

מרכז מידע

בסיוע "הפעולה המונעת" -
משרד התעשייה המסחר והתעסוקה
רח' מזא"ה 22, ת.ד. 1122, תל-אביב 61010
טלפון: 03-5266455 פקס: 03-5266456
e-mail: info@osh.org.il

ת-149

בטיחות השימוש בלייזרים



עיבוד: מהנדס בוריס פרידלנדר
עריכה טכנית: ד"ר רמי אריאלי



המוסד לבטיחות ולגיהות

דצמבר 2006

חוברת זו נועדה למסור מידע לקורא בתחומים בהם עוסק הפרסום
ואיננה תחליף לחוות דעת מקצועית לגבי מקרים פרטיים.
כל בעיה או שאלה מקצועית, הקשורות במקרה פרטי, יש לבחון,
לגופו של עניין, עם מומחה בתחום.

תוכן העניינים

3	הקדמה
4	1. אילו סיכונים נובעים מקרינת הלייזר עצמה?
6	1.1 סיכונים לעיניים
10	1.2 סיכונים לעור
12	1.3 חלוקת הלייזרים לקבוצות לפי מידת הסיכון הכרוכה בשימוש בהם
16	2. אילו סיכונים קשורים למכשיר הלייזר והפעלתו?
18	3. תקנים וחקיקה
	3.1 ותקנים
19	3.2 חקיקה
23	3.3 הגבלת חשיפה תעסוקתית לקרינת לייזר
	3.4 אמצעי הבטיחות
	3.4.1 אמצעים הנדסיים מובנים - דרישות לייצור
27	3.4.2 מדריך למשתמש
32	מקורות ביבליוגרפיים
	נספחים:
33	נספח 1 - מהם עקרונות הפעולה של לייזרים?
40	נספח 2 - טבלת אורכי גל של לייזרים הנמצאים בשימוש רב

הקדמה

מטרת פרסום זה, לתת לעוסקים בנושא את המידע לצורך הבנת דרישות הבטיחות והגיהות בעבודה עם קרינת לייזר תוך התייחסות לתקנות הבטיחות בעבודה (גיהות תעסוקתית ובטיחות העוסקים בקרינת לייזר), התשס"ה-2005 ולתקן ישראלי ת"י 60825 חלק 1 מוצרי לייזר: בטיחות מוצרים, מיון ציוד, יולי 2006.

מרכז המידע מתכנן לפרסם באתר האינטרנט של המוסד לבטיחות ולגיהות בכתובת www.osh.org גרסא מקוונת של חוברת זו, בה יינתן בפרק המבוא הרקע המדעי של הלייזרים.

קיימים לייזרים מסוגים שונים, המשמשים לצרכים שונים, בהתאם לאורכי הגל הנפלטים מהם, להספק הקרינה הנפלט מהם, ובהתאם לצורת הקרינה המתקבלת מהם בזמן ובמרחב. על סוגי הלייזר השונים ניתן לקרוא בפרק 6 באתר הלייזרים המופיע בביבליוגרפיה.

קיימים יישומים רבים של לייזר, ומספרם עולה ומתרחב עם הזמן. תכונות לייזרים, כמו אורך-גל, הספק ונצילות, שונות במידה ניכרת עבור לייזרים שונים, ולא קיים סוג לייזר אחד שמתאים לכל ייעוד. אף על פי כן, ע"י התאמה נכונה של תכונות הלייזר, ניתן לבצע באמצעותו מטלות אשר היו מסובכות או בלתי אפשריות לפני פיתוח הלייזר. יישומים אופייניים חשובים של לייזרים מופיעים להלן:

- **יצירת אפקטים ויזואליים** (הולוגרפיה, צילום, מופעי ראוה);
- **עיבוד וטיפול תרמי של חומרים** (כמו קידוח קדחים בעלי קוטר זעיר, חיתוך וריתוך בחומרים בעלי קשיות גבוהה);
- **אחסון מידע והעברתו** (בתקשורת ומיקרואלקטרוניקה);
- **מדידה וכוונון** במערכות שונות (כמו מערכות ציוד צבאי, טלסקופים, קונסטרוקציות גדולות, קווי צנרת, מנהרות ועוד). בתחום יישומים זה יש לציין את מכ"מ דופלר (LIDAR) המשמש למדידת מרחקים גדולים בתחום האסטרונומיה, מיפוי שטחים, זיהוי עצמים זעירים ביותר במידותיהם על פני הקרקע מגובה רב, איתור מקורות אור מרוחקים וחלשים, וכדומה.
- **רפואה** (לצורך אבחון, אנליזה, טיפול (גם קוסמטי), ניתוח ומחקר);
- **אנליזות הרכב כימי של חומרים** (לפי הספקטרום האלקטרומגנטי האופייני שכל אלמנט מרכיב פולט. תחום זה נקרא בשם **ספקטרוסקופיה**. דוגמה לשימוש כזו היא אנליזת גזים הנפלטים ממנועי שריפה פנימית (Analysis of Exhaust Gas).
- **מערכות נשק צבאיות** (לדוגמה - לצורך סימון מטרות, לצורך כיוון מדויק של מערכות ירי, ואפילו להשמדת מטרות).

עקרונות הפעולה של לייזרים - ראה נספח 1.

טבלת אורכי גל אופייניים של לייזרים הנמצאים בשימוש רב - ראה נספח 2.

סיכונים בעבודה עם לייזר ואמצעי הבטיחות למניעתם

בטיחות (Safety) מוגדרת כ"שליטה בסיכונים, וצמצום (הפחתה) של סיכונים, באתר או בתהליך מסוים".

גיהות תעסוקתית (Occupational hygiene) מוגדרת כ"חיזוי, הכרה, הערכה, בקרה ומניעה של גורמי סיכון בסביבת העבודה ושל תנאי חשיפה המשפיעים על בריאות העובד".
בפרק המבוא, המופיע בגרסא המקוונת של חוברת המידע הזאת באתר אינטרנט של המוסד לבטיחות ולגיהות בכתובת: <http://www.osh.org.il> מוסבר הרקע המדעי של הלייזרים, ובפרק זה נקשר את ההסבר לסיכונים ומניעתם.

את הסיכונים הקשורים בעבודה עם לייזרים ניתן לחלק לשתי קבוצות:

1. סיכונים אופטיים מקרינת הלייזר עצמה
2. סיכונים נוספים שקשורים להפעלת מכשיר הלייזר

1. אילו סיכונים נובעים מקרינת הלייזר עצמה?

כדי להבין מהם הסיכונים הנובעים מקרינת הלייזר, יש להבין מה קורה כאשר קרינת לייזר פוגעת ברקמה ביולוגית מסוגים שונים.

השפעת קרינת לייזר על רקמה ביולוגית

ראשית יש לחזור ולהדגיש:

א. **קרינת הלייזר היא קרינה אלקטרומגנטית**, ואין לבלבל אותה עם קרינה רדיואקטיבית. בנוסף לכך, לאורכי הגל של הלייזרים בתחום הנראה והאינפרא אדום הקרוב, אין כל השפעה מייננת כפי שיש לקרינה אלקטרומגנטית באורך גל קצר, כגון קרני X או קרני γ (*).

ב. קרינת הלייזר הפוגעת ברקמה ביולוגית עוברת אחד משלושת התהליכים: **החזרה, העברה ובליעה**. העוצמה היחסית של כל אחד מתהליכים אלו תלויה בתכונות קרינת הלייזר ובתכונות הרקמה הביולוגית.

(*) **קרינה מייננת** גורמת להוצאת אלקטרונים מהאטומים והמולקולות. כאשר קרינה מייננת פוגעת ברקמה ביולוגית, היא גורמת להרס התאים ברמה מולקולארית. לעומת זאת, קרינה אלקטרומגנטית בתחום הספקטרום האופטי הנבלעת ברקמה ביולוגית גורמת למעברי אלקטרונים בתוך המולקולות, שמיידי לאחר מכן חוזרות למצבן המקורי.

התהליך המשפיע על הנזק שייגרם לרקמה הביולוגית הוא **תהליך הבליעה**.

בליעת קרינת הלייזר ברקמה הביולוגית

קרינת לייזר הנבלעת ברקמה ביולוגית יכולה להשפיע במספר מנגנונים:

1. **אפקטים תרמיים** - הפוטונים של הקרינה הפוגעת הנבלעים ברקמה הביולוגית גורמים למולקולות להתנוודד ונוצר חום ברקמה. הנזק הנגרם לרקמה מתחיל בקרישת החלבונים, ויכול

להגיע לשריפה של הרקמה. כאשר כמות משמעותית של אנרגיה קרינה אלקטרומגנטית נבלעת ברקמה ביולוגית, הטמפרטורה שלה עולה. ידוע כי תחום הטמפרטורה בו מתקיימות רקמות ביולוגיות הוא מצומצם, וכאשר הטמפרטורה עולה מתרחשים בה תהליכים של קרישת חלבונים, ושריפה.

2. **אפקטים תרמו-אקוסטיים** - מתרחשים בעיקר כאשר קרינת הלייזר מרוכזת בפולסים קצרים (פחות ממיליונית השנייה $[s] = 10^{-6} [\mu\text{sec}]$) בעלי עוצמה גבוהה. התהליך השולט הוא עליית טמפרטורה מקומית גבוהה הנגרמת כתוצאה של צפיפות הספק רגעית גבוהה ביותר. כתוצאה מכך הופך הנוזל ברקמה לגז, ועקב הגדלת הנפח הכרוכה בכך, נקרעת מעטפת התאים בתהליך של פיצוץ.

3. **אפקטים פוטוכימיים** - מתרחשים כאשר אורך הגל של קרינת הלייזר מתאים לעירור תגובות (ריאקציות) כימיות בין מולקולות אורגניות מסוימות. בשנים האחרונות התגלו הוכחות להיווצרות שינויים בלתי הפיכים ברקמה הביולוגית עקב חשיפה ממושכת לרמות קרינה נמוכות. אפקטים מזיקים יכולים להיות תוצאה ישירה של בליעת אנרגיה האור הנתון על ידי מולקולות הרקמה הביולוגית. קיימות אינטראקציות בין האור לרקמות ספציפיות, שבהן יש מולקולות הנמצאות במצבים ביוכימיים היוצרים תגובות (שעדיין אינן מוסברות לחלוטין) שאינן בליעה המחממת את הרקמה, ועלולות לגרום נזק לרקמה גם ברמות חשיפה נמוכות.

4. **אפקטים לא ליניאריים (non-linear)** - לייזרים המפיקים הספק שיא גבוה בדפקים קצרי זמן (כמו לדוגמה לייזרים עם מתג "Q" או עם מנגנון נעילת אופנים) עלולים לגרום נזק לרקמות, באמצעות שילובים שונים של מנגנוני גרימת נזק.

השפעות קרינת הלייזר על רקמה ביולוגית

המנגנון שמיוחסת לו גרימת הנזק ע"י קרינת לייזר דומה לכל מנגנון המשפיע על מערכות ביולוגיות והוא יכול לכלול שילוב של חום, אירוע תרמו-אקוסטי ותהליכים פוטו-כימיים. חומרת הנזק תלויה במאפיינים פיסיקליים מסוימים הקשורים במקור ההקרנה, שהעיקריים הם:

- אורך הגל של קרינת הלייזר
- משך זמן ההקרנה
- גודל האזור המוקרן
- עוצמת ההקרנה.

באופן כללי, בחשיפות יתר, מנגנוני ההשפעה הנפוצים מיוחסים בהרחבה למשך הפולס של החשיפה. כך, לצורך ההערכה של משך הפולס, יש לתת את הדעת לאפקטים השולטים בתחומי זמן החשיפה, כלהלן:

- בזמנים ארוכים, מעל אלפיות שנייה (1 ms) ההשפעה היא בעיקר באמצעות אפקטים תרמיים;

- בזמנים קצרים מאוד (מסדר גודל של ננושניות (Nanoseconds) ופחות), באים לידי ביטוי אפקטים נוספים: אפקטים של גלי לחץ ואפקטים לא ליניאריים; הלייזרים עליהם חל התקן הישראלי- ת"י 60825 חלק 1 (IEC 60825-1) (מהדורה 1.2)) הם: ♣ לייזר פולסים (Pulsed Laser) המפיק אנרגיה בפולסים (דפקים) בודדים או בצורות במשך פרקי זמן קצרים מאוד. לעיתים מופיעים במקורות טכניים השמות: "לייזר דופקיי" או "לייזר דפקים".

