



تأثیر روشنایی پس‌زمینه و پدیده تردشوندگی در ارتباط بین روشنایی و درخشندگی

حامد کریمی‌پور^۱، سعیده گرجی‌کندی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

۲- استادیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵

تاریخ دریافت: ۹۴/۳/۳۱ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۴/۶/۶ تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۲۲ در دسترس به صورت الکترونیک: ۹۴/۷/۱۱

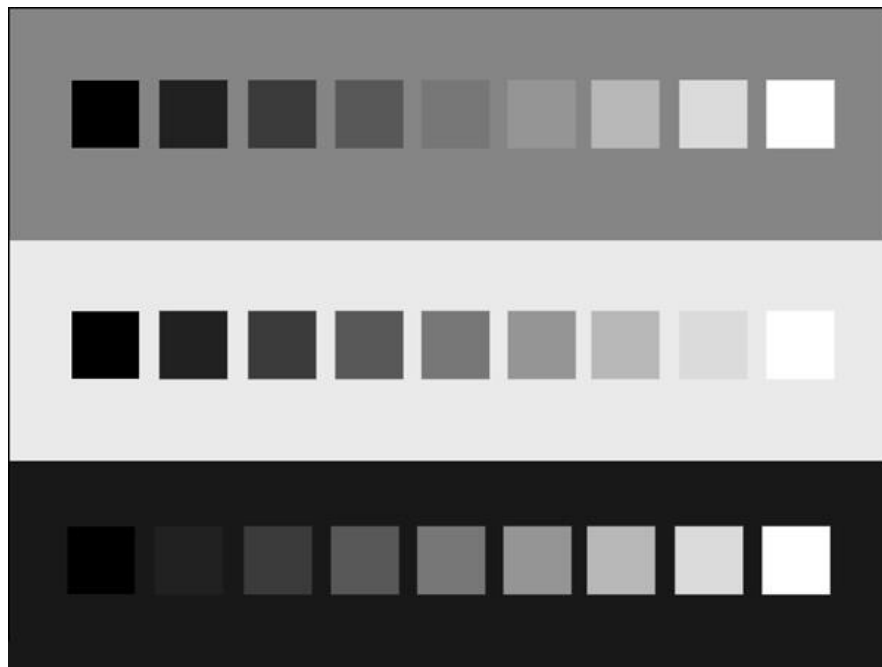
چکیده

رابطه بین روشنایی و درخشندگی، یکی از روابط سایکوفیزیکی است که از اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم تا به امروز محل بحث بوده است. دو نوع رابطه کلی که برای این هدف پیشنهاد شده‌اند عبارتند از: مدل لگاریتمی و مدل توانی. برازش منحنی‌های حاصل از این دو مدل کلی بر روی داده‌های تجربی حاکی از عملکرد مطلوب هر دو مدل است. هر چند به نظر می‌رسد مبنای ریاضیاتی مدل لگاریتمی، با فرض یکسان بودن گام‌های چشمی در سطوح مختلف روشنایی، قابل قبول تر است. یکی از مهم‌ترین عواملی که بر رابطه بین روشنایی و درخشندگی اثر می‌گذارد، روشنایی پس‌زمینه‌ای است که نمونه‌ها بر روی آن قرار می‌گیرند. هنگامی که روشنایی نمونه به روشنایی پس‌زمینه نزدیک می‌شود، سیستم بینایی انسان نسبت به تغییرات روشنایی نمونه حساس‌تر می‌شود، این اثر با عنوان "تردشوندگی" شناخته می‌شود. در بین توابع مختلف لگاریتمی، رابطه ویتل با در نظر گرفتن این اثر و دیگر عوامل موثر بر این رابطه، نسبت به دیگر روابط لگاریتمی برتری یافته است. تا به امروز همچنان مقایسه مدل ویتل با مدل‌های توانی (از جمله L^*) پاسخ قطعی نیافته است. هدف از این مقاله، مروری بر مطالعات انجام شده پیرامون اثر تردشوندگی - از آغاز تا به امروز - و همچنین مدل‌هایی است که برای پیش‌بینی اثر مذکور ارائه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی

روشنایی، درخشندگی، پس‌زمینه، تردشوندگی.

چکیده تصویری





Effect of background lightness and crispening phenomena in relation between lightness and brightness

Hamed Karimipour, Saeideh Gorji Kandi*

1- Polymer Engineering and Color Technology Department, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 4413-15875, Tehran, Iran.

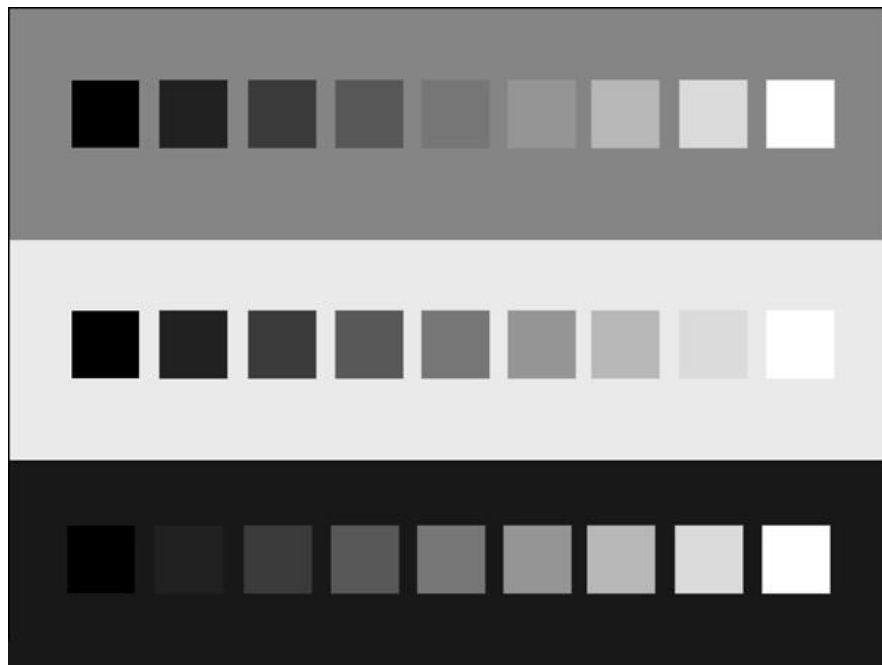
Abstract

The relation between lightness and brightness is one of the psychophysical relations, which has been discussed by the late nineteenth century and early twentieth century. Two types of equations have been suggested for this purpose: Logarithmic model and Power-law model. The results of curve fitting of these two general models versus experimental data showed acceptable performance for both logarithmic and power-law equations. However it seems that mathematical basic of logarithmic model, by assuming that visual steps in the different levels of lightness are the same, is more acceptable. One of the most important parameters which affects the relation between lightness and brightness, is the lightness of the background on which the samples were presented. When the lightness of the sample is closed to the lightness of the background, on which the sample is observed, the human visual system is more sensitive to the changes of sample's lightness; this effect is called Crispening. Among different logarithmic functions, Whittle's equation, which considers this effect and other important parameters, is superior to other logarithmic functions. Till now, the comparison between Whittle's model and other power-law's model (for example: L^*) has been given no definitive answer. The aim of this paper is to review the studies about "crispening effect" - from the beginning till now-and the models proposed for predicting this effect.

