**Laser Devices at the Weizmann Institute of Science**

The Weizmann Institute of Science uses both open laser systems and confined laser systems:

**Open laser systems –** optical systems with direct access to the laser beams on optical tables. The laser beam’s movement is parallel to the plane of the optical table.

**Confined (closed) laser systems –** systems built so that the laser beam is locked and protected inside the device, using safety mechanisms that prevent uncontrolled access and exposure to the laser beam, including the FACS system and most confocal microscopes.

The fact that a laser beam’s accidental contact with the human body may result in significant damage must be taken into consideration, and therefore everything possible should be done to prevent such an occurrence. On this site we will present the laser beam’s primary attributes, its mechanisms of interaction with biological tissue, and the safety system built at the Weizmann Institute of Science. The information is designed to provide tools for laser system users to prevent exposure to potential risks from the laser beam.

**2. The laser and its use**

**2.1 Properties of the laser beam**

The term LASER stands for Light by Amplification Stimulated Emission of Radiation – that is, light amplification obtained from the process of forced emission of radiation. This process gives the laser beam two important qualities: coherence and monochromaticity.

The laser beam is a "light" beam with a defined color, sent in a defined and known direction in space. The practical result is the ability to perform efficient work with a laser beam, which cannot be performed (or is very difficult) with other light sources. This is due to the laws of optics governing light rays passing through an optical lens. As stated, a lens is capable of focusing light rays passing through it into a dot of minimal diameter, and projecting the beams onto a target located within the focal plane of the lens. The density of power (or energy) of the ray on the target is directly proportional to the power (or energy) of the light ray passing through the lens, and inversely proportional to the square of the focal diameter. Therefore, all components of the laser beam, having the same wavelength and lens impact angle, will be focused at the focal length defined for the lens, producing a dot of minimal diameter. The practical result of this is that a lens enables gathering the entire output of the laser beam, and producing on a target (placed on the focal plane of the lens) an immeasurably higher power density than the power density that can be achieved from other light sources.

**Energy density and laser beam power**

One of the features that distinguish the laser beam from other light sources is its ability to exhibit extremely high power density (or energy). This feature is effectively applied to cutting materials, but this same feature makes the laser beam dangerous in the event of contact with the human body, and especially the eyes.

The power density expresses the intensity of the power supply, and is measured in units of watts per square centimeter (W/cm2). A nominal 10 W laser beam can be focused into a tiny dot, only 0.2 mm in diameter, with a massive power density of 3∙104 W/cm2. Pulsed lasers can easily reach a power density (peak power within the pulse) in the range of 109 W/cm2 and even higher.

**The nature of the laser beam**

Laser radiation, in all its forms, belongs in the sphere of electromagnetic radiation, where the electric field and magnetic field advance when they are coupled and coherent.

The laser systems with relevant applications produce radiation in the optical spectrum, including ultraviolet radiation, infrared radiation and the visible spectrum between them.

Ultraviolet (UV) radiation has the shortest wavelengths in the optical spectrum – from 400nm (near ultraviolet) to 10nm (deep ultraviolet).

Wavelengths in the visible spectrum range from 400nm (purple) to 700nm (red).

In the infrared spectrum the wavelengths are longer, ranging from 700nm (near infrared) to 1mm (the limit of distant infrared).

The electromagnetic wave containing the basic energy unit in the optical spectrum is called a photon. The photon carries energy (a basic "radiation dose") that depends on its specific frequency (f).

This energy value (Ep) can be calculated by: **Ep = h**·**f = h(c/l)**

**Where h represents the value** 6.626x10-27erg∙sec, known as the Planck constant (named after the physicist Max Planck).

The significance of this connection is that the energy contained in a photon increases as the photon’s oscillation frequency (f) increases. Similarly, it can be said that a photon’s energy increases as the wavelength (l) decreases. Photons in the ultraviolet range carry the most energy in the optical spectrum, and therefore pose potential risks against which safeguards must be taken.

**2.2 אלומת הלייזר במעבדות מחקר**

המניע העיקרי בפיתוח סוגים שונים של לייזרים הוא קבלה של אורכי גל שיתאימו לשימוש זה או אחר. למעשה, אורך הגל הוא הפרמטר העיקרי המבדיל בין הלייזרים השונים, והתאמת השימוש הנתון נקבעת לפי אורך הגל. מרבית הלייזרים מפיקים אלומה, המאופיינת ע"י אורך גל יחיד, הנקבע ממבנה רמות האנרגיה שבתווך הלזירה. ישנם לייזרים שבתווך הלזירה שלהם נוצרים תנאים להפקה של שני אורכי גל, ולפעמים גם יותר. בנוסף, ניתן לקבל מאורכי הגל הקיימים אורכי גל אחרים באמצעות הכפלה הרמונית (HG) ומתנדים פרמטריים (OPO).

