

MESOPIC LIGHTING CONDITIONS AND PEDESTRIAN VISIBILITY

Jaakko KETOMÄKI, Marjukka ELOHOLMA, Pasi ORREVETELÄINEN, Liisa HALONEN
Helsinki University of Technology, Lighting Laboratory, Finland

In the mesopic luminance region both the rods and cones on the retina are active and this is believed to cause changes in the spectral sensitivity of the human vision. The objective of this work was to study the effects of light spectrum on visual performance in road lighting conditions. Mesopic vision involves both foveal and peripheral vision, which are based on different receptor combinations on the retina. In driving, a lot of information is gained from off-axis vision and peripheral vision becomes important. In this work visibility tests were made in experimental road lighting installations both for foveal and peripheral ($15^\circ/20^\circ$) viewing. Pedestrian visibility tests were carried out at two luminance levels ($0.1/1.5 \text{ cd/m}^2$) using high pressure sodium and daylight metal halide lamps. The results show that light level has a strong effect on visibility of moving targets. The effect of light level on visibility is not, however, linear in different parts of the visual field. Light spectrum did not affect visibility at either luminance level when the target was viewed foveally. This confirms our earlier findings, that $V(\lambda)$ is valid for assessing luminosity of foveal targets also at mesopic light levels. On the other hand, the results suggest that lamp spectrum has an effect on visibility in road lighting conditions in off-axis vision. At constant photopically i.e. $V(\lambda)$ weighted luminance levels, the lamps with high content in the blue wavelength region seem to be visually more effective than the conventionally used high pressure sodium lamps. This was, however, found only at the lower luminance level (0.1 cd/m^2), where the contribution of rods is presumably higher than at the higher luminance level (1.5 cd/m^2).

1. Introduction

The mesopic luminance region lies between the photopic and scotopic. The mesopic luminances lay between about $0.001 \dots 3 \text{ cd/m}^2$ as shown in Figure 1. The upper luminance limit of mesopic region is not clearly defined, the CIE definition is 'at least several cd/m^2 ' [1]. The luminance limit definition between photopic and mesopic region varies between about $L > 3 \dots 10 \text{ cd/m}^2$ [1, 2, 3]. Mesopic lighting applications include road and street lighting, outdoor lighting and other night-time traffic environments. It is especially the higher end of the mesopic luminance region that is of prime importance in practical applications.

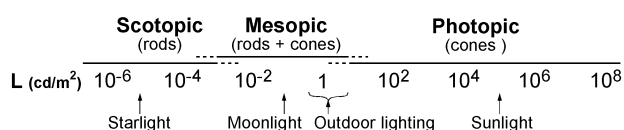


Figure 1 The photopic, scotopic and mesopic luminance ranges [4].

It is known that neither $V(\lambda)$ or $V'(\lambda)$ alone are representative of the eye's behaviour in the mesopic region. In the mesopic region both the rods and cones are active and their mutual interaction determines spectral sensitivity. When light levels are decreased from photopic to mesopic, the spectral sensitivity of the eye is believed to shift towards shorter wavelengths. There are, however, no internationally accepted methods for measurements in the mesopic region. Photometers are tuned to photopic foveal (2°) vision with $V(\lambda)$ -filters even though they are used in night-time lighting applications. Similarly, measurements of luminous efficacy of all electric light sources are based on the photopic $V(\lambda)$ function.

In the very centre of the fovea there are only cones and foveal vision is claimed to be that of the cone photoreceptors. The results of our former studies imply, that the spectral sensitivity of the fovea is not changed when lighting levels are decreased from photopic to mesopic [5]. Thus photopic luminance,

i.e. $V(\lambda)$ weighted luminance, is a valid measure for assessing luminosity of foveal vision also at mesopic levels. In driving, however, a lot of information is gained with off-axis vision and peripheral vision becomes important.

This work set out to investigate visibility in road lighting conditions using different lamps. Nowadays the most commonly used light sources in road and street lighting in Finland are high pressure sodium lamps (150 W and 250 W). These lamps have high luminous efficacy (100...120 lm/W) when calculated with the photopic $V(\lambda)$ function. As the radiant power of high pressure sodium lamps is concentrated in the longer wavelength region, the expected mesopic output of the lamps is not necessarily equally high. Besides the high pressure sodium lamps, daylight metal halide lamps with high content in the short wavelength region were used in the experiments.

In this work the effects of light spectrum on visibility was studied at luminance levels encountered in road and street lighting. Pedestrian visibility was used as the visual task. The experiments were conducted in road lighting in installations built in an underground tunnel.

2. Mesopic vision and road lighting

2.1 Basis for road lighting

Road and street lighting have great impact on ensuring good visibility conditions in night-time driving. In Finland night-time traffic is about 30% of the total traffic on public roads [6]. The function of fixed road and street lighting is to create safe and comfortable environments for road users and to improve the visibility conditions at night. Visibility influences, for example, how quickly a driver detects and interprets visual information, makes decisions and responds to unpredictable visual events. Research work is currently conducted to find new, more efficient ways to design and construct lighting for the road-users.

Visual performance in night-time driving is very complex as it consist of several visual elements with various parameters. In driving a car the driver has to obtain sufficient

information to move ahead and avoid collisions. One of the visual tasks of the driver is the detection of targets, either moving or stationary. The probability of detecting a target depends on the target luminance, contrast, size, shape, observation time etc. Also the luminance surroundings of the target play a role [7].

2.2 Mesopic light levels in road lighting

The measurements made in HUT Lighting Laboratory indicate that road surface luminances in road and street lighting are largely in the mesopic region, i.e. below 3 cd/m² even on well illuminated roads [8]. The luminances can be very low in the adjacent and surrounding areas of the road. There are also higher luminances in the visual field of the driver, e.g. road luminaires and headlights of oncoming car. The effect of the headlights of other cars is usually temporarily and the fixed street luminaires are mostly located in the peripheral parts of the visual field. Thus in night-time driving the luminances of the visual field remain mostly in the mesopic luminance region.

