

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET ZAGREB

ZAVRŠNI RAD

Lucija Agić

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAFIČKI FAKULTET ZAGREB

Smjer: tehničko-tehnološki

ZAVRŠNI RAD
USPOREDBA TEHNOLOGIJA ZASLONA
PAMETNIH TELEFONA

Mentor:

Doc. dr. sc. Ante Poljičak

Student:

Lucija Agić

Zagreb, 2019.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. LCD	2
2.1.1. Povijest	2
2.1.2. Princip rada	4
2.1.3. TFT LCD	8
2.1.5. Primjena	11
2.2. AMOLED	13
2.2.1. Povijest	13
2.2.2. Princip rada	14
2.2.3. Vrste	18
2.2.4. Primjena	19
2.3. KOLORIMetriJA	22
2.3.1. Karakteristike boje	24
2.3.2. Doživljaj boje	24
2.3.3. sRGB prostor boja	27
2.3.4. CIELAB prostor boja	29
3. EKSPERIMENTALNI DIO	35
3.1. Opis ispitivanja	35
3.2. Specifikacije zaslona uređaja [17]	37
3.3. Mjerni uređaj	38
3.4. Rezultati	39
4. ZAKLJUČAK	44
5. REFERENCE	46
6. DODATAK	48

1. UVOD

Tehnološkim razvojem i sve bržim napretkom zasloni su postali neizostavni dio svakodnevice. Od malog ručnog sata do digitalnih jumbo plakata na ulicama, okruženi smo pikselima na tankim panelima. Najvažniji od njih za većinu ljudi je multifunkcionalni uređaj koji objedinjuje tradicionalni telefon, fotoaparat, računalo, kompas i još mnogo drugih funkcija – pametni mobitel.

Svaka komponenta pametnih mobitela u kratko vrijeme se promijenila, poboljšala i unaprijedila zbog napretka u tehnologiji i znanosti - od memorije, procesora i baterije do same veličine ekrana. Iako se predviđa kako su *smartphone* uređaji dosegнули svoj maksimalan rast iznad kojega više ne bi bili praktični za korištenje jednom rukom, kvaliteta prikaza zaslona i dalje ima prostora za napredak te se ulaže mnogo u istraživanje novih mogućnosti. Tijekom godina, većina tih istraživanja temeljila se na postojećim tehnologijama, LCD i AMOLED zaslonima.

Dugo je vremena LCD zaslon bio zastupljeniji i češći izbor proizvođača mobilnih uređaja, ali i tableta, televizora i prijenosnih računala. Posljednjih nekoliko godina, međutim, omjer se mijenja u korist AMOLED tehnologije, među ostalim i zbog sve većeg rasta proizvođača koji se može smatrati odgovornim za popularizaciju i najveći razvoj ove tehnologije, tvrtke Samsung. Obje tehnologije nisu bez mane; kao što je vidljivo kasnije u ovom radu, LCD mnogo vjernije prikazuje boje onakvima kakve zaista jesu, ali zahtijeva i posebno pozadinsko osvjetljenje te pruža manji kontrast. AMOLED, s druge strane, pruža neviđen raspon boja i prave crne nijanse, ali sasvim sigurno i slabiju vidljivost na direktnom vanjskom svjetlu.

Cilj ovog rada usporedba je dvije različite tehnologije, LCD i AMOLED, na zaslonima pametnih telefona te, na temelju prednosti i mana te izmjerenih vrijednosti, zaključak koja bi u ovom trenutku mogla biti bolji izbor za krajnjeg korisnika.

2. TEORIJSKI DIO

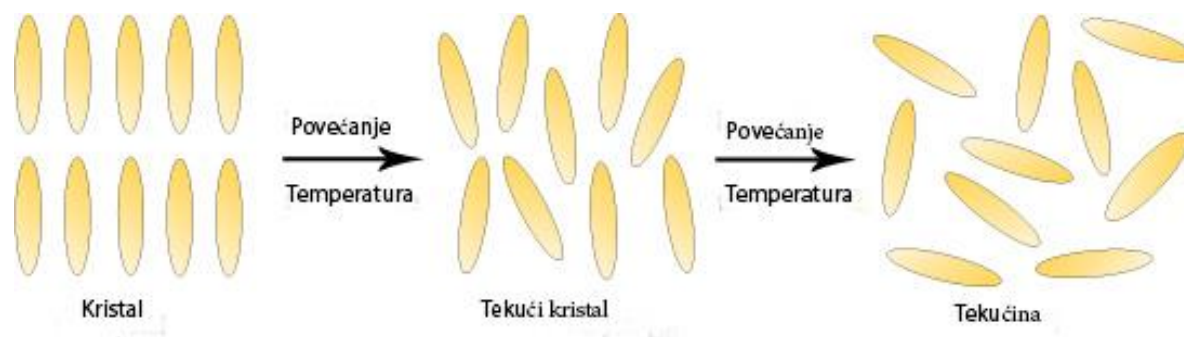
2.1. LCD

Tehnologija tekućih kristala ili LCD (*liquid crystal technology*) postala je česti izbor proizvođača svih vrsta zaslona. Temelji se na električnom nastajanju slike koja se prikazuje na tankom, ravnom panelu tekućih kristala. U svakodnevnu uporabu ovi zasloni ušli su putem kalkulatora i digitalnih satova, a zatim su 2007. kvalitetom premašili i zamijenili tradicionalne, glomazne katodne cijevi. Danas su posvuda – u mobitelima, kamerama, računalima, televizorima [3].

2.1.1. Povijest

Tehnologija tekućih kristala otkrivena je slučajno kada je austrijski botaničar Friedrich Reinitzer 1888. godine pokušao objasniti otkriće dva različita tališta biljnog derivata kolesteril benzoata – na 145°C i 179°C. Tekućina koju je dobio bila je mutna, a hlađenjem postajala bistra i naposljetku kristalizirala. Surađujući s fizičarem Ottom Lehmannom, pomoću mikroskopa i topline otkrili su međufazno tekuće stanje tipično za neke kristale. Tako je skovan izraz tekući kristal.

Godine 1922. M. G. Friedel definira 3 različite faze tekućih kristala te ih imenuje novom terminologijom: smektički, nematski, kolesterični. Također objašnjava pojavu prozirnog liotropskog tekućeg kristala kojemu je fazni prijelaz (stanje) ovisno o koncentraciji. Za razliku od tih vrsta, termotropskim tekućim kristalima promjena faze ovisi o promjeni temperature. Lipidni dvosloji izraz je kojim se opisuju liotropski prijelazi tekućih kristala, a na **Slici 1** prikazan je prijelaz kristala iz tekućeg u kruto stanje pod povećanom temperaturom [3].



Slika 1. Nastajanje tekućih kristala

U dvadesetim i tridesetim godinama prošlog stoljeća proučavano je djelovanje električnog i magnetskog polja na tekuće kristale. Preteča prvog modernog LCD-a pod naponom bio je pokus ruskog fizičara Vsevoloda Frederiksa (**Slika 2**), koji je uspio promijeniti orijentaciju tekuće-kristalnih molekula primjenom magnetskog polja na tanki film između dvije ploče.



Slika 2. Vsevolod Frederiks

Prvi LCD uređaj patentirala je UK Marconi Wireless Telegraph kompanija, davne 1936. Godinama kasnije, nakon II. Svjetskog rata, zanimanje za LCD tehnologiju povećalo se usporedno s razvojem sve manjih elektroničkih uređaja za svakodnevnu upotrebu. Javlja se potreba za razvojem kompatibilnih zaslona temeljenih na istoj tehnologiji.

U kasnim 1960-ima pojavili su se LCD uređaji sa tankim slojem tekućeg kristala umetnutim između staklenih površina prekrivenih prozirnim elektrodama. Električno polje remeti strukturu tekućih kristala te mijenja boju iz prozirne u obojenu. Ovakvi uređaji imali su pojačanu osjetljivost na temperaturu, pa nisu bili pretjerano izdržljivi i dugotrajni. Sve se promijenilo kada je britanski fizičar Peter Raynes u suradnji s kemičarima Georgeom Grayem i Kenom Harrisonom sa Sveučilišta Hull razvio LCD materijal koji je bio funkcionalan, stabilan pri sobnoj temperaturi te najvažnije, prikladan za masovnu proizvodnju. Interdisciplinarna suradnja ovih znanstvenika bila je ključna za napredak u

LCD tehnologiji. Uslijedili su brojni ključni izumi poput tranzistora tankih filmova (TFT) i zenitnog bistabilnog zaslona. TFT LCD tehnologija danas je osnovna tehnologija na kojoj se temelje zasloni televizora i računala [3].

2.1.2. Princip rada

Većina tekućih kristala ima duguljastu, štapičastu molekularnu strukturu koja je zaslužna za stvaranje tekuće-kristalne faze zbog kombinacije privlačnih sila među molekulama i njihovog specifičnog oblika. Ova veza nije dovoljno jaka kako bi molekule održale stabilnost, pa one naknadno tvore slojeve ili poprimaju oblik diska i slažu se u stupce. Po potrebi, kristalna molekularna struktura tekućih kristala može propuštati ili blokirati prolazak svjetlosti, što ih čini idealnima za stvaranje oštre, jasne slike. Još jedan razlog zbog kojeg su tekući kristali tako uspješno i efikasno zamijenili katodne cijevi je znatno manja debljina ekrana, što se pripisuje svjetlosti – za razliku od zastarjele tehnologije, tekući kristali ne emitiraju svjetlost na ekran, već raspoređuju postojeći izvor svjetlosti. Koristi pozadinsko osvjetljenje za reprodukciju višebojnih ili jednobojnih prikaza, a izbor pozadinskog osvjetljenja svodi se na odabir između kvalitete prikaza, cijene i značajki.

LED pozadinsko osvjetljenje najpopularniji je izbor za LCD zaslone male i srednje veličine. Koristi se umjesto klasičnih katodnih fluorescentnih cijevi, a koriste istu tehnologiju sa smanjenom potrošnjom energije te boljim značajkama kvalitete zaslona kao što su kontrast, osvjetljenje i raspon boja. Upravo je veličina gamuta najveća prednost ovih vrsta zaslona, a fizički su tanji, lakši i manje se zagrijevaju. Uz to imaju dulji vijek trajanja i pouzdaniji su [4].

Iako mnogi proizvođači i dobavljači reklamiraju LCD ekrane sa LED pozadinskim osvjetljenjem kao LED zaslon, za razliku od LCD tehnologije LED uređaji imaju vlastito osvjetljenje. Osvjetljenje daje i do nekoliko stotina plavih ili bijelih LED dioda. Koriste se dvije konstrukcije dioda: rubno osvjetljenje koje okružuje zaslon te se svjetlost jednoliko širi pozadinom ili puni niz pravilno poredanih dioda (matrica) direktno iza zaslona, pri čemu se upravlja pojedinačno svakom diodom kako bi se ostvario dobar omjer dinamičnosti i kontrasta slike [2].

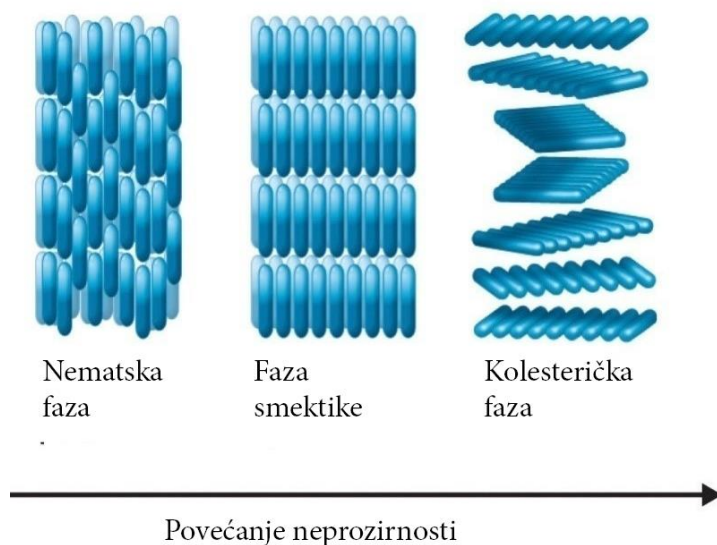
ELP (*Electroluminescence Panel*) je specifična vrsta pozadinskog osvjetljenja čiji je izvor svjetlosti pojava luminescencije u krutini pobuđenoj elektronima, u ovom slučaju ploči. Električna struja i električno polje koje generira ubrzavaju elektrone do točke induciranja luminescentne tvari. Boja svjetlosti elektroluminiscentnog panela varira ovisno o frekvenciji struje koja djeluje na tvar i samoj tvari. Često se primjenjuje u proizvodnji satova, instrumenata vozila i rendgenskih aparata. Zaslone temeljeni na ovoj tehnologiji vrlo su tanki, lagani i ravnomjerno raspoređuju svjetlost. Potrošnja energije ovih zaslona je niska, ali imaju ograničen i relativno kratak vijek trajanja od 3000 do 5000 sati [1].

Katodne fluorescentne cijevi ili CCFL (*Cold Cathode Fluorescent Lamps*) izvor su svjetlosti niske potrošnje električne energije. Primarna konfiguracija ovakve svjetlosti je slična kao kod rubnog LED osvjetljenja. Katodne cijevi jednoliko raspoređuju svjetlost preko cijeloga zaslona. Iako su LED diode zamijenile katodne cijevi kao modernija tehnologija pozadinskog osvjetljenja, one pružaju bolju jednoliku distribuciju svjetla, pogotovo na većim zaslonima. Također imaju puno kraći vijek trajanja (20 000 – 30 000 sati) i sadrže živu, zbog čega ih mnoge države potpuno izbacuju iz upotrebe [2].

Ovisno o temperaturi, tekući kristal ima 3 faze: krutu (kristal), anizotropnu tekuću fazu i izotropnu tekuću fazu. Razlog mijenjanja strukture kristala zagrijavanjem je slobodno kretanje centra mase kristala.

Po načinu dobivanja, kristale dijelimo na termotropne, enantiotropne, monotropne i liotropne [2]. Termotropni tekući kristali nastaju hlađenjem tekućine ili povećavanjem krutine, a liotropni dovođenjem tvari u kontakt s vodom ili organskim otapalom.

Termotropni dobiveni tekući kristali dijele se na nematske, kolesterične i smektične. Razlika u njihovoj strukturi molekula prikazana je na **Slici 3**.

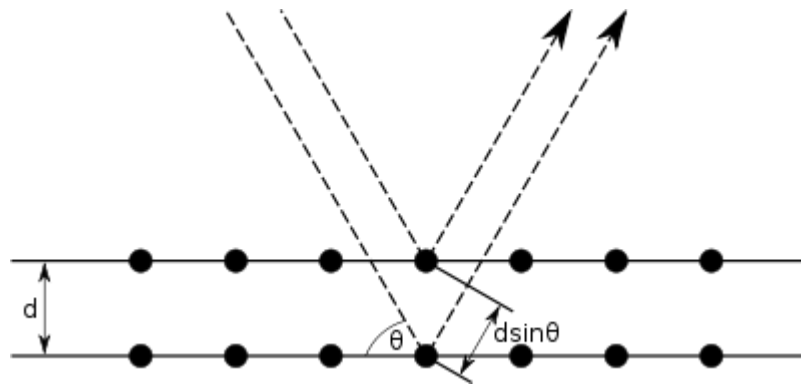


Slika 3. Faze tekućeg kristala

Nematski tekući kristal jedna je od najčešćih faza, a potječe od grčkog *nema*, što znači nit, a odnosi se na raspored molekula kristala usmjeren u jednom pravcu (N). Molekule se same pozicioniraju kako bi njihova os bila otprilike paralelna s obzirom na ostale. To im omogućuje slobodno kretanje jer su im težišta nasumično raspoređena poput molekula u tekućini. Većina ovakvih molekula ima jednu dulju dominantnu os. Nematski kristal tečan je poput svake izotropne tekućine, a može im se promijeniti orijentacija uz pomoć djelovanja magnetskog ili električnog polja [2].