**אלומת הלייזר ורכיבים אופטיים במעבדה**

הסיכון הטמון באלומת הלייזר נובע מיכולתה להציג צפיפות הספק גבוהה במיוחד. כאשר אלומת לייזר פוגעת ברכיבים אופטיים, נוצרים יחסי גומלין ביניהם, באופן שמאפייניה של אלומת הלייזר עשויים להשתנות. הדבר עשוי להשפיע על כיוון המשך התקדמותה של האלומה ו/או שינוי צפיפות ההספק שבתוך האלומה. לכן, בהערכת הסיכונים, יש חשיבות לדעת מהם השינויים החלים במאפייני האלומה כתוצאה מפגיעתה ברכיבים אופטיים שעשויים להימצא במעבדה.

**משטחים מחזירים ומפזרים**

אלומת הלייזר עשויה לפגוש, במהלך התקדמותה, משטחים החוסמים את התקדמותה בכיוון המקורי ומפנים אותה לכיוון (או לכיוונים) אחר. תוצאות המפגש בין אלומת הלייזר והמשטח תלויות באורך הגל של אלומת הלייזר ובאופי המשטח. קיימים שני סוגי החזר: החזרת ראי (Specular Reflection) או החזרה מפוזרת (Diffused Reflection).

**החזרת ראי**

החזרת ראי מתקבלת כאשר המשטח המחזיר מלוטש היטב, עד כדי כך שאי הרגולריות של המשטח קטנה מאורך הגל של אלומת הלייזר. בדרך כלל, נדרש ליטוש בדרגת אי רגולריות נמוכה מ- l/4, דהיינו כ- 0.15 mm עבור אלומת לייזר בתחום נראה. בתחום האינפרה אדום, מקובל להשתמש במראות מתכתיות מלוטשות המצופות בשכבה דקה של כסף או זהב כדי לשפר את יעילות ההחזר.

**החזרה מפוזרת**

החזרה מפוזרת מתקבלת כאשר אי הרגולריות של המשטח המחזיר גדולה מאורך הגל של אלומת  הלייזר. לגבי אלומת לייזר בתחום הנראה, אי  רגולריות  בשיעור של כ-5 mm, די בה כדי שתגרום להחזרה מפוזרת. האלומה המוחזרת מפוזרת למחצית המרחב, עם משקל עוצמה יחסי לפונקציית הקוסינוס.

**3. סיכוני לייזר**

**3.1 סיכונים בעבודה עם לייזר**

תכונת הכיווניות של אלומות הלייזר מקנה לה את היכולת להציג צפיפות הספק (W/cm2) גבוהה במיוחד. תכונה זו, יחד עם היות אלומת הלייזר בעלת אורך גל מוגדר (או מספר אורכי גל בדידים ומוגדרים), מאפשרת, בעזרתה של עדשה מצויה, למקד את אלומת הלייזר לכתם זעיר, שבו גדלה צפיפות ההספק, הגבוהה ממילא, בכמה סדרי גודל.

כושרו של הלייזר לרכז הספק גבוה בנקודה זעירה הוא הבסיס לשימושי הלייזר בתחומים רבים במדע, וככלי חיתוך רב עוצמה של מתכות, חומרים קרמיים קשים ואף יהלומים. מנגד, צפיפות ההספק הגבוהה מעוררת היבטים בטיחותיים בסביבת העבודה עם מערכות לייזר, שכן התפוקות הנומינליות של מרבית מערכות הלייזר גדולות לאין שיעור מרמות הסף המותרות בחשיפה לעיניים או לעור.

**סיכונים ביולוגיים של הלייזר**

חשיפת העין לאלומת הלייזר עלולה במקרים רבים להסתיים בפגיעה קשה ביכולת הראייה, וגם פגיעתה בעור עלולה להסתיים בכוויה עמוקה ומכאיבה. משום כך, חשוב להכיר את הנזק הפוטנציאלי ותלותו במאפייניה השונים של אלומת הלייזר, כגון: אורך גל, עוצמה, משך החשיפה ועוד. מידע זה יאפשר לנו, בשלב הראשון, לבנות סולם סיכונים שחומרתם הולכת וגדלה במעלה הסולם, ובשלב השני נוכל לבחון כל לייזר נתון, ולמפות את מיקומו בסולם הסיכונים. אורך הגל הספציפי של לייזר נתון, יחד עם מיקומו בסולם הסיכונים, יאפשרו לקבוע, במידה רבה של ודאות, את אמצעי המיגון הנדרשים לעבודה בטוחה עם הלייזר המסוים ובסביבתו.