Keywords

Lightness, Brightness, Background, Crispening.

Graphical abstract



*Corresponding author: s.gorji@aut.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مهم ترین روابط سایکوفیزیکی^۱، ارتباط بین روشنایی^۲ نمونه و درخشندگی^۳ آن است (روشنایی نمونه بیانگر میزان نور رسیده از سطح آن است که یک ویژگی قابل اندازه گیری است حال آنکه درخشندگی توسط سیستم بینایی درک می شود). از اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، دو نوع رابطه کلی برای روشنایی و درخشندگی ارائه شده است. یکی از این روابط- که به قانون وبر^۴ معروف است- بیانگر آن است که ارتباط بین این دو مفهوم بصورت یک تابع لگاریتمی است [۱]. وبر معتقد بود که در سطح روشنایی L، اگر روشنایی در حد آستانه بصری (ΔL) تغییر کند، نسبت زیر برقرار است:

$$K = \frac{\Delta L}{L} \quad (2)$$

در رابطه ۱، ΔL بیانگر تغییر روشنایی در حد آستانه، L بیانگر روشنایی زمینه و K مقداری ثابت است. فخنر^۵ بر مبنای قانون وبر و با دو فرض زیر رابطه ۲ را برای ارتباط بین روشنایی و درخشندگی پیشنهاد کرد که به رابطه فخنر- وبر معروف شد.

۱- گام های بینایی در سطوح مختلف روشنایی برابرند، به عبارت دیگر درک سیستم بینایی انسان از تغییر درخشندگی در حد آستانه (یک گام بینایی) در سطوح مختلف روشنایی یکسان است.

۲- اختلاف های صرفاً قابل تشخیص^۶ (به عبارت دیگر، اختلاف در حد آستانه تشخیص) قابلیت جمع پذیری دارند.

$$B = C \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) \quad (2)$$

در رابطه ۲، L بیانگر روشنایی نمونه، L_0 سطح روشنایی زمینه، C ضریبی ثابت و B بیانگر درخشندگی است.

رابطه دیگری که توسط استیونس^۷ و با تشکیک در دو فرض فخنر مطرح شد بیان می دارد که این رابطه از نوع توانی است [۲]:

$$B = K(L - L_0)^\beta \quad (3)$$

در رابطه ۳ مقادیر K و β به سطح تطبیق^۸ مرتبط هستند. منظور از سطح تطبیق شدت روشنایی است که نمونه تحت آن روشن شده است. یکی از عواملی که در درک درخشندگی نمونه توسط سیستم بینایی انسان موثر

است اما در روابط فوق نادیده گرفته شده است، پس زمینه ای است که نمونه بر روی آن قرار می گیرد. اگر نمونه ای روشن بر روی پس زمینه تیره قرار بگیرد، درخشندگی آن بیشتر می شود و اگر نمونه ای تیره بر روی پس زمینه روشن قرار گیرد، درخشندگی آن کمتر می شود. به این اثر "تباين هم زمان"^۹ می گویند. دانشمندان در دهه ۱۹۶۰ میلادی ضمن مطالعه اثر تباين هم زمان، متوجه پدیده ای دیگر شدند که بعدها "اثر تردشوندگی"^{۱۰} نام گرفت. این اثر بیان می دارد هنگامی که روشنایی نمونه به روشنایی پس زمینه نزدیک می شود، سیستم بینایی انسان حساسیت بیشتری نسبت به تغییر روشنایی نمونه نشان می دهد، به عبارت دیگر با نزدیک شدن روشنایی نمونه به روشنایی پس زمینه، سیستم بینایی انسان تغییرات کوچک تر در روشنایی نمونه را تشخیص می دهد. از آن زمان دانشمندان در صد آن برآمدند که رابطه ای بین روشنایی نمونه و درخشندگی آن بنا کنند که اثر تردشوندگی را نیز دربر داشته باشد. همچنین دانشمندان دریافتند که سیستم بینایی انسان، اختلاف رنگ بیشتری را در یک جفت نمونه که بر روی پس زمینه ای با رنگ مشابه قرار گرفته اند، درک می کند. از همین رو تعریف دیگری نیز توسط فیرچايلد^{۱۱} ارائه گردید بنام تردشوندگی که عبارت از افزایش اختلاف رنگ درک شده در یک جفت نمونه بر روی پس زمینه ای با رنگ مشابه جفت نمونه می باشد [۳]. در ادامه به بررسی روابط مطرح شده بین روشنایی و درخشندگی می پردازیم.

۲- معرفی پدیده تردشوندگی

تاکاساکی^{۱۲} در سال ۱۹۶۵ میلادی [۴] آزمایشی انجام داد که در طی آن مشاهده کننده ها می بایست دو سری نمونه-نمونه های آزمایشی و استاندارد- را با یکدیگر همانند می کردند. پس زمینه های مورد استفاده، نمونه های مانسل با روشنایی های شماره ۱ تا ۹ بودند. در هر بار آزمایش، روشنایی پس زمینه برای "نمونه آزمایشی" با روشنایی پس زمینه برای "نمونه استاندارد" تفاوت داشت. وی در خلال این آزمایش متوجه شد که نمودار "روشنایی نمونه آزمایشی-روشنایی نمونه استاندارد" در یک قسمت دچار برآمدگی می شود (شکل ۱).

برای درک علت وقوع این پدیده، وی آزمایش قبل را با جفت پس زمینه هایی انجام داد که علی رغم متفاوت بودن متوسط شماره روشنایی شان، اختلاف شماره روشنایی شان- بر طبق شماره های مانسل- برابر ۴ بود (شکل ۲). همانطور که از شکل ۲ مشخص است، با ثابت بودن مقدار اختلاف شماره روشنایی جفت پس زمینه ها و متفاوت بودن متوسط شماره روشنایی شان، موقعیت برآمدگی مذکور تغییر می کند. در نتیجه، وی دریافت که این پدیده ناشی از ارتباطی بین انعکاس نمونه و انعکاس پس زمینه است. نتایج حاصل نشان داد هنگامی که روشنایی نمونه به روشنایی پس زمینه نزدیک باشد، تغییرات کوچک در روشنایی نمونه منجر به تغییرات زیاد در ادراک

¹ Psychophysics

² Lightness

³ Brightness

⁴ Weber's Law

⁵ Fechner

⁶ Just Noticeable Difference

⁷ Stevens

⁸ Adaptation Level

⁹ Simultaneous Contrast

¹⁰ Crispning effect

¹¹ Fairchild

¹² Takasaki

مقادیر آنها برای چند سری مختلف در مقاله گزارش شده است. به عبارت دیگر ثابت C_1 بیانگر تاثیر کلی روشنایی پس زمینه است که این اثر در شکل ۱ به صورت فاصله نمودارها از خط قطری نشان داده شده است. ثابت C_2 بیانگر تاثیر روشنایی پس زمینه در نزدیکی روشنایی نمونه است که به صورت برآمدگی نمودارها در شکل ۱ نشان داده شده است. ثابت C_3 بیانگر میزان دامنه و شدت اثر تردشوندگی است که در شکل ۱ به صورت تیزی برآمدگی نشان داده شده است. همچنین V_b بیانگر روشنایی پس زمینه بر حسب روشنایی مانسل است. \bar{V}_b متوسط روشنایی دو پس زمینه ای است که در هر نوبت به کار گرفته شده‌اند. V روشنایی نمونه و L نیز بیانگر درخشندگی نمونه است که توسط سیستم بینایی انسان ادراک می‌شود.

$$\begin{cases} L=V-C_1 V_b + f(V, V_b, \bar{V}) \\ f(V, V_b, \bar{V})=C_2 \bar{V}_b [(V-V_b)/C_3] e^{-|V-V_b|/C_3} \end{cases} \quad (4)$$

تاکاساکی منحنی حاصل از رابطه ۴ را (حل رابطه مذکور به روش گرافیکی انجام شده است) بر روی داده های پنج مشاهده کننده برازش کرد و جدول ۱ را ارائه داد.

