

---

**מרכז מידע**

---

**ת-96**

---

# **בטיחות בעבודה עם לייזרים בתעשייה**

---

מאת אריה אמיצי

# בטיחות בעבודה עם לייזרים בתעשייה

## תוכן העניינים:

עמוד	שם הפרק
2	<b>מבוא</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- מושגי יסוד</li><li>- ישומי לייזר בתעשייה</li></ul>
4	<b>סיכוני אלומת הלייזר</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- לעיניים</li><li>- לעור</li><li>- סיכונים אחרים</li></ul>
7	<b>תאונות ופגיעות אופייניות של עובדי לייזרים</b>
8	<b>טווחי סיכון של קרני לייזר</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- רמות הקרינה המרביות המומלצות ע"י ACGIH</li></ul>
9	<b>סיווג הלייזר על-פי הסיכונים</b>
10	<b>אמצעים ושיטות למיגון נגד קרינת לייזר</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- אמצעי בטיחות מובנים הנדסיים</li><li>- אמצעי מיגון אישיים</li><li>- בחירת משקפי מגן</li><li>- נוהלים להפעלה בטוחה</li><li>- ממונה בטיחות לייזר</li><li>- הדרכה</li><li>- תקציר אמצעי בקרה הנדסיים וניהוליים</li></ul>
16	<b>תחיקה ותקינה בישראל ובעולם</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- תחיקה ותקינה בישראל</li><li>- תחיקה ותקינה בעולם</li></ul>
18	<b>מקורות</b>
18	<b>נספח א':</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- מונחים מקובלים</li><li>- דוגמאות לחישוב ההנחתה האופטית הנדרשת ממשקפי מגן</li><li>- דוגמאות לחישוב טווחי הסיכון של קרני לייזר</li><li>- דוגמא לכניסה בטיחותית לחדר בו מופעל לייזר</li></ul>

## מבוא

### מושגי יסוד

קיצור המילה לייזר (LASER) נגזר מתופעה הידועה באנגלית בשם

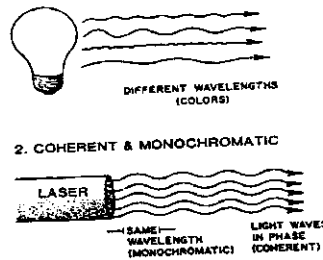
"Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"

התרגום לעברית הוא "הגברת אור באמצעות פליטה מאולצת של קרינה".

בפועל, לייזר בנוי בדרך כלל מהמרכיבים הבאים:

- \* המדיה הפעילה של הלייזר (תווך הלזירה).
- \* 2 מראות בקצוות, אחת מחזירה והשנייה מחזירה חלקית (מהוד).
- \* עדשת מיקוד חיצונית.
- \* מערכת שאיבה, חשמלית, כימית או אופטית.

תהליך הלזירה מתבצע ע"י ערוור אטומי התווך הפעיל באמצעות לדוגמא, מנורת הבזק (או שיטות אחרות). בליעת האנרגיה מעלה אלקטרונים לרמות גבוהות לזמן קצר. אלקטרונים אלה חוזרים למסלוליהם, תוך פליטת פוטונים הגורמים לתגובת שרשרת. תהליך זה מואץ ע"י מראות המהוד תוך שחרור חלק מאנרגיית הקרן דרך המראה המחזירה חלקית. ההבדל הבולט בין קרן לייזר למרבית מקורות האור האחרים הוא באופי הקרינה. קרינת הלייזר מאופיינת בתכונות הבאות: מופע (פאזה) אחיד, רמת התבדרות זוויתית נמוכה של הקרן, וקרינה בתחום אורכי גל צר (קוהרנטיות ומונוכרומטיות).



איור 1: השוואת קרן לייזר לקרינת אור של נורה רגילה

צפיפות קרינת הלייזר (בגלל רמת ההתבדרות הנמוכה והתכונות הקוהרנטיות והמונוכרומטיות) בהשוואה לקרינה הנפלטת ממקורות אור אחרים, מאפשרת שמירת עוצמתה הגבוהה לאורך מרחק גדול. סיכון נוסף טמון בלייזר-פולסים (דפקים) המאפשר שטף אנרגיה גבוה מאד בפרקי זמן קצרים. תכונות אלו מקנות לקרן-הלייזר את פוטנציאל הסיכון שלה.

תווך הלזירה יכול להימצא במצב מוצק, נוזלי או גזי. הלייזרים נקראים בד"כ על שם תווך הלזירה שלהם; לדוגמא: לייזר דוֹבֵי, לייזר הליום, וכו'.

את קרינת הלייזר מחלקים למספר תחומים שונים של אורכי גל. לכל תחום אורכי גל קיימים יישומים אופייניים וסיכונים אופייניים.

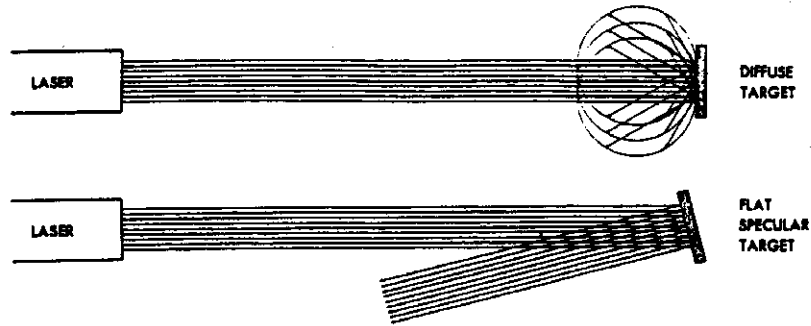
החלוקה הראשונית מבחינה בתחומים הבאים:

180 ÷ 400 nm	קרינה בתחום האולטרא סגול
400 ÷ 700 nm	קרינה בתחום הנראה
700 ÷ 10 <sup>6</sup> nm	קרינה בתחום האינפרא אדום

הערה: 10<sup>6</sup> nm = 1mm

קרן הלייזר עוברת במסלולים אופטיים שונים המשפיעים באופן שונה על עוצמתה. עוצמת הקרן או עוצמת שטף הקרינה לאורך מסלול הקרן תלוי בתכונות תווך המסלול ובתכונות האופטיות של העצמים בהם פוגעת קרן הלייזר.

איור 2 מדגים שני מצבי החזרה של קרן לייזר; החזרה ספקולרית, SPECULAR (החזרה דמוית ראי שטוח כאשר אי רגולריות המשטח המחזיר קטנה מאורך הגל) שומרת על אופי קרן הלייזר תוך הנחתה זעירה; החזרה בעלת אופי דיפוזיבי, DIFFUSED (מפזר, כאשר אי רגולריות המשטח המחזיר גדולה מאורך הגל); או החזרה ממשטח לא ישר, המורידה את שטף הקרינה. סוג נוסף של קרינה היא קרינת לייזר מפוזרת (SCATTERED). הקרנים מתפזרות באוויר עקב פגיעתן בארוסולים שיש להן תכונות פיזור שונות.



איור 2 : אופני החזרה שונים של קרני הלייזר

### ישומי לייזר בתעשייה

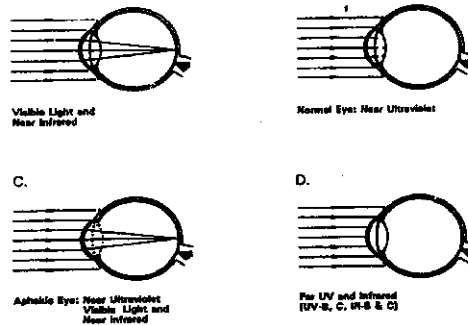
ללייזר יש מספר רב של יישומים ושימושו עולה ומתרחב עם הזמן. הלייזר משמש לצורכי מדידה, חיתוך, קדוח, ריתוך, טיפולים תרמיים, סימון, תצוגה, אבחונים רפואיים, ניתוחים וטיפולים רפואיים שונים, תקשורת, הדפסה, מופעי ראוזה ועוד יישומים רבים. מסמך זה מתמקד בבטיחות בלייזרים בתעשייה.

