

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 2083

**MODELIRANJE I UPRAVLJANJE UKUPNIM
OSVJETLJENJEM NA RADNOJ POVRŠINI U
UNUTARNJEM PROSTORU USLIJED
KOMBINIRANOG DJELOVANJA SUNČEVOG
ZRAČENJA I UMJETNE RASVJETE**

Matej Kuraja

Zagreb, lipanj 2011.g

Izvornik zadatka završnog rada

Modul: **Računarska znanost**

Naslov završnog rada: **Modeliranje i upravljanje ukupnim osvjetljenjem na radnoj površini u unutarnjem prostoru uslijed kombiniranog djelovanja sunčevog zračenja i umjetne rasvjete**

Opis:

Za konfiguraciju prostorije s krovnim prozorom potrebno je identificirati i validirati model doprinosa sunčevog zračenja i unutarnje rasvjete ukupnom osvjetljenju radne površine u prostoriji. Taj model treba ostvariti neuronskom mrežom. Za treniranje neuronske mreže potrebno je koristiti Neural Network Toolbox programskog paketa Matlab. Na temelju identificiranog modela potrebno je izraditi algoritam upravljanja osvjetljenjem na radnoj površini kako bi se željena razina njenog osvjetljenja osigurala uz minimalan utrošak energije. Izrađeni algoritam upravljanja potrebno je provjeriti simulacijski u Matlab/Simulink okruženju, te za nekoliko tipičnih scenarija odrediti vremenski dijagram potrošnje energije za rasvjetu koja se postiže uz izrađeni algoritam upravljanja.

Sadržaj

Uvod.....	1
1. Osvjetljenje.....	3
1.1. Vanjsko osvjetljenje.....	5
1.2. Unutarnje osvjetljenje.....	9
1.2.1. Osvjetljavanje trgovina.....	10
1.2.2. Osvjetljavanje poslovnih prostora.....	11
2. Umjetne neuronske mreže.....	14
2.1. Općenito o umjetnim neuronskim mrežama.....	14
2.2. Unaprijedna (feedforward) neuronska mreža.....	16
2.3. Opis rada neuronskih mreža.....	18
2.4. Backpropagation algoritam.....	20
2.5. Analiza neuronske mreže sustava.....	22
3. Model i upravljanje sustavom.....	24
3.1. Vrste regulatora.....	24
3.1.1. Proporcionalni regulatori.....	25
3.1.2. Derivacijski regulatori.....	26
3.1.3. Integracijski regulatori.....	26
3.2. Algoritam upravljanja.....	28
3.3. Analiza rezultata.....	31
Zaključak.....	35
Literatura.....	36
Sažetak.....	37
Privitak: Pseudokod algoritma upravljanja.....	39

Uvod

U današnje vrijeme zgrade su jedan od najvećih pojedinačnih potrošača električne energije. Prema raznim istraživanjima došlo se do brojki da je riječ o 25 – 40% ukupne potrošnje električne energije u svijetu. Stoga se kao nužnost javlja potreba za povećavanjem energetske efikasnosti u samom zgradarstvu. To je prepoznato i od strane međunarodne zajednice te je kroz razne analize došlo do stvaranja općih direktiva i smjernica koje se koriste za utjecaj na povećanje te efikasnosti. Te direktive i smjernice definirane su u sklopu EU pod nazivom **EU Direktiva 2002/91/EC**, a u Republici Hrvatskoj su prevedene i usvojene 2008.g pod nazivom **HRN EN 15193:2008 en, “Energijaska svojstva zgrade – Energijski zahtjevi za rasvjetu”**.

Ono što će biti obrađeno u sklopu ovog rada bit će jedan od segmenata te potrošnje, a to je osvjetljavanje prostorija. Prema podacima, samo na osvjetljavanje otpada 25 - 30% cjelokupne potrošnje energije uobičajenog objekta. U određenim situacijama taj postotak zna porasti i do 50% ako se u obzir uzme potrebno hlađenje koje je posljedica zagrijavanja koje nastaje iz umjetnih izvora svjetlosti. Iz toga se lako da zaključiti da je ovaj segment jedan od najznačajnijih u sklopu cijelog sustava pojedine zgrade te je stoga veoma bitno da ga se kvalitetno obradi.

Središnje pitanje bit će kvalitetno modeliranje osvjetljenja unutar prostorija te upravljanje tim osvjetljenjem u ovisnosti o tome kakvo je ono u odnosu na našu referentnu vrijednost. Prvi korak je prikupljanje podataka za unutarnje i vanjsko osvjetljenje pomoću simulacija u raznim programskim alatima te nakon toga analiza tih podataka pomoću neuronske mreže. Najbitniji element tih analiza bit će srednja iluminacija na površini od interesa (u našem slučaju radni stol u sklopu ureda) koja će nam biti izlazni podatak iz sustava i čija će ovisnost o ulaznim parametrima biti analizirana. Nakon što se odradi analiza podataka, prelazi se na pitanje modeliranja sustava na način da se ostvari mogućnost upravljanja i održavanja kvalitetne razine osvjetljenja, a da se pri tome utječe i na smanjenje potrošnje električne energije rasvjetnih tijela.

Sustav je zamišljen na način da se upravlja propusnošću vanjskog osvjetljenja na prozoru ukoliko je vanjsko osvjetljenje dovoljno ili previsoko za održanje željene razine, odnosno da se upravlja unutarnjim osvjetljenjem ukoliko je to vanjsko osvjetljenje nedostavno. Kroz nadolazeća poglavlja bit će obrađeni svi elementi zamišljenog sustava.

1. Osvjetljenje

Kako bi se što kvalitetnije ušlo u materiju ovog rada, za početak će biti objašnjene neke osnovne stvari i veličine vezane uz svjetlost. Sama svjetlost je elektromagnetsko zračenje vidljivo ljudskom oku (u rasponu valnih duljina zračenja 380 nm do 780 nm) te se definira široko područje različitih veličina koje služe za mjerenja i izračune vezane uz njene karakteristike. U sklopu toga, veličine koje su od interesa za ovaj rad su jakost svjetlosti (cd), osvjetljenje ili iluminacija (lux), sjajnost ili luminacija (cd/m^2), iradijacija (W/m^2), te svjetlosni tok (lm). Nadalje je svaka od njih posebno definirana:

Jakost svjetlosti je snaga zračenja koju emitira izvor svjetla u određenom smjeru. Mjerna jedinica je candela i ona predstavlja jakost svjetlosti koju u određenom smjeru zrači izvor svjetla frekvencije 540×10^{12} Hz i snage zračenja u istom smjeru od $1/683 \text{ W/sr}$.

Osvjetljenje ili iluminacija predstavlja intezitet svjetla koji upada na površinu od interesa, tj. riječ je o količini svjetlosnog toka koja pada na tu površinu (lm/m^2). Ponekad se u literaturi naziva i rasvjetljenjem. Mjeri se luksimetrom. Neke od karakterističnih vrijednosti nalaze se u sklopu Tablica 1.1. – primjeri nivoa osvjetljenosti

Primjeri nivoa Osvjetljenosti:

Primjer	Osvjetljenost [lx]
Rasvjeta operacijskog stola	20.000 - 120.000
Sunčan ljetni dan	60.000 - 100.000
Oblačan ljetni dan	20.000
Oblačan zimski dan	3.000
Dobro rasvijetljeno radno mjesto	500 - 750
Pješačka zona	5 - 100
Noć s punim mjesecom	0,25
Noć s mladim mjesecom	0,01

Tablica 1.1. – primjeri nivoa osvjetljenosti

Sjajnost ili luminacija je količina svjetlosti koja dolazi sa promatrane površine, tj. ona predstavlja mjeru svjetlosne jakosti kroz određenu površinu u nekom određenom smjeru. Mjeri se mjeračem sjajnosti te je jedina fotometrijska veličina koju ljudsko oko direktno vidi te osjeti razliku između različitih razina. Stoga ju je bitno održati na kvalitetnoj razini ($>100 \text{ cd/m}^2$) kako bi se izbjegao zamor oka.

Svjetlosni tok predstavlja količinu zračenja koju emitira izvor svjetla u svim smjerovima. Vrednuje se kao svjetlost prema krivulji osjetljivosti ljudskog oka. Mjerna jedinica je lumen (lm) te ona predstavlja situaciju u kojoj izvor zrači jakošću od 1 cd u prostor od 1 steradian.

Sve te vrijednosti te njihove mjerne jedinice predstavljene su u Tablica 1.2.

Veličina	Oznaka	Formula	Mjerna jedinica
Svjetlosni tok	Φ	$\Phi = I \times \Omega$	Lumen (lm)
Jakost svjetlosti	I	$I = \Phi / \Omega$	Candela (cd)
Osvjetljenost	E	$E = \Phi / A$	Lux (lx)
Sjajnost (luminacija)	L	$L = I / A$	Candela po kv.metru (cd/m^2)

A - osvijetljena ili svjetleća površina (m^2)

Ω - prostorni kut (sr)

Tablica 1.2. – fotometrijske veličine

Iradijacija predstavlja snagu izvora svjetlosti te je za razliku od ostalih ovdje navedenih jedina radiometrijska veličina¹.

¹ Radiometrijske veličine, za razliku od fotometrijskih, opisuju svjetlost u svim situacijama jednako ,energetski, ne uzimajući u obzir karakteristike ljudskog oka kao što je slučaj kod fotometrije koja je ograničena samo na karakteristike u vidljivom spektru.

Uz navedene sve bitnije veličine koje su nužne za razumijevanje svjetlosti sada se može prijeći na same elemente sustava osvjetljenja. Ti elementi su vanjsko i unutarnje osvjetljenje koje se svako analizira kao zaseban sustav te zatim kombinira njihov utjecaj i po potrebi njime upravlja. U sljedećim potpoglavljima svaki od njih bit će obrađen zasebno.

1.1. Vanjsko osvjetljenje

Izvor vanjskog osvjetljenja je Sunce. Svjetlo od Sunca se raspršuje u atmosferi, te distribucija i količina svjetlosti primljena u zgradama, odnosno prostorijama zgrada ili kuća ovisi o atmosferskim uvjetima. Međunarodna komisija za osvjetljenje (CIE) Skylight kategorizira atmosferske uvjete, a time i model osvjetljenja u niz od 15 različitih tipova distribucije osvjetljenja pod nazivom **BS ISO 15469:2004 – „Prostorni raspored dnevnog svjetla“**. Ti tipovi, odnosno modeli navedeni su u Tablica 1.3.

Table 1. Standard parameters

Type	Gradation	Indikatrix	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	Description of luminance distribution
1	I	1	4.0	-0.70	0	-1.0	0.00	CIE Standard Overcast Sky, alternative form Steep luminance gradation towards zenith, azimuthal uniformity
2	I	2	4.0	-0.70	2	-1.5	0.15	Overcast, with steep luminance gradation and slight brightening towards the sun
3	II	1	1.1	-0.8	0	-1.0	0.00	Overcast, moderately graded with azimuthal uniformity
4	II	2	1.1	-0.8	2	-1.5	0.15	Overcast, moderately graded and slight brightening towards the sun
5	III	1	0.0	-1.0	0	-1.0	0.00	Sky of uniform luminance
6	III	2	0.0	-1.0	2	-1.5	0.15	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, slight brightening towards the sun
7	III	3	0.0	-1.0	5	-2.5	0.30	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, brighter circumsolar region
8	III	4	0.0	-1.0	10	-3.0	0.45	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, distinct solar corona
9	IV	2	-1.0	-0.55	2	-1.5	0.15	Partly cloudy, with the obscured sun
10	IV	3	-1.0	-0.55	5	-2.5	0.30	Partly cloudy, with brighter circumsolar region
11	IV	4	-1.0	-0.55	10	-3.0	0.45	White-blue sky with distinct solar corona
12	V	4	-1.0	-0.32	10	-3.0	0.45	CIE Standard Clear Sky, low illuminance turbidity
13	V	5	-1.0	-0.32	16	-3.0	0.30	CIE Standard Clear Sky, polluted atmosphere
14	VI	5	-1.0	-0.15	16	-3.0	0.30	Cloudless turbid sky with broad solar corona
15	VI	6	-1.0	-0.15	24	-2.8	0.15	White-blue turbid sky with broad solar corona

Tablica 1.3. – kategorije modela nebeskog osvjetljenja

Unutar prikazanih 15 modela, 3 se smatraju standardnima, a to su sunčano nebo (Clear sky), nebo s umjerenom naoblakom (Intermediate sky²), nebo s potpunom naoblakom (Overcast sky). Ta tri standardna modela te način raspodjele svjetlosti pri različitim tipovima neba prikazani su na Slika 1.1. - tri osnovna CIE modela neba prikaza je vidljivo da kod sunčanog neba nema velike disperzije svjetlosti te se ona raspodjeljuje kroz manje područje, dok kod neba s umjerenom naoblakom je rasvjetljeno veće područje, ali s manjim intezitetom. Kod neba s potpunom naoblakom osvjetljenje je jednoliko kroz čitavo područje, ali sa vrlo niskim intezitetom.