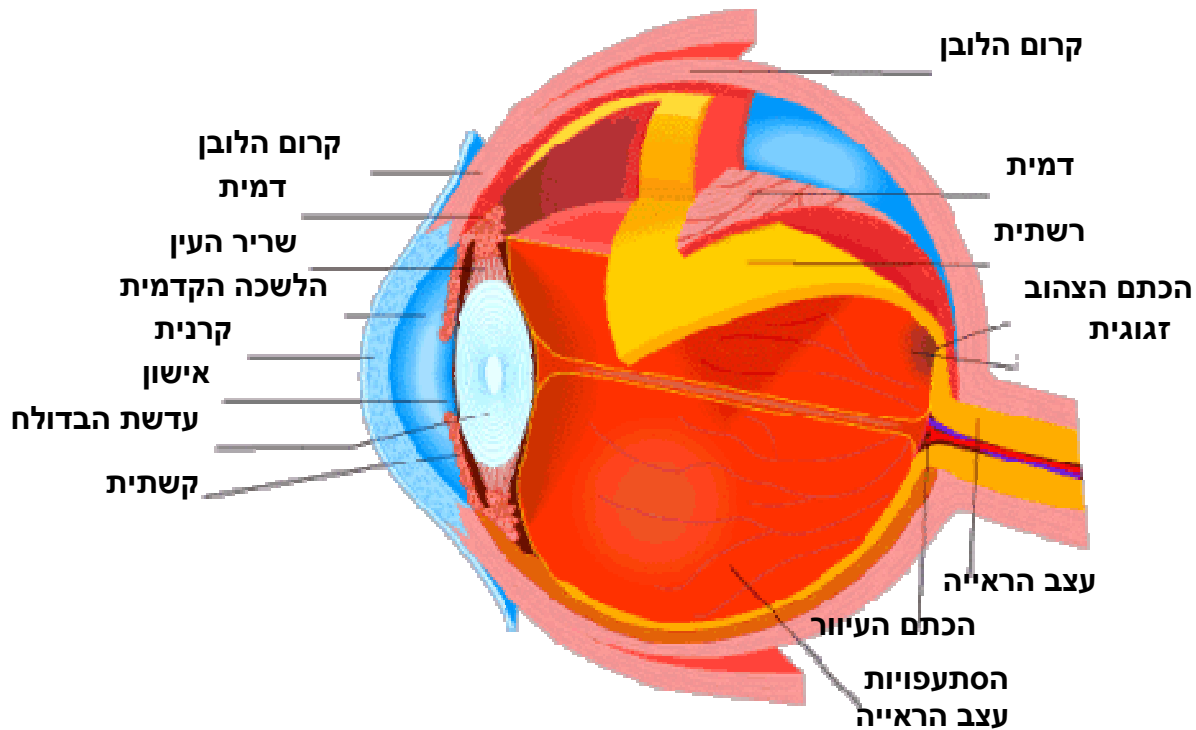
♣ לייזר המופעל במצב גל רציף (Continuous Wave -CW) המפיק אנרגיה במשך פרק זמן של 0.25 שניות או ארוך יותר (זמן זה נקבע על פי פרק הזמן שנמשך רפלקס סגירת אישון העין ("מיצמוץ") המהווה את מנגנון ההגנה הטבעי של האדם).

1.1 סיכונים לעיניים

הנזק העיקרי העלול להיגרם כתוצאה מפגיעת אלומת לייזר ברקמה ביולוגית הוא לעיניים (אפילו בהספק נמוך של לייזר!) ולכך מוקדש עיקר ההסבר שיובא כאן. לא תמיד מורגש הנזק על-ידי האדם לו נגרם הנזק. לעיתים הנזק הוא מזערי, ומצטבר על פני תקופה ארוכה. נזק מצטבר לעיניים יכול לגלות רופא עיניים בבדיקה עם אופטלמוסקופ. ואכן מומלץ לבצע פיקוח רפואי על בריאות העיניים לעובדים המשתמשים בלייזר ברמות סיכון 3 ו-4, כפי שמתואר בסעיף 3.4.2 בהמשך.

מבנה העין

העין היא האיבר הרגיש ביותר לאור ועל-כן היא פגיעה מאוד בחשיפה לאלומת לייזר בעלת צפיפות אנרגיה גבוהה ליחידת שטח. באיור הבא (עמוד 7) ניתן לראות את מבנה העין. חלק העין הנקרא רשתית (Retina) הוא האזור הפגיע במיוחד לקרינת לייזר ישירה. העין כולה פועלת כמערכת עדשות מרכזת המיועדת ליצור על הרשתית דמות ממשית של עצמים הנמצאים לפני העין. במעבר האור מהאוויר דרך הקרנית מתבצע רוב תהליך הריכוז של האור. ההבדל בין מקדם השבירה (Refraction Index) של העדשה והנוזל שבו היא שרויה הוא קטן, ולכן העדשה משנה רק מעט את כיוון האור הפוגע בה.



אור הפוגע בחפץ מסוים נבלע בחלקו ומוחזר בחלקו בהחזרה מפוזרת (דיפוזיבית) או מסודרת (סקולרית) (בהתאם לטיב המשטח). חלק האור שמוחזר לסביבה הוא בתחום אורכי גל (ספקטרום) מסוים. אור זה מגיע, בין השאר, אל **קרנית** העין. הקרנית מהווה עדשה בעלת עוצמה רבה, האור חודר דרכה ועובר שבירה אופטית (התכנסות) כתחנה ראשונה בדרך להתמקדותו על הרשתית. לאחר מכן עובר האור דרך **האישון**, שהוא למעשה פתח בקשתית העין. **האישון** מהווה צמצם המווסת את כמות האור הנכנסת, כך שלא נסתנוור אולם גם תהיה כמות מספקת של אור לראייה תקינה. קוטרו של האישון משתנה בהתאם לתנאי התאורה ע"י כיווץ שרירים בקשתית. האור ממשיך ופוגע **בעדשת העין**, שהיא עדשה ממקדת נוספת אשר עוצמתה ניתנת לשינוי בהתאם למרחק החפץ הנצפה. העדשה משנה קמירותה כך שהאור הפוגע בה יתמקד על רשתית העין. **הרשתית** מכילה את קולטני האור (פוטורצפטורים), שתפקידם המרת אנרגיית אור בתהליך כימי ותרגומם לאותות חשמליים המועברים דרך תאים עצביים ועצב הראייה אל המוח. הקולטנים נחלקים לשני סוגים:

קנים, שרגישים במיוחד לאור ולכן מותאמים לראייה בהארה נמוכה כגון בלילה, וכן **מדוכים**, שהם תאים מיוחדים הרגישים לצבע, ומרוכזים בחלק המרכזי של הרשתית. החלקים בעין האחראים להתאמת תפקוד העין לעוצמות אור שונות הוא האישון ושרירי הקשתית (הרדיאלי והטבעתי). קוטרו של האישון משתנה בהתאם למצבי התאורה, והוא קובע את כמות האור שנכנסת לעין ותגיע לרשתית.

כאשר התאורה בסביבה חזקה (למשל תאורת שמש ישירה), האישון יתכווץ ע"י כיווץ השריר הטבעתי של הקשתית. בחשיכה, האישון יתרחב כדי לאפשר לכמות גדולה יותר של אור לחדור לעין, ובכך לשפר את הראייה בתנאי תאורה גרועים. הרחבתו של האישון נעשית ע"י כיווץ השריר הרדיאלי של הקשתית. היחס בין עוצמת האור המכסימלית לעוצמת האור המינימלית הניתנת לראייה בעין האנושית הוא 10^{16} .

החלקים בעין האחראיים לראיית צבע הם המדוכים (הפוטו-רצפטורים הנמצאים ברשתית). הם אינם מפוזרים בצורה אחידה על הרשתית – הם מרוכזים בצפיפות במרכז העין, באזור המכונה הכתם הצהוב (Macula). בעיקר מרוכזים הם באזור קטנטן שגודלו כראש סיכה – פוביאה (Fovea), שהיא גומה במרכז המקולה.

ישנם שלושה סוגי מדוכים, הנבדלים זה מזה ברגישות לתחום אורכי הגל. כל סוג מדוכים רגיש לתחום מסוים, ובעיקר ל"נקודת השיא" של תחום זה. נהוג לכנות נקודות שיא אלו RGB, ראשי תיבות של אדום (Red), ירוק (Green) וכחול (Blue) שהם צבעי האור הראשוניים (עבור חיבור אורות).

שיא הרגישות	תחום אורכי גל [nm]	רגישות לתחום ספקטראלי
580	410-690	"אדום"
540	440-670	"ירוק"
440	400-540	"כחול"

ניתן לראות שקיימת חפיפה מסוימת בתחום אורכי הגל, במיוחד בין האדום לירוק, אולם "טווח השיא" (ולא הנקודה בלבד) שונה ביניהם. בנוסף, יש לכך יתרון ביולוגי בכך שגם אם המדוכים הירוקים נפגעים, עדיין קיים תפקוד של המדוכים האדומים המסוגלים לחוש בחלק מאורכי הגל המשותפים לאדום ולירוק.

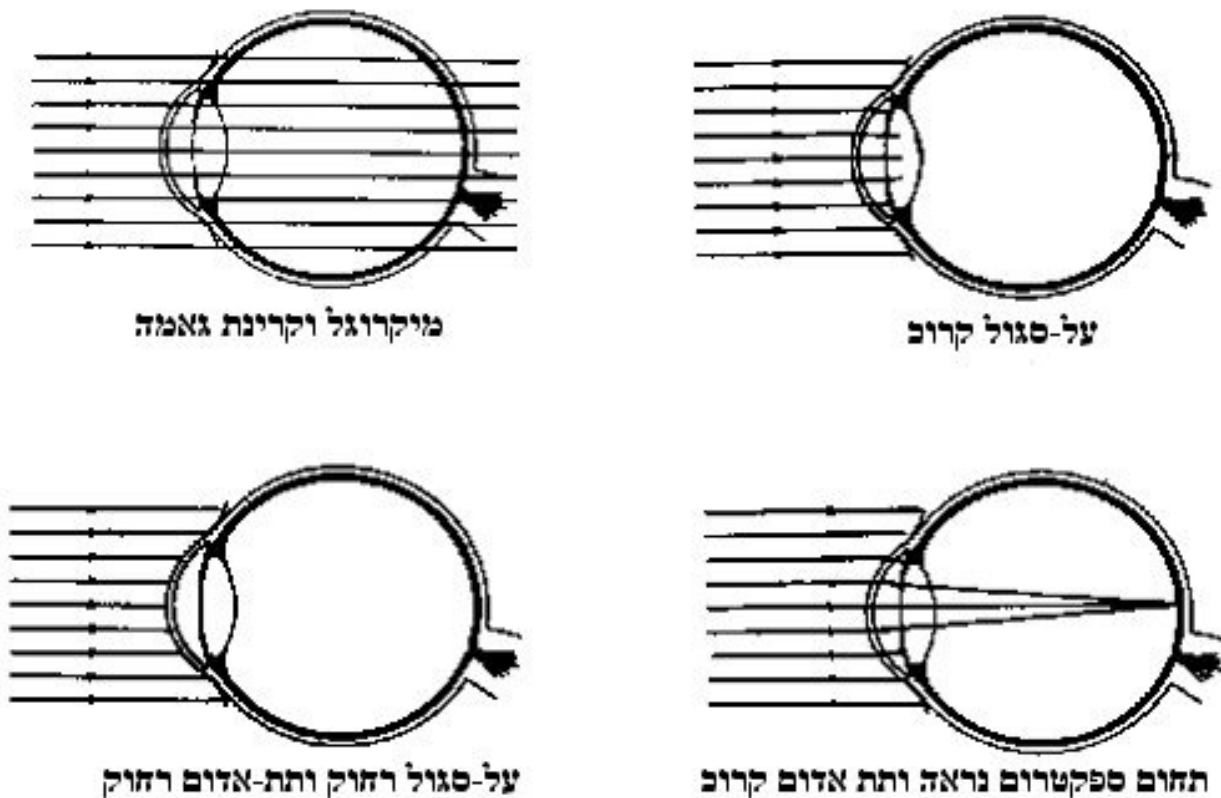
תחום אורכי הגל בספקטרום האלקטרומגנטי שהעין האנושית מזהה, הנקרא תחום הספקטרום הנראה (Visible Spectrum) הוא בין 400 ל-700 ננומטר.

השפעת קרינת לייזר על העין

עצמת ההקרנה של אלומת הלייזר חזקה במספר סדרי גודל מאשר זו של מקורות אור רגילים. עצמה חזקה של אנרגיה, הממוקדת ברשתית העין, במקרה של פגיעה בו, עולה במקרים מסוימים על זו של קרינת שמש ישירה. פגיעה מקרינה חזקה עלולה להסתיים בעיוורון חלקי או מלא, ולעיתים בלתי הפיך.

קרינת לייזר, המתאפיינת ביכולת שמירה על הספק גבוה לטווחים ארוכים בנוסף לאנרגית-הספק מוצא גבוהה, מובילה להעברת כמויות-יתר של אנרגיה לרקמות ביולוגיות.

באיור הבא מוצג תרשים סכימטי המתאר את מידת החדירה של קרינה אלקטרומגנטית בתחומי ספקטרום שונים לתוך אזורים שונים של העין.



תרשים מידת החדירה של קרינת לייזר בתחומים ספקטראליים שונים לתוך אזורים שונים של העין

פגיעת קרינת לייזר בעין

העין בנויה לקליטה של קרינת אור, ולכן היא שקופה בתחום הספקטרום הנראה וגם בתחום האינפרא-אדום הקרוב.

מבנה העין משמש מעין "מגבר אור" הממקד את הקרינה העוברת דרך אישון העין על הרישתית. "ההגברה" היא של צפיפות האנרגיה ליחידת שטח כתוצאה מתהליך מיקוד האור. ההגברה תלויה ביחס שבין גודל פתח האישון לבין גודל כתם האור הממוקד הנוצר על הרישתית.

העין ממקדת את הקרינה העוברת דרך אישון העין לכתם שקוטרו מסדר גודל של מיקרון, כתוצאה מכך יכולה צפיפות ההספק של הקרינה לגדול עד כדי פי מליון (10^6) !!! זאת מכיוון שהקטנת קוטר ממילימטרים למיקרונים, פירושה הקטנה של 3 סדרי גודל בקוטר, שהם 6 סדרי גודל בשטח החתך.

פגיעת קרינת לייזר בהספקים של מיליוואט בעין יכולה לגרום למיקוד צפיפות הספק לכדי מאות קילוואט למילימטר מרובע. כתוצאה מכך נשרפות נקודות על הרישתית, והתהליך יכול להסתיים בעיוורון!

למעשה, יש הטוענים כי קוטר הכתם הנוצר על הרישתית אינו של מספר מיקרוניס אלא של עשרות מיקרוניס, עקב רעידות העין בתדר 30-80 הרץ. למרות זאת, עדיין גם במקרה כזה מיקוד האור בעין הוא של מספר סדרי גודל והסכנה לפגיעה בעיניים גדולה!

אי לכך יש להקפיד על כללי הזהירות הבאים בעבודה עם לייזרים:

- להסביר למשתמשים את הסכנות של קרינת הלייזר!
- להימנע מהסתכלות ישירה אל תוך אלומת קרינת הלייזר!
- להרחיק חפצים מחזירי אור ממסלול אלומת הלייזר, כדי לא להטות את האלומה ממסלולה לכיוון בלתי רצוי. גם טבעת זהב הנמצאת על אצבע המשתמש, ומוכנסת בטעות במסלול אלומת הלייזר, עלולה להטותה לתוך העין (!).
- להשתמש בשילוט מתאים המתריע על הפעלת לייזר.
- להימנע לחלוטין מפתיחת המארז בו מצוי מכשיר הלייזר כאשר הוא מחובר למקור מתח.