Nematski kristali najdominantnija su vrsta kristala u proizvodnji LCD ekrana zbog dobrih optičkih svojstava i svog duguljastog oblika [5].

Kolesterična faza naziva se još i uvijeni nematski kristal, a od njih se razlikuju spiralnom strukturom s pravcem koji rotira duž vertikalne osi. Molekule ove faze imaju kiralni centar i asimetrični raspored, pa imaju i treće ime – kiralni nematični kristali. Smjer rotacije osi spirale određen je karakteristikama kiralnih radikala. Duljina jednog perioda spiralne strukture naziva se *pitch*, a ovisi o promjeni temperature ili broja molekula. U nekim vrstama tekućih kristala, pitch odgovara valnoj duljini vidljive svjetlosti te uzrokuje određene optičke pojave poput laserske emisije i Braggove refleksije na **Slici 4** [3].



Slika 4. Braggova refleksija

Jedno od specifičnih svojstava kolesteričnih tekućih kristala je refleksija kružno polarizirane svjetlosti kada ona upada na spiralnu os kristala, te refleksija eliptično polarizirane svjetlosti ako ona pada na istu os ukoso [5].

Smektički kristali, nazvani po grčkoj riječi za sapun, organizirani su u slojeve koji međusobno klize jedan preko drugoga. Molekule su smještene tako da su im osi međusobno paralelne. Unutar smektičke faze postoje mnoge druge faze poput A faze, čije su molekule orijentirane paralelno uz sloj, te C faze čije su molekule blago nagnute od sloja koji čine. Centar mase molekula A sloja je slobodan, a smjer osi je blago nagnut prema vertikalnom stanju sloja. Takve faze u slojevima tekućih kristala imaju svojstva i karakteristike tekućine [5].

Molekule tekućih kristala u svim smektičkim slojevima okomite su na njihove duge osi te imaju spontane dipol-momente čije je usmjerenje paralelno s tankim slojem, a karakteriziraju ga feroelektrične pojave.

LCD tehnologija koristi polarizaciju kako bi uštedjela na potrošnji energije. Pritom su polarizatori pod kutom od 90° s obzirom na ostale, vidljivo na **Slici 5**. Promjena kuta rezultirala bi mutnom ili crnom slikom. Oni također propuštaju i usmjeravaju postojeću svjetlost, a ne uključuju ili isključuju izvor svjetlosti zaslona [5].



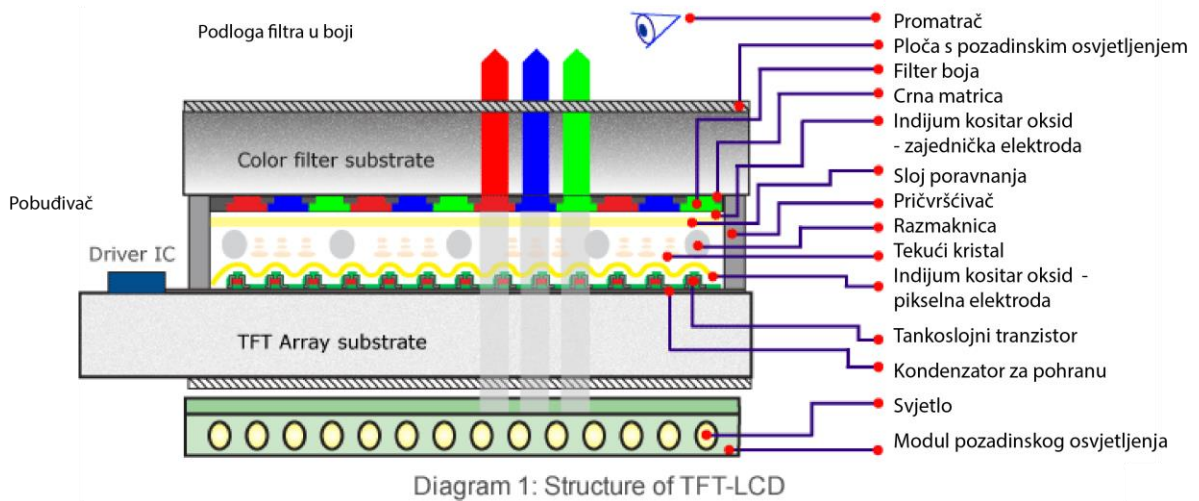
Slika 5. Dekonstruirani LCD monitor s polarizatorima

Polarizatori su inicijalno bili sastavljeni od mikroskopskih herafatitskih kristala. Danas se rade od polivinilne plastike na bazi alkohola s dodatkom joda. Funkcija polarizatora nije samo usmjeravanje svjetlosti koja je u ravnini sa njime, već i reflektiranje svjetlosti svih ostalih usmjerenja [1].

2.1.3. TFT LCD

TFT (*thin-film transistor*) LCD je tehnologija zaslona tekućih kristala koja implementira tranzistore s efektom polja. Takvi tranzistori građeni su od tankih slojeva posloženih na staklenoj podlozi, prikazano na **Slici 6**, a ista tehnologija koristi se pri izradi mikroprocesora. Tranzistori upravljaju pojedinačno svakim pikselom na zaslonu na način da postavljaju jačinu električnog polja u trima kondenzatorima tekućih kristala (RGB – po jedan za crvenu, zelenu i plavu vrstu piksela). Na taj način kontroliraju polarizaciju kristala, što automatski kontrolira količinu svjetlosti koja dopire do određenog filtera za boju u pozadini [3].

Često se naziva i tehnologijom aktivne matrice, budući da može vrlo brzo i izravno upravljati svakim pojedinačnim pikselom uz odlično vrijeme odaziva [2].



TFT niz supstrata

Slika 6. Konstrukcija TFT LCD zaslona

Na manjim ekranima dovođenje napona do određenih dijelova zaslona i zasebnih piksela u prošlosti nije predstavljalo problem. Međutim, porastom veličine ekrana i površine LCD zaslona, pripajanje svakog piksela pojedinačno na izvor napona bilo bi iznimno nepraktično, skupo i zamršeno zbog broja veza koje bi to zahtijevalo. Primjenom tehnologije tankih tranzistora, pikseli složeni u pravilne redove i stupce spajaju se s odgovarajućim tranzistorom. Time se onemogućava nepotrebno pražnjenje naboja piksela u razdoblju između ažuriranja slike na zaslonu, a svaki piksel funkcionira kao minijaturni kondenzator s izolacijskim slojem tekućeg kristala smještenim između prozirnih vodljivih slojeva indij kositrovog oksida [3].

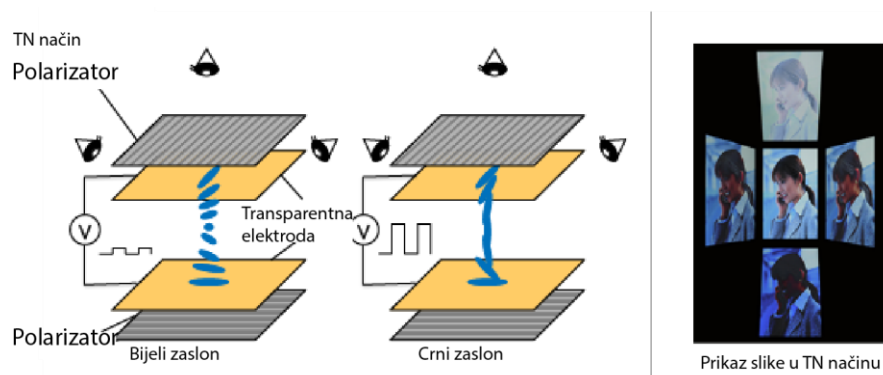
Tranzistori su izrađeni od tankog filma amorfno silikona nanesenog na površinu staklenog panela kemijskim taloženjem. Oni zauzimaju tek mali dio područja na kojem se piksel nalazi kako bi svjetlost mogla proći neometano.

TFT LCD komercijalno se predstavlja kao zaslon tekućeg kristala poboljšane kvalitete boje, kontrasta i prikaza crne boje. Dva najpoznatija tipa TFT zaslona su TN i IPS zasloni [2].

TN

Uvijeni nematski tekući kristal ili TN (*twisted nematic*) najčešća je vrsta TFT LCD zaslona koja se koristi za svakodnevnu uporabu prosječnih korisnika. Karakterizira ga relativno brzo vrijeme odaziva i korištenje 6 bitova po jednoj RGB boji. Budući da grafičke kartice u modernim uređajima imaju mogućnost prikaza 24-bitnih boja umjesto samo 18 bitova koliko ih ukupno nudi TN, miješanjem susjednih dodirujućih piksela interpolirane su 24-bitne boje. Osim te metode, moguće je postići nove nijanse boja metodom FRC (*Frame Rate Control*) pri čemu se svakim kadrom izmjenjuju različite nijanse kako bi se simulirala 'nova' boja ljudskom oku. Međutim, u nemalom broju slučajeva ta se metoda pokazala nadražujućom i zamornom za vid promatrača [2].

Neizbježni nedostaci ove tehnologije uključuju ograničeni kut gledanja zaslona koji za posljedicu ima neočekivana odstupanja u bojama i kvaliteti slike, kao što je prikazano na **Slici 7**.

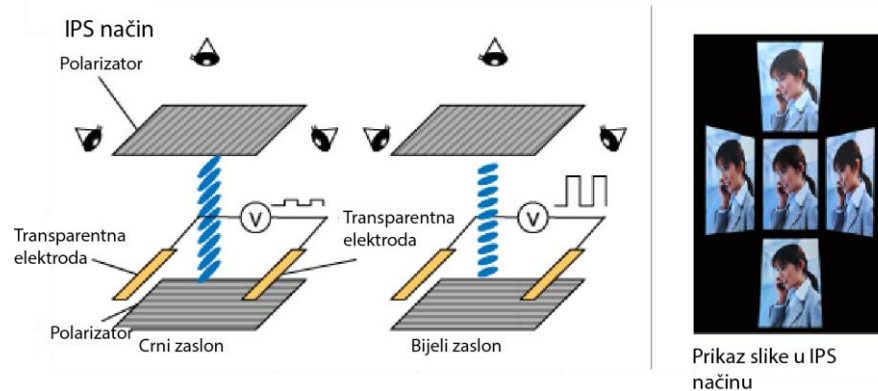


Slika 7. Utjecaj kuta gledanja na reprodukciju TN zaslona

2.1.4. IPS

IPS (*in-plane switching*) je tehnologija koja primjenjuje prostornu organizaciju i promjenu orijentacije molekula tekućih kristala koji se nalaze između staklenih podloga. Osmišljena je kako bi se poboljšala svojstva postojećih uvijenih nematičkih LCD zaslona koji su od svojih početaka 1980. postali standard za LCD zaslone. Za razliku od njih, IPS zasloni pružaju mnogo veći kut gledanja i veću kvalitetu reprodukcije boja, što se postiže prilagodbom individualnih piksela kako bi stajali paralelno umjesto okomito u odnosu na ploču [3].

Većina tzv. *high-end* mobilnih uređaja sa LCD zaslonom na dodir koristi IPS tehnologiju, upravo zbog poboljšanog kuta gledanja, prikazano na **Slici 8**. Posebno je važno naglasiti kvalitetnu reprodukciju boja na IPS zaslonima zbog koje se ovaj tip ekrana često koristi na elektronskim uređajima korištenima u industrijama poput grafičkog dizajna za koje je vizualna preciznost od iznimne važnosti [2].



Slika 8. Neovisnost kuta gledanja o kvaliteti IPS zaslona

2.1.5. Primjena

Uobičajene komponente od kojih se sastoji standardni LCD zaslon su sloj tekućih kristala između dva staklena panela s elektrodama, a sve skupa stoji između dva polarizatora, kao što je prikazano na Slici 7. Uvijena faza TN kristala preusmjerava svjetlost nakon što ona prođe kroz prvi polarizator te tako dopušta njen prolazak kroz drugi polarizator, postavljen pod kutem od 90° s obzirom na prvi. Tako se slika sa zaslona reflektira na zadnjem sloju koji se nalazi iza polarizatora. Kada bi se na uređaj primijenio električni napon, uvijeni nematički kristali počeli bi se odmotavati u središtu i time prestali preusmjeravati svjetlost. Time bi se svjetlost s prvog polarizatora apsorbirala na drugom polarizatoru, umjesto da se transmitira kao u prvom slučaju gdje nije bilo utjecaja električnog polja. Rezultat bi bila pojava svjetla na zaslonu. Na isti način odvija se prikaz svih boja RGB sustava [2].

Kod proučavanja i obrade slika širom čitavog elektromagnetskog spektra, primjenjuju se i elektrooptički uređaji poput filtera tekućih kristala. Oni elektronički upravljaju tekućim kristalima kako bi propustili ili apsorbirali svjetlost određenih valnih duljina. Ova tehnologija primjenjuje se u različitim znanstvenim područjima, od pregleda vida i

prehrambenih proizvoda do mineralogije, a većina ju poistovjećuje sa sustavima za nadzor i IR kamerama [2].

Tekući kristali poput termotropskih kiralnih, čija molekularna struktura i boja ovise o temperaturi okoline, imaju široku primjenu pri mjerenju topline pa se koriste u termometrima raznih vrsta. Također se koriste za mapiranje izvora topline i protoka povišene temperature [3].

Leće tekućih kristala eksperimentalno se koriste za ispravljanje vidne miopije. Ključno je njihovo preoblikovanje pravocrtne valne fronte u parabolu, a fokus leće može se prilagoditi utjecanjem na vanjsko električno polje.

Jednu od praktičnijih, jednostavnijih primjena ima polimerno dispergirani tekući kristal koji se u obliku presvlaka i navlaka može koristiti kao tzv. *Smart film* – sloj koji se uz pomoć adhezivne podloge nanosi na prozore i prilagođava po želji kupca.

Daleko najveću primjenu LCD tehnologija pronašla je u razvoju pametnih telefona sa zaslonima osjetljivima na dodir, ali mnogo prije pojave *touchscreen* ekrana LCD tehnologija korištena je u uređaju koji se danas smatra prvim pametnim telefonom. Davne 1994. IBM Simon, *smartphone* dimenzijama sličan cigli imao je maleni monokromatski LCD zaslon. Nekoliko desetljeća kasnije, pametni mobilni uređaji i LCD paneli razvijali su se praktički usporedno jedno uz drugo te su postali nerazdvojni i neizbježni u svakodnevnoj uporabi [3].

2.2. AMOLED

Tehnologija aktivne matrice s elektroluminiscentnim diodama (eng. Active Matrix Organic Light Emitting Diode ili AMOLED) tip je zaslona sa pojedinačnim osvjetljenjem svakog piksela koje čine organski elementi, a osvjetljavaju se prolaskom struje. Sastavni je dio zaslona u pametnim telefonima, ostalim mobilnim uređajima, prijenosnim računalima i televizorima. Za razliku od tehnologije pasivne matrice, aktivna matrica ima upravljački program s kondenzatorom za pohranu [7].

2.2.1. Povijest

Tehnologija aktivne matrice u širokoj komercijalnoj upotrebi je od 2008. godine, a zapažanja i pokusi na elektroluminescenciji započeli su još u pedesetim godinama prošlog stoljeća. Znanstvenici na francuskom Nancy-Université primijenili su visoki izmjenični napon zraka na materijale poput akridin oranža na celofanskom filmu. Nastala reakcija bilo je pobuda obojenih molekula i elektrona [7].

