

# Upravljanje protočnom sušarom pomoću neuronske mreže

---

**Radić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:235:236940>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Radić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor:  
Doc. dr. sc. Tomislav Stipančić, dipl. ing.

Student:  
Ivan Radić

Zagreb, 2021.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Radić** Mat. br.: 0035210178

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Upravljanje protočnom sušarom pomoću neuronske mreže**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Flow dryer control based on neural network**

Opis zadatka:

Protočne sušare se koriste za smanjenje vlage iz drveta pomoću protočnog zraka određene temperature. Osim što se tako smanjuje masa drveta, na taj se način osiguravaju ista svojstva drveta prije transporta ili daljnje obrade.

Neuronsku mrežu je moguće koristiti za određivanje optimalnih parametara sušenja u ovisnosti o ulaznim podacima. Na temelju trenutnih ulaznih podataka o relativnoj vlažnosti i temperaturi unutar sušare te početnoj vlažnosti drveta (npr. furnira), neuronska mreža može odrediti brzinu kojom će se traka pomicati da bi se postigla zadovoljavajuća kvaliteta. Parametri procesa će tako biti dinamički mijenjani da se osiguraju konstantne izlazne vrijednosti postupka.

U radu je potrebno:

- objasniti postupak sušenja i trenutni princip rada sušare,
- objasniti očekivana poboljšanja uvođenjem metode upravljanja neuronskom mrežom,
- definirati ulazne i izlazne parametre rada sušare,
- izraditi PLC dijagram upravljanja sustavom (eng. ladder),
- omogućiti nadzor (monitoring) značajnih parametara sušare,
- sakupiti podatke za trening te izraditi model neuronske mreže za upravljanje brzinom pokretne trake sušare.

Razvijeni model za upravljanje radom sušare potrebno je eksperimentalno verificirati.

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

Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.

Datum predaje rada:  
1. rok: 18. veljače 2021.  
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.  
3. rok: 23. rujna 2021.

Predvideni datumi obrane:  
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.  
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.  
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Tomislav Stipančić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Ovom prilikom želio bih se zahvaliti svima koji su me podržavali tijekom mog preddiplomskog studija i pisanja završnog rada, ponajviše prof. dr. sc. Tomislavu Stipančiću na mentorstvu.

Također, zahvaljujem se svojoj obitelji, i prijateljima bez kojih ništa od ovog ne bi bilo moguće.

Ivan Radić

# SADRŽAJ:

POPIS SLIKA: .....	6
POPIS TABLICA: .....	10
POPIS OZNAKA: .....	11
1. SAŽETAK:.....	13
SUMMARY:.....	14
2. UVOD.....	15
3. SUŠENJE.....	16
3.1. Prirodno i umjetno sušenje.....	16
3.2. Podjela vlage u drvu .....	17
3.3. Brzina sušenja .....	18
3.3.1. Period stabilizacije.....	18
3.3.2. Period konstantne brzine .....	19
3.3.3. Period linearno padajuće brzine .....	21
3.3.4. Period nelinearno padajuće brzine .....	22
3.4. Tipovi procesa sušenja.....	22
3.5. Osnovni elementi i uređaji za sušenje .....	25
3.5.1. Komora za sušenje .....	26
3.5.2. Izmjenjivači topline.....	26
3.5.3. Ventilatori.....	27
3.5.4. Ovlaživači zraka.....	28
3.5.5. Izmjenjivači zraka .....	28
3.6. Vrste sušara .....	29
3.6.1. Komorna sušare .....	30
3.6.2. Komorna vakuum sušara .....	31
3.6.3. Valjkasta vakuum sušara .....	31
3.6.4. Tunelska sušara.....	32
3.6.5. Pneumatska sušara.....	32
3.6.6. Trakasta sušara.....	33
3.6.7. Protočna sušara .....	33
3.6.8. Sušara s rotirajućim valjkom.....	34
3.6.9. Sušara raspršivač.....	34
4. NEURONSKE MREŽE .....	35
4.1. Primjena neuronskih mreža .....	36
4.2. Opis prirodni i umjetnih neuronskih mreža.....	36
4.2.1. Prirodni neuroni.....	36

---

4.2.2.	Umjetni neuroni .....	37
4.3.	Aktivacijske funkcije .....	38
4.3.1.	Step funkcija .....	38
4.3.2.	Linearna funkcija .....	39
4.3.3.	Sigmoidna funkcija .....	39
4.3.4.	Tanges hiperbolna funkcija .....	40
4.3.5.	ReLU funkcija.....	41
4.4.	Višeslojne neuronske mreže .....	42
4.4.1.	Statičke neuronske mreže .....	42
4.4.2.	Dinamičke neuronske mreže .....	43
4.5.	Učenje neuronskih mreža .....	45
4.5.1.	Učenje statičke neuronske mreže .....	47
4.5.2.	Ocjena uspješnosti algoritma učenja.....	53
4.6.	Podjela neuronskih mreža.....	54
5.	PRAKTIČNI RAD .....	55
5.1.	Trenutni rad sušare furnira .....	57
5.1.1.	Senzori sušare .....	60
5.1.2.	Ručna regulacija temperature, vlage i brzine trake .....	62
5.1.3.	Mjerenje izlazne vlažnosti furnira .....	63
5.2.	Očekivana poboljšanja .....	64
5.3.	Definiranje ulaznih i izlaznih podataka .....	65
5.3.1.	Komponente PLC sistema .....	65
5.3.2.	Ulazni signali.....	68
5.3.3.	Izlazni signali .....	72
5.4.	Ladder dijagrami u TIA Portalu .....	73
5.4.1.	Ladder dijagram „Al calculations“ .....	73
5.4.2.	Ladder dijagram za regulaciju temperatura Zone 1 i Zone 2 .....	75
5.4.3.	Ladder dijagram za upravljanje klapne za odzračivanje .....	81
5.5.	Prikupljanje i nadzor podataka .....	90
5.6.	Izrada modela neuronske mreže .....	94
5.6.1.	Kreiranje neuronske mreže u MATLAB-u .....	94
5.6.2.	Eksperimentalni rad .....	98
6.	ZAKLJUČAK.....	108
	LITERATURA .....	109

## POPIS SLIKA:

Slika 1. Deformacije drveta nakon sušenja: a) izbočenost, b) sabljastost, c) vitoperost d) čeone i površinske pukotine, e) promjene oblika .....	16
Slika 2. Podjela vlage u drvetu na temelju postotka vlage [1] .....	17
Slika 3. Prikaz promjene vlage tijekom perioda stabilizacije [1] .....	18
Slika 4. Prikaz brzine sušenja tijekom perioda stabilizacije [1] .....	19
Slika 5. Prikaz prijelaza tvari i topline tijekom perioda konstantne brzine sušenja [1] .....	19
Slika 6. Prikaz promjene vlage tijekom perioda konstantne brzine sušenja [1] .....	20
Slika 7. Prikaz konstantne brzine sušenja [1] .....	20
Slika 8. Prikaz promjene brzine sušenja za padajuću fazu [1] .....	21
Slika 9. Prikaz promjene vlage tijekom perioda padajuće brzine sušenja [1] .....	21
Slika 10. Prikaz procesa koji se odvijaju tijekom sušenja [1] .....	22
Slika 11. Prikaz prijenosa tvari i topline tijekom konvekcijskog sušenja [1] .....	23
Slika 12. Prikaz prijenosa tvari i topline tijekom kondukcijskog sušenja [1] .....	23
Slika 13. Prikaz prijenosa tvari i topline tijekom dielektričkog radijacijskog sušenja [1] .....	24
Slika 14. Prikaz prijenosa tvari i topline tijekom radijacijskog sušenja isijavanjem [1] .....	24
Slika 15. Prikaz osnovnih elemenata za provedbu procesa sušenja [2] .....	25
Slika 16. Prikaz komore za sušenje [2] .....	26
Slika 17. Prikaz ozmjjenjivača topline unutar sušare [2] .....	26
Slika 18. Toplinska podstanica unutar sušare [5] .....	27
Slika 19. Prikaz aksijalnog ventilatora [6] .....	27
Slika 20. Prikaz radijalnog ventilatora [7] .....	28
Slika 21. Prikaz industrijskog uređaja za ovlaživanje zraka [8] .....	28
Slika 22. Prikaz kružne klapne za odzračivanje [9] .....	29
Slika 23. Prikaz pravokutnih bočnih otvora s pokretnom klapnom za odzračivanje [2] .....	29
Slika 24. Prikaz kruženja zraka unutar komorne sušare [2] .....	30
Slika 25. Komorna sušara: a) nacrt, b) bokocrt, c) presjek [3] .....	30
Slika 26. Prikaz valjkaste vakuum sušare [10] .....	31
Slika 27. Prikaz mješalica unutar valjkaste vakuum sušare [10] .....	31
Slika 28. Bočni prikaz i presjek tunelske sušare [3] .....	32
Slika 29. Prikaz funkcioniranja pneumatske sušare [4] .....	32
Slika 30. Prikaz rada trakaste sušare [3] .....	33
Slika 31. Prikaz protočne sušare [4] .....	33
Slika 32. Sušara s rotirajućim valjkom: a) prikaz dijelova, b) prikaz unutrašnjih lopatica [4] ..	34
Slika 33. Prikaz sušare raspršivača [11] .....	34
Slika 34. Podjela računarstva na podcjeline [15] .....	35
Slika 35. Shematski prikaz prirodnog neurona [18] .....	37
Slika 36. Shematski prikaz umjetnog neuroma .....	37
Slika 37. Step aktivacijska funkcija [18] .....	39
Slika 38. Linearna aktivacijska funkcija [18] .....	39
Slika 39. Sigmoidna aktivacijska funkcija [18] .....	40
Slika 40. Tangens hiperbolna aktivacijska funkcija [18] .....	40
Slika 41. ReLU aktivacijska funkcija .....	41
Slika 42. Modificirana ReLU aktivacijska funkcija .....	42
Slika 43. Shematski prikaz statičkog neurona .....	42
Slika 44. Shematski prikaz statičke neuronske mreže .....	43
Slika 45. Shematski prikaz dinamičkog neurona .....	44
Slika 46. Shematski prikaz dinamičke neuronske mreže .....	45



Slika 47. Shematski prikaz učenja neuronske mreže s učiteljom [22] .....	46
Slika 48. Shematski prikaz učenja neuronske mreže bez učitelja .....	46
Slika 49. Grafički prikaz optimalne vrijednosti iteracija [17] .....	47
Slika 50. Shematski prikaz učenja statičke mreže [18] .....	48
Slika 51. Logo tvrtke Barting d.o.o. [23] .....	55
Slika 52. Makrolokacija tvrtke Spačva d.d. ....	55
Slika 53. Mikro lokacija tvrtke Spačva d.d. [24] .....	56
Slika 54. Tablica iz Financijskog izvješća tvrtke Spačva d.d. [25] .....	56
Slika 55. Shematski prikaz dijelova sušare [] .....	57
Slika 56. Prikaz prozora „Recept“ na HMI-i [23] .....	57
Slika 57. Grafički prikaz vrijednosti temperature furnira na izlazu .....	58
Slika 58. Bočni strana sušare .....	58
Slika 59. Izlazna strana sušare .....	59
Slika 60. Tehnički crtež sušare - bokocrt .....	59
Slika 61. Tehnički crtež sušare – tlocrt .....	59
Slika 62. Senzor za mjerenje ulazne vlažnosti furnira .....	60
Slika 63. Senzor za očitavanje temperature unutar sušare – na krovu sušare .....	60
Slika 64. Senzor za očitavanje temperature unutar sušare – na bočnoj strani .....	61
Slika 65. Senzor za očitavanje sadržaja vodene pare unutar sušare .....	61
Slika 66. Senzor za očitavanje izlazne temperature furnira [26] .....	61
Slika 67. Senzor za očitavanje prisustva mreže [27] .....	62
Slika 68. Grafički prikaz promjene temperature u zonama 1 i 2 .....	62
Slika 69. Prikaz promjene sadržaja vodene pare unutar sušare .....	63
Slika 70. Prikaz promjene brzine trake .....	63
Slika 71. Uređaj za ručno mjerenje vlažnosti furnira [28] .....	63
Slika 72. Komponente PLC sistema .....	65
Slika 73. Siemens CPU S7-1511-1 PN [29] .....	65
Slika 74. Korišteni digitalni i analogni ulazni moduli [29] .....	66
Slika 75. Korišteni digitalni i analogni izlazni moduli [29] .....	66
Slika 76. Shematski prikaz putovanja digitalnog signala .....	67
Slika 77. Shematski prikaz putovanja analognog signala .....	67
Slika 78. Uređaj za napajanje PLC-a [29] .....	68
Slika 79. Modularni PLC za upravljanje radom sušare .....	68
Slika 80. Shematski prikaz sušare sa iznačenim sensorima .....	69
Slika 81. Pozicija senzora 37S24, 37S13 i 37S14 .....	69
Slika 82. Pozicija senzora 37S7 .....	70
Slika 83. Pozicija senzora 39S5 i 39S6 .....	70
Slika 84. Pozicija senzora 37S21 .....	71
Slika 85. Popis digitlnih ulaznih signala na modulu E03 .....	72
Slika 86. Popis analognih ulaznih signala na modulu E11 .....	72
Slika 87. Popis digitlnih izlaznih signala na modulu A07 .....	73
Slika 88. Prikaz mreža funkcijskog bloka „AI Calculation“ .....	74
Slika 89. Blokovi „NORM_X“ i „SCALE_X“ .....	74
Slika 90. Temperatura zone 1 i zone 2 za vremensko razdoblje 9:00-15:00 dana 07.12.2021. ....	75
Slika 91. Odnos između temperature zone 2 i broja osušenih furnira .....	76
Slika 92. Prikaz mreža i internih varijabil funkcije „Valve FC“ .....	77
Slika 93. Prva mreža funkcije „Valve FC“ .....	77
Slika 94. Druga mreža funkcije „Valve FC“ .....	78
Slika 95. Treća mreža funkcije „Valve FC“ .....	79
Slika 96. Četvrta mreža funkcije „Valve FC“ .....	79

Slika 97. Pozivanje funkcije „Valve FC“ za ventil zone 1 .....	80
Slika 98. Pozivanje funkcije „Valve FC“ za ventil zone 2 .....	80
Slika 99. Prikaz promjene temperatura Zona 1 i 2 regulacijom ventila .....	81
Slika 100. Prijelazna karakteristika PI regulatora [35] .....	82
Slika 101. PID_compact blok .....	82
Slika 102. Osnovne postavke za konfiguraciju PID regulatora .....	83
Slika 103. Procesne postavke za konfiguraciju PID regulatora .....	84
Slika 104. Napredne postavke za konfiguraciju PID regulatora .....	84
Slika 105. Aperiodski odziv na step funkciju .....	85
Slika 106. Promjena sadržaja vodene pare bez regulacije klapne .....	86
Slika 107. Ladder dijagram za aktiviranje PID regulatora .....	86
Slika 108. Poziv finkcije „Flac FC“ za regulaciju klapne .....	87
Slika 109. Prikaz dijelova i internih varijabli funkcije „Flap FC“ za regulaciju klapne .....	87
Slika 110. Prva mreža funkcije „Flap FC“ .....	88
Slika 111. Druga mreža funkcije „Flap FC“ .....	88
Slika 112. Treća mreža funkcije „Flap FC“ .....	89
Slika 113. Četvrta mreža funkcije „Flap FC“ .....	89
Slika 114. Promjena sadržaja vodene pare unutar sušare tijekom regulacije klapne .....	90
Slika 115. Siemens SIMATIC IOT2050 IIoT gateway [29] .....	90
Slika 116. Ubuntu logo [30] .....	90
Slika 117. Node-RED logo [31] .....	91
Slika 118. Glavne cjeline Node-RED sučelja .....	91
Slika 119. Prikaz povezivanja blokova u Node-REDu .....	92
Slika 120. Baza podataka „IOTData“ u TIA Portalu .....	92
Slika 121. InfluxDB logo [32] .....	93
Slika 122. Logo web aplikacije Grafana [33] .....	93
Slika 123. Prikupljeni podatci prikazani na Grafani .....	93
Slika 124. Pozivanje početnog grafičkog prozora Neural Network Toolboxa .....	94
Slika 125. Početni prozor Neural Network Toolbox-a .....	94
Slika 126. Prozor za pojačnjavanje rada neuronske mreže .....	95
Slika 127. Unos ulaznih podataka i ciljeva .....	95
Slika 128. Prozor za odabir podataka za validaciju i testiranje .....	96
Slika 129. Prozor za stvaranje aritektute mreže .....	97
Slika 130. Prozor za izvođenje treniranja mreže .....	97
Slika 131. Temperature Zone 1 i Zone 2 za vrijeme prikupljanja mjerenja .....	98
Slika 132. Brzina trake za vrijeme sušenja mjerenih furnira .....	98
Slika 133. Sadržaj vodene pare unutar sušare za vrijeme sušenja mjerenih furnira .....	99
Slika 134. Prikaz prikupljenih mjerenja za posljednju skupinu podataka .....	99
Slika 135. Prozor za unos ulaznih i željenih izlaznih podataka .....	100
Slika 136. Podjela podataka na zadaće .....	100
Slika 137. Arhitektura umjetne neuronske mreže .....	101
Slika 138. „Neural Network Training“ prozor .....	101
Slika 139. Prozor za generiranje MATLAB funkcije .....	102
Slika 140. Pozivanje generirane funkcije .....	102
Slika 141. Usporedba izmjerenih i neuroskom mrežom dobivenih podataka .....	103
Slika 142. Graf promjene sadržaja vodene pare dana 19.01. na brzini trake 20m/min .....	103
Slika 143. Usporedba drugog skupa podataka na brzini 20 m/min s onima koje predviđa neuronska mreža .....	104
Slika 144. Promjena sadržaja vodene pare kod brzine trake 17 m/min dana 20. 01. 2021. ...	105

Slika 145. Uspredba izmjerenih podataka s onima koje je generirala neuronska mreža kod brzine trake 17 m/min dana 19. 01. 2021.....	105
Slika 146. Promjena sadržaja vodene pare kod brzine trake 17 m/min dana 20.01.2021. ....	106
Slika 147. Uspredba izmjerenih podataka s onima koje je generirala neuronska mreža kod brzine trake 17 m/min dana 20. 01. 2021.....	106

## **POPIS TABLICA:**

Tablica 1. Popis memorijskih lokacija PID_compact bloka.....	83
--------------------------------------------------------------	----

## POPIS OZNAKA:

$A$	površina plohe drveta koja ima doticaj s vrućim zrakom
$BIAS$	neuron bez ulaza s konstantnom izlaznom vrijednosti jednakom 1
$d_k$	željena vrijednost k-og izlaza neuronske mreže
$E$	funkcija cilja
$\Delta E(\mathcal{g})$	promjena pogreške
$\nabla E(\mathcal{g})$	gradijent pogreške
$H$	oznaka sakrivenog sloja
$I$	broj neurona ulaznog sloja uvećan za $BIAS$ neuron
$J$	broj neurona skrivenog sloja uvećan za $BIAS$ neuron
$j$	indeks funkcije sume skrivenog sloja ovisno o broju neurona skrivenog sloja
$K$	broj izlaznih neurona neuronske mreže
$K_p$	nagiba linearne funkcije
$k$	indeks funkcije sume izlaznog sloja ovisno o broju neurona u izlaznom sloju
$MS$	srednja kvadratna pogreška
$m_{st}$	masa suhe tvari drveta
$N$	ukupan broj ulaza
$NRMS$	normalizirani korijen srednje kvadratne pogreške
$n$	trenutni korak učenja
$net$	vrijednost funkcije sume
$net_j$	vrijednost funkcije sume j-og neurona
$net_{Hj}$	funkcija sume j-og neurona skrivenom sloja
$net_{Ok}$	vrijednost funkcije sume j-og neurona izlaznog sloja
$O$	oznaka izlaznog sloja
$O_k$	k-ti izlaz neuronske mreže
$q_k$	gustoća toplinskog toka ostvarena konvekcijom
$q_{uk}$	ukupna gustoća toplinskog toka dovedenog konvekcijom
$q_z$	gustoća toplinskog toka ostvarena zračenjem
$q_\lambda$	gustoća toplinskog tok ostvarena kondukcijom
$RMS$	korijen srednje kvadratne pogreške
$r(\mathcal{g}_s)$	latentna toplina ishlapljivanja za ravnotežna temperatura vodene površine
$t$	vrijeme potrebno da se drvo osuši na krajnju količinu vlage
$v_{ji}$	težinski koeficijenti skrivenog sloja
$v_s$	brzina sušenja
$v_{s,C}$	vrijednost konstantne brzine sušenja
$w_i$	težinski koeficijent umjetnog neurona
$w_{kj}$	težinski koeficijent veze između k-tog neurona izlaznog sloja i j-tog neurona sakrivenog sloja
$X_C$	sadržaj vlage u drvetu na kraju perioda konstantne brzine sušenja
$X_{eq}$	ravnotežni sadržaj vlage drveta

$X_T$	količina ukupnog sadržaja vlage u drvetu
$X_1$	početna vlažnost drveta
$X_2$	krajnja vlažnost drveta
$x_i$	i-ti ulaz umjetnog neurona
$y$	vrijednost izlaza neurona
$y_j$	vrijednost izlaza j-og neurona sakrivenog sloja
$Z_i$	i-ti ulaz neuronske mreže
$Z_j$	j-ti ulaz umjetnog neurona
$\alpha$	koeficijent momentuma prvog reda
$\alpha_k$	koeficijent prijelaza topline konvekcijom
$\alpha_{zr}$	koeficijent prijelaza topline zračenjem
$\gamma$	aktivacijska funkcija neurona
$\gamma'_j$	derivacija aktivacijske funkcije neurona
$\Delta$	iznos pomjene težine u jednom koraku
$\delta$	parametar algoritma povratnog prostiranja pogreške
$\delta_{Ok}$	parametar algoritma povratnog prostiranja pogreške izlaznog sustava
$\delta_s$	debljina stjenke
$\delta_{vt}$	debljina sloja drveta
$\eta$	koeficijent brzine učenja
$\lambda_s$	koeficijent toplinske provodnosti stjenke
$\lambda_{vt}$	koeficijent toplinske provodnosti drveta
$\vartheta$	težinski koeficijent
$\vartheta(n)$	trenutna vrijednost parametra učenja
$\Delta\vartheta(n)$	promjena težinskog koeficijenta
$\vartheta(n+1)$	nova vrijednost težinskog koeficijenta
$\vartheta_p$	temperatura površine materijala
$\vartheta_s$	ravnotežna temperatura vodene površine
$\vartheta_{zr}$	temperatura vruće stjenke

## **1. SAŽETAK:**

Tema ovog završnog rada je unapređenje rada protočne sušare furnira. Trenutno ručno podešavanje parametara unutar sušare ne zadovoljava zahtjeve željene kvalitete proizvoda što uzrokuje sve veće probleme zbog nezadovoljstva klijenata. Prevelike oscilacije od zadanih parametara za temperature i vlažnost zraka unutar sušare događale su se zbog neadekvatne regulacije izvršnih članova. Ovim radom opisan će se projekt automatizacije rada sušare s dodatkom predviđanja izlazne vlažnosti furnira pomoću neuronske mreže. U početnim poglavljima bit će opisane osnove procesa sušanja i neuronskih mreža. Praktičnim dijelom bit će prikazani ladder dijagrami u TIA Portalu koji preko Siemens PLC-a upravljaju ventilima za dovod pregrijane pare u izmjenjivače topline te za regulaciju klapne za odzračivanje, kako ne bi došlo do zasićenja zraka s vodenom parom. U zadnjem dijelu rada bit će objašnjena izrada neuronskih mreža pomoću MATLAB-ovog alata „Neural Network Toolbox“ te mogućnost predviđanja izlazne vlažnosti furnira temeljem uvjeta unutar sušare.

## **SUMMARY:**

The subject of this thesis is to improve the work of a veneer flow dryer. Currently, manually adjusting the dryer parameters does not meet the requirements of the desired quality of the product. It causes problems because of customer satisfaction. Excessive oscillations from the default parameters for ambient air temperature and humidity were caused by inadequate regulation of actuators. This thesis describes the dryer automation project with the addition of the forecast of the output moisture of the veneer using the neural net. The basics of the suture and neural networks will be described in the initial chapters. The practical part will be shown by the ladder diagrams in TIA Portal which, through Siemens PLC, will control valves for the supply of overheated steam to heat exchangers and for the regulation of aeration rods, so as to avoid saturation of air with water vapour. In the last part of the work, it will be explained by the development of neural networks, using the matrix of "Neural Network Toolbox" tools and the ability to predict the output moisture of the veneer based on the conditions inside the dryer.



## 2. UVOD

Sušenje drva jedno je od najstarijih tehnoloških procesa. Njime se uklanja voda iz drveta kako bi se smanjila njegova težina, dobila bolja mehanička svojstva te u krajnjem slučaju da bi drvo lakše izgorjelo. Velike količine vode u tek posječenom drvetu uzrokuju to da je drvo dimenzionalno nestabilno, da nema biološku otpornost niti kvalitetna mehanička svojstva. Zbog toga je sušenje nužno da bi se drvo učinilo tehnički upotrebljivim, što sami proces sušenja često stavlja kao prvu fazu procesa prerade.

Drvo se najviše koristi kao materijal za izradnju objekata ili za ogrijev što mu daje značajnu ulogu u životu ljudi. U ovome radu bit će opisan proces sušenja listova furnira hrasta lužnjaka. Osušeni listovi poslije se međusobno lijepe, prešaju te hlade kako bi se dobile furnirske ploče. Hrast lužnjak, ponos hrvatskog šumarstva, tvrd je, žilav i dobro se obrađuje. Zbog toga je pogodan za korištenje u građevini, unutrašnja i vanjska uređenja, parket i namještaj. Zbog svojih je kvaliteta hrast lužnjak relativno skup, prepoznatljiv te svjetski priznat.

Kako bi se dobila što bolja kvaliteta osušenih listova furnira hrasta lužnjaka potrebno je automatizirati proces sušenja. Tim postupkom, nakon što se odredi recept kojim bi se sušili furniri, dobiva se jednako kvalitetan furnir. Ujednačena kvaliteta osušenih furnira rezultirala bi većom otkupnom cijenom. Uz to, automatiziranjem se mogu prikupljati podatci za analizu procesa sušenja, a time i pronalaska određenih relacija među ključnim parametrima. Time bi se mogao ubrzati proces i ostvariti povećanje količine osušenih furnira u jednoj smjeni. Iz prikazanog je vidljivo da je automatizacija procesa sušenja opravdana i ekonomski isplativa. Povećanjem kvantitete i kvalitete osušenih furnira dolazi se do povećanog prihoda poduzeća što je cilj svake investicije.

U daljnjem tekstu analizirat će se rad protočne sušare tako da se pronađu određene relacije među fizikalnim veličinama koje utječu na proces sušenja. Izradit će se program za PLC koji će upravljati radom sušare te će se objasniti rad uređaja koji prikuplja podatke s PLC-a i šalju ih u bazu podataka.

## 3. SUŠENJE

### 3.1. Prirodno i umjetno sušenje

Sušenje drveta je tehnološki proces hidrotermičke obrade drveta gdje se ishlapljivanjem uklanja određena ili potpuna količina vode. Svrha tog procesa je dobivanje drveta željenog postotka vlage te zadovoljavajućih tehničkih kvaliteta. Iako je sušenje drveta već dugo poznat proces, danas se teži što bržim načinima sušenja uz što manji troškove, neumanjujući njegove kvalitete za obradu i daljnje korištenje. Tu dolazimo do dva najopćenitija načina sušenja drveta: prirodno i umjetno. Prirodno sušenje podrazumijeva sušenje pri atmosferskim uvjetima na koje čovjek ne utječe te je drvo prepušteno vanjskim klimatskim faktorima. S druge strane, umjetnim sušenjem drveta u komorama (sušarama) možemo utjecati na parametre sušenja u cilju skraćivanja vremena sušenja te bolje kvalitete drveta.

Budući da umjetnim sušenjem utječemo na faktore sušenja, moguće je da pri neusklađenim uvjetima dođe do grešaka pri sušenju, što može uvelike umanjiti kvalitetu drveta. Najčešće greške s kojima se susrećemo pri umjetnom sušenju očituju se u obliku površinskih i čeonih pukotina, skorjelosti, kolapsa drva, diskoloraciji i promjeni oblika.



Slika 1. Deformacije drveta nakon sušenja: a) izbočenost, b) sabljastost, c) vitoperost  
d) čeon i površinske pukotine, e) promjene oblika

Kako bi izbjegli takve rezultate sušenja potrebno je pronaći optimalnu točku sušenja gdje će drvo, u ovom slučaju list furnira, izlaziti iz sušare sa zadovoljavajućom kvalitetom. Optimalna točka sušenja predstavlja ono stanje zraka unutar sušare zajedno sa zadanom brzinu trake pri kojem će furnir početne vlažnosti iz sušare izlaziti sa željenom količinom vode.

Da bi odredili optimalnu točku sušenja potrebno je znati što želimo raditi s drvom nakon sušenja. Različite primjene drveta zahtijevaju različite izlazne vlažnosti drveta. Tako je za parket potrebno da drvo ima vlažnost 6-8%, građevinske grede 16-18%, namještaj i interijeri 7-12%, prozori i vrata 12-15 %. Smanjenjem sadržaja vode u drvu značajno mjenjamo njegovu kvalitetu te biramo kakve će karakteristike imati. Sušenjem se drveta mijenjaju njegove dimenzije, poboljšavaju mehanička svojstva (čvrstoća), štiti se od plijesni te se time sprečava njegovo propadanje, smanjuje mu se masa te se ono priprema za daljnju preradu kao što je lijepljenje, dekoriranje i zaštita.

Princip uvjetnog sušenja drveta zasniva se na ravnotežnoj vlazi pri stalnoj temperaturi. Ako se zasićen zrak zagrijava, povećava mu se mogućnost da primi još vodene pare, a ako se hladi, javlja se višak vodene pare (pojavljuje se kondenzacija). Ova osobina koristi se za istiskivanje

vlage iz drveta, odnosno za njegovo sušenje. Temperatura u sušioniku ne smije biti viša od temperature ishlapljivanja ili izgaranja drugih sastojaka osim vode kao što su razna organska otapala, alkoholi, masti, ulja i aromatični sastojci.

### 3.2. Podjela vlage u drvu

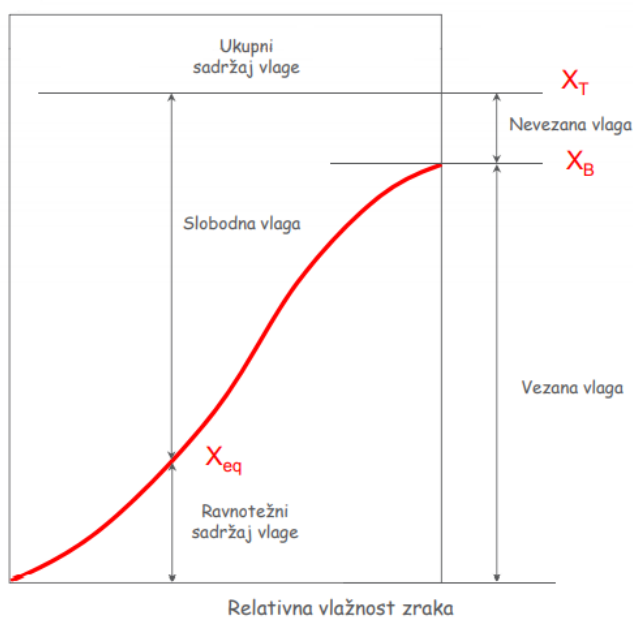
Drvo je najpoznatiji i najkorišteniji higroskopski materijal koji može upiti i zadržati vodu iz okoline. To svojstvo posljedica je njegove strukture i načina skladištenja vode.

Najveća količina vode u drvetu nalazi se u njegovim krupnijim kapilarama što znači da nije vezana za stijenke drveta te se zbog toga najlakše odvodi procesom sušenja.

S druge strane, vezana vlaga apsorbirana je u šupljikavim staničnim stjenkama drveta. Za ishlapljivanje ove vrste vode potrebno je dovesti više topline, a njeno odvođenje bitno utječe na svojstva drveta. Odvođenjem vezane vode dolazi do pojave utezanja drva pri čemu se mijenjanju njegova mehanička, toplinska i električna svojstva.

Voda koja se nalazi u spojevima od kojih je izrađeno drvo naziva se kemijska vezana vlaga i ne utječe na proces sušenja jer ju je nemoguće ukloniti sušenjem.

Na slici 2. može se vidjeti grafički prikaz podjele vlage u drvetu. Točka  $X_{eq}$  predstavlja ravnotežni sadržaj vlage drveta a postiže se kada je drvo u ravnoteži s okolišnim medijem koji ga okružuje, za zadanu relativnu vlažnost, tlak i temperaturu medija. U takvom stanju drvo više ne mijenja svoj sadržaj vlage, a ostvaruje se nakon relativno dugog boravka u okolišu stalnog stanja zraka.



Slika 2. Podjela vlage u drvetu na temelju postotka vlage [1]

Horizontalna linija  $X_T$  predstavlja količinu ukupnog sadržaja vlage u drvetu. To je ona količina vlage koja uključuje sve svrste vlage u drvetu: slobodnu, vezanu i kemijski vezanu. Horizontalna linija  $X_B$  označava razinu vlage u drvetu nakon uklanjanja nevezane vlage u drvetu.

### 3.3. Brzina sušenja

Brzina sušenja ovisi o mnogim čimbenicima jer je drvo heterogeno i anizotropno. Ako se ograničimo samo na drvo, tu možemo pričati o vrsti drveta, dijelu drveta (kora ili srčika), masi, dimenzijama, gustoći, itd. Stoga će se proces sušenja sagledavati samo utjecajem na najvažnije varijable: brzinu trake, temperaturu i relativnu vlažnost unutar sušare.

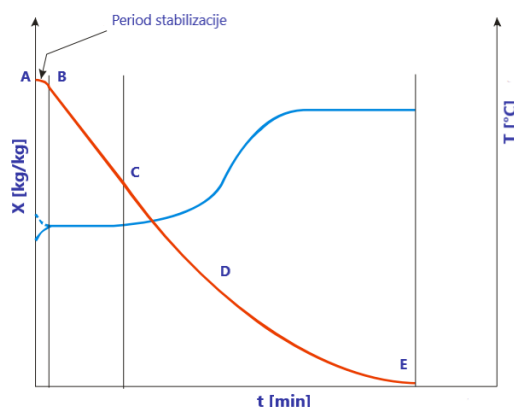
Osnovna definicija brzine sušenja predstavlja količinu vode koja ishlapi iz komada drva u jedinici vremena za stabilne uvjete unutar sušare.

Kako je opisano u prethodnom potpoglavlju, unutar drveta nalaze se slobodna i vezana voda koje ishapljuju na različiti način. Zbog toga je, za stabilne uvjete, brzina sušenja drveta promjenjiva te se mijenja kroz tri faze kao što je prikazano na slici 4.

#### 3.3.1. Period stabilizacije

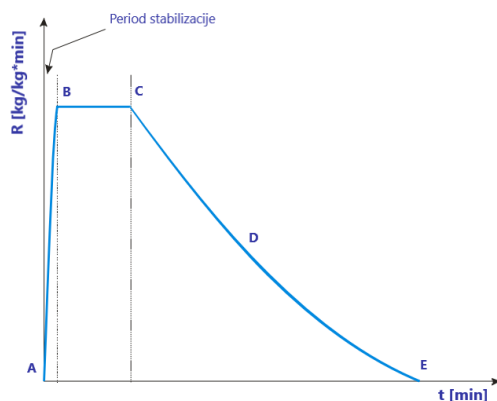
Ovaj period traje jako kratko i predstavlja vrijeme potrebno da se drvo zagrije na temperaturu za sušenje. Za vrijeme stabilizacije gubitak vlage vrlo je mali.

Na slici 3. može se vidjeti da sadržaj vode u drvetu (područje A-B) ostaje gotovo nepromijenjeno za vrijeme stabilizacije.



Slika 3. Prikaz promjene vlage tijekom perioda stabilizacije [1]

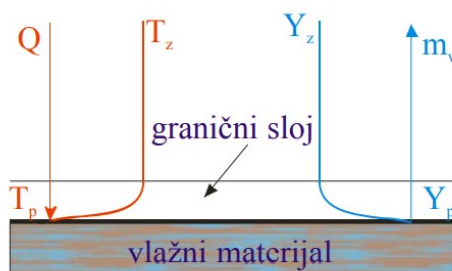
Za kratko vrijeme stabilizacije A-B brzina sušenja dostiže razinu konstantne vrijednosti, što se može vidjeti na slici 4.



Slika 4. Prikaz brzine sušenja tijekom perioda stabilizacije [1]

### 3.3.2. Period konstantne brzine

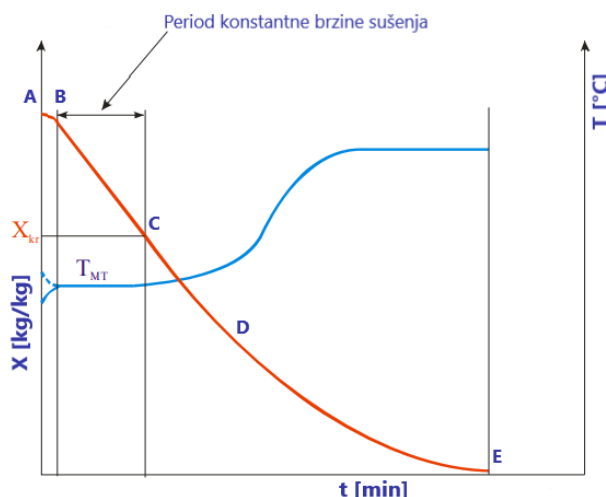
U drugoj fazi sušenja drveta dolazi do ishlapljivanja slobodne vode koja se u tankom sloju nalazi na površini drveta što sprječava naglo sušenje i povećanje temperature površine drva.



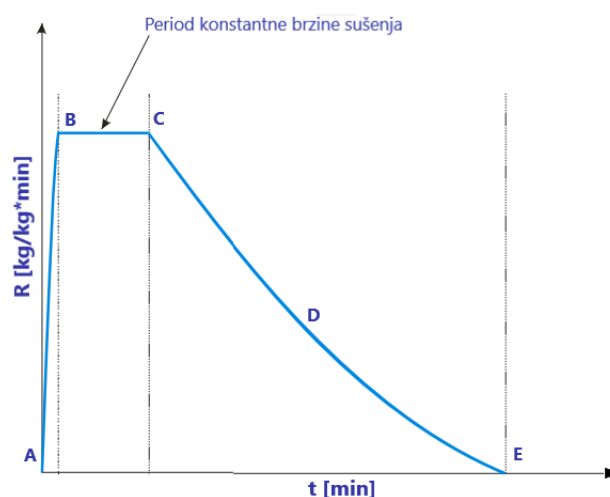
Slika 5. Prikaz prijelaza tvari i topline tijekom perioda konstantne brzine sušenja [1]

U toj fazi brzina sušenja je konstantna te u usporedbi s drugim fazama količina vode koja ishlapi je najveća. Točka C predstavlja vremensku konstantu koja označava kraj jednolične brzine sušenja.

Slika 6. prikazuje linearnu promjenu sadržaja vode u drvetu s vremenom te konstantnu temperaturu površine. To znači da je brzina u tom periodu bila konstantna, što se može vidjeti na slici 7.



Slika 6. Prikaz promjene vlage tijekom perioda konstantne brzine sušenja [1]



Slika 7. Prikaz konstantne brzine sušenja [1]

U ovoj fazi brzina sušenja  $v_s$  izračunava se prema izrazu:

$$v_s = \frac{q_{uk}}{r(\vartheta_s)}, \quad (3.1)$$

gdje su  $\vartheta_s$  ravnotežna temperatura vodene površine,  $q_{uk}$  ukupna gustoća toplinskog toka dovedenog konvekcijom, kondukcijom ili zračenjem, a  $r(\vartheta_s)$  latentna toplina ishlapljivanja za temperaturu  $\vartheta_s$ .

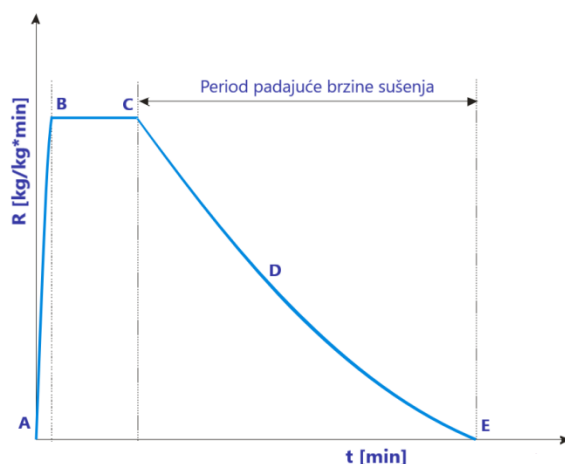
Vrijeme potrebno da se drvo početne vlažnosti  $X_1$  osuši na željenu vlažnosti  $X_2$  može se izračunati jednadžbom:

$$t = \frac{m_{st}}{Av_s} \cdot (X_1 - X_2) \quad (3.2)$$

gdje su  $m_{st}$  masa suhe tvari drveta,  $A$  površina plohe koja ima doticaj s vrućim zrakom.

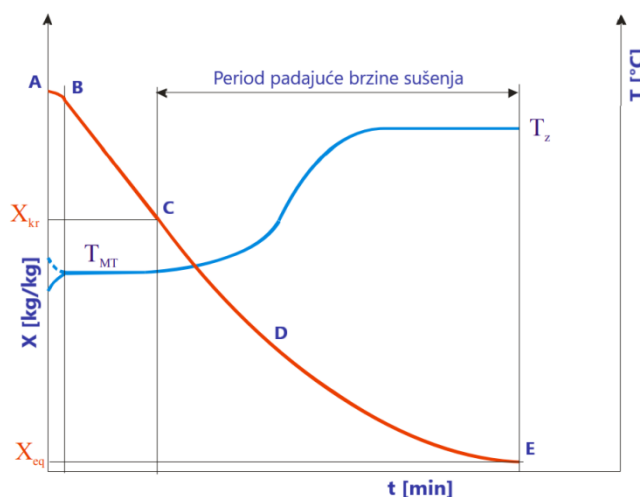
### 3.3.3. Period linearno padajuće brzine

Treća faza sušenja započinje nakon što ishlapi sva slobodna voda iz drveta, s početkom u točki C. U tom razdoblju dolazi do ishlapljivanja vezane vode, za koju je potrebna veća količina topline kako bi ishlapila, što se manifestira naglim padom brzine sušenja, slika 8. Linearni pad brzine sušenja traje sve dok se ne postigne sadržaj vlažnosti drveta u točki D, nakon čega započinje nelinearni zakon promjene brzine sušenja.



Slika 8. Prikaz promjene brzine sušenja za padajuću fazu [1]

Budući da je dovod vezana voda sporiji, površina drveta djelomično je prekrivena vodom što uzrokuje ubrzano povišenje temperature i njeno brže isušivanje, slika 9.