1.2 סיכונים לעור

באופן כללי, בהשוואה לעין, העור עמיד במידה רבה יותר בפני חשיפה לקרינת הלייזר. האפקט הביולוגי של הקרנת עור בקרינת לייזר, הפועל בתחום הספקטרום של האור הנראה (400-700nm) והתת-אדום (מעל 700nm), יכול להשתנות, החל מאדמנת העור (אדמומיות קלה) ועד להתפתחות חמורה של שלפוחיות.

בעקבות חשיפת העור לקרינת לייזר בפולסים קצרים, המפיקים פרצי אנרגיה בעוצמה חזקה, יכולה להיגרם חריכת רקמות (מתקבל גוון דמוי-אפר ברקמה). חשיפה זו לא בהכרח גורמת לאדמנת.

נזק לאיברים שמתחת לעור עלול להיגרם כתוצאה מהקרנות בעוצמה גדולה ביותר.

אפקטים מתמשכים ומצטברים של קרינת לייזר אינם שכיחים. למרות זאת, יש מעט עדויות לכך שבתנאים מיוחדים עלולים אזורי קטנים של רקמות אדם להיעשות לרגישים כתוצאה מחשיפות מקומיות חוזרות ונשנית. כתוצאה מכך, רמת החשיפה המינימאלית הנדרשת ליצירת תגובה נעשית פחותה יותר, והתגובות נעשות חמורות יותר ברמת חשיפה נמוכה זאת.

חשיפה מותרת מקסימאלית (MPE = Maximum Permissible Exposure)

ערכי MPE הם עבור המשתמש, והם פחות מהסף הגורם לנזק (כפי שידוע ממחקרים אחרונים בנושא).

ערכי MPE משמשים כערך לבקרת חשיפה מותרת למשתמש, ואינם מגדירים גבול מוחלט בין בטוח למסוכן. בכל מקרה, רצוי שהחשיפה לקרינת לייזר תהייה נמוכה ככול הניתן. כאשר מספר אורכי גל של קרינות לייזר מוקרנות על רקמה ביולוגית, יש להתייחס אל ההשפעות שלהן כמתווספות אחת לשנייה. בטבלה 1 מופיעות דוגמאות לחיבור האפקטים.

טבלה 1

השפעה כוללת (חיבור השפעות) של קרינת אור במספר תחומים ספקטראליים על העין ועל העור

IR-B ו- IR-C 1400 – 10 ⁶ [nm]	Visible ו- IR-A 400 – 1400 [nm]	UV-A 315 – 400 [nm]	UV-C ו- UV-B 180 – 315 [nm]	תחום ספקטראלי המוגדר לפי CIE *
			עין עור	UV-C ו- UV-B 180 – 315 [nm]
עין עור	עור	עין עור		UV-A 315 – 400 [nm]
עור	עין עור	עין** עור		Visible ו- IR-A 400 – 1400 [nm]
עין עור	עור	עין עור		IR-B ו- IR-C 1400 – 10 ⁶ [nm]

מקור: טבלה 5 עמוד 49 בתקן הישראלי מתוך: IEC 600825-1 Edition 1.2.

* הגדרת גבולות תחומים ספקטראליים לפי תקן -

Photobiological Safety of Lamp Systems - CIE - S 009/E ** שפורסם על ידי הוועדה הבין-לאומית למאור

(CIE – International Commission of Illumination).

תקן זה המתייחס למנורות ומקורות אור תקינים בתחום ספקטראלי רחב. מוגדרות בו קבוצות בטיחות (קבוצות רמת הסיכון) שמתבססות על זמן החשיפה הבטוח של העור והעיניים. בהתאם לקבוצת רמת הסיכון ניתן לקבוע מהו התחום הספקטראלי המתאים לחשיפה בטוחה לעור ולעיניים.

** כאשר הערכת AEL ו-MPE נעשית על בסיס של חשיפה של שניה אחת או זמן ארוך יותר, יש לעשות הערכה נפרדת עבור אפקטים פוטוכימיים (400nm-600nm), ואפקטים תרמיים (400nm-1400nm) ולהשתמש בערך המגביל ביותר.

סיכום ההשפעות הפתולוגיות הקשורות בחשיפת יתר לאור מתואר בטבלה 2.

טבלה 2

השפעות פתולוגיות המיוחסות לחשיפת-יתר לקרינת אור בתחומים ספקטראליים שונים

עור	עין	תחום ספקטראלי המוגדר לפי * CIE
אדמנת (אריתמה) = (Erythema) עד להתפתחות כווית שמש תהליך הזדקנות מואצת של עור פיגמנטציית יתר (מוגדלת)	דלקת קרנית הנגרמת ע"י קרינה על-סגולה (פוטוקרטיטיס = Photokeratitis)	180 – 280 [nm] UV-C
		280 – 315 [nm] UV-B
הכהית צבען (פיגמנט) תגובות רגישות יתר כוויות עור	ירוד פוטוכימי (photochemical Cataract)	315 – 400 [nm] UV-A
	פגיעה פוטו-כימית ופגיעה תרמית ברשתית	400 - 780 [nm] VIS
כוויות עור	ירוד (Cataract), כוויה ברשתית	780 – 1400 [nm] IR-A
כוויות עור	הצטברות חלקיקים צפים בנוזל בלשכה הקדמית של העין (Aqueous flare), ירוד (Cataract), כוויה בקרנית	1.4 - 3.0 [μm] IR-B
כוויות עור	פגיעה בקרנית בלבד	3.0 [μm] - 10.0 [mm] IR-C

מקור: תקן IEC 600825-1 Edition 1.2 טבלה B.1 עמוד 98.
גבולות התחומים הספקטראליים, כפי שמוגדרים ע"י הועדה הבינלאומית למאור (CIE), ניתנים לשימוש מוגבל לתיאור השפעות ביולוגיות גבוליות. הגבולות הספקטראליים שמופיעים בטבלה 2 לעיל לא בהכרח תואמים בצורה מושלמת את אלה שקיימים בטבלאות עבור חשיפה מרבית מותרת (MPE).

1.3 חלוקת הלייזרים לקבוצות לפי מידת הסיכון הכרוכה בשימוש בהם

קיים תקן ישראלי (ת"י 60825 חלק 1) משנת 2006, המבוסס על תקן אירופאי IEC 60825-1 מהדורה 1.2. תקן זה מחלק את הלייזרים הקיימים לקבוצות לפי מידת הסיכון הכרוכה בשימוש בהם. החלוקה היא ל-4 קבוצות עיקריות:

1. קבוצה 1 (Class I)
2. קבוצה 2 (Class II)
3. קבוצה 3 (Class III)
4. קבוצה 4 (Class IV)

חלק מקבוצות אלו מתחלקות לקבוצות משנה על פי הפירוט הבא:

1. קבוצה 1 (Class I)

כוללת את כל הלייזרים אשר בתנאי עבודה רגילים אינם יכולים לגרום לפליטת קרינה המסוגלת לגרום נזק. למעשה מוגדרת קבוצה זו על-ידי השם הכולל:

לייזרים בטוחים לעין ("Eye-safe lasers").

לייזר מסוג זה לא יגרום כל נזק לאדם המסתכל ישירות לתוך אלומת קרינת הלייזר במשך 8 שעות רצופות (יותר מ- 10^4 שניות), זאת ללא תלות באורך הגל הנפלט מהלייזר. מותר להתבונן לתוך אלומת הקרינה מלייזר מסוג 1 גם באמצעות מכשור אופטי. לדוגמא: עבור תחום הספקטרום האדום רמת ההספק המותר עבור קבוצה זו היא כ- 0.4 מיליוואט, ואילו עבור הספקטרום הכחול היא 40 מיקרוואט. לייזרים הנכללים בקבוצה זו נמצאים מתחת לרמה המירבית המותרת לחשיפה (Threshold Limit Value), שהיא הרמה של גורם הסיכון שעד אליה ותחת תנאי יכולים כל העובדים להיחשף יום אחר יום לאורך כל תקופת העבודה, ללא התפתחות השפעות בריאותיות מזיקות.

בתיקון לתקן האירופאי משנת 2001 הוכנסו גם לייזרים בהספק כלשהו הסגורים בתוך מבנה מגן, ואין קרינת לייזר יכולה להיפלט מהם אפילו במקרה של תקלה, לקבוצה 1. קבוצה 1M כוללת בתוכה לייזרים הפולטים קרינה בתחום אורכי הגל מ- 302.5 [nm] ועד 4000 [nm], ואשר בתנאי עבודה רגילים אינם יכולים לגרום לפליטת קרינה המסוגלת לגרום נזק, אך יכולים להיות מסוכנים כאשר משתמשים ברכיבים אופטיים נוספים במסלול אלומת הקרינה.

2. קבוצה 2 (Class II)

כוללת את כל הלייזרים הפולטים קרינה בתחום הנראה (אורכי גל בתחום: 0.4-0.7 מיקרון או 400-700 ננומטר). כאשר זמן החשיפה של העין לקרינה קטן מ- 0.25 שניות אין הם מסוכנים יותר מהלייזרים של קבוצה 1. פרק זמן זה (0.25 שנייה) הוא זמן ממוצע של רפלקס סגירת אישון העין באדם ממוצע (מצמוץ העיניים).

לדוגמה: ההספק המכסימלי של לייזר הליום-נאון רציף המותר בקבוצה זו הוא 1 מיליוואט.

כל לייזר שקרינתו אינה בתחום הספקטרום הנראה (אינו מפעיל את רפלקס סגירת האישון), ופולט מעל הרמה המסווגת בקבוצה 1, נכלל אוטומטית בקבוצה 3. קבוצה 2M כוללת את כל הלייזרים הפולטים קרינה בתחום הנראה (אורכי גל בתחום: 0.4-0.7 מיקרון או 400-700 ננומטר). כאשר זמן החשיפה של העין לקרינה קטן מ- 0.25 שניות אין הם מסוכנים יותר מהלייזרים של קבוצה 1. בתנאי עבודה רגילים לייזרים מקבוצה זו אינם יכולים לגרום לפליטת קרינה המסוגלת לגרום נזק, אך יכולים להיות מסוכנים כאשר משתמשים ברכיבים אופטיים נוספים במסלול אלומת הקרינה.

3. קבוצה 3 (Class III) - מחולקת לשתי תת-קבוצות:

קבוצה 3R - כוללת בתוכה לייזרים הפולטים קרינה בתחום אורכי הגל מ- [nm] 302.5 ועד [nm] 10^6 , ואשר צפייה ישירה באלומת הקרינה יכולה להוות סיכון. גבול הפליטה הנגישה (AEL) הוא פי 5 מגבול הפליטה הנגישה של לייזרים מקבוצה 2 בתחום הספקטרום הנראה (אורכי גל בתחום: 0.4-0.7 מיקרון או 400-700 ננומטר) ופי 5 מגבול הפליטה הנגישה עבור קבוצה 1 לשאר תחומי הספקטרום.

לייזרים מקבוצה זו מסוכנים בשימוש שלא על פי ההוראות, בעיקר על ידי משתמש בלתי מקצועי.

בתחום הספקטרום הנראה ההספק המותר בקבוצה זו הוא עד 5 מיליוואט.

קבוצה 3B - בקבוצה זו נכללים כל הלייזרים הפולטים קרינה באורך גל כלשהו המסוגלת לגרום נזק לעין של צופה אשר אינו מצויד באמצעי ראייה נוספים. צפייה בקרינה המוחזרת באופן מפוזר (דיפוזיבי) היא בדרך כלל בטוחה. יכול להיגרם גם נזק מועט לעור עבור הספקים בקרבת הגבול העליון.

ההספק המכסימלי של לייזרים מקבוצה זו הוא 0.5 וואט.

חובת שימוש במשקפי מגן בעת העבודה עם לייזרים מקבוצה זו!

4. קבוצה 4 (Class IV)

בקבוצה זו נכללים כל יתר הלייזרים הפולטים קרינה אלקטרומגנטית העלולה לפגוע בעיניים לא רק על-ידי פגיעה ישירה, או בהחזרה מסודרת, אלא גם במקרים של החזרה מפוזרת (דיפוזיבית).

כמו כן נכללים בקבוצה זו לייזרים העלולים לגרום נזק לא רק לעיניים אלא גם לעור, וכן לייזרים שקרינתם עלולה לגרום להצתה (שריפה). כל לייזר שהספקו מעל [W] 0.5 נכלל הקבוצה זו.

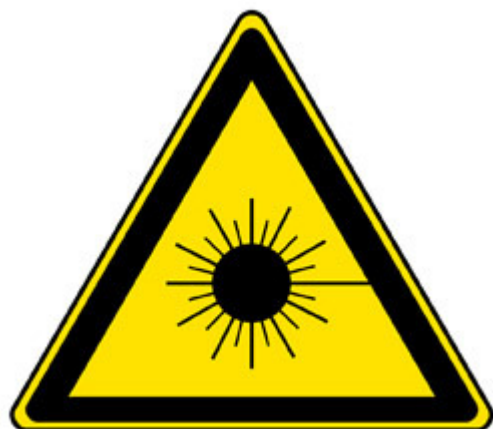
הערות כלליות:

חלוקה זו מבוססת על מקסימום הקרינה הנפלטת מהלייזר ועלולה לגרום לפגיעה ולנזק. לשם כך מגדירים את המיפתח דרכו נקלטת הקרינה. עבור קרינה בתחום הספקטרום הנראה ובתחום הספקטרום האינפרא-אדום הקרוב מיפתח זה מוגדר כ- 7 מילימטר (קוטר מכסימלי של אישון העין אצל צעיר).

עבור לייזרים שקרינתם בתחום האולטרא-סגול או האינפרא-אדום הרחוק, המיפתח מוגדר כ- 1 מילימטר.