U šezdesetim godinama, Martin Pope je na njujorškom sveučilištu zajedno s kolegama razvio vezu elektroda i organskih kristala te opisao uvjete za umetanje naboja te količinu energije potrebne za kontakt elektroda. Na njegovim pretpostavkama i rezultatima istraživanja temelji se moderna OLED tehnologija. Također je istražio istosmjernu strunu elektroluminescencije u vakuumu na kristalu antracena i tetracene (1963.).

Dvije godine kasnije, 1965., kanadski znanstvenici W. Helfrich i W. G. Schneider metodom dvostruke injekcije elektrodama dobivaju rekombinaciju elektroluminescencije na antracenovom kristalu, preteču modernih uređaja dvostrukog umetanja elektronskog naboja [8].

Razvoj OLED (Organic Light Emitting Diode) tehnologije u praksi počeo je 1987., a tvorci elektroluminiscentnih dioda bili su kemičari Ching W. Tang i Steven Van Slyke, istraživači u tvrtki Eastman Kodak. Oba izumitelja 2001. godine nagrađena su za svoje otkriće. Radi se o uređajima dvostrukoga sloja prijenosa elektrona, pri čemu se rekombinacija i emisija svjetlosti odvijala u centru organskog sloja. Time se smanjuje radni napon i postiže bolja efikasnost uređaja.

1990. se postiže značajan napredak: sa molekularnih se prelazi na makromolekularne materijale istraživanjem dugoročne stabilnosti organskih filmova i polifenilen vinila. Daljnjim istraživanjima razvijaju se višeslojni polimeri, a usporedno s njima i novo polje plastike u elektronici te ubrzan razvoj OLED proizvoda.

Kodak je patentirao nekoliko prvih uređaja koji su implementirali ovu tehnologiju na svojim ekranima, uključujući digitalnu kameru sa 2.2-inčnim zaslonom rezolucije 512x218 piksela koja je puštena u prodaju 2003 [9].

2.2.2. Princip rada

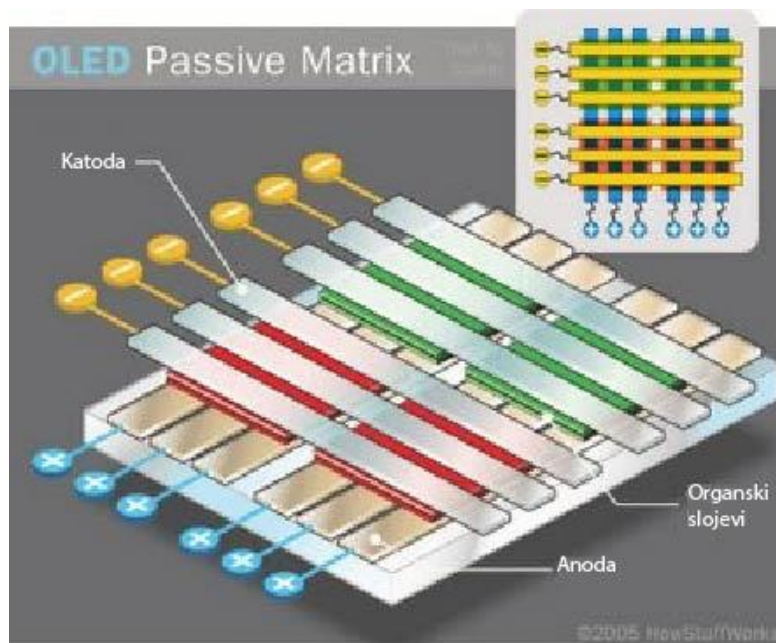
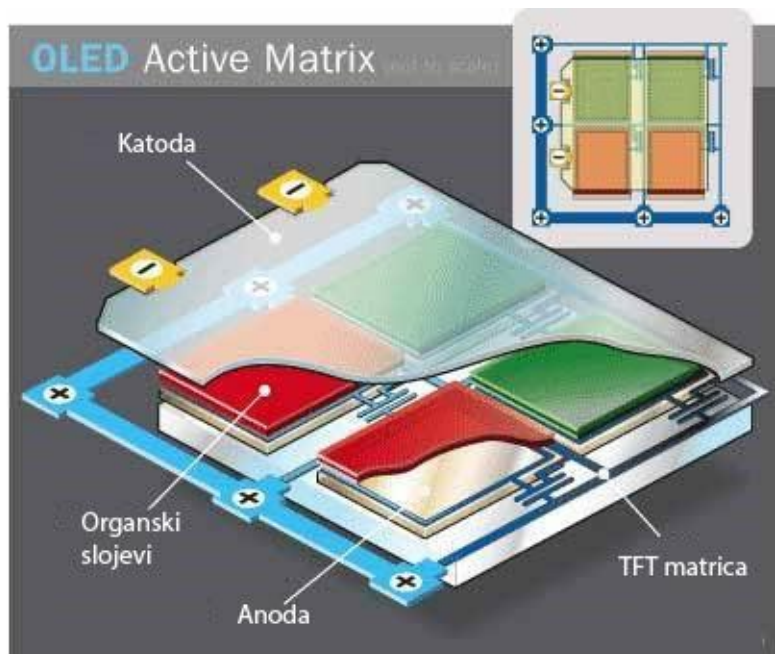
Organske laserske diode sadrže emisijski elektroluminiscentni sloj organskih spojeva koji emitira svjetlost kao odgovor na električnu struju. Sloj se nalazi između dvije elektrode od kojih je barem jedna prozirna [7].

Tehnologija organskih laserskih dioda može se podijeliti na dvije vrste: pasivnu matricu (Passive Matrix ili PMOLED) i aktivnu matricu (AMOLED). Dvije vrste razlikuju se najviše po upravljačkoj elektronici koja ih definira, a nalaze se na **Slici 9**.

Pasivna matrica služi se jednostavnim sustavom upravljanja pri čemu se istodobno kontrolira rad pojedinog reda ili stupca u polju organskih dioda koje čine piksele. Takva vrsta elektroluminiscentnih dioda ne sadrži kondenzator za pohranu, pa su pikseli u pojedinim redovima pretežno isključeni te zahtijevaju više energije za osvjetljenje. Tehnologija pasivne matrice vrlo je jednostavna i povoljna u proizvodnji. Međutim, prilično je neučinkovita i smanjenog životnog vijeka s obzirom na znatno veću potrošnju energije. Također, zbog velike količine utrošene energije ograničena je na određene veličine zaslona, a najčešći su do 3 inča. Tako je pasivna matrica primjenu našla u manjim uređajima poput MP3 playera i ostalih džepnih uređaja [10].

Aktivna matrica vrsta je OLED zaslona koju pokreće TFT (transistor tankog filma) koji, za razliku od pasivne matrice, sadrži kondenzator za pohranu. Kondenzator održava početna stanja pojedinačnih piksela te omogućava mnogo veću slobodu u pogledu veličine ekrana i njegove rezolucije pri proizvodnji. Mane aktivne matrice su složeniji proizvodni proces i cijena proizvodnje. Bez obzira na to, AMOLED zasloni u širokoj su upotrebi te se procjenjuje da je u 2018. godini proizvedeno 500 milijuna ekrana. Dominantna je

tehnologija i u proizvodnji pametnih telefona – 2014. godine samo 21 model pametnih telefona imao je zaslon temeljen na tehnologiji aktivne matrice elektroluminiscentnih dioda, a danas je vodeća u mobilnoj industriji [10].

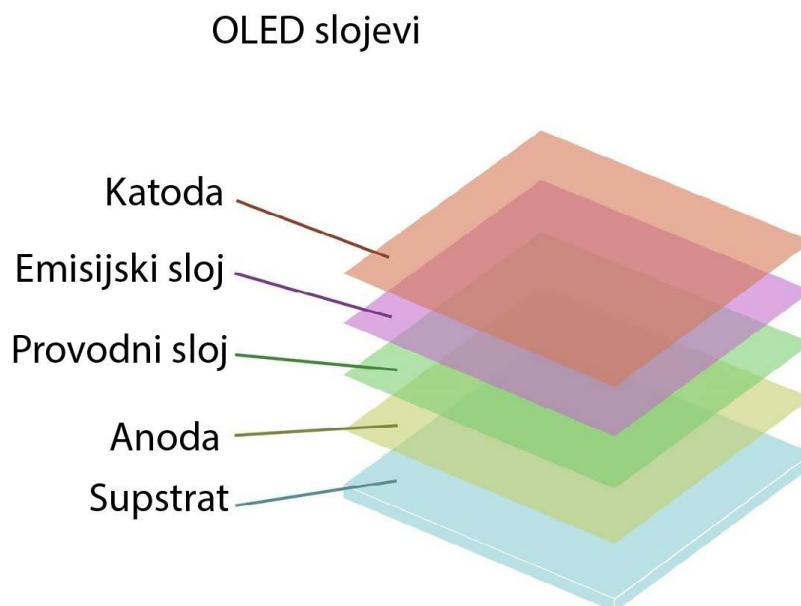


Slika 9. Struktura aktivne i pasivne OLED matrice

Elektrode spojene na diodu okružuju organski sloj, a organske molekule u sloju vodljive su zbog delokalizacije pi elektrona. Koriste se materijali koji se nazivaju organskim poluvodičima, a njihova najviša popunjena i najniža nepopunjena atomska orbitala analogna je valenciji i vodljivosti anorganskih poluvodiča [9].

Dodavanjem više slojeva na početnu konstrukciju organske laserske diode koja je bila jednoslojna poboljšala se učinkovitost rada diode. Većina modernih OLED uređaja koristi dva sloja – vodljivi i emisijski sloj.

Anoda, nositelj pozitivnog naboja, prima naboj koji potječe iz negativno nabijene katode te elektroni putuju u tom smjeru nakon što su umetnuti u organski sloj uređaja. Strujanje elektrona odvija se sve dok se oni ne upare s pozitivno nabijenim česticama pri čemu tvore eksiton. Spajanje u eksiton odvija se u blizini emisijskog spoja, a raspad te čestice uzrokuje otpuštanje energetske razine elektrona i spektralno zračenje u vidljivom dijelu spektra [9]. Frekvencija zračenja ovisna je o razlici energija na katodi i anodi. Presjek sastava OLED matrice prikazan je na **Slici 10**.



Slika 10. Presjek strukture OLED slojeva

Ekperimentalno je dokazano kako svojstva anode i njezinog sloja znatno utječu na učinkovitost i trajanje organske laserske diode. Prema tome, svaka nepravilnost na njezinoj površini smanjuje adheziju za organski sloj, povećava otpor i pridonosi stvaranju neemitivnih tamnih mrlja na materijalu koji čini organsku diodu te tako skraćuje vijek trajanja diode. Moguća poboljšanja u vidu materijala anode su upotreba kristalnog supstrata safira ojačanoga zlatnim filmom, što bi smanjilo radni napon i otpor [11].

Materijali

Prve inačice OLED tehnologije koristile su manje molekule poput helata ($\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{NO})_3$), fluorescentnih i fosforescentnih bojila te dendrimera [11].

Uređaji i zaslone sastavljeni od malih molekula materijala OLED tipa proizvode se termalnom evaporacijom u vakuumu. Premda skupa, ova metoda dobivanja organskih dioda omogućuje dobivanje precizno kontroliranih i homogenih filmova te složene višeslojne strukture, a omogućuje i visoku fleksibilnost pri dizajniranju slojeva [11].

Polimerne laserske diode ili PLED (Polymer light-emitting diodes) građene su od elektroluminiscentnog vodljivog polimera koji pri spajanju na vanjski izvor emitira svjetlost. Koriste se kao tanki sloj za zaslone u punom spektru boja, učinkoviti su i ne zahtijevaju puno električne energije s obzirom na količinu proizvedenog svjetla.

Za razliku od malih molekula, proizvode se u otopini te oslojavaju u tanke slojeve filma. Takva metoda prikladnija je za velike površine filmova od termalne evaporacije, a postoji inačica preuzeta iz grafičke tehnike ink-jet tiska kojom se mlaznicama nanosi film u obliku aerosola i tako oslojava površinu. Ipak, tom metodom teško je dobiti višeslojne strukture.

Uobičajeni polimeri korišteni za proizvodnju organskih dioda derivati su polifenilen vinila i polifluorena. O lančanoj strukturi polimera ovisi boja emitirane svjetlosti te stabilnost materijala i jednostavnost proizvodnog procesa [12].

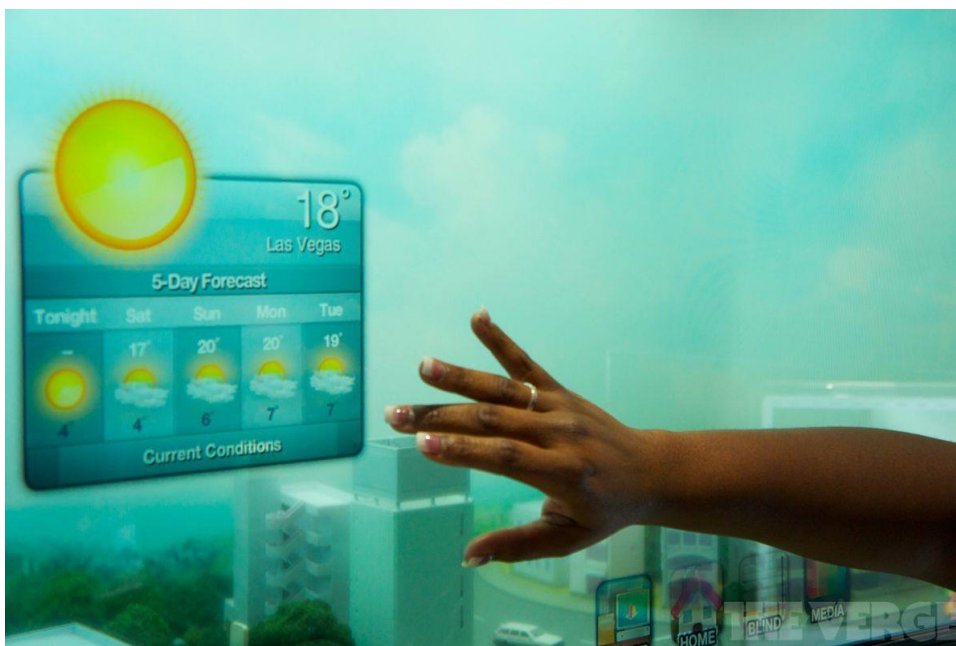
Fosforescentni materijali imaju jedinstveno karakteristično svojstvo elektrofosforescencije čime vrše pretvorbu električne energije u organskim laserskim diodama u svjetlost sa gotovo stopostotnim koeficijentom korisnosti, tj. omjerom utrošene i dobivene energije.

Najčešći fosforescentni materijal korišten za podlogu u organometalnom spoju je polivinil karbazol, a mogu ga zamijeniti i kompleksni spojevi iridija, kao i platine. Korištenjem takvih materijala, eksitoni u dvostrukom ili trostrukom sastavu (tripleti) radioaktivno se raspadaju te poboljšavaju kvantnu učinkovitost uređaja s obzirom na prijašnje tehnologije koje su imale koristi samo od raspada jednostrukog eksitona [11].

2.2.3. Vrste

Strukturalno, OLED zaslon može se podijeliti na nekoliko vrsta. Zaslone s gornjom ili donjom emisijom odnose se na smjer izlaska emitirane svjetlosti iz uređaja. Ako svjetlost prolazi kroz (prozirnu) donju elektrodu i supstrat (materijal), radi se o donjoj emisiji. Gornja emisija označava uređaje koji emitiraju svjetlost kroz poklopac dodan na uređaj pri završetku proizvodnje. Takva emisija bolje odgovara AMOLED zaslonima, budući da se lakše kombiniraju s neprozirnom poleđinom tranzistora. TFT panel pričvršćen za većinu AMOLED zaslona u pravilu je neproziran te bi u slučaju donje emisije onemogućavao prolazak transmitirane svjetlosti [12].

