



بهینه سازی بهره‌برداری روشنایی راه‌های دوخطه دو طرفه

محمدعلی پیرایش^۱، ابوالفضل محمدزاده مقدم^۲، علی اصغر صادقی^۳

۱- استادیار دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع

۲،۳- دانشجوی دکتری دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، گرایش

راه و ترابری

pirayesh@um.ac.ir

ab_mohammadzadeh@yahoo.com

al_sadeghi@yahoo.com

خلاصه

روشنایی راه یک عامل مهم و مؤثر در ایمنی جاده‌ای می‌باشد و هدف اصلی از تامین روشنایی جاده‌ای ایجاد محیطی مناسب برای تردد وسایل نقلیه می‌باشد بطوریکه دید سریع، دقیق و راحت در آنها امکان‌پذیر باشد. هزینه تامین روشنایی قابل توجه بوده و اثر آن بر هزینه‌های ایمنی جاده‌ای مهم و مؤثر است لذا تامین روشنایی مناسب با ملاحظه جنبه‌های فنی و اقتصادی یک مسئله مهم در تخصیص منابع محدود می‌باشد. هدف از این تحقیق، یافتن پارامترهای بهینه و مؤثر بر تامین و نگهداری امکانات روشنایی با توجه به حداقل کردن هزینه و دستیابی به حداقل روشنایی مورد نیاز می‌باشد. پارامترهای بررسی شده در این تحقیق دهنه چراغ، زاویه، طول تیرک، فاصله بین دو تیرک، نوع تیرک، فاصله از کنار راه، هزینه نگهداری، عمر لامپ می‌باشد که باید با توجه به شدت نور، سطح مورد نیاز روشنایی، سرعت طرح و ملاحظات ایمنی بررسی گردد.

کلمات کلیدی: روشنایی، هزینه، بهینه‌سازی، ایمنی جاده‌ای

۱. مقدمه

در نواحی برون شهری روشنایی جاده که دارای استاندارد مناسب باشد به ایمنی جاده‌ای کمک می‌کند. این امر خصوصاً در نواحی تردد عابرین پیاده و دوچرخه‌سواران بسیار مهم است. استانداردهای روشنایی و دستورالعمل‌های لازم برای گروه‌های خاص از راه‌ها و خیابان‌ها وجود دارد که بر اساس شناسایی اشیا در محیط تاریک ارائه می‌شوند. تحقیقات در آمریکا کاهش ۴۱ درصدی در تصادفات فوتی و ۱۶ درصدی در تصادفات جرحی همراه با یک نسبت سود به هزینه ۱۲ به ۱ را در اثر بهبود روشنایی نشان داده است [۱].

حداقل کردن هزینه‌های کلی ساخت و بهره‌برداری سیستم روشنایی راه یک موضوع مهم در سیستم توسعه راه‌ها می‌باشد. بهینه‌سازی سیستم‌های روشنایی راه شامل جنبه‌های اقتصادی (مانند هزینه‌های سیستم روشنایی) است که باید بسیاری از محدودیت‌ها را ارضا نماید. عامل مهم دیگر در جانمایی روشنایی خیابان‌ها بوسیله پارامترهای هندسی محل و نیز توزیع نور معین می‌شود. الزامات مربوط به بهره‌برداری از روشنایی در نشریات کمیسیون بین‌المللی روشنایی (CIE) بخصوص نشریات ۳۰/۲ و ۳۱ [۳،۲] ارائه شده است. سطح عملکردی روشنایی بوسیله ضوابط مشخص توسط پارامترهای فنی نور محاسبه می‌گردد. بطور ایده‌آل چراغ‌های خیابان هنگامی مناسب هستند که یک توزیع مکانی شار نور و حداقل روشنایی را برای سطح راه تامین نمایند. تکنیک‌های بهینه‌سازی نیز برای تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی بهره‌برداری روشنایی راه‌ها بکار رفته‌اند [۴،۵]. هدف از این تحقیق، ارائه مدلی جهت بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر تامین و نگهداری امکانات روشنایی به منظور حداقل کردن هزینه و دستیابی به حداقل روشنایی مورد نیاز می‌باشد.