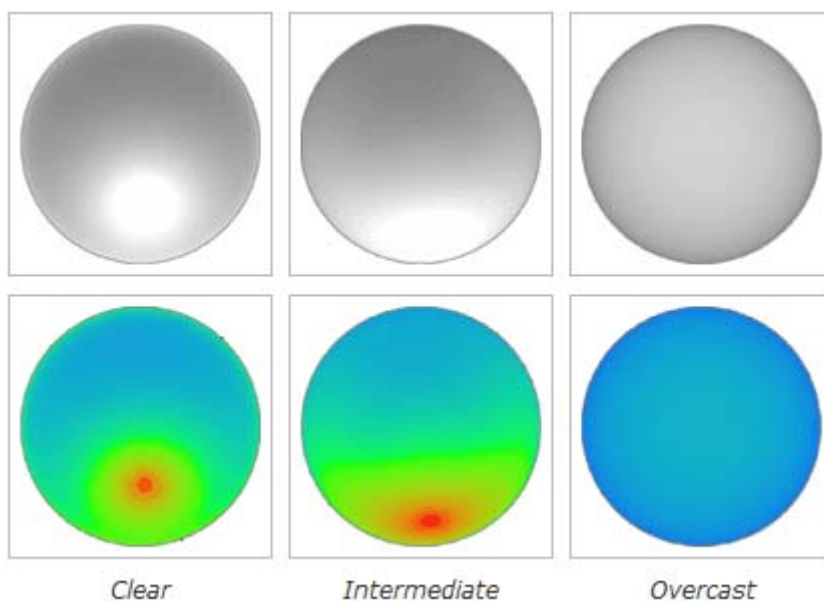


Figure 3 - A comparison of the three main CIE sky models.

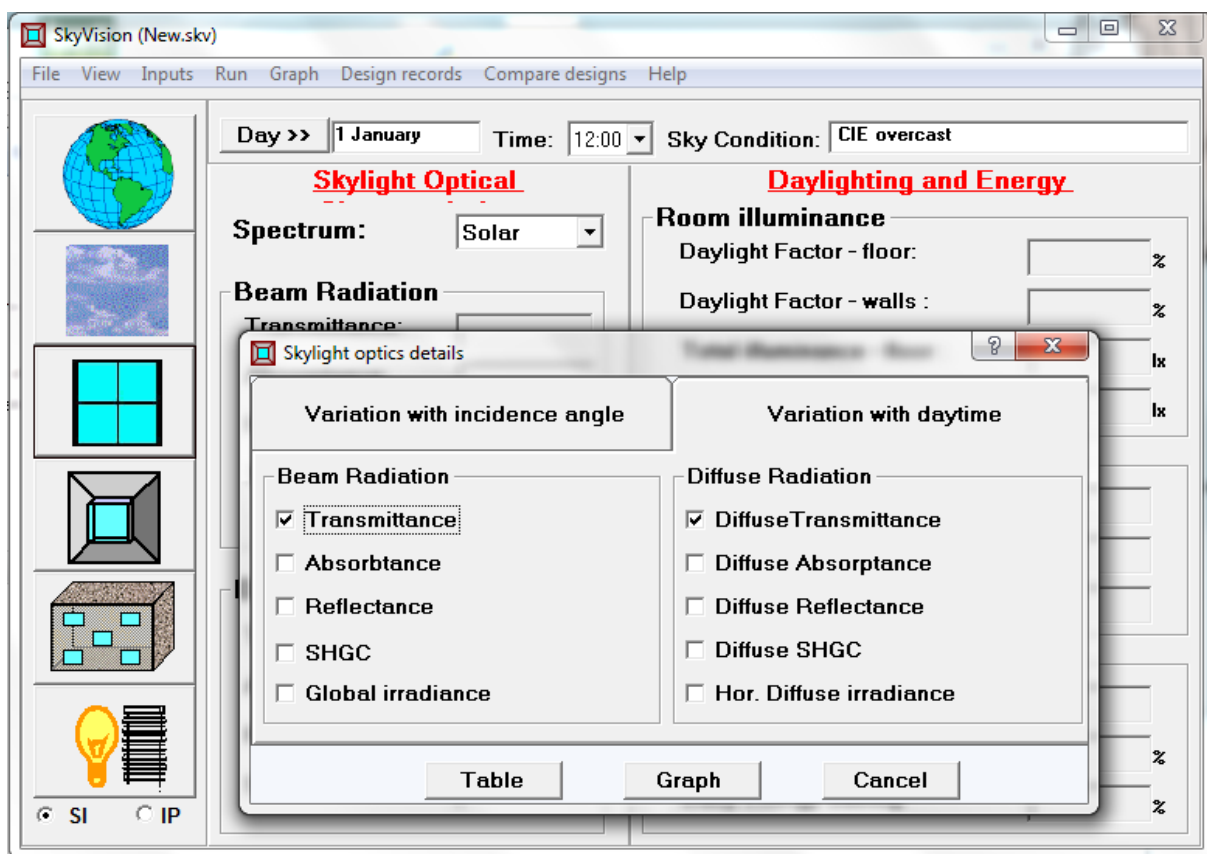
Slika 1.1. - tri osnovna CIE modela neba

Ostali tipovi su varijacije na osnovne tipove u ovisnosti o omjeru direktnog i difuznog osvjetljenja, odnosno radijacije. Kako bi problem bio što kvalitetnije i realnije obrađen potrebno je, osim tih osnovnih tipova, prilikom analize uzeti u obzir što veći broj izvedenih tipova. Nedostatak osnovnih tipova je u činjenici da oni većinom u obzir uzimaju samo direktnu radijaciju te se time ne dobiva potpuna vrijednost, odnosno globalna radijacija. U ovom slučaju, osnovni skup je proširen na šest različitih modela osvjetljenja.

² Ponekad se u literaturi pojavljuje i kao intermediate sky

Na osnovne, dodani su po još jedna vrsta neba s umjerenom naoblakom i neba s potpunom naoblakom gdje se doprinos difuzne radijacije na količinu osvjetljenja pojavljuje kao značajan element te tzv. uniformirani tip gdje je raspodjela osvjetljenja kroz čitavo područje neba jednolika.

Za analizu vanjskog osvjetljenja korišten je programski alat SkyVision v1.21 čije je korisničko sučelje prikazano na Slika 1.2. Razvijen je 2003.g od strane kanadskog Državnog zavoda za istraživanje (National Research Council Canada), te se koristi za izračune vezane uz osvjetljenost (od strane vanjskog izvora) unutrašnjosti prostorija s krovnim prostorom. Priručnik za korištenje preuzet je sa stranica navedenog zavoda [2].



Slika 1.2. – korisničko sučelje programskog alata SkyVision v1.21.

Neki od mogućih izračuna su izračun samog osvjetljenja na zidovima ili na površini od interesa, dnevnih/godišnjih proračuna potrošnje vezanih za moguće uštede električne energije. Za nas najbitnija mogućnost je upravo izračun osvjetljenja na površini od interesa. Kako bi se to izračunalo potrebno je programu zadati opis prostorije kroz razne parametre koji se dijele na dvije skupine:

FIKSNI PARAMETRI koji definiraju same kvalitativne karakteristike prostorije poput dimenzija prostorije, pozicije i veličine krovnog prozora, dubine tzv. bunara krovnog prozora te raznih koeficijenata vezanih uz karakteristike građevinskih materijala korištenih u izgradnji, te geografska duljina i širina jer je od interesa izračun u realnoj situaciji (kao lokacija zgrade uzete su vrijednosti geografskog položaja Zagreba). One se drže na fiksnim vrijednostima kako bi se osigurali referentni uvjeti za kvantificiranje utjecaja promjenjivih parametara.

PROMJENJIVI PARAMETRI u odnosu na koje se proučavaju dobiveni izlazi kako bi se dobila međusobna funkcijska ovisnost između tih parametara i izlaza programa, odnosno osvjetljenja. Ti promjenjivi parametri su datum i vrijeme, tip osvjetljenja te stupanj zasjenjavanja prozora³ nad kojim će u konačnici biti izvođeno upravljanje.

Nakon što se zadaju svi potrebni podaci, pokreće se simulacija unutar programskog alata SkyVision, te se kao izlaz dobivaju podaci o efikasnosti prijenosa svjetlosnog toka, kvaliteti raspodjele osvjetljenja te o samom osvjetljenju na različitim površinama. Svi ti izračuni temeljene se na raytracing-u⁴. Jedini značajniji nedostaci su relativno sporo prikupljanje podataka te ograničenost na određenu strukturu oblika prostorije. Kako bi konačna aproksimacija te izračuni bili što kvalitetniji potrebno je skupiti što veći broj mjerenja za različite vrijednosti promjenjivih parametara. Svako od tih mjerenja zapisuje se u tekstualnu datoteku i koja se kasnije analizira uporabom neuronskih mreža (opširnije će biti obrađeno u poglavlju 3.). U sklopu ovog rada taj broj iznosi 4320 mjerenja.

³ U ovom koraku je napravljena simulacija tog zasjenjavanja kroz mijenjanje samih karakteristika prozorskog stakla (njegovih nivoa refleksije, apsorpcije i transmisije).

⁴ Raytracing je metoda izračuna puta vala ili zrake u određenoj okolini praćenjem same zrake od ishodišta do cilja. Moguće je i korištenje inverzne metode.

1.2. Unutarnje osvjetljenje

Možda i bitniji element unutar ovog rada je unutarnje osvjetljenje. Njen izvor je umjetna rasvjeta i upravo nad tom umjetnom rasvjetom će se ovdje pokušati upravljati i kroz to omogućiti što kvalitetnije uvjete u svakom trenutku za rad na površini od interesa, odnosno radnom stolu. Primjer kvalitetnih radnih uvjeta na radnom stolu predložen je slikom Slika 1.3.



Slika 1.3. – kvalitetno osvijetljena radna površina

Cilj dizajniranja radnog mjesta je ostvariti idealne uvjete za rad te zajedno s time i veću efikasnost radnika, ali i izbjegavanje negativnih utjecaja na zdravlje. Razlog za to je činjenica da postoje razni fizički utjecaji osvijetljenja na ljude. Ukoliko ono nije kvalitetno dizajnirano to može dovesti do većeg broja problema u zdravstvenom smislu, od pogoršanja vida pa čak i do mišičastih problema. Riječ je o globalnom problemu, jer su istraživanja pokazala kako više od dvije trećine osoba, koje rade uredski posao s upotrebom računala kroz svoj radni vijek steknu zdravstvene tegobe koje su posljedica slabo ili neadekvatno osvijetljenog

radnog prostora. Takav radni prostor utječe na brz zamor očiju, pad koncentracije, glavobolje te još mnogih drugih smetnji. Kako bi se to izbjeglo, potrebno je ispuniti sljedeće zahtjeve:

- **Kvalitetan dizajn prostorije** – ne smije biti velike razlike u razinama sjajnosti elemenata u prostoriji jer se oko automatski prilagođava toj razini te to ometa radnikovu koncentraciju
- **Kvalitetna razina osvjetljenja na površini od interesa** – ovisi o tipu posla koji se obavlja
- **Uklanjanje blještanja uzrokovano rasvjetom** – ostvaruje se kroz kvalitetno postavljanje rasvjetnih tijela
- **Uklanjanje blještanja od strane monitora**
- **Jednolikost osvjetljenja⁵ kroz cijelu površinu prostorije**
- **Kvalitetan odabir tipa rasvjetnog tijela**

Gore navedeni zahtjevi prilagođavaju se tipu korištenja prostorije i kroz sljedeća dva potpoglavlja biti će opisana dva karakteristična problema osvjetljavanja od kojih je drugi povezan sa samom problematikom ovog rada.

1.2.1. Osvjetljavanje trgovina

Svjetlost privlači pažnju i pozornost te povećava prodaju. Kvalitetno osvijetliti neku trgovinu znači postići pravi kompromis između štedljivosti (u trgovinama su svijetla uglavnom stalno upaljena) i vizualnom doživljaju trgovine. To se uglavnom postiže kvalitetnim 'downlighterima' sa metal-halogenim Osram HCl žaruljama te akcentnom rasvjetom atraktivnijih dijelova trgovine. Naravno, pažnju treba obratiti i na vanjsku rasvjetu te na svjetleće reklame kojima se treba ukazati na trgovinu. Predviđene razine osvjetljenja u ovom slučaju su između 500 i 750 luxa.