Prozirne svjetleće diode koriste transparentne spojeve na obje strane uređaja kako bi nastali zaslon mogao emitirati svjetlost s gornje i donje strane. Ovakva vrsta zaslona naziva se TOLED (*Transparent Organic Light Emitting Diode*), a karakterizira ga poboljšani kontrast i bolja vidljivost na danjem svjetlu. Nerijetko se upotrebljava za tzv. pametne prozore prikazane na **Slici 11** i AU (*Augmented Reality*) videouređaje [12].



Slika 11. Samsungova inačica pametnog prozora

Stupnjeviti OLED zasloni funkcioniraju na principu postupnog smanjivanja omjera elektronskih otvora i kemikalija koje prenose elektrone. Na ovaj način postiže se dvostruko veća kvantna učinkovitost postojećih tehnologija zaslona [12].

Stacked OLED nazvan je po specifičnoj građi koja se temelji na naslagivanju (eng. *stacking*) crvenih, zelenih i plavih podpiksela jedan na drugi, za razliku od klasičnog organiziranja jedan pored drugoga. Ovakav pristup dizajniranju zaslona dovodi do porasta u gamutu i percipiranoj dubini boja.

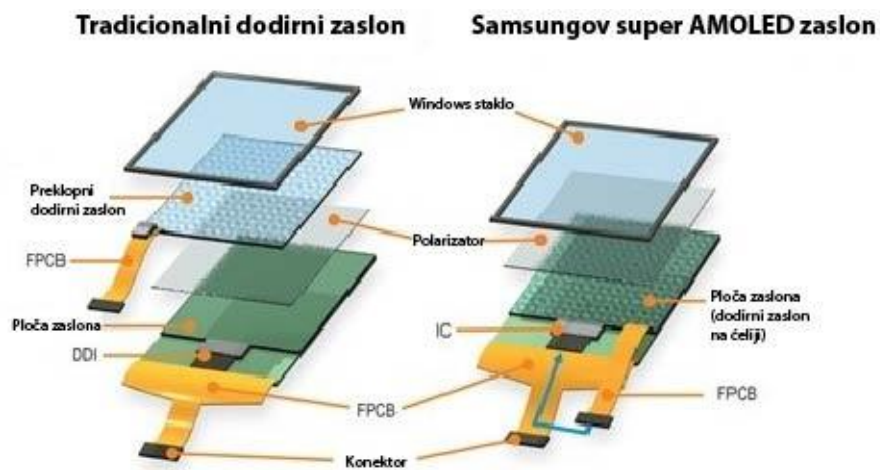
Inverzna tehnologija svjetlećih diode podrazumijeva spajanje katode umjesto anode na supstrat, a time i TFT panel. Primjenjuje se kod materijala poput amorfnog silikona, najčešće u AMOLED vrsti zaslona [11].

2.2.4. Primjena

Tehnologija organskih svjetlećih dioda ima široku komercijalnu primjenu u gotovo svakoj vrsti elektroničkih uređaja i pomagala, od manjih džepnih uređaja poput mobitela, digitalnih kamera i audio playera. Niskom potrošnjom energije i dobrom vidljivosti na danjem svjetlu konkuriraju ostalim vrstama zaslona, a problem niskog vijeka trajanja organskih dioda ne zamjećuje se pri povremenoj ili isprekidanoj upotrebi [11].

Prijenosni uređaji mnogo češće se proizvode sa zaslonom koji koristi tehnologiju aktivne matrice, za razliku od pasivne. Razlog tome je mnogo veća responzivnost, ključan faktor u dizajniranju pametnih mobitela i tablet. Istovremeno su štedljiviji pri potrošnji električne struje potrebne za njihov rad [11].

Problem slabije vidljivosti na direktnom Sunčevom svjetlu tvrtka Samsung riješila je razvojem Super AMOLED tehnologije 2010. godine. Riječ je o smanjenju praznog prostora među slojevima zaslona, prikazan na **Slici 12**. Otprilike u to vrijeme veći su mobilni giganti prihvatili i implementirali OLED tehnologiju za proizvodnju zaslona pametnih mobitela. Neki od njih uključuju Huawei, HTC, Nokiu, LG [19].



Slika 12. AMOLED zaslon na lijevoj strani i Super AMOLED na desnoj

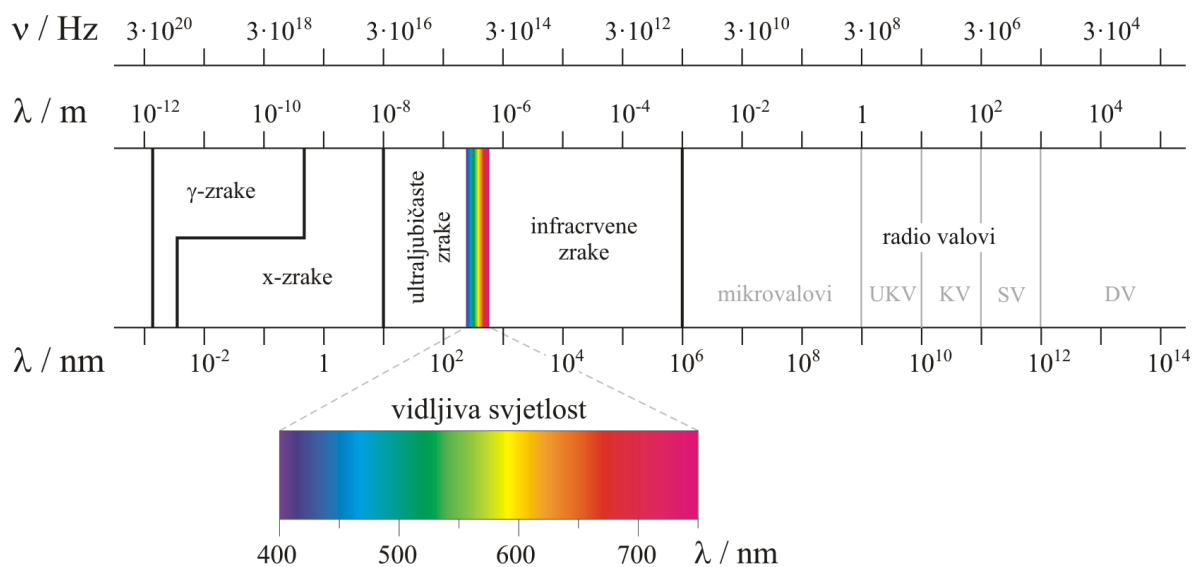
Organske diode za razliku od LCD ekrana ne moraju koristiti pozadinsko osvjetljenje, što im daje značajnu prednost u smislu štednje energije i funkcionalnosti dizajna zbog tanje površine. Međutim, kako bi se dobila što veća rezolucija, najčešće na uređajima poput televizije ili računalnih monitora, potrebno je koristiti TFT panel, što ograničava veličinu zaslona [19].

Najnovije postignuće u tehnologiji organskih zaslona Samsungov je fleksibilni pametni telefon, čiji je prototip predstavljen u veljači 2019. godine [19]. U proizvodnji je kao supstrat korišten transparentni polimer, čime se eliminira potreba za staklenim zaslonom osjetljivim na udarce i ogrebotine. Istovremeno, gubi se potreba za metalnim kućištem te se

nekoliko dotada odvojenih slojeva integrira u jedan sloj. Razumno je u skorije vrijeme očekivati početak masovne proizvodnje i komercijalne primjene ovakvih izdržljivih i savitljivih uređaja [19].

2.3. KOLORIMETRIJA

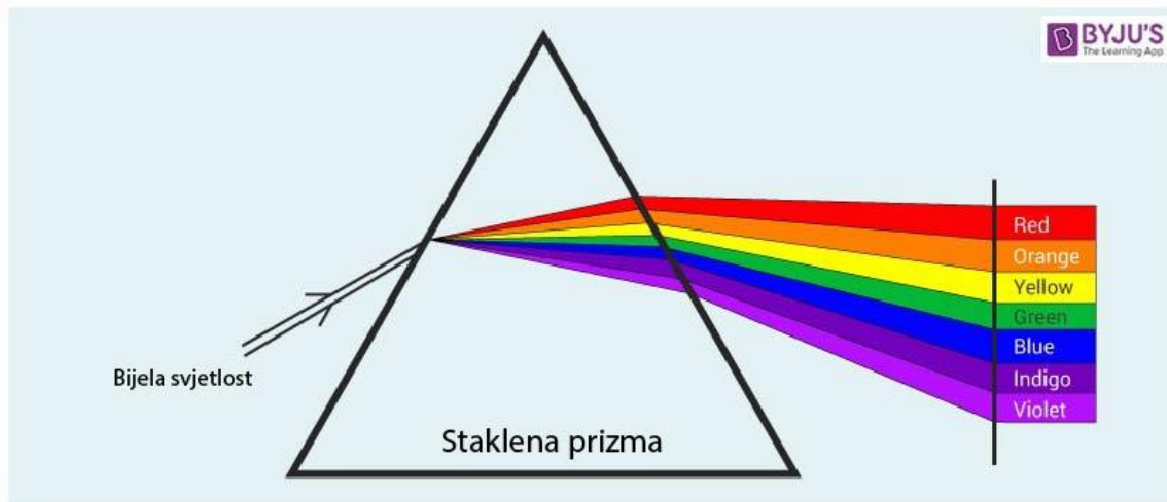
Kolorimetrija je znanost nastala iz potrebe za objektivnim načinom uspoređivanja boja te kontroli reprodukcije, a bavi se bročanim određivanjem boje s obzirom na vizualni podražaj. Uz pomoć kolorimetrijskih vrijednosti, određuje se tolerancija za reprodukciju boja u tisku te se vrši kontrola faza procesa te kalibracija izlaznih/ulaznih uređaja [14]. Doživljaj boje ovisi o tri faktora, a to su izvor svjetla, promatrani objekt i promatrač. Izvor vidljivog svjetla može zračiti valnom duljinom od 350 do 780 nanometara, a prikaz spektra zračenja valova različitih frekvencija i valnih duljina prikazan je na **Slici 13** iz koje se mogu očitati vrijednosti za zračenje radiovalova, radarskih valova, mikrovalova, infracrvenog dijela spektra, vidljivog dijela, ultraljubičastih zraka, x-zraka, gama zraka te kozmičkih fotona [14].



Slika 13. Elektromagnetski spektar zračenja

Vidljiva svjetlost sa svim svojim vrijednostima dobiva se rasipanjem (disperzijom) bijelog svjetla (npr. lomom kroz staklenu prizmu, **Slika 14**). Svaka od dobivenih boja ima vlastitu frekvenciju vala. Kut devijacije prizme definira se kao kut koji zatvara upadna zraka

svjetlosti koja pada na prizmu te izlazne zrake svjetlosti koja se transmitira i lomi na izlazu iz prizme. Izračunom kuta devijacije za zrake svjetlosti poznatih valnih duljina dolazi se do zaključka kako dijelovi vidljivog spektra kraćih valnih duljina imaju veće odstupanje od početnog kuta upada [14].



Slika 14. Lom svjetlosti na prizmi

Pri upadu zrake svjetlosti na površinu tj. materijal određene optičke gustoće, upadna zraka se reflektira, apsorbira i transmitira [13]. Transmisija je omjer upadne zrake svjetlosti i transmitirane, lomljene zrake svjetlosti koja prolaskom kroz neko sredstvo mijenja valnu duljinu, ali ne i frekvenciju. Refleksija je omjer zrcalno reflektirane zrake svjetlosti s obzirom na početnu, upadnu svjetlost, a kut refleksije pri prolasku svjetlosti iz vakuuma (indeks loma 1) u neko optički gušće tijelo (indeksa loma većeg od 1) jednak je upadnom kutu zrake svjetlosti. Apsorpcija podrazumijeva količinu svjetlosti koje je tijelo apsorbiralo s obzirom na upadnu svjetlost, pri čemu faktor apsorpcije (omjer upadne i apsorbirane zrake) nikad nije veći od 1, a jedino crna tijela imaju karakteristični faktor apsorpcije $\epsilon=1$. Crna tijela su specifična užarena kruta tijela koja zrače toplinu svih poznatih valnih duljina (duž cijelog spektra gustoće zračenja) [13].

2.3.1. Karakteristike boje

Temeljna perceptualna svojstva fizičkog stimulusa boje su ton (hue), zasićenje (saturation) i svjetlina (*brightness*) [14].

Kolorimetrijske vrijednosti mjere se:

- **denzitometrom** – uređaj koji mjeri faktor refleksije/transmisije uređaja,
- **kolorimetrom** – uređaj koji mjeri tristimulusne vrijednosti boja,
- **spektrofotometrom** – uređaj koji mjeri promjene u refleksiji/transmisiji/zračenju duž vidljivog dijela spektra.

Kolorimetar mjeri vrijednosti boja na način sličan ljudskom doživljaju boja, pa je najprikladniji za ispitivanja u ovom radu. Mjerenje je temeljeno na komparaciji ispitivane boje i boje dobivene u kolorimetru, aditivnom sintezom tj. miješanjem boja. Dobivene vrijednosti prikazuju se u nekom od CIE prostora boja.

Također je moguće izračunavanje ΔE razlike boja temeljene na varijacijama u svjetlini, tonu i kromatičnosti.

Kolorimetar je ograničen na jedan standardni izvor svjetla pri usporedbi dvaju ili više različitih uzoraka. Nije moguće provjeriti (usporediti) brojčane vrijednosti prikaza boja na uređajima pod različitim izvorima svjetla [14].

2.3.2. Doživljaj boje

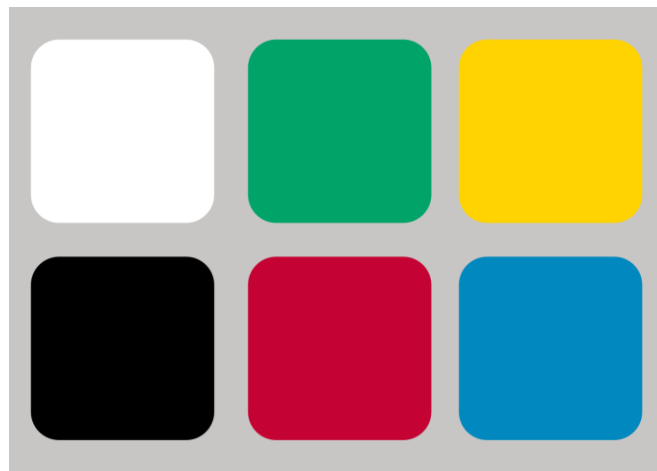
YOUNG-HELMHOLTZOVA TEORIJA

Young-Helmholtzova teorija, poznata i kao trikromatska teorija, nastala je 1802. kada je Thomas Young definirao tri tipa fotoreceptora (čunjića) u ljudskom oku. Svakoj vrsti fotoreceptora pripisao je osjetljivost na određeni raspon vidljive svjetlosti. Njegovu teoriju detaljnije je razradio Hermann von Helmholtz 1850. godine te podijelio tri vrste čunjića na kratkovalne (ljubičastoplave), srednjevalne (zelene) te dugovalne (crvene), s obzirom na

valnu duljinu svjetlosti na koju reagiraju. Premda eksperimentalno dokazana, Young-Helmholtzova teorija ne razlikuje neke slične tonove boja različitih svjetlina te ne uzima u obzir defektno viđenje boje. [13]

HERINGOVA TEORIJA

Ewald Hering 1892. predlaže teoriju suprotnih boja koja objašnjava interpretaciju boja kroz čovjekov osjetilni sustav receptorima u obliku čunjića. Prema Heringovoj teoriji, svaka boja poznata ljudskom oku može nastati iz crvene, žute, zelene i plave boje koje su poredane tako da čine komplementarne, suprotne parove. Tri suprotna procesa doživljaja boje stvaraju tri para suprotnih boja: crvena-zelena, plava-žuta i crna-bijela, kao što je prikazano na **Slici 15**. Zadnji suprotni par (crna-bijela) je akromatski i određuje varijaciju u količini osvjetljenja [13].