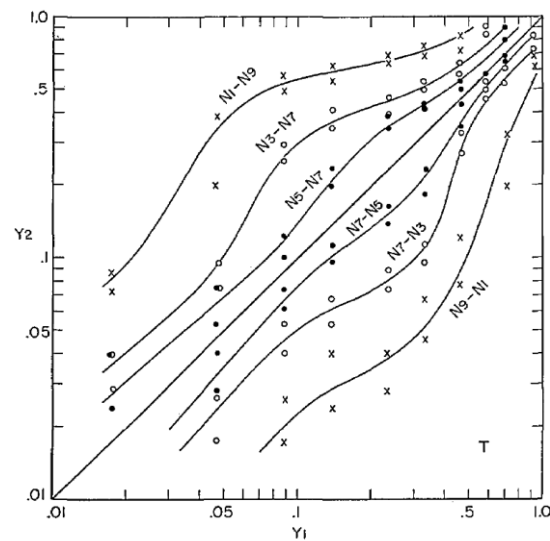
جدول ۱- ثوابت موجود در رابطه ۱ برای پنج مشاهده کننده مختلف [۴].

مشاهده کننده	C_1	C_2	C_3
H	۰/۳۵	۰/۵	۱/۵
K	۰/۳	۰/۴	۱/۴
J	۰/۲۲	۰/۲۵	۱/۵
T	۰/۳۵	۰/۵	۱/۵
Y	۰/۲	۰/۱۵	۰/۸

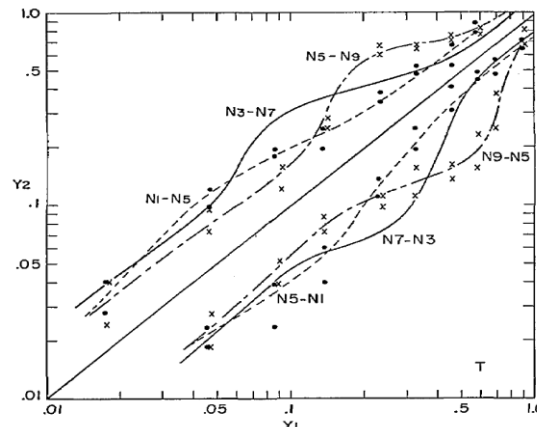
۳- پیشنهاد تابع توانی پیش بینی کننده رابطه روشنایی- درخشندگی

استیونس در سال ۱۹۶۲ میلادی [۲] بیان کرده بود که بر طبق یک قانون جهان شمول سایکوفیزیکی، تمام "وجوه حسی"^۳ از قانون توانی تبعیت می‌کنند، اما هر سیستم حسی، توان خاص خود را دارد. بر مبنای این نظر، درخشندگی - که در سیستم بینایی بیان می‌شود- تحت شرایط مشخص - مثلاً تطبیق در روشنایی یا تاریکی- قانون توانی مشخص دارد. سملروث^۴ در سال ۱۹۷۰ میلادی [۵] با رویکرد سایکوفیزیکی مورد نظر استیونس سعی در مدل سازی اثر تردشوندگی کرد. وی این فرضیه را مطرح کرد که در برابر شار روشنایی دو پاسخ α و β وجود دارد که هر دو از قانون توانی تبعیت می‌کنند. پاسخ به روشنایی نمونه α نامیده می‌شود و پاسخ به تفاوت روشنایی نمونه با محیطش β نام دارد. فرضیه سملروث با فرض "تباین هم‌زمان" به صورت رابطه ۵ نوشته می‌شود.

ما از روشنایی آن می‌شود. تاکاساکی این پدیده را "ترد شدگی" نامید.



شکل ۱- آزمایش همانندسازی تاکاساکی. شماره‌های N در شکل بالا نشان دهنده روشنایی پس زمینه بر طبق شماره‌های مانسل است. Nهای سمت چپ، روشنایی پس زمینه نمونه استاندارد است و Nهای سمت راست، روشنایی پس زمینه نمونه آزمایشی است. محور عمودی، روشنایی نمونه آزمایشی و محور افقی، روشنایی نمونه استاندارد است [۴].



شکل ۲- تکرار آزمایش اولیه برای جفت پس زمینه‌هایی که علی‌رغم متفاوت بودن متوسط شماره روشنایی مانسلشان، مقدار اختلاف شماره روشنایی‌های مذکور برای جفت پس زمینه‌های مورد استفاده یکسان است [۴].

در ادامه توجه وی به سمت مدل سازی ریاضی اثر مذکور معطوف شد. وی با استفاده از "تئوری القایی"^۱ - که بیانگر اثر روشنایی پس زمینه بر روشنایی نمونه است- و نتایج به دست آمده از آزمایش هایش، رابطه ۴ را برای همانندسازی دو نمونه بر روی پس زمینه‌های با روشنایی متفاوت پیشنهاد کرد. در رابطه ۴ ثابت‌های C_1 ، C_2 و C_3 به ترتیب بیانگر "اثر القایی"^۲، "مقدار تردشوندگی" و "مقدار تیزی برآمدگی" است و

³ Sensory modality

⁴ Semmelroth

¹ Induction Theory

² Sharpness

۴- پیشنهاد تابع لگاریتمی پیش‌بینی‌کننده رابطه روشنایی-درخشندگی

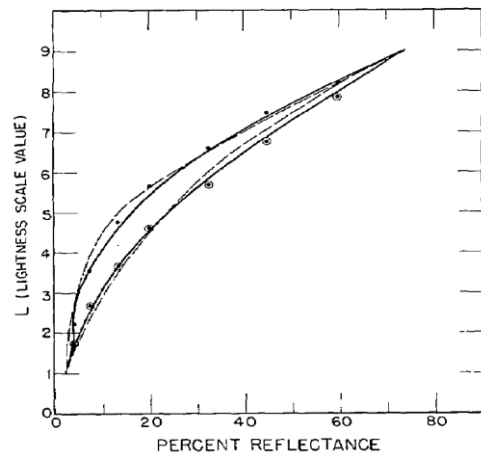
در سال ۱۹۸۶ میلادی [۶] ویتل^۲، به بررسی "اثر تردشوندگی" برای اختلاف روشنایی‌های در حد آستانه پرداخت. در آزمایش او، دو نمونه با روشنایی بالاتر یا پایین‌تر از روشنایی پس‌زمینه، روی پس‌زمینه قرار می‌گرفت اما روشنایی هر دو نمونه در ابتدای کار یکسان بود. وظیفه مشاهده‌کننده عبارت بود از تغییر روشنایی یکی از نمونه‌ها به اندازه‌ای که از لحاظ چشمی متوجه شود که این دو نمونه با یکدیگر متفاوت شده‌اند و به محض درک این تفاوت آزمایش متوقف شده و اختلاف روشنایی دو نمونه ثبت می‌شد، این آزمایش برای جفت نمونه‌ها با روشنایی متفاوت انجام شد. به این مقدار اختلاف روشنایی، اختلاف روشنایی در حد آستانه گفته می‌شود. نتایج حاصل از این آزمایش نشان داد که رابطه بین روشنایی و اختلاف روشنایی در حد آستانه به این شکل است:

$$\begin{cases} L = S^m + K / S - B / n & S \geq B \\ L = S^m - K / S - B / n & S \leq B \end{cases} \quad (۵)$$