2.3 Mesopic vision

Both foveal and peripheral vision are important in traffic conditions. At mesopic light levels they are based on different receptor combinations on the retina. Foveal visual tasks, like visual acuity and spatial resolution, are mediated by the cone receptors. In peripheral vision or when viewing large visual targets, the visual functions are determined by both rods and cones. In many mesopic applications, like night-time driving, peripheral tasks play a major role. Because the contribution of rods and cones to visual tasks depend on the task characteristic and light level, the spectral sensitivity changes are believed to be different for different visual conditions in the mesopic range.

The fovea is used for recognition and identification of objects. In the very centre of the fovea there are only cones and foveal vision is claimed to be that of the cone photoreceptors. In our former studies visual acuity was used as a measure to study the

effects of light spectrum on foveal vision in the mesopic region. The results imply, that the spectral sensitivity of the fovea is not changed when luminance levels are decreased from photopic to mesopic, at least in the higher end of the mesopic region ($0.2 \dots 5 \text{ cd/m}^2$) [5]. Thus it is believed that the foveally determined $V(\lambda)$ function is valid for describing foveal spectral sensitivity also at mesopic light levels.

It is clear that in e.g. driving conditions the visual field that is of interest is certainly larger than the central two degrees, that was used to establish the photopic $V(\lambda)$. Actually, in driving a lot of information is gained with off-axis vision and off-axis vision becomes important. Peripheral visual tasks include, for example, detection and discrimination of moving and stationary objects, and are mediated by both rods and cones at mesopic light levels [7]. In peripheral vision the rods become increasingly dominant with decreasing light levels.

2.4 Pedestrian visibility

Visibility of a pedestrian is one of the visual tasks drivers face when driving a car by night. The purpose of fixed road and street lighting is to enhance the visibility of temporary and steady elements on the road and road surroundings outside the reach of the car headlights. In order to be able to react in time to a pedestrian on the road or approaching the road, the driver should detect the pedestrian at a 40 m distance when the driving speed is 50 km/h. The detection distance should be about 100 m at a 100 km/h driving speed and in slippery road conditions even 400 m [9]. Because the effect of car headlights does not reach this far, the visibility of pedestrian is highly dependent on fixed road lighting.

In this work the visibility of pedestrian was used as the visual task. By employing a real pedestrian instead of e.g. a flat cardboard as a visual target the test becomes more realistic, as the pedestrian includes three-dimensionality. Furthermore, the movement of the walking pedestrian is an important component of the visual tasks faced by road users.

3. Experimental set-up

We studied the effects of light spectrum and luminance level on visibility in road lighting conditions in experimental road lighting installations in an underground tunnel. The length of the tunnel is 200 m, height 3.5 m and width 5 m. The advantage of the tunnel was that the exterior conditions remained constant. It was thus possible to carry out visibility tests with several subjects in exactly the same conditions at any time. In the road lighting installations the viewing conditions simulate conditions on roads at night-time when fixed road or street lighting are used [8].

As light sources we selected metal halide (MH) and the commonly used high pressure sodium (HPS) lamps. We selected a daylight MH lamp as a comparable light source, because the radiation of it is distributed over the whole visible region of the spectrum. Thus the expected mesopic output of this MH lamp is quite high. The colour temperature of the HPS lamp was 2000 K and that of the MH lamp 5200 K. The spectra of these lamps are shown in Figure 2. The lamps supply voltages were stabilized. The luminance levels of the installations were controlled by attaching neutral density filters in the apertures of the luminaires. The filters did not alter the spectral output of the lamps. In the HPS and MH lamp installations the luminance levels of the road surfaces were equal in terms of $V(\lambda)$ -weighted luminances.

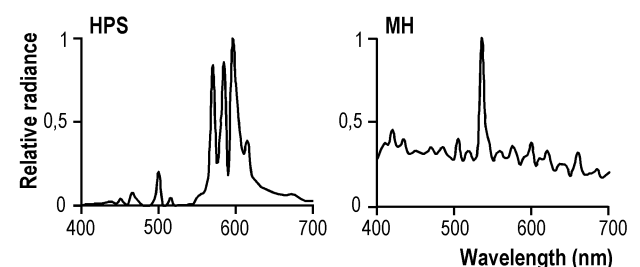


Figure 2. The spectra of the high pressure sodium (HPS) and daylight metal halide (MH) lamps

Using these light sources, we built two similar installations, the other with HPS lamps and the other with MH lamps. In both

installations the luminaires were in five luminaire groups with 8 m spacing. The subject sat in the front of the first luminaire and was looking towards the dark end of the tunnel, Figures 3 and 4. The pedestrian subtended a visual angle of 2° from 40 m distance.

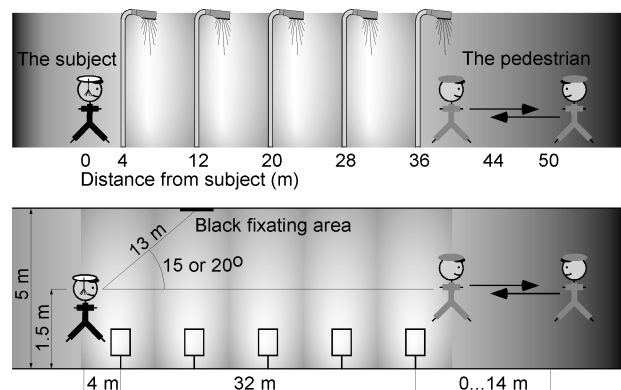


Figure 3. Experimental set up. The installation consisted of five luminaires 8 m apart. In foveal viewing the subject was fixating to the back of the walking pedestrian. In off-axis ($15^\circ/20^\circ$) viewing the subject was fixating to the black fixing area on the wall of the tunnel.

The task of the subject was to indicate the detection threshold of the pedestrian. The pedestrian was walking towards the dark end of the tunnel and thereafter approaching the illuminated area of the tunnel from the dark. The pedestrian was dressed in grey clothing and wore a grey cap to cover his face. The reflection coefficient of the neutral grey clothes was 0.20.

We made the visibility tests both in central and off-axis vision. In central viewing conditions the subject fixated to the back of the walking pedestrian. In off-axis viewing conditions the subject fixated at a black area covered with black fabric at the left side wall of the tunnel. The eccentricity of vision in the off-axis test was 15° in the first series and 20° in the second test series. We made tests for both light spectra, HPS and MH, and at two average road surface luminance levels 0.1 and 1.5 cd/m^2 . Each subject made the test in all four different lighting conditions. Before starting the first actual experiment the subject had adapted to the tunnel lighting for 30 minutes. A 5

minutes adaptation time preceded the tests in each lighting condition. Young subjects of 22...28 age participated in the experiments. Their colour vision, refraction, visual acuity, visual field was checked to be normal at the Helsinki University Central Hospital.