Slika 9. Prikaz promjene vlage tijekom perioda padajuće brzine sušenja [1]

Kao što se vidi iz slike 8., u drugoj fazi brzina sušenja mijenja se ne idealno linearno, odnosno čini laganu nelinearnu krivulju. Vrijeme  $t$  potrebno da se drvo vlažnosti  $X_C$  osuši na željenu količinu vlage  $X_2$  može se izračunati pomoću izraza:

$$t = \frac{m_{st}}{A} \cdot \int_{X_2}^{X_C} \frac{dX}{v(X)} \quad (3.3)$$

Ako se pretpostavi da se u drugoj fazi brzina smanjuje linearno jednadžba za izračunavanje vremena sušenja prelazi u izraz:

$$t = \frac{m_{st}}{A} \cdot \frac{(X_C - X_2)}{(v_{s,C} - v_{s,2})} \cdot \ln \left( \frac{v_{s,C}}{v_{s,2}} \right) \quad (3.4)$$

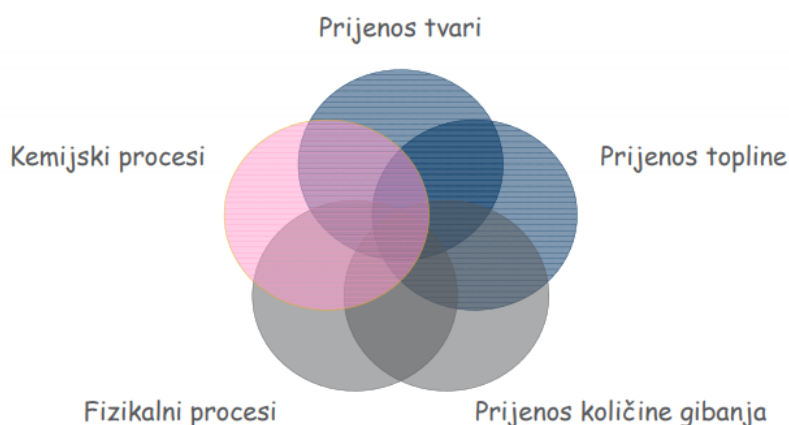
gdje su  $X_C$  količina vlage u drvetu nakon perioda konstantne brzine sušenja te  $v_{s,C}$  vrijednost konstantne brzine sušenja.

### 3.3.4. Period nelinearno padajuće brzine

Treća faza sušenja traje sve dok drvo ne uđe u ravnotežu s medijem u kojem se nalazi, točnije dok vlaga ne dođe do razine točke E na slici 9. U ovom dijelu postotak vlage u drvu mijenja se jako malo što znači da brzina sušenja zatno opada. Temperatura površine raste sve dok ne postigne temperaturu zraka u sušari.

## 3.4. Tipovi procesa sušenja

Proces sušenja drveta uključuje istovremeni prijenos topline i mase te ovisi o strukturi drveta, njegovoj geometriji, vrsti veze vode s krutom tvari, fizikalnim i termodinamičnim parametrima sredstva za sušenje. Zbog svoje složenosti proces sušenja može voditi na više načina ovisno o tome koji su nam parametri važniji. Kako bi se ilustrirala kompleksnost sušenja, na slici 10. mogu se vidjeti procesi koji se odvijaju tijekom sušenja.



Slika 10. Prikaz procesa koji se odvijaju tijekom sušenja [1]

Prema načinu dovođenja i odvođenja topline od materijala razlikujemo četiri metode sušenja:

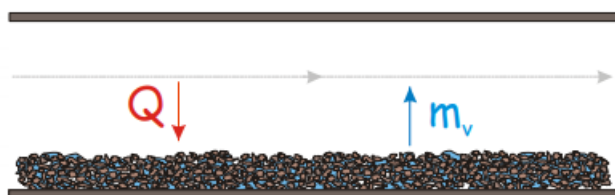
#### 1. konveksijsko sušenje:

- kod kojeg zagrijani plin zagrijava materijal i odnosi vodenu paru s njega čime ga suši. Najčešće se koristi vrući zrak, ali u posebnim postupcima koristi se i inertni plin, dimni plinovi, itd.
- uklanjanje vode iz drveta događa se na temperaturi manjoj od temperature ključanja vode za dotički ukupni tlak
- gustoća toplinskog toka ostvarena konvekcijom  $q_k$  izračunava se prema izrazu:

$$q_k = \alpha_k \cdot (\vartheta_z - \vartheta_p), \quad (3.5)$$



gdje su  $\vartheta_z$  temperatura zagrijanog zraka,  $\vartheta_p$  temperatura površine materijala i  $\alpha_k$  koeficijent prijelaza topline konvekcijom.



Slika 11. Prikaz prijenosa tvari i topline tijekom konvekcijskog sušenja [1]

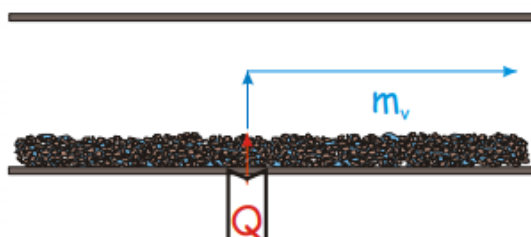
## 2. kondukcijsko sušenje:

- kod kojeg se materijalu dovodi topline kroz zagrijanu plohu koja je s njime u kontaktu
- u ovom slučaju uklanjanje vode događa se na temperaturama većima ili jednakoj temperaturi vrenja vode za dotični tlak
- gustoća toplinskog toka  $q_\lambda$  koja konduktivno prolazi kroz stijenku i prelazi na vlažni materijal izračunava se iz izraza:

$$q_\lambda = k \cdot (\vartheta_z - \vartheta_p) \quad (3.6)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_k} + \frac{\delta_s}{\lambda_s} + \frac{\delta_{vt}}{\lambda_{vt}}} \quad (3.7)$$

gdje su  $\alpha_k$  koeficijent prijelaza topline konvekcijom na strani zagrijanog zraka,  $\lambda_s$  koeficijent toplinske provodnosti stijenke,  $\lambda_{vt}$  koeficijent toplinske provodnosti materijala,  $\delta_s$  debljina stijenke i  $\delta_{vt}$  debljina sloja materijala.

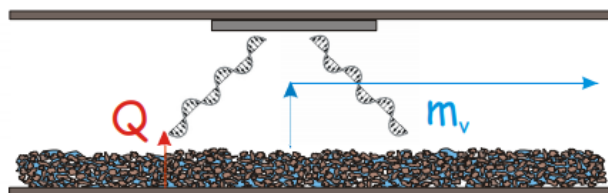


Slika 12. Prikaz prijenosa tvari i topline tijekom kondukcijskog sušenja [1]

## 3. radijacijsko sušenje:

- kod kojeg se visokofrekventnim elektromagnetskim zračenjem dovodi topline materijalu, čime se cijeli volumen jednoliko zagrijava posljedica čega je brže sušenje
- postoje dvije vrste radijacijskog sušenja ovisno o vrsti nosioca topline
  1. dielektrično sušenje:

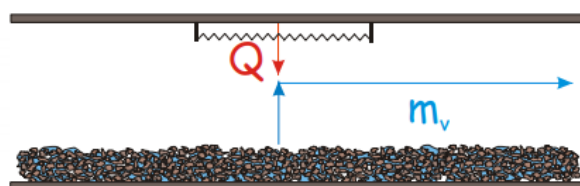
- nosioci topline su mikrovalovi ili radiofrekvencijski valovi
- ostvaruje se direktan prijenos topline



Slika 13. Prikaz prijenosa tvari i topline tijekom dielektričkog radijacijskog sušenja [1]

## 2. sušenje isijavanjem

- nosioci topline su elektromagnetni valovi
- toplina se prenosi do površinskog sloja drveta
- u unutrašnjost drveta toplina se prenosi kondukcijom



Slika 14. Prikaz prijenosa tvari i topline tijekom radijacijskog sušenja isijavanjem [1]

- gustoća toplinskog toka ostvarena zračenjem  $q_z$  jednaka je:

$$q_z = \alpha_{zr} \cdot (\vartheta_{zr} - \vartheta_p) \quad (3.8)$$

gdje su  $\vartheta_{zr}$  temperatura vruće površine,  $\vartheta_p$  temperatura površine materijala i  $\alpha_{zr}$  koeficijent prijelaza topline zračenjem.

## 4. sublimacijsko sušenje:

- kod kojeg se voda odvodi tako da se materijal prvo smrzne a onda izloži sniženome tlaku što uzrokuje sublimacije leda

Kako bi sušenje podijelili prema načinu vođenja procesa tada govorimo o:

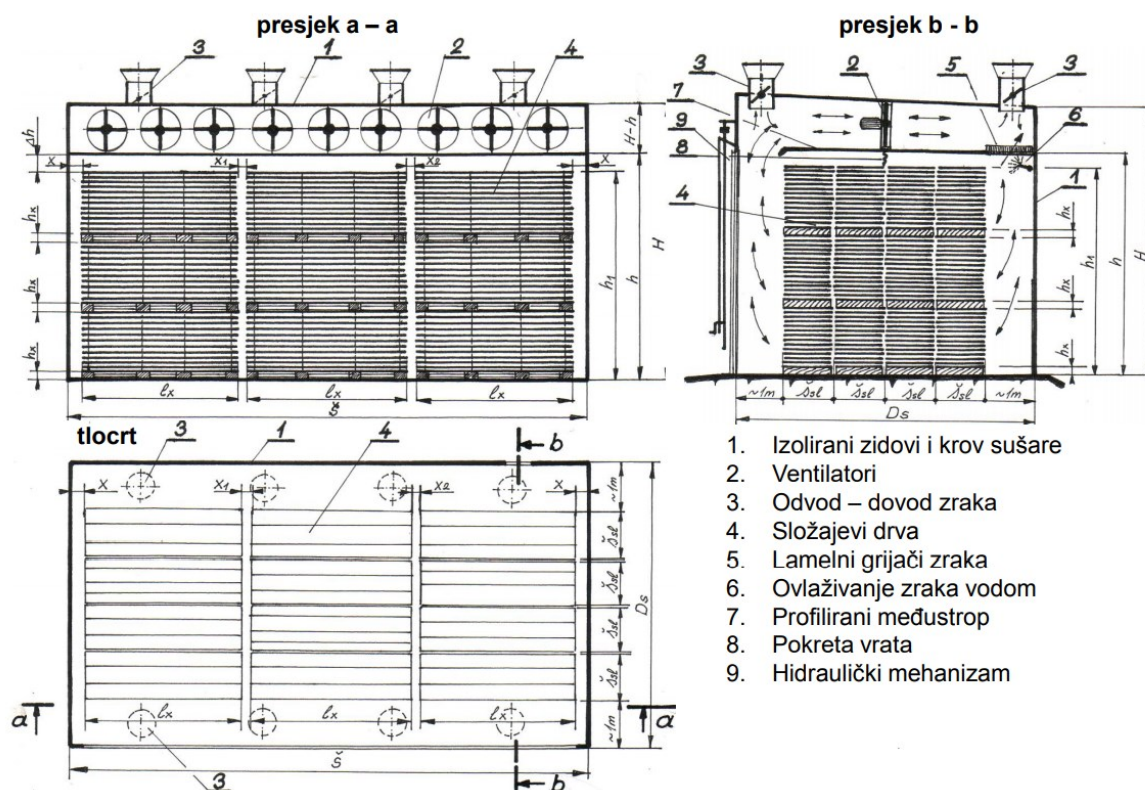
### 1. Adijabatskom sušenju:

- kod kojeg je početna entalpija zraka na ulazu u sušaru jednaka krajnjoj entalpiji zraka na izlazu iz sušare. Takvo sušenje provodi se konstantnim propuhivanjem vlažnog materijala nezasićenim zagrijanim zrakom koji preuzima ishlapljenu vodu.

2. Stepenastom sušenju:
- koje se provodi tako da se zrak u sušari u više navrata dogrijava
  - zbog toga što neke tvari ne podnose visoku temperaturu potrebno je u više faza povećavati i održavati temperaturu zraka kako ne bi došlo do neželjenih učinaka tijekom sušenja
  - kod ovakvog načina sušenja ostvaruje se ušteda topline u odnosu na jednokratno zagrijavanje zraka na konačnu temperaturu
3. Optočnom sušenju:
- koristi se kod sušenja prehrambenih proizvoda koji su osjetljivi na povišene temperature, a zahtijevaju jednoličnu brzinu sušenja
  - potrebno je uskladiti dinamiku ishlapljivanja s površine tvari i prispjeća vode iz unutrašnjosti na površinu tako što se kontrolira temperatura i vlažnost zraka unutar sušare
  - ukoliko se izvodi nepravilo, kod prehrambenih proizvoda dolazi do pokorice koja otežava difuziju vode iz unutrašnjosti

### 3.5. Osnovni elementi i uređaji za sušenje

U najvećem broju slučajeva drvo se suši konvekcijskim procesom u komorama za sušenje. Zbog svoje važnosti i zastupljenosti u drvenoj industriji u ovom poglavlju bit će opisani samo elementi konvektivne sušare. Na slici 15. prikazani su svi bitni dijelovi u uređaju za sušenje u konvektivnoj komornoj sušari.



Slika 15. Prikaz osnovnih elemenata za provedbu procesa sušenja [2]

### 3.5.1. Komora za sušenje

Komora za sušenje prema svojoj konstrukcijskoj izvedbi može biti izvedena kao montažna ili zidana. Obje izvedbe imaju svoje prednosti. Zidana je otpornija na koroziju te konstrukcijski i toplinski stabilnija, dok je prednost montažne to što je izgradnja i nadogradnja jednostavnija te se zagrijavanje u njoj lakše i brže odvija. Neovisno o izvedbi komore za sušenje, komora mora imati nisku toplinsku vodljivost, mora biti dobro brtvljena, otporna na koroziju te imati zadovoljavajuću nosivost. Na slici 16. prikazana je montažna komora za sušenje.



Slika 16. Prikaz komore za sušenje [2]

### 3.5.2. Izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline služe za zagrijavanje i održavanje temperature zraka ravnomjerno unutar čitave sušare tijekom konvektivnog sušenja. Najčešći mediji koji se koriste su: topla/vrela voda, suhozasićena para i termalno ulje. Na snagu izmjenjivača topline koji će se ugraditi utječu veličina komore za sušenje, željena temperatura zraka, brzina kojom se odvija sušenje i energija koja je potrebna za izlučivanje vode iz drva. Na slici 17. prikazan je izmjenjivač topline unutar komorne sušare.



Slika 17. Prikaz izmjenjivača topline unutar sušare [2]

Iako većina sušara imaa dotoke medija za zagrijavanje direktno iz kotlovnice, neke izvedbe zahtijevaju instalaciju toplinske podstanice u odvojenom dijelu sušare, slika 18.



Slika 18. Toplinska podstanica unutar sušare [5]

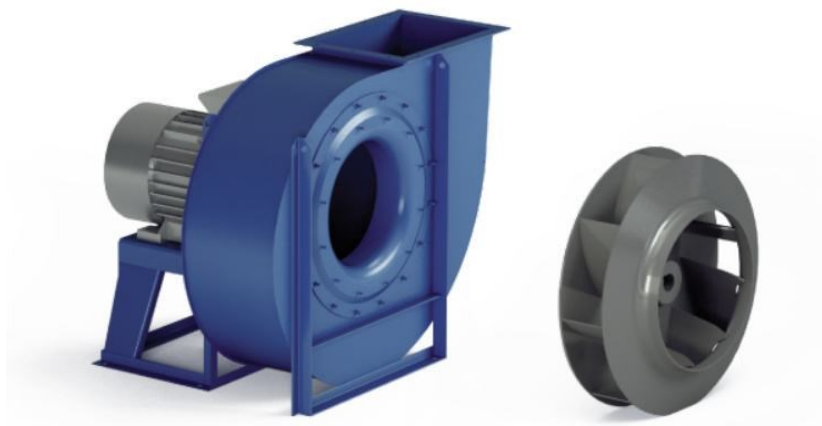
### 3.5.3. Ventilatori

Ventilatori unutar sušare izazivaju kruženje zraka, a prije svega moraju osigurati prijenos topline sa izmjenjivača topline na površinu drveta, uklanjanje vodene pare s površine drva te miješanje zračnih tokova kod izmjene zraka. Najkorišteniji ventilatori u komorama za sušenje su aksijalni ventilatori koji omogućuju strujanje velike količine zraka uz relativno malu snagu. Po potrebi mijenjanje smjera vrtnje što uzrokuje reverziranje smjera kruženja zraka, a uz to su jednostavnije izvedbe od drugih, jeftiniji su i lakše se ugrađuju. Nedostatak aksijalnih ventilatora jest postizanje dosta manje brzine u odnosu na druge izvedbe ventilatora (posebno u reverzibilnoj izvedbi) te veći pad tlaka što uvelike smanjuje ravnomjernost procesa sušenja. Na slici 19. prikazana je klasična izvedba aksijalnog ventilatora.



Slika 19. Prikaz aksijalnog ventilatora [6]

Za njima slijede radijalni ventilatori, slika 20., koji postižu veće brzine zraka, ali se sve manje koriste jer neravnomjerno prozračuju komoru, zahtjevnije su izvedbe i nemaju reverzibilan način rada, tj. nema mogućnosti promjene smjera kruženja zraka unutar sušare.



Slika 20. Prikaz radijalnog ventilatora [7]

#### 3.5.4. Ovlaživači zraka

Kako bi se održala stabilna vlažnost zraka potrebno je u nekim dijelovima procesa ovlaživati zrak. Za ovlaživanje cirkulirajućeg zraka koristi se voda visokog tlaka u sitnim česticama ili suhozasićena vodena para. Problem kod suhozasićene pare je taj što u proces unosi dodatnu toplinsku energiju što pak uzrokuje poremećaj u režimu sušenja. Na slici 21. prikazan je industrijski uređaj za ovlaživanje zraka unutar prostorija.



Slika 21. Prikaz industrijskog uređaja za ovlaživanje zraka [8]

#### 3.5.5. Izmjenjivači zraka

Uz ovlaživače zraka, za održavanje optimalne vlažnosti zraka unutar komore koriste se i izmjenjivači zraka. Prema izvedbi su otvori sa zračnicama i automatski upravljivim

poklopcima. Pomoću njih se smanje vlažnost zraka tako da se izbaci vlažni zrak iz komore i zamjeni sušim, okolišnim zrakom. Pažljivim dimenzioniranjem, pozicioniranjem i njihovim brojem osigurava se ravnomjerna promjena zraka u komori a time i ujednačen proces sušenja. Na slici 22. prikazan je izmjenjivač zraka kružnog otvora s pomičnom klapnom zaklopkom.



Slika 22. Prikaz kružne klapne za odzračivanje [9]

Uz izmjenjivače zraka kružnog presjeka često se izvode i izmjenjivači zraka s pravokutnim otvorom, slika 23. U oba slučaja klapna se pomiče pomoću servomotora tako da se regulacijom otvaranja može ostvariti što stabilnija količina vodene pare unutar sušare.



Slika 23. Prikaz pravokutnih bočnih otvora s pokretnom klapnom za odzračivanje [2]

### 3.6. Vrste sušara

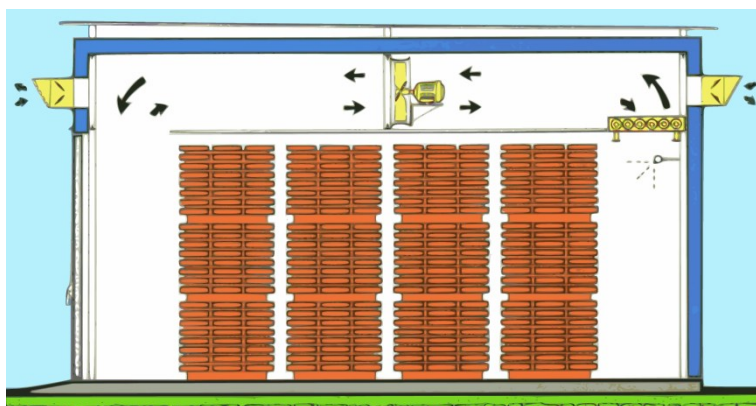
Budući da se proces sušenja može voditi na više načina, kombiniranjem dolje navedenih osobina to dovodi do toga da je nemoguće napraviti strogu podjelu vrsta sušara. Zbog toga možemo govoriti samo o podjeli sušara ovisno o nekim njenim karakteristikama, pa tako postoji podjela ovisno o :

- načinu dovođenja topline: konvektivne i konduktivne
- tlaku unutar sušare: atmosferske i vakuumske
- mediju unutar sušare: zrak, inertni plin, para
- načinu provođenja procesa sušenja: kontinuirane i diskontinuirane
- međusobnom smjeru strujanja zraka i drveta: istosmjerne, protusmjerne i unakrsne

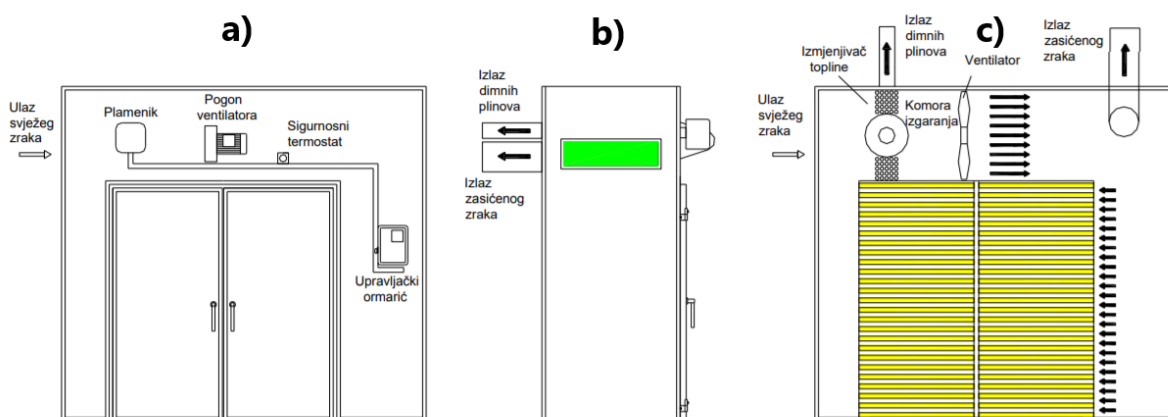
U daljnjem tekstu ukratko će biti opisane sušare s nekima od navedenih karakteristika.

### 3.6.1. Komorna sušare

Komorna sušare prostorija je odgovarajuće termodinamičke i konstruktivne stabilnosti u kojoj se prema potrebi mogu mijenjati režimi sušenja tako da se kontroliraju temperatura, relativna vlaga i brzina strujanja zraka unutar nje. Spada u skupinu konvektivnih jer se sušenje odvija konvekcijskim prijenosom topline s ugrijanog zraka na drvo. U komornim sušarama drvo se suši tako što je posloženo u pravilno oblikovane složajeve. Nedostatak ovih sušara je taj što sušenje traje relativno dugo, dolazi do neujednačenog sušenja drveta te potrebno je uložiti puno vremena i snage da se posloži složaj drva. Na slikama 24. i 25. prikazane su konvektivne komorne sušare u različitim pogledima i presjecima u svrhu što boljeg razumjevanja konstrukcije same sušare.



Slika 24. Prikaz kruženja zraka unutar komorne sušare [2]



Slika 25. Komorna sušara: a) nacrt, b) bokocrt, c) presjek [3]

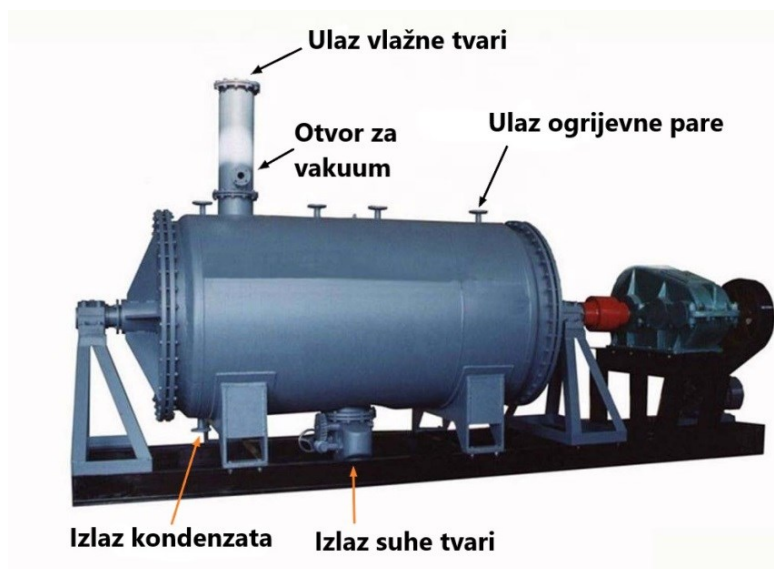


### 3.6.2. Komorna vakuum sušara

Za razliku od prethodno opisane komorne sušare, sušare ovakave izvedbe spadaju u skupinu konduktivnih sušara. U ovakvim se sušarama suše specifične tvari koje zahtijevaju malu količinu uklonjene vode. Tvar koja se suši postavlja se u posebne posude koje su naslonjene na izmjenjivače topline kroz koje protječe vrela/topla voda ili para. Preko cijevnih priključaka, a pomoću uređaja za stvaranje vakuuma, ostvaruje se vakuum unutar sušare za vrijeme sušenja. Nedostatak je taj što je količina izlučene vode iz tvari relativno mala, uz to, unošenje i iznošenje tvari izvodi se ručno.

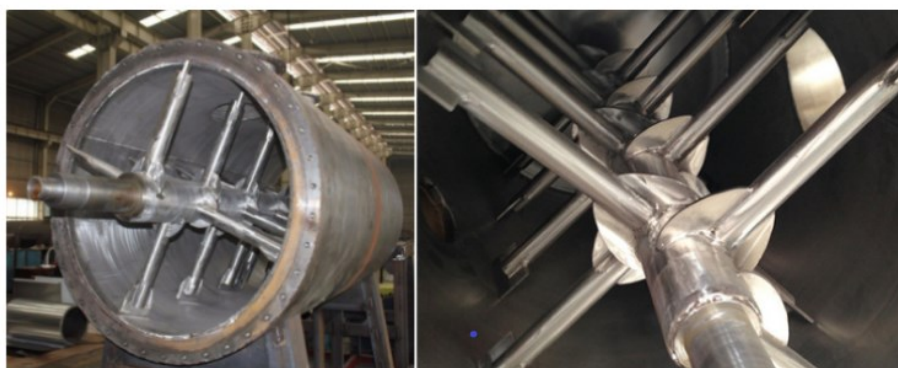
### 3.6.3. Valjkasta vakuum sušara

Kako bi se povećala efikasnost sušenja pomoću komorne vakuum sušare, ako je to moguće, zamjenjuju se valjkstima. Kod ovakve izvedbe tvar koja se suši ne miruje već se miješa mješalicom što uzrokuje uklanjanje veće količine vode. Ova se sušara sastoji od valjka u kojem je ugrađena mješalica koja se okreće prvo na jednu pa na drugu stranu kako bi se postiglo što ujednačenije i efikasnije sušenje te se sprječava nagomilavanje tvari na jednu stranu. Na slici 26. prikazana je valjkasta vakuum sušara sa označenim ključnim dijelovima.



Slika 26. Prikaz valjkaste vakuum sušare [10]

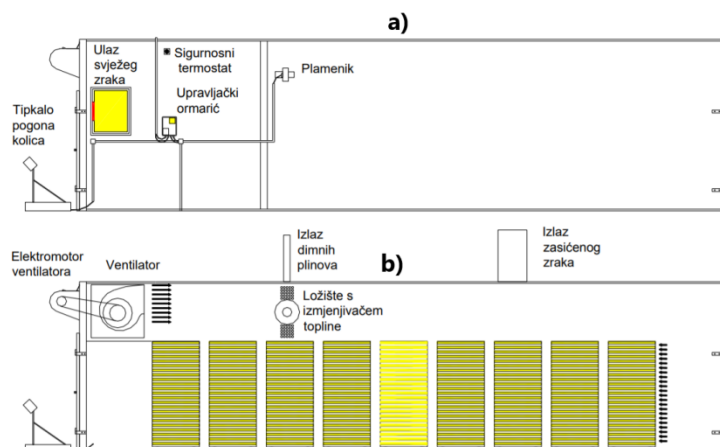
Slika 27. prikazuje mješalicu s lopaticama koja se nalazu unutar cilindrične komore sušare.



Slika 27. Prikaz mješalica unutar valjkaste vakuum sušare [10]

### 3.6.4. Tunelska sušara

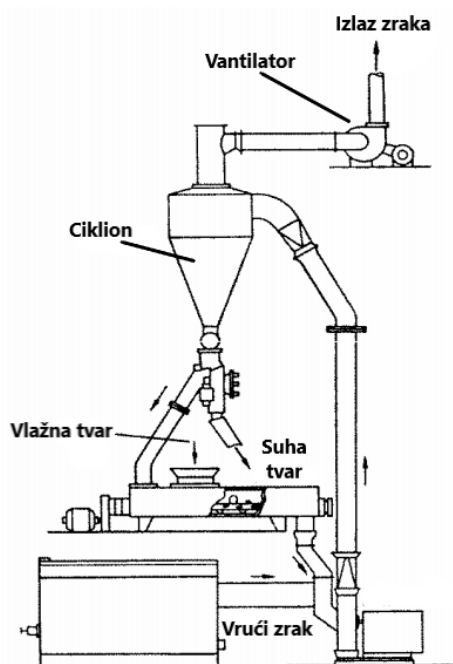
Ova sušara slična je komornoj konvektivnoj sušari samo što je znatno dulja te ima pokretne složajeve. Također spada u skupinu konvektivskih sušara, ali u ovom slučaju ima i osobinu istosmjerne sušare jer tvari ulazi i izlazi iz sušare u smjeru strujanja zraka. Za razliku od komorne, ovakva izvedba sušare ima znatno bolju efikasnost jer se dio zraka ispušta u okoliš a dio vraća u proces kako bi se zagrijao svježiji zrak. Slika 28. prikazuje konstrukcijsku izvedbu tunelske sušare s označenim ključnim uređajima i dijelovima.



Slika 28. Bočni prikaz i presjek tunelske sušare [3]

### 3.6.5. Pneumatska sušara

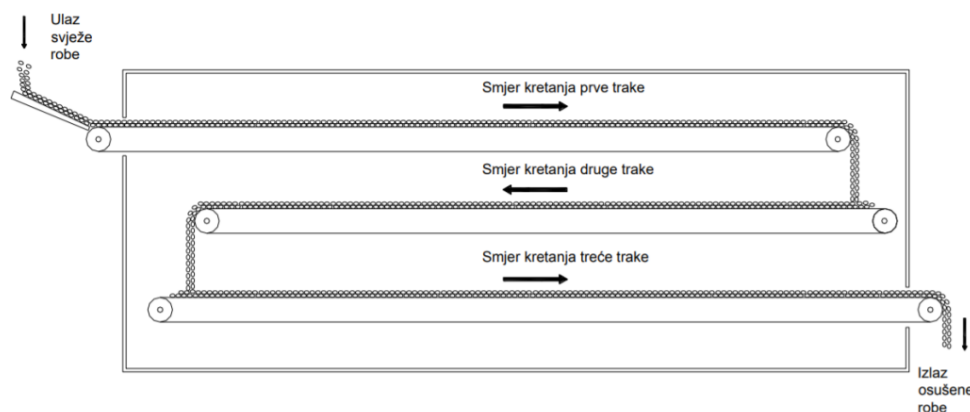
Pneumatska sušara, slika 29., koristi se za sušenje malih, zrnatih tvari dimenzija od 8 do 10 mm. Postupak se odvija tako da se tvar pomoću dozatora usipa u lijevak te se onda u vertikalnoj cijevi transportira strujom toplog zraka do cikliona gdje se odvaja. U ovakvom procesu uklanja se uglavnom samo slobodna vlaga tvari.



Slika 29. Prikaz funkcioniranja pneumatske sušare [4]

### 3.6.6. Trakasta sušara

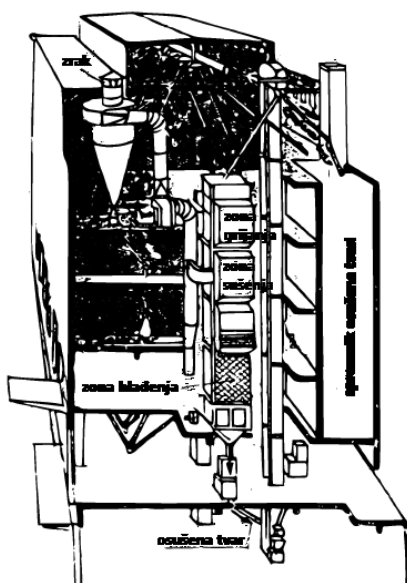
Konstruktivski je napravljena tako da se unutar komore nalaze pokretni valjci na koje su postavljene trake. Sama izvedba valjaka i traka takva je da tvar kod svake promjene smjera pada na donju razinu trake sve dok ne dođe do izlaza. Ventilatori se nalaze s bočne strane što ju svrstava u unakrsne sušare ovisno o smjeru kretanja tvari i zraka. Prednost naspram prethodno spomenutih vrsta sušara je ta što se ovdje tvar ravnomjernije suši jer se tijekom procesa više puta okreće. Na slici 30. može se vidjeti spuštanje tvari po razinama od ulaza do izlaza iz sušare.



Slika 30. Prikaz rada trakaste sušare [3]

### 3.6.7. Protočna sušara

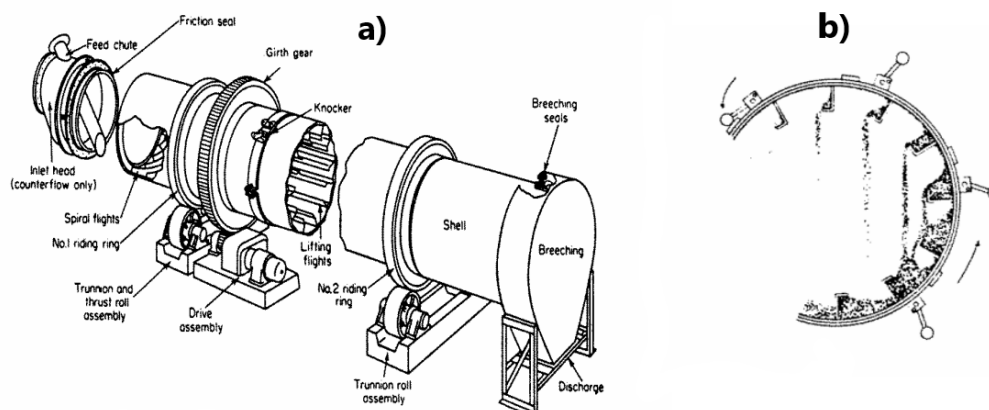
Protočna sušara, slika 31., koristi se za sušenje žitarica i uljarica. Proces se sastoji od četiriju faza: grijanja, sušenja, hlađenja i dosušivanja. Tvar se prvo odvaja u ciklioni, odvodi kroz usipni lijevak nakon čega prolazi kroz sušaru. Tvar se nakon sušenja okreće u prevrtačima i izlazi na dnu. Konstrukcijski je sušara pravokutnog oblika, a njena visina ovisi o vlažnosti tvari, odnosno o količini vode koju je optrebno ukloniti.



Slika 31. Prikaz protočne sušare [4]

### 3.6.8. Sušara s rotirajućim valjkom

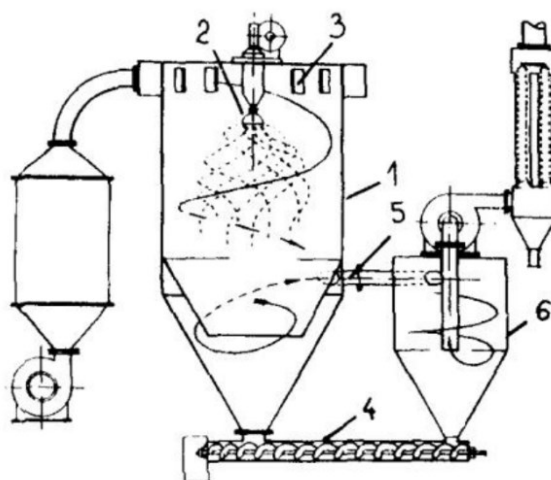
Kod ovakve je izvedbe rotirajući valjak, unutar kojeg se odvija sušenje, nagnut malo na jednu stranu čime transportira tvar do izlaza. Najčešće se koristi za sušenje žitarica i sjemenki iz kojih se ekstrahira ulje. Na slici 32. prikazana je konstrukcijska izvedba sušare s presjekom koji prilazuje lopatice za miješanje unutar valjka.



Slika 32. Sušara s rotirajućim valjkom: a) prikaz dijelova, b) prikaz unutrašnjih lopatica [4]

### 3.6.9. Sušara raspršivač

Proces sušenja u ovakvim sušarama odvija se tako da se praškasta tvar suši unutar tornja. Tvar ulazi u toranj kroz raspršivač i suši se strujom toplog zraka. Suha praškasta tvar zatim pada na dno tornja, skuplja se i odvodi pužnicom. Zrak koji se koristio za sušenje izlazi iz tornja, odvodi se u ciklione za pročišćavanje iz kojih se izbacuje van ili se ponovno koristi. U komori se zrak može kretati istosmjerno ili protusmjerno u odnosu na smjer gibanja tvari. Nedostatak ove vrste sušare je taj što je efikasnost mala, sušara zbog svojih dimenzija zahtijeva relativno puno mjesta i sušenje je vrlo skupo. Na slici 33. konstrukcijski je prikazana sušara koja radi na principu sušenja tvari raspršivanjem unutar tornja.



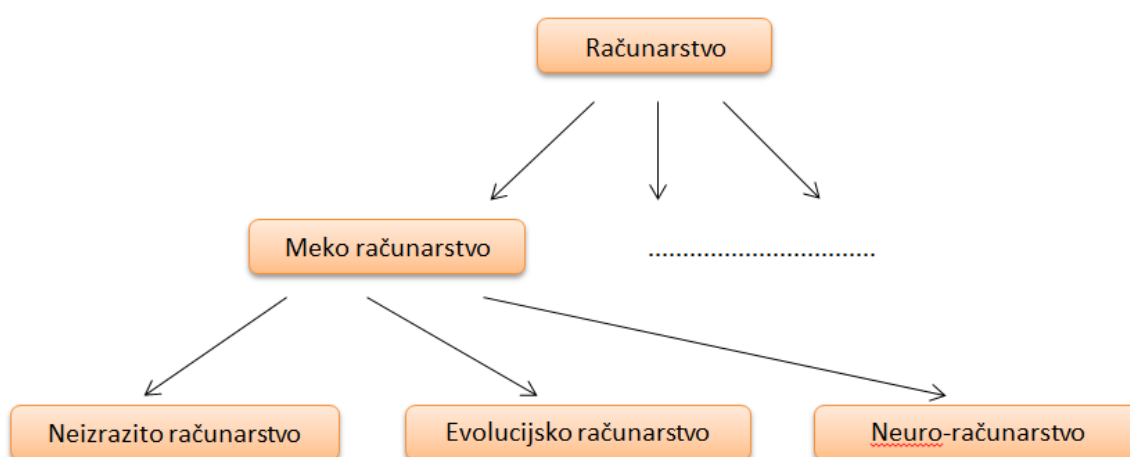
Slika 33. Prikaz sušare raspršivača [11]

## 4. NEURONSKE MREŽE

Umjetne neuronske mreže predstavljaju projekt koji imitira rad ljudskog mozga u procesu učenja i zaključivanja. Temelj za opću strukturu umjetnog neurona postavio je William James 1890. godine svojom izjavom da se aktivnost bilo koje točke čovjekova mozga predstavlja zbrojem nastojanja svih ostalih točaka da se prazne ili ispaljuju u nju [14]. Nakon njega, neuronsku mrežu definirali su: Robert Hecht-Nielsen - kao mrežu paralelno distribuiranih informacijskih struktura koja se sastoji od elemenata procesiranja koji su povezani u slojeve jednosmjernim vezama [20], te Alexander i Morton prema kojima je neuronska mreža „masivni paralelni distribuirani sustav za obradu podataka koji se sastoji od jednostavnih elemenata i ima prirodnu sklonost pohranjivanja iskustvenog znanja koje potom može i koristiti, a sličan je mozgu prema načinu na koji stječe i pohranjuje znanje” [19].

Razvojem umjetnih neuronskih mreža želi se simulirati rad i funkcije ljudskog mozga u svrhu stvaranja umjetne inteligencije koja bi olakšala život ljudima. Kroz povijest, ljudski razvoj tekao je relativno sporo u usporedbi s današnjim zbivanjima. Promjene koje se trenutno događaju u svijetu, u tehnološkom smislu i količini informacija, toliko su velike da se količina ukupnog znanja svijeta, prema nekim procjenama, udvostručuje svake tri godine. Kako bi se olakšao rad s tolikom količinom informacija došlo je do potrebe stvaranja umjetne inteligencije. Iako je to danas postala potreba, ljudska vrsta oduvijek je željela razumijeti na koji način nastaje inteligencija te može li se stvoriti umjetni sustav sličan ljudskom [15]. Umjetna neuronska mreža slična je ljudskom kao i životinjskom mozgu jer znanje kojim rješava određene zadatke stječe kroz proces učenja, a međusobne veze između neurona koristi za spremanje znanja.

Dio računarstva koji se bavi razvojem i uporabom umjetnih neuronskih mreža naziva se neuro-računarstvo, a deklarirano je u skupini mekog računarstva. Unutar tog dijela računarstva smjestile su se metode i pristupi koji teže izgradnji umjetne inteligencije. Na slici 34. može se vidjeti osnovna podjela mekog računarstva.



Slika 34. Podjela računarstva na podcjeline [15]

Pod tim pojmom obuhvaćene su metode koje koriste neizrazitu logiku za oblikovanje tehničkih sustava, evolucijsko računarstvo koje se bavi izgradnjom sustava temeljenih na teoriji evolucije, te neuro-računarstvo koje teži razviti sustave konceptualno slične arhitekturi i načinu rada mozga.

## 4.1. Primjena neuronskih mreža

Neuronske mreže danas se koriste uglavnom za klasifikaciju. To je proces određivanja klase kojoj ulazni podatak pripada. Uz to, neuronske mreže koriste i funkcijsku regresiju kod koje se na temelju zadanih podataka pokušava izraditi aproksimacijska funkcija.

Primjer klasifikacijskog zadatka je taj gdje se na temelju boje, oblika i marke proizvođača određuje pripada li predmet na slici određenoj skupini crvenih automobila. S druge strane, primjer funkcijske regresije je takav problem kod kojeg se na temelju prošlih rezultata i odluka trenera, trenutnih karakteristika tima i forme nogometnih klubova simulira i predviđa na kojoj će poziciji određeni klub biti u zadanom vremenskom razdoblju.