در رابطه ۵، S و B به ترتیب بیانگر روشنایی نمونه و محیط آن هستند. در رابطه فوق منظور از L درخشندگی نمونه است که توسط مشاهده‌کننده درک می‌شود. سلمروت سعی کرد تا با استفاده از داده‌های تاکاساکی [۴] m، n و K را به دست بیاورد. اما متوجه شد که داده‌های تاکاساکی در مشخص کردن m (ثابت پاسخ α) ناتوان است چرا که داده‌های مذکور اثر پس‌زمینه را در خود داشتند. به همین دلیل سلمروت به سراغ داده‌های استیونس [۲] رفت و از مجموع داده‌های تاکاساکی و استیونس ثابت‌های موجود را به دست آورد بطوریکه $n=0.72$ ، $m=0.4$ و $K=0.65$. سپس وی به مقایسه کارایی رابطه ۵ با رابطه آدامس-کوب-جاد^۱ پرداخت. رابطه آدامس-کوب-جاد به صورت رابطه ۶ می‌باشد.

$$B=L/L+L_B \quad (۶)$$

در رابطه ۶ ترم L اشاره به روشنایی نمونه و ترم L_B اشاره به روشنایی پس‌زمینه دارد. B نیز درخشندگی درک شده توسط سیستم بینایی انسان است. برای مقایسه کارایی این دو رابطه، وی از داده‌های بازسازی شده مانسل بر روی پس‌زمینه‌هایی با انعکاس ۸۵٪ و ۴٪ استفاده کرد و دو رابطه مذکور را به منظور برازش منحنی بر روی آن داده‌ها به کار برد و نمودار شکل ۳ را ارائه داد. منحنی برازش شده توسط رابطه ۵ با "خط ممتد" و منحنی برازش شده از رابطه ۶ با "خط بریده بریده" در شکل مشخص شده است. همانطور که از نمودار زیر مشخص است رابطه ۵ نسبت به رابطه ۶ تطابق بیشتری با داده‌های مذکور دارد.



شکل ۳- دایره‌های توپر و تو خالی به ترتیب نمایانگر روشنایی ادراک شده از نمونه‌های شماره ۱ تا ۹ مانسل بر روی پس‌زمینه با انعکاس ۸۵٪ و ۴٪ است. خط تیره ممتد و خط تیره بریده بریده، به ترتیب نمایانگر پیش‌بینی داده‌های مذکور توسط رابطه ۵ و رابطه ۶ می‌باشد [۵].

- اگر روشنایی نمونه‌ها از روشنایی پس‌زمینه بیشتر باشد، این رابطه از قانون وبر نسبت به $\Delta L=L-L_B$ تبعیت می‌کند که ترم L_B نشانگر روشنایی پس‌زمینه می‌باشد.
- اگر روشنایی نمونه‌ها از روشنایی پس‌زمینه کمتر باشد، به شرطی که اختلاف روشنایی‌شان با پس‌زمینه کم باشد، از قانون وبر نسبت به $\Delta L=L-L_B$ تبعیت می‌کند، در غیر این صورت از قانون وبر نسبت به L تبعیت می‌کند.

به عنوان مثال چنانچه تهیه یک مقیاس خاکستری با فواصل منظم بصری مدنظر باشد به طوری که K (نسبت ثابت در رابطه وبر) برابر ۲ باشد، اگر سطح روشنایی نمونه حاضر برابر ۲۰ و سطح روشنایی پس‌زمینه برابر ۱۰۰ باشد، برای نمونه بعدی کافی است روشنایی نمونه دو برابر شود. اما اگر روشنایی نمونه برابر ۱۰۱ باشد و روشنایی پس‌زمینه ۱۰۰ باشد، برای اینکه برابر بودن گام‌های بینایی رعایت شود، باید قانون وبر نسبت به ΔL در نظر گرفته شود. یعنی سطح روشنایی بعدی نمونه برابر ۱۰۲ باشد (نباید سطح روشنایی بعدی نمونه ۲۰۲ باشد). واحد L در این آزمایش cd/m^2 بوده است.

در سال ۱۹۹۱ میلادی [۷] ویتل با توجه به آزمایش‌هایی که در سال‌های قبل انجام داده بود، بیان کرد که رابطه آستانه^۳ تشخیص تغییر روشنایی نمونه، به نزدیکی روشنایی نمونه به پس‌زمینه ارتباط دارد. بر این مبنا، هنگامی که روشنایی نمونه (L) از روشنایی پس‌زمینه دور باشد (تباين زیاد)، آستانه مذکور از قانون وبر نسبت به L تبعیت می‌کند و اگر روشنایی نمونه به روشنایی پس‌زمینه نزدیک باشد (تباين کم)، آستانه مذکور از قانون وبر نسبت به ΔL تبعیت می‌کند که ΔL بیانگر اختلاف روشنایی نمونه و پس‌زمینه است. برای سنجش درستی فرضیه مذکور برای اختلاف‌های بالاتر از آستانه، وی آزمایشی را طراحی کرد که بر