כאשר משתמשים במערכת אופטית כגון משקפת, המיפתח מוגדר כ- 50 מילימטר.

דוגמאות (באנגלית) לשילוט על פי התקן הישראלי (המאומץ מתוך התקן האירופאי) – כיתוב שחור על רקע צהוב, משולש מסמן אזהרה:



התקן הישראלי מחייב כיתוב גם בעברית בהתאם למופיע בתקן הישראלי- ת"י 60825 חלק 1 (בהקדמה לתקן, עמודים 3-6).
דוגמאות לשילוט בעברית:



2. אילו סיכונים קשורים למכשיר הלייזר והפעלתו?

2.1 זיהום אטמוספירה

- א. נדפי חומר מעובד ותוצרי התגובה, הנוצרים בפעולות חיתוך, קידוח וריתוך: חומרים אלה עשויים לכלול אסבסט, פחמן חד-חמצני (CO), פחמן דו-חמצני (CO₂), אוזון, עופרת, כספית, מתכות אחרות וחומרים ביולוגיים.
- ב. גזים ממערכות זרימת הגז של לייזר או מתוצרי-לוואי של תגובות לייזר, כמו ברום, כלור ומימן ציאנידי;
- ג. גזים או אדים של נוזלי קירור;
- ד. גזים כמו חמצן, המיועדים לסיוע בפעולת גומלין לייזר-מטרה;
- ה. יש לנקוט באמצעים הדרושים למזעור ככל שניתן של הסיכונים המפורטים לעיל, כך שחשיפת עובד הלייזר לגורמים מזיקים לא תהיה מעל זו המותרת לפי המלצות ה- (TLV - TWA) שהתקבלו כמחייבות בתחיקה הישראלית.

2.2 קרינת לוואי (collateral radiation)

בנוסף לקרינת לייזר הנוצרת במהוד האופטי, יש לעיתים בלייזרים מסוימים פליטת קרינה בתדרים השונים מתדירות הלייזר. לדוגמה:

א. קרינה בתחום ספקטרום העל-סגול

קרינה בתחום ספקטראלי זה, מקורה במנורות-הבזק ושפופרות פריקה של לייזר רציף (CW), במיוחד כאשר משתמשים בצנרת או מראות להעברה של אלומות קרינת העל-סגול (כמו קוורץ).

ב. קרינת בתחום ספקטרום האור נראה והתת-אדום

קרינה בתחומים ספקטראליים אלה, הנפלטת ממנורות הבזק, וקרינה המוחזרת ממטרה (מהחלק המעובד) עלולה להגיע לרמה גבוהה למדי ולהוות סיכון פוטנציאלי.

ג. קרינה בלתי מייננת בתדרי רדיו (RF-Radio Frequency) או גלי מיקרו

(Microwave - MW) וקרינה מייננת - קרינת רנטגן (X-Ray).

קרינה זו קשורה להפעלת לייזרים מסוימים, כמו לייזר אקסימר^(*) בו משתמשים בשפופרות פריקת גז אלקטרוניות (gas electron tubes). שפופרות אלה פועלות במתח גבוה בין האלקטרודות שלהן. המתח בין האנודה לקתודה בשפופרת יכול להיות מעל 5 קילו-וולט והפעלתו יכולה לגרום לתופעות הבאות: יצירת פלסמה (מצב צבירה מיונן של גז), פליטת קרינה בלתי מייננת בתדרים של רדיו (RF) או גלי מיקרו (MW), פליטת קרינת רנטגן (קרני X) שהיא קרינה מייננת.

* **לייזר אקסימר** (Excimer laser) (Exited Dimmer) לייזר שמשמש כתווך פעיל בתרכובת שבין גז אציל לבין הלוגן (noble-gas halide) ליצירת קרינה בתחום ספקטראלי על-סגול

2.3 סיכוני חשמל

קיימים לייזרים שמתח הפעלתם הוא מתח גבוה (מעל 1,000 וולט שהם 1 קילו-וולט). מסוכן במיוחד הוא לייזר פולסים בשל אנרגיה גבוהה הנאגרת ברשת קבלים (capacitor bank) ויכולה לגרום נזק באם אין הם מוגנים היטב. שפופרות אלקטרוניות הפועלות במתח אנודה הגדול מ-5 קילו-ואט עלולות לפלוט קרינת רנטגן.

2.4 נוזלי קירור

נוזלי קירור שמשמשים בהם בלייזרים רבי עוצמה עלולים לגרום לכוויות ונדרשים אמצעי זהירות מיוחדים בטיפול בהם. חלק מנוזלי הקירור עלולים לכלול חומרים מסוכנים נוספים. יש לפעול בעבודה עם חומר מסוכן לפי הנחיות גיליון הבטיחות (SDS) של היצרן, כנדרש בתקנות.

2.5 עיבוד חומרים

אפיונם של מוצרי לייזר הנועדים לעיבוד חומרים יכול להשתנות בהתאם לייעד. אם החומר המעובד שונה מזה שמומלץ ע"י היצרן, המשתמש חייב להיות מודע בדבר דרגת הסיכון השונה והסיכונים הקשורים בכך, כגון פליטת אדים רעילים, אש או החזרת קרינת הלייזר מהשטח המעובד, ולנקוט אמצעים הדרושים למניעתם בהתאם.

2.6 סיכונים נוספים

בנוסף לקרינת האור הנפלטת מהלייזר, קיימים סיכונים פוטנציאליים נוספים בלייזרים מיוחדים. סיכונים אלו עלולים להיגרם כתוצאה מ:

- ♣ מתח גבוה העלול לגרום לחישמול, לשריפה, או לפיצוץ קבל.
- ♣ רסיסים או גזים הנפלטים מאזור המטרה המוקרנת באלומת הלייזר, בתהליכי חיתוך, קידוח וריתוך לייזר.

♣ תגובות פיצוץ של חומרים מגיבים, בלייזר כימי ובגזים שמשמשים בהם בתוך מעבדה.

2.7 סיכוני אש

סיכוני אש קיימים בשימוש בלייזרים מסוכנים (ברמת הסיכון 3B ו-4). יש לנקוט באמצעים למניעת אש והתקנת ציוד כיבוי כנדרש. קיים תקן אמריקני הדן בנושא זה:

NFPA 115 Standard for Laser Fire Protection 2003 Edition

מסמך זה כולל:

- דרישות מינימום להגנה בפני אש (Fire Protection) עבור תכנון, ייצור, התקנה ושימוש בלייזרים והציוד הנלווה;
- קריטריונים להדרכה ותגובות במצבי חירום בעת דליקה בה מעורבים לייזרים.

מטרת המסמך להציב דרישות הנוגעות למנוע ולהפחית השפעות של דליקות בהן מעורבים לייזרים.

המסמך ישים עבור לייזרים שיכולים לגרום לסיכוני הצתה מאלומת לייזר (לייזרים מסוכנים המסווגים ברמת הסיכון 3B ו-4), עבור לייזרים שמשמשים בחומרים וברכיבים המהווים סיכון אש.

3. תקנים וחקיקה

3.1 תקנים

בארה"ב ובאירופה נקבעו תקנים מחמירים לגבי בטיחות השימוש בלייזרים.

בישראל פורסם בשנת 2006 תקן - ת"י 60825 חלק 1.

תקן זה זהה לתקן הנציבות הבין-לאומית לאלקטרוטכניקה -

IEC 60825-1 Edition 1.2

Safety of laser products

Part 1: Equipment' classification' requirements and user's guide

למעט השינויים והתוספות המצוינים בו.

התקן דן באמצעי הבטיחות של מוצרי לייזר וכולל 3 חלקים כאשר חלק 2 מתייחס לדרישות לייצור (manufacturing requirements) וחלק 3 הוא מדריך למשתמש (User's Guide). הנספחים שהוכללו בחלק 3 של תקן זה מיועדים למטרת הדרכה כללית. בכל מקרה יש לעיין בסעיפים המתאימים בחלקים 1 עד 3 של התקן. לצורך הערכת הסיכונים הנובעים מקרינת הלייזר, חולקו הלייזרים לקבוצות לפי אורכי הגל הנפלטים מהם, ולפי אפיוני הקרינה הנפלטת: הספק הקרינה, משך פולס, וכו' (ראה סעיף 1.3).

תקני בטיחות טבעם שהם מתעדכנים מידי פעם בהתאם למחקרים ולתגליות בתחום הלייזרים, ובהתאם לידע הנלמד על האינטראקציה (פעולת גומלין) של קרינת הלייזר עם הרקמה הביולוגית.

מכיוון שהשימוש בלייזרים מתרחב ליישומים שונים ומגוונים, חיוני שלכל מי שמשתמש בלייזר תהיה מודעות לסיכונים הקשורים בשימוש במכשיר הלייזר.

המודעות לסיכונים הקשורים בקרינת הלייזר והכרתם וכן הבנת מערכת הלייזר והתנאים להפעלתה, הם האמצעים המשמעותיים ביותר למניעת תאונות העלולות להיגרם מהשימוש בלייזרים.

לפני תחילת העבודה עם לייזרים יש להקפיד על:

- א. שילוט מתאים (בהתאם לסעיף 5 בתקן);
- ב. הדרכת כל המצויים באזור בו מתפשטת קרינת הלייזר לגבי אמצעי הזהירות שעליהם לנקוט בעת שהלייזר מופעל.

תקנים נוספים

בהקדמה לתקן ישראלי מובא פירוט השינויים והתוספות לסעיפי התקן הבין-לאומי: IEC 60825-1 Edition 1.2. בטבלה המפרטת השינויים והתוספות מופיעים תקנים ישראליים הבאים:

- ת"י 1011 חלק 2.22 ציוד חשמלי לשימוש רפואי: דרישות מיוחדות לבטיחות ציוד לייזר לאבחנה ולריפוי
- ת"י 6110 חלק 1 דרישות בטיחות לציוד חשמלי המיועד למדידה, לבקרה ולשימוש מעבדתי: דרישות כלליות.

כמו כן, קיים תקן ישראלי:

- ת"י 4368 בטיחות מכונות - מכונות לייצור בלייזר - דרישות בטיחות כלליות
תקן ישראלי זה הוא התקן של הארגון הבין-לאומי לתקינה ISO 11553-1 * (מהדורה ראשונה) מפברואר 2005 שאושר כלשונו בשפתו האנגלית בלבד כתקן ישראלי.

***ISO 11553-1: 2005 SAFETY OF MACHINERY - LASER PROCESSING MACHINES - Part 1: GENERAL SAFETY REQUIREMENTS**

תקן בין-לאומי זה מגדיר סכנות הנובעות משימוש במכונות המיועדות לייצור בלייזר, ומגדיר דרישות בטיחות הקשורות בתהליך הקרינה ובסכנות הנגרמות על ידי חומרים. תקן זה מפרט גם את המידע שעל יצרן המכונה לספק. התקן אינו חל על מוצרי לייזר או על ציוד המכילים מוצרים המיועדים אך ורק למטרות אלה: -דפוס (ליתוגרפיה) צילום; -דפוס (ליתוגרפיה) סטריאו; -הולוגרפיה; -שימוש רפואי; -אחסון מידע.

3.2 חקיקה

בנושא בטיחות בעבודה עם לייזר קיימות תקנות הבטיחות בעבודה (גיהות תעסוקתית ובטיחות העוסקים בקרינת לייזר), התשס"ה-2005. התקנות האלה מתייחסות לנושאים הבאים:

1. הגדרות מונחים הקשורים לבטיחות בעבודה עם לייזרים;
2. הגבלות חשיפה תעסוקתית לקרינת לייזר;
3. שימוש במוצר לייזר מסוכן;
4. חובותיו של המעביד;
5. חובותיו של עובד בסיכוני לייזר;
6. תנאים לאישור ממונה על בטיחות לייזר;

7. תפקידיו וסמכויותיו של ממונה על בטיחות לייזר ;

8. תנאים לאישור בודק מאושר ;

9. תנאים לאישור מעבדה מאושרת ;

10. חובות מעבדה מאושרת ;

11. תנאים לאישור מכון הדרכה ;

12. מעבדה מאושרת בגוף מחקר ופיתוח ;

13. תחולה על גופי ביטחון ;

14. עונשין ;

15. תחילה ;

16. הוראות מעבר.

להלן פירוט של מספר נושאים מהתקנות :

א. הגדרות :

✓ **"מוצר לייזר"** - התקן, מכשיר או מכונה הפולטים קרינת לייזר, לרבות התקן, מכשיר או מכונה פולטי קרינת לייזר כאמור שאינם מוצרים מוגמרים ;

✓ **"מוצר לייזר מסוכן"** - מוצר לייזר המסווג ברמת סיכון 3R, הפולט קרינת לייזר שאינה בתחום האור הנראה, או מוצר לייזר המסווג ברמת סיכון 3B או 4 ;

✓ **"חשיפה מרבית מותרת"** - (MPE - Maximum Permissible Exposure) - הרמה המרבית של קרינת לייזר שאדם יכול להיחשף לה, בתנאים רגילים, בלי להינזק בעיניו או בעורו, נזק מיידי או נזק מאוחר, כקבוע בתקן ;

✓ **"גבול הפליטה הנגישה"** (AEL = Accessible Emission Limit) - רמת הפליטה המרבית של קרינה המותרת ממוצר לייזר על פי סיווג רמת הסיכון שלו, כמפורט בתוספת השניה ;

✓ **"חשיפה תעסוקתית"** - חשיפת גופו של אדם לקרינת לייזר עקב עבודה, הכשרה מקצועית, לימודים או מחקר ;

✓ **"תקן"** - תקן ישראלי, ת"י 1249 חלק 1 מוצרי לייזר : בטיחות מוצרים, מיון ציוד, דרישות וגיליון הדרכה, כמשמעותו בחוק התקנים, התשי"ג-1953.