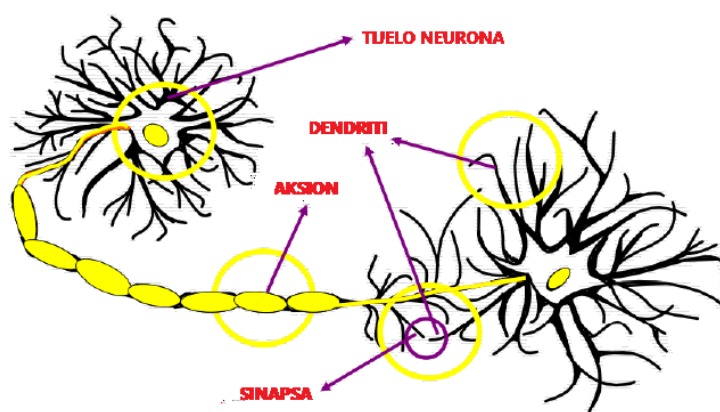
Konkretna primjena umjetnih neuronskih mreža u raznim područjima su:

- obrada jezika – sustavi za pretvorbu teksta u govor, sigurnosni sustavi za prepoznavanje govornika na temelju karakteristika njegova govora, sustavi za automatsku transkripciju, sustavi za simulaciju govora
- prepoznavanje pisanih znakova – sustavi koji skeniranjem stranice rade detekciju teksta tako da se segmentiraju retci, riječi i prepoznaju slova pri čemu tekst može biti pisan rukom ili štampan.
- kompresija slika – sustavi za kompresiju i dekompresiju podataka u stvarnom vremenu
- prepoznavanje uzoraka - sustavi koji pomoću kamera i zadanih ulaznih podataka prepoznaju određeni oblik, sustavi za prepoznavanje lica, sustavi za prepoznavanje opasnih predmeta na temelju snimke prtljage, u medicini sustavi za prepoznavanje raka, sustavi predviđanje mogućnosti poplave na temelju mjerenja vodostaja, količine kiše i buduće prognoze vremena
- obrada signala – sustavi za uklanjanje šuma, sustavi za identifikaciju izvora signala, sustavi za detekciju signala, sustavi za uklanjanje interferencije signala
- financije – sustavi za procjenu rizika od bankrota i kreditnog rizika, sustavi za predviđanje vrijednosti dionica
- upravljanje i regulacija – neuronske mreže za modeliranje dinamičkih sustava, adaptivno upravljanje, upravljanje inverznim njihovom, upravljanje vozilom, upravljanje industrijskim robotima i slično

## 4.2. Opis prirodni i umjetnih neuronskih mreža

### 4.2.1. Prirodni neuroni

Budući da su umjetne neuronske mreže razvijene po uzoru na ljudski mozak potrebno je prije svega pojednostavljeno opisati rad prirodnih neurona. Neuroni su osnovni elementi mozga čija je funkcija odašiljanje elektro-kemijskih signala u svrhu obrade podataka dobivenih podražajem. Ljudski mozak građen je od oko  $10^{11}$  neurona koji su u prosjeku povezani s 10,000 drugih neurona [17]. Ta umreženost govori nam da je funkcioniranje mozga temeljeno na paralelnoj obradi podataka. U mozgu se nalazi oko 100 različitih vrsta neurona od kojih svaka ima točno definiran raspored ovisno o njihovoj funkciji [17]. Unatoč njihovoj raznolikosti, svaki prirodni neuron građen je od četiri osnovna dijela: tijela stanice, dendrita, aksiona i niza sinapsi. Slika 35. prikazuje shematsku građu prirodnog neurona.

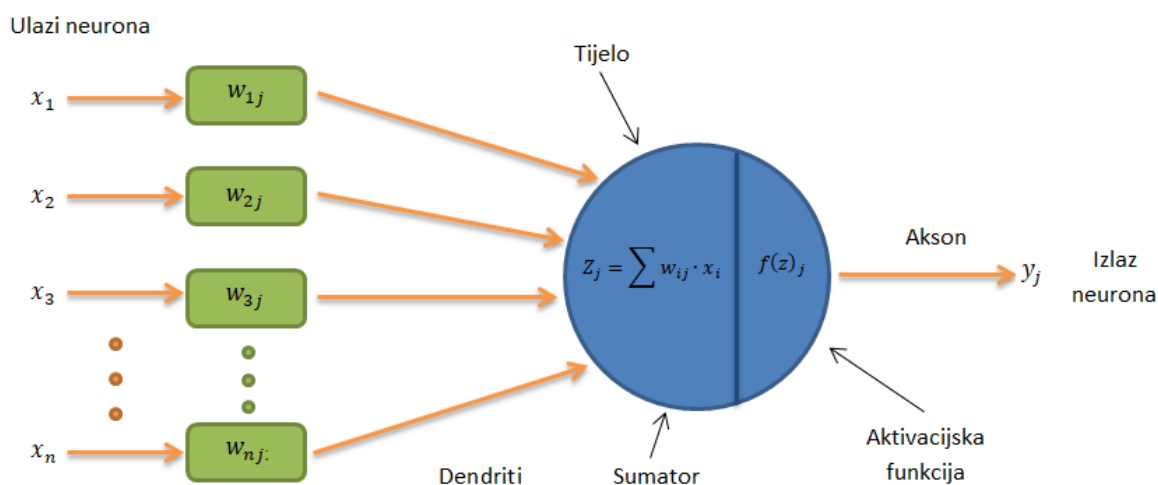


Slika 35. Shematski prikaz prirodnog neurona [18]

Na tijelu neurona može se vidjeti niz razgranatih završnih članaka koji se zovu dendriti. Njihova zadaća je primanje signala od strane drugih neurona u vidu post-sinaptičkog potencijala čime se povećava ili smanjuje potencijal neurona. Nakon što se u tijelu neurona sumiraju zaprimljeni signali te time dosegne određena razina, neuron ispaljuje impuls prema drugom neuronu s kojim je povezan preko aksiona. Na temelju toga lako je zaključiti da su informacije koje sadržimo u obliku električnog potencijala. Kao što se vidi na slici 35., aksion na kraju neurona ima skup sinapsi povezanih s dendritima drugih neurona. Sinapse po prirodi mogu biti ekscitatorne ili inhibitorne, ovisno o tome pojačavaju li ili prigušuju impuls prema drugom neuronu.

#### 4.2.2. Umjetni neuroni

Umjetni neuroni koji imitiraju funkcionalnost prirodnog nazivaju se *Threshold Logic Unit* (TLU) neuroni. Na slici 36. može se vidjeti općeniti model umjetnog neurona koji prema analogiji ima jednake funkcije kao i prirodni. Nakon što su signali, koji su opisani numeričkim iznosom, pomnoženi s težinskom funkcijom na ulazu u neuron, sumiraju se analogno procesu sumiranja potencijala prirodnog neurona. Ako vrijednost dobivena sumiranjem prelazi zadanu razinu, neuron daje izlazni signal. Kod umjetnih neuronskih mreža težinske funkcije označavaju jakost sinaptičkih veza.



Slika 36. Shematski prikaz umjetnog neuroma

Ulazni signali, kojih ima ukupno  $n$  predstavljaju dendrite umjetnog neurona i označavaju se sa  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Preko dendrita neuron prima pobudu od prethodnih neurona. Težinske funkcije, odnosno jačine sinapsi, označavaju se sa  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ . One određuju kojom će jačinom ulazni signal utjecati na neuron. Kada je težinska funkcija negativnog predznaka, ona raducira djelovanje određenog ulaza na neuron, dok ga pozitivne pojačavaju. Po uzoru na biološki neuron, svi zaprimljeni ulazni signali sumiraju se u jedan zajednički potencijal unutar tijela umjetnog neurona. Suma ulaznih signala označava se sa  $Z_j$  i računa se pomoću izraza:

$$Z_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i . \quad (3.1)$$

Akson umjetnog neurona prikazn je kao aktivacijska funkcija koja modelira i određuje konačan izlaz neurona.

Prema utjecaju na podatak izlaza sumatora, aktivacijska funkcija može biti linearna i nelinearna. Linearne aktivacijske funkcije samo pojačavaju izlaze sumatora s određenim koeficijentima, dok pomoću nelinearnih izlazi mogu poprimiti različite oblike. Više o aktivacijskim može se pročitati u sljedećem potpoglavlju.

### 4.3. Aktivacijske funkcije

Uspoređujući s prirodnim neuronom ljudskog mozga, aksion umjetnog neurona predstavlja aktivacijsku funkcija koja modelira i određuje konačan izlaz  $y$  neurona prema izrazu:

$$y = f(\text{net}) , \quad (3.2)$$

gdje  $\text{net}$  označava zbroj ulaznih signala, odnosno  $Z_j$ .

Kod građenja umjetnih neuronskih mreža koristi se niz različitih aktivacijskih funkcija kao što su step funkcija, sigmoidalna funkcija, linearna i hiperbolna funkcija. Razvojem dubokih neuronskih mreža za koje je karakteristično da imaju velik broj skrivenih slojeva sve se više koriste zglobnica, propusna zglobnica i *max-out* neuroni.

#### 4.3.1. Step funkcija

Već predstavljani *TLU* neuron koristi step aktivacijsku funkciju koja je definirana izrazom:

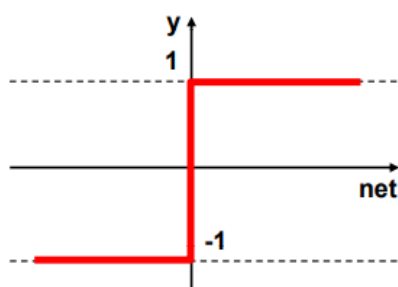
$$\text{step}(\text{net}) = \begin{cases} 0, & \text{net} \leq 0 \\ 1, & \text{net} \geq 0 \end{cases} . \quad (3.3)$$

U nekim slučajevima koristi se alternativna definicija step funkcije kod koje je izlaz step funkcije između -1 i 1. Prema tome izvorni izraz prelazi u:

$$\text{step}(\text{net}) = \begin{cases} -1, & \text{net} \leq 0 \\ 1, & \text{net} \geq 0 \end{cases} . \quad (3.4)$$

Na slici 37. prikazana je alternativna definicija step funkcije koja ima granice -1 i 1.





Slika 37. Step aktivacijska funkcija [18]

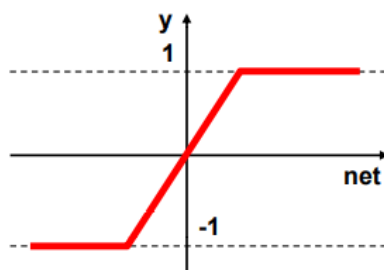
Negativno svojstvo ove aktivacijske funkcije je to što je nemoguće koristiti postupke učenja temeljene na derivacijama jer bi derivacija na cijelom području imala konstantnu vrijednost 0 dok bi za  $net = 0$  funkcija imala prekid.

### 4.3.2. Linearna funkcija

Linearna aktivacijska funkcija definirana je izrazom:

$$\text{lin}(net) = \begin{cases} 0 & net \leq a \\ net & a < net < b \\ 1 & net \geq b \end{cases} \quad (3.5)$$

Kao i kod step funkcije, alternativnim definiranjem linearna funkcija u krajnjim slučajevima poprima vrijednosti -1 i 1, što se može vidjeti na slici 38.

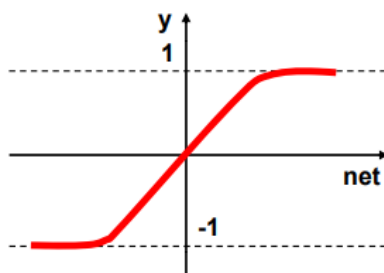


Slika 38. Linearna aktivacijska funkcija [18]

### 4.3.3. Sigmoidna funkcija

Sigmoidna aktivacijska funkcija modifikacija je step funkcije. To se objašnjava tako da se vrijednosti od 0 do 1 postupno mijenjanju, što ju za razliku od step funkcije čini derivabilnom. To svojstvo omogućuje da se neuronske mreže izgrađene s ovom aktivacijskom funkcijom mogu koristiti za učenja temeljena na gradijentnom spustu. Sigmoidna funkcija prikazana je na slici 39., a definirana je izrazom:

$$\text{sigm}(net) = \frac{1}{1 + e^{-net}} \quad (3.6)$$



Slika 39. Sigmoidna aktivacijska funkcija [18]

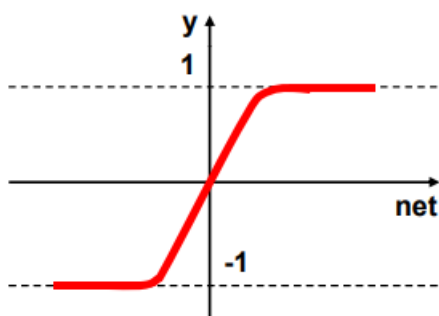
Posebno svojstvo ove funkcije jest da se njezna derivacija može izraziti preko nje same, prema izrazu:

$$\frac{d \text{sigm}(\text{net})}{d \text{net}} = \text{sigm}(\text{net}) \cdot (1 - \text{sigm}(\text{net})). \quad (3.7)$$

#### 4.3.4. Tangens hiperbolna funkcija

Kao i u slučaju sigmoidne funkcije, ova se funkcija može smatrati poopćenom funkcijom step funkcije jer je derivabilna. Njezine vrijednosti, koje se postupno mijenjaju između -1 i 1, imaju puno oštrije nagim promjene nego kod sigmoidne. Na slici 40. prikazana je tangens hiperbolna funkcija s granicama -1 i 1, a definirana je izrazom:

$$\tanh(\text{net}) = \frac{2}{1 + e^{-\text{net}}} - 1. \quad (3.8)$$



Slika 40. Tanges hiperbolna aktivacijska funkcija [18]

Posebno svojstvo ove funkcije jest to što se može jednostavno prikazati izravno pomoću sigmoidne aktivacijske funkcije prema izrazu,

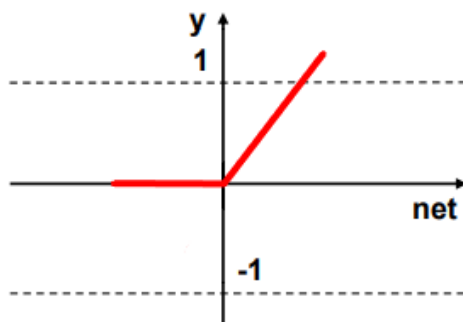
$$\tanh(\text{net}) = 2 \cdot \text{sigm}(2 \cdot \text{net}) - 1, \quad (3.9)$$

a njena derivacija može se zapisati preko nje same:

$$\frac{d \tanh(\text{net})}{d \text{net}} = 1 - \tanh^2(\text{net}). \quad (3.10)$$

### 4.3.5. ReLU funkcija

Ova se funkcija još naziva i zglobnica jer je njeno svojstvo to da propušta sve vrijednosti veće od nule bez prigušivanja, dok s druge strane eliminira sve negativne vrijednosti. ReLU funkcija može se vidjeti na slici 41.



Slika 41. ReLU aktivacijska funkcija

Definicija zglobnice određena je izrazom:

$$\text{relu}(\text{net}) = \max(0, \text{net}), \quad (3.11)$$

a njezina derivacija iznosi:

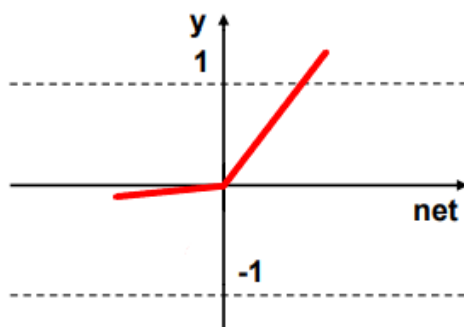
$$\frac{d \text{relu}(\text{net})}{d \text{net}} = \begin{cases} 1 & \text{net} > 0 \\ 0 & \text{inačn} \end{cases}. \quad (3.12)$$

Problemi kod ove funkcije javlju se pri negativnim ulaznim podacima jer njihove izlaze postavlja na 0, a samim time i derivacija je u tome područj jednaka 0. Ovo stvara problem kod učenja koje se temelji na uporabi derivacija jer će neuroni, koji imaju sve ulaze u negativnom području, biti neupotrebljivi, tj. učenje ih neće moći prilagođavati.

Kako bi se riješio taj problem ReLU funkcija je modificirana u propusnu zglobnu funkciju koja, za razliku od zglobnice, propušta negativne vrijednosti s određenim prigušenjem  $\alpha$ . Određena je izrazom:

$$\text{lrelu}(\text{net}) = \begin{cases} \text{net} & \text{net} > 0 \\ \alpha \cdot \text{net} & \text{net} \leq 0 \end{cases}, \quad (3.13)$$

Na slici 42. prikazana je propusna zglobna funkcija.



Slika 42. Modificirana ReLU aktivacijska funkcija

Ovako definirana funkcija koristi se za učenja temeljena na derivacijama jer joj je derivacija na čitavom području različita od nule :

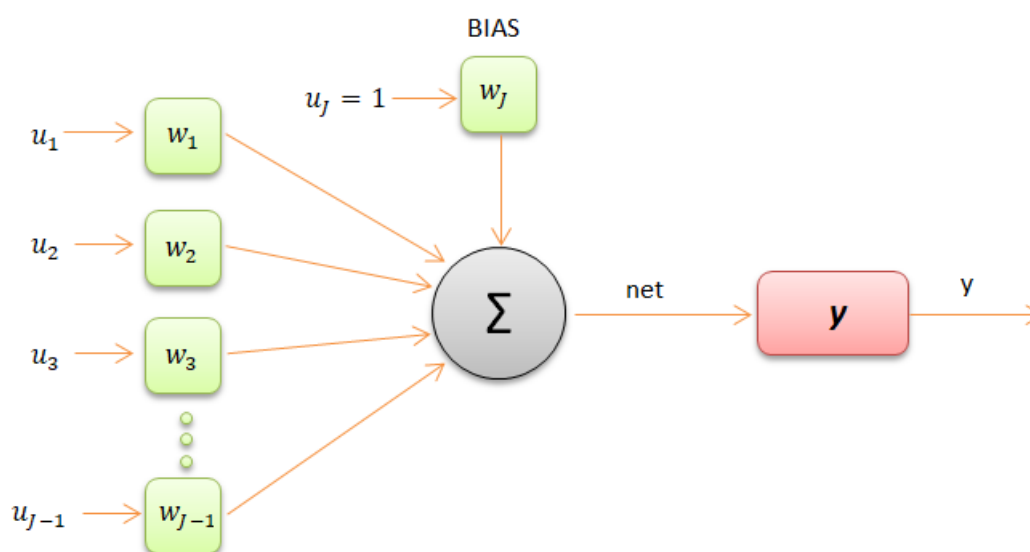
$$\frac{d \text{relu}(net)}{d net} = \begin{cases} 1 & net > 0 \\ \alpha & net \leq 0 \end{cases} \quad (3.14)$$

## 4.4. Višeslojne neuronske mreže

### 4.4.1. Statičke neuronske mreže

Statičke neuronske mreže karakteristične su po tome što je njihov raspored neurona unaprijedan, tj. ne postoji povezivanje neurona pomoću povratne veze. Iz same definicije statičkih mreža jasno je da te neuronske mreže ne sadržavaju dinamičke članove. To svojstvo strukturu mreže čini stabilnom. Ovakav tip neuronskih mreža najčešće se primjenjuje kod sustava za prepoznavanje oblika, obrade signala, identifikacije te za upravljanje procesima.

Na slici 43. prikazan je osnovni statički neuron koji je sastavljen od dvije temeljne podfunkcije: funkcije sume  $\Sigma$  i aktivacijske funkcije  $\gamma$  [21].



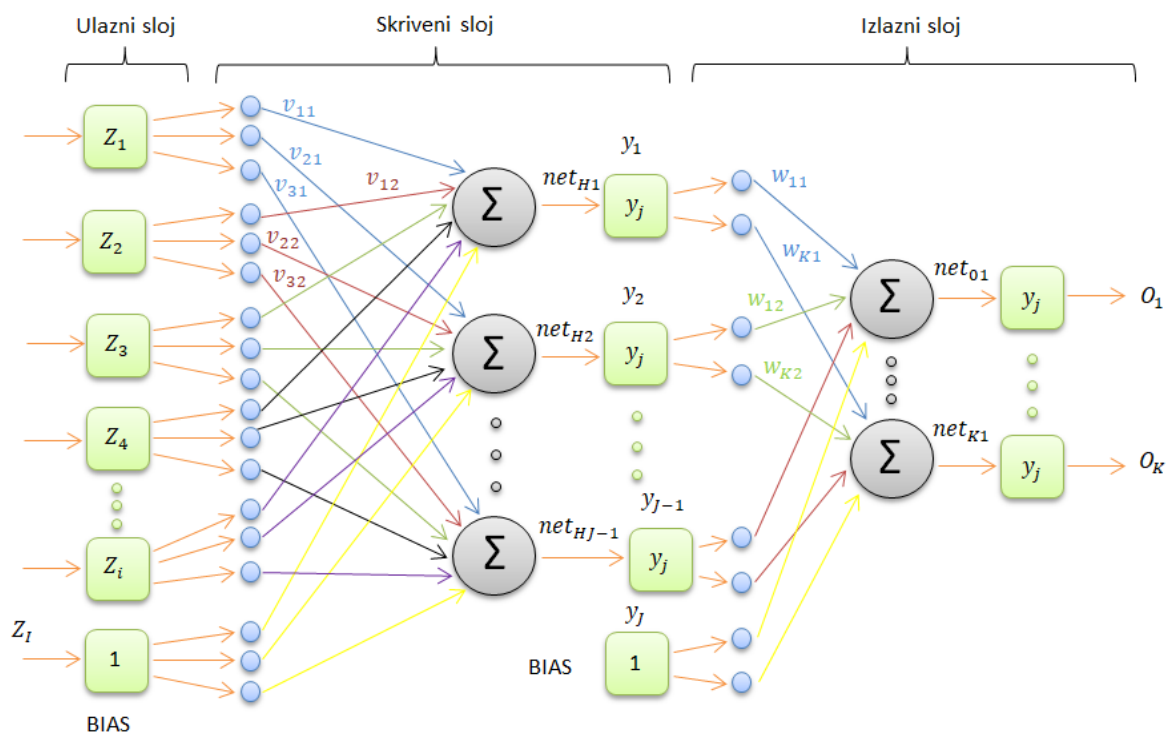
Slika 43. Shematski prikaz statičkog neurona

Kao što je prikazano na slici 43., svaki neuron statičke mreže u procesu učenja mora posjedovati poseban ulaz jedinične vrijednosti. Takva struktura realizira se dodavanjem *bias* neurona konstantnog izlaza vrijednosti jedan [21].

Svaka statička unaprijedna neuronska mreža (Static Neural Network, SNN), prikazana na slici 44., sastoji se od tri glavne skupine neurona: ulaznog, skrivenog i izlaznog. Postupcima unošenja vrijednosti ulaznih neurona i preuzimanjem izračunatih vrijednosti izlaznih neurona, jasno je da su ulazni i izlazni slojevi neurona u izravnoj interakciji s okolinom. S druge strane, skriveni sloj ponaša se kao „crna kutija“. To znači da, iako je broj neurona i slojeva skrivenog dijela neuronske mreže proizvoljan, ne znamo što se događa s podacima. Navedeni slojevi - ulazni, skriveni i izlazni slojevi neuronske mreže - međusobno s povezani vezama.

Te veze između neurona susjednih slojeva predstavljene su sinaptičkim težinskim koeficijentima koji djeluju kao pojačala signala.

Iznosi sinaptičkih težinskih koeficijenata određuju vladanje mreže, odnosno njezina aproksimacija svojstva. Prilagođavanje njihovih optimalnih iznosa ostvaruje se algoritmima učenja.



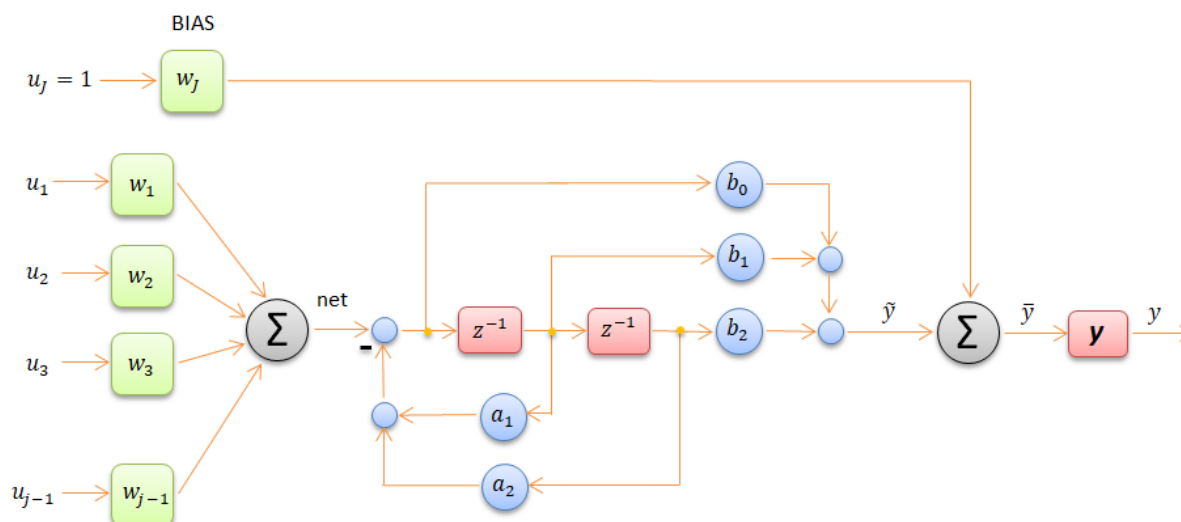
Slika 44. Shematski prikaz statičke neuronske mreže

Na slici 44. u ulaznom sloju indeks „I“ neurona predstavlja broj ulaznih neurona uvećan za jedan, bias neuron. U skrivenom sloju indeks „J“ označava ukupan broj neurona naznačenog sloja, dok indeks „K“ govori koliko izlaznih neurona ima neuronska mreža na samome izlazu. Uz to, vidljivo je stabilna struktura u kojoj je jedan neuron sloja povezan sa svim neuronima prethodnog sloja. Jedini izuzetak su *bias* neuroni koji nisu povezani s neuronima prethodnog sloja.

#### 4.4.2. Dinamičke neuronske mreže

Na slici 45. prikazan je opći model dinamičkog neurona. Promatrajući sliku, mogu se uočiti povratne veze u strukturi. Takva struktura za sobom vuče to svojstvo da su izlazi iz dinamičkih neurona ovisni o: trenutnim ulaznim vrijednostima, trenutnim vrijednostima težinskih funkcija te o prošlim stanjima težinskih funkcija.

Za razliku od statičkog neurona, u ovakvoj konstrukciji prostiranje signala događa se u oba smjera, unaprijed i unazad preko povratnih veza.



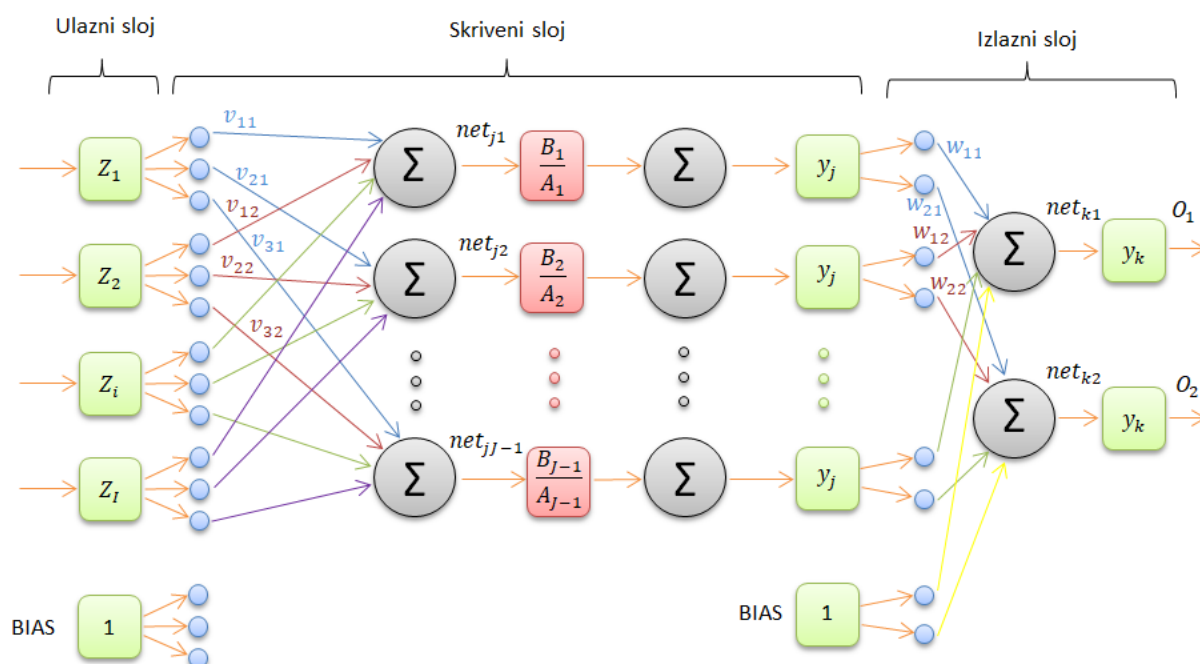
Slika 45. Shematski prikaz dinamičkog neurona

Poopćeni model dinamičke neuronske mreže može se vidjeti na slici 46. Ovakav tip neuronskih mreža koristi se za rješavanje problema koji zahtijevaju čuvanje i korištenje prošlih, već upotrebljenih informacija. U ovakvim slučajevima statička mreža je neupotrebljiva.

Zbog svoje kompleksnosti dinamičke mreže se, u odnosu na statičke, koriste znatno rjeđe. Problemi se javljaju zbog njihove nezagarantirane stabilnosti i zahtjevnog procesa učenja. Budući da izlazi dinamičke neuronske mreže ovise o prošlim ulaznim vrijednostima, loš odabir početnih uvjeta može rezultirati sporim i neefikasnim učenjem. Preporuča se da se koriste samo u nužnim situacijama kada statična mreža ne može dati zadovoljavajuće ponašanje.

Najpoznatije dinamičke neuronske mreže su:

- Elmanove mreže
- NARX mreže
- Hopfildove mreže



Slika 46. Shematski prikaz dinamičke neuronske mreže

## 4.5. Učenje neuronskih mreža

Učenje neuronskih mreža zasniva se na podešavanju težinskih koeficijenata između slojeva mreže tako da se izlazi, koje neuronska mreža daje za određene ulaze, što više približe željenim iznosima. Težine se tijekom postupka učenja mogu neprestano podešavati sve do trenutka kada izlaz, u odnosu na podatke za testiranje, ne daje zadovoljavajuće malu grešku. Težinski koeficijenti neuronske mreže važni su zbog toga jer je u njima pohranjeno naučeno znanje o obradi podataka kao funkcija ulaza.

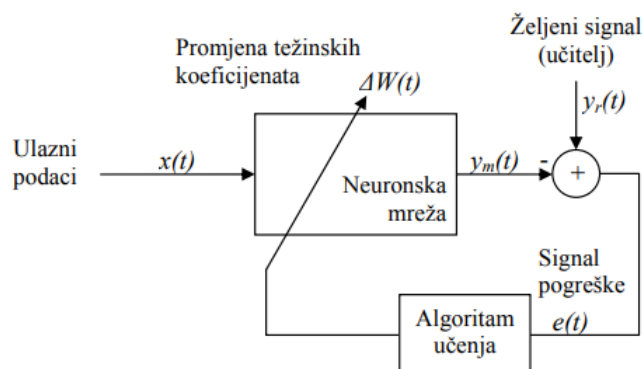
Skup podataka koji se daje mreži za učenje dijeli se na: skup podataka za učenje s kojima se podešavaju koeficijenti težina, skup podataka za testiranje koji služe za provjeravanje učinkovitosti rada mreže s već definiranim težinskim faktorima, dok se točnost i preciznost mreže za obradu podataka provjerava skupom za validaciju.

Ovisno o tome je li u postupku učenja poznat izlaz iz mreže ili ne, razlikuju se dva načina učenja:

- 1) učenje s učiteljem – mreža uči pomoću primjera u obliku para ulaz-izlaz
- 2) učenje bez učitelja – mreža uči samo pomoću ulaza, bez definiranih željenih izlaza

*Učenje s učiteljem* podrazumijeva učenje mreže na takav način da se sa svakom iteracijom dobiveni rezultati uspoređuju sa pravim izlaznim vrijednostima. Taj postupak ponavlja se sve dok pogreška mreže ne bude manja od unaprijed zadanog iznosa. Kod ovog načina učenja neuronske mreže zahtijeva se nadzor učitelja koji upravlja mrežom i definira njeno ponašanje.

Za provedbu učenja uz nadzor potrebno je prije definirati osnovne dijelove strukture mreže kao što su: broj ulaza i izlaza, broj neurona i težina mreže te algoritma za učenje koji na temelju pogrešaka izračunava nove težinske koeficijente. Na slici 47. shematski je prikazan postupak učenja neuronske mreže uz prisustvo učitelja.

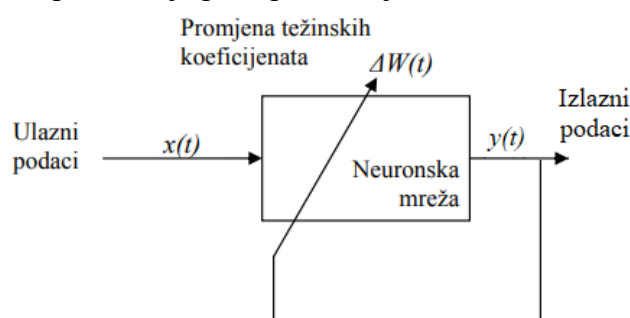


Slika 47. Shematski prikaz učenja neuronske mreže s učiteljem [22]

Nakon učenja slijedi proces testiranja mreže tijekom kojega mreža daje izlaze koristeći skup ulaznih podataka koji nisu korišteni za učenje. U ovom postupku mreža ne mijenja svoje težine već uspoređujući nove izlazne podatke sa stvarnim podacima ocjenjuje se njezina sposobnost da daje zadovoljavajuće rezultate za nepoznate skupove podataka.

Ovakav način učenja primjenjiv je samo u situacijama kada su unaprijed poznati parovi ulazno-izlaznih signala pomoću kojih mreža može učiti i postići željeno ponašanje. S druge strane, nedostatak neuronske mreže koja je učila pod nadzorom učitelja je taj da mreža nije sposobna naučiti nove koncepte rješavanja problema koji nisu obuhvaćeni korištenim skupom podataka za učenje.

Princip *učenja bez učitelja* razlikuje se od prethodnog postupaka (učenja s učiteljem) po tome što u ovoj metodi mreža uči bez poznavanja izlaza te se sama organizira. Mreža organizira svoje parametre ovisno o skupu ulaznih podataka i definiranog algoritma za učenje. Takav način učenja onemogućuje prilagođavanje težinskih koeficijenata na osnovi stvarnih izlaznih vrijednosti. Na slici 48. prikazan je postupak učenja neuronske mreže bez prisustva učitelja.

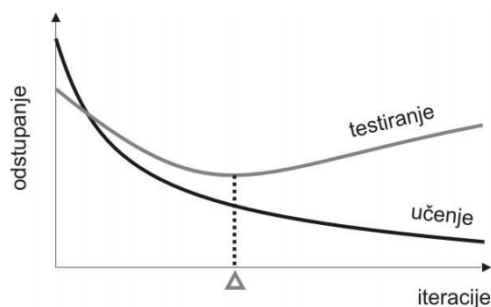


Slika 48. Shematski prikaz učenja neuronske mreže bez učitelja

Nakon procesa učenja slijedi testiranje sposobnosti mreže da riješi problem u prihvatljivom rasponu grešaka. Ova metoda učenja koristi se uglavnom kod sustava gdje neuronska mreža rješava probleme klasteriranja i prepoznavanja uzoraka.

Ako broj iteracija tijekom učenja prijeđe optimalnu vrijednost dolazi do pojave pretreniranosti mreže gdje mreža postaje stručnjak za obradu podataka samo onih vrijednosti koje pripadaju skupu za učenje. Mreža tada prestaje davati generalizirajuće rezultate za sve ulazne podatke koje nije koristila tijekom učenja, tj. počinje davati loš odaziv. Na slici 49. može se vidjeti graf na kojem je označen optimalan broj iteracija za učenje.





Slika 49. Grafički prikaz optimalne vrijednosti iteracija [17]

Jedno od najvažnijih svojstava neuronske mreže je sposobnost učenja novih pojmova uz to da se već naučeni pojmovi ne gube, odnosno ostanu zapamćeni, što povećava njezinu učinkovitost.

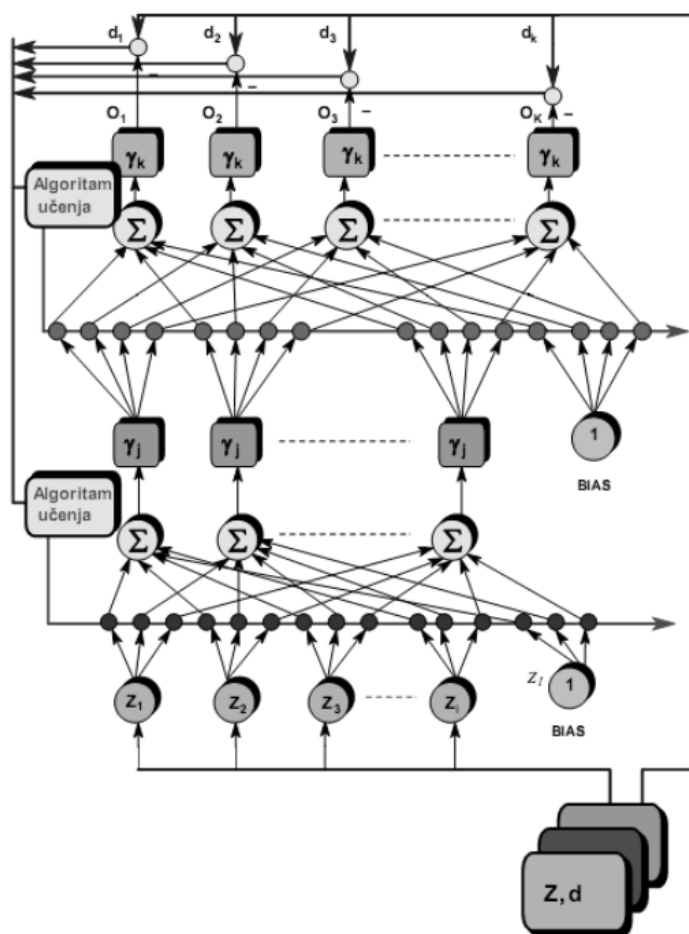
#### 4.5.1. Učenje statičke neuronske mreže

Koncept učenja statičke neuronske mreže temelji se na iterativnom procesu podešavanja težinskih faktora skrivenog i izlaznog sloja ovisno o vrijednostima ulaznih i izlaznih podataka te svojstvima aktivacijskih funkcija. Postupak učenja statičke mreže odvija se u dvije faze: unaprijednoj i povratnoj.

U prvoj fazi učenja prvo se definiraju početne vrijednosti skrivenih i izlaznih težinskih faktora. Nakon toga se uzimaju ulazne vrijednosti iz skupa podataka za učenje, te se pomoću težinskih faktora izračunavaju izlazi mreže. Završetkom unaprijedne faze započinje povratna faza tijekom koje se izračunavaju pogreške učenja te korigiraju težinski koeficijenti između slojeva.

Ovaj postupak ponavlja se sve dok se ne postigne zadovoljavajuće mala greška pri uspoređivanju dobivenog i stvarnog izlaza i tako za svaki ulazno-izlazni par.

Opći model učenja statičkoneuronske mreže prikazan je na slici 50.



Slika 50. Shematski prikaz učenja statičke mreže [18]

### Unaprijedna faza učenja statičke neuronske mreže

Kao što je već spomenuto, u ovoj fazi odabiru se ulazno-izlazni parovi ( $Z$  i  $d$ ) čiji se ulazni podatci postavljaju na neurone ulaznog sloja ( $Z_i$ ). Nakon toga se ulazni neuroni preko sinaptičkih veza, djelovanjem težinskih funkcija na njima, predaju skrivenom sloju.

#### Skriveni sloj:

Na ulazu u svaki skriveni sloju nalazi se funkcija sume koja se računa prema izrazu:

$$net_{Hj} = \sum_{i=1}^I v_{ji} \cdot Z_i, \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, J-1, \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (3.15)$$

gdje su :

- $net_{Hj}$  - funkcija sume neurona koji se nalazi u skrivenom sloju H
- $H$  - oznaka sakrivenog sloja
- $Z_i$  - oznaka ulaznog sloja
- $J$  - broj neurona u skrivenom sloju (zajednom s bias neuronom)

- $I$  - broj neurona u ulaznom sloju (zajednom s bias neuronom)  
 $v_{ji}$  - težinski koeficijenti sakrivenog sloja  
 $j$  - indeks funkcije sume sakrivenog sloja ovisno o broju neurona u navedenom sloju

i aktivacijska funkcija kojom se računaju izlazi neurona sakrivenog sloja. Aktivacijske funkcije detaljno su opisane u poglavlju 4.3. Izrazi nekih aktivacijskih funkcija za izlazne neurone skrivenog sloja određeni su prema:

Sigoidalna funkcija: 
$$y_j = \frac{1}{1 + e^{-net_{Hj}}} \quad (3.16)$$

Tanges hipoerbolna funkcija: 
$$y_j = \frac{2}{1 + e^{-net_{Hj}}} - 1 \quad (3.17)$$

Gaussianova funkcija: 
$$y_j = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{net_{Hj} - c_j}{\sigma_j} \right)^2} \quad (3.18)$$

kod kojih oznaka  $J$  predstavlja broj neurona sakrivenog sloja uvećan za neuron biasa.

### Izlazni sloj:

Težine sakrivenog sloja  $w$  povezuju izlazne vrijednosti sakrivenog sloja s neuronima izlaznog sloja neuronske mreže. U izlaznom sloju  $O$  funkcija sume  $net$  izračunava se prema izrazu:

$$net_{Ok} = \sum_{i=1}^I w_{kj} \cdot y_j, \quad \text{za } j = 1, 2, \dots, J-1, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (3.19)$$

gdje korištene oznake predstavljaju:

- $net_{Ok}$  - funkcija sume neurona izlaznog sloja  $O$   
 $O$  - oznaka izlaznog sloja  
 $K$  - broj izlaznih neurona  
 $J$  - broj neurona u sakrivenom sloju (zajednom s Bias neuronom)  
 $w_{kj}$  - težinski koeficijenti izlaznog sloja  
 $k$  - indeks funkcije sume izlaznog sloja ovisno o broju neurona u navedenom sloju

Za aktivacijsku funkciju izlaznog sloja najčešće se odabire linearna funkcija tako da izlazni podatci mogu poprimati vrijednosti veće od 1. U ovom slučaju vrijednost aktivacijske funkcije izračunava se iz izraza:

$$O_k(n) = K_p \cdot net_{Ok}, \quad \text{za } k = 1, 2, 3, \dots, K. \quad (3.20)$$

gdje je  $K_p$  iznos nagiba linearne funkcije.