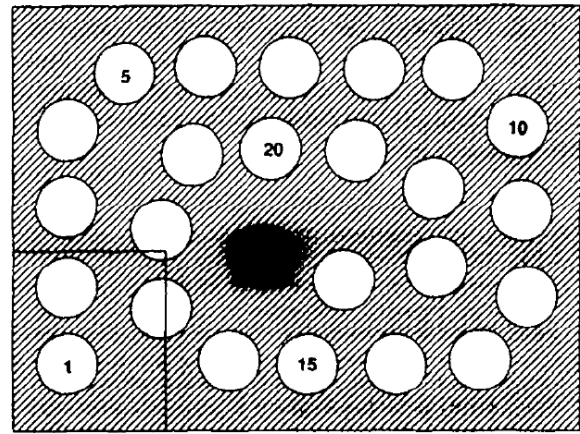
² Whittle

³ Threshold

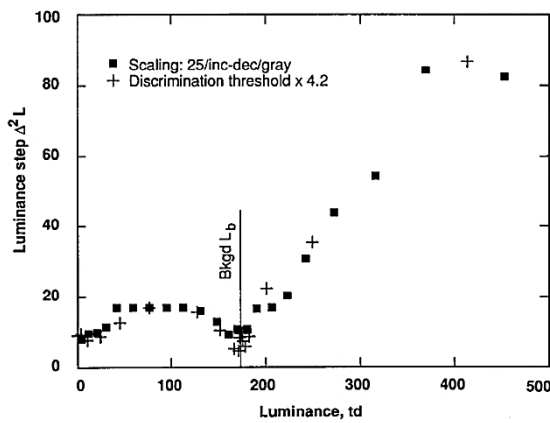
¹ Adams-Cobb-Judd

نزدیک می شود اختلاف روشنایی تنظیم شده کاهش می یابد و این امر - که موید "اثر تردشوندگی" است- به وضوح در تغییر شیب این نمودار دیده می شود. در این شکل مربع های تو پر نشانگر نمودار مقیاس "درخشندگی-روشنایی" و مربع های تو خالی نشانگر نمودار "مقیاس درخشندگی-لگاریتم روشنایی" می باشند. مطالب گفته شده با وضوح بیشتری در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل محور عمودی بیانگر اختلاف روشنایی تنظیم شده بین دو دایره کناری و محور افقی روشنایی هر دایره است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود، هنگامی که روشنایی دایره ها به روشنایی پس زمینه نزدیک می شود، نمودار دارای یک کمینه می شود که این کمینه بیانگر "اثر تردشوندگی" است.

مبنای آن افراد موظف بودند تا ۲۵ دایره با روشنایی کم تا زیاد- را به نحوی بر روی یک پس زمینه ثابت بچینند که مقدار اختلاف روشنایی درک شده دایره های مجاور یکسان باشد (شکل ۴).



شکل ۴- دایره های با روشنایی های مختلف در آزمایش ویتل [۷].



شکل ۶- محور عمودی اختلاف روشنایی دایره های مجاور و محور افقی روشنایی هر دایره است [۷].

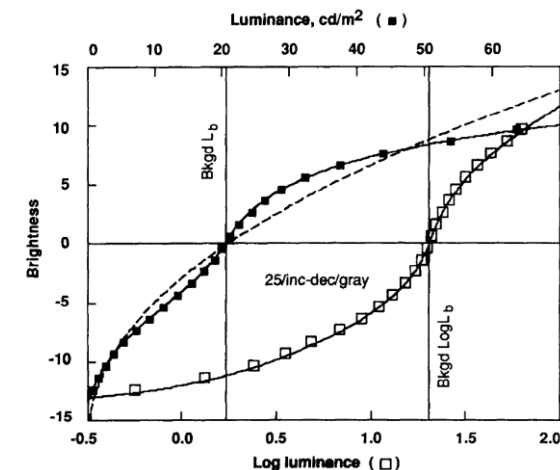
در نتیجه این طراحی روشنایی دایره ها به روشنایی پس زمینه نزدیک می شد و سپس از آن دور می شد. وی نمودار شکل ۵ را برای این آزمایش ارائه داد تا اثر تردشوندگی را در آزمایش خود نشان دهد. همانطور که در نمودار مذکور می بینیم اختلاف روشنایی دو دایره مجاور با نزدیک شدن روشنایی دایره ها به روشنایی پس زمینه کاهش می یابد و با دور شدن از آن دوباره افزایش می یابد. این مطلب موید اثر تردشوندگی است. این موضوع به وضوح در شکل ۵ نشان داده شده است.

با توجه به این که روند تغییرات اختلاف روشنایی در هر دو حالت آستانه و بالاتر از آستانه یکسان بود، وی به مدل سازی "اثر تردشوندگی" پرداخت. او برای این منظور ترم $W = \frac{\Delta L}{L_{min}}$ را تعریف کرد و آن را تابع تباین نامید. مدل کلی پیشنهادی ویتل بصورت رابطه ۷ می باشد.

$$\text{Brightness} = a \log(1 + bW) \quad (7)$$

در رابطه ۷، a و b ثابت هایی هستند که با داده های تجربی به دست می آیند. در نهایت او با در نظر گرفتن اصلاحاتی بر روی تابع تباین، مدل ۸ را برای پیش بینی درخشندگی پیشنهاد کرد که "اثر تردشوندگی" نیز در آن لحاظ شده است.

$$\begin{cases} B = B_b + S_b (1+c) \log(1 + \frac{W}{W_0}) & W > 0 \\ B = B_b - S_b \log(1 - \frac{W}{W_0}) & W < 0 \end{cases} \quad (8)$$



شکل ۵- مقیاس درخشندگی برای ۲۵ دایره چیده شده با فواصل منظم بینایی. در این نوع چینش دایره ها، هر دو دایره مجاور دارای اختلاف روشنایی درک شده یکسانی هستند [۷].

در شکل ۵، محور عمودی مقیاس درخشندگی (درک شده) و محور افقی روشنایی (در دو حالت لگاریتمی و غیرلگاریتمی) می باشند. برای به دست آوردن اختلاف روشنایی برابر بین دایره ها، همانطور که در این شکل مشاهده می شود، هنگامی که روشنایی دایره ها به روشنایی پس زمینه

روشنایی‌شان از خودشان است. وی سپس به بررسی مبنای ریاضی روابطی پرداخت که رابطه روشنایی و درخشندگی را پیش بینی می‌کند. در نهایت با بررسی روابط ریاضی و استفاده از داده‌های هیمن، وی به این نتیجه رسید که در محاسبه L^* استفاده از روابط لگاریتمی از لحاظ ریاضی صحیح‌تر است.

۵- مقایسه مدل‌های مختلف در پیش‌بینی اثر تردشوندگی

۵-۱- مقایسه دو مدل لگاریتمی ویتل و کینگدوم

در سال ۱۹۹۸ میلادی [۱۰] بلید^۶ و مارتنس^۷، دو مدل ویتل و کینگدوم را برای داده‌هایی که قبلاً به دست آورده بودند، بررسی کردند. قبل از انجام این بررسی، آنان پیشنهاد کردند که با توجه به اینکه مدل کینگدوم در پیش‌بینی اثر ترد شونددگی ضعیف است و همچنین با توجه به اینکه عدم تقارن موجود در بین نمونه‌های با روشنایی بالاتر از پس‌زمینه و نمونه‌های با روشنایی پایین‌تر از پس‌زمینه را در نظر نمی‌گیرد، مدل مذکور به شکل رابطه ۱۱ اصلاح شود.