חשיפה רגעית (או ארוכה יותר) של רקמה כלשהי לאלומות הלייזר עלולה להסתיים בנזק ממשי הנגרם באמצעות אחד, או יותר, משלושת מנגנוני הנזק הבאים:

1. **נזק פוטו תרמי:** קרן הלייזר גורמת לתנודות במולקולות ברקמה הביולוגית, נוצר חום ברקמה. הנזקים לרקמה נעים משינוי תכונות החלבון (אלבומין) לכוויות, אידוי רקמה עד להתפחמות .
2. **נזק פוטו אקוסטי:** צפיפות הספק גבוהה גורמת לטמפ' מקומית גבוהה, הנוזלים בתאי הרקמה משנים את מצב הצבירה לגזים המשנים את נפחם, נוצר גל הלם מכני המתפשט לתאים הסמוכים ועלול לגרום לקריעתם.
3. **נזק פוטו כימי:** אורכי גל מסוימים בתחום ה-UV והאור הכחול יוצרים תגובות בין מולקולות אורגניות או שהם שוברים קשרים כימיים במולקולות. האפקט ארוך טווח.

בפועל, מנגנון הנזק הדומיננטי, בכל מקרה ומקרה, תלוי במאפייני אלומת הלייזר ובמאפייני הרקמה כאחד.

**סיכונים פיזיקליים של הלייזר**

**גרימת אש ופיצוץ**: לייזרים בעוצמות גבוהות עלולים לגרום להתלקחות חומרים דליקים (בד, נייר, פלסטיק, עץ וכו') ולפיצוץ במגע עם נוזלים וגזים דליקים.

**סכנת התחשמלות**: נגרמת עקב מתח הזנה גבוה למערכות לייזר.

**סיכוני קרינה UV** (בלתי מייננת): קרינה בתחום ספקטראלי זה, מקורה במנורות הבזק ושפופרות פריקה של לייזר רציף (CW), במיוחד כאשר משתמשים בצנרת או במראות להעברה של אלומות קרינת ה-UV (כמו קוורץ).

**סיכוני קרינה מייננת וקרינה בלתי מייננת**:

לייזר אקסימר בו משתמשים בשפופרות פריקת גז אלקטרוניות ((gas electron tubes, שפופרות אלה פועלות במתח גבוה בין האלקטרודות שלהם. 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 וקרינת חשמל (ELF)
* פליטת קרינת רנטגן (X-ray).

**סיכונים כימיים של הלייזר**

**אידוי חומרים רעילים**: פגיעה של קרן הלייזר בחומרים כימיים עלולה לגרום לאידוי חומרים רעילים לחלל החדר.

**סיכונים כימיים ממקור הלייזר עצמו**:

* לייזר צבע המכיל כימיקלים רעילים
* לייזרים המכילים גז רעיל כגון פלואור
* דליפה של נוזלי קירור של הלייזר
* סכנת דחיקת חמצן בשימוש בלייזרים עם שימוש בגזים אינרטיים (חנקן, הליום)

**3.2 נזקי הלייזר לעור ולעיניים**

מכל איברי הגוף, העור והעיניים הם היחידים העלולים להיחשף לקרינת לייזר מזיקה. מקור הנזק לאיברים אלה עשוי להיות מורכב מכל שלושת מנגנוני הנזק שתוארו קודם (תרמי, אקוסטי וכימי), אבל התרומה היחסית (לנזק) של כל אחד מהם עשויה להיות מושפעת מהאנטומיה וממרכיבי הרקמות המיוחדים לעור או לעין. בנוסף, כשאנו דנים באופי הנזק העלול להיווצר, יש לקחת בחשבון את מנגנוני ההגנה הטבעיים העוזרים לנו, בתנאים מסוימים, ולהקטין את חומרת הנזק באופן הבא:

* תחושת הכאב המתפתחת בתחילתה של כוויה גורמת לנו להסיט את האיבר שנחשף לאלומת הלייזר, ובכך להקטין את חומרתה של הכוויה האפשרית. תחושת הכאב מורגשת בעיקר בחשיפה לאלומות לייזר, בתחום הנראה והאינפרה אדום, בעלות צפיפות הספק גדולה יחסית.
* רפלקס העפעוף (סגירת העפעף) המופעל, כשהעין נחשפת לבהירות גבוהה של אור בתחום הנראה, מסייע בידנו להקטין את מידת הנזק העלול להתפתח מחשיפת העין לאלומת לייזר בתחום זה. זמן התגובה המרבי של העפעוף מוערך ברבע שנייה, ולכן הוא מספק הגנה מסוימת רק כנגד חשיפה הנמשכת למעלה מזמן זה.

