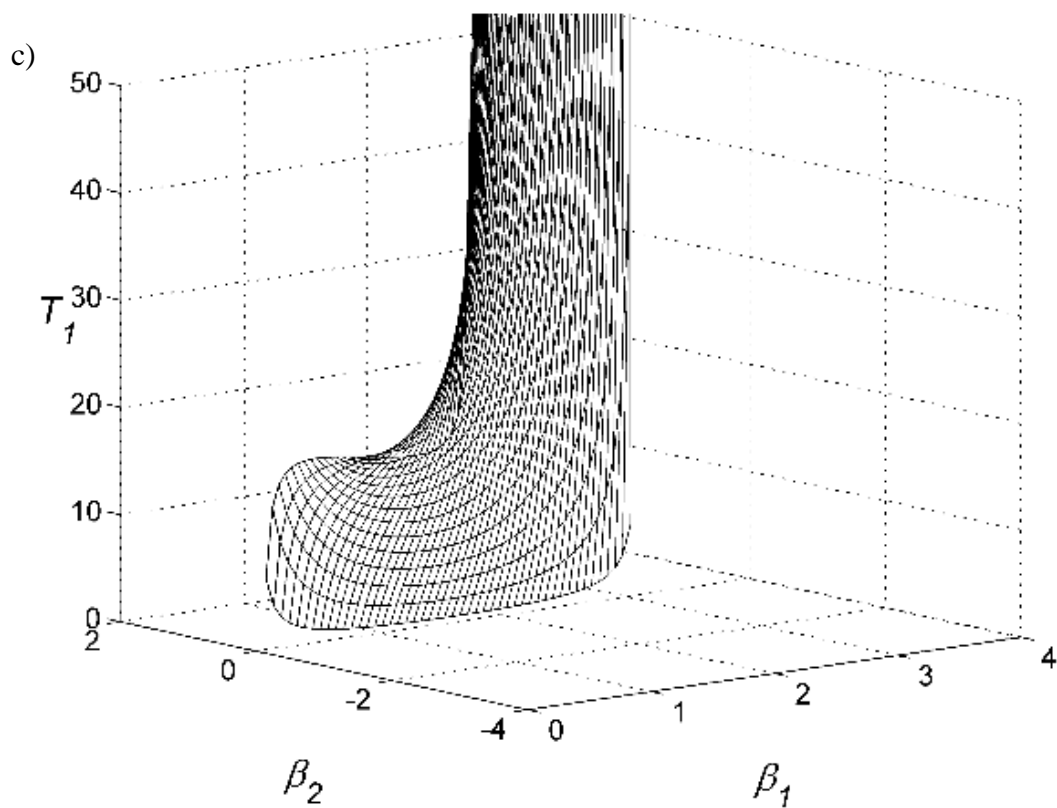
Slika 74. Parametri sustava u ovisnosti o  $\beta_1$ , i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $T_2$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .



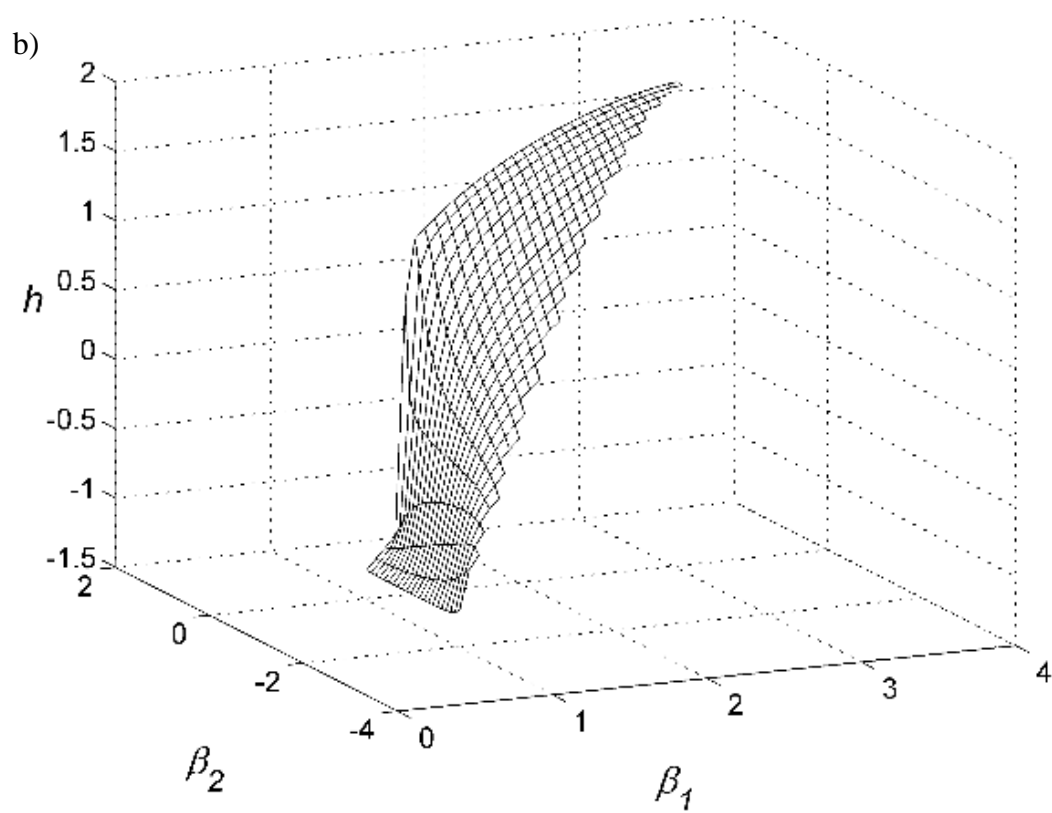
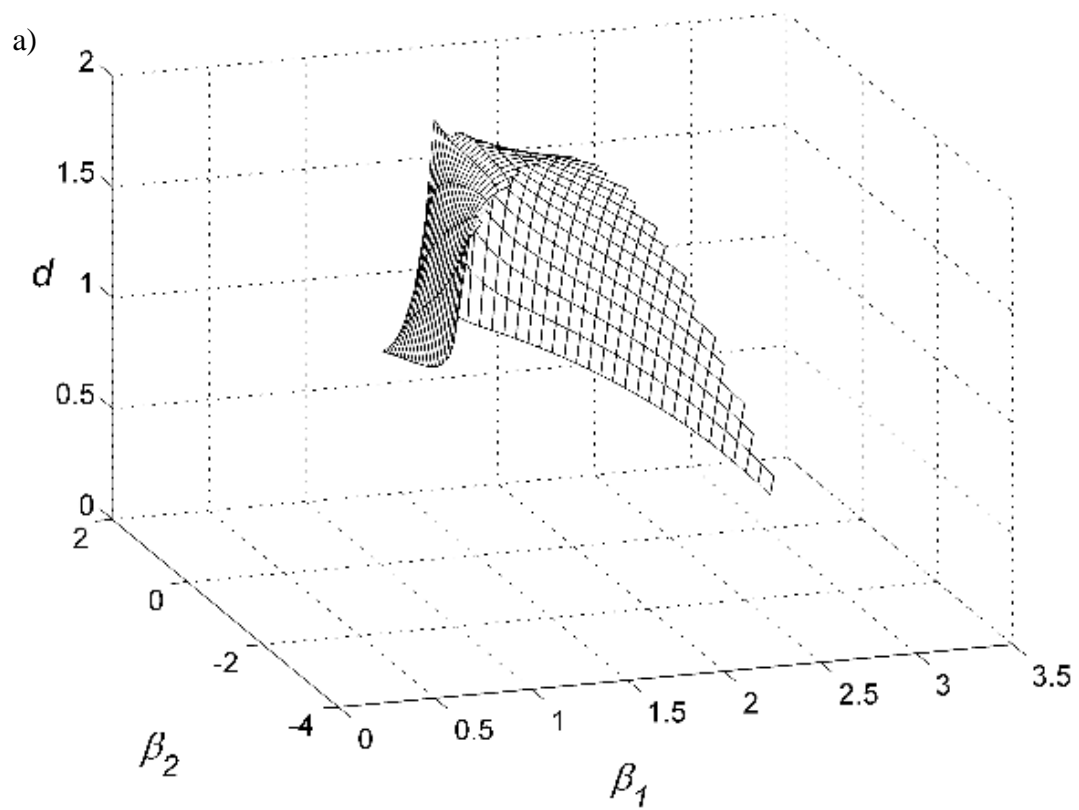


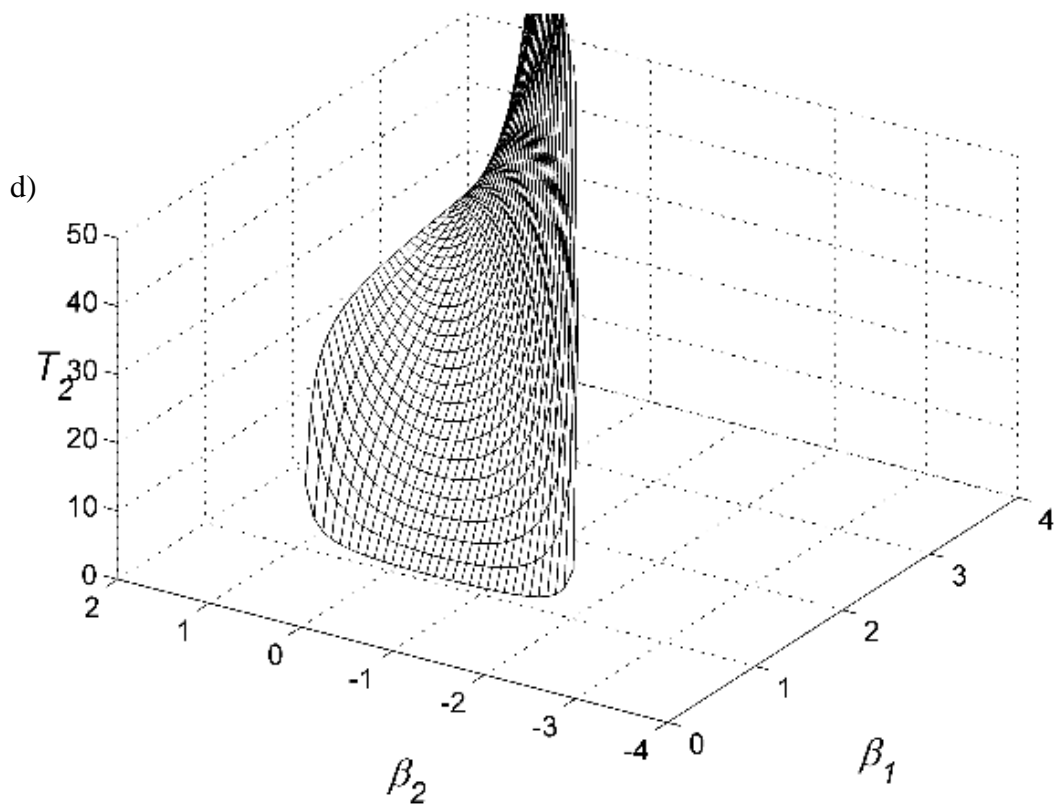
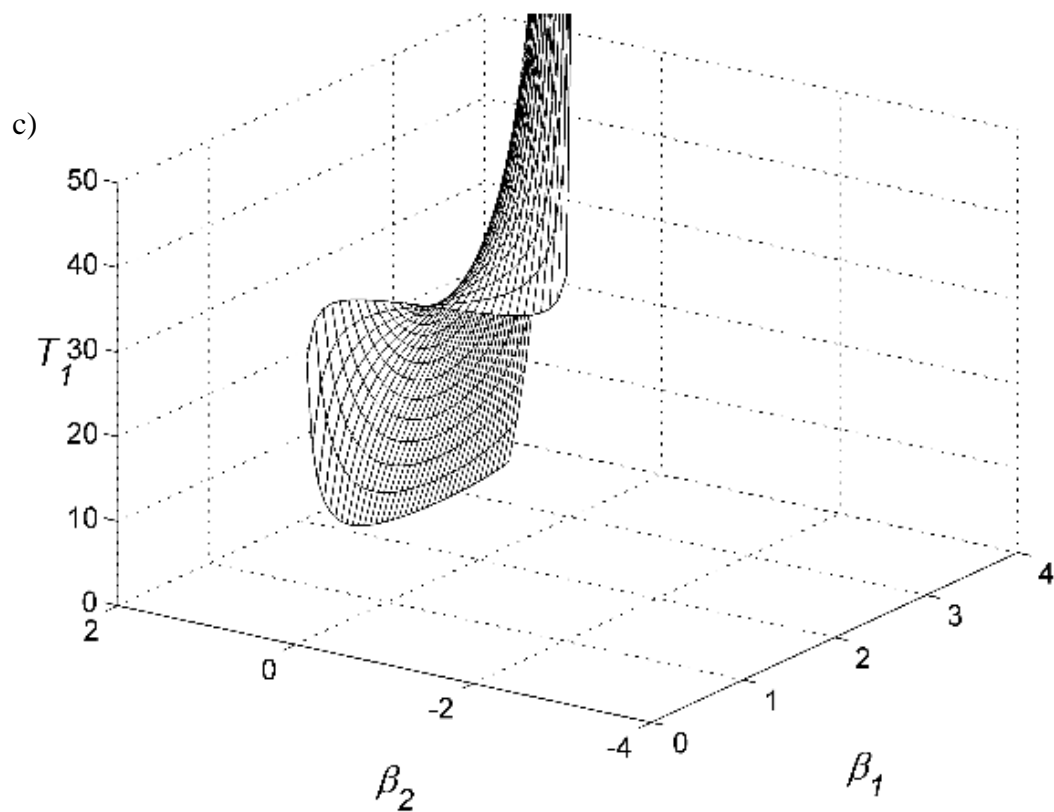
Slika 75. Parametri sustava u ovisnosti o  $\beta_1$ , i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $T_2$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .



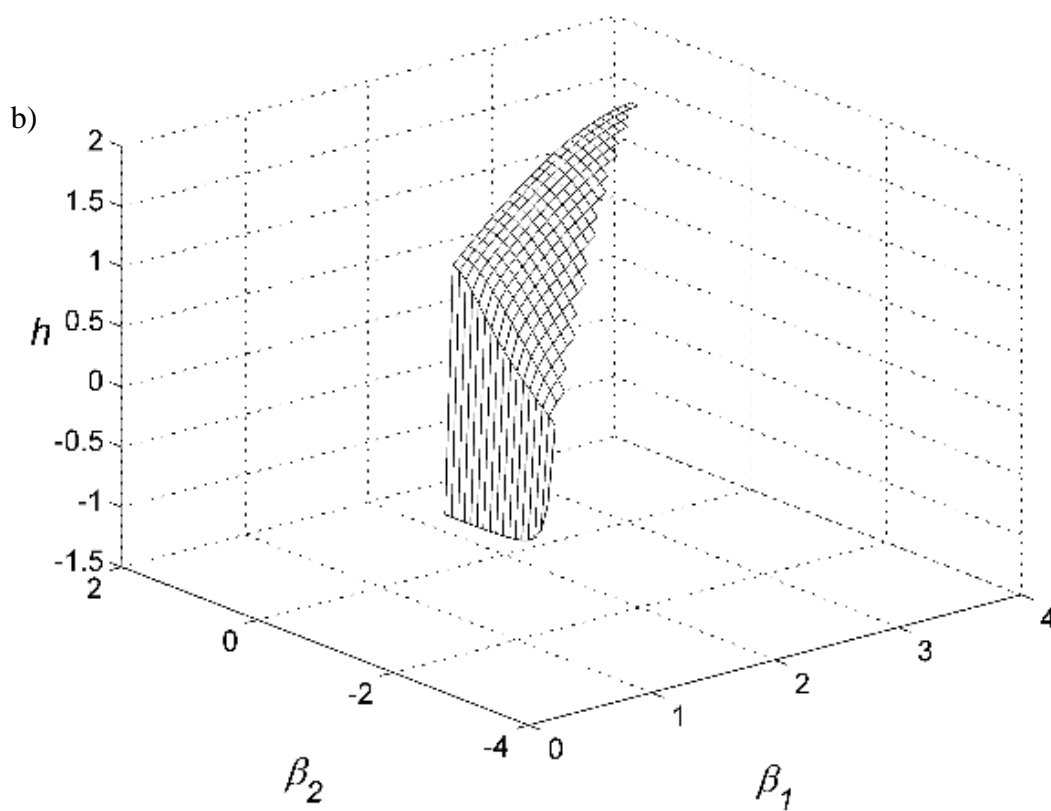
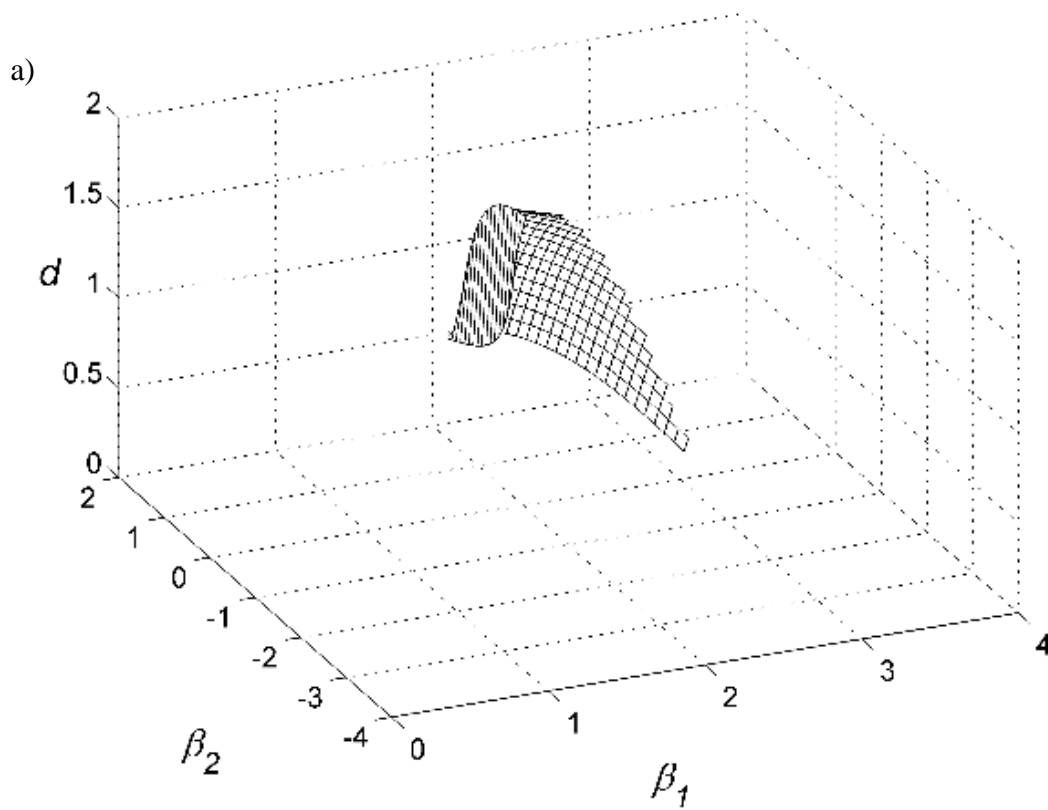


Slika 76. Parametri sustava u ovisnosti o  $\beta_1$ , i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $T_2$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

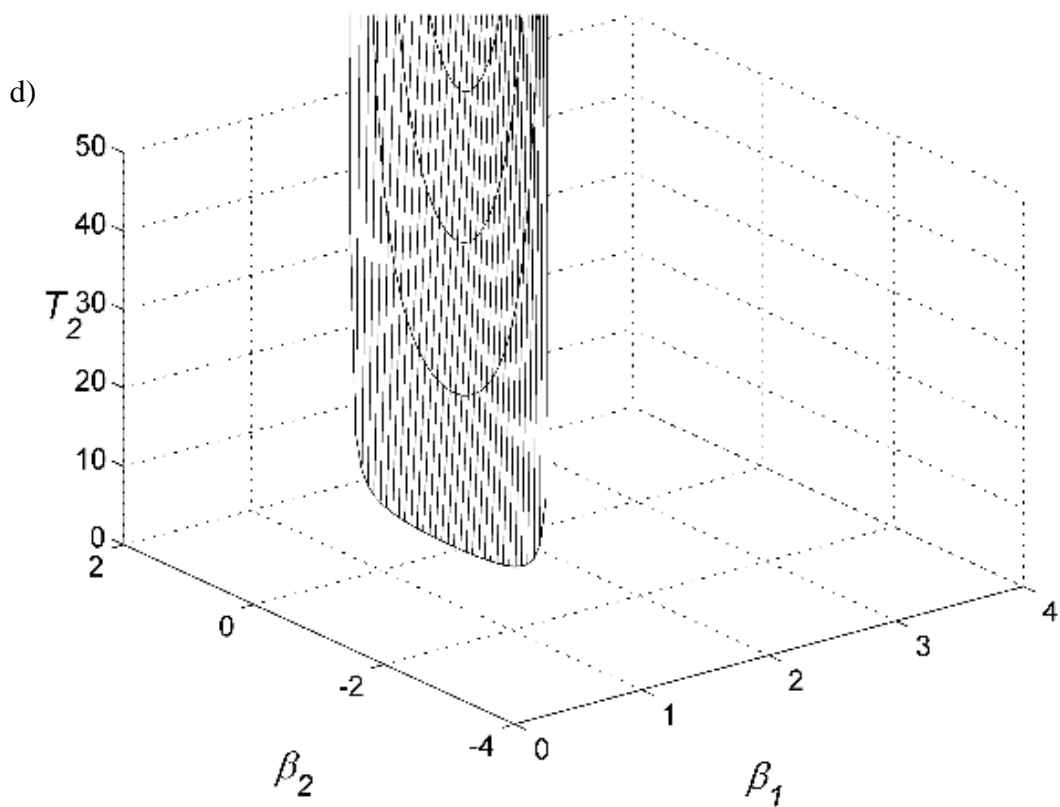
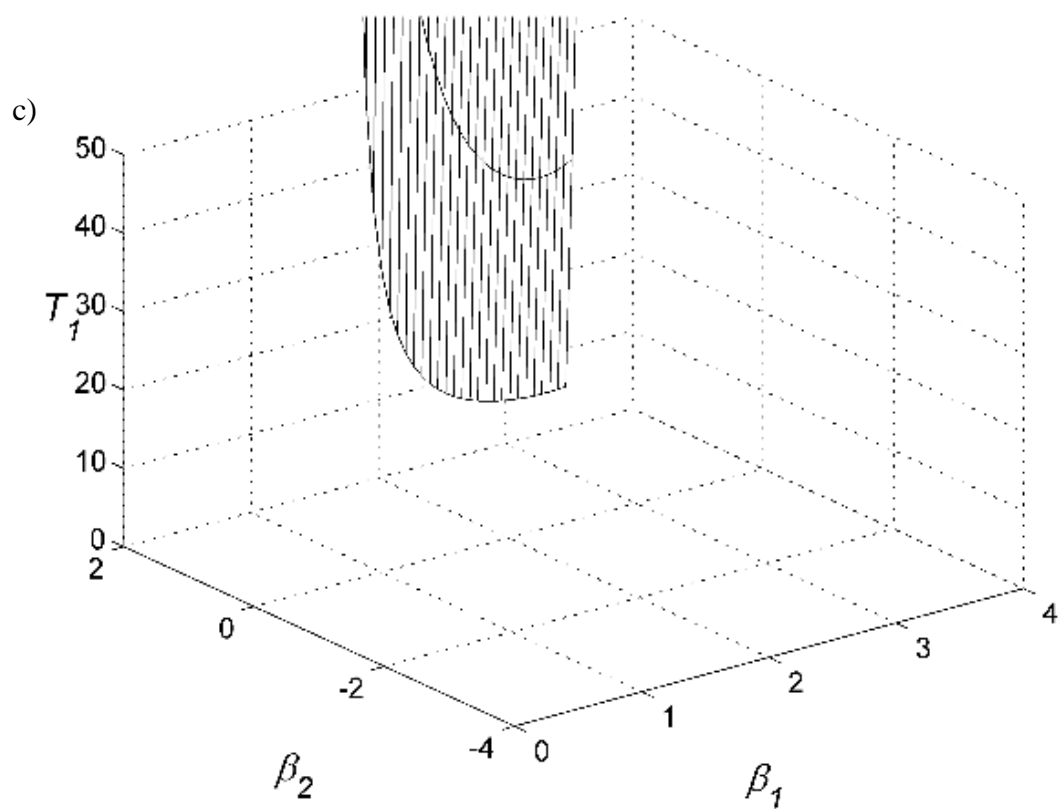




Slika 77. Parametri sustava u ovisnosti o  $\beta_1$ , i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $T_2$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .





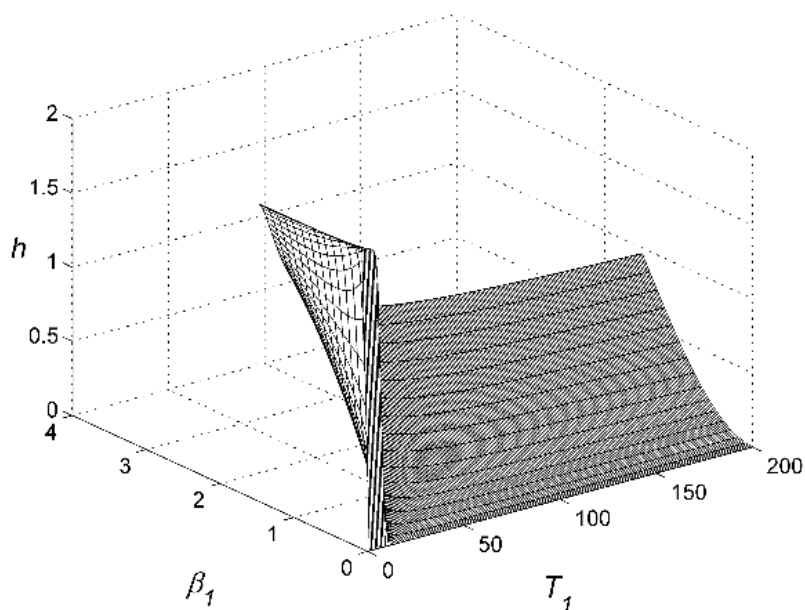
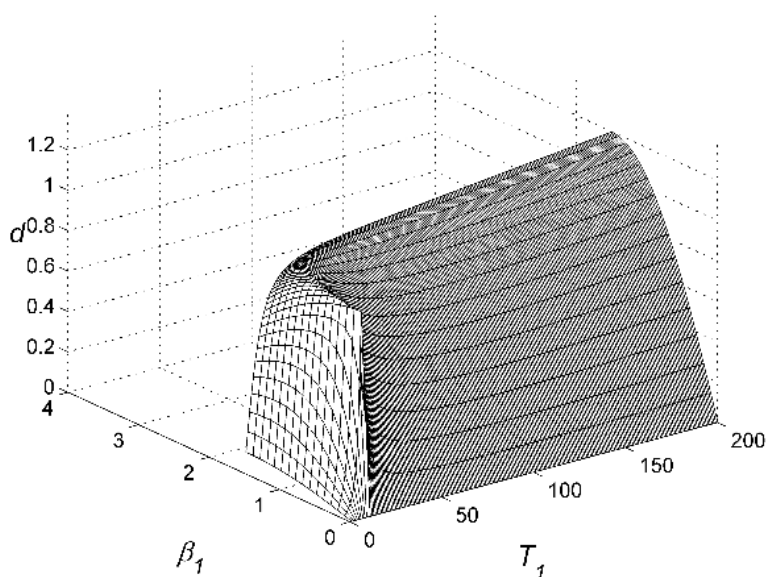


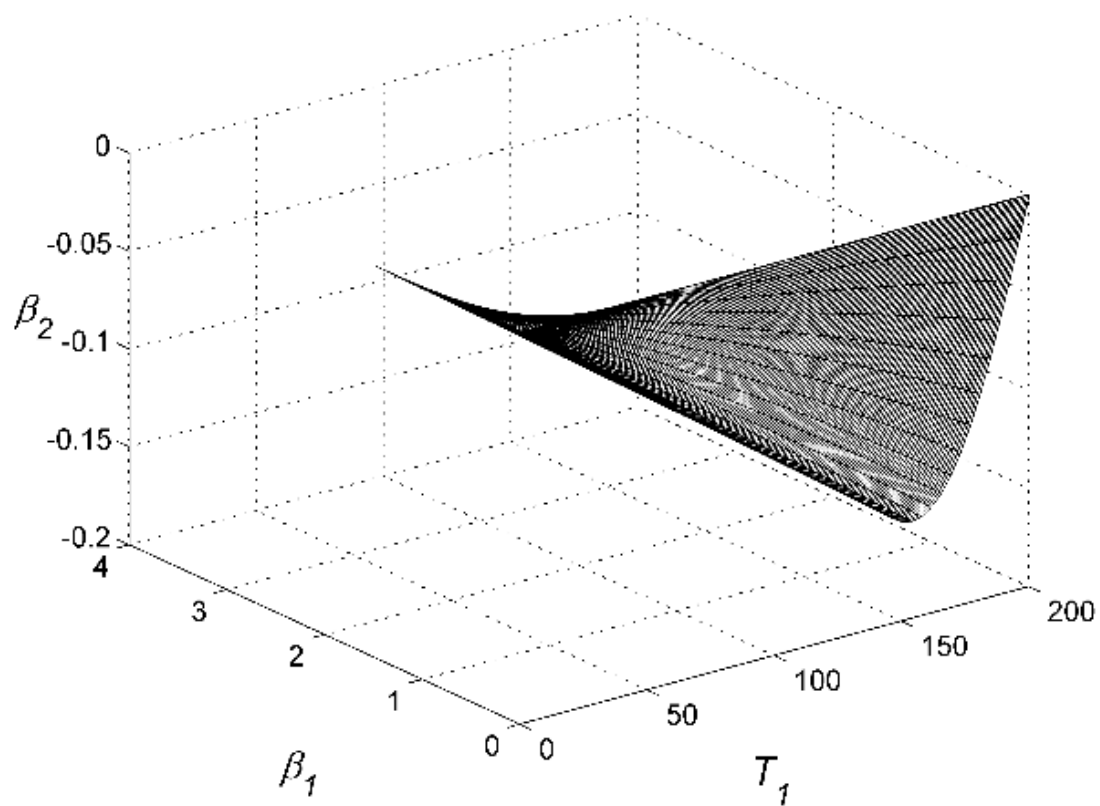
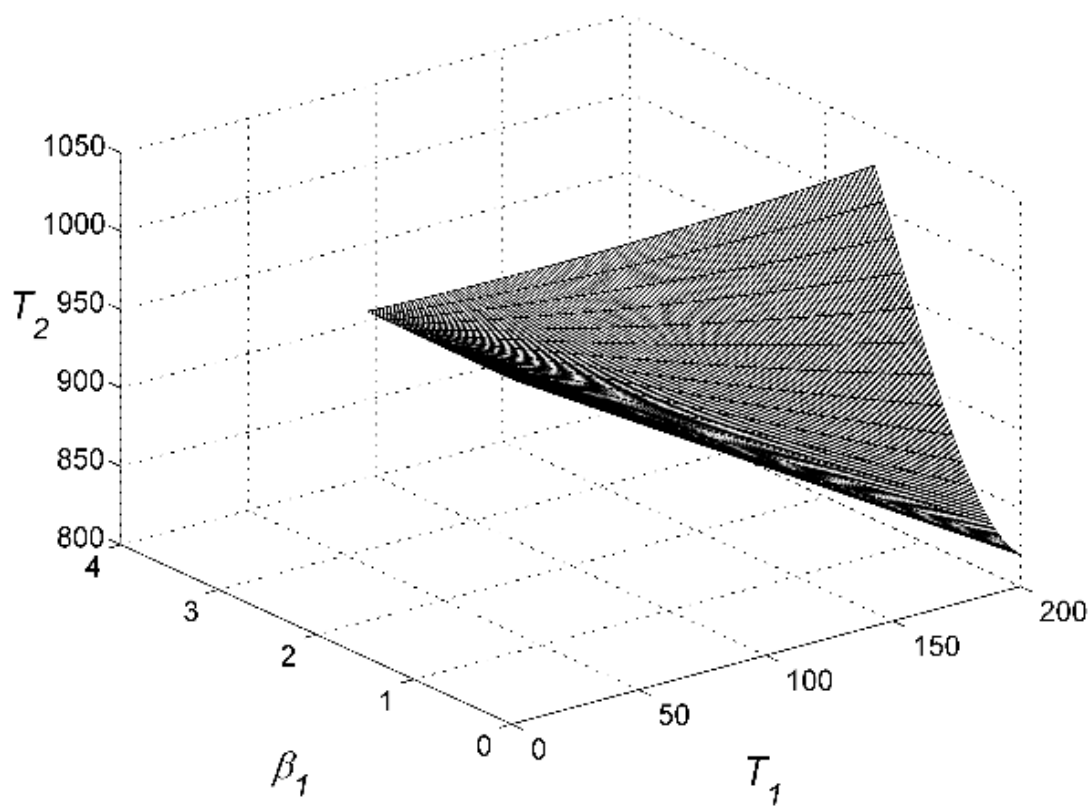
Slika 78. Parametri sustava u ovisnosti o  $\beta_1$ , i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $T_2$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

## 8.4 Upravljanje vektorom potiska беспilotne letjelice 1

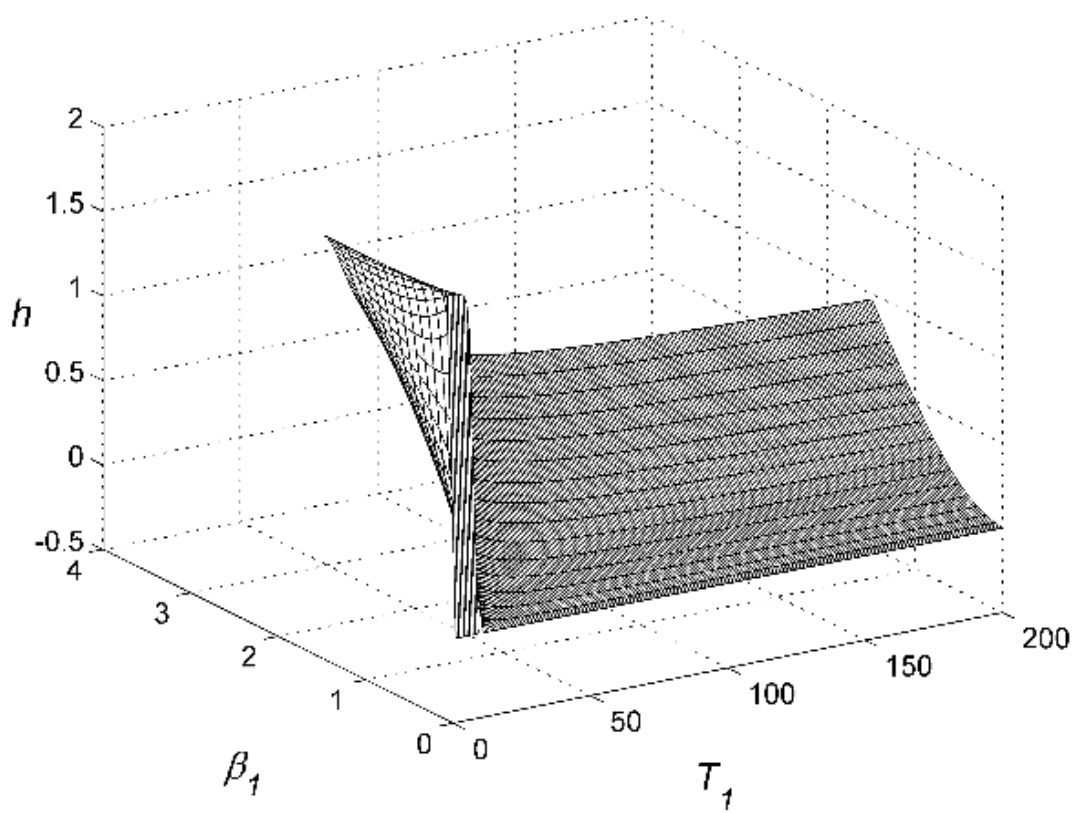
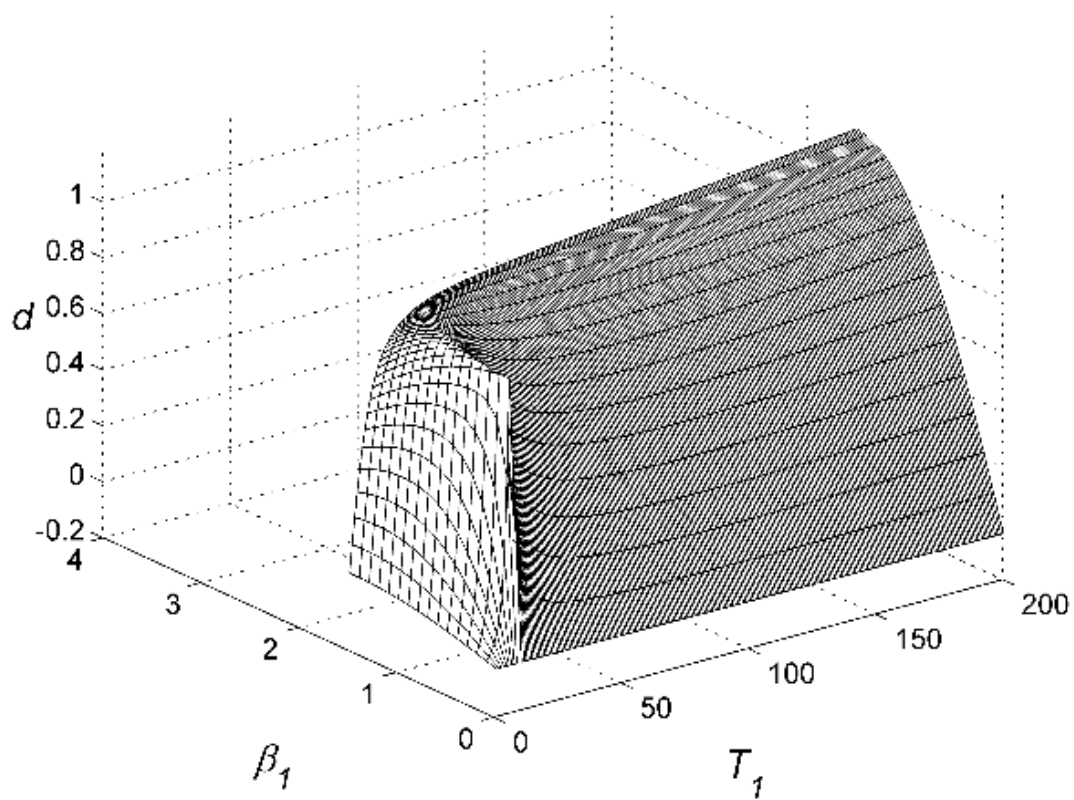
Upravljanje vektorom potiska беспilotne letjelice 1 ostvaruje se na način opisan u poglavlju Detaljno modeliranje na stranici xx. Sustav je razmatran u različitim režimima leta ( $\psi = 0 - \pi/2$ ) pri različitim omjerima masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ). U razmatranim karakterističnim slučajevima analiziran je međusobni položaj letjelica 1 i 2. Za letjelicu 2 analiziran je vektor potiska  $T_2$  s pripadnim kutom  $\beta_2$  kako bi se odredilo ponašanje letjelice budući da u ovom načinu upravljanja ona nije potpuno autonomna nego slijedi letjelicu 1.

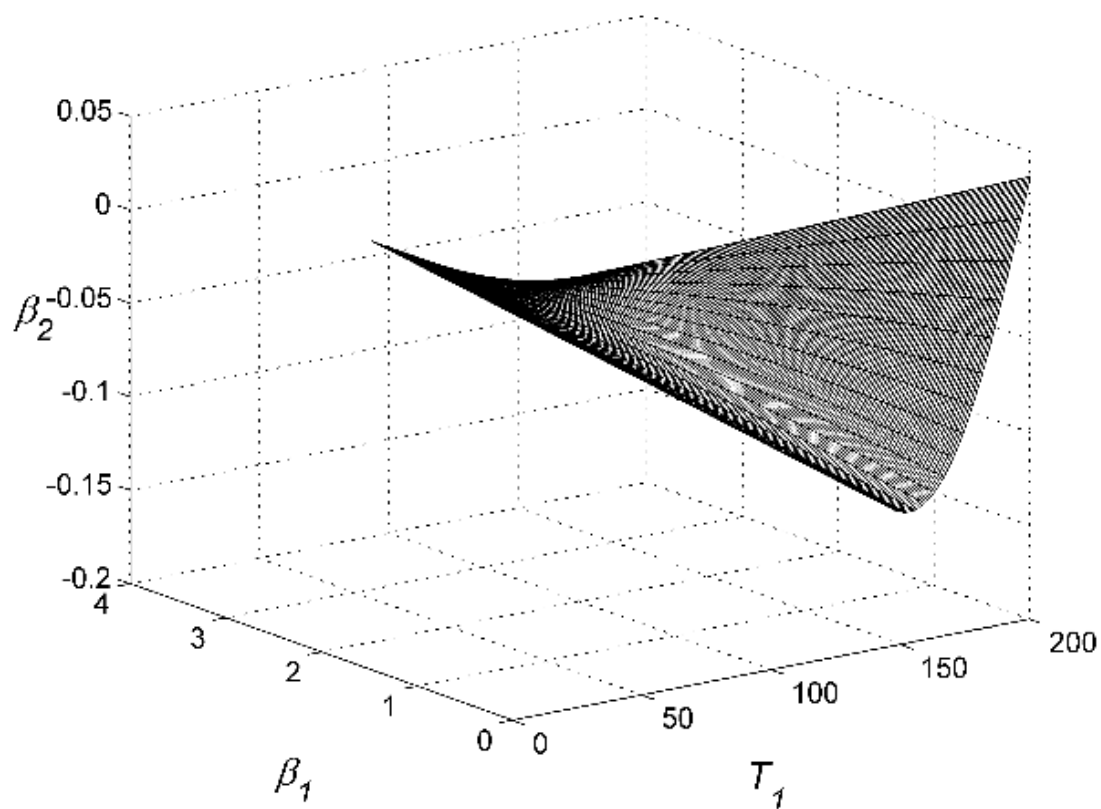
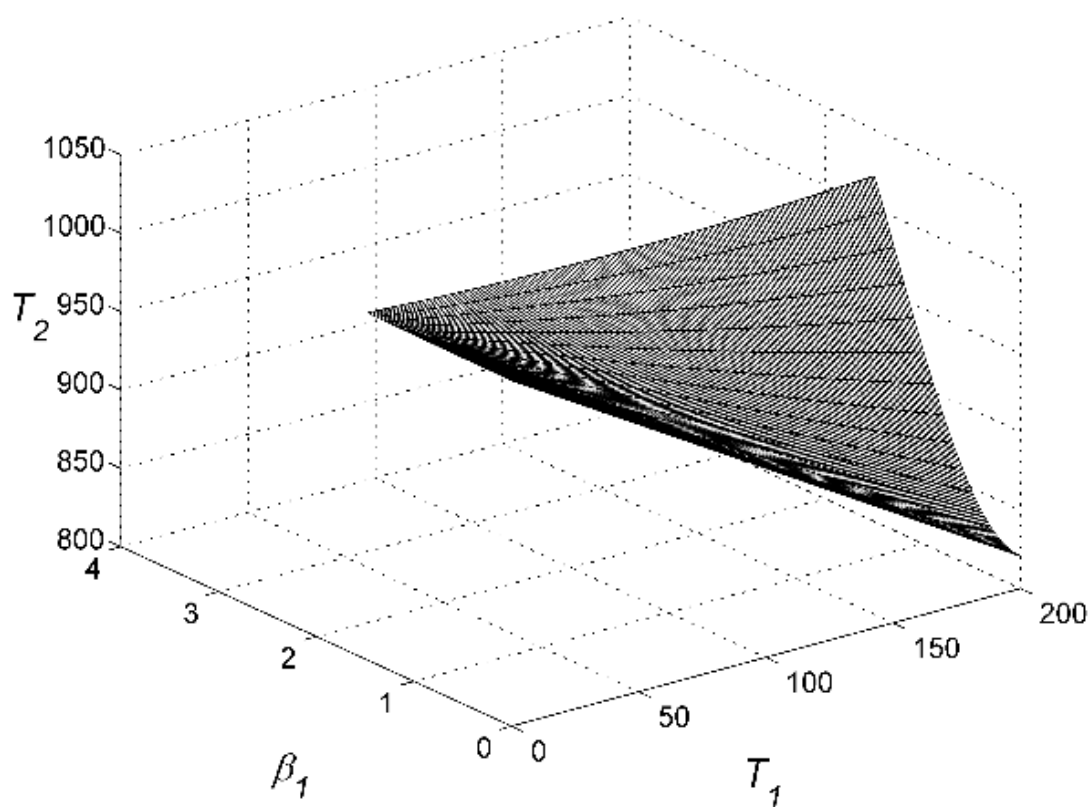
Detaljna analiza sustava razrađena je u poglavlju *Diskusija* na stranici 190. Tablični prikazi rezultata istraživanja prikazani su u *Prilogu* na stranici 202.