### Povratna faza učenja statičke neuronske mreže

U ovoj fazi se izračunavaju pogreške u učenju ovisno u ostvarenim izlazima mreže i stvarnim izlaznim vrijednostima. Nakon toga slijedi korekcija težinskih koeficijenata svakog sloja ovisno o vrijednostima grešaka.

Mjera odstupanja izlaza mreže od stvarne vrijednosti izračunava se prema modelu sume kvadrata pogreške koji se naziva funkcija cilja  $E$ , čiji izraz glasi:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N (d_n - O_n)^2, \quad (3.21)$$

gdje oznaka  $N$  predstavlja broj podataka iz skupa za učenje.

Kako bi greška mreže bila u zadanom području vrijednosti, algoritam tijekom učenja mora minimizirati vrijednosti dobivene funkcijom cilja  $E$ .

Težinski koeficijenti mijenjaju se primjenom algoritma za učenje koji vrši nelinearno optimiranje, prema izrazu:

$$\mathcal{G}(n+1) = \mathcal{G}(n) + \Delta\mathcal{G}(n), \quad (3.22)$$

gdje su:

- $\mathcal{G}$  - težinski koeficijent
- $n$  - trenutni korak učenja
- $\mathcal{G}(n+1)$  - nova vrijednost težinskog koeficijenta
- $\Delta\mathcal{G}(n)$  - promjena težinskog koeficijenta

U jednadžbi (3.22) težinski koeficijent prikazan je općim izrazom, tako je za izlazni sloj težinski koeficijent  $\mathcal{G} = w$ , dok za skriveni vrijedi jednakost  $\mathcal{G} = v$ .

Budući da je za kvalitetno učenje mreže potrebno pronaći promjenu težinskog koeficijenta  $\Delta\mathcal{G}$  za koju bi se pogreška učenja  $\Delta E(\mathcal{G})$  smanjivala s najvećim mogućim iznosom potrebno je prije svega pronaći gradijent pogreške  $\nabla E(\mathcal{G})$ . Gradijent pogreške izvodi se tako da se suma kvadrata pogreške  $E$  uvrsti u izraz (3.22) i aproksimira s prva dva člana Taylorovog reda čime dobivamo izraz:

$$\nabla E(\mathcal{G}) = - \frac{\partial E(\mathcal{G})}{\partial \mathcal{G}} \quad (3.23)$$

Kako bi se ispunio gore navedeni uvjet za pronalazak promjene težinskog koeficijenta  $\Delta\mathcal{G}$  potrebno je postaviti uvjet:

$$\Delta\mathcal{G}(n) = -\eta \cdot \Delta E(\mathcal{G}), \quad (3.24)$$

gdje je:

- $\eta$  - koeficijent brzine učenja

Za koeficijent brzine učenja, kojeg odabire učitelj, najčešće se uzimaju vrijednosti koje su u rasponu od  $10^{-3}$  do  $10$  [16].

Kada bi se izraz za promjenu težinskog koeficijenta (3.24) uvrstio u jednadžbu za promjenu koeficijenta za svaki korak (3.22), dobila bi se naizgled funkcija koja savršeno rješava problem učenja neuronske mreže, a izraz joj glasi:

$$\mathcal{G}(n+1) = \mathcal{G}(n) - \eta \cdot \nabla E(\mathcal{G}(n)). \quad (3.25)$$

No kod ovakve funkcije događa se to da je potrebno puno iteracija da se dobije zadovoljavajuće razina točnosti.

Jedno od rješenja je modificiranje izraza (3.24) tako da mu se doda momentum čime se, uz jednaku dozvoljenu pogrešku, proces učenja znatno ubrzava [16]. Ovom modifikacijom izraz (3.25) prelazi u oblik:

$$\mathcal{G}(n+1) = \mathcal{G}(n) - \eta \cdot \Delta E(\mathcal{G}(n)) + \alpha \cdot \Delta \mathcal{G}(n-1), \quad (3.26)$$

gdje su:

- $\alpha$  - koeficijent momentuma prvog reda
- $n$  - trenutna promjena težinskog koeficijenta
- $n-1$  - prethodna promjena težinskog koeficijenta

Kao i za koeficijenta brzine učenja, vrijednost momentuma  $\alpha$  određuje učitelj, a najčešće korištene vrijednosti nalaze se u rasponu od 0.1 i 0.9 [16].

### Promjena težina izlaznog sloja:

Budući da se kod povratne faze učenja neuronske mreže promjene težina odvijaju od izlaza prema ulazu mreže, najprije je potrebno pronaći promjene težina izlaznog sloja. Koristeći izraz (3.25) za izračunavanje promjene težine izlaznog sloja dobiva se izraz:

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) - \eta \cdot \nabla E(n), \quad (3.27)$$

dok se gradijent promjene, prema izrazu (3.23), izračunava kao:

$$\nabla E(n) = - \frac{\partial E(n)}{\partial w_{kj}}. \quad (3.28)$$

Ako se gradijent promjene zapiše u obliku uzastopnih parcijalnih derivacija tada izraz (3.28) prelazi u oblik:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{kj}} = \frac{\partial E(n)}{\partial O_k} \cdot \frac{\partial O_k}{\partial net_{Ok}} \cdot \frac{\partial net_{Ok}}{\partial w_{kj}} \quad (3.29)$$

nakon parcijalnih derivacija dobivaju se izrazi pojedinih članova prethodnog izraza koji glase:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial O_k} = -(d_k - O_k) \quad (3.30)$$

$$\frac{\partial O_k}{\partial net_{Ok}} = 1 \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial net_{Ok}}{\partial w_{kj}} = y_j \cdot \quad (3.32)$$

Kada se prema Zuradi [16] primijeni izraz za karakterističnu vrijednost algoritma povratnog prostiranja greške  $\delta$  u parcijalnu jednadžbu za gradijent, uz gore prikazane izraze za pojedine članove, dobije se:

$$\delta_{Ok} = d_k - O_k \quad (3.33)$$

Uvrštavanjem tog izraza u jednadžbu algoritma za povratno učenje (3.25) dobiva se konačni algoritam promjene težina izlaznog sloja:

$$w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) - \eta \cdot \delta_{kj} \cdot y_j + \alpha \cdot \Delta w_{kj}(n-1). \quad (3.34)$$

### Promjene težina skrivenog sloja

Postupak promjene težinskih faktora skrivenog sloja nastupa tek kada se optimiraju sve težine izlaznog sloja. Jednako kao i za izlazni sloj započinje se izračunavanjem gradijenta greške  $\nabla E(n)$  primjenom uzastopnih parcijalnih derivacija:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial v_{ji}} = \frac{\partial E(n)}{\partial y_j} \cdot \frac{\partial y_j}{\partial net_{Hj}} \cdot \frac{\partial net_{Hj}}{\partial v_{ji}} \quad (3.35)$$

Deriviranjem se dobiju vrijednosti pojedinih članova parcijalnih derivacija koje glase:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial y_j} = -\sum_{k=1}^K \delta_{Ok} \cdot w_{kj} \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial y_j}{\partial net_{Hj}} = \gamma'_j \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial net_{Hj}}{\partial v_{ji}} = Z_i \cdot \quad (3.38)$$

Vrijednosti drugog člana parcijalne derivacije ovisi o aktivacijskoj funkciji koja se primjenjuje u skrivenom sloju. Deriviranjem aktivacijskih funkcija prikazanih jednadžbama (3.16), (3.17) i (3.18) dobiju se izrazi:

Sigoidalna funkcija: 
$$\gamma'_j = \frac{e^{net_{Hj}}}{(1 + e^{net_{Hj}})^2} \quad (3.39)$$

Tanges hipoerbolna funkcija: 
$$\gamma'_j = \frac{1}{2} \cdot (1 - y_j^2) \quad (3.40)$$

$$\text{Gaussianova funkcija: } \gamma'_j = -y_j \cdot \left( \frac{\text{net}_{Hj} - c_j}{\sigma_j^2} \right) \quad (3.41)$$

Izrazom (3.40) prikazan je derivirani algoritam promjene težinskih koeficijenata za slučaj tangens hiperbolne funkcije. Budući da se taj algoritam najčešće koristi u skrivenom sloju, njegovim uvrštavanjem u izraz (3.25) dobije se algoritam za promjenu težinskih koeficijenata skrivenog sloja koji glasi:

$$v_{ji}(n+1) = v_{ji}(n) - \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot (1 - y_j^2) \cdot Z_i \cdot \left( \sum_{k=1}^K \delta_{Ok} \cdot w_{kj} \right) + \alpha \cdot \Delta v_{ji}(n+1). \quad (3.42)$$

#### 4.5.2. Ocjena uspješnosti algoritma učenja

Za određivanje točnosti naučene neuronske mreže potrebno je definirati mjeru točnosti za koju se najčešće koriste tri oblika:

1. Srednja kvadratna pogreška (eng. *Mean Square error, MS*):

$$MS = \frac{\sum_{n=1}^N (d_n - O_n)^2}{N}, \quad (3.43)$$

gdje oznaka  $N$  predstavlja ukupan broj ulaza.

2. Korijen srednje kvadratne pogreške (eng. *Root Mean Square error, RMS*):

$$RMS = \sqrt{MS} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (d_n - O_n)^2}{N}}. \quad (3.44)$$

3. Normalizirani korijen srednje kvadratne pogreške (eng. *Normalized Root Mean Square error, NRMS*):

$$NRMS = \frac{RMS}{\sigma_{d_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (d_n - O_n)^2}{N \cdot \sigma_{d_n}^2}}, \quad (3.45)$$

gdje su:

$$\sigma_{d_n} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N (d_n - \bar{d})^2} \quad (3.46)$$

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N d_n \quad (3.47)$$

Najpogodniji oblik mjere točnosti za korištenje je NRMS zbog njegove bezdimenzionalnosti. To svojstvo omogućuje uspoređivanje više neuronskih mreža neovisno o dimenzijama učenih veličina.

## 4.6. Podjela neuronskih mreža

Od početka istraživanja umjetnih neuronskih mreža pa sve do danas razvilo se mnogo različitih mreža jer je nastala potreba za rješavanjem sve većeg broja različitih problema. Ovisno o kriteriju koje odaberemo, neuronske mreže dijele se prema:

1. Broju slojeva :
  - jednoslojne mreže (imaju samo jedan skriveni sloj)
  - višeslojne mreže (imaju više skrivenih slojeva)
2. Protoku signala:
  - unaprijedne (signal putuje od ulaza prema izlazu)
  - povratne (postoje povratne veze)
3. Načina učenja:
  - pojedinačno učenje (u jednoj iteraciji predočava se jedan primjer za učenje)
  - grupno učenje (u jednoj iteraciji predočavaju se svi primjeri za učenje)
4. Prisustvu učitelja:
  - s učiteljem (koristi se ulazno-izlazni par za učenje)
  - bez učitelja (koriste se samo ulazi za učenje – bez izlaza)
5. Podacima za učenje:
  - asocijativne
  - heteroasocijativne
6. Pravilu učenja:
  - Adaline (neuroni građeni od ulaza, sumatora i izlaza)
  - TLU (neuroni građeni od ulaza, sumatora, stem aktivacijske funkcije i izlaza)
  - RBF (Radial Basis Function)
  - SVM (Support Vector Machines)
  - BAM (Di-directional Associative Memory)



## 5. PRAKTIČNI RAD

Ovaj praktični rad obavljao sam u tvrtci Barting d.o.o. koja mi je omogućila sve potrebne resurse za uspješno izvršenje rada.



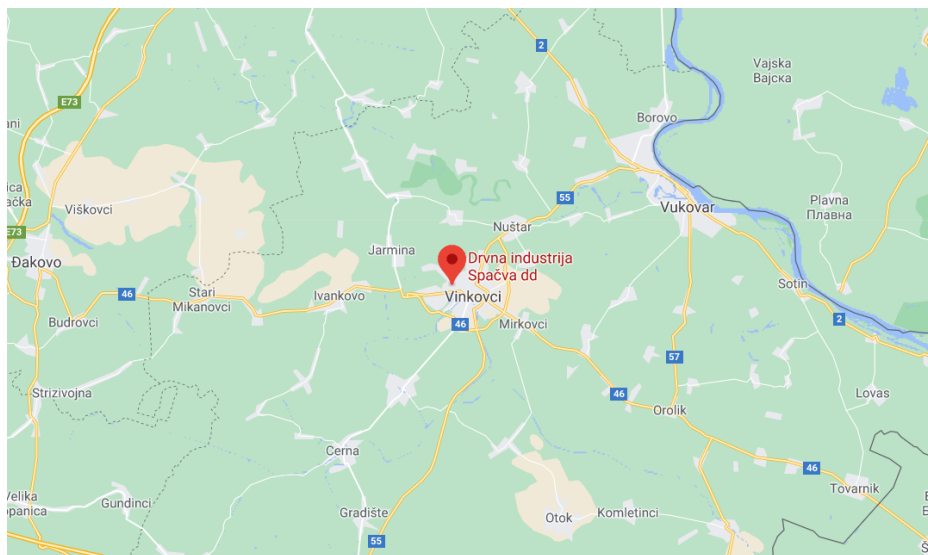
Slika 51. Logo tvrtke Barting d.o.o. [23]

Tvrtka Barting d.o.o. bavi se automatizacijom i digitalizacijom postrojenja, a sjedište joj je u Zagrebu. Tvrtka je podijeljena u dva odjela: servisni, koji je zadužen za popravak i modernizaciju strojeva te inženjerski, koji se bavi rješenjima automatizacije i digitalizacije. Ideja za ovaj rad nastala je prilikom sudjelovanja u projektu rekonstrukcije automatskog upravljanja i digitalizacije sušare furnira u tvrtci Spačva d.d.

Ciljevi projekta bili su:

- obnova i unapređenje sustava automatskog upravljanja stroja
- energetska učinkovitost kroz optimalno upravljanje procesom
- digitalizacija stroja
- priprema podataka za Industriju 4.0 i povezivanje s ERP-om

Sušara koju je bilo potrebno digitalizirati nalazi se u odjelu 'Furnir' tvrtke Spačva d.d. u Vinkovcima. Proizvođač sušare je tvrtka *Babcock BHS* koja je ovakav model protočne sušare razvila 1996. godine.



Slika 52. Makrolokacija tvrtke Spačva d.d.

Na slici 52. može se vidjeti kako izgleda postrojenje Spačve d.d. pogledom iz zraka. Gledajući sliku može se primijetiti da većinu poslovnog prostora zauzima vanjsko skladište hrasta i jasena. Unutar hala instalirano je postrojenje za proizvodnju određenih proizvoda, pa tako postoje odjeli za proizvodnju: furnira, parketa, seljačkog poda, peleta, piljene građe, itd.



Slika 53. Mikro lokacija tvrtke Spačva d.d. [24]

Furnir je jedan od najprofitabilnijih proizvoda tvrtke. Zbog toga se teži što boljoj kvaliteti i količini proizvedenih komada po smjeni. Prema slici 53., preuzeta iz javno dostupnog Financijskog izvješća Spačve d.d. za razdoblje 1. 1. 2020. – 30. 9. 2020, vidi se da poslovni prihod ostvaren prodajom furnira iznosi gotovo trećinu ukupnog prihoda.

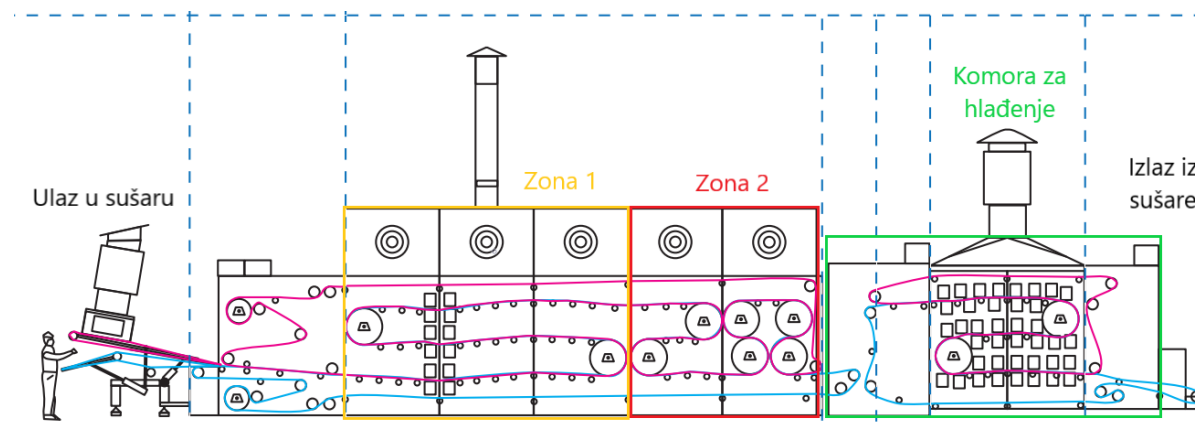
PROIZVODI	01.01.-30.09.20.	01.01.-30.09.19.	PLAN 01.01.-30.09.20.	I-IX 2020/ I-IX 2019	PRODANO /PLAN
048 - FURNIR	52.431	60.422	62.300	86,77%	84,16%
086 - PELET	36.243	39.000	35.210	92,93%	102,93%
132 - SELJAČKI POD	35.404	39.912	40.852	88,71%	86,66%
020 - PARKET	17.292	15.214	15.582	113,66%	110,97%
111 - VRATA	8.819	7.683	8.183	114,79%	107,77%
052 - ELEMENT	3.368	5.644	5.900	59,67%	57,08%
058 - Briket	2.651	6.875	11.200	38,56%	23,67%
OSTALI FINALSKI PROIZV.	2.171	793	2.676	273,77%	81,13%
080 - OSTALO	1.692	2.598	375	65,13%	451,20%
062 - PILJENA GRAĐA	1.123	1.267	1.425	88,63%	78,81%
130 - LAJSNE	740	575		128,70%	
019 - MESSERREST	678	1.488		45,56%	
126 - MASIVNI ČETVRTACI	393				
138 - USLUGE	346	425	248	81,41%	139,52%
136 - PILJENI FURNIR	295	1.797		16,42%	
124 - LJEPLJENE PLOČE	286	610	991	46,89%	28,86%
081 - REPRMATERIJAL	101	144		70,14%	
041 - TRGOVAČKA ROBA	69	21		328,57%	
<b>Ukupno:</b>	<b>164.102</b>	<b>184.468</b>	<b>184.942</b>	<b>88,96%</b>	<b>88,73%</b>

Slika 54. Tablica iz Financijskog izvješća tvrtke Spačva d.d. [25]

Proučavajući gore istaknutu sliku, jasno je da se planirana količina furnira za navedeno razdoblje nije ostvarila, što je bio povod za modernizacijom i automatizacijom sušare kako bi se kapacitet prizvedenih listova furnira povećao.

## 5.1. Trenutni rad sušare furnira

Sušara se sastoji od tri komore: „Zone 1“ i „Zone 2“, koje se griju na različitim temperaturama, te „Komore za hlađenje“. Kako bi se što bolje razumjela konstrukcija sušare na slici 55. predstavljen je shematski prikaz sušare.



Slika 55. Shematski prikaz dijelova sušare []

Paketi furnira sastoje se od 30 listova furnira koji se dobivaju rezanjem hrastova debla na tanke listove. U Spačvi d.d. proizvode se listovi furnira hrasta debljina 0,56; 1,8 i 2 mm te listovi od jasena debljine 0,56 mm. Tako izrezani listovi postavljaju se u pakete te se odnose na skladište. Iz skladišta radnik s viličarom donosi pakete furnira na ulaz u sušaru. Paketi se postavljaju na stol gdje ih radnice ručno postavljaju na ulaznu pokretnu traku koja ih vodi do pokretne trake „Zone 1“. Na ulazu u prvu zonu list se postavlja između dvije čelične mrežaste trake koje ga vode kroz obje zone. Na izlazu iz „Zone 2“ listovi furnira prelaze na čeličnu mrežastu traku „Komore za hlađenje“.

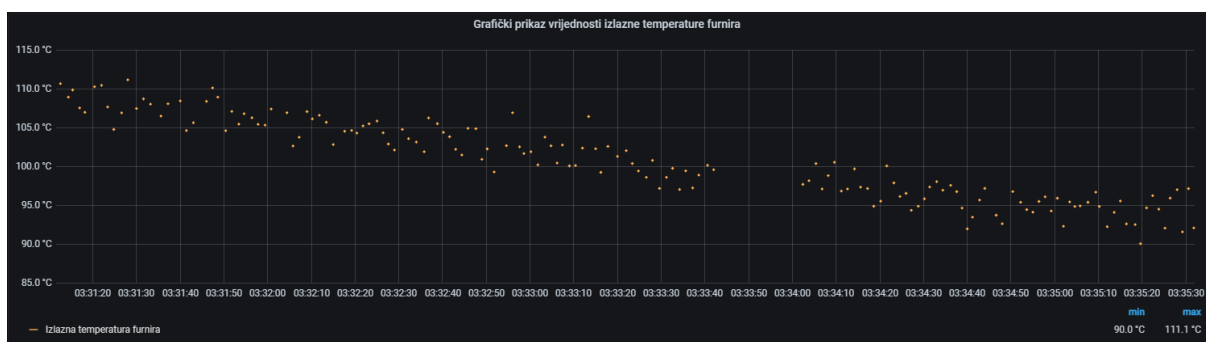
Unutar „Zone 1“ potrebno je održavati temperaturu oko zadanih 115°C, dok je u „Zoni 2“ referentna temperatura 125°C. Unutar obje zone udio vlage u zraku ima zadanu vrijednost 90 grama vodene pare/ kilograma suhog zraka.



Slika 56. Prikaz prozora „Recept“ na HMI-u [23]

Ključne podatke procesa za određeni proizvod zadaju se u receptu odakle PLC preuzima podatke koje regulira i održava. Na slici 56. prikazan je recept za 'Hrast 0,56'.

Na izlazu „Zone 2“ nalazi se beskontaktni temperaturni senzor koji nam svojim očitanim podacima dokazuje zašto postoji posljednja komora sušare. Iz prikupljenih podataka vidljivo je da listovi furnira izlaze zagrijani na 95°C kojima je nemoguće rukovati u normalnim uvjetima.



Slika 57. Grafički prikaz vrijednosti temperature furnira na izlazu

Posljednja komora služi za hlađenje furnira na okolišnu temperaturu kako bi bilo moguće prebacivanje listova u određene skupine ovisno o njihovoj vrsti i kvaliteti.

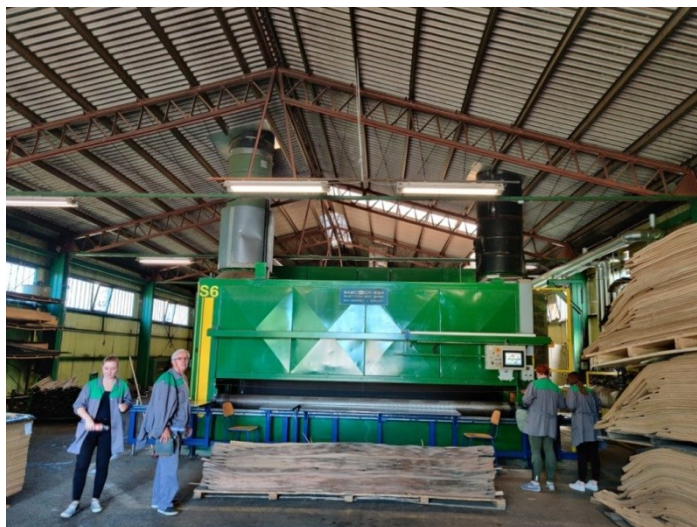
Na izlazu iz sušare listovi se skupalju u pakete od njih 30 te se poslije raspoređuju u različite odjele ovisno o kvaliteti.

Slika 58. prikazuje bočnu stranu navedene *Babcock BHS* protočne sušare u odjelu „Furnira“. Bliža komora služi za hlađenje furnira, dok se dalja komora sastoji od „Zone1“ i „Zone2“ unutar kojih se odvija proces sušenja.



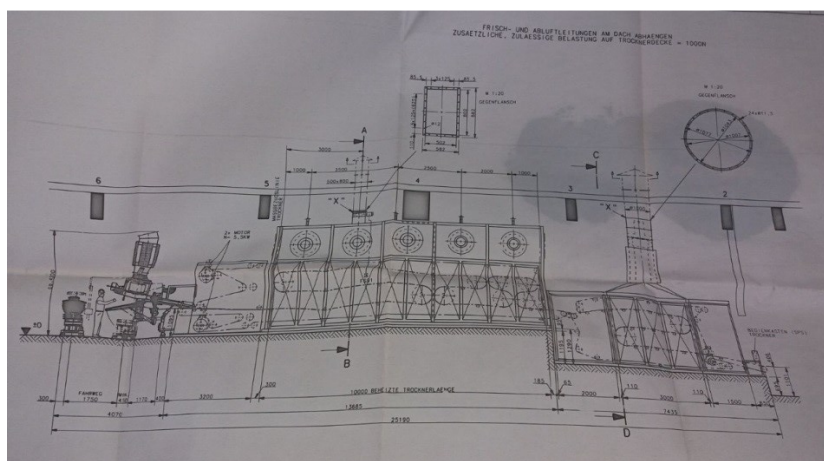
Slika 58. Bočna strana sušare

Slika 59. prikazuje izlaznu stranu sušare gdje se listovi furnira slažu u pakete i sortiraju prema njihovoj kvaliteti.

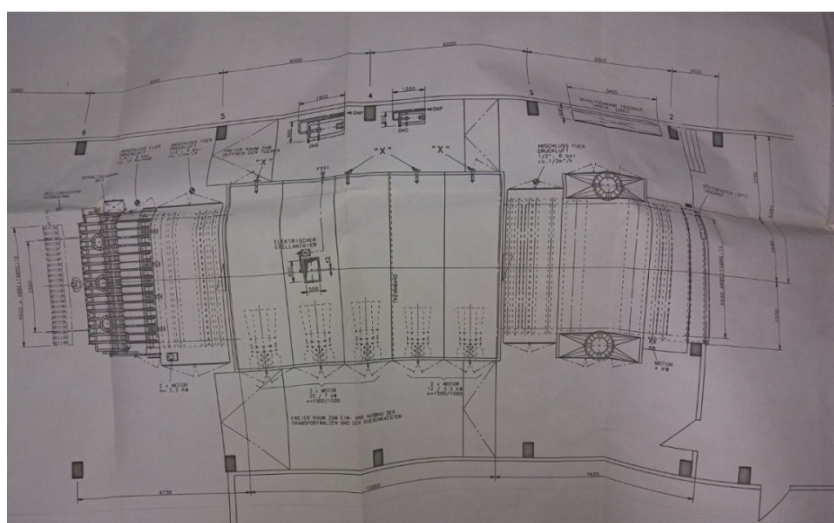


Slika 59. Izlazna strana sušare

Točne dimenzije i karakteristični uređaji sušare za furnir mogu se vidjeti na tehničkim crtežima, slike 60. i 61.



Slika 60. Tehnički crtež sušare - bokocrt



Slika 61. Tehnički crtež sušare – tlocrt

Dolaskom na teren zatečeno je stanje sušare u koje su se sve funkcije namještale u ručnom modu. To znači da se brzina mijenjala tek odobrenjem vođitelja pogona na temelju stanja unutar komora sušare; ventili za dotok vrela pare otvarali su se na fiksnu poziciju neovisno o tome što se događa unutar sušare, dok je klapna za odzračivanje bila u neispravnom stanju. Regulacije vlage pomicanjem klapne te regulacija temperature kontroliranjem ventila bile su nefunkcionalne.

### 5.1.1. Senzori sušare

U ovom pododjeljku spomenut će se najvažniji senzori koji se nalaze na sušari. Senzori su podijeljeni u dvije skupine: procesni senzori te sigurnosni senzori.

Procesni senzori očitavaju određene parametre ključne za uspješno vođenje procesa sušenja. Tako u tu skupinu spadaju: senzori za očitavanje ulazne vlažnosti lista furnira, trenutne temperature „Zone 1“ i „Zone 2“, izlazne temperature lista furnira te senzor za očitavanje vlažnosti zraka unutar komora. Na slici 62. prikazan je senzor za očitavanje vlažnosti furnira na ulazu u sušaru.



Slika 62. Senzor za mjerenje ulazne vlažnosti furnira

Na slici 63. prikazan je temperaturni senzor instaliran na gornjoj strani sušare. Ovaj senzor očitava temperaturu u središnjoj poziciji „Zone 1“. Isti takav senzor postavljen je na gornjoj strani sušare da očitava temperaturu unutar „Zone 2“.



Slika 63. Senzor za očitavanje temperature unutar sušare – na krovu sušare

Slika 64. prikazuje istu vrstu temperaturnog senzora kao i u prethodnom slučaju. Razlika je u tome što je ovaj senzor postavljen na bočnoj strani sušare. Ta pozicija senzora određena je tako da očitava temperaturu u blizini izmjenjivača topline. Isti takav senzor postavljen je i na bočnoj strani „Zone 2“.



Slika 64. Senzor za očitavanje temperature unutar sušare – na bočnoj strani

Senzor za očitavanje sadržaja vodene pare unutar sušare prikazan je na slici 65. Instaliran je na bočnoj strani sušare tako da očitava vlažnost zraka na prijelazu između zona.



Slika 65. Senzor za očitavanje sadržaja vodene pare unutar sušare

Senzor koji očitava izlaznu temperaturu furnira, slika 66., postavljen je u prijelaznom području između „Zone 2“ i „Komore za hlađenje“.



Slika 66. Senzor za očitavanje izlazne temperature furnira [26]

U skupinu sigurnosnih senzora smjestili su se oni senzori koji osiguravaju sigurno i neprekidno vođenje procesa. To su senzori koji svojom aktivacijom onemogućavaju ispadanje čelične mreže s valjaka, sprečavaju preveliku napetost mreže i motorne zaštite. Na slici 67. prikazan je senzor koji zaustavlja cijeli proces ukoliko mreža dođe u kontakt s njim.

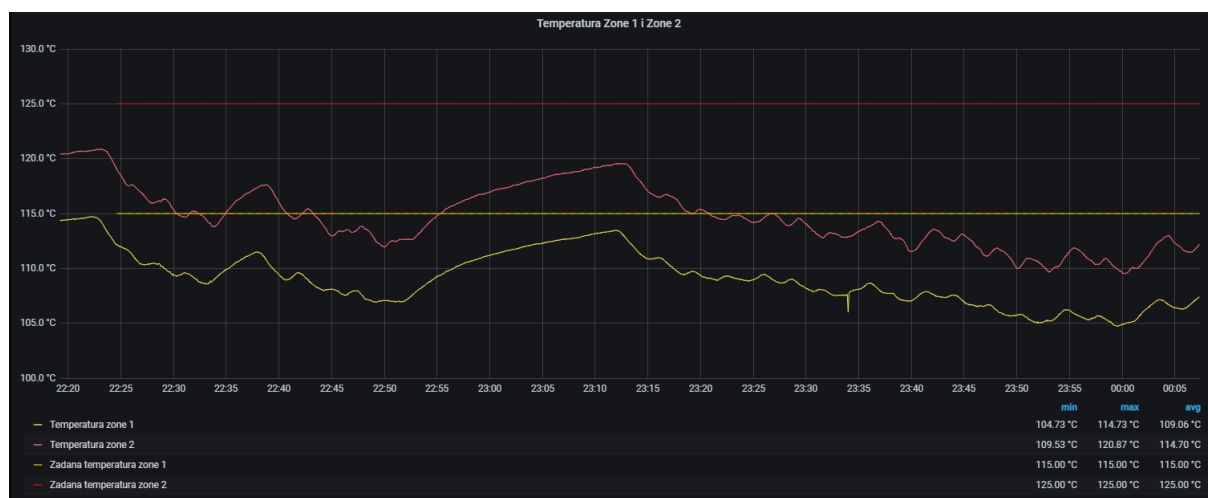


Slika 67. Senzor za očitavanje prisustva mreže [27]

### 5.1.2. Ručna regulacija temperature, vlage i brzine trake

Prije samog projekta rekonstrukcije sušare, upravljanje temperaturom zona te vlagom vršilo se ručno. Ventili i klapna za odzračivanje bi se otvorili na neku fiksnu poziciju za vrijeme rada čitave smjene. Takav način upravljanja temperaturom i vlagom unutar sušare dovodio je do nestabilnih uvjeta i uvelike drukčijih vrijednosti od onih zadanih receptom.

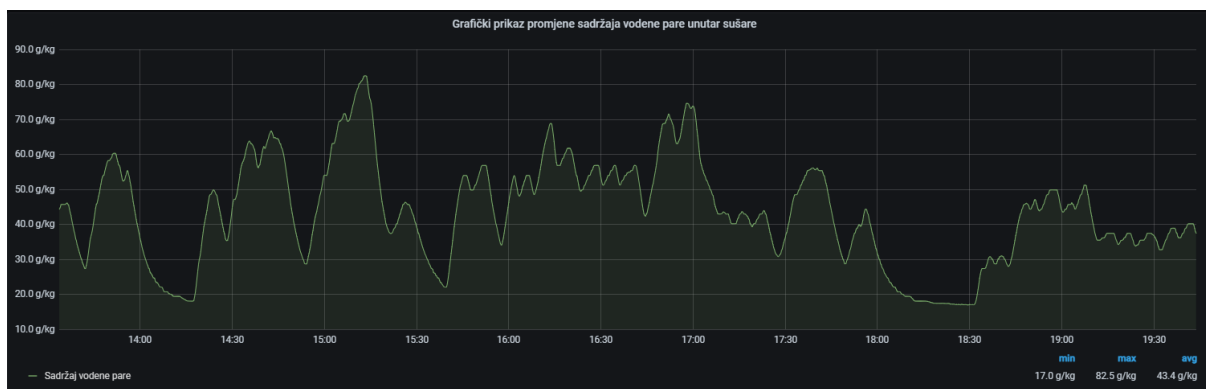
Na slici 68. može se vidjeti kako je izgledala promjena temperatura „Zone 1“ i „Zone 2“ tijekom jedne noćne smjene.



Slika 68. Grafički prikaz promjene temperature u zonama 1 i 2

Slika dokazuje da se postavljanjem ventila na fiksnu poziciju ne može postići stabilna temperatura unutar zona te da je potrebna automatska regulacija. Promjena sadržaja vlažnosti unutar sušare prikazana na slici 69.

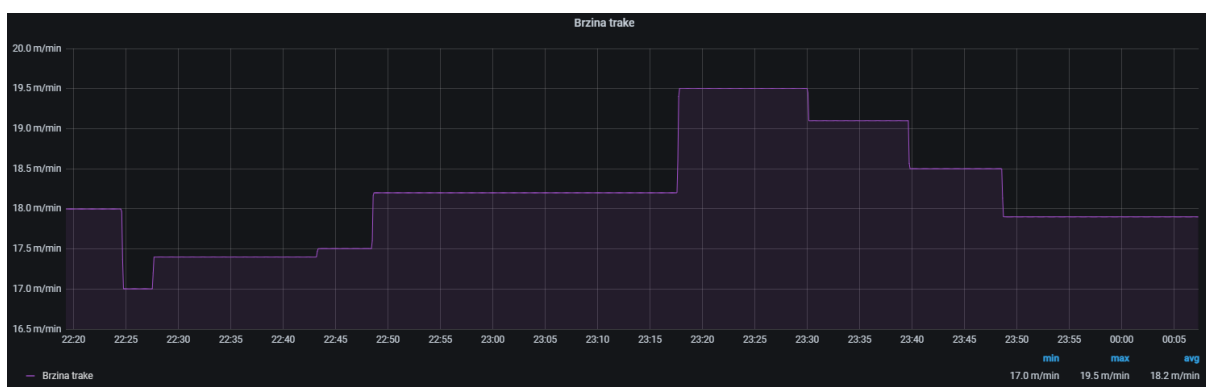




Slika 69. Prikaz promjene sadržaja vodene pare unutar sušare

Kao i u prošlom slučaju, postavljanjem klapne za odzračivanje u fiksnu poziciju ne dobivaju se željeni podatci.

Brzina čelične trake mijenja se odlukom vođenja postrojenja ovisno o uvjetima unutar sušare. Promjena brzine trake, slika 70., ostvaruje se upisivanjem željene brzine na HMI-u.



Slika 70. Prikaz promjene brzine trake

Ovakvim vođenjem procesa dolazi do nekontrolirane promjene temperatura i vlažnosti gdje se gotovo nikada ne ostvaruju sve reference zadane receptom u istom trenutku. Vidljivo je da je proces prepušten sam sebi te da ga se ne kontrolira ili regulira.

### 5.1.3. Mjerenje izlazne vlažnosti furnira

Izlazna vlažnost furnira mjeri se pomoći ručnog mjerača vlažnosti marke „GANN Hydromette Compact S“, prikazanog na slici 71.



Slika 71. Uređaj za ručno mjerenje vlažnosti furnira [28]

Ovaj uređaj za mjerenje vlage u drvetu radi na principu mjerenja električnog otpora što ga drvo pruža prolaskom električne struje kroz njega. Drvo je vrlo dobar izolator, što ga svrstava u skupinu dielektrika. Budući da drvo sadrži određenu količinu vode, bilo u odliku vezane, slobodne ili kemijske vezane vode, što je objašnjeno u prošlim poglavljima, pružat će manji otpor prolasku struje ukoliko sadržava veću količinu vode.

U praksi se koriste zbog svoje jednostavnosti pri korištenju i zadovoljavajuće preciznosti kod očitavanja količine vode unutar drveta.

## 5.2. Očekivana poboljšanja

Budući da je sušara radila u ručnom načinu rada, neregulirajući niti jednu ključnu varijablu procesa i tako gubeći na kvaliteti proizvoda, bilo je neophodno zatražiti unapređenje rada sušare kako bi se dobila potpuno funkcionalna sušara.

Ciljevi projekta poboljšanja rada protočne sušare bili su:

- instaliranje *Edge* uređaja za prikupljanje podataka u svrhu analize stanja unutar sušare
- regulacija temperature „Zone 1“ i „Zone 2“ tako da je temperatura unutar zona uvijek na razini referentne temperature zadane receptom
- regulacija otvorenosti klapne za odzračivanje tako da vlaga unutar sušare ne prelazi referentnu vrijednost. U slučajevima kada vlažnost pada ispod referentne vrijednosti ona se ne može regulirati jer ne postoji uređaj za ovlaživanje prostora unutar sušare
- regulacija brzine trake prema kvaliteti proizvoda tako da traka ubrzava ili usporava ovisno o vlažnosti unutar sušare dobivajući na izlazu listove furnira zadovoljavajuće kvalitete
- optimizacija rada stroja u svrhu energetske učinkovitosti tako da se u vremenskim razdobljima kada se ne odvija proces sušenja cijeli stroj postavlja u stanje mirovanja

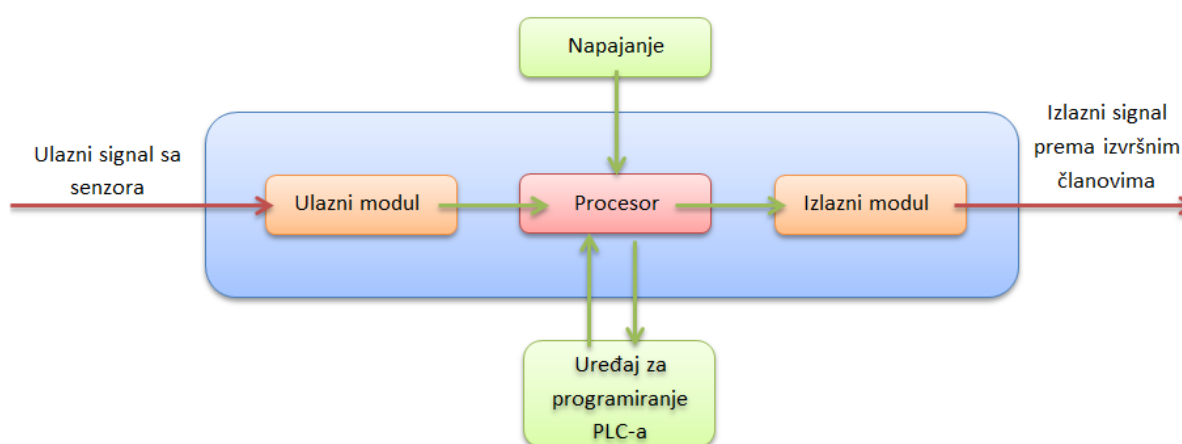
Ova nabrojena poboljšanja samo su softverski dio projekta koja cijeli stroj čine efikasnijim, funkcionalnijim, određenijim te omogućuju lakše upravljanje. Prije ovih poboljšanja bilo je potrebno zamijeniti frekventne pretvarače motora ulazne pokretne trake i pokretne trake sušare, izraditi i ugraditi upravljački ormar s HMI-om, demontirati i ugraditi novi PLC, ugraditi komunikacijske i signalne kablove te po potrebi zamijeniti dotrajale instalacije.

### 5.3. Definiranje ulaznih i izlaznih podataka

Prvi korak za izradu PLC programa je popisivanje svih ulaznih i izlaznih signala u sustavu. Temeljem tog popisa određuje se optimalni CPU za izvršavanje naredbi te se dobiva informacija o količini ulaznih i izlaznih modula. Ovakva konstrukcija predstavlja modularni PLC sistem koji se sastoji od centralne procesorske jedinice, ulazno-izlaznih modula koji se jednostavno nadograđuju u PLC sistem i komunikacijskih konektora.

#### 5.3.1. Komponente PLC sistema

Svaki PLC sistem ima četiri osnovne komponente: procesor (CPU), ulazni i izlazni moduli te napajanje. Te su komponente međusobno povezane prema slici 72. i one su ključne u radu svakog PLC-a.



Slika 72. Komponente PLC sistema

Uređaj za programiranje PLC-a služi za dizajniranje programskog koda kojeg će stroj izvršavati preko PLC-a. Može biti osobno ili prijenosno računalo, dok se u nekim slučajevima koristi čak i mobilni uređaj.

Kao glavnu komponentu PLC sustava, u ovom projektu, koristio se Siemens CPU S7-1511-1 PN, koji se može vidjeti na slici 73.



Slika 73. Siemens CPU S7-1511-1 PN [29]

Ova komponenta predstavlja mozak PLC-a zbog svoje zadaće koju obavlja u sustavu. CPU učitava podatke s digitalnih i analognih ulaznih modula, sukladno programskom kodu

izrađenom od strane stručnog PLC programera, obrađuje ulazne podatke te preko izlaznih digitalnih i analognih modula šalje signale izvršnim članovima, slika 72.

Ulazni moduli, digitalni i analogni, služe za prikupljanje signala iz procesa koje poslije CPU koristi za upravljanje strojem ili sustavom.

U PLC sustavu za automatsko upravljanje radom sušare korištena su tri digitalna ulazna modula S7-1500 DI 32x24VDC HF te tri analoga S7-1500 AI 8 i 4xU/I/RTD/TC ST, koji se mogu vidjeti na slici 74.