Figure 4. Pedestrian visibility measurements in underground road lighting installations. The subject indicated with a response button when she/he could detect the walking pedestrian 40...50 m apart.

4. Results of pedestrian visibility tests

4.1 First test series

In this test series the pedestrian was walking towards the dark end of the tunnel and thereafter approaching the illuminated area of the tunnel from the dark. Six subjects made this test both in foveal vision and in off-axis vision at 15° eccentricity.

The pedestrian luminance at the detection distance corresponds to the lowest detectable luminance in each lighting condition. The results are presented as a ratio of the pedestrian luminance at the detection distance and the average road surface luminance in that lighting condition (L_{ped}/L_{road}). This is referred to as 'Relative Luminance Threshold'.

The results are shown in Figure 5. The statistical analysis of the results was conducted using analysis of variance based on the Bonferroni and Fisher's tests. The probability level 0.05 was used. The results show that the luminance level has a clear effect on visibility. The relative luminance threshold is lower at 1.5 cd/m^2 luminance level compared to 0.1 cd/m^2 luminance level. Thus the ability to detect low contrasts is higher at the higher road luminance level.

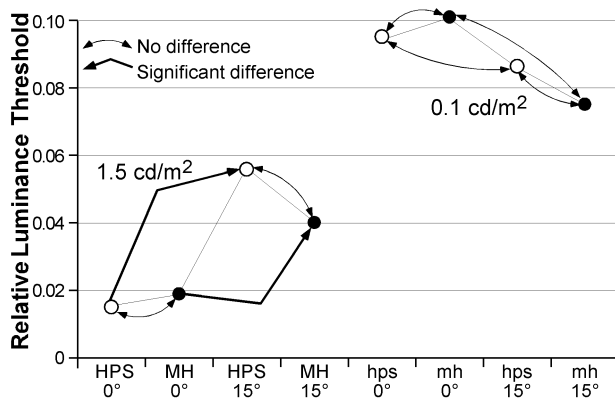


Figure 5. Results of the first test series with six subjects. Relative luminance threshold for detecting the pedestrian at road surface luminance levels 1.5 and 0.1 cd/m^2 , at two light spectra (high pressure sodium HPS/ metal halide MH) and for foveal (0°) and off-axis (15°) viewing.

At the luminance level 1.5 cd/m^2 visibility is relatively better for targets in foveal vision compared to off-axis vision. Thus visibility decreases when the target is moved from central vision towards the periphery. When the road surface luminance is decreased to 0.1 cd/m^2 the differences between central and off-axis vision disappear. Thus at the lower light level the detection distance and relative luminance threshold are the same in foveal and off-axis viewing. This means that the importance of off-axis vision increases in comparison to central vision when the light level decreases in the mesopic region. In the first test series light spectrum did not affect visibility at either luminance level.

4.2 Second test series

In the first test series it was noticed that the visual test was quite difficult to perform if the subject was not carefully trained for the task. It is very difficult for a non-trained subject to maintain her/his eye fixation point in a given position. This was true especially in off-axis viewing. In off-axis viewing it is also difficult for the observer to exactly define whether the pedestrian is visible or not.

The second test series employed only one subject, but he repeated the same tests several times. The subject was trained and motivated for this task and thus the test process could be very carefully controlled. A trained subject's

fixation point is more reliably maintained and the criterion of visibility is more accurate.

In the second test series we included a new component, pedestrian arm movements, in the visual task. In the experimental conditions the walking speed of the pedestrian has to be very slow (1 step/2 sec) in order to record the detection distance accurately. At this speed the movement of the walking pedestrian seen from over 40 m distance is no more a critical component of the visibility task. In the second test series the pedestrian was constantly swinging his hands between downwards and horizontal plane while walking. As in the first test series, the walking speed of the pedestrian was constant (0.2 m/s) and the length of one footstep was 40 cm. The movement of the arms made the detection of the pedestrian easier for the subject and the detection distance could be more accurately defined. The pedestrian arm movement also enlarged the horizontal size of the visual target.

We carried out eight test sessions on subsequent days for the trained subject. One session consisted four different lighting conditions. In off-axis viewing the eccentricity of the target was 20° . The results are shown in Figure 6.

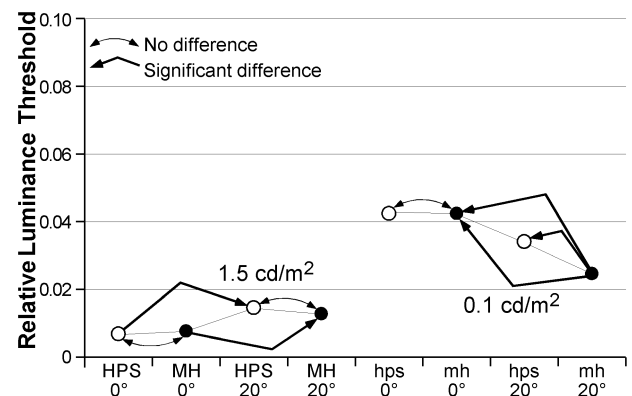


Figure 6. Results of the second test series. Relative luminance threshold for detecting the pedestrian at luminance levels 1.5 and 0.1 cd/m^2 , at two light spectra (HPS and MH) and for foveal (0°) and off-axis (20°) viewing.

Again the results show that luminance level has a clear effect on visibility. Also, as in the first test series, visibility is better in foveal viewing than in off-axis viewing at the

luminance level 1.5 cd/m^2 . Spectral effects were not found at the higher luminance level.

However, there are differences between the two light spectra at the luminance level 0.1 cd/m^2 . The trained subject could define the detection distance more accurately. In addition, the inclusion of movement in the visual task increased the sensitivity of the test and the detection distances could be recorded more accurately. So differences between two light spectra could be found.