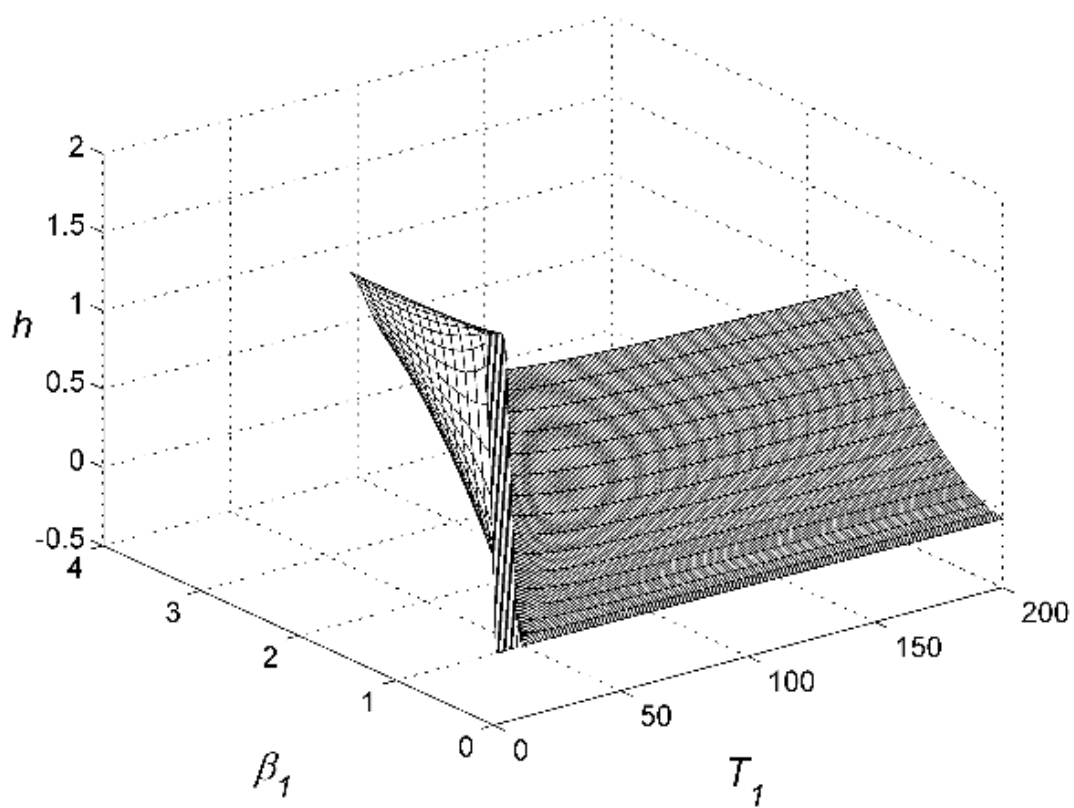
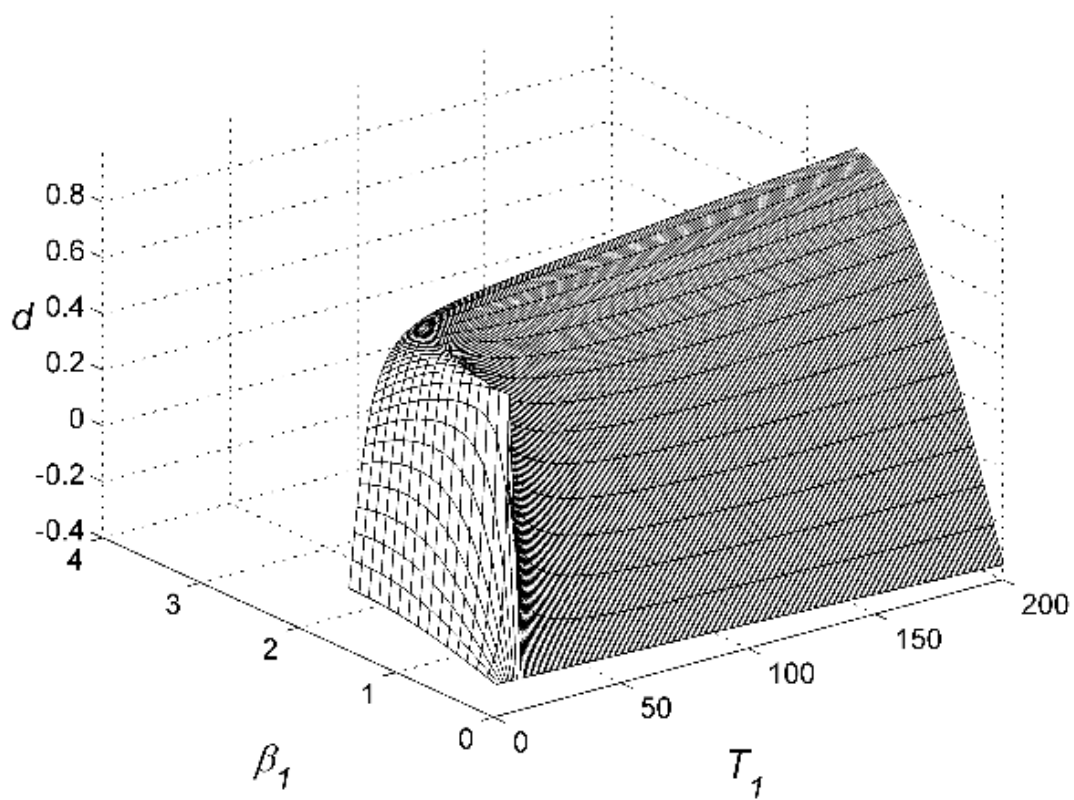


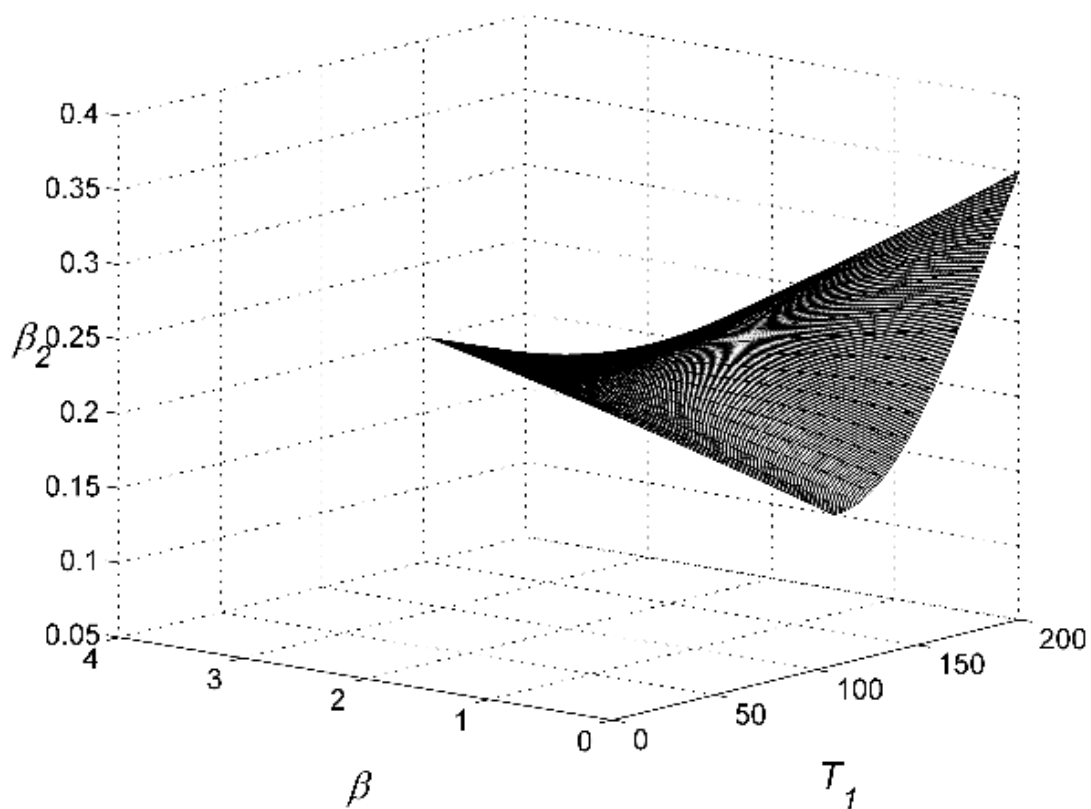
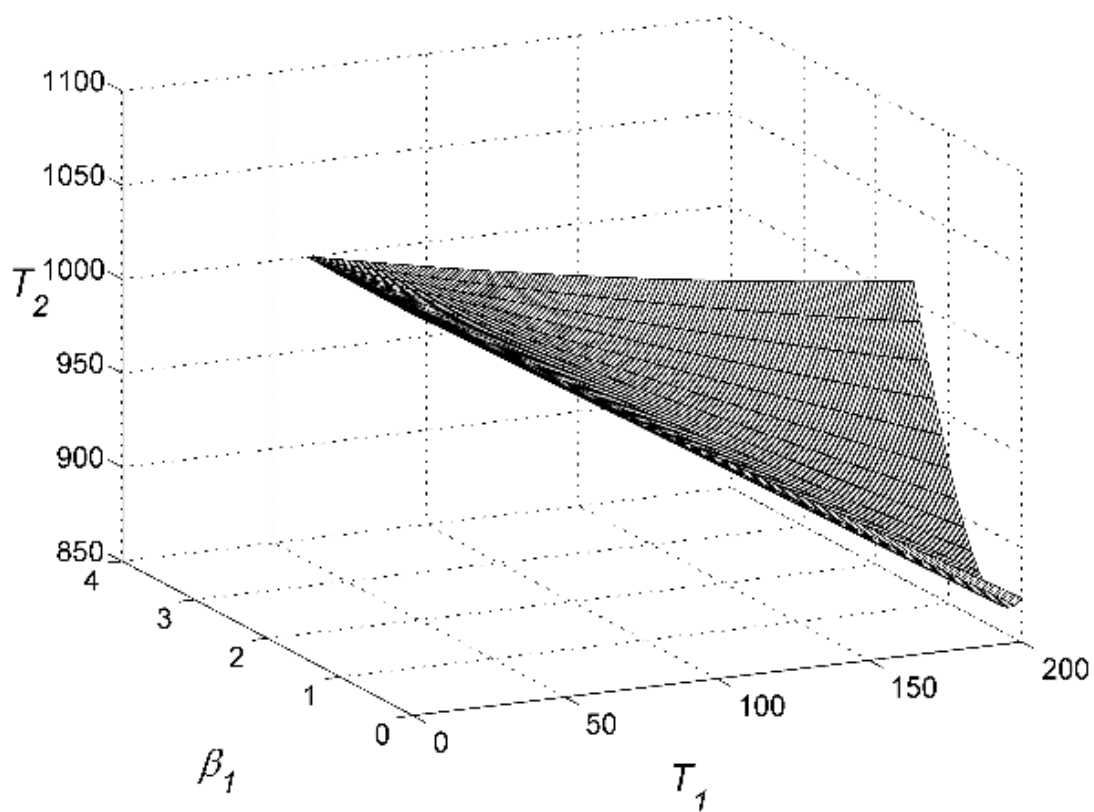
Slika 79. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_1$  i  $\beta_1$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_2$ ; d)  $\beta_2$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .



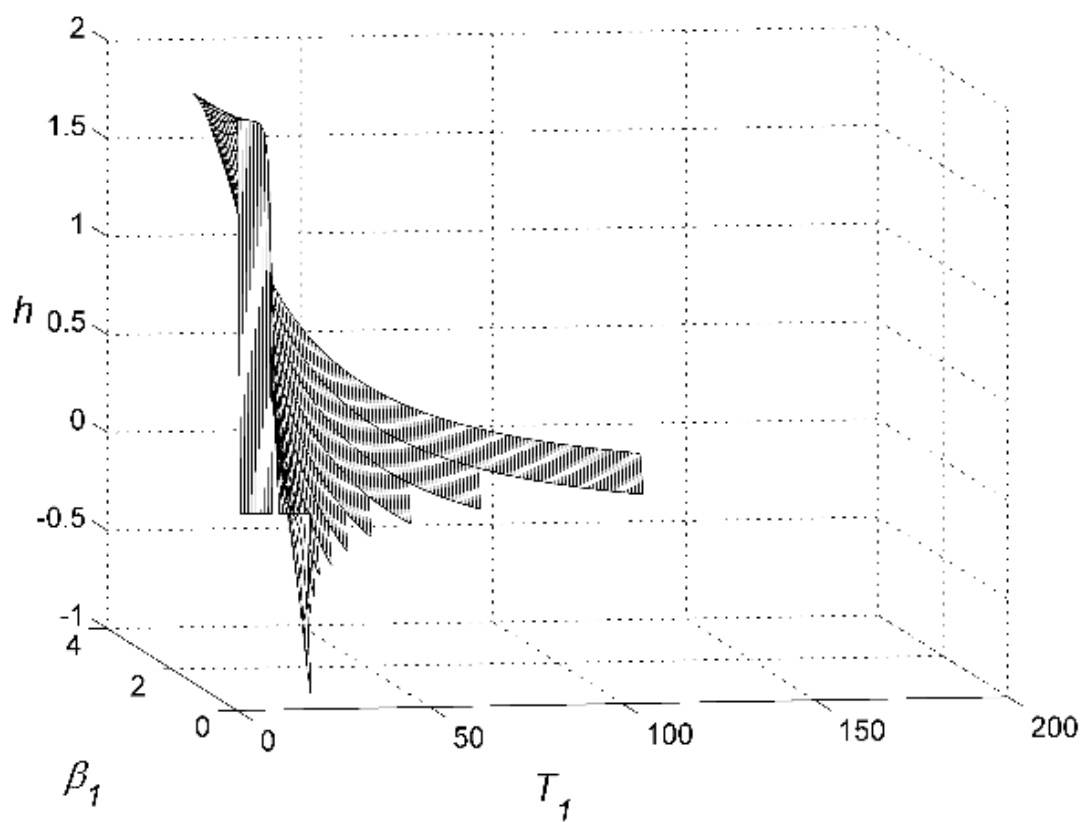
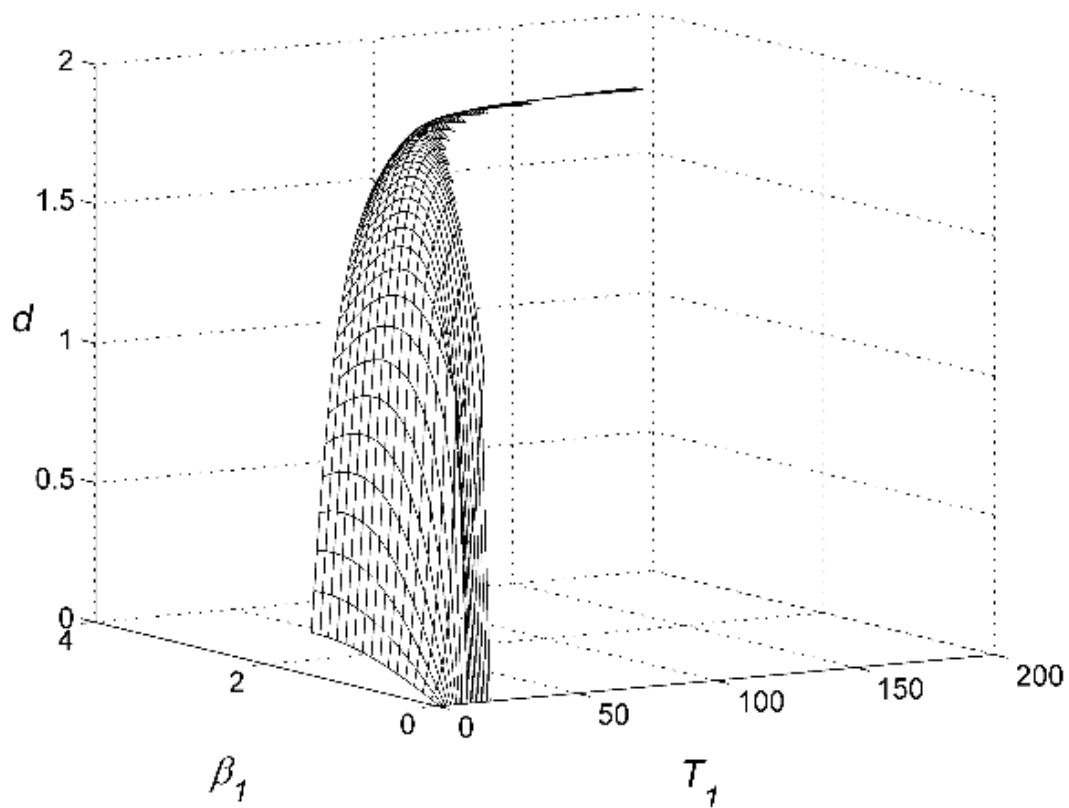


Slika 80. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_1$  i  $\beta_1$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_2$ ; d)  $\beta_2$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .

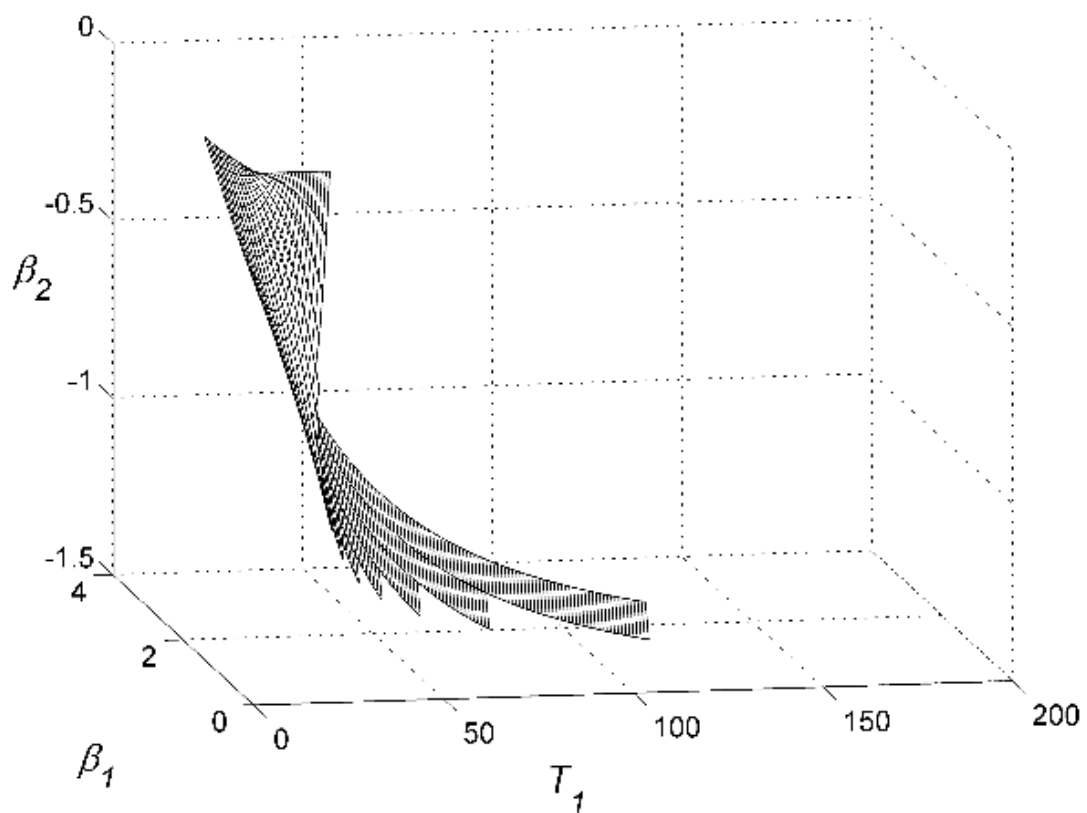
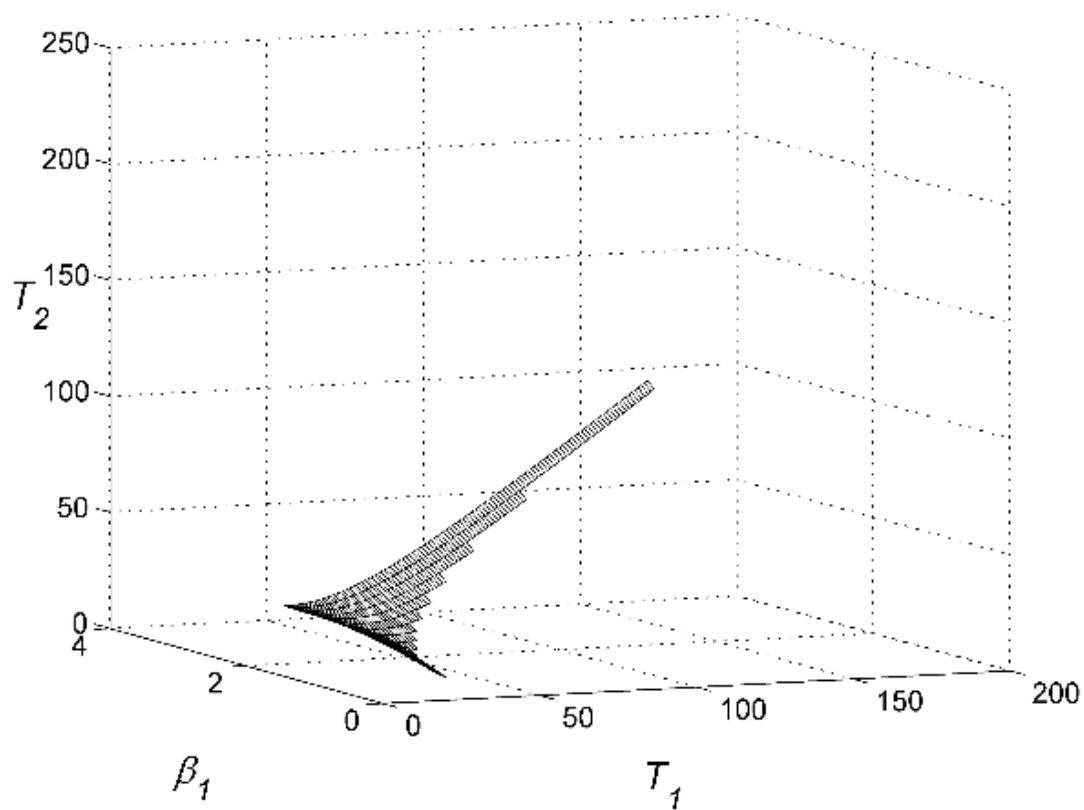




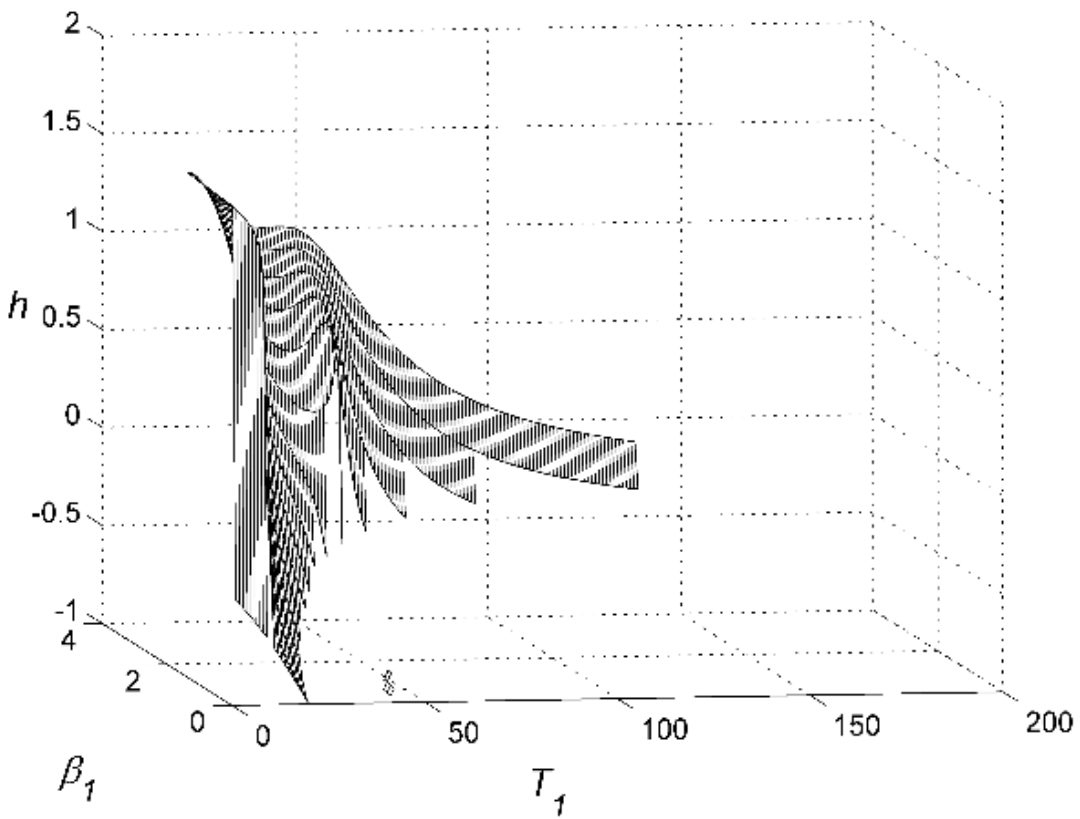
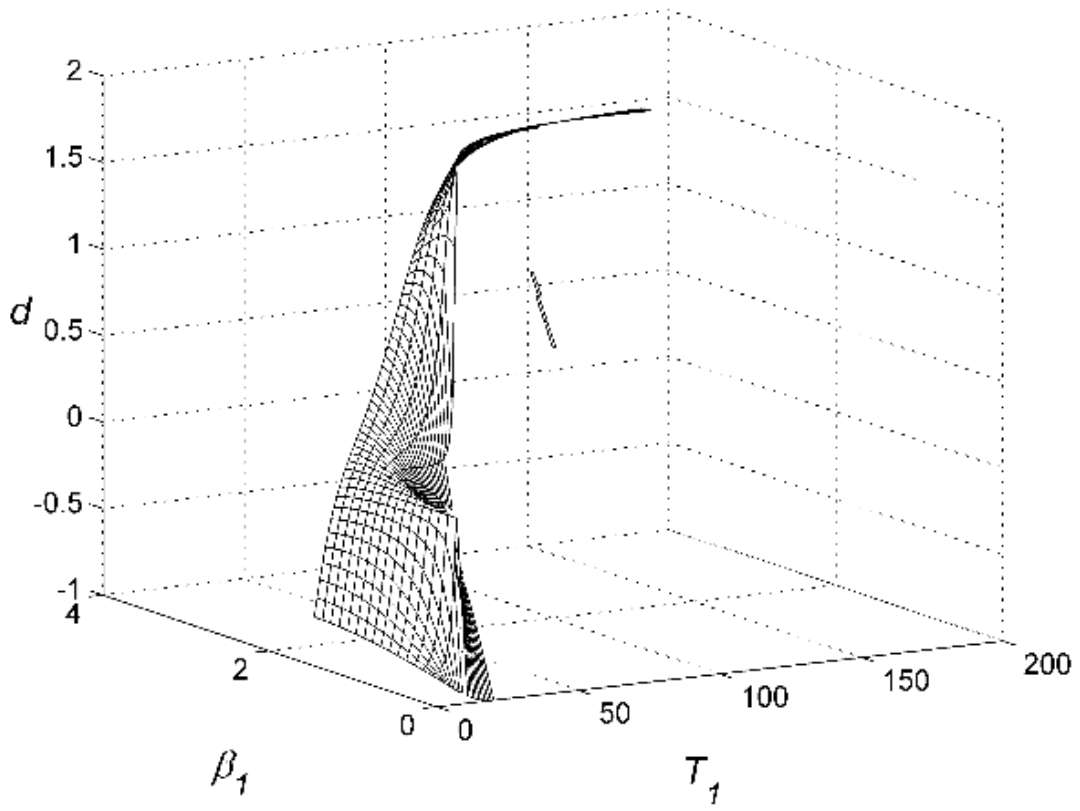
Slika 81. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_1$  i  $\beta_1$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_2$ ; d)  $\beta_2$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .

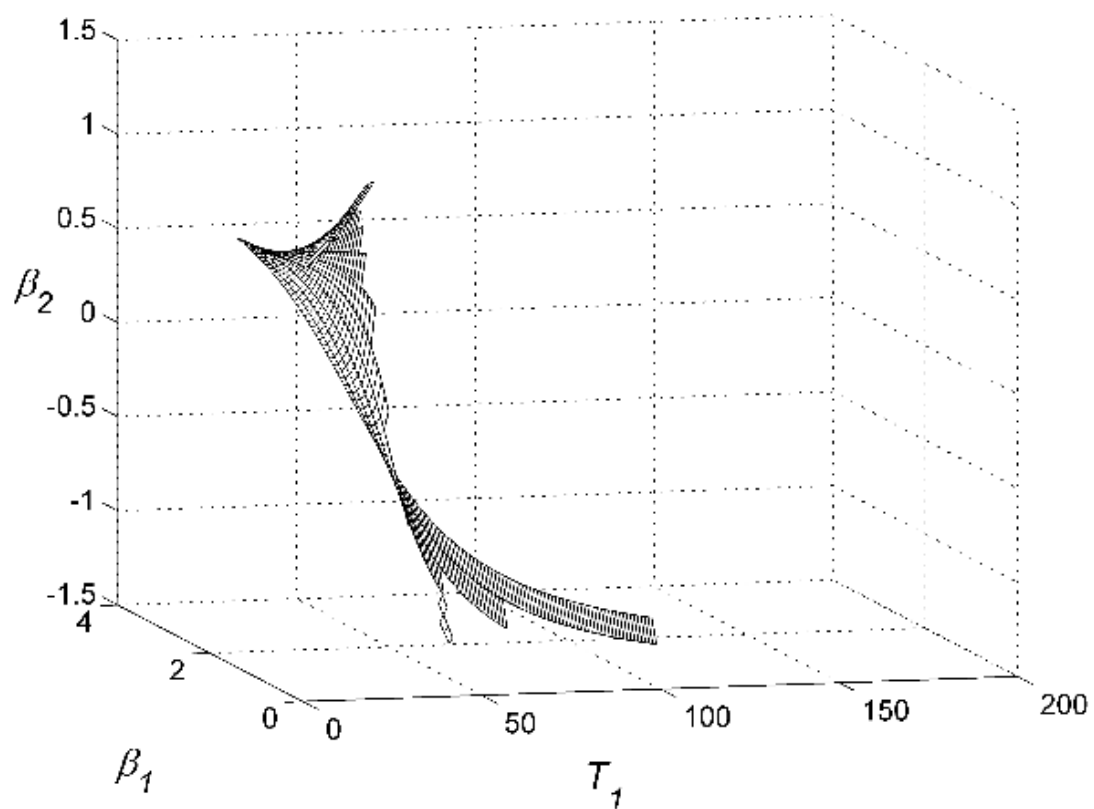
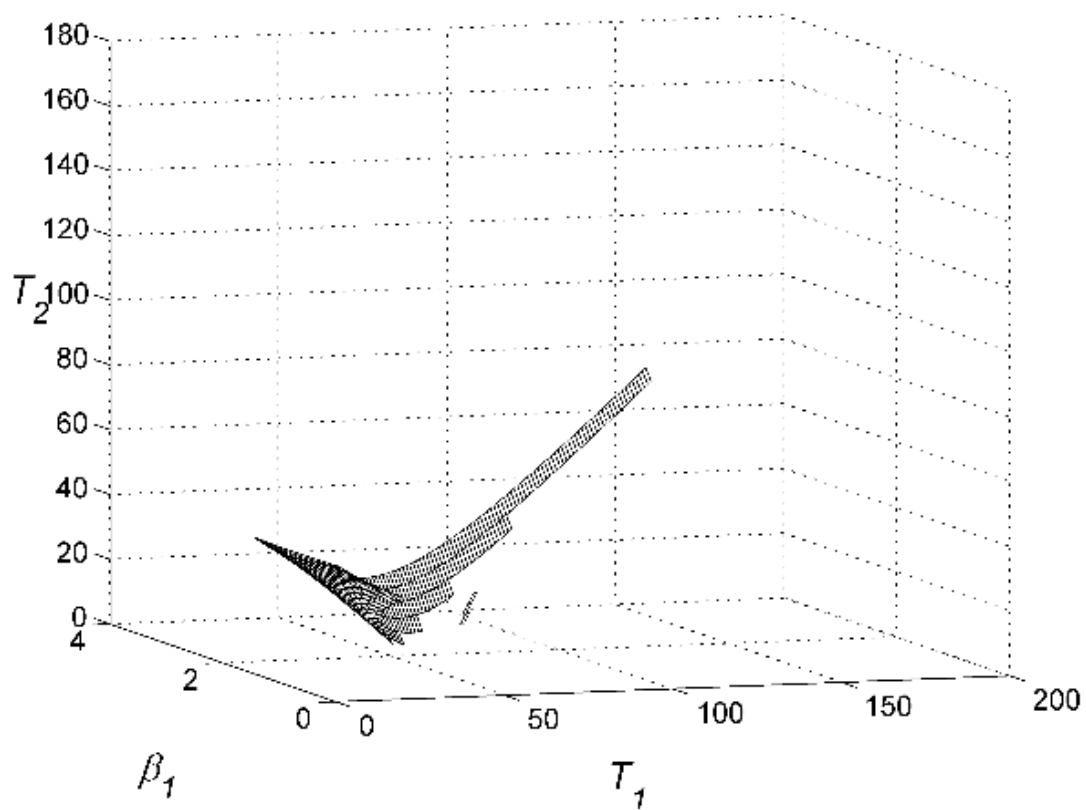




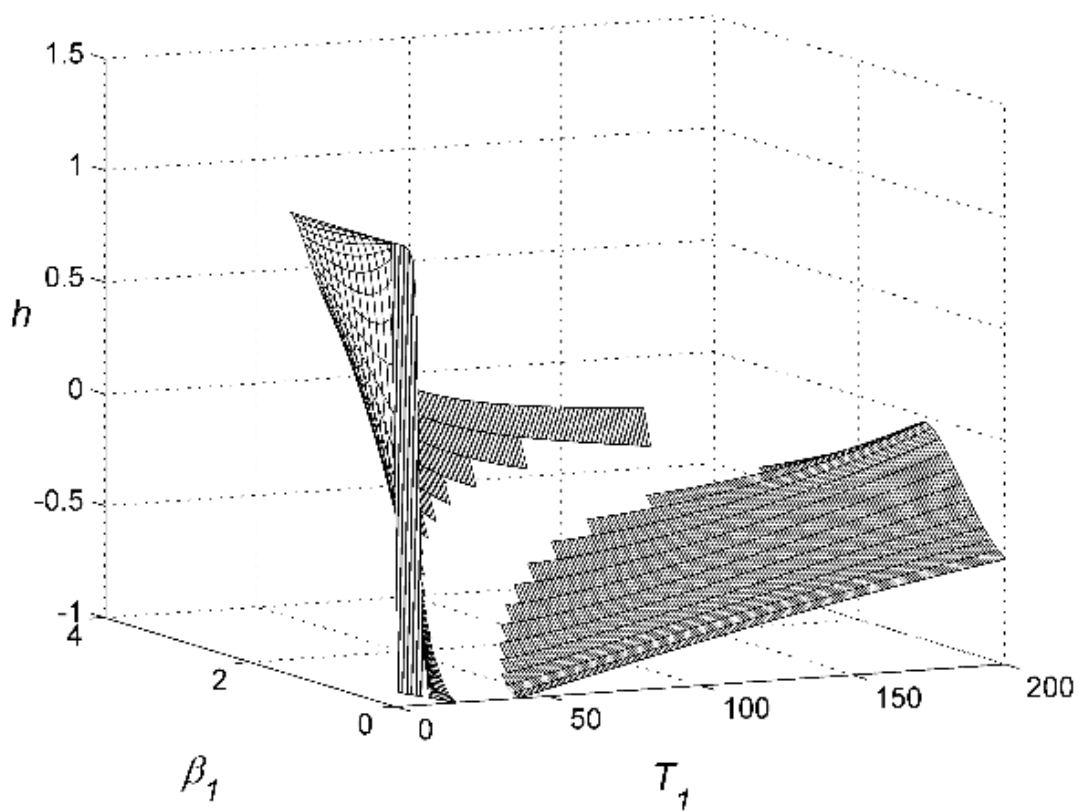
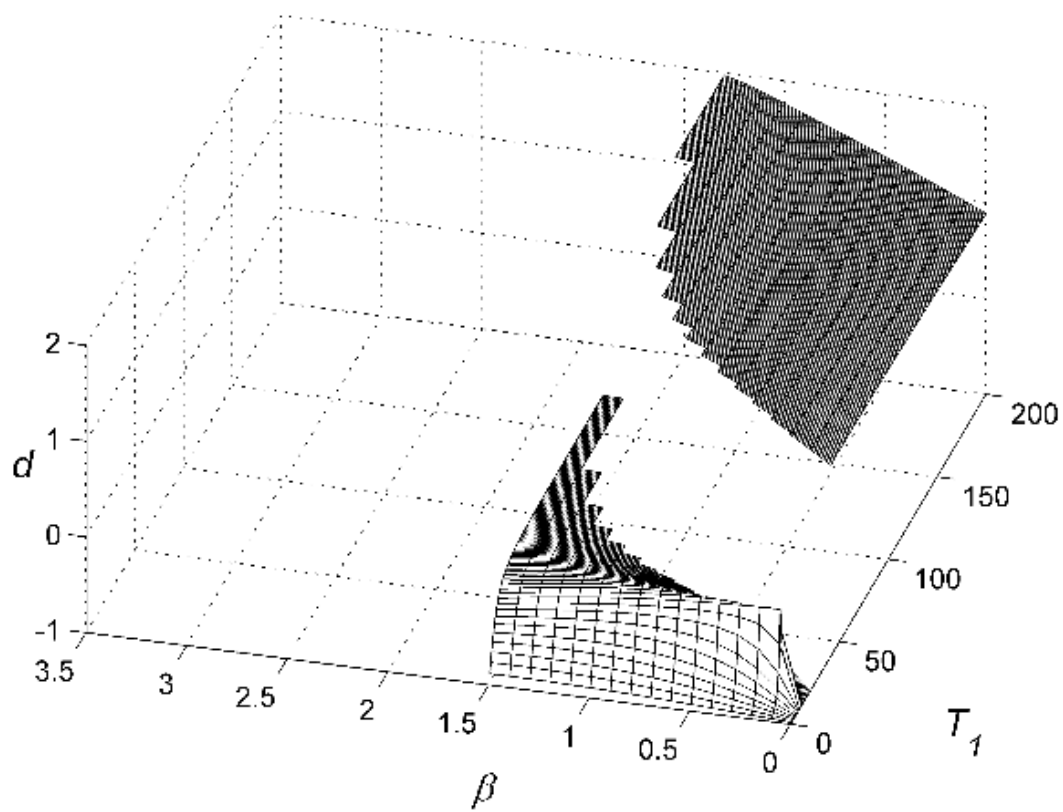


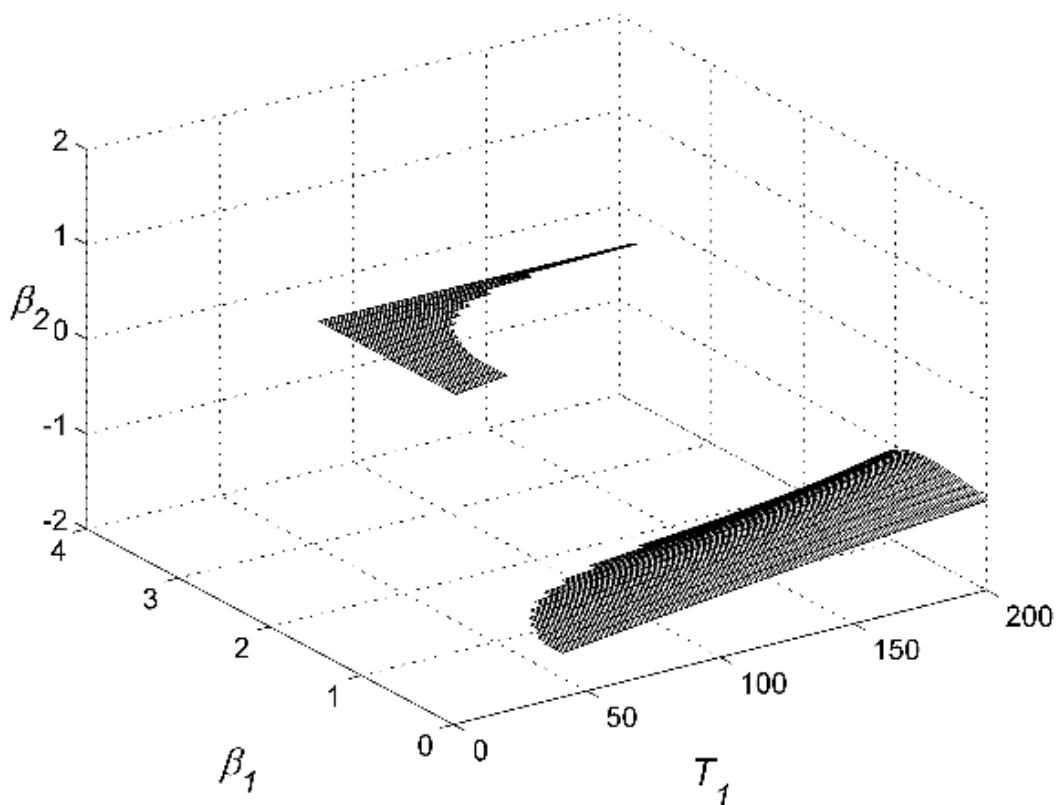
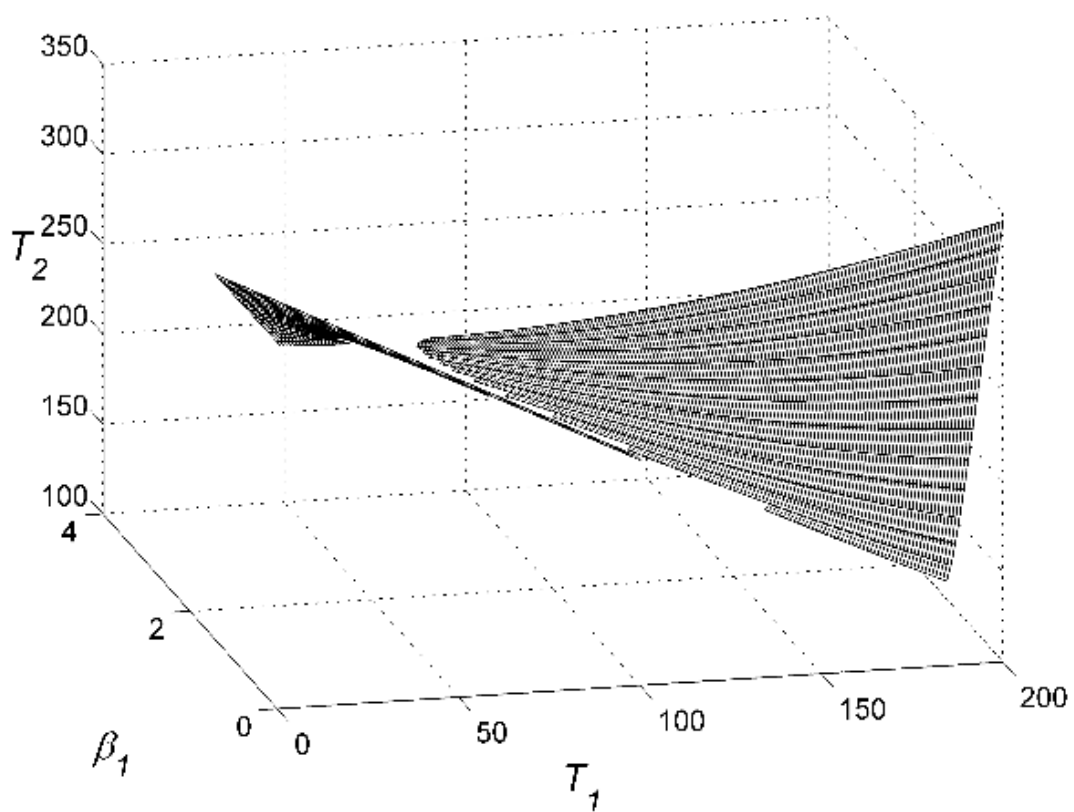
Slika 82. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_1$  i  $\beta_1$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_2$ ; d)  $\beta_2$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .



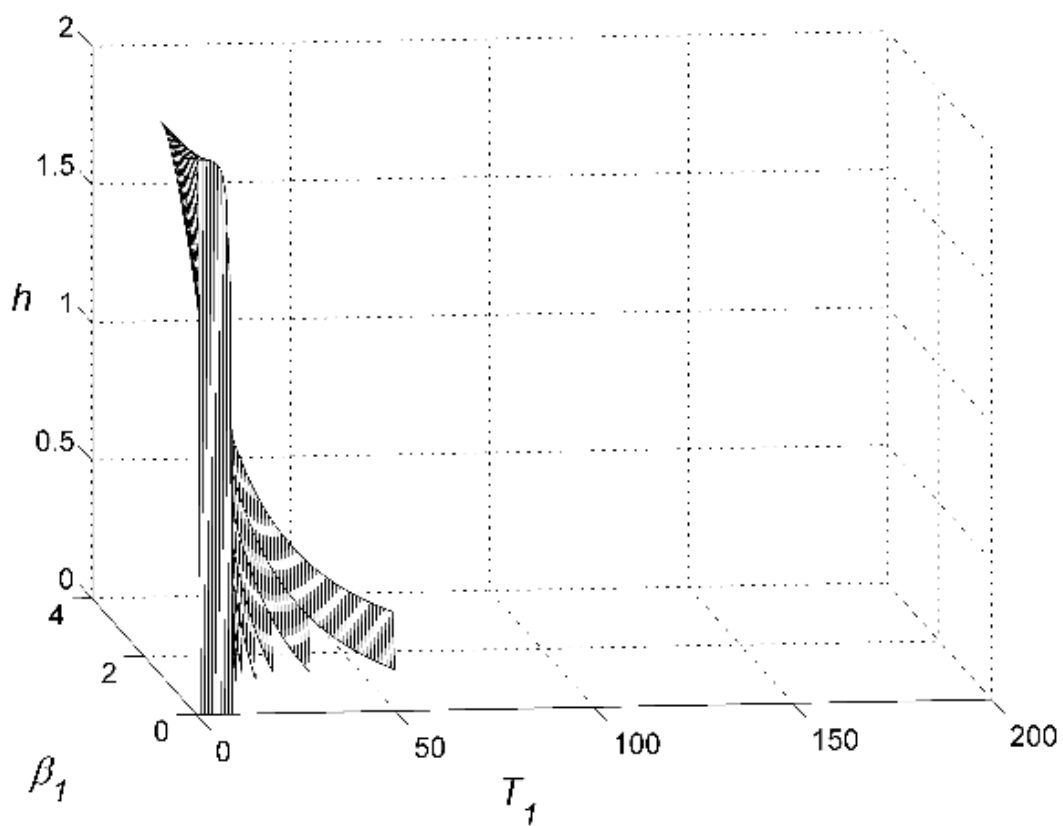
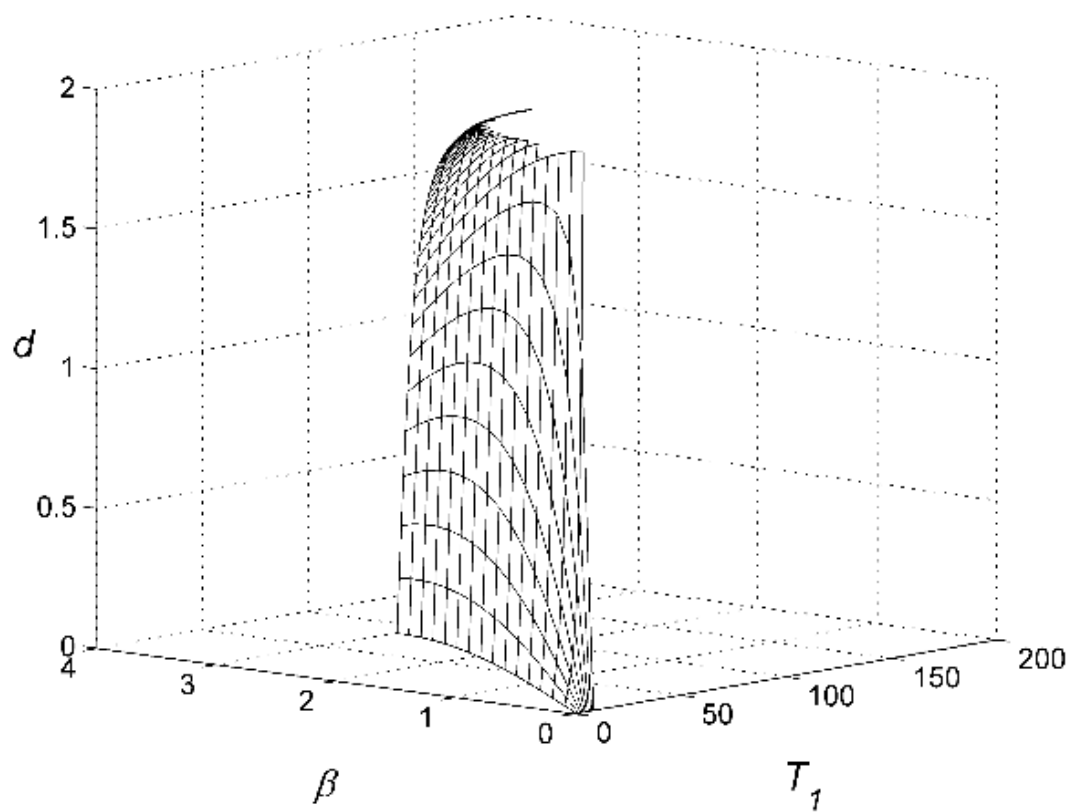


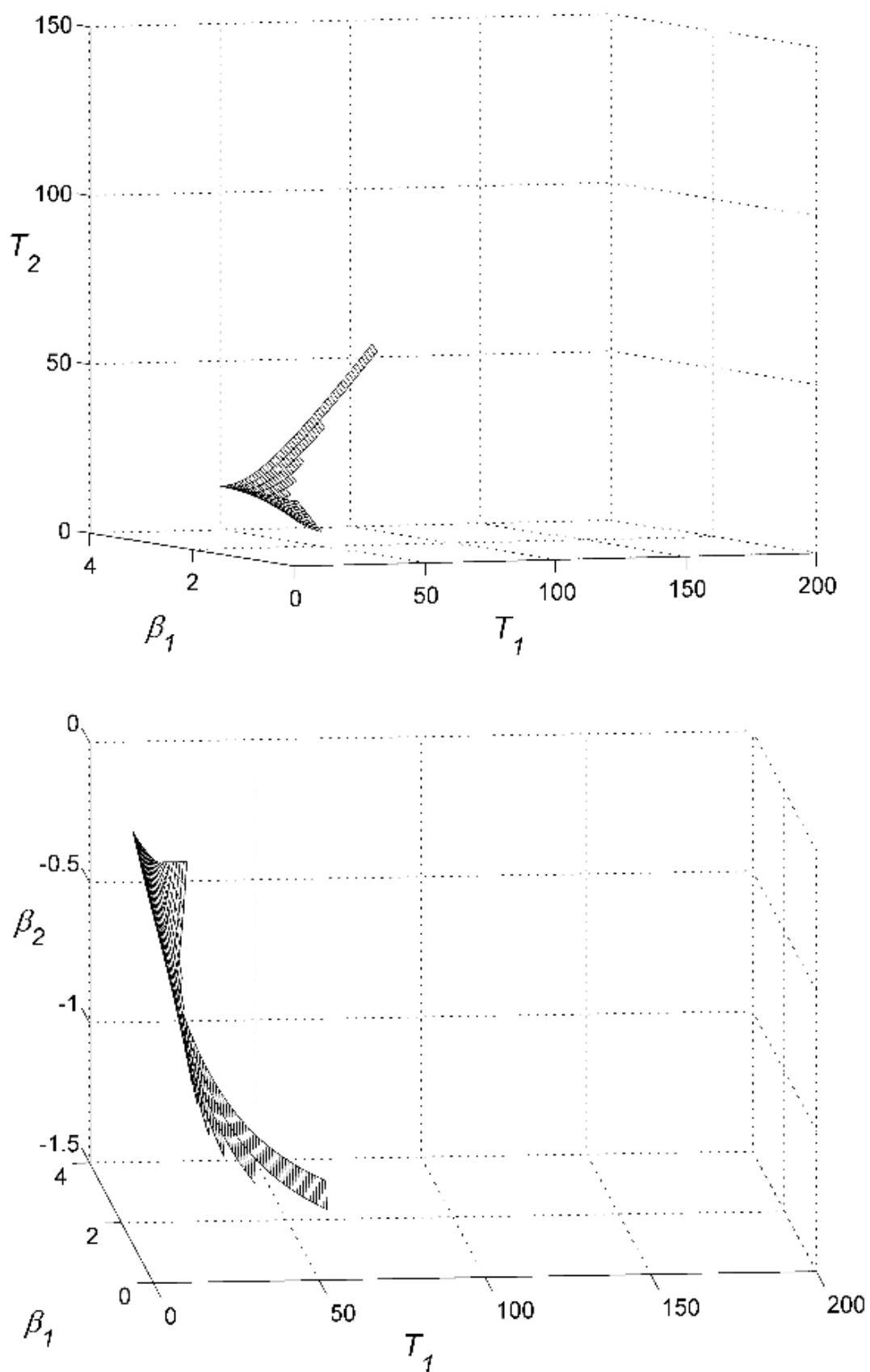
Slika 83. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_1$  i  $\beta_1$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_2$ ; d)  $\beta_2$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .



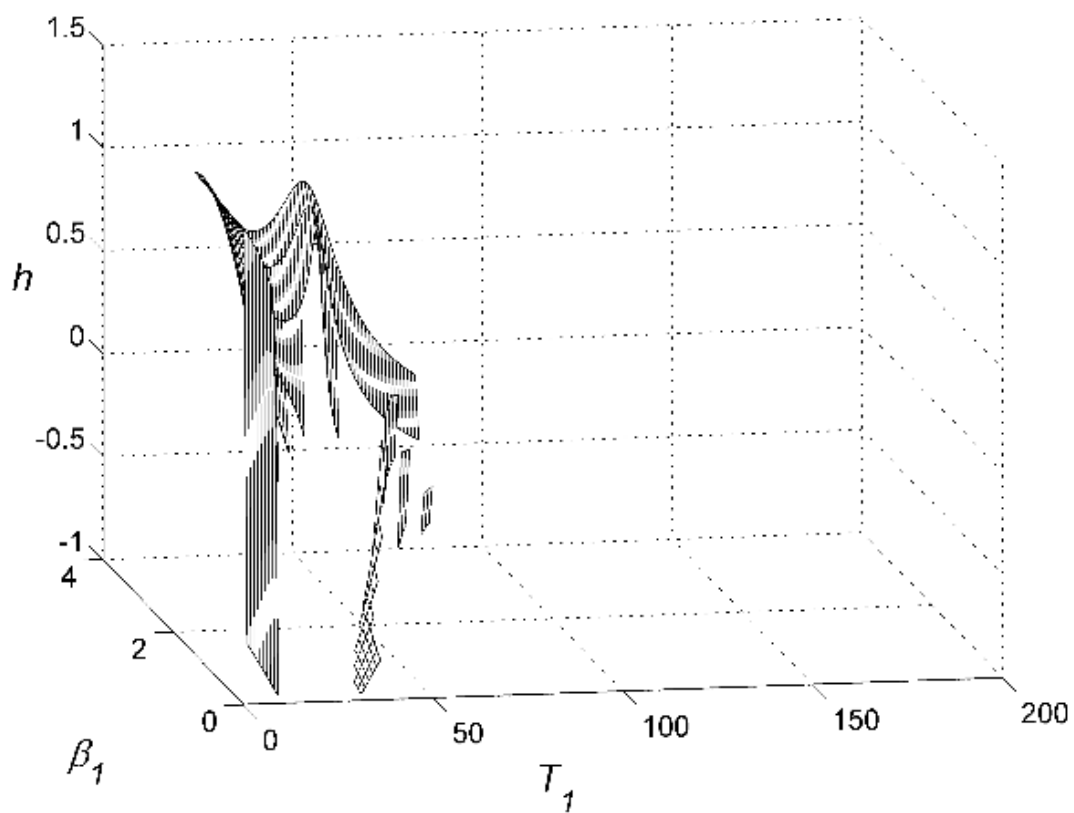
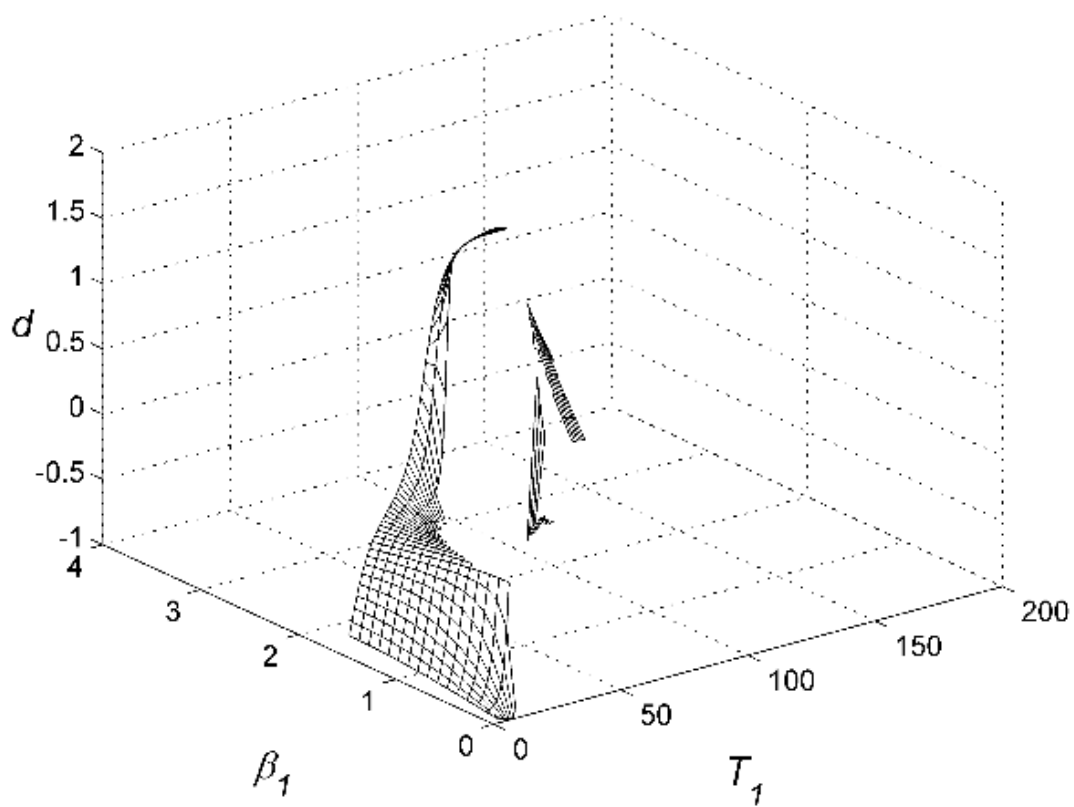


Slika 84. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_1$  i  $\beta_1$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_2$ ; d)  $\beta_2$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .

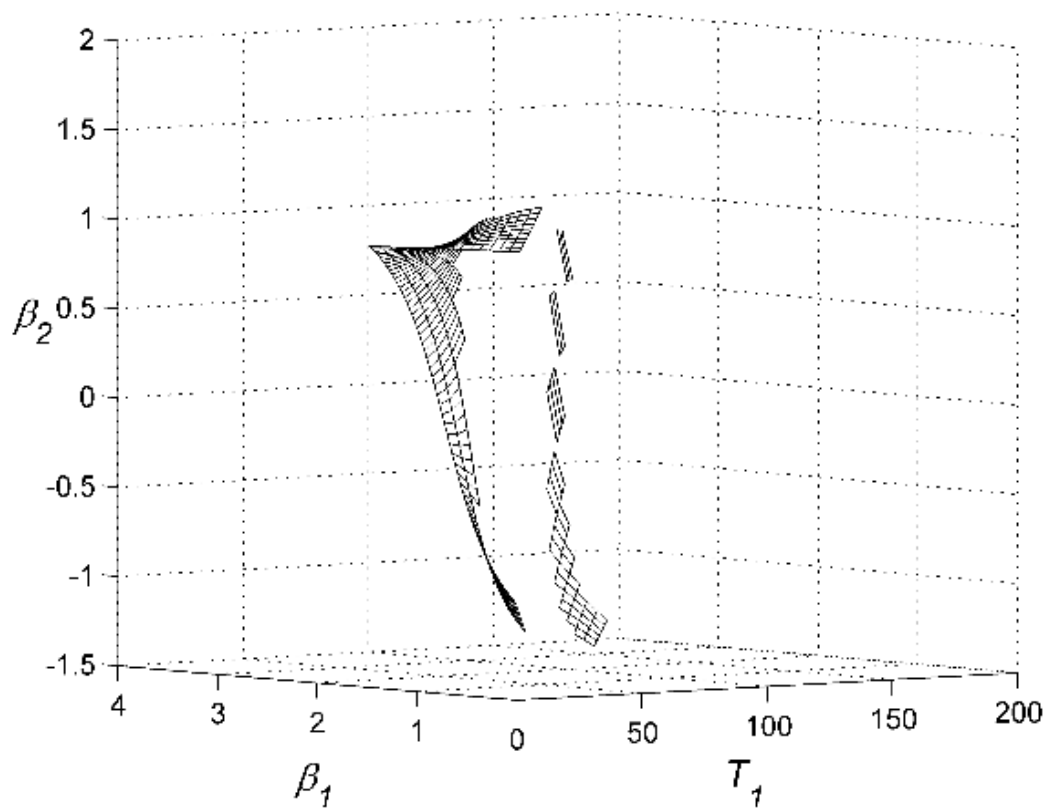
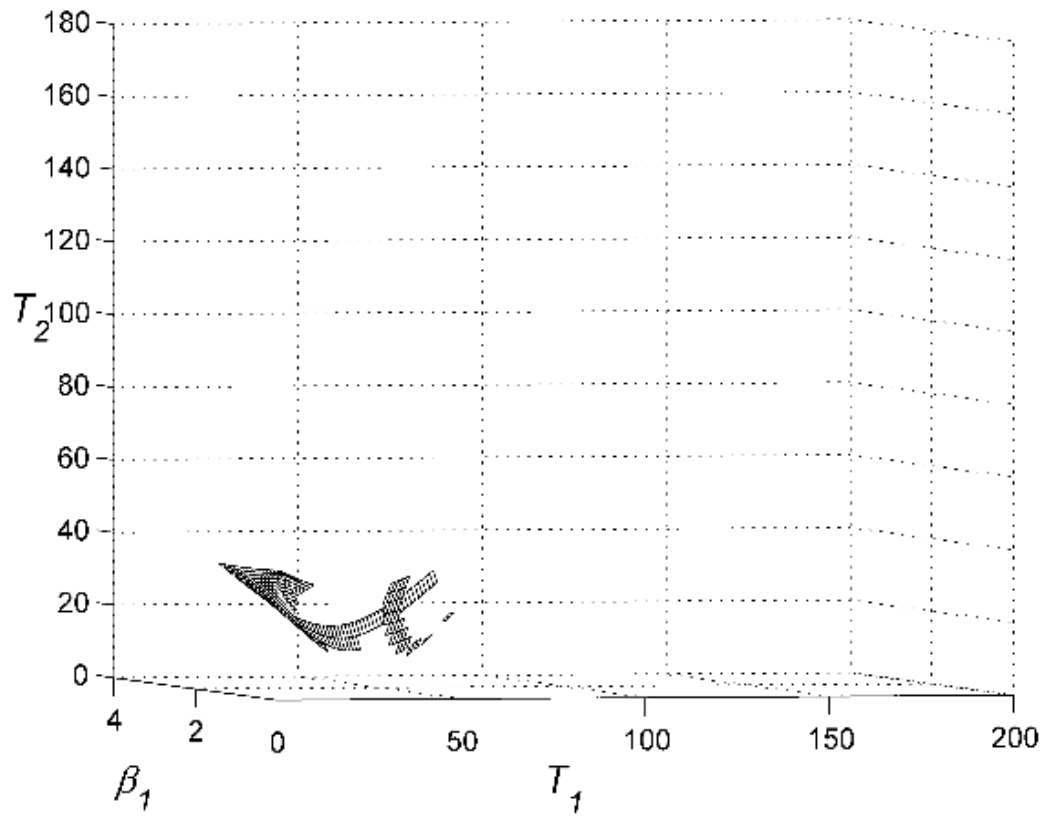




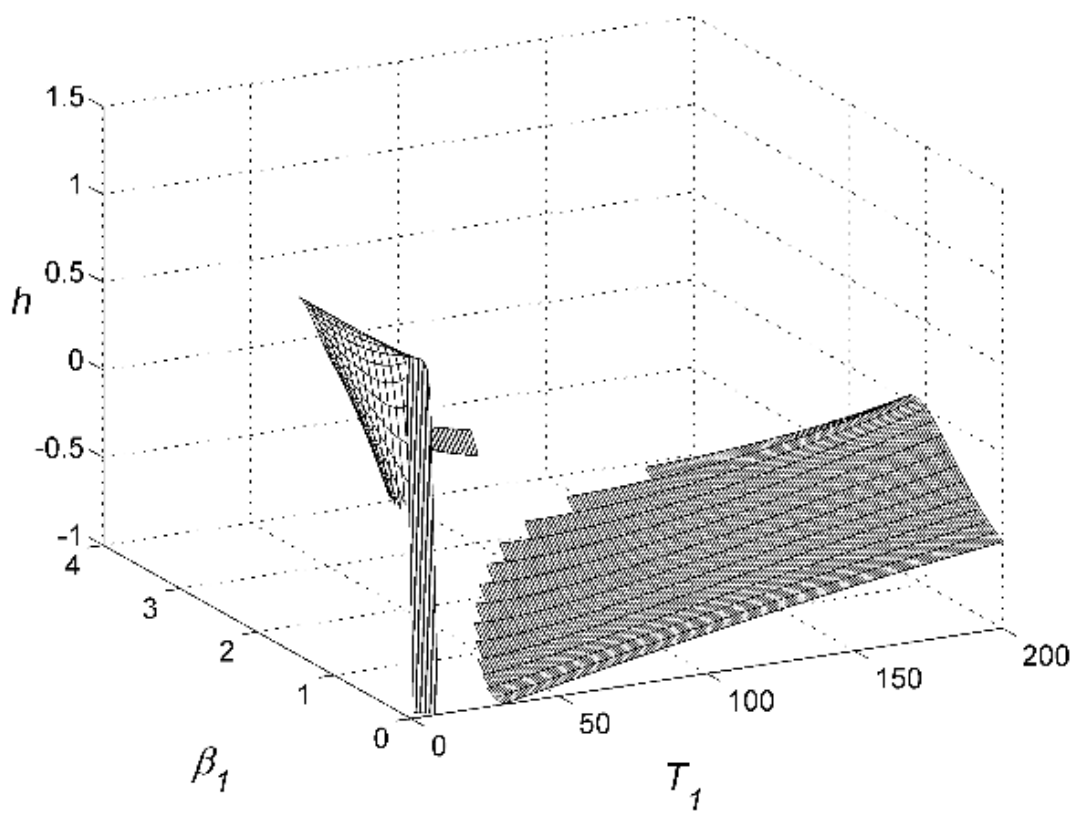
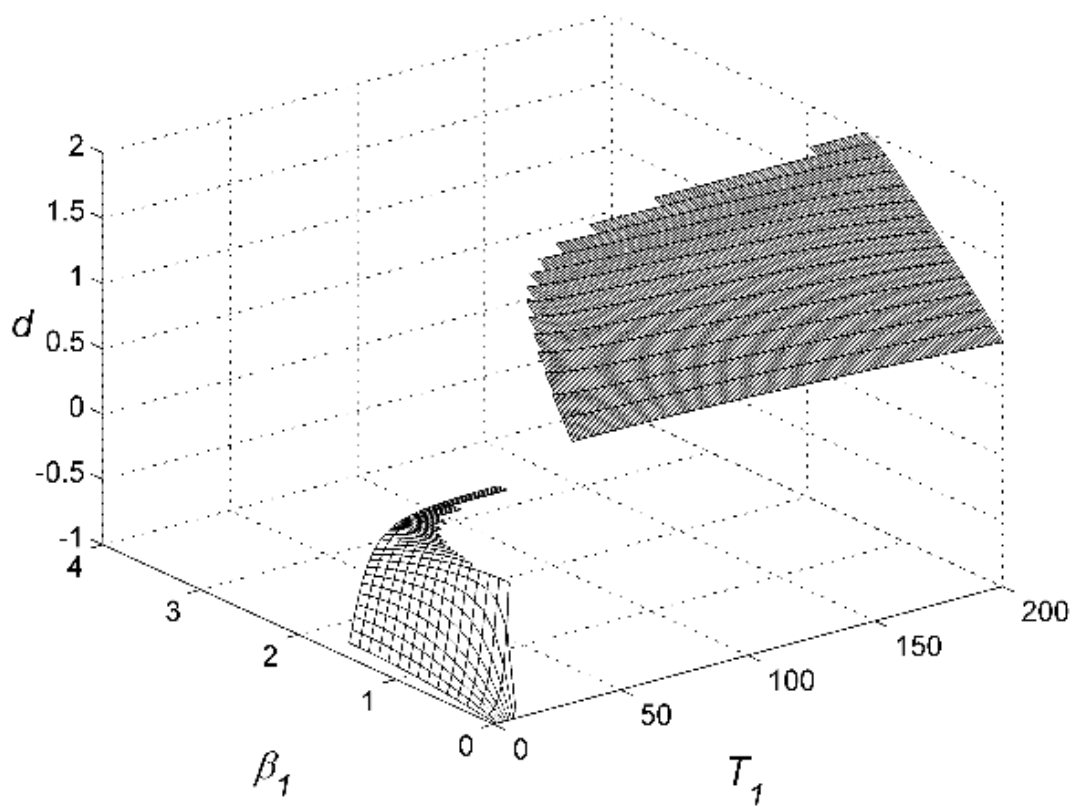
Slika 85. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_1$  i  $\beta_1$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_2$ ; d)  $\beta_2$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

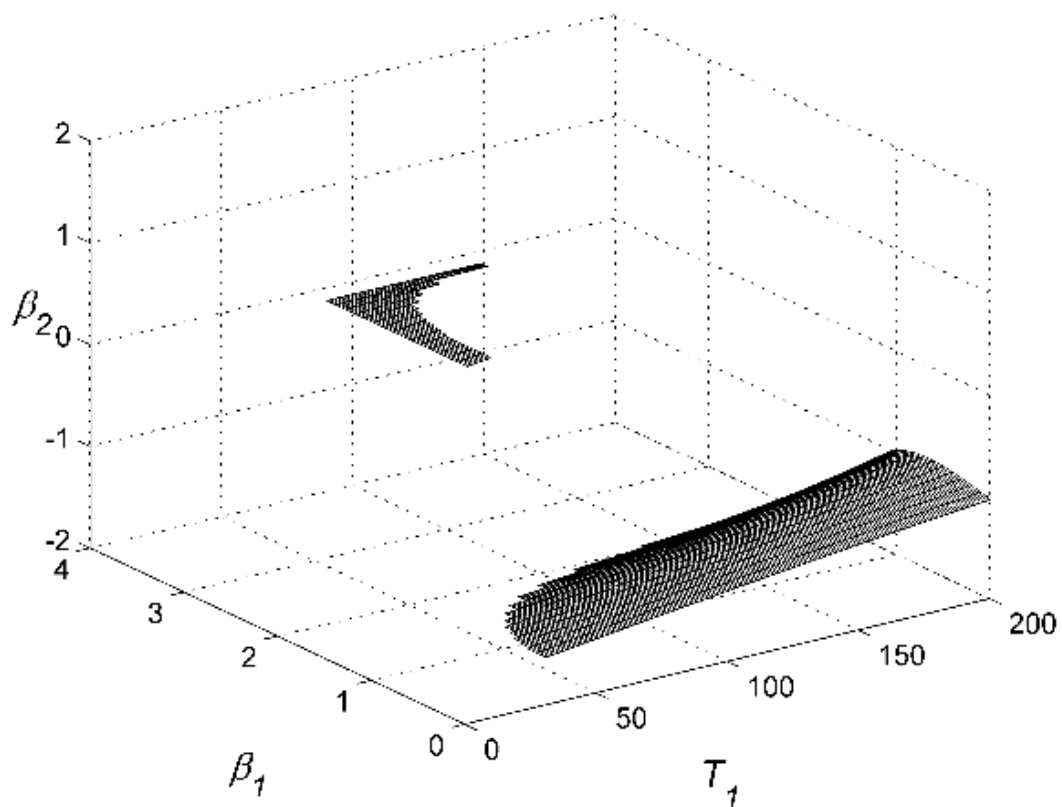
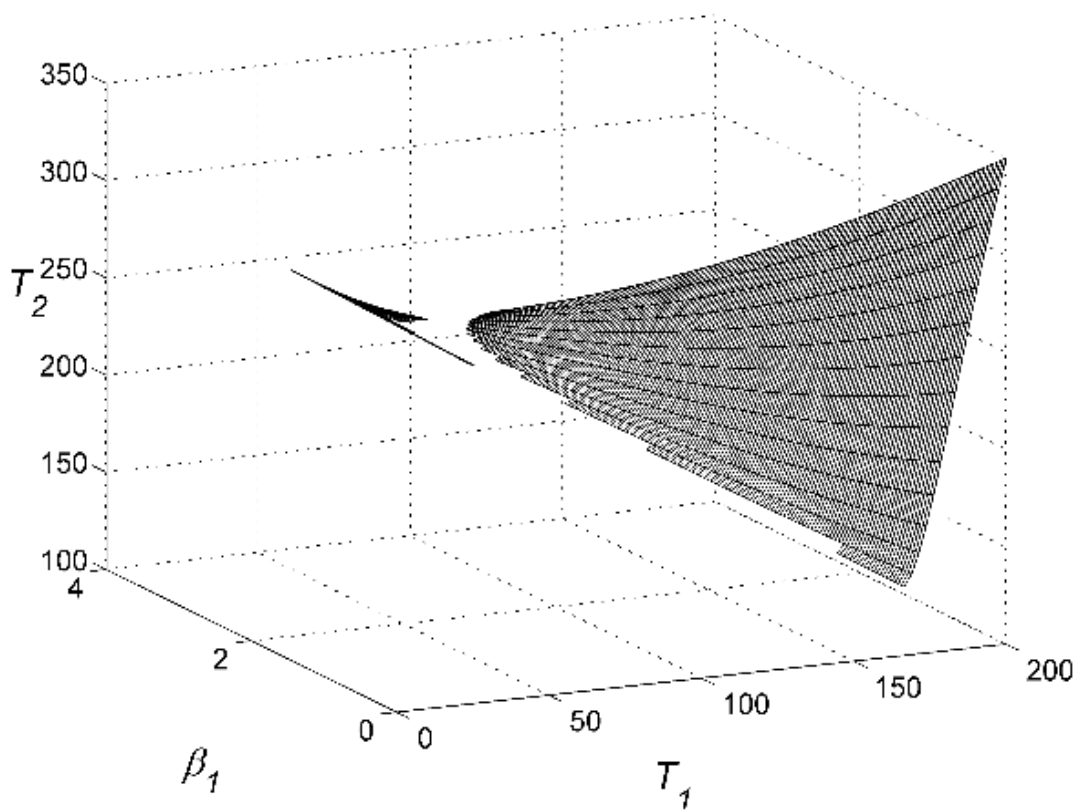






Slika 86. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_1$  i  $\beta_1$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_2$ ; d)  $\beta_2$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .





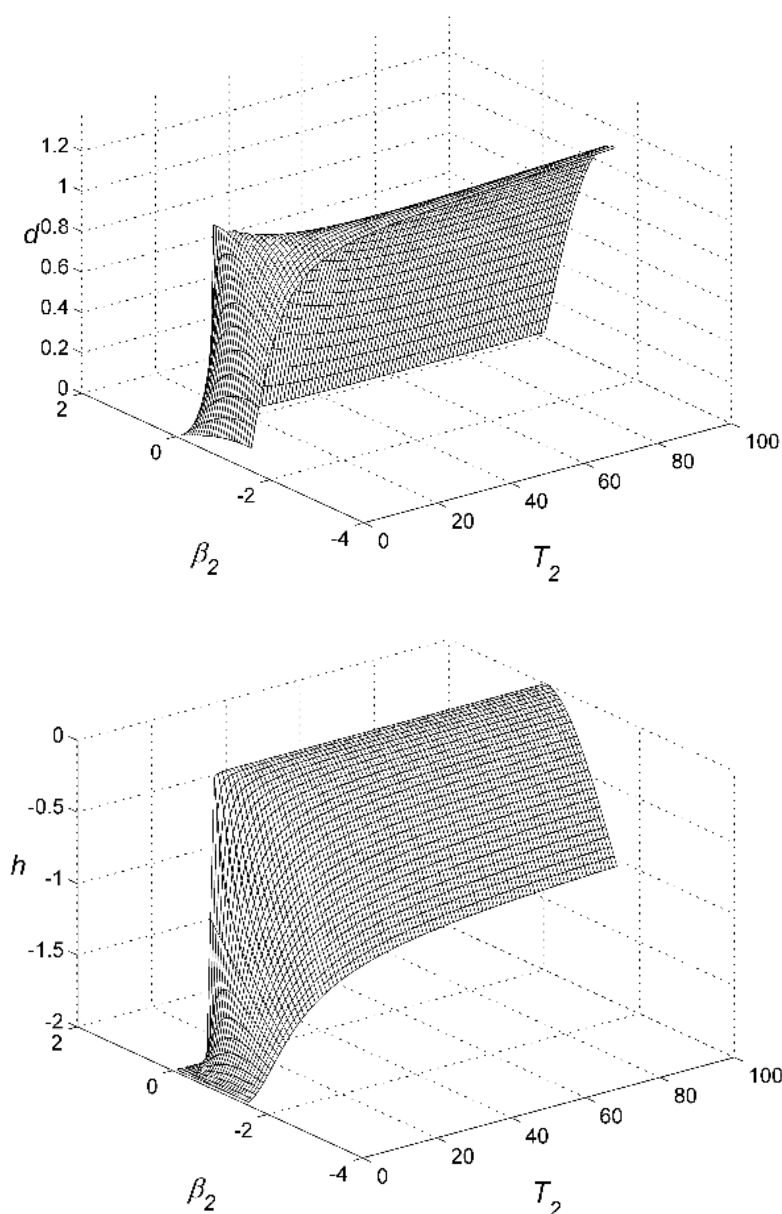
Slika 87. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_1$  i  $\beta_1$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_2$ ; d)  $\beta_2$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

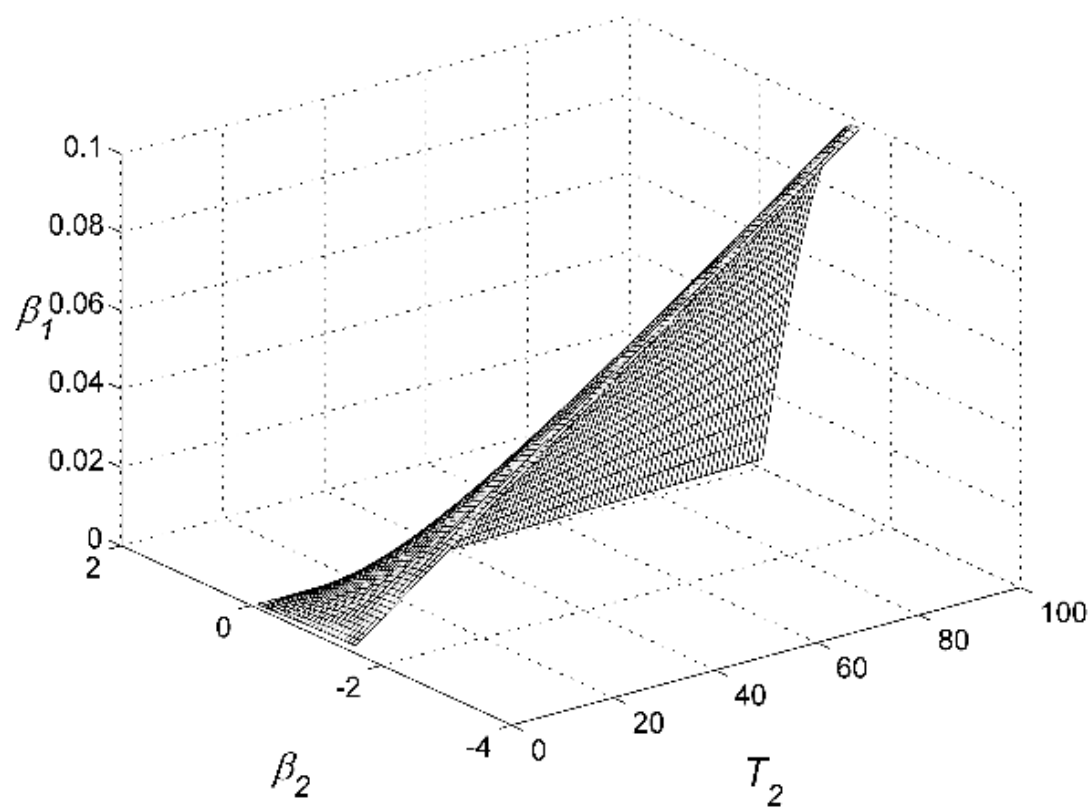
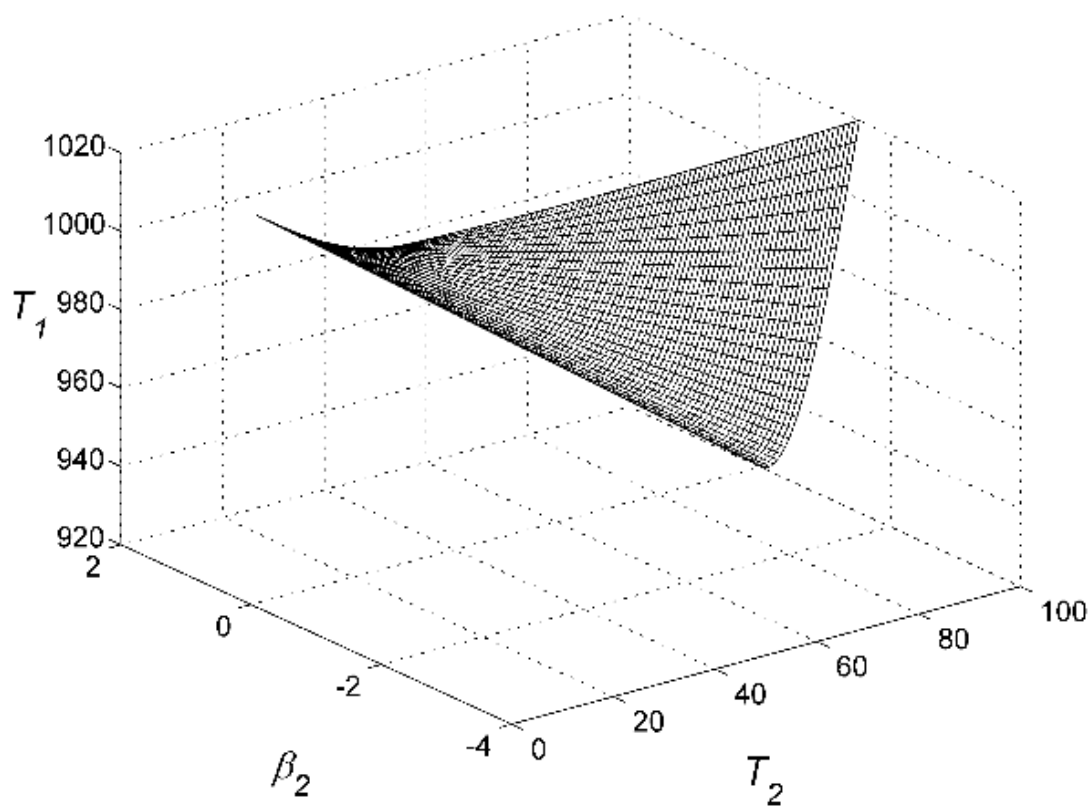
## 8.5 Upravljanje vektorom potiska беспilotne letjelice 2

Upravljanje vektorom potiska беспilotne letjelice 2 ostvaruje se na način opisan u poglavlju *Detaljno modeliranje* na stranici 49. Sustav je razmatran u različitim režimima leta ( $\psi = 0 - \pi/2$ ) pri različitim omjerima masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ).

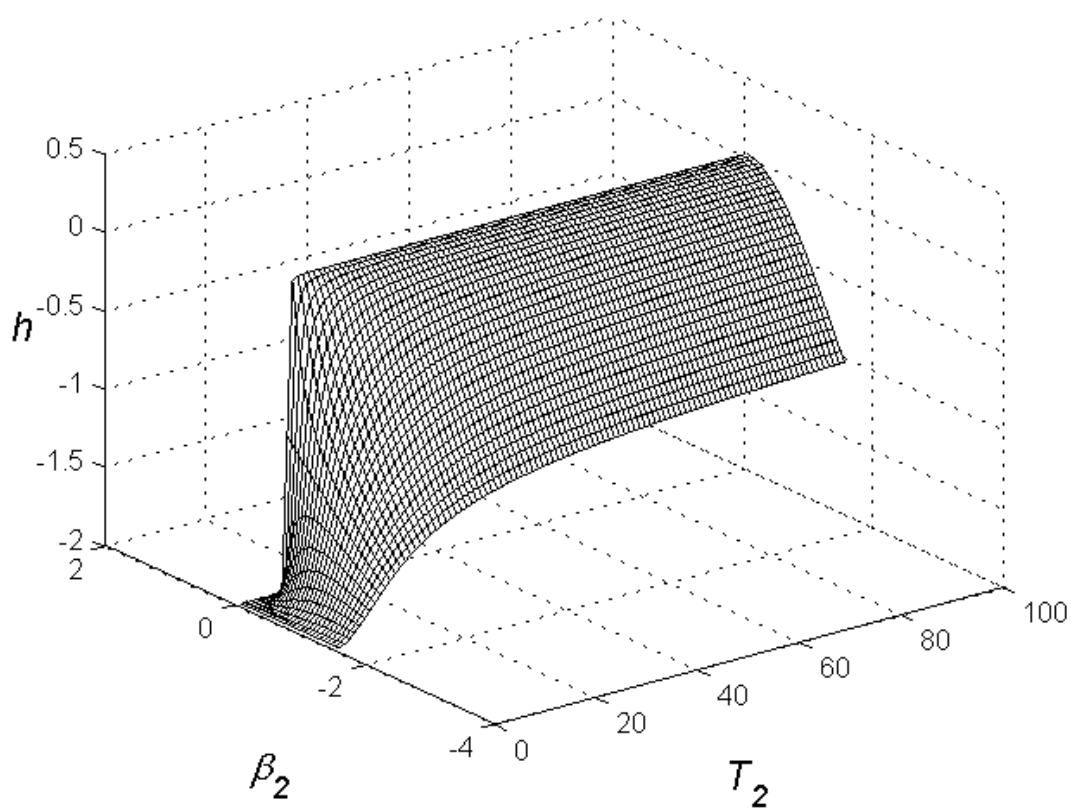
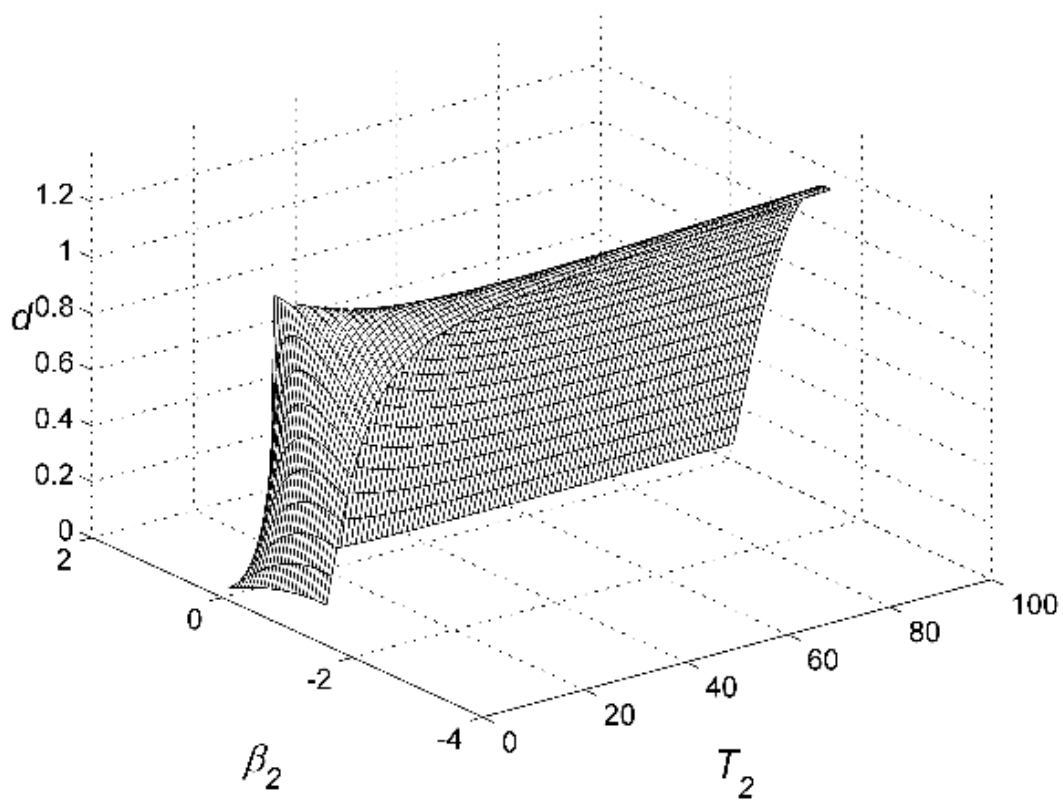
U razmatranom slučaju analiziran je međusobni položaj letjelica 1 i 2. Za letjelicu 1 analiziran je vektor potiska  $T_1$  s pripadnim kutom  $\beta_1$  kako bi se odredilo ponašanje letjelice budući da u ovom načinu upravljanja ona nije potpuno autonomna nego slijedi letjelicu 2.

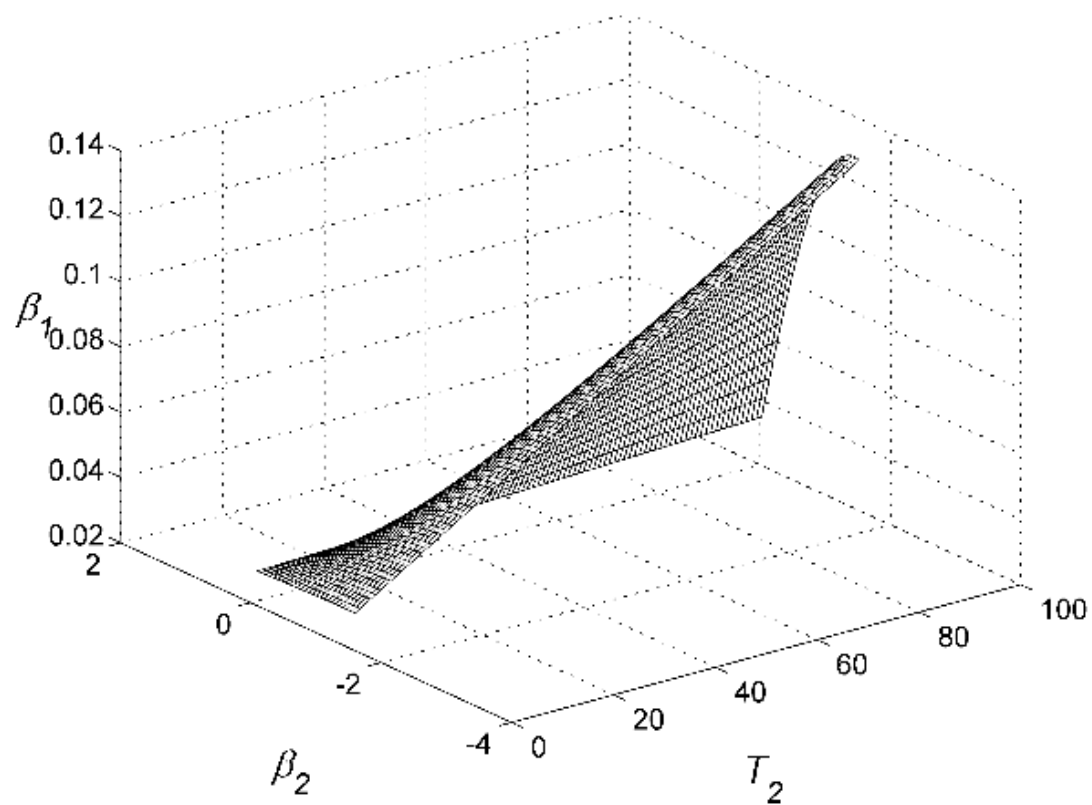
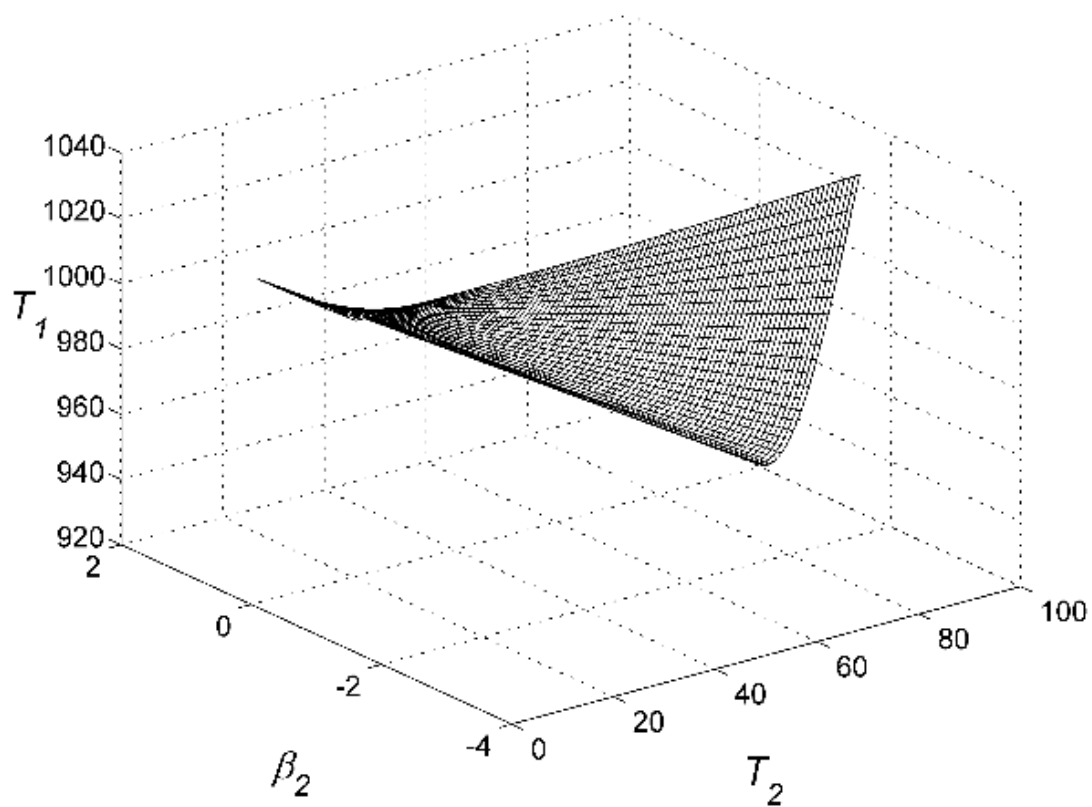
Detaljna analiza sustava razrađena je u poglavlju *Diskusija* na stranici 192. Tablični prikazi rezultata istraživanja prikazani su u *Prilogu* na stranici 203.



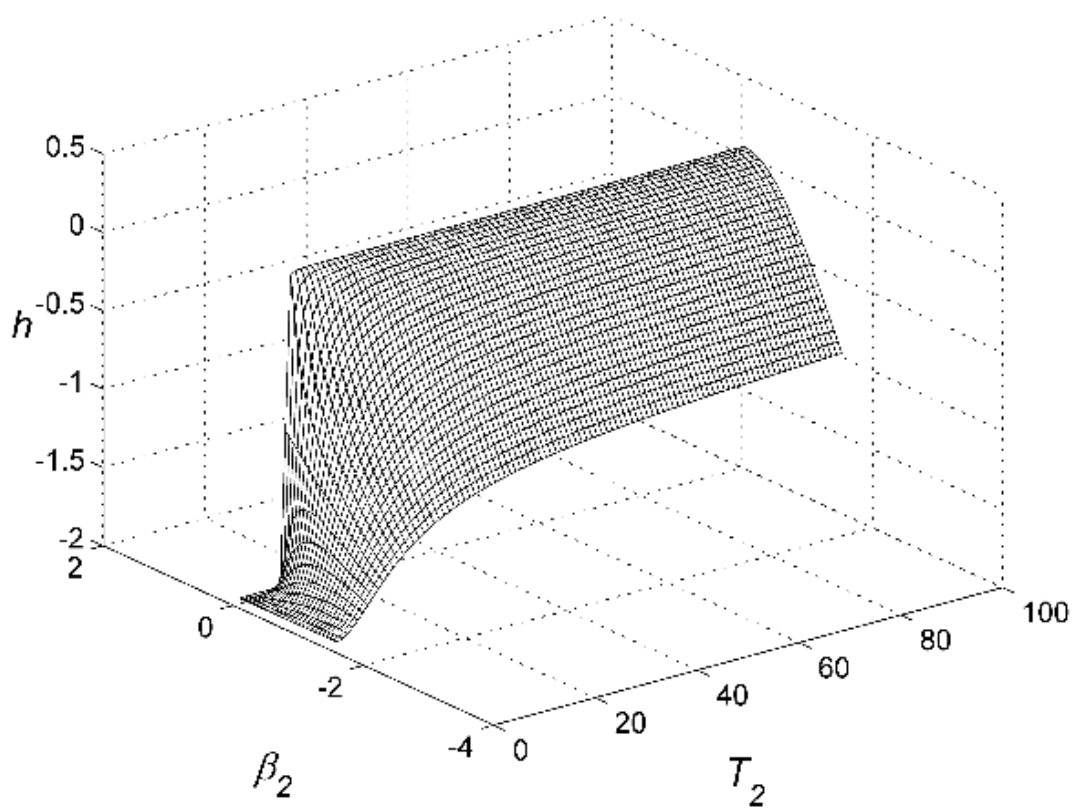
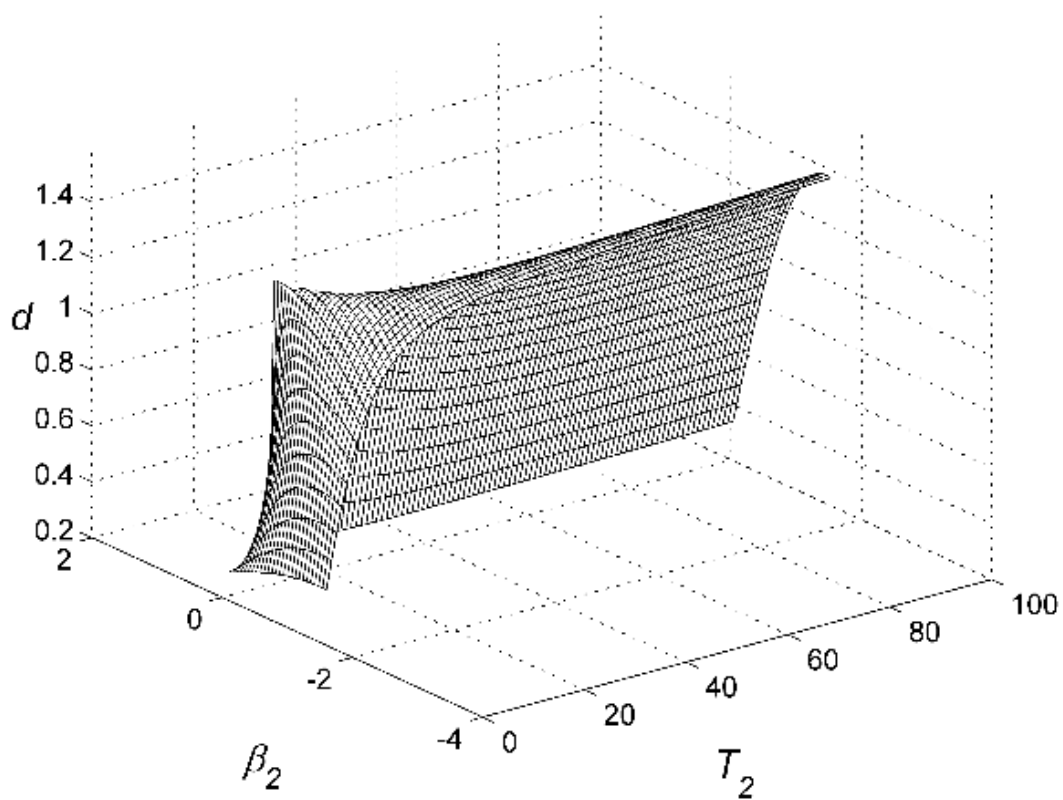


Slika 88. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_2$  i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $\beta_1$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .

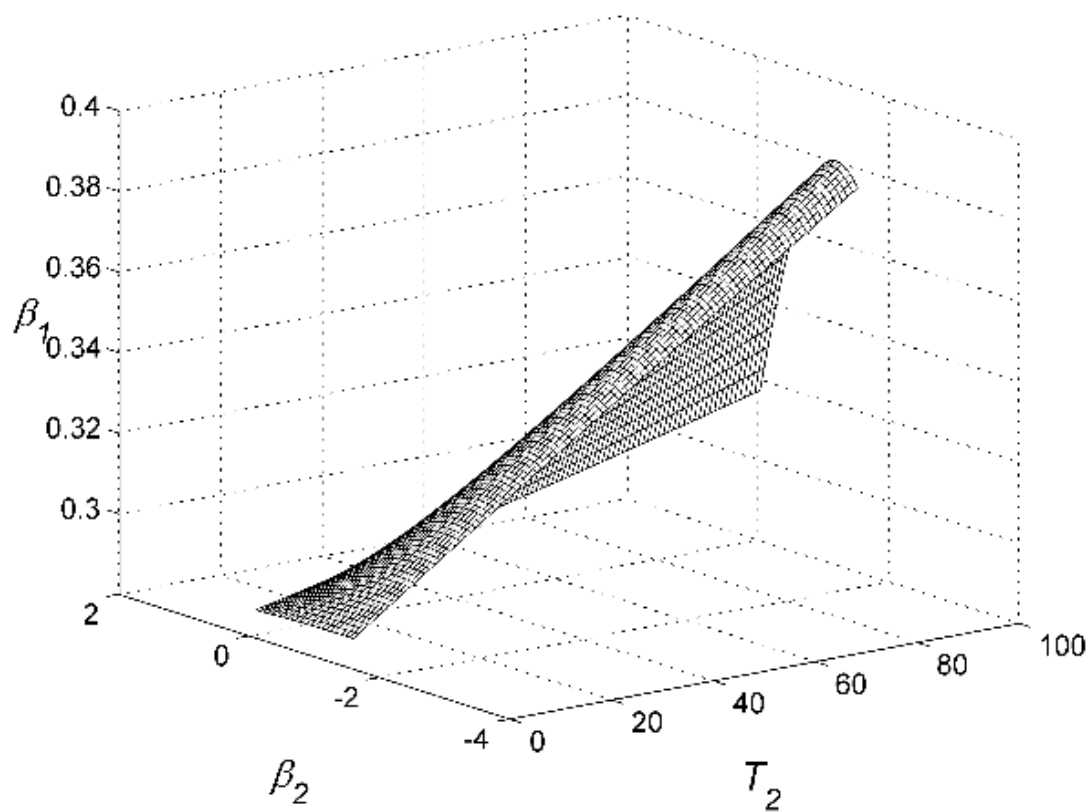
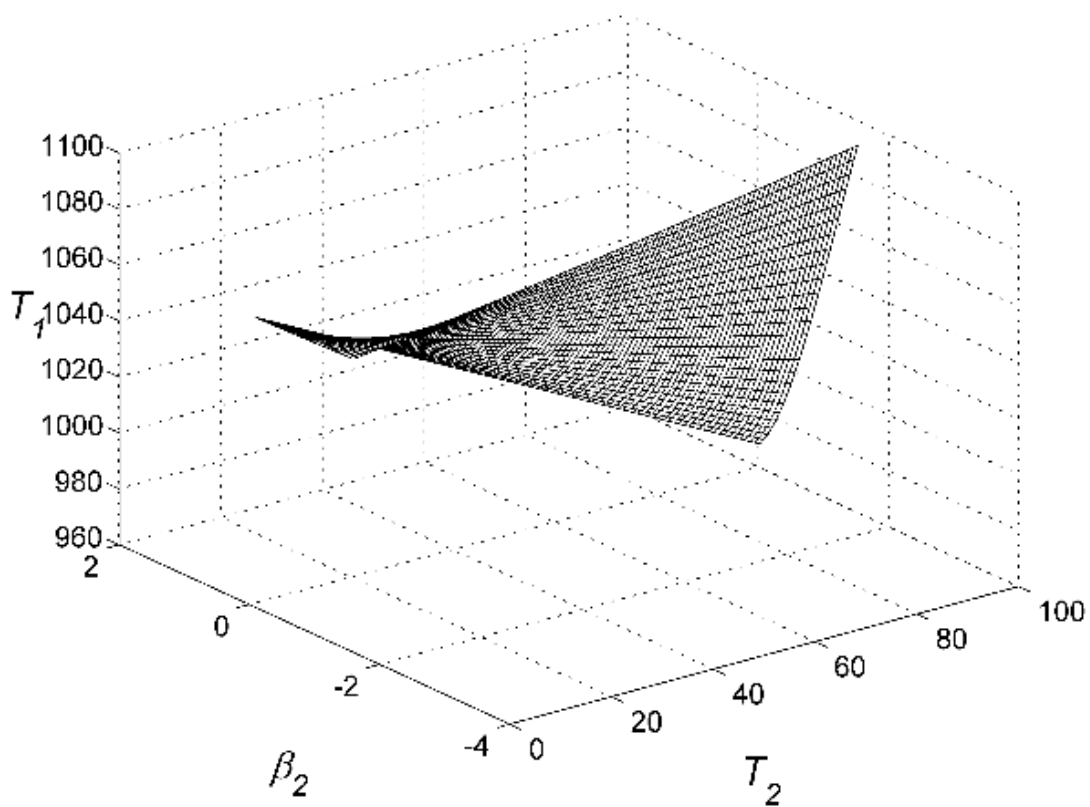




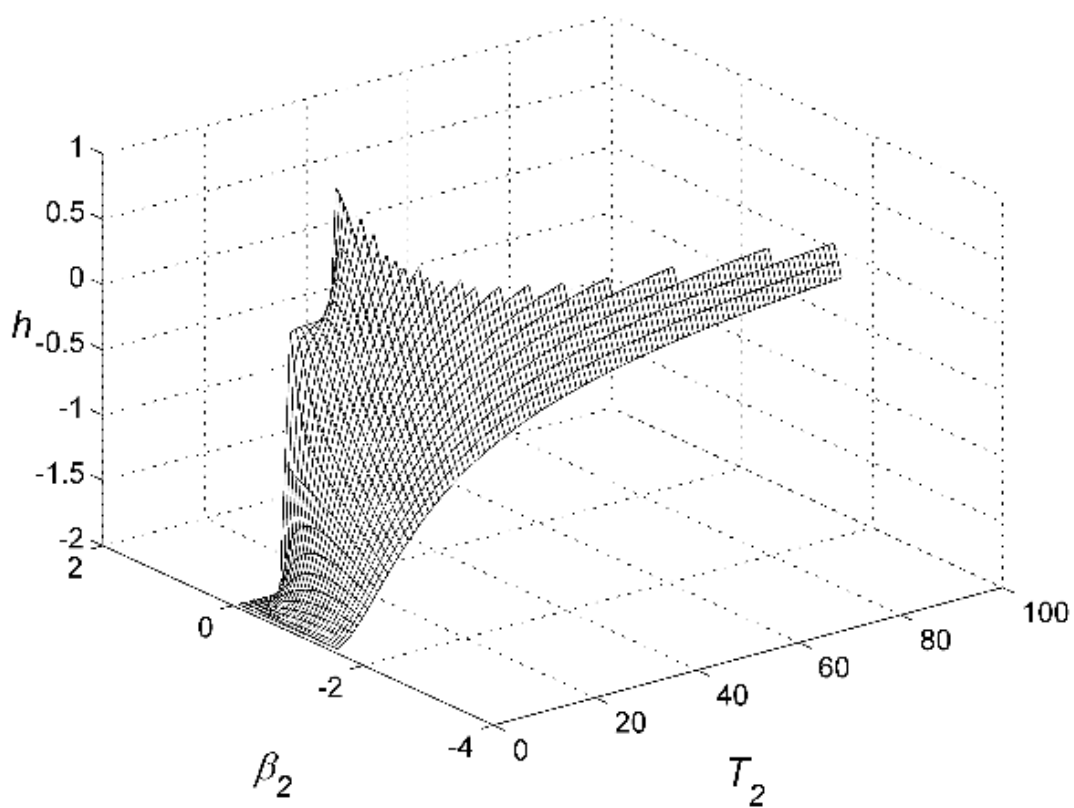
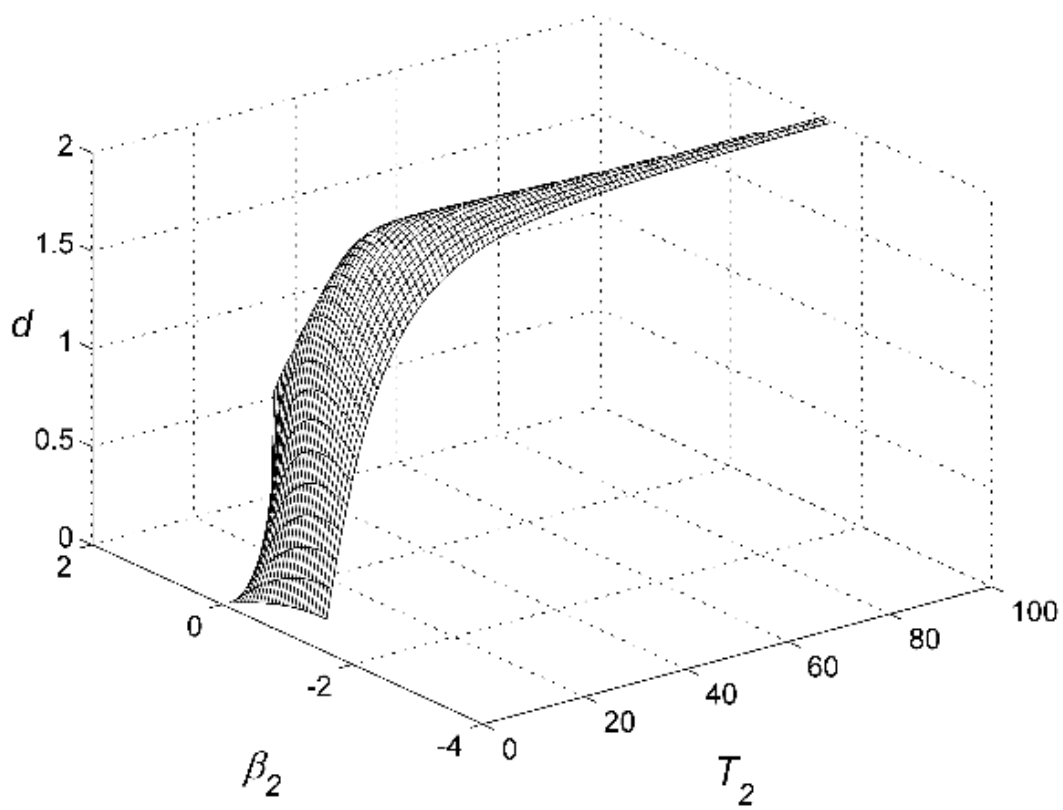
Slika 89. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_2$  i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $\beta_1$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .

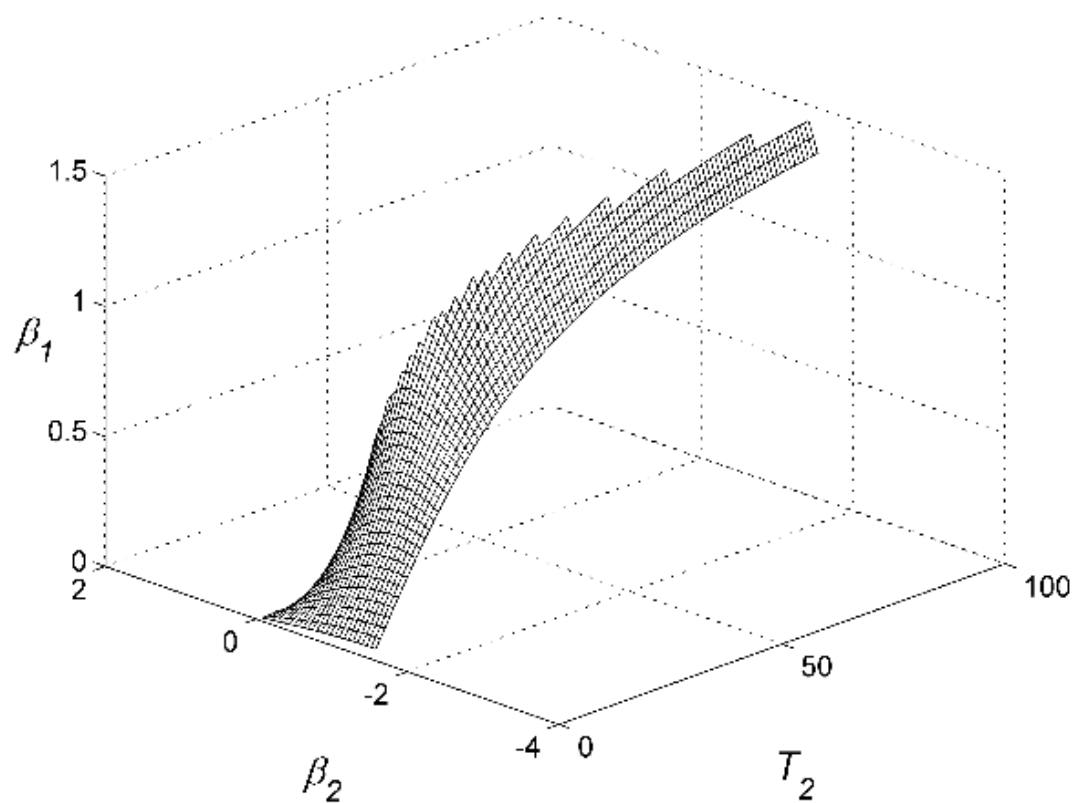
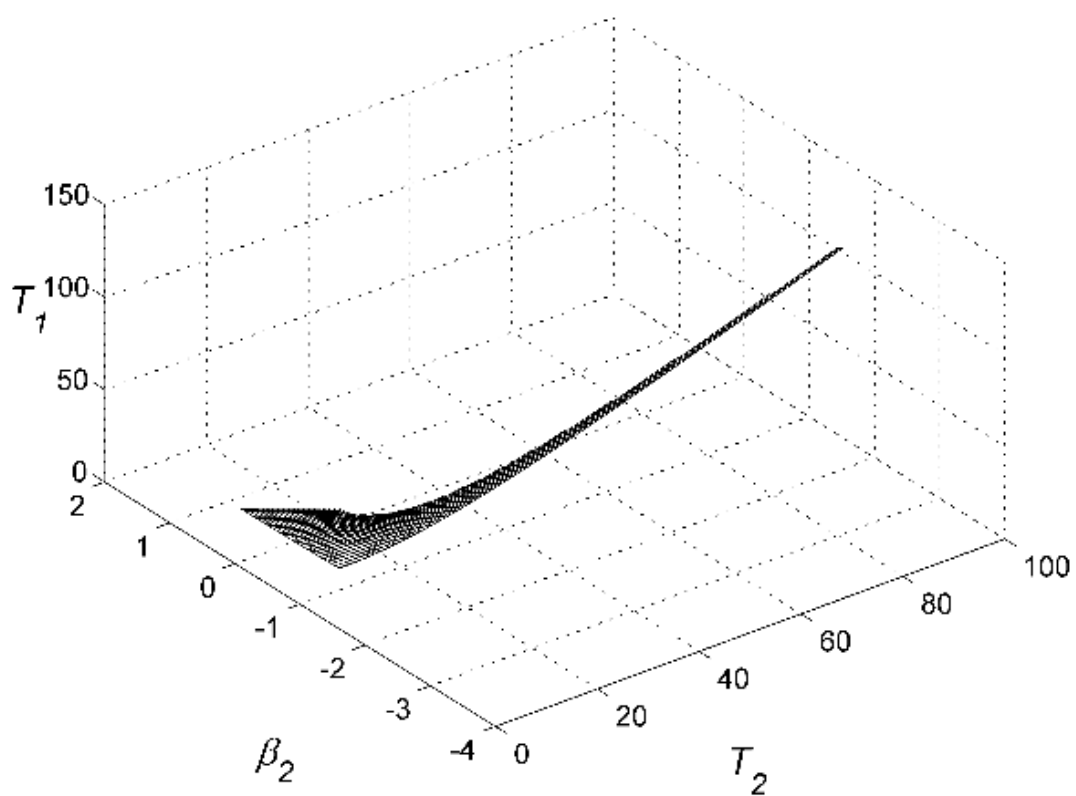




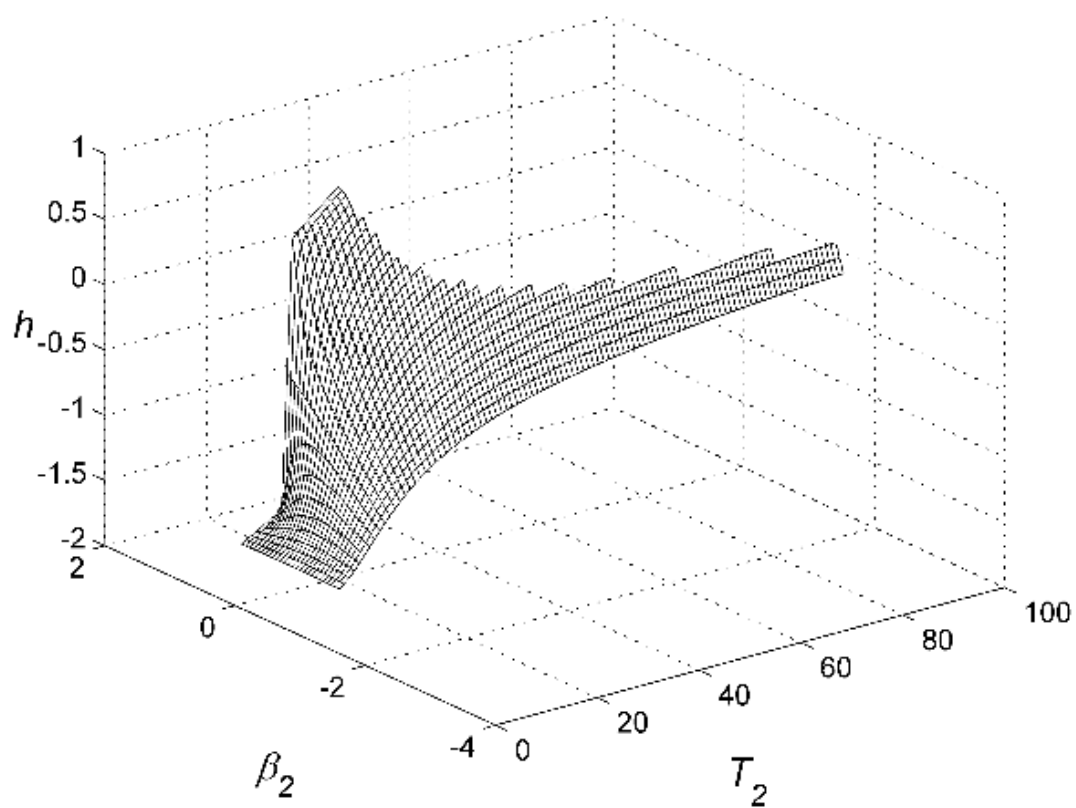
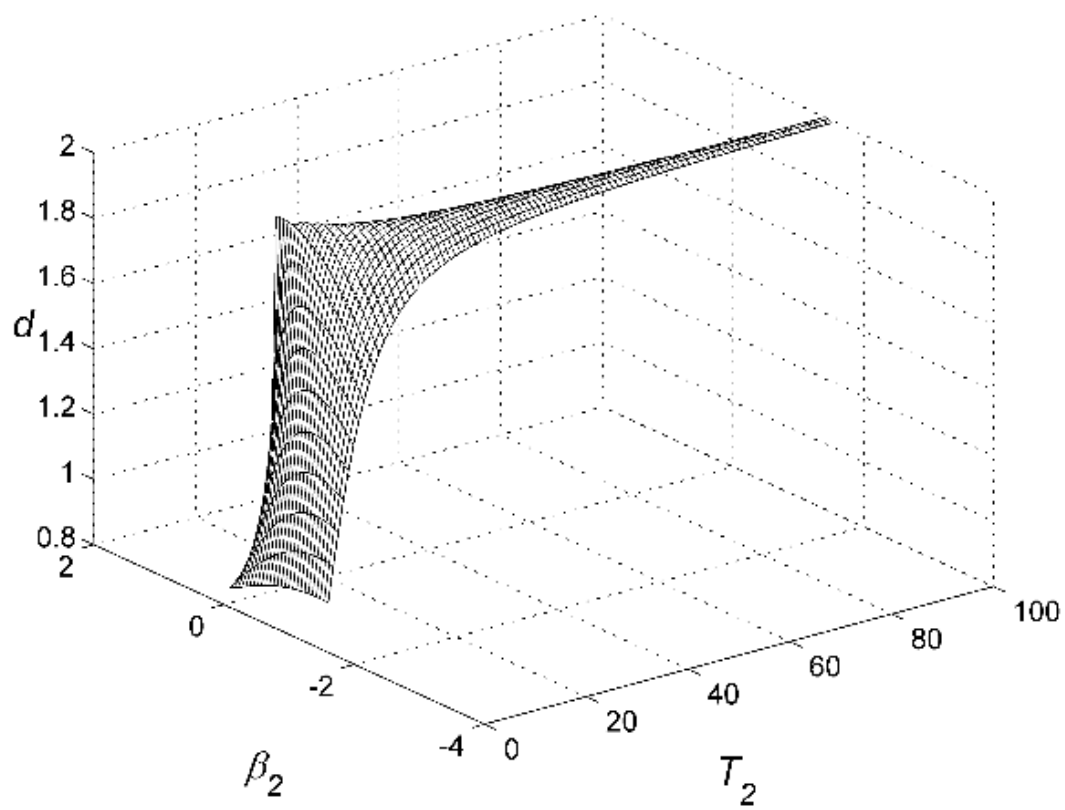


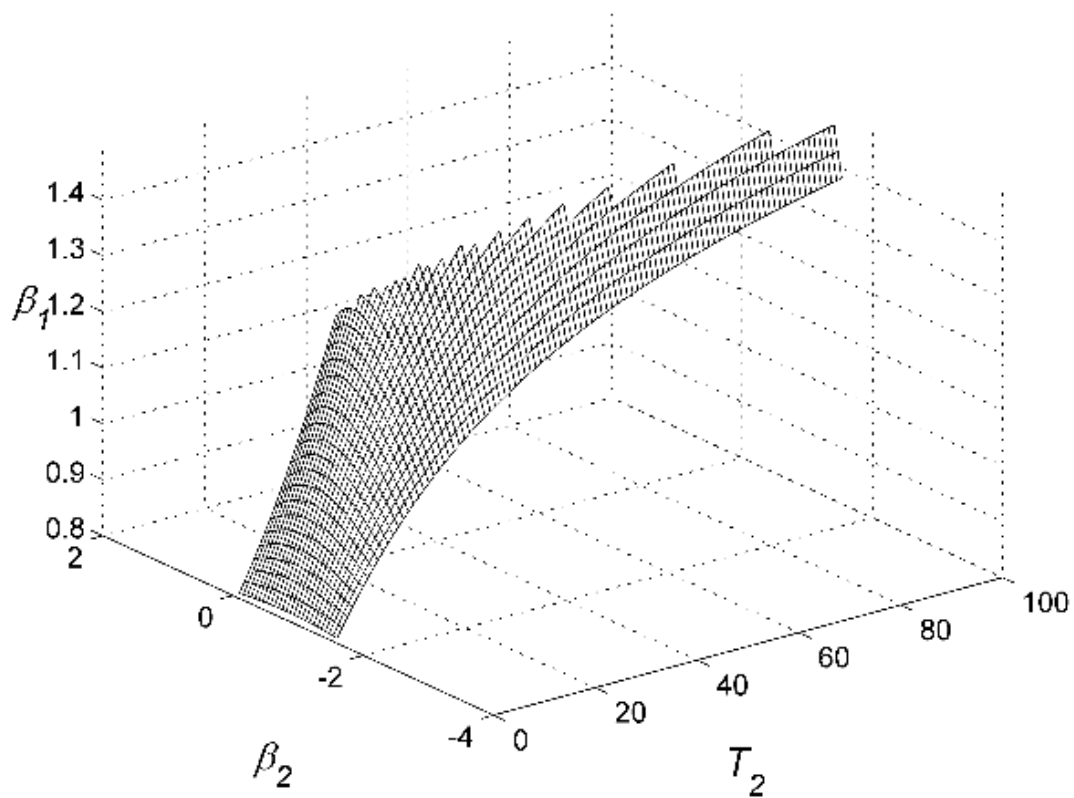
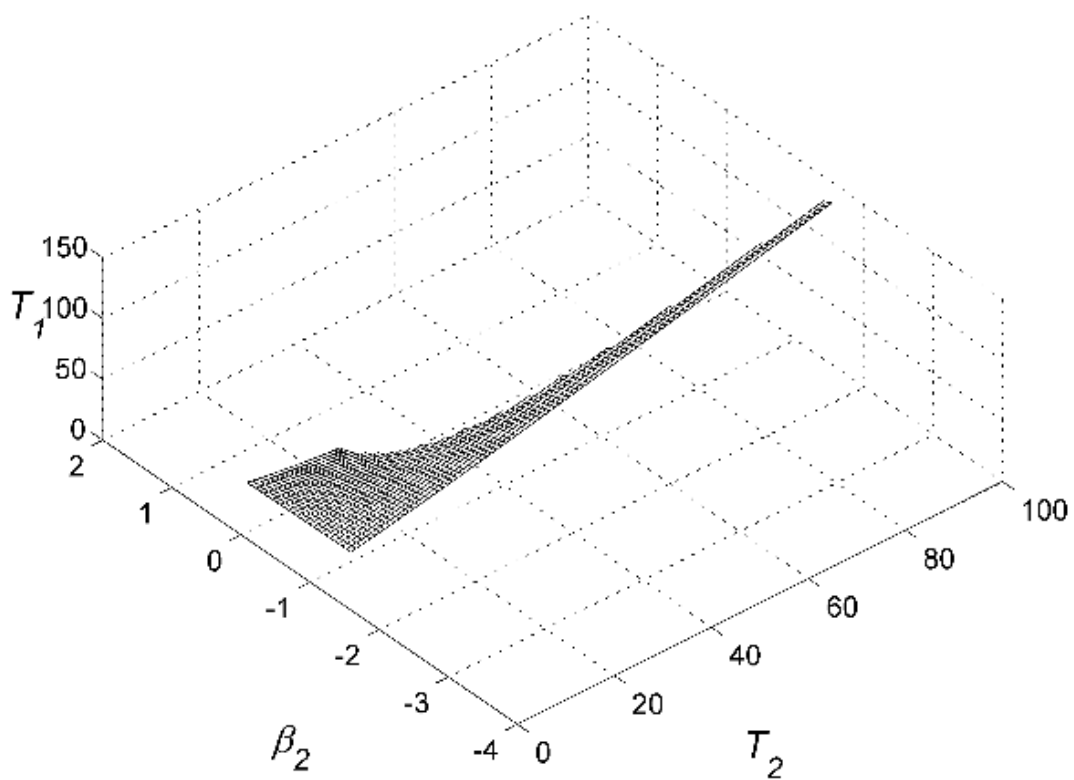
Slika 90. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_2$  i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $\beta_1$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .



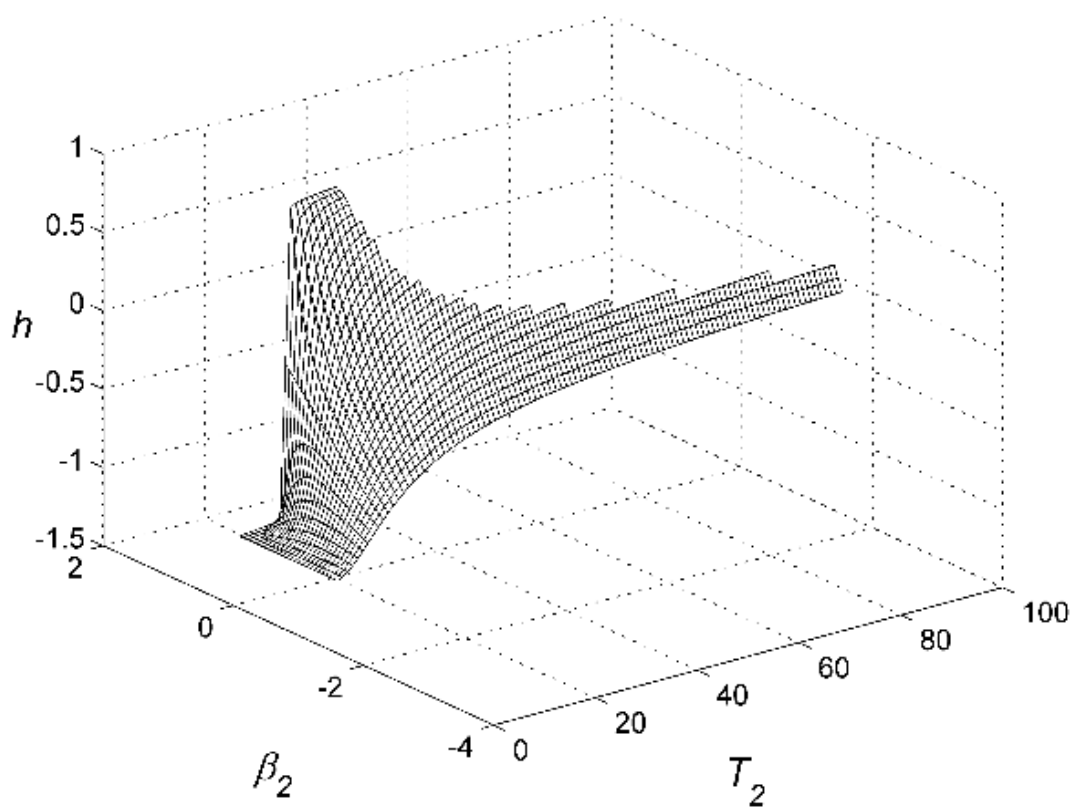
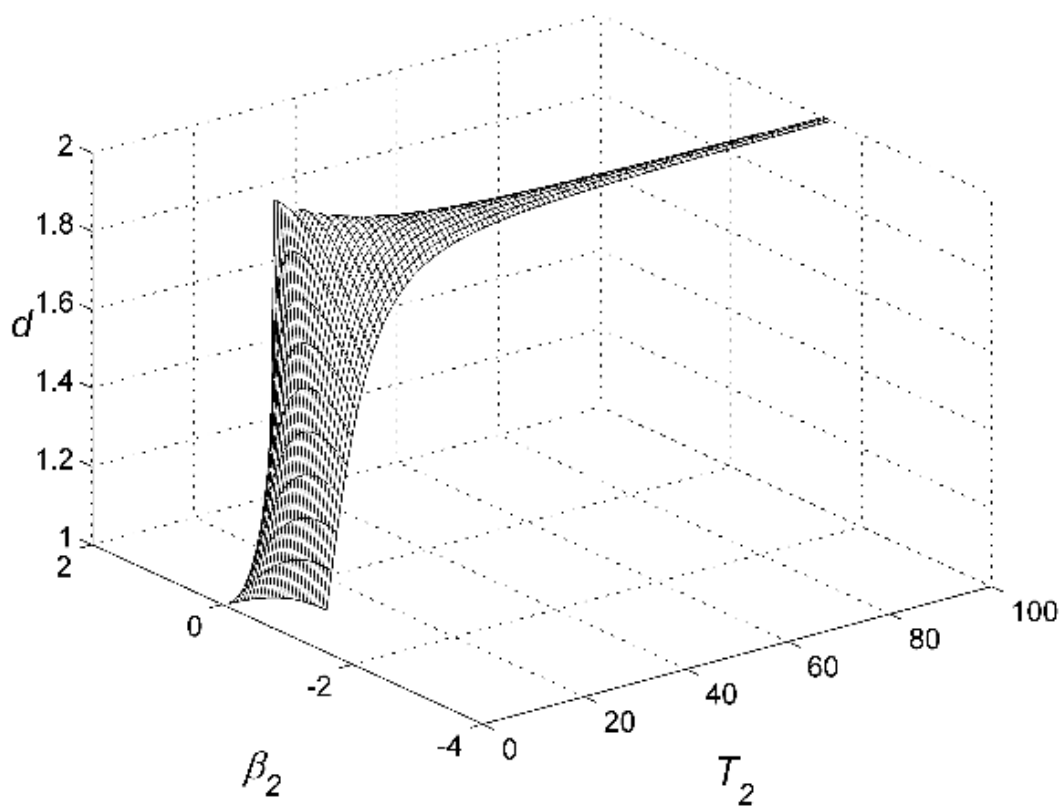


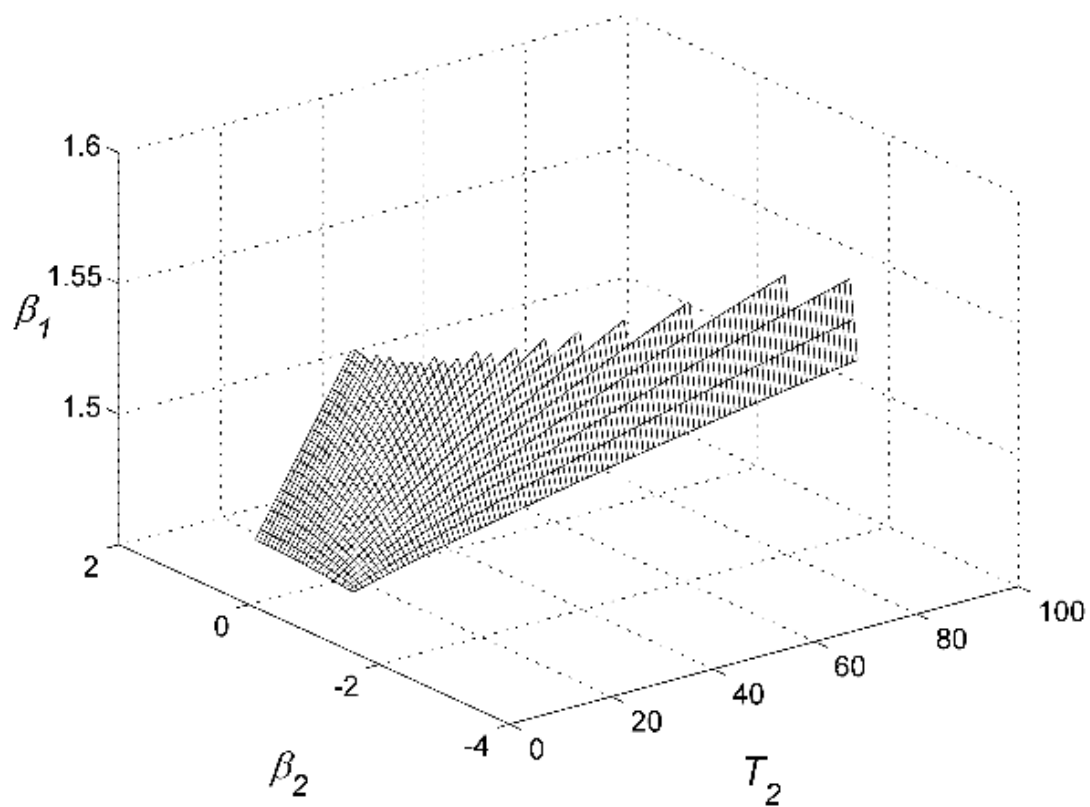
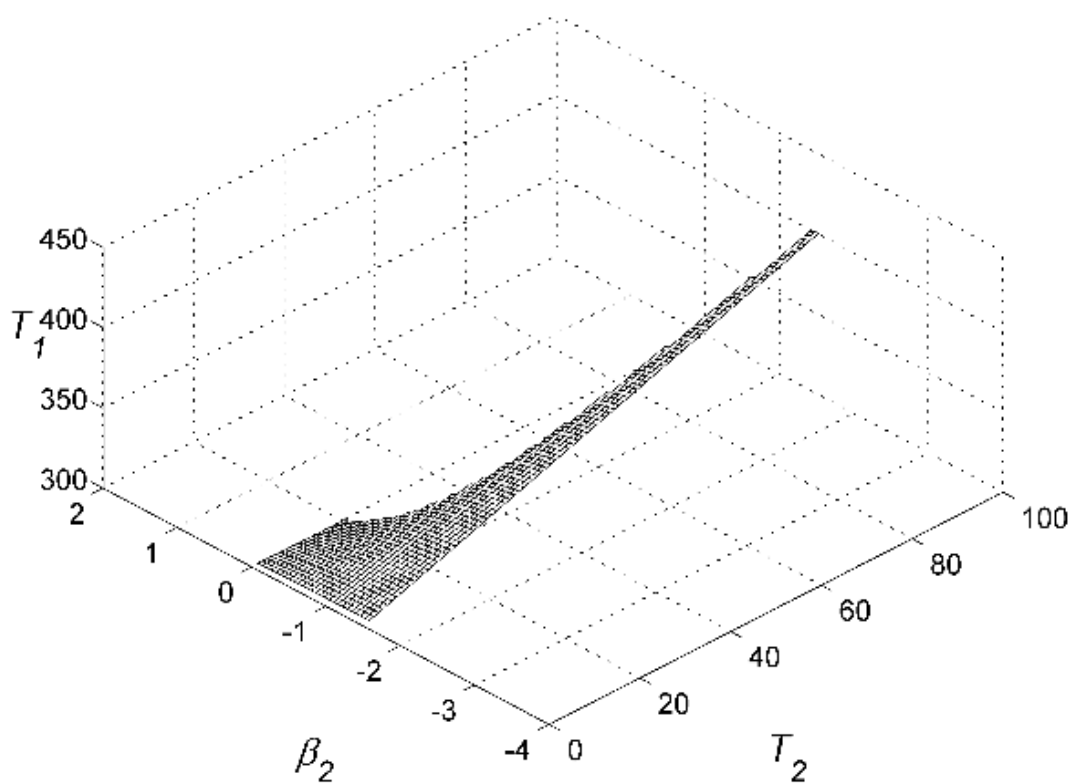
Slika 91. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_2$  i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $\beta_1$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$



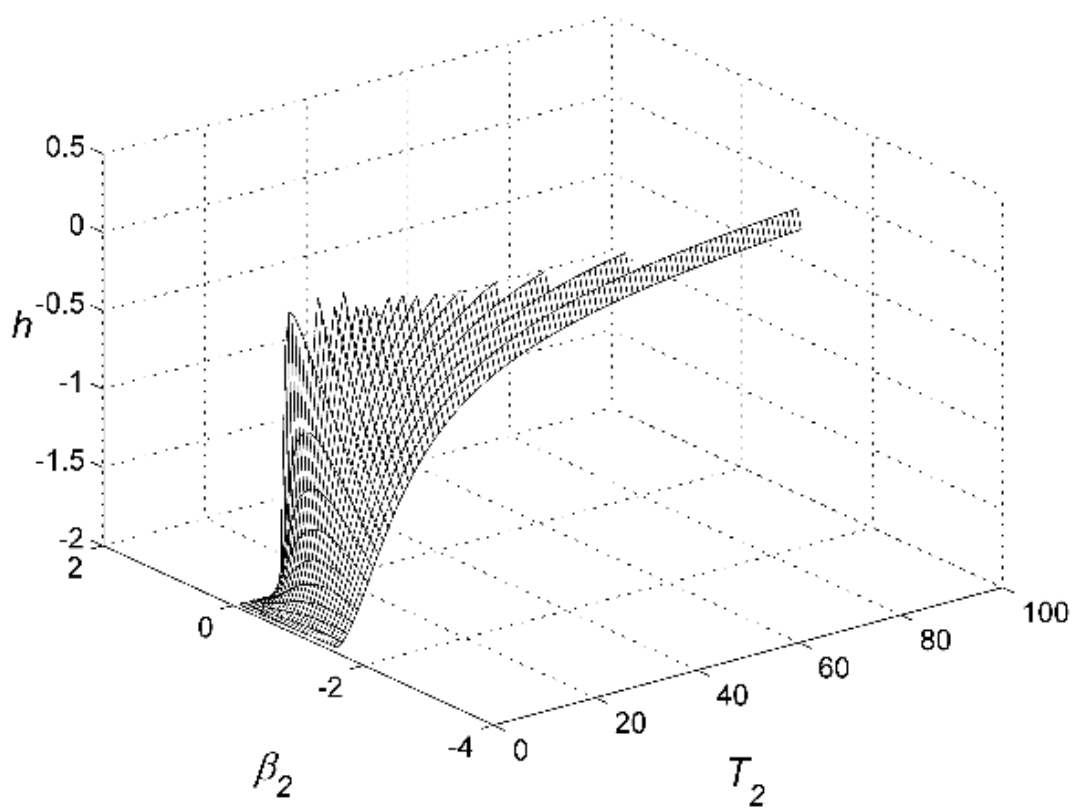
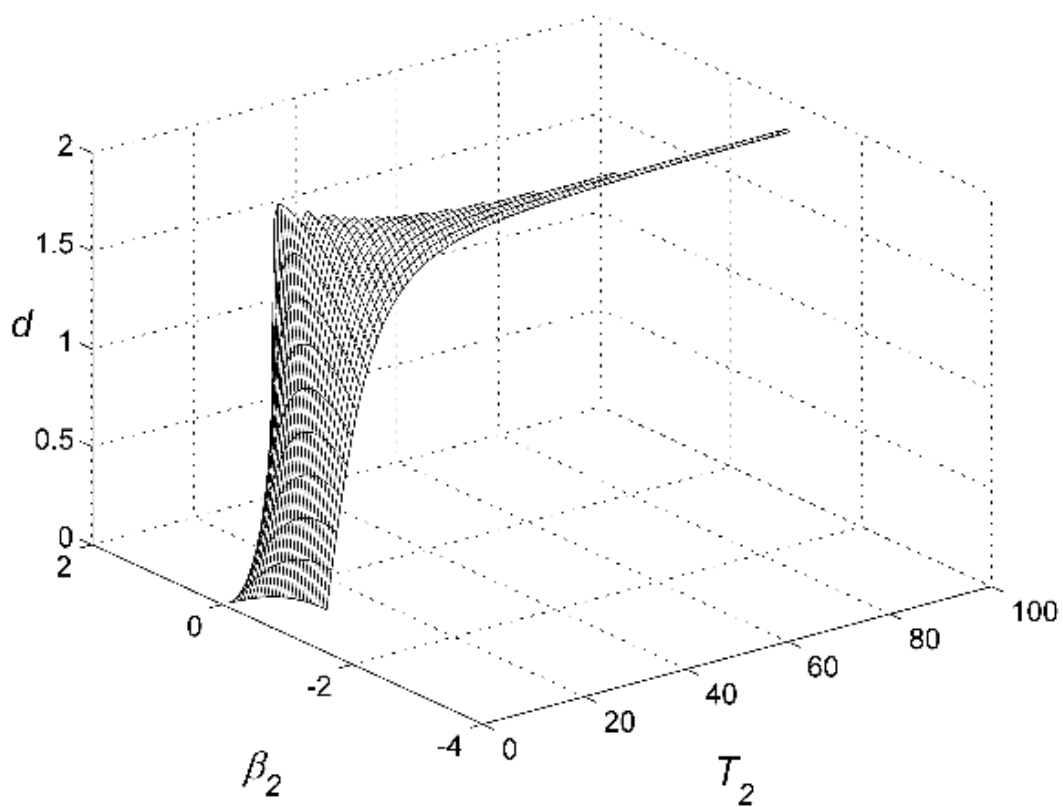


Slika 92. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_2$  i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $\beta_1$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .

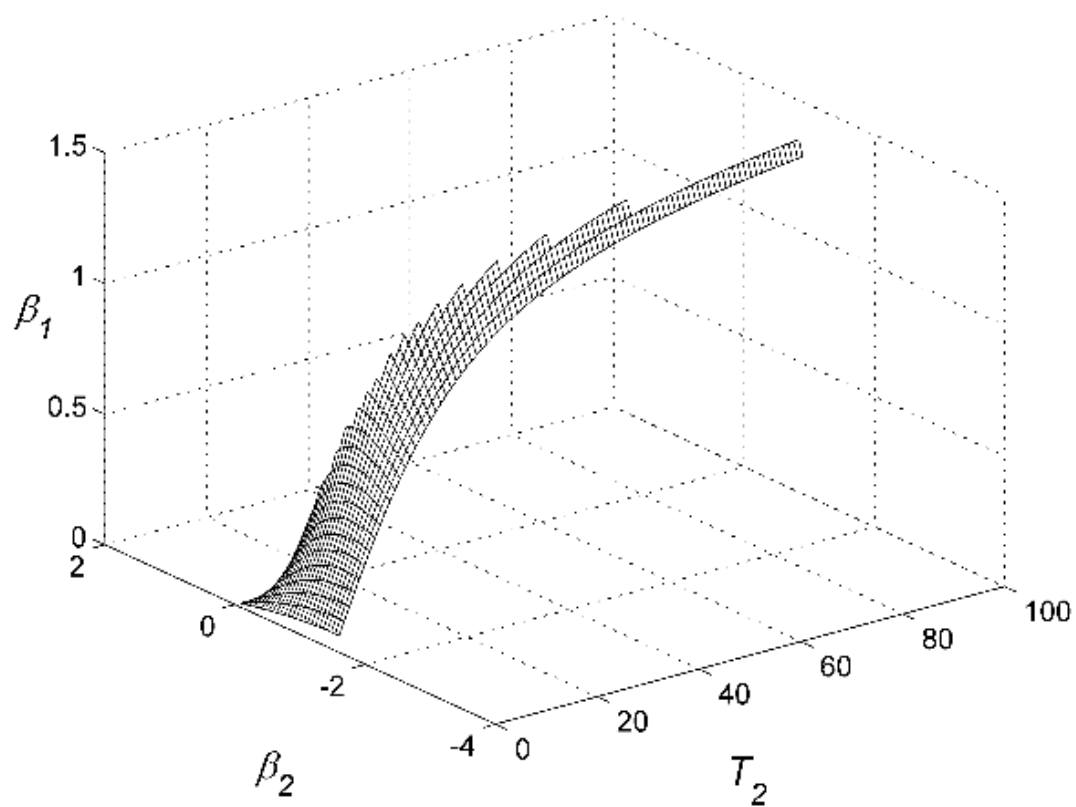
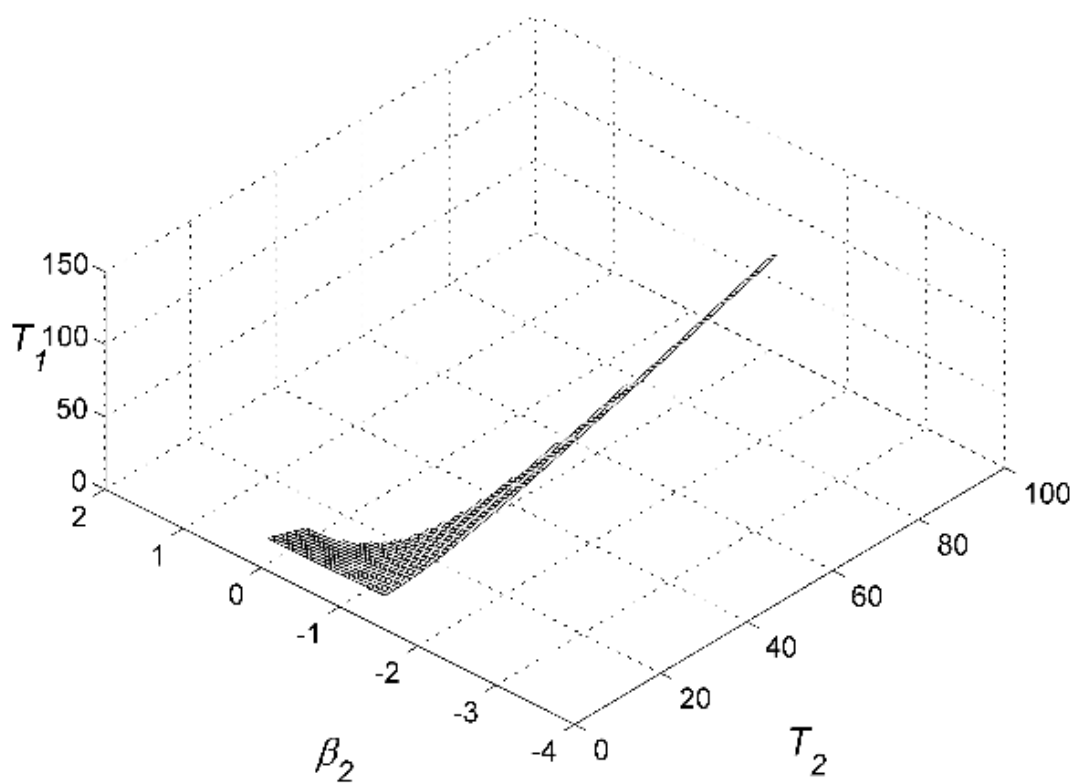




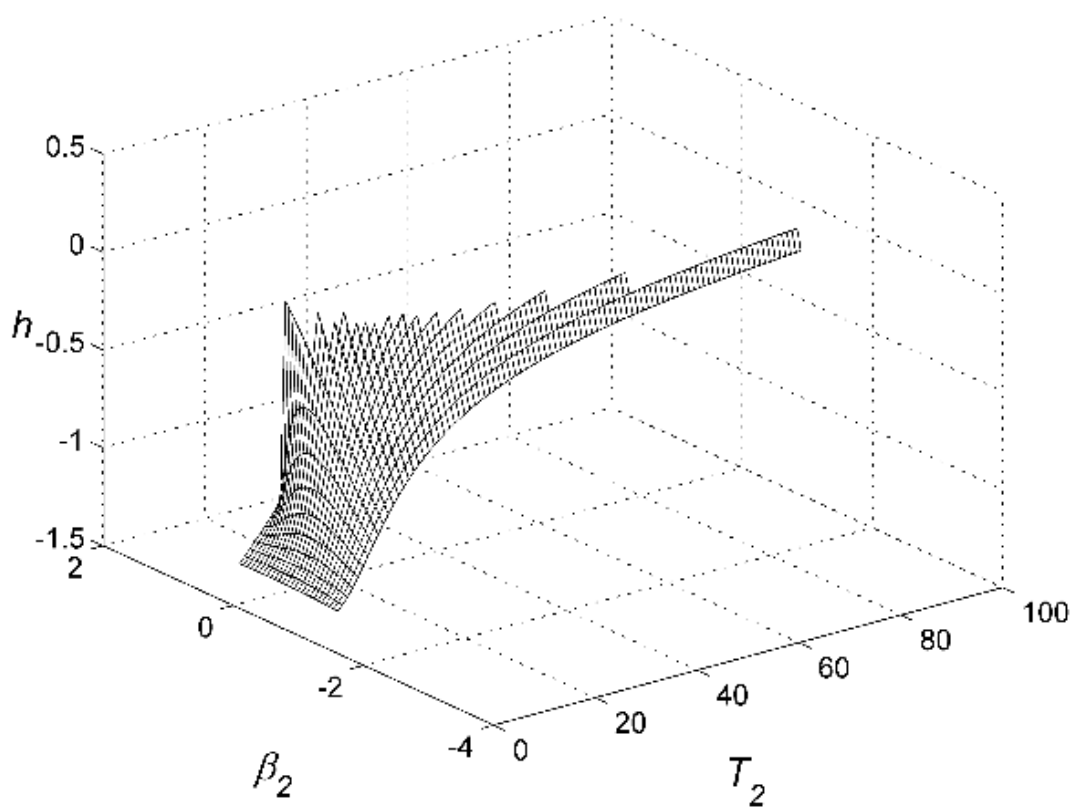
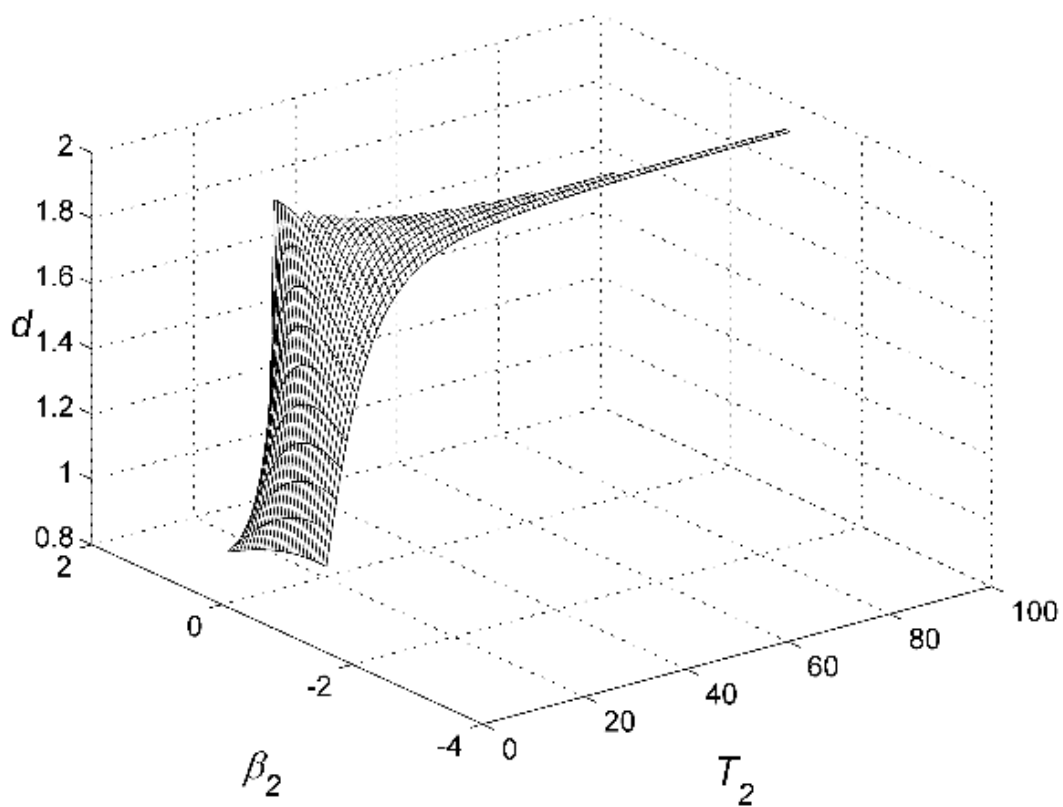
Slika 93. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_2$  i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $\beta_1$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .

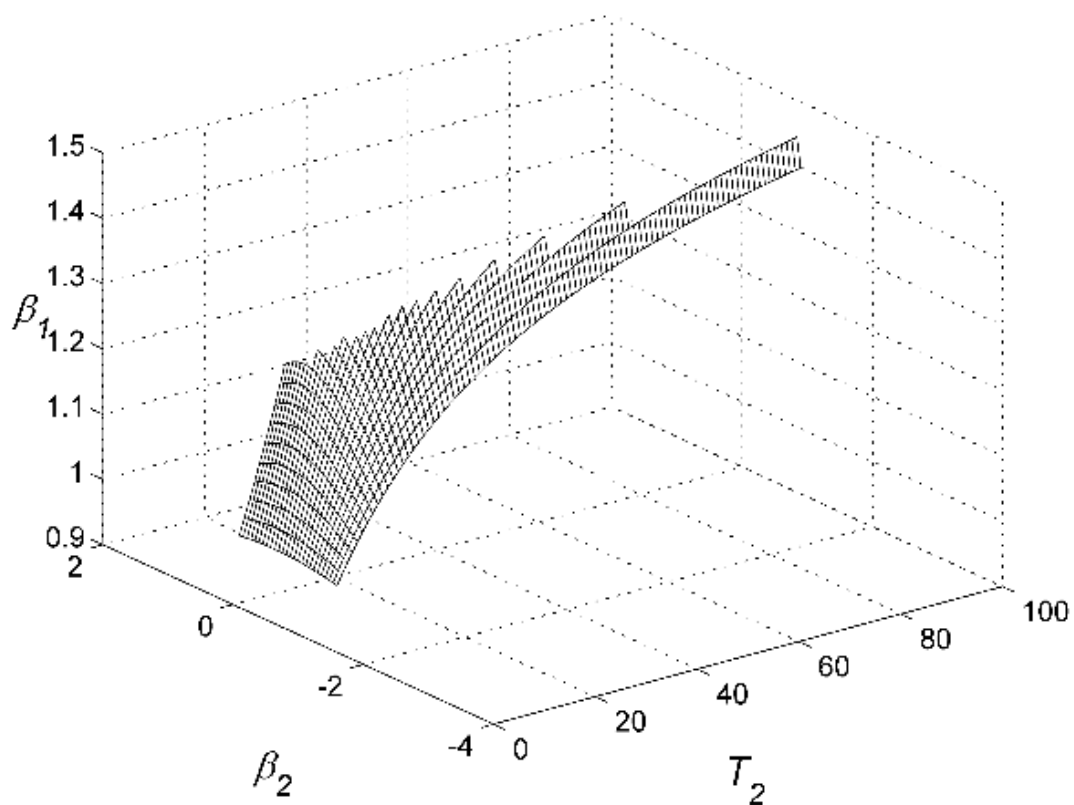
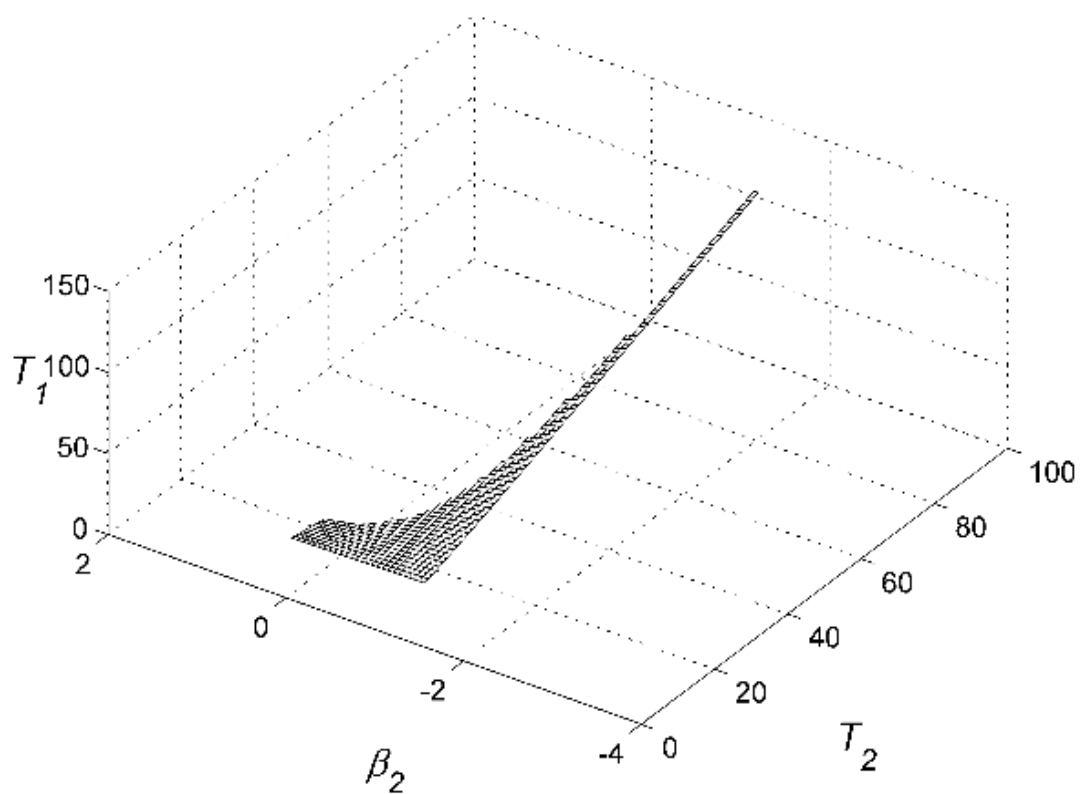




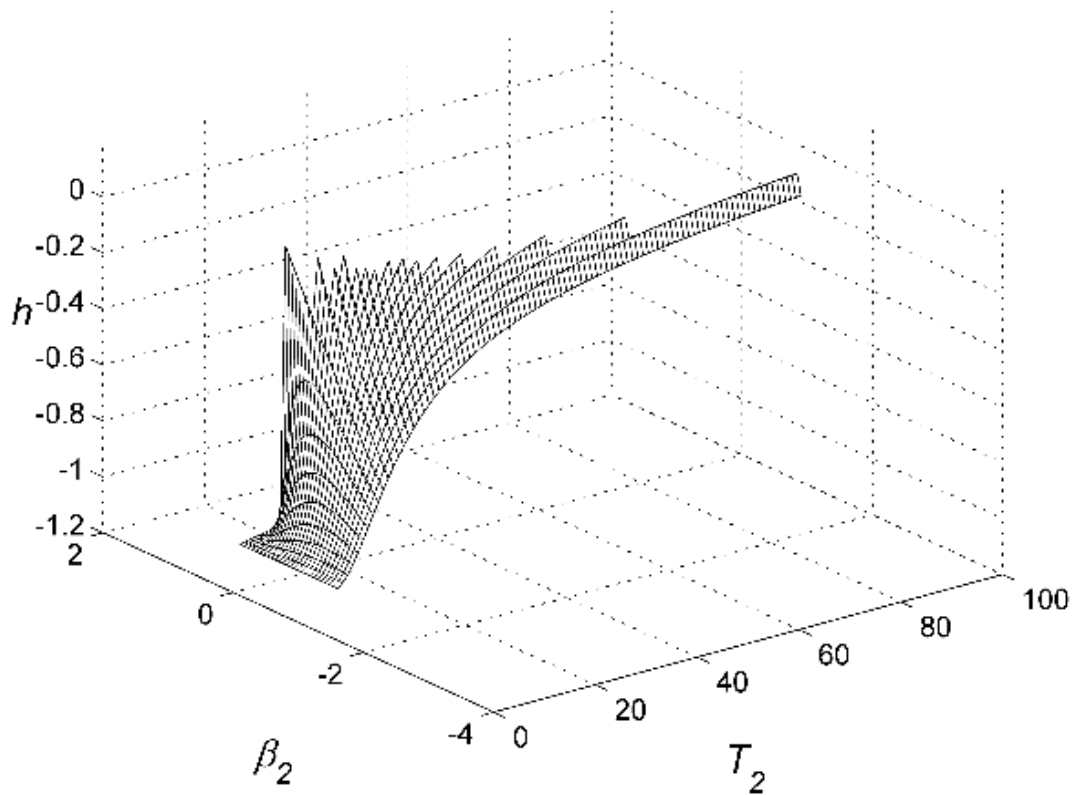
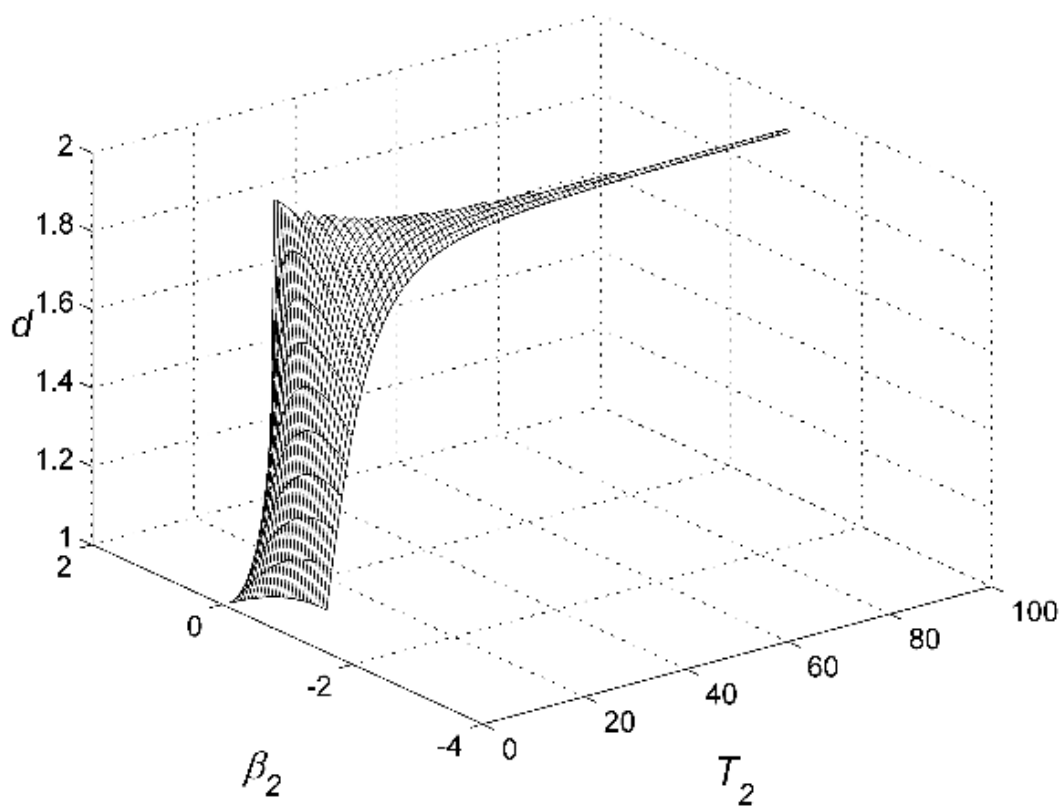


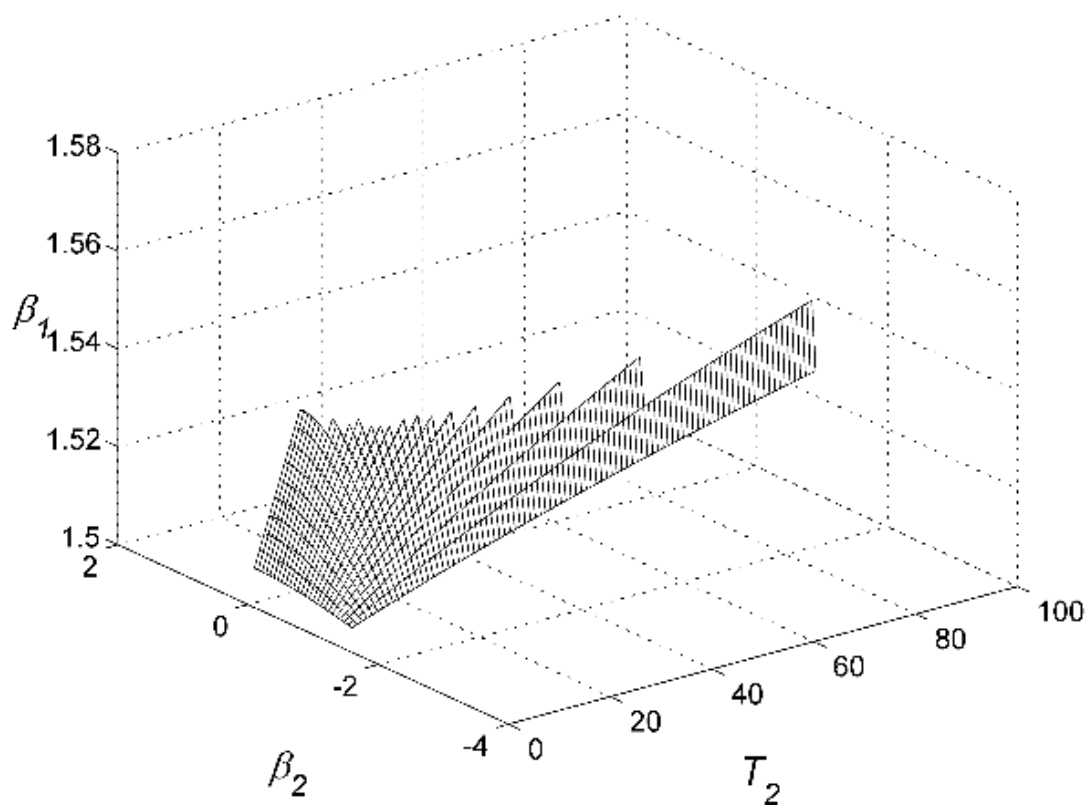
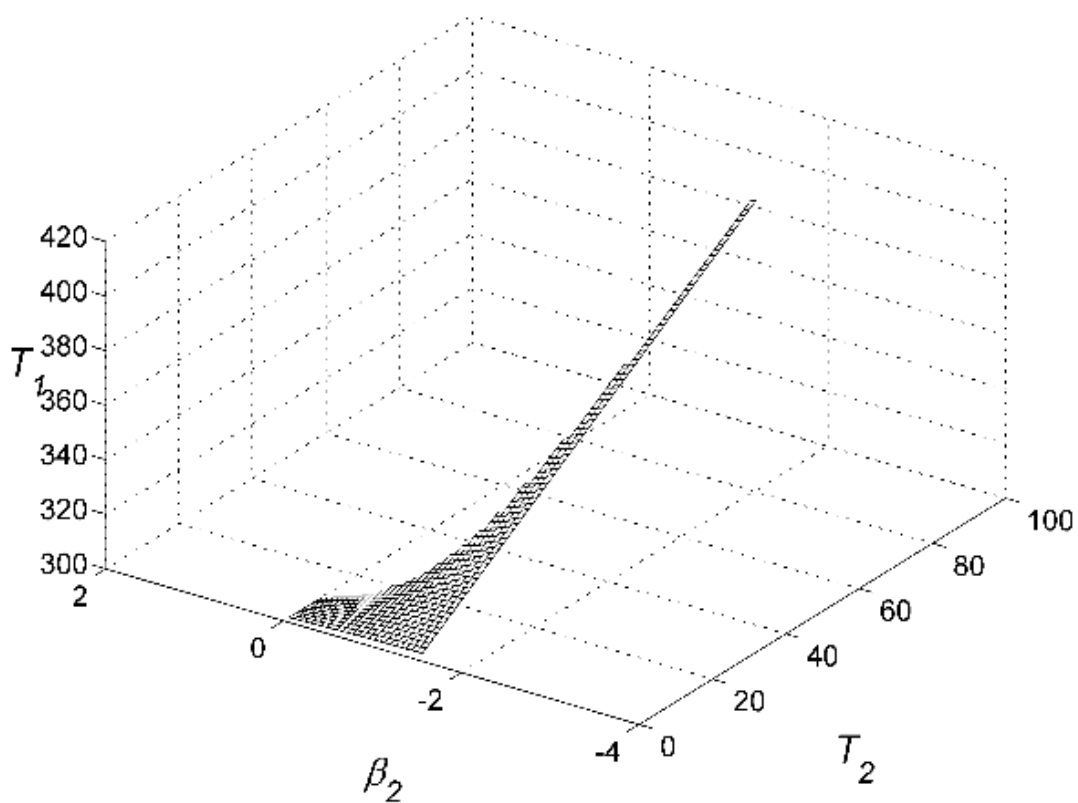
Slika 94. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_2$  i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $\beta_1$  pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .





Slika 95. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_2$  i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $\beta_1$  pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

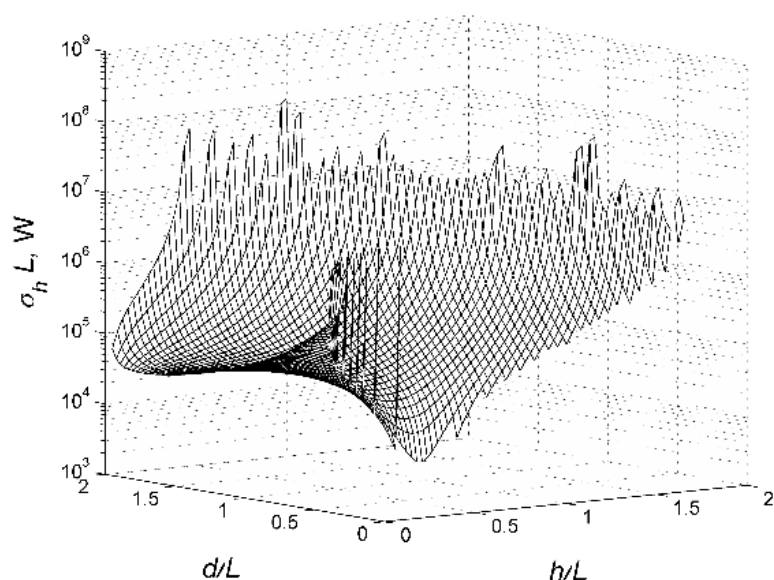
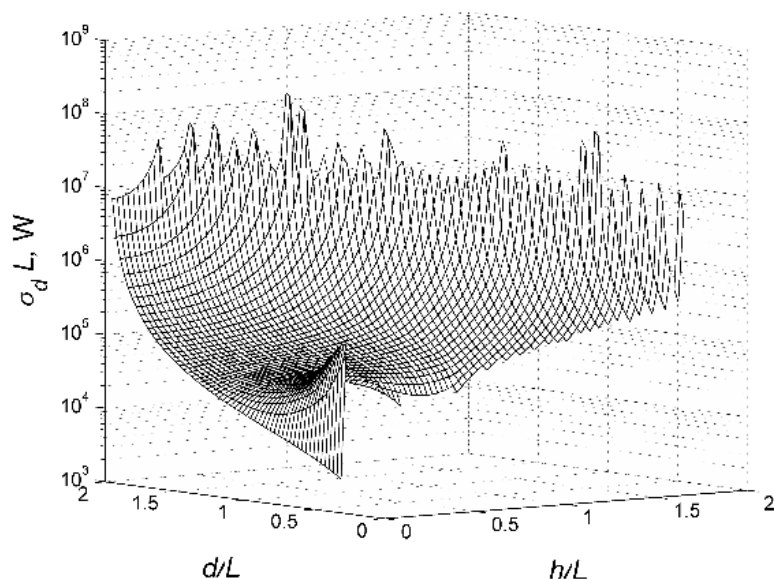


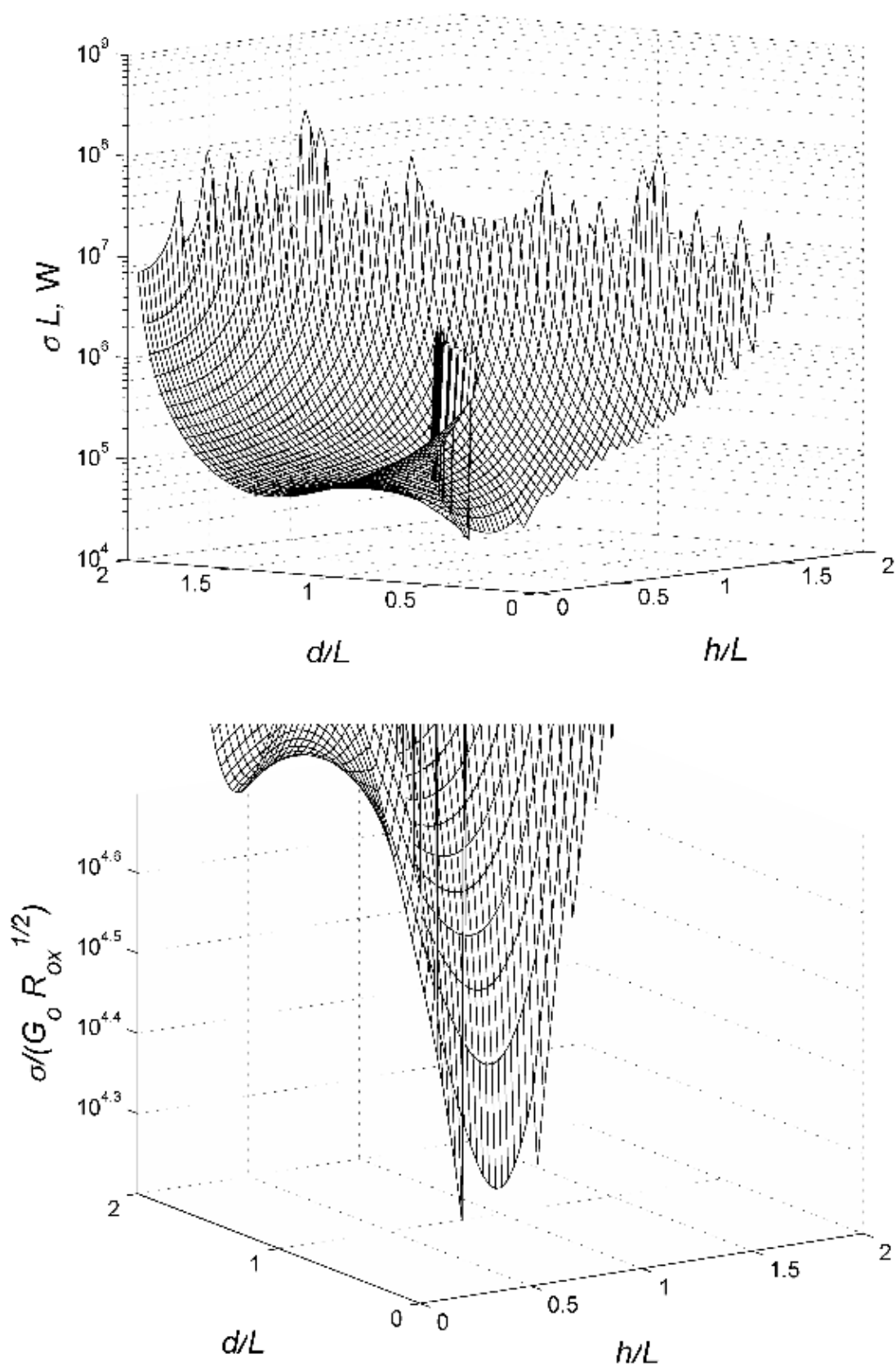


Slika 96. Parametri sustava u ovisnosti o  $T_2$  i  $\beta_2$  a)  $d/L$ ; b)  $h/L$ ; c)  $T_1$ ; d)  $\beta_1$  pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

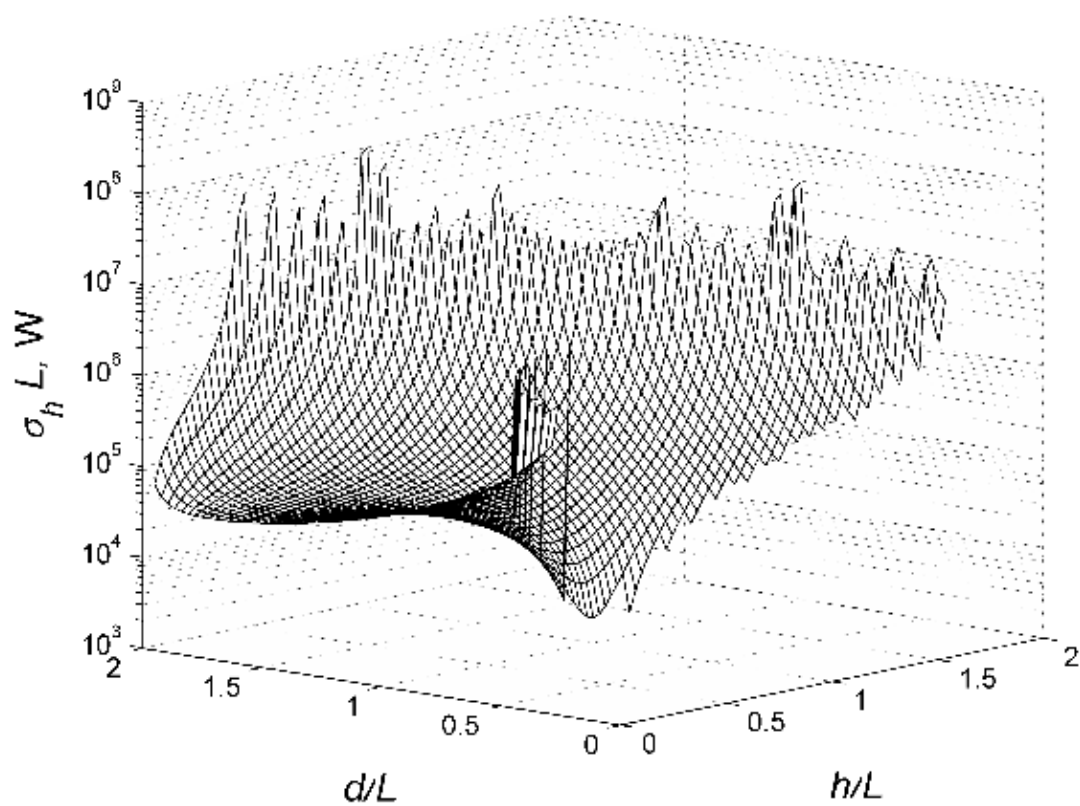
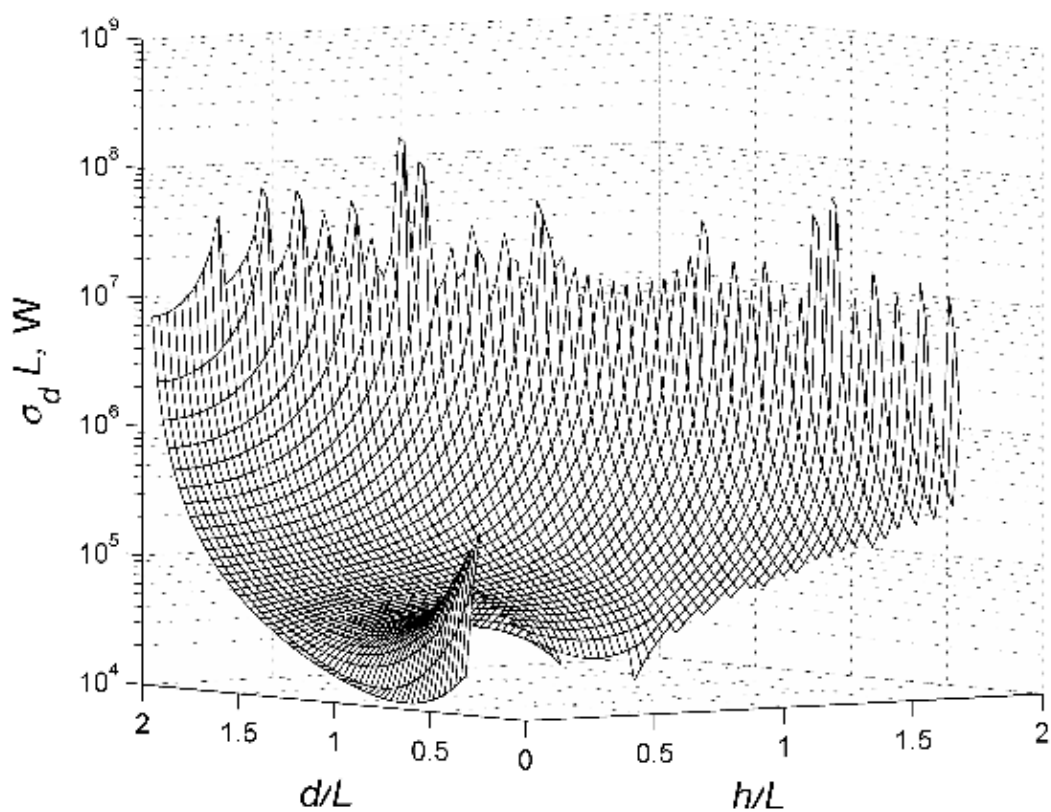
## 8.6 Energetska učinkovitost sustava

Energetska učinkovitost sustava očituje se kroz osjetljivost sustava na povremene zaluhe vjetrova. Zaluhi vjetrova, prikazani ovim radom, ograničeni su na ravninu u kojoj se nalazi sustav bespilotnih letjelica i teret. Stoga je strujanje vjetrova vodoravno (čeonni ili leđni vjetrovi) ili vertikalno (prema gore ili prema dolje). Pretpostavljeni odgovor sustava na promjene u bilo kojem smjeru od tih zaluha vjetrova očituje se promjenom geometrijskog parametra definirano u smjeru vanjske promjene. Očuvanje konačne geometrije realizirano je promjenama generirane snage sustava. U nastavku su prikazani rezultati analize sustava za različite omjere masa ( $m_{1,2}/m_0$ ) i brzine leta ( $\psi$ ). Tablični prikazi rezultata istraživanja prikazani su u *Prilogu* na stranici 204.

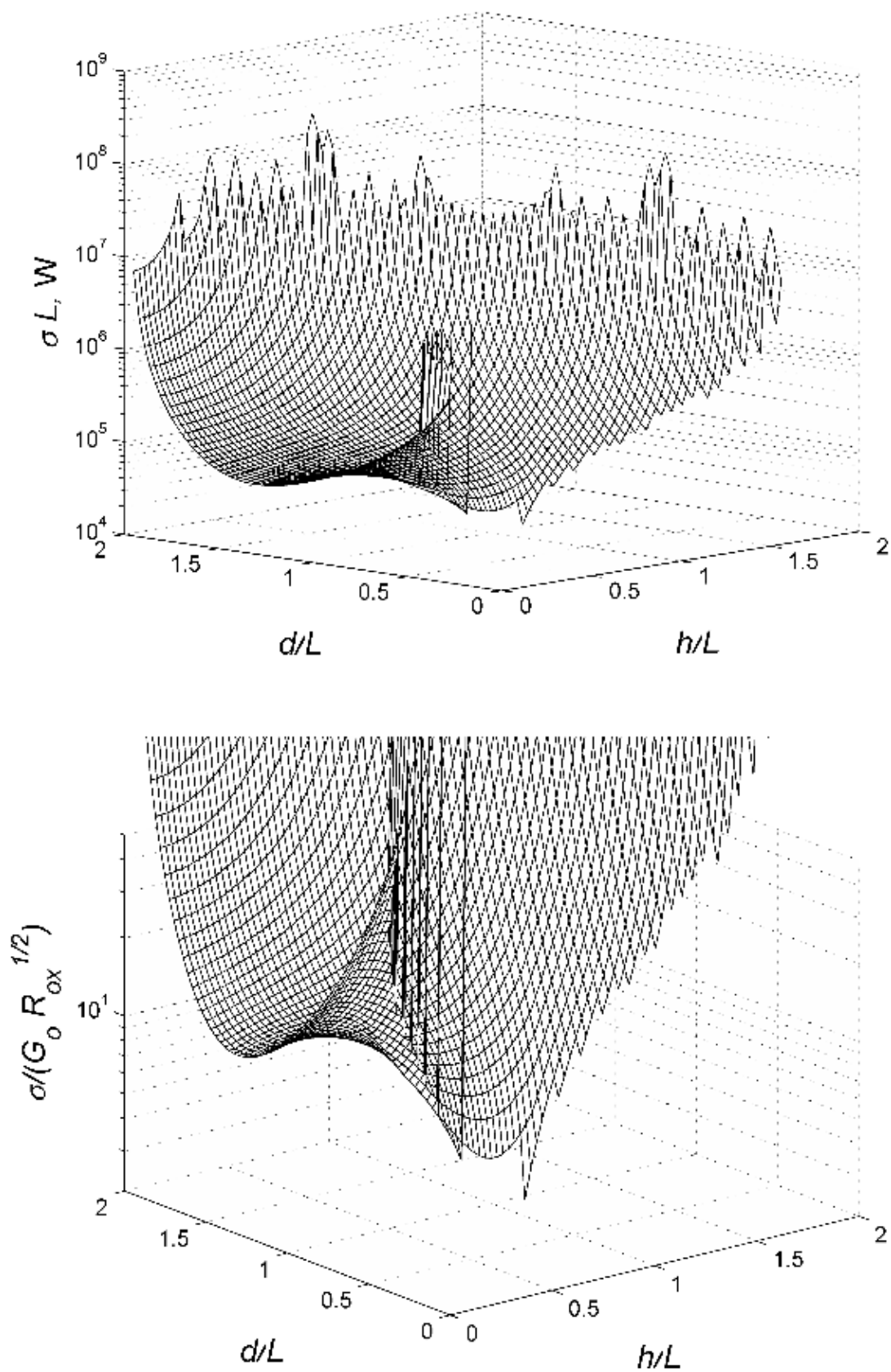




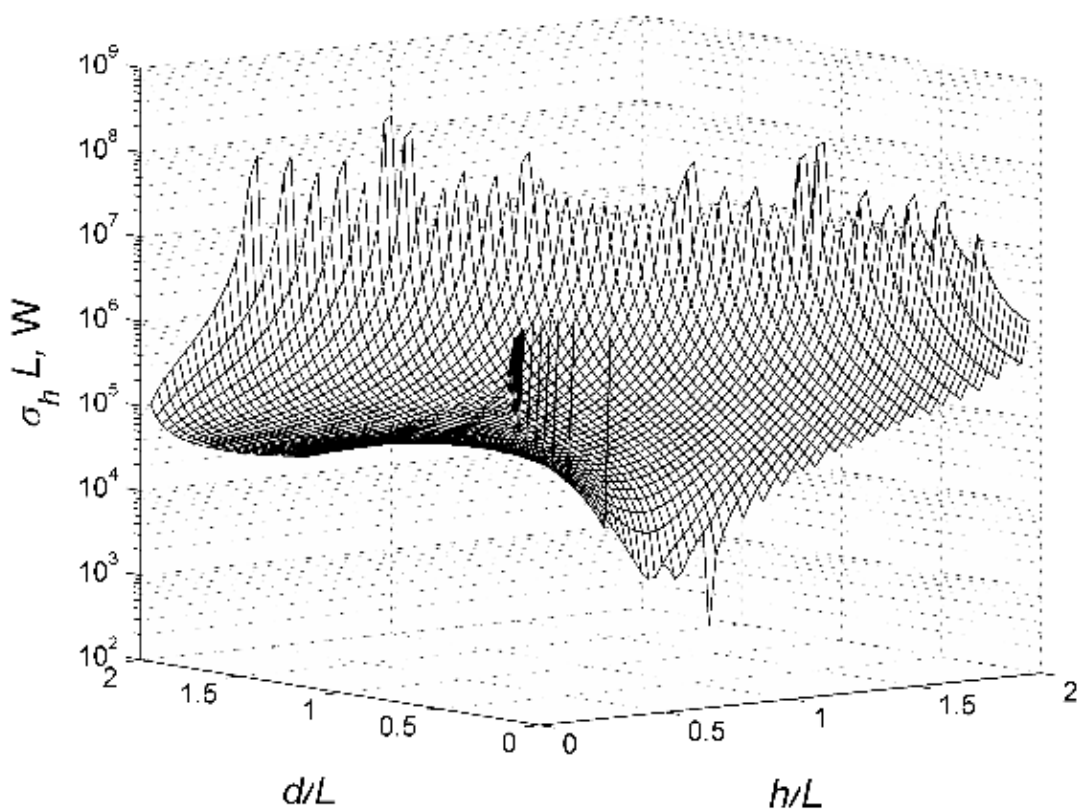
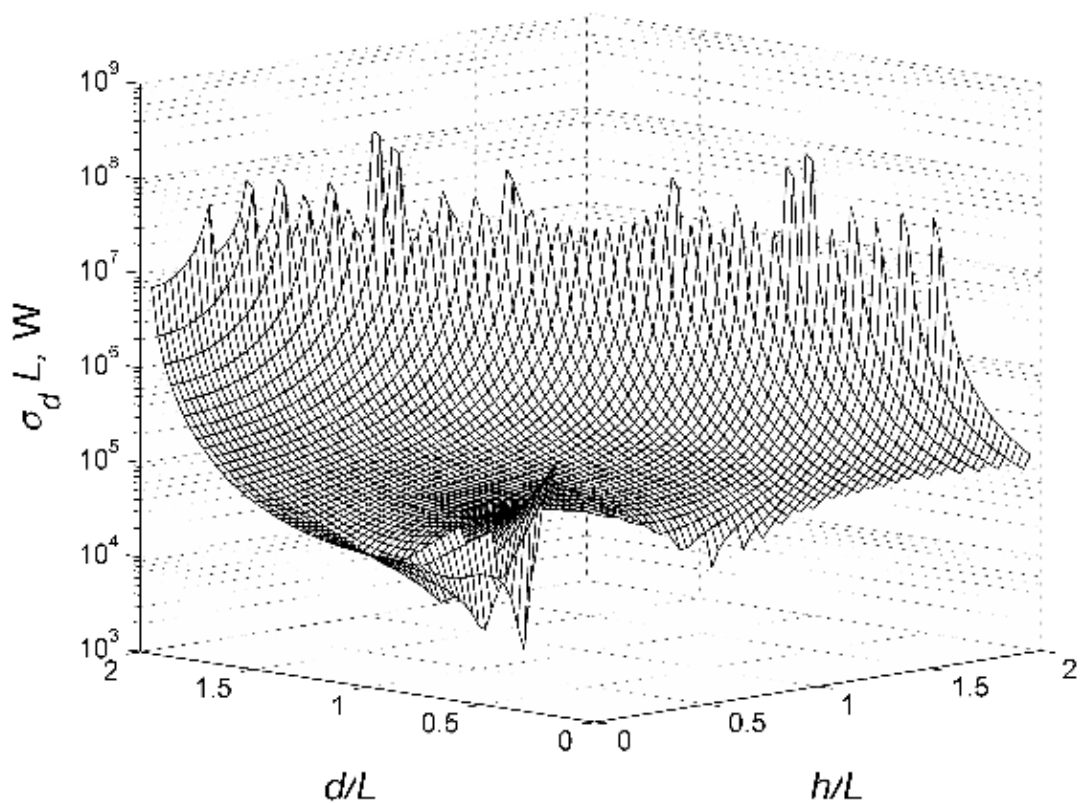
Slika 97. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a)  $\sigma_d$ ; b)  $\sigma_h$ ; c)  $\sigma$ ; d)  $\sigma$  normirano pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .

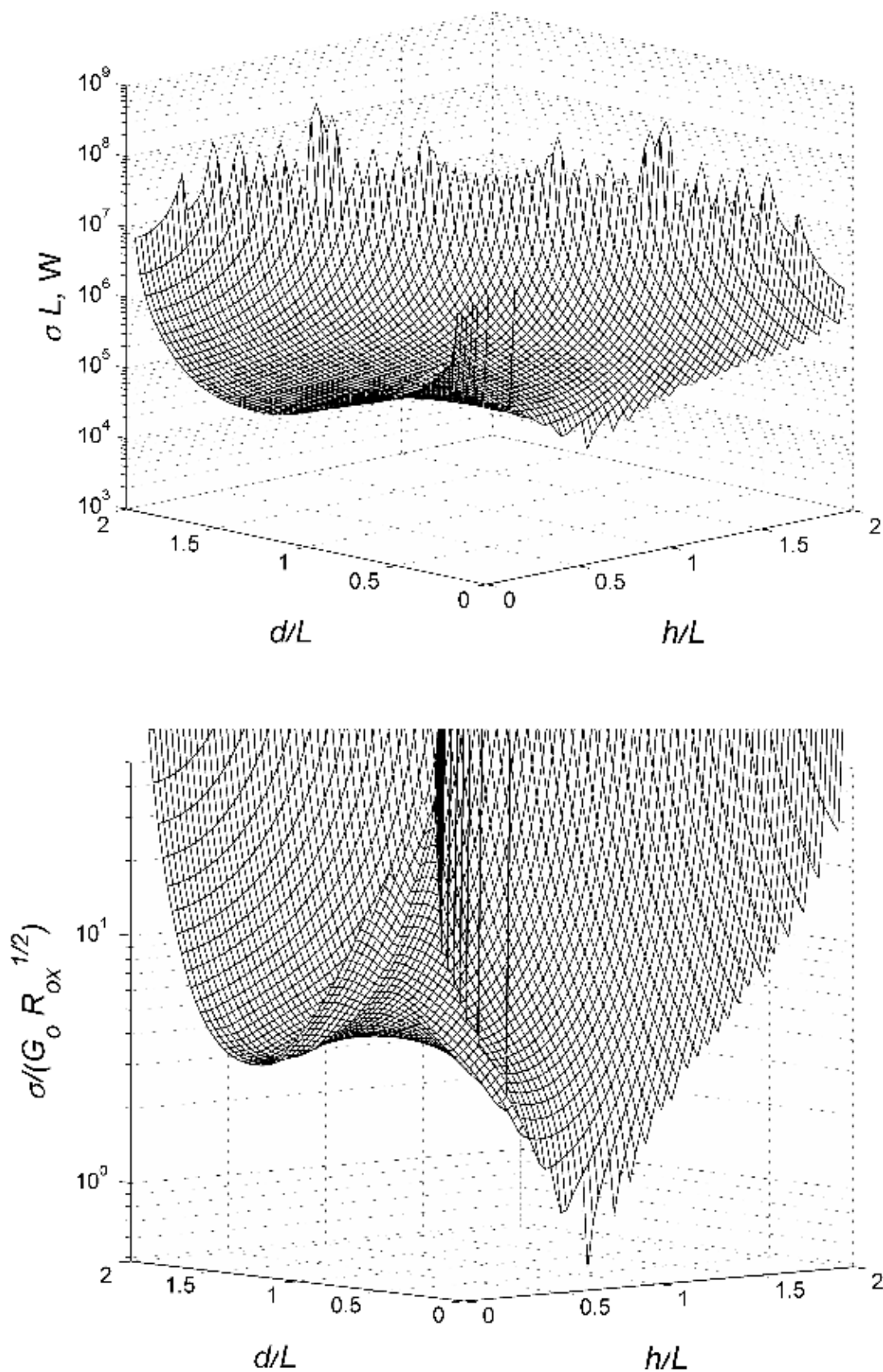




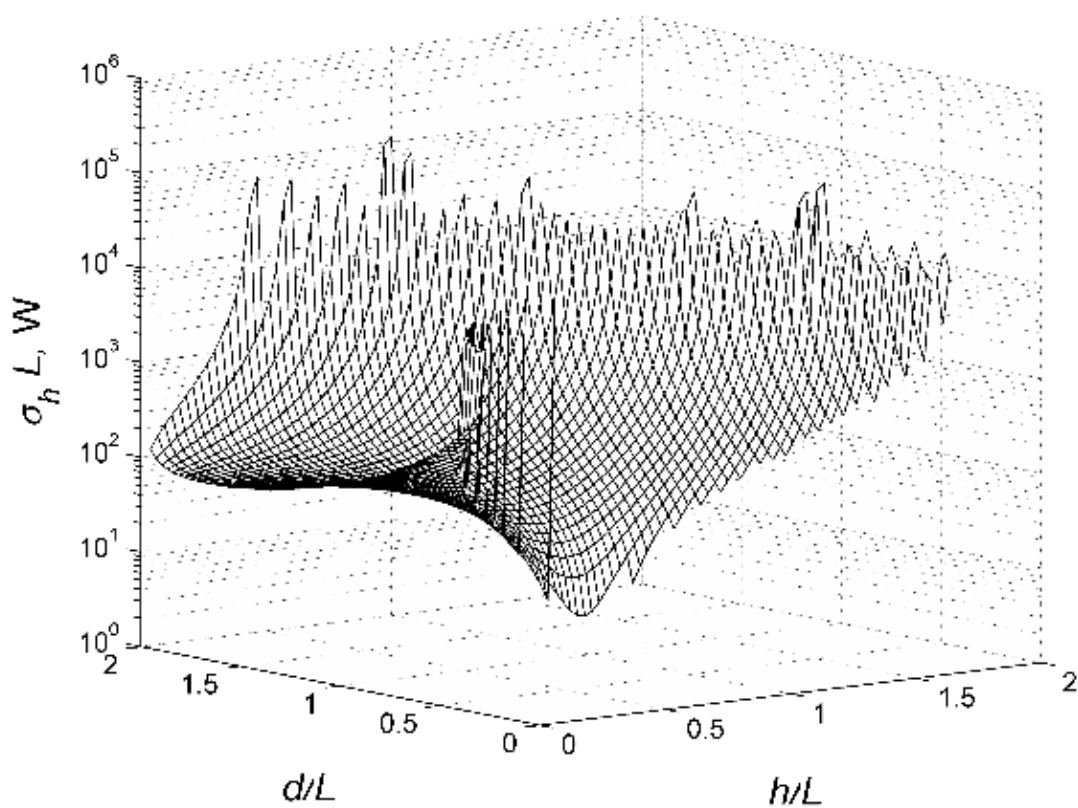
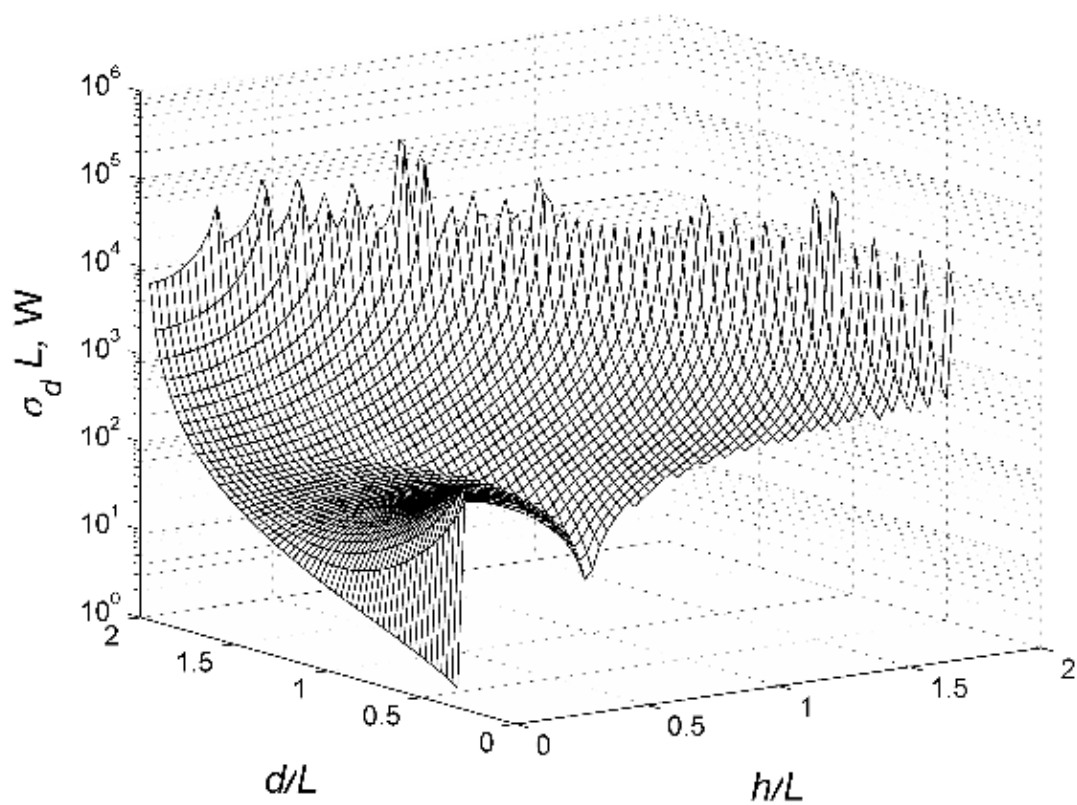


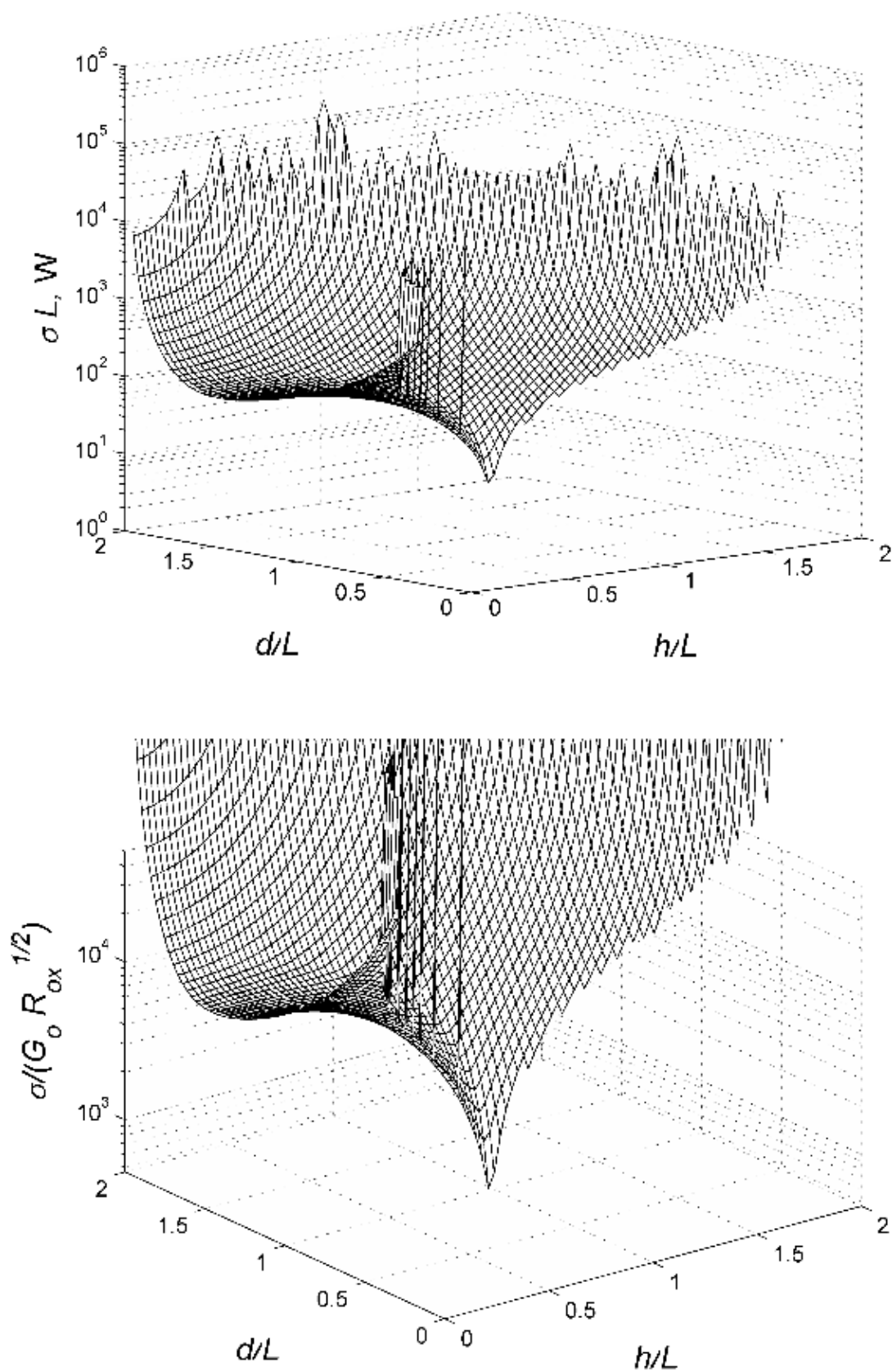
Slika 98 Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a)  $\sigma_d$ ; b)  $\sigma_h$ ; c)  $\sigma$ ; d)  $\sigma$  normirano pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .



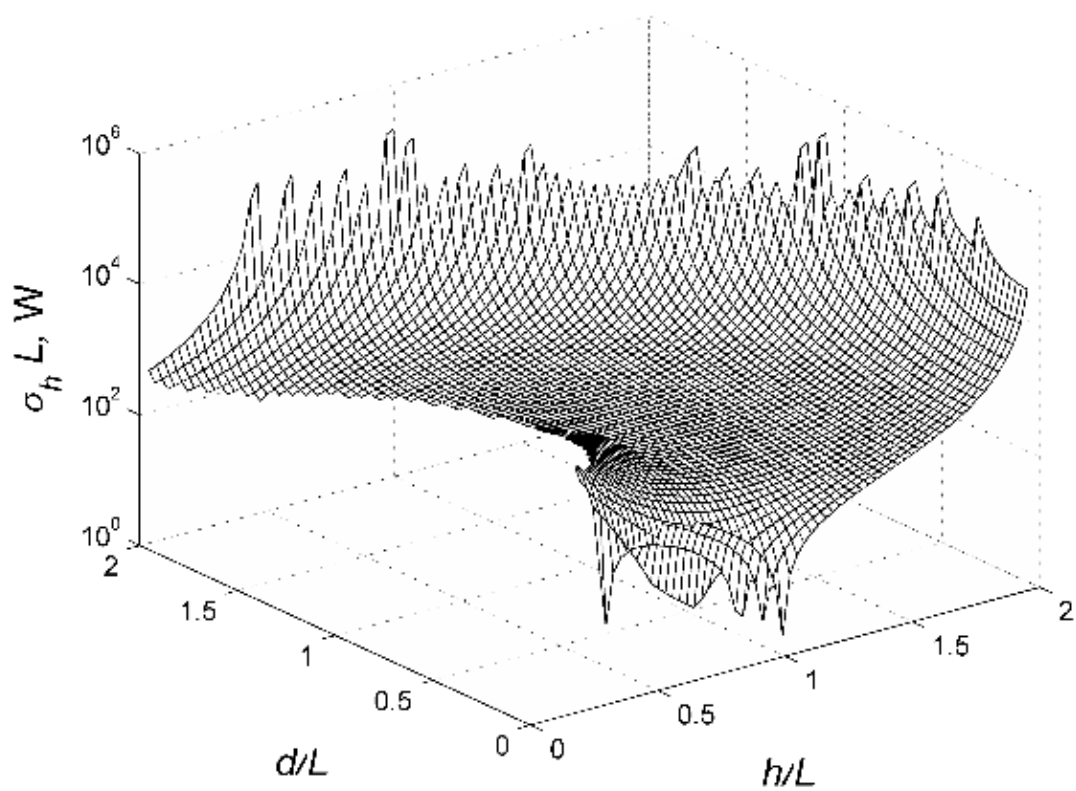
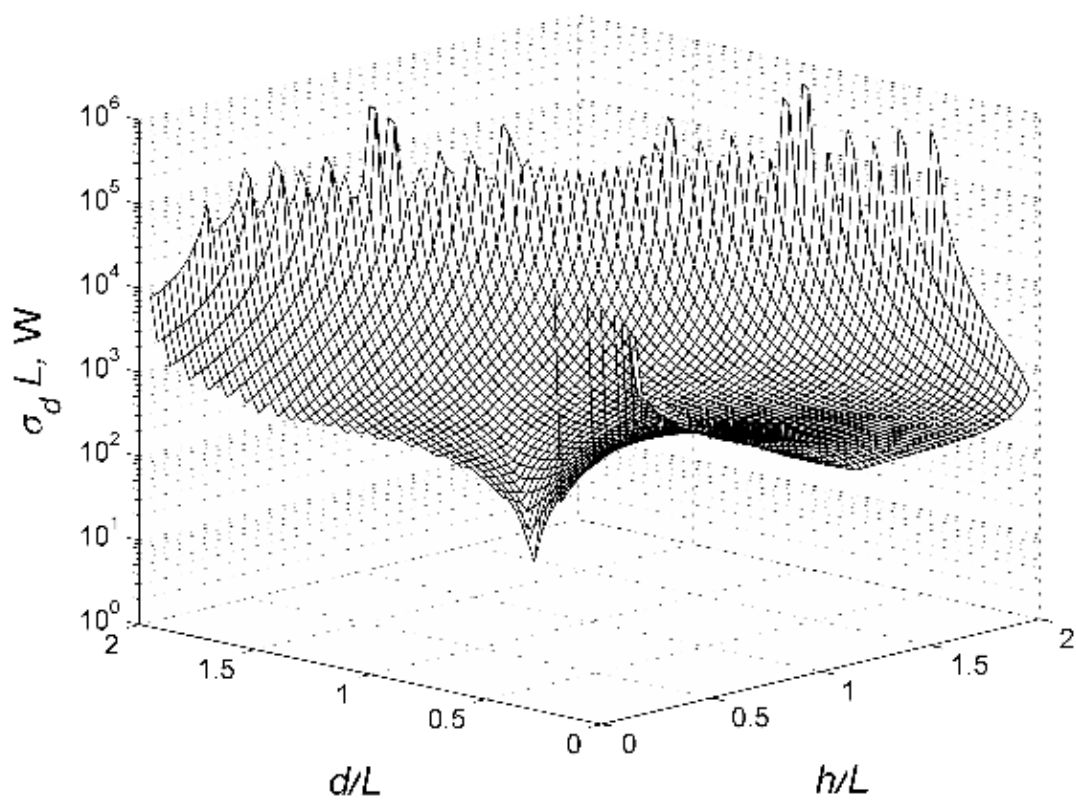


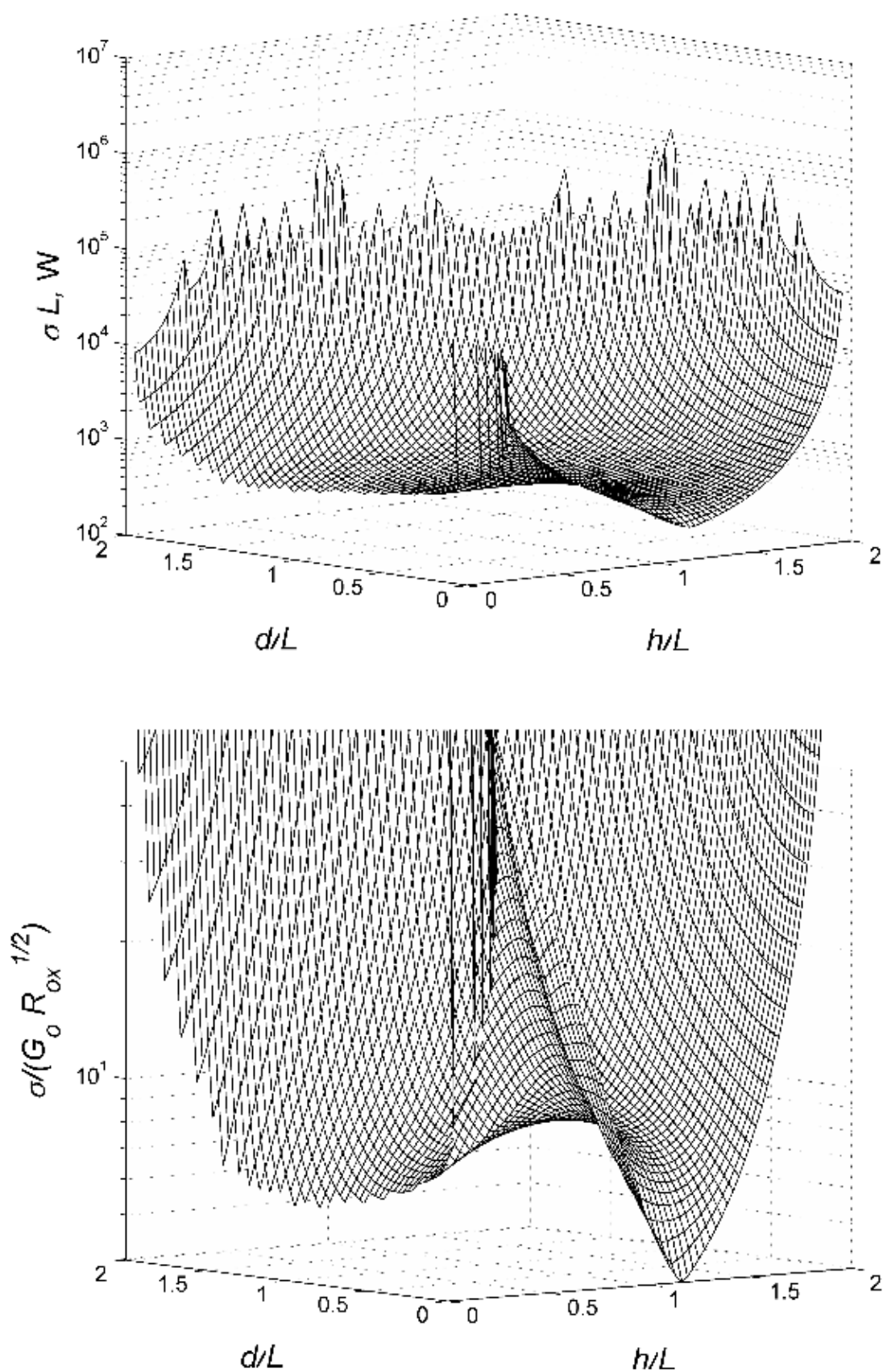
Slika 99 Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a)  $\sigma_d$ ; b)  $\sigma_h$ ; c)  $\sigma$ ; d)  $\sigma$  normirano pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ .



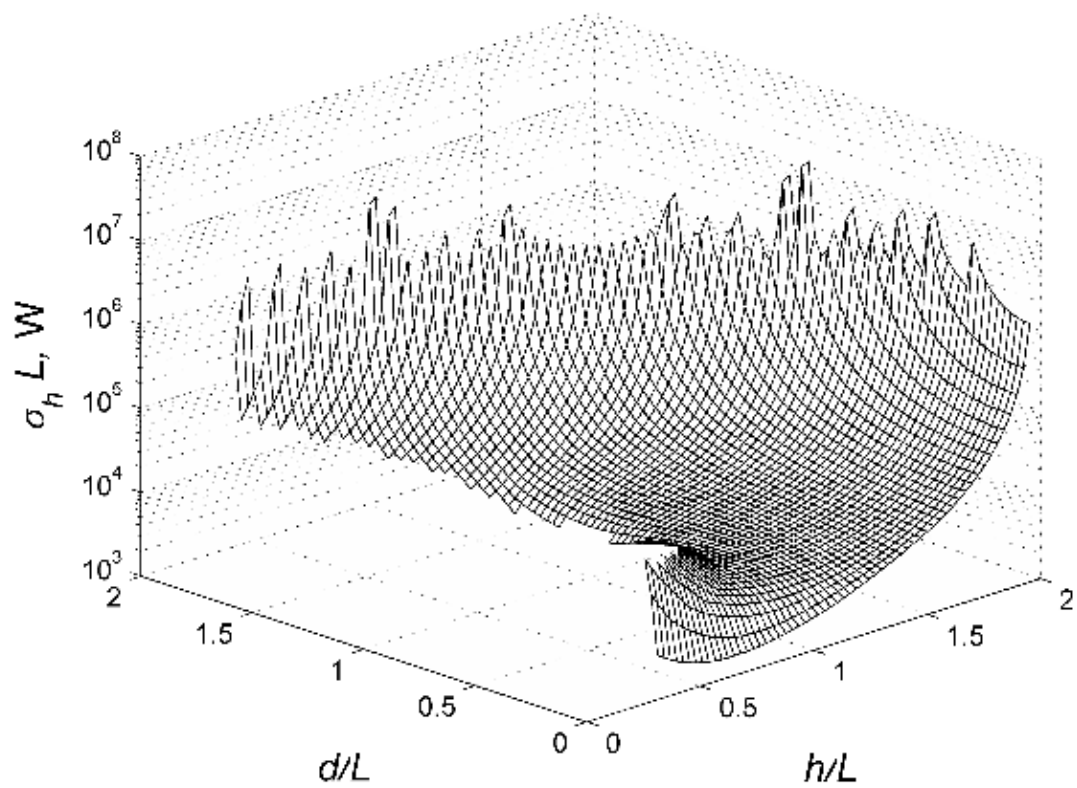
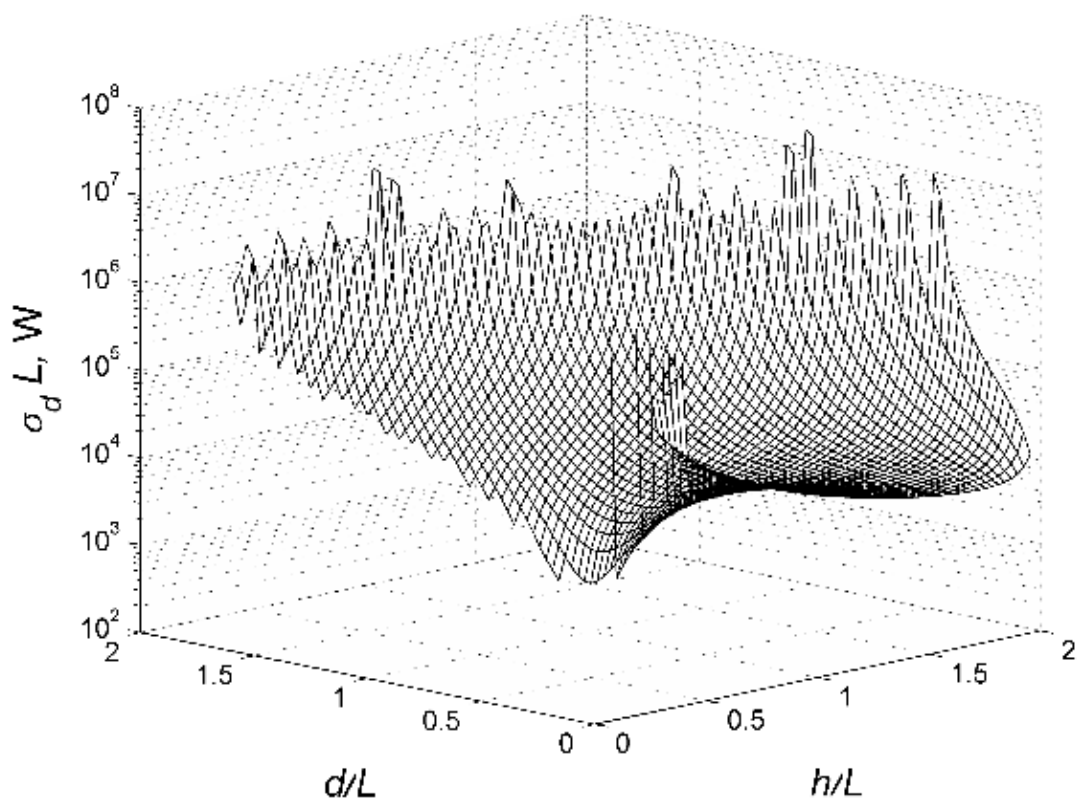


Slika 100. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a)  $\sigma_d$ ; b)  $\sigma_h$ ; c)  $\sigma$ ; d)  $\sigma$  normirano pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .

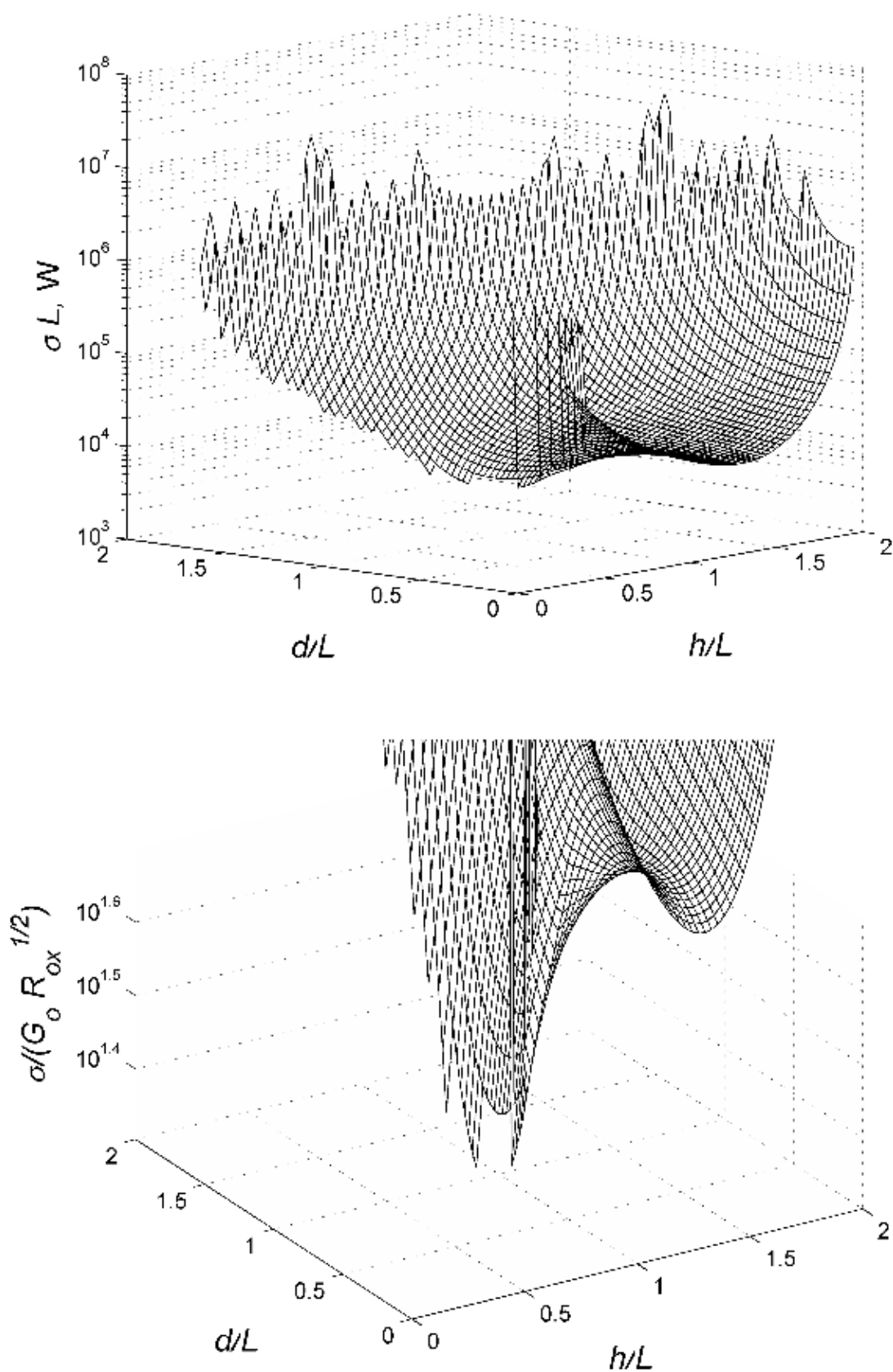




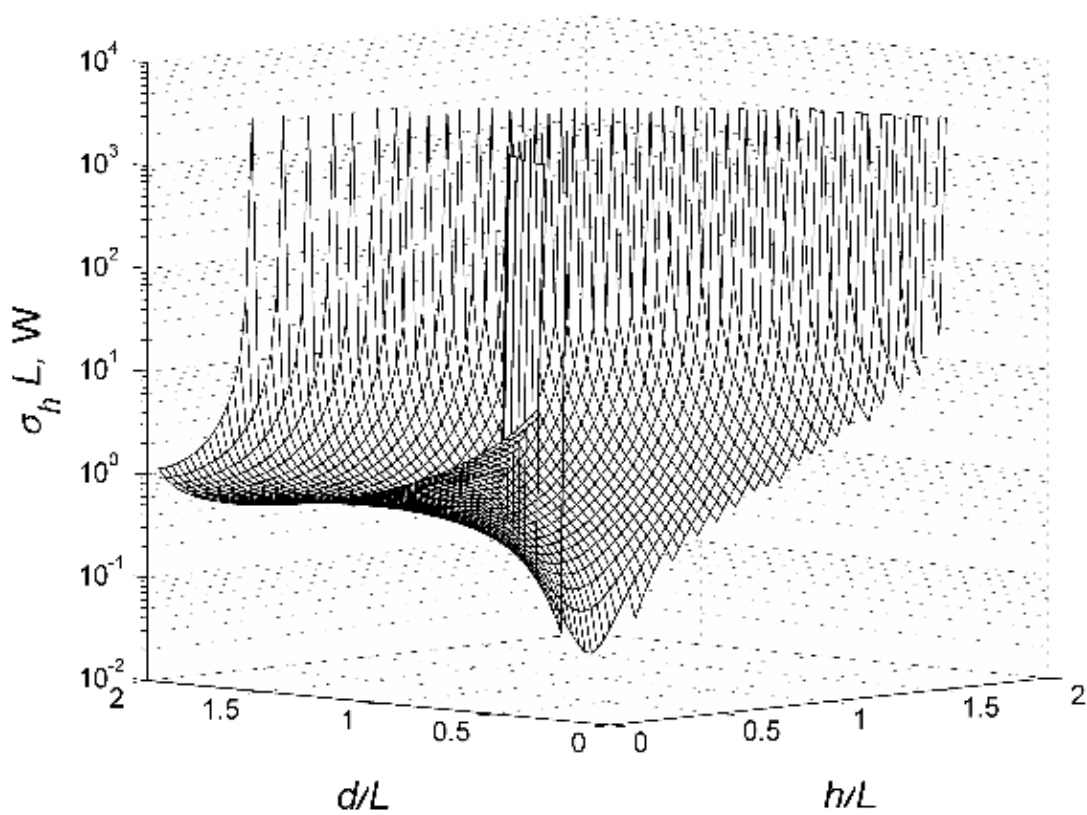
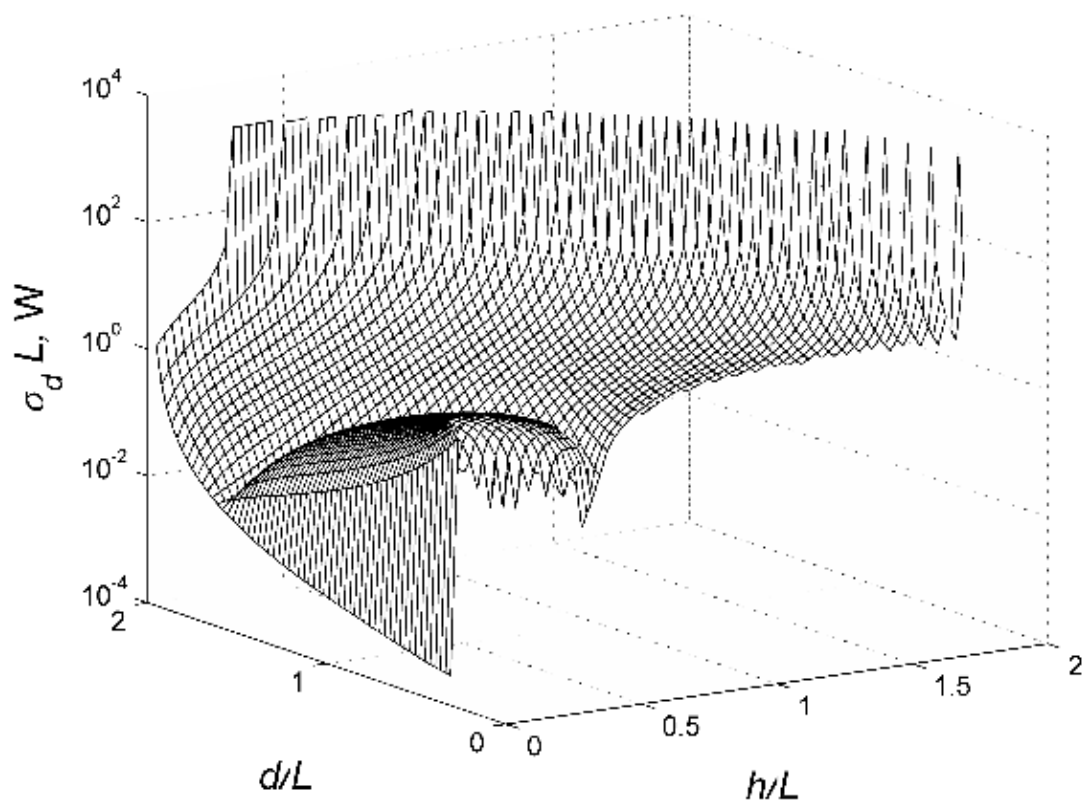
Slika 101 Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a)  $\sigma_d$ ; b)  $\sigma_h$ ; c)  $\sigma$ ; d)  $\sigma$  normirano pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .

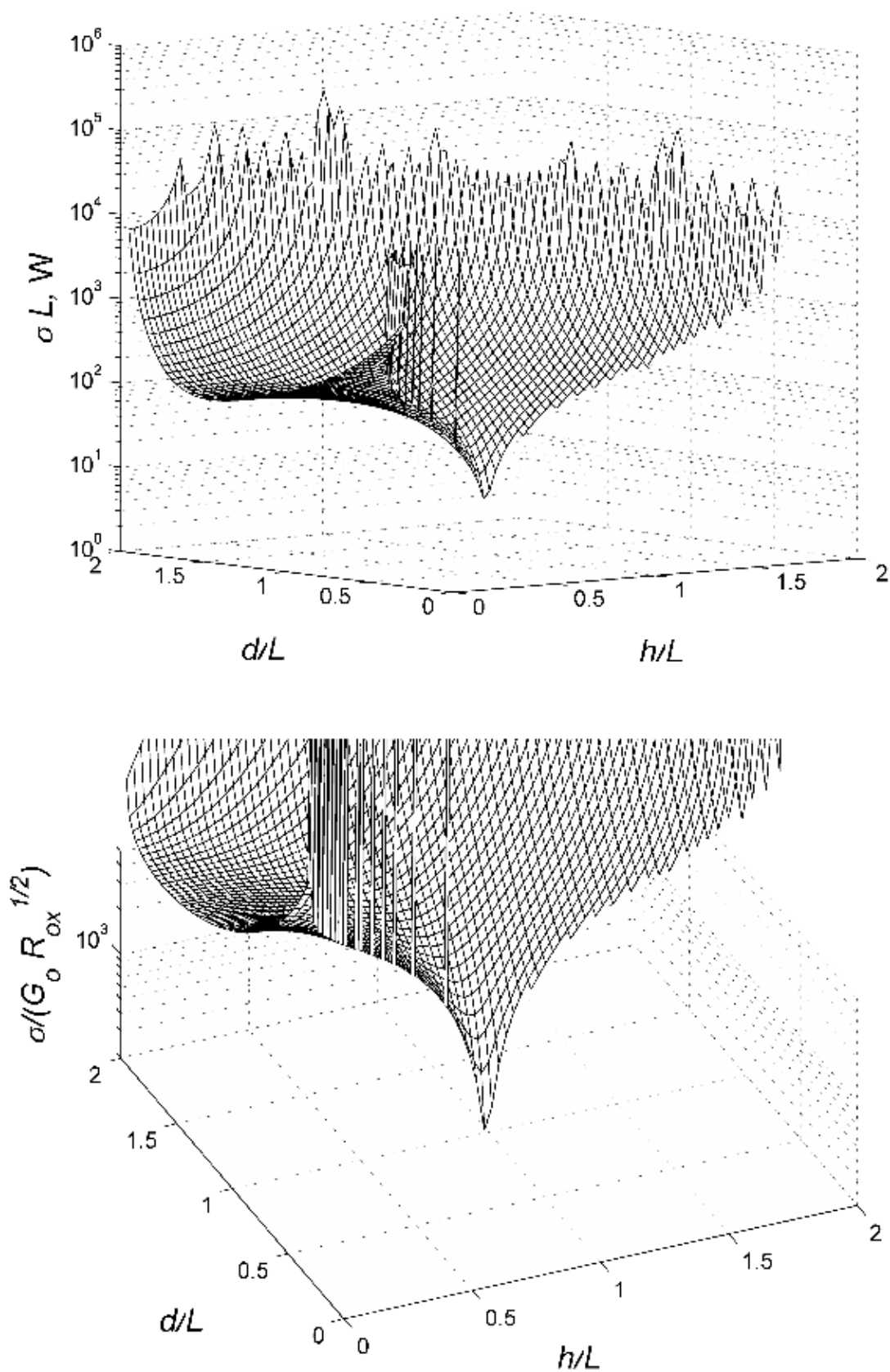




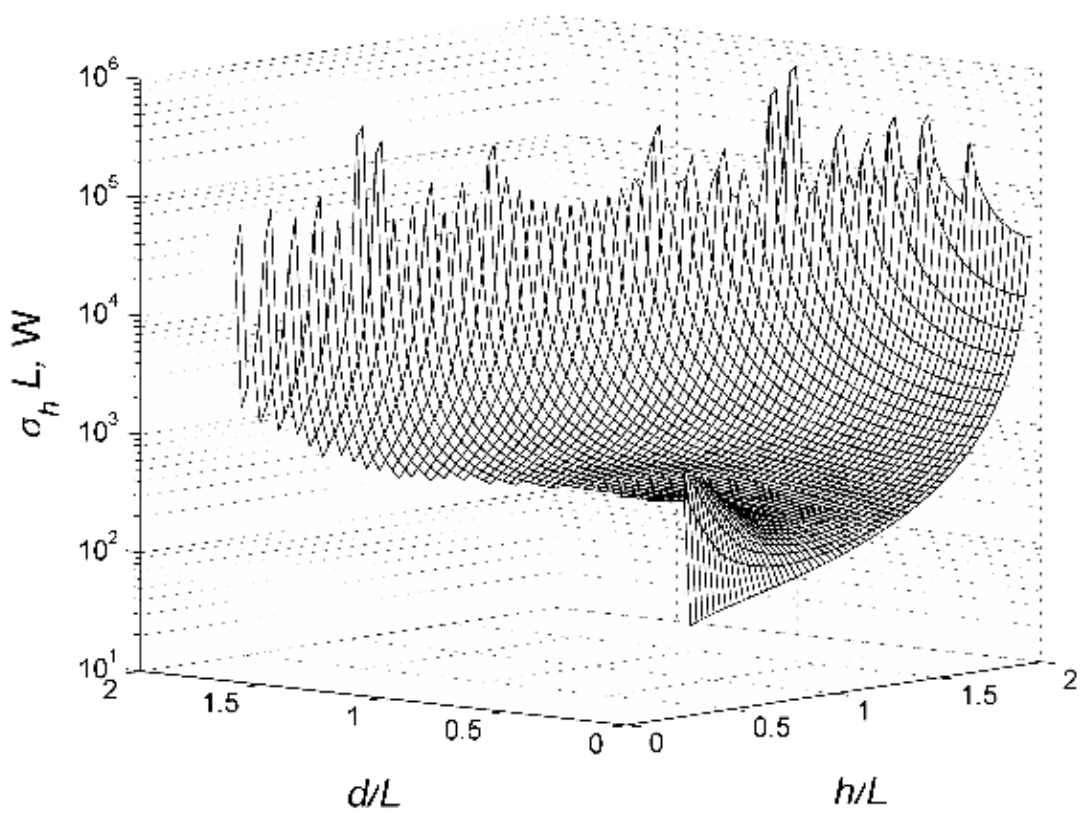
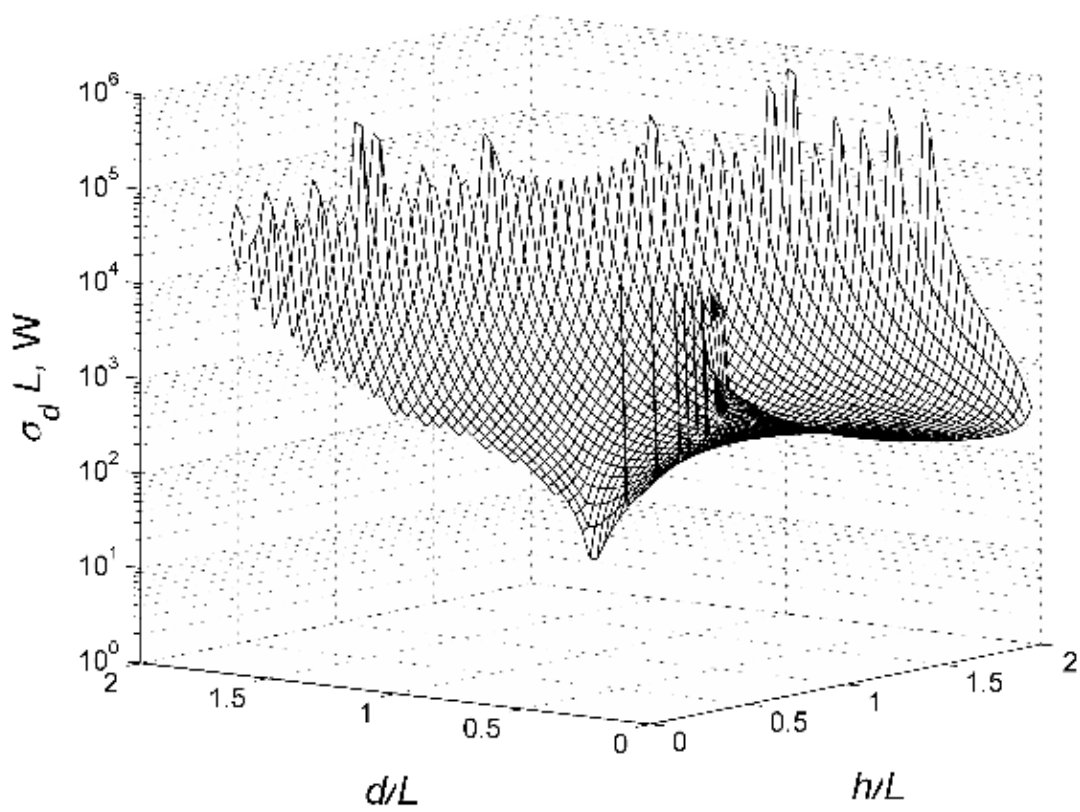


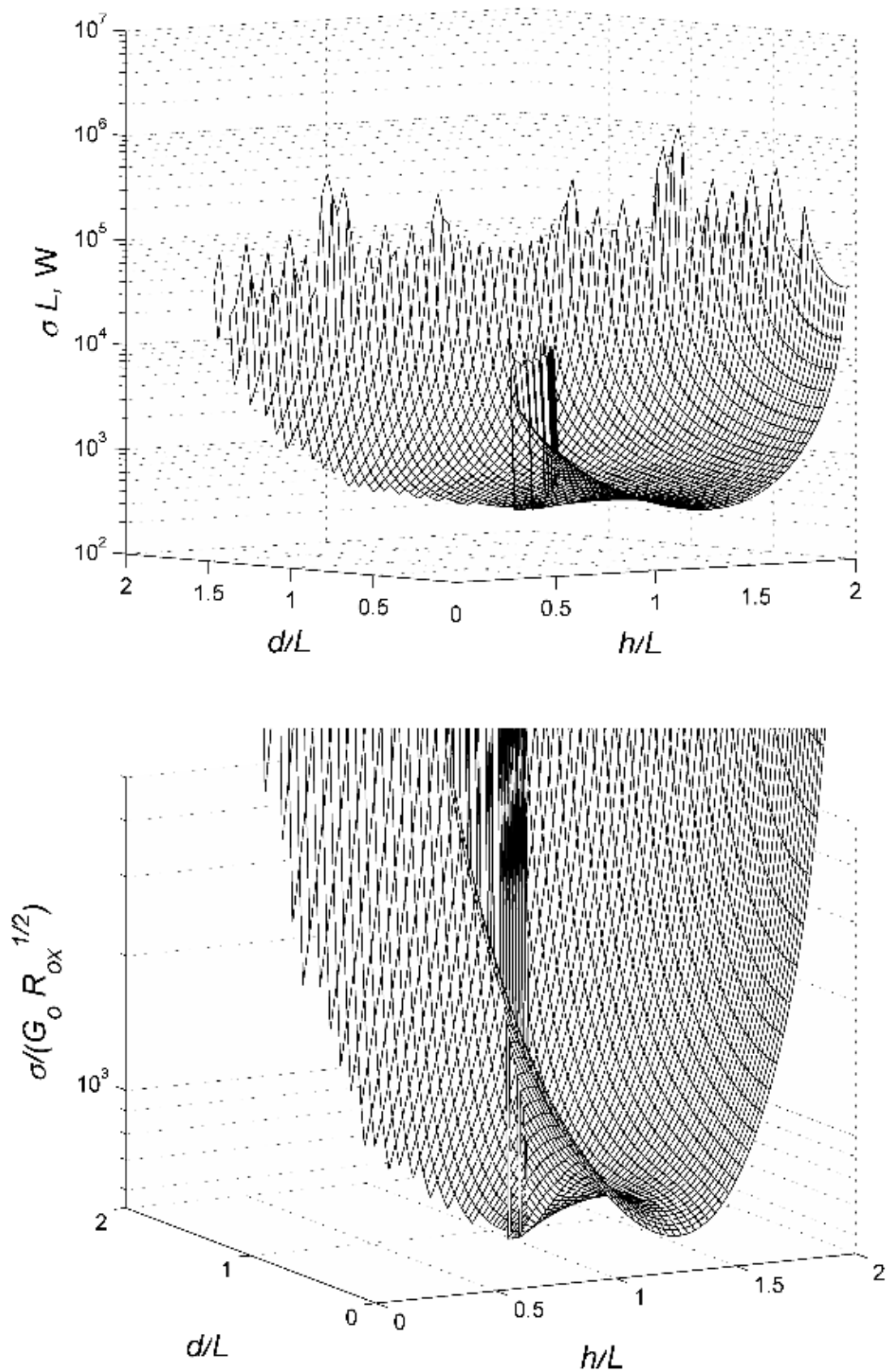
Slika 102 Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a)  $\sigma_d$ ; b)  $\sigma_h$ ; c)  $\sigma$ ; d)  $\sigma$  normirano pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 1$ .



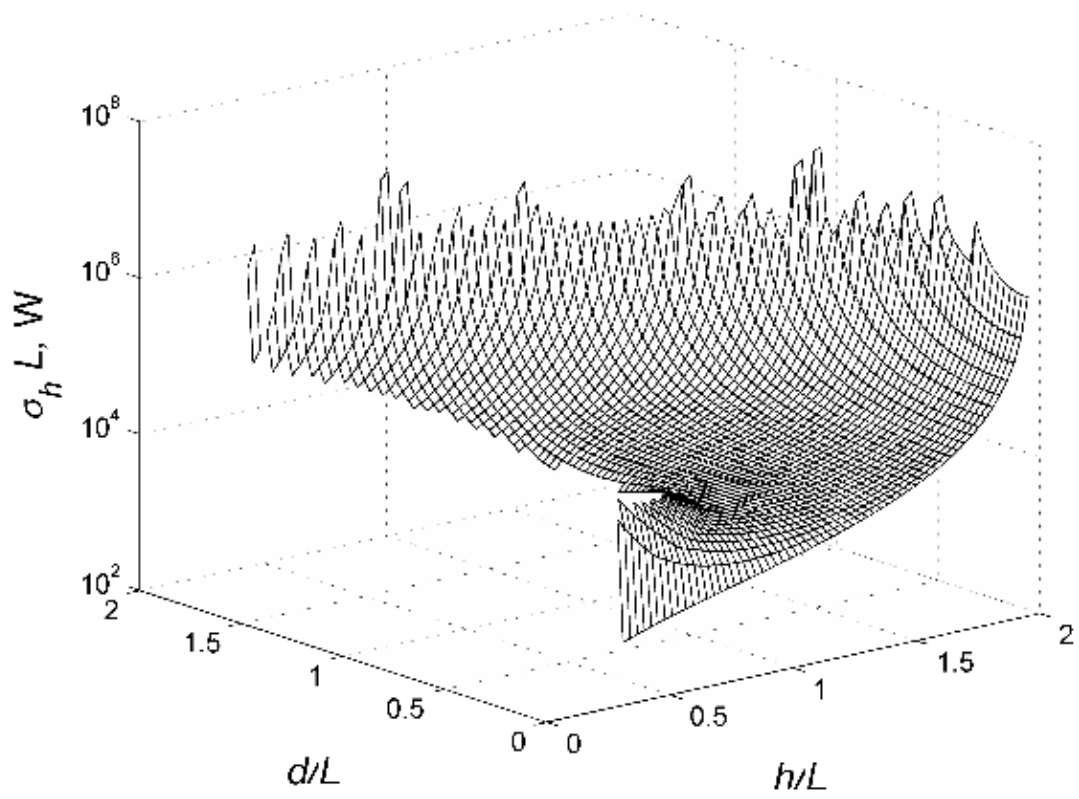
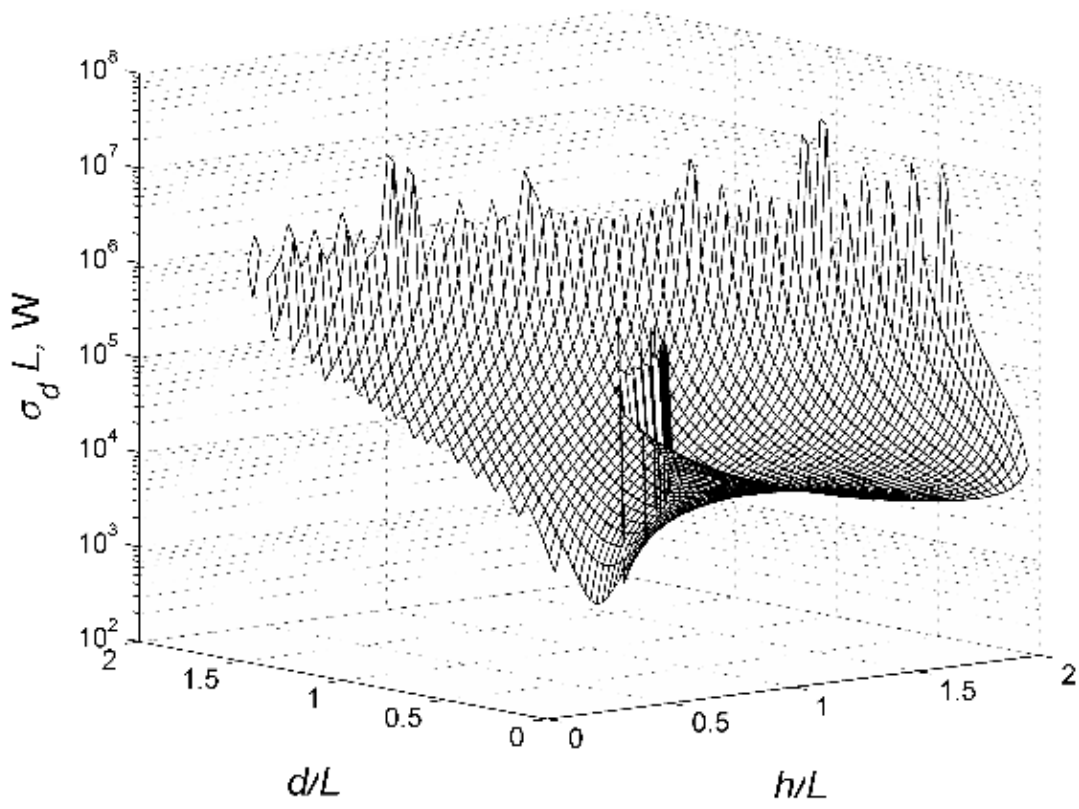


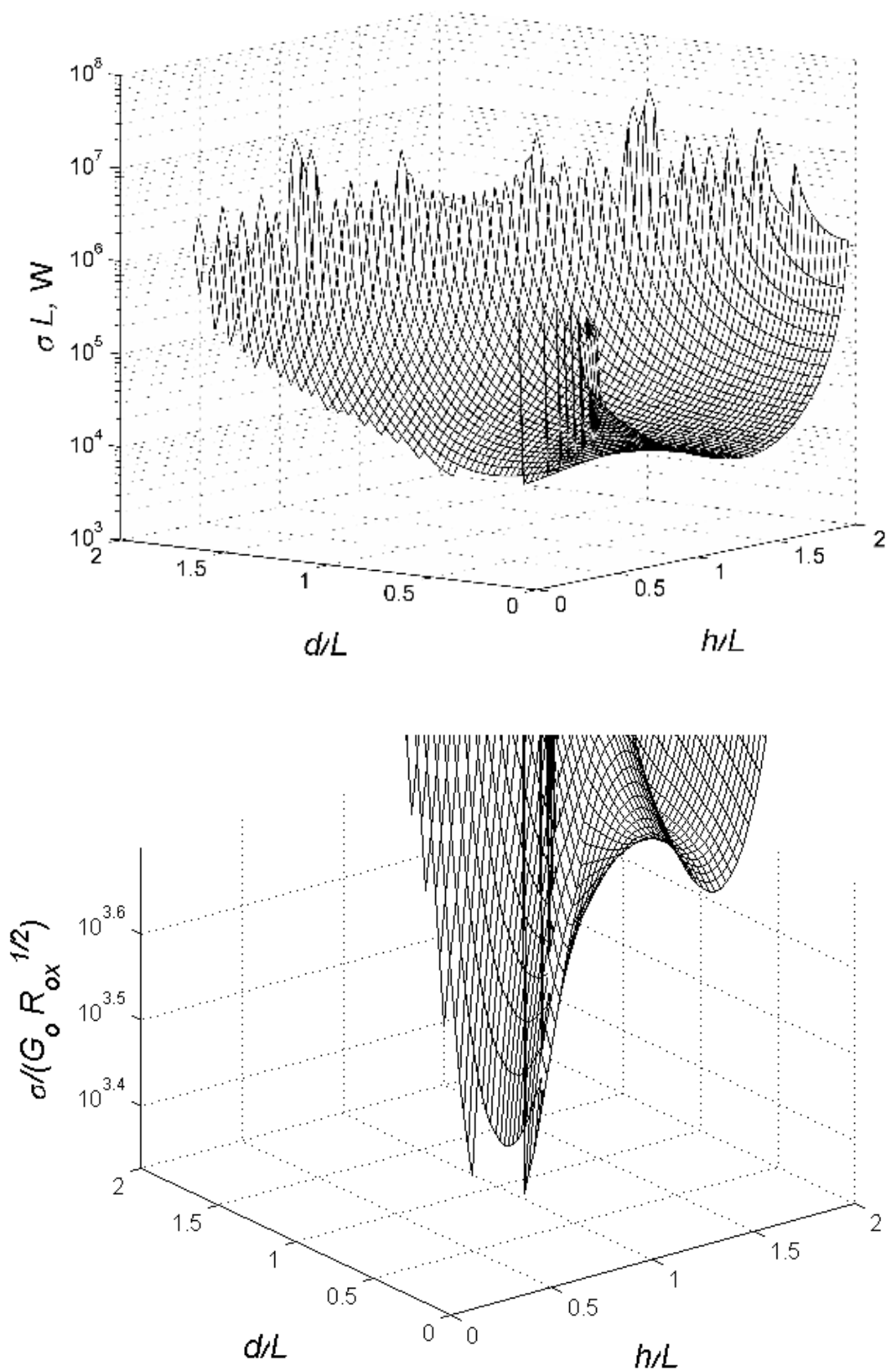
Slika 103. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a)  $\sigma_d$ ; b)  $\sigma_h$ ; c)  $\sigma$ ; d)  $\sigma$  normirano pri  $\psi = \pi/2$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .





Slika 104 Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a)  $\sigma_d$ ; b)  $\sigma_h$ ; c)  $\sigma$ ; d)  $\sigma$  normirano pri  $\psi = \pi/4$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

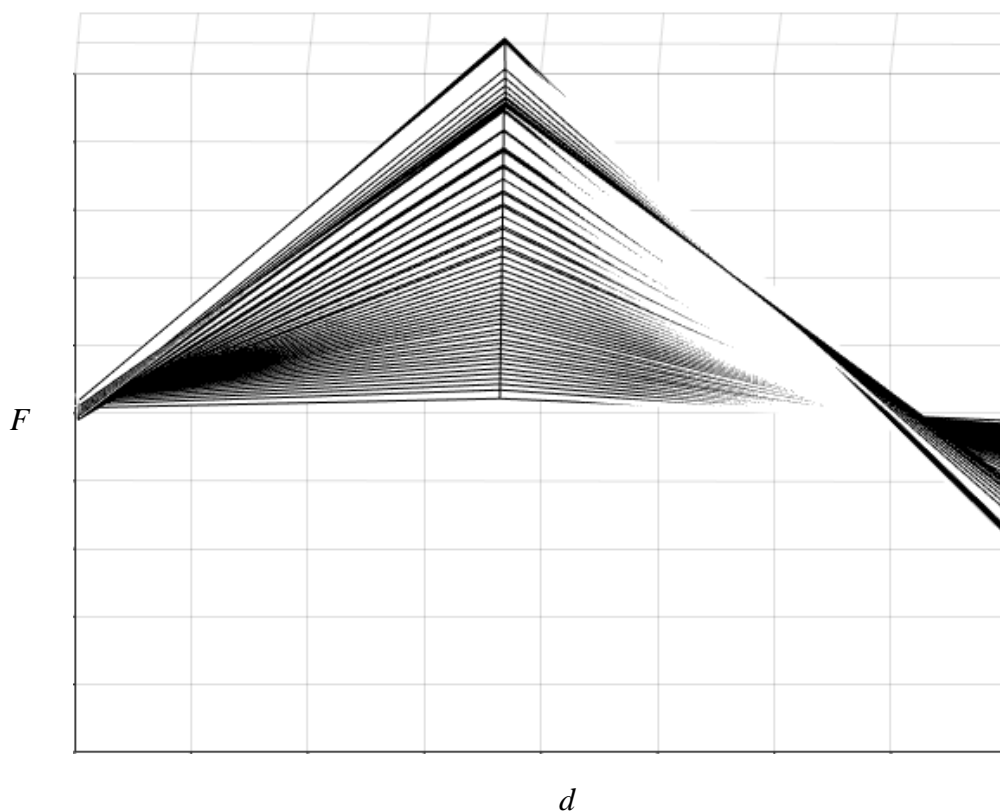




Slika 105. Statička osjetljivost sustava u ovisnosti o konfiguraciji a)  $\sigma_d$ ; b)  $\sigma_h$ ; c)  $\sigma$ ; d)  $\sigma$  normirano pri  $\psi = 0$  i  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

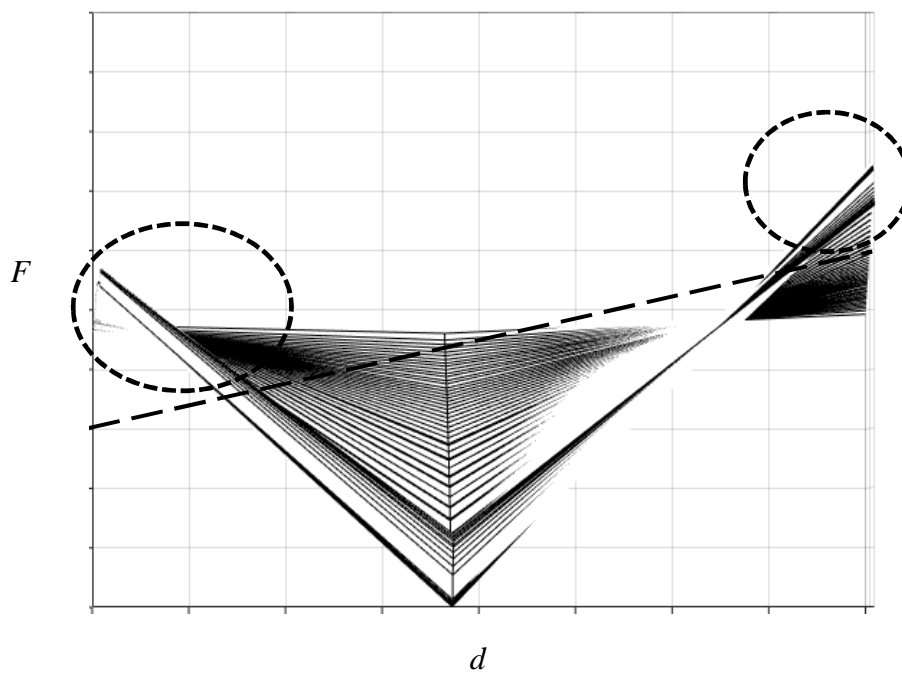
## 8.7 Slobodna energija sustava

Slobodna energija sustava očituje se u količini energije sustava raspoložive za održavanje stabilnosti sustava uslijed nekontroliranih parametara okoline kao npr. povremeni zapusi vjetra. Zapusi vjetra, prikazani ovim radom, ograničeni su na ravninu u kojoj se nalazi sustav bespilotnih letjelica i teret. Stoga je strujanje vjetra vodoravno (čeoni ili leđni vjetar) ili vertikalno (prema gore ili prema dolje). Pretpostavljeni odgovor sustava na promjene u bilo kojem smjeru od tih zapuha vjetra očituje se promjenom geometrijskog parametra definiranog u smjeru vanjske promjene. U nastavku su prikazani rezultati analize sustava pri upravljanju konfiguracijom za omjer masa  $m_{1,2}/m_0 = 1$  i varijabilnog kontrolnog parametra  $\psi_0$ .

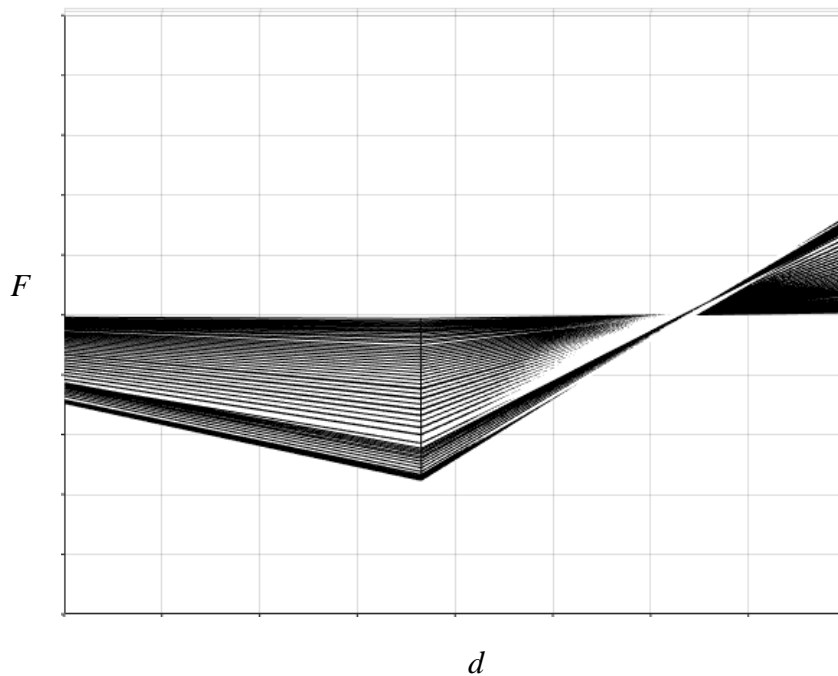


Slika 106 Slobodna energija sustava u ovisnosti o  $d/L$  za kontrolni parametar  $\psi_0 \approx 0$ .

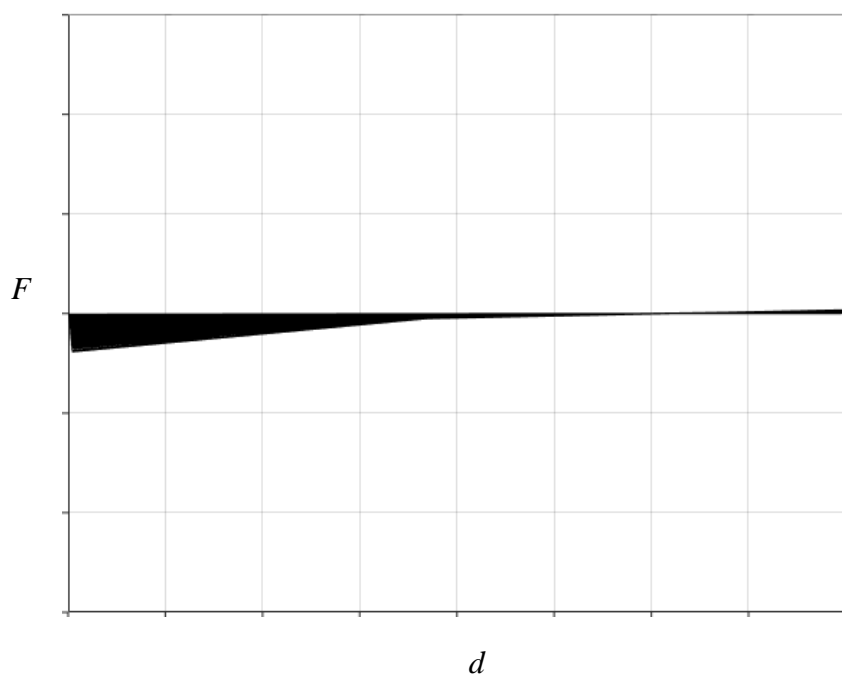




Slika 107 Prikaz povoljnog područja slobodne energije sustava u ovisnosti o  $d/L$  za kontrolni parametar  $\psi_0 \approx 0$ .



Slika 108 Slobodna energija sustava u ovisnosti o  $d/L$  za kontrolni parametar  $\psi_0 = \pi/4$ .



Slika 109 Slobodna energija sustava u ovisnosti o  $d/L$  za kontrolni parametar  $\psi_0 = \pi/4$ .

## 9 Diskusija

Rezultati numeričkih simulacija prenošenja tereta pomoću dvije bespilotne letjelice obuhvaćaju gotovo sve realistične iznose parametara sustava. Fokus rada je na energiji sustava potrebnoj za prijenos tereta. Potrebna energija je funkcija realiziranih pogonskih sila i sila reakcije sustava uslijed opterećenja. Parametri promatranog sustava su mase letjelica,  $m_{1,2}$ , masa tereta,  $m_0$ , te brzina leta iskazana otklonom vektora ukupne sile reakcije sustava od referentne horizontalne osi,  $\psi$ . Sve duljine unutar sustava iskazane su relativno u odnosu na konstantnu duljinu konopca,  $L$ , a pripadni kutovi su iskazani u apsolutnom iznosu. Za navedeni sustav pet je kvalitativno različitih načina upravljanja. Svaki od načina ostvaruje se preko dvije upravljačke varijable. Načinu upravljanja, s pripadnim iznosima upravljačkih varijabli za koje su prikazani rezultati numeričke simulacije, su

- upravljanje konfiguracijom za  $h = 0, 1; 1$  i  $2$  za cijeli dozvoljeni raspon  $d$ ,
- upravljanje iznosima potisaka za  $1 < T_{1,2} < 2000$ ,
- upravljanje kutovima otklona potisaka za  $0 < \beta_1 < \pi$  i  $-\pi < \beta_2 < \pi/2$ ,
- upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 1 za  $1 < T_1 < 200$  i  $0 < \beta_1 < \pi$  te
- upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 2 za  $1 < T_2 < 200$  i  $-\pi < \beta_2 < \pi/2$ .

U svim načinima upravljanja utjecajni parametri sustava su omjer masa letjelica i mase tereta te brzina leta. Tri karakteristična slučaja prijenosa tereta obuhvaćena su pomoću tri pripadna omjera masa

- prijenos relativno teškog tereta za  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ,
- prijenos tereta mase usporedive s masom letjelica za  $m_{1,2}/m_0 = 1$  i
- prijenos relativno laganog tereta za  $m_{1,2}/m_0 = 100$ .

Brzina leta za tri karakteristične kategorije iskazana je otklonom ukupne sile reakcije u odnosu na horizontalnu os (Slika 7.):

- $\psi = \pi/2$  za lebdenje,
- $\psi = \pi/4$  za relativno spori horizontalni let i
- $\psi = 0$  za relativno brzi horizontalni let.

Numeričkim simulacijama sustava obuhvaćeni su svi iznosi navedenih parametara. Karakteristične kombinacije parametara prikazane su u poglavlju *Rezultati istraživanja* na stranici 74, a u nastavku su detaljno analizirane za pojedini način upravljanja.

## 9.1 Upravljanje konfiguracijom

Upravljanje konfiguracijom ostvaruje se promjenama vertikalne ( $h$ ) i horizontalne ( $d$ ) udaljenosti između letjelica. U pripadnim grafovima vertikalna udaljenost  $h$  je fiksirana te su druge veličine promatrane u cijelom dozvoljenom rasponu horizontalne udaljenosti  $d$ .

Tri karakteristične vertikalne udaljenosti su mala udaljenost  $h = 0,1 L$ ; srednja udaljenost  $h = 1 L$  i velika udaljenost  $h \approx 2 L$ , a rezultati su prikazani slikama (Slika 36) do (Slika 62). Na svim navedenim slikama graf a) prikazuje iznose potiska letjelica,  $T_{1,2}$ , u ovisnosti o relativnoj horizontalnoj udaljenosti,  $d/L$ ; graf b) prikazuje napetosti konopaca,  $N_{1,2}$ , u ovisnosti o relativnoj horizontalnoj udaljenosti,  $d/L$ ; graf c) prikazuje kutove potisaka prema vertikali,  $\beta_{1,2}$ , u ovisnosti o horizontalnoj udaljenosti,  $d/L$  i graf d) prikazuje kutove koje konopci zatvaraju s vertikalnom osi,  $\alpha_{1,2}$ , u ovisnosti o horizontalnoj udaljenosti,  $d/L$ . Grafovi upućuju na tri kvalitativno različita područja horizontalnih udaljenosti za koje sustav ostvaruje prijenos tereta

- područje malih horizontalnih udaljenosti  $d/L \ll 1$ ,
- područje srednje horizontalne udaljenosti  $d/L \approx 1$  i
- područje velikih horizontalnih udaljenosti  $d/L \approx 2$ .

Za slučaj držanja teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri lebdenju ( $\psi = \pi/2$ ) na malim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 0,1$ ) karakteristične veličine sustava prikazane su slikom (Slika 36). U području malih horizontalnih udaljenosti,  $d/L \ll 1$ , letjelice su gotovo neovisne. Letjelica 1 ostvaruje potisak kojim nosi samo svoju težinu dok letjelica 2 ostvaruje potisak za održavanje vlastite težine i težine tereta. Dakle, letjelica 2 sama prenosi gotovo cijelu težinu tereta,  $T_2 \approx G_0$ , graf 36 a). Napetosti konopaca su u skladu s udjelom letjelica u nošenju tereta, graf 36 b). Vektor potiska letjelice 1 ima i horizontalnu i vertikalnu komponentu različitu od nule,  $\beta_1 > 0$ , dok vektor potiska letjelice 2 ima samo vertikalnu komponentu, graf 36 c). Pripadni kutovi otklona konopaca  $\alpha_{1,2}$  pokazuju da se letjelica 2 nalazi gotovo vertikalno iznad tereta dok je letjelica 1 otklonjena od vertikalne osi, graf 36 d). Povećanjem horizontalne udaljenosti između letjelica potisak letjelice 1 se povećava, a letjelice 2 smanjuje. U području srednjih horizontalnih udaljenosti  $d/L \approx 1$  potisci su gotovo jednaki,  $T_1 \approx T_2$ . U tom području horizontalnih udaljenosti letjelica 2 malo više doprinosi nošenju tereta nego letjelica 1. Slično

vrijedi i za iznose napetosti konopaca. To upućuje na kooperativno nošenje. Graf 36 c) pokazuje da su potisci otklonjeni od vertikale za podjednake iznose ali na suprotne strane obzirom na vertikalu. Za relativno velike horizontalne udaljenosti  $d/L \approx 2$  postaje izražena kompeticija između letjelica. Iznosi potisaka divergiraju, jednako kao i napetosti konopaca. Najveći dio iznosa potiska jedne letjelice razvijen je zbog suprotstavljanja drugoj letjelici a ne zbog prenošenja tereta. Vrijedi  $\beta_{1,2} \approx \pi/2$  što znači da su potisci gotovo horizontalni. Također, konopci su gotovo horizontalni,  $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx \pi/2$ , i otklonjeni od vertikalne osi na suprotnim stranama. U realnom slučaju ovakvo stanje ne može biti dosegnuto jer zbog konačne vlačne čvrstoće konopci ne mogu prenositi prevelike napetosti.

Razvijena snaga, odnosno utrošena energija, ukazuje da je područje malih udaljenosti energetski nepovoljno jer je gotovo sva uložena energija iskorištena za prijenos tereta samo jednom letjelicom. Područje srednjih udaljenosti je optimalno područje jer letjelice djeluju kooperativno i podjednako sudjeluju u držanju tereta. Područje velikih horizontalnih udaljenosti također je energetski nepovoljno jer letjelice pokazuju kompeticiju i troše raspoloživu energiju na međusobno suprotstavljanje, a ne na prenošenje tereta.

Za slučaj držanja teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri lebdenju ( $\psi = \pi/2$ ) na srednjim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 37). U području malih horizontalnih udaljenosti napetost konopaca je negativna pa uzimamo da sustav ne djeluje u tom području. U području srednjih horizontalnih udaljenosti,  $d/L \approx 1$ , letjelice su gotovo neovisne. Letjelica 1 ostvaruje potisak kojim nosi samo svoju težinu dok letjelica 2 ostvaruje potisak za održavanje vlastite težine i težine tereta. Dakle, letjelica 2 sama prenosi gotovo cijelu težinu tereta,  $T_2 \approx G_0$ , graf 37 a). Napetosti konopaca su u skladu s udjelom letjelica u nošenju tereta, graf 37 b). Pripadni kutovi otklona konopaca  $\alpha_{1,2}$  pokazuju da se letjelica 2 nalazi gotovo vertikalno dok je letjelica 1 otklonjena od vertikalne osi, graf 37 d). Povećanjem horizontalne udaljenosti između letjelica potisak letjelice 1 se povećava, a letjelice 2 smanjuje. Kutovi otklona vektora potiska se povećavaju, a ujedno je kut  $\beta_2$  u negativnom području. Razlog tome je što je letjelica 2 orijentirana suprotno od pravca leta. Povećanje kuta otklona konopca  $\alpha_2$  uzrokuje smanjenje kuta otklona konopca  $\alpha_1$ . U području velike horizontalne udaljenosti izražena je velika kompeticija. Iznosi potisaka divergiraju kao i napetosti konopaca. Najveći dio potiska letjelice nije razvijen zbog držanja tereta nego zbog suprotstavljanja drugoj letjelici. Kutovi otklona potisaka  $\beta_{1,2}$  rastu, a kutovi otklona konopaca se smanjuju. U realnom slučaju ovakvo stanje je ne održivo jer bi zbog konačne vlačne čvrstoće konopci ne mogu prenositi prevelike napetosti.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je nepovoljno iz razloga što letjelice u niti jednom području raspona horizontalnih udaljenosti ne ostvaruje kooperaciju, odnosno ne sudjeluju u zajedničkom držanju tereta.

Za slučaj držanja teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri lebdenju ( $\psi = \pi/2$ ) na velikim vertikalnim udaljenostima ( $h/L \approx 2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 38). Pri malim horizontalnim udaljenostima,  $d/L \ll 1$ , letjelica 2 ostvaruje potisak za održavanje vlastite težine i težine tereta. Dakle, letjelica 2 sama prenosi gotovo cijelu težinu tereta,  $T_2 \approx G_0$ , graf a). Napetosti konopaca su u skladu s udjelom letjelica u nošenju tereta, graf b). Kut otklona vektora potiska letjelice 2 je približno jednak nuli, a kut otklona vektora potiska letjelice 1 je veći od  $\pi/2$ , graf c). Za relativno malo povećanje horizontalne udaljenosti iznosi ostvarenih potisaka naglo divergiraju kao i napetost konopaca te se ostvaruje kompeticija između letjelica. U ostalom dijelu horizontalno raspona sustav ne ostvaruje djelovanje.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je nepovoljno iz razloga što letjelice ne ostvaruju kooperaciju, odnosno ne sudjeluju u zajedničkom držanju tereta.

Za slučaj prijenosa teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) na malim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 0,1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 39). Za ovako postavljene parametre ponašanje sustava u potpunosti odgovara slučaju lebdenja za iste parametre sustava,  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ;  $h/L = 0,1$ , Slika 36.

Za slučaj prijenosa teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) na srednjim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 40). Za ovako postavljene parametre ponašanje sustava u potpunosti odgovara slučaju lebdenja za iste parametre sustava,  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ;  $h/L = 1$ , Slika 37.

Za slučaj prijenosa teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) na velikim vertikalnim udaljenostima ( $h/L \approx 2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 41). Za ovako postavljene parametre ponašanje sustava u potpunosti odgovara slučaju lebdenja za iste parametre sustava,  $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ;  $h/L = 2$ , Slika 38.

Za slučaj prijenosa teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) na malim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 0,1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 42). Zbog velike brzine leta u području malih horizontalnih udaljenosti obje letjelice ostvaruju određeni iznos potiska, graf a). Napetosti konopaca su u skladu s udjelom letjelica u

nošenju tereta, graf b)). Zbog velike brzine kut otklona konopca od vertikale,  $\alpha_2$ , prelazi iz negativnog u pozitivno područje, odnosno letjelica 2 prelazi s desne na lijevu stranu u odnosu na vertikalu, graf d). Povećavanjem horizontalne udaljenosti između letjelica potisak letjelice 1 se povećava, a potisak letjelice 2 se smanjuje. Podjednak trend ponašanja vidljiv je i na krivuljama za napetost konopaca. Kutovi otklona od vertikalne osi,  $\beta_{1,2}$  i  $\alpha_{1,2}$ , se povećavaju. Kut  $\alpha_2$  prelazi u pozitivni dio što znači da se s povećanjem horizontalne udaljenosti letjelica 2 otklanja na lijevo u odnosu na vertikalnu os. U području srednjih udaljenosti potisci letjelica teže izjednačavanju, ali u ovom režimu leta letjelica 1 ostvaruje veći potisak nego letjelica 2,  $T_1 > T_2$ . Potisak letjelice 2 ostvaruje tendenciju polaganog rasta. Podjednak trend ponašanja očituje se i za napetosti konopaca, a pripadni kutovi otklona potisaka i konopaca se povećavaju. U području velike horizontalne udaljenosti izražena je velika kompeticija. Iznosi potisaka divergiraju kao i napetosti konopaca. Najveći dio potiska letjelice nije razvijen zbog držanja tereta nego zbog suprotstavljanja drugoj letjelici. Kutovi  $\beta_{1,2} \approx \pi/2$  što pokazuje da su vektori potiska gotovo horizontalni. Kutovi otklona konopaca su približno jednaki,  $\alpha_1 \approx \alpha_2$ , te ukazuju na to da su letjelice za  $\pi/2$  otklonjene od vertikalne osi u suprotnim smjerovima. U realnom slučaju ovakvo stanje je ne održivo jer bi zbog konačne vlačne čvrstoće konopci ne mogu prenositi prevelike napetosti.

Razvijena snaga, odnosno utrošena energija, u području malih udaljenosti ukazuje da je to područje nepovoljno za sustav jer sva uložena energija je iskorištena za prijenos tereta samo jednom letjelicom. Područje srednjih udaljenosti je optimalno područje jer letjelice ostvaruju kooperaciju i gotovo podjednako sudjeluju u prenošenju tereta. Područje velikih horizontalnih udaljenosti je ne povoljno jer letjelice ostvaruju kompeticiju i troše raspoloživu energiju na međudjelovanje, a ne na prenošenje tereta.

Za slučaj prijena teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) na srednjim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 43). Za ovako postavljene uvjete pri malim horizontalnim udaljenostima letjelice su gotovo neovisne. Letjelica 1 ostvaruje potisak kojim nosi samo svoju težinu dok letjelica 2 ostvaruje potisak za održavanje vlastite težine i težine tereta. Dakle, letjelica 2 sama prenosi gotovo cijelu težinu tereta,  $T_2 \approx G_0$ , graf a). Napetosti konopaca su u skladu s udjelom letjelica u nošenju tereta, graf b). Kut otklona vektora potiska letjelice 2,  $\beta_2$ , je pozitivan odnosno u pravcu leta. Kut otklona konopca letjelice 2,  $\alpha_2$ , je negativan što ukazuje na činjenicu da je letjelica 2 nagnuta na desnu stranu u odnosu na vertikalnu os. Povećanjem horizontalne udaljenosti između letjelica potisak letjelice 1 se povećava, a letjelice 2 smanjuje. Razlog tome

je što letjelica 1 počinje sudjelovati u nošenju tereta. Sukladno tome povećava se i napetost  $N_1$  dok se napetost  $N_2$  smanjuje. Kutovi otklona od vertikalne osi vezani uz letjelicu 2,  $\beta_2$  i  $\alpha_2$ , teže prema nuli. Kut otklona vektora potiska letjelice 1 se povećava, a kut otklona konopca 1 se smanjuje. U području velike horizontalne udaljenosti potisci i napetosti konopaca divergiraju. Letjelice ostvaruju kompeticiju. Najveći dio potiska letjelice nije razvijen zbog prijenosa tereta nego zbog suprotstavljanja drugoj letjelici. Kutovi  $\beta_{1,2} \approx \pi/2$  što pokazuje da su vektori potiska gotovo horizontalni. Kutovi otklona konopaca su približno jednaki,  $\alpha_1 \approx \alpha_2$ , i teže kutu od  $\pi/2$  za koji su letjelice otklonjene od vertikalne osi u suprotnim smjerovima. U realnom slučaju ovakvo stanje je ne održivo jer bi zbog konačne vlačne čvrstoće konopci ne mogu prenositi prevelike napetosti.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je nepovoljno iz razloga što letjelice u niti jednom području raspona horizontalnih udaljenosti ne ostvaruje kooperaciju, odnosno ne sudjeluju u zajedničkom nošenju tereta.

Za slučaj prijenosa teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) na velikim vertikalnim udaljenostima ( $h/L \approx 2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 44). Pri malim horizontalnim udaljenostima,  $d/L \ll 1$ , letjelica 2 sama prenosi gotovo cijelu težinu tereta,  $T_2 \approx G_0$ , graf a). Napetosti konopaca su u skladu s udjelom letjelica u nošenju tereta, graf b). Kut otklona vektora potiska letjelice 2 je približno jednak nuli, a kut otklona vektora potiska letjelice 1 je veći od  $\pi/2$ , graf c). Za relativno malo povećanje horizontalne udaljenosti iznosi ostvarenih potisaka naglo divergiraju kao i napetost konopaca te se ostvaruje kompeticija između letjelica. U ostalom dijelu horizontalno raspona sustav ne ostvaruje djelovanje.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je nepovoljno iz razloga što letjelice ne ostvaruju kooperaciju, odnosno ne sudjeluju u zajedničkom nošenju tereta.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) na malim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 0,1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 45). Za ovako postavljene parametre sustav se ponaša identično kao i u režimu leta malim brzinama za iste parametre ( $m_{1,2}/m_0$  i  $\psi$ ). U početnom dijelu horizontalnog raspona letjelice djeluju neovisno. Povećanjem horizontalne udaljenosti najprije se očituje kooperativno djelovanje, a pri maksimalnoj horizontalnoj udaljenosti letjelice su u režimu kompeticije te ne povoljno utječu jedna na drugu.



Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) na srednjim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 46). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša kao i u režimu leta malim brzinama za iste parametre ( $m_{1,2}/m_0$  i  $\psi$ ). Razlika u odnosu na režim leta malih brzina je ta što uslijed povećanja brzine raste i generirani otpor sustava pa letjelice moraju ostvariti veće iznose potisaka. Trend ponašanja pripadnih krivulja prikazanih slikama (Slika 37) i (Slika 46) je jednak.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) na velikim vertikalnim udaljenostima ( $h/L \approx 2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 47). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša kao i u režimu leta malim brzinama za iste parametre ( $m_{1,2}/m_0$  i  $\psi$ ). Razlika u odnosu na režim leta malih brzina je ta što uslijed povećanja brzine raste i generirani otpor sustava pa letjelice moraju ostvariti veće iznose potisaka te povećanje pripadnih kutova odklona  $\beta_{1,2}$ . Trend ponašanja pripadnih krivulja prikazanih slikama (Slika 38) i (Slika 47) je jednak.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) na malim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 0,1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 48). Upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima ograničeno je na područje velikih horizontalnih udaljenosti  $d/L \approx 2$ . Letjelica 1 ostvaruje potisak potreban za nošenje tereta, a letjelica 2 održava samo vlastitu težinu, graf a). Napetosti konopaca su u skladu s udjelom letjelica u nošenju tereta, graf b). Za relativno malo povećanje horizontalne udaljenosti iznosi ostvarenih potisaka naglo divergiraju te se ostvaruje kompeticija između letjelica.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je nepovoljno iz razloga što letjelice ne ostvaruju kooperaciju, odnosno ne sudjeluju u zajedničkom nošenju tereta.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) na srednjim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 49). Za ovako postavljene uvjete sustav je djelotvoran u gotovo cijelom rasponu  $d/L$ . U području malih horizontalnih udaljenosti,  $d/L \ll 1$ , obje letjelice za relativno mali raspon ostvaruju potisak, graf a). Kutovi odklona potisaka su  $\beta_{1,2} \approx \pi/4$ , graf c). Kutovi odklona konopaca po iznosu su jednaki ali su suprotno usmjereni te je kut  $\alpha_2$  u negativnom području što nam daje informaciju kako je letjelica 2 otklonjena u desnu stranu u odnosu na vertikalnu os, graf d). Povećanjem horizontalne udaljenosti potisak letjelice 1 raste,

a ujedno potisak letjelice 2 pada. Pripadni kutovi otklona za letjelicu 1 rastu, dok otkloni kutova vezanih uz letjelicu 2 teže u 0. Za horizontalnu udaljenost  $d/L \approx 0,5$  iznosi potisaka letjelica se izjednačuju i obje letjelice podjednako nose teret. Daljnjim povećanje horizontalne udaljenosti potisak letjelice 1 raste, a letjelice 2 pada. U području srednjih horizontalnih udaljenosti letjelica 2 ne prenosi teret nego ostvaruje potisak potreban samo za svoje vlastito održavanje. Sukladno tome i napetost konopca  $N_2$  se smanjuje, graf b). Kutovi otklona obiju letjelica su u porastu. Prelaskom u područje velikih horizontalnih udaljenosti potisak obiju letjelica divergira kao i napetost konopaca. Kutovi otklona vektora potisaka također rastu, a kutovi otklona konopaca teže izjednačenju.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je povoljno samo u dijelu gdje letjelice ostvaruju približno jednak iznos potisaka. U ostatku raspona horizontalnih udaljenosti djelovanje sustava je nepovoljno iz razloga što letjelice ne ostvaruje kooperaciju, odnosno ne sudjeluju u zajedničkom nošenju tereta.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) na velikim vertikalnim udaljenostima ( $h/L \approx 2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 50). U području malih horizontalnih udaljenosti,  $d/L \approx 0,1$ , obje letjelice ostvaruju potisak, graf a). Potisak letjelice 2 je veći u odnosu na potisak letjelice 1. Napetosti konopaca jednake su ostvarenim potiscima, graf b). Kut otklona vektora potiska letjelice 2 približno je jednak nuli, a kut otklona vektora potiska letjelice 1 je preko  $\pi/2$ , graf c). Za povećanje horizontalne udaljenosti iznosi ostvarenih potisaka naglo rastu te se ostvaruje kompeticija između letjelica. Sukladno tome raste i napetost konopaca  $N_{1,2}$  te kutovi otklona vektora potisaka  $\beta_{1,2}$ . Kutovi otklona konopaca,  $\alpha_{1,2}$ , teže izjednačenju.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je nepovoljno iz razloga što letjelice ne ostvaruju kooperaciju, odnosno ne sudjeluju u zajedničkom nošenju tereta.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) na malim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 0,5$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 51). Za ovako postavljene parametre sustav ostvaruje djelovanje pri malim,  $d/L \ll 1$ , i velikim,  $d/L \approx 2$ , horizontalnim udaljenostima. Pri malim horizontalnim udaljenostima sustav ostvaruje neovisno ponašanje letjelica koje ostvaruju isti iznos potiska, graf a), a ujedno su i napetosti konopaca identične, graf b). Kutovi otklona vektora potisaka od vertikalne osi su

pozitivni, kut  $\beta_2 \rightarrow \pi/2$ , a kut  $\beta_1 \approx \pi/2$ , graf c). Kutovi otklona konopaca od vertikalne osi  $\alpha_{1,2} \approx \pi/2$ , graf d). Kut  $\alpha_1$  je pozitivno usmjeren, a kut  $\alpha_2$  negativno što upućuje na to da se letjelica 2 nalazi na desno u odnosi na vertikalnu os. Povećanjem horizontalne udaljenosti potisak letjelice 1 se povećava, a potisak letjelice 2 prelazi u 0. Razlog tome je što dolazi do negativnih vrijednosti napetosti konopca  $N_2$ . Ujedno kutovi  $\beta_{1,2}$  se smanjuju, kut  $\alpha_1$  raste, a kut  $\alpha_2$  teži u 0. Daljnjim povećanje kuta  $\alpha_2$  sustav ponovno dolazi u operativno područje. Ponovno uspostavljanje područja djelovanja ostvareno je za velike horizontalne udaljenosti,  $d/L \approx 2$ . Potisak i napetost konopca letjelice 2 postaju pozitivni i veći od 0. Za malu promjenu horizontalne udaljenosti na ovoj razini sustav velikom brzinom dolazi u područje kompeticije. Potisci letjelica, a ujedno i napetosti konopaca, divergiraju. Kutovi otklona vektora potisaka se povećavaju, a kutovi otklona konopaca teže izjednačenju.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je nepovoljno iz razloga što letjelice u di jednom području horizontalnog raspona ne ostvaruju kooperaciju, odnosno ne sudjeluju u zajedničkom nošenju tereta.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) na srednjim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 52). Pri malim horizontalnim udaljenostima,  $d/L \ll 1$  obje letjelice ostvaruju potisak jednakog iznosa, graf a), a napetosti u konopcima su identične, graf b). Kutovi otklona potisaka su pozitivni i usmjereni u pravcu leta, graf c)). Ujedno je kut otklona konopca letjelice 2 negativan što nam daje informaciju da je letjelica 2 otklonjena u desnu stranu u odnosu na vertikalnu os, graf d). Povećanjem horizontalne udaljenosti potisak letjelice 1 raste, a ujedno potisak letjelice 2 pada. Pripadni kutovi otklona za letjelicu 1 rastu, dok otkloni kutova vezanih uz letjelicu 2 teže u 0. Daljnjim povećanjem horizontalne udaljenosti potisak letjelice 1 raste, a letjelice 2 pada. U području srednjih horizontalnih udaljenosti letjelica 2 ne prenosi teret nego ostvaruje potisak potreban samo za svoje vlastito održavanje. Sukladno tome i napetost konopca  $N_2$  se smanjuje. Kutovi otklona obiju letjelica su u porastu. Prelaskom u područje velikih horizontalnih udaljenosti potisak obiju letjelica divergira kao i napetost konopaca. Kutovi otklona vektora potisaka također rastu, a kutovi otklona konopaca teže izjednačenju.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je povoljno samo u početnom trenutku kad letjelice ostvaruju približno jednak iznos potisaka. U ostatku raspona horizontalnih udaljenosti djelovanje sustava

je nepovoljno iz razloga što letjelice ne ostvaruju kooperaciju, odnosno ne sudjeluju u zajedničkom nošenju tereta.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) na velikim vertikalnim udaljenostima ( $h/L \approx 2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 53). Pri malim horizontalnim udaljenostima,  $d/L \approx 0,1$ , letjelice ostvaruju gotovo podjednak potisak te možemo reći da obje sudjeluju u nošenju tereta, graf a). Pripadna napetost konopaca je također jednaka, graf b). Kut otklona vektora potiska letjelice 2 približno je jednak  $\pi/6$ , a kut otklona vektora potiska letjelice 1 je preko  $\pi/2$ , graf c). Kutovi otklona konopaca po iznosu su jednaki, ali su suprotno usmjereni te je kut  $\alpha_2$  u negativnom području što nam daje informaciju kako je letjelica 2 otklonjena u desnu stranu u odnosu na vertikalnu os, graf d). Za povećanje horizontalne udaljenosti iznosi ostvarenih potisaka naglo rastu te se ostvaruje kompeticija između letjelica. Napetosti konopaca slijede trend rasta kao i potisci, a kutovi otklona konopaca teže izjednačenju.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima ostvarivo je pri malim horizontalnim udaljenostima, ali zbog same geometrije sustava ovakvo rješenje je nerealno budući da bi jedna letjelica trebala biti iznad, a druga ispod tereta. U ostalom dijelu raspona letjelice ostvaruju kompeticiju i ne nose teret.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) na malim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 0,1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 54). Pri malim horizontalnim udaljenostima,  $d/L \approx 0,1$ , letjelice djeluju neovisno jedna o drugoj te letjelica 1 počinje ostvarivati potisak dovoljan za vlastito održavanje visine, a letjelica 2 ostvaruje potisak koji je dovoljan za održavanje konstantne visine i nošenje tereta, odnosno ona sama prenosi cijelu težinu tereta graf a). Napetosti konopaca su u skladu s udjelom letjelica u nošenju tereta, graf b). Pripadni prikloni kutovi  $\beta_{1,2}$  i  $\alpha_{1,2}$  pokazuju da se letjelica 2 nalazi gotovo vertikalno dok je letjelica 1 otklonjena od vertikalne osi (graf c) i d)). Povećanjem horizontalne udaljenosti između letjelica potisak letjelice 1 se povećava, a letjelice 2 smanjuje. Razlog tome je što letjelica 1 počinje sudjelovati u nošenju tereta. Sukladno tome povećava se i napetost  $N_1$  dok se napetost  $N_2$  smanjuje. Pripadni kutovi  $\alpha_{1,2}$  se povećavaju, a kutovi  $\beta_{1,2}$  su konstantni ( $\beta_{1,2} \approx 0$ ). U području srednjih udaljenosti potisci letjelica se postupno izjednačavaju. Posljedica toga je kooperativno nošenje tereta, odnosno obje letjelice prenose gotovo podjednaki dio mase tereta. Sukladno tome napetosti konopaca su gotovo identične ( $N_1 \approx N_2$ ), a pripadni kutovi otklona konopaca rastu. U području velikih udaljenosti,  $d/L \approx 2$ , letjelice su u području kompeticije i međusobno pokušavaju poništiti djelovanje jedne u odnosu

na drugu. Posljedica toga je skokovito povećanje ostvarenih potisaka, a ujedno i povećanje napetosti konopaca. U realnom slučaju ovakvo stanje je ne održivo jer bi zbog konačne vlačne čvrstoće konopci ne mogu prenositi prevelike napetosti.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije područje malih udaljenosti je nepovoljno područje jer sva uložena energija je iskorištena za prijenos tereta samo jednom letjelicom. Područje srednjih udaljenosti je optimalno područje jer letjelice ostvaruju kooperaciju i gotovo podjednako sudjeluju u prenošenju tereta. Područje velikih udaljenosti je ne povoljno područje budući da letjelice troše dostupnu količinu energije kako bi poništile djelovanje druge letjelice stoga ovo područje nazivamo područjem kompeticije.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) na srednjim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 55). Za ovako postavljene parametre sustava sustav ostvaruje pozitivno djelovanje pri srednjim udaljenostima,  $d/L \approx 1$ . U tom području letjelica 2 ostvaruje potisak dovoljan za održavanje konstantne visine i nošenje tereta, odnosno ona sama prenosi cijelu težinu tereta (graf a). Napetosti konopaca su u skladu s udjelom letjelica u nošenju tereta, (graf b). Pripadni prikloni kutovi  $\beta_{1,2}$  i  $\alpha_{1,2}$  pokazuju da se letjelica 2 nalazi gotovo vertikalno dok je letjelica 1 otklonjena od vertikalne osi (graf c) i d)). Povećanjem horizontalne udaljenosti potisci letjelica divergiraju kao i napetosti konopaca. Kutovi  $\beta_{1,2}$  su konstantni. Kutovi  $\alpha_{1,2}$  teže izjednačavanju.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije ovako postavljeni sustav je ne djelotvoran budući da letjelice u nijednom rasponu ne ostvaruju kooperativno prenošenje tereta.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) na velikim vertikalnim udaljenostima ( $h/L \approx 2$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 56). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao u slučaju prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa na srednjim vertikalnim udaljenostima za lebdenje, slika (Slika 55). Jedina razlika između ova dva slučaja je što za veće iznose brzine sustav ostvaruje pozitivno djelovanje pri znatno nižim iznosima horizontalne udaljenosti,  $d/L \ll 1$ .

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) na malim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 0,5$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 57). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica pri velikim brzinama

( $h/L = 0,5$  i  $\psi = 0$ ) prikazanim na slici (Slika 51). Djelovanje sustava je ne povoljno budući da je sva raspoložena energija sustava iskorištena za neovisno djelovanje letjelica pri malim horizontalnim udaljenostima ili za kompeticiju između letjelica za velike horizontalne udaljenosti.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) na srednjim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 58). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša slično kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica pri istim parametrima ( $h/L$  i  $\psi$ ) prikazanim slikom (Slika 49). Razlika se očituje u otklonu kuta vektora potiska letjelice 1 te je za ovako postavljeni sustav  $\beta_1 \rightarrow \pi/2$ , graf c). Također izjednačenje iznosa potisaka se očituje pri manjim vrijednostima horizontalnih udaljenosti.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) na velikim vertikalnim udaljenostima ( $h/L \approx 2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 59). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša slično kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica pri istim parametrima ( $h/L$  i  $\psi$ ) prikazanim slikom (Slika 50). Jedina razlika pojedine postavke parametara se očituje u iznosima potisaka. U slučaju prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ostvareni iznosi potisaka su znatno veći, graf a), a ujedno i napetosti konopaca, graf b).

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) na malim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 0,5$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 60). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica pri istim parametrima ( $h/L$  i  $\psi$ ) prikazanim na slici (Slika 51). Djelovanje sustava je ne povoljno budući da je sva raspoložena energija sustava iskorištena za neovisno djelovanje letjelica pri malim horizontalnim udaljenostima ili za kompeticiju između letjelica za velike horizontalne udaljenosti.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) na srednjim vertikalnim udaljenostima ( $h/L = 1$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 61). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša slično kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica pri istim parametrima ( $h/L$  i  $\psi$ ) prikazanim slikom (Slika 52). Jedina razlika pojedine postavke parametara se očituje

u iznosima potisaka. U slučaju prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ostvareni iznosi potisaka su znatno veći, graf a), a ujedno i napetosti konopaca, graf b).

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) na velikim vertikalnim udaljenostima ( $h/L \approx 2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 62). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa pri srednjim brzinama prikazanim slikom (Slika 59). Jedina razlika pojedine postavke parametara se očituje u iznosima potisaka. Pri većoj brzini ostvareni su veći iznosi potisaka letjelica, graf a), a ujedno i napetosti konopaca, graf b).

## 9.2 Upravljanje iznosima potisaka

Upravljanje iznosima potisaka ostvaruje se promjenama potisaka letjelica  $T_{1,2}$  u različitim režimima leta ( $\psi = 0 - \pi/2$ ) pri različitim omjerima masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ). Na svim prikazanim slikama karakterističnim za ovaj način upravljanja (Slika 63-Slika 69) graf a) prikazuje horizontalnu udaljenost između letjelica  $d/L$  u ovisnosti o iznosima potisaka  $T_{1,2}$ ; graf b) prikazuje vertikalnu udaljenost između letjelica  $h/L$  u ovisnosti o iznosima potisaka  $T_{1,2}$ . Opći oblici dozvoljenog područja djelovanja sustava za pojedini režim leta prikazani su na slikama (Slika 22.- Slika 25.) u poglavlju Detaljno modeliranje na stranici 55.

Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 63). Prijenos teškog tereta laganim letjelicama zahtjeva razvijanje velikih iznosa potisaka na pojedinoj letjelici stoga je raspon potisaka za koje promatramo sustav  $1 < T_{1,2} < 2000$ . Pravac koji definira ostvarene iznose potisaka i područje djelovanja sustava određen je jednadžbom (81). Za sve točke tog pravca letjelice imaju iste iznose potisaka, a za ovako postavljene uvjete nalaze se na istom nivou odnosno sustav se nalazi na malim vertikalnim udaljenostima  $h/L \approx 0$ , graf b). Gledano za isti iznos potisaka i horizontalna udaljenost između letjelica je u području malih udaljenosti,  $d/L \approx 0,1$ , graf a). Za malu promjenu iznosa potisaka konfiguracija sustava se skokovito mijenja, a sukladno tome vertikalna udaljenost je  $h/L \approx 1$ , dok je horizontalna udaljenost također  $d/L \approx 1$ . Razlog tome je uvjet o ne rastezljivosti konopaca koji mora biti zadovoljen. Daljnjim povećanjem iznosa potisaka vertikalna udaljenost između letjelica teži nuli ( $h/L \rightarrow 0$ ), a vertikalna udaljenost kontinuirano raste do maksimalnog iznosa ( $d/L \approx 2$ ). Suženje dozvoljenog područja nastaje

uslijed negativnih vrijednosti napetosti konopaca, a vidljivo je da oba konopca podjednako utječu, odnosno suženje gornje i donje granice je podjednako.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima ostvarivo je u području  $1 < d/L < 1,4$ . U ostalom dijelu raspona letjelice ostvaruju kompeticiju i ne nose teret.

Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 64). Prijenos teškog tereta laganim letjelicama zahtjeva razvijanje velikih iznosa potisaka na pojedinoj letjelici stoga je raspon potisaka za koje promatramo sustav  $1 < T_{1,2} < 2000$ . Ponašanje sustava za ovako postavljene parametre slično je ponašanju sustava za lebdenje s istim parametrima, Slika 63. Jedina razlika u odnosu na navedeni slučaj je proširenje povoljno područja te u ovom slučaju iznosi  $1 < d/L < 1,5$ . U ostalom dijelu raspona letjelice ostvaruju kompeticiju i ne nose teret.

Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 65). Prijenos teškog tereta laganim letjelicama zahtjeva razvijanje velikih iznosa potisaka na pojedinoj letjelici stoga je raspon potisaka za koje promatramo sustav  $1 < T_{1,2} < 2000$ . Ponašanje sustava za ovako postavljene parametre slično je ponašanju sustava za lebdenje s istim parametrima, Slika 63. Razlika u odnosu na slučaj malih brzina očituje se u suženju dozvoljenog područja uslijed negativnih vrijednosti napetosti konopaca. Konopac vezan uz letjelicu 1 više doprinosi suženju područja nego konopac vezan uz letjelicu 2. Razlika je jasno vidljiva na slici za horizontalnu udaljenost graf a).

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 66). Prijenos tereta težine identične težini letjelica zahtjeva razvijanje manjih iznosa potisaka nego u slučaju prijenosa teškog tereta stoga je raspon potisaka pojedine letjelice za koje promatramo sustav  $1 < T_{1,2} < 200$ . U početnom trenutku ostvareni iznosi potisaka slijede pravac definiran jednadžbom (81). Za sve točke tog pravca letjelice imaju iste odnose iznosa potisaka, a za ovako postavljene uvjete nalaze se na istom nivou odnosno vertikalna udaljenost između njih je nula,  $h/L \approx 0$ , graf b). Gledano za isti iznos potisaka horizontalna udaljenost između letjelica je  $d/L \approx 0,5$ , graf a). Za malu promjenu iznosa potisaka konfiguracija sustava ostvaruje se blagi prijelaz u slijedeći konfiguraciju. Vertikalna udaljenost između letjelica je  $h/L \approx 1$ , dok je horizontalna udaljenost također  $d/L \approx 1$ . Razlog tome je uvjet o ne rastezljivosti konopaca koji mora biti zadovoljen. Daljnjim povećanjem



iznosa potisaka vertikalna udaljenost između letjelica teži nuli ( $h/L \rightarrow 0$ ), a vertikalna udaljenost kontinuirano raste do maksimalnog iznosa ( $d/L \rightarrow 2$ ). Suženje dozvoljenog područja nastaje uslijed negativnih vrijednosti napetosti konopaca, a vidljivo je da oba konopca podjednako utječu, odnosno suženje gornje i donje granice je podjednako i znatno utjecajnije nego u slučaju prijenosa teških tereta.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima ostvarivo je u području  $1 < d/L < 1,4$ . U ostalom dijelu raspona letjelice ostvaruju kompeticiju i ne nose teret.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 67). Prijenos tereta težine identične težini letjelica zahtjeva razvijanje manjih iznosa potisaka nego u slučaju prijenosa teškog tereta stoga je raspon potisaka pojedine letjelice za koje promatramo sustav  $1 < T_{1,2} < 200$ . U početnom trenutku iznos horizontalne i vertikalne udaljenosti između letjelica je jednak i iznosi  $d/L$  (graf a);  $h/L \approx 0,2$  (graf b). Povećanjem iznosa potisaka vertikalna udaljenost između letjelica raste i dostiže maksimalni iznos od  $h/L \approx 1$  za male promjene potisaka. Horizontalna udaljenost slijedi trend rasta vertikalne udaljenosti i za istu promjenu potisaka iznosi  $d/L \approx 1$ . Daljnjim povećanjem iznosa potisaka horizontalna udaljenost slijed kontinuirani trend rasta i za maksimalni iznos potiska teži u svoj maksimum ( $d/L \rightarrow 2$ ). Pri istoj kontinuiranoj promjeni potisaka vertikalna udaljenost osjetno pada i teži prema nuli ( $h/L \rightarrow 0$ ). Suženje dozvoljenog područja uslijed negativnih vrijednosti napetosti konopaca je manje za konopac vezan uz letjelicu 2 u odnosu na prethodno definirane režime leta, a veći za konopac vezan uz letjelicu 1. Iz toga proizlazi činjenica da se vertikalna udaljenost pretežno očituje u negativnom rasponu. Negativni raspon vertikalne udaljenosti označava da se letjelica 1 nalazi na većoj visini u odnosu na letjelicu 2 budući da je prema slici (Slika 16) pozitivan smjer vertikalne udaljenosti orijentiran od letjelice 2 prema letjelici 1.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima je nestabilan i teško ostvariv zbog skokovitih promjena vertikalne udaljenosti, a ujedno letjelice u većem dijelu područja ostvaruju kompeticiju.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) sustav ne ostvaruje pozitivno djelovanje, odnosno u bilo kojem rasponu potisaka jedna od napetosti konopaca je negativna. Sukladno tome ne postoje rješenja za tako postavljeni sustav.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 68). Prijenos relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa zahtjeva razvijanje manjih iznosa potisaka nego u slučaju prijenosa teškog tereta stoga je raspon potisaka pojedine letjelice za koje promatramo sustav  $1 < T_{1,2} < 200$ . Pozitivno djelovanje sustava očituje se pri malim iznosima vertikalnih udaljenosti,  $h/L \approx 0$ , graf b). Gledano za isti raspon potisaka horizontalna udaljenost između letjelica je  $d/L \approx 0,5$  graf a). Za malu promjenu iznosa potisaka konfiguracija sustava ostvaruje se blagi prijelaz u slijedeći konfiguraciju. Vertikalna udaljenost između letjelica je  $h/L \approx 1$ , dok je horizontalna udaljenost također  $d/L \approx 1$ . Razlog tome je uvjet o ne rastezljivosti konopaca koji mora biti zadovoljen. Daljnjim povećanjem iznosa potisaka vertikalna udaljenost između letjelica teži nuli ( $h/L \rightarrow 0$ ), a vertikalna udaljenost kontinuirano raste do maksimalnog iznosa ( $d/L \rightarrow 2$ ). Suženje dozvoljenog područja nastaje uslijed negativnih vrijednosti napetosti konopaca, a vidljivo je da oba konopca podjednako utječu, odnosno suženje gornje i donje granice je podjednako i znatno utjecajnije nego u slučaju prijenosa tereta mase jednake masi letjelica.