آرایش‌های زیر برای نصب تیر چراغ برق در نظر گرفته می‌شود [۶]:

کنار هم

زیگزاگ

مقابل هم

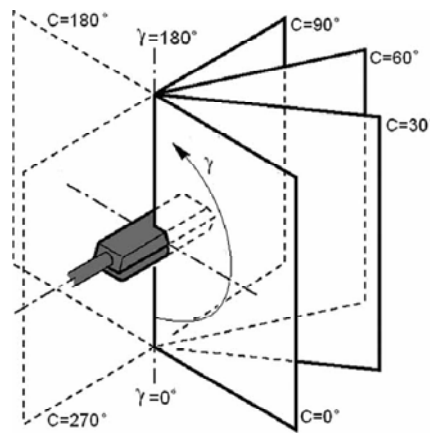
مرکزی

در این مقاله فرض بر این است که تیرهای چراغ برق بصورت کنار هم در راه قرار دارند.

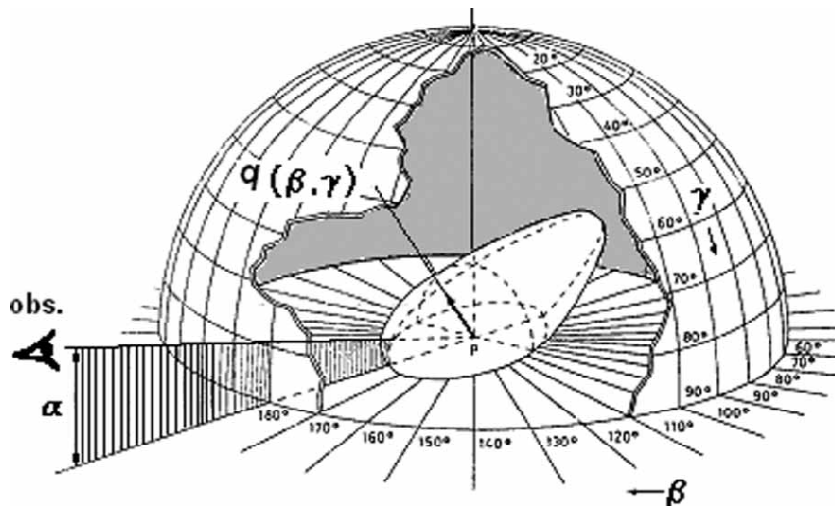
۲. روشنایی

۱. تعاریف

شار روشنایی یک لامپ که بر حسب لومن اندازه گیری می شود بر اساس اثر قدرت تابشی یک لامپ بر چشم انسان ارزیابی می گردد. توزیع فضایی نور مربوط به شار روشنایی بر حسب شدت نور بیان می گردد و با $I(C, \gamma) = \frac{d\phi}{d\omega}$ تعریف می گردد که در این رابطه $d\phi$ شار نوری در جزء زاویه فضای $d\omega$ می باشد. هر چراغ دارای سیستم مختصات $C - \gamma$ شدت نور مربوط به خود می باشد که در آن برای تعیین اطلاعات توزیع شار روشنایی استفاده می گردد. در اینجا C نیم صفحه نصف النهاری و γ زاویه بین محور قائم بر چراغ و محور شدت می باشد. (شکل ۱)



شکل ۱- سیستم مختصات $C - \gamma$



شکل ۲- دیاگرام q سطح راه- یک مجموعه از بردارها که خصوصیات انعکاسی سطح را خلاصه می کند

ویژگی های انعکاسی سطح راه بوسیله دیاگرام q شکل ۲ تعیین می گردد. این شکل مجموعه ای از بردارها $q(\alpha, \beta, \gamma)$ می باشد که به آن عامل روشنایی گویند و به سه زاویه کلی (α, β, γ) بستگی دارد. در این رابطه α زاویه دید سطح راه می باشد که بسته به سرعت و نوع راه متفاوت است. β زاویه صفحه قائم گذرا بر بردار شدت به سمت سطح واحد (p) تحت بررسی و صفحه دید می باشد و γ زاویه بین بردار شدت نور یک سطح واحد معلوم و محور قائم بر چراغ است و جهت q به سمت چراغ می باشد. بنابراین بردار q مختلف، متناظر با موقعیت های مختلف چراغ نسبت به مشاهده کننده وجود دارد.