## סיכוני אלומת הלייזר

### עיניים

בגלל שקרן הלייזר היא בעלת שטף אנרגיה וריכוז גבוה, הלייזר משמש כמקור אור נקודתי חזק, שלגביו העין מהווה את האיבר הפגיע ביותר.

קרן לייזר בעלת עוצמה גבוהה, יוצרת עוצמת אור הגבוהה במספר סדרי גודל ביחס למקורות אור רגילים. רמת הקרינה שממוקדת על הרשתית יוצרת עוצמות קרינה, שבמקרים מסוימים, עולות על עוצמת הקרינה הישירה מהשמש. התוצאה של פגיעה מקרינות אלו היא עוררן חלקי או מלא ובלתי הפיך. איזור הרשתית הפגיע במיוחד לקרינת לייזר ישירה נמצא בחלק האחורי של הרשתית ונקרא מקולה (MACULA). איזור זה כולל את ראיית הצבע ומצטיין בחדות ראייה גבוהה. תכונות הבליעה של העין משתנות כתלות באורכי הגל של הקרינה האלקטרומגנטית. האפקטים הביולוגיים תלויים בהגעה של האנרגיה לרקמות הקריטיות וביחסי הגומלין בין סוגי הרקמות לסוג הקרינה.



איור 3 מדגים את חדירת האנרגיה לעין כתלות באורך גל הקרינה, ומציג מספר רקמות קריטיות בעין.

### פגיעות תרמיות

רב הפגיעות השכיחות של הרקמות הנגרמות ע"י קרן הלייזר נובעות מפגיעה במבנה המרחבי של החלבונים, כתוצאה מבליעת אנרגיית הלייזר ע"י הריקמה ועליה דרמטית של הטמפרטורה. תהליך הפגיעה התרמית (כוויה) נובע בד"כ מזמני חשיפה לקרינת לייזר הארוכים מ- 10 מיקרושניות, ובתחום קרינה מהאולטרה סגול הקרוב ועד האינפרא אדום הרחוק  $0.315 + 103 \mu\text{m}$ .

בלייזר-פולסים הנוק הביולוגי הוא נוק מצטבר (כולל גם "פיצוץ" התא כתוצאה מחימום מהיר הגורם להתפשטות התא), כתלות באנרגיית הפולס הבודד ובמספר הפולסים. הנוק הביולוגי תלוי בפרמטרים העיקריים הבאים:

- תכונות הבליעה והפיזור של רקמות העור, המשתנות כתלות באורכי הגל של קרינת הלייזר.
- עוצמת שטף הקרינה של קרן הלייזר.
- עוצמת זרימת הדם המקומית באזור הפגיעה.
- גודל האזור המוקרן.

## עור

פגיעות לא תרמיות בעור תלויות באורכי הגל ומשך הקרינה. קרינת UV שוברת קשרים ביומולקולריים. לכל תחום ספקטרי יש פגיעות אופייניות; לדוגמא: פגיעה של קרינת UV actinic בתחום  $0.200 + 0.315 \mu\text{m}$  בכל משך חשיפה, או קרינת אור כחול בתחום  $0.400 + 0.500 \mu\text{m}$  למשך חשיפה העולה על 10 שניות, יגרמו לפגיעה פוטוכימית. פיגמנטציה - יתר או אריתמה יגרמו ע"י קרינת UVA בתחום  $0.315 + 0.400 \mu\text{m}$ . קרינת UVB יוצרת סיכונים גבוהים נוספים מבחינה קרצינוגנית (סירטון): היא יכולה לגרום לפגיעה ישירה ב-DNA, או לקרצינוגניות באמצעות יצירת אפקטים שונים על הווירוסים הנמצאים בתוך התאים.

תמצית הפגיעות הביולוגיות מקרן לייזר

תחום ספקטרי	אפקט על העין	אפקט על העור
$0.200 - 0.280 \mu\text{m}$ UVC $0.280 - 0.315 \mu\text{m}$ UVB	דלקת קרנית	כוויות שמש סרטן העור האצת הזדקנות העור פיגמנטציה יתר
$0.315 - 0.400 \mu\text{m}$ UVA	UV- ירוד (קטרקט) פוטו-כימי	פיגמנטים כהים תגובת רגישות לאור
$0.400 - 0.700 \mu\text{m}$ VIS	פגיעת הרשתית: תרמית ופוטוכימית	כוויות עור
$0.780 - 1.400 \mu\text{m}$ IRA	ירוד, כוויות ברשתית, כוויות בקרנית	
$1.400 - 3.000 \mu\text{m}$ IRB	ירוד אינפרא-אדום	
$3.000 - 10.000 \mu\text{m}$ IRC	רק כוויות קרנית	

מעובד מתוך: OSHA Technical Manual - Section II - Chapter 6, Laser Hazards

## סיכונים אחרים

השימוש בלייזרים קשור בסיכונים פוטנציאליים שונים נובעים מקרן הלייזר לכשעצמה. הסיכונים הפוטנציאליים קשורים לגזים דחוסים, חומרי קירור שונים, חומרים רעילים ומסרטנים ופליטת רעש; לדוגמא: נדרשת מערכת אורור מתאימה למניעת סיכוני אדים או נדפים רעילים שונים בתהליכי ריתוך, חיתוך ופעולות נוספות של הלייזר הכרוכות בשחרור גזים רעילים. תפקיד מערכת אורור זו הוא למנוע יצירת ריכוזים רעילים העולים על רמות הסף המרביות (TLV, בספר ה-ACGIH המעודכן) המותרות עפ"י תקנות ארגון הפיקוח על העבודה - ניטור סביבתי וניטור ביולוגי של עובדים בגורמים מזיקים, התשנ"א - 1990.

### **סיכוני פיצוץ**

מנורות קשת חשמליות בלחץ גבוה, מנורות חוט להט בלייזרים לריתוך, או אלמנטים פנימיים בתוך המסלול האופטי חייבים להיות מוגנים ע"י מעטפת ומנגנוני הגנה שיוכלו לעמוד בפיצוץ פנימי. סיכוני פיצוץ קיימים גם בקבלי הלייזר ובמערכת השאיבה האופטית, בתהליכי חיתוך ריתוך וקידוח בהם יכולים לעוף נתזים לוחטים. ריאקציות המלוות בפיצוץ יכולות להתרחש גם בריאגנטים הנמצאים בלייזר כימי, ובגזים שונים הנמצאים במעבדה.

### **סיכוני קרינה אופטית שלא נובעים מקרן הלייזר**

סיכונים אלה נובעים בין היתר מקרינת UV הנפלטת משפופרת פריקת הלייזר, מנורת ההבזק של מערכת השאיבה וכן מפלסמה הנוצרת בעת ריתוך. קרינות אלו חייבות להיות ממוגנות או מונחתות עד לרמות החשיפה (TLV) המותרות.

### **סיכוני קרינה לא-אופטית**

קימות קרינת מסוכנת נוספות הקשורות להפעלת לייזרים מסוימים, כגון קרינת RF (Radio Frequency) או קרינת MW (Micro-Wave) הנפלטות משפופרות פלסמה, קרינת X הנפלטות מספקי מתח גבוה שאופייניים לאקסימר לייזר (EXIMER), וקרינת X הנפלטות מקבלים העוברים מתח פריקה העולה על KV 1. קרינת אלו יש לנטרל ולחסום בהתאם לנדרש. עקרונות ההגנה מפניהן, חייבים להיות מותאמים לדרישות התקנות, יש לוודא שרמות החשיפה לא יעלו על המותר (TLV).

### **סיכוני חשמל**

לייזרים מסוימים מופעלים ע"י מתחים גבוהים ומסוכנים הכוללים קבלים בעלי קיבול גבוה. לייזרים אלה, על כל חלקיהם, וכן נוהל הפעלתם, חייבים לעמוד בכל תקני הבטיחות עבור כלים חשמלים של מכון התקנים הישראלי (מתי"י), וכן לענות על תקנות חוק החשמל ותקנות הבטיחות בעבודה - (חשמל).