S7-1500 DI 32x24VDC HF



S7-1500 AI 8 i 4xU/I/RTD/TC ST

Slika 74. Korišteni digitalni i analogni ulazni moduli [29]

Izlazni moduli su uređaji preko kojih CPU šalje digitalne i analogne signale izvršnim elementima. Digitalni izlazni signali svode se samo na uključivanje i isključivanje aktuatora. S druge strane, aktuatorom koji zahtijeva manipulaciju analognim signalima upravlja se na fin i kontinuirani način, pomoću analognog napona ili struje. Primjer takvih aktuatora su: servomotori i hidraulični servo ventili.

Za upravljanje izvršnim elementima korištena su dva digitalna izlazna modula DQ 32 i 32VDC/0.5A HF te jedan DQ 16x24VDC/0.5A HF i analogni izlazni modul AQ 4xU/I ST, prikazani na slici 75.



S7-1500 DQ 32 i 16x24VDC/0.5A HF

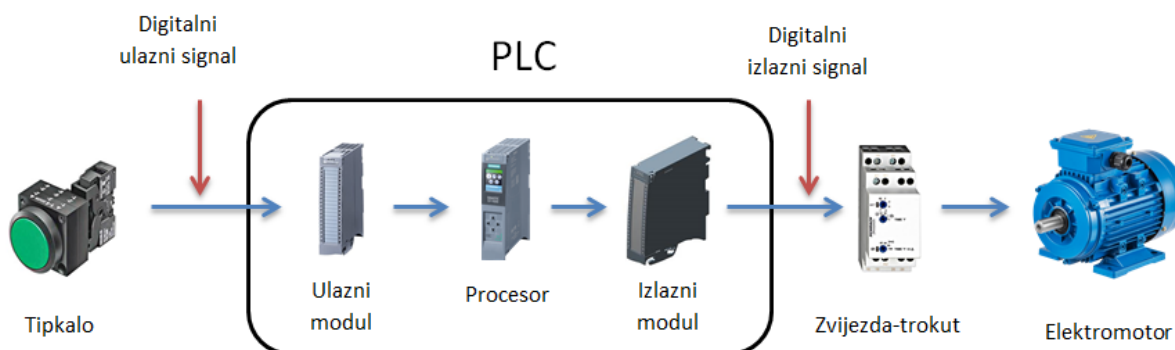


S7-1500 AQ 4xU/I ST

Slika 75. Korišteni digitalni i analogni izlazni moduli [29]

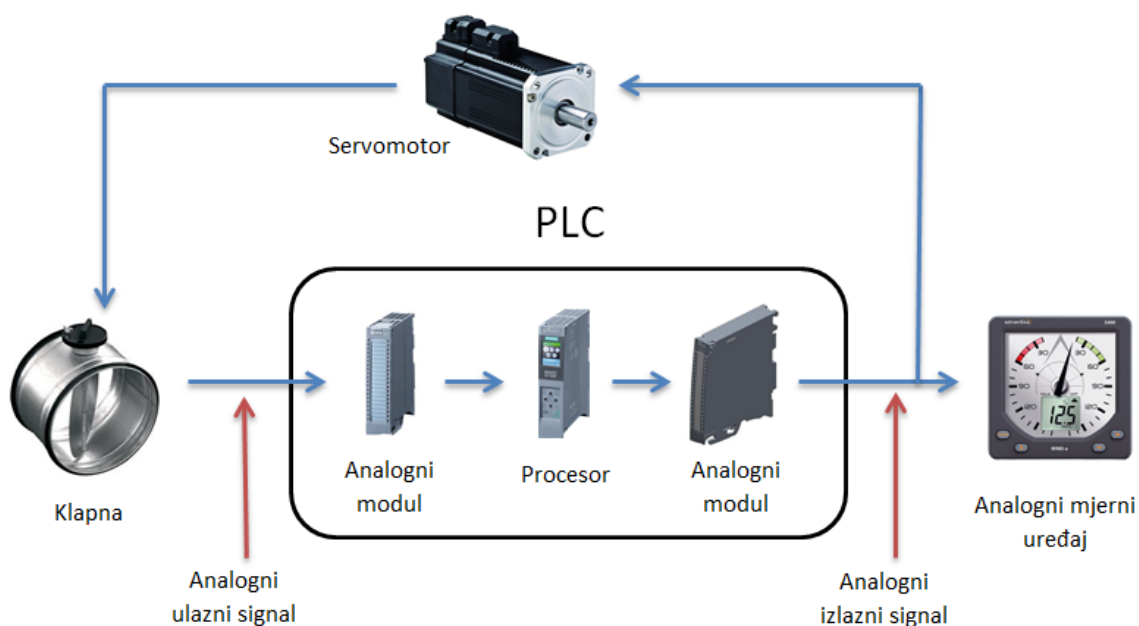
Digitalni ulazi i izlazi mogu imati dva stanja: visoko „1“ ili nisko „0“ kojim imaju točno definirano područje. Tako se visoko stanje odnosi na područje 8-24 VDC, a nisko na područje

0-5 VDC. Uređaji koji šalju digitalne signale prema ulaznom modulu su: tipkala, kontaktni releji, blizinski prekidači, relej i sl. Sljedeći shematski prikaz, slika 76., prikazuje put digitalnog signala od njegova izvora, što je u ovome slučaju tipkalo, sve do izvršnog elementa kojim se želi upravljati.



Slika 76. Shematski prikaz putovanja digitalnog signala

Analogna ulazna informacija je kontinuirani varijabilni signal. Standardne vrijednosti i oblici analognih signala su: strujni 0-20mA, strujni 4-20mA i naponski 0-10 VDC. Senzori koji šalju analogne signale ulaznom modulu mogu biti mjerni pretvornici tlaka, temperature, protoka, razine tekućine i sl.



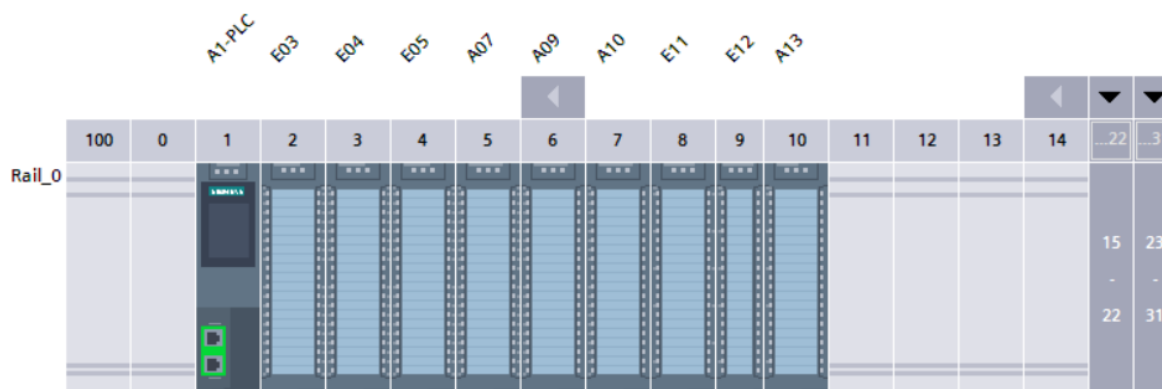
Slika 77. Shematski prikaz putovanja analognog signala

Za napajanje je korišten Siemens SITOP PSU100S koji s ulaznim naponom od 230V AC opskrbljuje CPU i ulazno-izlazne module električnom energijom od 24 V DC, a prikazan je na slici 78.



Slika 78. Uređaj za napajenje PLC-a [29]

Cijeli modularni PLC koji je ugrađen u glavni ormar za upravljanje sušarom, prikazan na slici 79. , izmodeliran je u softverskom programu TIP Portal koji služi za programiranje Siemens PLC-a.

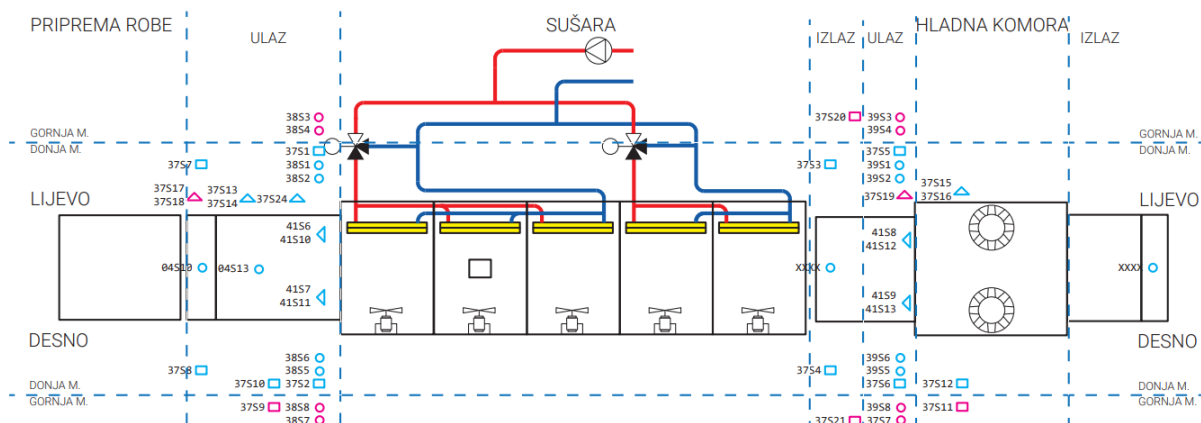


Slika 79. Modularni PLC za upravljanje radom sušare

### 5.3.2. Ulazni signali

Svi ulazni signali koji se sa sušara šalju na PLC spadaju u tri grupe: sigurnosni signali, signali s tipkala i senzorski procesni signali. Cijeli sustav opremljen je sa sigurnosnim senzorima koji, prilikom nekog kvara ili neprimjerene distance, štite radnike od ozbiljnih povreda. Zbog toga, najveći broj senzora spada u prvu grupu, dok se gotovo svi ulazni signali koje PLC prima od tipkala nalaze na upravljačkom ormaru.

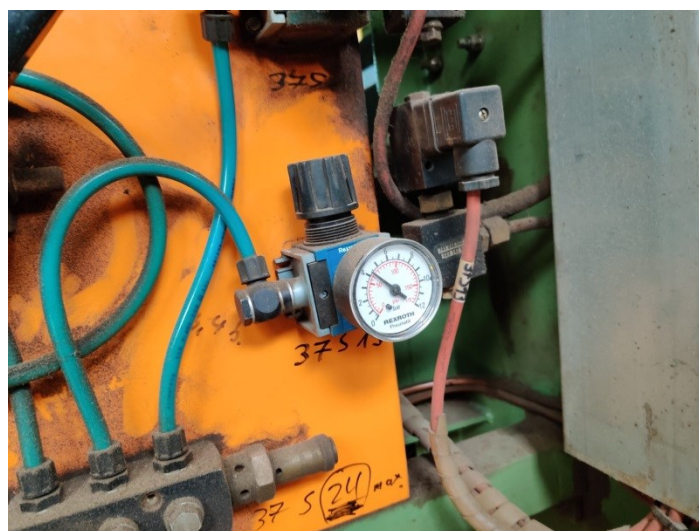
Kako bi se dočaralo koliko je sigurnosnih senzora ugrađeno u sušaru, na slici 80. može se vidjeti shematski prikaz sa oznakama pojedinih senzora.



Slika 80. Shematski prikaz sušare sa označenim senzorima

Slika 80. prikazuje sušaru u tlocrtnom pogledu. Vertikalne plave isprekidane crte predstavljaju granice pojedinih komora i zona. Tako je vertikalnim crtama sušara podijeljena na početnu zonu „Pripreme robe“, gdje radnik s viličarom donosi pakete furnira, drugu zonu „ulaz u sušaru“, „sušara“, prijelazne zone „Izlaz iz sušare“ i „Ulaz u hladnu komoru“, „Hladnu komoru“ i posljednju zonu „Izlaz iz hladne komore“. Horizontalne linije dijele senzore na plave, koji očitavaju promjene na donjoj, i crvene, koji očitavaju promjene na gornjoj čeličnoj mreži.

Za bolje razumijevanje sheme na slici 80. u nastavku će biti prikazani sigurnosni senzori određenih skupina, njihove točne pozicije te objašnjene funkcije.



Slika 81. Pozicija senzora 37S24, 37S13 i 37S14

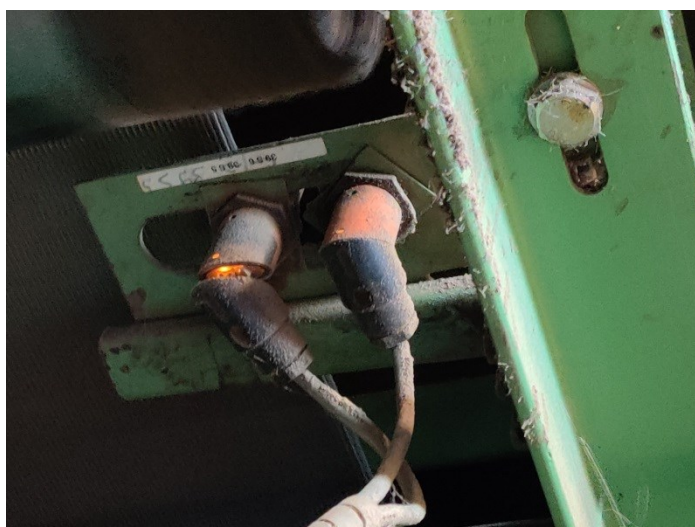
Na slici 81. prikazani su senzori koji osiguravaju preporučenu napetost mreže. Na shematskom prikazu, slika 80., prikazani su kao horizontalno postavljeni tokutići na ulazu u „Sušaru“ i „Hladnu komoru“. Senzori 37S13 i 37S14 su tlačni ventili koji detektiraju minimalni tlak zraka u cilindru nakon čega se pogon trake zaustavlja sve dok se tlak zraka ne vrati na zadovoljavajuću razinu. Senzor 37S24 aktivira se kada u cilindru nastane tlak veći od dopuštenog što znači da je mreža prezategnuta čime je tlak zraka prešao granicu

maksimalnog. Pogon trake se zaustavlja, provjeravaju se tlakovi, namještaju u prihvatljivo područje te se nastavlja s radom.



Slika 82. Pozicija senzora 37S7

Budući da se mreža na valjcima cijelo vrijeme pomiče lijevo-desno važno je osigurati da se pogonski motori ugase ukoliko mreža prijeđe određenu granicu da ne bi došlo do ozbiljnih oštećenja stroja. Kako bi se spriječilo potpuno proklizavanje mreže s valjaka, senzor 37S7 ima zadaću da pošalje signal PLC-u ako je mreža došla do krajnje granice. Ovaj senzor spada u kategoriju mikroprekidača, a njegovom aktivacijom cijeli stroj prestaje raditi, nakon čega je mrežu potrebno vratiti u početno stanje. Na shematskom prikazu, slika 81., predstavljan je crvenim i plavim pravokutnicima što znači da osiguravaju donji i gornju mrežu od potpunog proklizavanja.

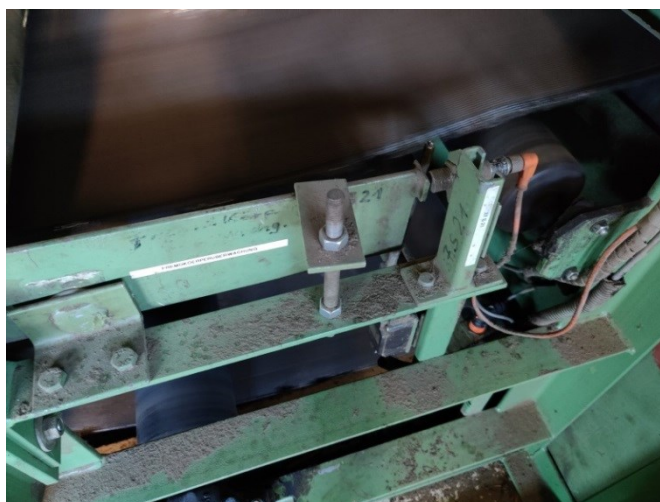


Slika 83. Pozicija senzora 39S5 i 39S6

Par fotosenzibilnih senzora 39S5 i 39S6 ima zadaću da pošalje signal PLC-u ukoliko je mreža došla do njih tijekom konstantnog proklizavanja lijevo-desno po valjcima. Kada bliži senzor očita prisutnost mreže tada se aktivira pneumatski cilindar koji naginje valjak kako bi se mreža vratila u središnji položaj. Drugi senzor ima istu funkciju samo što se njegovom



aktivacijom ostvaruje veći nagib valjka. Gledajući shematski prikaz na slici 81., prikazani su s crvenim i plavim kružićima. Može se primjetiti da uvijek idu u paru i nalaze se na ulazima u „Sušaru“ i „Hladnu komoru“.



Slika 84. Pozicija senzora 37S21

Induktivni senzor 37S21 ima ulogu da detektira prisutnost stranog predmeta. Ovaj senzor nalazi se na mjestu gdje je omogućen pristup pokretnoj traci, ali samo u svrhu remonta. Ukoliko se poluga koju cijelo vrijeme očitava senzor pomakne tada se kontakt prekida, te PLC zaustavlja cijeli stroj.

Nakon što se popišu svi senzori i tipkala koji šalju signale PLC-u, u TIA Portalu potrebno je upisati koji signali dolaze u koje ulazne module. Kao što je već spomenuto (i na slici 79. prikazano), u modularnom PLC-u nalaze se tri digitalna ulaza koji ukupno imaju 96 slobodnih digitalnih priključnih stezaljki i dva analogna koja omogućuju prikupljanje najviše 12 ulaznih analognih signala.

Na slikama 85. i 86. može se vidjeti koji su sve digitalni ulazi priključeni na ulazni modul E03 te koji se analogni signali prikupljaju na analognom ulaznom modulu E11. sa slike 79.

Name	Type	Address	Tag table	Comment
I0.0 Dryer OFF	Bool	%I0.0	Input Tags	0451
I0.1 Dryer ON	Bool	%I0.1	Input Tags	0452
I0.2 Horn OFF	Bool	%I0.2	Input Tags	0453
I0.3	Bool	%I0.3	Input Tags	
I0.4 Control Voltage ON	Bool	%I0.4	Input Tags	02K2
I0.5 No Overvoltage	Bool	%I0.5	Input Tags	02K3
I0.6	Bool	%I0.6	Input Tags	
I0.7 Dryer - Inlet - Photocell	Bool	%I0.7	Input Tags	04510
I1.0 Dryer - Fan 1 - Alarm	Bool	%I1.0	Input Tags	11Q1 & 11Q2 & 11K3
I1.1 Dryer - Fan 2 - Alarm	Bool	%I1.1	Input Tags	12Q1 & 12Q2 & 12K3
I1.2 Dryer - Fan 3 - Alarm	Bool	%I1.2	Input Tags	13Q1 & 13Q2 & 13K3
I1.3 Dryer - Fan 4 - Alarm	Bool	%I1.3	Input Tags	14Q1 & 14Q2 & 14K3
I1.4 Dryer - Fan 5 - Alarm	Bool	%I1.4	Input Tags	15Q1 & 15Q2 & 15K3
I1.5	Bool	%I1.5	Input Tags	
I1.6 Cooling Field - Supply Fan - Alarm	Bool	%I1.6	Input Tags	31Q1
I1.7 Cooling Field - Exhaust Fan - Alarm	Bool	%I1.7	Input Tags	32Q1
I2.0 Dryer - Inlet - Left	Bool	%I2.0	Input Tags	3751
I2.1 Dryer - Inlet - Right	Bool	%I2.1	Input Tags	3752
I2.2 Dryer - Outlet - Left	Bool	%I2.2	Input Tags	3753
I2.3 Dryer - Outlet - Right	Bool	%I2.3	Input Tags	3754
I2.4 Cooling Field - Left	Bool	%I2.4	Input Tags	3755
I2.5 Cooling Field - Right	Bool	%I2.5	Input Tags	3756
I2.6 Dryer - Foreign body - Left	Bool	%I2.6	Input Tags	3757
I2.7 Dryer - Foreign body - Right	Bool	%I2.7	Input Tags	3758
I3.0 Dryer - Upper Mesh - Relaxed	Bool	%I3.0	Input Tags	3759
I3.1 Dryer - Lower Mesh - Relaxed	Bool	%I3.1	Input Tags	37510
I3.2 Cooling Field - Upper Mesh - Relaxed	Bool	%I3.2	Input Tags	37511
I3.3	Bool	%I3.3	Input Tags	Pokvaren input
I3.4 Dryer - Mesh Tension - Compressed Air - MN	Bool	%I3.4	Input Tags	37513 (DM) & 37514 (GM)
I3.5 Dryer - Mesh Tension - Compressed Air - M...	Bool	%I3.5	Input Tags	37524

Slika 85. Popis digitalnih ulaznih signala na modulu E03

Name	Type	Address	Tag table	Comment
IW12 Zone 1 - Before Heater - Te...	Int	%IW12	Input Tags	
IW14 Zone 2 - Before Heater - Te...	Int	%IW14	Input Tags	
IW16 Dryer - Humidity	Int	%IW16	Input Tags	
IW18 Dryer - Exhaust Flap Position	Int	%IW18	Input Tags	
IW20	Int	%IW20	Input Tags	
IW22 Final Temperature - Left	Int	%IW22	Input Tags	
IW24 Final Temperature - Right	Int	%IW24	Input Tags	
IW26	Int	%IW26	Input Tags	

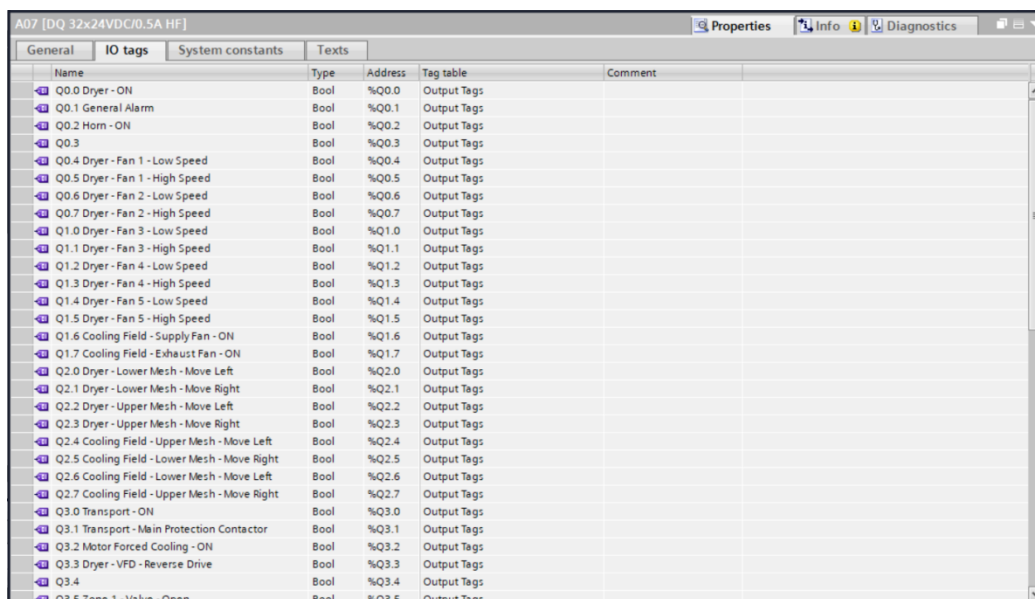
Slika 86. Popis analognih ulaznih signala na modulu E11

### 5.3.3. Izlazni signali

Nakon popisivanja ulaznih signala, za izradu programskog koda PLC-a, potrebno je odrediti koje se sve radnje moraju odvititi ovisno o pojedinim ulaznim signalima. Naredbe za izvršne radnje iz PLC-a aktuatori će dobiti preko izlaznih digitalnih i analognih modula.

Najvažnije funkcije koje pokreću izlazni signali su: paljenje elektromotora za pokretanje ulazne trake i trake za sušenje, pokretanje ventilatora, uključivanje alarma, pokretanje hidrauličnih cilindara za ispravljanje pozicija trake, otvaranje ventila, pozicioniranje klapne za odzračivnje.

Na slici 87. prikazani su digitalni izlazi za modul A07.



Name	Type	Address	Tag table	Comment
Q0.0 Dryer - ON	Bool	%Q0.0	Output Tags	
Q0.1 General Alarm	Bool	%Q0.1	Output Tags	
Q0.2 Horn - ON	Bool	%Q0.2	Output Tags	
Q0.3	Bool	%Q0.3	Output Tags	
Q0.4 Dryer - Fan 1 - Low Speed	Bool	%Q0.4	Output Tags	
Q0.5 Dryer - Fan 1 - High Speed	Bool	%Q0.5	Output Tags	
Q0.6 Dryer - Fan 2 - Low Speed	Bool	%Q0.6	Output Tags	
Q0.7 Dryer - Fan 2 - High Speed	Bool	%Q0.7	Output Tags	
Q1.0 Dryer - Fan 3 - Low Speed	Bool	%Q1.0	Output Tags	
Q1.1 Dryer - Fan 3 - High Speed	Bool	%Q1.1	Output Tags	
Q1.2 Dryer - Fan 4 - Low Speed	Bool	%Q1.2	Output Tags	
Q1.3 Dryer - Fan 4 - High Speed	Bool	%Q1.3	Output Tags	
Q1.4 Dryer - Fan 5 - Low Speed	Bool	%Q1.4	Output Tags	
Q1.5 Dryer - Fan 5 - High Speed	Bool	%Q1.5	Output Tags	
Q1.6 Cooling Field - Supply Fan - ON	Bool	%Q1.6	Output Tags	
Q1.7 Cooling Field - Exhaust Fan - ON	Bool	%Q1.7	Output Tags	
Q2.0 Dryer - Lower Mesh - Move Left	Bool	%Q2.0	Output Tags	
Q2.1 Dryer - Lower Mesh - Move Right	Bool	%Q2.1	Output Tags	
Q2.2 Dryer - Upper Mesh - Move Left	Bool	%Q2.2	Output Tags	
Q2.3 Dryer - Upper Mesh - Move Right	Bool	%Q2.3	Output Tags	
Q2.4 Cooling Field - Upper Mesh - Move Left	Bool	%Q2.4	Output Tags	
Q2.5 Cooling Field - Lower Mesh - Move Right	Bool	%Q2.5	Output Tags	
Q2.6 Cooling Field - Lower Mesh - Move Left	Bool	%Q2.6	Output Tags	
Q2.7 Cooling Field - Upper Mesh - Move Right	Bool	%Q2.7	Output Tags	
Q3.0 Transport - ON	Bool	%Q3.0	Output Tags	
Q3.1 Transport - Main Protection Contactor	Bool	%Q3.1	Output Tags	
Q3.2 Motor Forced Cooling - ON	Bool	%Q3.2	Output Tags	
Q3.3 Dryer - VFD - Reverse Drive	Bool	%Q3.3	Output Tags	
Q3.4	Bool	%Q3.4	Output Tags	
Q3.5 Zone 1 - Valve - Open	Bool	%Q3.5	Output Tags	

Slika 87. Popis digitlnih izlaznih signala na modulu A07

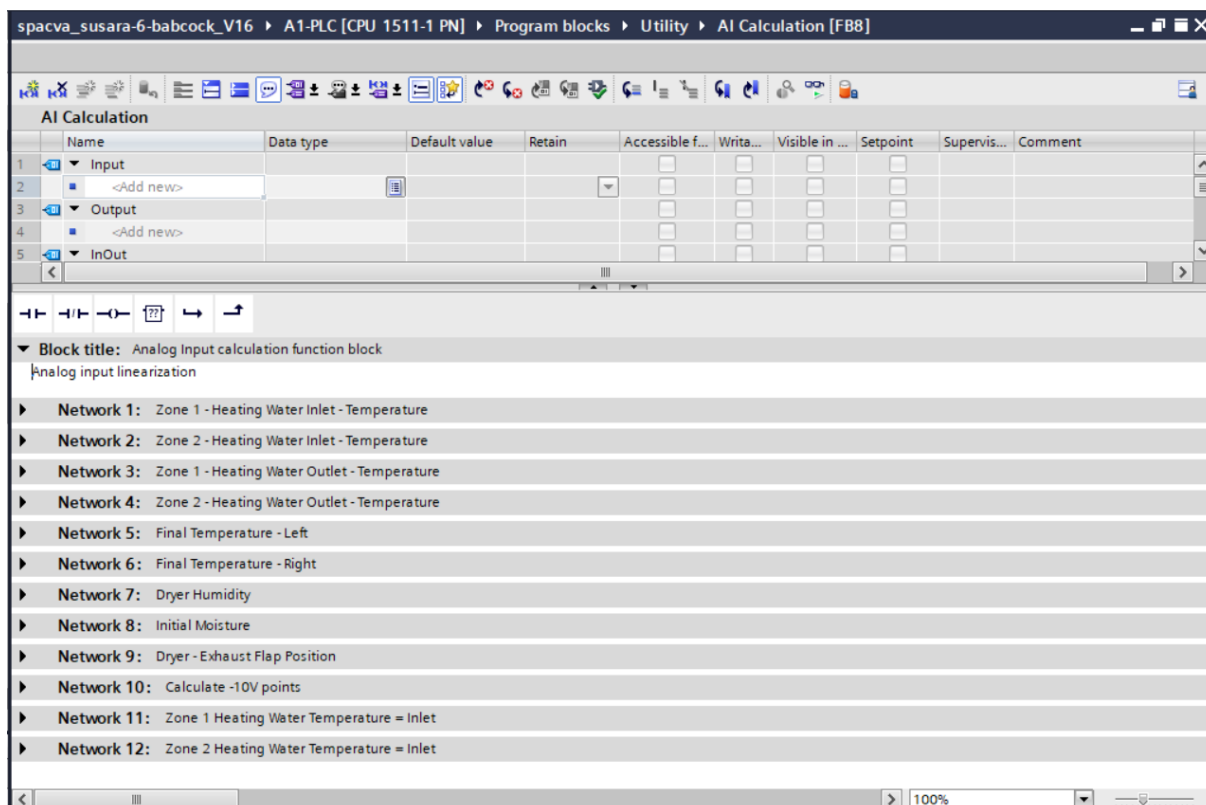
## 5.4. Ladder dijagrami u TIA Portalu

*TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal)* programski je alat dizajniran od strane Siemens za konfiguraciju i programiranje PLC-a te vizualizaciju procesa u jedinstvenoj razvojnoj okolini. Ono što TIA Portal čini toliko jakim na tržištu jest to što objedinjuje nekoliko TIA alata u jedinstvenu aplikaciju kao što su STEP 7 i WinCC. Za izradu programskog koda kojeg će PLC izvršavati koristi se STEP7, dok je alat WinCC zadužen za izradu grafičkog sučelja HMI-a. Na ovaj način korisniku se omogućuje podrška u svim segmentima potrebnima za automatizaciju sustava na jednom mjestu.

### 5.4.1. Ladder dijagram „AI calculations“

Kako bi se podatci prikupljeni sa senzora mogli koristiti posebno ih je prebaciti u stvarne, realne podatke. Senzori ulaznom modulu, odnosno PLC-u, ne šalju stvarne fizikalne vrijednosti koje mjere već napone ili struju.

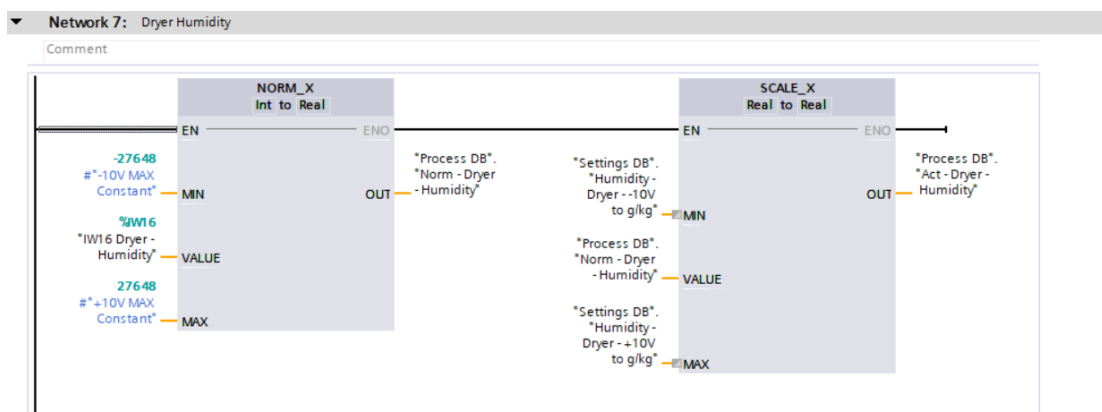
Sve analogne vrijednosti koje se prikupljaju sa senzora u funkcijskom bloku „AI calculation“ konvertirane su u stvarne fizikalne veličine, slika 88.



Slika 88. Prikaz mreža funkcijskog bloka „AI Calculation“

Senzori koji očitavaju fizikalne vrijednosti kao što su temperatura, brzina ili vlažnost ne šalju PLC-u stvarne vrijednosti već analogne signale, koji ovisno o senzoru, mogu biti u nekom strujnom ili naponskom rasponu. Zbog toga je potrebno takve signale konvertirati pomoću programskog koda u stvarne fizikalne vrijednosti.

Na slici 89. prikazan je primjer konverzije analognog signala „Dryer humidity“, kojeg očitava senzor vlažnosti, u stvarnu fizikalnu vrijednost sadržaja vodene pare unutar sušare.



Slika 89. Blokovi „NORM\_X“ i „SCALE\_X“

Kod konverzije se prvo koristi blok za normalizaciju „NORM\_X“ kojemu je potrebno definirati minimalnu i maksimalnu vrijednost ulazne veličine. Uz to, potrebno mu je pridružiti ulaznu „VALUE“ memorijsku lokaciju analognog signala kojeg želimo normalizirati. Tim postupkom dobiva se izlazna vrijednost koja se nalazi u području od 0 do 1, drugim riječima

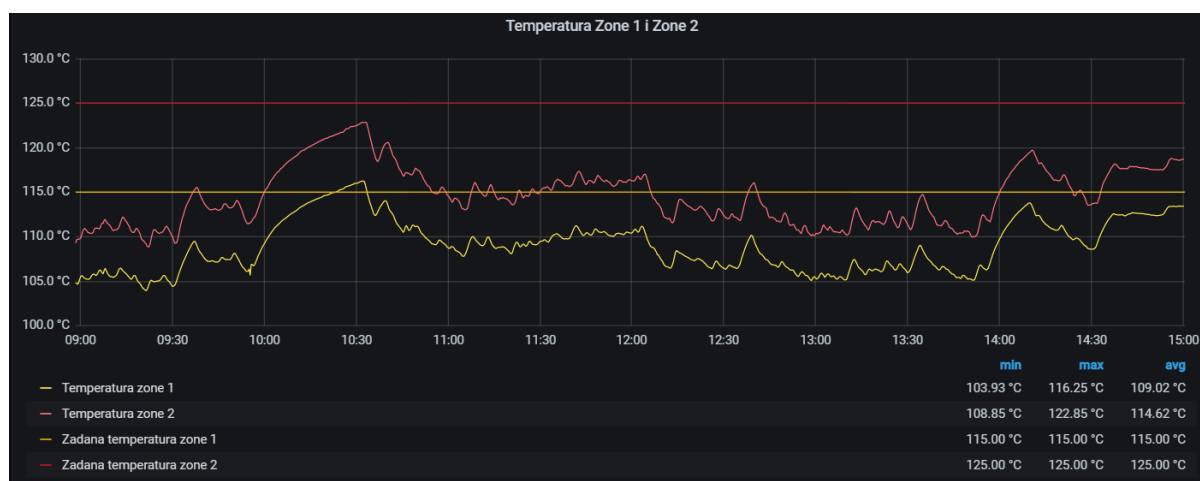
dobiva se vrijednost analogna u postotku od maksimalne vrijednosti. Sljedeći korak je skaliranje normalizirane vrijednosti tako da se bloku „SCALE\_X“ definiraju minimalna i maksimalna vrijednost. Izlaz iz bloka „SCALE\_X“ ima vrijednost stvarne fizikalne veličine.

Analognim postupkom konvertiraju se i ostali prikupljeni analogni signali.

#### 5.4.2. Ladder dijagram za regulaciju temperatura Zone 1 i Zone 2

Regulacija temperature „Zone 1“ i „Zone 2“ relizirana je primjenom histereze jer ne postoji povratna veza sa servomotora koji upravljaju otvaranjem i zatvaranjem ventila za dovod pregrijane pare u izmjenjivače topline. Do sada, postavljanjem ventila na jednu fiksnu poziciju za cijeli dan rada, temperatura unutar sušare bila je uvelike promjenjiva.

Na slici 90. može se vidjeti na koji se način temperatura ponašala kada je ventil bio otvoren na fiksnoj poziciji tijekom 6 sata rada dana 7. 12. 2021. Horizontalne crte predstavljaju referentne temperature koje trebaju biti unutar zona za vrijeme sušenja, crvena za „Zonu 2“ i žuta za „Zonu 1“.

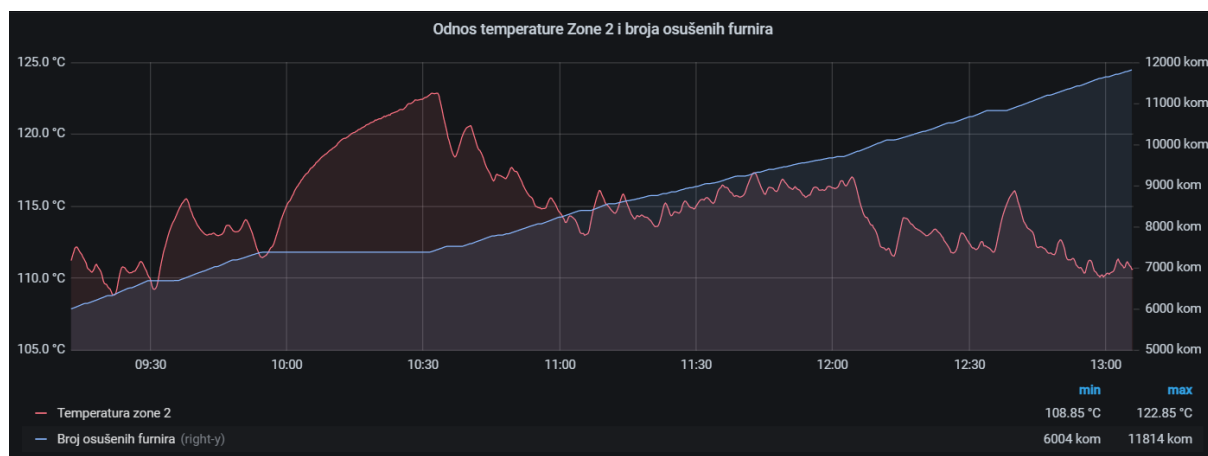


Slika 90. Temperatura zone 1 i zone 2 za vremensko razdoblje 9:00 - 15:00 dana 7. 12. 2021.

Proučavanjem ostalih podataka koji se prikupljaju sa senzora sušare dolazi se do zaključka da promjenu temperature uvjetuje broj osušenih komada furnira, njihova gustoća posloženosti unutar sušare, brzina sušenja i unutarnja vlažnost zraka. Na slici 91. prikazan je odnos između promjene temperature „Zone 2“ i broja osušenih komada funira za vremensko razdoblje 9:15-3:00 dana 7. 12. 2021.

Na slici se može primijetiti da povećanjem broj osušenih furnira pada temperatura unutar sušare, dok za vrijeme mirovanja, kada se furnir ne suši, temperatura naglo raste. To se najbolje može primijetiti za vremensko razdoblje 10:00 - 10:30 kada je radnicima pauza te se furnir ne suši što uzrokuje povećanje temperature „Zoni 2“.

Iz priloženog jasno zaključujemo da temperatura unutar zona nije regulirana na pravilan način te je potrebno ustabiliti temperaturu u području oko referentne vrijednosti od 115°C za „Zonu 1“ i 125°C za „Zonu 2“.



Slika 91. Odnos između temperature zone 2 i broja osušenih furnira

Budući da je riječ o tzv. *open-loop* problemu gdje nema povratne veze sa servomotorom, što znači da nema podataka u kojoj je točno poziciji ventil, za regulaciju se koristio princip histereze.

To omogućuje da se promjena otvaranja i zatvaranja ventila događa između dvije krajnje vrijednosti. Kada temperatura padne ispod donje krajnje vrijednosti ventil se otvara i ostaje otvoren sve dok temperatura ne prijeđe gornju krajnju vrijednost. U ovom slučaju histereza iznosi  $\pm 0,5$  °C što znači da donja vrijednost za Zonu 2 iznosi 124,5 °C, a gornja 125,5°C.

Programiranju koda u TIA Portalu pristupa se na takav način da se prvo izgrade funkcije jer su uvjeti za oba ventila analogni, samo je referentna temperatura drukčija, te se onda samo ubace u funkcijske blokove.

Funkcija za upravljanje ventilima prikazana je na slikama 92. - 98. Prva slika predstavlja funkciju „Valve FC“ sa njezinim dijelovima „Type conversion“, „Valve active“, „Valve Open“ i „Valve Colse“ te njezine parametre „Input“, „Output“ i „Temp“ u njezinoj internoj bazi podataka. Ovim parametrima ne može se pristupiti iz drugih blokova, već postoje samo u definiranoj funkciji.