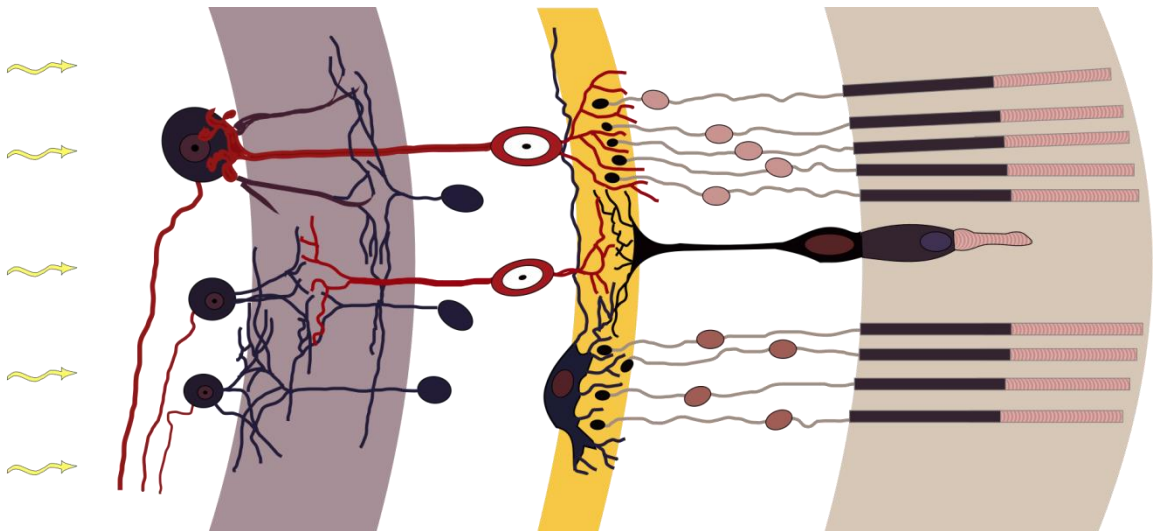
Slika 15. Suprotne boje prema Heringovoj teoriji

Teorija suprotnih boja objašnjava pojavu disimilacije i asimilacije. Dobar primjer navedenih pojava su dugotrajno gledanje u npr. svijetlu nijansu crvene boje. Naglim skretanjem pogleda na neku drugu, akromatsku površinu nastat će privid svijetle zelene boje. Nakon nekog vremena oko će se postupno asimilirati te zelena boja nestaje. Međutim, ovom teorijom nisu objašnjene sve pojave dikromatskog deficita ili sljepoće na određene boje [13].

TEORIJA SUPROTNIH PROCESA

Danas se teorija doživljaja boje ljudskim okom objašnjava teorijom suprotnih procesa ili zonskom teorijom. Nastala je ujedinjavanjem elemenata Heringove i Young-Helmholtzove teorije. Receptori učinkovitije prepoznaju boje na temelju njihovih međusobnih razlika u osjetljivosti na podražaj svjetlosti nego na temelju stvarnih osjetilnih podražaja svake od tri pojedine vrste čunjića, što je objašnjeno činjenicom kako se područja osjetljivosti na određene valne duljine triju vrsta čunjića djelomično preklapaju. Pritom svaka vrsta fotoreceptora ima određeni maksimum valne duljine spektra zračenja na koji reagira [13].

Osim čunjića, između fotoreceptora i stanica ganglija nalaze se bipolarne štapičaste stanice koje prenose informaciju s fotoreceptorskih čunjića na ganglij. Ganglij se sastoji od dviju vrsta stanica koje imaju ulogu prepoznavanja razlika u nijansama crvene i zelene te plave i žute boje, a također prikupljaju informacije o intenzitetu upadne svjetlosti s mrežnice oka.

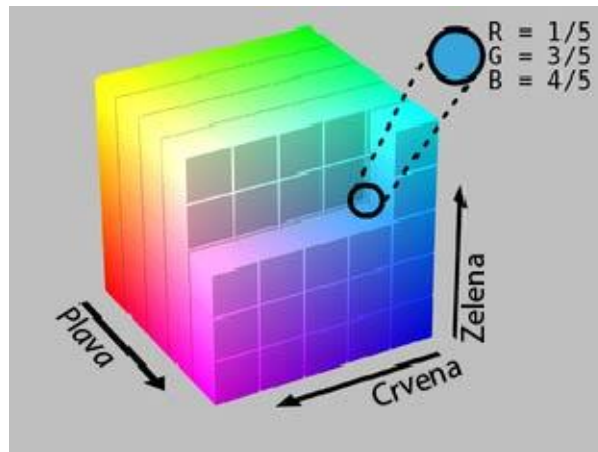


Slika 16. Receptori za vid smješteni u oku

Na **Slici 16** prikazan je položaj receptora unutar vidnog organa. Štapići, smješteni na vanjski rub mrežnice oka, osjetljivi su na niske razine svjetlosti te stvaraju doživljaj svjetline pojedine boje. Štapići nisu osjetljivi na same boje. Čunjići, receptori u središnjem dijelu mrežnice, formiraju žutu pjegu na mrežnici oka te stvaraju doživljaj tona boje [13].

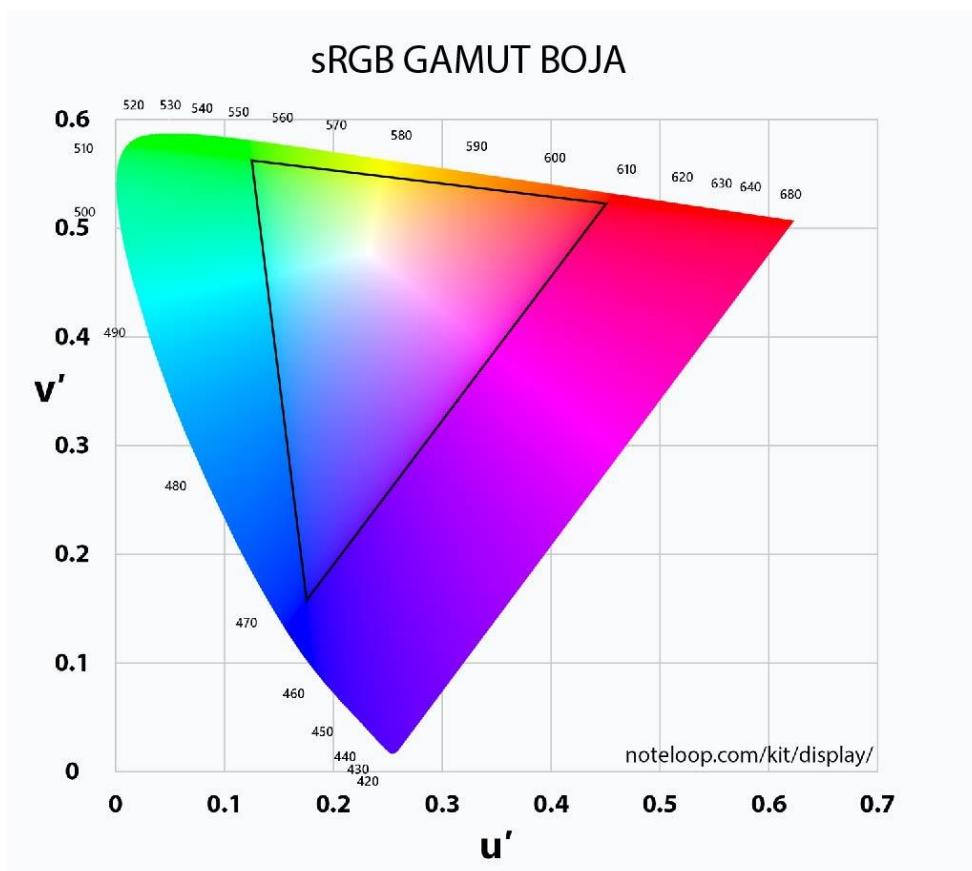
2.3.3. sRGB prostor boja

RGB prostorom boja naziva se bilo koji aditivni sustav boja temeljen na RGB modelu tri kromatske vrijednosti (crvena, zelena, plava) koje predstavljaju tri primarne boje čijim miješanjem nastaju sve ostale nijanse. Uz njih, prostor se definira još i bijelom bojom te krivuljom gama korekcije, kao što je prikazano na **Slici 17** [16].



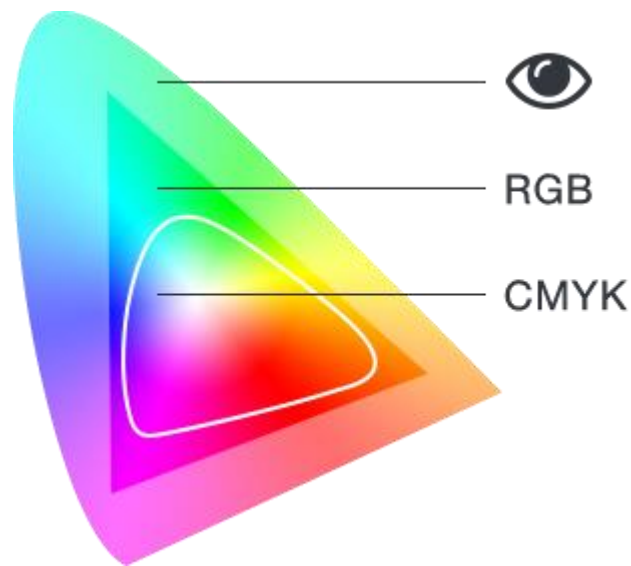
Slika 17. RGB Cube (kocka)

Od 2007., najčešće korišten RGB prostor boja postao je sRGB (eng. Standard Red Green Blue) prostor, **Slika 18** [16]. To je prostor boja nastao 1996. suradnjom HP-a i Microsofta, a nastao je u svrhu primjene na monitorima, printerima i internetu, a standardiziran je 1999. Najčešći je izbor kod prikaza datoteka s 8-bitnim vrijednostima po kanalu boje. sRGB koristi isti 16:9 standard prikaza slike kao i klasični uređaji sa tehnologijom katodnih cijevi (eng. Cathod Ray Tubes, CRT) [17].



Slika 18. Gamut sRGB prostora boja

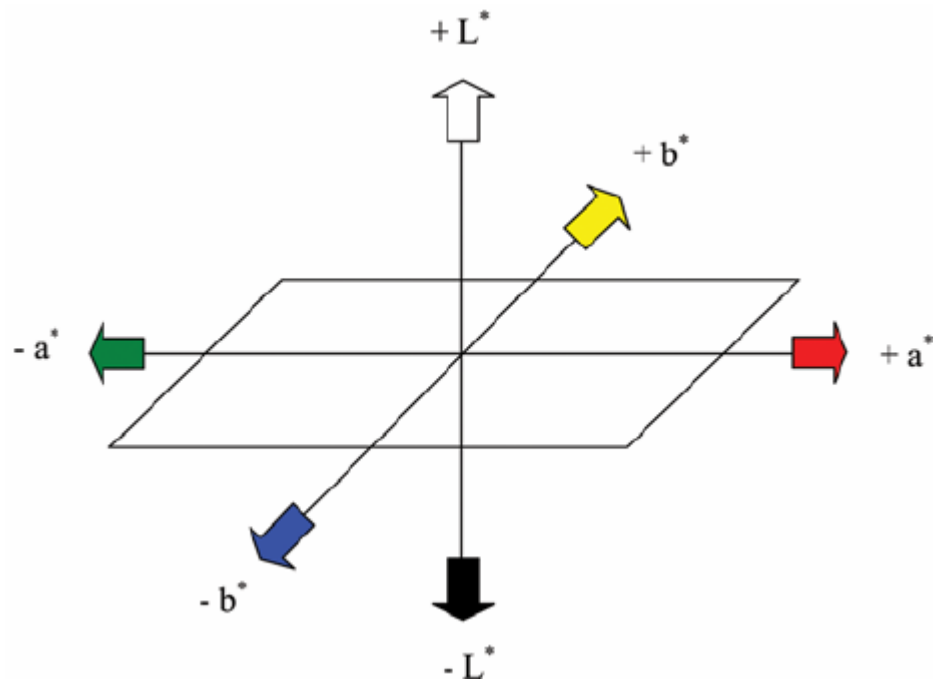
Standardizacija sRGB prostora boja na internetu i računalima utjecala je na njegovu rasprostranjenost u niskobudžetnim digitalnim kamerama, monitorima i skenerima. Gamut sRGB sustava adekvatan je za svakodnevnu uporabu prosječnih korisnika. Usporedba gamuta RGB prostora boja i CMYK-a prikazana je na **Slici 19** [17].



Slika 19. Usporedba sRGB i CMYK prostora boje

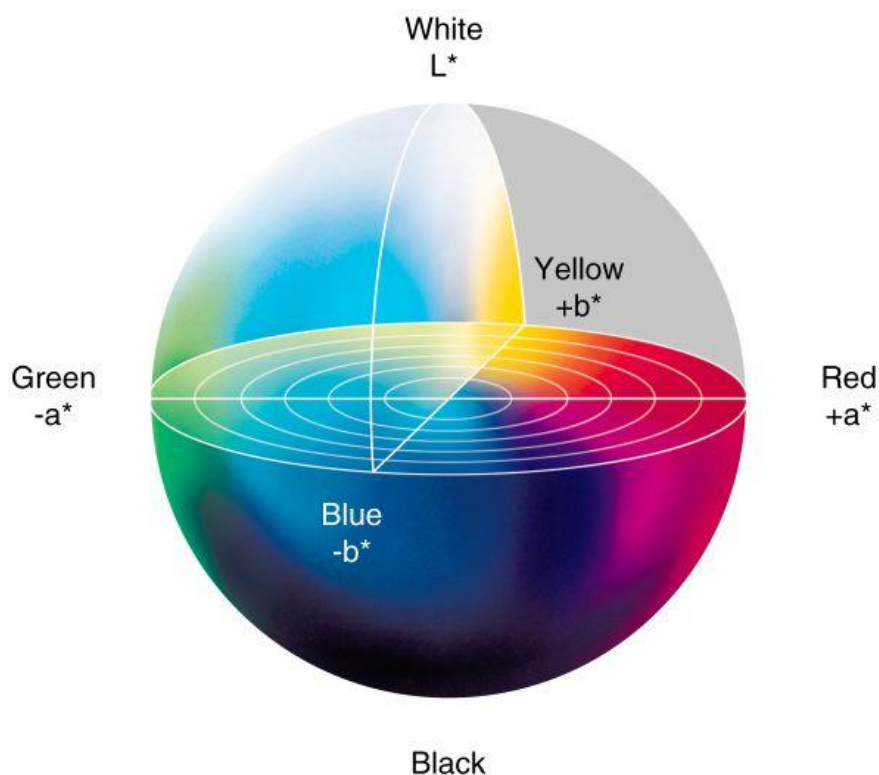
2.3.4. CIELAB prostor boja

Međunarodna komisija za rasvjetu (franc. Commission Internationale de l'Eclairage – CIE), internacionalna organizacija za svjetlost, rasvjetu, boju i prostore boja, 1976. definirala je CIELAB prostor boja koji je dobio naziv po trima vrijednostima koje ga određuju. Svjetlina (L^*) varira od potpuno crne (0) prema bijeloj (100), a parametri a^* i b^* vizualiziraju se u koordinatnom sustavu s pozitivnim (+) i negativnim (-) vrijednostima. Na **Slici 20** može se vidjeti što u prostoru boja predstavljaju vrijednosti a^* i b^* - raspon od zelene prema crvenoj boji te od plave prema žutoj [16].