תקן- ת"י 60825 חלק 1, מתאריך 06/07/2006 (בא במקום ת"י 1249 חלק 1) זהה לתקן של הנציבות הבין-לאומית לאלקטרוטכניקה IEC 60825-1 (מהדרה 1.2) למעט השינויים והתוספות המצוינים בו.
הערות:

♣ חישוב ערכי ה-MPE מוסבר ומודגם, בליווי מספר דוגמאות עבור לייזרים מסוגים שונים, בנספח (Annex A) לחלק 3- הוראות שימוש (User's Guide) של תקן IEC 60825-1 Edition 1.2.

♣ דוגמאות של חישוב ערכי החשיפה המרבית המותרת (MPE), טווחי הסיכון, ומרחקי קרינה מסוכנים לעבודה עם מוצרי לייזר לסוגיהם השונים מובאים בנספח א' לדף תפוצה - ת-98 של מרכז המידע של המוסד לבטיחות וגיהות.

ב. סיווג רמות הסיכון של מוצרי לייזר

מטרת הסיווג של מוצרי לייזר על פי רמת סיכונם היא כדי להתאים עבור כל מכשיר לייזר את אמצעי הבטיחות הדרושים להפעלתו הבטוחה. לפי תוספת שנייה לתקנות הבטיחות בעבודה (גיהות תעסוקתית ובטיחות העוסקים בקרינת לייזר), התשס"ה-2005, מסווגים מוצרי הלייזר לארבע רמות סיכון שלגבי כל אחת ואחת מהן נקבע גבול הפליטה הנגישה (AEL - Accessible Emission Limit). טבלה 3 מציגה את רמות הסיכון של מוצרי לייזרים לפי התוספת השניה לתקנות בנושא עבודה עם לייזר, שהוזכרו לעיל.

טבלה 3: סיווג רמות הסיכון של מוצרי לייזר (ראה פירוט בתקן, סעיף 9.3)

(לפי התוספת השנייה (תקנות 1 ו-13))

רמת הסיכון	תיאור הסיכון
רמת סיכון 1 (class 1)	מוצר לייזר שרמת קרינתו אינה מסוכנת דרך כלל;
רמת סיכון 1M (class 1M)	מוצר לייזר שרמת קרינתו אינה מסוכנת מוצר זה עלול להיות מסוכן לעין כאשר צופים על אלומת הלייזר בעזרת מערכת אופטית מרכזת.
רמת סיכון 2 (class 2)	מוצר לייזר הפולט בתחום האור הנראה (400-700 nm) אשר רמת קרינתו מסוכנת את העין רק אם החשיפה נמשכת יותר מ-0.25 שניות (זמן התגובה הארוך ביותר לרפלקס המצמוץ).
רמת סיכון 2M (class 2M)	מוצר לייזר אשר רמת קרינתו אינה מסוכנת לעין כאשר החשיפה נמשכת פחות מ-0.25 שניות (זמן התגובה הארוך ביותר לרפלקס המצמוץ); מוצר זה עלול להיות מסוכן לעין כאשר צופים על אלומה באמצעות מערכת אופטית מרכזת.
רמת סיכון 3R (class 3R)	מוצר לייזר שפגיעת קרינתו באלומה ישירה עלולה להיות מסוכנת לעין. גבול הפליטה הנגישה לרמת סיכון זו הוא עד חמש פעמים רמת סיכון 2, בתחום האור הנראה ועד חמש פעמים רמת סיכון 1, בשאר התחומים.
רמת סיכון 3B (class 3B)	מוצר לייזר שפגיעת קרינתו באלומה ישירה מסוכנת לעין בכל זמן חשיפה שהוא, אך בדרך כלל אינה מסוכנת לעור.
רמת סיכון 4 (class 4)	מוצר לייזר שפגיעתו בעין ובעור מסוכנת הן באלומה ישירה והן באלומה מוחזרת ומפוזרת; אלומתו של מוצר זה עלולה להצית חומרים דליקים

שטף קרינה מרבי (המבוטא ביחידות וואט/מ"ר) של אלומת הלייזר הנגישה או תפוקת יציאה מרבית של לייזרים ברמות הסיכון המוצגות בטבלה זו:

- רמת הסיכון 1 – לא עוברת ערך ה-MPE.
- רמת הסיכון 2 – מוגבלת ב-1 מיליוואט.
- רמת הסיכון 3B - מוגבלת ב-500 מיליוואט (פ-5 מתפוקת יציאה של לייזר ברמת הסיכון 1).
- רמת הסיכון 4 - גדולה מ-500 מיליוואט.

ג. **בדיקות סביבתיות-תעסוקתיות במקום העבודה עם מוצרי לייזר חייבות להתבצע ע"י בודק מאושר או מעבדה מאושרת.** פעולות מורשות לבודק מאושר ולמעבדה מאושרת מפורטות בתוספת הראשונה לתקנות.

ד. **ממונה בטיחות לייזר**

לפי תקנות אלו, יש למנות ממונה על בטיחות לייזר במקום עבודה שמשתמשים בו בלייזר מסוכן, ברמת הסיכון 3B או 4. על ממונה בטיחות על לייזרים להיות מאושר על ידי מפקח עבודה אזורי. להלן תנאים לאישורו של הממונה, כמפורטים בתקנה 6:

- "הוא בעל תואר מוכר בתחומים המפורטים בתקנות;
- בוגר קורס ממונים על בטיחות לייזר בהדרכת מכון הדרכה מאושר ע"י מפקח עבודה ראשי;
- בעל ניסיון בעבודה עם מערכת לייזר ברמת הסיכון 3B או 4 שנה לפחות."
- לפי תקנה 7, מתפקידו של הממונה על בטיחות לייזר לייעץ למעביד בכל הנושאים הקשורים לבטיחות הפעלת הלייזר ולבצע את הפעולות המפורטות חלקית, כלהלן:
- "לבדוק כי מתקיימות הוראות המעבדה המאושרת והוראות בטיחות אחרות לפני הפעלה ראשונה של מוצר לייזר חדש ולאחר כל שינוי מהותי שבוצע בו.
- להכין תוכנית בטיחות לפני תחילת השימוש במוצר לייזר מסוכן.
- לבדוק באופן שוטף תנאי הבטיחות במקום.
- להבטיח קיום הוראות הפעלה, כונון, כיול ותחזוקה של מוצרי לייזר מסוכנים.
- לחקור את סיבותיהן ונסיבותיהן של מחלות מקצוע ושל תאונות עבודה הנובעות משימוש במוצרי לייזר מסוכנים".

ה. **הדרכת עובדים**

עבודה עם מוצרי לייזר דורשת מיומנות.

על פי תקנות הבטיחות בעבודה (גיהות תעסוקתית ובטיחות העוסקים בקרינת לייזר), התשס"ה-2005, תקנה 4(א)(3):

"4 (א) בכל מקום עבודה שבו מפעילים מוצר לייזר מסוכן, משתמשים בו, או מייצרים אותו, ינקוט המעביד אמצעים אלו:

(3) ידריך ויאמן, בכתב ובעל-פה, גם בהתאם לתכנית להדרכת עובדים בנושאי הגנה מפני סיכוני לייזר, באמצעות הממונה על בטיחות לייזר או מכון מאושר ("על ידי מפקח עבודה ראשי לבצע הכשרה והדרכה לפי תקנה 11"), כל עובד חדש, מיד עם קבלתו לעבודה, וכל עובד אחר, באופן שוטף וקבוע, אחת לשנה לפחות, על פי צורכי הבטיחות המתאימים למקום העבודה; המעביד ינקוט אמצעים באמור בתקנות ארגון הפיקוח על העבודה (מסירת מידע והדרכת עובדים), התשנ"ט-1999, (להלן - תקנות מסירת מידע), כדי לוודא שההדרכה שניתנה לעובדים הובנה על ידם כראוי, וכי הם פועלים על פיה".

הדרכת מפעילי לייזרים מסוכנים (רמות הסיכון 3B ו-4) תכלול הנושאים הבאים :

- הכרת תהליכי תפעול הלייזר ;
 - הכרת הסיכונים הנובעים מתפעול הלייזר ;
 - אפקטים ביולוגיים בעיניים ובעור מאלומת לייזר ;
 - הכרת אמצעים ומנגנונים של בטיחות המכשיר, סימני אזהרה וכו'
 - שימוש בציוד מיגון אש ;
 - דיווח על תאונות.
- מכון הדרכה מאושר** רשאי לקבל אישור להכשיר עובדי קרינת לייזר, ממונים על בטיחות קרינת לייזר או בודקים מאושרים.

בנוסף לתקנות הבטיחות בעבודה (גיהות תעסוקתית ובטיחות העוסקים בקרינת לייזר), התשס"ה-2005 שהוזכרו לעיל התייחסות לעבודה ושימוש בלייזרים קיימת בחוק ותקנות הבאות :

*** חוק הקרינה הבלתי מייננת, התשס"ו-2006**

בחוק זה נדרש היתר להקמת מקורות קרינת לייזר מסוכן, ברמת סיכון 3 ו-4. על סמך זה, דורש המשרד לאיכות הסביבה "סקר בטיחות קרינה מקדים להפעלת מקור לייזר סביבתי"

*** תקנות הבטיחות בעבודה (ציוד מגן אישי), התשנ"ז-1997**

לפי תוספת (תקנה 3), סעיף 4.2 שבטור א', העובד בעיבוד שטח באמצעות לייזר חייב להשתמש במשקפי מגן נגד סיכוני קרינת לייזר.

*** תקנות עבודת הנוער (עבודות אסורות ועבודות מוגבלות), התשנ"ו-1995**

תקנות אלו אוסרות עבודה במכשירים פולטי קרינת לייזר (laser), למעט המכשירים המסווגים בדרגה 1 על פי הגדרתם בתקנות.

*** תקנות מחלות מקצוע (חובת הודעה - רשימה נוספת), התש"ם-1980**

בתקנות אלו מופיעות גם מחלות הנגרמות על ידי קרינת לייזר (laser) לרבות ירוד (cataracts).

*** צו בדבר רישום מכשיר לייזר**

משרד הבריאות פרסם צו המחייב רישום כל מכשיר לייזר מסוכן, ברמת הסיכון 3 ו-4.

3.3 הגבלת חשיפה תעסוקתית לקרינת לייזר

עפ"י תקנה 2. הגבלת חשיפה תעסוקתית לתקנות בנושא בטיחות בעבודה עם קרינת לייזר וקרינת לוואי, שהוזכרו לעיל :

"מעביד יגביל את החשיפה התעסוקתית של עובד בסיכוני לייזר, כך שתהיה מתחת לחשיפה המרבית המותרת, כאמור בתקן".

רמת החשיפה התעסוקתית המותרת (TLV-TWA) לגורמי הסיכון הנוספים הקשורים להפעלת מוצר הלייזר תהיה על-פי תקנות ארגון הפיקוח על העבודה (ניטור סביבתי וניטור ביולוגי של עובדים בגורמים מזיקים), התשנ"א-1990, תקנה 5. בתקנה זו נקבע שהערכים של

רמת החשיפה המותרת לגורמים פיסיקליים אשר אין קיימות לגביהם תקנות ישראליות ספציפיות יהיו לפי המהדורה האחרונה של ספר ה- ACGIH .

Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices

American Conference of Governmental Industrial Hygienists Inc. (ACGIH)

ACGIH - הארגון האמריקני של הגיהותנים התעשייתיים הממשלתיים תקנות נוספות הנוגעות לבטיחות בעבודה עם מוצרי לייזר מוזכרות בסעיפים הרלוונטיים של מאמר זה.

3.4 אמצעי הבטיחות

מטרת אמצעי הבטיחות היא מניעת חשיפה לקרינת הלייזר מעל גבול פליטה נגישה תוך כדי הפעלת מוצר הלייזר וע"י כך לוודא הפעלתו הבטוחה. אמצעי הבטיחות הנדרשים ממוצר לייזר מחולקים, כמקובל לפי התקן המקורי - IEC 60825-1, לשתי קבוצות:

- אמצעים הנדסיים מובנים - חלק 2 של התקן - דרישות לייצור;

- אמצעים ניהוליים - חלק 3 של התקן - מדריך למשתמש

3.4.1 אמצעים הנדסיים מובנים - דרישות לייצור

לפי תקן IEC 60825-1, **נדרשים מוצרי לייזר לאמצעי בטיחות מובנים**, בהתאם לרמת הסיכון שלהם כאשר מושם בתקן דגש ללייזרים מסוכנים. יצרנים של מוצרי הלייזר חייבים לעמוד בדרישות האלה אשר כוללות:

- **מארז הגנה** (protecting housing)

כל מוצר לייזר חייב להיות מוגן ע"י מארז הגנה המשמש למניעת אפשרות גישת אדם לקרינת הלייזר ברמה העולה על רמת סיכון של קבוצה 1 (class 1), פרט למקרה בו גישה זו דרושה לביצוע הפונקציות להן נועד מוצר זה.

- **לוח גישה** (access panel) **ומנגנון בטיחותי** (safety interlock)

יש להתקין בלוח הגישה של מארז ההגנה, מנגנון בטיחותי המופעל באופן אוטומטי עם פתיחת מארז ההגנה (בעת התחזוקה או ההפעלה) ומנתק את הזינה למקור קרינת הלייזר. מנגנון בטיחותי זה ייבנה כך שהסרת לוח הגישה לא תאפשר פליטה של קרינת לייזר שהיא מעל גבול הפליטה הנגישה של לייזרים ברמת הסיכון 1M ו- 2M.

- **מחבר להתקן בטיחותי אוטומטי המבוקר מרחוק** (remote interlock connector)

כל מערכת לייזר ברמת סיכון 3B ו-4 חייבת לכלול מחבר להתקן בטיחותי אוטומטי המבוקר מרחוק. כאשר חיבורי הקצה של המחבר פתוחים, רמת הקרינה הנגישה לא תהיה מעל גבול הפליטה הנגישה של הלייזרים ברמת הסיכון 1M ו- 2M.

כאשר יחידת הבקרה מרחוק מנותקת ומגעית ההתחברות של המחבר גלויים רמת הקרינה הנגישה לא תהיה מעל גבול הפליטה הנגישה של לייזרים ברמת הסיכון 1M ו- 2M.