⁵ Jednolikost osvjetljenja je omjer minimalne i maksimalne vrijednosti osvjetljenja kroz neku površinu

1.2.2. Osvjetljavanje poslovnih prostora

Kod osvjetljavanja poslovnih prostora zahtjevi su nešto drugačiji. Oni zahtijevaju posebnu brigu prilikom osvjetljavanja te se projektiranje prepušta stručnjacima. Da bi se postigli optimalni radni uvjeti i maksimalna učinkovitost radnika, potrebno je pristupiti svjetlotehničkom proračunu. Ovisno o radnjama koje će se vršiti, potrebna je i različita vrsta rasvjete. Npr. uredski prostori zahtijevaju kvalitetnu rasvjetu sa elektroničkim predspojnim napravama i kvalitetnim rasterima da se minimaliziraju troškovi električne energije. U ovom slučaju, kako bi se pojednostavili izračuni rad tih elemenata simulirati će jednostavni potencijometar koji će u ovisnosti o vanjskom osvjetljenju držati razinu unutarnjeg osvjetljenja na razini koja će u kombinaciji s vanjskim osvjetljenjem davati željenu vrijednost. Također, kao što je već ranije rečeno, potrebno je paziti na blještanje i refleksije od monitora, te se treba osigurati dovoljnu količinu svjetlosti da bi se osigurala maksimalna učinkovitost radnika. U ovom slučaju, riječ je o uredskom prostoru gdje se radi s računalima za koje su, prema literaturi [5], standardni zahtjevi:

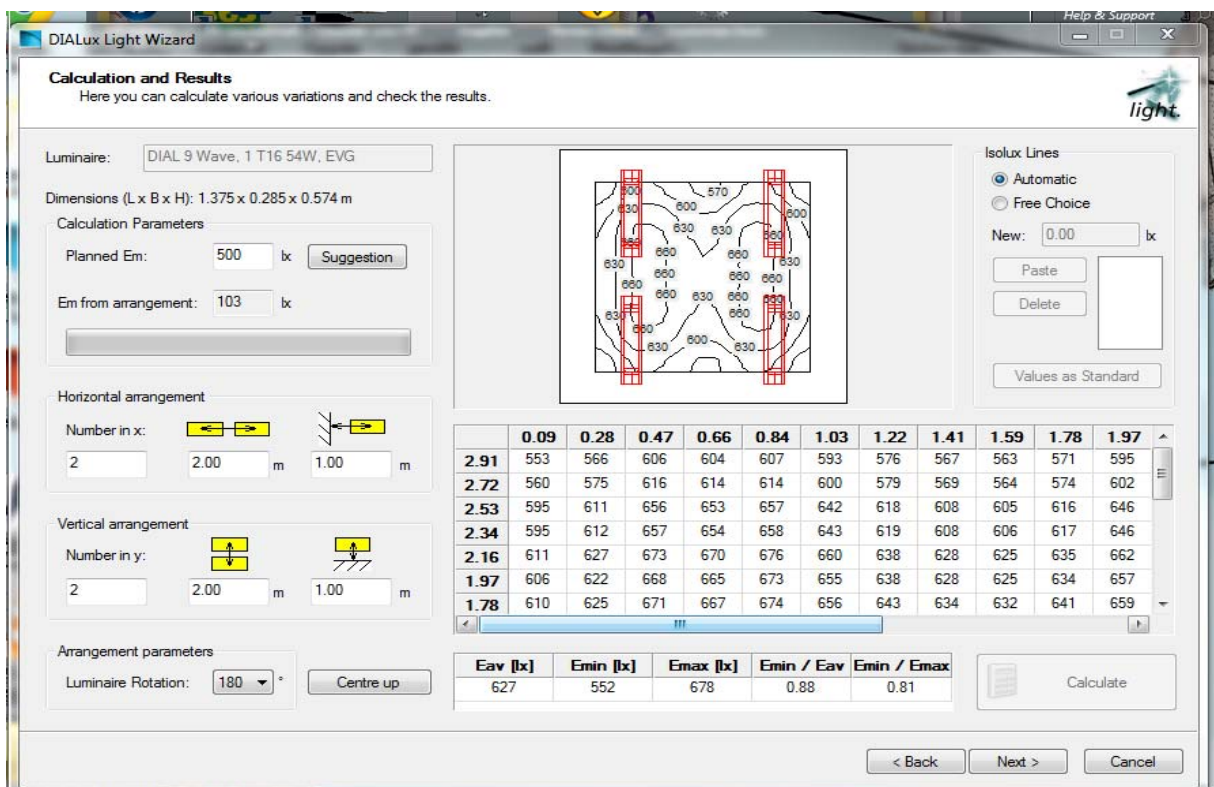
1. razina osvjetljenja na razini od 500lux
2. visoka razina jednolikosti osvjetljenja (0.7 - 0.8)
3. koeficijenti refleksije od zidova, stropa i poda u vrijednosti od 0.5, 0.8 te 0.3

Za projektiranje prostorije koja bi udovoljila navedenim zahtjevima koristi se programski alat DIALux 4.9 Light [3] čije je korisničko sučelje prikazano na Slika 1.5. Kako bi se vidjelo u kojoj situaciji su postavljeni zahtjevi ispunjeni izvode se kalkulacije nad različitim tijelima umjetne rasvjete, različitim brojem tijela i prostornim rasporedom. Kalkulacije nad različitim tipovima rasvjetnih tijela su bitne jer se u novije vrijeme proizvođači trude u što većoj mjeri ispuniti zahtjeve kupaca te stoga postoje različite kategorije rasvjetnih tijela. Raspodjela po kategorijama ovisi o boji same svjetlosti te se prema tome prilagođavaju određenoj vrsti upotrebe. U slučaju poslovnog prostora, preporučaju se rasvjetna tijela s temperaturom od oko 4100 K što daje boju koja odgovara boji ranojutarnjeg sunca. Ta i ostale kategorije rasvjetnih tijela prikazane su na Slika 1.4.

Boja (temperatura u kelvinima)		PREPORUČLJIVA UPOTREBA
• 5,000 (srednje plava)	Srednja mješavina sunca i neba	• Grafička umjetnost, pregled probnog ispisa
• 4,100 (svjetlo plava)	Jutamje sunce	• Standardni uredi s VDT-ima
• 3,500 (svjetlo žuta, bijela)	Ranojutamje sunce	• Standardni uredi s VDT-ima, CAD-prostorije, prostori za slučaj opasnosti
• 2,700 (žuta)	Izlazak, zalazak sunca	• Stambene prostorije

Slika 1.4. – kategorije upotrebe rasvjetnih tijela u ovisnosti o boji svjetlosti

Također, željena vrijednost osvjetljenja od 500 luxa nastaje kroz kombiniranje unutarnjeg i vanjskog osvjetljenja, ali u obzir treba uzeti i situaciju kada je doprinos od vanjskog osvjetljenja jednak nuli. Tada cijelo osvjetljenje treba dolaziti od unutarnjeg osvjetljenja te se stoga kao još jedan od zahtjeva postavlja i mogućnost da vrijednost unutarnjeg osvjetljenja može doći do zahtjevanih 500 luxa.



Slika 1.5. – korisničko sučelje programskog alata DIALux 4.9 Light

Kroz kalkulacije sa velikim brojem različitih rasvjetnih tijela i različitim prostornim rasporedom došlo se do zaključka kako sljedeća organizacija tijela umjetne

rasvjete daje uvjete koji ispunjavaju postavljene zahtjeve - prostorija ima četiri jednaka izvora svjetlosti s efikasnošću od 86,13 lm/W. Ono što omogućuje takve izračune je tzv. **luminous efficacy**, odnosno efikasnost svjetlosnog toka koji predstavlja omjer svjetlosnog toka i snage rasvjetnog tijela (lm/W). Zahvaljujući tome i činjenici da je u alatu DIALux 4.9 Light moguće mijenjati iznos svjetlosnog toka jednostavno se može oblikovati izračun osvjetljenja kroz povećanje snage rasvjetnog tijela time da se za svako povećanje od jednog watta na jačinu svjetlosnog toka pridoda navedenih 86,13lm. Ova vrijednost se razlikuje za različite tipove rasvjetnih tijela te može iznositi od 20 lm/W za halogene lampe do okvirno 200 lm/W kod natrijevih lampi. Teoretskom granicom za rasvjetna tijela smatra se iznos od 300 lm/W, a u prirodi idealnim izvorom smatra se dio vidljivog spektra koji predstavlja zelenu boju (555 nm) te je njegova efikasnost 683,02 lm/W.

Što se tiče prostornog razmještaja rasvjetnih tijela, on je zamišljen na sljedeći način - tijela su poredana u dvije linije i udaljena od zidova 1 metar te su linije međusobno udaljene 2 metra. Prilikom toga se dolazi do vrijednosti od 0.81 za jednolikost raspodjele osvjetljenja što zadovoljava postavljene zahtjeve. Kao što je već ranije rečeno, želja je mogućnost upravljanja tim osvjetljenjem te se stoga rade mjerenja za različite količine „uloženih“ watta te se mjeri koliko je osvjetljenje. Prilikom prikupljanja mjerenja kreće se od 0 watta prema više te se prikupljanje može zaustaviti kada se dođe do 500 luxa dobivenih od strane umjetnog osvjetljenja.

Ti podaci se također upisuju u zasebnu tekstualnu datoteku te se obrađuju pomoću neuronske mreže kako bi se dobila ovisnost izlaza o ulazu. U ovom slučaju, samo je jedan promjenjivi parametar, a to je snaga rasvjetnih tijela.

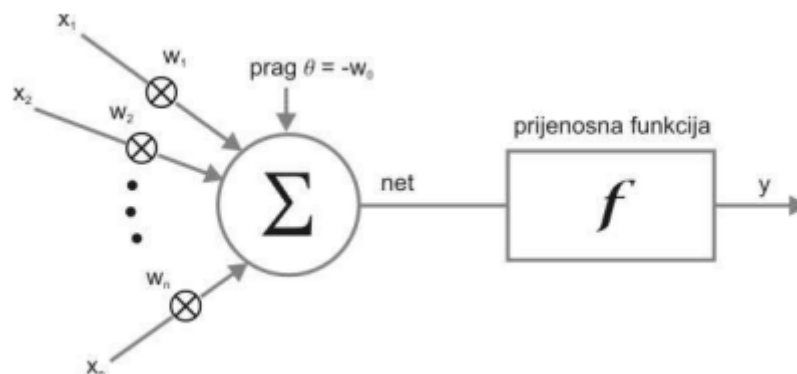
2. Umjetne neuronske mreže

Nakon što su kroz programske alate SkyVision v1.21 i DIALux 4.9 Light prikupljeni podaci o jačini osvjetljenja u ovisnosti o različitim ulaznim parametrima, odnosno uvjetima sustava, postavlja se pitanje kako ostvariti mogućnost da se sustav koristi i u situacijama koje su izvan okvira prikupljenih mjerenja, tj. kako na kvalitetan način obraditi izmjerene podatke da sustav i za ostale kombinacije ulaznih parametara daje točnu vrijednost izlaza. Cilj je pronaći funkciju koja će najbolje aproksimirati međusobne ovisnosti ulaza i izlaza. S obzirom da je riječ o vrlo kompleksnom problemu koji je teško riješiti standardnim polinomnim aproksimacijama, kao alat za rješavanje problematike najbolje je koristiti umjetne neuronske mreže koje se smatraju vrlo moćnim alatom kada je riječ o problemima kod kojih postoji odnos, odnosno ovisnost ulaznih i izlaznih parametara. One na osnovi poznatih podataka kroz proces „učenja“ pronalaze međusobne ovisnosti i na taj način ostvaruju mogućnost generalizacije na veći skup podataka i u konačnici ostvaruju važan segment za samo upravljanje sustavom. Okvirno, cilj u ovom slučaju je omogućiti da se u sustavu, na osnovi izmjerene vrijednosti za osvjetljenje, upravljivi parametri prilagode na način da se zadovolji konačna željena vrijednost od 500 luxa ili kroz upravljanje unutarnjim osvjetljenjem ukoliko vanjska komponenta daje manju vrijednost od željene ili kroz upravljanje sjenilima na prozorima ukoliko je vanjska komponenta veća od željene.

2.1. Općenito o umjetnim neuronskim mrežama

Umjetne neuronske mreže imaju za cilj realizirati sustav koji bi na neki način simulirao sam rad ljudskog mozga te procesa koji se unutar njega odvijaju. Stoga se kao gradbeni element ovakovog sustava postavljaju umjetni neuroni koji kao i pravi neuroni u ljudskom mozgu prihvaćaju informacije, obrađuju ih i šalju dalje elementima, tj. ostalim neuronima s kojima su povezani. Ono što im omogućuje to su **prijenosne „težinske“ funkcije** do kojih se dolazi kroz gore navedeni proces učenja na bazi poznatih podataka dobivenih kroz mjerenja. U tim težinskim

funkcijama pohranjeno je znanje same umjetne neuronske mreže i one na neki način predstavljaju ono što u polinomnim funkcijama predstavljaju koeficijenti uz varijable. Podaci se obrađuju distribuirano i paralelno u svim čvorovima mreže, tj svim neuronima. Jedan takav umjetni neuron prikazan je na Slika 2.1.



Slika 2.1. - matematički model umjetnog neurona

Informacije koje ulaze u umjetni neuron predstavljene su realnim brojevima, te se one dalje obrađuju. Pod obradom se smatra sumiranje svih ulaza i u konačnici množenje tih ulaza određenom težinom te slanje na ulaz neurona s kojim je povezan.

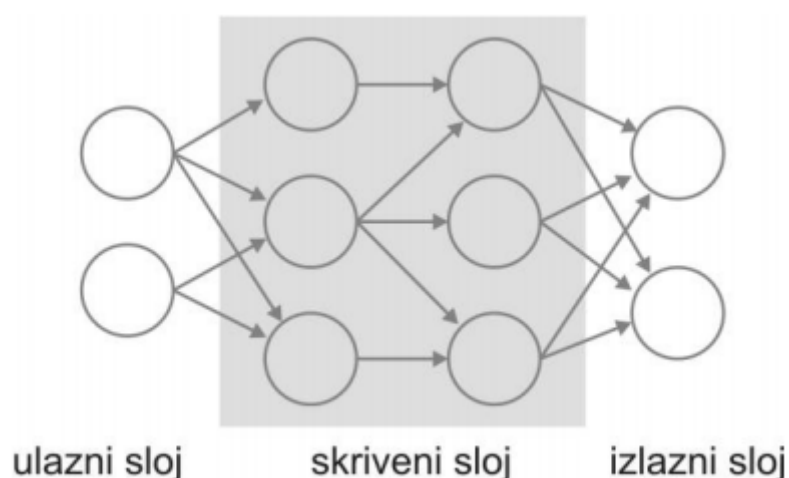
Postoji više vrsta umjetnih neuronskih mreža od kojih su najznačajnije:

- **unaprijedna mreža (eng. feedforward network)**
- **mreža s povratnom vezom (eng. recurrent network)**
- **lateralno povezana mreža (rešetkasta),**
- **hibridne mreže**

Za potrebe ovog rada, koristit će se unaprijedne neuronske mreže, jedna za vanjsko osvjetljenje, a druga za unutarnje osvjetljenje. Razlog za to leži u činjenici da se svaka ograničena kontinuirana funkcija može prikazati slojevitom neuronskom mrežom, koja koristi sigmoidne neurone u skrivenom sloju i linearne neurone u izlaznom sloju.