קביעה של הנזקים המיוחדים לעור או לעיניים דורשת, אפוא, התייחסות למבנה הרקמות, בכל איבר בנפרד, ומיקום נזקי הלייזר האפשריים.

**נזקי עור**

עובי שכבת העור העליונה - האפידרמיס (Epidermis)0.1-0.2   מ"מ, כשלעניין האינטראקציה עם הלייזר מניחים שבשכבה זו קיימת תכולה רבה של מים ובתחתיתה גרנולות של מלנין. מתחת לאפידרמיס מצויה שכבת הדרמיס (Dermis), שעובייה עשוי להגיע עד 2 מ"מ, הבנויה מסיבי קולגן ואלסטין, וגם היא בעלת תכולת מים מרובה. בחלק זה מצויים כלי הדם הקפילריים, הקטנים, וכלי דם בקטרים גדולים יותר. השכבה התת-עורית מכילה בעיקר שומן (Fat). בפועל, בגלל המרכיבים הנמצאים ברקמת העור, מסוגלות אלומות הלייזר לגרום נזקי עור מכל הסוגים: תרמי, אקוסטי וכימי, כשאופי הנזק בכל מקרה ומקרה תלוי באורך הגל הנתון של אלומת הלייזר, בעוצמתה, ובגודלו של שטח החשיפה. לעניין הנזקים התרמיים והאקוסטיים, יש להזכיר שוב שחומרת הנזק יחסית לצפיפות ההספק של האלומה (W/cm2) במקום פגיעתה בעור.

**נזקי עיניים**

לעניין נזקי הלייזר הפוטנציאליים חשוב להדגיש את הנקודות הבאות:

1. הקרנית (Cornea) והעדשה (Lens) מהוות יחד את מערך ההדמיה האופטי של העין, שהוא בעל חוזק אופטי כולל של כ- 50 דיופטר (Diopter). למילוי תפקידן צריכות הקרנית והעדשה להיות בעלות דרגת שקיפות גבוהה, באופן שהדמות שהן יוצרות על הרשתית תהיה חדה וברורה. פגיעה פיזית ברקמות הקרנית והעדשה או פגיעה בדרגת שקיפותן ייחשבו לנזק.
2. הנוזל הזגוגי (Vitreous) נותן לגלגל העין את מבנהו הכדורי. בנוסף לכך, הוא חייב להיות בעל דרגת שקיפות גבוהה, מאותה סיבה (של הקרנית והעדשה). פגיעה בשקיפות הנוזל הזגוגי תיחשב לנזק.
3. הרשתית (Retina) משמשת משטח רגיש לאור שבו נבנית דמות האובייקט הנצפה, ובה מתבצעת התמרה של הדמות האופטית לאותות חשמליים המועברים למוח לעיבוד התמונה. הרשתית נמצאת על מישור המוקד של מערך ההדמיה האופטי, ותפקודה התקין מחייב הישארות צמודה לדופן הפנימית של גלגל העין. היפרדות הרשתית מהדופן הפנימית של גלגל העין או פגיעה בחלק משטחה ייחשבו לנזק.
4. מכל שטחה של הרשתית, למרכז הראייה (Macula, הכתם הצהוב) תפקיד מכריע בפעולת הראייה, שכן רק באזור זה קיימת יכולת הבחנה בין צבעים, ורק במרכזו של אזור זה (Fovea, שקוטרו כ- 0.25 מ"מ בלבד הנמצא על הציר האופטי של מערך ההדמיה) נוצרת דמות בעלת כושר הפרדה גבוה. במקרים רבים, נזק במרכז הראייה מסתיים, בפגיעה קשה ביכולת הראייה.

בגלל תכונת הכיווניות הגבוהה של אלומת הלייזר, היא נראית למערך ההדמיה האופטי כאובייקט הנמצא באינסוף (במרחק רב), שדמותו נבנית כנקודה זעירה על הרשתית. יתרה מכך, כאשר מתבוננים ישירות על אלומת לייזר, דמות זעירה זו נופלת ממש במרכז הראייה של הרשתית, צפיפות ההספק גדולה פי 122,500 עם סיכוי גבוה לפגיעה חמורה ביכולת הראייה, עד כדי עיוורון.

