

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI

KATEDRA OPTIKY



**VPLYV JASU A KONTRASTU NA FOVEÁLNÝ CROWDING
A KONTÚROVÚ INTERAKCIU**

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Pavlína Krigovská

odbor 5345R008 OPTOMETRIE

študijný rok 2019/2020

VEDÚCI DIPLOMOVEJ PRÁCE:

RNDr. Mgr. František Pluháček, Ph.D.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že nasledujúcu diplomovú prácu som vypracovala samostatne pod vedením RNDr. Mgr. Františka Pluháčka, Ph.D. s použitím literatúry uvedenej na konci práce.

V Olomouci dňa 29.5.2020

.....

Bc. Pavlína Krigovská

PodĎakovanie

Touto cestou chcem poĎakovať predovšetkým vedúcemu mojej diplomovej práce RNDr. Mgr. Františkovi Pluháčkovi, Ph.D. za odborné vedenie, za čas strávený pri konzultáciách, za poskytnutie cenných rád a pripomienok, ktoré mi pri písaní práce veľmi pomohli.

Táto práca bola vytvorená za podpory projektov IGA PŘF UP v Olomouci č. IGA_PrF_2019_005 a IGA_PrF_2020_008.

Obsah

Úvod	6
1 Zraková ostrosť a jej vyšetovanie	7
1.1 Rozlišovacia zraková ostrosť	7
1.1.1 Optická rozlišovacia medza	7
1.1.2 Fyziologická rozlišovacia medza	9
1.1.3 Centrálna a periférna zraková ostrosť	10
1.2 Vyšetovanie zrakovej ostrosti	11
1.2.1 Snellenove optotypy	12
1.2.2 LogMÚR optotypy	13
1.3 Vplyv jasů a kontrastu na zrakovú ostrosť	16
1.3.1 Jas a zraková ostrosť	16
1.3.2 Kontrast a zraková ostrosť	17
2 Spracovanie svetelného signálu prostredníctvom neurónov a receptívnych polí	19
2.1 Usporiadanie sietnicových neurónov a ich vzájomné prepojenie	19
2.2. Receptívne polia	21
2.2.1 Receptívne polia gangliových buniek	21
2.2.2 Vplyv jasů na receptívne pole	24
2.3 Adaptačné procesy na úrovni fotoreceptorov	25
2.3.1 Typy videnia	25
2.3.2 Adaptačné procesy	26
3 Crowding fenomén a kontúrová interakcia	28
3.1 Crowding fenomén	29
3.1.1 Odlíšenie pojmu crowding od podobných javov	30
3.1.2 Základné charakteristiky crowdingu	31
3.1.3 Pôvod crowding fenoménu	32
3.2 Kontúrová interakcia	34
3.2.1 Základné charakteristiky kontúrovej interakcie	35
3.2.2 Pôvod kontúrovej interakcie	36
3.3 Crowding a kontúrová interakcia vo fovei a v periférii	37
3.4 Crowding a kontúrová interakcia za rôznych jasů a kontrastov	39

3.4.1 Vplyv jasú a kontrastu na kontúrovú interakciu	39
3.4.2 Vplyv jasú a kontrastu na crowding fenomén	40
4 Experimentálna štúdia vplyvu jasú a kontrastu na foveálny crowding a kontúrovú interakciu	42
4.1 Metodika výskumu	43
4.2 Analýza dát.....	45
4.3. Výsledky	46
4.4 Diskusia	52
Záver	55
Zoznam použitej literatúry.....	57

Úvod

Medzi všetkými zmyslami, ktoré nám prostredníctvom získaných informácií umožňujú pochopiť okolitý svet a efektívne v ňom fungovať, má zrak jednoznačne dominantnú pozíciu. Hoci sa do spracovania zrakového podnetu zapája značná časť mysle a mozgu, mnoho bežných situácií je riešených bez účasti kognitívnych procesov, ako napríklad prechádzanie cez cestu alebo vyhýbanie sa prekážkam, kde je aktivita obmedzená na vnem a bezprostrednú reakciu. Aj tieto zmienené situácie a iné každodenné činnosti sú ovplyvňované fyziologickými javmi ako crowding fenomén a kontúrová interakcia, ktorých skúmanie je ťažiskom tejto práce. Ku crowdingu dochádza v prípade, keď sú objekty lokalizované príliš blízko pri sebe a prvky z niekoľkých objektov sú kombinované do spoločného neusporiadaného vnemu. Crowding je komplexný jav, ktorý okrem faktoru pozornosti a fixačných pohybov očí zahŕňa vo veľkej miere aj jav kontúrovej interakcie. Tá nastáva po obklopení pozorovaného znaku kontúrami, čo môže byť v bežnom živote pozorované pri nevhodne zvolenom ohraničení značky na ceste, ktorá je v dôsledku toho ťažko rozlíšiteľná. Ukazuje sa tak, že videnie je obmedzené skôr vzájomnou vzdialenosťou objektov ako ich veľkosťou. Tieto zistenia sa samozrejme uplatňujú aj v optometrickej a oftalmologickej praxi, najmä pri vyšetrovaní zrakovkej ostrosti. Keďže správna identifikácia písmen je ovplyvnená aj okolím daného znaku, je nutné pri meraní používať štandardizované optotypy, ktoré zachovávajú stanovené parametry a zásady konštrukcie, aby nedošlo k nesprávnemu stanoveniu zrakovkej ostrosti.

Teoretická časť slúži k objasneniu základných pojmov a procesov, ktoré sú úzko späté so študovanými fyziologickými javmi, a tým spolu s experimentálnou časťou vytvára komplexný celok. V prvej kapitole je popísaná zraková ostrosť a jej meranie so zameraním sa na design jednotlivých optotypov. V závere kapitoly je zmienený vplyv jasú a kontrastu na zrakovú ostrosť. Druhá kapitola pojednáva o mechanizme spracovania obrazu prostredníctvom neurónov a receptívnych polí. Súčasne dochádza k objasneniu rôznych typov videnia a adaptačných procesov. Tretia kapitola je venovaná charakteristike crowdingu a kontúrovej interakcie. Oba javy sú najprv zadané a následne sú uvedené možné mechanizmy ich vzniku. Podstatná časť tejto kapitoly sa zaoberá popisom zmien vlastností daných fyziologických javov za rôznych jasových a kontrastných podmienok. Na teoretickú časť plynule nadväzuje časť experimentálna, ktorá skúma možné zmeny vlastností foveálneho crowdingu a kontúrovej interakcie pri znížení jasú pozadia a znížení kontrastu prezentovaného stimulu. Dôraz je tiež kladený na meranie tzv. zámenných matíc, ktoré sú analyzované v druhej časti tohto výskumu. Získané výsledky praktickej časti sú následne porovnávané s doterajšími publikovanými štúdiami, ktoré dané javy skúmali za podobných podmienok.

1 Zrková ostrosť a jej vyšetovanie

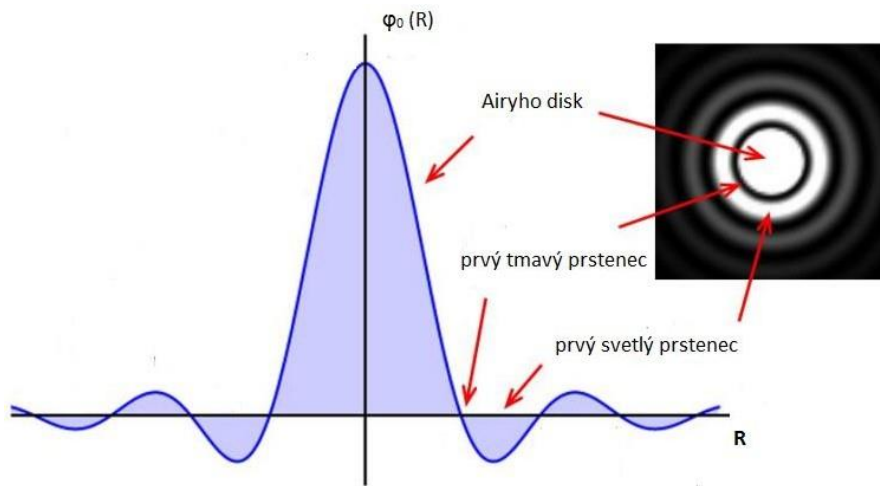
Významným a najpoužívanejším ukazovateľom zrakových schopností a predpokladov je zrková ostrosť. Zrkovú ostrosť je možné charakterizovať ako mieru schopnosti oka rozlíšiť tvary a detaily pozorovaných predmetov na určitú vzdialenosť. Je podmienená optickými a neurálnymi faktormi ako sú napríklad - funkcia sietnice (najmä foveálnych čapíkov), činnosť zrkového nervu a kôrového centra, interpretačná schopnosť mozgu, miesto podráždenia na sietnici a ďalšie. Medzi významné typy priestorovej zrakovkej ostrosti patria detekčná, lokalizačná a rozlišovacia ostrosť. Detekčná ostrosť je vyjadrená pomocou minimálnej uhlovej veľkosti predmetu, ktorý je okom ešte viditeľný, čo v zásade odpovedá prahovej intenzite rozlíšenia. Lokalizačná ostrosť vypovedá o najmenšom vzájomnom posune objektov, ktorý je ešte možné rozlíšiť. Tretím typom je rozlišovacia ostrosť, ktorá odpovedá najmenšej uhlovej vzdialenosti dvoch susedných bodov alebo línií, ktoré sú navzájom rozpoznateľné – nazývaná tiež minimum separabile. [2, 3]

1.1 Rozlišovacia zrková ostrosť

Napriek tomu, že existujú presnejšie ukazovatele, v klinickej praxi sa na určenie zrakovkej ostrosti najčastejšie využíva rozlišovací potenciál oka (vyššie zmienené ako minimum separabile). U zdravého ľudského oka je rozlišovacia schopnosť ovplyvňovaná ako optickými, tak aj fyziologickými parametrami zrkového systému – poznáme rozlišovaciu medzu optickú a fyziologickú. [5]

1.1.1 Optická rozlišovacia medza

Zrková ostrosť je ovplyvnená mnohými faktormi, medzi ktoré primárne patrí aj veľkosť zrenice (pupily), aberácie a difrakcia (ohyb). Pri rozšírenej zrenici je vplyv difrakcie síce minimálny, no rozlíšenie je ovplyvňované zostatkovými aberáciami. Problém nastáva pri malom priemere pupily (približne 2 mm), kedy je oko z fyzikálneho hľadiska výrazne zaťažené difrakciou. Monochromatické svetlo prechádzajúce kruhovou clonou (pupilou oka) sa ohýba do miesta geometrického tieňa a namiesto bodu vytvára na sietnici kruhovo symetrický difrakčný obrázok (viď obr. 1). Štruktúra tohto vzoru je špecifická striedaním maxím a miním, ktoré odpovedajú meniacej sa intenzite svetla v obrazci. Až 84 % svetla dopadá do svetlej centrálnej oblasti vzoru, ktorá je známa pod pojmom Airyho disk. [5]

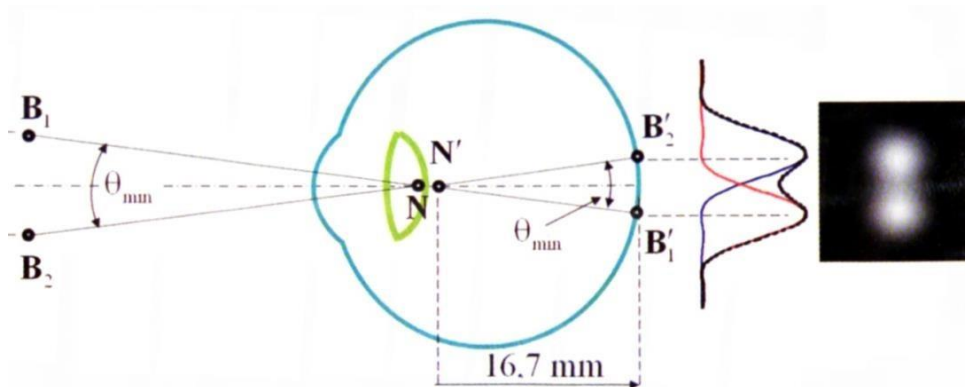


Obr. 1 – Difrakčný obrazec so svetlým centrálnym Airyho diskom obklopeným koncentrickými prstencami (φ_0 – intenzita, R - vzdialenosť od stredu); upravené podľa [12]

Na základe difrakcie je založené tzv. Rayleighovo rozlišovacie kritérium. Podľa neho sú dva monochromatické bodové zdroje od seba rozlíšené vtedy, ak centrálnе maximum intenzity obrazca jedného bodu padne do prvého minima intenzity obrazca druhého bodu (obr. 2). Ak odpovedajúci uhol rozlíšenia označíme θ_{min} , bude platiť vzťah

$$\sin \theta_{min} = 1,22 \frac{\lambda}{d},$$

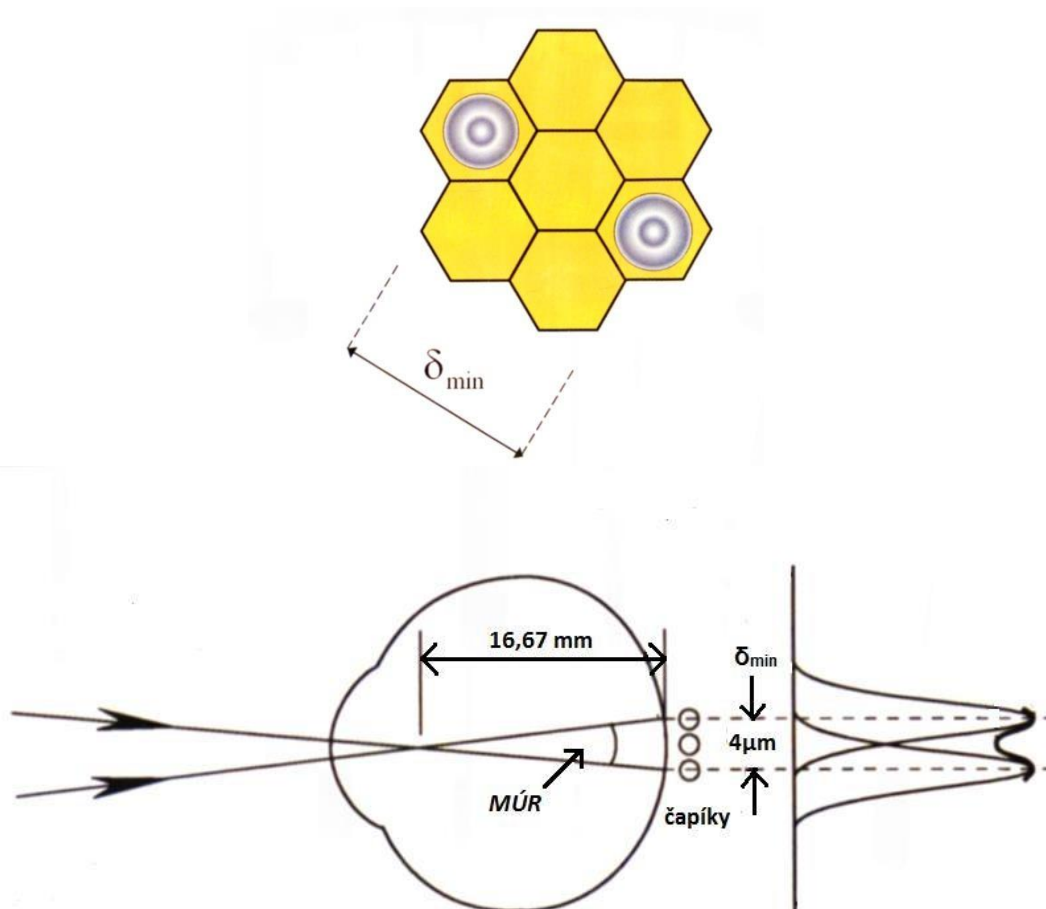
kde λ je vlnová dĺžka dopadajúceho svetla a d priemer pupily. S rastúcou vlnovou dĺžkou, resp. so zmeňujúcim sa priemerom zrenice, schopnosť rozlíšiť dva body klesá. Pre strednú vlnovú dĺžku $\lambda = 550 \text{ nm}$ je uhol rozlíšenia θ_{min} pre 2mm pupilu 69", zatiaľ čo pre 8mm pupilu 17". [5, 8]



Obr. 2 – Dvojbodová rozlišovacia medza (B_1, B_2 a B'_1 a B'_2 - monochromatické bodové zdroje a im odpovedajúce difrakčné krúžky, θ_{min} - minimálny rozlišovací uhol podľa Rayleighovho kritéria); upravené podľa [5]

1.1.2 Fyziologická rozlišovacia medza

Z fyziologického hľadiska je možné od seba rozlíšiť dva body (resp. bodové zdroje) v prípade, že medzi ich rozptylovými krúžkami na sietnici ostane jeden nepodráždený čapík. Vzďialenosť stredov ich sietnicových obrazov v tom prípade odpovedá efektívnej vzdialenosti medzi stredmi čapíkov, ktorá predstavuje 4 – 4,5 μm . Tejto požiadavke približne odpovedá uhlová vzdialenosť pozorovaných bodov rovná 1', vid' obr. 3. Táto hodnota je pri meraní zrakovej ostrosti považovaná za referenčnú. Všeobecne je daný uhol označovaný ako minimálne uhlové rozlíšenie oka ($MÚR$). [5]



Obr. 3 – Hore vzdialenosť stredov čapíkov (δ_{min}), dole odvodenie fyziologického limitu rozlíšenia oka $MÚR$; upravené podľa [5, 8]

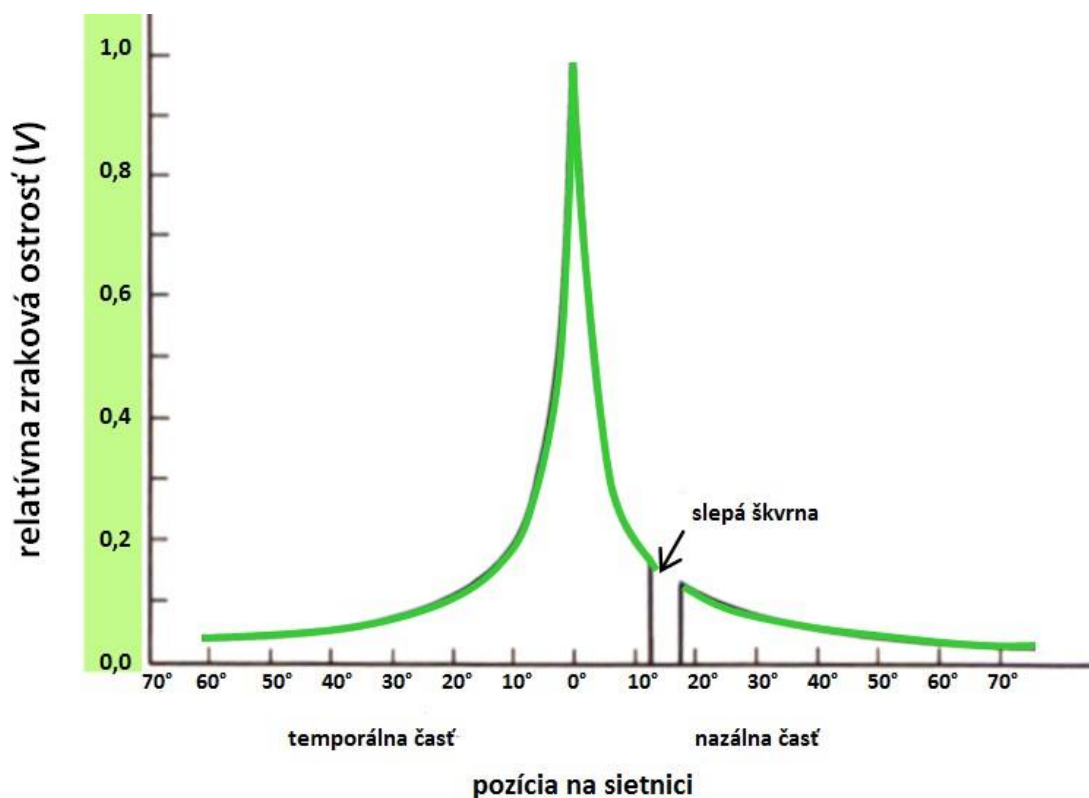
Zraková ostrosť je obvykle číselne popisovaná prostredníctvom relatívnej veličiny označovanej vízus V , ktorá v sebe zahŕňa porovnanie konkrétnej hodnoty $MÚR$ s referenčnou hodnotou 1',

$$V = \frac{1'}{MÚR [']}$$

Vzhľadom k logaritmickému charakteru ľudského zmyslového vnímania býva namiesto $MÚR$ v odborných štúdiách a pri presných meraniach použitý dekadický logaritmus, tj. $\log MÚR$. Z uvedeného vzťahu je zrejmé, že s klesajúcim $MÚR$ zraková ostrosť rastie. Záleží pritom na hustote a zapojení fotoreceptorov v danom mieste sietnice, samozrejme popri iných nevyhnutných faktoroch akými sú zdatnosť optického aparátu oka, priehľadnosť, intenzita osvetlenia a neporušená zraková dráha. $MÚR$ dosahuje najnižšiu hodnotu vo fovea centralis, kde je hustota receptorov (čapíkov) najvyššia a ich následné prepojenie na bipolárne a gangliové bunky je v pomere 1:1. [1, 6, 7]

1.1.3 Centrálna a periférna zraková ostrosť

Keď sa hovorí o zrakovaj ostrosti, najčastejšie je myslená práve foveálna (centrálna) zraková ostrosť. O tú sa jedná v prípade, kedy je pozorovaný predmet (napr. písmeno na optotype) fixovaný foveou. Centrálna časť fovey – fovea centralis – neobsahuje tyčinky, ale je charakteristická veľkou koncentráciou čapíkov, z ktorých každý jeden má vlastné nervové vlákno vedúce až do mozgovej kôry (viď 2.1). [4]

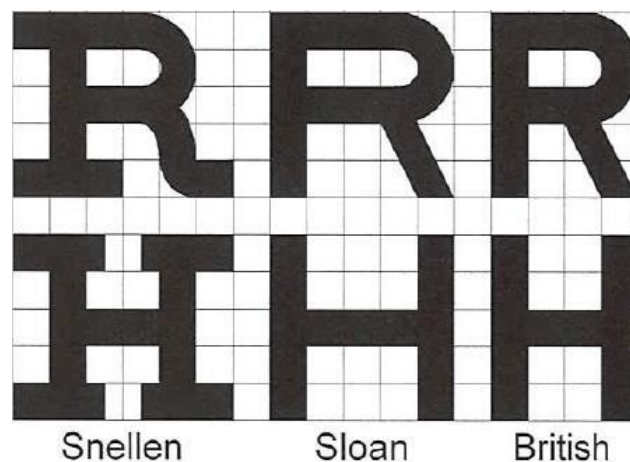


Obr. 4 – Zmena zrakovaj ostrosti v rámci sietnice (v meridiáne cez optický disk); upravené podľa [8]

Za rozlišovaciu schopnosť oka zodpovedajú predovšetkým čapíky, pričom dôvodom nie je ich štruktúra. Zraková ostrosť závisí najmä na veľkosti receptívnych polí (viď 2.2.1) a s tým súvisiacou mierou konvergence svetelného signálu. Všeobecne platí, že väčšia miera konvergence (typická pre perifériu sietnice) znižuje schopnosť rozlišovať detaily, pretože spojenie informácií z väčšej časti zorného poľa (tj. z väčšieho množstva fotoreceptorov) do jednej gangliovej bunky a jedného nervového vzruchu znemožňuje spätné dohľadanie miesta v priestore, z ktorého informácia prišla. Je teda samozrejmé, že rozlišovacia schopnosť od centra foveoly smerom do periférie výrazne klesá (viď obr. 4). [6, 7, 17]