$$\begin{cases} B = B_b + S_b \frac{1+c}{n} \log \left(\left(1 + \frac{G}{G_0} \right)^n - 1 \right) & G > 0 \\ B = B_b + S_b \frac{1+c}{n} \log \left(\left(1 + \frac{G}{G_0} \right)^n - 1 \right) & G < 0 \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، B_b و S_b ، وابسته به روشنایی پس‌زمینه هستند و با استفاده از داده‌های تجربی معین می‌گردند. c نیز برای بحث عدم تقارن - که در رابطه ۸ ذکر شد- در رابطه اصلاح شده جای گرفته است. G تابع تباین است و G_0 تابع تباین نرمال‌کننده است، به عبارت دیگر G_0 در معادله ۱۱ نقش W_0 را در رابطه ۸ دارد و یک عدد ثابت است که وابسته به روشنایی پس‌زمینه است. این ضریب از این جهت در رابطه گنجانده شده است که در آزمایش‌های عملی نشان داده شده است که وجود این ضریب در فرمول باعث می‌شود که اثر تردشوندگی بهتر پیش‌بینی گردد. برای این بررسی، آنان از مشاهده‌کنندگان خواستند تا ۱۶ نمونه خاکستری را شکل ۱ به گونه‌ای بچینند که اختلاف درخشندگی هر دو نمونه مجاور یکسان باشد. نتایج به دست آمده نشان داد که مدل ویتل نسبت به مدل اصلاح نشده مولدن و کینگدوم عملکرد بهتری دارد اما اگر اصلاحات پیشنهادی توسط بلید و مارتنس بر روی مدل کینگدوم اعمال شود، هر دو مدل عملکرد نسبتاً یکسانی خواهند داشت. سپس با استفاده از داده‌های به دست آمده به بررسی و بهینه‌سازی مدل‌های مذکور پرداختند و سعی کردند رابطه‌هایی را ارائه دهند تا به کمک‌شان مقادیر بهینه‌ای برای ضرایب مدل‌های فوق به دست آورند که برای مدل ویتل به صورت رابطه ۱۲ می‌باشد.

در رابطه ۸ ترم‌های B_b و S_b ، وابسته به روشنایی پس‌زمینه هستند و با استفاده از داده‌های تجربی معین می‌گردند. ترم c بیانگر عدم تقارنی است که بین رفتار نمونه‌های با روشنایی بالاتر از پس‌زمینه و نمونه‌های با روشنایی پایین‌تر از پس‌زمینه وجود دارد. همچنین ترم بیانگر تابع تباین نرمال‌کننده است و یک عدد ثابت است که وابسته به روشنایی پس‌زمینه می‌باشد. در قسمت‌های بعدی این آزمایش، ویتل دریافت که با قرار دادن یک قاب مشکی اطراف نمونه‌های دایره‌ای شکل و انجام آزمایش به روال قبل، اثر تردشوندگی کاهش می‌یابد. وی همچنین دریافت که اختلاف فام بین نمونه‌های دایره‌ای و پس‌زمینه می‌تواند منجر به کاهش اثر ترد شونددگی شود.

در سال ۱۹۹۱ میلادی [۸] کینگدوم^۱ و مولدن^۲، با بیان اینکه تابع تباین ویتل از لحاظ فیزیولوژیکی غیرمحمتمل است، تابع تباین دیگری را بر مبنای کار لند^۳ که در رابطه ۹ آورده شده، پیشنهاد دادند.

$$G = \log \left(\frac{L + L_{dk}}{L_b + L_{dk}} \right) \quad (9)$$

در رابطه مذکور L بیانگر روشنایی نمونه، L_b بیانگر روشنایی پس‌زمینه و L_{dk} در اصطلاح بیانگر نور تاریک^۴ است و بیانگر آن است که هیچ نور فیزیکی وجود نداشته باشد. آنها بر مبنای تابع تباین پیشنهادی‌شان، مدل جدیدی بصورت رابطه ۱۰ برای پیش‌بینی درخشندگی پیشنهاد کردند:

$$B = B_b - S_b \operatorname{sgn}(G) \frac{|G|^n}{n} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، اگر $n = 0.31$ قرار داده شود، نتایج حاصل از این مدل به نتایج حاصل از مدل ویتل نزدیک می‌شود. منظور از $\operatorname{sgn}(G)$ علامت تابع تباین است.

در سال ۱۹۹۳ میلادی [۹]، کارتر^۵ به بررسی مدل‌های ریاضی پرداخت که برای ساختن مقیاس خاکستری در صفحات نمایشگر و کاربردهای پزشکی به کار می‌رود. با توجه به اینکه اختلاف روشنایی بین خاکستری‌ها در چنین مقیاسی فراتر از آستانه است، باید مدل‌هایی را به کار گرفت که در پیش‌بینی اثرات فراتر از آستانه نیز توانا باشند. در ادامه وی به بررسی مشکلات رابطه L^* در فضا رنگ CIELAB می‌پردازد. مشکل اول عدم توافق جهانی برای تعریف واحد از روشنایی است. مشکل دوم، در نظر نگرفتن اثر پس‌زمینه و اثرات مرتبط با پس‌زمینه است. مشکل سوم، مبهم بودن تعریف L^* است برای نمایشگرهایی که

¹ Kingdom

² Moulden

³ Land

⁴ Dark light

⁵ Carter

⁶ Blaid

⁷ Martens

به عبارت دیگر، یافتن یک رنگ مشخص در شکل ۷، به این قضیه ارتباط می‌یابد که تفکیک‌پذیری رنگ‌ها تا چه حد مناسب باشد. هنگامی که مشاهده‌کننده به رنگی نگاه می‌کند که کاملاً با رنگ هدف متفاوت است، سرعت نسبی تثبیت برای این رنگ برابر صفر است و مشاهده‌کننده سریعاً چشم خود را از روی آن رنگ برمی‌دارد. اما هنگامی که رنگ نمونه مذکور به رنگ نمونه هدف نزدیک باشد، مشاهده‌کننده زمان بیشتری را برای مشاهده آن در نظر می‌گیرد. اگر نمونه مذکور همان نمونه هدف باشد، مقدار سرعت نسبی تثبیت برابر ۱ می‌شود. کارتر سال‌ها قبل پیشنهاد کرد برای تعیین تفکیک‌پذیری رنگ‌ها، از رابطه‌های اختلاف رنگ استفاده شود و برای شروع، استفاده از فرمول‌های اختلاف رنگ CIELAB و CIELUV [۱۲] را پیشنهاد نمود. دلیل این پیشنهاد این بود که فرمول‌های مذکور برای بررسی اختلاف رنگ‌های بزرگ تنظیم شده بودند. اما در سال ۲۰۰۸ وی و همکارانش تصمیم گرفتند که از روابط اختلاف رنگ CIEDE2000 و CMC [۱۲] و اختلاف رنگ بر مبنای فضا رنگ OSA و مدل ظاهر رنگی CIECAM02 [۳] استفاده کنند و نتایج را با کارهای قبلی مقایسه نمایند. برای این کار نیاز به تعدادی نمونه رنگی داشتند که نمونه‌های مذکور را از داده‌های ویلیامز انتخاب کردند. برای این مقایسه، بر اساس رسم داده‌ها (شکل ۸)، رابطه ۱۳ ارائه گردید.