- **מפתח בטיחות** (key control)

מערכת של לייזר מסוכן (רמת סיכון 3B ו-4) חייבת לכלול **מפתח בטיחות**. כאשר מוציאים את מפתח הבטיחות, הגישה לקרינת לייזר אינה אפשרית. משתמשים במפתח לצורך נעילת הלייזר כדי למנוע הפעלתו בשוגג ע"י המפעיל או ע"י אנשים בלתי מורשים. המונח "מפתח" משמעותו (לפי ת" 60825 חלק 1) גם התקני בקרה ונעילה אחרים, כמו כרטיסים מגנטיים, כרטיסים חכמים וכו'.

- **אזהרה בפני פליטת קרינת הלייזר**

כל מערכת לייזר ברמת הסיכון 3R באורכי גל של פחות מ- [nm] 400 או מעל [nm] 700, וכל מערכת לייזר ברמת הסיכון 3B ו-4 תיתן אזהרה, נראית או נשמעת, כאשר היא נמצאת במצב ההפעלה או כאשר רשת קבלים של לייזר פולסים עדיין טעונה.

- **חוסם אלומה או מנחת** (beam stop or attenuator)

מערכת לייזר מסוכן (רמת הסיכון 3B ו-4) חייבת לכלול אמצעים מקובעים, אחד או יותר להנחתת קרינת הלייזר (חוסם או מנחת) בנוסף למתגים הנועדים למיתוג מקורות אנרגיה, מחבר ראשי או מפתח בטיחות. המנחת יהיה מסוגל למנוע גישת האדם לקרינת לייזר ברמת סיכון מעל גבול הפליטה הנגישה של לייזרים ברמת הסיכון 1M ו- 2M.

- **בקרים** (controls)

כל מוצר לייזר חייב לכלול אמצעי בקרה (בקרים) הממוקמים כך שכוונן והפעלה של המערכת לא יידרשו חשיפה לקרינת לייזר ברמות הסיכון 3R, 3B ו-4.

- **מכשירי ראייה אופטיים** (viewing optics)

בכל מקום שנמצאים בו במוצר לייזר **מכשירי ראייה אופטיים**, **עמדות ראייה** או מסכי תצוגה, יש לדאוג להנחתה משמעותית של קרינת הלייזר, (נוסף למתג מקור אנרגיה, ולמחבר ראשי או מפתח בטיחות), כדי למנוע חשיפה לקרינת לייזר מעל לגבול הפליטה הנגישה המתאימה לרמת הסיכון 1M. אמצעים אלה יש לספק כדי:

למנוע גישת אדם לקרינת לייזר מעל גבול הפליטה הנגישה המתאים לרמת הסיכון 1M כאשר הצמצם פתוח או כאשר מבצעים כוונן;

למנוע אפשרות פתיחה של הצמצם או כוונן של המנחת, כאשר קיימת אפשרות לרמת חשיפה לקרינת לייזר מעל גבול הפליטה הנגישה המתאימה לרמת הסיכון 1M.

- **מגן סורק** (scanning safeguard)

מוצר לייזר, הנועד לפלוט קרינת לייזר והמסווג על בסיס זה (סריקה), חייב לא לאפשר גישת אדם לקרינת לייזר שעולה על גבול הפליטה הנגישה עבור רמת הסיכון הנתונה, בעקבות כשל סריקה או שינויים נוספים במהירות הסריקה או המשרעת (אמפליטודה) של הסריקה.

- **אמצעי עזר ליישור של מערך הלייזר (alignments aids)**
תחזוקה שוטפת דורשת כיוונון כל הרכיבים האופטיים במסלול האלומה. יש לספק אמצעי עזר בטוחים לביצוע כיוונון זה.

- **גישה ללוח גישה פתוח ("walk-in" access)**
א. כאשר מארז ההגנה מצויד בלוח גישה אשר מאפשר גישה מאושרת לתוכו, אזי:
יש להתקין אמצעים כך שכל אדם הנמצא בתוך מארז ההגנה יכול למנוע הפעלת סיכונים הנובעים מלייזרים ברמת סיכון 3B ו-4.
ב. התקני אזהרה חייבים להיות ממוקמים כך שתינתן אזהרה מתאימה לכל אדם הנמצא בתוך מארז ההגנה במקרה של פליטת קרינת הלייזר בתחום באורכי גל פחות מ- 400 [nm] ומעל 700 [nm] ברמת סיכון 3B, או קרינת הלייזר ברמת סיכון 3B ו-4 לכל אדם שייתכן ונמצא בתוך מארז ההגנה.

- **תנאי הסביבה**
מוצר לייזר חייב לעמוד בדרישות הבטיחות המוגדרות בתקן IEC 825-1 בכל תנאי ההפעלה הצפויים בהתאם לשימוש המיועד של המוצר. הגורמים שיש להתחשב בהם כוללים:
- תנאי מזג האוויר (כגון: טמפרטורה, לחות יחסית);
- רטט והלם.

- **סיכונים לא-אופטיים**
חייבים לעמוד בדרישות של התקנים המתאימים הנוגעים לבטיחות המוצר, בהפעלה ובאירוע של כשל בודד לגבי הסיכונים הבאים:
- סיכוני חשמל, כגון: הלם חשמלי;
- טמפרטורה מעל המותר;
- שריפה - התפשטות אש מצויד;
- רעש קולי ועל-קולי (ultrasonic);
- חומרים מזיקים;
- התפוצצות.

אם התקן הנוגע למוצר לייזר, כגון תקן IEC 60825-1 אינו כולל את הדרישות האלה, יש לפעול לפי סעיפים רלוונטיים של תקן IEC 61010-1. דרישות לגבי חומרים מזיקים תהינה לפי תקנות הבטיחות והגיהות הקיימות בארץ.
הערה: יש לשקול דרישות ביחס להשפעה שדות אלקטרומגנטיים.

- **קרינה לוואי**
בדרך כלל, מארז ההגנה של מוצר לייזר מגן בפני קרינה בתחומי ספקטרום הנמצאים משני צידי הספקטרום הנראה (כמו קרינה על-סגולה (UV) או תת אדומה (IR)). "יחד עם זאת, אם קיים חשש שקרינת לוואי עלולה להיות מסוכנת, ניתן ליישם לגביה ערכי ה-MPE כדי

להעריך, בשיטה מקובלת, את הסיכון הטמון בה לצורך הערכת הסיכון" (מתוך ת"י 60825 חלק 1).

- תוויות אזהרה

כל מוצר לייזר יסומן בסימון אזהרה בהתאם לדרישות הסעיפים הרלוונטיים של התקן. מידות לסמלי הסיכון, סימני האזהרה, תוכן כתובות האזהרה ומידות האותיות מפורטות בתקן IEC 60825-1 (שאומץ כתקן ישראלי 60825 חלק 1) כלהלן:

א. Figure 14 - מידות סמל ותוויות אזהרה;

ב. Figure 15 - מידות תווית ההסבר;

ג. תוכן כתובות ההזהרה - חלק 1, פרק 2, סעיף 5. Labeling.

דרישות נוספות לכיתוב בעברית על תוויית ושלטי הזהרה מפורטות בהקדמה לתקן ישראלי ת"י 60825 חלק 1, תוספות לסעיף 5. Labeling של התקן הבין-לאומי IEC 60825-1.

3.4.2 מדריך למשתמש

אמצעי הבטיחות בעבודה עם מוצרי לייזר בהתאם לסיווג רמת הסיכון שלו, המתוארים בהמשך, אינם מחייבים ומיועדים למידע בלבד. זאת, לעומת הדרישות לכותבי מפרטים ודרישות לייצור שלעיל. תמצית דרישות הבטיחות ראה טבלה 4 (עמ' 31). אמצעי הבטיחות לפי תקן זה נקבעים בהתאם לרמת הסיכון של מוצר לייזר. אמצעים האלה מחולקים בתקן לשלוש קבוצות עיקריות:

- **אמצעי בטיחות מובנים הנדסיים (engineering control)**

- **אמצעי בקרה ניהוליים**

אמצעים אלה כוללים אמצעי בטיחות שאינם מסווגים כאמצעים הנדסיים, כמו **סידור/נוהל לשמירת מפתח הבטיחות**, הדרכת בטיחות לעובדים, הערות אזהרה, תהליך ספירה לאחור (count-down) ובקרי בטיחות גבוליים (range safety controls).

להלן אמצעי בטיחות שיש לנקוט בהם בעבודה עם מוצר לייזר:

א. **שימוש במחבר לבקרה מרחוק על מנגנון בטיחותי**

מחבר זה מאפשר חיבור של התקני חיצוניים הממוקמים בנפרד ממכלולים אחרים של מוצר לייזר. כפי שתואר בסעיף 4.4 של התקן הבינלאומי כל מערכת לייזר ברמת סיכון 3B ו-4 חייבת לכלול מחבר המתואר לעיל.

מחבר זה של לייזרים ברמת הסיכון 3B ו-4 מומלץ לחבר למנגנון בטיחותי ראשי של ניתוק חירום, או מנגנון בטיחות של חדר או דלת.

לעובד המאושר ניתנת הסמכות לעקוף לזמן קצר את המחבר כדי לאפשר גישה לאנשים מוסמכים אחרים, בתנאי שוידא מעבר לכל ספק שלא קיים כל סיכון קרינה אופטית בזמן כניסת האנשים ונתן סימן לכניסה.

ב. מפתח בטיחות (key control)

יש להגן על מוצרי לייזר ברמת הסיכון 3B ו-4, שאינם נמצאים במצב הפעלה, בפני שימוש בלתי מורשה. עושים זאת ע"י הוצאת מפתח בטיחות.

ג. חוסם אלומה או מנחת (beam stop or attenuator)

יש למנוע חשיפה בשגגה של אנשים, הנמצאים במקום או עוברים ושבים, לקרינת לייזר ברמות הסיכון 3B ו-4 ע"י שימוש בחוסם אלומה או מנחת.

מערכת לייזר מסוכן: רמת הסיכון 3B ו-4 חייבת לכלול אמצעים מקובעים: אחד או יותר להנחתת קרינת הלייזר (חוסם או מנחת), נוסף למתגים הנועדים למיתוג מקורות אנרגיה, מחבר ראשי או מפתח בטיחות). המנחת יהיה מסוגל למנוע גישת האדם לקרינת לייזר ברמה העולה על זו המותרת ללייזרים ברמת הסיכון 1M או 2M.

ד. שלטי אזהרה

יש להציב שלטי אזהרה מתאימים בכניסות לאזורים או חדרים הכוללים מוצרי לייזר ברמות הסיכון 3B ו-4. **הסברים על שלטי האזהרה נמצאים בסעיף 5 בתקן, ודוגמאות נמצאות באיורים 14-15 בעמודים 66-67 בתקן.**

ה. מסלול האלומה

האלומה הנפלטת מכל מוצר לייזר, ברמות הסיכון 1, 2M, 3R, הפולט אנרגיה בתחום אורכי גל 400nm עד 700nm חייבת להסתיים בפגיעה בחומר המחזיר אור בצורה מפוזרת (דיפוזית) בעל אפיונים מתאימים הן מבחינת החזרת האור והן מבחינה תרמית או בחומר בולע אור. באם הדבר ניתן לביצוע, יש לתכנן שימוש בלייזר כך שמסלול האלומה הפתוח יעבור מעל או מתחת למפלס העיניים. מסלול האלומה במוצרי לייזר ברמות הסיכון 3R, 3B ו-4 יהיה קצר ככל הניתן לביצוע, ובעל מספר מינימלי של שינויי כיוון. יש להימנע מהצטלבות עם דרכי מעבר. מומלץ לסגור את מסלול האלומה באם זה מעשי.

ו. החזרה מפוזרת של אלומת לייזר

יש לדאוג למניעת החזרה של קרינת לייזר מפוזרת בשוגג, במיוחד במוצרי לייזר מסוכן, ברמות הסיכון 3B ו-4. הסיכונים גדולים במיוחד בהחזרות מאלמנטים אופטיים כגון: מראות, עדשות, מפצלי אלומה, וכו' הנמצאים במסלול האלומה. יש לקבע את האלמנטים האופטיים באופן יציב ומבוקר כדי למנוע אפשרות תזוזה שלהם בזמן שהלייזר פועל.

יש גם למנוע החזרה בשוגג של קרינת הלייזר ממשטחים מבריקים הנמצאים בחדר ואינם אלמנטים אופטיים. משטחים אלו יכולים להיות חלונות או דלתות זכוכית בחדר, מסכי מחשב, מכסים של גופי תאורה, וכו'.

לעומת החזרה ממשטחים מבריקים, ההחזרה ממשטחים שאינם מחזירים החזרה מסודרת, אלא החזרה דיפוזיבית, יוצרת פיזור של הקרינה הפוגעת על פני מעטפת כדורית (לכל הכיוונים), ובכך מקטינה את צפיפות ההספק שיכולה להגיע לעין.

ז. **ציוד מגן אישי**

(1) **הגנת עיניים**

חובת השימוש במשקפי מגן מעוגנת בתקנות הבטיחות בעבודה (ציוד מגן אישי), התשנ"ז - 1991, תוספת (תקנה 3), סעיף 4.2. בסעיף זה צוין שיש להשתמש במשקפי מגן להגנת עיניים בעת ביצוע תהליכי עיבוד השטח באמצעות קרני לייזר (לייזרים מסוכנים ברמת הסיכון 3B ו-4).

כאשר מאפיינים משקפי מגן מתאימים מומלץ להתחשב בגורמים הבאים:

א. אורך (אורכי) גל של פעולה;

ב. רמת חשיפה לקרינה או הקרנה;

ג. חשיפה מרבית מותרת (MPE);

ד. צפיפות אופטית* של משקפי מגן באורך גל של אלומת לייזר מופק;

ה. דרישות להעברות האור הנראה;

ו. רמת חשיפה לקרינה או הקרנה בה נגרם נזק למשקפי מגן;

ז. צורך במשקפי ראייה;

ח. נוחות ואוורור;

ט. בלאי (degradation) או שינוי (modification) של תווך הבליעה אף באופן קבוע או חולף;

י. חוזק של חומרים (עמידות בפני הלם);

יא. דרישות לראייה היקפית (peripheral vision);

יב. דרישות חוקים לאומיים רלוונטיים.