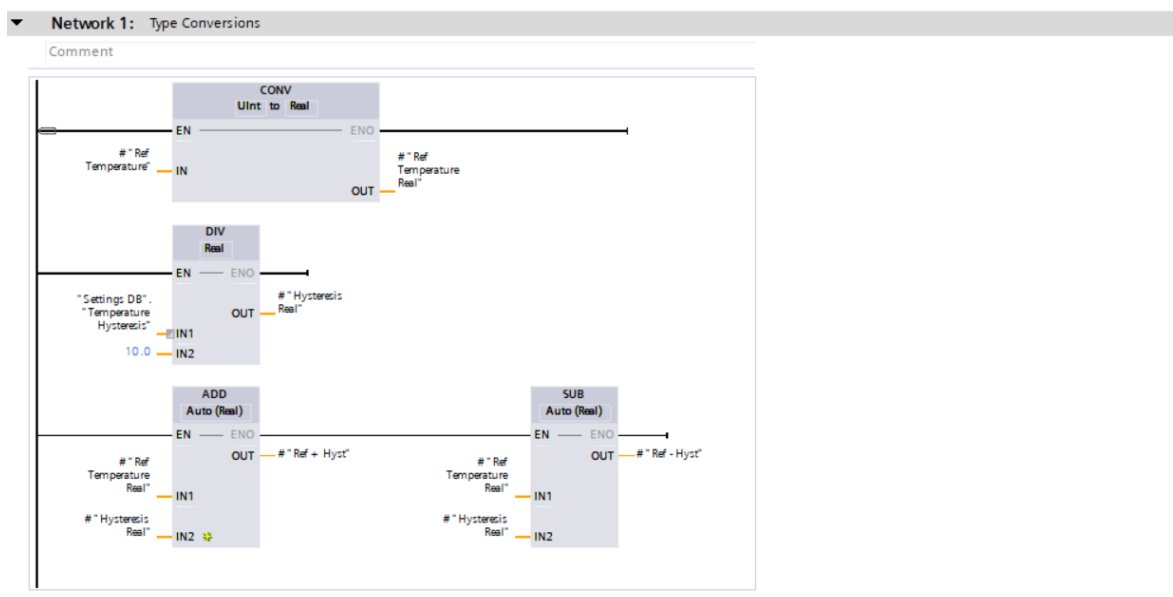
Name	Data type	Default value	Comment
1	Input		
2	Stop/Start	Bool	0 = Stop, 1 = Start
3	Ref Temperature	UInt	
4	Act Temperature	Real	
5	Output		
6	<Add new>		
7	InOut		
8	Valve Open Output	Bool	Actuator Open
9	Valve Close Output	Bool	Actuator Close
10	Last Ref Temperature	UInt	
11	Valve Active	Bool	
12	Temp		
13	Ref Temperature Real	Real	
14	Hysteresis Real	Real	
15	Ref + Hyst	Real	
16	Ref - Hyst	Real	

Block title: Valve FC  
Valve actuator function

Network 1: Type Conversions  
Network 2: Valve Activate  
Network 3: Valve Open  
Network 4: Valve Close

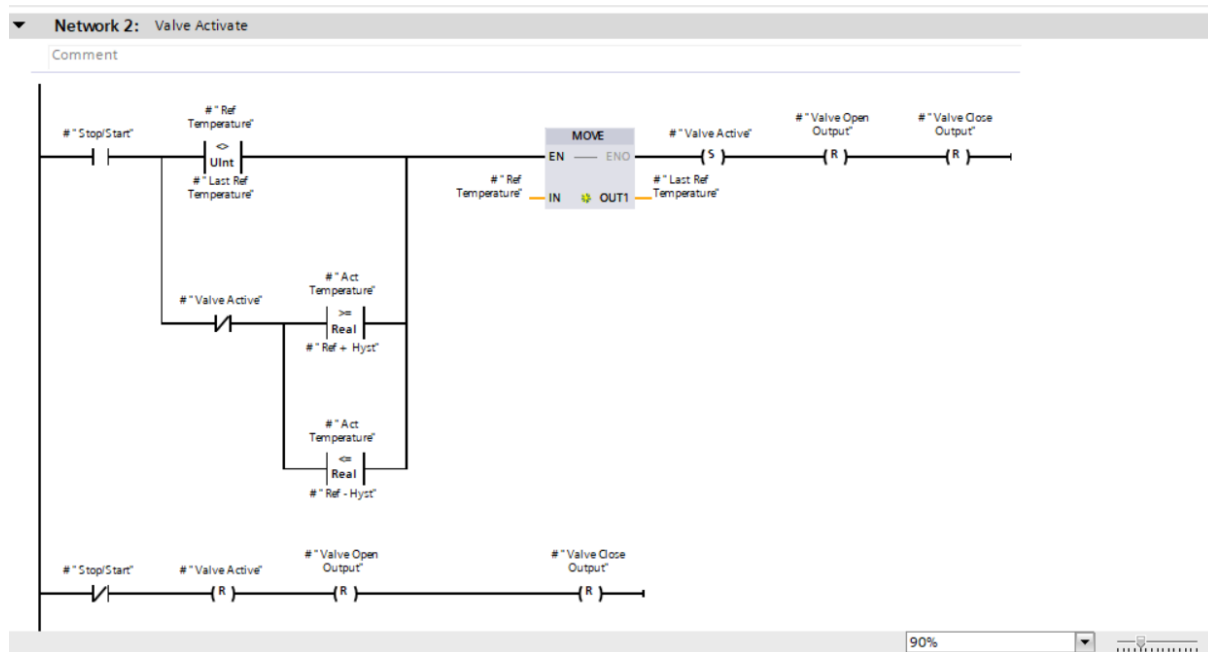
Slika 92. Prikaz mreža i internih varijabil funkcije „Valve FC“

Prva mreža, „Type Conversions“, slika 93., služi za konverziju referentne temperature „Ref Temperature“, zadane u receptu, koja je u *Integer* obliku u podatak „Ref Temperature Real“ tipa *Real*. Ovo je potrebno zbog toga što su signali s temperaturnog senzora konvertirani u *Real* podatke, tako da se temperatura može prikazivati na više decimala, a manipulacije s dva podatka različitih tipova nije moguća. U sljedećoj liniji koda podatak „Temperature Hysteresis“ koji se u PLC upisuje kao postotak, odnosno kao *Integer* podatak, dijeli se s 10 tako da se dobije stvarni iznos histereze „Hysteresis Real“. Sljedeće dvije linije koda mreže „Type Conversions“ služe za izračunavanje gornje „Ref + Hyst“ i donje „Ref - Hyst“ krajnje vrijednosti na kojima se ventil počinje zatvarati, odnosno otvarati.



Slika 93. Prva mreža funkcije „Valve FC“

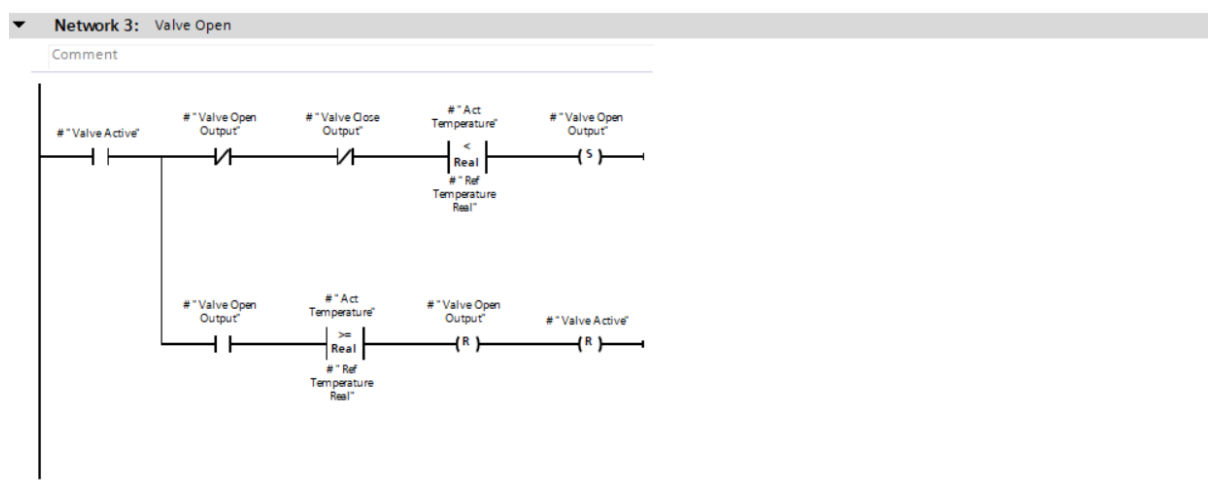
Druga mreža „Valve Activate“ funkcije „Valve FC“ predstavlja kod koji određuje je li ventil u stanju pripravnosti, odnosno je li aktivan ili u stanju mirovanja. Navedena su tri uvjeta kod kojih se ventil stavlja u stanje aktivnosti „Valve Active“: Ako zadana temperatura zone nije jednaka prethodno zadanoj temperaturi, što se može dogoditi ako netko promjeni recept, ako je trenutna temperatura unutar sušare veća od gornje krajnje vrijednosti histereze, i posljednji, ako je trenutna temperatura manja od donje krajnje vrijednosti histereze. Kada se ostvari jedan od tih triju uvjeta tada podatak „Valve Active“ poprima vrijednost *True* i tako ostaje sve dok se ne ugasi sušara ili ostvari uvjet iz posljednje dvije mreže koje resetiraju „Valve Active“ na razinu *False*.



Slika 94. Druga mreža funkcije „Valve FC“

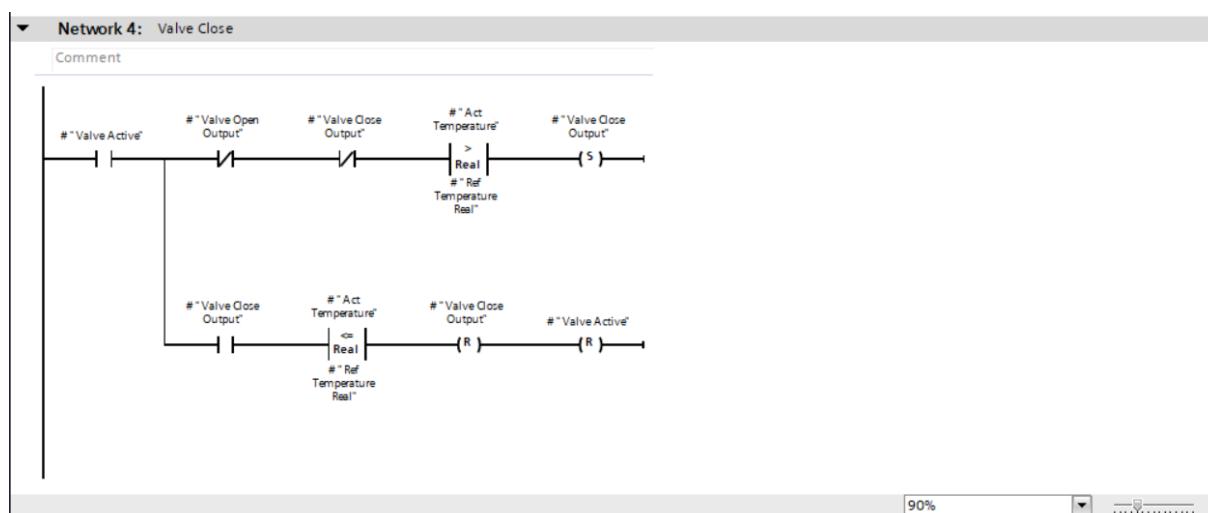


Kada je podatak „Valve Active“ u stanju *True* ostvaruje se uvjet za kontroliranjem ventila pomoću treće „Valve open“ i četvrta „Valve Close“ mreže. Ventil se počinje otvarati kada se ispuni uvjet da je trenutna temperatura u zoni manja od referentne, slika 95. Ovdje nije naznačeno da mora biti manja od donje krajnje vrijednosti histereze jer ako taj uvjet nije ispunjen, podatak „Valve Active“ uopće ne bi bio u stanju *True*. To znači da će svaka temperatura koja je aktivirala uvjet da je trenutna temperatura unutar sušare manja od „Ref - Hyst“, aktivirati ventil da se otvori postavljanjem veličine „Valve Open Output“, u stanje *True*.



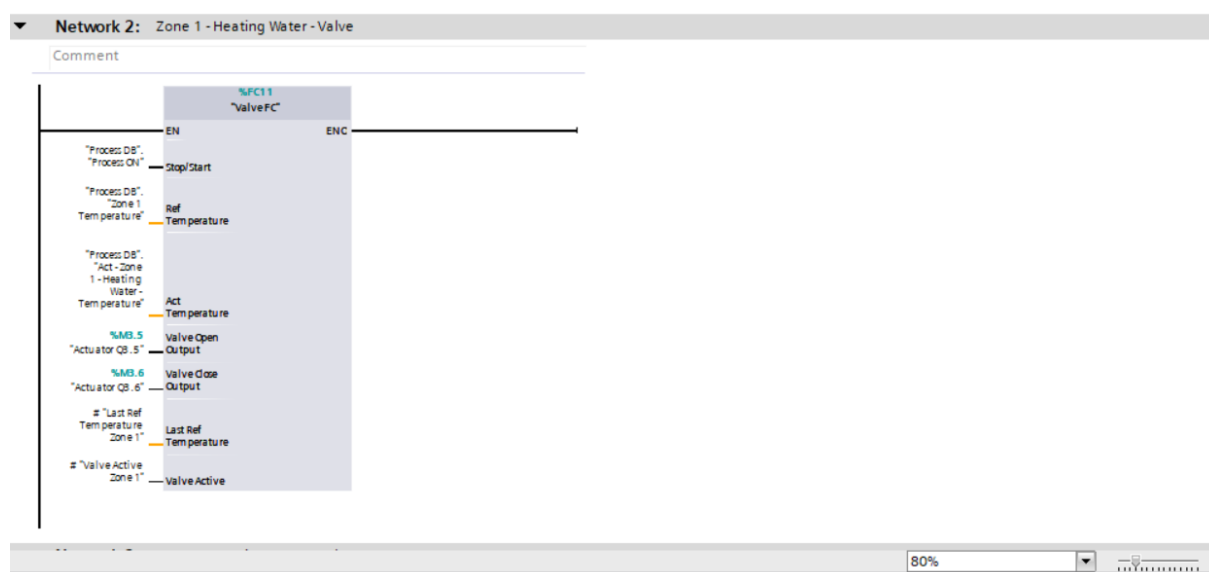
Slika 95. Treća mreža funkcije „Valve FC“

Ventil će se početi zatvarati kada temperatura unutar sušare prijeđe gornju vrijednost histereze „Ref + Hyst“, što se može vidjeti na slici 96.

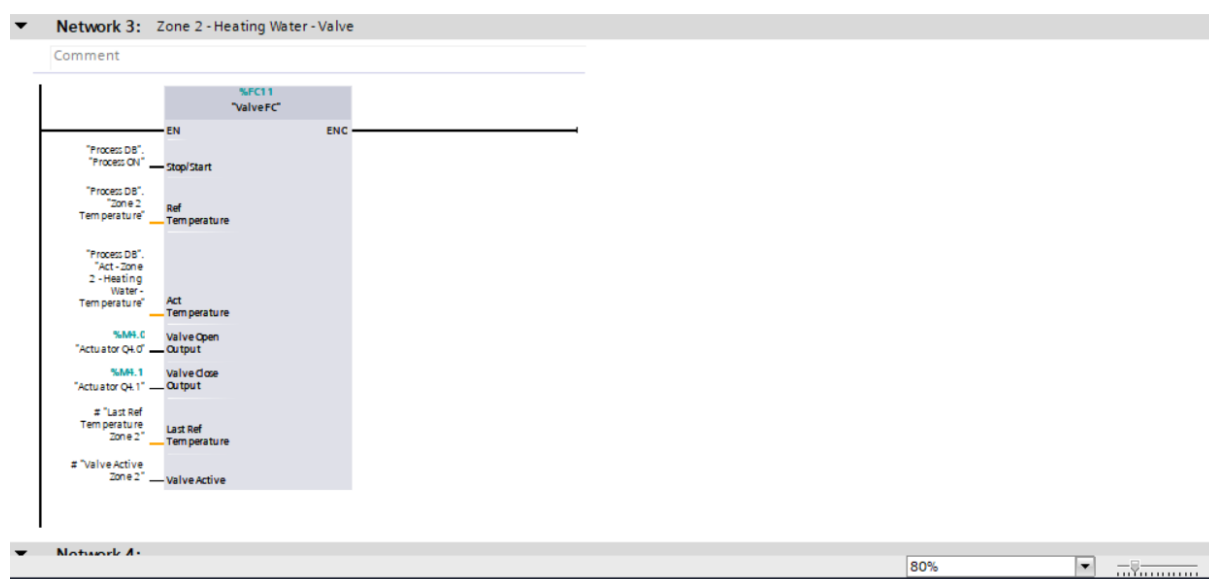


Slika 96. Četvrta mreža funkcije „Valve FC“

Ovako iskodirana funkcija sama za sebe nema nikakvo značenje jer se ne izvršava tijekom procesa. Tek postavljanjem u funkcijski blok „Valve“ dobiva svoj zaseban blok što joj omogućuje izvršavanje njene funkcije. Oba ventila imaju analogno ponašanje, stoga se jedna funkcija koristi za upravljanje oba. Na slikama 97. i 98. mogu se vidjeti zasebni funkcijski blokovi za upravljanje ventilima „Zone 1“ i „Zone 2“.

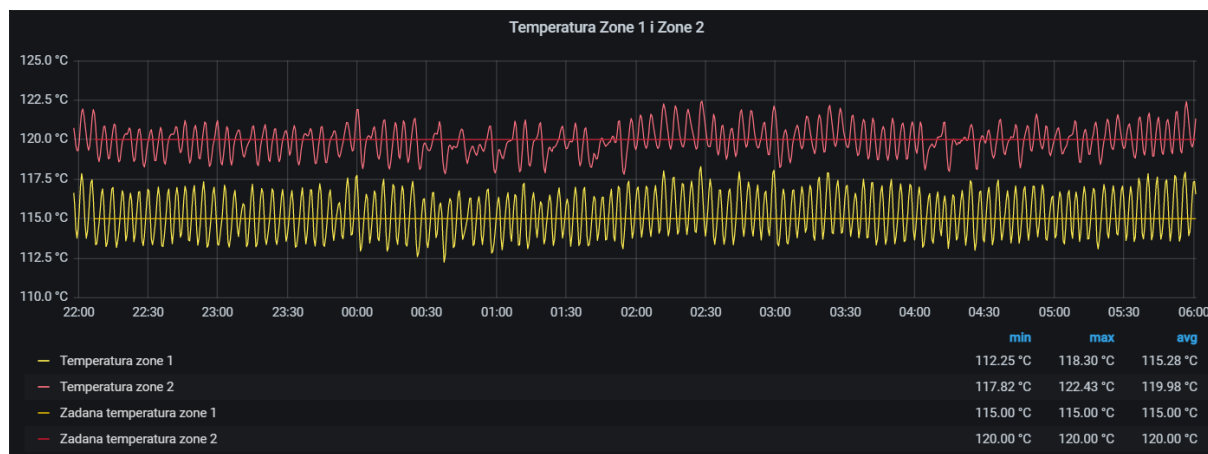


Slika 97. Pozivanje funkcije „Valve FC“ za ventil zone 1



Slika 98. Pozivanje funkcije „Valve FC“ za ventil zone 2

Ovakav PLC programski kod daje puno bolji odaziv od onog kod postavljanja ventila u jednu fiksnu poziciju, a rezultati su i više nego zadovoljavajući. Na slici 99. prikazan je graf promjene temperature u zonama 1 i 2 tijekom cijele treće smjene 22:00 - 06:00, dana 19. 12. 2021.



Slika 99. Prikaz promjene temperatura Zona 1 i 2 regulacijom ventila

Iz slike je vidljivo da je referentna temperatura za „Zonu 2“ postavljena na 120°C. Regulacija ventila, korištenjem gore objašnjenog koda, daje rezultate takve da je:

- srednja temperatura „Zone 1“: 115,28 °C što odstupa od zadane vrijednosti zanemarivih 0,28°C
- maksimalne oscilacije temperature „Zone 1“ od referentne vrijednosti su : +/- 3°C
- srednja temperatura „Zone 2“: 119,98 °C što gotovo pa i ne daje odstupanje od referentne vrijednosti
- maksimalne oscilacije temperature „Zone 2“ od referentne vrijednosti su : +/- 2,2°C

### 5.4.3. Ladder dijagram za upravljanje klapne za odzračivanje

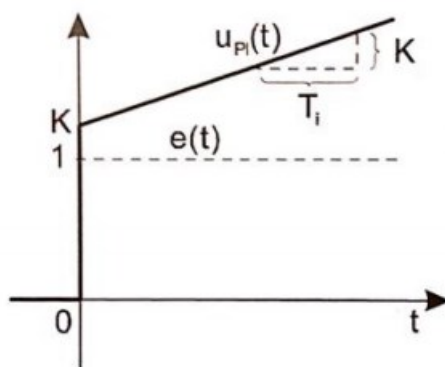
Za regulaciju klapne za odzračivanje primijenjen je PI regulator jer proces nema veliki zahtjev za brzim odzivom a traži što bolji i točniji odziv na referentnu vrijednost. U tu svrhu koristilo se gotovo rješenje *PID\_Compact* koje je integrirano u *TIA Portal*.

PI regulator građen je od dva osnovna tipa regulatora: proporcionalnog i integralnog.

P regulator ima zadaću da izlaznu veličinu regulira proporcionalno signalu pogreške što znači da je veza između ulaza i izlaza regulatora linearna. Ovaj tip regulatora je najjednostavniji i koristi se kod svih vrsta regulatora kao što su PI, PD i PID. Prednost mu je to što daje brz i stabilan odziv, dok s druge strane njegovo ponašanje uvijek ostavlja grešku u odnosu na željenu vrijednost.

I regulator integrira signal pogreške što znači da se vrijednost izlaza iz regulatora mijenja brzinom koja je proporcionalna pogrešci.

Na slici 100. prikaza je prijelazna karakteristika PI regulatora iz koje se vidi da je nagla promjena na izlazu rezultat proporcionalnog djelovanja dok integracijsko mijenja izlaz sve dok greška ne postane zanemariva.



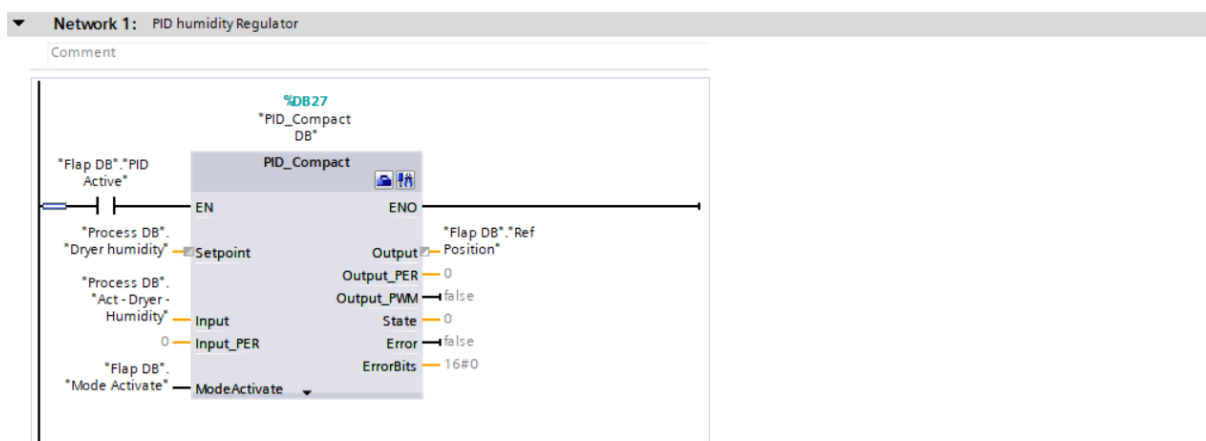
Slika 100. Prijelazna karakteristika PI regulatora [35]

Ponašanje PI regulatora je takvo da uklanja regulacijsku grešku što znači da odstupanje teži stanju u kojem je jednako nuli. To mu je velika prednost naspram jednostavnog P regulatora, no zbog integracijskog djelovanja smanjena je brzina odziva te stabilnost regulacijskog kruga.

Ukoliko se javi potreba za bržim odzivo na zadanu vrijednost tada PI regulatoru treba dodati derivacijsko djelovanje koje bi mu onda omogućilo predviđanje greške u bliskoj budućnosti što dovodi do ubrzanja reakcije regulatora.

Nakon stvaranja *PID\_Compact* bloka potrebno je ulaznim i izlaznim mjestima pridružiti odgovarajuće memorijske lokacije.

Na slici 101. može se vidjeti kako izgleda *PID\_compact* blok.



Slika 101. PID\_compact blok

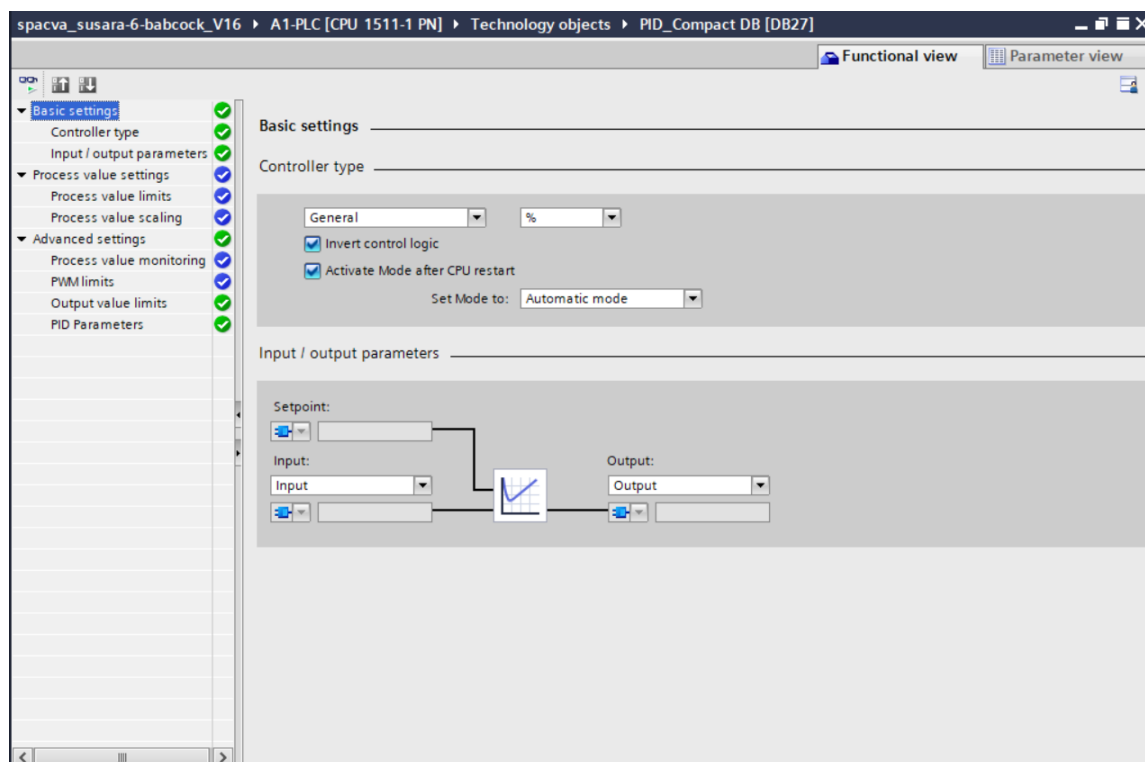
Za lakše razumijevanje koju memorijsku lokaciju je potrebno pridružiti određenim ulaznim i izlaznim mjestima, u tablici 1. ukratko su objašnjene njihove funkcije.

Tablica 1. Popis memorijskih lokacija PID\_compact bloka

Ulaz	Značenje	Izlaz	Značenje
<b>EN</b>	Uključenje i isključenje bloka sa logičkim „1“ i „0“	<b>Output</b>	Daje reguliranu vrijednost
<b>Setpoint</b>	unos referentne vrijednosti	<b>Output_PER</b>	Daje analognu reguliranu vrijednost
<b>Input</b>	Unos stvarne veličine	<b>Output_PWM</b>	daje izlaznu impulsnoširinsku modulaciju
<b>Input_PER</b>	Unos analogne vrijednosti	<b>State</b>	Način rada PID regulatora
<b>ModeActive</b>	Prijelaz iz jednog načina rada u drugi	<b>Error</b>	Daje <i>True</i> ako postoji greška
		<b>ErrorBits</b>	Ispisuje grešku koja se dogodila

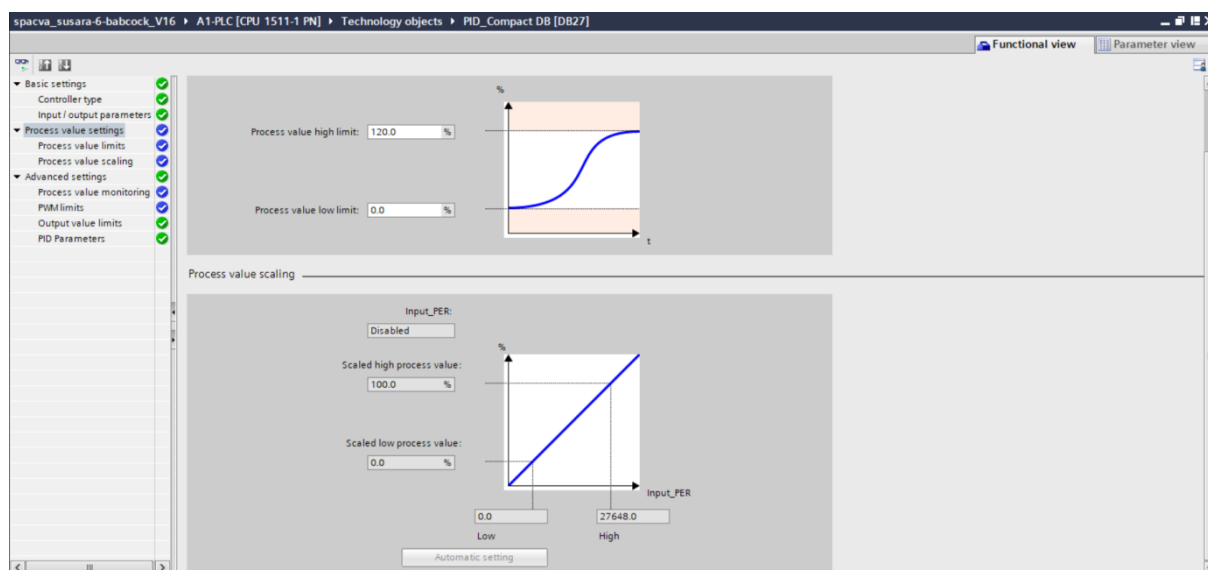
Na prvi ulaz „Setpoint“ funkcijskog bloka PID regulatora dovedena je referentna vrijednost vlažnosti koja mora biti unutar sušare „Dryer humidity“. Za stvarnu veličinu „Input“ koju je potrebno dati PID regulatoru odabrana je trenutna vrijednost vlažnosti unutar sušare. Tražena izlazna vrijednost „Output“ pridružena je memorijskoj lokaciji „Ref position“ koja daje informaciju u koju poziciju treba doći klapna.

Nakon podešavanja ulaza i izlaza slijedi konfiguriranje PID regulatora. Na slici 102. prikazan je prozor s opcijama za podešavanje. Prva skupina opcija je osnovna „Basic settings“ gdje se od ponuđenih odabire jedan tip regulatora, u ovom slučaju je izabran „General“ koji ima mjernu jedinicu postotka. Uz to, u poglavlju „Input /output parameters“ definira se vrsta ulaznih i izlaznih podataka od ponuđenih: *real* i *PWM* za „Input“ i *real*, *PWM* i *PER* za „Output“. Odabrano je da su ulazne i željene izlaz vrijednosti tipa *Real*.



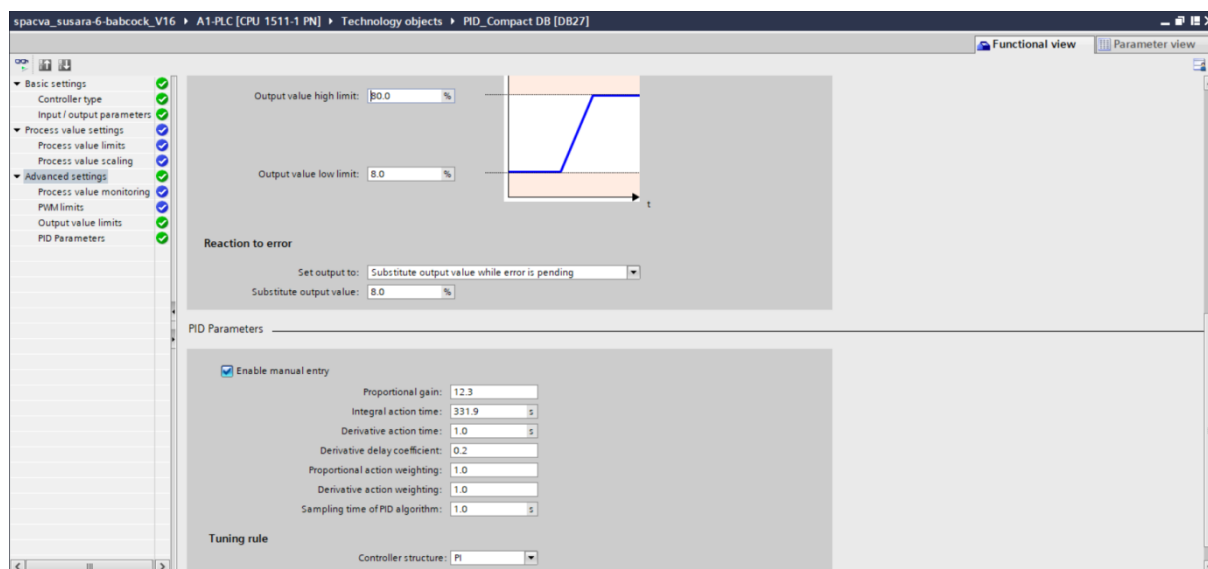
Slika 102. Osnovne postavke za konfiguraciju PID regulatora

U drugoj skupini opcija za konfiguraciju regulatora „Process value settings“ definira se gornja i donja granica referentne ulazne veličine te se daje mogućnost skaliranja ukoliko je za ulaz odabran analogni signal, slika 103.



Slika 103. Procesne postavke za konfiguraciju PID regulatora

Na slici 104. prikazana je posljednja skupina opcija u kojima se podešavaju parametri PI regulatora te podešavaju gornja i donja granica izlazne veličine „Output“. U posljednjoj postavci „Tuning role“ odabrana je struktura PI regulatora.



Slika 104. Napredne postavke za konfiguraciju PID regulatora

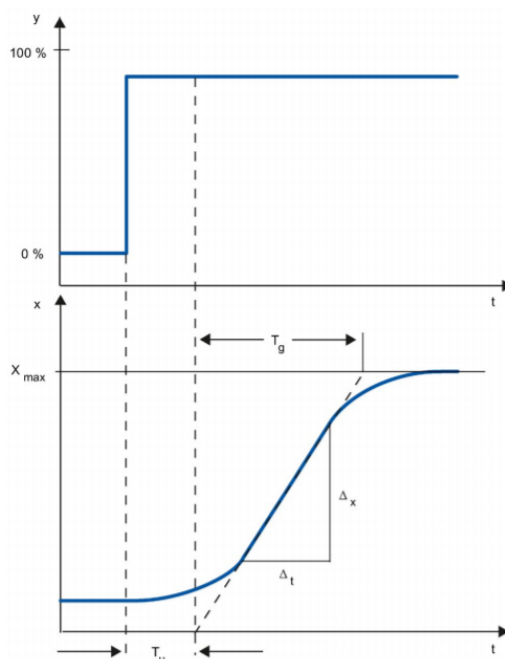
Iako TIA Portal omogućuje automatsko traženje parametara PID regulatora pomoću opcije „Pretuning“, parametri su se ručno unosili. Parametri PI regulatora odabrali su se primjenom sljedećih jednadžbi [36]:

$$GAIN = 1.2 \cdot v_{\max} \cdot T_u \quad (5.2)$$

$$TI = 4 \cdot T_u \quad (5.3)$$

$$v_{\max} = \Delta x \cdot \Delta t \quad (5.4)$$

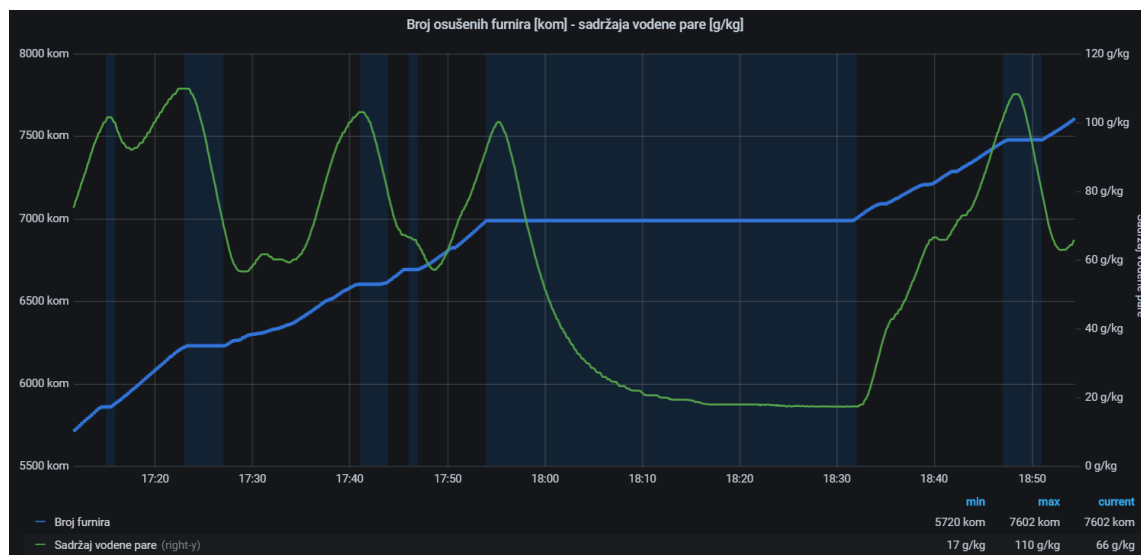
Na slici 105., prikazan je graf željenog aperiodskog odziva na step funkciju na kojem su ucrtane ključne veličine potrebne za izračunavanje parametara regulatora.



Slika 105. Aperiodski odziv na step funkciju

Veličine potrebne za izračunavanje parametara PI regulatora izračunate su iz grafa promjene sadržaja vodene pare prema uzoru na graf sa slike 106.

Na slici 105. prikazana je promjena sadržaja vodene pare unutar sušare za vremensko razdoblje 17:10 - 18:55 dana 15. 11. 2021. Plava polja označavaju periode kada se nisu sušili furniri. Plavo označeno vremensko razdoblje 17:55 - 18:32 predstavlja vrijeme kada radnici imaju pauzu. Za to vrijeme sadržaj vlage pada na najmanju moguću vrijednost, tj. izjednači se s okolišnom. Nakon 18:32 započinje sušenje furnira što u ovom slučaju to označava impuls step funkcije. Koristeći podatke s više ovakvih grafova, kada nakon odmora započne sušenje, izračunali su se parametri PI regulatora sa slike 104.

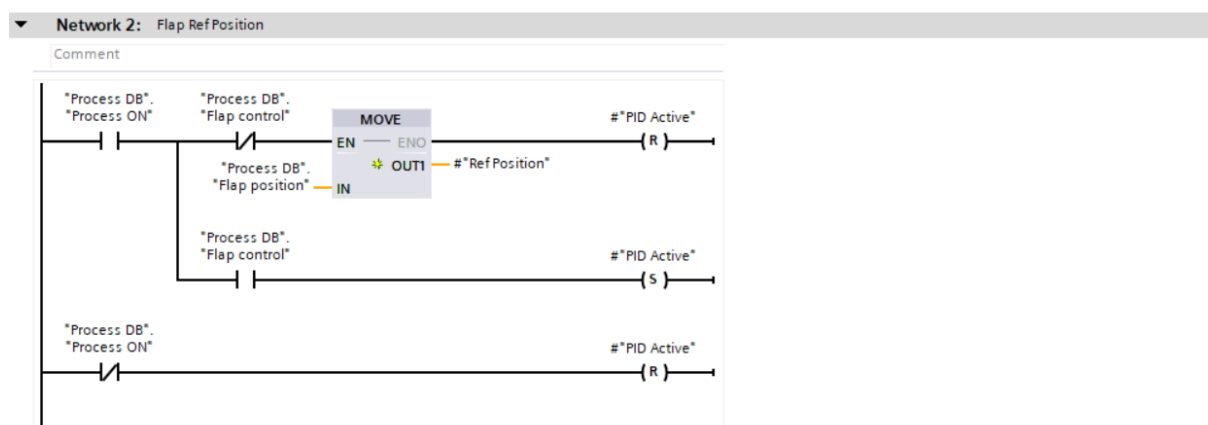


Slika 106. Promjena sadržaja vodene pare bez regulacije klapne

PI regulator ima zadaću da mijenja referentnu poziciju klapne tako da vlažnost unutar sušare ne prijeđe zadanu vrijednost, u ovom sučaju 90 g/kg za recept hrasta 0,56.

Na slici 107. prikazan je *ladder* dijagram u funkcijskom bloku „Flap“ koji izlaz „Output“ iz bloka *PID\_compact* koristi kao referentnu vrijednost pozicije klapne ukoliko se aktivira funkcija regulacije klapne za odznačavanje na HMI-u, odnosno kada memorijska lokacija „Flap control“ dobije logično stanje „1“.

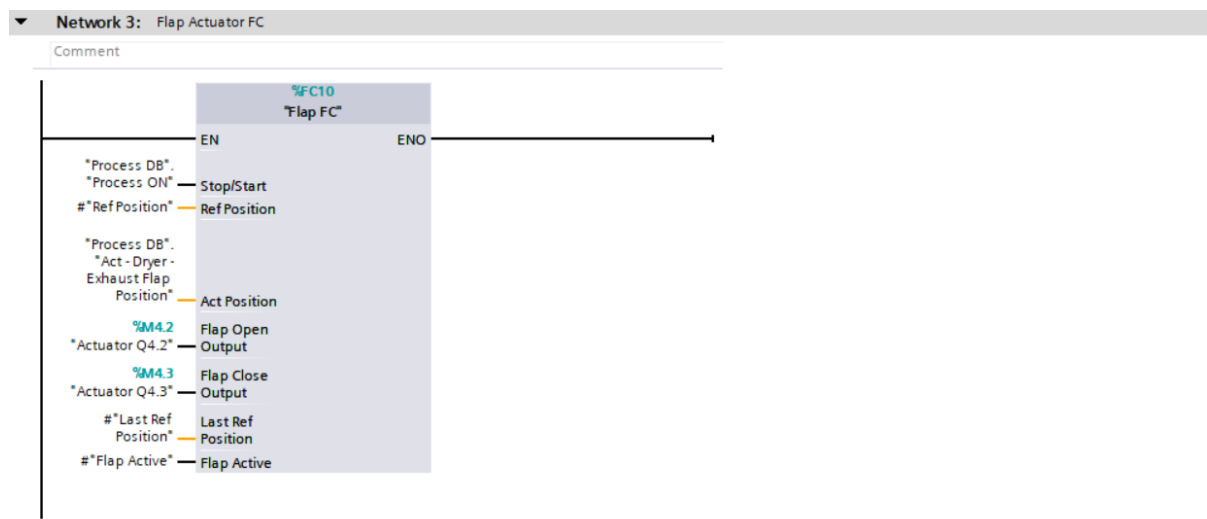
U suprotnom, ako se ne aktivira funkcija automatske regulacije klapne, tada se za referentnu poziciju klapne odabire pozicija upisana u receptu.



Slika 107. Ladder dijagram za aktiviranje PID regulatora

Nakon mreže „Flap Ref Position“ u kojoj se određuje referentna pozicija klapne u isti funkcijski blok postavlja se funkcija „Flap FC“ u blok koji određuje kada se počinje zatvarati i otvarati klapna, slika 108.





Slika 108. Poziv funkcije „Flap FC“ za regulaciju klapne

Značenje ulaza u blok „Flap FC“ bit će objašnjeno opisom sljedećih slika koje prikazuju *laddare* dijagram navedene funkcije.

Prva slika opisa funkcije „Flap FC“ prikazuje njenu internu bazu podataka i mreže koje grade funkciju: „Type conversion“, „Flap Active“, „Flap Open“ i „Flap Close“. Vidljivo je da su funkcionalnosti mreža jednake onima kod funkcije „Valve FC“ za regulaciju ventila.