### **סיכוני אש**

לייזרים מקבוצה 4 (ראה בהמשך את הפרק: "סיווג הלייזר על פי הסיכונים") ומספר לייזרים בעלי רמות מיקוד קרן גבוהות מקבוצה 3 ב' הם בעלי פוטנציאל סיכון אש. כל המעטפת של לייזרים אלה החשופה לרמות קרינה מעל  $10W/cm^2$  והעשויה מחומר פלסטי עלולה להידלק ולשחרר נדפים רעילים. עוד בשלב התכנון, יש לתת את הדעת לסיכון זה, ולהשתמש רק בחומרים חסיני אש ובעלי עמידות תרמית מספקת אשר ישמשו כחוסמי קרינה.

### **אטמוספירה רעילה**

כתוצאה מריתוך, חיתוך, קידוח או פעולות אחרות יכולים להיווצר גזים רעילים אותם יש לשאוב ולאוויר את המקום כך שימנעו ריכוזים גבוהים ומסוכנים.

### **נזלי קירור**

בלייזרים רבי עוצמה משתמשים בנוזלי קירור, חלקם נוזלים רעילים הדורשים טיפול בטיחותי בהתאם.

## תאונות ופגיעות אופייניות של עובדי לייזרים

תאונות עבודה רבות, בעבודה עם לייזר, מתרחשות בעת כיוונון אלומת הלייזר. תאונות אופייניות אלו קורות בדרך כלל במעבדות, כאשר קרן הלייזר פוגעת במשטח מחזיר ספקולרי (בעל אופי מראתי) והקרן מוחזרת בצורה לא מבוקרת ופוגעת בעיני עובדים שאינם מרכיבים משקפי מגן. הפגיעה הנפוצה במקרה זה היא פגיעה ברשתית העין ויצירת אזורים פגועים קבועים בעין, בהם לא ניתן יותר לראות. תאונות מתרחשות כאשר עובדים ללא משקפי מגן, משתמשים בעדשות מגע פלסטיות ומפעילים לייזר באינפרא אדום (בלתי נראה). קרן הלייזר מוחזרת ממשטח מחזיר כלשהו ופוגעת בעדשת המגע. פגיעות אלו גורמות לנזק כפול: נזק ראשוני נגרם לקרנית (נזק תרמי היכול לגרום לירוד); נזק נוסף (לעתים חמור יותר) נגרם עקב כווייה מהעדשה הפלסטית שמוכתכת כתוצאה מבליעת אנרגיית הלייזר.

### תאונות אופייניות

מקום	העובד	הלייזר	הפגיעה
מעבדת פיסיקה באוניברסיטה	חוקר	Ti-Sapphire	כווייה בעין השמאלית
אוניברסיטה	חוקר	Argon	אובדן ראייה קבוע של חלק משדה הראייה
מתקן תעשייתי	עובד	Nd:YAG	כוויות קשות בידיים
מתקן ייצור	טכנאי	דיודת לייזר	סנוור ואיבוד ראייה זמני

## טווחי סיכון של קרני לייזר

הפרמטרים לחישוב רמות קרינת הסף (TLV) לקרינת הלייזר ב- ACGIH, ודוגמאות לחישוב טווחים ומרחקי סיכון כתוצאה מקרינת לייזר מובאות בנספח א' בכל אותם מקרים בהם עוצמת קרן הלייזר עולה על רמת החשיפה המותרת (TLV) ויוצרת סיכונים שונים למערכת הראייה, ולא ניתן למנוע במסגרת העבודה הסדירה, את חשיפת עיני העובד לפגיעת קרן הלייזר (כגון בתהליכים של: ריתוך בלייזר, מדידת מרחק, כיוונים אופטיים וכו') נדרשת הגנה על עיני העובד כך שיוכל לראות באופן חופשי ולהיות מוגן מפגיעה אפשרית של קרן הלייזר. כדי לחשב את רמת ההנחתה הנדרשת משתמשים במושג שנקרא **צפיפות אופטית** (Optical Density (OD) המוגדר כלהלן:

$$OD = \log_{10}(H(o) / MPE)$$

$$H(o) = \text{(שטח/הספק)}$$

maximum permissible exposure - MPE

### רמות הקרינה המרביות המומלצות ע"י ACGIH

#### כללי

רמות ה-TLV (Threshold Limit Values) המומלצות ע"י ארגון הגיהותנים הממשלתיים של ארה"ב (ACGIH) הן ערכי סף גבוליים אשר אינם מהווים קו ברור בין רמות קרינה מסוכנות ללא מסוכנות (מומלץ לעבוד בערכים הנמוכים משמעותית מערכים אלה). רמות אלו מתעדכנות באופן שוטף ונקבעות על סמך ניסיון רפואי, ניסיון תעשייתי, ניסויים בבעל-חיים ושילוב ביניהם. אנשים הרגישים לקרינת אור, כתוצאה מסיבות גנטיות, גיל, והרגלים (עישון, אלכוהול וכו') או שהם צורכים תרופות, בהחלט יכולים להיפגע גם ברמות קרינה מתחת ל-TLV המומלץ. כמו כן, שילוב בין מספר אפקטים פיזיקליים כגון חום גבוה, קרינה לא מיננת וכו' מגביר את סיכויי הפגיעה גם ברמות הנמוכות מה-TLV.

## סיווג הלייזר על-פי הסיכונים

הצורך לסווג קבוצות לייזר עפ"י הסיכונים הוא לתת למפעילי מכשירי הלייזר מידע לגבי אמצעים ונוהלים הנדרשים לשמירת הבטיחות בתפעול הלייזר.

קבוצות הסיכון נחלקות ל-4 קבוצות עיקריות שלגבי כל אחת ואחת מהן נקבעים גבולות קרינה מוגדרים (AEL (Accessible Emission Limit). חלוקה לארבע קבוצות סיכונים זו פותחה בארה"ב ואומצה הן על ידי התקינה האמריקאית, האירופאית והבינלאומית והן ע"י התקינה המקומית (מכון התקנים אימץ את התקן של הנציבות הבינלאומית לאלקטרוטכניקה IEC 825 - 1984). קיימים מספר הבדלים לא משמעותיים בין התקנים השונים (בתקינה האמריקאית מוגדרת תת-קבוצה נוספת בשם 2A, בקבוצה זו משך הקרינה יכול להגיע ל- 1000 שניות כאשר עוצמת הקרינה לא תעלה על המוגדר בקבוצה 1). להלן קבוצות הסיכון:

### קבוצה 1 (Class 1)

מכשירי לייזר שאינם פולטים קרן לייזר מסוכנת בכל מצבי הפעלתם.

(הערה: קיימים מוצרי לייזר בעלי קרינת לייזר גבוהה, פנימית, הכלואה בתוך מעטפת בלתי חדירה לקרינה; מוצרים אלה כוללים אמצעי מיגון מובנים שאינם יוצרים שום סיכון בכל צורות ההפעלה. מכשירי לייזר אלה יהיו מסווגים בקבוצה 1).

### קבוצה 2 (Class 2)

מכשירי לייזר היוצרים קרן לייזר רק בתחום הנראה (400+700 nm).

פליטת הלייזר יכולה להיות רצופה (CW) או בפולסים. זמן החשיפה לא יעלה על 0.25 שניה, עבור קרן רצופה. הספק הקרן לא יעלה על 1mW.

(לייזרים אלה מפעילים את רפלקס עצימת העין כמנגנון הגנה בזמן של חשיפה לקרינת גבוהות).

### קבוצה 3א (Class 3A)

מכשירי לייזר בעלי קרינה רצופה (CW) שהספקם הוא עד 5mW, כלומר כאלה שהספקם עולה עד פי 5 משל הלייזרים השייכים לקבוצה 2 שהם לייזרי פולסים, או לייזרים סורקים (בתחום ספקטרלי של 400+700 nm). בכל מקרה, הקרינה בתחום הנראה לא תעלה על  $25w/m^2$ . עבור תחומי קרינה אחרים, לא תעלה רמת הקרינה על פי 5 מרמת הקרינה המותרת (ערך ה-AEL) לגבי לייזרים של קבוצה 1.