קיימים שני תקנים ישראליים הדנים בציוד מגן אישי המשמש להגנת עיניים בעבודה עם לייזרים:

- ת"י 4141 חלק 10 ציוד מגן אישי לעיניים: מסננים ומגיני עיניים להגנה מפני קרינת לייזר. תקן זה מבוסס על תקן אירופי

EN 207-1993 Personal eye-protection: Filters and eye protection against laser radiation.

- ת"י 4141 חלק 11, ציוד מגן אישי לעיניים: מגיני עיניים לעבודת כוונן לייזרים ומערכות לייזר (מגיני עיניים לכוונן לייזר), דצמבר 97 (מבוסס על תקן EN 208 מ-1993)

פירוט נוסף ביחס לתכני התקן- ראה בתת פרק "בחירת משקפיים" בחוברת מידע: ת-96. הגורם החשוב שצריך להתחשב בו לצורך בחירת משקפי מגן הוא צפיפות אופטית

(OD = Optical Density) של המסנן. במסננים בעלי צפיפות אופטית גבוהה יותר מועבר לעין פחות אור. יש לבחור OD כך שמחד הראייה לא תיפגם באופן משמעותי ומאידך יהיה ניתן להפחית את קרינת הלייזר לתחום בלתי מזיק.
ניתן לחשב את הערך של הצפיפות האופטית לפי נוסחה הבאה:

$$OD = \log_{10} (H_0 / MPE)$$

כאשר:

H_0 - רמת החשיפה הצפויה של עין בלתי מוגנת, מבוטא ביחידות:

עבור לייזר בעל גל רציף: צפיפות ההספק של אלומת הלייזר/שטח האלומה אלומת הלייזר.

עבור לייזר דופקי: צפיפות האנרגיה של אלומת הלייזר /שטח האלומה אלומת הלייזר.

MPE - חשיפה מרבית מותרת

לפני שימוש במשקפיים יש תמיד לבדוק שהם מסומנות עפ"י הנדרש בתקן כולל צפיפות אופטית ואורך הגל המתאים לה. דרישות לסימון המשקפים מופיעות בתקן **4141 חלק 10**.

(2) בגדי מגן

במדריך למשתמש (חלק 2, פרק 3 של תקן אירופי IEC 600825-1: Edition 1.2 (זהה לתקן ת"י 60825 חלק 1), מומלץ לספק בגדי מגן מתאימים לעובד בסיכוני לייזר, כאשר קיימת אפשרות חשיפתו לקרינה מעל חשיפה מרבית מותרת (MPE). לייזרים ברמת סיכון 4 גורמים במיוחד לסיכון פוטנציאלי של אש, ובגדי מגן חייבים להיות עשויים מחומר מתאים בעל עמידות אש וחום. מומלץ להשתמש בבגדי מגן בעבודה עם לייזרים ברמת הסיכון 3B (לפעמים) וברמת הסיכון 4 - בבגדי מגן בעלי דרישות מיוחדות כנ"ל.

ח. **פיקוח רפואי** (medical supervision)

התקנות הנוגעות בעבודה עם לייזרים אינן דורשות בדיקות רפואיות לעובדים בסיכוני לייזר. בהיעדר דרישות כאלה, מומלץ לאמץ את הכתוב בתקן IEC 600825-1, סעיף 10.1. לפיו מומלץ לערוך בדיקת עיניים ע"י מומחה מיד לאחר חשיפת עיניים או חשד לחשיפה כזו. עריכת בדיקות כאלה מומלצת לעובדים עם לייזרים ברמות סיכון 3B ו-4. בנוסף לכך בספרות מקצועית קיימת המלצה לערוך בדיקת עיניים התחלתית לכל מועמד להפעיל לייזר מסוכן (ברמת סיכון 3B ו-4). מצוין גם שלבדיקה זו יש משמעות משפטית בלבד.

ט. **הגנה בפני סיכוני חשמל**

ציוד לייזר עלול להוות מקור לסיכוני חשמל. תקן ת"י 60825 חלק 1 מתאר את דרישות המינימום למניעתם. בכל מקרה, יש לעמוד, בעבודה עם ציוד לייזר, בדרישות התחיקה והתקינה הרלוונטיות בנושא חשמל, כולל חוק החשמל ותקנותיו, ותקנות הבטיחות בעבודה (חשמל)-התש"ן-1990.

ראה סיכום אמצעי הבטיחות למשתמש בלייזר בטבלה 4.

טבלה 4
סיכום אמצעי בטיחות למשתמש
 (Table D.3-Summary of user precaution (IEC 825-1))

רמת הסיכון (class)						אמצעי בטיחות
4	3 B	3 R	2M	2	1M	1
נדרש	נדרש	לא נדרש לפליטה בתחום ספקטראלי נראה. נדרש לפליטה בתחום ספקטראלי לא נראה.	לא נדרש, אבל מומלץ ליישומים שכוללים צפייה ישירה לתוך אלומת הלייזר			ממונה על בטיחות לייזר
יש לחבר למעגל פיקוד של חדר או דלת		לא נדרש				התקן בטיחות הנשלט (המבוקר) מרחוק
יש להוציא את המפתח כאשר אין שימוש בלייזר		לא נדרש				מפתח בטיחות
כאשר מופעל, מונע חשיפה בהיסח דעת		לא נדרש				מנחת אלומה
נותן חיווי כאשר הלייזר מופעל		נותן חיווי כאשר הלייזר מופעל בתחום אורכי גל בתחום הבלתי נראה	לא נדרש			מנגנון חיווי פליטת קרינה
חייב להיות עוצר אלומה בסוף מסלולה השימושי			רמת הסיכון של M2 זהה לרמת הסיכון של 3B	לא נדרש	רמת הסיכון של 1M זהה לרמת הסיכון של 3B	לא נדרש
חובה למנוע החזרה בשוגג			רמת הסיכון של M2 זהה לרמת הסיכון של 3B	לא נדרש	רמת הסיכון של 1M זהה לרמת הסיכון של 3B	לא נדרשת
נדרש כאשר אמצעים הנדסיים ומנהלתיים אינם מעשיים ורמת הקרינה מעל חשיפה מרבית מותרת (MPE)						הגנת עיניים
דרישות ייחודיות	נדרש לעיתים	לא נדרשים				בגדי מגן
החל מקבוצה 3R נדרשת הדרכה לכל המפעילים ולכל הצוות הנותן שירות למערכת.			רמת הסיכון של M2 זהה לרמת הסיכון של 3R	לא נדרש	רמת הסיכון של 1M זהה לרמת הסיכון של 3R	לא נדרשת
<p><u>הערה</u>: טבלה זו לא נועדה לספק מידע מוסכם לגבי כלל אמצעי הזהירות. לגבי כלל אמצעי הזהירות יש לראות נוסח מלא של התקן - IEC 825-1.</p>						

מקורות ביבליוגרפיים

1. תקנות הבטיחות בעבודה (גיהות תעסוקתית ובטיחות העוסקים בקרינת לייזר), התשס"ה-2005
2. ת"י 60825 חלק 1, 2006 מוצרי לייזר : בטיחות בפני קרינה, מיון הציוד, דרישות-
International Standard, IEC 60825-1 Edition 1.2 2001-08
Safety of laser products – Part 1: Equipment, classification, requirements and user's guide IEC 60825-1: 1993+A1:1997+A2:2002
3. "לייזרים ויישומיהם", מאת ד"ר רמי אריאלי, בהוצאת המחלקה להוראת המדעים, מכון ויצמן למדע, 1996. כל המידע שהופיע בספר, כולל עידכונים, נמצא בעברית ובאנגלית באתר האינטרנט הפתוח, הנמצא בכתובת (להיכנס בכניסת מבקרים):
<http://stwww.weizmann.ac.il/lasers/laserheb/mainind.asp>
4. "הלייזר ושימושיו ברפואה", מאת ד"ר שמעון גבאי, בהוצאת דגש, 2000.
5. "לייזרים עקרונית ויישומים", מאת זאב זיסמן, בהוצאת בית ספר לטכנולוגיה של אוניברסיטה הפתוחה (המרכז לטכנולוגיה חינוכית), משרד החינוך והתרבות האגף למדע וטכנולוגיה, משרד העבודה והרווחה, משרד החינוך והתרבות (המכון הממשלתי להכשרה טכנולוגית), 1992.
6. "סיבים ותקשורת אופטית", HENRY ZANGER & CYTNIA ZANGER, בהוצאת בית ספר לטכנולוגיה של אוניברסיטה הפתוחה (המרכז לטכנולוגיה חינוכית), משרד החינוך והתרבות האגף למדע וטכנולוגיה, משרד העבודה והרווחה, משרד החינוך והתרבות (המכון הממשלתי להכשרה טכנולוגית), 1997.
7. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents, Biological Exposure Indices, ACGIH, 2006

נספח 1: מהם עקרונות הפעולה של לייזרים?

כדי להבין את עקרונות הפעולה של לייזרים, יש להבין תחילה מספר תהליכים המתרחשים במערכת חומרית, וקשורים במעברי אנרגיה בתוך החומר. חומר מדעי זה הוא נספח ואינו נדרש להבנת הסיכונים וכללי הבטיחות בלייזרים.

פליטה ספונטנית של קרינה אלקטרומגנטית

אחד העקרונות הפיסיקליים הבסיסיים (המהווה בסיס למדע התרמודינמיקה) הוא שכל מערכת בטבע שואפת להימצא במצבה האנרגטי הנמוך ביותר. מצב זה נקרא מצב היסוד (Ground State). (לדוגמא, הזכרנו מצב זה במודל האטום של בוהר). כאשר משקיעים אנרגיה במערכת, מביאים את אטומי החומר למצב מעורר (State Excited), המתבטא בעליית האלקטרונים לרמות אנרגיה גבוהות מרמת היסוד. אלקטרונים אלה ישהו ברמה המעוררת פרק זמן מסוים, ואז יחזרו לרמות אנרגיה נמוכות יותר, תוך פליטת אנרגיה בכמות השווה להפרש בין רמות האנרגיה (ΔE). פליטת חבילת האנרגיה הזו (הפוטון) מתבצעת בצורה עצמאית ע"י כל אטום שהאלקטרון בו יורד מהרמה המעוררת לרמת היסוד.

כאשר פוטונים נפלטים מאטומים שונים, בזמנים שונים ובאופן אקראי, קרוי התהליך פליטה ספונטנית (Spontaneous Emission), מכיוון שפליטה זו אינה תלויה בהשפעה חיצונית על האטום. הפליטה הספונטנית היא פליטה אקראית לכל הכיוונים, ואין קשר פאזה בין הפוטונים הנפלטים מאטומים שונים.

תהליך הפליטה הספונטנית קרוי לעיתים גם תהליך רלקסציה (Relaxation), מפני שזהו תהליך המוביל את האטום לכוון שווי משקל תרמודינמי (מצב בו רוב האטומים נמצאים במצב היסוד שלהם).

על פי התיאוריה הקלאסית, התדירויות האופייניות הנפלטות ע"י אטום מעורר חייבות להיות זהות לתדירויות הטבעיות של האטום, כלומר ספקטרום הפליטה חייב להיות זהה לספקטרום הבליעה.

שיווי משקל תרמודינמי - עקרון בולצמן

(הערה: יש המשתמשים במונח החליפי "שווי משקל תרמי").

יש לשים לב כי איכלוס אטומים מתייחס לאוסף של מספר רב של אטומים, שכל אחד מהם נמצא במצב מסוים.

קודם התייחסנו לאיכלוס האלקטרונים ברמות האנרגיה באטום בודד, ואילו עכשיו מתייחסים למספר רב של אטומים, ובודקים אלו מהם נמצאים ברמת היסוד, או ברמה מעוררת.

מחוקי התרמודינמיקה מקבלים כי:

- כל אוסף אטומים הנמצאים בשיווי משקל תרמי בטמפרטורה T מתפלג כך שבכל רמת אנרגיה יש מספר אטומים מסוים.

- את מספר האטומים הנמצאים ברמת אנרגיה מסוימת (E_i) נהוג לסמן ע"י **מספר האיכלוס**:

$$N_i = \text{Population Number}$$

של רמה זו.

- הקשר בין מספר האיכלוס לבין רמת האנרגיה המסוימת והטמפרטורה בה נמצא החומר ניתן ע"י **משוואת בולצמן**:

$$N_i = \text{const} \cdot \exp(-E_i/kT)$$

$$N_i = \text{מספר האטומים ליחידת נפח ברמה מסוימת (i)} = \text{מספר איכלוס.}$$

$$k = \text{קבוע בולצמן:}$$

$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ [Joule/K]}$$

$$E_i = \text{אנרגיית הרמה i.}$$

const = קבוע פרופורציה. קבוע זה מתבטל (מצטמצם מהמשוואה) כאשר מתייחסים לאיכלוס רמה מסוימת ביחס לאחרת (כפי שניתן לראות בעמוד הבא).

$$T = \text{טמפרטורה במעלות קלווין [K]} \text{ (סולם טמפרטורה המתחיל מהאפס המוחלט).}$$

משוואה זו מראה את תלות מספר האיכלוס (N_i) באנרגיית הרמה (E_i) והטמפרטורה (T). ממשוואת בולצמן רואים מייד כי:

- ככל שהטמפרטורה גבוהה יותר, מספר האיכלוס גדול יותר.
- ככל שרמת האנרגיה גבוהה יותר, מספר האיכלוס קטן יותר.