**3.3 ערכי סף לנזקים ביולוגיים**

מגוון הסיכונים הביולוגיים שמקורם בחשיפה לאלומת הלייזר, הוצגו בסעיף הקודם בהיבט האיכותי בלבד, מבלי לקשור בין הערכים של פרמטרי אלומת הלייזר (אורך גל, עוצמה וכד') למידת הנזק הצפויה. בעולם הממשי חייבים לכמת את מידת הנזק הצפוי, ולקשור אותו לערכי הפרמטרים של אלומת הלייזר. ניתוח כמותי של מידת הנזק, ואופן ההתייחסות לרמות הנזק השונות, נעשים בשלושת השלבים הבאים:

1. קביעת רמות חשיפה מותרות שאין בהן כל סיכון.
2. חלוקת רמות החשיפה הגבוהות יותר למספר דרגות סיכון.
3. קביעת אמצעי ההגנה הדרושים למניעת החשיפה לדרגות הסיכון השונות.

רמות חשיפה שאין בהן כל סיכון ביולוגי, הן כאלה שלא ניתן להבחין בהן באמצעי האבחון המקובלים (למשל, אופטלמוסקופ) מיד לאחר החשיפה לאלומת הלייזר, או מאוחר יותר. בגלל הפיזור הקיים במרכיבים האנטומיים של אנשים שונים (רמת פיגמנטציה שונה של העור, עובי האפידרמיס וכד'), ובגלל התלות של מידת הנזק בערך הממשי של מרכיבים אלה באזור החשיפה, לא ניתן לקבוע רמות חשיפה מותרות שיתאימו לכלל האוכלוסייה. במקום זאת, ניתן להגדיר רמות סף הנעזרות בממוצעים סטטיסטיים. משום כך, הקביעה של רמות הסף המותרות נעשית בשני השלבים הבאים:

1. קביעת ערך החשיפה **E**xposure **D**ose) ED50 )
2. קביעת סף החשיפה המותר MPE.

ערך החשיפה ED50 מציין את רמת החשיפה העלולה לגרום נזק מינימלי, שניתן להבחין בו, ב- 50% מכלל האוכלוסייה שנחשפה לרמה זו. ערך זה כולל בתוכו את ההתייחסות הסטטיסטית הנובעת מפיזור הערכים של המרכיבים האנטומיים. כמובן שרמת החשיפה הזו מסוכנת למחצית מכלל האוכלוסייה. לכן, כדי להגן על מרבית האוכלוסייה מגדירים רמת חשיפה נמוכה יותר :

MPE - **M**aximum **P**ermissible **E**xposure

המקיימת את הקשר הבא: **MPE = (ED50)/10**

ערך זה מציין את החשיפה המירבית המותרת בה אין סיכון. ההנחה היא שהגבלת החשיפה לעשירית הערך שמסוגל לגרום נזק מינימלי ב-50% מהאוכלוסייה, יש בה מקדם בטחון מספיק גדול להגנה על כלל האוכלוסייה. אבל, כבר כאן חשוב להדגיש, שלא ניתן לצאת בהנחה גורפת שכזו, ולמעשה חלק (קטן, אמנם) מהאוכלוסייה עלול להינזק גם בחשיפה לערך המוגדר ע"י MPE. הסיבה לכך קשורה באופן הגדרת הערך MPE, הגדרה המתבססת על ממוצע סטטיסטי. במקרים אלה, לכל רף שיוצב, נמוך ככל שיהיה, תמיד יימצא האינדיבידואל שיינזק גם בערכים הקטנים מהרף שנקבע. כלומר, גם הורדת הרף של MPE למאית ערכו של ED50 (או לפחות מכך) אין בה כדי להבטיח הגנה על כלל האוכלוסייה. מן הצד האחר, קביעת MPE על ערך השווה ל- ED50/100, או קטן יותר, הייתה מקשה מאוד על אפשרויות השימוש בטכנולוגיית הלייזר מבלי להבטיח הגנה מלאה לכלל האוכלוסייה. הפשרה בין הסיכונים לצרכים נמצאה בהגדרת ערכו של MPE בתוספת ההוראה הכללית, האומרת: "לא לנקוט בפעולות שאינן נחוצות, גם אם הן כרוכות בחשיפה לערכים נמוכים יותר מהמותר".