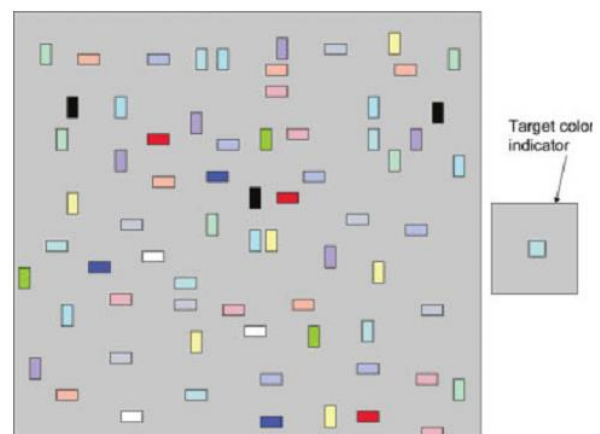
$$\begin{cases} \Delta E < K_{nee} & RFR = e^{-a(\Delta E)^b} \\ \Delta E > K_{nee} & RFR = e^{-a(K_{nee})^b} \end{cases} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳ منظور از Knee جایی است که در شکل ۸، نمودار تبدیل به خط افقی می‌شود. نتایج تحلیل آماری نشان داد که استفاده از رابطه‌های اختلاف رنگ CIEDE2000 و ΔE_{GP} و CIECAM02 نسبت به فرمول‌های اختلاف رنگ CIELAB و CIELUV نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. آنها همچنین تصمیم گرفتند تا مقیاس "اختلاف‌های صرفاً قابل تشخیص" (رابطه‌ای که توسط ویتل ارائه شده بود) را با مقیاس L^* مقایسه نمایند. برای این کار آنان نیاز به تعدادی نمونه غیررنگی داشتند که صرفاً اختلاف روشنایی داشته باشند. نمونه‌های مذکور نیز از بین نمونه‌های ویلیامز انتخاب گردید. در شکل ۹ و ۱۰ به ترتیب تابع روشنایی L^* و تابع پیشنهادی توسط ویتل در برابر RFR رسم شده‌اند. برای رسم این نمودارها، ابتدا مقدار RFR را محاسبه می‌کنند و سپس با استفاده از توابع روشنایی گفته شده، مقدار اختلاف روشنایی را برای هر نمونه محاسبه می‌کنند و نمودار برازش شده را با داده‌های تجربی می‌سنجند. نتایج حاصل با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهد که این دو مقیاس رفتاری مشابه دارند اما مزیت فرمول پیشنهادی ویتل این است که اثر تردشوندگی را نیز پیش‌بینی می‌کند. در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰، نقاط مشکی بیانگر حالت‌هایی است که در آزمایش مذکور روشنایی پس‌زمینه، بین روشنایی نمونه اصلی (سمت راست تصویر شکل ۷) و روشنایی نمونه‌های موجود بر پس‌زمینه سمت چپ تصویر شکل ۷ قرار داشته باشد.

$$\begin{cases} W_0 = 0.836 - 0.290 \log L_b \\ c = -0.181 + 0.014 L_b \end{cases} \quad (12)$$

۵-۲- مقایسه دو مدل لگاریتمی و توانی

در سال ۲۰۰۸ میلادی [۱۱]، کارتر و همکارش به بررسی کارایی فرمول‌های اختلاف رنگ در پیش‌بینی اختلاف رنگ و تفکیک‌پذیری نمونه‌هایی با اختلاف رنگ زیاد و اندازه بسیار کوچک (درجه) پرداختند. برای انجام چنین آزمونی، از روش "سرعت نسبی تثبیت"^۱ استفاده شد. در این روش، تعداد زیادی نمونه کوچک در رنگ‌های مختلف بر روی یک پس‌زمینه بزرگ نمایش داده می‌شدند (شکل ۷). همانطور که در این شکل دیده می‌شود، مشاهده‌کننده موظف است نمونه‌ای را که در سمت راست به تنهایی مشخص شده است در بین نمونه‌های موجود بر روی پس‌زمینه بزرگ بیابد. آنچه که در این آزمون ثبت می‌شود تعداد حرکت چشمان مشاهده‌کننده بر روی نمونه‌های موجود بر پس‌زمینه سمت چپ تصویر ۷ است. ثبت حرکت چشمان مشاهده‌کننده به این شکل صورت می‌گیرد: هنگامی که مشاهده‌کننده به هر یک از نمونه‌های موجود بر روی پس‌زمینه سمت چپ شکل ۷ نگاه می‌کند و سپس به منظور مقایسه با نمونه اصلی چشمان خود را به سمت نمونه موجود بر روی پس‌زمینه سمت راست شکل ۷ حرکت می‌دهد، یک حرکت چشم ثبت می‌گردد و برای تعیین سرعت نسبی تثبیت، مقدار زمانی که مشاهده‌کننده به نمونه‌ای بر روی پس‌زمینه سمت چپ تصویر نگاه می‌کند را بر زمانی که مشاهده‌کننده به نمونه اصلی بر روی پس‌زمینه سمت راست تصویر نگاه می‌کند تقسیم می‌کنند. تعیین این مطلب که مشاهده‌کننده برای یافتن نمونه همانند نمونه اصلی در بین نمونه‌های سمت چپ تصویر، چه تعداد نمونه را از نظر می‌گذرانند، میزان تفکیک‌پذیری^۲ را نشان می‌دهد. در نهایت حرکت ثبت‌شده چشمان با استفاده از یک سری روابط به تفکیک‌پذیری رنگ‌ها ارتباط پیدا می‌کند.



شکل ۷- نحوه نمایش نمونه‌های رنگی ویلیامز^۳ در آزمایش کارتر [۱۱]