Gledano iz aspekta razvijenih snaga odnosno potrošene energije upravljanje sustavom s ovako postavljenim parametrima ostvarivo je u području  $1 < d/L < 1,4$ . U ostalom dijelu raspona letjelice ostvaruju kompeticiju i ne nose teret.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 69). Prijenos jako laganog tereta letjelicama identičnih masa zahtjeva razvijanje manjih iznosa potisaka nego u slučaju prijenosa teškog tereta stoga je raspon potisaka pojedine letjelice za koje promatramo sustav  $1 < T_{1,2} < 200$ . Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica pri istim brzinama, Slika 67.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) sustav ne ostvaruje pozitivno djelovanje, odnosno u bilo kojem rasponu potisaka jedna od napetosti konopaca je negativna. Sukladno tome ne postoje rješenja za tako postavljeni sustav.

### 9.3 Upravljanje kutovima otklona potisaka

Upravljanje kutovima otklona potisaka ostvaruje se promjenama kutova  $\beta_{1,2}$  u različitim režimima leta ( $\psi = 0 - \pi/2$ ) pri različitim omjerima masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ). Na svim prikazanim slikama karakterističnim za ovaj način upravljanja (Slika 70 - Slika 78) graf a) prikazuje horizontalnu udaljenost između letjelica  $d/L$  u ovisnosti o kutovima  $\beta_{1,2}$ ; graf b) prikazuje vertikalnu udaljenost između letjelica  $h/L$  u ovisnosti o kutovima  $\beta_{1,2}$ ; graf c) prikazuje iznose potisaka  $T_1$  o kutovima  $\beta_{1,2}$ ; graf d) prikazuje iznose potisaka  $T_2$  o kutovima  $\beta_{1,2}$ . Rasponi kutova su  $0 < \beta_1 < \pi$  i  $-\pi < \beta_2 < \pi/2$ . Opći oblici dozvoljenog područja djelovanja sustava za pojedini režim leta prikazani su na slikama (Slika 27 - Slika 30) u poglavlju *Detaljno modeliranje* na stranici 62.

Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 70). Duž cijelog raspona dozvoljenog područja kut  $\beta_2$  je u negativnom dijelu što označava da je vektor potiska letjelice 2 otklonjen u lijevu stranu u odnosu na vertikalnu os. Za male iznose kutova,  $\beta_{1,2} \approx 0$ , horizontalna udaljenost između letjelica je mala,  $d/L \approx 0,1$ , graf a). Ujedno je i vertikalna udaljenost između letjelica  $h/L \approx 0$ , graf b). Za tako postavljene parametre sustava letjelica 1 graf c) razvija znatno manji potisak nego letjelica 2 graf d). Pri konstantnom iznosu kuta  $\beta_1$ ,  $\beta_1 \approx 0$ , a povećanjem po apsolutnom iznosu kuta  $\beta_2$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se povećava do kuta  $\beta_2 \approx \pi/2$ , a potom smanjuje,  $d/L \approx 0,1$ . Za istu promjenu kutova vertikalna udaljenost,  $h/L$ , po apsolutnom iznosu, se povećava. Negativni predznak označava da se letjelica 1 nalazi iznad letjelice 2. Ujedno potisak letjelice 1 divergira, a potisak letjelice 2 je konstantan. Pri konstantnom iznosu kuta  $\beta_2$ ,  $\beta_2 \approx 0$ , a povećanjem kuta  $\beta_1$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se mijenja kao i za prethodnu kombinaciju kutova. Za istu promjenu kutova vertikalna udaljenost,  $h/L$ , se povećava do maksimalnog iznosa,  $h/L \approx 2$ . Ujedno potisak letjelice 1 je konstantan, a potisak letjelice 2 divergira. Povećanjem iznosa kutova  $\beta_{1,2}$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se povećava i dostiže maksimum. Ujedno vertikalna udaljenost dostiže minimum,  $h/L \approx 0$ . Potisci obiju letjelica divergiraju.

Razvijena snaga, odnosno utrošena energija, najpovoljnija je u području srednjih udaljenosti između letjelica budući da letjelice u tom području ostvaruju kooperativno prenošenje tereta.

Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 71). Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava

prikazano je slikom (Slika 72). U oba navedena slučaja sustav se ponaša isto kao i u slučaju malih brzina.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 73). Duž cijelog raspona dozvoljenog područja kut  $\beta_2$  je u negativnom dijelu što označava da je vektor potiska letjelice 2 otklonjen u lijevu stranu u odnosu na vertikalnu os. Za male iznose kutova,  $\beta_{1,2} \approx 0$ , horizontalna udaljenost između letjelica je  $d/L \approx 1$ , graf a). Ujedno je i vertikalna udaljenost između letjelica  $h/L \approx 1$ , graf b). Za tako postavljene parametre sustava letjelica 1 graf c) razvija znatno manji potisak nego letjelica 2 graf d). Pri konstantnom iznosu kuta  $\beta_1$ ,  $\beta_1 \approx 0$ , a povećanjem po apsolutnom iznosu kuta  $\beta_2$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se smanjuje  $d/L \approx 0,1$ . Za istu promjenu kutova vertikalna udaljenost,  $h/L$ , po apsolutnom iznosu, se povećava. Negativni predznak označava da se letjelica 1 nalazi iznad letjelice 2. Potisak letjelice 1 raste, a potisak letjelice 2 se smanjuje te poprima konstantan iznos. Pri konstantnom iznosu kuta  $\beta_2$ ,  $\beta_2 \approx 0$ , a povećanjem kuta  $\beta_1$  udaljenosti između letjelica,  $d/L$  i  $h/L$ , identične su prethodnoj kombinaciji kutova. Ujedno potisak letjelice 1 je konstantan, a potisak letjelice 2 divergira. Povećanjem iznosa kutova  $\beta_{1,2}$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se povećava i dostiže maksimum. Ujedno vertikalna udaljenost dostiže minimum,  $h/L \approx 0$ . Potisci obiju letjelica divergiraju.

Razvijena snaga, odnosno utrošena energija, najpovoljnija je u području srednjih udaljenosti između letjelica budući da letjelice u tom području ostvaruju kooperativno prenošenje tereta.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 74). Duž cijelog raspona dozvoljenog područja kut  $\beta_2$  je u negativnom dijelu što označava da je vektor potiska letjelice 2 otklonjen u lijevu stranu u odnosu na vertikalnu os. Za ovako postavljene parametre sustava sustav ostvaruje pozitivno djelovanje za iznose kutova  $\beta_1 \approx 0,8$  i  $\beta_2 \approx 0$ . Pri tome horizontalna udaljenost između letjelica je  $d/L \approx 1$ , graf a). Ujedno je i vertikalna udaljenost između letjelica  $h/L \approx -1,5$ , graf b). Negativni predznak označava da se letjelica 1 nalazi iznad letjelice 2. Za tako postavljene parametre sustava letjelica 1 graf c) razvija znatno manji potisak nego letjelica 2 graf d). Pri konstantnom iznosu kuta  $\beta_1$ ,  $\beta_1 \approx 0,8$ , a povećanjem po apsolutnom iznosu kuta  $\beta_2$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se povećava. Za istu promjenu kutova vertikalna udaljenost,  $h/L$ , je konstantna. Potisak letjelice 1 se smanjuje te poprima konstantan iznos, a potisak letjelice 2 se smanjuje te poprima konstantan iznos. Pri konstantnom iznosu kuta  $\beta_2$ ,  $\beta_2 \approx 0$ , a povećanjem kuta  $\beta_1$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , najprije raste a potom za više iznose kuta  $\beta_1$  pada do minimuma. Vertikalna udaljenost,  $h/L$ , raste do maksimalne vrijednosti. Potisak letjelice 1

raste, a potisak letjelice 2 raste. Povećanjem iznosa kutova  $\beta_{1,2}$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se povećava i dostiže maksimum. Ujedno vertikalna udaljenost dostiže minimum,  $h/L \approx 0$ . Potisci obiju letjelica divergiraju.

Razvijena snaga, odnosno utrošena energija, najpovoljnija je u području srednjih udaljenosti između letjelica budući da letjelice u tom području ostvaruju kooperativno prenošenje tereta.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 75). Duž cijelog raspona dozvoljenog područja kut  $\beta_2$  je u negativnom dijelu što označava da je vektor potiska letjelice 2 otklonjen u lijevu stranu u odnosu na vertikalnu os. Za ovako postavljene parametre sustava sustav ostvaruje pozitivno djelovanje za iznose kutova  $\beta_1 \approx 1,5$  i  $\beta_2 \approx 0$ . Pri tome horizontalna udaljenost između letjelica je  $d/L \approx 1,3$ , graf a). Ujedno je i vertikalna udaljenost između letjelica  $h/L \approx 1$ , graf b). Za tako postavljene parametre sustava letjelica 1 graf c) razvija veći potisak nego letjelica 2 graf d). Pri konstantnom iznosu kuta  $\beta_1$ ,  $\beta_1 \approx 1,5$ , a povećanjem po apsolutnom iznosu kuta  $\beta_2$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se povećava i dostiže maksimalnu vrijednost. Za istu promjenu kutova vertikalna udaljenost,  $h/L$ , se smanjuje. Potisak letjelice 1 se povećava te poprima konstantan iznos, a potisak letjelice 2 se smanjuje te poprima konstantan iznos. Pri konstantnom iznosu kuta  $\beta_2$ ,  $\beta_2 \approx 0$ , a povećanjem kuta  $\beta_1$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se smanjuje i dostiže minimalni iznos. Vertikalna udaljenost,  $h/L$ , raste i dostiže maksimalan iznos. Potisak letjelice 1 se smanjuje te poprima konstantan iznos, a potisak letjelice 2 se povećava te poprima konstantan iznos. Povećanjem iznosa kutova  $\beta_{1,2}$  horizontalna udaljenost,  $d/L$ , se povećava i dostiže maksimum. Ujedno vertikalna udaljenost dostiže minimum,  $h/L \approx 0$ . Potisci obiju letjelica divergiraju.

Razvijena snaga, odnosno utrošena energija, najpovoljnija je u području srednjih udaljenosti između letjelica budući da letjelice u tom području ostvaruju kooperativno prenošenje tereta.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 76). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica pri istim brzinama, Slika 73.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 77). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica pri istim brzinama, Slika 74.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 78). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica pri istim brzinama, Slika 75.

## 9.4 Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 1

Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 1 ostvaruje se promjenama potiska letjelice  $T_1$  i otklona kuta  $\beta_1$  u različitim režimima leta ( $\psi = 0 - \pi/2$ ) pri različitim omjerima masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ). Na svim prikazanim slikama karakterističnim za ovaj način upravljanja (Slika 79-Slika 87) graf a) prikazuje horizontalnu udaljenost između letjelica  $d/L$  u ovisnosti o vektoru potiska letjelice 1; graf b) prikazuje vertikalnu udaljenost između letjelica  $h/L$  u ovisnosti o vektoru potiska letjelice 1; graf c) prikazuje iznose vektora potiska letjelice 2,  $T_2$ , u ovisnosti o vektoru potiska letjelice 1; graf d) prikazuje kut otklona od vertikalne osi za vektor potiska  $\beta_2$  u ovisnosti o vektoru potiska letjelice 1. Rasponi karakterističnih veličina za letjelicu 1 su  $1 < T_1 < 200$  i  $0 < \beta_1 < \pi$ .

Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 79). Za male iznose potiska letjelice 1 i pripadne male kutove  $\beta_1$  sustav ostvaruje malu horizontalnu udaljenost,  $d/L \approx 0,1$ , graf a). Za istu kombinaciju parametara letjelice 1 vertikalna udaljenost između letjelica je maksimalna,  $h/L \approx 2$ , graf b). Prema tome letjelica 2 se nalazi iznad letjelice 1 pri njihovoj maksimalnoj udaljenosti. Iznos ostvarenog potiska letjelice 2 odgovara ukupnom potisku potrebnom za prenošenje tereta,  $T_2 \approx G_0$ , graf c). Kut otklona od vertikalne osi za vektor potiska  $\beta_2$  je jednak nuli, odnosno vektor potiska nije otklonjen u odnosu na vertikalnu os, graf d). Pri konstantnom malom iznosu potiska  $T_1$  i povećanju kuta  $\beta_1$  svi parametri sustava,  $d/L$ ;  $h/L$ ;  $T_2$ ;  $\beta_2$ , su konstantni. Povećanjem iznosa potiska  $T_1$  i kuta  $\beta_1$  horizontalna udaljenost između letjelica se povećava, a vertikalna udaljenost se smanjuje u cijelom dozvoljenom području. Pri velikim iznosima potiska  $T_1$  i kuta  $\beta_1$  potisak letjelice 2,  $T_2$ , odgovara ukupnom potisku potrebnom za prenošenje tereta,  $T_2 \approx G_0$ . Pripadni kut  $\beta_2$  je negativan, odnosno otklonjen u lijevu stranu u odnosu na vertikalnu os. Smanjenjem kuta  $\beta_1$  pri velikim iznosima potiska  $T_1$  letjelica 2 razvija manje potiska, a pripadni kut  $\beta_2$  se, gledano po apsolutnom iznosu, smanjuje. Utjecaj napetosti konopaca u cijelom rasponu nije vidljiv.

Razvijena snaga, odnosno utrošena energija, najpovoljnija je u području srednjih udaljenosti između letjelica budući da letjelice u tom području ostvaruju kooperativno prenošenje tereta.

Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 80). Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 81). U oba navedena slučaja sustav se ponaša isto kao i u slučaju malih brzina, stoga kooperativno nošenje relativno teškog tereta, za upravljanje vektorom potiska letjelice 1, se ostvaruje u području srednjih, horizontalnih i vertikalnih, udaljenosti.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 82). Za male iznose potiska letjelice 1 i pripadne male kutove  $\beta_1$  sustav ostvaruje malu horizontalnu udaljenost,  $d/L \approx 0,1$ , graf a). Za istu kombinaciju parametara letjelice 1 vertikalna udaljenost između letjelica je maksimalna,  $h/L \approx 2$ , graf b). Prema tome letjelica 2 se nalazi iznad letjelice 1 pri njihovoj maksimalnoj udaljenosti. Iznos ostvarenog potiska letjelice 2 odgovara ukupnom potisku potrebnom za prenošenje tereta,  $T_2 \approx G_0$ , graf c). Kut odklona od vertikalne osi za vektor potiska  $\beta_2$  je jednak nuli, odnosno vektor potiska nije otklonjen u odnosu na vertikalnu os, graf d). Pri konstantnom malom iznosu potiska  $T_1$  i povećanju kuta  $\beta_1$  svi parametri sustava,  $d/L$ ;  $h/L$ ;  $T_2$ ;  $\beta_2$ , su konstantni. Povećanjem iznosa potiska  $T_1$  za cijeli raspon kuta  $\beta_1$  do izražaja dolazi utjecaj napetosti konopaca  $N_{1,2}$ , vidljiv kroz drastično suženje dozvoljenog područja u odnosu na slučaj prijenosa relativno teškog tereta laganim letjelicama, slika (44). Povećanjem iznosa potiska  $T_1$  i kuta  $\beta_1$  horizontalna udaljenost između letjelica se povećava,  $d/L \approx 2$ , a vertikalna udaljenost se smanjuje  $h/L \approx 0$ . Iznos ostvarenog potiska letjelice 2,  $T_2$ , divergira. Pripadni prikloni kut  $\beta_2$ , po apsolutnoj vrijednosti, se povećava ( $\beta_2 \rightarrow \pi/2$ ).

Za cijeli raspon potiska  $T_1$  i kuta  $\beta_1$  razvijena snaga, odnosno utrošena energija, je nepovoljno iskorištena jer letjelice ne ostvaruju kooperativno nošenje tereta.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 83). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica za lebdenje, slika (Slika 82).

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 84). Za male iznose potiska letjelice 1 i pripadne male kutove  $\beta_1$  sustav ostvaruje velike horizontalne udaljenosti s negativnim

predznakom,  $d/L \approx -1$ , graf a). Pri tome je vertikalna udaljenost pozitivna,  $h/L \approx 1$ , graf b). Prema tome slijedi da se letjelica 1, gledano po horizontali, nalazi iza letjelice 2, a letjelica 2 je iznad letjelice 1. Iznos ostvarenog potiska letjelice 2 odgovara ukupnom potisku potrebnom za prenošenje tereta,  $T_2 \approx G_0$ , graf c). Kut odklona od vertikalne osi za vektor potiska  $\beta_2$  je jednak nuli, odnosno vektor potiska nije otklonjen u odnosu na vertikalnu os, graf d). Povećanjem iznosa potiska  $T_1$  i kuta  $\beta_1$  horizontalna udaljenost između letjelica prelazi u pozitivni raspon i teži prema maksimalnim udaljenostima,  $d/L \rightarrow 2$ . Ujedno vertikalna udaljenost se smanjuje,  $h/L \rightarrow 0$ . Potisak letjelice 2 se smanjuje te obje letjelice sudjeluju u prenošenju tereta. Povećanjem iznosa potiska  $T_1$  i smanjenjem kuta  $\beta_1$  horizontalna udaljenost između letjelica se smanjuje, a vertikalna gledano po apsolutnom iznosu povećava. Iz ovoga vidimo da se, za ovako postavljene parametre letjelica 1, gledano po vertikali, nalazi iznad letjelice 2. Za tako postavljene parametre sustava letjelice dolaze u područje kompeticije ta počinju nepovoljno utjecati jedna na drugu. Prekid dozvoljenog područja nastaje uslijed negativnih iznosa napetosti konopaca.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 85). Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 86). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica za lebdenje, Slika 82.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 87). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša isto kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica za lebdenje, Slika 84.

## 9.5 Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 2

Upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 2 ostvaruje se promjenama potiska letjelice  $T_2$  i odklona kuta  $\beta_2$  u različitim režimima leta ( $\psi = 0 - \pi/2$ ) pri različitim omjerima masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ). Na svim prikazanim slikama karakterističnim za ovaj način upravljanja (Slika 88-Slika 96) graf a) prikazuje horizontalnu udaljenost između letjelica  $d/L$  u ovisnosti o vektoru potiska letjelice 2; graf b) prikazuje vertikalnu udaljenost između letjelica  $h/L$  u ovisnosti o vektoru potiska letjelice 2; graf c) prikazuje iznose vektora potiska letjelice 1,



$T_1$ , u ovisnosti o vektoru potiska letjelice 2; graf d) prikazuje kut otklona od vertikalne osi za vektor potiska  $\beta_1$  u ovisnosti o vektoru potiska letjelice 2. Rasponi karakterističnih veličina za letjelicu 2 su  $1 < T_2 < 200$  i  $-\pi < \beta_2 < \pi/2$ .

Upravljanje sustavom vektorom potiska letjelice 2 simetrično je upravljanju sustavom vektorom potiska letjelice 1. Iz tog razloga ovdje neće biti naveden detaljni opisi karakterističnih slučajeva prijenosa tereta budući da su identični slučajevi detaljno opisani prethodnim načinom upravljanja.

## 9.6 Energetska učinkovitost sustava

Energetska učinkovitost sustava ostvaruje se promjenama generirane snage sustava uslijed povremenih zapuha vjetra. Pretpostavljeni odgovor sustava na promjene okoline očituje se promjenom geometrijskog parametra definiranog u smjeru vanjske promjene u različitim režimima leta ( $\psi = 0 - \pi/2$ ) pri različitim omjerima masa letjelica i tereta ( $m_{1,2}/m_0$ ). Na svim slikama (Slika 97 - Slika 105) karakterističnim za pretpostavljene parametre sustava graf a) prikazuje horizontalnu komponentu statičke osjetljivosti sustava u ovisnosti o konfiguraciji; graf b) prikazuje vertikalnu komponentu statičke osjetljivosti sustava u ovisnosti o konfiguraciji; graf c) prikazuje ukupnu statičku osjetljivosti sustava u ovisnosti o konfiguraciji; graf d) prikazuje normiranu ukupnu statičku osjetljivosti sustava u ovisnosti o konfiguraciji.

Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 97). Ukupna osjetljivost sustava, graf c), zbroj je komponenti osjetljivosti, graf a) i graf b). Za male iznose horizontalne,  $d/L \approx 0$ , i vertikalne,  $h/L \approx 20$ , udaljenosti generirana snaga sustava divergira. Razlog tome je neovisno nošenje tereta pojedinom letjelicom. Za velike iznose geometrijske udaljenosti,  $d/L \approx 2$  i  $h/L \approx 2$ , generirana snaga sustava također divergira uslijed relativno velikih iznosa generiranih potisaka pojedine letjelice. Razlog tome je kompeticija između letjelica, odnosno suprotstavljeno djelovanje između letjelica uslijed kojega najveći dio potiska letjelice nije razvijen zbog držanja tereta. U središnjem dijelu raspona geometrije,  $d/L \approx 1$  i  $h/L \approx 1$ , dolazi do generiranja minimalne osjetljivosti sustava koja se očituje pojavom tzv. sedla odnosno polegnutijeg dijela krivulje. Razlog tome je relativno mala promjena generirane snage sustava. U tom području letjelice ostvaruju kooperativno nošenje tereta.

Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 98). Za prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama ( $m_{1,2}/m_0 = 0,01$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 99). Za ovako postavljene konfiguracije sustava sustav se ponaša kao i u slučaju lebdenja pri istom omjeru masa. Razlika se očituje u iznosu generiranih snaga te je ona najmanja u slučaju srednjih brzina. Ujedno i širina sedla je najveća za srednje brzine, odnosno najšire je područje primjene sustava.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 100). Ponašanje sustava identično je kao i u slučaju prijenosa relativno teškog tereta laganim letjelicama za isti iznos brzine,  $\psi = \pi/2$ . Razlika se očituje u manjim iznosima generirane snage sustava.

Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 101). Za slučaj prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica ( $m_{1,2}/m_0 = 1$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 102). Za ovako postavljene konfiguracije sustava sustav se ponaša kao i u slučaju lebdenja pri istom omjeru masa. Razlika se očituje u iznosu generiranih snaga te je ona najmanja u slučaju srednjih brzina. Ujedno povećanjem brzine širi dio sedla ostvaruje se u širem području vertikalnih udaljenosti.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) za lebdenje ( $\psi = \pi/2$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 103). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica za isti iznos brzine.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri srednjim brzinama ( $\psi = \pi/4$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 104). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica za isti iznos brzine.

Za slučaj prijenosa relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa ( $m_{1,2}/m_0 = 100$ ) pri velikim brzinama ( $\psi = 0$ ) ponašanje sustava prikazano je slikom (Slika 105). Za ovako postavljene parametre sustava sustav se ponaša kao i u slučaju prijenosa tereta mase usporedive s masom letjelica za isti iznos brzine.

## 10 Zaključak

Korištenje sustava autonomnih agenata obuhvaća brojne primjene u nizu djelatnosti u kojima se nastoji izbjeći prisustvo ljudi. Djelatnosti koje autonomni agenti obavljaju čine aktivnosti koje se smatra opasnim po ljude, iscrpljujućim ili dosadnim. Primjeri primjene autonomnih agenata su transport robe i ljudi između više lokacija, beskontaktna i nerazorna pretraga područja, praćenje prirodnih pojava, podvodna istraživanja, kontrola prometa, implementacija komunikacijskih mreža u nepovoljnim okruženjima i drugo.

Temelj simulacijskog modela ovog istraživanja su, kritičkom analizom znanstvene i stručne literature, dosadašnjim preliminarnim istraživanjima i iskustvom na području istraživanja, izdvojene dinamičke karakteristike sustava autonomnih agenata. Te karakteristike su primijenjene za definiranje skupa minimalnog broja dinamičkih karakteristika sustava autonomnih agenata dovoljnih za jednoznačni opis dinamike pojedinog autonomnog agenta, relacija među autonomnim agentima unutar sustava i dinamike okoline parametrizirane složenosti.

Analizom dostupnih vrsta agenata i sveobuhvatnih potreba u načinu korištenja sustava agenata fokus ovog rada postavljen je na prijenos tereta sustavom bespilotnih letjelica. Problem je analiziran za sustav dvije bespilotne letjelice koje prenose ovješeni teret. Teret je za letjelice pričvršćen s dva nerastezljiva konopca i učvršćen u težištu pojedine letjelice. Sustav je analiziran u nekarakteriziranoj okolini.

Simulacijski model je postavljen kroz tri razine modeliranja: konceptualno, preliminarno i detaljno modeliranje. Analitički i numerički su riješeni i opsežno analizirani izdvojeni specifični modeli prijenosa tereta. Analiza sustava provedena je za različite slučajeve prijenosa i to prijenos relativno teškog tereta laganim letjelicama; prijenos tereta mase usporedive s masom letjelica i prijenos relativno laganog tereta letjelicama identičnih masa. Načini upravljanja za koje je sustav promatran su upravljanje konfiguracijom; upravljanje iznosima potisaka; upravljanje kutovima otklona potisaka; upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 1 i upravljanje vektorom potiska bespilotne letjelice 2. Svi navedeni slučajevi promatrani su za različite operativne režime rada sustava, odnosno za različite režime leta. Podudaranje rješenja analitičkog i numeričkog modela omogućilo je potvrđivanje hipoteze H1.

U drugom dijelu istraživanja postavljena je i validirana metoda za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava autonomnih agenata. Prvo su izdvojeni svi potrebni i dovoljni parametri za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava autonomnih agenata na temelju rezultata dinamike sustava postavljenog prethodnim razinama modeliranja. Uzimajući u obzir izdvojene parametre razmotren je veći broj kvalitativno različitih djelovanja sustava autonomnih agenata. Sukladno tome, analiziran je utjecaj parametara i njihova važnost na ostvarivanje djelovanja za sustave. Odnosno, postavljena je funkcionalna ovisnost rubnih uvjeta o tim parametrima. Nakon definiranih i izvrijednjenih specifičnosti parametara i ostvarenih djelovanja provedena je analiza dinamike sustava autonomnih agenata u cilju postavljanja opće metode za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava autonomnih agenata. Metoda za procjenu robusnosti i sposobnosti sustava autonomnih agenata postavljena je od prvih principa. Postavljena metoda primijenjena je na numerički model postavljenog sustava bespilotnih letjelica koje prenose teret. Slaganje rješenja numeričkog modela i rješenja dobivenih primjenom opće metode omogućilo je potvrđivanje hipoteze H2.

Potvrđivanje specifičnih hipoteza H1 i H2 dovodi do potvrđivanja opće hipoteze rada, H0, a ujedno potvrđuje ispunjenje očekivanog znanstvenog doprinosa.

## 11 Literatura

- [1] J. S. Model Reference Adaptive Control. In: JBT S, editor. Encyclopedia of Systems and Control. London: Springer; 2015. p. 729–33.
- [2] V. S. Interactive Environments and Software Tools for CACSD. In: JBT S, editor. Encyclopedia of Systems and Control. London: Springer; 2015.
- [3] D. H. Optimization Based Robust Control. In: Baillieul JS T, editor. Encyclopedia of Systems and Control. London: Springer; 2015.
- [4] Dorigo M, Montes de Oca M, Oliveira S ST. Ant Colony Optimization. In New York: John Wiley & Sons; 2011.
- [5] Stützle. Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence. In Berlin: Springer Verlag; 2006.
- [6] Colomi A, Dorigo M M V. Distributed optimization by ant colonies. In: Proceedings of the first European conference on artificial life. Paris; 1991.
- [7] Liao T, Stützle T, Montes de Oca MA DM. A unified ant colony optimization algorithm for continuous optimization. Eur J Oper Res. 2014;234(3):597–609.
- [8] Brambilla M, Brutschy A, Dorigo M BM. Property-Driven Design for Robot Swarms: A Design Method Based on Prescriptive Modeling and Model Checking. ACM Trans Auton Adapt Syst. 2014;9(4).
- [9] Valentini G, Hamann H DM. Self-Organized Collective Decision-Making in a 100-Robot Swarm. In: Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2015.
- [10] Dorigo M et al. Swarmanoid: A Novel Concept for the Study of Heterogeneous Robotic Swarms. Robot Autom Mag. 2013;20(4).
- [11] MJ M. Minimizing complexity in controlling a mobile robot population. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1992.
- [12] Mataric MJ, Nilsson M SK. Cooperative multi-robot box-pushing. In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 1995.
- [13] Mathew N, Smith SL WS. Planning Paths for Package Delivery in Heterogeneous

- Multirobot Teams. *IEEE Trans Autom Sci Eng.* 2015;12(4).
- [14] Medić S, Kondić Ž RB. Validation of the realised measurement uncertainty in process of precise line scales calibration. *Teh Vjesn / Tech Gezzette.* 2012;19(2).
- [15] Hui P, Meng-lan H, Zhi-zhong L WX. Simulation analysis of cooperative target search strategies for multiple UAVs. In: 27th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). 2015.
- [16] Ducho F et al. Simulation analysis of cooperative target search strategies for multiple UAVs. In: 2016 IEEE 14th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI). 2016.
- [17] Runje B, Markučič D SJ. Assessment of Uncertainty in Modelled Ultrasonic Thickness Measurements. *Mater Test.* 2015;53(4).
- [18] Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. 2008.
- [19] Capitan J, Merino L OA. Cooperative Decision-Making Under Uncertainties for Multi-Target Surveillance with Multiples UAVs. *J Intell Robot Syst.* 2015;1–16.
- [20] Ducatelle F et al. Cooperative navigation in robotic swarms. *Swarm Intell.* 2014;8(1):1–33.
- [21] Korner F, Speck R, Goktogan AH SS. Autonomous airborne wildlife tracking using radio signal strength. In: International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2010.
- [22] Cubber GD, Balta H, Doroftei D BY. UAS deployment and data processing during the Balkans flooding. In: IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. 2014.
- [23] Sun B, Zhu D YS. Real-time hybrid design of tracking control and obstacle avoidance for underactuated underwater vehicles. *J Intell Fuzzy Syst.* 2015;
- [24] Stepanić J, Sabol G, Žebec MS. Describing social systems using social free energy and social entropy. *Kybernetes.* 2005;
- [25] I. M. Socio-thermodynamics -integration and segregation in a population. *Contin Mech Thermodyn.* 2002;14:384–404.
- [26] No Title [Internet]. Available from:

- <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=30962>
- [27] Herman TR. *Adaptivity Through Distributed Convergence*. University of Texas at Austin; 1992.
- [28] Di Paolo EA. Autopoiesis, Adaptivity, Teleology, Agency. *Phenomenol Cogn Sci* [Internet]. 2005;4(4):429–52. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11097-005-9002-y>
- [29] No Title [Internet]. Available from: <https://coronarenderer.freshdesk.com/support/home>
- [30] Jensen M. Improving robustness and flexibility of tardiness and total flowtime job shops using robustness measures. *J Appl Soft Comput*. 2001;1(1):35–52.
- [31] Gribble SD. Robustness in complex systems. In: *8th Workshop on Hot Topics in Operating Systems (HotOS-VIII)*. 2001. p. 21–6.
- [32] Doyle JMC and J. Complexity and robustness. In: *Proceedings of National Academy of Science (PNAS)*. 2002. p. 2538–2545.
- [33] Jen E. Stable or robust? What's the difference? *Complexity*. 2003;8:12–8.
- [34] H K. Biological robustness. *Nat Rev Genet*. 2004;5:826–37.
- [35] Doyle FJ, Doyle J, Stelling J, Sauer U, Szallasi Z, Doyle III FJ DJ. Robustness of cellular functions. *Cell*. 2004;118:675–85.
- [36] Bieke Dejaegher YVH. Ruggedness and robustness testing. *J Chromatogr A*. 2007;1158(1–2):138–57.
- [37] No Title [Internet]. Available from: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=70276>
- [38] No Title [Internet]. Available from: [http://aaz.hr/pojmovnik#letter\\_v](http://aaz.hr/pojmovnik#letter_v)
- [39] Huhns, M., Singh MP. *Readings in Agents*. San Mateo; 1998.
- [40] Bond, A. H., Gasser L. *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Los Altos; 1988.
- [41] Chaib-Draa B, Moulin B, Mandiau R, Millot P, Chaib-draa, B., Moulin, B., Mandiau, R. and Millot P. Trends in distributed artificial intelligence. *Artif Intell Rev*. 1992;6:35–66.
- [42] W.R. A. *An Introduction to Cybernetics*. Wiley; 1956.
- [43] N. W. *Cybernetics; Or, Control and Communication in the Animal and the Machine*. 2nd ed. MIT Press; 1961.

- [44] McClelland HA, Rumelhart DE. Parallel distributed processing. 1986.
- [45] Gasser L. HMN. Distributed Artificial Intelligence. 1989;2.
- [46] Wolfram S. Cellular automata and complexity: Collected papers. Computers & Mathematics with Applications. 2003.
- [47] Margolus N, Toffoli T. Cellular Automata Machines. Complex Syst. 1987;
- [48] Gutowitz H. Gutowitz, Howard, ed. Cellular automata: theory and experiment. Gutowitz H, editor. MIT press; 1991.
- [49] Holland JH. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. Adaptation in Natural and Artificial Systems. 1992.
- [50] Koza J. Genetic programming: on the programming of computers by natural selection. Cambridge,MA:MITPress. 1992;
- [51] Koza JR. Genetic Programming II: Automatic Discovery of Reusable Programs. MIT Press; 1994.
- [52] Langton CG. Artificial Life. Artificial Life. 1989.
- [53] Langton CG, Farmer D, Rasmussen S, Taylor C. Artificial Life II. Sante Fe Institute Series. 1992.
- [54] Langton CG. Artificial Life III: Proceedings of the Workshop on Artificial Life. Reading, Mass: Addison-Wesley; 1994.
- [55] Brooks RA, Maes P. Artificial life IV. In: Fourth International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems. 1994.
- [56] Crist TO, Haefner JW. Spatial model of movement and foraging in harvester ants (*Pogonomyrmex*) (II): The roles of environment and seed dispersion. *J Theor Biol.* 1994;
- [57] Haefner JW, Crist TO. Spatial model of movement and foraging in harvester ants (*pogonomyrmex*) (I): The roles of memory and communication. *J Theor Biol.* 1994;
- [58] Epstein, Joshua M. and RA. Growing artificial societies: social science from the bottom up. Brookings Institution Press; 1996.
- [59] No Title [Internet]. Available from: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=67443>



- [60] No Title [Internet]. Available from: <https://www.hrleksikon.info/definicija/lebdeca-vozila.html>
- [61] Magister T. The Problem of Mini-Unmanned Aerial Vehicle Non-segregated Flight Operation. *PROMET - Traffic&Transportation*. 2007;19(6):381–6.
- [62] Cos, C. D., Acosta, J., & Ollero A, De Cos CR, Acosta JA, Ollero A. Relative-pose optimisation for robust and nonlinear control of unmanned aerial manipulators. In: *International Conference on Unmanned Aircraft Systems*. 2017.

## PRILOG

**Prilog 1.** Tablični prikaz ovisnih veličina sustava za kontrolni parametar  $h/L$  (nastavak na stranicama 198-199).

Kontrolni parametar	$m_{1,2}/m_0$	$\psi$	Iznos kontrolnog parametra	Ovisna veličina	oznaka
$h/L$	0,01	$\pi/2$	0,1	$T_{1,2}$	Slika 36 a)
				$N_{1,2}$	Slika 36 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 36 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 36 d)
			1	$T_{1,2}$	Slika 37 a)
				$N_{1,2}$	Slika 37 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 37 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 37 d)
			2	$T_{1,2}$	Slika 38 a)
				$N_{1,2}$	Slika 38 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 38 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 38 d)
		$\pi/4$	0,1	$T_{1,2}$	Slika 39 a)
				$N_{1,2}$	Slika 38 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 39 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 39 d)
			1	$T_{1,2}$	Slika 40 a)
				$N_{1,2}$	Slika 40 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 40 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 40 d)
			2	$T_{1,2}$	Slika 41 a)
				$N_{1,2}$	Slika 41 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 41 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 41 d)
0	0,1	$T_{1,2}$	Slika 42 a)		
		$N_{1,2}$	Slika 42 b)		
		$\alpha_{1,2}$	Slika 42 c)		
		$\beta_{1,2}$	Slika 42 d)		
	1	$T_{1,2}$	Slika 43 a)		
		$N_{1,2}$	Slika 43 b)		
		$\alpha_{1,2}$	Slika 43 c)		
		$\beta_{1,2}$	Slika 43 d)		
	2	$T_{1,2}$	Slika 44 a)		
		$N_{1,2}$	Slika 44 b)		
		$\alpha_{1,2}$	Slika 44 c)		
		$\beta_{1,2}$	Slika 44 d)		

**Prilog 1.** Tablični prikaz ovisnih veličina sustava za kontrolni parametar  $h/L$  (nastavak na stranicu 197).

Kontrolni parametar	$m_{1,2}/m_0$	$\psi$	Iznos kontrolnog parametra	Ovisna veličina	oznaka
$h/L$	1	$\pi/2$	0,1	$T_{1,2}$	Slika 45 a)
				$N_{1,2}$	Slika 45 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 45 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 45 d)
			1	$T_{1,2}$	Slika 46 a)
				$N_{1,2}$	Slika 46 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 46 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 46 d)
			2	$T_{1,2}$	Slika 47 a)
				$N_{1,2}$	Slika 47 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 47 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 47 d)
		$\pi/4$	0,1	$T_{1,2}$	Slika 48 a)
				$N_{1,2}$	Slika 48 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 48 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 48 d)
			1	$T_{1,2}$	Slika 49 a)
				$N_{1,2}$	Slika 49 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 49 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 49 d)
			2	$T_{1,2}$	Slika 50 a)
				$N_{1,2}$	Slika 50 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 50 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 50 d)
		0	0,1	$T_{1,2}$	Slika 51 a)
				$N_{1,2}$	Slika 51 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 51 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 51 d)
			1	$T_{1,2}$	Slika 52 a)
				$N_{1,2}$	Slika 52 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 52 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 52 d)
2	$T_{1,2}$		Slika 53 a)		
	$N_{1,2}$		Slika 53 b)		
	$\alpha_{1,2}$		Slika 53 c)		
	$\beta_{1,2}$		Slika 53 d)		

**Prilog 1.** Tablični prikaz ovisnih veličina sustava za kontrolni parametar  $h/L$  (nastavak na stranicu 198).

Kontrolni parametar	$m_{1,2}/m_0$	$\psi$	Iznos kontrolnog parametra	Ovisna veličina	oznaka
$h/L$	100	$\pi/2$	0,1	$T_{1,2}$	Slika 54 a)
				$N_{1,2}$	Slika 54 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 54 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 54 d)
			1	$T_{1,2}$	Slika 55 a)
				$N_{1,2}$	Slika 55 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 55 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 55 d)
			2	$T_{1,2}$	Slika 56 a)
				$N_{1,2}$	Slika 56 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 56 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 56 d)
		$\pi/4$	0,1	$T_{1,2}$	Slika 57 a)
				$N_{1,2}$	Slika 57 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 57 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 57 d)
			1	$T_{1,2}$	Slika 58 a)
				$N_{1,2}$	Slika 58 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 58 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 58 d)
			2	$T_{1,2}$	Slika 59 a)
				$N_{1,2}$	Slika 59 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 59 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 59 d)
		0	0,1	$T_{1,2}$	Slika 60 a)
				$N_{1,2}$	Slika 60 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 60 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 60 d)
			1	$T_{1,2}$	Slika 61 a)
				$N_{1,2}$	Slika 61 b)
				$\alpha_{1,2}$	Slika 61 c)
				$\beta_{1,2}$	Slika 61 d)
2	$T_{1,2}$		Slika 62 a)		
	$N_{1,2}$		Slika 62 b)		
	$\alpha_{1,2}$		Slika 62 c)		
	$\beta_{1,2}$		Slika 62 d)		

**Prilog 2.** Tablični prikaz ovisnih veličina sustava za kontrolni parametri  $T_{1,2}$ .

Kontrolni parametri	$m_{1,2}/m_0$	$\psi$	Ovisna veličina	oznaka
$T_{1,2}$	0,01	$\pi/2$	$d/L$	Slika 63 a)
			$h/L$	Slika 63 b)
		$\pi/4$	$d/L$	Slika 64 a)
			$h/L$	Slika 64 b)
		0	$d/L$	Slika 65 a)
			$h/L$	Slika 65 b)
	1	$\pi/2$	$d/L$	Slika 66 a)
			$h/L$	Slika 66 b)
		$\pi/4$	$d/L$	Slika 67 a)
			$h/L$	Slika 67 b)
	100	$\pi/2$	$d/L$	Slika 68 a)
			$h/L$	Slika 68 b)
$\pi/4$		$d/L$	Slika 69 a)	
		$h/L$	Slika 69 b)	

**Prilog 3.** Tablični prikaz ovisnih veličina sustava za kontrolni parametri  $\beta_{1,2}$ .

Kontrolni parametri	$m_{1,2}/m_0$	$\psi$	Ovisna veličina	oznaka
$\beta_{1,2}$	0,01	$\pi/2$	$d/L$	Slika 70 a)
			$h/L$	Slika 70 b)
			$T_1$	Slika 70 c)
			$T_2$	Slika 70 d)
		$\pi/4$	$d/L$	Slika 71 a)
			$h/L$	Slika 71 b)
			$T_1$	Slika 71 c)
			$T_2$	Slika 71 d)
		0	$d/L$	Slika 72 a)
			$h/L$	Slika 72 b)
			$T_1$	Slika 72 c)
			$T_2$	Slika 72 d)
	1	$\pi/2$	$d/L$	Slika 73 a)
			$h/L$	Slika 73 b)
			$T_1$	Slika 73 c)
			$T_2$	Slika 73 d)
		$\pi/4$	$d/L$	Slika 74 a)
			$h/L$	Slika 74 b)
			$T_1$	Slika 74 c)
			$T_2$	Slika 74 d)
		0	$d/L$	Slika 75 a)
			$h/L$	Slika 75 b)
			$T_1$	Slika 75 c)
			$T_2$	Slika 75 d)
100	$\pi/2$	$d/L$	Slika 76 a)	
		$h/L$	Slika 76 b)	
		$T_1$	Slika 76 c)	
		$T_2$	Slika 76 d)	
	$\pi/4$	$d/L$	Slika 77 a)	
		$h/L$	Slika 77 b)	
		$T_1$	Slika 77 c)	
		$T_2$	Slika 77 d)	
	0	$d/L$	Slika 78 a)	
		$h/L$	Slika 78 b)	
		$T_1$	Slika 78 c)	
		$T_2$	Slika 78 d)	

**Prilog 4.** Tablični prikaz ovisnih veličina sustava za kontrolne parametre  $T_1 \beta_1$ .

Kontrolni parametri	$m_{1,2}/m_0$	$\psi$	Ovisna veličina	oznaka
$T_1 \beta_1$	0,01	$\pi/2$	$d/L$	Slika 79 a)
			$h/L$	Slika 79 b)
			$T_2$	Slika 79 c)
			$\beta_2$	Slika 79 d)
		$\pi/4$	$d/L$	Slika 80 a)
			$h/L$	Slika 80 b)
			$T_2$	Slika 80 c)
			$\beta_2$	Slika 80 d)
		0	$d/L$	Slika 81 a)
			$h/L$	Slika 81 b)
			$T_2$	Slika 81 c)
			$\beta_2$	Slika 81 d)
	1	$\pi/2$	$d/L$	Slika 82 a)
			$h/L$	Slika 82 b)
			$T_2$	Slika 82 c)
			$\beta_2$	Slika 82 d)
		$\pi/4$	$d/L$	Slika 83 a)
			$h/L$	Slika 83 b)
			$T_2$	Slika 83 c)
			$\beta_2$	Slika 83 d)
		0	$d/L$	Slika 84 a)
			$h/L$	Slika 84 b)
			$T_2$	Slika 84 c)
			$\beta_2$	Slika 84 d)
100	$\pi/2$	$d/L$	Slika 85 a)	
		$h/L$	Slika 85 b)	
		$T_2$	Slika 85 c)	
		$\beta_2$	Slika 85 d)	
	$\pi/4$	$d/L$	Slika 86 a)	
		$h/L$	Slika 86 b)	
		$T_2$	Slika 86 c)	
		$\beta_2$	Slika 86 d)	
	0	$d/L$	Slika 87 a)	
		$h/L$	Slika 87 b)	
		$T_2$	Slika 87 c)	
		$\beta_2$	Slika 87 d)	

**Prilog 5.** Tablični prikaz ovisnih veličina sustava za kontrolne parametre  $T_2 \beta_2$ .

Kontrolni parametar	$m_{1,2}/m_0$	$\psi$	Ovisna veličina	oznaka
$T_2 \beta_2$	0,01	$\pi/2$	$d/L$	Slika 88 a)
			$h/L$	Slika 88 b)
			$T_1$	Slika 88 c)
			$\beta_1$	Slika 88 d)
		$\pi/4$	$d/L$	Slika 89 a)
			$h/L$	Slika 89 b)
			$T_1$	Slika 89 c)
			$\beta_1$	Slika 89 d)
		0	$d/L$	Slika 90 a)
			$h/L$	Slika 90 b)
			$T_1$	Slika 90 c)
			$\beta_1$	Slika 90 d)
		$\pi/2$	$d/L$	Slika 91 a)
			$h/L$	Slika 91 b)
			$T_1$	Slika 91 c)
			$\beta_1$	Slika 91 d)
		$\pi/4$	$d/L$	Slika 92 a)
			$h/L$	Slika 92 b)
			$T_1$	Slika 92 c)
			$\beta_1$	Slika 92 d)
		0	$d/L$	Slika 93 a)
			$h/L$	Slika 93 b)
			$T_1$	Slika 96 c)
			$\beta_1$	Slika 93 d)
	$\pi/2$	$d/L$	Slika 94 a)	
		$h/L$	Slika 94 b)	
		$T_1$	Slika 94 c)	
		$\beta_1$	Slika 94 d)	
	$\pi/4$	$d/L$	Slika 95 a)	
		$h/L$	Slika 95 b)	
		$T_1$	Slika 95 c)	
		$T_2$	Slika 95 d)	
	0	$d/L$	Slika 96 a)	
		$h/L$	Slika 96 b)	
		$T_1$	Slika 96 c)	
		$\beta_1$	Slika 96 d)	



**Prilog 6.** Tablični prikaz ovisnih veličina sustava za kontrolne parametre  $d/L$   $h/L$ .

Kontrolni parametri	$m_{1,2}/m_0$	$\psi$	Ovisna veličina	oznaka
$d/L$ $h/L$	0,01	$\pi/2$	$\sigma_d$	Slika 97 a)
			$\sigma_h$	Slika 97 b)
			$\sigma$	Slika 97 c)
			$\sigma_{norm}$	Slika 97 d)
		$\pi/4$	$\sigma_d$	Slika 98 a)
			$\sigma_h$	Slika 98 b)
			$\sigma$	Slika 98 c)
			$\sigma_{norm}$	Slika 98 d)
		0	$\sigma_d$	Slika 99 a)
			$\sigma_h$	Slika 99 b)
			$\sigma$	Slika 99 c)
			$\sigma_{norm}$	Slika 99 d)
	1	$\pi/2$	$\sigma_d$	Slika 100 a)
			$\sigma_h$	Slika 100 b)
			$\sigma$	Slika 100 c)
			$\sigma_{norm}$	Slika 100 d)
		$\pi/4$	$\sigma_d$	Slika 101 a)
			$\sigma_h$	Slika 101 b)
			$\sigma$	Slika 101 c)
			$\sigma_{norm}$	Slika 101 d)
		0	$\sigma_d$	Slika 102 a)
			$\sigma_h$	Slika 102 b)
			$\sigma$	Slika 102 c)
			$\sigma_{norm}$	Slika 102 d)
100	$\pi/2$	$\sigma_d$	Slika 103 a)	
		$\sigma_h$	Slika 103 b)	
		$\sigma$	Slika 103 c)	
		$\sigma_{norm}$	Slika 103 d)	
	$\pi/4$	$\sigma_d$	Slika 104 a)	
		$\sigma_h$	Slika 104 b)	
		$\sigma$	Slika 104 c)	
		$\sigma_{norm}$	Slika 104 d)	
	0	$\sigma_d$	Slika 105 a)	
		$\sigma_h$	Slika 105 b)	
		$\sigma$	Slika 105 c)	
		$\sigma_{norm}$	Slika 105 d)	

## Životopis

Jelena Čosić Lesičar rođena je 17. ožujka 1986. godine u Banja Luci. Nakon završene srednje Tehničke škole u Zadru, smjer Zrakoplovni tehničar IRE, 2005. godine upisuje studij Zrakoplovstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Godine 2011. diplomirala je i stječe titulu mag. ing. aero. ing. Iste godine zaposlena je na mjestu asistentice na Katedri za nerazorna ispitivanja, Zavoda za kvalitetu te upisuje poslijediplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Uključena je u nastavne djelatnosti Katedre na kolegijima „Oprema bespilotnih letjelica“, „Bespilotni sustavi“, „Sustavi i oprema zrakoplova 1“, „Sustavi i oprema zrakoplova 2“, „Navigacijski sustavi“, „Interdisciplinarno modeliranje sustava“ i „Fizika ultrazvučne medicine“. Autorica ili koautorica je deset znanstvenih radova. Aktivno se služi engleskim jezikom i pismom. Udana i majka jednog djeteta.

## Curriculum vitae

Jelena Čosić Lesičar was born on March 17 1986 in Banja Luka. After graduation in primary Technical school in Zadar, Aircraft Technician for instruments, radio and electrical equipment, 2005 she enrolled graduate study of Aeronautical Engineering at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. In 2009 she received Mag. Sci. Aero. Sci. degree. In same year she was employed as a research assistant in Chare of non-destructive testing, Department of quality and enrolled postgraduate studies at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb. She is involved in Chare's educational activities within the courses on „Unmanned Aerial Vehicles Equipment“, „Unmanned Aerial Systems“, „Aircraft Systems and Equipment I“, „Aircraft Systems and Equipment II“, „Navigation Systems“, „Interdisciplinary Modelling of Systems“ and „Physics of Ultrasonography in Medicine“. She is author or co-author of 10 scientific papers. Married, mother of one child.