**3.4 סיווג רמות הסיכון של מערכות הלייזר**

רמת הסיכון של הלייזר מסווגת על פי גבול הפליטה הנגישה לאלומת הלייזר, ומאפשרת להתאים ללייזר "חבילת בטיחות". הסיווג (Classification) נעשה לפי דרגת הנזק הפוטנציאלי שאלומת הלייזר מסוגלת לגרום, בהתאם לקריטריונים הבאים:

* עוצמת אלומת הלייזר ביחס לערך החשיפה המירבית המותרת (MPE).
* יכולת האלומה הישירה או המפוזרת לגרום לנזק לעין.
* ****יכולת האלומה הישירה לגרום נזק לעור או לגרום להצתה של חומרים דליקים.

**רמת סיכון 1: (Class 1)**

מוצר לייזר שרמת קרינתו אינה מסוכנת. ייתכן גם מצב בו לייזר מסוכן נמצא בתוך מעטפת, ומערכות הבטיחות אינן מאפשרות מעבר אלומת לייזר מסוכנת. עקיפת מערכת הבטיחות עלולה להעלות את רמת הסיכון של הלייזר.

**רמת סיכון 1M: (Class 1M)**

מוצר לייזר שרמת קרינתו אינה מסוכנת דרך כלל; מוצר זה עלול להיות מסוכן לעין כאשר צופים בקרן הלייזר בעזרת מערכת אופטית מרכזת.

**רמת סיכון 2: (Class 2)**

מוצר לייזר הפולט בתחום האור הנראה (nm 400-700).רמת קרינתו מסכנת את העין רק אם החשיפה נמשכת יותר מ-0.25 שניות (זמן התגובה הארוך ביותר לרפלקס המצמוץ).

**רמת סיכון 2M: (Class 2M)**

מוצר לייזר הפולט בתחום האור הנראה (nm 400-700). 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 בקרן 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.

עד חמש פעמים רמת סיכון 1 בשאר התחומים. מסוכן לעין בתחום הבלתי נראה החל מ-0.7mW.

**רמת סיכון 3B: (Class 3B)**

מוצר לייזר שפגיעת קרינתו באלומה ישירה או בהחזרת מראה 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 כזה עלולה להצית חומרים דליקים. כמו כן, קרן הלייזר, באינטראקציה עם חומר, יכולה ליצור פלסמה וחומרים נדיפים רעילים.

**4. הנחיות ונהלים**

**4.1 הוראות לעבודה בטוחה עם מערכות לייזר בדרגת סיכון 3B/4**

**הגדרה: "עובד בסיכוני לייזר"**- אדם העובד במקום עבודה והעשוי להימצא באזור סיכוני לייזר, לרבות סטודנט, תלמיד, חוקר, מתנדב וכל מי שנמצא באזור זה באופן סדיר לצורך עבודתו או הכשרתו המקצועית;

**1**. הכר את הסיכונים ונהלי הבטיחות של מערכות הלייזר הנמצאות במעבדה, ופעל בהתאם להוראות היצרן ולנהלי הבטיחות.

**2**. הכניסה למעבדה מתאפשרת רק באמצעות קוד כניסה.

**3**. **סיכוני הלייזר**

\* אלומת לייזר Class 4 ישירה או מוחזרת ממשטח מלוטש, או מפוזרת ממשטח מחוספס, עלולה להצית חומרים

דליקים, לגרום לכוויה בעור, ועלולה לפגוע בעיניים ולגרום נזק חמור לראייה.

\*\* אלומה ישירה של לייזר Class 3B עלולה לפגוע בעיניים ולגרום נזק חמור לראייה.

**4**. **הפעלת מערכת הלייזר**

* 1. מערכת הלייזר תופעל אך ורק ע"י עובדים שקיבלו הדרכה לפני פחות משנה ע"י ממונה בטיחות לייזר, וקיבלו הדרכה ממנהל המעבדה להפעלת מערכת הלייזר על כל רכיביה.
  2. לפני הפעלת המערכת יש לוודא כי:
     1. מנורת האזהרה, המוצבת מעל דלת הכניסה למעבדה, דולקת.
     2. חלונות המעבדה מכוסים.
     3. כל מי שנמצא במעבדה מרכיב משקפי מגן מתאימים לאלומת הלייזר.
     4. בעבודה עם לייזר בדרגת סיכון Class 4 בתחום האולטרה סגול בלבד, מומלץ ללבוש חלוק מעבדה עם שרוולים ארוכים ולעטות כפפות.
  3. פעולות כוונון האלומה ייעשו בעוצמת הלייזר הנמוכה ביותר האפשרית, תוך שימוש במשקפי מגן ייעודיים ומתאימים לאלומת הלייזר.
  4. במהלך פעולות הכוונון, יש להשתמש בחוסם אלומה, שיוצב בכל פעם לאחר הקטע האופטי המצוי בתהליך הכוונון.
  5. במהלך ניסוי ארוך, המחייב להשאיר את המערכת פועלת ללא נוכחות המפעיל, יש לסגור את הדלת, ולוודא שמנורת האזהרה בכניסה למעבדה דולקת. זאת, כדי להבטיח שאדם שאינו מוסמך לא יוכל להיכנס לחדר (לרבות עובדי ניקיון). כמו כן, יש להתקין מצלמות וידאו כדי לפקח על הניסוי מרחוק.
  6. בגמר הפעלת הלייזר, יש לכבות את מנורת האזהרה המוצבת מעל דלת הכניסה.