סיכונים: צפייה ישירה דרך מערכת אופטית מגדילה כלשהיא לתוך הקרן של לייזרים אלה היא מסוכנת.

### קבוצה 3 ב' (Class 3B)

מכשירי לייזר אשר יכולים לפלוט קרינה הן בתחום הנראה והן בתחום הבלתי נראה (רמת הפליטה לא תעלה על ערכי AEL כפי שמוגדר בטבלה IV, עמוד 29 של ת"י 1249 חלק 1). קרינת לייזר רציף (CW) לא תעלה על 0.5W, וקרינת לייזר פולסים לא תעלה על  $10^5 J/m^2$ .

סיכונים: בקרינה ישירה לעין או בהחזרה ספקולרית.

### קבוצה 4 (Class 4)

כל מכשיר לייזר שקרינתו עולה על קרינת הלייזרים המשתייכים לקבוצה 3ב.

סיכונים: קרינת לייזרים מקבוצה זו מסוכנת הן כקרינה ישירה והן כקרינה מוחזרת ע"י משטחים ספקולריים ודיפוזיוניים לעין ולעור, ועלולה גם לגרום סיכון כקרינה מפורזת ע"י ארוסולים. לייזרים אלה יכולים לגרום גם לכוויות ולסיכונים שריפה. השימוש בהם מחייב זהירות מרבית.

## סיכונים ביולוגיים וסיכונים אש של קבוצות הסיכון השונות

קבוצה	אורכי גל				סיכונים	
	UV	VIS	NIR	IR	קרן ישירה	קרן מוחזרת או מפורזת
1	x	x	x	x	אין	אין
2	-	x	-	-	רק אחרי חשיפה של 0.25 שניות	תלוי באופי ההחזרה
3א'	x	x	x	x	לעיניים	תלוי באופי ההחזרה
3ב'	x	x	x	x	לעיניים (לעור רק בקרינות קרובות לגבול העליון 0.5w)	תלוי באופי ההחזרה
4	x	x	x	x	יש	יש

## אמצעים ושיטות למיגון נגד קרינת לייזר

מטרת נקיטת אמצעי הבטיחות היא להוריד את סיכוני קרינת הלייזר וסיכונים נוספים הכרוכים מהפעלת מכשיר הלייזר לרמות נמוכות ככל שאפשר.

את אמצעי הבטיחות מחלקים ל-3 קטגוריות:

1. אמצעי בטיחות מובנים הנדסיים.
2. אמצעי מגון אישיים.
3. ונהלים להפעלה בטוחה.

אמצעי בטיחות מובנים הנדסיים הם הבטוחים ביותר, במידה ואינם ניתנים ליישום יש צורך באמצעי מיגון אישיים ונהלים להפעלה בטוחה.

אמצעי הבטיחות הנדרשים יהיו בהתאם לסיכוני הלייזר וקבוצות סיווג הסיכון. להלן מספר דוגמאות לאמצעי הבטיחות בקטגוריות השונות:

### אמצעי בטיחות מובנים הנדסיים

#### מעבר קרן

קרן הנפלטת מלייזרים מקבוצות 3ב' ר4 חייבת להחסם ע"י חומר דיפוזיווי מחזיר מתאים, הן מבחינה תרמית והן מבחינת תכונות של בליעה ספקטרלית.

#### החזרות ממוזרות

יש לדאוג למניעת קרינות לייזר מוחזרות או ממוזרות בשוגג מקבוצות לייזרים 3ב' ר4. מראות, עדשות, מפצלי אלומה ואלמנטים אופטיים שונים במסלול הקרן חייבים להיות מקובעים באופן יציב ומבוקרי תנועה בזמן שהלייזר פועל.

להלן דוגמא למספר אמצעי בטיחות מובנים:

מפסק לחסימת קרן הלייזר עם אפשרות של הפעלה מרחוק,

שימוש במפסק חוסם (Remote inter-lock connector) יהיה בלייזרים מקבוצות סיכון 3ב' ר4 שאין אפשרות לסגור את קרן הלייזר במעטפת ביטחון. מפסק זה יגרום לחסימה מיידית של קרן הלייזר במקרה שתיפתח דלת אזור הקרינה המסוכנת.

במקרים בהם אין אפשרות לסגור את קרן הלייזר במעטפת ביטחון לא תנותב קרן הלייזר בגובה עמידה או ישיבה על מנת להפחית את הסיכון לחשיפה בשוגג.

#### מפתח בטיחות

מפתח זה ישמש לנעילה מפני הפעלה של המפעיל בשוגג, או ע"י אנשים שאינם מוסמכים להפעלת לייזרים מקבוצות 3א', 3ב' ר4.

#### חוסם קרן או מנחת

לייזרים מקבוצות 3א', 3ב' ר4 חייבים לכלול חוסם קרן המונע קרינה או מנחת המוריד את הקרינה מתחת ל-TLV כאשר המכשיר נמצא במצב "המתנה" בין פעולות.

### אמצעי מיגון אישיים

השיקולים לבחירת משקפי מגן ואמצעי מיגון אישיים נוספים ללייזר כוללים מספר פרמטרים הדורשים בדיקה וזאת לאחר חישוב ה-OD. המיגון ינחית את כל קרינה המסוכנת מתחת לרמת הקרינה המרבית המותרת (TLV).

### בחירת משקפי מגן

משקפי מגן יבחרו עפ"י תקנות הבטיחות בעבודה (ציוד מגן אישי), התשנ"ז - 1991, ציוד מגן אישי יתאים לתקן ישראלי והיה ואין תקן כזה יתאימו משקפי המגן לתקן בינלאומי אחר, כגון: EN, DIN, ISO ANSI.

תקן ישראלי 4141 חלק 10 מדצמבר 97 "ציוד מגן אישי לעיניים: מסננים ומגיני עיניים להגנה מפני קרינת לייזר, (מבוסס על תקן EN 207 מ - 1993) **מגדיר במפורט** דרישות למיגון עיניים בפני קרינת לייזר, שם התקן הארופאי הוא: Personal eye-protection - Filters and eye protection against laser radiation

להלן פרמטרי בחירת מיגון עיניים:

- 1 - עבירות פוטופית גבוהה בעבודה בתנאי תאורה טובים.
- 2 - עבירות סקוטפית גבוהה בעבודה בתנאי חשכה.
- 3 - מניעת עיבוי במיוחד בתנאי לחות גבוהים.
- 4 - מניעת יצירת צבעים מדומים (קריטי לשימושים רפואיים)
- 5 - ראייה מרחבית טובה במיוחד באזורים עם מכשולים וסיכונים.
- 6 - עמידות המשקפיים בקרינת לייזר בעוצמות גבוהות מעל  $1 \text{ W/cm}^2$  (קבוצה 4).
- 7 - ניתנות לתיקוני ראייה אופטיים במידה ונדרשים ע"י העובדים.
- 8 - עמידות המשקפים בקרינת UV ותנאי סביבה קשים (במיוחד בעבודות מחוץ למבנים).
- 9 - עמידות בריססים בליסטים, באם נדרש.
- 10 - נוחיות לאורך זמן וכשר אחיזה.
- 11 - דרישה למסנן לצורך כיוונים אופטיים של קרן הלייזר (Alignment filters) שיאפשר ראיית קרן הלייזר (במידה והקרן נמצאת בתחום הנראה).
- 12 - יש לבדוק שהמשקפיים מסומנות עפ"י הנדרש בתקן כולל OD ואורך הגל המונחת. (סימון המשקפים מופיע בדרישות תקן 4141 חלק 10).

### בגדי מגן

בכל אזור בו רמת הקרינה גבוהה מהמותר לעור יש להשתמש בבגדי מגן מתאימים. בעבודה בלייזרים מקבוצה 4 נדרשים ביגוד מגן חסין אש וחם.