از طرف دیگر روشنایی سطح واحد (L_p) در سطح راه که بوسیله یک چراغ ایجاد می شود برابر E_H می باشد که در این رابطه E_H شدت روشنایی بر حسب لوکس (Lux) می باشد که از رابطه زیر محاسبه می گردد:



$$E_H = \frac{I(C,\gamma) \cdot \cos^3 \gamma}{H^2} \quad (1)$$

در این رابطه H فاصله قائم بین سطح راه و چراغ می‌باشد (شکل ۳). عامل روشنایی $q(\beta, \gamma)$ به عنوان روشنایی سطح راه لازم برای شدت روشنایی 1 Lux تعریف می‌شود و از طریق ضریب روشنایی به شکل زیر فراهم می‌گردد:

$$r(\beta, \gamma) = q(\beta, \gamma) \cos^3 \gamma \times 10^4 \quad (2)$$

که $r(\beta, \gamma)$ برای روسازی‌های راه متداول توسط کمیسیون بین‌المللی روشنایی (CIE) در گروه‌های مختلف ارائه شده است. بنابراین روشنایی L_k در k امین سطح واحد رویه راه بوسیله یک چراغ برابر است با:

$$L_k = \frac{r(\beta_k, \gamma_k) \cdot I(C_k, \gamma_k)}{10^4 \times H^2} \quad (3)$$

سه ضابطه مهم فنی نور بسته به روشنایی سطح راه وجود دارد که باید در نظر گرفته شود [۳]:

اولین عامل مهم روشنایی متوسط (L_{av}) است که توسط M چراغ نزدیک در تمامی سطوح واحد P_k و $k=1, \dots, K$ بین دو تیر چراغ برق ایجاد می‌شود. معمولاً ۲ تا ۳ تیر چراغ برق در جلو و یک تیر چراغ برق در پشت مشاهده کننده در نظر گرفته می‌شود.

$$L_{av} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K I(m, k)}{K} \quad (4)$$

دومین ضابطه مهم مربوط به یکنواختی کلی روشنایی می‌شود:

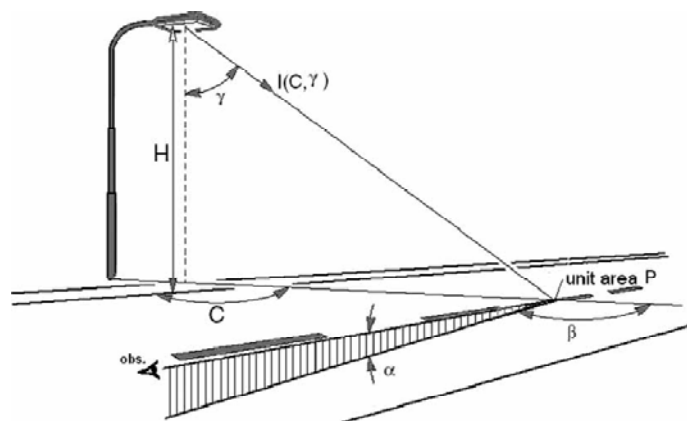
$$U_0 = \frac{L_{\min}^0}{L_{av}} \quad (5)$$

در این رابطه L_{\min}^0 حداقل مقدار مقادیر محاسبه شده روشنایی در سراسر تمام سطوح واحد بین دو تیر چراغ برق مجاور می‌باشد.

سومین ضابطه روشنایی، یکنواختی روشنایی طولی (U_L) می‌باشد.

$$U_L = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \quad (6)$$

L_{\max} و L_{\min} مقادیر ماکزیمم و می‌نیمم روشنایی در سطوح واحد، در خط طولی راه که موقعیت مشاهده کننده در روی آن قرار دارد، می‌باشد [۷۸].



شکل ۳- محاسبات روشنایی

۲.۲. ضوابط راه

هر راه بسته به طبقه آن نیاز به میزان خاص روشنایی دارد. استانداردهای اروپا [۹] راه‌ها را به چهار دسته بر اساس نوع سطح راه و ترافیک تقسیم‌بندی می‌کند:

- ۱- راه با سرعت زیاد (60 km.hr^{-1}) (وسایل نقلیه موتوری) ۲- راه با سرعت متوسط ($30-60 \text{ km.hr}^{-1}$) (وسایل نقلیه موتوری با سرعت کم) ۳- سرعت پایین ($5-30 \text{ km.hr}^{-1}$) (دوچرخه و موتور سوار)، ۴- سرعت بسیار پایین عابر پیاده.