**5**. **מקרים ותגובות**

* 1. במקרה של חשד לפגיעה בעיניים מאלומת הלייזר דווח למוקד 2999.

פגיעה בעיניים מחייבת **פינוי מיידי לחדר המיון** במרכז הרפואי "קפלן" לשם בדיקה רפואית.

* 1. במקרה שנגרמת כוויה בעור מפגיעה של אלומת הלייזר, כסה את אזור הכוויה במשחה לטיפול בכוויות, המצויה בערכת העזרה הראשונה שבחדר, ודווח מייד למוקד 2999.
  2. במקרה הצתה של חומר דליק, החל בפעולות הכיבוי תוך שימוש במטף לכיבוי אש ודווח מיידית למוקד 2999.
  3. במקרה של תקלה/חשד לכשל בהפעלת מערכת הלייזר, יש להפסיק מיידית את המתח למכשיר ע"י לחיצה על מפסק החירום, או ניתוק זרם החשמל הראשי בלוח החשמל הצמוד. יש להודיע מיידית לממונה בטיחות הלייזר.

**6.** **דגשי בטיחות**

* 1. אסור לבטל או לעקוף את התקני הבטיחות הקיימים במערכת הלייזר !!!
  2. יש לדווח לממונה בטיחות הלייזר על כל טיפול או שינוי שבוצע במערכת הלייזר, או כאשר מבקשים להשמיש מערכת שלא הופעלה תקופה ארוכה. חידוש השימוש במערכת הלייזר מחייב בדיקת בודק לייזר מוסמך לפני ההפעלה, וזאת בתיאום עם ממונה בטיחות הלייזר.
  3. יש לקבל מראש את אישורו של ממונה בטיחות הלייזר לביצוע פעולה לא שגרתית במערכת הלייזר. האישור השנתי מתייחס אך ורק להפעלה שגרתית של מערכת הלייזר, כל פעולה אחרת מחייבת אישור מיוחד בכתב.

**4.2 הנחיות בטיחות לעבודת כוונון אלומת לייזר**

1. **המטרה**

מניעת תאונות עבודה במהלך כיוון אלומת לייזר הנובעת מחשיפה לאלומת הלייזר.