### נהלים להפעלה בטוחה

שלטי אזהרה

כניסות לאזורים מוגנים, בהם מופעלים לייזרים מקבוצה 3א', או 3ב', או 4 חייבות להיות משולטות בשלטי אזהרה מתאימים.

### **ממונה בטיחות לייזר**

ממונה בטיחות לייזר חייב להיות בעל ידע מתאים בתחום הפיזיקה, בתחום סיכוני הקרינה התחיקה ואמצעי הבטיחות הנדרשים. להלן חלק מתפקידיו:

סיווג סיכונים

קביעת אזורים מסוכנים

ניטור קרינת הלייזר

תכנון התקני בטיחות לצורך הפעלת לייזרים מקבוצות 3 ו-4

דרישות לאמצעי מיגון ובטיחות

קביעת נוהלי הפעלה

הסמכת עובדים

שילוט והדרכה

דיווח על תאונות

בקרה רפואית

### **הדרכה**

הפעלת לייזרים מקבוצות 3, 4, 3 ו-4 דורשת תפעול מיומן וזאת לאחר הדרכה בנושאים הבאים:

- הכרת תהליכי תפעול הלייזר.
- הכרת הסיכונים הנובעים מתפעול הלייזר
- אפקטים ביולוגיים בעיניים ובעור מקרן לייזר.
- הכרת כל אמצעי ומנגנוני הבטיחות, סימני אזהרה וכו'
- הצורך במיגון אש.
- דיווח על תאונות.

### **תקציר אמצעי בקרה הנדסיים וניהוליים**

דרישות בטיחות במוצרי לייזר מתייחסות קודם כל לסיווג הלייזר לקבוצת הסיכון המתאימה, ולאחר מכן לשורה של אמצעים ומנגנוני בטיחות בהתאם לקבוצת הסיכון.

להלן טבלאות המציגות את רשימות דרישות הבטיחות השונות בהתאם לקבוצת הסיכון בהם הם נדרשים עפ"י תקן ANSI Z 136.1 (1993) ותקן IEC 825-1 1993:

**תקציר אמצעי בקרה הנדסיים וניהוליים עבור 4 קבוצות הסיכון**  
**עפ"י תקן ANSI Z 136.1 (1993)**

קבוצת הסיכון						אמצעי בקרה	
4	3b	3a	2	2a	1	אמצעי בקרה הנדסיים	
X	X	X	X	X	X	מכסה מגן	1
ממונה בטיחות לייזר יקבע אמצעי בטיחות חלופיים						ללא מכסה מגן	2
X	X	∇	∇	∇	∇	מכסה מגן משולב INTERLOK ב-	3
X	X	∇	∇	∇	∇	הדרישות ממכסה השרות	4
X	*	-	-	-	-	מפתח הפעלה ראשי	5
MPE	MPE	MPE	MPE	-	-	פתחי הצפייה	6
MPE	MPE	MPE	MPE	MPE	MPE	מערך אופטי לאיסוף קרינת האור	7
X NHZ	X NHZ	-	-	-	-	אלומה חשופה לגמרי	8
X NHZ	X NHZ	-	-	-	-	אלומה חשופה חלקית	9
לא נדרש, אם סעיפים 4.3.1 ו- 4.3.2 במפרט מתקיימים						אלומה סגורה	10
X	*	-	-	-	-	מחבר מגן משולב INTERLOCK ב- (פיקוד מרחוק)	11
X	*	-	-	-	-	חוסם או מנחית אלומה	12
X	*	-	-	-	-	חיווי אלומה	13
X	-	-	-	-	-	משהה הפעלת האלומה	14
X NHZ	X NHZ	-	-	-	-	בקרה על אזורי קרינה מסוכנת	15
-	X	-	-	-	-	אזור מבוקר לקבוצת סיכון לייזר 3b	16
X	-	-	-	-	-	אזור מבוקר לקבוצת סיכון לייזר 4	17
X NHZ	X NHZ	-	-	-	-	בקרת קרינה על לייזרים בשימוש בחוץ	18
*	*	*	-	-	-	לייזר במערכות ניווט אוויר	19
-	-	∇ MPE	∇ MPE	∇ MPE	∇ MPE	בקרת שטח קרינת לייזר זמנית	20
*	-	-	-	-	-	לזירה מרחוק ומדידות	21
X	X	X	X	X	X	שילוט	22
X NHZ	X NHZ	*	-	-	-	סימון אזורי לזירה	23

קבוצת הסיכון						אמצעי בקרה	
4	3b	3a	2	2a	1	אמצעי בקרה מינהלים	
X	*	-	-	-	-	נוהלי הפעלה תקינים	1
תיקבע ע"י ממונה בטיחות לייזר						הגבלת עוצמת פליטת הקרינה	2
X	X	*	*	-	-	הדרכה ואימון	3

X	X	-	-	-	-	מפעיל מוסמך	4
X	X	X	X	-	-	נוהלי כוונון	5
X	*	-	-	-	-	אמצעי מיגון שונים	6
X	*	-	-	-	-	צופה	7
X	X	▽ MPE	▽ MPE	▽ MPE	▽ MPE	אנשי שרות	8
X	X	X	X	-	+ MPE	מופעי תצוגה לציבור	9
X	X	X	MPE	MPE	MPE	סיבים אופטיים לתקשורת לייזר	10
X NHZ	X NHZ	-	-	-	-	לייזר המותקן ברובוטים	11
X MPE	X MPE	-	-	-	-	מיגון עיניים	12
X NHZ	X NHZ	-	-	-	-	חלונות מגן	13
*	*	-	-	-	-	מחסומים ווילונות מגן	14
X MPE	X MPE	-	-	-	-	הגנת עור	15
יתכן צורך בשימוש							16
X NHZ	X NHZ	*	*	-	-	אמצעי מיגון אחרים שילוט וסימני אזהרה	17
תקבע ע"י ממונה בטיחות לייזר							18
תקבע ע"י ממונה בטיחות לייזר							19

**מפתח סימנים:**

X אמצעי המגן נדרש

\* אמצעי המגן רצוי

- אין דרישה לאמצעי מיגון

▽ נדרש, אם עוצמת אלומת קרן הלייזר החבויה במכשיר היא מקבוצות הסיכון 4,3b

MPE (Maximum Permissible Exposure) נדרש אמצעי מגן, אם רמת קרינת הלייזר עולה עליו

NHZ (Nominal Hazard Zone) נדרשת אנליזה וחישוב

+ אמצעי מגן המיושם רק בלייזרי UV ו- IR

תקציר אמצעי בטיחות הנדסיים הנדרשים מיצרני מכשירי הלייזר עבור 4 קבוצות הסיכון

עפ"י תקן IEC 825-1 1993

קבוצת הסיכון					
IV	III B /	III A	II	I	אמצעי בטיחות
הספק גבוה, גם קרינה מפורזת עלולה להיות מסוכנת	צפייה ישירה עלולה להיות מסוכנת	דומה לקבוצה II, צפייה דרך מערכת אופטית עלולה להיות מסוכנת	הספק נמוך, העין מוגנת בד"כ ע"י רפלקס המצמוץ	בטוח בתפעול ובתנאי פעולה סבירים	1 2 תאור סיכון קבוצת הסיכוי
נידרש עבור כל קבוצות הסיכון					3 מכסה מגן
מתוכנן למנוע הסרת המכסה, עד ירידת עוצמת קרינת הלייזר מתחת לרמה המסוכנת					4 מכסה מגן משולב INTERLOCK
מאפשר התקנת מגן משולב חיצוני			לא נדרש		5 מחבר מגן משולב INTERLOCK ב- (פיקוד מרחוק)
הלייזר לא יפעל ללא המפתח			לא נדרש		6 מפתח הפעלה ראשי