نیازهای دید برای هر کدام از این راه‌ها متفاوت است زیرا نیازهای کاربران بسته به سرعت متفاوت می‌باشد. بطور کلی محدودیت‌ها برای نصب چراغ می‌تواند بصورت زیر بیان شود:

$$\lambda L_{av,N} \leq L_{av} \leq \epsilon L_{av}$$

میانگین روشنایی راه

$$U_0 \geq U_{0,N}$$

یکنواختی کلی روشنایی

$$U_L \geq U_{L,N}$$

یکنواختی طولی روشنایی

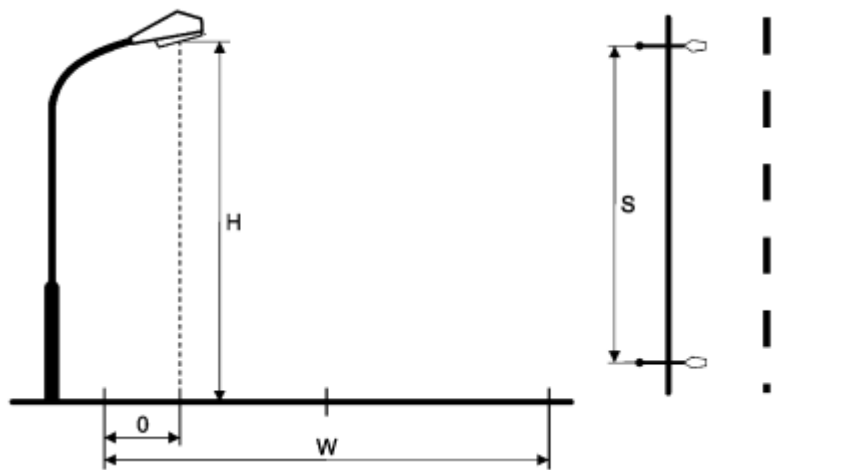
عامل روشنایی در ارتفاع ۱/۵ متر از سطح پیاده‌رو که بیشتر در معابر عابر پیاده مهم است. $E_{SC} \geq U_{SC,N}$ ، که در این رابطه

$$U_{SC,N} = 1 \text{ lux}$$

است و حداقل نور لازم برای روشنایی چهره افراد می‌باشد.

اندیس N نشانگر مقادیر استاندارد می‌باشد [۱۱،۱۰].

قیود برای بدست آوردن توزیع بهینه نور می‌تواند با مشخصات هندسی محل حاصل گردد. فرض کنید در شکل ۴ عرض خیابان برابر W باشد که شامل حاشیه ایمنی نیز است. دکل‌ها در ارتفاع H و فاصله S از هم قرار دارند. موقعیت‌های نسبی نقاط اندازه‌گیری، روشنایی‌ها و مشاهده‌کننده توسط زاویه φ (که با علامت C در شکل ۱ دیده می‌شود) و γ (برای محاسبه شدت نور)، زاویه β و γ برای محاسبه ضرایب روشنایی و زاویه دید α مشخص می‌شوند. برای سرعت‌های سفر بیش از ۵۰ کیلومتر بر ساعت فرض می‌شود زاویه دید 1° است که این زاویه مقدار استاندارد مورد استفاده توسط CIE است. برای سرعت ۴۰ کیلومتر بر ساعت فرض می‌شود α برابر $3/30$ است. برای سرعت 30 km.h^{-1} ، α برابر $5/70$ فرض می‌گردد و از این α در محاسبه q استفاده می‌گردد. بنابراین بسته به نوع راه α مناسب انتخاب می‌گردد [۱۲].



شکل ۴: مشخصات راه

۳. هزینه‌ها

در این بخش به بررسی هزینه‌ها در مورد هر تیر چراغ می‌پردازیم:

۱- هزینه‌های اولیه که شامل هزینه‌های کلی طراحی (طراحی روشنایی)، هزینه مصالح، هزینه تجهیزات و وسایل (دکل، کابل، چراغها (نورافکن)، هزینه‌های عملیاتی کارهای لازم) و همچنین هزینه‌های آزمایش نصب چراغ‌های جدید است. بنابراین هزینه‌های اولیه طبق رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$C_{in} = N_p [C_p + C_b + C_l + C_{ls} + C_{wl} + C_{wp}] \quad (7)$$

در این رابطه N_p تعداد کل تیر چراغ در طول قطعه راه در نظر گرفته شده که برابر طول قطعه راه (D) تقسیم بر فاصله دکلها (S) می‌باشد.