Name	Data type	Default value	Comment
1	Input		
2	Stop/Start	Bool	0 = Stop, 1 = Start
3	Ref Position	ULint	
4	Act Position	Real	
5	Output		
6	<Add new>		
7	InOut		
8	Flap Open Output	Bool	Actuator Open
9	Flap Close Output	Bool	Actuator Close
10	Last Ref Position	ULint	
11	Flap Active	Bool	
12	Temp		
13	Ref Position Int	Int	
14	Act Position Int	Int	
15	Constant		
16	<Add new>		

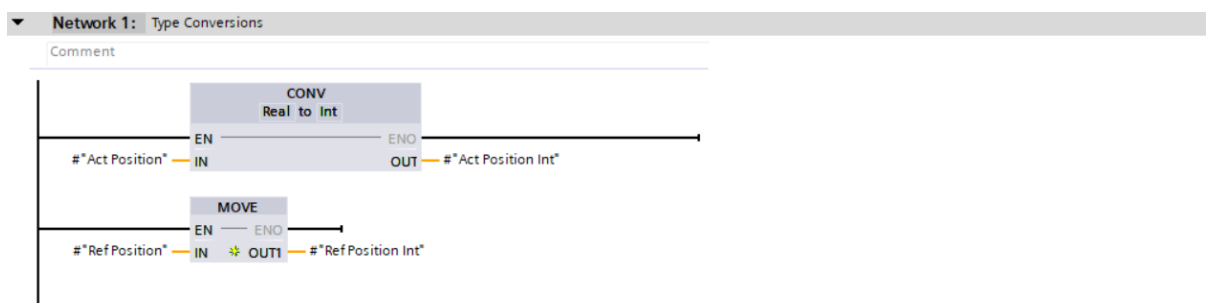
Block title: Flap FC  
Flap actuator function

- Network 1: Type Conversions
- Network 2: Flap Activate
- Network 3: Flap Open
- Network 4: Flap Close

Slika 109. Prikaz dijelova i internih varijabli funkcije „Flap FC“ za regulaciju klapne

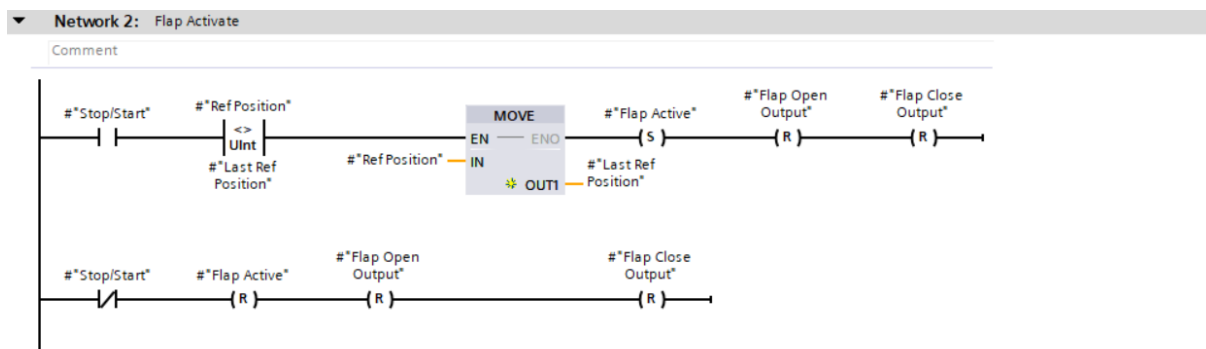
Prva mreža „Type conversion“, prikazana na slici 110., ima zadatak da konvertira trenutnu vrijednost pozicije klapne „Act – Dryer – Exhaust Flap Position“ tipa Real u podatak tipa Int

čija memorijska lokacija ima naziv „Act Position Int“. Uz to se kopira vrijednost referentne pozicije u koju se želi postaviti klapna „Ref Position“ u memorijsku lokaciju „Ref position Int“. U ovom slučaju koristi se obrnuta logika naspram funkcije „Valve FC“ jer se ovdje sve manipuliraju podatci tipa *Int*.



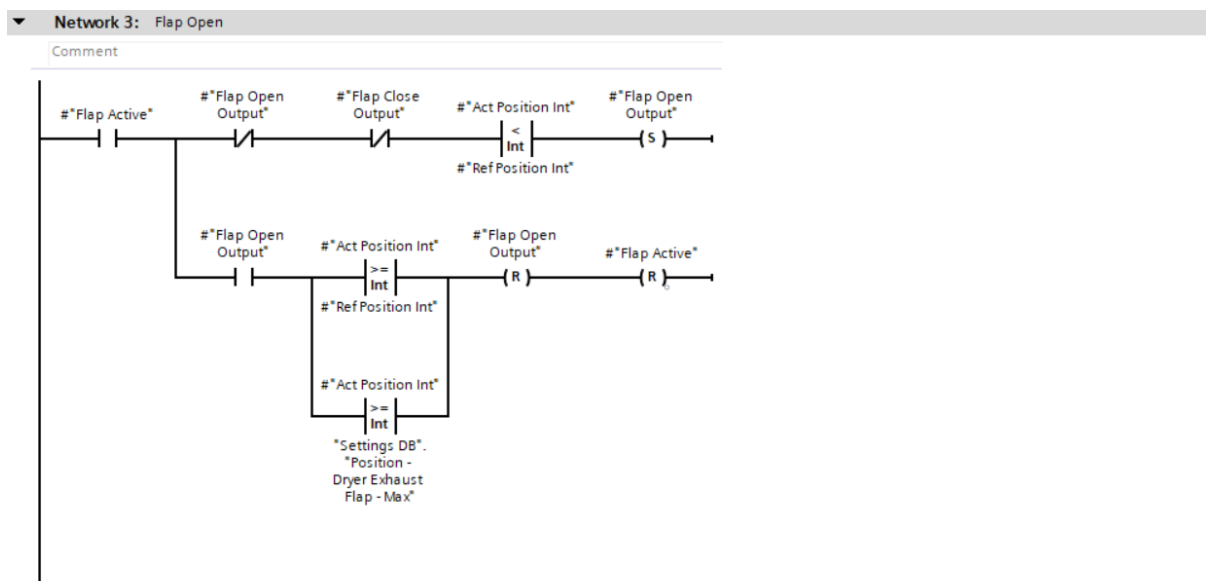
Slika 110. Prva mreža funkcije „Flap FC“

Mreža „Flap Activate“, slika 111., ispunjenjem uvjeta da je prošla pozicija klapne „ Last Ref Position“, različita od one u koju treba doći „ Ref Position“, omogućuje otvaranje i zatvaranje klapne. Funkcionalnost ove mreže glavni je uvjet za regulaciju klapne zato što je memorijska lokacija „Flap Active“ postavljena kao ključni uvjet za pomicanje klapne.



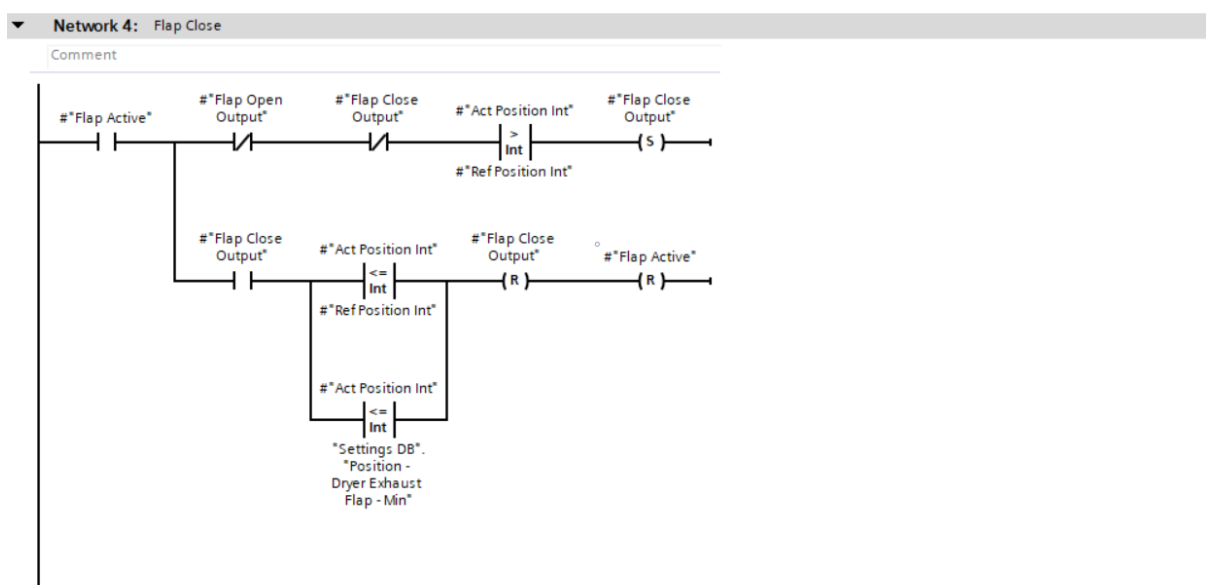
Slika 111. Druga mreža funkcije „Flap FC“

Kada memorijska lokacija „Flap Active“ prijeđe u visoko stanje i ispunjen je uvjet da je trenutna pozicija klapne manja od referentne, klapna za odzračivanje počinje se otvarati, slika 112. Kada klapna dođe u poziciju koja ima jednaku ili veću vrijednost od referentne tada prestaje otvaranje klapne i on staje u tom položaju. Paralelno navedenom uvjetu postavljen je i uvjet za zaustavljanje klapne ako je vrijednost njene trenutne pozicije veća ili jednaka maksimalnoj mogućoj vrijednosti pozicije.



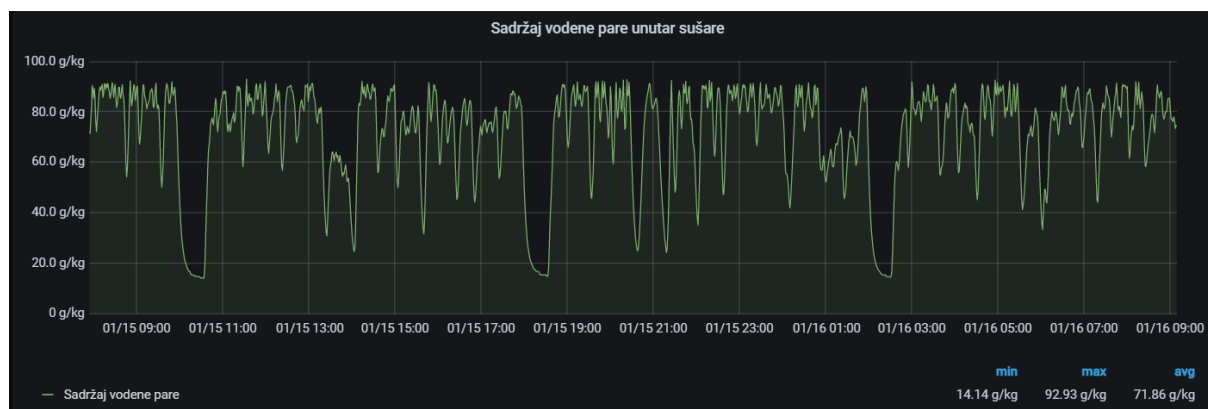
Slika 112. Treća mreža funkcije „Flap FC“

Posljednja mreža „Flap Close“ napravljena je na analogan način kao i prethodna „Flap Open“, samo što su uvjeti u ovome slučaju obrnuti, slika 102. Klapna se počinje zatvarati ako je vrijednost trenutne pozicije veća od zadane referentne vrijednosti. Klapna se zatvara sve dok se ne ostvari uvjet da pozicija klapne ima manju ili jednaku vrijednost kao i referentna vrijednost ili ako je klapna došla u krajnju donju poziciju.



Slika 113. Četvrta mreža funkcije „Flap FC“

Na slici 114. prikazana je promjena sadržaja vodene pare za vremensko razdoblje od 15. 1. 2021 u 9:00 do 16. 1. 2021. u 9:00. Može se primijetiti da sadržaj vodene pare ne prelazi značajno receptom zadanih 90 g/kg. Ispod grafa može se iščitati podatak da je maksimalna vrijednost sadržaja vodene pare bila 92.93 g/kg, što znači da je greška bila samo 2,93 g/kg. Budući da u sušari nema uređaja za ovlaživanje prostora, nije moguće regulirati vlažnost zraka u trenucima kada sadržaj vodene pare pada.



Slika 114. Promjena sadržaja vodene pare unutar sušare tijekom regulacije klapne

## 5.5. Prikupljanje i nadzor podataka

Podatci s PLC-a prikupljaju se pomoću uređaja *SEMATIC IOT2050*, slika 115., koji predstavlja industrijsku platformu sličnu *PC-u* na koju korisnik može instalirati razne aplikacije.



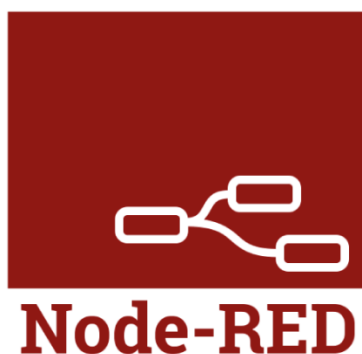
Slika 115. Siemens SIMATIC IOT2050 IIoT gateway [29]

Prije svega potrebno je na njega instalirati *Linuxov* operacijski sustav *Ubuntu* koji je pandan operacijskom sustavu *Windows* na osobnom računalu. Na slici 116. prikazan je logo navedenog operacijskog sustava.



Slika 116. Ubuntu logo [30]

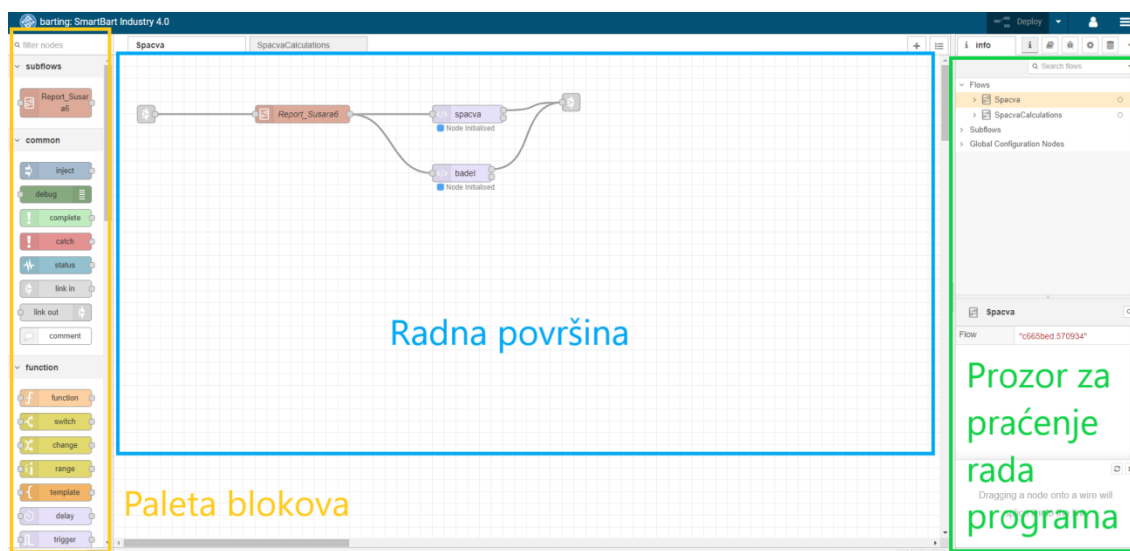
Nakon pokretanja operacijskog sustava na *IOT* uređaj instalira se platforma za grafičko programiranje *NodeRED*. Na slici 117. prikazan je logo *Node-RED* platforme.



Slika 117. Node-RED logo [31]

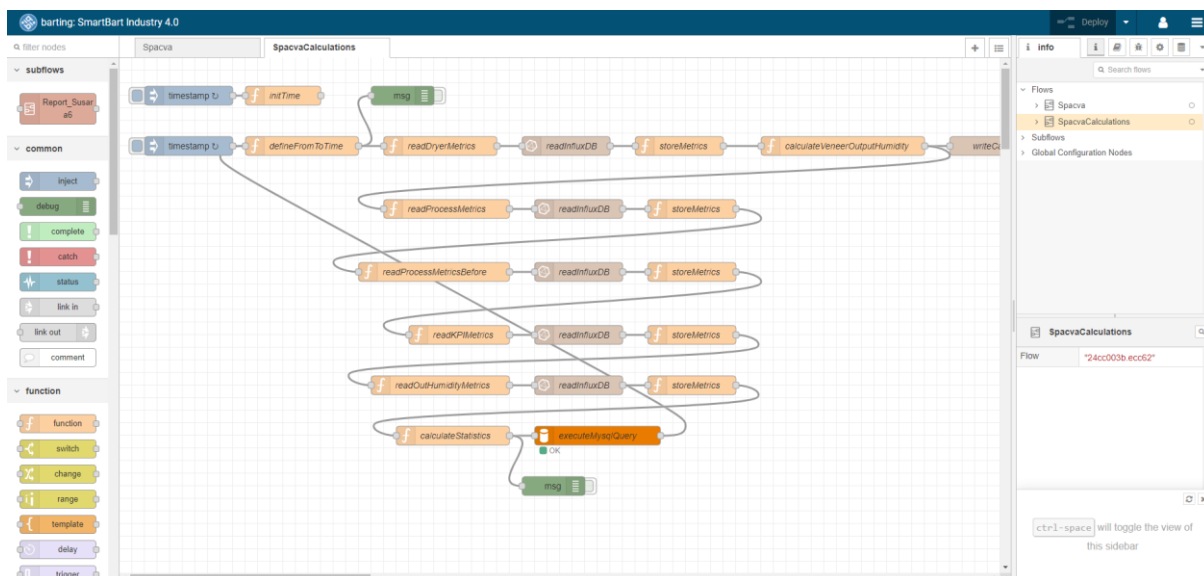
*Node-RED* spada u skupinu *VPL* (*Visual programming language*) alata jer omogućuje korisniku pojednostavljen i razumljiv način programiranja povezivanjem vizualnih programskih blokova. Ovakvo programiranje zamišljeno je kao povezivanje programskih blokova preko njihovih ulaza i izlaza s time da svaki blok izvršava neki definirani proces.

*Node-RED* editor pokreće se pomoću Internet preglednika. Njegovo radno sučelje, slika 118., dijeli se na tri glavne cjeline: radna površina, paleta blokova i prozor praćenja rada programa, tj. za *debugiranje*.



Slika 118. Glavne cjeline Node-RED sučelja

Procesi koje izvršavaju blokovi definiraju se pomoću tekst editora te u *JavaScriptu* što omogućuje korisnicima kreiranje funkcija blokova prema njihovoj potrebi. Tako u nekim situacijama blok treba izvršiti relativno kompleksne zadatke prije nego što na izlazu preda informaciju sljedećem bloku. Na slici 118. prikazani su blokovi koji izvršavaju razne kalkulacije iz prikupljenih podataka. Izračunate vrijednosti prikazane su u automatski generiranim izvještajima koje dobiju voditelji proizvodnje „Furnira“.



Slika 119. Prikaz povezivanja blokova u Node-REDu

Problem kod ovakvog načina programiranja javlja se prilikom kreiranja kompleksnijih projekata čime dolazi do zamršenosti i prezatrpne strukture što program projekta čini teže čitljivim.

Povezivanje *SIMATIC IOT2050* uređaja s PLC-om vrši se pomoću Ethernet kabla *TCP/IP* protokolom. Potrebno je uskladiti *IP*, odnosno subnet, adrese oba uređaja kako bi komunikacija bila moguća.

Nakon povezivanja, u *TIA Portalu* potrebo je definirati bazu podataka koji će se povlačiti s PLC-a pomoću navedenog *Gateway* uređaja. Na slici 120. prikazana je baza „*IOTData*“ u kojoj su definirane varijable koje će se preuzimati od PLC-a.

Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Supervis...	Comment
Static										
Veneer Active Index	UInt	0.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Veneer Last Active Ind...	UInt	2.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Veneer Temperature L...	UInt	4.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
VeneerMetric - Node-R...	"VeneerMetricsData"	6.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
DryerMetric - Node-Red	"DryerMetricsData"	90.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Temperature Zone 1	Real	90.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Temperature Zone 2	Real	94.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Initial Moisture	Real	98.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Final Temperature ...	Real	102.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Final Temperature ...	Real	106.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Humidity Zone 1	Real	110.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Flap Position	Real	114.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Transport Speed	Real	118.0	0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Fan 1 Speed	SInt	122.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Fan 2 Speed	SInt	123.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Fan 3 Speed	SInt	124.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Fan 4 Speed	SInt	125.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Fan 5 Speed	SInt	126.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Cooling Field Supp...	SInt	127.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Cooling Field Exha...	SInt	128.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
Process Status	SInt	129.0	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
KPIMetric - Node-Red	"KPIMetricsData"	130.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
ProcessMetrics - Node...	"ProcessMetricsData"	166.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
VeneerTemperatureM...	"VeneerTemperatur..."	196.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
VeneerMetrics	Array[0..200] of "V..."	222.0			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		

Slika 120. Baza podataka „IOTData“ u TIA Portalu

U *Node-RED*-u potrebno je kreirati dva bloka, prvi s kojim se *Gateway* usklađuje s PLC-om i definiraju podatci koji će se preuzimati, i drugi s koji se definira baza podataka na *Cloud*-u u koju će se spremati prikupljeni podatci.

Korištena baza podataka je *InfluxDB* koja sve podatke povezuje s vremenskim serijama te je kreirana s ciljem pohrane velike količine podataka. Na slici 121. prikazan je logo *Influx* baze podataka.



Slika 121. InfluxDB logo [32]

Za prikaz podataka korištena je web aplikacija za analitiku i vizualizaciju podataka *Grafana*, čiji je logo prikazan na slici 122. Unutar sučelja *Grafane* definira se server baze podataka iz koje se žele preuzeti podatci, u ovom slučaju s *InfluxDB*-a, čime je omogućeno manipuliranje prikupljenim podacima s PLC-a.



Slika 122. Logo web aplikacije Grafana [33]

Na slici 123. prikazani su podatci prikupljeni sa sušare. Podatci su definirani u razne grafove koji omogućavaju detaljnu analizu procesa sušenja.



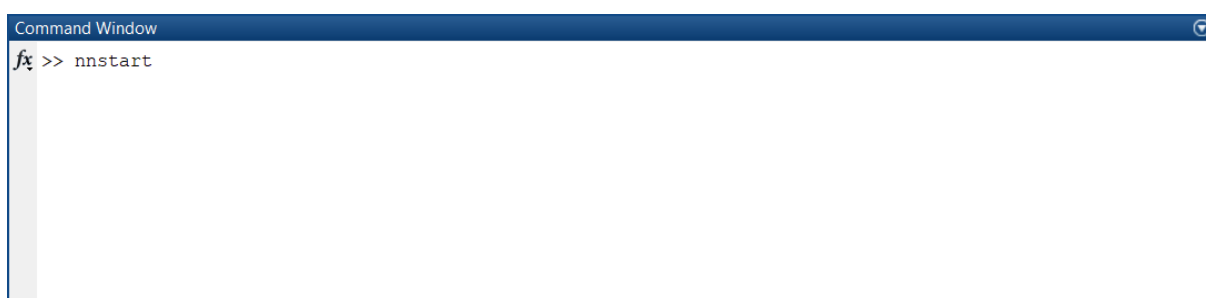
Slika 123. Prikupljeni podatci prikazani na Grafani

## 5.6. Izrada modela neuronske mreže

Na temelju 4. poglavlja koje objašnjava građu i način funkcioniranja neuronskih mreža, moguće je ručno isprogramirati neuronski mrežu koja bi rješavala problem predviđanja izlazne vlažnosti furnira ovisno o stanju unutar sušare. No u ovom će se radu koristiti alat *Neural Network Toolbox* iz računalnog programa *MATLAB*. Alat *Neural Network Toolbox* zasniva se na grafičkom sučelju koje na jednostavan način nudi korisniku unos podataka te građenje neuronske mreže. Ovakav način rada s neuronskim mrežama ne zahtijeva detaljno poznavanje rada umjetnih neurona, već se od korisnika traži samo osnovno teoretsko znanje.

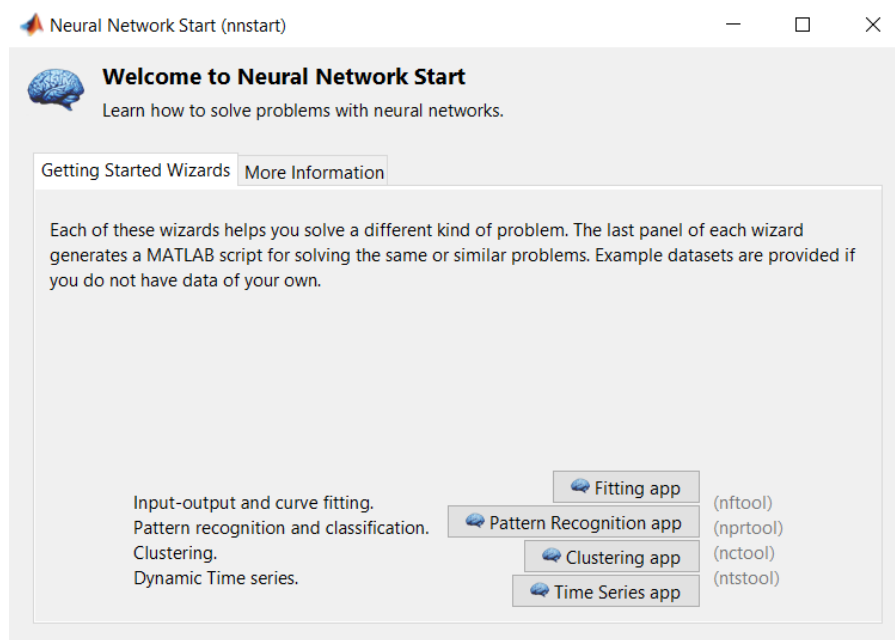
### 5.6.1. Kreiranje neuronske mreže u MATLAB-u

Upisivanjem naredbe „nnstart“ u *Command Window* sučelje programa *MATLAB*, slika 124., otvara se početni grafički prozor za izgradnju neuronskih mreža.



Slika 124. Pozivanje početnog grafičkog prozora Neural Network Toolboxa

Na samom početku potrebno je odrediti koja vrsta neuronskih mreža će se koristiti. Na slici 125. prikazan je početni prozor koji nudi odabir vrste neuronske mreže.



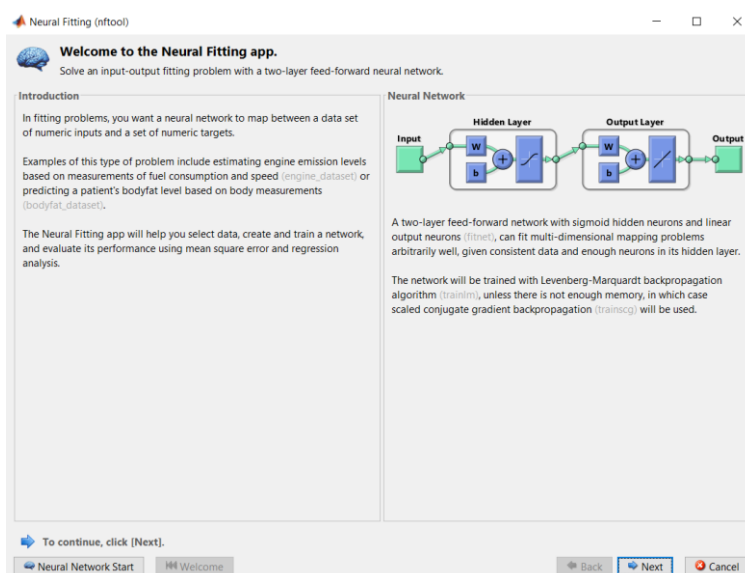
Slika 125. Početni prozor Neural Network Toolbox-a

Prvi alat „Fitting app“ koristi se kod problema gdje se traži relacija između ulaznih skupova podataka i željenih izlaznih ciljeva. Odabirom „Pattern Recognition app“ dobiva se neuronska



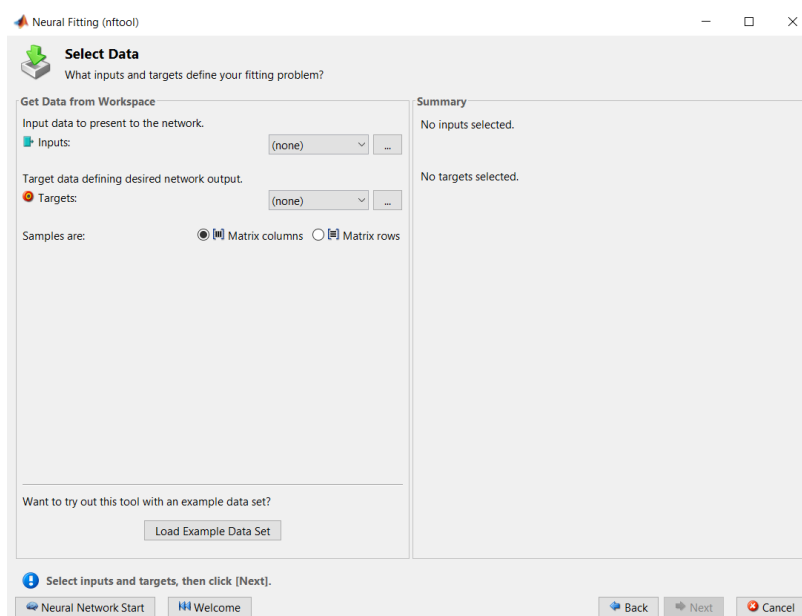
mreža za rješavanje problema prepoznavanja uzorka tako da mreža klasificira ulaze u kategorije. Treći alat „Clustering app“ služi za rješavanje problema u kojima se ulazni podatci grupiraju u skupove prema nekoj sličnosti koristeći samo-organizirajuću neuronsku mrežu. Posljedni ponuđeni odabir „Time Series app“ stvara dinamičku neuronsku mrežu koja rješava probleme kod kojih prethodno korišteni uzorci utječu imaju utjecaj na trenutne i buduće.

U ovom slučaju koristi se prva opcija „Fitting tool“ nakon čega se otvara prozor koji ukratko objašnjava način rada samog alata te odabrane neuronske mreže prikazan na slici 126.



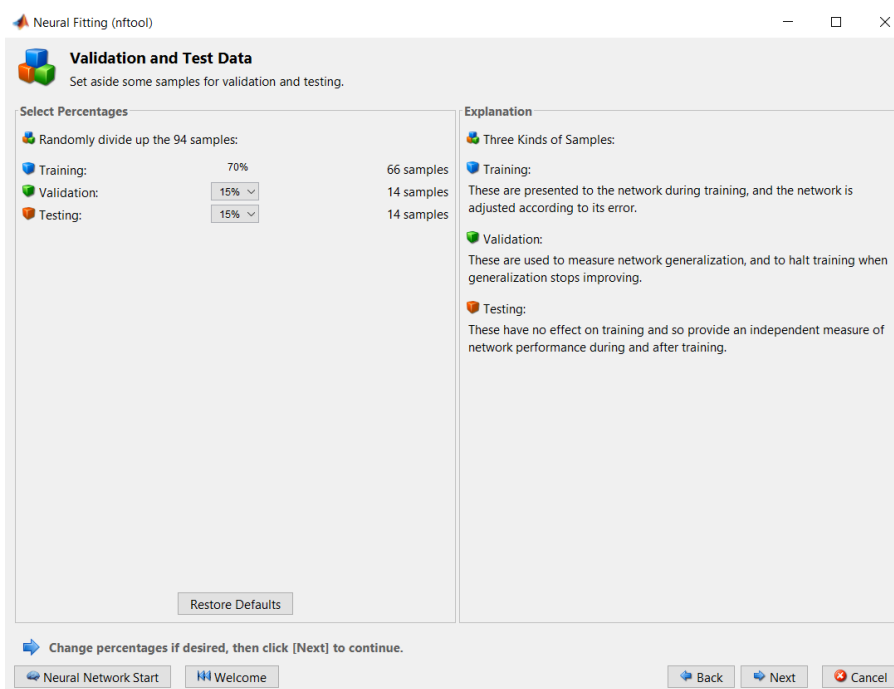
Slika 126. Prozor za pojačnjavanje rada neuronske mreže

Pritiskom na dugme „Next“ dolazimo do prozora prikazanog na slici 127. unutar kojega se nudi unos ulazno-izlaznih podataka za učenje. U ovom prozoru nudi se unos već pripremljenih testnih podataka kako bi se moglo utvrditi ponašanje neuronske mreže prije unosa stvarnih podataka.



Slika 127. Unos ulaznih podataka i ciljeva

Nakon unosa podataka za treniranje mreže pritisom na gumb „Next“ dolazi se do prizora koji služi za odabir količine podataka koji će se koristiti za validaciju i testiranje istrenirane neuronske mreže, slika 128. Unutar ovog prozora postotak podataka za treniranje fiksno je određen na 70% dok je količina podataka za validaciju i treniranje ostavljena korisniku na odabir čime se posljedično mijenja i količina prvog skupa podataka. Najčešće se koristi već prikazana opcija s 15% podataka za validaciju i 15% podataka za testiranje ili opcija gdje se uzima 20% podataka za validaciju a ostatak služi za testiranje neuronske mreže.

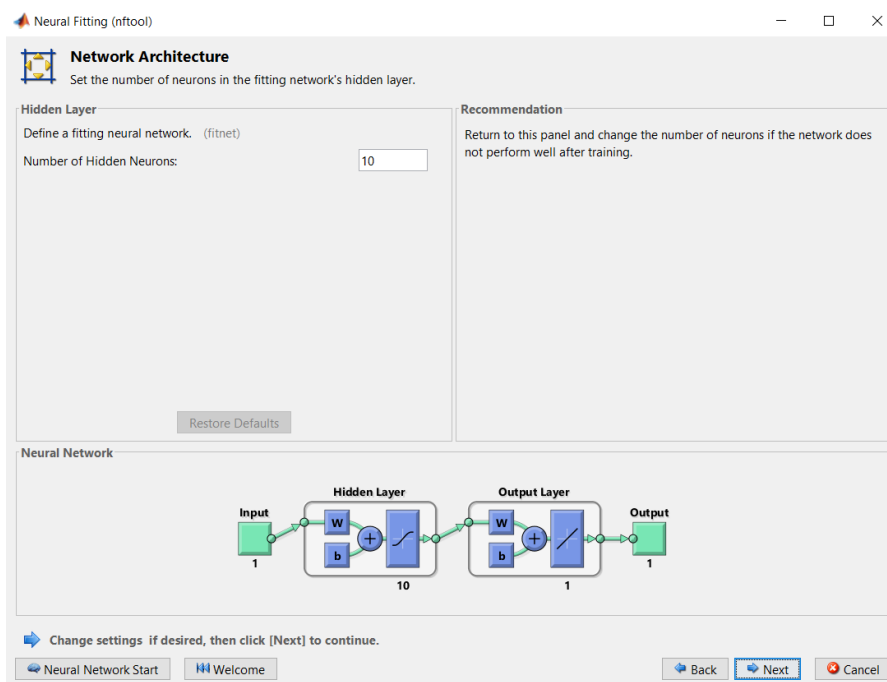


Slika 128. Prozor za odabir podataka za validaciju i testiranje

Nakon što se odabere skup podataka za trening, validaciju i testiranje, pomoću gumba „Next“ otvara prozor za definiranje arhitekture mreže, slika 129. Unutar ovog prozora ponuđen je odabir broja neurona skrivenog sloja prema vlastitom izboru. Iako nema nekog strogo pravila za odabir broja neurona unutar skrivenog sloja, predlažu se tri smjernice [34]:

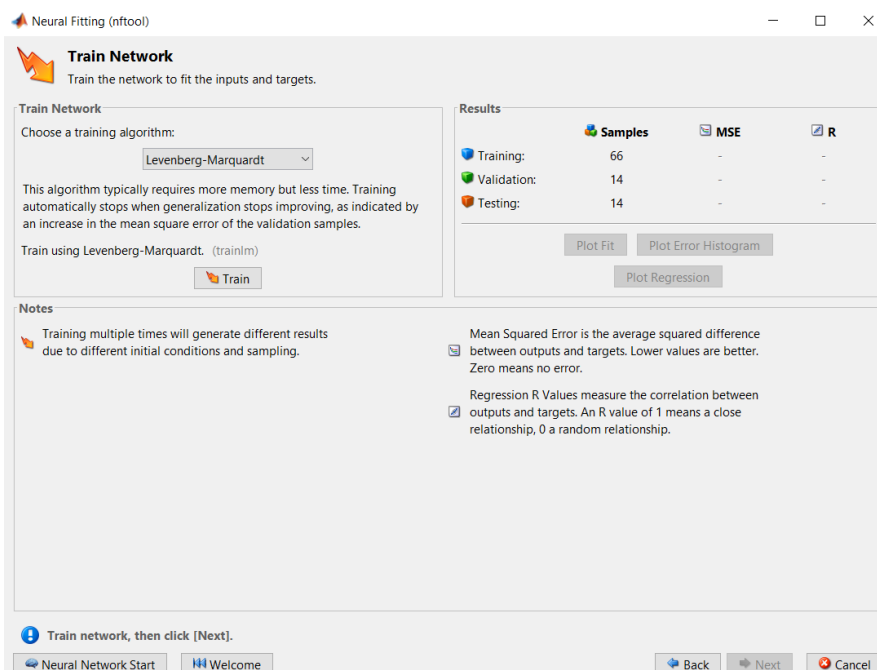
- broj neurona skrivenog sloja trebao bi biti između aritmetičkih vrijednosti ulaznih i izlaznih podataka
- broj neurona skrivenog sloja trebao bi biti unutar zone 70-90% zbroja aritmetičkih vrijednosti parametara
- broj neurona trebao bi se određivati prema izrazu:

$$\text{broj neurona} = (\text{ulazni parametri} - \text{izlazni parametri}) \cdot \frac{2}{3} \quad (5.1)$$



Slika 129. Prozor za stvaranje arhitekture mreže

Nakon definiranja arhitekture neuronske mreže pritiskom na „Next“ dolazi se do prozora, slika 130., za početak treniranja mreže pritiskom na gumb „Train“. Uz to, unutar ovog prozora omogućen je odabir algoritma za treniranje mreže. Prema zadanim vrijednostima *MATLAB*-a odabran je algoritam *Levenberg-Marquardt* koji će biti korišten u eksperimentu, a moguće je odabrati još dva algoritma: *Bayesian Regularization* i *Scaled Conjugate Gradient*.



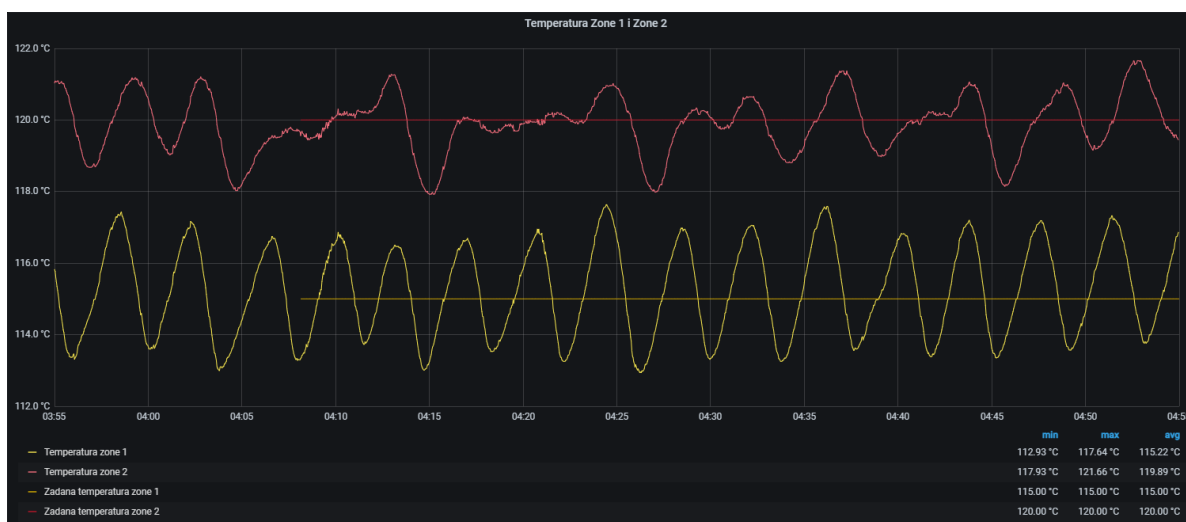
Slika 130. Prozor za izvođenje treniranja mreže

### 5.6.2. Eksperimentalni rad

Za eksperimentalni rad dostavljena su četiri skupa podataka ručno izmjerenih izlaznih vlažnosti furnira. Mjerenja su se uzimala za vrijeme popodnevnog i noćnog smjene dana 19. 1. 2021. u vremenskim razdobljima: prva mjerenja 15:15 - 16:20, druga mjerenja 19:50 - 20:50, treća mjerenja 00:35 - 01:35 i četvrta mjerenja 03:55 - 04:55. Tijekom prvog i četvrtog razdoblja mjerenja brzina trake bila je oko 20 m/min, dok je kod preostala dva razdoblja mjerenja brzina bila prosječno 17 m/min. Za oba slučaja bit će izrađena neuronska mreža koja bi predviđala izlaznu vlažnost furnira temeljem stanja zraka unutar sušare. Koristit će se jedan skup podataka za brzinu trake 20 m/min, a drugi za validaciju točnosti mreže, te će se analogno tome napraviti i validirati mreža za podatke kada je brzina trake bila 17 m/min.

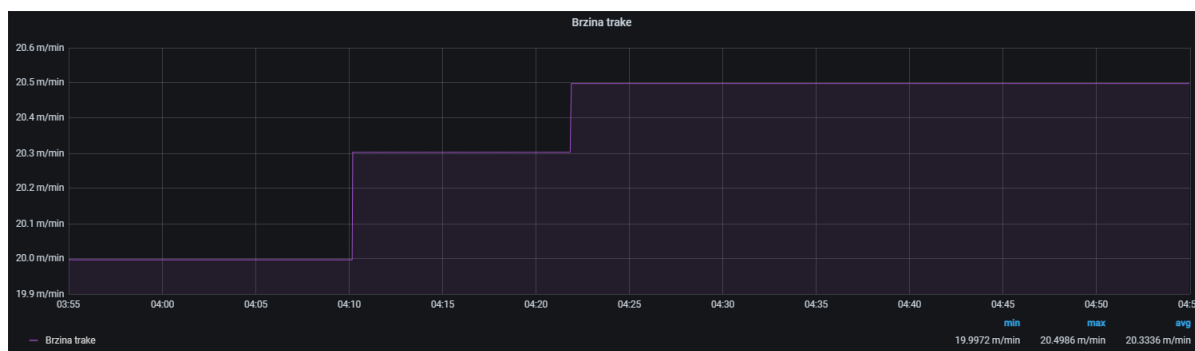
Tijekom posljednjeg vremenskog razdoblja mjerenja radnici su u odjelu „Furnira“ osušili 1677 listova furnira od kojih su za njih 190 izmjerili izlaznu vlažnost.