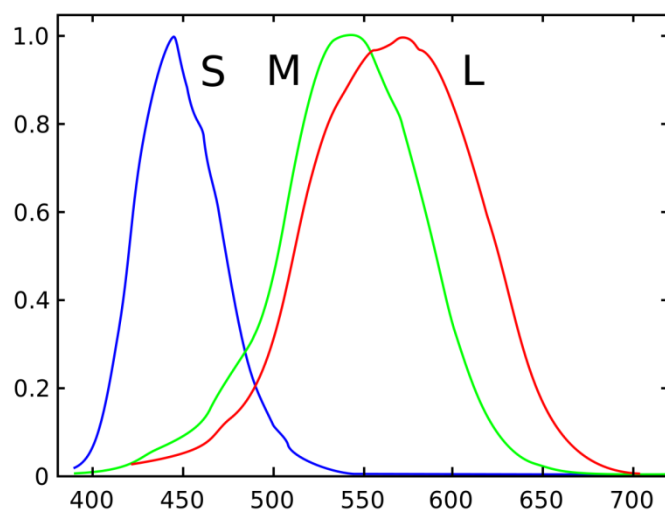
Slika 20. Vizualni prikaz LAB vrijednosti

CIELAB prostor stvoren je s ciljem vjernog prikaza vizualne promjene u boji numeričkim vrijednostima koordinatnog sustava u kojem se nalazi. U teoriji, sustav s tri parametra određivanja boje može rezultirati beskonačnim brojem kombinacija boja, ali se u praksi primjenjuju cijeli brojevi s unaprijed definiranim rasponom svih triju vrijednosti prostora boja. Os a^* predstavlja zeleno-crvenu komponentu numeričke vrijednosti neke boje, pri čemu se negativne vrijednosti odnose na zelenu, a pozitivne na crvenu boju. Os b^* je istovjetna plavo-zelenom sastavu određene boje te se plave nijanse odnose na negativni smjer osi, a pozitivni smjer kreće se prema žutoj, prikazano na **Slici 21**. Vrijednosti za navedene koordinate najčešće se postavljaju na ± 100 ili od -128 do 127 [16].



Slika 21. CIE Lab prostor boja

Prethodnik LAB prostora boja je XYZ prostor boja čije su osnovne tristimulusne vrijednosti definirale poveznicu između distribucije valnih duljina po vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra i psihološkog doživljaja boja u vidnom organu čovjeka [16]. Vrijednosti koje ga opisuju podudaraju se s tri vrste čunjića u mrežnici ljudskog oka, čije su spektralne osjetljivosti prikazane na **Slici 22**. Prema XYZ prostoru boja, da bi dva izvora svjetla naizgled prikazivala iste boje ne moraju se podudarati u valnim duljinama zračenja, već samo u njihovim tristimulusnim vrijednostima. U tom sustavu, Z se može usporediti s plavom bojom, Y sa osvijetljenošću, a X predstavlja kombinaciju krivulja odziva pozitivnih izmjerenih vrijednosti [16].



Slika 22. Spektralna senzitivnost receptora (čunjića) u ljudskom oku

Prednosti LAB prostora boja nad RGB i CMYK modelima prikaza su ujednačenost vizualnog i numeričkog prikaza s ciljem da se što više približi vrijednostima ljudskog oka. U tome značajnu ulogu ima L^* komponenta boje koja je vrlo slična stvarnoj percepciji svjetlosti oka. Zbog toga je LAB prostor koristan u korekcijama balansa boja bez dodatnih modula za određivanje vrijednosti miješanja pojedinih boja [16].

U praksi, mjerenja dobivena kolorimetrijskim uređajima uspoređuju se sa odgovarajućim standardima te se tumači dobivena razlika dvaju vrijednosti [17]:

$$\Delta L^* = L^* \text{ mjereno} - L^* \text{ standard}$$

$$\Delta a^* = a^* \text{ mjereno} - a^* \text{ standard}$$

$$\Delta b^* = b^* \text{ mjereno} - b^* \text{ standard}$$

Također su definirane i razlike u zasićenju (ΔC^*ab) i tonu (ΔH^*ab) mjerenih i standardnih vrijednosti [17]:

$$\Delta C^* = \Delta C^{*ab} - \Delta C^{*ab} = \frac{(a^*mjereno)^2 + (b^*mjereno)^2}{2}$$

$$\Delta H^{*ab} = \frac{[(\Delta E^{*ab})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^{*ab})]}{2}$$

Svjetlosna razlika ($\Delta L > 0$, $\Delta L < 0$) pokazuje koliko je mjereni uzorak svjetliji ili tamniji od standardne boje. Prema istom načelu mjerimo crvenu ($\Delta a^* > 0$), zelenu ($\Delta a^* < 0$), žutu ($\Delta b^* > 0$) i plavu (Δb^*) vrijednost boje uzorka [17]. Korištenje tona i zasićenja pri mjerenju razlika u psihološkom doživljaju boje primjenjuje se zbog ograničenja LAB sustava – bez tih parametara, bilo bi moguće izmjeriti uzorak npr. plave boje čija je plava komponenta manja od standarda plave boje, te bi se moglo doći do netočnog zaključka da je uzorak žute boje [17].

Sveukupna razlika mjerene i standardne vrijednosti boje (kolorimetrijska razlika) računa se trima dobivenim razlikama vrijednosti [17]:

$$\Delta E^{*ab} = \frac{[(\Delta L^*)^2 - (\Delta a^*)^2 - (\Delta b^*)^2]}{2}$$

Međutim, ovo nije jedina verzija pokušaja dobivanja univerzalne formule za objektivno opisivanje boje. Prvi od tri pokušaja Međunarodne komisije za rasvjetu (CIE) bio je Delta E 76 koji je bio varijacija Euklidove formule za udaljenost. Nedostatak ove formule bilo je zanemarivanje razlike u zasićenju dviju boja pod različitim osvjetljenjem. Poboljšana i složenija verzija Delta E 94 ispravila je ovaj propust, ali nije uspjela prepoznati razliku u tonu dviju boja potpuno istoga osvjetljenja. Posljednja verzija, Delta E 2000, najtočnija je i najpreciznija formula za dobivanje razlike u bojama, a njen izvod je opsežan i matematički složen [17].

Približno tumačenje ΔE vrijednosti objašnjeno je **Tablicom 1**:

Tablica 1. Tumačenje vrijednosti ΔE

Delta E	Percepcija boje
≤ 1.0	Razlika nije uočljiva ljudskim okom.
1 - 2	Razlika je vidljiva pomnim promatranjem.
2 - 10	Razlika je vidljiva pogledom.
11 - 49	Boje su sličnije nego što su različite.
100	Boje su potpuno različite.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. Opis ispitivanja

U eksperimentalnom dijelu rada ispituju se numeričke vrijednosti prikaza boja obje vrste zaslona – LCD i AMOLED – na nekoliko različitih modela mobilnih uređaja. Radi preciznijih rezultata korištena su po dva uzorka za LCD te tri uzorka za AMOLED vrstu zaslona. Jedan od uzoraka (iPhone 7) imao je zaštitno staklo adhezivom pričvršćeno na zaslon.

U pregledniku mobilnih uređaja (Safari, Chrome) pokrenuta je skripta ChangeColors v1.5 koja se nalazi na snimki zaslona na **Slici 23**. Skripta je osmišljena kako bi poslužila u svrhu ispitivanja i mjerenja unaprijed određenih vrijednosti boja na različitim zaslonima, a temelji se na nizu podešenog broja boja (Step) koje se prikazuju samo jednom (Sequence) ili se ponavljaju (Loop) preko cijelog zaslona uređaja.

Change colors

Type Loop Sequence

Delay (ms)

Step

R channel
G channel
B channel
Sequence #

Slika 23. Change Colors v1.5, preglednik Google Chrome

Period trajanja prikaza jedne boje (eng. Delay) podešen je na 10000 milisekundi. Ponavljanje boja (Step) podešeno je na 128 prikaza, s time da se posljednje 3 boje ponavljaju. Prikazano je 125 boja koje se mogu opisati zadanim (teoretskim) RGB i LAB vrijednostima navedenima u **Tablici 2** koja se nalazi u poglavlju Dodatak.

3.2. Specifikacije zaslona uređaja [17]

Apple iPhone 7

ZASLON	<u>Vrsta</u>	IPS LCD capacitive touchscreen, 16M colors
	<u>Veličina</u>	4.7 inches, 60.9 cm ² (~65.6% screen-to-body ratio)
	<u>Rezolucija</u>	750 x 1334 pixels, 16:9 ratio (~326 ppi density)
	<u>Zaštita</u>	Ion-strengthened glass, oleophobic coating
		Wide color gamut 3D Touch display & home button

Apple iPhone 8

ZASLON	<u>Vrsta</u>	IPS LCD capacitive touchscreen, 16M colors
	<u>Veličina</u>	4.7 inches, 60.9 cm ² (~65.4% screen-to-body ratio)
	<u>Rezolucija</u>	750 x 1334 pixels, 16:9 ratio (~326 ppi density)
	<u>Zaštita</u>	Ion-strengthened glass, oleophobic coating
		Wide color gamut 3D Touch display & home button True-tone

Samsung Galaxy S8+

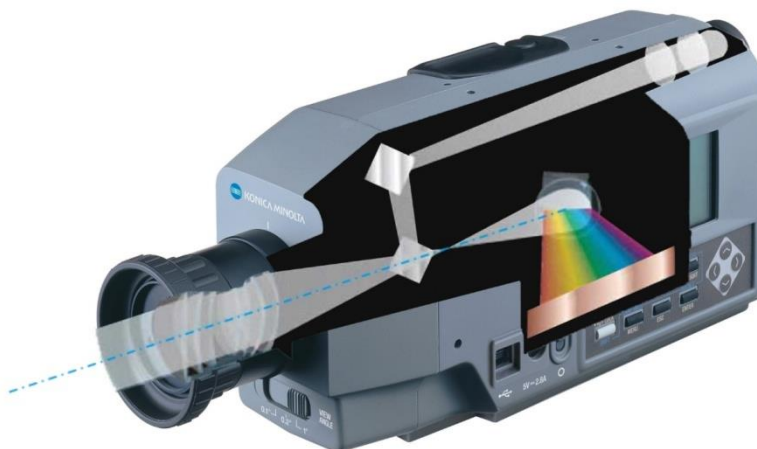
ZASLON	<u>Vrsta</u>	Super AMOLED capacitive touchscreen, 16M colors
	<u>Veličina</u>	6.2 inches, 98.3 cm ² (~84.0% screen-to-body ratio)
	<u>Rezolucija</u>	1440 x 2960 pixels, 18.5:9 ratio (~529 ppi density)
	<u>Zaštita</u>	Corning Gorilla Glass 5
		HDR10 3D Touch (home button only) Always-on display

Samsung Galaxy A5 (2017)

ZASLON	<u>Vrsta</u>	Super AMOLED capacitive touchscreen, 16M colors
	<u>Veličina</u>	5.2 inches, 74.5 cm ² (~71.5% screen-to-body ratio)
	<u>Rezolucija</u>	1080 x 1920 pixels, 16:9 ratio (~424 ppi density)
	<u>Zaštita</u>	Corning Gorilla Glass 4 Always-on display

3.3. Mjerni uređaj

Kolorimetar Konica Minolta CS-200, mjerac osvijetljenja i boja, koristi se za mjerenje numeričkih vrijednosti boja unutar više sustava, a u eksperimentalnom dijelu rada korišten je za mjerenje RGB i CIELAB vrijednosti. Princip rada prikazan je na **Slici 24**. Uređaj je pogodan za mjerenje pod bilo kojim svjetlom te mu ne trebaju posebni uvjeti poput zamračene prostorije [13].



Slika 24. Uređaj Konica Minolta CS-200

Pri mjerenjima u ovom radu korišten je izvor svjetlosti Illuminant D65, kut mjerenja podešen je na 1° (od mogućih 0.5, 1 i 2 stupnja), brzina mjerenja je 10 sekundi

(maksimalna brzina za ovaj uređaj), a kut promatranja iznosio je 2° . Uređaj je dvaput mjerio svaku prikazanu boju te izračunao srednju vrijednost dobivena dva rezultata te ju ispisao na ekranu. Računalo i uređaj spojeni su USB konekcijom, a detaljniji prikaz cijele opreme postavljene za mjerenje nalazi se na **Slici 25**:



Slika 25. Mjerni uređaj s pripadajućim računalom i jednim od ispitivanih uređaja

Od softvera, na računalo korišten je CS-S10w Softver za upravljanje podacima (eng. *Data Management Software*) koji dolazi u paketu s mjernim uređajem CS-200.

3.4. Rezultati

Dobivene vrijednosti za svaki od pet uređaja (iPhone 7, iPhone 8, Samsung Galaxy S8+ (1), Samsung Galaxy S8+ (2), Samsung Galaxy A5) pomoću prethodno navedene formule za E odstupanje od testne karte prikazane su u **Tablici 3** koja se nalazi u poglavlju Dodatak.

U **Tablici 4** izračunate su srednje vrijednosti za svaki od mobilnih uređaja, a naveden je broj vrijednosti ΔE koji premašuje 50 (granica sličnosti boja je oko tog broja) i količina mjerenja s vrijednosti ΔE ispod 10 (vrlo sličan prikaz testnoj karti).

Tablica 4. Srednja vrijednost ΔE i broj mjerenja

ΔE	iPhone 7	iPhone 8	Samsung Galaxy S8+ (1)	Samsung Galaxy S8+ (2)	Samsung Galaxy A5
>50	1	0	7	7	41
<10	33	63	22	2	0
$\overline{\Delta E}$	14	9,92	22,53	31,58	44,02

Prema CIELAB sustavu mjerenja reprodukcije boje, najvjerniji prikaz boja na zaslonu ima LCD uređaj, iPhone 8. Drugo mjesto zauzima njegov prethodnik, iPhone 7, sa nešto starijom inačicom hardvera i zaštitnim kaljenim staklom na svojoj površini. Slijede AMOLED zasloni, Samsung Galaxy S8+ uređaji, sa zanimljivom razlikom u prosječnoj vrijednosti ΔE . Vrijedi napomenuti kako je S8+ sa većim odstupanjima imao napuknuto staklo na zaslonu. Uređaj s najvećim odstupanjima od testne karte, Samsung Galaxy A5, koristi AMOLED zaslon i nema odstupanja manjih od 10, što je granica jedva primjetne razlike u boji ljudskom oku.