1.2 Vyšetrovanie zrakovej ostrosti

Vyšetrovanie zrakovej ostrosti sa rutinne používa pri screeningu refrakčných chýb, pre sledovanie vývoja v priebehu terapie očných chorôb a na stanovenie zrakovej ostrosti pre účely overenia schopnosti vykonávať určité povolania, či viesť motorové vozidlá. Najčastejšie prebieha za štandardnej vzdialenosti 5 alebo 6 m od optotypu, kedy je akomodácia menšia než 0,25 D [2]. Existujú rôzne spôsoby testovania zrakovej ostrosti. V klinickej praxi sa využívajú najmä testy pozostávajúce zo znakov, ktoré vyšetrovaný pozoruje najčastejšie, a ktorých rozpoznanie či nerozpoznanie je ľahko detekovateľné. Tieto testy, tzv. optotypy obsahujú vybrané znaky o rôznej veľkosti, na základe čoho umožňujú posúdiť rozlišovaciu schopnosť, a teda zrakovú ostrosť (tj. rozlíšenie najmenšieho detailu písmena a rozpoznanie jeho tvaru) [5, 18]. Medzi znaky používané na optotypoch patria Landoltove prstence, E-háky, Pflügerove háky, obrázky, ale najčastejšie sa jedná o písmená. K nim patria najmä Sloan alebo British letters (bezpätkové), oproti dnes len zriedkavo používaným Snellenovým písmenám (s pätkami). Odlišnosti jednotlivých typov písmen vo vzhľade a vo veľkosti mriežky, do ktorej sú vpísané, sú doplnené v obr. 5. [11]



Obr. 5 - Rôzna konštrukcia znakov na optotype; upravené podľa [3]

1.2.1 Snellenove optotypy

Názov týchto optotypov sa spája s menom nemeckého oftalmológa profesora Hermanna Snellena. Pôvodné optotypy pozostávali zo siedmich riadkov, z ktorých každý obsahoval niekoľko písmen rovnakej veľkosti, pričom v každom rade bola veľkosť písmen vždy o niečo menšia než v predchádzajúcej úrovni (viď obr. 6). Na konci každého radu býva uvedené číslo vyznačujúce počet metrov, z ktorých by ešte malo oko o víze 1 dotýčny rad prečítať. Detail písmena je rovný 1/5 jeho výšky. Pri vyšetrení pozoruje pacient optotypy z vyššie spomínanej vzdialenosti a číta každým okom zvlášť jednotlivé znaky od najväčších až po tie, ktoré ešte dokáže bezchybne identifikovať. Za identifikované riadky sa považujú také, ktoré boli subjektom správne prečítané aspoň zo 60 %, teda pokiaľ boli rozpoznané typicky minimálne 3 z 5 znakov na jednom riadku. Z definície vízu a vlastností optotypu sa dá odvodiť, že platí

$$V = \frac{\text{vyšetrovacia vzdialenosť}}{\text{číslo riadku}}.$$

Napríklad zrková ostrosť 6/12 znamená, že vyšetovaná osoba zo štandardnej vyšetrovacej vzdialenosti 6 m je schopná ešte rozpoznať znaky, ktoré by normálne oko o víze 1 rozpoznalo zo vzdialenosti 12 m. Okrem tvaru zlomku je možné zrkovú ostrosť vyjadriť aj v decimálnych hodnotách - napríklad štandardný vízus 6/6 odpovedá decimálnej hodnote 1,0. [2, 5, 9, 14]

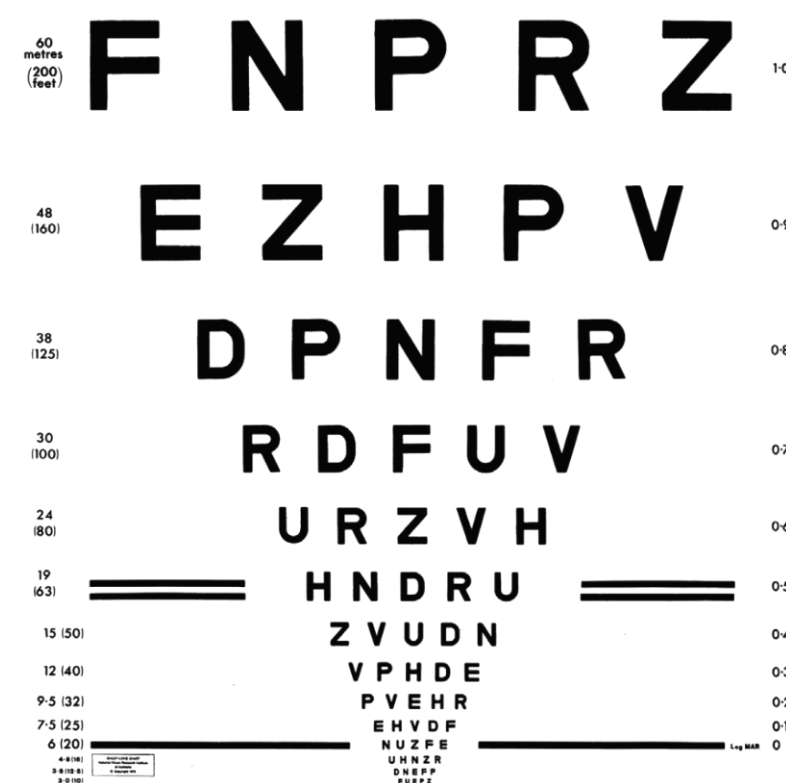


Obr. 6 - Pôvodný Snellenov optotyp [1]

Klasická Snellenova konštrukcia optotypu má viacero nevýhod. Medzi hlavné zápory patrí nerovnomerný počet znakov v každom riadku, nepravidelné medzery medzi písmenami a riadkami, nejednotná postupnosť zvyšovania veľkosti písmen a ďalšie nevýhody súvisiace s konštrukciou, či použitými znakmi na optotype. [10]

1.2.2 LogMÚR optotypy

V posledných rokoch boli Snellenove optotypové tabuľky revidované a postupne nahrádzané modernými (tzv. logaritmicnými) optotypmi podľa konštrukcie, ktorú navrhli Ian L. Bailey a Jan E. Lovie-Kitchin (viď obr. 7). Ich návrh optotypu rešpektuje vyššie zmienený logaritmický charakter zrakového vnímania a ďalšie podstatné javy. V praxi sa tiež vyskytujú rôzne modifikácie týchto optotypov, napríklad tzv. ETDRS optotypy (viď obr. 8). [11, 18]



Obr. 7 - Bailey-Lovie optotyp. LogMÚR optotyp pozostávajúci z písmen British Standard 5x4 určený pre štandardnú testovaciu vzdialenosť 6 m. [11]



Obr. 8 – ETDRS optotyp (tabuľa 1) [18]

Konštrukcia logaritmických optotypov vychádza z niekoľkých charakteristických princípov. Na každom riadku $\log MÚR$ optotypu je rovnaký počet písmen (zväčša 5), ktoré oddeľuje medzera o veľkosti šírky jedného znaku. Vzďialenosť medzi jednotlivými riadkami odpovedá výške písmen nižšieho radu. Ak by boli písmená blízko pri sebe, problémom by sa stalo ich vzájomné rozlíšenie (viď kapitola 3 pojednávajúca o crowdingu a kontúrovej interakcii). Jednotlivé riadky vykazujú geometrický progres veľkosti znakov, pričom dva susedné riadky sa vždy líšia o kvocient $q = 1,2589$, ktorý po prepočte odpovedá konštantnej zmene o $0,1 \log MÚR$. [2, 6]

Optotypy pozostávajú zo 14 riadkov s rozsahom od $\log MÚR = 1$ (čomu odpovedá minimálny uhol rozlíšenia $10'$) až po $\log MÚR = -0,3$ ($MÚR = 0,5'$), tj. od vízu 0,1 po jeho hodnotu 2 (viď tab. 1). Vysokú presnosť a precíznosť určenia zrakovej ostrosti pomocou daných optotypov je možné dosiahnuť zohľadnením jednotlivých prečítaných písmen. Keďže odstup jedného normalizovaného riadku odpovedá hodnote $0,1 \log MÚR$ a každý riadok disponuje 5 písmenami, každému písmenu je priradená hodnota $0,02 \log MÚR$. Ak osoba správne identifikovala všetky písmená na riadku $0,3 \log MÚR$ a potom ďalšie dve písmená na riadku $0,2 \log MÚR$, výsledná zrková ostrosť by mala hodnotu $0,26$. Podstatné je si uvedomiť, že čím je hodnota $\log MÚR$ nižšia, tým lepšiu zrkovú ostrosť pacient vykazuje, teda za každé správne rozlíšené písmeno je hodnota $0,02 \log$ jednotiek odpočítavaná. Týmto sa poskytuje škála, ktorá je päťkrát jemnejšia, ako by bol výsledok merania po jednotlivých riadkoch. [2, 6, 8]

Tab. 1 – Možnosti zápisu vízu; upravené podľa [19]

<i>MÚR</i>	<i>logMÚR</i>	Snellenov zlomok	desatinné číslo
0,5	-0,3	6/3	2,0
0,63	-0,2	6/3,8	1,6
0,8	-0,1	6/4,8	1,25
1,0	0	6/6	1,0
1,25	0,1	6/7,5	0,8
1,60	0,2	6/9,5	0,63
2,0	0,3	6/12	0,5
2,5	0,4	6/15	0,4
3,2	0,5	6/19	0,32
4,0	0,6	6/24	0,25
5,0	0,7	6/30	0,2
6,3	0,8	6/38	0,16
8,0	0,9	6/48	0,125
10	1,0	6/60	0,1

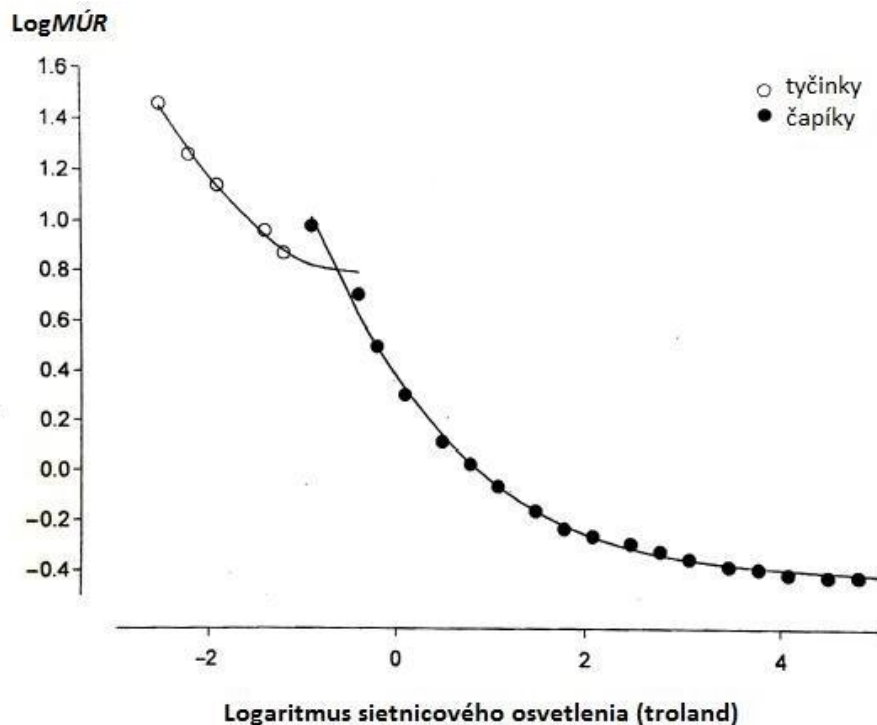
Okrem vyššie spomínaných zásad a kritérií potrebných pre zostavenie optotypov je nutné prihliadať ešte na jeden faktor – čitateľnosť jednotlivých znakov. Aj pri štandardnom formáte a rovnakej veľkosti písmen existujú písmená, ktoré sú ťažšie identifikovateľné ako iné. Okrem vlastnej čitateľnosti je podstatná aj zameniteľnosť niektorých skupín znakov. Oba tieto javy sú významne ovplyvnené kontúrovou interakciou a crowdingom, a je možné ich sledovať pomocou tzv. zámenných matíc, ktoré sú bližšie popísané v experimentálnej časti práce. Na základe týchto poznatkov boli navrhnuté sady písmen, ktoré rešpektujú určité kritériá – v jednom riadku majú podobnú priemernú čitateľnosť a obsahujú rovnaký počet zameniteľných párov. [3]

1.3 Vplyv jasů a kontrastu na zrakovú ostrosť

Každý z nás už zažil situáciu, kedy boli zrakové činnosti, ako napríklad čítanie, výrazne zhoršené za nízkych jasových podmienok. Aj na základe toho môžeme usudzovať, že hladina jasů je jedným z faktorov, ktoré viac či menej ovplyvňujú zrakovú ostrosť. [3]

1.3.1 Jas a zraková ostrosť

Za fotopických podmienok (viď 2.3.1) a súčasne za zvyšovania osvetlenia sietnice sa zraková ostrosť spočiatku rapídne zlepší, no neskôr je toto zlepšenie už len pozvoľné. Maximum je dosiahnuté vo fovei, kde je najvyššia koncentrácia čapíkov [3, 17]. Podobne za skotopických podmienok, kedy sú aktívne tyčinky, dochádza s rastúcim jasom k zlepšeniu zrakovej ostrosť až na $510'$ ($0,7 - 1,0 \log MÚR$). V tomto prípade sa jedná o periférnu zrakovú ostrosť, pretože fovea obsahuje predovšetkým len čapíky, ktoré sú za skotopických podmienok neaktívne (môžeme pozorovať fyziologický centrálny skotóm [7]). Klinicky sa odporúča merať zrakovú ostrosť pri dostatočne vysokých jasoch (približne 100 cd/m^2), kedy už malé zmeny osvetlenia miestnosti či rozdielna veľkosť pupily od pacienta k pacientovi nemajú významný vplyv na výsledok. Závislosť zrakovej ostrosť na retinálnom osvetlení je zobrazená na obr. 9. [3]



Obr. 9 – Zraková ostrosť ako funkcia retinálneho osvetlenia pre tyčinky (v periférii) a čapíky (prvé štyri hodnoty sú merané parafoveálne, ostatné foveálne); upravené podľa [3]

Rabin prostredníctvom svojho výskumu [58] sledoval vplyv jasú na zrakovú ostrosť a kontrastnú citlivosť (vid' nižšie). Pri znížení jasových podmienok bol u oboch javov zaznamenaný pokles, no jeho efekt bol u každého javu iný. Redukcia jasú z hodnoty 116 cd/m² na 0,23 cd/m² vyvolala 3-násobný pokles zrakovej ostrosti, no až 17-násobný pokles kontrastnej citlivosti. Každé dvojnásobné zníženie jasú malo za následok redukciu zrakovej ostrosti o 10 % (zhoršenie približne o dve písmená na optotype) a redukciu kontrastnej citlivosti o 40 % (zhoršenie o 1,5 riadku na optotype). Hoci sa preukázalo, že jas má omnoho väčší vplyv na kontrastnú citlivosť, je zrejmé, že aj v prípade zrakovej ostrosti zohráva významnú úlohu.

Existuje viacero štúdií, ktoré sa zaoberali vzťahom medzi zrakovou ostrosťou a mezopickým jasom, ktorý je vďaka zachovanej funkcii čapíkov aj tyčiniek, a vďaka zachovanému centrálnemu videniu možné považovať za špecifický. Johnson a Casson [59] potvrdili, že s klesajúcim jasom pozadia dochádza k redukcii zrakovej ostrosti. Pôsobením viacerých faktorov súčasne (znížený jas a znížený kontrast) sa preukázal aditívny účinok pri poklese zrakovej ostrosti, ktorá sa znížila omnoho viac, ako pri pôsobení len jedného faktoru. Wood a Owens [60] využili meranie zrakovej ostrosti a kontrastnej citlivosti za znížených jasových podmienok k tomu, aby zistili, či je možné na ich základe odhadnúť rozlišovaciu schopnosť vodičov za reálnych podmienok (jazda za denného svetla a v noci). Potvrdil sa fakt, že u všetkých vekových skupín, no najmä u starších ľudí, dochádza k redukcii zrakovej ostrosti za znížených jasových podmienok, teda aj pri vedení vozidla v noci. Zistilo sa tiež, že fotopická kontrastná citlivosť poskytuje lepší predpoklad rozlišovacej schopnosti vodiča počas jazdenia (najmä za nočných podmienok) ako zrková ostrosť. Čo sa týka mezopického jasú, existujú faktory, ktoré môžu prispievať k zhoršeniu zrakových funkcií - napríklad sférická aberácia, veľkosť pupily, fotónový šum či neurálne účinky, no najväčší vplyv predstavovala úroveň jasú a chyba akomodácie. [61]

1.3.2 Kontrast a zrková ostrosť

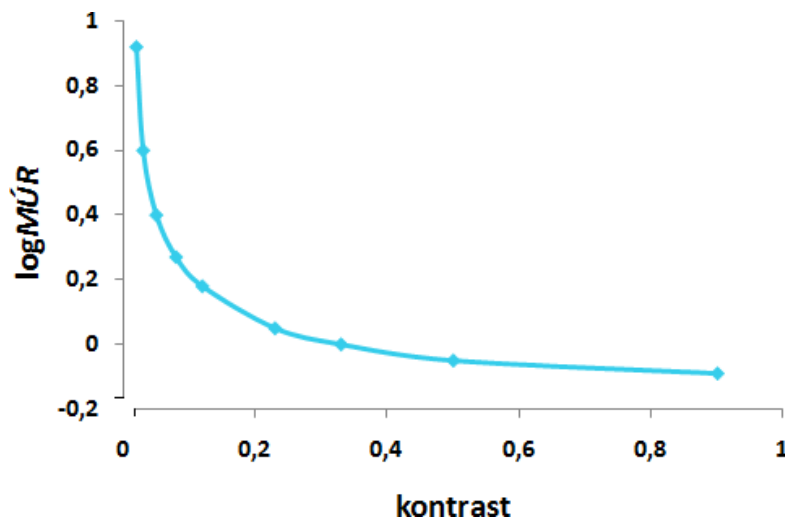
Podobne ako u jasú, aj pri redukcii kontrastu dochádza k zhoršeniu centrálnej zrakovej ostrosti. Pod pojmom kontrast rozumieme relatívny rozdiel dvoch jasov (jas objektu oproti jasú pozadia). Kontrast (C) aperiodického objektu (napr. písmena optotypu; tzv. Weberov kontrast) je definovaný vzťahom

$$C = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max}},$$

kde L_{\max} predstavuje jas pozadia a L_{\min} odpovedá jasú písmen. Kontrast dosahuje hodnoty v rozmedzí $0 \leq C \leq 1$, ale často býva vyjadrený percentuálne. Podľa odporúčania British Standard je hodnota minimálneho kontrastu 0,9. Súvisiacimi

veličinami sú kontrastná citlivosť a kontrastný prah. Ten predstavuje najnižšiu hodnotu kontrastu dvoch jasov, pri ktorej ich ešte dokážeme od seba odlíšiť. Kontrastná citlivosť je definovaná ako prevrátená hodnota kontrastného prahu. [8, 44]

Z obr. 10 je zrejmé, že pri malom poklese kontrastu si zraková ostrosť zachováva spočiatku pomerne dobré hodnoty, a jej výrazné zníženie je viditeľné až keď kontrast prekročí hodnotu 0,2. S ďalším klesaním sa zraková ostrosť postupne zhoršuje. [3]



Obr. 10 – Závislosť zrakovej ostrosti na meniacom sa kontraste; upravené podľa [3]

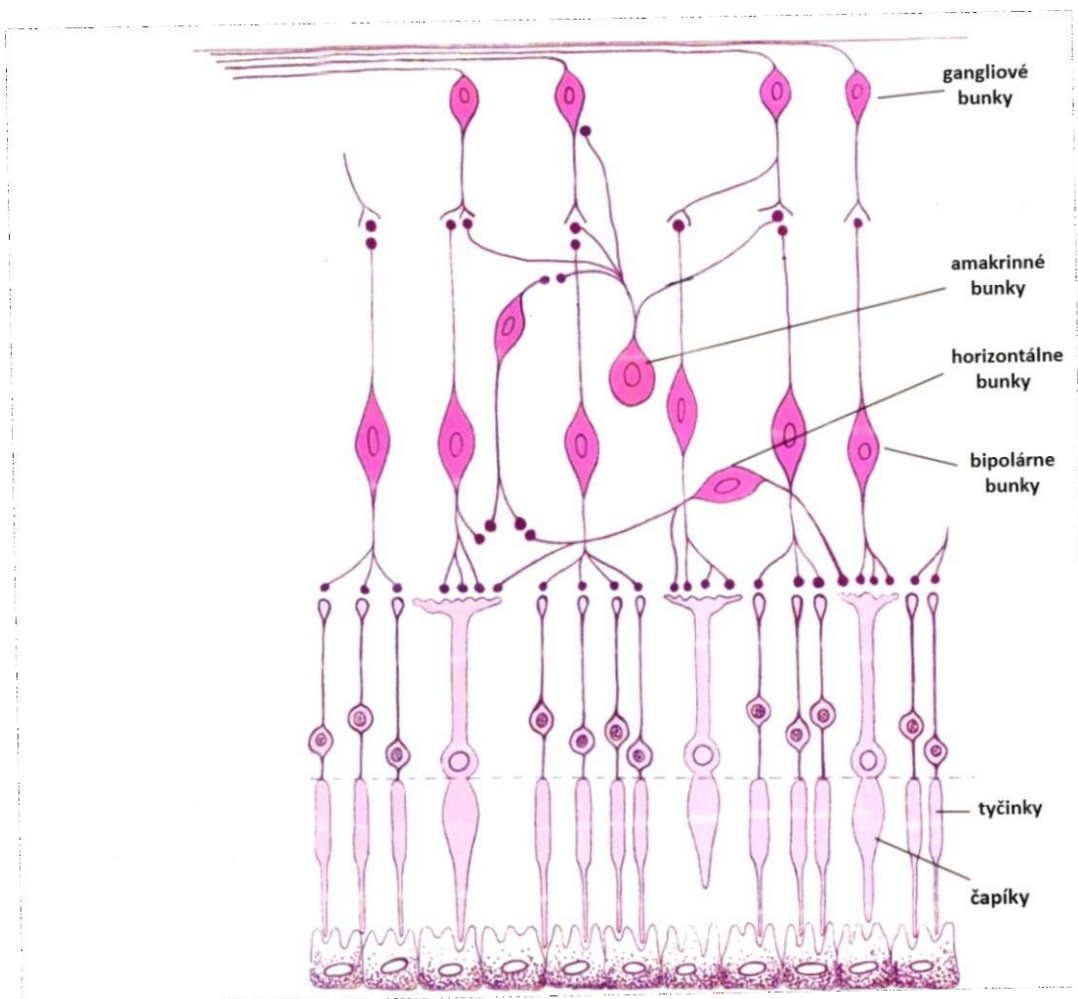
Napriek tomu, že je vo všeobecnosti náročné porovnať zistenia ohľadom zrakovej ostrosti naprieč rôznymi štúdiami, kde sú použité rozdielne úrovne jasov a rozdielne stimuly, Lin a kol. [61] našli podobnosť medzi zmenou zrakovej ostrosti za rôznych kontrastných a rôznych jasových podmienok. Rozdiel 0,21 logMÚR (viac ako 2 riadky na optotype) medzi zrakovou ostrosťou za vysokého a nízkeho kontrastu vo výskume [62] je podobný rozdielu 0,24 logMÚR medzi fotopickou a mezopickou (0,75 cd/m²) zrakovou ostrosťou v štúdiu [61]. Zmeny v zrakovej ostrosti medzi vysokým (HCDVA) a nízkym (LCDVA) kontrastom stimulov meranej na diaľku boli zaznamenané nie len autormi spomenutej štúdie [62], ale aj mnohými ďalšími. Brown a Lovie-Kitchin (1989) zaznamenali zmenu LCDVA o 2,5 riadku oproti HCDVA u nekorigovanej populácie vo veku 14 až 74 rokov. Wood a Bullimore zistili rozdiel zrakových ostrotí o hodnote 0,2 logMÚR u pacientov s optimálnou korekciou. Predpokladá sa, že dôvodom týchto rozdielov medzi HCDVA a LCDVA je rozptyl v očnom médiu alebo neurálne straty kontrastnej citlivosti na sietnici, či centrálnejšie. [62]

2 Spracovanie svetelného signálu prostredníctvom neurónov a receptívnych polí

Spracovanie zrkovného signálu neprebíha až v kôrovom centre mozgu, ale v rozličnej miere k nemu dochádza v rôznych častiach zrkovnej dráhy v rámci tzv. receptívnych polí (RP) neurónov. Tie sa v rôznych častiach zrkovnej dráhy podieľajú na detekcii a integrácii svetelných, či nervových signálov, pričom spôsob spracovania daných zrkovných informácií sa pre každý typ receptívneho poľa v niečom líši. Ich funkcia je tiež ovplyvnená jasom pozorovanej scény. Okrem toho RP úzko súvisia s javmi skúmanými v experimentálnej časti tejto práce – crowdingom a kontúrovou interakciou. Teória založená na receptívnych poliach je najčastejšie uvažovanou možnosťou pri skúmaní pôvodu daných fyziologických javov. V nasledovných podkapitolách sa preto ozrejmia ich vlastnosti, štruktúra a chovanie za rôznych jasových podmienok.