At the luminance level 0.1 cd/m^2 visibility became relatively better for targets in off-axis compared to foveal vision. When the target was in foveal vision, the light spectrum did not affect visibility. However, in off-axis vision the relative luminance threshold was lower with MH compared to HPS lamps. Thus light with higher content in the blue wavelength region yielded to better visibility in off-axis vision.

5. Conclusions

The results show that light level has a strong effect on visibility of moving targets in the mesopic region. The pedestrian detection distance becomes shorter with decreasing light level. The effect of light level on visibility is not, however, linear in different parts of the visual field. At the luminance level 1.5 cd/m^2 visibility was better in foveal than in off-axis vision. When we decreased light level to 0.1 cd/m^2 , the differences between foveal and off-axis visibility disappeared and were partly reversed. This is explained by the structure of the retina.

In the fovea there are only cones and no rods. The number of cones decreases with eccentricity from the fovea, whereas the number of rods increases with eccentricity from the fovea. At higher light levels cones are more active than rods. When light levels decrease to the mesopic region more rods become active, while the contribution of cones to the visual process becomes smaller. Thus the importance of off-axis vision increases when light level is decreased in the mesopic luminance region.

In the central viewing conditions the target (pedestrian) was viewed with the fovea. The

luminance levels in the HPS and MH lamp installations were equal in terms of photopically weighted, i.e. $V(\lambda)$, luminance values. As $V(\lambda)$ is based on the spectral sensitivity of the cones and as there are merely cones in the fovea, it is in prospect that light spectrum does not affect visibility in central viewing even at low light levels. This was actually the result of the experiments at both luminance levels the 1.5 and 0.1 cd/m^2 . Light spectrum did not affect visibility at either luminance level when the target was viewed foveally. This also confirms the findings from our earlier studies, where the effects of light spectrum on visual acuity were studied in the mesopic region.

In off-axis vision both the rods and cones are active at mesopic light levels. The spectral sensitivity of rods is shifted to the shorter wavelength region, as compared to cones. It is in prospect that when luminance levels decrease to the mesopic region, the blue part of the spectrum becomes more effective for off-axis vision. The results of the second test series support this hypothesis. In off-axis (20°) vision the relative luminance threshold was lower under MH lamps compared to HPS lamps. This we found, however, only at the luminance level 0.1 cd/m^2 , where the contribution of rods is presumably higher than at the luminance level 1.5 cd/m^2 . The results suggest that in the mesopic region the spectral sensitivity of the eye shifts towards shorter wavelengths in such parts of the retina where both rods and cones are contributing to visual tasks.

The pedestrian visibility measurements suggest that lamp spectrum has an effect on visibility in road lighting conditions in off-axis vision. Lamps with high content in the blue wavelength region seem to be more efficient than the conventionally used high pressure sodium lamps. The effects of light spectrum on visibility at mesopic levels are dependent on the adaptation level of the eye and on the eccentricity of the visual task. The reason is the non-uniform retinal distribution of rods and the three types of cones and the changing mutual contribution of rods and cones to visual tasks with changing light levels.

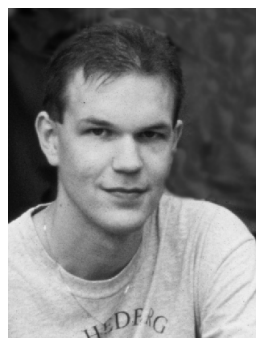
We will continue the experiments in the road lighting installations in HUT Lighting Laboratory. The objective is to confirm the visibility findings in different luminance conditions and with varied light spectra. The visual task in the experiments reported in this paper was the detection threshold of a pedestrian. This corresponds to the minimum luminance contrast of a target against its surroundings that is needed for the observer to detect the target. We didn't include visual identification or recognition in the task. In these experiments the surroundings of the target were relatively uniform and the target was always in the expected place. In many driving situations the visual field is very complex and the conspicuity of a visual stimulus from the background becomes important. It is clear that the visual task of night-time driving cannot be comprehensively described with a single visual task. Experiments with different visual tasks are needed to get comprehensive proof of the spectral effects on visual performance in the mesopic range.

6. References

- 1 Commission Internationale de l'Éclairage, Light as a true visual quantity: Principles of measurement. CIE Central Bureau CIE 41, 1978.
- 2 Lighting Handbook Reference & Application, 9th Edition. Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
- 3 Kokoschka S. Das $V(\lambda)$ - Dilemma in der Photometrie: Proceedings of 3. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, TU Ilmenau, Ilmenau, 1997.
- 4 Rinalducci, E. & Higgins, K. & Zavod, M. & Wallace, S. Mechanism of photopic, mesopic and, scotopic vision. In Vision at low light levels (Alfred Gough ed). EPRI 1998.
- 5 Eloholma M., Halonen L. Vision in Mesopic Lighting Levels - The Effects of Light Spectrum and Luminance Level. CIE Proceedings, Publication CIE No 133, 1999.
- 6 Tievalaistuksen käsikirja. Tielaitos, 1991.
- 7 Commission Internationale de l'Éclairage, Fundamentals of the visual task of night driving. CIE Central Bureau CIE 100, 1992.
- 8 Eloholma M., Ketomäki J., Halonen L. Road Lighting – Luminance and visibility measurements. HUT Lighting Laboratory, Report 29, 2001.
- 9 Luoma J., Häkkinen S. Liikennepsykologia. Otatieta 1990.