2.2. Unaprijedna (feedforward) neuronska mreža

U sklopu ovog projekta, koristit će se dvije unaprijedne neuronske mreže, po jedna za vanjsko osvjetljenje i jedna za unutarnje osvjetljenje. Unaprijedna umjetna neuronska mreža je mreža acikličkog tipa, odnosno tip neuronske mreže u kojoj veza između jedinica definirana uvijek u samo jednome smjeru te se ne postoji mogućnost stvaranja ciklusa. Kod ovakvog tipa mreže, postoji mogućnost korištenja slojevite arhitekture kod kojeg se pojavljuju ulazni, skriveni i izlazni sloj. Izgled takve arhitekture prikazan je na Slika 2.2.



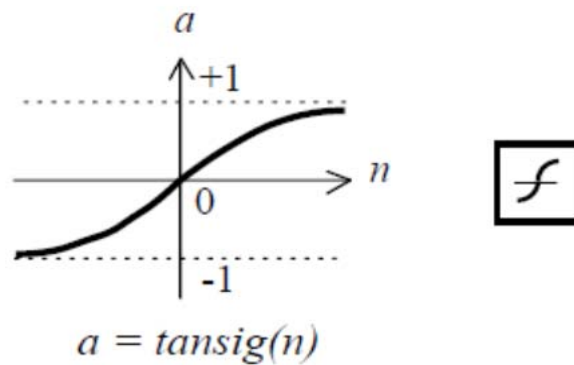
Slika 2.2. – arhitektura unaprijedne neuronske mreže

Specifičnost slojevite arhitekture leži u činjenici da su slojevi međusobno potpuno odvojeni, odnosno ne postoji situacija u kojoj je neuron nekog sloja spojen s neuronima iz dva različita sloja već je spojen isključivo s neuronima susjednog. Stoga se unutar sustava pojavljuju tri različita tipa neurona:

ULAZNI NEURONI – vrsta neurona koja prima jedan podatak te ga šalje na svoj izlaz. S obzirom da je riječ o samo jednom podatku, nema potrebe za obradom već služi samo za predaju podataka iz tekstualne datoteke skrivenom sloju. U ovom slučaju postoji jedan ulazni neuron.

SKRIVENI NEURONI – skriveni neuroni mogu biti raspoređeni u više slojeva. Po strukturi su isti kao izlazni neuroni te se razlikuju samo u vrsti izlazne, odnosno

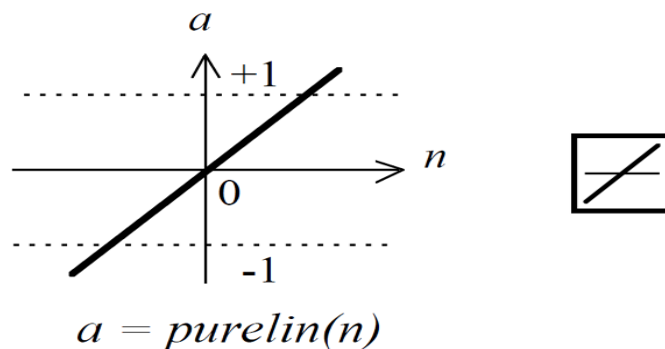
prijenosne funkcije. Kod skrivenih neurona koristi se sigmoidalna funkcija tangens hiperbolni (tansig) prikazana na Slika 2.3.



Slika 2.3. - sigmoidalna funkcija tangens hiperbolni

Razlog za korištenje takve funkcije leži u činjenici da se želi ostvariti mogućnost predstavljanja nelinearnih funkcija za što je potrebna derivabilna nelinearna funkcija. Upravo zato, prvotne neuronske mreže su imale velikih problema prilikom pokušaja obrade nelinearne problematike. Za broj skrivenih slojeva, a time i broj skrivenih neurona ne postoji strogo definirana brojka, ali prema istraživanjima, za problematiku ovakvog tipa dovoljan je samo jedan skriveni sloj. Što se broja neurona tiče, sloj se sastoji od sto neurona.

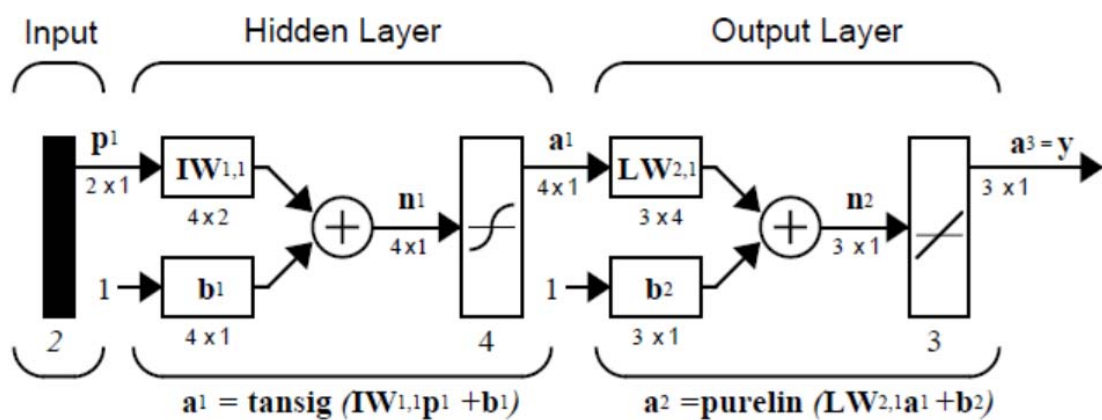
IZLAZNI NEURONI – izlazni neuron prima od svakog od neurona skrivenog sloja podatke i obrađuje ih. Oni daju konačni izlaz iz sustava, odnosno daju vrijednost za koju mreža smatra da je izlazna vrijednost osvjetljenja s obzirom na podatke koji su ušli u sustav. U ovom sustavu postoji samo jedan izlazni neuron s obzirom na činjenicu da na osnovi ulaznih podataka nas zanima samo jedna izlazna vrijednost, a to je osvjetljenje. Kod izlaznog neurona, prijenosna funkcija je linearna funkcija (purelin) prikazana na Slika 2.4.



Slika 2.4. - linearna funkcija izlaznog neurona

2.3. Opis rada neuronskih mreža

Nakon što su objašnjeni svi bitniji segmenti sustava, može se prijeći na analizu samog rada neuronskih mreža. Arhitektura zamišljene mreže prikazana je na Slika 2.5. Kao što je već ranije navedeno, sustav ima dvije neuronske mreže, jednu za vanjsko, a drugu za unutarnje osvjetljenje. Njihovi način rada je gotovo identičan pa će se stoga opis rada obaviti nad jednom od njih, mrežom vanjskog osvjetljenja, te samo naglasiti razlike koje postoje i usporediti rezultate rada za njih.



Slika 2.5. - arhitektura neuronske mreže

Dijelovi neuronske mreže za vanjsko osvjetljenje su šest ulaznih parametara (datum, vrijeme, tip osvjetljenja, model osvjetljenja, transmisija prozora, refleksija prozora), jednog neurona u ulaznom sloju koji služi za prijenos podataka do skrivenog sloja, sto neurona u skrivenom sloju i jednog neurona u izlaznom sloju. Kod unutarnjeg osvjetljenja jedina razlika je u tome da umjesto šest, postoji samo jedan ulazni parametar, a to je snaga rasvjetnog tijela.

Prvi korak nakon što je izrađena mreža željene arhitekture je treniranje mreže na određenom skupu podataka kako bi se u vezama među neuronima i na izlazu dobile točne težine, tj. težine za koje će izlaz odgovarati očekivanom uz dopušteno manje odstupanje⁶. Treniranje započinje čitanjem podataka na ulaznom sloju te propagiranjem tih podataka, bez obrade, na skriveni sloj. U skrivenom sloju se izvršava čitanje podataka, zatim zbrajanje ulaza, odnosno obrada i postavljanje

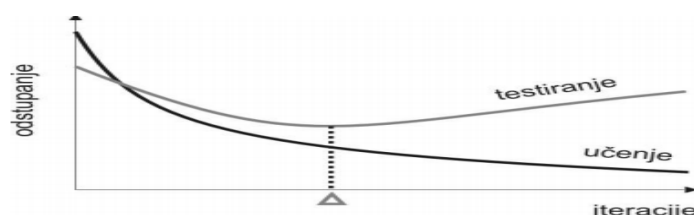
⁶ U tim težinama implicitno se nalazi cjelokupno znanje mreže

izlaza pomoću ranije navedene sigmoidalne funkcije. U konačnici te vrijednosti čita neuron izlaznog sloja, obrađuje i postavlja svoj izlaz. Nakon postavljanja izlaza, dobivena vrijednost se uspoređuje s očekivanim izlazom te ukoliko se one razlikuju se javlja neuronima skrivenog sloja informacija o pogrešci te se kroz promjene težina pokušava doći do onih vrijednosti uz koje će se dobivati željeni izlaz. Nakon toga sustav je spreman za generalizaciju na opći skup podataka. Općenito, postoje dvije vrste učenja, odnosno treniranja – **učenje s učiteljem i učenje bez učitelja**. U ovom slučaju riječ je o učenju s učiteljem jer nam je za svaku kombinaciju ulaznih parametara poznat točan izlaz. Sam skup o učenju, odnosno njegova veličina je proizvoljna te u našem slučaju iznosi 4320 podataka za vanjsko osvjetljenje i 85 podataka za unutarnje. Unutar sebe, neuronska mreža skup podataka dijeli na dva dijela:

- **Skup za učenje** – 70 % od ukupnog broja parova podataka, služe za podešavanje težina na zadovoljavajuće vrijednost
- **Skup za vrednovanje** – 30 % od ukupnog broja parova podataka, za provjeru rada kako bi se izbjeglo kvarenje preformansi, odnosno izbjegavanje situacije u kojoj mreža postaje prenaučena te biva precizna samo za postavljeni skup podataka

Samo treniranje se ponavlja nekoliko puta, kako bi se izbjegla mogućnost da sustav „zaglavi“ u situaciji gdje mu se čini da je došao do najmanje vrijednosti pogreške, a zapravo bude riječ o lokalnom minimumu. Svako to ponavljanje procesa treniranja naziva se iteracijom, a uz nju je isto tako važno spomenuti pojam epohe.

Iteracija je jedno ponavljanje namještanja težinskih faktora neurona. Kako bi se izbjegla pretreniranost (Slika 2.6.), broj iteracija je ograničen te se samo treniranje zaustavlja ukoliko se pogreška spusti ispod predviđane tolerirane vrijednosti za pogrešku.



Slika 2.6. - pretreniranost

Epoha je jedno predstavljanje svih podataka iz skupa za treniranje. Smatra se da je treniranje uspješno izvršeno nakon što se za jedno uzastopno predstavljanje svih parova podatka ulaz – izlaz dobiju svaki put točne vrijednosti izlaza.

Za navedeni postupak treniranja, korišten je **back-propagation algoritam**, koji će poblize biti obrađen u sklopu sljedećeg potpoglavlja.

2.4. Backpropagation algoritam

Kao što je već ranije rečeno, obične neuronske mreže s perceptronom kao procesnom jedinicom su dobro rješenje za linearne probleme, ali kod ovakve nelinearne problematike potrebno je ostvariti statičke funkcije koje su nelinearne funkcije svojih ulaza, ali i mogućnost da se pogreška rekurzivno distribuira od izlaznog sloja prema ulaznom kako bi se određivale nove težine veza. Kao kvalitetna metoda za ispunjavanje željenih mogućnosti učenja uzima se backpropagation algoritam, odnosno algoritam sa širenjem pogreške unatrag. On koristi metodu gradijentnog spusta kako bi se minimizirala pogreška. Formula za izračun te pogreške prikazana je na Slika 2.7.

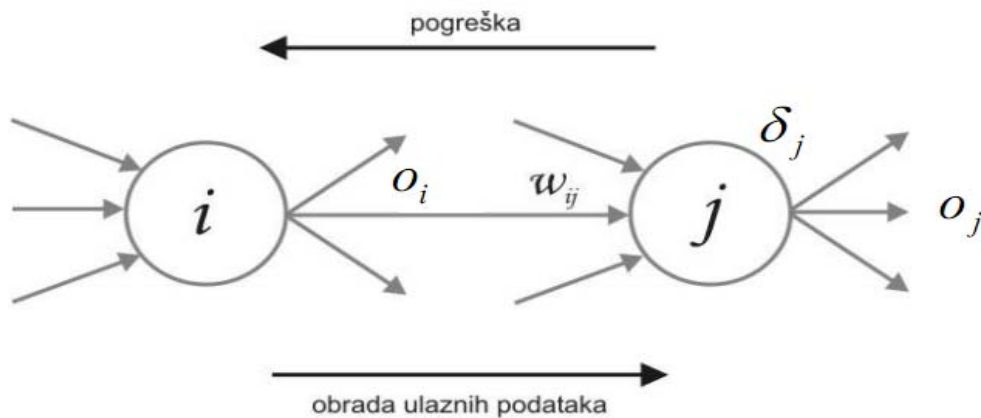
$$E(\vec{w}) = \frac{1}{2} \sum_{d \in D} (t_d - o_d)^2$$

Slika 2.7. – izračun vrijednosti pogreške

U navedenoj formuli za pogrešku, t_d predstavlja ciljanu vrijednost, a o_d stvarnu. Formula se može poopćiti i na više neurona. Općenito, ideja algoritma je modificirati veze na taj način da pri svakoj idućoj aktivaciji mreže greška bude što manja. Jedini veći problem ovog algoritma leži u mogućnosti da vrijednost pogreške zaglavi u lokalnom minimumu, ali postoji nekoliko metoda za rješavanje tog problema, od kojih se u sklopu ovog rada koriste uključivanje zamaha te ponavljanje postupka učenja u više iteracija s različitim početnim vrijednostima težina. Kao konačno rješenje, uzima se ona iteracija prilikom koje je dobivena najmanje vrijednost pogreške.