2.1 Usporiadanie sietnicových neurónov a ich vzájomné prepojenie

Sietnicu tvorí niekoľko vrstiev funkčne špecializovaných buniek. Najhlbšia vrstva obsahuje svetlocitlivé bunky – fotoreceptory, ktoré pohlcujú častice svetla a pomocou série fotochemických procesov premieňajú svetelnú energiu na nervový vzruch. Strednú vrstvu tvoria predovšetkým bipolárne bunky spolu s horizontálnymi a amakrinnými bunkami, ktoré sú ďalej bližšie špecifikované. Výstupnými neurónmi sú gangliové bunky, ktoré tvoria vnútornú vrstvu sietnice. Ich axóny sa na sietnici spájajú a vytvárajú zrkovný nerv, ktorý vedie nervový vzruch cez chiasma opticum a tractus opticus do corpus geniculatum laterale, a ďalej optickou radiáciou do primárnej zrkovnej kôry (V1) a vyšších zrkovných centier v mozgu. Jednotlivé vrstvy sú vzájomne prepájané synapsiami nervových vlákien. Okrem vertikálnych prepojení naprieč sietnicou má veľký význam pre tvorbu RP a výsledného vnemu taktiež horizontálne spojenie jednotlivých neurónov. V horizontálnom smere sú neuróny prepájané prostredníctvom horizontálnych a amakrinných buniek, konkrétne spojenie medzi fotoreceptormi a bipolárnymi bunkami zabezpečujú horizontálne bunky, zatiaľ čo amakrinné bunky tvoria následné prepojenie bipolárnych a gangliových buniek. Tieto spojenia umožňujú modifikáciu výslednej správy, ku ktorej dôjde vzájomným ovplyvnením viacerých signálov z rôznych častí sietnice. Predpokladá sa, že amakrinné bunky zosilňujú signály pri slabom osvetlení a niektoré typy amakrinných buniek majú dôležitú úlohu pri modulácii adaptácie sietnice na rôzne svetelné podmienky. Prepojenia jednotlivých neurónov sú zobrazené na obr. 11. [8, 16, 17]



Obr. 11 – Retinálne bunky a synapsie; upravené podľa [16]

Odhaduje sa, že počet fotoreceptorov dosahuje hodnotu viac ako 120 miliónov, ale počet gangliových buniek sa pohybuje iba okolo 1 milióna. Tento nepomer vyplýva zo známych faktov, ktoré hovoria o tzv. konvergencii fotoreceptorov na jednotlivé bipolárne bunky a ďalej na bunky gangliové. Z toho plynie, že jedna gangliová bunka môže byť napojená na viacero tyčiniek a čapíkov v periférii, pričom vždy prevažuje konvergencia tyčiniek v porovnaní s čapíkmi. Pomer tyčiniek ku gangliovým bunkám je vo viacerých oblastiach sietnice vysoký, čo zabezpečuje vysokú citlivosť na detekciu svetla a pohybu. Odhaduje sa, že až 75 000 tyčiniek sa napája na 5000 bipolárnych a 250 amakrinných buniek pred tým, ako konverguje na 1 gangliovú bunku. K tomuto dochádza predovšetkým v periférii sietnice. Na rozdiel od toho je len veľmi malé množstvo čapíkov napojené na bipolárnu bunku a malý počet bipolárnych buniek vyúsťuje k jednej gangliovej bunke. V niektorých prípadoch, najmä v oblasti fovey, dosahuje pomer medzi čapíkmi a gangliovými bunkami hodnotu 1:1, čo poukazuje na významné množstvo detailov, ktoré dokážu čapíky rozlíšiť. Predpokladom pre

spomínanú konvergenciu a následné vedenie, či spracovanie zrkového signálu je charakteristické rozmiestenie tyčínok a čapíkov na sietnici. Ako už čiastočne vyplýva z predošlého textu, najväčšiu koncentráciu čapíkov je možné zaznamenať v centrálnej časti retiny (fovea centralis), približne 1 mm od fovey sa počty oboch typov fotoreceptorov vyrovnajú, a s rastúcou vzdialenosťou sa zvyšuje prevaha tyčínok až k pomeru 50:1 na periférii sietnice. Úplná absencia fotoreceptorov je zaznamenaná nazálne od makuly, v oblasti, kde sa zbiehajú axóny gangliových buniek a vytvárajú zrkový nerv. [8, 16, 17]

2.2. Receptívne polia

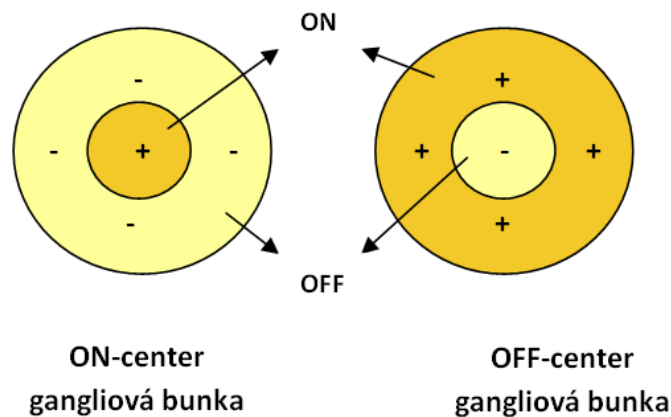
Doposiaľ najviac poznatkov o mechanizme vnímania a spracovania zrkových informácií bolo získaných štúdiom receptívnych polí neurónov jednotlivých etáží zrkovej dráhy a zrkového kortexu. Receptívnym poľom (RP) rozumieme oblasť zorného poľa alebo oblasť sietnice, ktorej svetelným podráždením môže dôjsť k vyvolaniu vzrastu alebo útlmu elektrickej aktivity študovaného sietnicového neurónu. Ako už z predchádzajúcej vety vyplýva, existuje viacero priestorových tvarov receptívnych polí, ktoré sa líšia na základe neurónov, ktorým prislúchajú. Prvotné jednoduché receptívne polia patria fotoreceptorom, ktoré sa následne priamo, či nepriamo spájajú s bipolárnymi bunkami. Receptívne polia bipolárnych buniek sú po štruktúrálnej a funkčnej stránke podobné receptívnym poliám gangliových buniek, ktoré budú v nasledujúcom popise fungovania RP považované za prototyp (predstaviteľa). [9, 16]

2.2.1 Receptívne polia gangliových buniek

Receptívne polia gangliových buniek (GB) sú kruhové a majú rozdielnu veľkosť. U gangliových buniek typu X (80 % GB) sú receptívne polia veľmi malé, pretože bývajú koncentrované vo foveálnej oblasti a prijímajú signály z menšieho počtu fotoreceptorov. Majú stredne veľké telo a úzky dendritický strom. Zaisťujú detailnú štruktúrálnu a farebnú analýzu pozorovaného objektu. Podstatne väčšie sú RP gangliových buniek typu Y (tvoria 10 % všetkých GB), ktoré sa vyznačujú veľkým telom a rozsiahlym dendritickým vetvením. Vyskytujú sa častejšie v periférii sietnice a sú zodpovedné za detekciu lokalizácie a pohybu predmetu v priestore. Existuje aj tretí typ GB (tzv. W-bunky), ktorý reaguje na smer pohybu, ale ten nie je nutné bližšie špecifikovať. [9, 15]

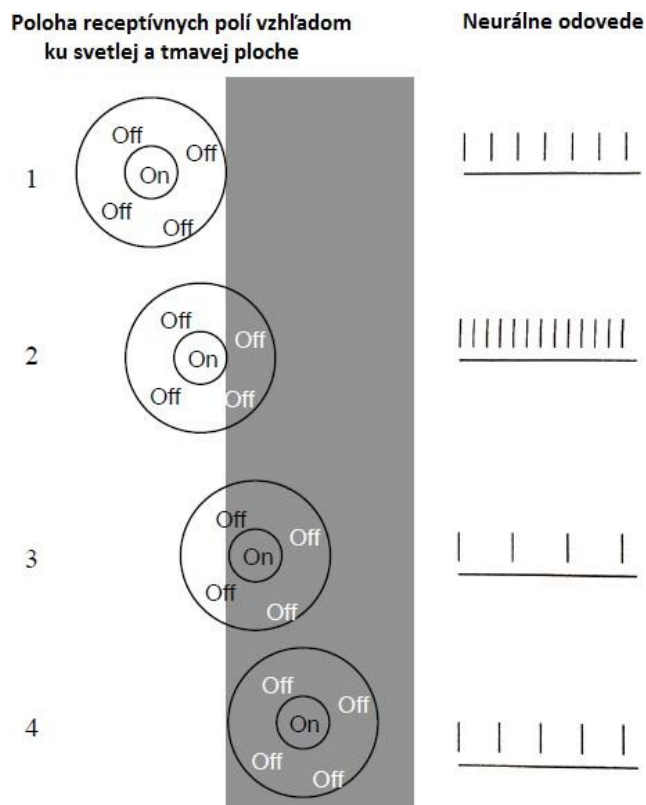
Receptívne pole buniek nie je homogénne, ale pozostáva z koncentricky usporiadanej centrálnej a periférnej zóny (viď obr. 12). Toto usporiadanie je

v literatúre tiež nazývané ako center-surround receptívne pole. Charakteristickou črtou je antagonistická odpoveď na svetelný podnet, tj. jedna časť RP aktivitu bunky zvýši a druhá ju zase inhibuje. Protikladná reakcia RP zvyšuje vnímanie kontrastu zrakových podnetov – na rozhraní tmavej a svetlej plochy sa tmavá strana javí tmavšia a svetlá svetlejšia. V zásade rozlišujeme 2 typy týchto koncentrických receptívnych polí, a to bunky s on-centrom (off-perifériou) alebo naopak s off-centrom (on-perifériou). Centrum je vytvárané priamym spojením fotoreceptorov s bipolárnymi bunkami. Antagonistická periférna zóna je tvorená nepriamym spojením medzi fotoreceptormi a bipolárnymi bunkami, ktoré prebieha prostredníctvom horizontálnych buniek v rámci vonkajšej plexiformnej vrstvy. Za funkčnú organizáciu gangliových RP zodpovedajú teda najmä horizontálne bunky, ktoré „prevracajú“ informácie z fotoreceptorov v periférii RP a prenášajú ich na receptory centra. Ak svetelný stimul dopadne na stred receptívneho poľa gangliovej bunky s on-centrom, dochádza ku vzrastu jej tonickkej aktivity; osvetlenie periférie receptívneho poľa svetelnou škvrnou alebo prstencom spôsobí naopak inhibíciu elektrickej aktivity. Bunky s off-centrom reagujú presne opačne: osvit centra vedie k útlmu (inhibícii) bunky a osvetlenie periférie vedie naopak ku zvýšeniu frekvencie generovaných akčných potenciálov. [3, 15]



Obr. 12 - Antagonistické usporiadanie receptívnych polí gangliových buniek s ON- a OFF-centrom

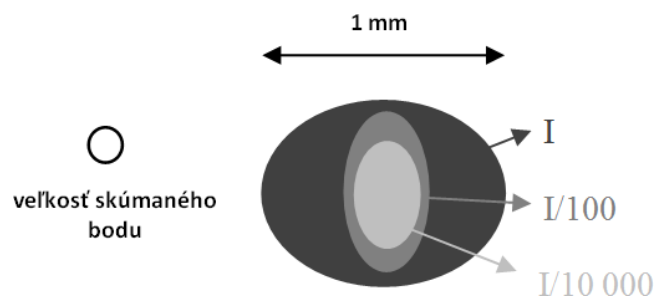
Rovnomernou stimuláciou celej plochy receptívneho poľa nedochádza k výraznej zmene aktivity bunky, čo znamená, že gangliové bunky neslúžia ako detektory jasů, ale sú vnímavé na kontrast. Najúčinnnejším stimulom pre gangliové bunky sietnice je výrazne kontrastný svetelný podnet, ktorý svojou veľkosťou odpovedá šírke centra alebo periférie RP. Táto výrazná zmena v intenzite, napríklad na rozhraní svetla a tmy, je charakteristická pre rozlíšenie hrán objektov. Príklad reakcií gangliovej bunky na osvetlenie rôznych častí jej receptívneho poľa uvádza obr. 13. [3, 8, 9]



Obr. 13 – On-centrum receptívne polia gangliových buniek sietnice v rôznych pozíciách voči hranici svetlej a tmavej plochy; upravené podľa [3]

Aj neuróny vo vyšších centrách zrakovej dráhy majú receptívne polia charakteristické inhibičnými a excitačnými zónami, podobne ako je to u RP gangliových buniek. Dá sa povedať, že RP buniek nachádzajúcich sa ďalej v zrakovej dráhe sú výsledkom kombinácie vlastností receptívnych polí gangliových buniek. Tie je tak možné považovať za stavebný kameň, či zjednodušený prototyp, čo sa funkcie aj štruktúry týka, pre receptívne polia buniek vo vyšších nervových centrách (napr. pre genikulátové bunky a drobné hviezdicovité neuróny v dolnej časti IV. vrstvy primárnej zrakovej kôry). Významný rozdiel je pozorovaný v ich tvare, ktorý sa postupom k ďalším centrách v zrakovej dráhe mení na zložitejší. Veľkú rolu pritom zohrávajú svetelné podnety v tvare pruhov a uhlov, no taktiež ich dĺžka, osová orientácia a smer pohybu. [15]

Vo všeobecnosti je známe, že veľkosť receptívnych polí od centra do periférie sietnice narastá, hoci v ktorejkoľvek oblasti existuje široká škála prekrývajúcich sa receptívnych polí rôznych veľkostí. Veľkosť receptívnych polí sa mení tiež s intenzitou stimulu. Obr. 14 ukazuje, ako sa receptívne pole samostatnej gangliovej bunky zväčšuje so zvyšujúcou sa intenzitou svetelného bodového stimulu. V periférii môže dosahovať RP gangliovej bunky veľkosť až 1 mm, zatiaľ čo v oblasti fovey odpovedá jednému alebo veľmi malému počtu čapíkov. [8]



Obr. 14 – Veľkosť receptívneho poľa gangliovej bunky pri rôznej relatívnej intenzite stimulu (bod svetla); upravené podľa [8]

2.2.2 Vplyv jasu na receptívne pole

Z viacerých zdrojov a štúdií sa dozvedáme, že pri adaptácii na tmu sa centrum receptívnych polí zväčšuje na úkor periférie, ktorá nakoniec môže úplne vymiznúť. Výsledkom zmeny pomeru antagonistických zón v receptívnych poliach dôjde na jednej strane k zvýšeniu priestorovej sumácie, no na druhej strane sa zníži kontrast, a tým aj zraková ostrosť [15]. Tvrdenie o eliminácii efektu periférie po adaptácii na tmu sa stalo predmetom skúmania štúdie [20]. Jej autori sa zaoberali hlavne zmenami organizácie receptívnych polí jednotlivých buniek sietnice, zrakového kortexu a LGN (lateral geniculate nucleus) pri vysokej a nízkej úrovni jasu. Ako u väčšiny štúdií, tak aj výskum tejto bol realizovaný prostredníctvom skúmania RP u mačiek. Najčastejšou zmenou u buniek LGN a v zrakovej kôre bolo zníženie, prípadne až absencia odozvy periférie u buniek s on- aj off-centrom za nízkeho jasu, čo potvrdzuje vyššie spomínané tvrdenie. Podobné výsledky boli zaznamenané aj u gangliových buniek, kde za nízkeho jasu dochádzalo k útlmu odozvy off-periférie. Zistilo sa, že táto zmena organizácie RP pretrváva dlhšiu dobu (minimálne 2 hodiny počas experimentu). Orientácia a priestorová frekvencia však ostávajú za rôznych jasových podmienok relatívne nezmenené. Štúdia [21] ukázala, že schopnosť periférie utlíť reakciu centra po adaptácii na nižšie jasové podmienky u buniek LGN mierne klesá, ale omnoho menej ako u gangliových buniek, kde je táto zmena výraznejšia. Po adaptácii na tmu sa objavili aj iné náznaky zmien efektu periférie, ako napríklad zvýšenie funkčnej veľkosti receptívnych polí gangliových buniek.

Ani v problematike ohľadom vplyvu jasu na RP však nejednotné stanovisko, pretože existuje viacero štúdií, ktoré potvrdzujú pretrvávanie periférnych reakcií aj pri slabom osvetlení, či už u buniek na úrovni retiny (Enroth-Cugell a Lennie, 1975) alebo u LGN buniek (Wiesel a Hubel, 1966). Vysoký stupeň variability metód daných štúdií sťažuje zjednotenie týchto zdanlivo protichodných výsledkov. Ako pravdepodobné vysvetlenie nezrovnalostí uvádza štúdia [22] to, že efekt periférie mizne iba v okolí hodnoty absolútneho detekovateľného prahu bunky. Potvrdzuje to správa zo štúdie [23], v ktorej bolo zistené, že reakcia periférie receptívneho poľa LGN buniek opíc klesá s intenzitou osvetlenia v blízkosti absolútneho prahu, no je zreteľne prítomná pri nadprahovej intenzite v rozsahu skotopických podmienok.

2.3 Adaptačné procesy na úrovni fotoreceptorov

Ľudská sietnica obsahuje približne 75-150 miliónov tyčínok a 7 miliónov čapíkov. Dané fotoreceptory sa líšia nie len svojím tvarom a rozmiestnením na sietnici (viď podkapitola 2.1) ale aj funkciou, ktorú plnia v procese videnia. Z predchádzajúceho textu je zrejmé, že niektoré vlastnosti receptívnych polí sa s poklesom jasenia. Jas však vplyva aj na samotné fotoreceptory takým spôsobom, že pri rôznych jasových úrovniach sú funkčné buď len čapíky alebo len tyčinky. Pri prechode medzi rozdielnymi hladinami jasenia dochádza k procesu adaptácie, ktorej veľká časť sa vyskytuje práve vo fotoreceptoroch, no čiastočne prebieha aj v nervových spojoch sietnice. Pre realizáciu adaptačných procesov popísaných v podkapitole 2.3.2. sú podstatné fotosenzitívne pigmenty, ktoré sú súčasťou vonkajšieho segmentu fotoreceptorov (u tyčínok dominuje rodopsín a u čapíkov fotopsín). [8, 17, 24]

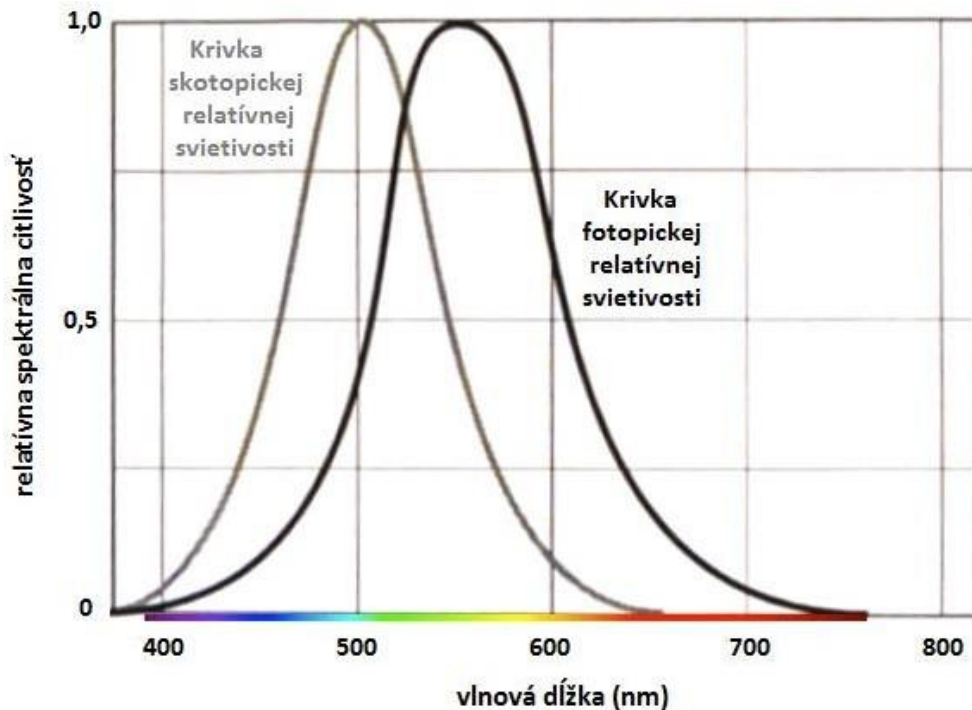
2.3.1 Typy videnia

Zrakový systém je vysoko špecializovaný na detekciu a analýzu svetelných stimulov. Je schopný fungovať v širokom rozmedzí hodnôt jasenia, od 10^6 až po 10^{-6} cd/m^2 , pričom v ľubovoľnom okamihu umožňuje vnímanie v rozsahu 10^4 cd/m^2 . Prostredníctvom adaptácie na príslušný jas môže zrakový systém modifikovať svoju schopnosť reagovať pri extrémne vysokých (slnečné osvetlenie na ľadovcoch) a nízkych (svit malej hviezdy) úrovniach osvetlenia. Na základe množstva svetla dopadajúceho na sietnicu rozoznávame 3 charakteristické typy videnia - fotopické (jas dosahuje hodnoty vyššie ako 10^{-2} cd/m^2), mezopické (rozsah jasenia od 10^0 cd/m^2 až 10^{-2} cd/m^2) a skotopické (jas je nižší ako 10^{-2} cd/m^2). [14, 16]