Jaakko KETOMÄKI

M.Sc., Research Scientist
P.O.Box 3000, FIN-02015 HUT, Finland
Tel. + 358 9 451 4983
jaakko.ketomaki@hut.fi



Research scientist in Lighting Laboratory in Helsinki University of Technology. Main research area - low light levels and mesopic vision

Marjukka ELOHOLMA

M.Sc., Research Scientist
P.O.Box 3000, FIN-02015 HUT, Finland
Tel. + 358 9 451 4981
marjukka.eloholma@hut.fi



Research scientist in Lighting Laboratory in Helsinki University of Technology. Main research area - low light levels and mesopic vision

Received 1 June 2003

Reviewers

Dr. David CARTER, Prof. Ramon SAN MARTIN, Dr. Axel STOCKMAR

ILUMINATUL MEZOPIC ȘI VIZIBILITATEA PIETONILOR

În zona iluminatului mezopic atât bastonașele cât și conurile de pe retină sunt active și acest lucru se presupune că ar produce schimbări în sensibilitatea spectrală a vederii umane. Obiectivul studiului a fost de a determina efectele spectrului luminii asupra performanțelor vizuale în condițiile iluminatului rutier. Vederea mezopică implică atât vederea foveică cât și cea periferică care sunt bazate pe diferite combinații de receptori de pe retină. În cazul șoferilor, multe informații sunt receptate din vederea în afara axei (dezaxată) astfel încât vederea periferică devine extrem de importantă. În acest studiu testele de vizibilitate au fost realizate în instalații de iluminat experimentale atât pentru vedere foveică cât și pentru cea periferică (15°/20°). Testele de

vizibilitate ale pietonilor au fost realizate pentru două niveluri de luminanță ($0,1/1,5 \text{ cd/m}^2$) utilizând lămpi cu vapori de sodiu de înaltă presiune și cu halogenuri metalice.

Rezultatele arată că nivelul luminii are un puternic efect asupra vizibilității șintelor mișcătoare. Totuși, efectul nivelului luminii asupra vizibilității nu este liniar în diferite părți ale câmpului vizual. Spectrul luminii nu afectează vizibilitatea la nici un nivel de luminanță atunci când șinta era văzută foveal. Aceasta confirmă descoperirile noastre inițiale, că $V(\lambda)$ este valid pentru determinarea luminozității la șinte foveale inclusiv la nivelul mezopic. Pe de altă parte, rezultatele arată că spectrul lămpii are efect asupra vizibilității în condițiile iluminatului rutier pentru vederea în afara axei. La niveluri fotopic constante, adică luminanțe evaluate $V(\lambda)$, lămpile cu conținut ridicat în zona lungimii de undă albastre par să fie mai eficiente decât lămpile cu vapori de sodiu înaltă presiune utilizate în mod curent. Această descoperire este valabilă doar la niveluri scăzute ale luminanței ($0,1 \text{ cd/m}^2$), unde contribuția bastonașelor se presupune a fi mai mare decât la luminanțe ridicate ($1,5 \text{ cd/m}^2$).

1. Introducere

Domeniul luminanței mezopice se află între cel fotopic și cel scotopic. Luminanța mezopică se situează între $0,001...3 \text{ cd/m}^2$ după cum este prezentat în Figura 1. Limita superioară a luminanței în regiunea mezopică nu este clar definită, definiția CIE fiind ‘cel puțin câteva cd/m^2 ’ [1]. Definirea limitei luminanței între fotopic și mezopic variază între $L > 3...10 \text{ cd/m}^2$ [1, 2, 3]. Aplicațiile iluminatului mezopic includ iluminatul rutier și stradal, cel exterior și alte medii de trafic pe timp de noapte. Pentru aplicațiile practice este de primă importanță zona superioară a domeniului luminanțelor mezopice.

Se știe că nici $V(\lambda)$ și nici $V'(\lambda)$ nu sunt reprezentative pentru comportamentul ochiilor în regiunea mezopică. În regiunea mezopică atât bastonașele cât și conurile sunt active și interacțiunea mutuală determină sensibilitatea spectrală. Când nivelul luminii scade de la fotopic la scotopic, se presupune că sensibilitatea spectrală a ochiului se mută spre lungimile de undă mai mici. Totuși, nu există metode de măsurare acceptate internațional pentru domeniul mezopic. Fotometrele sunt fixate pe vedere fotopică foveală (2°) cu filtre $V(\lambda)$ chiar dacă sunt utilizate în aplicații ca iluminatul pe timp de noapte. Similar,

măsurarea eficienței luminoase a tuturor surselor electrice de lumină se bazează pe funcția fotopică $V(\lambda)$.

În exact centrul foveei sunt doar conuri iar vederea foveală se consideră a fi realizată cu fotoreceptori cu conuri. Rezultatul studiilor preliminare arată că sensibilitatea spectrală a foveei nu se schimbă când nivelul luminii scade de la fotopic la mezopic [5]. Luminanța fotopică, adică luminanța evaluată funcție de $V(\lambda)$, este o măsură valabilă pentru estimarea luminozității vederii foveale și la niveluri mezopice. La condus, multe informații sunt primite de la vederea în afara axei iar vederea periferică devine importantă.

Acest studiu a investigat vizibilitatea în condițiile iluminatului rutier utilizând diferite lămpi. Azi cele mai utilizate surse de lumină în Finlanda pentru iluminatul rutier și stradal sunt lămpile cu vapori de sodiu de înaltă presiune (150 W și 250 W). Aceste lămpi au eficacitate luminoasă mare ($100...120 \text{ lm/W}$) atunci când sunt calculate cu funcția fotopică $V(\lambda)$. Cum puterea radiantă a lămpilor cu vapori de sodiu de înaltă presiune este concentrată în zona lungimilor de undă lungi, efectul în mezopic nu este neapărat la fel de mare. În afară de lămpile cu vapori de sodiu de înaltă presiune, în experimente s-au utilizat halogenurile metalice cu conținut ridicat în zona lungimilor de undă scurte.

În acest studiu s-a evaluat efectul spectrului luminii asupra nivelurilor de luminanță întâlnite în iluminatul rutier și stradal. Vizibilitatea pietonilor a fost utilizată ca sarcină vizuală. Experimentul a fost realizat pe o instalație de iluminat rutier montată într-un tunel subteran.

2. Vederea mezopică și iluminatul rutier

2.1 Bazele iluminatului rutier

Iluminatul rutier și stradal are un impact puternic în asigurarea condițiilor de bună vizibilitate în conducerea pe timp de noapte. În Finlanda traficul pe timp de noapte este în jur de 30% din traficul total pe drumuri publice [6]. Funcția iluminatului fix rutier este de a crea un mediu sigur și confortabil pentru utilizatorii șoselelor și de a îmbunătăți

condițiile de vizibilitate pe timp de noapte. Vizibilitatea influențează, de exemplu, cât de rapid detectează șoferii și apoi interpretează vizual informații, iau decizii și răspund la evenimente vizuale neprevăzute. Cercetare are ca scop găsirea unor noi modalități eficiente de proiectare și construire a sistemelor de iluminat rutier.