האיכלוס היחסי (יחסי האיכלוס של שתי רמות אנרגיה: E_2 ביחס ל- E_1):

$$N_2/N_1$$

ניתן ע"י:

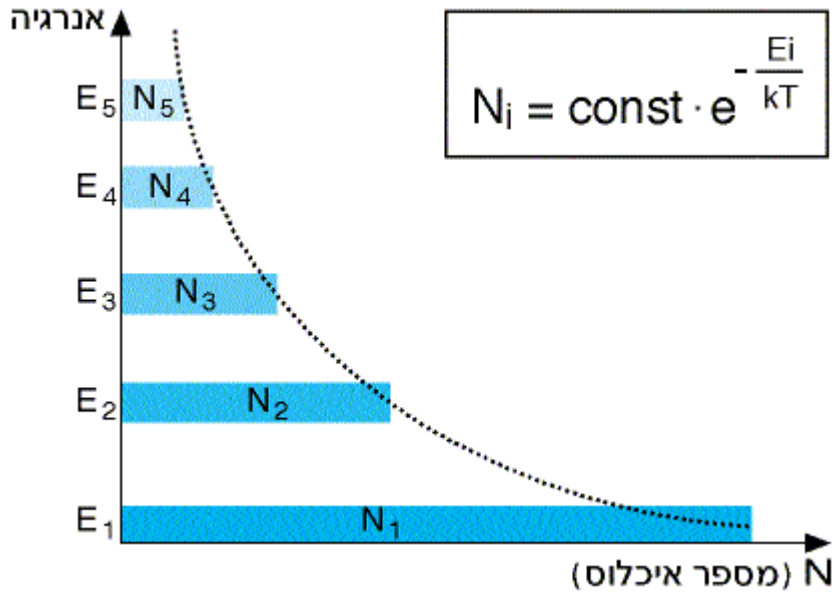
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\text{const} \cdot \exp\left(-\frac{E_2}{k_B \cdot T}\right)}{\text{const} \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{k_B \cdot T}\right)} = \exp\left[\frac{-(E_2 - E_1)}{k_B \cdot T}\right]$$

שימו לב:

- קבוע הפרופורציה (**const**) שהופיע במשוואת בולצמן התבטל בחילוק שני מספרי האיכלוס. מהמשוואה המתארת את האיכלוס היחסי מקבלים כי:
- היחס (N_1/N_2) אינו תלוי בערכי E_1 ו- E_2 , אלא בהפרש ביניהם: $(E_1 - E_2) = (\Delta E)$ בלבד.
- עבור (ΔE) מסוים, ככל שהטמפרטורה עולה, יחס האיכלוס גדל.
- תחום ערכים אפשרי ליחס האיכלוס הוא בין 0 ל- 1.

רמות האנרגיה בצבר אטומים במצב שיווי משקל תרמי

באיור הבא מתואר איכלוס הרמות בצבר אטומים הנמצאים במצב שיווי משקל תרמי.



איור: איכלוס רמות אנרגיה במצב שיווי משקל תרמי

הערה: שרטוט זה הוא בהתאם לדרך המקובלת לשרטט את ערכי האנרגיה של כל רמה על

ציר y, ואת מספרי האכלוס של הרמה על ציר x.

אם מחליפים בין הצירים, מקבלים היסטוגרמה (דיאגרמת עמודות) בה גובה העמודה מציין את מספר האכלוס של הרמה. בשרטוט אין חשיבות לרוחב הרמה (ΔE) והוא נבחר שרירותית. מסקנות מהאיור:

- במצב של שיווי משקל תרמי, מספר האיכלוס של רמה גבוהה יותר יהיה תמיד קטן יותר ממספר האיכלוס של רמה נמוכה ממנה.
- ככל שפער האנרגיה:

$$(\Delta E) = E_2 - E_1 = h\nu$$

קטן יותר, יהיה ההפרש בין מספרי האיכלוס:

$$(\Delta N) = N_2 - N_1$$

בין הרמות קטן יותר.

מבחינה פיזיקאלית אלקטרונים באטום שואפים תמיד להיות ברמת האנרגיה הנמוכה ביותר.

גם כאשר מעוררים את האלקטרונים לרמות גבוהות יותר, הם ישאפו לחזור לרמה הנמוכה ביותר.

דוגמא 3:

חשב מהו היחס בין מספרי האיכלוס של שתי הרמות E_1, E_2 , שההפרש ביניהן 0.5 [eV] כאשר החומר נמצא בטמפרטורת החדר ($T = 300 \text{ [K]}$).

מהו אורך הגל (λ) של פוטון שייפלט במעבר מרמה E_2 לרמה E_1 ?

פתרון דוגמא 3:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B \cdot T}\right) = \exp\left[-\frac{(0.5 \cdot \text{eV}) \cdot \left(1.6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{\text{J}}{\text{eV}}\right)}{\left(1.38 \cdot 10^{-23} \cdot \frac{\text{J}}{\text{K}}\right) \cdot (300\text{K})}\right]$$

$$= 4 \cdot 10^{-9}$$

כלומר, בטמפרטורת החדר, על כל 1,000,000,000 אטומים במצב יסוד E_1 , יש רק 4 אטומים במצב מעורר (E_2)!!

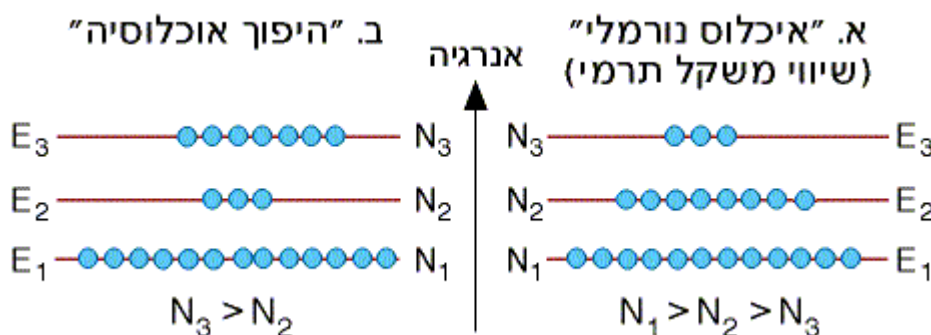
כדי לחשב את אורך הגל נציב במשוואה:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta E} = \frac{(6.626 \cdot 10^{-34} \cdot \text{J} \cdot \text{sec}) \cdot \left(3 \cdot 10^8 \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}}\right)}{(0.5 \cdot \text{eV}) \cdot \left(1.6 \cdot 10^{-19} \cdot \frac{\text{J}}{\text{eV}}\right)} = 2.48 \cdot \mu\text{m}$$

אורך גל זה הוא בתחום האינפרא-אדום הקרוב.

היפוך אוכלוסייה (Population Inversion)

ראינו כי במצב של שיווי משקל תרמודינמי (על פי עקרון בולצמן) מתקיים התנאי: $N_3 < N_2 < N_1$. כלומר: מספרי איכלוס של רמות גבוהות יותר קטנים מאלו של רמות נמוכות מהן. זהו מצב של "איכלוס נורמלי", כמתואר באיור א'.



איור: "איכלוס נורמלי" לעומת מצב של "היפוך אוכלוסייה"

זהו המצב בו פוטון הפוגע בחומר נבלע ומעלה אטום לרמת אנרגיה גבוהה יותר.

ע"י עירור חיצוני הגורם להשקעת אנרגיה במערכת ניתן להשיג מצב של "היפוך אוכלוסייה" כמתואר באיור ב'.

במצב זה קיימת רמה גבוהה יותר (E_3), ובה מספר האלקטרונים המעוררים (N_3) גדול יותר ממספר האלקטרונים ברמה נמוכה ממנה (N_2). זהו תנאי הכרחי ללזירה, כפי שנראה בהמשך.

התהליך של העלאת מספר האטומים המעוררים נקרא תהליך שאיבה (Pumping). כאשר תהליך השאיבה מבוצע על ידי עירור אופטי (גל אלקטרומגנטי פוגע) התהליך נקרא שאיבה אופטית (Optical Pumping).

פליטה מאולצת

אטומים מעוררים שוהים ברמה המעוררת זמן קצר בלבד (10^{-8} שניות) לפני חזרתם למצב היסוד ע"י הפליטה הספונטנית.

לכל רמת אנרגיה מייחסים זמן חיים (lifetime) ממוצע אופייני. זהו הזמן בו נותרת כמות של בערך e^{-1} (שהם כ- 37%) מהאטומים המעוררים שלא חזרו לרמת היסוד ע"י פליטה ספונטנית. כלומר, כ- $2/3$ מן האטומים המעוררים חוזרים למצב היסוד. על פי תורת הקוונטים מקבלים כי מעבר מרמת אנרגיה אחת לשנייה הוא לפי הסתברות סטטיסטית.

מסתבר כי לא לכל המעברים מרמה לרמה יש הסתברות זהה להתרחש, מכיוון שקיימים "חוקי איסור קוונטיים" הגורמים לכך שהסתברות המעבר נמוכה עבור מעברים מסוימים. הסתברות התרחשות המעבר לרמה נמוכה יותר נמצאת ביחס (פרופורציונית) הפוך לזמן החיים של הרמה העליונה.

פליטה מאולצת מרמה מטאסטבילית

כאשר הסתברות המעבר נמוכה, זמן החיים של הרמה ארוך יותר (מסדר גודל של 10^{-3} שניות), והיא הופכת להיות רמה מטאסטבילית (Level Metastable). ברמת אנרגיה זו מתאספת אוכלוסייה גדולה של אטומים מעוררים והיא הרמה ממנה מתבצע תהליך הלזירה. כאשר מתקיים היפוך אוכלוסייה, מספר האטומים ברמה מעוררת גבוה ממספר האטומים ברמה נמוכה ממנה.

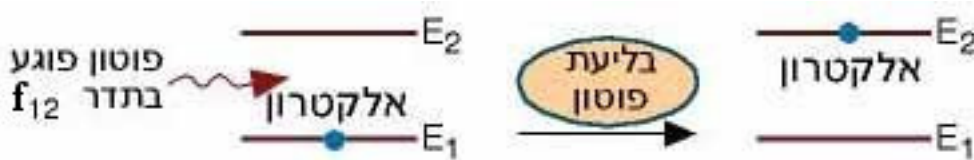
במקרה זה, גדולה יותר ההסתברות שפוטון פוגע יאלץ (stimulate) אטום מעורר לרדת למצב נמוך יותר, תוך פליטה מאולצת של פוטון נוסף.

הסתברות זו תלויה בהתאמה בין אנרגיית הפוטון הפוגע להפרש האנרגיה בין הרמות.

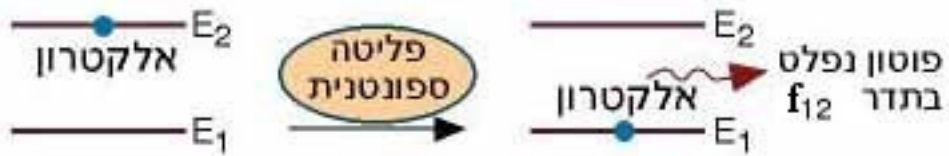
האיור הבא מסכם את שלושת התהליכים המתרחשים בין פוטונים ואטומים: בליעה, פליטה ספונטנית ופליטה מאולצת.

איור: תהליכים בין פוטונים לאטומים:

- **בליעת פוטון:** פוטון בתדר f_{12} פוגע באטום הנמצא במנוחה (משמאל), גורם לאטום לעלות למצב מעורר תוך בליעת הפוטון הפוגע.



- **פליטה ספונטנית של פוטון:** אטום במצב מעורר (משמאל) פולט פוטון בתדר f_{12} ויורד למצב אנרגטי נמוך יותר.



- **פליטה מאולצת של פוטון:** פוטון בתדר f_{12} פוגע באטום במצב מעורר ויוצר באמצעות פליטה מאולצת שני פוטונים זהים בתדר f_{12} .



ברור כי שני פוטונים שאורך הגל שלהם זהה (מונוכרומטיות), הם בעלי אותה אנרגיה:

$$E = hf = hc/\lambda$$

- במצב של שיווי משקל תרמי, תמיד תתרחש בחומר בליעה ולא הגברה.
- אם רוצים תווך מגביר, יש ליצור בו מצב של היפוך אוכלוסייה ע"י "שאיבת" האטומים שלו לרמה גבוהה יותר.

הפוטון הנפלט בפליטה מאולצת זהה לחלוטין לפוטון הפוגע, כלומר לשניהם:

(1) אותו אורך גל (כלומר, גם אותו תדר) - מונוכרומטיות.

(2) אותו כיוון תנועה - כיווניות.

(3) אותו מופע - קוהרנטיות.

שלוש תכונות אלה מאפיינות את קרינת הלייזר.

הפוטון הפוגע אינו עובר כל שינוי כתוצאה מתהליך הפליטה המאולצת.

ראינו כיצד מאטום אחד במצב מעורר ומפוטון אחד פוגע קיבלנו שני פוטונים זהים ע"י פליטה מאולצת.

נספח 2: טבלת אורכי גל אופייניים של לייזרים הנמצאים בשימוש רב

Laser Type (Spectral Region)	Wavelength(s) (Nanometers)
Argon Fluoride Excimer (UV)	193
Krypton Chloride Excimer (UV)	222
Krypton Fluoride Excimer (UV)	248
Xenon Chloride Excimer (UV)	308
Xenon Fluoride Excimer (UV)	351
Helium Cadmium (UV, Visible)	325, 442
Nitrogen (UV)	337
Krypton (Visible)	476, 528, 568, 647
Argon (Visible)	488, 514
Copper Vapor (Visible)	510, 578
Nd:YAG Frequency Doubled (Visible)	532
Helium Neon (Visible, Near IR)	543, 594, 612, 633, 1150, 3390
Gold Vapor (Visible)	628
Rhodamine 6G Dye (Visible, Tunable)	570-650
Ruby (Visible)	694
Diode Semiconductor (Visible, Near IR)	630-1600
Ti:Sapphire (Visible - Near IR)	680-1130
Nd:YAG (Near IR)	1064
Erbium (Near IR)	1540
Hydrogen Fluoride (Near IR)	2600-3000
Carbon Dioxide (Far IR)	9600, 10600