Fotopické videnie je možné synonymicky nazvať ako čapíkmi sprostredkované, pretože predstavuje videnie v jasnom svetle, ku ktorému tyčinky nedokážu žiadnym spôsobom prispievať. Čapíky sa podieľajú na videní za vyšších svetelných intenzít (tzn. počas dňa alebo pri umelom osvetlení), a ich hlavnou prednosťou je schopnosť rozlíšenia jemných detailov v zornom poli. V sietnici nachádzame 3 druhy čapíkov, pričom každý z nich je rozdielne citlivý na svetlo o rôznych vlnových dĺžkach. Tým je umožnené vnímanie farieb za fotopických podmienok. Všeobecne sú však čapíky najviac citlivé na žltozelené svetlo o vlnovej dĺžke 555 nm. [3, 8, 16]

Tyčinky zaisťujú videnie za podstatne nižších svetelných podmienok (tzn. v noci) a ich hlavnou výsadou je vysoká citlivosť na svetlo sprostredkovaná sumáciou veľkej sietnicovej oblasti počas dlhšieho času v porovnaní s čapíkmi. Existuje len jeden druh tyčínok, čo neumožňuje rozlíšenie svetla o rôznych vlnových dĺžkach. Znamená to, že v čase, keď je videnie sprostredkované výhradne činnosťou tyčínok (skotopické podmienky) nedokážeme rozpoznať farby. Okrem toho, že je tyčinkové videnie achromatické, vyznačuje sa aj nízkou zrkovou ostrosťou, ktorá v skutočnosti

predstavuje iba 1/8 zrakovej ostrosti za fotonických podmienok. Maximálna citlivosť tyčínok je dosiahnutá pri vlnovej dĺžke 500 nm (zelenomodré svetlo), čo predstavuje rozdiel 55 nm v porovnaní s čapíkmi. Tento posun maximálnej citlivosti smerom ku kratším vlnovým dĺžkam je nazývaný Pukyňov posun (obr. 15). [3, 8, 16]



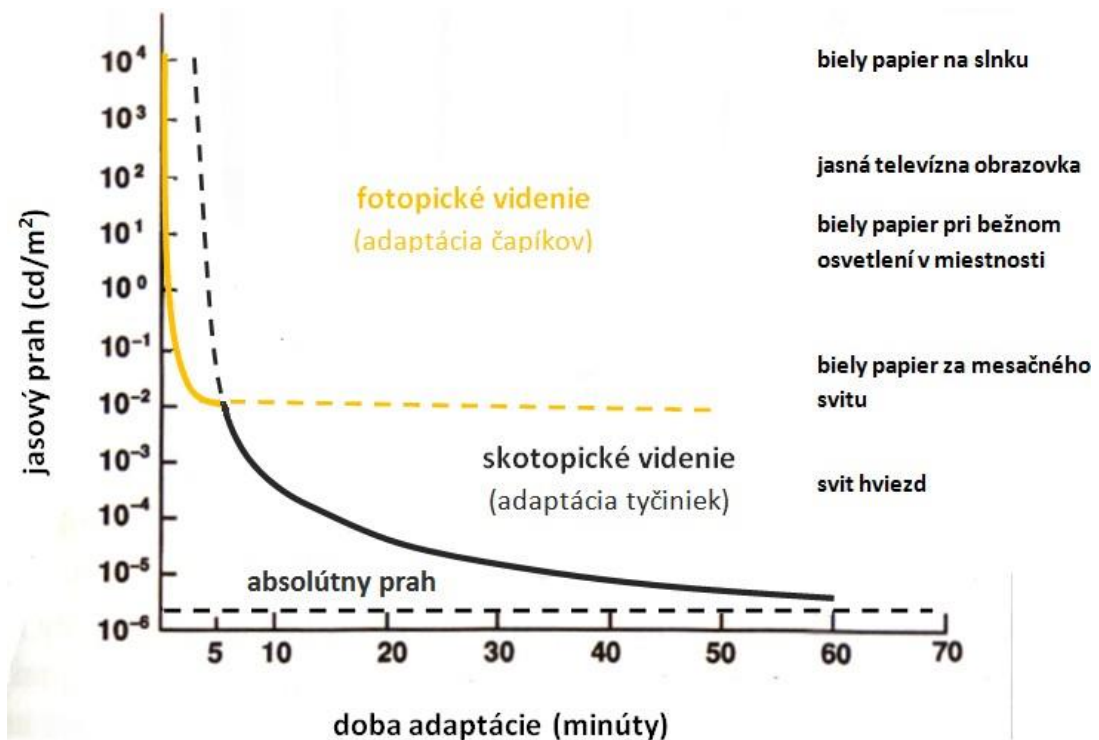
Obr. 15 – Krivky skotopickej a fotonickéj citlivosti znázorňujúce relatívne svietivosti pre zdroje svetla o rôznych vlnových dĺžkach pri adaptácii na tmú a svetlo (Purkyňov posun); upravené podľa [8]

2.3.2 Adaptačné procesy

Pri zmene jasnosti pozorovanej scény dochádza k tzv. adaptácii. Adaptácia na svetlo je proces, ktorý spôsobuje zvýšenie prahového jasnosti, tj. zníženie citlivosti, ako reakciu na zvýšenie prevládajúcej úrovne osvetlenia a na bielenie fotonických pigmentov. Prechod zo stavu adaptácie na tmú do stavu adaptácie na svetlo je väčšinou nepríjemný, no pohodlné videnie je dosiahnuté za menej ako jednu minútu, pretože pigmenty čapíkov podliehajú rýchlemu vybielovaniu. [3, 8]

Adaptácia na tmú je reverzným dejom k adaptácii na svetlo. Prispôbenie sa nižšej úrovni jasnosti ako tej, na ktorú je oko práve adaptované, si vyžaduje určitý čas strávený v tmavých podmienkach. Tento proces je charakterizovaný ako doba potrebná pre regeneráciu vybieleného fotonického pigmentu a s tým spojené zvýšenie citlivosti oka na temnejšie svetlo. Absolútny prah predstavuje minimálnu intenzitu svetla

potrebnú k vyvolaniu svetelného vnemu. Všetky objekty s jasom nižším ako je absolútny prah nie sú okom detekovateľné. Proces adaptácie na tmu je možné znázorniť pomocou adaptačnej krivky (viď obr. 16), ktorá je tvorená dvomi zreteľne odlišnými vetvami. Horná vetva reprezentuje fotopické videnie sprostredkované čapíkmi. Počas prvých 2 minút vykazuje vetva čapíkov výrazný pokles prahového jasú. Potom nasleduje približne 5 minútová doba, počas ktorej dochádza iba k malému poklesu prahu a čapíky sa blížia k najnižšej prahovej hladine, pretože sú už plne adaptované na tmu. Na týchto úrovniach jasú je stále možné vnímať farby. Tyčinky sa samozrejme adaptujú aj v tejto oblasti, no počas tejto doby vykazujú pomalšiu adaptáciu a majú vyšší prah ako čapíky (sú menej citlivé). Dolná vetva predstavuje adaptáciu tyčiniek počas dlhšej doby v tme. Jasový prah začne znovu klesať a tyčinky sú citlivejšie ako čapíky. Plná adaptácia na tmu trvá približne 60 minút, kedy je dosiahnutý absolútny prah. [3, 8]

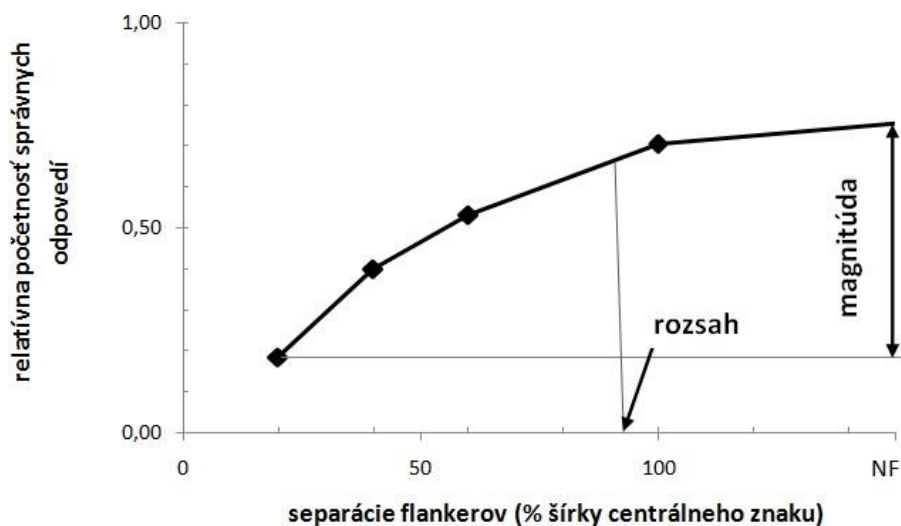


Obr. 16 – Krivka adaptácie na tmu (plné línie znázorňujú celkovú adaptáciu sietnice); upravené podľa [8]

3 Crowding fenomén a kontúrová interakcia

Niektoré zásady a parametre konštrukcie optotypov, napríklad dostatočné vzdialenosti medzi jednotlivými písmenami a riadkami (viď podkapitola 1.2.2) alebo prítomnosť kontúr či okrajov optotypu v blízkom okolí znaku, majú výrazný vplyv na rozlíšiteľnosť písmen, a tým na správne stanovenie zrakovej ostrosti. Separácia znakov a podmienky okolia znaku tak úzko súvisia s problematikou javov zvaných kontúrová interakcia a crowding, pričom crowding efekt (alebo tiež crowding fenomén) je považovaný za zložitejší. Doterajšie poznatky ukázali, že crowding fenomén v sebe zahŕňa kontúrovú interakciu, faktory pozornosti a fixačné pohyby očí. Okolité znaky či objekty, ktoré spôsobujú crowding alebo kontúrovú interakciu, sú obvykle v anglojazyčnej literatúre označované ako „flankers“. Vzhľadom ku komplikovanému prekladu bude tento pojem používaný aj v tejto práci.

V posledných rokoch výrazne vzrástol záujem o štúdium týchto fenoménov, čo je možné posúdiť na základe veľkého počtu nových štúdií zaoberajúcich sa touto problematikou. Dôvodom je odhodlanie lepšie porozumieť procesom, ktoré sú neoddeliteľnou súčasťou rozpoznávania objektov. Často sa však stretávame s tým, že crowding a kontúrová interakcia sú v jednotlivých štúdiách ponímané ako synonymá, a preto je mnohokrát ťažké ich vlastnosti, či mechanizmy vzniku navzájom odlíšiť. [25]



Obr. 17 - Znázornenie magnitúdy a rozsahu (NF – bez flankerov)

Medzi základné popisné charakteristiky oboch javov patrí rozsah a magnitúda (obr. 17). Rozsah je definovaný ako maximálna vzdialenosť obklopujúceho flankeru (písmeno u crowdingu a jednoduchá úsečka u kontúrovej interakcie) od znaku centrálného (fixovaného), pri ktorej už začína dochádzať k zhoršeniu rozlíšenia pozorovaného znaku, t.j. začína sa prejavovať efekt daného javu. Magnitúda

predstavuje najväčší dosiahnutý pokles zrakovej ostrosti (úspešnosti identifikácie znakov) pri prítomnosti flankerov oproti izolovanému znaku, kde neprebíha maximálna interakcia s okolitými objektmi [35, 36]. U oboch javov sa skúmali tieto vlastnosti za rôznych podmienok (znížený jas a kontrast) a pri rôznej excentricite (vo fovei a v periférii sietnice), pričom mnohé štúdie zaznamenali menšie, či väčšie odlišnosti u spomínaných charakteristík. Podkapitoly 3.3 a 3.4 poskytujú podrobnejší prehľad o dôležitých zisteniach z tejto oblasti.

3.1 Crowding fenomén

Prvýkrát bol pojem crowding použitý škandinávskym oftalmológom Ehlersom v roku 1936. Tento pojem je všeobecne definovaný ako zásadná prekážka pre vnímanie objektov či ako nepriaznivý vplyv okolitých znakov na schopnosť zrakového rozlíšenia. Objekty, ktoré bolo možné jednoducho identifikovať v izolovanom stave sa v zhľuku javia nejasne a neusporiadane. Jedná sa teda o formu inhibičnej interakcie, ktorá je všadeprítomná v priestorovom videní. Z toho je zrejmé, že crowding vplýva nie len na schopnosť rozpoznania zhlukovaných objektov či písmen [26] (viď obr. 18), ale okrem toho má súvis s rozlíšením orientácie, noniovou a priestorovou zrakovou ostrosťou, pohybujúcimi sa stimulmi či rozpoznávaním tvárí [27]. Jeho účinky je možné pozorovať v širokej škále oblastí zrakového vnímania (viď obr. 19). Je možné ho vnímať v prírodných scénach všade naokolo, významne ovplyvňuje prakticky všetky každodenné činnosti vrátane čítania, či vedenia vozidla. [25, 30]



Obr. 18 - Identifikácia znaku obklopeného inými znakmi (vpravo) pri fixácii značky je omnoho zložitejšia ako identifikácia izolovaného znaku (vľavo) [33]

Viacero štúdií potvrdzuje významné klinické následky crowdingu u amblyopických pacientov, no taktiež u pacientov s makulárnou degeneráciou, či dyslexiou. Štúdia [33] preukázala, že zhoršené čítanie u amblyopických očí nie je dôsledkom potreby väčších písmen (t.j. horšia zrková ostrosť) ale dôsledkom požiadavky na väčší rozostup znakov (t.j. silný crowding). Zjavná je aj významná kvalitatívna odlišnosť efektu crowdingu u jednotlivých typov amblyopie. U amblyopov so strabizmom sa crowding prejavuje omnoho výraznejšie ako u anizotropických amblyopov. [25]



a

ine ehcsa tbe seocrd cpficr. "I beh rc
s qensrel-eps husiness miqbf ba." Sbc
bar hcsk tcr tbe letter from Xiroarf D'Am
if fc Hemilton. His eyebrows warf uq es h
Ha's eomirq bcne at three c'olcok." Ncne
cen sac, ba qcints out tbet fhana's a de
cd tnicrb cf mirc, Frir Kcllay, arswcre

b

Obr. 19 – **a** - Crowding v každodennom živote (pri fixácii terča je takmer nemožné rozpoznať dieťa na ľavej strane cesty kvôli okolitým značkám, dieťa vpravo je omnoho ľahšie identifikovateľné), **b** - Pôsobenie crowdingu pri čítaní (v blízkosti bodu fixácie sú písmená zreteľné, za touto oblasťou podliehajú efektu crowdingu); upravené podľa [30, 40]

3.1.1 Odlíšenie pojmu crowding od podobných javov

Ukázalo sa, že existuje viacero diagnostických kritérií, pomocou ktorých je možné vo výskumoch odlíšiť crowding od podobných efektov (napr. maskovanie, laterálna interakcia, priestorová supresia). Dané javy majú síce spoločné charakteristiky, no každý z nich je odlišný a pravdepodobne odzrkadľuje rôzne neurálne procesy. Medzi tieto diagnostické kritériá patrí tvrdenie, že crowding je zodpovedný za zhoršenie identifikácie, ale nie za zhoršenie detekcie. Ak by crowding vplýval na detekciu, došlo by u zhlukovaných stimulov k zrušeniu ich signálov (vymiznutiu), ktoré nastáva napríklad u javu zvaného „ordinary masking“, ale u crowdingu naopak nie. Ďalším významným kritériom je to, že zhlukované objekty sú u crowdingu vnímané síce s vysokým kontrastom, no napriek tomu sú nezreteľné a ťažko rozlíšiteľné. [30, 34]

U obyčajného maskovania sa detekcia rysu alebo objektu zhorší, ak je pozorovaný znak prekrytý znakom maskovacím. V periférii alebo amblyopickej fovei však dôjde k zhoršeniu rozlišovacej schopnosti aj keď sa susedné znaky neprekrývajú – nastáva crowding. Najsilnejším efektom pôsobí obyčajné maskovanie vtedy, ak má pozorovaný a maskovací znak podobnú priestorovú frekvenciu a orientáciu. Okrem bežného maskovania sa stretávame s podobným javom zvaným laterálne maskovanie. Aby u tohto javu mohlo dôjsť k vzájomnému pôsobeniu medzi pozorovaným znakom a flankerom, nie je nutné aby sa dané elementy prekryvali. Napríklad platí, že obklopujúce flankery môžu zhoršiť detekciu pozorovaného znaku, ak sa nachádzajú príliš blízko (prekrývajú sa alebo priliehajú), no môžu ju naopak zlepšiť ak sú vo väčšej vzdialenosti. Vysvetlenie týchto efektov spočíva v tom, že excitáciu nervových kanálov vyvolajú ostatné kanály, ktoré sú umiestnené v rámci vzdialenosti dvoch vlnových dĺžok od pôvodných, a ich inhibíciu spôsobia nervové kanály pochádzajúce z väčších vzdialeností. Jav priestorovej supresie sa vyznačuje tým, že maskovací znak je umiestnený mimo klasického receptívneho poľa neurónu „prislúchajúceho“ testovaciemu znaku. Napriek mnohým dôležitým atribútom, ktoré tento fenomén zdieľa s crowdingom, sú tieto dva javy veľmi odlišné. Odlišnosť je pozorovaná napríklad v tom, že priestorová supresia nevykazuje vnútoro-vonkajšiu asymetriu evidentnú u crowdingu. [25]

3.1.2 Základné charakteristiky crowdingu

Udáva sa, že crowding nie je v periférii sietnice izotropný. Podstatným faktorom je radiálno-tangenciálna anizotropia, ktorá hovorí o silnejšom efekte radiálne usporiadaných flankerov oproti tangenciálne usporiadaným. Zistilo sa, že crowding v priemere siaha od 0,1-násobku excentricity znaku v tangenciálnom smere až po 0,5-násobok excentricity znaku v radiálnej orientácii, a to v závislosti na typu flankeru. Feng a kol. sa vo svojej štúdii [31] zamerali na skúmanie crowdingu pre horizontálne a vertikálne usporiadané priestorové konfigurácie. Výsledok ich prvého výskumu hovoril o výraznejšom vplyve crowdingu u horizontálne orientovaných znakov a flankerov oproti vertikálne orientovaným. Táto skutočnosť bola preukázaná vo všetkých štyroch kvadrantoch zrkovného priestoru. Za určitých podmienok sa zistili isté nezrovnalosti s týmto záverom a to také, že ak boli stimuly sústredené na horizontálny meridián, silnejší efekt crowdingu vykazovali horizontálne orientované flankery. U vertikálne sústredených stimulov pôsobili silnejšie naopak vertikálne usporiadané flankery. Jedným z možných vysvetlení je väčšia významnosť radiálnej/tangenciálnej asymetrie. Zistilo sa tiež, že crowding efekt je silnejší v hornom zrkovom poli v porovnaní so spodným. K vyššie spomínaným asymetrickým vlastnostiam crowdingu v periférii sietnice radíme ešte jednu dôležitú vlastnosť. Dokázalo sa, že crowding je silnejší v prípade, keď je samostatný flanker prezentovaný s väčšou excentricitou ako keď je situovaný bližšie pri fovei, pričom je zachovaná uhlová separácia od

pozorovaného znaku. Táto vnútoro-vonkajšia asymetria môže byť vysvetlená na základe usporiadania zrakovej kôry (po zobrazení do kortikálneho priestoru je pozorovaný priestor s väčšou excentricitou postupne viac nahustený a platí, že vzdialenejší flanker je v skutočnosti bližšie k pozorovanému objektu, než ten s menšou excentricitou). [30, 32]

Efekt crowdingu závisí vo veľkej miere aj od podobnosti pozorovaných znakov a flankerov. Obvykle sa jedná najmä o tvar a veľkosť, orientáciu, priestorovú frekvenciu, kontrastnú polaritu a v určitých prípadoch farbu, či pohyb. V prípade rovnakej kontrastnej polarite pozorovaného znaku a flankeru (obe biele alebo čierne) sa crowding prejaví silnejším efektom, ako keby bola ich polarita rozdielna (čierny znak, biely flanker). To však platí iba vtedy, ak veľkosti stimulov neprekročia rozlišovací limit. [25]

3.1.3 Pôvod crowding fenoménu

Medzi hlavné ciele štúdií zaoberajúcich sa problematikou crowdingu a kontúrovej interakcie patrí skúmanie mechanizmu týchto fyziologických javov. Existuje viacero možných vysvetlení ich vzniku, pričom najrelevantnejším sa zdá byť neurálny mechanizmus. Zatiaľ čo pre foveu je pôvod oboch javov veľmi podobný, periférny crowding a periférna kontúrová interakcia podliehajú odlišným neurálnym mechanizmom. [36, 48]

Jednou z možných hypotéz je optická (alebo tiež fyzikálna) podstata crowding fenoménu, založená na vplyve optickej rozptylovej funkcie alebo zmeny priestorových frekvencií stimulu spôsobenej prítomnosťou flankerov. V tomto prípade sa predpokladá, že crowding je prítomný len u malých znakov blízko limitu zrakovej ostrosti a nevyskytuje sa u veľkých rozmazaných stimulov. Chung a Tjan [52] sa vo svojej štúdii zaoberali meraním priestorovej frekvencie písmen rôznych veľkostí a separácií, a ich hlavným cieľom bolo zistiť, či sa maximálna citlivosť zrakového systému pri rozlišovaní písmen podliehajúcich crowdingu a izolovaných písmen posunie k odlišnej priestorovej frekvencii. V súlade s Hessom a kol. (viď podkapitola 3.2.2.), ktorí skúmali fyzikálny mechanizmus u kontúrovej interakcie, zaznamenali autori posun maximálnej priestorovej frekvencie u všetkých veľkostí znakov, avšak iba pre malé vzájomné separácie medzi písmenami. Výsledky naznačujú, že citlivosť zrakového systému sa posúva smerom k vyššiemu priestorovo-frekvenčnému kanálu pri identifikácii písmen, ktoré sú obklopené inými blízkymi písmenami, tj. u crowding fenoménu. Tento posun je však malý a nedostatočný nato, aby mal hlavnú zodpovednosť za veľký efekt crowdingu v periférii. [25]

Mnoho štúdií preukázalo, že crowding (podobne ako kontúrová interakcia) nastáva aj za dichoptických podmienok, čo naznačuje kortikálny pôvod daného javu. V súčasnej dobe sa dáva do pozornosti dvojstupňový model crowdingu, kde prvý stupeň

zahŕňa detekciu jednoduchých štruktúr (pravdepodobne v oblasti V1) a druhý stupeň odpovedá integrácii resp. interpretácii štruktúr ako objektu (za oblasťou V1). Na rozdiel od prvého, pomerne dobre pochopeného procesu nezávislej detekcie rysov, je druhý stupeň omnoho zložitejší a záhadnejší. Aby došlo k správne rozpoznaniu (odpovedi), identifikácia často vyžaduje zlúčenie informácií z niekoľkých detekovaných rysov, pričom tento nelineárny proces je nazývaný integrácia rysov. Crowding si je možné predstaviť ako nadmernú integráciu rysov v rámci príliš veľkej oblasti zahrňujúcej signál aj flankery. U crowdingu sú rysy znaku a obklopujúcich flankerov pomocou RP detekované nezávisle. V prípade, že padnú do rovnakého integračného poľa, zlúčia sa dohromady a vytvoria neurčitý, neusporiadaný obraz. Ako uvádza Pelli a kol. [34], zrakový systém pravdepodobne disponuje širokou škálou veľkostí integračných polí pri rôznej excentricite. Pre foveu je typické využitie integračných polí podobnej veľkosti a polohy ako má identifikovaný predmet. Pri periférnom videní sa predpokladá deficit malých integračných polí v dôsledku čoho sa často využívajú neprimerane veľké integračné polia. Veľké polia nie sú v tomto prípade až tak významné ako malé, pretože aj ich nízky počet stačí na pokrytie zrakového poľa a vždy je možnosť preskúmať objekt prostredníctvom priamej foveálnej fixácie, ktorá sa vyznačuje malými integračnými poľami. Integračným poľom rozumieme receptívne pole druhého stupňa, ktoré spája rysy detekované prvým stupňom vo výsledný objekt. Mnohokrát však nie sú pevne dané a statické ako receptívne polia. [25, 34]