Formalna struktura algoritma je sljedeća : x_{ij} je ulaz s jedinice i u jedinicu j , w_{ij} je odgovarajuća težina, a x_n je pogreška izlaza jedinice n .

Kao parametre uzima skup za učenje D , stopu učenja η , broj čvorova ulaznog sloja n_i , broj čvorova izlaznog sloja n_o i broj čvorova skrivenog sloja n_h . Mreži se predočavaju parovi podataka (x, t) gdje je x vektor ulaznih vrijednosti, a t ciljana izlazna vrijednost. Prije toga sve težine u sustavu postavljaju se na male vrijednosti, npr. u intervalu $-0.05 < w_{ji} < 0.05$. Nakon toga ulazi se šire kroz sustav I na temelju svakog od njih računa se izlaz o_d . Greške se računaju i šire unatrag kroz mrežu na način da se za svaki izlazni neuron k (u ovom slučaju samo jedan), računa se greška δ_k , a za svaki skriveni neuron h , izračuna se pogreška δ_h . Ta pogreška se propagira unazad od izlaznog sloja k ulaznom te od tuda dolazi naziv backpropagation algoritam. Struktura mreže koja se koristi tim algoritom predočena je Slika 2.8.



Slika 2.8. – propagiranje pogreške kod backpropagation algoritma

Sve se težine w_{ji} nadalje ažuriraju korištenjem formula:

$$w_{ji} = w_{ji} + \Delta w_{ji}(n)$$

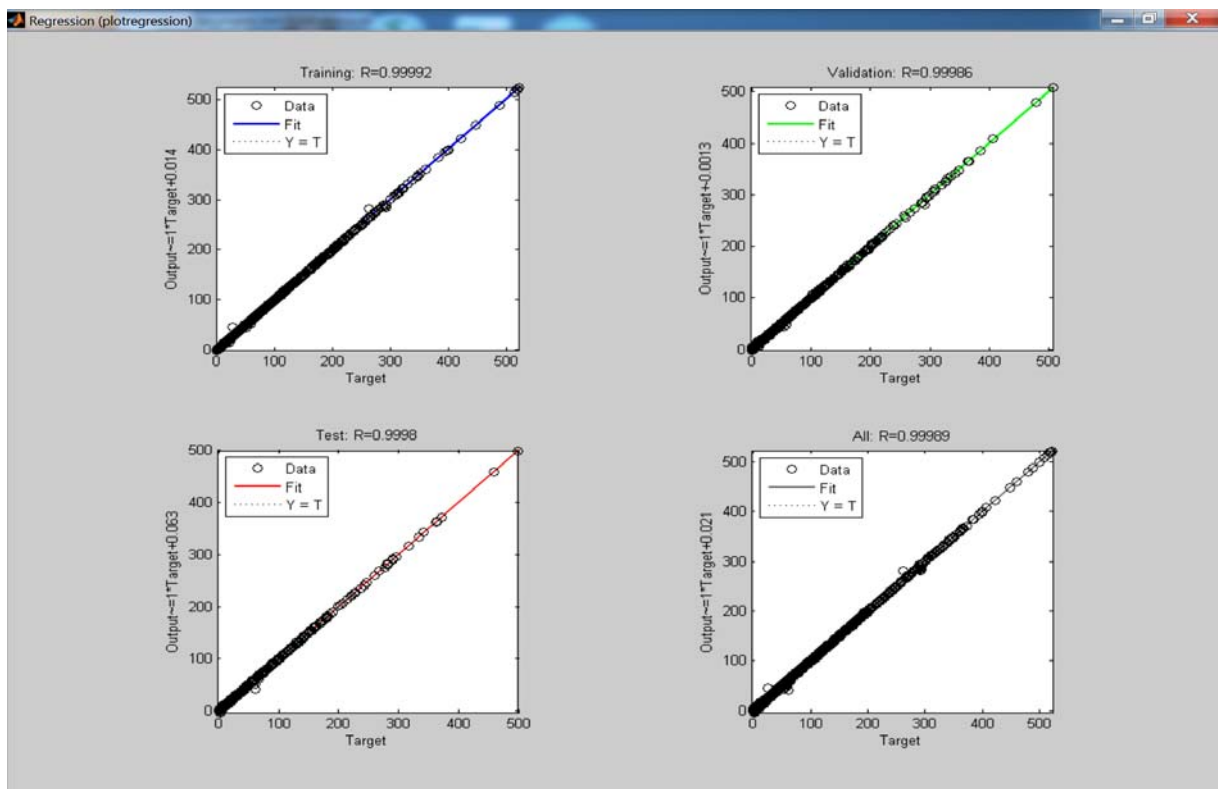
$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j x_{ji} + \alpha \Delta w_{ji}(n-1)$$

pri čemu je η stopa, odnosno brzina učenja, a α zamah (moment). Postupak ažuriranja težina vrši se sve dok se ne ispuni uvjet za izlazak iz petlje. Taj uvjet može biti dostizanje željene vrijednosti pogreške, gradijenta, ili porast (odnosno nepromijenjenost) pogreške nakon nekoliko iteracija algoritma. Uvjet zaustavljanja vrlo je bitan parametar iz ranije navedenih razloga da premalo iteracija može rezultirati lošom obradbenom sposobnosti mreže dok preveliki broj iteracija može dovesti do pretreniranja. Kroz sljedeće potpoglavlje bit će objašnjena praktična

primjena objašnjelog algoritma te rezultati treniranja u sklopu neuronskih mreža korištenih u ovom sustavu.

2.5. Analiza neuronske mreže sustava

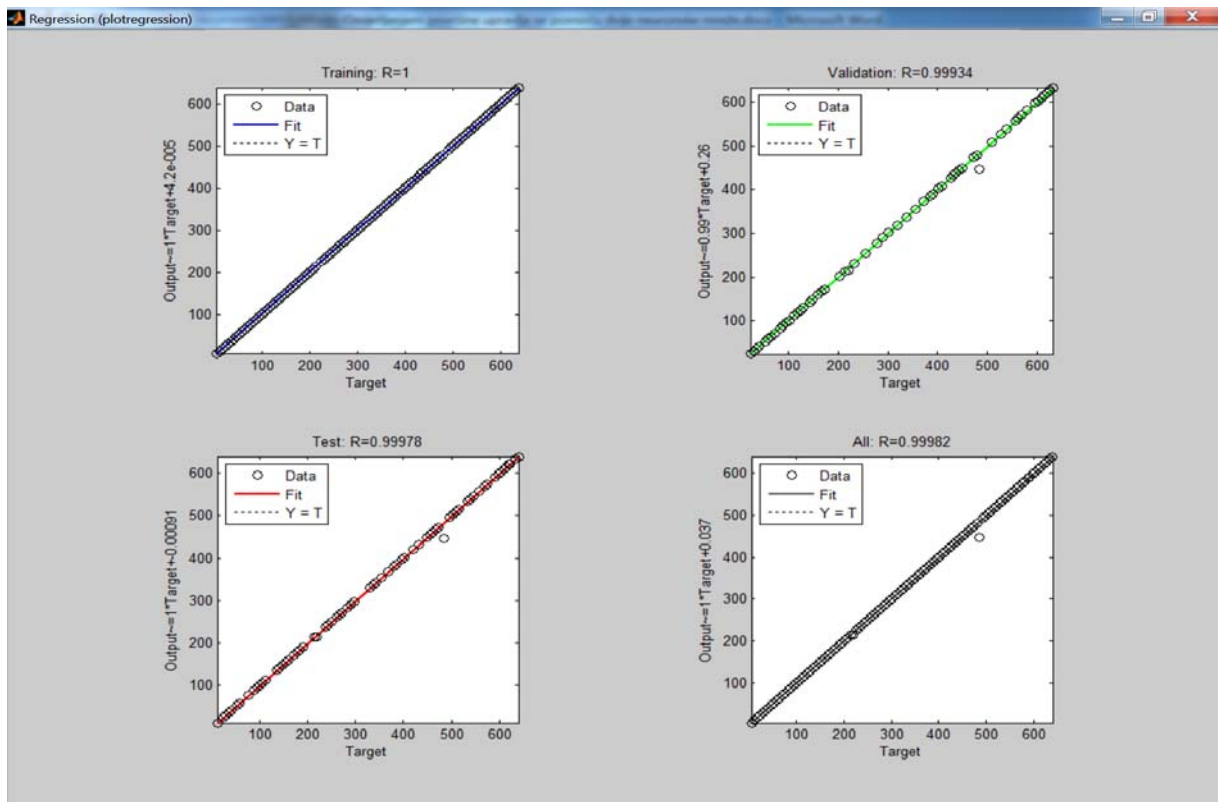
Mreža za vanjsko osvjetljenje trenira se na temelju podataka iz datoteke vanjski.txt. Čitaju se ulazni podatci i izlazna vrijednost i na temelju tih podataka se backpropagation algoritmom ažuriraju težine koje povezuju ulaz sa skrivenim slojem i skriveni sloj sa izlaznim slojem. Nakon što se pročitaju svi podatci, formirana je neuronska mreža net, čije težine odgovaraju ovisnosti osvjetljenja površine o vanjskim parametrima. Kako se u datoteci vanjska.txt mijenja samo 6 podataka, dok su ostali konstantni, vanjska mreža u praksi koristi šest ulaza za treniranje, a konstantne podatke zanemaruje. Regresijska analiza performansi vanjske mreže za podatke na kojima se mreža trenira, podatke za validaciju, testne podatke i sve podatke nalazi se na Slika 2.9.



Slika 2.9. - regresijska analiza preformansi neuronske mreže vanjskog osvjetljenja

Iz dane slike vidljivo je kako je koeficijent regresije približno jednak jedinici, a odsječak na ordinati blizak je nuli, što upućuje na kvalitetne performanse sustava.

Mreža za unutrašnje osvjetljenje trenira se na temelju podataka iz datoteke unutrasnji.txt. Čitaju se ulazni podaci i izlazna vrijednost i na temelju tih podataka se ažuriraju težine koje povezuju ulaz sa skrivenim slojem i skriveni sloj sa izlaznim slojem. Nakon što se pročitaju svi podaci, izvrši treniranje nad njima, formirana je neuronska mreža net2, čije težine odgovaraju ovisnosti osvjetljenja površine o unutrašnjim parametrima. Kako se u datoteci unutarnja.txt mijenja samo 1 podatak (snaga lampe), dok su ostali konstantni, unutarnja mreža koristi dva podatka za treniranje, a ostale zanemaruje. Regresijska analiza performansi unutarnje mreže za podatke na kojima se mreža trenira, podatke za validaciju, testne podatke i sve podatke nalazi se na Slika 2.10.



Slika 2.10. - regresijska analiza performansi neuronske mreže unutarnjeg osvjetljenja

Kao i kod mreže za vanjsko osvjetljenje, na temelju rezultata regresije, dolazi se do zaključka kako su postignute vrlo kvalitetne performanse sustava.

Nakon što su zadovoljeni zahtjevi performansi neuronskih mreža, prelazi se na sljedeći korak, a to je upravljanje osvjetljenjem na površini i analiza upravljanja kroz simulacijski model u Matlab/Simulink okruženju.

3. Model i upravljanje sustavom

Upravljanje sustavom osvjetljenja je konačni cilj ovog rada. Želi se ostvariti mogućnost da se željeni uvjeti u sustavu održavaju u svakom trenutku, a da se pri tome minimizira potrošnja električne energije. Za početak, treba definirati okviran način ponašanja samog sustava pošto se unutar njega nalaze dva upravljiva elementa – sjenila na prozorima koja u slučaju previše vanjskog osvjetljenja smanjuju njegov doprinos te potencijometar kojime se upravlja u slučaju kada je potrebno pojačavanje jačine unutarnjeg osvjetljenja. Kako bi se ostvario cilj minimalizacije potrošnje električne energije prvo će se pratiti stanje vanjskog osvjetljenja i onda na osnovi njega vidjeti kojim segmentom sustava je potrebno upravljati. Isto tako, vrlo je bitno poznavati samu prirodu procesa koji se odvijaju unutar sustava kako bi se odabrala odgovarajuća vrsta upravljačkog algoritma za ostvarivanje željenih preformansi. Općenito gledajući postoje dvije vrste upravljačkih algoritama – **sustavi s povratnom vezom i sustavi bez povratne veze**. U sklopu ovog projekta kao što je već i ranije objašnjeno, koristi se sustav s povratnom vezom, što znači da se izlaz sustava postavlja na ulaz te se ulazni parametri prilagođavaju na način da se ostvari željeno stanje, odnosno željena razina osvjetljenja. U takvoj situaciji potrebno je postojanje upravljačkog uređaja koji će na kvalitetan način obrađivati podatke te u konačnici upravljati upravljivim elementima. Vrsta upravljačkog uređaja kojim se to ostvaruje naziva se **regulator**.