7	חיווי אזהרה בעת לזירה	לא נדרש	נותן של אור או קול כאשר הלייזר מופעל או כאשר קבלי לייזר דפקים נטענים
8	חוסם או מנחת אלומה	לא נדרש	מאפשר עצירת האלומה בנוסף למתג הפעלה ראשי
9	בקרי בטיחות לכוונון והפעלה	לא נדרשים	מונעים קרינה מעל קבוצת סיווג II או III בעת ביצוע כיוונונים
10	פתחי הצפייה	מסך המונע קרינה מעל לרמות הסיכון	
11	בטיחות סריקה	מונעת עלייה בסיווג קבוצת הסיכון בעת תקלת סריקה	
12	שילוט קבוצת הסיכון	נידרש בכתב	נידרש שילוט בהתאם לתקן
13	שילוט למכסי שירות	נידרש בהתאם לקבוצת הסיכון	
14	שילוט מנסה מגן משולב ב- INTERLOCK שניתן לעקיפה	נידרש בתנאים מסוימים בהתאם לקבוצת הסיכון שבשימוש	
15	מידע למשתמש	הוראות התפעול חייבות לכלול ההפעלה בטוחה	
16	מידע לרוכש ולמתן שרות	דפי הוראות שימוש חייבים לכלול סימון קבוצת הסיכון, הוראות שרות חייבות לכלול מידע בטיחותי	
17	לייזרים רפואיים מידע נימצא גם ב- IEC 601-2-22	נידרשים הוראות כיוול ייחודיות לכל מכשיר	הוראות כיוול ייחודיות, נדרשים אמצעים לחיווי מדידה ופגיעה
18	סיבים אופטיים מידע נימצא גם ב- IEC 825-2	נידרשים כלים יעודיים לגיתוק הכבלים, אם ניתוק הכבלים יצור קרינה מסוכנת	
19	בהתייחס לדרישות למגן משולב הנישלט מרחוק, מפתח הפעלה, חיווי קרינה, ומנחת, קבוצת סיכון III B אשר עוצמת קרינתה אינה עלה על פי 5 מרמת הקרינה המותרת לקבוצה II בתחום 400 + 700 nm תחשב לקבוצת סיכון III A		

תקציר אמצעי בטיחות לתפעול מכשיר הלייזר עבור 4 קבוצות הסיכון עפ"י תקן IEC 825-1 1993

קבוצת הסיכון						
IV	III B	III A	II	I	1	
חבר למעגל חשמל בחדר או בדלת				לא נדרש	אמצעי בטיחות מגן משולב הנישלט מרחוק	2
הוצא מפתח כאשר אין שימוש בלייזר				לא נדרש	מפתח הפעלה ראשית	3
מנגנון המונע חשיפה אקראית				לא נדרש	מנחת אלומה	4
נותן חיווי כאשר הלייזר מופעל				לא נדרש	מנגנון חיווי קרינה	5
עוצר את האלומה בסוף מסלולה השימושי				לא נדרש	עצר אלומה	6
מונע החזרה אקראית				לא נדרש	החזרה ספקולרית	7
נידרש כאשר אמצעים הנדסיים ומנהליים אינם מונעים קרינה מסוכנת לעיניים				לא נדרש	מיגון עיניים	8
נידרש לעתים ייחודית				לא נדרש	בגדי מגן	9
נידרשת עבור כל אנשי התפעול והתחזוקה				לא נדרשת	הדרכה	10
בהתייחס לדרישות למגן משולב הנישלט מרחוק, מפתח הפעלה, חיווי קרינה, ומנחת, קבוצת סיכון III B אשר עוצמת קרינתה אינה עלה על פי 5 מרמת הקרינה המותרת לקבוצה II בתחום 400 + 700 nm תחשב לקבוצת סיכון III A						11

## תחיקה ותקינה בישראל ובעולם

### תחיקה ותקינה בישראל

רמת החשיפה המותרת לקרינת לייזר מעוגנת בתקנות ארגון הפיקוח על העבודה (ניטור סביבתי וניטור ביולוגי של עובדים בגורמים מזיקים), התשנ"א - 1990.

תקנה 5 קובעת, שרמת החשיפה המותרת תהיה עפ"י המהדורה האחרונה של הספר:

Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices

American Conference of Governmental Industrial Hygienists Inc. (ACGIH)

סימון ושילוט ללייזר נידרש עפ"י הכתוב בתקנה 7 של תקנות ארגון הפיקוח על העבודה (מסירת מידע והדרכת עובדים), התשמ"ד - 1984.

### הלן מספר דוגמאות לתקני סימון לייזר בעולם:

תקני סימון אלה נלקחו מתקני ANSI IEC ו BRH

IEC-International Electrotechnical Commission

BRH- Bureau of Radiological Health (USA)

ANSI-American National Standards Institute



שילוט אזהרה לקרינת לייזר ודוגמאות לסימון מכשירי לייזר

**מיגון אישי** נידרש עפ"י תקנות הבטיחות בעבודה (ציוד מגן אישי), התשנ"ו - 1997, תוספת לתקנה 3 סוגי מגן אישי להגנת אברי הגוף לפי עבודות ותהליכי עבודה דורשת מיגון אישי מפני קרינת ליזר בסעיפים בטבלא בטור א' וטור ג' הבאים:

4. הגנת פנים ועיניים
10. הגנה כללית של הגוף

#### **התקינה בישראל**

קיימים 4 תקנים ישראליים העוסקים בבטיחות מוצרי ליזר:

1. ת"י 1249 חלק 1, מרס 1992 - "מוצרי ליזר: בטיחות מפני קרינה, מיון הציוד, דרישות וגיליון הדרכה".
2. ת"י 1249 חלק 2, מאי 1989 - "בטיחות חשמלית של מוצרי ליזר".
3. ת"י 4141 חלק 10, דצמבר 97 "ציוד מגן אישי לעיניים: מסננים ומגיני עיניים להגנה מפני קרינת ליזר, (מבוסס על תקן EN-207 מ - 1993).
4. ת"י 4141 חלק 11, דצמבר 97 "ציוד מגן אישי לעיניים: מגיני עיניים לעבודת כוונן לייזרים ומערכות ליזר (מגיני עיניים לכוונן ליזר), (מבוסס על תקן EN 208 מ - 1993)

#### **תחיקה ותקינה בעולם**

- |   |   |                                  |
|---|---|----------------------------------|
| Federal law, 21 CFR Part 1000           | - | סימון לייזרים ומוצרי ליזר בארה"ב |
| Federal law, 21 CFR 1926.54 (Subpart 1) | - | תקן בטיחות ליזר וציוד מגן        |

בעולם קיימים תקנים רבים הדנים מהיבטים מגוונים בבטיחות של מוצרי ליזר. התקן הישראלי למוצרי ליזר אימץ את התקן של הוועדה הבין לאומית לאלקטרומכניקה, IEC-825-1984 Safety of laser products.

תקנים אירופים חשובים כדוגמת ה-EN (Europaisch Norm) עוסקים בבטיחות של מכשירי ליזר. להלן מספר תקני EN בנושא זה:

EN 60 825-1, Safety of laser products, equipment classification, requirements and user's guide.

EN 207, Personal eye-protection-Filters and eye-protectors against laser radiation.

כמו כן קיימים תקנים אמריקאים חשובים כגון:

Federal Laser Product Performance Standard 21 CFR Part 1000.

American National Standards Institute, ANSI, Z 136.1 (1993) Safe use of Lasers.

American National Standards Institute, ANSI, Z 136.2 (1988) American National Standard for the Safe use of Optical Fiber Communication Systems Utilizing Laser Diode and LED Source.

American National Standards Institute, ANSI, Z 136.3 (1988) Safe Use of Lasers in Health Care Environment

Practice for Occupational and Educational Eye and Face Protection ANSI Z87.1-1989.