Performanța vizuală la condusul pe timp de noapte este foarte complexă și constă din mai multe elemente vizuale cu diferiți parametri. Atunci când conduce o mașină șoferul trebuie să obțină suficiente informații pentru a înainta și a evita coliziunile. Una din sarcinile vizuale este detectarea țintelor, fie în mișcare fie staționare. Probabilitatea detectării unei ținte depinde de luminanța țintelor, contrast, dimensiuni, formă, timp de observație. De asemenea luminanța zonei înconjurătoare este importantă [7].

2.2 Niveluri de lumină mezopică în iluminatul rutier

Măsurările efectuate în HUT Lighting Laboratory indică faptul că luminanța suprafeței drumurilor și străzilor sunt în special în regiunea mezopică, adică sub 3 cd/m^2 chiar și pe drumurile bine iluminate [8]. Luminanțele pot fi foarte scăzute în zonele adiacente sau din jurul drumului. De asemenea, în câmpul vizual al șoferului sunt luminanțe ridicate ca de exemplu aparate de iluminat rutier sau farurile altor mașini din sens opus. Efectul farurilor de la celelalte mașini este de obicei temporar iar aparatele de iluminat rutier sunt poziționate în partea periferică a câmpului vizual. Cu toate acestea, în cazul condusului pe timp de noapte luminanța din câmpul vizual rămâne mai ales în zona luminanței mezopice.

2.3 Vederea mezopică

Atât vederea foveală cât și cea periferică sunt importante în condițiile de trafic. La niveluri de lumină mezopică se bazează pe diferite combinații de receptori de pe retină. Sarcinile vizuale foveale, ca și acuitatea vizuală și rezoluția spațială sunt mediate de conuri. În vederea periferică sau când sunt privite ținte vizuale mari, funcțiile vizuale sunt determinate atât de bastonașe cât și de conuri. În multe

aplicații mezopice, ca și condusul pe timp de noapte, sarcinile periferice joacă un rol extrem de important. Din cauza că contribuția bastonașelor și conurilor la sarcina vizuală depinde de caracteristicile sarcinii și nivelul luminii, schimbările în sensibilitatea spectrală se presupun a fi diferite pentru diverse condiții vizuale din domeniul mezopic.

Fovea este utilizată pentru recunoașterea și identificarea obiectelor. În chiar centrul foveei sunt doar conuri iar vederea foveică se consideră a fi doar cea cu fotoreceptori conuri. În studiile noastre anterioare s-a utilizat acuitatea vizuală pentru a măsura efectul spectrului luminii asupra vederii foveale din regiunea mezopică. Rezultatele indică faptul că sensibilitatea spectrală a foveei nu se schimbă atunci când luminanța scade de la fotopic la mezopic, cel puțin la capătul de sus al regiunii mezopice ($0,2 \dots 5 \text{ cd/m}^2$) [5]. De aceea se crede că funcția $V(\lambda)$, determinată foveal, este validă pentru a descrie sensibilitatea spectrală foveală la niveluri de iluminare foveală.

Este clar că la condus câmpul vizual care este de interes este cu siguranță mai mare decât cele două grade centrale, care au fost utilizate la stabilirea lui $V(\lambda)$ fotopic. De fapt, la condus multe informații sunt câștigate de la vederea în afara axei și vederea în afara axei devine importantă. Sarcina vizuală periferică include, de exemplu, detectarea și selectarea obiectelor în mișcare și staționare și utilizează atât bastonașe cât și conuri la niveluri de lumină mezopică [7]. În vederea periferică bastonașele devin din ce în ce mai dominante odată cu scăderea nivelului de iluminare.

2.4 Vederea pietonilor

Vizibilitatea unui pieton este una din sarcinile vizuale la care trebuie să facă față un șofer atunci când conduce noaptea. Scopul iluminatului rutier și stradal este de a mări vizibilitatea elementelor temporare sau definitive de pe drum sau din apropierea drumului din afara zonei de acțiune a farurilor. Pentru a fi în măsură să reacționeze în timp la prezența unui pieton pe șosea sau care se apropie de șosea, șoferul trebuie să detecteze pietonul de la o distanță de 40 m atunci când

viteza sa este de 50 km/h. Distanța de detecție trebuie să fie în jur de 100 m la o viteză de 100 km/h, iar pe o șosea alunecoasă chiar 400 m [9]. Din cauză că farurile mașinii nu au efect la așa o distanță, vizibilitatea pietonilor este dependentă în mare măsură de iluminatul fix.

În acest studiu vizibilitatea pietonilor a fost utilizată ca sarcină vizuală. Prin utilizarea unui pieton real în locul unei cutii de carton ca și sarcină vizuală, testul devine mai realist, deoarece pietonul are tri-dimensionalitate. Mai mult, mișcarea unui pieton este o componentă importantă a sarcinii vizuale a șoferilor.

3. Experimentul

Am studiat efectul spectrului luminii și al nivelului de luminanță în condițiile iluminatului rutier într-un tunel subteran. Lungimea tunelului era de 200 m, înălțime 3,5 m și lățime 5 m. Avantajul tunelului este că condițiile exterioare rămân constante. A fost astfel posibil să se efectueze teste de vizibilitate cu mai mulți subiecți în exact aceleași condiții, la orice oră. În instalația de iluminat rutier condițiile de vizibilitate de pe drum simulează condițiile de pe șosea pe timp de noapte, atunci când se utilizează corpuri de iluminat rutier fixe [8]. Ca și surse de lumină au fost selectate lămpi cu halogenuri metalice (MH) și uzualele lămpi cu vapori de sodium de înaltă presiune (HPS). Am selectat o lampă MH 'daylight' ca și sursă de lumină comparabilă, deoarece radiația este distribuită pe tot domeniul vizibil a spectrului. Fluxul mezopic estimat al lămpii MH este destul de mare. Temperatura de culoare corelată a lămpii HPS este 2000 K și cea a lămpii MH 5200 K. Spectrul acestor lămpi este prezentat în Figura 2. Tensiunea de alimentare a lămpilor a fost stabilizată. Nivelul de luminanță al instalației a fost controlat prin atașarea unor filtre neutre de densitate pe deschiderea aparatelor de iluminat. Filtrele nu au afectat distribuția spectrală a acestor lămpi. În instalațiile de iluminat cu lămpi HPS și MH nivelul de luminanță al suprafeței șoselei a fost egal în termeni de $V(\lambda)$ -luminanțe echilibrate.