C_p : هزینه یک دکل با تجهیزات لازم و دسترسی‌ها (فیوز، سیم کشی، صفحه ستون و میل مهارها) و تابعی از ارتفاع است، C_b : هزینه براکت، C_l : هزینه چراغ‌ها (مجهز به جعبه کنترل)، C_{ls} : هزینه لامپ، C_{wl} : هزینه‌های نصب چراغ، C_{wp} : هزینه نصب دکل چراغ که شامل هزینه پی‌سازی آن نیز می‌گردد. باید در نظر داشت که هزینه نصب دکل بسته به ارتفاع و مشخصات مکانیکی خاک آن نیز می‌تواند متغیر باشد که بسته به شرایط و کشور باید محاسبه گردد.



۲- هزینه‌های متغیر: هزینه‌های متغیر شامل موارد زیر است:

الف- هزینه سالیانه برق (C_e) برای تمام تیرهای چراغ برق

ب- هزینه نگهداری، از آنجایی که یک فرآیند بهینه نگهداری فرض می‌کند که باید یک دسته لامپ طبق سازماندهی خاص تعویض شوند و هزینه تمیز کردن هم هنگام جایگزینی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین هزینه گروه لامپ‌ها برای جایگزینی در نظر گرفته می‌شود (C_{gr}).

ج- هزینه تعویض، هزینه جایگزینی تعداد لامپ‌ها در صورت خرابی ناگهانی آنها در سال J بعد از نصب (C_{srj}).

د) هزینه‌های مربوط به جعبه کنترل (C_{ci}).

بنابراین هزینه کل C تنزیل یافته در ابتدای دوره بهره‌برداری به مدت T سال طبق رابطه $C = C_{ind} + C_{ed} + C_{grd} + C_{srd} + C_{cid}$ محاسبه می‌شود. که در فوق علامت d نشان دهنده هزینه‌های کاهش یافته برای دوره T است.

۴. مدل برنامه‌ریزی ریاضی بهره‌برداری روشنایی

هدف نهایی کمینه کردن هزینه در قطعه راه مورد نظر با رعایت حداقل شار نوری مورد نیاز (Φ_0) است. شار نوری از طریق M چراغ پیش‌رو و مجموعه آنها در تمام سطوح واحد $P(i,j)$ (سطح راه در فاصله S را به N_j قسمت واحد در طول خیابان و N_i قسمت واحد در عرض خیابان تقسیم می‌کنیم) در سطح A بین دو چراغ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Phi = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} I(m, i, j) d\omega(m, i, j) \quad (8)$$

که $d\omega$ در رابطه (۸) بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d\omega = p(i, j) \cdot \frac{\cos \gamma}{l^2(m, i, j)} \quad (9)$$

بنابراین، مدل برنامه‌ریزی ریاضی، جهت بهینه‌سازی بهره‌برداری روشنایی، را بصورت زیر خواهیم داشت. در این مدل متغیرهای تصمیم عبارتند از:

$$S, H, L_{max}(i), L_{min}(i), L_{av}, L(i, j), I(m, i, j)$$

$$\min C = C_{ind} + C_{ed} + C_{grd} + C_{srd} + C_{cid} \quad (10)$$

S.t:

$$\Phi = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} I(m, i, j) d\omega(m, i, j) \geq \Phi_0 \quad (11-1)$$

$$L(i, j) = \frac{\sum_{m=1}^M I(m, i, j) q(m, i, j)}{10^4 \times H^2} \quad i=1, \dots, N_i \text{ و } j=1, \dots, N_j \quad (11-2)$$

$$L(i, j) \geq U_{0,N} \cdot L_{av} \quad i=1, \dots, N_i \text{ و } j=1, \dots, N_j \quad (11-3)$$

$$L_{av} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{m=1}^M I(m, i, j) q(m, i, j)}{10^4 \times H^2 \times N_i N_j} \quad (11-4)$$