Pri identifikácii znakov podliehajúcich crowdingu často dochádza k chybnému zámene flankeru za pozorovaný znak. Dané zistenie je v súlade s dvoma rozdielnymi procesmi – substitúciou a poolingom. V prípade substitúcie dochádza k zámene fixovaného znaku za vizuálne podobný okolitý znak, ide tak o zmenu ich umiestnenia. Keďže obklopujúce znaky musia byť podobné centrálnemu znaku, je jasné, že substitúcia je uvažovaná iba ako možná príčina crowdingu (pre kontúrovú interakciu to neplatí). K procesu substitúcie môže prispievať zlyhanie pozornosti, či náhodné očné pohyby. Podstata poolingingu spočíva v náhodnej kombinácii rysov medzi niekoľkými objektmi. Podľa viacerých štúdií vytvárajú pooling a tzv. non-pooling procesy spoločne priestor všetkých možných modelov crowdingu. Hlavný rozdiel spočíva v tom, že pooling prijíma vstupné signály z viacerých objektov a tie kombinuje pre vytvorenie odpovede, zatiaľ čo non-pooling (alebo tiež jednoduchá substitúcia) prijíma informácie iba z jedného z prezentovaných znakov. Freeman a kol. [53] uvažujú široký význam pojmu pooling, ktorý v sebe zahŕňa všetky modely crowdingu používajúce informácie z viac ako jedného objektu a dosahujúce priemerné parametre stimulov (orientácia, umiestnenie) naprieč mnohými objektmi. Mnoho štúdií preukázalo, že podobnosť flankerov zvyšuje efekt crowdingu pri identifikácii znakov. Kľúčovým zistením Freemana a kol. [53] bolo to, že podobnosť systematicky ovplyvňuje identitu chyby a výsledný model chýb tak obmedzuje substitučný model. Zistilo sa, že flankery, ktoré pôsobia väčší crowding efekt sú častejšie volené ako odpovede. Tým sa výrazne obmedzuje úloha jednoduchej substitúcie v mechanizme crowdingu a preto sú

Freeman a kol. presvedčení o tom, že jednoduchá substitúcia sama o sebe nemôže zodpovedať za jav crowdingu. Ako podstatný proces je v tomto prípade uvažovaný pooling. [53]

Mnoho štúdií trvá na hierarchických modeloch spracovania obrazu s doprednou väzbou – od analýzy jednoduchých štruktúr (línie a okraje) po spracovanie zložitejších štruktúr (objekty a tváre). Má sa za to, že spracovanie na nižšej úrovni ovplyvňuje to na vyššej úrovni, ale nie opačne. Predpokladá sa tiež, že crowding predstavuje prekážku na nižšej úrovni spracovania zrakovej informácie. Herzog a Manassi [54] na základe výsledkov štúdie mnoho týchto predpokladov popreli. Zastávajú názor, že veľkosť crowding efektu závisí od celkového usporiadania všetkých elementov v rámci zrakového poľa a uvádzajú, že crowding nastáva až v neskorších fázach zrakového spracovania a nie na začiatku. Autori sa najviac prikláňajú k názoru, že za vznikom crowdingu stojí tzv. grouping, tj. cielené (na základe skúseností s vnímanou scénou) zoskupovanie pozorovaného znaku a flankerov, poprípade vzájomné zoskupovanie flankerov. Grouping je považovaný za flexibilný, čo v tomto prípade znamená, že aj nepatrné zmeny v usporiadaní môžu viesť k výrazným zmenám intenzity crowding efektu. Na rozdiel od predošlých tvrdení z toho vyplýva, že spracovanie komplexnejších znakov ovplyvňuje spracovanie tých jednoduchších rovnako ako spracovanie jednoduchších ovplyvňuje zložitejšie. Najprv je vhodné poznať spôsob zoskupovania elementov a potom je možné určiť, ktoré elementy navzájom interferujú. [54]

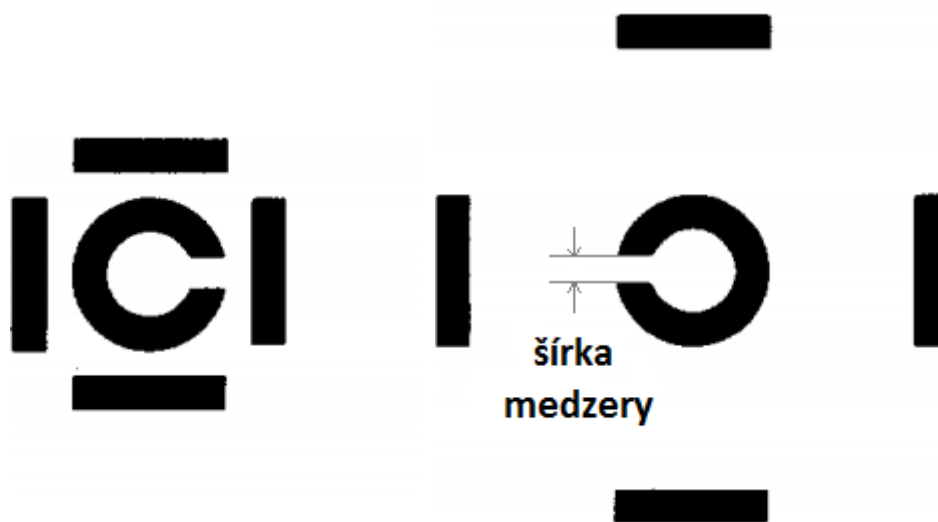
Pôvodne sa uvažovalo ešte nad efektmi typu masking ako o možných vysvetleniach crowding fenoménu, avšak zistilo sa, že ich vlastnosti plne nekorešponujú (viď 3.1.1). Napriek mnohým predpokladom, následným experimentom a predstretým výsledkom stále ostáva priestor na objavovanie a skúmanie mechanizmov crowdingu aj kontúrovej interakcie.

3.2 Kontúrová interakcia

Kontúrová interakcia je typom priestorového laterálneho maskovania. Jej charakteristickou črtou je zhoršenie rozlíšiteľnosti znakov, tj. zníženie zrakovej ostrosti v prípade, že sa v blízkom okolí daného znaku alebo písmena nachádzajú rušivé kontúry (okraje optotypu, úsečky). Pri väčšine klinických meraní zrakovej ostrosti sú používané izolované znaky alebo písmená s veľkými separáciami. V reálnom živote sa však väčšmi stretávame s väčším počtom blízko zoskupených znakov, či objektov. Podobne ako crowding, tak aj kontúrová interakcia negatívne ovplyvňuje rozlíšenie detailov znaku a jej pôsobenie je vidieť v každodennom dianí. V mnohých prípadoch určuje práve kontúrová interakcia (popri veľkosti písma) limit čitateľnosti tlačeného textu. [13, 35]

3.2.1 Základné charakteristiky kontúrovej interakcie

Najjednoduchšiu formu kontúrovej interakcie (viď obr. 20), demonštroval Flom a kol. [35] prostredníctvom Landoltových prstencov, ktoré boli orientované v štyroch základných smeroch a obklopené štyrmi kontúrami. Uhlová veľkosť prstenca sa menila, až kým proband nerozlíšil monokulárne menej než 100 % prezentovaných izolovaných znakov. Táto percentuálna hodnota je označovaná pojmom „hladina“ a objaví sa aj v experimentálnej časti tejto práce. Kontúry počas vyšetrovania obklopovali znak v rôznych vzdialenostiach, pričom ich vlastnosti boli dané – dĺžka sa rovnala výške/šírke Landoltovho prstenca C a šírka kontúry odpovedala šírke jeho medzery. Pri veľkej vzdialenosti kontúr od „C“ sa efekt kontúrovej interakcie neprejavil. Zhoršenie rozlíšenia nastalo pri vzdialenosti 2 až 4 uhlových minút od písmena C, pričom maximálnu úroveň (najmenšie % rozlíšenia) dosiahlo až pri vzdialenosti 1 minúty od pozorovaného znaku. U amblyopických očí sa efekt kontúrovej interakcie prejavil už omnoho skôr, a to v rozmedzí 4 - 23 minút. Prekvapivé boli výsledky aj u veľmi malých separácií, pri ktorých došlo k zlepšeniu rozlíšenia, niekedy až na úroveň rozlíšenia izolovaných znakov u zdravých aj amblyopických očí. Jednalo sa najmä o prípady, kedy sa príľahlé kontúry takmer dotýkali prstenca, či ho dokonca ohraničovali. Vo výsledku je známe, že maximálny efekt kontúrovej interakcie a teda najťažšie rozpoznanie orientácie znaku je dosiahnuté pri vzdialenosti kontúr rovnej 1 až 2 – násobku veľkosti *MÚR* izolovaného znaku. [35]



Obr. 20 – Kontúrová interakcia (rôzna veľkosť separácie flankerov a charakteristické usporiadanie úsečiek okolo Landoltovho prstenca); upravené podľa [38]

3.2.2 Pôvod kontúrovej interakcie

Podobne ako u crowdingu aj u kontúrovej interakcie prišli niektoré štúdie s návrhom, že foveálna kontúrová interakcia môže byť vysvetlená skôr na základe fyzikálnej stránky stimulu ako na základe fyziológie zrakového systému. Napríklad degradačný účinok vo fovei sa prinajmenšom čiastočne pripisuje účinku bodovej rozptylovej funkcie oka pre malé písmená rozmiestnené blízko pri sebe [25]. Hess a kol. [50] tvrdia, že pri foveálnom videní blízke flankery posúvajú pásmo kritickej priestorovej frekvencie (používané pri detekcii orientácie medzery Landoltovho prstenca) k vyšším priestorovým frekvenciám, čím dôjde k zníženiu viditeľnosti stimulu. Napriek výsledkom potvrdzujúcim fyzikálny vplyv sami pripúšťajú, že jestvujú podmienky, za ktorých samotné fyzikálne vysvetlenie nebude postačovať. Príkladom je periférne videnie, pri ktorom dochádza k zreteľnejšej interakcii použitím väčších flankerov. Levi kol. [51] taktiež deklaruje, že model Hessa a kol. neposkytuje všeobecne platné vysvetlenie kontúrovej interakcie vo fovei.

Ďalšou možnosťou je objasnenie mechanizmu kontúrovej interakcie na báze laterálneho maskovania, ktoré je krátko charakterizované v podkapitole 3.1.1. Tento jav však predpokladá, že rozsah kontúrovej interakcie bude úmerný voči veľkosti pozorovaného znaku. Takáto vzájomná súvislosť medzi rozsahom a veľkosťou znaku bola mnohými štúdiami pre foveálne aj pre periférne videnie vylúčená. Neplatí to však iba pre kontúrovú interakciu, ale aj pre periférny crowding, ktorý nemôže byť vysvetlený prostredníctvom laterálneho maskovania z rovnakého dôvodu. [36]

Hlavnou príčinou zníženej zrakovej ostrosti pri kontúrovej interakcii sa zdá byť neurálny pôvod, ktorého charakteristiky pramenia z vlastností receptívnych polí (viď podkapitola 2.2), pričom ku vzniku interakcie, podobne ako u crowdingu, prispieva taktiež pooling alebo grouping. Z kontralaterálneho experimentu Floma a kol. sa dozvedáme, že priestorový rozsah a intenzita kontúrovej interakcie ostávajú rovnaké pri prezentácii znaku a kontúr rovnakému oku, ale aj v prípade, ak sú prezentované oboj očiam zvlášť (znak jednému a kontúry druhému oku). Podobne ako Flom, tak aj Westheimer a Hauske dospeli k záveru, že kontúrová interakcia nastáva aj za dichoptických podmienok. Z toho je možné vyvodiť, že inhibičný efekt kontúrovej interakcie sa musí odohrávať na takom mieste v zrakovej dráhe, kde dochádza k stretu senzorických informácií z oboch očí. Úroveň zrakovej kôry sa považuje za najpravdepodobnejšie miesto vzniku tohto javu. [26, 35]

Mnohí autori uprednostnili vysvetlenie pôvodu predovšetkým kontúrovej interakcie na báze antagonistických neurálnych interakcií medzi stimulmi, ktoré sú zobrazené v rámci spoločného neurónového receptívneho poľa. Podstata tejto antagonistickej reakcie je objasnená v podkapitole 2.2.1 a v tomto konkrétnom prípade sa zakladá na princípe, že sledovaný znak spadá do centrálnej časti on-center receptívneho poľa neurónu, zatiaľ čo obklopujúce kontúry (znaky) stimulujú periférnu časť. Následný útlm spôsobí zhoršenie rozlíšiteľnosti centrálného znaku. Je známe, že

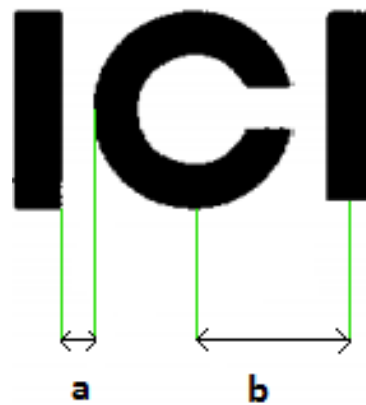
prínos antagonistickej periférie receptívneho poľa na výstup gangliovej bunky klesá pri adaptácii na tmu, a to bez akejkoľvek ďalšej zmeny v usporiadaní RP [43]. Zjednodušene je možné tvrdiť, že magnitúda antagonistickej periférie klesá a základná štruktúra zahrňujúca aj priemer RP ostáva nezmenená [36]. Podobné zníženie vplyvu periférie oproti centru bolo zaznamenané aj v receptívnych poliach corpus geniculatum laterale a kortikálnej oblasti. Výsledky štúdií [36] a [43] v oblasti foveálneho videnia ukazujú, že pokles magitúdy a približne fixný rozsah foveálnej kontúrovej interakcie sa zdajú byť v súlade so štrukturálnymi zmenami RP za znížených jasových podmienok. Keďže je kontúrová interakcia súčasťou crowding fenoménu, je možné predpokladať podobné vysvetlenie aj u tohto fyziologického javu.

3.3 Crowding a kontúrová interakcia vo fovei a v periférii

Mnohými štúdiami bolo preukázané, že zraková ostrosť (viď 1.1.3) a typ, vlastnosti, či počet receptívnych polí (viď 2.2.1) sa vo fovei a v periférii sietnice významne líšia. Podobne je možné očakávať odlišné vlastnosti centrálnych a periférnych častí sietnice, čo sa crowdingu a kontúrovej interakcie týka.

Za foveálneho a periférneho videnia podliehajú vlastnosti crowdingu a kontúrovej interakcie výrazným zmenám. Pelli a Tillman [40] tvrdia, že rozsah crowding fenoménu rastie úmerne s excentricitou (vzdialenosťou pozorovaného znaku od fixácie) a teda je výrazne väčší v periférii, než vo foveálnej časti. Herman Bouma na základe svojho pozorovania uviedol ako hodnotu rozsahu periférneho crowdingu polovicu excentricity znaku, ktorá je v dnešnej dobe často krát považovaná za všeobecný štandard. Chung a kol. [47] vo svojom experimente zistili, že priestorový rozsah crowdingu nadobúda hodnotu $0,5^\circ$ vo fovei a 2° pri excentricite znaku 5° , čo odpovedá vyššie spomínaným zisteniam (rozsah v periférii je 0,4-násobok excentricity). Aj u kontúrovej interakcie platí, že so zväčšujúcou sa periférnou excentricitou pozorovaného znaku rastie jej priestorový rozsah. Potvrďuje to štúdia [39], v ktorej rozsah kontúrovej interakcie dosiahol hodnotu približne $0,1^\circ$ pri excentricite 0° (fovea) a zvýšil sa na hodnotu $0,8^\circ$, keď bol znak prezentovaný vo vzdialenosti 5° smerom do periférie. Najvýraznejšia bola kontúrová interakcia pri najmenších separáciách, keď ešte nedošlo k dotyku flankerov s centrálnym znakom. Levi a kol. [46] na základe svojho výskumu uviedli, že rozsah kontúrovej interakcie odpovedá 0,1-násobku excentricity. Výskum bol realizovaný vo vzdialenostiach 5° a 10° od fovei. Z doterajších štúdií tak vyplýva, že závislosť rozsahu na excentricite je u kontúrovej interakcie zreteľne menšia ako u crowding fenoménu. V prospech tejto skutočnosti hovorí aj výsledok štúdie [48], ktorý ukázal, že v periférii (5°) je rozsah kontúrovej interakcie približne 4-krát menší ako rozsah crowdingu. V platnosti však ostáva, že ich periférny rozsah je oproti foveálnemu omnoho väčší, čo je v súlade s vlastnosťami receptívnych polí, ako uvádzajú Duffy a Hubel [22].

Ďalšou vlastnosťou, ktorá je odlišná pre centrum a perifériu je magnitúda crowdingu a kontúrovej interakcie. Marten-Ellis a Bedell [48] zistili, že magnitúda bola v centrálnej časti u oboch skúmaných javov približne rovnaká a k jej zníženiu došlo až za nízkeho jasú pozadia (viď podkapitoly 3.4.1 a 3.4.2). V periférii sú však rozdiely v magnitúde oboch javov výraznejšie. V prípade, že je centrálny znak obklopený podobnými znakmi, rozlišovacia schopnosť poklesne s excentricitou výrazne viac, ako keby bol pozorovaný znak obklopený jednoduchými úsečkami, alebo by bol izolovaný. Tento záver platí len pre periférne videnie. Z toho vyplýva, že periférna kontúrová interakcia spôsobuje omnoho menšie narušenie identifikácie znakov než periférny crowding, a teda jej magnitúda je oproti crowdingu menšia [49].



Obr. 21 - Možnosti merania separácie: **a** – edge-to-edge, **b** – center-to-center; upravené podľa [38]

Ako napovedajú vyššie uvedené zmeny medzi perifériou a foveou, a medzi kontúrovou interakciou a crowdingom, dajú sa očakávať odlišné mechanizmy týchto javov v rôznych lokáciách. Ukazuje sa, že vhodná mierka separácie flankerov od pozorovaného znaku je spojená s mechanizmom sledovaného javu. Pri určitej miere totiž nezávisí grafický priebeh kontúrovej interakcie na veľkosti znaku. Separáciu je možné merať buď medzi príľahlými hranami flankerov a znaku (tzv. edge-to-edge), alebo od stredu znaku ku stredu flankeru (tzv. center-to-center), viď obr. 21. Separácia center-to-center je charakteristická pre výskumy spojené s periférnym crowdingom [42], zatiaľ čo druhá možnosť (edge-to-edge) sa využíva najmä u kontúrovej interakcie [43]. Dané separácie je možné vyjadriť dvoma spôsobmi a to v relatívnej miere (% veľkosti centrálného znaku) alebo v absolútnej miere (uhlová vzdialenosť). [25, 36]

3.4 Crowding a kontúrová interakcia za rôznych jasov a kontrastov

Nie len miesto, resp. lokalizácia na sietnici (viď 3.3) je ovplyvňujúcim faktorom pre charakteristiky niektorých parametrov, javov a procesov spojených so zrakovým vnímaním. Je známe, že aj zmena jasov a kontrastu spôsobuje zmeny v zrakovej ostrosti a navyše zmena jasov vyvoláva zmeny v receptívnych poliach (viď 2.2.2). Očakáva sa, že zmeny týchto parametrov sa budú odrážať taktiež vo vlastnostiach crowdingu a kontúrovej interakcie.

3.4.1 Vplyv jasov a kontrastu na kontúrovú interakciu

Kontúrová interakcia sa podľa štúdie [37] vyskytuje v pevnej oblasti foveálnej časti sietnice o veľkosti niekoľkých uhlových minút (merané edge-to-edge), a to bez ohľadu na veľkosť pozorovaného znaku, či na jeho kontrast. Siderov a kol. [37] uviedli, že magnitúda aj uhlový rozsah foveálnej kontúrovej interakcie ostávajú približne rovnaké za vysokého aj nízkeho kontrastu. Konkrétne rozsah zotrúva v rozmedzí 3 až 5 uhlových minút aj pri poklese kontrastu prezentovaného stimulu, zatiaľ čo rozdiel veľkosti centrálnych znakov medzi nízkym a vysokým kontrastom odpovedá hodnote $0,4 \log MÚR$ (2,5-násobok). Existujú staršie štúdie, ktorých výsledky ukázali, že podobne ako foveálny crowding, tak aj foveálna kontúrová interakcia je závislá na úrovni kontrastu stimulu. Zatiaľ čo pri zvyšujúcom sa kontraste bola kontúrová interakcia výraznejšia, pri nízkom kontraste došlo k jej redukcii až absencii [38]. Hoci sa zdajú byť výsledky týchto štúdií protichodné, dáta získané výskumom [37] sú v súlade s predchádzajúcimi štúdiami. Dôvodom je rozdiel vo zvolených metrikách daných štúdií, a to konkrétne Pascal a Abadi používali vždy proporcionálne rovnaký rozstup medzi kontúrami a centrálnym znakom za všetkých kontrastných podmienok (flankery boli vo vzdialenosti špecifických násobkov šírky znaku), pričom Siderov a kol. zvolili pre meranie veľkosti separácie metódu edge-to-edge v uhlových minútach (flankery boli v pevnej uhlovej vzdialenosti od centrálného znaku). Najnovšia štúdia [57] skúmala kontrastnú energiu (násobok šírky a kontrastu) flankerov v súvislosti s kontúrovou interakciou. Výsledky ukázali, že so zvyšujúcou sa kontrastnou energiou flankerov dochádza k zväčšeniu magnitúdy kontúrovej interakcie. Ak dosiahne kontrastná energia flankerov vysoké hodnoty, magnitúda kontúrovej interakcie závisí iba na kontraste prilahlých úsečiek. Platnosť tejto závislosti bola preukázaná vo fovei aj v periférii.

Úroveň jasov je ďalší faktor ovplyvňujúci charakteristické rysy kontúrovej interakcie. Simunovic a Calver [41] zistili, že v periférii je rozsah kontúrovej interakcie za skotopických podmienok výrazne menší ako za fotopických podmienok pri rovnakej excentricite. Za skotopických podmienok bola jeho veľkosť $0,6^\circ$ pri excentricite 10° ,

zatiaľ čo za fotopických podmienok [42] nadobudla hodnotu 3° pri excentricite $9,2^\circ$. Z týchto výsledkov autori dedukujú, že mechanizmy zodpovedné za efekt kontúrovej interakcie sa adaptáciou na tmu menia. Táto zmena môže predstavovať reorganizáciu laterálnych nervových spojení v zrakovej kôre, či zmenu vlastností receptívnych polí týchto buniek. Na druhej strane štúdia [43] nezaznamenala zmenu rozsahu interakcie vo fovei za mezopických oproti fotopickým podmienkam. Magnitúda na rozdiel od rozsahu systematicky klesala spolu so znižujúcim sa jasom. Výsledky [43] potvrdzujú pôvod kontúrovej interakcie v antagonistickej štruktúre receptívnych polí, ktorých vlastnosti sú tiež závislé na jase. Výsledky práce [42] uvádzajúce, že rozsah interakcie s jasom v periférii klesá, sa zdajú byť nelogické oproti zmenám vo veľkosti receptívnych polí s jasom. Na tento rozpor upozornila štúdia [36], ktorá zároveň potvrdila stálosť rozsahu a zmenu magnitúdy foveálnej kontúrovej interakcie pri rôznych jasových podmienkach, a priamym porovnaním kontúrovej interakcie na rovnakých subjektoch preukázala, že v periférii sa jej rozsah s jasom nemení (a to od fotopického až po hlboké skotopické videnie). Rozpor oproti výsledkom [42] vysvetlila tým, že predchádzajúca práca porovnávala fotopický rozsah crowdingu a skotopický rozsah kontúrovej interakcie. Oba javy majú pritom v periférii za rovnakého jasú značne odlišný rozsah, ako uvádza podkapitola 3.3. Nezávislosť rozsahu na jase v periférii tiež potvrdila práca Marten-Ellis a Bedell [48].