## מקורות

1. U.S. Department of Labor, Occupational & Health administration, Section II, Chapter 6, Laser hazard, 1997.
2. ILO 68, The Use of Lasers in the workplace, 1993.
3. Safety With Lasers and Other Optical Source, David Slaney and Myrom wolbarsht, 1982.
4. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents, Biological Exposure Indices, ACGIH, 1999.
5. A Guide for Control of Laser Hazards, ACGIH, Fourth Edition 1990
6. IEC-825-1984 Safety of laser products
7. American National Standards Institute, ANSI, Z 136.1 (1993) Safe use of Lasers
8. ת"י - 1249 חלק 1, 1988 "מוצרי לייזר: בטיחות בפני קרינה, מיון הציוד, דרישות וגיליון הדרכה"
9. הנחיות לעבודה בטוחה עם קרינת לייזר, ממיג 2063, 1991.

## נספח א'

### מונחים מקובלים

Cataract - עכירות עדשת העין או חלקים אחרים בעין -

Radiance -  $W/cm^2sr$  - שטף אנרגיית קרן הלייזר - מבוטא ביחידות

Radiant exposure - סה"כ האנרגיה הפוגעת ביחידת שטח , נתון המבוטא ביחידות  $J/cm^2$

Visual band - תחום אורכי הגל של הראיה (400+700 nm)

Pulsed laser - קרן לייזר המאופיינת ע"י פולסים בעלי עוצמה ותדר מסוימים

(CW) Continuous wave - לייזר המוציא קרן בעוצמה קבועה רצופה בזמן -

Cornea - קרנית חלון עדשת העין -

Retina - רשתית - רשת של תאים ההופכים את האור לאותות עצביים בעין -

Cornea burns - כוויה בקרנית -

Intrabeam viewing - מצב בו העין חשופה לקרינת לייזר ישירה -

Laser hazard area - אזור קרינה מסוכנת של הלייזר -

Plasma - מצב פיסיקאלי בו גז מקבל תכונה של מוליכות חשמלית כתוצאה מנוכחות אלקטרונים חופשיים -

NOHD - Nominal Ocular Hazard Distance

המרחק שממנו ואילך עוצמת קרן הלייזר פחותה מרמת החשיפה המותרת לעין

NOHD Extended - מרחק מורחב בו קיימת גם אפשרות צפייה במשקפות אופטיות -

## דוגמאות לחישוב טווחי הסיכון של קרני לייזר

פרמטרי קרינת הלייזר ב־ ACGIH

\* קרינת הלייזר מסווגת כקרינה לא מייננת.

קרינה מיננת מוגדרת כקרינה ברמת אנרגיה העולה על - 12.4 electron Volt (eV)  
(1eV=1.6x10<sup>-19</sup> Joule (J))

\* תחום אורכי הגל המוגדרים בטבלה כקרינות ללייזר הוא 180 nm + 10<sup>3</sup>μm והוא מחולק לתתי התחומים הבאים:

280	+	180	nm	UVC
315	+	280	nm	UVB
400	+	315	nm	UVA
700	+	400	nm	Light
1400	+	700	nm	IRA
1.401	+	10 <sup>3</sup>	μm	IRB&C

הגדרות של מגבלות מפתח הקרן, כוללות את הערכים הבאים: 1.0, 3.5, 7.0, 11.0 מ"מ. במידה והמפתח קטן מאחד מערכים אלה, ניתן לחלק את הספק הקרן בשטחה על מנת לקבל את שטף הקרינה.

קיימת הפרדה בין מקורות אור נקודתיים לבין לא נקודתיים - Extended Source- לדוגמה, large laser diode arrays הינו מקור לא נקודתי. עבור מקורות אור אלה מוגדרים תחומי זווית הפתיחה. לדוגמה זווית הפתיחה של "Extended Source" היא  $\alpha_{max} > 100 \text{ mrad}$ .

בגלל הקשר בין אורך הגל לרמת הסיכון קיימים מקדמי תיקון לתחום אורכי גל שונים (פונקציות משקל) A,B,C (C<sub>A</sub>, C<sub>B</sub>, C<sub>C</sub>).

קיימת הפרדה בין לייזר רציף (CW) ולייזר פולסים (PRF).

קיימת הפרדה בין קרינה ישירה וקרינה מפוזרת.

רמת סיכון שונה עבור קרינה ישירה לעין ועבור קרינה על העור.

נוקי הקרינה תלויים בזמן החשיפה ובעוצמת הקרינה.

המעבר בין קרינה רציפה (CW) המבוטאת ביחידות W/cm<sup>2</sup> לבין קרינת פולסים המבוטאת ביחידות J/cm<sup>2</sup> מבוצע ע"י הכפלה או חילוק בשניה, לדוגמה קרינה של 1 W/cm<sup>2</sup> שווה לאחר משך של שניה ל- 1 J/cm<sup>2</sup>.

**חישובי הרמות המותרות לקרינת לייזר** דורשים מיומנות ורקע מתאים ולא ניתנים לביצוע באופן פשטני ע"י אנשים בלתי מיומנים.

### חישוב טווח סיכוני קרן הלייזר בקרינה ישירה לעין

מרחק הקרינה המסוכנת: Nominal Ocular Hazard Distance (NOHD)

הוא המרחק מנקודת היציאה של קרן הלייזר בו כל חשיפה לקרן הלייזר יוצרת סיכונים.

באותם יישומים בהם קרן הלייזר נמצאת באזור פתוח ולא מוגן (כגון: לייזר לעיבודי מתכת-ריתוך, חיתוך וכ"ו, או לייזר למדידות בהנדסה אזרחית) לא ניתן באופן מעשי למגן את קרן הלייזר ולכן נדרש להגדיר באופן מדויק את אזורי הסיכון, לגדרם ולשלט את האזור המסוכן בהתאם לנדרש.

לחישוב מרחק הסיכון נדרשים הפרמטרים הבאים:

- הספק קרן הלייזר בנקודת היציאה שלה.
- קוטר הקרן.
- התבררות הקרן.
- אנרגיה, תדר הפולסים ואורכם (אם מדובר בלייזר פולסים).
- אורך הגל.
- תכונות התווך האופטי והתווך האטמוספרי.
- משך הקרינה.
- האיבר החשוף לסיכון (עין או עור)

**דוגמאות לחישוב מרחקי קרינה מסוכנת**

**דוגמא מס' 1:**

נתון: לייזר עם הנתונים הבאים:

אורך הגל = 530 nm

$P_0 = 4W$ , עוצמת הקרן ביציאה, (אלפית רדיאן)  $\phi = 0.7 \text{ mrad}$ , התבררות הקרן

$a = 1\text{mm}$ , קוטר הקרן ביציאה

קרן רציפה = CW

CB=1 מקדם תיקון עפ"י ACGIH

חישוב רמת הקרינה המותרת (TLV) עפ"י 98 ACGIH יעשה עפ"י המשוואה המופיעה בת"י 1249 חלק 1 כלהלן:

$$\text{NOHD} = [(4 \times P_0 / \pi \text{MPE})^{1/2} - a] / \phi$$

$$\text{MPE} = C_B \mu \text{w/cm}^2 = 1 \times 10^{-6} \text{ w/cm}^2 = 1 \times 10^{-2} \text{ w/m}^2$$

MPE - maximum permissible exposure

עבור זמן חשיפה של:  $1 \times 10^4 - 3 \times 10^4 \text{ SEC}$

מתאים לזמן חשיפה של 3 עד 8 שעות

נקבל ערך של:

$$\text{NOHD} = [(4 \times 4 / \pi \times 10^{-2})^{1/2} - 0.001] \times 1 / 0.7 \times 10^{-3}$$

תוצאת החישוב היא, כי טווח סיכון לקרינת לייזר ישירה לעין ללא שימוש באמצעי הגדלה אופטיים וללא

הנחתה אטמוספירית היא: ק"מ  $\text{NOHD} = 32$

שימוש במשקפות גורר הגדלת טווח הביטחון בהתאמה להגדלה ועבירות של מכשיר התצפית עקב ריכוז

שטף הקרינה (Extended NOHD)

**דוגמא מס' 2:**

אותו לייזר עם הנחתה אטמוספירית בראות של 20km, תוצאות חישוב אלו מגדירות טווחי בטיחות ארוכים

יותר מאשר חישוב אטמוספרי מדויק.