3.1. Vrste regulatora

Postoji mnogo različitih vrsta regulatora, a njihova kategorizacija ovisi o tipu sustava u kojem se koriste te o načinu na koji ovisi o grešci sustava. Osnovne kategorije koje se mogu razmatrati kao opcije za ovaj sustav su sljedeće:

- **Proporcionalni regulatori**
- **Derivacijski regulatori**
- **Integracijski regulatori**
- **Proporcionalno-integracijski regulatori**

- **Proporcionalno-derivacijski regulatori**

Za prve tri vrste regulatora biti će ukratko objašnjeni tipovi sustava za koji se koriste, te korišteni zakon upravljanja.

3.1.1. Proporcionalni regulatori

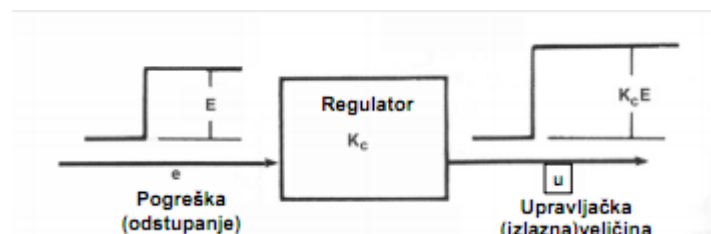
Proporcionalni regulatori su najjednostavnija vrsta regulatora i najčešće se nalaze u kontinuiranim sustavima kod kojih postoji linearna veza između ulaza i izlaza. Unutar njega, realiziran je proporcionalni zakon upravljanja koji je dan sljedećom relacijom:

$$u(t) = K_c * e(t)$$

, gdje K_c predstavlja pojačanje (**engl. gain**) regulatora s obzirom na promjenu signala pogreške, a $e(t)$ signal pogreške. Funkcija prijenosa takvog proporcionalnog regulatora je:

$$G_p(s) = U(s)/E(s) = K_c$$

Kod ovakvog regulatora izlazna veličina je proporcionalna signalu pogreške. Primjer korištenja nalazi se na Slika 3.1.



Slika 3.1. – proporcionalni regulator

Karakteristike proporcionalnih regulatora su: kod njih je potrebno odrediti samo jedan parametar te su stabilni i brzog odaziva. Nedostaci koji su ujedno i razlog ne korištenja u ovom sustavu su činjenica da se skokovito reagira na promjene što bi uvelike ometalo rad na površini koja se osvjetljava te postojanje konstantnog regulacijskog odstupanja između željene i vođene vrijednosti u ustaljenom stanju.

3.1.2. Derivacijski regulatori

Derivacijski regulatori nikada ne dolaze kao zasebna struktura, nego se najčešće nadovezuju na proporcionalne. Razlog za to je činjenica da u situaciji kada je signal pogreške konstantan, tj. kada ne mijenja vrijednost tijekom određenog vremena, derivacijski regulator ne prepoznaje signal pogreške te za izlazni signal daje nulu. Osim toga, problem je i postojanje šuma mjerenja koji se ovakvom vrstom regulatora povećava. Samo djelovanje temelji se na brzini promjene signala pogreške $e(t)$. Zakon, odnosno algoritam upravljanja dan je sljedećom relacijom:

$$u(t) = K_d * \frac{de}{dt}$$

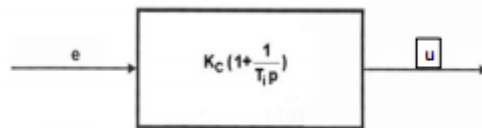
, gdje K_d predstavlja koeficijent derivacijskog prijenosa. Derivacijski regulator u biti služi za dodavanje tzv. prethođenja (**engl. lead**) kako bi se kompenzirala postojeća zadržka sustava. U većini sustava postoji zadržka tako da je ovo svojstvo u teoriji vrlo korisno. Ipak, puno je teže za korištenje u praksi od ostalih tipova regulatora te se stoga primjena ograničava samo na sustave sa velikom zadržkom te kao što je već rečeno, u kombinaciji s nekom drugom vrstom regulatora. Najčešće je riječ o proporcionalno – derivacijskim regulatorima.

3.1.3. Integracijski regulatori

Integracijski regulator, odnosno integracijsko djelovanje predstavlja način upravljanja sustavom gdje se vrijednost upravljačke veličine mijenja brzinom koja je proporcionalna pogrešci $e(t)$. Osnovni algoritam upravljanja je:

$$u(t) = K_i * \int e(t) dt$$

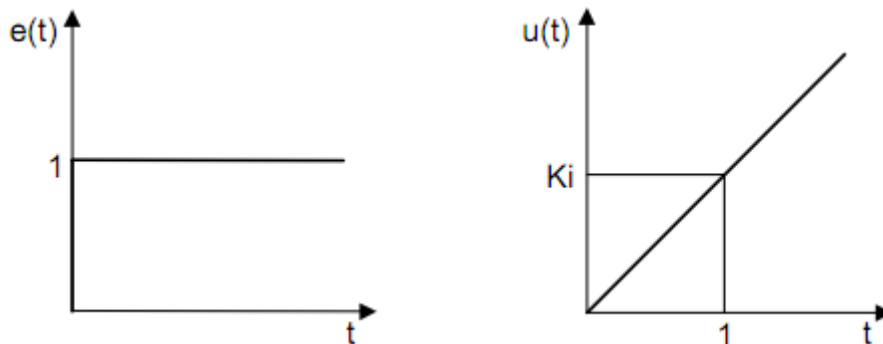
, gdje K_i predstavlja koeficijent integralnog prijenosa te proporcionalnu vrijednost vremena integracije T_n . O toj vremenskoj integraciji ovisi brzina mijenjanja procesne varijable. Ako regulator ima kratko vrijeme integracije tj. visok koeficijent integralnog prijenosa, izlazni signal regulatora će znatno brže djelovati nego kod regulatora s velikim vremenom integracije. Osnovni model prikazan je na Slika 3.2.



Slika 3.2. – integracijski regulator

Jedna od najbitnijih značajki ovakve vrste regulatora je da oni u potpunosti uklanjaju regulacijsko odstupanje u stacionarnom stanju. Najčešće se pojavljuju u kombinaciji s proporcionalnim regulatorima te se ta kombinacija naziva proporcionalno-integracijski (**engl. propotional-integral**) regulator.

Nakon analize svih ovih vrsta regulatora, za sustav kakav se želi ostvariti odlučeno je da se koristi integracijski regulator s funkcijom $\Delta u(t) = K \cdot e(t)$ gdje K predstavlja koeficijent koji služi kao kontrolni mehanizam te se prilagođava signalu pogreške na način da se pokušava ostvariti otprilike jednako vrijeme prilagodbe sustava novim uvjetima neovisno o visini razlike željenje i trenutne razine osvjetljenja . Razlog za korištenje ove vrste regulatora leži u činjenici da, osim što se trajno otklanja pogrešku iz sustava, isto tako se njegovim korištenjem može povećati inertnost sustava, odnosno ne dolazi do skokovitih promjena okolnosti sustava. U ovom slučaju, želja je ostvariti tranzijent u okviru vremenskog intervala nekoliko puta većeg od vremenskog intervala isčitavanja uvjeta za kojeg je odlučeno da iznosi dvije minute. Kada bi se dopustile takve skokovite promjene to bi uvelike ometalo rad na površini od interesa zbog negativnih efekata na radnika. Ilustracija rada prikazana je na Slika 3.3.



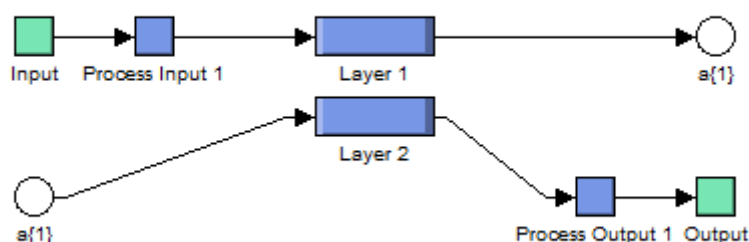
Slika 3.3. – ilustracija regulacije integracijskim regulatorom

U ovom slučaju, želi se ostvariti sustav koji će sporije reagirati na promjene te se stoga uzima regulator s velikim vremenom regulacije. Tada se ostvaruje željena niska brzina odziva sustava te se u potpunosti neutraliziraju negativni efekti. Nakon što je odlučeno o tipu regulatora prelazi se na sam algoritam upravljanja sustavom.

3.2. Algoritam upravljanja

Okvirno, sustav je biti deterministički jer će se u jednakim uvjetima uvijek ponašati na isti način. Programski alat koji se koristi za ostvarenje sustava je MATLAB 7.10 2011a. U sklopu njega napravljeno je programsko rješenje za učenje mreže i simuliranje rezultata izvedenog algoritma upravljanja, te sam model sustava u koji je implementiran zamišljeni način upravljanja u sklopu Simulink okruženja. Isto tako veoma bitan element su i neuronske mreže koje su ostvarene kroz korištenje *Neural Networks Toolbox*-a [8] koji se nalazi u sklopu Simulinka.

Kao što je već ranije navedeno, za početak se čitaju podaci o unutarnjem i vanjskom osvjetljenju iz .txt datoteka te se pomoću njih izvrši treniranje mreža. Tu treba naglasiti da mreže ne služe izravno kao dio algoritma za upravljanje već su one na neki način pomagalo kojime se dolazi do podataka (odnosno osvjetljenja na površini od interesa) te u konačnici na osnovi tih podataka ulazi u samo upravljanje sustavom. Elementi jedne od mreža u Simulinku prikazani su na Slika 3.4.

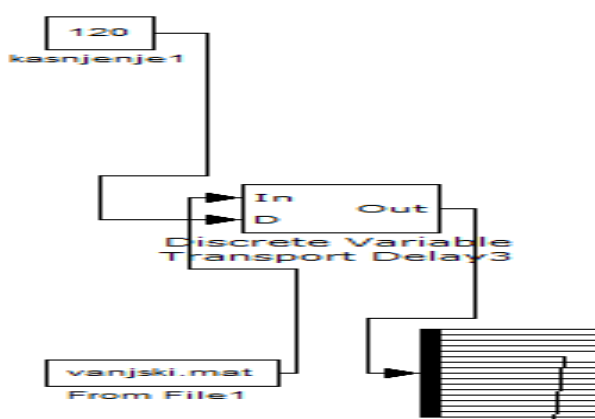


Slika 3.4. – elementi neuronske mreže u Simulinku

Kao što je već ranije navedeno mreža se sastoji od ulaznog, skrivenog i izlaznog sloja. Mreže su trenirane u sklopu programskog dijela rješenja te zatim sa

prilagođenim vrijednostima parametara, odnosno težina implementirane u Simulink model.

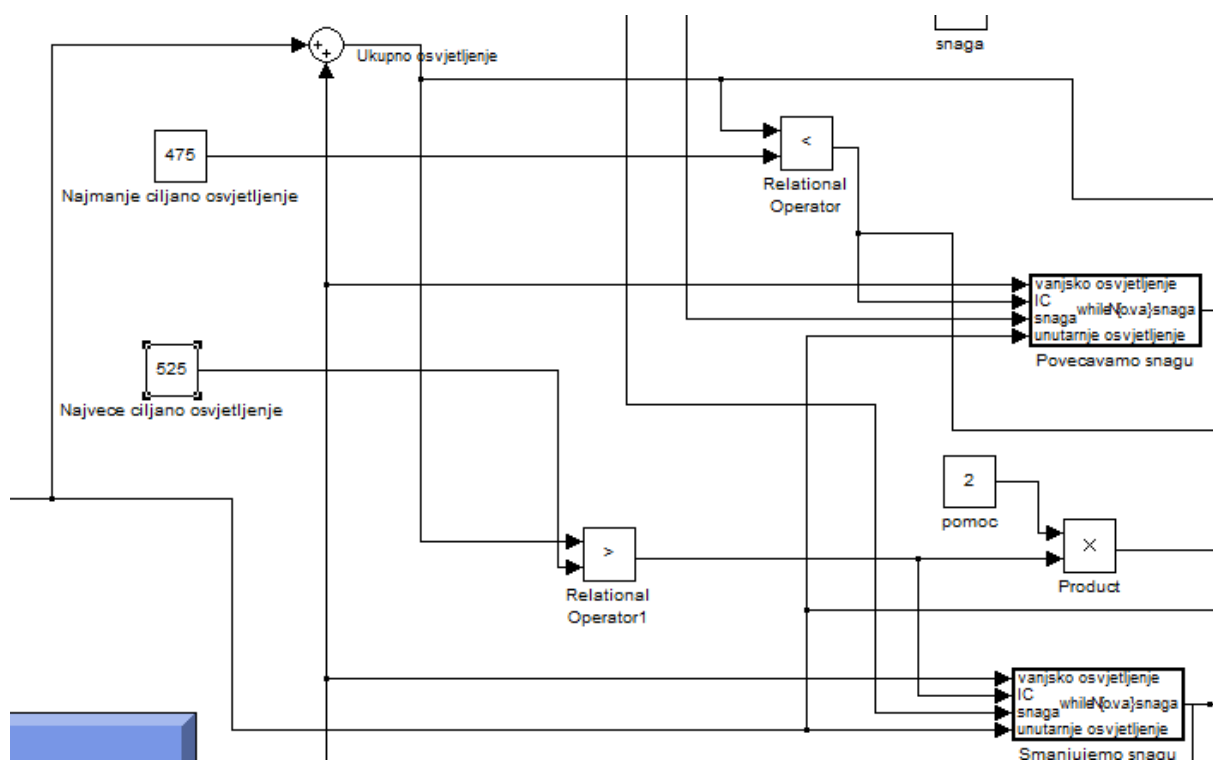
Nakon što su mreže istrenirane počinje se sa čitanjem podataka za vanjsko osvjetljenje. U sklopu Simulink modela to se vrši iz .mat datoteke (vanjski.mat). U početku, na ulaz neuronske mreže za unutarnje osvjetljenje vrijednost snage rasvjetnog tijela postavljena je na nulu. Uzrokovanje, tj. isčitavanje mjerenja vrši se svakih 120 sekundi te se prilikom toga vanjski parametri dostavljaju kao ulaz u mrežu net. Takvo uzorkovanje ostvareno je kroz spajanje kašnjenja na ulaz u sustav (Slika 3.5.)