3.4.2 Vplyv jasú a kontrastu na crowding fenomén

V roku 1992 autori Toet & Levi svojim výskumom [28] potvrdili, že vo foveálnej oblasti sa prejavuje crowding zväčša pri pomerne malých vzájomných vzdialenostiach znakov (4 až 6 uhlových minút). Štúdia [29] zase uvádza, že crowding vo fovei nenastáva. Tento záver však nemožno pokladať za správny, pretože vo výskume [29] boli použité stimuly s nízkym kontrastom, v dôsledku čoho museli byť značne veľké. Keďže autori volili separáciu úmernú veľkosti znakov, nemohli dosiahnuť dostatočne malé separácie, kde by sa mohol crowding prejavíť.

Existuje mnoho štúdií, ktoré skúmajú zrakovú ostrosť za rôznych jasových podmienok, no iba málo takých, ktoré za rovnakých podmienok sledujú správanie crowding efektu ako takého. Pluháček a Siderov [45] sa vo svojom nedávnom výskume sústredili na možné zmeny crowdingu pri rôznych jasových podmienkach, a na ich prípadný vplyv na meranie mezopickej zrakovej ostrosti. Zistilo sa, že veľmi malé separácie medzi písmenami ETDRS optotypu, kde crowding pôsobí silnejšie, spôsobovali väčší pokles zrakovej ostrosti pri fotopických podmienkach v porovnaní s rovnakými separáciami pri podmienkach mezopických. Crowding teda vykazuje menší účinok na zrakovú ostrosť za mezopického než za fotopického jasú. Z výsledku vyplýva, že magnitúda crowdingu s jasom klesá, zatiaľ čo rozsah sa javí konštantný. Zníženie magnitúdy foveálneho crowdingu potvrdila aj štúdia [48]. Tieto výsledky rozširujú

poznatky výskumu [43] a [36] (viď podkapitola 3.4.1) o vplyv úrovne jasů na crowding fenomén ponímaný všeobecne.

Rashal a Yeshurun [55] skúmali účinok kontrastu stimulu (najmä rozdiel medzi kontrastom znaku a príľahlého flankeru) na periférny crowding fenomén a na jeho priestorový rozsah. Výsledky preukázali zníženie magnitúdy crowdingu (znížený rozsah) pri redukcii kontrastu flankerov oproti centrálnemu znaku a naopak zvýšenie efektu crowdingu (zväčšený rozsah) pri väčšom kontraste flankerov. Je vhodné poznamenať, že vplyv na priestorový rozsah crowdingu bol zaznamenaný až pri zmene relatívneho kontrastu (zmena absolútneho kontrastu nepostačovala). Keďže boli vo výskume použité rozdielne kontrasty pre znak a flankery, nedá sa hovoriť všeobecne o vplyve kontrastu na crowding fenomén. Potvrďuje to iba známu skutočnosť, že odlišnosť medzi znakom a obklopujúcim flankerom zlepší identifikáciu písmen podliehajúcich crowdingu, tj. zníži účinok crowdingu. Táto výhoda odlišnosti je pozorovaná iba v prípade, keď je kontrast znaku vyšší ako kontrast príľahlého flankeru [55]. K poslednému tvrdeniu sa prikláňa aj štúdia [56], ktorá potvrďuje správanie crowdingu v prípade menšieho kontrastu flankerov, pričom sa úplne nestotožňuje so získaným výsledkom pre väčší kontrast flankerov. Autori zaznamenali najväčšiu magnitúdu a rozsah crowdingu vtedy, keď mali znaky aj flankery rovnaký kontrast (buď vysoký alebo nízky). Z výsledkov sa tak dá usúdiť, že kontrast stimulu nemá vplyv na rozsah periférneho crowding fenoménu [36, 56]. Účinok kontrastu flankerov na periférny crowding (pri excentricite 5°) skúmal aj Chung a kol. [47]. Jeden z experimentov ukázal, že magnitúda crowdingu monotónne rástla s podielom kontrastu, ktorý sa medzi centrálnym znakom a príľahlým flankerom menil.

4 Experimentálna štúdia vplyvu jasú a kontrastu na foveálny crowding a kontúrovú interakciu

Cieľom experimentálnej časti tejto práce bolo zistiť, ako sa mení foveálny crowding fenomén a kontúrová interakcia pri poklese kontrastu prezentovaných stimulov a pri redukcii jasú z fotickej na mezopicú hladinu. Dôležitými parametrami pri sledovaní daných javov boli rozsah a magnitúda. Ako bolo v teoretickej časti uvedené, niektoré vlastnosti receptívnych polí podliehajú zmenám, pokiaľ sú podrobené adaptácii na nižší jas. Jednou z možných a zároveň najpreferovanejších hypotéz vzniku kontúrovej interakcie či crowdingu je neurálny mechanizmus, ktorý vyplýva z charakteristík receptívnych polí. Na základe tejto súvislosti je možné očakávať, že zmena v antagonistickom pôsobení receptívnych polí za nižšieho jasú vyvolá určité zmeny chovania aj u spomínaných fyziologických javov. Konkrétne sa dá uvažovať o tom, že za znížených jasových podmienok sa spolu s redukciou inhibičnej funkcie periférie voči centru receptívneho poľa zníži aj chybovosť pri čítaní centrálného znaku, čo spôsobí pokles magnitúdy kontúrovej interakcie, príp. crowdingu.

Z rešerše realizovanej v predchádzajúcej teoretickej časti práce je zrejmé, že počet štúdií zaoberajúcich sa javom kontúrovej interakcie prevýšil počet tých, ktoré skúmali crowding fenomén za zmienených podmienok. Predpoklad možných výsledkov v prípade foveálnej kontúrovej interakcie vychádzal z troch výskumov, a to konkrétne zo štúdií [36, 43] ohľadom vplyvu jasú, a zo štúdie [37] v prípade vplyvu kontrastu na interakciu. Podľa práce Bedella a kol. [43] a Musilovej a kol. [36] je možné očakávať zníženie efektu foveálnej kontúrovej interakcie za nízkeho (mezopického) jasú, pretože sa preukázal pokles magnitúdy, no na druhej strane jej rozsah ostal zachovaný. Na základe publikácie Siderova a kol. [37] nie sú predpokladané žiadne zmeny vlastností kontúrovej interakcie pri zníženom kontraste. Čo sa týka vplyvu jasú na foveálny crowding fenomén, je možné vychádzať zo štúdie Pluháčka a Siderova [45], ktorej výsledky sú veľmi podobné záverom zo štúdie [43] pre kontúrovú interakciu. Aj pre foveálny crowding sa teda predpokladá pokles magnitúdy a zachovanie rozsahu pri poklese jasú. Hoci existujú štúdie zaoberajúce sa vplyvom kontrastu na crowding fenomén, kvôli rozdielnym stimulom (odlišný kontrast pre pozorovaný znak a flanker) a podmienkam (použitá excentricita) nemôže žiadna z nich plne slúžiť ako predloha pre porovnanie výsledkov. Keďže kontúrová interakcia je považovaná za jednu zo súčastí crowding fenoménu, je možné do určitej miery predpokladať zachovanie magnitúdy a rozsahu crowdingu aj za nízkeho kontrastu ako bolo štúdiou [37] zistené v prípade kontúrovej interakcie. Podobný záver bol získaný aj výskumom [56] pre periférny crowding fenomén za nízkeho kontrastu.

4.1 Metodika výskumu

Subjekty

Merania sa zúčastnilo 5 probandov vo veku od 20 do 42 rokov, pričom sa jednalo o 4 ženy a jedného muža. Každý z figurantov splnil potrebné požiadavky, medzi ktoré patrila predovšetkým absencia akýchkoľvek očných ochorení či zrakových abnormalít, ktoré by mohli mať vplyv na zrakovú ostrosť. V prípade zníženej zrakovej ostrosti figuranta bola refrakčná vada kompenzovaná najlepšou možnou korekciou tak, aby monokulárny vízus dosahoval hodnotu najmenej 1,0. Keďže meranie bolo časovo náročné, okrem vyššie spomínaných podmienok bol potrebný dobrý fyzický a psychický stav figuranta v deň merania. Pred samotným meraním bol každý proband zoznámený s cieľom, metodikou a celým priebehom merania. Svoj súhlas s účasťou na tomto výskume potvrdili probandi prostredníctvom podpísania informovaného súhlasu. Meranie prebiehalo v laboratóriu katedry optiky Prírodovedeckej fakulty Univerzity Palackého.

Stimul

Vizuálnym podnetom bola pri meraní crowdingu a kontúrovej interakcie za normálneho a nízkeho jasú sada čiernych písmen, konkrétne Sloan letters, vid' podkapitola 1.2, na bielom pozadí. Probandovi bolo prezentované vždy len jedno písmeno, ktoré bolo buď izolované alebo obklopené štyrmi rovnakými kontúrami (v prípade merania CI), či vybranými písmenami (v prípade merania CW), a to vždy o rovnakom kontraste ako prezentovaný centrálny znak. Kontúry, ktoré obklopovali centrálny znak, mali charakteristické vlastnosti – ich hrúbka predstavovala pätinu šírky centrálného znaku a ich dĺžka bola totožná so šírkou (výškou) daného písmena. Pri meraní crowdingu mali obklopujúce písmená totožnú veľkosť ako centrálné písmeno, pričom pre tento účel bolo zvolených 5 písmen zo sady Sloan letters (D, K, N, O, Z). Tieto písmená reprezentovali guľaté znaky (D, O) a znaky s ostrými hranami (K, N, Z), pričom Z bolo vybrané pre svoju nízku zameniteľnosť s inými písmenami. Celý stimul bol generovaný špeciálnym softwarom pomocou počítača na LCD monitore. Meranie prebiehalo za troch rôznych podmienok – za fotopického jasú a vysokého kontrastu (ozn. ako fotopické podmienky), za mezopického jasú a vysokého kontrastu (ozn. ako mezopické podmienky) a za fotopického jasú a nízkeho kontrastu (ozn. ako nízky kontrast). Pri vysokom kontraste dosahoval Weberov kontrast stimulu oproti pozadiu 98 %. Pre podmienky s nízkym kontrastom bol použitý Weberov kontrast približne 5 %. Pri fotopických podmienkach aj za nízkeho kontrastu bol jas pozadia stimulu 228 cd/m², pri mezopických podmienkach odpovedal hodnote 0,164 cd/m². Vyšetrovacía miestnosť bola zatemnená, pričom jediný výrazný zdroj svetla bol práve monitor, pomocou ktorého bol daný výskum realizovaný. Rozlíšenie širokouhlého 22 palcového

monitoru predstavovalo 1680x1050 pixlov. Monitor so stimulom bol pozorovaný cez rovinné zrkadlo pri optickej vzdialenosti 12 m za fotopických podmienok, za mezopických podmienok a pri nízkom kontraste bola pozorovacia vzdialenosť skrátaná na 6 m.

Postup merania

Meranie prebiehalo monokulárne (vždy na pravom oku) s centrálnou fixáciou stimulu za použitia stenopeickej clony o priemere 3 mm, ktorá bola vsadená do svetlotesných okuliarov pred vyšetované oko a zabezpečovala stabilné foveálne osvetlenie. Okrem clony bola v okuliaroch zabudovaná oklúzia pre netestované oko. Mezopické podmienky boli navodené redukciou jasu pomocou neutrálneho šedého filtra (výrobca Thorlabs), vloženého do svetlotesných okuliarov pred testované oko. Pred začiatkom merania za mezopických podmienok prebehla približne 20 minútová adaptácia figuranta na danú hladinu jasu. Znak bol prezentovaný iba po stanovenú dobu 2 s, pričom figurant mohol identifikovať písmeno počas doby prezentácie znaku ale aj potom, čo daný znak na monitore zmizol. Slovná odpoveď probanda bola vyšetrujúcim zaznamenaná pomocou klávesnice do projekčného softwaru. Následne po zaznamenaní odpovede sa na monitore objavil ďalší náhodný znak generovaný softwarom.

Samotné meranie začínalo stanovením východiskovej hodnoty veľkosti znaku, vyjadrenej v odpovedajúcej hodnote (hladine) $\log MÚR$, pri ktorej boli izolované písmená správne rozlíšené s pravdepodobnosťou 75 – 85 %. Kvôli efektu učenia sa konkrétnych znakov (Sloan letters), hlavne na začiatku merania, bolo nutné túto hladinu viackrát overiť a vylúčiť nárast percenta správnych odpovedí. V priebehu testovania taktiež dochádzalo k pravidelným kontrolám východiskovej hladiny z dôvodu vylúčenia únavy. Ak sa zaznamenal výrazný vplyv únavy na výsledky, meranie bolo nutné prerušiť. Testovanie bolo pri každej podmienke zahájené na izolovanom znaku (bez kontúr) a následne sa k nemu pridali buď kontúry (meranie kontúrovej interakcie) alebo písmená (meranie crowdingu). Voľba typu skúmaného javu bola pri každej podmienke náhodná.

Vlastné meranie kontúrovej interakcie a crowdingu bolo rozdelené na dve hlavné časti. V prvej časti bola sledovaná závislosť správnej identifikácie znaku na veľkosti separácie kontúr alebo písmen obklopujúcich centrálny znak. Do tejto časti experimentu boli zahrnutí všetci piati probandi. Kontúry, prípadne písmená, obklopovali centrálny znak v štyroch rôznych uhlových separáciách, ktoré boli pre daného probanda za všetkých podmienok približne rovnaké. Separácie boli merané od vnútorného okraja kontúry, popr. písmena, po príľahlý vonkajší okraj centrálného písmena (tzv. edge-to-edge). Tieto separácie boli volené tak, aby pri fotopických podmienkach a vysokom kontraste odpovedali 20 %, 40 %, 60 % a 100 % šírky centrálného znaku. Separácie boli prezentované v náhodnom poradí. Pri každej

separácii a za každej zo sledovaných podmienok prebehlo 100 prezentácií stimulu, z ktorých bola určená pravdepodobnosť správnej identifikácie centrálného písmena.

Do druhej časti experimentu boli zahrnutí iba štyria probandi, pričom podstatou tejto časti bolo meranie tzv. zámenných matíc. Riadky zámennej matice reprezentujú skutočne zobrazené písmeno, stĺpce odpovedajú odpovediam probanda. V bunke na priesečníku daného riadku a stĺpca je tak zaznamenaná absolútna alebo relatívna početnosť zámeny zobrazeného písmena odpovedajúceho danému riadku za písmeno odpovedajúce danému stĺpcu. V prípade relatívnej početnosti je táto určená vždy tak, aby súčet všetkých početností na riadku bol rovný 1 (tzv. normovaná zámenná matica). Na diagonále sa nachádzajú početnosti správnych odpovedí, mimo diagonálu sú uvedené chybné zámeny. Pre každú podmienku a každého probanda bola zmeraná zámenná matica pre izolovaný znak a pre najmenšiu použitú separáciu kontúr a písmen. Pre tento účel bolo vždy ponúknutých 1200 prezentácií znaku v sériách po 100 znakoch. V týchto sériách boli softwarom na základe zadanej odozvy probanda automaticky generované čiastkové zámenné matice, ktoré boli vo finále zlúčené. Pre finálnu analýzu boli použité matice vytvorené zlúčením odpovedajúcich si matíc jednotlivých probandov, tj. jedna matica vychádzala z 4800 prezentácií. V prípade crowdingu boli matice zostavené pre všetky flankery spoločne (celkové matice) alebo pre každý flanker samostatne (čiastkové matice flankerov).

4.2 Analýza dát

V prvej časti experimentu, sledujúcej závislosť pravdepodobnosti správnej identifikácie na separácii kontúr alebo písmen, bol najprv pre každú podmienku samostatne vyhodnotený vplyv separácie pomocou jednofaktorovej analýzy rozptylu (ANOVA) pre opakované merania. Následne boli všetky podmienky navzájom porovnané použitím trojfaktorovej analýzy rozptylu pre opakované merania, pričom ako faktory boli zvolené separácie, typ interakcie (kontúrová interakcia alebo crowding) a podmienky merania (jas a kontrast stimulu). Pre následné post hoc párové porovnanie dát bol využitý Tukeyov HSD test.

U zámenných matíc boli porovnávané odpovedajúce si riadky pomocou χ^2 testu nezávislosti, pričom boli uvažované iba bunky s chybnými zámenami. Pokiaľ sa dve matice líšili aspoň v jednom riadku (tj. v prípade signifikancie testu), boli považované za odlišné. Pre použitie tohto testu bolo vyžadované, aby nanajvyš 20 % predpokladaných početností bolo < 5 a žiadna predpokladaná početnosť nebola rovná 0. Pokiaľ táto podmienka nebola splnená, daný riadok bol z porovnania vyradený. Konkrétne prebehlo porovnanie matíc CI a CW získaných za rovnakých podmienok, nasledovalo porovnanie matice CI za fotopických podmienok s ostatnými maticami pre CI, a ďalej porovnanie matice CW za fotopických podmienok s ostatnými maticami pre CW. U CW

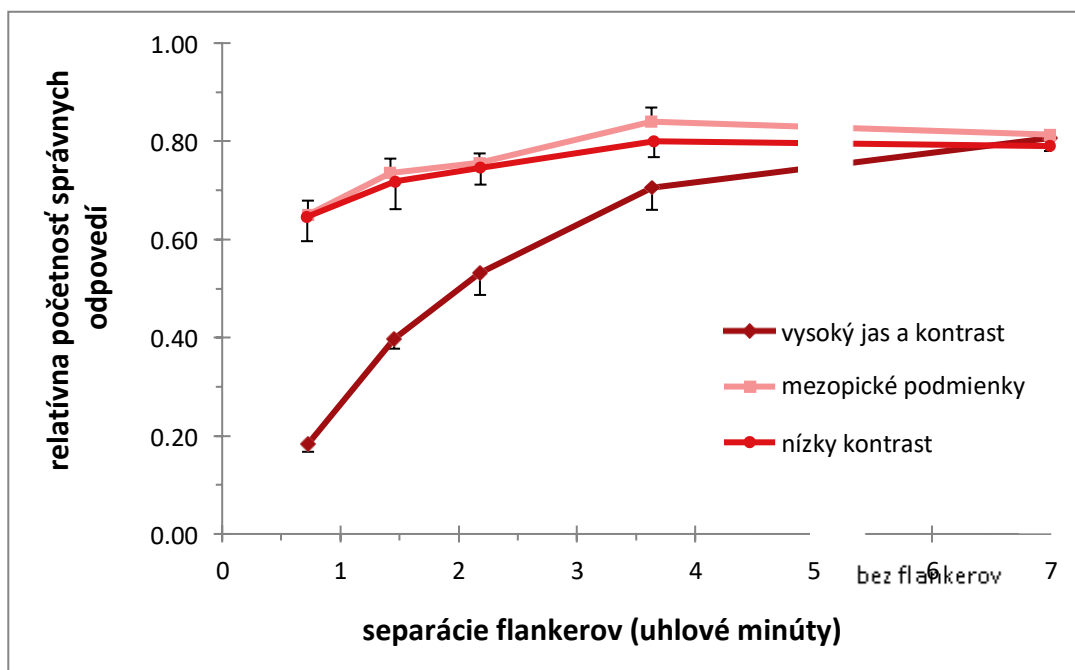
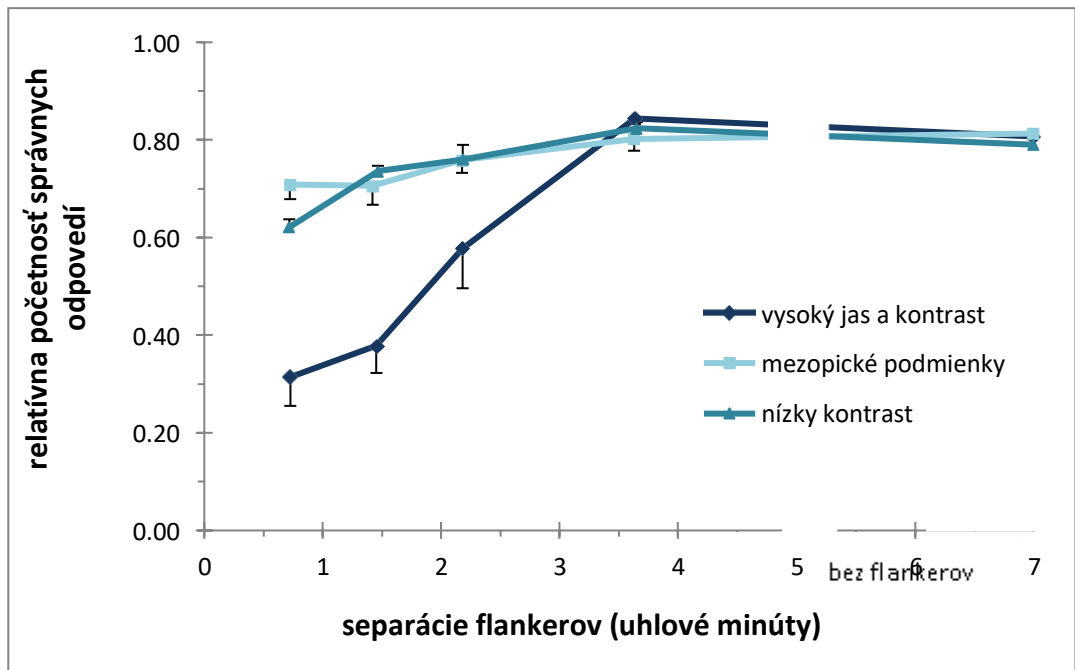
boli štatisticky vyhodnotené iba celkové matice z dôvodu možných nízkych počtov pozorovaní u čiastkových matíc flankerov.

Štatistická analýza prebiehala vždy na hladine významnosti 0,05. V texte sú tiež uvedené hraničné hodnoty hladiny významnosti p , pri ktorých by práve došlo k zamietnutiu testovanej hypotézy.