$$r \mu = 0.5 r c [1 + \exp(-\mu r c)]$$

$$\mu = 10^{-3} \times (3.91/v) \times (0.55/\lambda)^A \text{m}^{-1}$$

$\mu$  - מקדם הנחתה אטמוספירית [ $\text{m}^{-1}$ ]

$r \mu$  - טווח סיכון המחושב עם הנחתה אטמוספירית

$r c$  - טווח סיכון המחושב ללא הנחתה אטמוספירית

$$A = 0.585 V^{0.33}$$

V - טווח ראות

טווח אורך הגל:  $0.4 < \lambda < 2.0$  , אורך גל ביחידות  $\mu\text{m}$

$$\mu = 10^{-3} (3.91/20) \times 1 = 1.95 \times 10^{-4}$$

$$r \mu = 0.5 \times 32 [1 + \exp (1.95 \times 10^{-4} \times 32 \times 10^3)]$$

התוצאה, טווח הסיכון לקרינת לייזר ישירה בעין ללא שימוש באמצעי הגדלה אופטיים עם הנחתה אטמוספירית (חישוב מקורב) - ק"מ  $r \mu = 8$  (NOHD)

דוגמאות לחישוב רמות החשיפה המרביות בלייזרי פולסים

### דוגמא מס' 3:

נתון לייזר ארגון באורך גל 514.5-nm הפועל בפולסים של 10MHz, זמן פולס בודד  $t=10\text{ns}$ , זמן החשיפה הוא 0.25sec. היות והתדר  $F > 15 \text{ kHz}$ , חישוב ה- TLV יהיה עפ"י הממוצע, ערך ה- TLV נילקח מתוך טבלא' מהחוברת של ACGIH, פרק LASERS שנת 1999.

$$\text{TLV:H} \leq 1.8 \times 10^{-3} t^{3/4} \text{ Jcm}^{-2}$$

TLV:H - רמת החשיפה המרבית ביחידות של  $\text{J/cm}^2$

$$\text{TLVH} = [(1.8 \times 10^{-3})(0.25)] / (0.25)^{1/4}$$

רמת החשיפה המרבית היא:

$$\text{TLVH} \leq 6.36 \times 10^{-4} \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ in } 0.25 \text{ s}$$

על מנת לקבל את התוצאה ביחידות של  $\text{W/cm}^2$ , יש לחלק את התוצאה בערך זמן החשיפה הכולל (0.25 שנייה)

### דוגמא מס' 4:

נתון לייזר GaAs באורך גל 905 nm הפועל בפולסים של 1kHz, זמן פולס בודד  $t=100\text{ns}$ , זמן החשיפה הכולל הוא 10s. היות ומדובר בלייזר הפועל מחוץ לתחום הנראה שלא יפעיל את רפלקס הגנת העין, נחשב את מספר הפולסים,

$$n = F \times T = (10^3 \text{ Hz})(10 \text{ s}) = 10^4 \text{ pulses}$$

F - מספר פולסים ביחידת זמן [ שניות / 1 ]

T - זמן [שניות]

n - מספר פולסים

$$n^{-1/4} = (10^4)^{-1/4} = 0.1$$

מצויר 1 מחוברת ACGIH פרק LASERS נמצא את מקדם  $C_A(\lambda=905nm) = 2.6$  ואת רמת החשיפה,

$$TLV:H = 5C_A \times 10^{-7} Jcm^{-2}$$

$$TLV:H/PULSES = (n^{-1/4}) 5C_A \times 10^{-7} Jcm^{-2}$$

רמת החשיפה המותרת עבור פולס בודד היא:

$$TLV:H \leq 1.3 \times 10^{-7} Jcm^{-2}$$

רמת החשיפה המותרת עבור פולסים מתמשכים היא:

$$TLV_{train} \leq n \times H_p Jcm^{-2}$$

$$TLV_{train} \leq (10s)(10^3 Hz) 1.3 \times 10^{-7} Jcm^{-2}$$

$$TLVt \leq 1.3 \times 10^{-3} Jcm^{-2}$$

על מנת לקבל את התוצאה ביחידות של  $Wcm^{-2}$ , יש לחלק את התוצאה בזמן החשיפה הכולל (10 שניות)

#### דוגמאות לחישוב ההנחתה האופטית הנדרשת ממשקפי מגן

$H_{(o)}$  - רמת החשיפה לקרינת הלייזר במקרה הגרוע (יחידות:  $W/cm^2$  או  $J/cm^2$ )

MPE - רמת חשיפה מרבית מותרת (יחידות:  $W/cm^2$  או  $J/cm^2$ )  
היחידות במונה ובמכנה חייבות להיות זהות.

ממשוואה  $OD = \log_{10}(H_{(o)} / MPE)$ , ניתן לחשב את הצפיפות האופטית (OD) הנדרשת לצורך הגנת העיניים על סמך נתוני קרן הלייזר,

לדוגמא: לייזר ארגון באורך גל 514 nm בעל עוצמת קרן במוצא של 5 watt.  
זמן המיגון הנדרש הוא ל-100 שניות.

נתונים: Poutput = 5 watt

MPE =  $10^{-4} W/cm^2$  (עבור זמן חשיפה של 100 שניות)

d = 7 mm (קוטר אישון במצב הגרוע)

חישוב  $H_{(o)}$  במצב גרוע

$$H_{(o)} = (שטח/הספק) = 5/0.25\pi(0.7)^2 = 12.99 w/cm^2$$

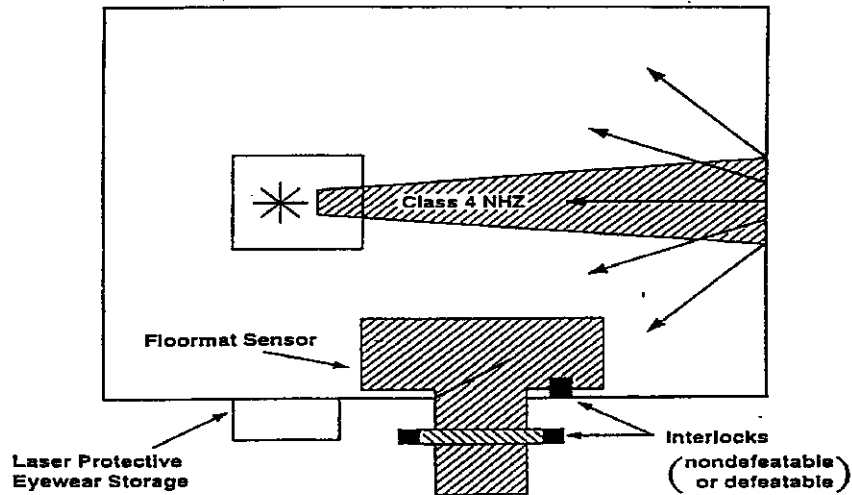
$$OD \geq \log_{10} [(12.99)/(10^{-4})] = 5.1$$

עבור זמן חשיפה של 10,000 שניות (3 שעות),

הצפיפות האופטית הנדרשת היא:  $OD \geq 7.1$ .

הערה: במידה ולקרן הלייזר יש מספר הרמוניות, נידרש לחשב עבור כל הרמוניה את ההנחתה הנדרשת, ולהצטייד במשקף או משקפים בעלי כושר סינון בהתאם.

דוגמא לכניסה בטוחה למעבדת לייזר מקבוצה 4 עם מגן משולב (INTERLOCK)  
 עפ"י ANSI Z136.1 - 1993



מיקרא

- Emergency Override - מתג ניתוק חירום ימוקם במכשיר הלייזר
- Class 4 NHZ - אזור סיכון קרינת לייזר מקבוצה 4
- Laser Barrier Screen Curtain - חסימת קרינת לייזר באמצעות מסך ווילון
- Exposure < MPE @ Entryway - רמת החשיפה בכניסה לחדר נמוכה מרמת החשיפה המרבית המותרת
- Entryway Warning Light Assembly or Audible Signal- מעורה או זמזום אזהרה בזמן פעולת הלייזר ימוקמו בכניסה