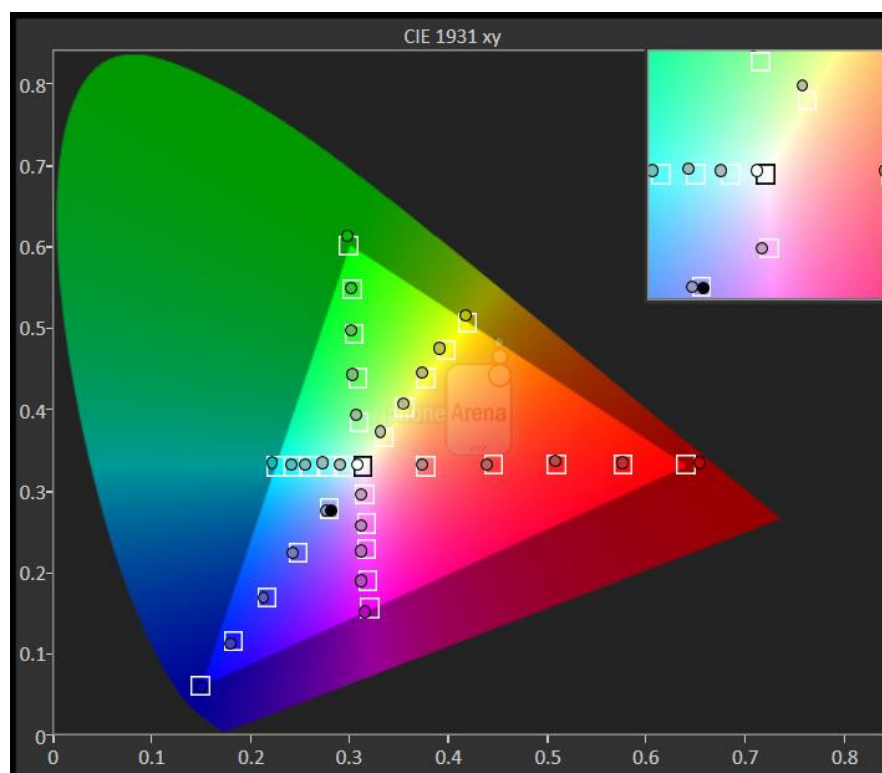
LCD

Tehnologija tekućih kristala u smartphone zaslonima pokazala se iznimno bliska zadanim vrijednostima za gotovo polovicu od 125 izmjerenih boja, a najrealističnije joj uspijeva prikazati nijanse s kojima AMOLED ima mnogo veća odstupanja, poput nijansi zelene različite svjetline, plavih i ljubičastih nijansi te tirkizne boje. Najmanja razlika izmjerena je upravo na svjetloplavoj boji ($\Delta E=1,9185$), a jedino značajnije odstupanje na blijedožutoj nijansi.

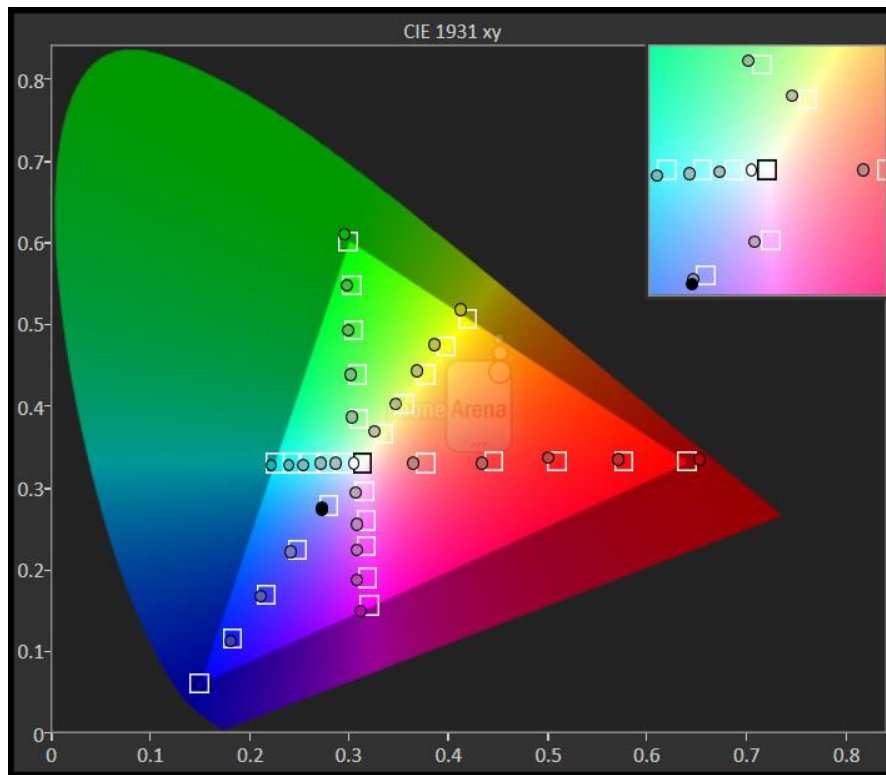
AMOLED

Zaslon s aktivnom matricom prikazuje znatno drukčije vrijednosti od onih zadanih testnom kartom. Od takvih uređaja, najmanja odstupanja pokazao je prvi Galaxy S8+, a najveća razlika u prikazu boja izmjerena je na Galaxy A5 modelu. Ipak, neke boje AMOLED prikazuje vjernije zadanim vrijednostima; to su tamnije, gotovo crne nijanse, a odstupanja su manja i za neke pastelne nijanse ružičastih i narančastih tonova bez mnogo zasićenja. Međutim, kod nijansi poput zasićene svijetle zelene boje kolorimetrijska razlika penje se do 80. Među AMOLED uređajima postoje znatne razlike u izmjerenom odstupanju kod nekih boja poput žute i smeđe, a veću razliku uglavnom pokazuje model A5.

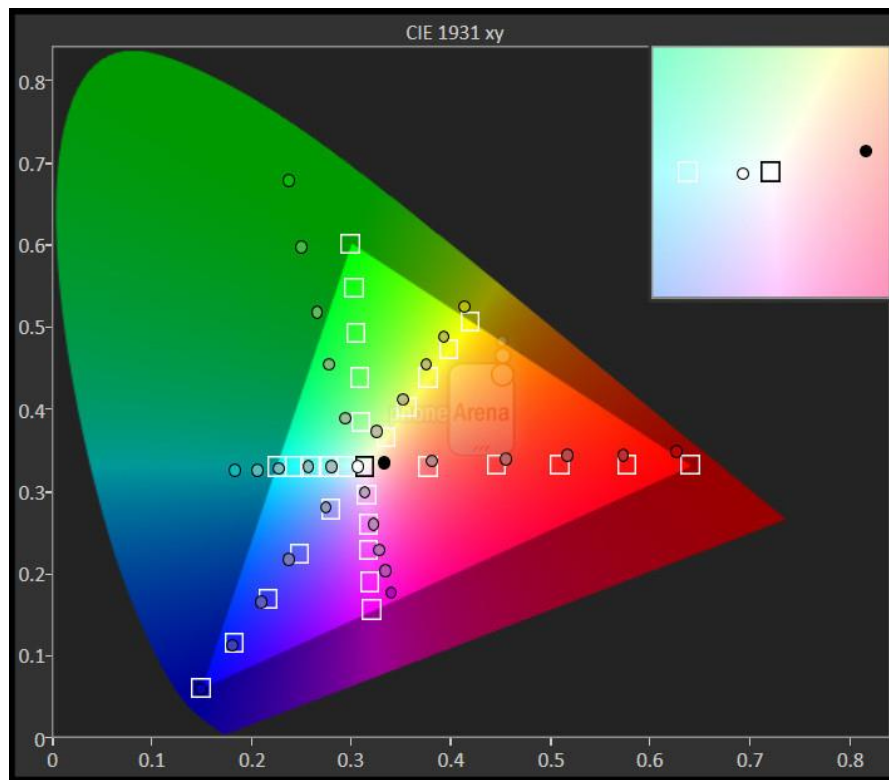
GAMUTI [20]



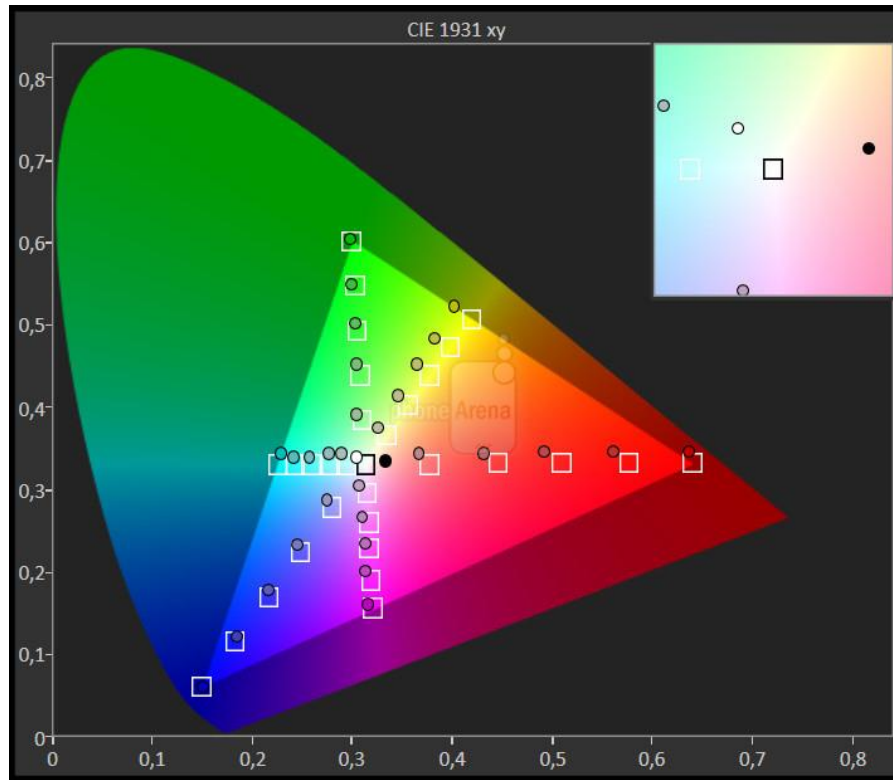
Slika 26. iPhone 7



Slika 27. iPhone 8



Slika 28. Samsung Galaxy S8+



Slika 1. Samsung Galaxy A5

4. ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu ovoga rada usporedba zaslona temeljila se na CIELAB prostoru boja, trenutno najobjektivnijem i najpreciznijem sustavu za definiranje parametara boje, a time i komparacije dviju boja.

Rezultati mjerenja pokazuju kako LCD tehnologija, konkretno IPS LCD korišten u iPhone 7 i 8 modelima, vrlo realistično prikazuje boje. IPS LCD ranije je spomenut u ovome radu kao poboljšana verzija prethodne inačice TFT, s bržim odazivom, oštrijim prikazom slike te širokokutnim prikazom. AMOLED uređaji, s druge strane, pokazali su znatna odstupanja od standardnih vrijednosti zadanih tonova, što je nešto manje izraženo na Samsungovom *flagship* modelu Galaxy S8+, ali je mnogo vidljivije kod A5 uređaja nešto nižeg cjenovnog ranga.

Ipak, realističan prikaz nije jedini parametar pri određivanju kvalitete zaslona. Prema LAB vrijednostima, AMOLED uređaji imaju mnogo veći raspon boja (gamut), a time i veće mogućnosti prikaza. Upravo zato se u marketinškim kampanjama za AMOLED modele često spominju življe, zasićene boje, a nevjerojatni tonovi plave i zelene boje razlog su tolikog izmjerenog odstupanja u prikazu. S obzirom na njih, LCD modeli imaju manji gamut i ograničeniji prikaz različitih boja. Osim toga, organske diode pasivno prikazuju crnu boju, pa je moguće prikazati tzv. *true black*, dok zbog pozadinskog osvijetljenja svjetleće diode nikad neće moći postići toliko tamnu nijansu.

Ostale karakteristike zaslona također nisu zanemarive; AMOLED se teže, time i skuplje, proizvodi. Osim toga, organske diode zbog svoje prirode imaju kraći životni vijek od LCD zaslona. S vremenom ovi nedostaci postaju sve manji problem zahvaljujući neprekidnom razvoju tehnologije i sve većem opsegu proizvodnje. S druge strane, LCD tehnologija zahtijeva već spomenuto pozadinsko osvijetljenje, što ograničava dizajn uređaja i neizbježno ‘podebljava’ ekran. Iz istog razloga troši više energije; za razliku od pojedinačnih piksela aktivne matrice koji omogućavaju značajke poput popularnog Always-On Displaya, polarizirano svjetlo LCD ekrana uvijek je cijelom površinom aktivno, trošeći energiju. Međutim, isto pozadinsko osvijetljenje omogućava bolju

vidljivost LCD ekrana u usporedbi s AMOLED-om na direktnom svjetlu, što je važno pri korištenju mobitela u vanjskom okruženju.

S obzirom na sve navedene činjenice, zaista se ne može jasno i nedvosmisleno odrediti koja tehnologija je objektivno bolja, ali razvoj tehnologije i proizvodnje ukazuje na to da bi AMOLED uskoro mogao prevagnuti kao bolji izbor. U prilog tome govori činjenica da je Apple, poznat po svojoj revolucionarnoj IPS LCD tehnologiji predstavljenoj kao Retina Display, od 2017. počeo koristiti OLED tehnologiju na svojim mobilnim uređajima.

5. REFERENCE

1. Joseph A. Castellano. (1992). Handbook of Display Technology. (1st edition). [On-line]. Available: <https://books.google.hr/books?id=Mdy2w-EWqEAC> [June 20, 2019].
2. K. Takatoh, M. Hasegawa, M. Kodan, N. Itoh, R. Hasegawa, M. Sakamoto. (2005). Alignment Technologies and Applications of Liquid Crystal Devices. (2nd edition). [On-line]. Available: <https://books.google.hr/books?id=YEtBkaxka20C> [June 20, 2019].
3. H.-S. Kwok, S. Naemura, H. L. Ong. (2013). Progress in Liquid Crystal Science and Technology. (1st edition). [On-line]. 4(3). Available: <https://books.google.hr/books?id=hvG6CgAAQBAJ> [June 21, 2019].
4. Shaun Taylor. „History of Liquid Crystals“. Internet: www.photonicswiki.org/index.php?title=History_of_Liquid_Crystals, July 27, 2009 [July 30, 2019].
5. Kat Walcott. “Types of Liquid Crystals”. Internet: www.sciencing.com/types-liquid-crystals-6707420.html, February 20, 2018 [September 1, 2019].
7. S. D. Yambem, T. Brooks-Richards, D. P. Forrestal. “”. Internet: www.nature.com/articles/s41598-019-45867-9, October 24, 2018 [July 22, 2019].
8. Alexa Crawls. (2008, May 22). “Introduction to OLED Displays - Design Guide for Active Matrix OLED (AMOLED) Displays”. Available: www.web.archive.org/web/20100705004637/http://data.4dsystems.com.au/downloads/micro-OLED/Docs/4D_AMOLED_Presentation.pdf [June 13, 2019]
9. Mary Bellis. (2019, April 17). OLED Technology. [On-line]. Available: <https://www.thoughtco.com/who-invented-oled-technology-1992208>.
10. Hari Singh Nalwa. Handbook of Organic Electronics and Photonics. Volume 1–3. American Scientific Publishers, Los Angeles, 2008.
11. T. Tsujimura. OLED Display Fundamentals and Applications, Wiley-SID Series in Display Technology, New York, 2017.