Slika 3.5 – namještanje kašnjenja ulaza

Ona zatim kao izlaz daje doprinos vanjskog osvjetljenja osvjetljenju površine od interesa. Unutarnji parametar (snaga rasvjetnog tijela) se dostavlja kao ulaz mreži net2, koja računa doprinos unutarnjeg osvjetljenja osvjetljenju površine od interesa.

Nakon toga, prelazi se na izračun ukupnog doprinosa vanjskog i unutarnjeg osvjetljenja te se ta vrijednost uspoređuje sa željenom vrijednošću osvjetljenja na podlozi uz dopušteno odstupanje od 5%. Blokovi koji u sklopu Simulink modela ostvaruju navedenu funkcionalnost prikazani su na Slika 3.6.



Slika 3.6. – provjera vrijednosti osvjetljenja

U početnom koraku pokretanja sustava snaga rasvjetnih tijela je postavljena na nulu te se stoga, u situaciji gdje je zbroj osvjetljenja manji od željenog, ulazi u unutarnju kontrolnu petlju. U toj unutarnjoj kontrolnoj petlji prvo se izračunava razlika između trenutne i željene vrijednosti osvjetljenja. Razlog za to je činjenica da želimo postići sustav koji će neovisno o razlici tih dviju vrijednosti održavati konstantnim vrijeme potrebno da se sustav dovede u željeno stanje. Drugim riječima, što je razlika između trenutne i željene vrijednosti veća, to će inkrement na unutarnjim rasvjetnim tijelima biti veći. Tim inkrementom se povećava snaga na rasvjetnim tijelima uz postavljeno kašnjenje od jedne sekunde. Nakon što se odredi sam inkrement, te doda u snagu na rasvjetnom tijelu, ta nova vrijednost se ponovno šalje kao ulaz u mrežu net2 te se ponavlja opisani postupak sve dok se ne uđe u željene granice ukupnog osvjetljenja na površini od interesa.

Sljedeća situacija koja se mora uzeti u obzir je da se prilikom isčitavanja novih parametara te prolaska kroz mreže na izlazu dobije vrijednost ukupnog osvjetljenja koja je veća od željene uz spomenutu toleranciju. U toj situaciji, postupak je sljedeći – za početak se provjerava jesu li rasvjetna tijela uključena, tj. je li snaga na njima veća od nula. Ukoliko je, prelazi se na smanjivanje doprinosa unutarnjeg

osvjetljenja kako bi se zadovoljio postavljeni cilj smanjenja potrošnje električne energije. To smanjivanje vrši se na isti način kao i povećavanje, dakle kroz dva koraka – provođenje računa za vrijednost inkrementa, te postepeno smanjivanje i provjeru u svakom koraku smanjivanja je li se ušlo u željene granice jakosti osvjetljenja.

Druga mogućnost je da se provjerom vrijednosti snage na rasvjetnim tijelima došlo do zaključka da su ona ugašena (odnosno da je snaga jednaka nuli) . Tada se prelazi na prilagođavanje parametara vanjskog osvjetljenja, tj. prelazi se na prilagođavanje vrijednosti transmisije i refleksije prostora, odnosno upravlja se zasjenjivačima na prozoru s inkrementom od 0.01 te se prilikom svakog inkrementa ponavlja postupak ulaska u mrežu s novim podacima te provjere je li se ušlo u željene granice.

Ako se kroz kasnija mjerenja dođe u situaciju u kojoj se ukupna vrijednost smanjila ispod željene granice, prvo se zasjenjivači vraćaju u početni položaj te se nakon toga ponavlja cjelokupni postupak u ovisnosti o okviru u kojem se nova zbrojena vrijednost nalazi. Opširni pseudokod cjelokupnog upravljanja nalazi se u prilogu ovog rada.

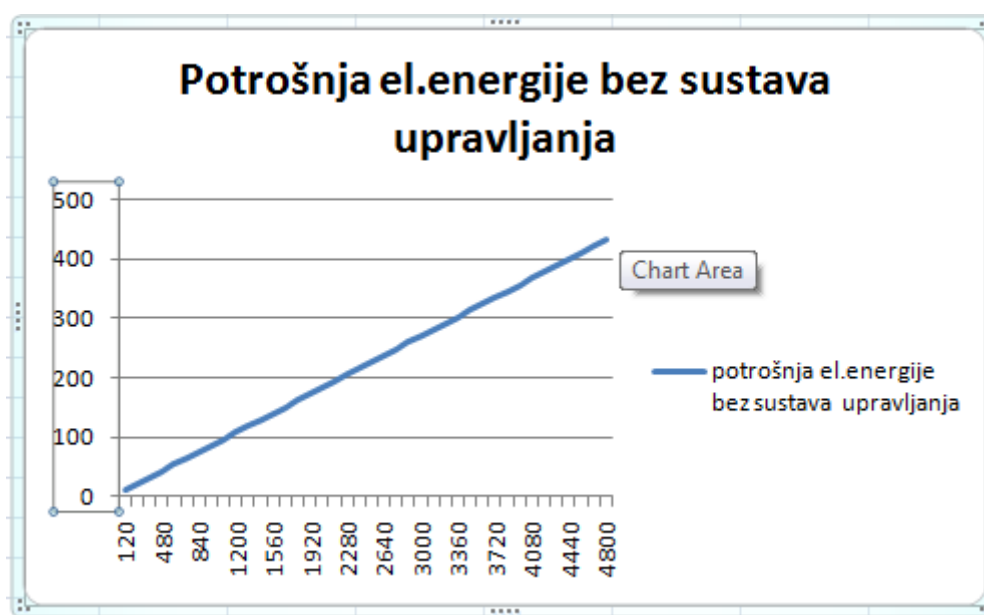
S obzirom da je na početku rada spomenuto kako je jedna od motivacija za izradu sustava upravljanja želja da se ostvari smanjenje potrošnje električne energije, istovremeno se, uz praćenje vrijednosti snage i osvjetljenja, u svakom koraku obavlja i izračun dotad potrošene električne energije. U konačnici tu vrijednost je moguće jednostavno usporediti s razinom potrošnje u sustavu koji ne koristi upravljanje osvjetljenjem te se tako može vidjeti je li ostvarena ušteda. Analiza tog segmenta, te analiza samog ponašanja sustava i kretanja vrijednosti osvjetljenja opširnije je obavljena u sljedećem potpoglavlju.

3.3. Analiza rezultata

Kako bi se dobio što kvalitetniji uvid u te rezultate i ostvarene uštede napravljena je testna .mat datoteka kojom se u modelu sustava simulira očitavanje uvjeta osvjetljenja na površini od interesa te se testira njegovo ponašanje pri različitim scenarijima od potrebe povećanja snage rasvjetnih tijela, ali i smanjivanja i održavanja na istoj razini. U toj datoteci nalazi se 40 mjerenja prilikom čega se

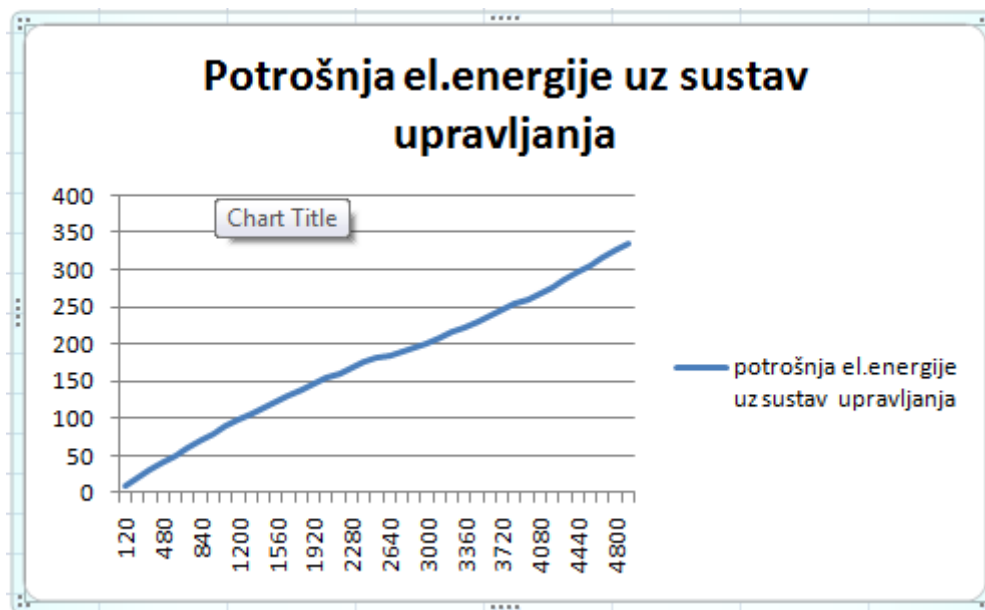
mjerenje u sustav ubacuje u već navedenom vremenu uzorkovanja od 120 sekundi. Dobiveni rezultati prikazani su na sljedeće dvije slike gdje prva predstavlja potrošnju električne energije bez uporabe upravljanja osvjetljenjem, dok druga predstavlja potrošnju električne energije prilikom uporabe modela upravljanja osvjetljenjem.

Kod situacije gdje nema upravljanja osvjetljenjem uzeta je vrijednost snage na rasvjetnim tijelima od 81 watta čime se od unutarnjeg osvjetljenja dobiva 479 luxa na površini od interesa čime se ušlo u željene granice osvjetljenja te se osigurava da će i u situaciji gdje je doprinos vanjskog osvjetljenja jednak nuli, biti dovoljno svjetlosti. Osim što je iz toga jasno da će sama potrošnja biti velika, isto tako se time ne mogu ostvariti idealni uvjeti u kojima bi učinkovitost radnika bila na maksimalnoj razini. Navedene slike grafova potrošnje koriste se kako bi se potvrdile ili opovrgnule postavljene pretpostavke. Prva slika (Slika 3.7.) prikazuje potrošnju električne energije u prostoriji koja nema sustav upravljanja osvjetljenjem, a druga (Slika 3.8.) potrošnju električne energije u situaciji gdje postoji sustav upravljanja osvjetljenjem.



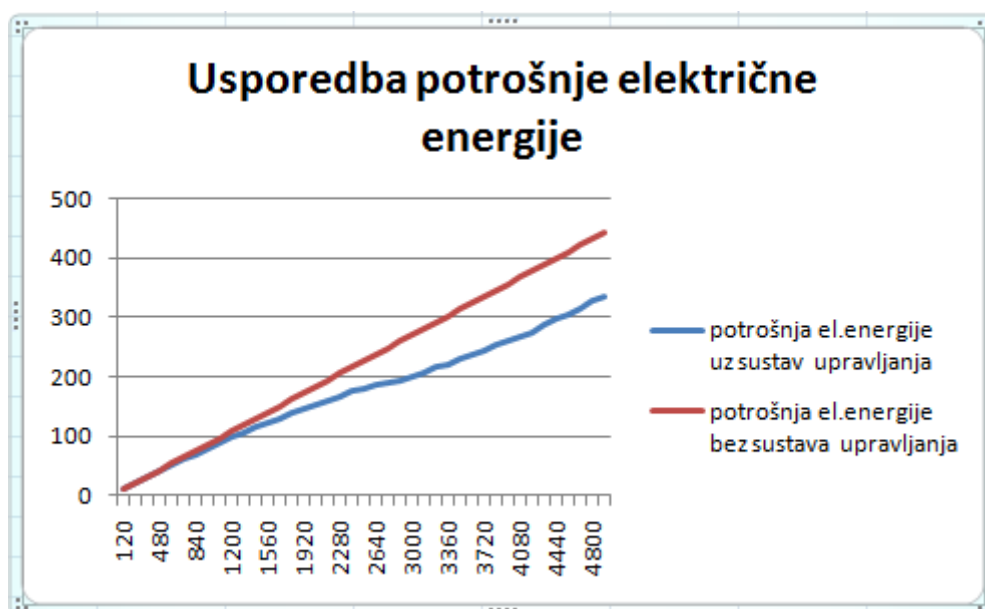
Slika 3.7. – potrošnja el. energije bez sustava upravljanja

U prostoriji gdje nema sustava za upravljanje osvjetljenjem jačina osvjetljenja je na ranije navedenoj konstantnoj razini te se iz toga dolazi do zaključka kako je potrošnja nakon 40 intervala uzimanja uzoraka koji se pojavljuju kod sustava s upravljanjem osvjetljenjem 442.8 Wh.