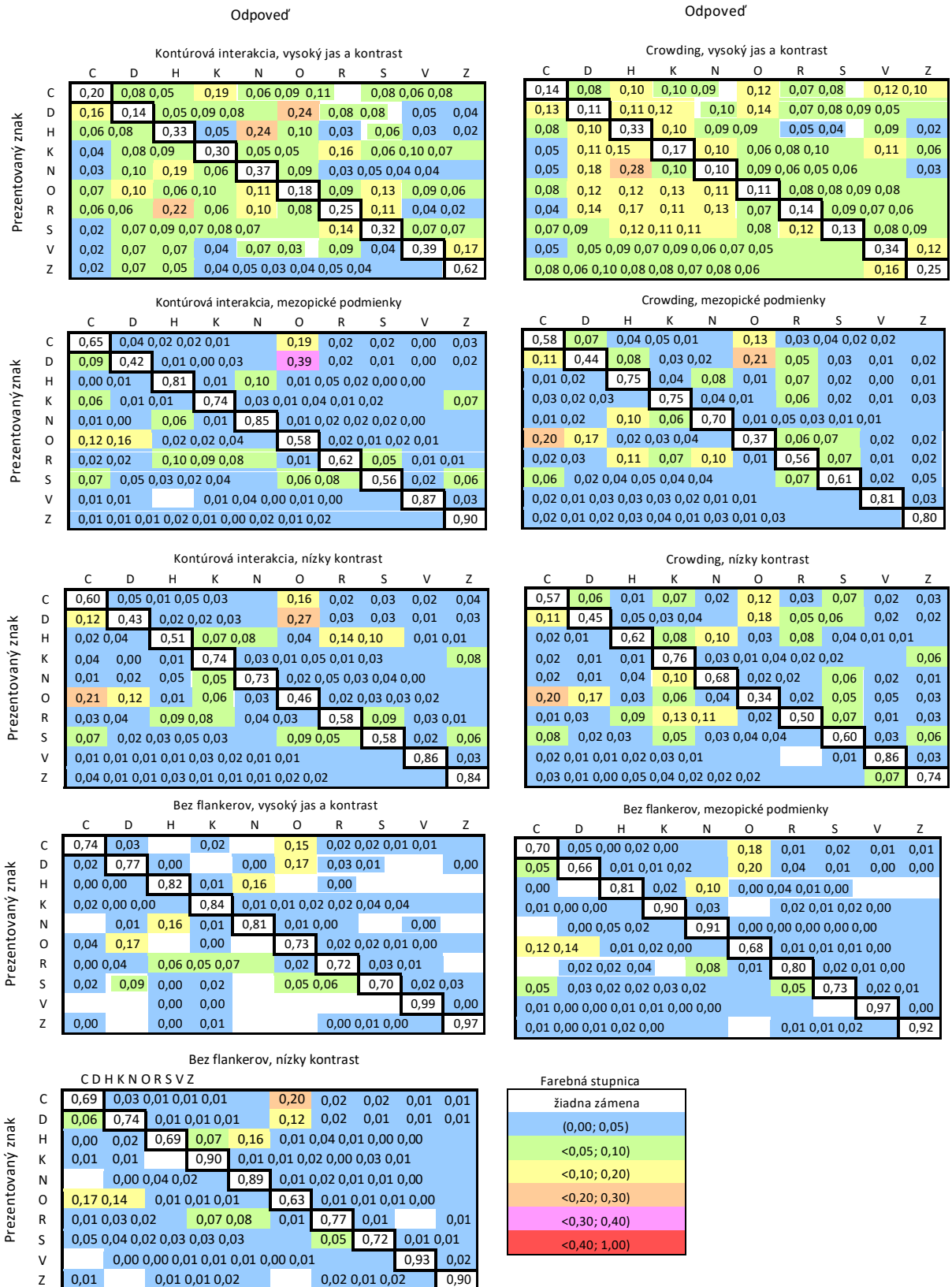
4.3. Výsledky

Z dát zobrazených prostredníctvom grafov na obr. 22 je zrejmé, že kontúrová interakcia i crowding sa prejavili za všetkých sledovaných podmienok poklesom percenta správnych odpovedí s klesajúcou separáciou kontúr alebo písmen. Túto skutočnosť tiež potvrdzuje ANOVA, samostatne realizovaná pre každú podmienku a typ obklopujúcich znakov, vo forme signifikantného vplyvu separácie ($p < 0,0001$, $p = 0,0033$, $p = 0,0030$ pre kontúry a $p < 0,0001$, $p = 0,0003$, $p = 0,00055$ pre písmená).

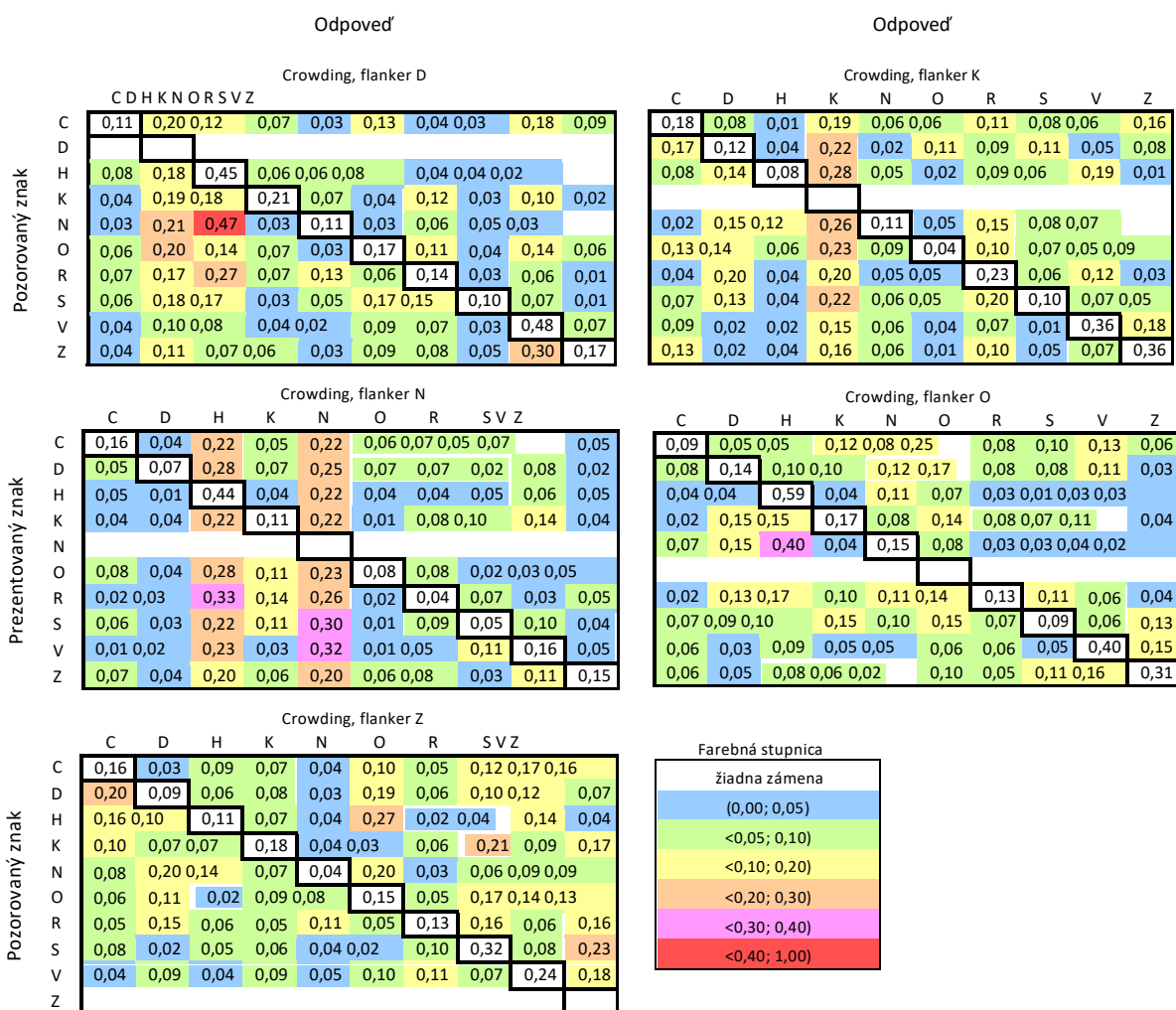
Z grafov je taktiež vidieť, že jav kontúrovej interakcie a jav crowdingu postupne slabnú s klesajúcim jasom, aj so znižujúcim sa kontrastom. Rozsah kontúrovej interakcie sa javí za všetkých podmienok rovnaký, zatiaľ čo rozsah crowdingu sa zdá byť za fotopických podmienok najväčší. Okrem toho je zrejmé, že crowding je pri nízkych separáciách silnejší, a to najmä pri fotopických podmienkach. Tieto výsledky sú podporené štatistickou analýzou dát trojfaktorovou metódou ANOVA pre opakované merania, ktorá potvrdila významný vplyv separácie ($p < 0,0001$) a podmienok ($p = 0,00011$), hlavný efekt typu obklopujúceho znaku sa nepotvrdil ($p = 0,558$). Následný post hoc Tukeyov test zistil, že sa CI aj CW za mezopických podmienok aj nízkeho kontrastu významne líšia od fotopických podmienok ($p < 0,0004$), zatiaľ čo medzi mezopickými podmienkami a nízkym kontrastom navzájom nie je rozdiel pozorovaný ($p > 0,99$). Rozdiely sú prítomné predovšetkým pre malé separácie, čo vyplýva z potvrdenia významného vplyvu interakcie podmienok a separácie ($p < 0,0001$). Ostatné interakcie boli štatistickou analýzou dát vyhodnotené ako nevýznamné ($p = 0,176$ pre interakciu typu a podmienok, $p = 0,212$ pre interakciu typu a separácie) okrem spoločnej interakcie typu, podmienok a separácie ($p = 0,036$). Z tejto výslednej spoločnej interakcie ako aj z grafu vyplýva, že kontúrová interakcia a crowding sa významne líšia len za fotopických podmienok. Post-hoc Tukeyov test za týchto podmienok zistil, že rozdiel CI a CW pri minimálnej separácii (20 % veľkosti znaku) je blízko hranice signifikancie ($p = 0,061$), pri separácii rovnej 100 % veľkosti znaku je signifikantný ($p = 0,040$), no pri ostatných separáciách neboli rozdiely pozorované ($p > 0,99$). Uvedené dáta potvrdzujú odlišnú fotopickú magnitúdu aj rozsah CI a CW.



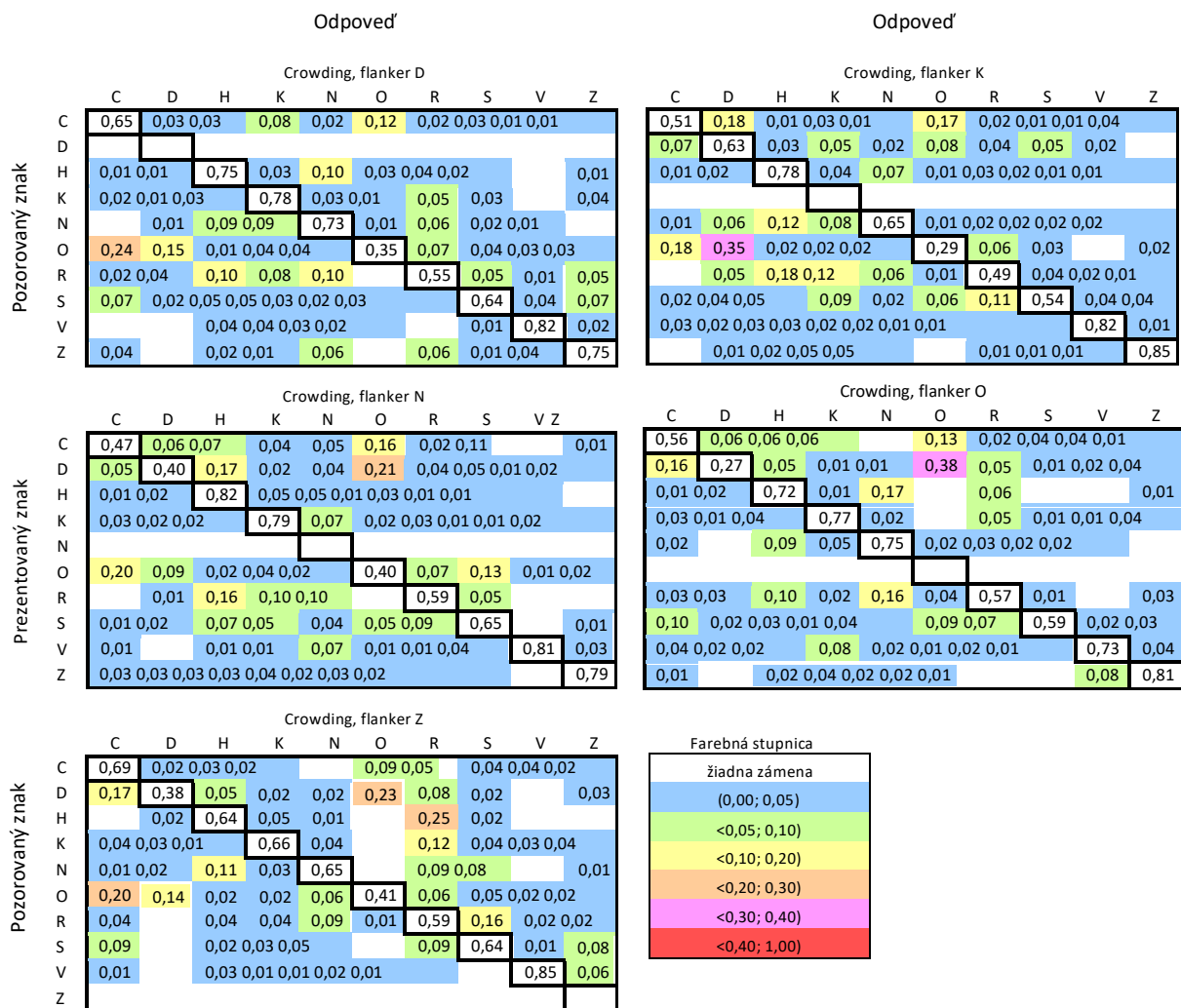
Obr. 22 – Závislosť priemerných hodnôt relatívnej početnosti správnych odpovedí na separácii flankerov udaných v uhlových minútach pre kontúrovú interakciu (hore) a pre crowding (dole) pre 3 podmienky – vysoký jas a kontrast, mezopické podmienky a nízky kontrast. Symbody predstavujú jednotlivé priemerné hodnoty, vertikálne úsečky reprezentujú veľkosť strednej chyby priemeru.



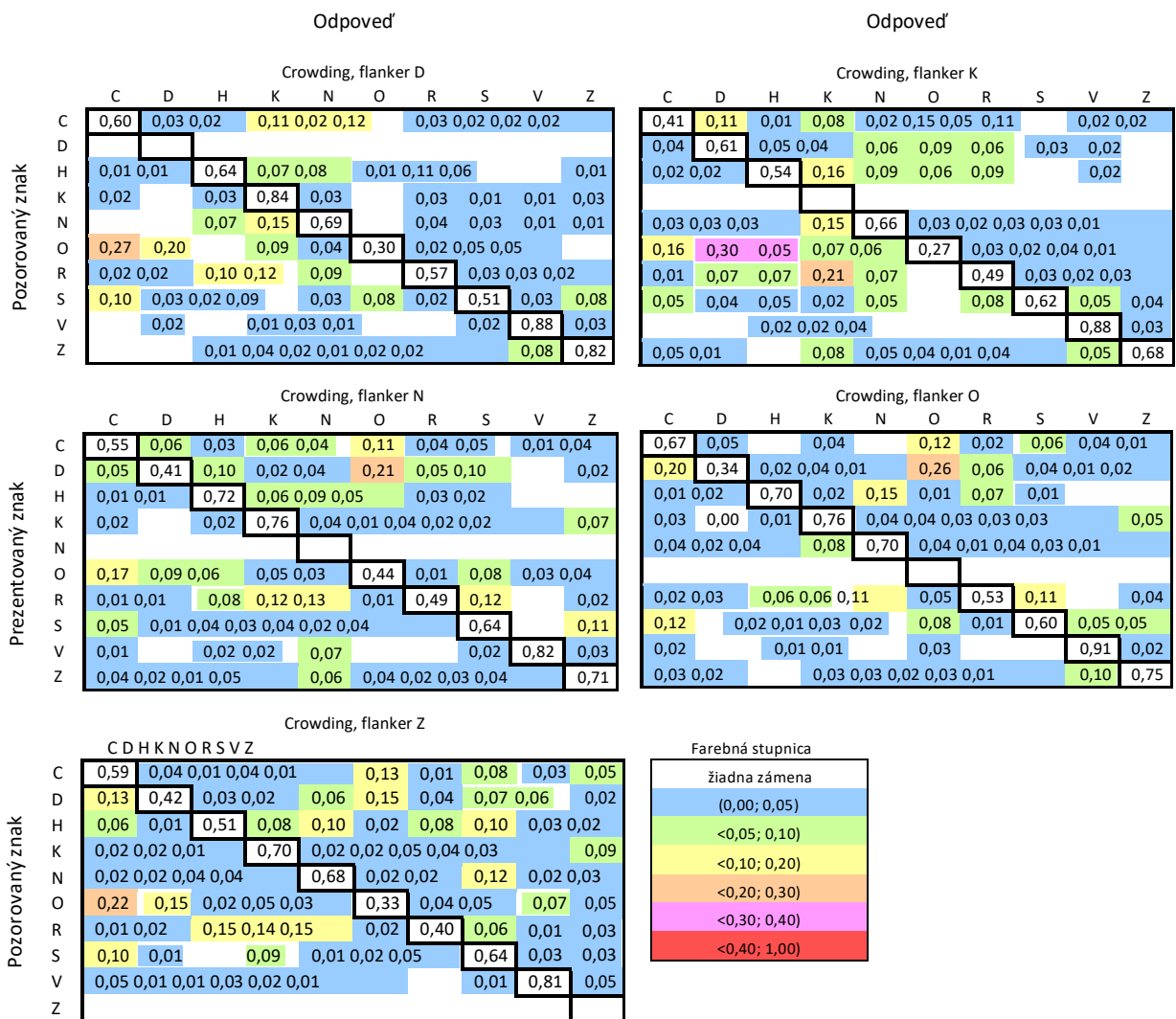
Obr. 23 - Normované zámenné matice vytvorené zlúčením dát všetkých probandov pre CI, CW a pre situáciu bez flankerov za všetkých sledovaných jasových a kontrastných podmienok. Bunky s chybnými odpoveďami (mimo diagonálu) sú farebne škálované podľa relatívnej početnosti. Prázdne bunky odpovedajú situácii, kedy nedošlo k žiadnej zmene.



Obr. 24 – Normované zámenné matice vytvorené zlúčením dát všetkých probandov pre crowding v prípade jednotlivých flankerov (D, K, N, O, Z) za vysokého jas a kontrastu. Bunky s chybnými odpoveďami (mimo diagonálu) sú farebne škálované podľa relatívnej početnosti. Prázdne bunky odpovedajú situácii, kedy nedošlo k žiadnej zmene.



Obr. 25 – Normované zámenné matice vytvorené zlúčením dát všetkých probandov pre crowding v prípade jednotlivých flankerov (D, K, N, O, Z) za mezopických podmienok. Bunky s chybnými odpoveďami (mimo diagonálu) sú farebne škálované podľa relatívnej početnosti. Prázdne bunky odpovedajú situácii, kedy nedošlo k žiadnej zmene.



Obr. 26 – Normované zámenné matice vytvorené zlúčením dát všetkých probandov pre crowding v prípade jednotlivých flankerov (D, K, N, O, Z) za nízkeho kontrastu. Bunky s chybnými odpoveďami (mimo diagonálu) sú farebne škálované podľa relatívnej početnosti. Prázdne bunky odpovedajú situácii, kedy nedošlo k žiadnej zmene.

Výsledné normované zámenné matice získané pri experimente sú prezentované na obr. 23 až 26. V situácii bez flankerov je rozloženie chýb v maticiach za všetkých podmienok podobné, no pri nízkom jase a kontraste je vidieť viac drobných náhodných chýb. Z obr. 23 je ďalej zrejmé, že podobne ako u CI, tak aj u CW výrazne narástol počet zámen oproti situácii bez flankerov v prípade fotopických podmienok, pričom u CW je prítomných viacero chýb. Signifikantný rozdiel medzi CI a CW potvrdila tiež analýza pomocou χ^2 testu (rozdiel v 8 z 10 analyzovaných riadkov, $p < 0,0034$). Z čiastkových matíc flankerov za fotopických podmienok (obr. 24) je možné

vyozorovať, že u daného flankeru došlo oproti CI k výraznému navýšeniu zámen ostatných písmen za tento flanker. Táto skutočnosť poukazuje na jav substitúcie. U CW sa dá taktiež pozorovať systematický nárast odozvy aj u písmen, ktoré sú podobné flankerom (typicky navýšenie odpovede „H“ u flankeru N). Centrálny znak bol teda zamenený za flanker, a ten bol navyše zamenený za podobné písmeno.

S poklesom jasú aj kontrastu došlo k výraznému poklesu chybovosti u CI aj CW. V prípade CI je pri mezopických podmienkach rozdelenie chýb veľmi blízke matici bez flankerov, u nízkeho kontrastu je rozdielov viac (napr. výrazný podiel odozvy „R“ a „S“ pre písmeno H). Štatistická analýza preukázala významné rozdiely medzi oboma maticami CI (a to u 3 riadkov zo 4 analyzovaných, $p < 0,037$). Pre CW sú obe normované matice veľmi podobné, no ani v tomto prípade nie sú totožné (rozdiel v 3 riadkoch z 8, $p < 0,021$). Medzi CI a CW bol v oboch prípadoch zistený štatisticky významný rozdiel (rozdiel v 4 zo 6 analyzovaných riadkov, $p < 0,001$ pri nízkom jase a v 6 z 9, $p < 0,025$ pri nízkom kontraste). Vplyv flankerov u čiastkových matíc však nebol ani v jednom z prípadov zreteľný, čo svedčí o výraznom znížení vplyvu substitúcie za týchto podmienok.

4.4 Diskusia

Z výsledkov mnohých štúdií je všeobecne známe, že okolie pozorovaného znaku má výrazný vplyv na jeho čitateľnosť, a tým aj na stanovenie zrakovej ostrosti. Podstatným faktorom ovplyvňujúcim zrakovú ostrosť je hodnota separácie medzi znakmi a obklopujúcimi flankermi. Pri zmenšujúcich sa separáciách je pôsobenie crowdingu a kontúrovej interakcie väčšie, čo sa následne prejaví poklesom hodnôt zrakovej ostrosti. Takýto efekt bol zaznamenaný u oboch spomínaných fyziologických javov aj v tomto výskume, a to nie len za fotopických podmienok, ale aj pri zníženom jase a zníženom kontraste.

Na základe grafického spracovania a štatistickej analýzy dát boli v prípade vysokého jasú a kontrastu zistené zreteľné rozdiely medzi efektom crowdingu a kontúrovej interakcie. Crowding vykazoval za fotopických podmienok mierne väčší rozsah. Súčasne sa zistilo, že prejav crowding fenoménu je pri malých separáciách za vysokého jasú a kontrastu znateľne silnejší v porovnaní s javom kontúrovej interakcie, tj. vykazuje väčšiu magnitúdu. Správanie týchto fenoménov bolo u ostatných podmienok veľmi podobné.

Viaceré štúdie potvrdili, že jas je významným faktorom ovplyvňujúcim vlastnosti crowdingu a kontúrovej interakcie. Bedell a kol. [43] skúmali vplyv jasú pozadia stimulu na jav kontúrovej interakcie, a to konkrétne meraním percentuálne správnej identifikácie izolovaných písmen a písmen obklopených štyrmi kontúrami pri 5 rôznych separáciách meraných v uhlových minútach spôsobom edge-to-edge. Uhlová veľkosť

týchto separácií bola u každého probanda za všetkých štyroch jasových podmienok približne rovnaká. Podobné vyšetrovacie podmienky pri meraní foveálnej kontúrovej interakcie zvolila aj najnovšia štúdia ohľadom tejto problematiky od Musilovej a kol. [36]. Na základe toho je možné dosiahnuté výsledky oboch štúdií navzájom porovnať. Tie sa zhodli predovšetkým v tom, že rozsah kontúrovej interakcie nie je ovplyvnený klesajúcim jasom pozadia, a teda ani zmenou veľkosti pozorovaného stimulu. Oproti tomu zaznamenali dané štúdie výrazný pokles magnitúdy kontúrovej interakcie medzi úrovňou fotopického a mezopického jasu.