$$aL_{av,N} \leq L_{av} \leq bL_{av} \quad (11-5)$$

$$\sum_{m=1}^M I(m, i, j) q(m, i, j) \geq 10^4 \times H^2 \times L_{min}(i) \quad i=1, \dots, N_i \quad (11-6)$$

$$\sum_{m=1}^M I(m, i, j) q(m, i, j) \geq 10^4 \times H^2 \times L_{max}(i) \quad i=1, \dots, N_i \quad (11-7)$$

$$L_{min}(i) \geq U_{L,N} L_{max}(i) \quad i=1, \dots, N_i \quad (11-8)$$

$$I(m, i, j) \geq 0, T > 0, H > 0, S > 0 \quad (11-9)$$

$$C_{in} \leq B_N \quad (11-10)$$

$$C_{ej} + C_{grj} + C_{srj} + C_{cij} \leq B_{ej} \quad j=1, \dots, T \quad (11-11)$$



در این روابط $U_{L,N}$ و $U_{0,N}$ و L_{av} پارامترهای مربوط به استانداردها هستند. در رابطه ۱۱-۱۱ مقدار بودجه در دست در سال B_{ej} است. روابط ۱۱-۲ و ۱۱-۳ و ۱۱-۴ الزام روشنایی در هر سطح واحد $P(i,j)$ نسبت به روشنایی میانگین L_{av} که باید بزرگتر و مساوی مقدار استاندارد $U_{0,N}$ باشد را ارضا می کند. رابطه ۱۱-۵ نیز شرایط انحراف متوسط روشنایی که توسط ضرایب a و b نشان داده شده را ارائه می کند. معادله $(U_L = \frac{L_{min}}{L_{max}})$ بوسیله قیدهای ۱۱-۶ و ۱۱-۷ و ۱۱-۸ ارضا می گردد.

۵. نتیجه گیری

بهینه سازی سیستم روشنایی خیابان شامل حداقل کردن هزینه های کل و برآورده کردن حداقل میزان روشنایی سطح خیابان می باشد. پارامترهای قابل محاسبه می تواند $S, H, I(m,i,j), L(i,j), L_{av}, L_{min}(i), L_{max}(i)$ باشد. همچنین در نظر گرفتن پارامتر خیرگی و نیز زاویه انحراف قائم میله فوقانی چراغ، پارامترهای مربوط به نوع لامپ ها، عمر آنها و نرخ کاهش توان لامپ می تواند به معادله بسیار بهتری منجر گردد.

۶. مراجع

1. Ogden, K.W., (1996), "Safer roads: a guide to road safety engineering", Avebury Technical, ISBN 0 291 39829 4.
2. CIE (International Commission on Illumination), (1976), "Glare and Uniformity in Road Lighting Installations", CIE Publication 31, Vienna, Austria.
3. CIE (International Commission on Illumination), (1982), "Calculation and Measurement of Luminance and Illuminance in Road Lighting", CIE Publication 30.2, Vienna, Austria.
4. Pachamanov, A. and Pachamanova, D. (2008), " Optimization of the light distribution of luminaries for tunnel and street lighting", journal of Engineering Optimization, 40(1), pp 47- 65.
5. Maćków, A., (2010), "Optimization of the costs of road lighting systems", submitted abstracts of Ninth International Conference on Environment and Electrical Engineering, Prague, Czech Republic, May 16-19.
6. Kostic, M., Djokic, L., Hadzibegovic, N. and Pojatar, D., (2009), "Technical and economic analysis of road lighting solutions based on mesopic vision", journal of Building and Environment, 44, pp 66– 75.
7. Schreuder, D.A., (1998), "Road lighting for safety", Published by Thomas Telford, UK London.
8. Simons, R.H., Bean, A.R., (2001), "Lighting engineering: applied calculations", Architectural Press.
9. CEN (European Committee for Standardization), (2003), "Road lighting", Technical Report, 13201 1–4.
10. CIE (International Commission on Illumination), (1995), "Recommendations for the Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic", CIE Publication 115, Vienna, Austria.
11. CEN (European Committee for Standardization), (2002), "Lighting Applications: Tunnel Lighting", Technical Report, 458/2002–09–06, Brussels, Belgium.
12. Pachamanov, A., (1988), "Measuring photometric characteristics of street lighting systems", PhD Dissertation, Technical University, Sofia (in Bulgarian).