Slika 3.8. – potrošnja el. energije uz sustav upravljanja

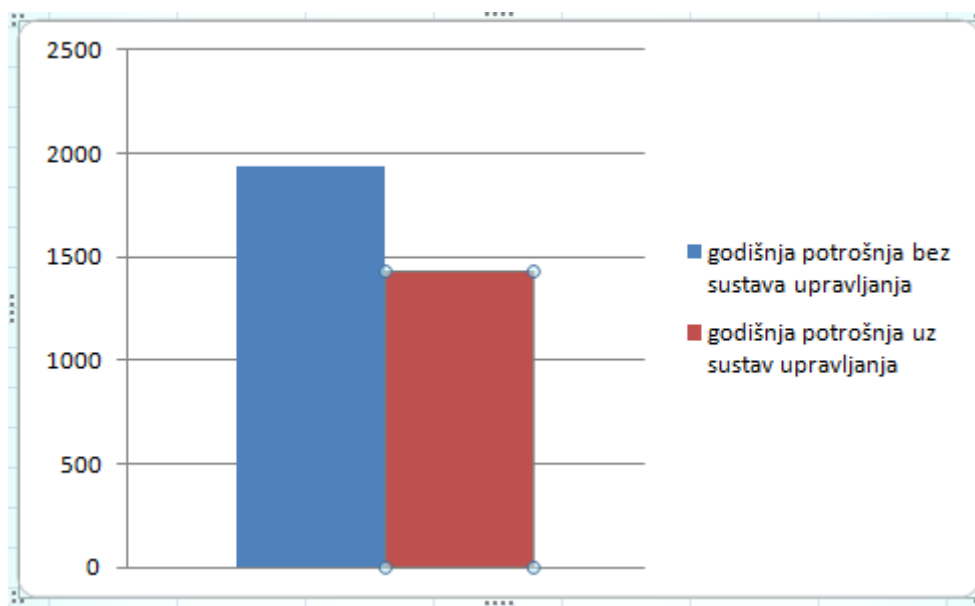
Za razliku od sustava gdje se ne koristi upravljanje osvjetljenjem, u sustavu gdje ono postoji potrošnja električne energije je znatno manja te nakon istog vremenskog intervala iznosi 326.39 Wh što je značajna ušteda od čak 30%. Kako bi se dobio što kvalitetniji uvid u navedenu razliku, gore prikazana grafa su uspoređena na Slika 3.9.



Slika 3.9. – usporedba potrošnje električne energije

Na slici 3.9. prikazano je kretanje potrošnje električne energije u obje situacije, gdje crvena linija predstavlja potrošnju u situaciji gdje nema sustava upravljanja osvjetljenjem, a plava linija sustav gdje postoji upravljanje osvjetljenjem.

Iz priloženih grafova vidljivo je da se ostvaruje pretpostavka da je potrošnja električne energije bez upravljanja veća nego u situaciji gdje se koristi upravljanje osvjetljenjem i parametrima prozora. Stoga se može reći kako je uvođenje upravljanja osvjetljenjem vrlo dobar način da se ostvare uštede električne energije u zgradarstvu. Na bazi jedne prostorije, te gledajući samo na navedenom malom intervalu nije riječ o značajnoj uštedi, ali ako se gleda globalno ušteda električne energije je značajna. Kao pretpostavka je uzeto da se u uredu radi u dvije smjene, odnosno dnevno 16 sati. O kakvim je uštedama riječ prikazano je na Slika 3.10.



Slika 3.10. – usporedba godišnje potrošnje

Iz priloženog grafa je vidljivo kako je potrošnja u situaciji gdje postoji sustav upravljanja na godišnjoj bazi otprilike 500 kWh što je značajna potrošnja, te iznosi uštedu od oko 25% u odnosu na prostoriju gdje ne postoji sustav upravljanja osvjetljenjem.

Zaključak

Na samom početku rada predstavljen je podatak da potrošnja električne energije u zgradama iznosi 25 – 40 % ukupne potrošnje električne energije u svijetu. Iz toga se došlo do zaključka da je taj postotak potrebno smanjiti na što upućuju i obvezuju razne norme kako pojedinačnih država, tako i međunarodne zajednice. Stoga je veoma bitno kroz istraživanja doći do različitih načina na koje bi se moglo utjecati na smanjenje potrošnje što je bitno ne samo s ekonomskog aspekta, već i s ekološkog. U ovom radu ostvaren je model upravljanja osvjetljenjem jedne radne prostorije u sklopu sustava nekog poslovnog objekta. Taj model se bazirao na postupku prikupljanja podataka, stvaranja algoritma upravljanja te implementiranja tog algoritma upravljanja u Simulink model. Nakon što je model ostvaren pristupilo se testiranju te usporedbi potrošnje električne energije prostorije koja ima implementirano upravljanje osvjetljenjem te prostorije koja isto to nema implementirano. Na bazi te jedne prostorije jasno je vidljivo da se pojavljuje ušteda u okvirima do čak 30%. Gledajući samo jednu prostoriju, nije riječ o pretjerano značajnoj uštedi (jer je riječ o potrošnji na bazi od par kilowattsati dnevno po prostoriji), ali ako se uzme da zgrade redovito imaju po nekoliko stotina prostorija lako se dolazi do zaključka kako je riječ o veoma kvalitetnim rezultatima i u konačnici, značajnim uštedama električne energije. Stoga se može zaključiti da će ovako zamišljen model, ili modeli slični njemu u bliskoj budućnosti imati značajnu ulogu te da će biti potrebno uložiti velik trud u dizajniranje sustava koji će imati implementirane ovakve mogućnosti upravljanja.

Literatura

- [1] ADRIAN BIRAN, MOSHE BREINER: „MATLAB 5 for Engineers”, 2. izdanje, Addison-Wesley, 1999.g.
- [2] ABDELAZIZ LAOUADI: „Design with SkyVision: a computer tool to predict daylighting performance of skylight”, NRC – CNRC, svibanj 2007.g
- [3] EZZAT BAROUDI, „DIALUX 4.9 Manual Guide”, 10. ožujak 2011.g, <http://ezzatbaroudi.wordpress.com/2011/03/10/dialux-4-9-manual-guide/>, 17. svibnja 2011.g
- [4] ABDELAZIZ LAOUADI: „Efficient calculation of daylight coefficients for rooms with dissimilar complex fenestration systems“, NRC-CNRC, svibanj 2011.g
- [5] „Green building case studies”, 23. siječanj 2011.g, <http://www.gbca.org.au/>, 07. lipanj 2011.g
- [6] „The Engineering Toolbox“, http://www.engineeringtoolbox.com/light-level-rooms-d_708.html, travanj 2011.g
- [7] S.N.SIVANANDAM, S SUMATHI, S.N.DEEPA: „Introduction to Neural Networks Using MATLAB 6.0“, Tata McGraw-Hill, 2005.g
- [8] „Mathworks – Function References: Neural Network Toolbox“, <http://www.mathworks.com/help/toolbox/nnet/ref/f7-23438.html>, lipanj 2011.g
- [9] SIMON S.HAYKIN: „Neural Networks: A Comprehensive Foundation“, 2.izdanje, Prentice Hall, New Jersey, 1999.g
- [10] BOJANA DALBELO BAŠIĆ, JAN ŠNAJDER, Bilješke s predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011.g
- [11] „Regulatori“, http://ccd.uns.ac.rs/aus/sau/sau_doc/PID.pdf, lipanj 2011.g
- [12] N. BOLF: „Mjerenja i vođenje procesa”, 2006.g, http://www.fkit.unizg.hr/files/nastava/zmavp/MAVP_06-07_Regulatori.pdf, lipanj 2011.g

Sažetak

U ovom završnom radu se projektiralo upravljanje osvjetljenjem za prostoriju s krovnim prozorom. Prvi korak je identificiranje i validiranje modela doprinosa vanjskog i unutarnjeg osvjetljenja ukupnom osvjetljenju na površini interesa. Alat kojim se koristi za ostvarenje tog koraka su neuronske mreže te njihovo ostvarenje pomoću Neural Network Toolbox-a u sklopu programskog alata MATLAB. Drugi korak je izrada algoritma upravljanja kako bi se održavali željeni uvjeti osvjetljenja na navedenoj površini od interesa, odnosno radnom stolu, uz minimalnu potrošnju električne energije. Algoritam je provjeren programski također u sklopu programskog alata MATLAB, te simulacijski u Simulink okruženju istog programskog alata. U konačnici je izrađeno nekoliko scenarija za doprinose vanjskog osvjetljenja te se kroz usporedbu potrošnje bez sustava upravljanja i uz sustav upravljanja došlo do određenih zaključaka vezanih za vrijednost implementiranja takvih sustava u zgradarstvu.

KLJUČNE RIJEČI : SkyVision, DIALux 4.9 Light, neuronska mreža, pretreniranost, Neural Network Toolbox, MATLAB, Simulink, model, upravljanje osvjetljenjem, usporedba potrošnje električne energije

Summary

In this bachelor thesis the goal was to design a system that will control the light in the room with the skylight window. First step was to identify and validate the model of contribution for the external and internal illumination to the total illumination on the surface of interest. The tool that was used to achieve that step, were neural networks and their realization through usage of Neural Network Toolbox implemented in MATLAB software tool. The second step was to make a control algorithm for maintaining the desired lighting conditions on the surface of interest with minimal power consumption. The algorithm was tested through a program made in MATLAB and also through a simulation in Simulink environment of MATLAB. In the end, there were made a couple of scenarios for the contribution of external illumination and the comparison of consumption with or without the control system for indoor illumination. The reason for this is to come to the certain conclusions regarding the value of implementing such systems in buildings.

KEY WORDS: SkyVision, DIALux 4.9 Light, neural network, over-trained, Neural Network Toolbox, MATLAB, Simulink, model, illumination control, comparison of electrical energy consumption

Privitak: Pseudokod algoritma upravljanja

1. Čitaju se početni unutrašnji parametri (iz datoteke).
2. Ulazimo u vanjsku kontrolnu petlju.
 - 2a. Čitaju se izmjereni vanjski parametri (npr. iz datoteke). Nova se mjerenja obavljaju svakih 120 sekundi.
 - 2b. Vanjski parametri dostavljaju se kao ulaz mreži net , koja računa doprinos vanjskog osvjetljenja osvjetljenju podloge.
 - 2c. Unutrašnji parametri se dostavljaju kao ulaz mreži $net2$, koja računa doprinos unutrašnjeg osvjetljenja osvjetljenju podloge.
 - 2d. Računamo zbroj vanjskog i unutrašnjeg osvjetljenja i uspoređujemo sa željenom vrijednošću osvjetljenja (u ovom slučaju 500W uz moguća odstupanja od 5%).
 - 2e. Ukoliko je osvjetljenje manje od željenog, skačemo na korak 2f. Ukoliko je osvjetljenje veće od željenog, skačemo na korak 2g. Ukoliko je osvjetljenje unutar željenih granica, vraćamo se na korak 2a.
- 2f. Ulazimo u unutrašnju kontrolnu petlju.
 - 2f1. Provjeravamo razliku između trenutne i željene vrijednosti osvjetljenja te u ovisnosti o toj vrijednosti prilagođavamo vrijednost inkrementa snage. Povećavamo snagu lampe za zadanu vrijednost inkrementa nakon zadanog kašnjenja (1s).
 - 2f2. Unutrašnji parametri se dostavljaju kao ulaz mreži $net2$, koja računa doprinos unutrašnjeg osvjetljenja osvjetljenju podloge.
 - 2f3. Računamo zbroj vanjskog i unutrašnjeg osvjetljenja i uspoređujemo sa željenom vrijednošću osvjetljenja (u ovom slučaju 500W uz moguća odstupanja od 5%).
 - 2f4. Ako je vrijednost osvjetljenja i dalje manja od željene, vraćamo se na korak 2f1. Inače skačemo na korak 2h.
- 2g. Provjeravamo da li je lampa uključena, odnosno da li joj je snaga veća od 0W. Ako je, idemo na korak 2g1. Ako nije, idemo na korak 2g2.
- 2g1. Smanjujemo snagu lampe, dok ne dođemo do željene vrijednosti osvjetljenja, ili dok snaga ne padne na nulu.
- 2g1a. Provjeravamo razliku između trenutne i željene vrijednosti osvjetljenja te u ovisnosti o toj vrijednosti prilagođavamo vrijednost inkrementa snage. Smanjujemo snagu lampe za zadanu vrijednost inkrementa nakon zadanog kašnjenja (1s).

2g1b. Unutrašnji parametri se dostavljaju kao ulaz mreži net2, koja računa doprinos unutrašnjeg osvjetljenja osvjetljenju podloge.

2g1c. Računamo zbroj vanjskog i unutrašnjeg osvjetljenja i uspoređujemo sa željenom vrijednošću osvjetljenja (u ovom slučaju 500W uz moguća odstupanja od 5%).

2g1d. Ako je vrijednost osvjetljenja dosegla željenu vrijednost, prelazimo na 2h. Ako nije, prelazimo na 2g1e.

2g1e. Ako je lampa isključena, prelazimo na 2g2. Ako nije, vraćamo se na 2g1a.

2g2. Namještamo parametre prozora sve dok osvjetljenje površine ne padne na zadanu razinu.

2g2a. Smanjujemo vrijednost koeficijenta transmisije prozora za zadanu vrijednost (0.01) i istodobno povećavamo vrijednost koeficijenta refleksije prozora za jednaku vrijednost. Koeficijenti se mijenjaju nakon zadanog kašnjenja (1s).

2g2b. Vanjski se parametri dostavljaju mreži net, koja računa doprinos vanjskog osvjetljenja osvjetljenju podloge.

2g2c. Računamo zbroj vanjskog i unutrašnjeg osvjetljenja (koje je nula) i uspoređujemo sa željenom vrijednošću osvjetljenja (u ovom slučaju 500W uz moguća odstupanja od 5%).

2g2d. Ako smo dosegli željenu vrijednost osvjetljenja, prelazimo na 2h. Ako nismo, skaćemo na 2g2a.

2h. Skaćemo na početak vanjske petlje, odnosno korak 2a.