V prípade crowdingu bolo preukázané, že jeho efekt za mezopických jasových podmienok nie je taký silný ako za podmienok fotopických. Z tohto predpokladu vychádzala štúdia Pluháčka a Siderova [45], ktorej ťažiskom bolo skúmanie vplyvu zmien crowdingu s jasom na meranie mezopickej zrakovej ostrosti. Na rozdiel od predošlých štúdií o kontúrovej interakcii bol stimul prezentovaný iba pri dvoch úrovniach jasu – fotopickej (228 cd/m^2) a mezopickej ($0,164 \text{ cd/m}^2$). Stimul predstavoval tri horizontálne riadky po 5 písmen rovnakej veľkosti v poradí od najväčšieho po najmenší, pričom zmena $\log MÚR$ medzi jednotlivými riadkami dosahovala hodnotu 0,05. Z výsledkov danej štúdie je zrejmé, že vlastnosti crowdingu podliehajú podobným zmenám ako vlastnosti kontúrovej interakcie – magnitúda s jasom klesá a rozsah ostáva pomerne stály.

Výsledky spomínaných štúdií sa približne zhodujú s výsledkami výskumu realizovaného v rámci tejto diplomovej práce. U oboch fyziologických javov – crowdingu aj kontúrovej interakcie bol zistený výrazný vplyv jasu, ktorý viedol hlavne k poklesu ich intenzity resp. magnitúdy. Možným vysvetlením poklesu magnitúdy kontúrovej interakcie a crowdingu s jasom môže byť eliminácia inhibičného účinku periférie voči centru receptívneho poľa. Je známe, že antagonistický efekt receptívnych polí je pri adaptácii na tmu značne redukovaný, pričom štruktúra receptívneho poľa ostáva podľa mnohých štúdií zachovaná. Za miernym znížením rozsahu môže stáť pozorované obmedzenie substitúcie s poklesom jasu, ktoré bude objasnené nižšie.

Ďalším predmetom skúmania sa stal vplyv kontrastu na kontúrovú interakciu a crowding. Staršie štúdie uvádzajú, že zhoršenie foveálnej zrakovej ostrosti vplyvom obklopujúcich kontúr klesá v prípade, keď je zrková ostrosť meraná pomocou nízko kontrastných stimulov. Siderov a kol. [37], ktorý sa taktiež zaoberali možným vplyvom kontrastu na efekt kontúrovej interakcie, však dospeli k odlišnému záveru. Výsledky štúdie ukazujú, že magnitúda a uhlový rozsah foveálnej kontúrovej interakcie ostávajú pre vysoký aj nízky kontrast približne nezmenené. Na rozdiel od predchádzajúcich autorov, ktorí prezentovali vysoko aj nízko kontrastné stimuly s proporčne rovnakými separáciami (vyjadrenými v násobkoch šírky znaku) medzi pozorovanými znakmi a flankermi, Siderov a kol. zvolili fixné uhlové separácie merané edge-to-edge pri porovnaní kontúrovej interakcie za vysokého, stredného a nízkeho kontrastu. Výsledky výskumu tejto diplomovej práce poukazujú na významný vplyv kontrastu na kontúrovú

interakciu (podobne ako u vyššie spomínaného jasu), čo je možné demonštrovať najmä poklesom jej magnitúdy. Keďže zvolené metriky a použité typy stimulov (rovnaký kontrast pozorovaného znaku a flankeru) v štúdií Siderova a kol. [37] a v tejto diplomovej práci približne súhlasia, získané výsledky si v prípade kontúrovej interakcie navzájom odporujú. Možným vysvetlením daného rozporu by mohlo byť použitie príliš nízkeho kontrastu stimulu v experimente tejto práce, pri ktorom už antagonistické časti receptívnych polí nemuseli odpovedajúco reagovať.

Doposiaľ neexistuje štúdia, ktorá by skúmala správanie foveálneho crowdingu pri použití nízkeho kontrastu stimulu. Z nameraných dát v rámci tohto výskumu bolo však u crowdingu možné pozorovať (podobne ako u kontúrovej interakcie) zníženie jeho magitúdy. Taktiež došlo k miernemu zmenšeniu jeho rozsahu, a to na úroveň rozsahu kontúrovej interakcie. Východiskom pre jedno z možných vysvetlení by mohla byť hypotéza, že crowding zahŕňa kontúrovú interakciu. O tom svedčí jeho správanie, ktoré v tomto prípade do určitej miery kopíruje správanie kontúrovej interakcie. Ku zmene crowdingu, najmä k poklesu rozsahu, môže tiež prispievať s kontrastom klesajúci vplyv substitúcie, ako je popísané nižšie.

Pri skúmaní zámenných matíc sa zistilo, že rozloženie chýb u kontúrovej interakcie je iné ako u crowdingu. Na základe pozorovania čiastkových matíc bol v prípade crowdingu zaznamenaný výrazný vplyv flankerov, ktorý sa prejavil zvýšením zámien pozorovaných písmen za daný flanker. Toto zistenie upriamuje pozornosť na jav substitúcie. Vplyv flankerov, a teda aj substitúcie, s jasom aj kontrastom klesá. Možným vysvetlením obmedzenia substitúcie môže byť vplyv nárastu veľkosti znakov za znížených jasových a kontrastných podmienok. Substitúcia je daná náhodnými pohybmi očí, ktoré by mali byť za všetkých sledovaných podmienok približne rovnaké. V prípade väčších znakov by však očné pohyby museli byť omnoho väčšie, aby mohlo dôjsť medzi pozorovaným znakom a flankerom k zámene.

Z uvedených výsledkov a ich rozboru vyplýva, že kontúrová interakcia a crowding sa síce navzájom líšia, ale pri zmenách jasu a kontrastu je ich správanie podobné. Pozorované rozdiely medzi kontúrovou interakciou a crowdingom je pravdepodobne možné z veľkej časti (minimálne za fotopických podmienok) priradiť substitúcii, ktorá nastáva iba u crowdingu. Vplyv substitúcie je s poklesom kontrastu aj jasu oslabený, čím sa charakteristiky oboch javov k sebe približujú. Uvedené zistenia sú v súlade s predpokladom, že kontúrová interakcia je súčasťou crowdingu, ktorý však okrem kontúrovej interakcie zahŕňa ešte ďalšie javy.

Záver

Teoretická časť tejto práce slúžila ako východiskový súbor základných znalostí procesov a javov súvisiacich s crowdingom a kontúrovou interakciou pre následnú analýzu a porovnanie výsledkov získaných v praktickej časti. Úvod práce bol zameraný na vymedzenie pojmu zrakovej ostrosti spolu so stanovením optickej a fyziologickej rozlišovacej medze oka. Dôležitú časť prvej kapitoly tvoril popis merania zrakovej ostrosti s ťažiskom na charakteristiku štruktúry najznámejších optotypov. V úvodnej kapitole nechýbalo ani objasnenie pojmov centrálna a periférna zrková ostrosť, a tiež charakteristika zmien centrálnej zrakovej ostrosti s jasom a kontrastom, ktorá sa opierala o viaceré doposiaľ publikované štúdie.

Videnie je komplexný proces, v ktorom musí vstupný signál prejsť zložitými zmenami a rôznymi úpravami, kým sa stane kompletným vnemom. Druhá kapitola sa venovala spracovaniu tohto zrkového signálu, ktoré prebieha v rôznych častiach zrakovej dráhy prostredníctvom receptívnych polí neurónov. Najprv bolo objasnené usporiadanie a prepojenie neurónov na sietnici a následne boli charakterizované vlastnosti a funkcia receptívnych polí, pričom podrobná demonštrácia bola realizovaná prostredníctvom RP gangliových buniek. Pomocou viacerých štúdií sa tiež podarilo popísať zmeny v antagonistickom pôsobení RP pri zníženom jase, čo úzko súvisí s vysvetlením správania daných fyziologických javov za znížených jasových podmienok. V závere kapitoly boli definované rôzne typy videnia a vysvetlené procesy adaptácie na svetlo a tmu.

Ťažiskom teoretickej časti bola tretia kapitola, ktorá podrobne popisovala javy ovplyvňujúce rozlíšiteľnosť pozorovaných znakov, tj. crowding a kontúrovú interakciu. Okrem základnej charakteristiky, typických rysov a odlišenia od podobných javov boli podrobne spracované rôzne možnosti mechanizmov vzniku daných javov. Neoddeliteľnou súčasťou tejto kapitoly sa stalo odlíšenie správania daných javov vo fovei a v periférii sietnice, a charakteristika ich zmien vplyvom zníženého jasu a kontrastu, čo bolo aj hlavným predmetom skúmania experimentálnej časti. Pre ucelený prehľad sa okrem novších štúdií použili aj staršie, pričom ich výsledky boli navzájom porovnané a v prípade nezhôd podľa možnosti vysvetlené.

Podstatnou časťou tejto práce bola experimentálna časť, ktorá zisťovala, či pokles jasu pozadia z fotopickej na mezopickú hladinu a pokles kontrastu prezentovaného stimulu vyvolá zmeny vlastností foveálneho crowdingu a kontúrovej interakcie. Medzi vlastnosti, na základe ktorých boli zmeny vyhodnocované, patrili rozsah a magnitúda. Zo získaných výsledkov je zrejmé, že pri zníženom jase aj kontraste dochádza k oslabeniu vplyvu foveálneho crowdingu a kontúrovej interakcie na rozlíšiteľnosť pozorovaných znakov, tj. vplyvom daných javov nedôjde k takému veľkému poklesu zrakovej ostrosti ako pri fotopických podmienkach. Tento záver je stanovený na základe pozorovania poklesu magnitúdy oboch javov za

mezopických a znížených kontrastných podmienok. Rozsah kontúrovej interakcie ostal zachovaný a u crowdingu sa mierne zmenšil. V prípade mezopických podmienok sú výsledky dosiahnuté týmto výskumom zhodné s výsledkami viacerých novších štúdií. Získané dáta tak podporujú teóriu vysvetlenia crowdingu a kontúrovej interakcie na základe receptívnych polí. V prípade kontúrovej interakcie za zníženého kontrastu stimulu sa však výsledky tejto práce nezhodujú s predošlou štúdiou realizovanou za podobných podmienok. Správanie crowdingu za zníženého kontrastu nebolo doposiaľ žiadnou štúdiou skúmané, preto nebolo možné dané výsledky adekvátne porovnať. Z nameraných dát je známy pokles magnitúdy a a mierne znížený rozsah crowdingu, čo je možné vysvetliť na základe straty vplyvu náhodných pohybov očí (zložka crowdingu) s poklesom kontrastu. Na základe výsledkov je možné konštatovať, že crowding a kontúrová interakcia sa za mezopických podmienok a nízkeho kontrastu významne líšia od fotopických podmienok, no medzi mezopickými podmienkami a nízkym kontrastom navzájom nie je rozdiel pozorovaný. Významné odlišnosti, najmä v magnitúde daných javov, sú pozorované iba za fotopických podmienok, za čo je zodpovedná substitúcia a ostatné javy, ktoré crowding okrem kontúrovej interakcie zahŕňa.

Zoznam použitej literaúry

- [1] BENJAMIN, J. W. *Borish's Clinical Refraction*, 2nd edition, Philadelphia: Butterworth-Heinemann Elsevier, 2006. ISBN 978-0-7506-7524-6.
- [2] SYNEK S., SKORKOVSKÁ Š. *Fyziologie oka a vidění*. 2. dopl. a přeprac. vydání, Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3992-2.
- [3] NORTON T. T., CORLISS D. A., BAILEY J. E. *The psychophysical measurement of visual function*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 0-7506-9935-3.
- [4] GROSVENOR, T. *Primary Care Optometry*. 5th edition, St. Louis, Mo.: Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-0-7506-7575-8.
- [5] KUCHYNKA, P. a kol. *Oční lékařství*. 2. přepracované a doplněné vydání, Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-5079-8.
- [6] ROZSÍVAL, P. a kol. *Oční lékařství*. 1. vydání, Praha: Galén Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1213-5.
- [7] TROJAN, S. a kol. *Lékařská fyziologie*. Praha: Grada Publishing, 2003. ISBN 80-247-0512-5.
- [8] TUNNACLIFFE, A. H. *Introduction to visual optics*. 4th ed. Godmersham Park: Association of British Dispensing Opticians, 1993. ISBN 0-9009-928-3.
- [9] KRÁLÍČEK, P. *Úvod do speciální neurofyziologie*. 3. přepracované a rozšířené vydání, Praha: Galén, 2011. ISBN 978-80-7262-618-2.
- [10] REID, L. Functional Assessment of Vision. *Scottish Sensory Centre, Moray House School of Education, University of Edinburgh* [online]. 2006 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <http://www.ssc.education.ed.ac.uk/courses/vi&multi/vmay06a.html>
- [11] BAILEY I. L., LOVIE-KITCHIN J. E. *Visual acuity testing. From the laboratory to the clinic*. Vision Research, Vol. 90, 2013, pp. 2–9
- [12] GRIS-SÁNCHEZ I., VAN RAS D., BIRKS T. A. *The Airy fiber: an optical fiber that guides light diffracted by a circular aperture*. Optica, OSA Publishing, Vol. 3, 2016, No. 3, pp. 270-276
- [13] LIU, L. *Dual oriented mechanisms in contour interaction*. Vision Research, Vol. 41, 2001, No. 7, pp. 853–858
- [14] PLUHÁČEK, F. *Adaptace a kontrast jasů - výučbové materiály k predmetu Fyziologická optika*, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v

Olomouci, Olomouc, 2011

- [15] SILBERNAGL S., DESPOPOULOS A. *Atlas fyziologie člověka*. 6. vyd. prepracované a rozšířené. Praha: Grada Publishing, 2003. ISBN 80-247-0630-X.
- [16] REMINGTON, L. A. *Clinical Anatomy and Physiology of the Visual System*. 3rd edition, Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-1-4377-1926-0.
- [17] ŠIKL, R. *Zrakové vnímání*. 1. vydání, Praha: Grada Publishing, 2012. ISBN 978-80-247-3029-5.
- [18] KOLÁŘ, P. *Věkem podmíněná makulární degenerace*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2008. 160 s. ISBN 978-80-247-2605-2.
- [19] ELLIOTT, D. B. *Clinical Procedures in Primary Eye Care*. 3rd ed. Edinburgh: Elsevier Butterworth Heinemann, 2007. ISBN 978-0-7506-8896-3.
- [20] RAMOA A. S., FREEMAN R. D., MACY A. *Comparison of response properties of cells in the cat's visual cortex at high and low luminance levels*. Journal of Neurophysiology, Vol. 54, 1985, No. 1, pp. 61–72
- [21] VIRSU V., LEE B. B., CREUTZFELDT O. D. *Dark adaptation and receptive field organisation of cells in the cat lateral geniculate nucleus*. Experimental Brain Research, Vol. 27, 1977, No. 1, pp. 35-50
- [22] DUFFY K. R., HUBEL D. H. *Receptive field properties of neurons in the primary visual cortex under photopic and scotopic lighting conditions*. Vision Research, Vol. 47, 2007, No. 19, pp. 2569–2574
- [23] WIESEL T. N., HUBEL D. H. *Spatial and chromatic interactions in the lateral geniculate body of the rhesus monkey*. Journal of Neurophysiology, Vol. 29, 1966, No. 6, pp. 1115–1156
- [24] SAKMAR T. P., HUBER T. *Rhodopsin*. Encyclopedia of Neuroscience, Elsevier, 2009, pp. 365–372
- [25] LEVI, D. M. *Crowding - An essential bottleneck for object recognition: A mini-review*. Vision Research, Vol. 48, 2008, No. 5, pp. 635–654
- [26] FLOM M. C., WEYMOUTH F. W., KAHNEMAN D. *Visual Resolution and Contour Interaction*. Journal of the Optical Society of America, Vol. 53, 1963, No. 9, pp. 1026 - 1032
- [27] LOUIE E. G., BRESSLER D. W., WHITNEY D. *Holistic crowding: Selective interference between configural representations of faces in crowded scenes*. Journal of Vision, Vol. 7, 2007, No. 24, pp. 1–11

- [28] TOET A., LEVI D. M. *The two-dimensional shape of spatial interaction zones in the parafovea*. Vision Research, Vol. 32, 1992, No. 7, pp. 1349–1357
- [29] STRASBURGER H., HARVEY L. O., RENTSCHLER I. *Contrast thresholds for identification of numeric characters in direct and eccentric view*. Perception & Psychophysics, Vol. 49, 1991, No. 6, pp. 495–508
- [30] WHITNEY D., LEVI D. M. *Visual crowding: a fundamental limit on conscious perception and object recognition*. Trends in Cognitive Sciences, Vol. 15, 2011, No. 4, pp. 160–168
- [31] FENG C., JIANG Y., HE S. *Horizontal and vertical asymmetry in visual spatial crowding effects*. Journal of Vision, Vol. 7, 2007, No. 2, pp. 1-10
- [32] MOTTER B. C., SIMONI D. A. *The roles of cortical image separation and size in active visual search performance*. Journal of Vision, Vol. 7, 2007, No. 2, page 6
- [33] LEVI D. M., SONG S., PELLI D. G. *Amblyopic reading is crowded*. Journal of Vision, Vol. 7, 2007, No. 2, pp. 1-17
- [34] PELLI D. G., PALOMARES, M., MAJAJ N. J. *Crowding is unlike ordinary masking: Distinguishing feature integration from detection*. Journal of Vision, Vol. 4, 2004, No. 12, pp. 1136-1169
- [35] FLOM, M. C. *Contour Interaction and the Crowding Effect*. Problems in Optometry. J. B. Lippincott Co., 1991, Vol. 3, No. 2, pp. 237 - 257
- [36] MUSILOVÁ L., PLUHÁČEK F., MARTEN-ELLIS S. M., BEDELL H. E., SIDEROV J. *Contour interaction under photopic and scotopic conditions*. Journal of Vision, Vol. 18, 2018, No. 6, page 5
- [37] SIDEROV J., WAUGH S. J., BEDELL H. E. *Foveal contour interaction for low contrast acuity targets*. Vision Research, Vol. 77, 2013, pp. 10–13
- [38] PASCAL E., ABADI R. V. *Contour interaction in the presence of congenital nystagmus*. Vision Research, Vol. 35, 1995, No. 12, pp. 1785–1789
- [39] WOLFORD G., CHAMBERS L. *Contour interaction as a function of retinal eccentricity*. Perception & Psychophysics, Vol. 36, 1984, No. 5, pp. 457–460
- [40] PELLI D. G., TILLMAN K. A. *The uncrowded window of object recognition*. Nature Neuroscience, Vol. 11, 2008, No. 10, pp. 1129–1135
- [41] SIMUNOVIC M. P., CALVER R. *Crowding under scotopic conditions*. Vision Research, Elsevier, Vol. 44, 2004, pp. 963 – 969

- [42] TRIPATHY S. P., CAVANAGH P. *The extent of crowding in peripheral vision does not scale with target size*. Vision Research, Vol. 42, 2002, pp. 2357–2360.
- [43] BEDELL H. E., SIDEROV J., WAUGH S. J., ZEMANOVÁ R., PLUHÁČEK F., MUSILOVÁ L. *Contour interaction for foveal acuity targets at different luminances*. Vision Research, Vol. 89, 2013, pp. 90–95
- [44] PLUHÁČEK, F. *Zraková ostrost a její měření - vyukové materiály k předmětu Fyziologická optika, Katedra optiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci, Olomouc, 2011.*
- [45] PLUHÁČEK F., SIDEROV J. *Mesopic visual acuity is less crowded*. Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology, Vol. 256, 2018, No. 9, pp. 1739-1746
- [46] LEVI D. M., HARIHARAN S., KLEIN S. A. *Suppressive and facilitatory spatial interactions in peripheral vision: Peripheral crowding is neither size invariant nor simple contrast masking*. Journal of Vision, Vol. 2, 2002, No. 2, page 3–3
- [47] CHUNG S. T. L., LEVI D. M., LEGGE G. E. *Spatial-frequency and contrast properties of crowding*. Vision Research, Vol. 41, 2001, No. 14, pp. 1833–1850
- [48] MARTEN-ELLIS S. M., BEDELL H. E. *Do different mechanisms mediate contour interaction and crowding in the fovea and visual periphery?* Investigative Ophthalmology & Visual Science, Vol. 56, 2015, No. 7, page 2213
- [49] NAZIR, T. A. *Effects of lateral masking and spatial precueing on gap-resolution in central and peripheral vision*. Vision Research, Vol. 32, 1992, No. 4, pp. 771–777
- [50] HESS R. F., DAKIN S. C., KAPOOR N. *The foveal "crowding" effect: physics or physiology?* Vision Research, Vol. 40, 2000, No. 4, pp. 365–370
- [51] LEVI D. M., KLEIN S. A., HARIHARAN S. *Suppressive and facilitatory spatial interactions in foveal vision: Foveal crowding is simple contrast masking*. Journal of Vision, Vol. 2, 2002, No. 2, page 2
- [52] CHUNG S. T. L., TJAN B. S. *Shift in spatial scale in identifying crowded letters*. Vision Research, Vol. 47, 2007, No. 4, pp. 437–451
- [53] FREEMAN J., CHAKRAVARTHI R., PELLI D. G. *Substitution and pooling in crowding*. Attention, Perception, & Psychophysics, Vol. 74, 2011, No. 2, pp. 379–396
- [54] HERZOG M. H., MANASSI M. *Uncorking the bottleneck of crowding: a fresh look at object recognition*. Current Opinion in Behavioral Sciences, Vol. 1, 2015, pp. 86–93
- [55] RASHAL E., YESHURUN Y. *Contrast dissimilarity effects on crowding are not simply another case of target saliency*. Journal of Vision, Vol. 14, 2014, No. 6, pp. 1–12

- [56] KOOI F. L., LEVI D. M., TRIPATHY S. P., TOET A. *The effect of similarity and duration on spatial interaction in peripheral vision*. *Spatial Vision*, Vol. 8, 1994, No. 2, pp. 255–279
- [57] BEDELL E. H., SIDEROV J., PLUHÁČEK F. *Contrast Energy and Contour Interaction*. *Optometry and Visual Science*, Vol. 96, 2019, No. 12, pp. 940-947
- [58] RABIN, J. *Luminance Effects on Visual Acuity and Small Letter Contrast Sensitivity*. *Optometry and Vision Science*, Vol. 71, 1994, No. 11, pp. 685–688
- [59] JOHNSON C. A., CASSON E. J. *Effects of Luminance, Contrast, and Blur on Visual Acuity*. *Optometry and Vision Science*, Vol. 72, 1995, No. 12, pp. 864–869
- [60] WOOD J. M., OWENS D. A. *Standard Measures of Visual Acuity Do Not Predict Drivers' Recognition Performance Under Day or Night Conditions*. *Optometry and Vision Science*, Vol. 82, 2005, No. 8, pp. 698–705
- [61] LIN R. J., NG J. S., NGUYEN A. L. *Determinants and Standardization of Mesopic Visual Acuity*. *Optometry and Vision Science*, Vol. 92, 2015, No. 5, pp. 559–565
- [62] LOVIE-KITCHIN J. E., BROWN B. *Repeatability and Intercorrelations of Standard Vision Tests as a Function of Age*. *Optometry and Vision Science*, Vol. 77, 2000, No. 8, pp. 412–420