¹ Relative Fixation Rate

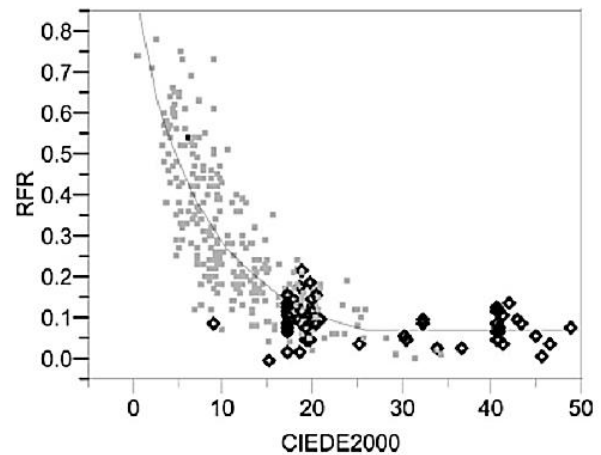
² Discriminability

³ Williams

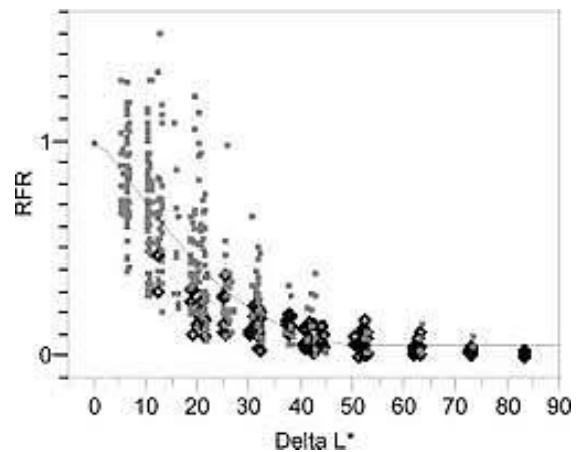
پرداختند که چه تابعی می‌تواند به شکل صحیح‌تری رابطه بین روشنایی-درخشندگی را پیش‌بینی کند؟ آنان بیان داشتند که صرف استفاده از برازش منحنی درست نیست و قبل از این کار می‌بایست مسائل نظری آن را بررسی کرد. به نظر آنان باید از تابع لگاریتمی استفاده کرد و استفاده از تابع توانی درست نیست. تابع لگاریتمی با تبعیت از قانون وبر و با تجمیع "اختلاف‌های صرفاً قابل تشخیص" با مشاهدات صورت گرفته در پس‌زمینه با روشنایی ثابت و "اختلاف‌های صرفاً قابل تشخیص" کوچک سازگار است. در پاسخ به مقاله آنان، در همان سال [۱۴] شخصی به نام کویینی مقاله‌ای نوشت که در آن بیان کرد آنان از اثر تردشوندگی غفلت کرده‌اند و هر تابعی با توجه به شرایطی که آزمایش در آن انجام می‌شود می‌تواند پاسخ‌گو باشد. او همچنین افزود که با توجه به اینکه افرادی ۳۰ سال در این زمینه تلاش کرده‌اند و نتوانستند تابع جامعی به دست آورند، این ایده تقویت می‌شود که احتمالاً دید شخصی^۲ تا حدودی تحت تاثیر آمار تجمعی^۳ تجربیات چشمی افراد است، به عبارت دیگر دید شخصی افراد تحت تاثیر تمامی چیزهایی است که فرد در طول زندگی مشاهده کرده است و تمامی این مشاهدات بر نحوه دید فرد موثر است. در پاسخ به مقاله وی نیز کارتر و بریل مقاله‌ای نوشتند [۱۵] و ادعا کردند لحاظ کردن اثر تردشوندگی در تابع روشنایی-درخشندگی استفاده از تابع توانی را ناکارآمدتر می‌کند. بهر تقدیر این موضع از مباحث علمی روز می‌باشد و هنوز پاسخ قطعی به آن داده نشده است.

۶- نتیجه‌گیری

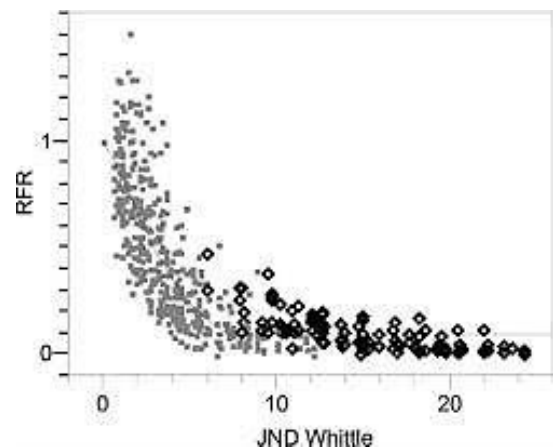
بعد از گذشت چند دهه همچنان سوالی که بر جای مانده، این است که چه تابعی در پیش‌بینی رابطه روشنایی (قابل اندازه‌گیری)-درخشندگی (درک شده در سیستم بینایی) عملکرد بهتری دارد؟ به نظر می‌رسد یک سوال کلیدی وجود دارد که می‌بایست قبل از تعیین نوع رابطه مذکور، به آن پاسخ داد: آیا یک گام بصری از لحاظ ادراکی در سطوح روشنایی مختلف متفاوت است؟ به عبارت دیگر اگر در سطح روشنایی پایین، روشنایی نمونه به اندازه آستانه تغییر کند، انسان از لحاظ ادراکی همان درکی را دارد که در سطح روشنایی بالا، روشنایی نمونه به اندازه آستانه تغییر کند؟ رابطه لگاریتمی پاسخ مثبت به این سوال را می‌طلبد. هرچند با برازش منحنی‌های ناشی از روابط توانی و لگاریتمی بر روی داده‌های تجربی، هر دو عملکرد نسبتاً خوبی از خود نشان داده‌اند اما به نظر می‌رسد از لحاظ ریاضیاتی توابع لگاریتمی مبنای درست‌تری برای پیش‌بینی رابطه روشنایی-درخشندگی دارند. در بین روابط لگاریتمی که تا به حال پیشنهاد شده‌اند، عنوان می‌شود که تابع ویتل با در نظر گرفتن عوامل متعددی از جمله: اثر پس‌زمینه و ترد شونده‌گی، عدم تقارن موجود بین دو حالتی که روشنایی نمونه بالاتر از روشنایی پس‌زمینه و یا پایین‌تر از روشنایی پس‌زمینه باشد، و همچنین در نظر گرفتن اثر نور تاریک و نور منتشر شده و لحاظ کردن آن در تابع تباین، نسبت به بقیه توابع لگاریتمی برتری داشته باشد.



شکل ۸- رسم اختلاف رنگ نمونه‌های رنگی بر اساس فرمول اختلاف رنگ CIEDE2000 در برابر RFR [۱۱].



شکل ۹- رسم اختلاف رنگ نمونه‌هایی با اختلاف روشنایی صرف، بر اساس رابطه L^* در فضا رنگ CIELAB در برابر RFR [۱۱].



شکل ۱۰- رسم اختلاف رنگ نمونه‌هایی با اختلاف روشنایی صرف، بر اساس رابطه ویتل در برابر RFR [۱۱].

در همین زمینه در سال ۲۰۱۲ میلادی [۱۳] بریل^۱ و کارتر به این بحث

^۲ Personal vision

^۳ Cumulative Statistics

^۱ Brill

۷-مراجع

1. H. E. Adler, English tr. of G. Fechner, "Elements of Psychophysics (Holt, Rinehart & Winston", New York, **1966**.
2. J. C. Stevens, S. S. Stevens, "Brightness Function: Effects of Adaptation", J. Opt Soc Am, 53, 375-385, **1962**.
3. M. D. Fairchild, "Colour appearance models", 2nd Edition, John Wiley & Sons, **2005**.
4. H. Takasaki, "Lightness change of grays Induced by change in reflectance of gray background", J. National Bureau of Standards, 56, 504-509, **1965**.
5. C. C. Semmelroth, "Prediction of lightness and brightness on different backgrounds", J. Opt Soc Am, 60, 1685-1689, **1970**.
6. P. Whittle, "Increments and decrements: Luminance discrimination", J. Vision Research, 26, 1677-1691, **1986**.
7. P. Whittle, "Brightness, discriminability and the crispening effect", J. Vision Res, 32, 1493-1507, **1992**.
8. F. Kingdom, B. Moulden, "A model for contrast discrimination with incremental and decremental test patches", J. Vision Research, 31, 851-858, **1991**.
9. R. C. Carter, "Gray scale and achromatic color difference", J. Opt Soc Am, 10, 1380-1391, **1993**.
10. N. Blaid, J. Martens, "Grey scale, the "crispening effect", and perceptual linearization", J. Signal Processing, 70, 231-245, **1998**.
11. R. C. Carter, R. Huertas, "Ultra large color difference and small subtense", Color Res Appl, 35, 4-17, **2008**.
12. M. R. Luo, "Development of colour-difference formulae", Rev Prog Color 32, 28-39, **2002**.
13. M. H. Brill, R. C. Carter, "Does lightness obey a log or a power law? Or is that the right question?", Color Res Appl, 39, 99-101, **2012**.
14. R. G. Kuehni, "Modeling lightness perception—Another point of view", Color Res Appl, 39, 102-104, **2012**.
15. M. H. Brill, R. C. Carter, "Modeling lightness perception—a response to Kuehni", Color Res Appl, 39, 105-106, **2012**.