12. K. T. Kamtekar, A. Monkman. (2010, February 02). Recent Advances in White Organic Light-Emitting Materials and Devices. [On-line]. Available: www.doi.org/10.1002/adma.200902148.
13. N. Knešaurek. “Kvalitativne metode ispitivanja reprodukcije boja”. Internet: www.fotoproceni.grf.unizg.hr/media/Predavanja%20-%20Kvalitativne%20metode%20ispitivanja%20reprodukcije%20boja_2014.pdf, [September 1, 2019].
14. M. Strgar Kurečić. “Kontrola boja – od percepcije do mjerenja”. Internet: http://repro.grf.unizg.hr/media/download_gallery/OSNOVE%20O%20BOJI%203.dio.pdf, [September 1, 2019].
15. Abhay Sharma. (2018, July 18). Understanding Color Management. Available: www.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119223702
16. R. W. G. Hunt. The Reproduction of Colour (6th ed.). Chichester UK: Wiley–IS&T Series in Imaging Science and Technology, 2004.
17. Ante Mikulić. “Gamut LCD monitora u ovisnosti o kutu gledanja”. Sveučilište u Zagrebu, Grafički fakultet, 2015. Internet: www.eprints.grf.unizg.hr/2298/1/Z638_Mikuli%20Ante.pdf.
18. Orlin Milinov. “Compare Specs – gsmarena.com” Internet: www.gsmarena.com/compare.php3?idPhone1=8064&idPhone2=8573&idPhone3=8523, [September 1, 2019].
19. Ben Woods. “Smartphone screens explained: display types, resolutions and more”. Internet: www.androidpit.com/super-amoled-vs-retina-display, [October 23, 2019].
20. Pressian Karakostov. “Display benchmarks and color charts – phonearena.com”. Internet: www.phonearena.com/phones/Apple-iPhone-7_id9815/benchmarks#, [July 31, 2019].
-

6. DODATAK

Tablica 2. Standardne sRGB i LAB vrijednosti mjerenih boja

#Boje	R	G	B	L*	a*	b*
1	0	0	0	0,00	0,00	0,00
2	64	0	0	10,20	30,00	16,00
3	128	0	0	26,27	48,00	39,00
4	192	0	0	40,78	65,00	56,00
5	255	0	0	54,12	81,00	70,00
6	0	64	0	22,75	-29,00	30,00
7	64	64	0	26,27	-6,00	34,00
8	128	64	0	34,90	26,00	45,00
9	192	64	0	46,27	51,00	58,00
10	255	64	0	58,04	71,00	71,00
11	0	128	0	46,27	-48,00	49,00
12	64	128	0	47,84	-36,00	51,00
13	128	128	0	52,16	-9,00	56,00
14	192	128	0	59,22	20,00	65,00
15	255	128	0	67,84	46,00	75,00
16	0	192	0	67,84	-64,00	65,00
17	64	192	0	68,63	-57,00	67,00
18	128	192	0	71,37	-38,00	70,00
19	192	192	0	75,69	-13,00	75,00
20	255	192	0	81,96	14,00	83,00
21	0	255	0	87,84	-79,00	81,00
22	64	255	0	88,24	-75,00	82,00
23	128	255	0	90,20	-61,00	84,00
24	192	255	0	93,33	-40,00	88,00
25	255	255	0	97,65	-16,00	93,00
26	0	0	64	2,75	18,00	-38,00
27	64	0	64	12,16	35,00	-22,00

28	128	0	64	27,06	50,00	2,00
29	192	0	64	41,18	66,00	24,00
30	255	0	64	54,51	82,00	43,00
31	0	64	64	23,53	-19,00	-6,00
32	64	64	64	27,06	0,00	0,00
33	128	64	64	35,69	28,00	13,00
34	192	64	64	46,67	52,00	30,00
35	255	64	64	58,43	71,00	47,00
36	0	128	64	46,67	-43,00	26,00
37	64	128	64	48,24	-32,00	28,00
38	128	128	64	52,55	-7,00	34,00
39	192	128	64	59,61	21,00	44,00
40	255	128	64	68,24	46,00	56,00
41	0	192	64	68,24	-61,00	50,00
42	64	192	64	69,02	-55,00	51,00
43	128	192	64	71,37	-37,00	55,00
44	192	192	64	76,08	-11,00	61,00
45	255	192	64	81,96	15,00	69,00
46	0	255	64	87,84	-78,00	70,00
47	64	255	64	88,63	-73,00	71,00
48	128	255	64	90,20	-60,00	73,00
49	192	255	64	93,33	-39,00	78,00
50	255	255	64	97,65	-15,00	83,00
51	0	0	128	11,37	41,00	-67,00
52	64	0	128	17,65	45,00	-56,00
53	128	0	128	29,80	56,00	-36,00
54	192	0	128	42,75	70,00	-15,00
55	255	0	128	55,69	84,00	6,00
56	0	64	128	26,67	3,00	-42,00
57	64	64	128	29,80	14,00	-37,00
58	128	64	128	37,65	35,00	-24,00
59	192	64	128	47,84	56,00	-7,00

60	255	64	128	59,22	74,00	11,00
61	0	128	128	47,84	-30,00	-9,00
62	64	128	128	49,41	-21,00	-7,00
63	128	128	128	53,73	0,00	0,00
64	192	128	128	60,39	26,00	11,00
65	255	128	128	68,63	49,00	24,00
66	0	192	128	68,63	-54,00	20,00
67	64	192	128	69,80	-48,00	22,00
68	128	192	128	72,16	-31,00	26,00
69	192	192	128	76,47	-7,00	32,00
70	255	192	128	82,75	18,00	41,00
71	0	255	128	88,63	-72,00	46,00
72	64	255	128	89,02	-68,00	46,00
73	128	255	128	90,59	-55,00	49,00
74	192	255	128	93,73	-36,00	53,00
75	255	255	128	98,04	-12,00	60,00
76	0	0	192	20,78	55,00	-91,00
77	64	0	192	24,71	58,00	-84,00
78	128	0	192	34,12	65,00	-68,00
79	192	0	192	45,49	76,00	-49,00
80	255	0	192	57,65	88,00	-29,00
81	0	64	192	31,37	26,00	-73,00
82	64	64	192	34,12	32,00	-69,00
83	128	64	192	40,78	46,00	-57,00
84	192	64	192	50,20	63,00	-41,00
85	255	64	192	60,78	78,00	-24,00
86	0	128	192	50,20	-12,00	-42,00
87	64	128	192	51,76	-5,00	-40,00
88	128	128	192	55,69	12,00	-34,00
89	192	128	192	61,96	33,00	-23,00
90	255	128	192	70,20	54,00	-10,00
91	0	192	192	70,20	-41,00	-12,00

92	64	192	192	70,98	-36,00	-11,00
93	128	192	192	73,33	-21,00	-7,00
94	192	192	192	77,65	0,00	0,00
95	255	192	192	83,53	23,00	9,00
96	0	255	192	89,41	-63,00	15,00
97	64	255	192	89,80	-59,00	16,00
98	128	255	192	91,37	-48,00	19,00
99	192	255	192	94,51	-29,00	24,00
100	255	255	192	98,82	-7,00	30,00
101	0	0	255	29,41	68,00	-112,00
102	64	0	255	32,16	70,00	-107,00
103	128	0	255	39,22	75,00	-95,00
104	192	0	255	49,41	83,00	-79,00
105	255	0	255	60,00	94,00	-61,00
106	0	64	255	37,25	46,00	-99,00
107	64	64	255	39,22	50,00	-96,00
108	128	64	255	45,10	59,00	-86,00
109	192	64	255	53,33	71,00	-72,00
110	255	64	255	63,14	85,00	-55,00
111	0	128	255	53,33	9,00	-73,00
112	64	128	255	54,90	13,00	-71,00
113	128	128	255	58,43	26,00	-65,00
114	192	128	255	64,31	43,00	-55,00
115	255	128	255	72,16	61,00	-42,00
116	0	192	255	72,16	-25,00	-43,00
117	64	192	255	72,94	-20,00	-42,00
118	128	192	255	75,29	-8,00	-38,00
119	192	192	255	79,22	10,00	-31,00
120	255	192	255	85,10	31,00	-22,00
121	0	255	255	90,59	-51,00	-15,00
122	64	255	255	91,37	-47,00	-14,00
123	128	255	255	92,94	-37,00	-11,00

124	192	255	255	95,69	-20,00	-7,00
125	255	255	255	100,00	0,00	0,00

Tablica 3. Izračunate vrijednosti ΔE za pet uređaja

#Boje	ΔE iPhone7	ΔE iPhone8	ΔE Galaxy S8+ (1)	ΔE Galaxy S8+ (2)	ΔE Galaxy A5
1	20,2293	12,7788	12,4418	14,2556	10,3559
2	22,4624	16,1831	15,1292	24,4056	15,1538
3	19,5283	12,9463	7,4459	28,2797	30,8012
4	20,5164	13,0364	17,9646	30,0369	47,0161
5	21,8221	14,4802	28,5399	30,1038	64,889
6	13,1308	6,5769	10,8948	26,0264	28,5791
7	14,2728	8,4124	8,5737	21,0922	20,5041
8	15,8244	10,1727	5,6405	23,3203	29,746
9	16,048	12,18	16,3776	26,1096	45,4507
10	18,088	14,8459	27,1541	28,4847	62,1339
11	11,299	8,0914	22,7743	27,9992	61,5565
12	12,654	9,513	17,6013	27,3151	51,5624
13	15,0982	12,0171	7,5067	26,5206	42,3373
14	16,6809	13,7577	14,3774	27,0656	46,2712
15	18,3577	16,6488	27,3649	27,4316	60,2475
16	14,3608	10,7493	45,0427	30,3526	79,0727
17	14,9476	11,4037	40,9239	30,6821	82,6385
18	16,7892	13,5049	30,4232	3,9229	68,995
19	17,9448	14,9388	22,1523	30,1201	60,3979
20	20,3743	17,7174	25,5843	31,625	48,9699
21	16,4018	12,1462	56,0377	35,6053	68,9773
22	16,3394	11,9384	59,3503	35,4814	71,1569
23	17,6092	13,9345	53,9772	35,591	80,753
24	18,8376	16,8807	40,6436	36,7064	67,4754
25	20,9708	18,2832	32,0799	37,838	65,9533
26	24,2335	17,3375	21,6956	38,6387	15,5488
27	20,1799	12,9005	15,3554	32,6219	15,4085
28	12,8475	7,7322	8,3005	21,5794	22,9733

29	12,7368	9,7315	12,2547	20,2992	34,0661
30	15,0833	13,438	24,0202	23,0343	46,7329
31	9,8623	4,6	4,2877	11,1696	19,0463
32	11,0605	6,3903	3,6476	8,2538	14,2078
33	11,7409	7,8801	6,3842	12,0847	19,343
34	14,3799	10,7689	15,0052	17,2232	32,084
35	15,6611	13,6155	24,7411	21,1695	46,333
36	10,608	7,8944	19,8159	18,2669	50,6531
37	12,2154	8,6515	16,3388	18,1246	41,455
38	13,8649	11,1153	5,423	18,4258	29,66
39	15,0149	13,2925	8,2984	19,819	31,6353
40	16,2909	15,4928	23,1074	23,0199	44,587
41	14,3081	9,9132	41,893	26,6245	75,4173
42	14,1133	10,1868	38,3209	26,6142	73,2303
43	15,7024	11,8691	27,0329	26,9176	58,8077
44	18,0705	15,2398	17,0797	28,1397	47,368
45	19,7116	17,4961	20,079	29,4684	44,4195
46	15,5384	10,683	54,6942	33,7723	65,0042
47	16,4279	11,562	59,2541	34,0366	68,6337
48	16,9992	12,9077	49,2798	34,1489	79,7514
49	18,4993	16,2567	36,314	35,9059	66,2806
50	20,8327	18,1033	26,6288	37,0309	53,6353
51	17,2093	13,0806	12,8945	52,6367	33,0646
52	11,9032	8,5282	8,6579	44,6124	31,4042
53	11,7776	6,1369	8,2362	33,7811	45,4438
54	10,616	8,8261	13,3093	28,5502	31,9314
55	13,2182	12,7101	20,4381	26,5916	39,2764
56	7,0691	3,8804	9,8554	24,7698	24,2773
57	6,8015	2,878	8,4466	24,6977	24,0933
58	8,6968	5,6491	10,2569	23,4522	24,7545
59	11,1083	9,4533	14,0722	23,0465	29,4704
60	13,514	13,218	19,7321	24,2278	34,4676

61	8,4486	5,089	13,1835	18,5993	36,273
62	9,2964	6,0601	11,4638	18,8614	30,052
63	11,0931	8,4934	4,3283	19,1767	21,3132
64	13,7209	11,7303	6,8877	20,7234	24,362
65	15,4733	14,577	16,8884	22,9034	30,5229
66	11,7156	7,2909	32,9364	24,5117	65,0252
67	12,2159	8,0435	30,2324	24,7893	59,1902
68	13,7271	11,1279	21,4353	29,4719	42,6716
69	16,3718	13,7673	8,3183	26,6326	32,7542
70	18,5122	16,5815	6,6573	28,3663	23,0824
71	14,9838	10,4838	54,7772	32,8827	60,2375
72	15,085	10,7617	51,2395	32,5635	63,977
73	16,451	12,5603	43,6112	33,0843	68,6485
74	16,9274	14,7205	29,6059	34,4469	50,8473
75	52,3594	17,9696	17,4021	35,841	36,8174
76	8,7628	7,9107	14,8803	55,582	52,3594
77	7,0329	5,6997	15,3485	51,7043	49,3246
78	7,4882	4,2953	16,5896	43,509	44,1432
79	9,9183	7,3039	17,2827	37,9292	41,3256
80	12,7995	10,993	19,5974	34,9905	40,562
81	7,1401	4,037	22,8329	37,1789	43,4685
82	19,605	18,1836	26,8502	39,7035	45,5381
83	7,7795	3,6372	20,4237	34,4193	40,2333
84	10,7833	8,0149	18,5673	32,8706	36,7808
85	12,675	11,0603	20,6665	32,4894	38,1253
86	7,1331	2,0019	17,3877	26,0454	31,6504
87	7,2695	2,6579	16,3574	26,3809	30,5979
88	8,9057	5,8749	14,0963	26,9338	26,8641
89	11,5577	9,0873	14,4863	27,3459	27,2423
90	14,2192	12,7444	17,8461	28,7825	30,6621
91	9,4494	4,9492	23,2228	27,1582	49,9262
92	9,6151	5,8715	21,2351	21,2351	44,3178

93	11,9751	8,321	15,4698	27,8801	35,0419
94	14,36	11,2919	6,6751	28,808	25,7876
95	16,665	14,511	6,3709	30,3361	17,311
96	12,3267	8,3887	41,9249	33,0464	65,8785
97	12,9921	9,1302	40,4433	33,2467	66,5693
98	13,9205	9,9253	33,3875	33,5177	54,0452
99	16,2491	13,965	22,5456	34,3787	37,9776
100	18,5313	16,2986	8,9834	35,8773	22,9304
101	8,1222	5,0808	29,3281	59,2388	70,5268
102	7,6547	3,7131	29,347	56,7501	66,9683
103	8,1815	2,8546	28,2977	52,0537	61,5078
104	9,2714	4,8541	25,5768	48,1505	53,6723
105	12,0375	8,9168	23,6531	45,7823	47,6535
106	9,0446	4,4682	35,9273	47,7369	63,1819
107	7,9656	3,5903	33,4828	48,0429	61,1086
108	8,2424	2,7174	30,0163	45,9741	55,6
109	9,7344	5,3082	27,3776	44,0148	49,8361
110	13,0471	9,982	24,7118	43,0701	45,3002
111	7,6879	2,5706	31,3681	37,361	44,0232
112	7,1869	1,9185	29,0672	37,4822	43,2185
113	7,7432	3,3883	25,6042	37,76	40,8185
114	9,7123	6,6761	24,4103	37,8311	38,9822
115	12,6511	10,5285	23,2482	38,1352	37,4623
116	7,7099	1,9721	21,5879	33,8107	40,1328
117	8,1879	3,3833	20,7647	34,6893	38,1392
118	9,7027	5,6222	18,0358	34,6647	33,5574
119	12,2423	8,8967	15,4003	34,918	28,8325
120	15,4325	12,8488	15,5891	36,031	21,7761
121	10,18	4,8634	29,5183	36,3535	53,958
122	10,8903	5,9151	28,9129	36,8424	50,7852
123	8,1933	7,4529	24,7992	36,8476	41,8509
124	13,9772	11,316	17,2747	37,5701	29,5868

125	16,6542	14,0709	9,485	83,5127	15,2905
-----	---------	---------	-------	---------	---------