Na slici 131. prikazana je promjena temperatura unutar „Zone 1“ i „Zone 2“ tijekom posljednjeg razdoblja mjerenja. Vidljivo je da je prosječna temperatura unutar zona gotovo jednaka onima zadanim receptom, za „Zonu 1“ 115°C i za „Zonu 2“ 120°C.



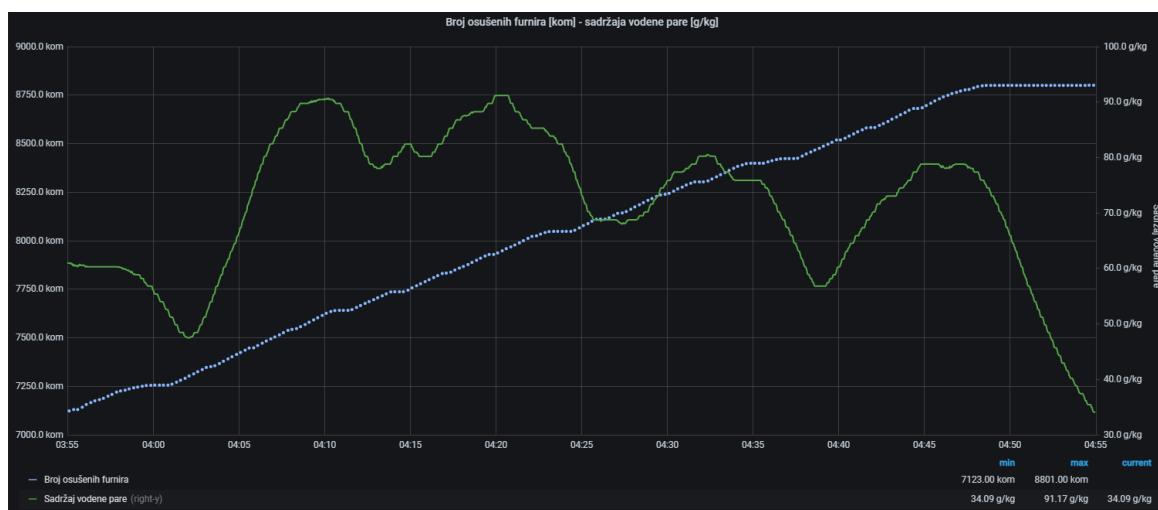
Slika 131. Temperature Zone 1 i Zone 2 za vrijeme prikupljanja mjerenja

Slika 132. prikazuje promjenu brzine trake tijekom jednakog razdoblja. Iako je prosječna brzina 20.33 m/min, zbog jednostavnosti izračuna pretpostaviti će se da je brzina tijekom cijelog razdoblja bila 20 m/min.



Slika 132. Brzina trake za vrijeme sušenja mjerenih furnira

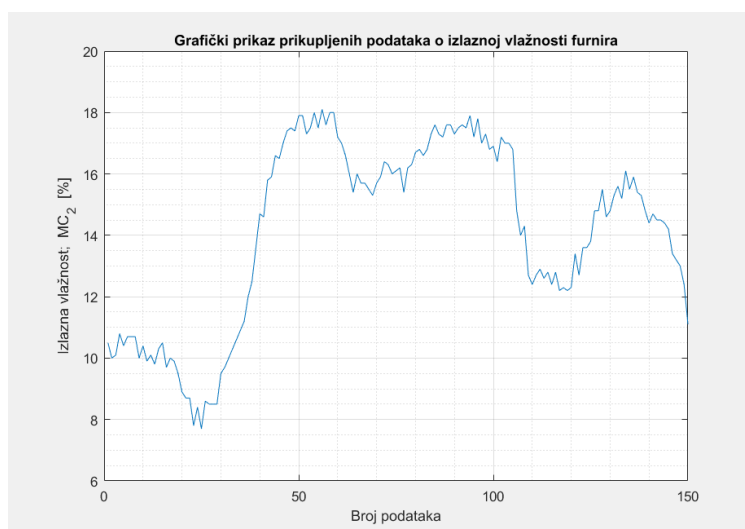
Promjena sadržaja vodene pare unutar komora i broj osušenih furnira prikazani su na slici 133. Lako je uočljivo da vlažnost unutar sušare opada ukoliko se stane s ubacivanjem novih listova furnira u sušaru. Maksimalna količina vodene pare unutar sušare bila je 91.17 g/kg što je rezultat regulacije klapne za odzračivanje, dok je minimalna vrijednost iznosila 34.09 g/kg.



Slika 133. Sadržaj vodene pare unutar sušare za vrijeme sušenja mjerenih furnira

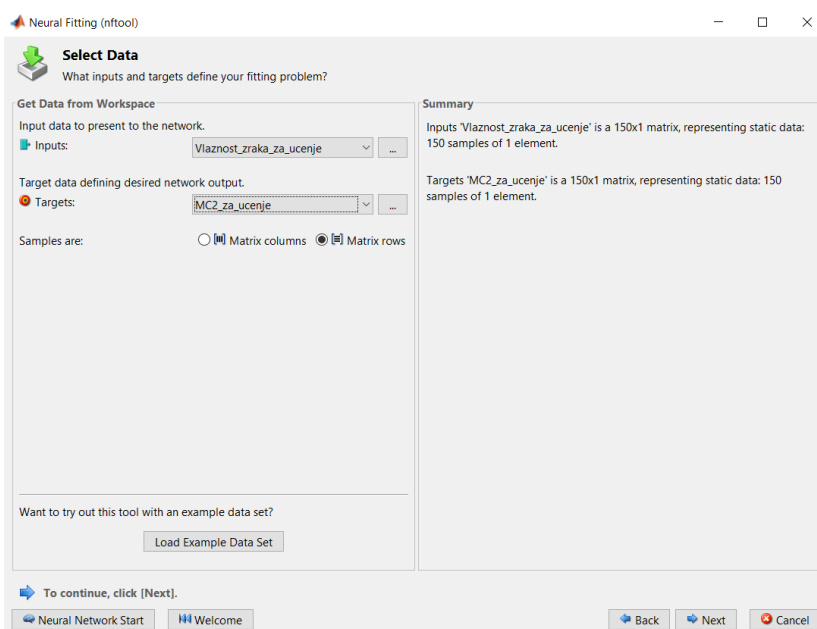
Od prikupljenih 190 mjerenja za to vremensko razdoblje njih 150 bit će iskorišteno za učenje neuronske mreže. Spomenutih 150 podataka, prema slici 127., bit će raspoređeno u tri skupine: njih 105 (70%) za učenje mreže, 30 (20%) za validaciju i 15 (10%) za testiranje mreže. Podatci koji nisu iskorišteni za učenje mreže, preostalih 40, bit će upotrebljeni za testiranje mreže kod predviđanja izlazne vlažnosti furnira.

Kad se prikupljeni podatci za posljednje vremensko razdoblje profiltriraju i grafički prikažu, slika 134., može se vidjeti da izlazna vlažnosti furnira prati količinu vlage unutar sušare. Prikazani graf poklapa se s vlažnošću zraka unutar sušare u vremenskom razdoblju 03:55-04:37. Može se primijetiti da se padom količine vodene pare unutar sušare smanjuje izlazna vlažnost lista furnira, dok porast količine vodene pare uzrokuje izlaznu vlažnosti furnira većih vrijednosti.



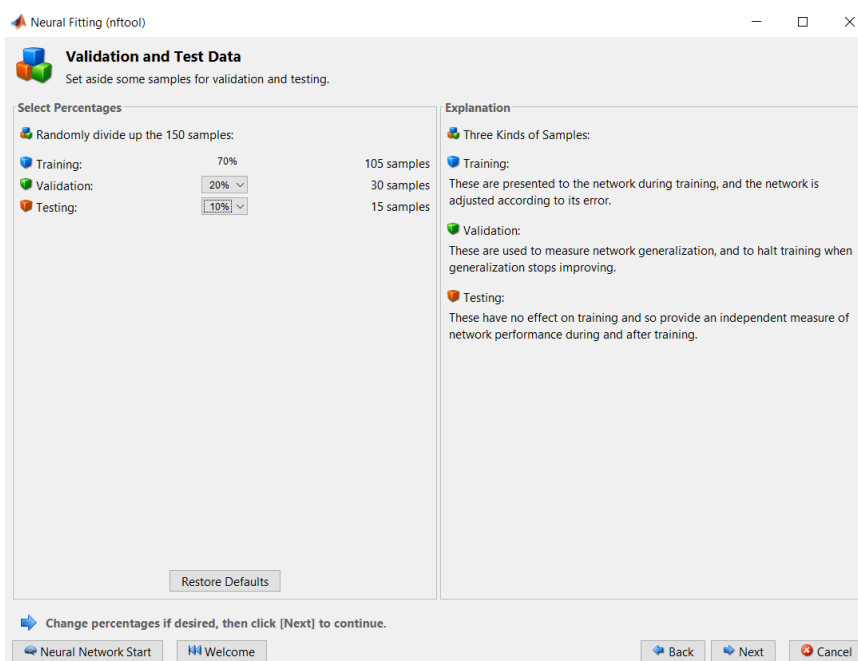
Slika 134. Prikaz prikupljenih mjerenja za posljednju skupinu podataka

Prema prethodnom potpoglavlju koje opisuje tijek izrade i učenja neuronske mreže odabire se prva opcija „Fitting app“ koja služi za traženje odnosa između ulaznih i izlaznih podataka. Na slici 135. prikazan je prozor unutar kojeg je potrebno unijeti ulazne podatke „Inputs“ i željene izlaze „Targets“ koji su ciljani odziv zadanih ulaza. Kao što je već spomenuto uneseno je 150 podataka o izlaznoj vlačnosti furnira te jednako toliko podataka o stanju vlažnosti unutar sušare za vrijeme sušenja mjerenih furnira.



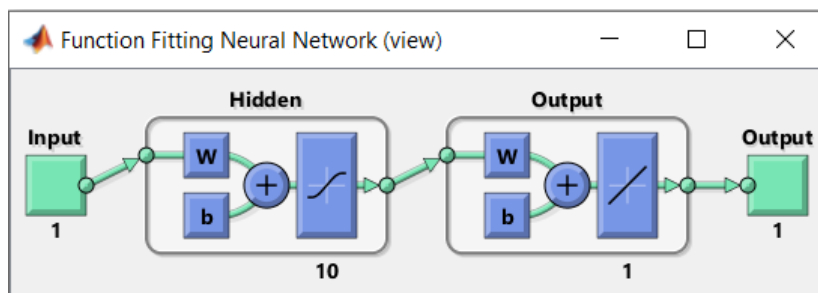
Slika 135. Prozor za unos ulaznih i željenih izlaznih podataka

Nakon unošenja ulazno-izlaznog para podataka, kao što je već spomenuto, odabrano je da će se 70 % podataka koristiti za trening mreže, 20% za validaciju te 10% za testiranje istrenirane mreže, što se može vidjeti na slici 136.



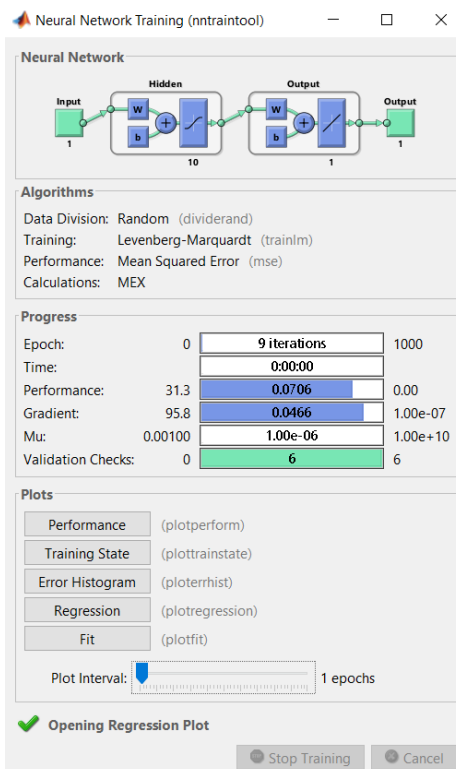
Slika 136. Podjela podataka na zadaće

Kod postavljanja arhitekture neuronske mreže odabrana je već postavljena količina od 10 neurona u skrivenom sloju. Slika 137. prikazuje shematski prikaz arhitekture mreže.



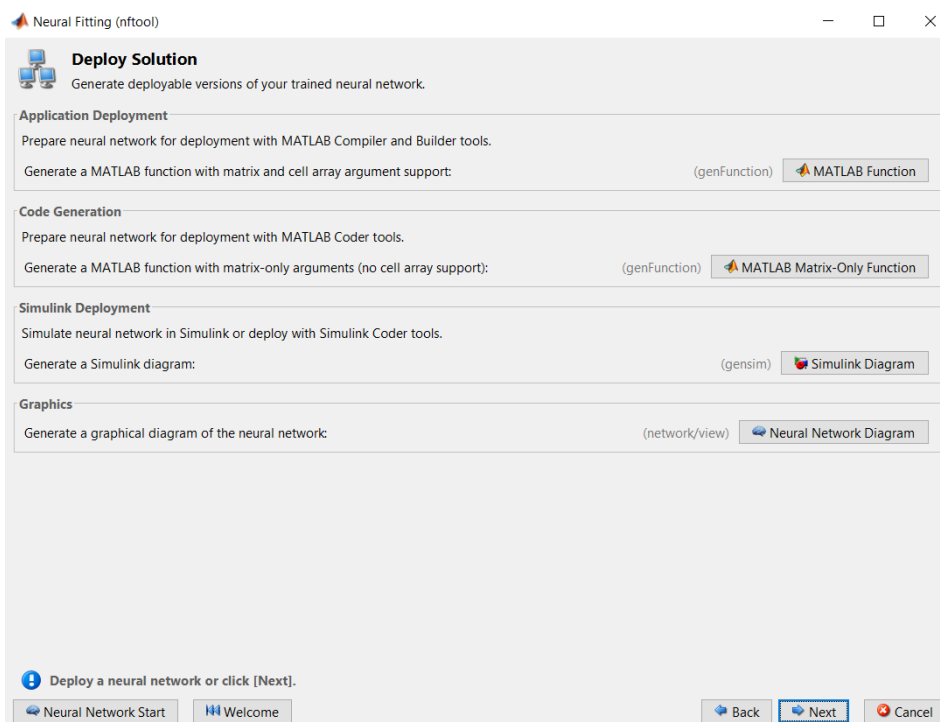
Slika 137. Arhitektura umjetne neuronske mreže

Nakon odabira arhitekture mreže u prozoru za treniranje mreže odabran je *Levenberg-Marquardt* algoritam za treniranje mreže. Pritiskom na gumb „Train“ započinje treniranje, a po završetku treninga pojavljuje se *Neural Network Training* prozor s najvažnijim podacima o naučenoj mreži, koji je prikazan na slici 138.



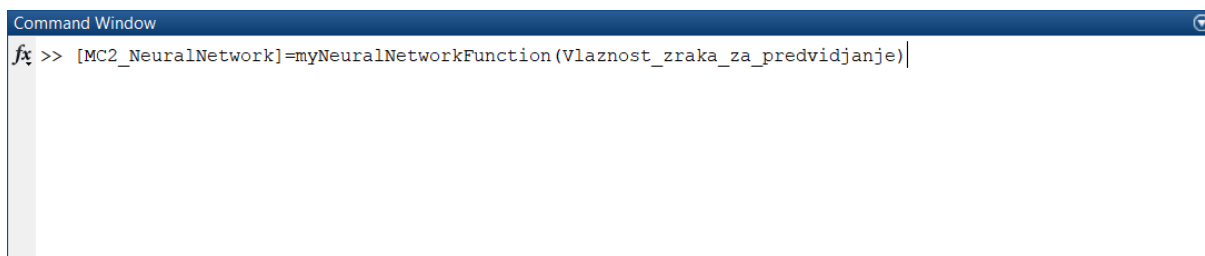
Slika 138. „Neural Network Training“ prozor

Prelaskom na sljedeće prozore dolazi se do dijela u kojem je moguće preuzeti rad naučene neuronske mreže u obliku *MATLAB* funkcije. Prozor u kojem se preuzima funkcija prikazan je na slici 139.



Slika 139. Prozor za generiranje MATLAB funkcije

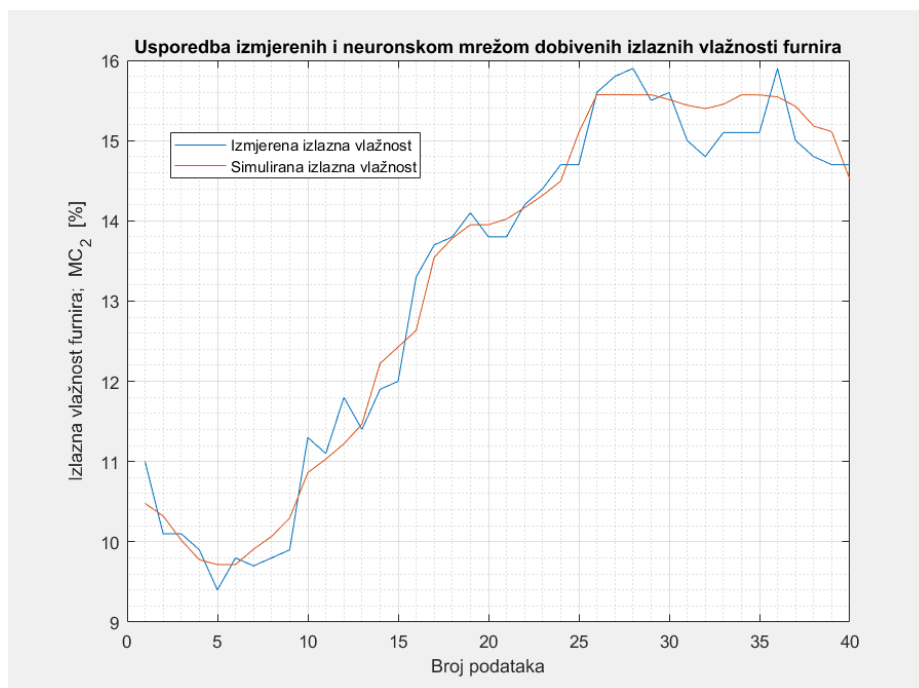
Pozivanjem generirane funkcije, koja je nazvana „myNeuralNetworkFunction“, moguće je rad istrenirane neuronske mreže na vrlo jednostavan način primijeniti na drugi skup podataka. Funkcija se poziva u *Command Window* sučelju unutar *MATLAB*-a što je prikazano na slici 140.



Slika 140. Pozivanje generirane funkcije

Za učenje mreže korišteno je 150 podataka od 190 dostavljenih za mjerenje dana 20. 1. 2021. na brzini trake 20 m/min. Preostalih 40 podataka ostavljeno je kako bi se provjerila točnost neuronske mreže za predviđanja izlazne vlažnosti furnira na osnovi vlažnosti zraka unutar sušare pomoću generirane funkcije. Na slici 141. prikazana je usporedba izmjerenih vrijednosti izlazne vlažnosti i vrijednosti dobivenih neuronskom mrežom kojoj su na ulaz dovedeni podatci o vlažnosti zraka unutar sušare za to vremensko razdoblje.

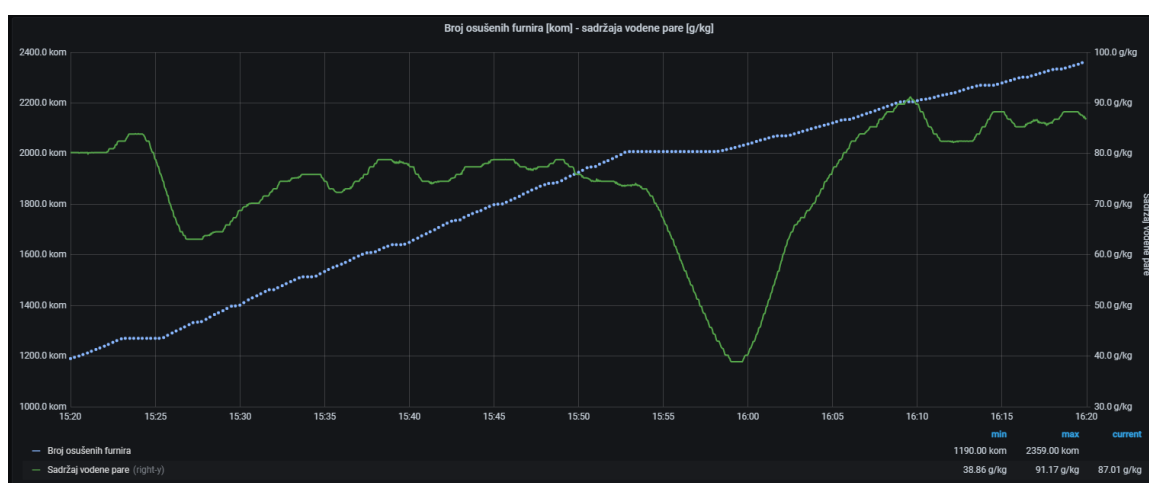




Slika 141. Usporedba izmjerenih i neuronskom mrežom dobivenih podataka

Iz slike je vidljivo da neuronska mreža može predviđati izlaznu vlažnost furnira sa zadovoljavajućom točnošću gdje je maksimalna ostvarena pogreška jedan postotni poen naspram izmjerene vrijednosti. Ovakva razina točnosti, kod koje se izlazna vlažnost furnira može procijeniti na  $\pm 1\%$  uvelike je prihvatljiva jer list funira nema jednaku vlažnost po cijeloj svojoj površini pa se kod odluke uvijek uzima prosječna vrijednost od nekoliko mjerenja.

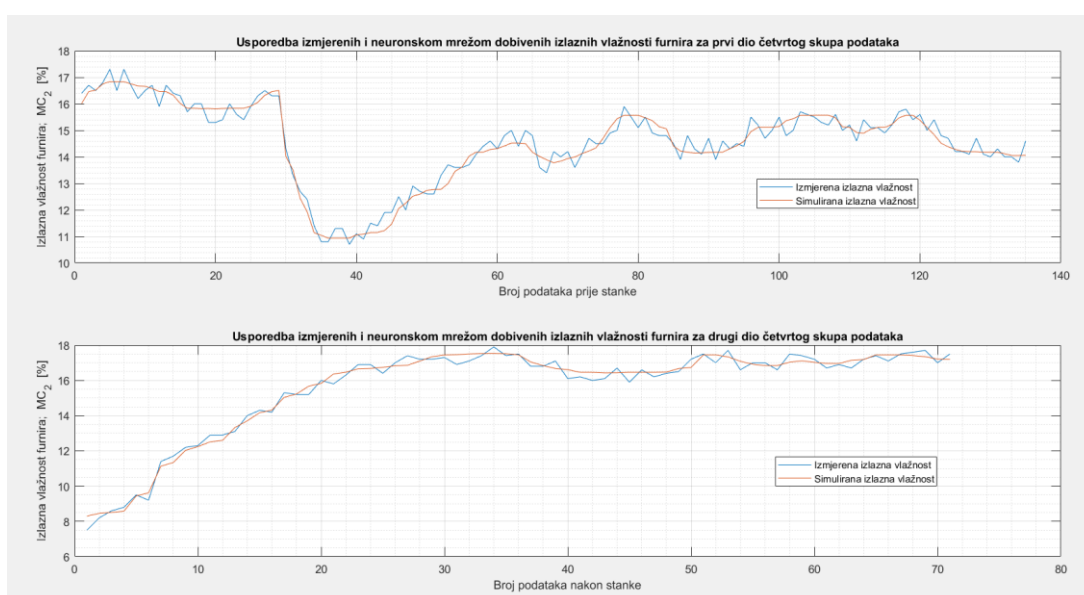
Generirana funkcija koja opisuje rad neuronske mreže bit će iskorištena za provjeru drugog skupa podataka mjerenja prikupljenog tijekom brzine trake 20 m/min. U ovom skupu dostavljeno je 205 podataka. Na slici 142. prikazan je graf promjene vlažnosti zraka unutar sušare za vrijeme mjerenja.



Slika 142. Graf promjene sadržaja vodene pare dana 19. 1. na brzini trake 20m/min

U ovom slučaju preuzeto je 205 podataka o vlažnosti zraka unutar sušare iz baze podataka koji bi najbolje opisivali izmjerene podatke o furniru te su uneseni u generiranu funkciju „myNeuralNetworkFunction“. Na slici 143. prikazana je usporedba druge skupine podataka s podacima koje daje neuronska mreža ovisno o podacima na grafu sa slike 141.

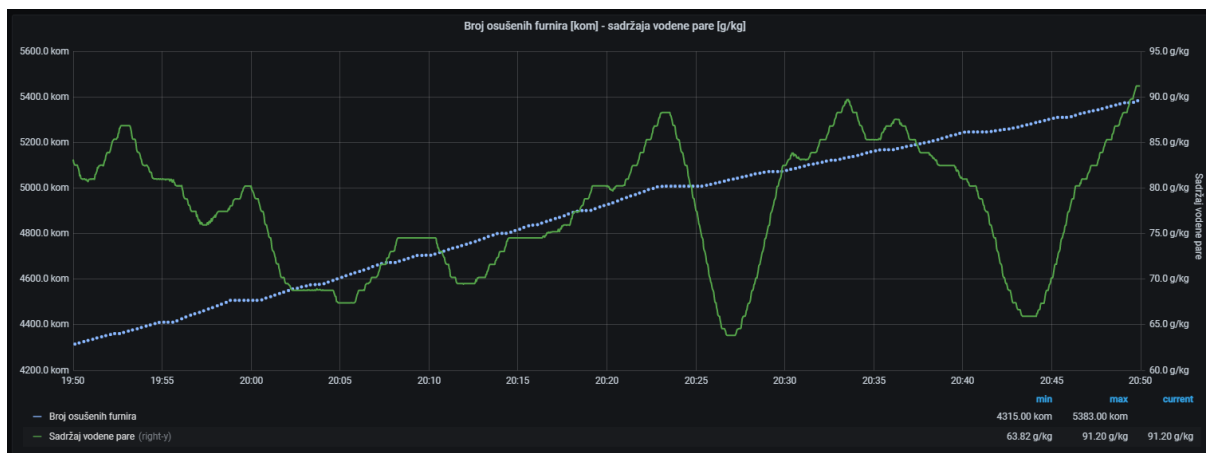
Podatci su podjeljeni u dvije cjeline, prva koja sadrži podatke izmjerene prije pauze koja se dogodila 15:53 - 15:58, te druga koja predstavlja podatke nakon navedene pauze. Razlog ovakve podjele je taj što mreža daje grešku kod naglog skoka u podacima. U jednom trenutku, prije stanke, vlažnost unutar sušare je 75 g/kg dok u drugom, kada započinje sušenje, je 38 g/kg. Kod ovakvog slučaja mreža daje značajnu grešku pri procjeni izlazne vlažnosti furnira. To bi se moglo riješiti na dva načina: kada bi bila omogućena veća količina podataka s kojim bi mreža učila ili kada bi mreža cijelo vrijeme računala izlaznu vlažnost neovisno o tome ima li furnira unutar sušare tako da ostane kontinuitet podataka.



Slika 143. Usporedba drugog skupa podataka na brzini 20 m/min s onima koje predviđa neuronska mreža

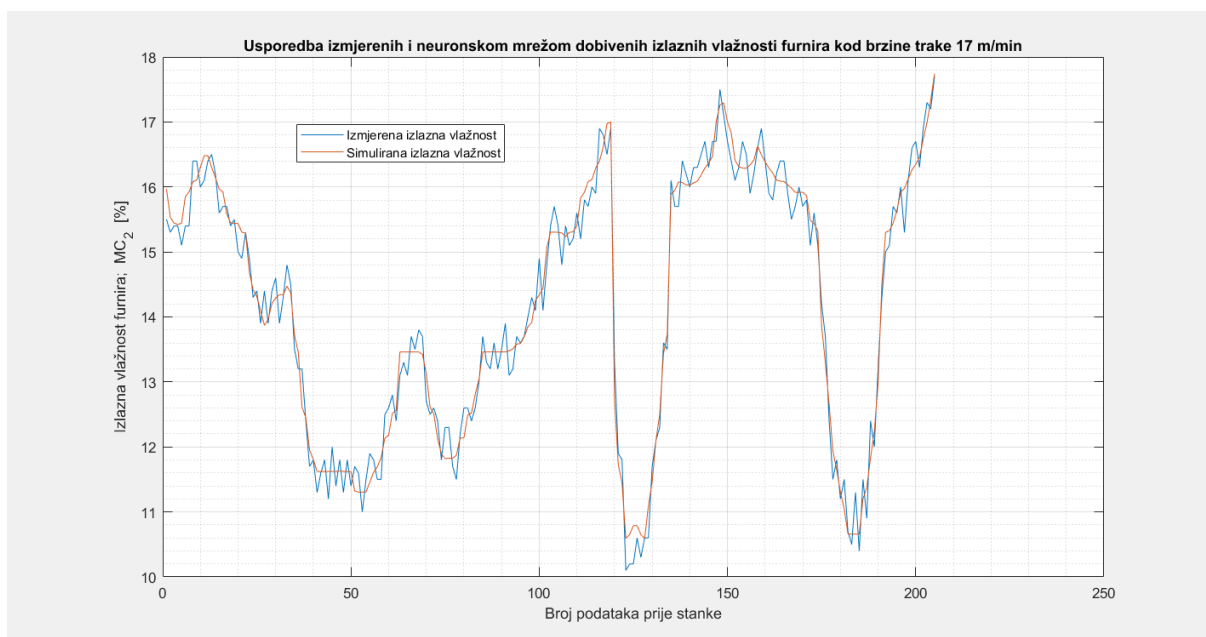
Preostala dva skupa podataka o izlaznoj vlažnosti furnira odnose se na slučaj kada je traka imala brzinu 17 m/min. Prema analogiji, uzeti su podatci prikupljeni 19:50 - 20:50 dana 19. 1. 2021. pomoću kojih je istrenirana druga neuronska mreža te je generirana funkcija „myNeuralNetworkFunction2“ za sučaj kada je brzina 17 m/min.

Na slici 144. prikazan je graf promjene sadržaja vodene pare za vrijeme prikupljanja podataka 19. 1. 2021. kada je brzina bila 17 m/min.



Slika 144. Promjena sadržaja vodene pare kod brzine trake 17 m/min dana 20. 1. 2021.

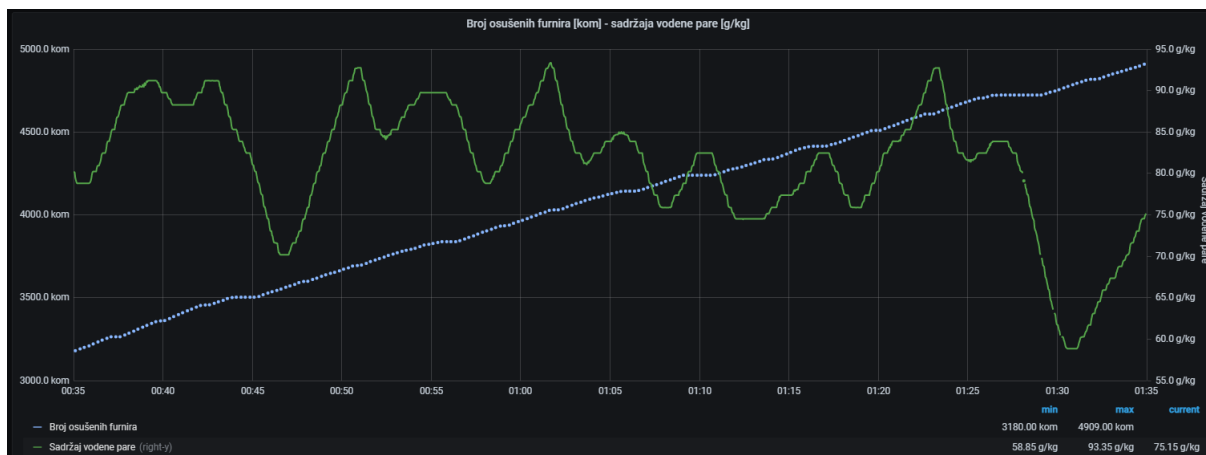
U ovom skupu bilo je dostavljeno 200 podataka o izlazinm vlažnostima furnira. Slika 145. prikazuje usporedbu dostavljenih podataka i onih koje je generirala funkcija neuronske mreže.



Slika 145. Uspredba izmjerenih podataka s onima koje je generirala neuronska mreža kod brzine trake 17 m/min dana 19. 1. 2021.

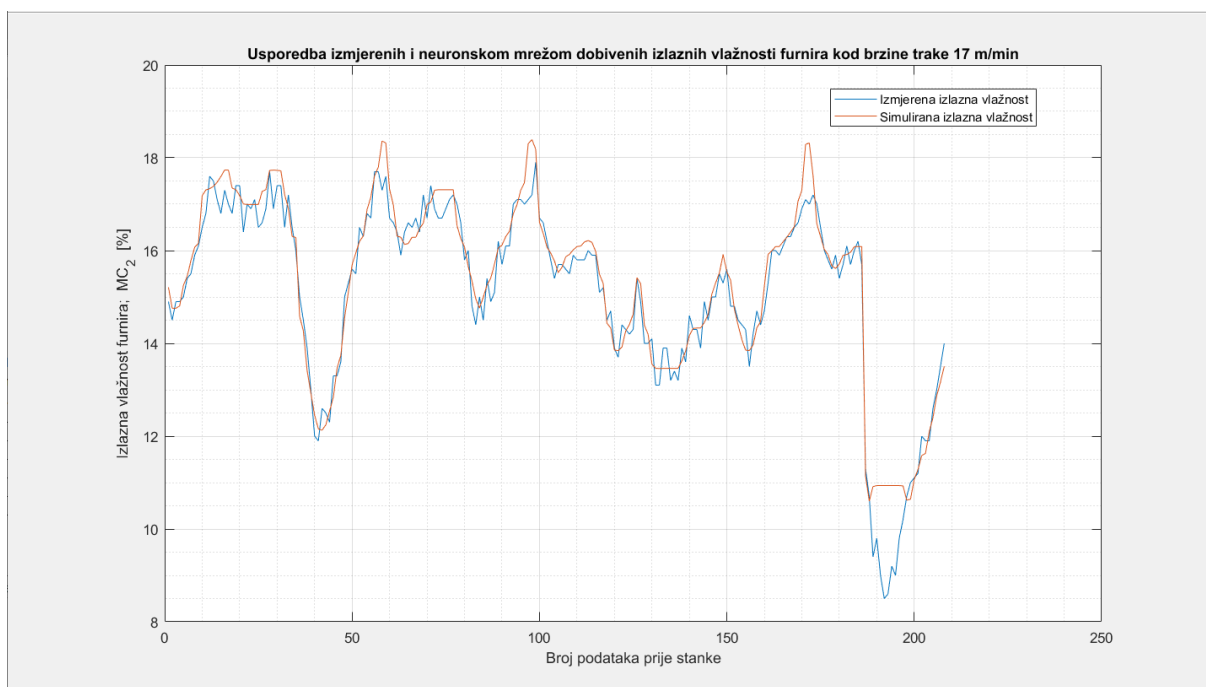
Kao i u prethodnim slučajevima mreža je dala rezultate koji imaju zadovoljavajuću točnost. Drugi skup podataka kod brzine 17 m/min prikupljen je 20. 1. 2021. u vremenskom razdoblju 00:35 - 01:35. Ovaj skup, kao i u prošlom slučaju, sadrži 200 podataka o izlaznoj vlažnosti furnira.

Slika 146. prikazuje graf stanja zraka unutar sušare te broja osušenih tijekom procesa mjerenja.



Slika 146. Promjena sadržaja vodene pare kod brzine trake 17 m/min dana 20.01.2021.

Usporedba rezultata generiranih funkcijom „myNeuralNetworkFunction2“ i onih ručno izmjerenih prikazana je na slici 147.



Slika 147. Uspredba izmjerenih podataka s onima koje je generirala neuronska mreža kod brzine trake 17 m/min dana 20. 1. 2021.

Ovdje se može primijetiti greška kod naglog skoka podataka koja se spominjala u drugom primjeru, a locirana je na krajnjem dijelu grafa. Uz tu grešku, vidljivo je da rezultati imaju nadvišenja u odnosu na mjerene vrijednosti, ali u ovom slučaju sve ulazi u prihvatljivu zonu.

Budući da je brzina trake bila 17 m/min, listovi furnira boravili su duže unutar sušare te su na istoj razini sadržaja vodene pare unutar sušare u odnosu na to kada je brzina bila 20 m/min izlazili suši. Uspoređujući prikupljene podatke za slučajeve kada je brzina bila 20 m/min i 17 m/min dolazi se do zaključka da je za isti sadržaj vodene pare unutar sušare izlazna vlažnost manja kod manje brzine trake.

Iako je zadatkom bila zadana izrada modela neuronske mreže koja će upravljati brzinom pokretne trake iz prikupljenih podataka to nije bilo moguće izvesti. Projekt automatizacije sušare obavljen, je uspješno te je klijent zadovoljan. Upravljanje izvršnim članovima za regulaciju temperature i vlažnosti zraka daju zadovoljavajuće rezultate. Nastavak navedenog projekta bila je „Digitalizacija rada sušare“ kojom se uradio *Gateway* uređaj (*SIMATIC IOT2050*) za prikupljanje podataka i analizu. Pomoću prikupljenih podataka s PLC-a i izmjerenih izlaznih vlažnosti furnira pronašao se odnos između navedenih podataka korištenjem neuronske mreže što je dovelo do mogućnosti predviđanja izlazne vlažnosti furnira bez mjerenja. Nažalost, daljnja mjerenja nisu nam dostavljena jer je projekt obustavljen za ovu godinu. Zbog trenutne epidemiološke situacije i stanja na tržištu uprava tvrtke Spačva d.d. odlučila je da nema investicijskih ulaganja u „Furnir“ za ovu godinu. Tom odlukom prestalo je prikupljanje podataka sa sušare i mjerenja izlaznih vlažnosti furnira. Za završetak projekta bilo bi potrebno obaviti mjerenja izlazne vlažnosti furnira za brzine trake od 16m/min do 22 m/min s pomakom od 0.5 m/min tako da se dobije odnos između tri varijable brzine, vlažnosti zraka unutar sušare te izlazne vlažnosti furnira. Time bi bilo omogućeno učenje neuronske mreže da mijenja brzinu trake ovisno o vlažnosti zraka unutar sušare tako da se dobije najbolja kvaliteta furnira na izlazu.

## 6. ZAKLJUČAK

Sudjelovanjem u projektu automatizacije rada sušare *Babcock BHS* u odjelu „Furnira“ tvrtke Spačva d.d. naučio sam mnogo o procesu sušenja drveta; odabiru, programiranju i ugradnji PLC-a te korištenje *MATLAB*-ovog alata *Neural Network toolbox*. U poglavlju „Praktični rad“ opisana je implementacija Ladder dijagrama u programskom alatu *TIA Portal* pomoću kojeg se programira PLC. Automatskim vođenjem rada sušare ostvarili su se stabilniji uvjeti za proces sušenja, a rezultati su validirani grafičkim prikazima podataka prikupljenih s PLC-a. Stabilizacija temperatura te ograničenje rasta sadržaja vodene pare uvelike je olakšala proces predviđanja izlazne vlažnosti furnira. Predviđanjem izlazne vlažnosti listova furnira ostvarile su se značajne uštede jer nema potrebe za kupnjom senzora za mjerenje vlažnosti koji radi na principu uzimanja 14 uzoraka po listu furnira. Njegova se cijena kreće oko 150 tisuća eura što je mnogostruko više od projekta koji se temelji na izgradnji neuronskih mreža.

U budućnosti, nastavkom projekta težit će se što većem broju mjerenja kako bi se izmodelirala neuronska mreža koja bi upravljala brzinom trake i pozicijom klapne u svrhu postizanja što kvalitetnijeg proizvoda. Uz to, težit će se i povećanju brzine trake tako da se dobije veći protok robe kroz sušaru. U nekom trenutku, radnici više neće moći ubacivati listove furnira većom brzinom što daje prostor ugradnji robota ubacivača. Na temelju razgovora s članovima uprave i financijskih proračuna odlučeno je da će sljedeći koraci nakon krize biti u smjeru ostvarivanja potpune autonomnosti sušare.

## LITERATURA

- [1] Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Sušenje, Zagreb
- [2] Čikić, A., Klimatizacija zraka, glavni čimbenik konvektivnog sušenja piljenog drva, Hrvatska komora inženjera strojarstva, Varaždin, 2011.
- [3] Velić, D., Izazovi i mogućnosti u proizvodnji hranje, Prehrambeno-tehnološki fakultet, Osijek, 2011.
- [4] Muminović, J., Sušenje, 2013.
- [5] <https://promingzepce.com/index.php/news>
- [6] <http://www.milowent.com/firma.html>
- [7] <http://www.mzaspiratori.eu/ventilatori-centrifughi/medie-alte-pressioni-per-trasporto/serie-zb>
- [8] <https://www.ema.hr/ovlazivac-zraka-prostorni-cuoghi-ucv/>
- [9] <https://www.ventilacija.rs/proizvod/463/226>
- [10] <https://www.alibaba.com/showroom/manure-rotary-vacuum-dryer.html>
- [11] Tehnološke operacije, Prehrambena tehnologija, Požega, 2014. str. 202.
- [12] Mudrinić, S., Tehnički procesi sušenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [13] Novaković, B., Majetić, D., Široki, M.: Umjetne neuronske mreže, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1998.
- [14] W. James, The Principles of Psychology, 1890.
- [15] Čupić, M.: Umjetne neuronske mreže, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2016.
- [16] J.M.Zurada, Artificial Neural Systems, W.P Company, USA, 1992.
- [17] Dalebo Bašić, B., Čupić, M., Šnajder, J.: Umjetne neuronske mreže, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2008.
- [18] Majetić, D.: Neuronske mreže, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [19] Alexander, I., Morton, H., An Introduction to Neural Computing. London: Chapman and Hall, 1990
- [20] Maureen Caudill, Neural Network Primer: Part I, AI Expert, Feb. 1989
- [21] M. Smith, Neural Networks for Statistical Modeling, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- [22] Vincek, M., Diplomski rad, Adaptivni neuronski regulator s referentnim modelom, str. 10
- [23] <https://barting.hr/>
- [24] <https://spacva.eu/hr/o-nama>
- [25] Spačva d.d., Financijsko izvješće za razdoblje 01.01.-30.09.2020., Vinkovci, 2020.
- [26] <https://www.directindustry.es/>
- [27] <http://www.ia.omron.com/>
- [28] <https://www.gann.de/>
- [29] <https://www.siemens.com/global/en.html>
- [30] <https://www.shoplinuxonline.com/ubuntu1604.html>
- [31] <https://nodered.org/>
- [32] <https://dbdb.io/db/influxdb>
- [33] <https://en.wikipedia.org/wiki/Grafana>
- [34] "Number of Neurons in Hidden Layer."; <http://www.faqs.org/faqs/ai-faq/neural-nets/part3/section-10.html>
- [35] Leljak, M., Završni rad: Kontinuirana regulacija broja okretaja elektromotora upravljanja PLC-om, 2018.
- [36] Siemens, SIMATIC S7-1200,S7-1500, PID control, Function manual, 2019., str. 38.