Utilizând aceste surse de lumină, s-au construit două instalații similare, una cu lămpi HPS și una cu lămpi MH. În ambele instalații, aparatele de iluminat au fost în cinci grupuri de aparate de iluminat cu o distanță între ele de 8 m. Subiectul stătea în fața primului aparat de iluminat și privea spre capătul negru al tunelului, Figurile 3 și 4. Pietonul subînțindea un unghi vizual de 2 grade de la 40 m distanță.

Sarcina subiectului a fost de a indica pragul de detecție al pietonului. Pietonul mergea spre capătul întunecat al tunelului și se apropia de zona iluminată a tunelului din întuneric. Pietonul era îmbrăcat cu haine gri și avea o șapcă gri care îi acoperea fața. Reflectanța hainelor gri neutru era de 0,20.

Testele de vizibilitate au fost realizate atât pentru vedere centrală cât și pentru cea dezaxată. În condiții de vedere centrală subiectul fixa spatele pietonului. În condițiile de vedere dezaxată fixa spre o zonă neagră acoperită cu stofă neagră de pe peretele din stânga al tunelului. În testul dezaxat excentricitatea vederii era de 15° în prima serie și 20° în a doua serie de teste. Am făcut teste pentru ambele spectre de lumină, HPS și MH, și la două niveluri de luminanță a suprafeței șoselei 0,1 și 1,5 cd/m². Fiecare subiect a făcut testul în toate cele patru condiții diferite de lumină. Înainte de a începe primul experiment subiecții se adaptau la iluminatul din tunel timp de 30 de minute. Un timp de adaptare de 5 minute preceda testul din fiecare condiție de iluminat. La experiment au participat subiecți cu vârste cuprinse între 22 și 28 ani. La Spitalul Central Universitar din Helsinki s-a verificat ca subiecții să aibă vederea colorată, refracția, acuitatea vizuală și câmpul vizual normal.

4. Rezultatele testelor de vizibilitate a pietonilor

4.1 Prima serie de teste

În această serie de teste pietonii mergeau spre capătul întunecat al tunelului și apoi se apropiau de zona iluminată a tunelului din întuneric. Șase subiecți au făcut acest test în vedere foveală și dezaxată cu o excentricitate de 15°.

Luminanța pietonilor la distanța de detecție corespunde celui mai scăzut nivel de luminanță

detectabil în fiecare condiție de iluminat. Rezultatele sunt prezentate ca și un raport între luminanța pietonului la distanța de detecție și luminanța medie a suprafeței șoselei (L_{ped}/L_{road}). Este denumită 'Pragul Luminanței Relative'.

Rezultatele sunt prezentate în Figura 5. Analiza statistică a rezultatelor a fost realizată utilizând analiza varianței bazată pe testul Bonferroni și Fisher. S-a utilizat un nivel de probabilitate de 0,05. Rezultatele arată că nivelul de luminanță are un efect clar asupra vizibilității. Pragul luminanței relative este mai scăzut la nivelul de luminanță de $1,5 \text{ cd/m}^2$ comparativ cu nivelul de $0,1 \text{ cd/m}^2$. Ca atare, abilitatea de a detecta contraste scăzute este mai mare la niveluri ridicate ale luminanței șoselei.

La nivelul de luminanță de $1,5 \text{ cd/m}^2$ vizibilitatea este relativ mai bună pentru ținte în vedere foveală comparativ cu vederea dezaxată. Astfel vizibilitatea scade când ținta este mișcată dinspre vederea centrală spre periferie. Când lumina șoselei scade la $0,1 \text{ cd/m}^2$ dispare diferența dintre vederea centrală și cea dezaxată. Astfel la niveluri scăzute de lumină distanța de detecție și pragul luminanței relative sunt identice în vedere foveală și dezaxată. Aceasta înseamnă că importanța vederii dezaxate scade în comparație cu vederea centrală atunci când nivelul de lumină scade în domeniul mezopic. În prima serie de teste spectrul luminii nu a afectat vizibilitatea la nici un nivel de luminanță.

4.2 A doua serie de teste

În prima serie de teste s-a observat că testul vizual a fost dificil de realizat dacă subiectul nu era antrenat cu atenție pentru sarcina care i se dădea. Este foarte dificil pentru un subiect neantrenat să-și mențină ochii fixați într-un punct, într-o poziție dată. Acest lucru s-a dovedit adevărat mai ales pentru vederea dezaxată. În vederea dezaxată este dificil pentru observator să definească exact dacă pietonul este vizibil sau nu.

A doua serie de teste a utilizat doar un subiect, dar care a repetat același test de mai multe ori. Subiectul a fost antrenat și motivat pentru această sarcină și astfel procesul de

testare a fost atent controlat. Punctul de fixare al unui subiect antrenat este menținut cu mai multă siguranță și criteriul de vizibilitate este mai precis.

În a doua serie de teste am inclus o nouă componentă ca sarcină vizuală: mișcarea brațului pietonului. În condițiile experimentului, viteza de deplasare a pietonului trebuia să fie foarte înceată (1 pas/2 sec) pentru a înregistra distanța de detecție cât mai precis. La această viteză, mișcarea unui pieton care se plimbă, văzut de la mai mult de 40 m nu mai este o componentă critică a sarcinii vizuale. În a doua serie de teste, pietonul mișca tot timpul brațul în timp ce se deplasa. Ca și la prima serie de teste, viteza de mișcare era constantă ($0,2 \text{ m/s}$) și lungimea unui pas era de 40 cm. Mișcarea brațului făcea detectarea pietonului mai ușoară iar distanța de detecție putea fi definită mai precis. Mișcarea brațului pietonului mărea dimensiunea orizontală a țintei vizuale.

Am efectuat sesiunea de opt teste în zile consecutive cu subiectul antrenat. O sesiune consta din patru condiții de iluminat diferite. În vederea dezaxată excentricitatea vederii țintei era de 20° . Rezultatele sunt prezentate în Figura 4.

Din nou rezultatele au arătat că nivelul de luminanță are un efect clar asupra vizibilității. De asemenea, la fel ca în prima serie de teste, vizibilitatea este mai bună în vederea foveală decât în vederea dezaxată la un nivel de luminanță de $1,5 \text{ cd/m}^2$. Nu s-au găsit efecte spectrale la niveluri de luminanță ridicate. Totuși, apar diferențe între cele două spectre de lumină la o luminanță de $0,1 \text{ cd/m}^2$. Subiectul antrenat putea defini distanța de detecție mult mai precis. În plus, includerea mișcării a mărit sensibilitatea testului și distanța de detecție putea fi înregistrată mult mai precis.

La nivelul de luminanță de $0,1 \text{ cd/m}^2$ vizibilitatea devenea relativ mai bună pentru ținte dezaxate comparativ cu vederea dezaxată. Când ținta era în vedere foveală, spectrul luminii nu afecta vizibilitatea. Totuși, în vedere dezaxată pragul de luminanță relativă era mai scăzut cu lămpi MH comparativ cu cele HPS. Astfel lumina cu conținut ridicat în regiunea cu lungimi de undă albastre indică o vizibilitate mai bună în vederea dezaxată.

5. Concluzii

Rezultatele indică faptul că nivelul de lumină are un efect mai puternic în vederea țintelor mișcătoare în regiunea mezopică. Distanță de detectare a pietonilor devine mai scurtă odată cu scăderea nivelului luminii. Efectul nivelului luminii asupra vizibilității nu este totuși liniar în diferite părți ale câmpului vizual. La niveluri de luminanță de $1,5 \text{ cd/m}^2$ vizibilitatea este mai bună în vedere foveală decât în cea dezaxată. Atunci când a fost scăzut nivelul luminii la $0,1 \text{ cd/m}^2$, diferențele dintre vizibilitatea foveală și cea dezaxată dispăreau și erau parțial inversate. Aceasta este explicabilă prin structura retinei. În fovea sunt doar conuri și nu sunt bastonașe. Numărul conurilor scade cu excentricitatea de la fovee, în timp ce numărul bastonașelor crește cu excentricitatea de la fovee. La niveluri ridicate de lumină conurile sunt mai active decât bastonașele. Când nivelul luminii scade și ajunge în zona mezopică, bastonașele devin active, în timp ce contribuția conurilor în procesul vizual devine scăzută. Importanța vederii dezaxate crește când nivelul luminii scade în domeniul luminațelor mezopice. În condiții de vedere centrală ținta (pietonii) erau văzuți cu fovea. Nivelul luminanței în instalațiile cu lămpi HPS și MH era egal în termeni de luminațe echivalente fotopic funcție de $V(\lambda)$. Cum $V(\lambda)$ este bazată pe sensibilitatea spectrală a conurilor și sunt aproape numai conuri în fovea, este de prevăzut că spectrul luminii nu afectează vizibilitatea în vederea centrală chiar la niveluri de lumină scăzute. Acesta era de fapt rezultatul experimentelor atât la niveluri de luminanță de $1,5$ cât și $0,1 \text{ cd/m}^2$. Spectrul luminii nu a afectat vizibilitatea la nici un nivel de luminanță atunci când ținta a fost observată foveal. Aceasta confirmă descoperirile studiilor noastre anterioare, când s-a studiat efectul spectrului luminii asupra acuității vizuale în domeniul mezopic. În vederea dezaxată sunt active atât bastonașele cât și conurile la niveluri de lumină mezopică. Sensibilitatea spectrală a bastonașelor este mai pronunțată la regiunea lungimilor de undă scurte, comparativ cu conurile. Este de prevăzut că atunci când nivelul luminanțelor scade la domeniul mezopic, partea albastră a spectrului devine mai activă pentru vederea dezaxată.[...] În vederea dezaxată (20°)

pragul luminanței relative era mai scăzut sub lămpi MH comparativ cu lămpile HPS. Aceasta a fost confirmată doar pentru luminanțe de $0,1 \text{ cd/m}^2$, unde contribuția bastonașelor se presupune a fi mai mare decât la luminanțe de $1,5 \text{ cd/m}^2$. Rezultatele sugerează că în domeniul mezopic sensibilitatea spectrală a ochiului se mută spre lungimile de undă scurte în acele părți ale retinei unde atât conurile cât și bastonașele contribuie la sarcina vizuală. Măsurările vizibilității pietonilor sugerează că spectrul lămpii are un efect în vizibilitatea în condiții rutiere în cazul vederii dezaxate. Lămpile cu conținut ridicat în regiunea lungimilor de undă albastre par a fi mai eficiente decât cele convenționale cu lămpi cu vapori de sodiu de înaltă presiune. Efectul spectrului luminii asupra vizibilității la nivele mezopice este dependent de nivelul de adaptare al ochiului și de excentricitate a sarcinii vizuale. Motivul este distribuția neuniformă a celor trei tipuri de conuri și a bastonașelor pe retină și a schimbării contribuției mutuale a bastonașelor și conurilor la sarcina vizuală cu schimbarea nivelului de iluminare.

Vom continua experimentele în ceea ce privește instalațiile de iluminat rutier. Obiectivul este de a confirma descoperirile legate de vizibilitate pentru diferite condiții de luminanțe și cu diferite spectre de lumină. Sarcina vizuală din experimentele prezentate în această lucrare este pragul de detectare al pietonilor. Acesta corespunde contrastului minim de luminanță al sarcinii raportat la zona înconjurătoare necesar pentru ca observatorul să detecteze ținta. Nu am inclus identificarea vizuală sau recunoașterea sarcinii. În aceste experimente zona înconjurătoare a țintelor a fost relativ uniformă și țintele au fost întotdeauna în locul așteptat. În multe din situațiile care apar real la condus câmpul vizual este extrem de complex și observabilitatea unui stimul vizual față de fundal să devină importantă. Este clar că sarcina vizuală a condusului pe timp de noapte nu poate fi descrisă extensiv cu o singură sarcină vizuală. Experimente cu diferite sacini vizuale sunt necesare pentru a avea dovezi extensive despre efectele spectrale asupra performanței vizuale în domeniul mezopic.

Traducere Dr. Dorin BEU