1. **השיטה**
   1. להצביע על סיכוני הלייזר בעת כיוון אלומת הלייזר.
   2. היערכות וביצוע כיוון אלומת לייזר במעבדות עם מערכות לייזר פתוחות ברמת סיכון Class 3B/4 ו-Class 3R בתחום הבלתי נראה.
2. **הגבלת גישה**
   1. הכניסה למעבדה תהיה רק לעובדים המבצעים את הכיוון של אלומת הלייזר.
   2. כאשר קיימים תנאים יוצאי דופן בזמן הכיוון, יוצב בכניסה למעבדה שלט אזהרה (כניסה אסורה/סכנה מיוחדת - לייזר בכיוון).
   3. יש לוודא כי אמצעי האזהרה והבטיחות בכניסות למעבדה פועלים (לדוגמא: אינטרלוק, מנורת האזהרה), והעובדים יודעים היכן נמצא מפסק החירום ללייזר.
   4. דלת המעבדה סגורה, הוילון ברחבת ההיערכות מוגף ומונע יציאת האלומה מהמעבדה.
3. **הכנת ציוד**
   1. הכן וזהה את כל הציוד והחומרים הדרושים לכיוון לפני תחילת העבודה, כגון: כלים, מטרות, חוסמי אלומה, מד -הספק, אמצעים לקביעת פרופיל האלומה, משקפי מגן מתאימים לתכונות וסיכוני הלייזר, מטף וציוד עזרה ראשונה.
   2. כל דרישה הנוגעת למידע או אמצעים בנושא בטיחות לייזר יש להפנות בדוא"ל ל: Yehuda.moshayev@weizmann.ac.il.
4. **בטיחות בשולחן האופטי**
   1. יש להסיר מהגוף, תכשיטים (שעונים, טבעות, תגים, שרשראות) וכל אביזר העלול לבצע החזרה של אלומת הלייזר לפני התחלת הכיוון. יש להשתמש בכלים שאינם מחזירים.
   2. הסר את כל הציוד המיותר שאינו נחוץ לכיוון, כמו: כלים (מברגים, מפתחות, רכיבים אלקטרוניים, אופטיקה), כדי למזער את האפשרות של השתקפות והחזרת אלומה.
   3. פנה גישה ומפגעי בטיחות סביב השולחן האופטי כגון: כבלים, סיבים אופטיים, פינות חדות וחומרים מסוכנים.
   4. השתמש בחסמי אלומה כדי לחסום את אלומת הלייזר מפגיעה ישירה ומאלומה מוחזרת.
   5. בעת הכיוון, יש להימנע מלבוש סינטטי דליק. מומלץ ללבוש חלוק כותנה.
   6. יש לבחון היבטים למניעת חשמל סטטי במעבדה (חיכוך בווילונות, חוסר לחות).
5. **משקפי מגן ללייזר**
   1. יש לוודא שמשקפי המגן מותאמים ללייזר שבשימוש.
   2. חובה על כל הנוכחים באזור סכנת הלייזר, להרכיב משקפי מגן ללייזר
   3. (אזור סכנת הלייזר, בעת הכיוון, הינו כל שטח המעבדה שיש בה לייזר. הפרת סעיף זה מהווה סכנה מיידית לנוכחים במעבדה).
6. **זיהוי אלומת הלייזר** 
   1. צפייה ישירה בעין (intra beam) לכיוון האלומה הינה אסורה. הצפייה מותרת באמצעות עזרים לצפייה בלבד, לדוגמה, התקנים פלורוסנטיים.
   2. בעת שימוש בעזרים להדמיית האלומה, יש להגיע אל האלומה לאט ובזהירות עם כרטיס נטוי מעט כלפי מטה, על מנת לראות את השתקפות האלומה המפוזרת. יש להתאים את האופטיקה, כך שהאלומה תפגע בכרטיס ממש לפני שטח הרכיב.
   3. כאשר צופים בקרינה בלתי נראית, על ידי שימוש בכרטיסי IR, על המכוון להיות מודע לכך שעלולות להיות השתקפויות והחזרות ספקולטיביות בחלק מן האמצעים הללו.
7. **הנחיות בכיוון האלומה**
   1. כיוון אלומת הלייזר יבוצע בעוצמת האלומה המינימלית האפשרית.
   2. בצע את ההכוונות לפי ספר השירות של הלייזר.
   3. חסום כל מהלך אלומת לייזר שלא בשימוש או אלומת לייזר מוחזרת.
   4. הכנס אלמנטים אופטיים רק כאשר האלומה חסומה. הדק את האלמנטים, שקול אפשרויות ההחזרות והפיזורים וטפל בסכנות הנובעות מכך. הוסף חוסם אלומה לאחר האלמנט האופטי, ולאחר מכן העבר את האלומה אל האלמנט האופטי הבא.
   5. הקפד, במידת האפשר, שהאלומה תהיה אופקית ומקבילה לשולחן האופטי.
   6. במקרה שיש צורך להגביר את עוצמת האלומה, שים לב כי תיתכן הצתה מאלומת הלייזר.
8. **סיום הכיוון:**
   1. בסוף הכיוון החזר את המערכת למצב פעולה רגיל (שים לב לכיסוי המגן, אינטרלוק, וחסמים).
   2. וודא הפעלה רגילה.
9. **במקרה חרום:**
   1. בכל מקרה חירום, תאונה או כמעט תאונת לייזר יש לדווח מיידית למוקד החירום 08-9342999 ,לממונה בטיחות לייזר, מושיאב יהודה טל' 050-9001995 , 08-9345155 ולממונה הישיר.

במקרה של פגיעה או חשד לפגיעה מלייזר יש להתפנות מיידית למיון בבית חולים.

**4.3 הנחיות בטיחות לעבודה במערכות לייזר כלואות (סגורות)**

1. **המטרה**  
   להצביע על סיכוני הלייזר בעבודה עם לייזר במערכת כלואה/סגורה (כגון: מיקרוסקופ קונפוקאלי, מכשירי Facs וכד') ולהימנע מפגיעה הנובעת מחשיפה לאלומת הלייזר המופעלת במערכת לייזר כלואה בעת העבודה.
2. **הגדרות**
   1. אזור סיכוני לייזר - אזור שבו מופקת קרינת לייזר, והחשיפה הצפויה בו בפעילות שגרתית, בתקלה או בתאונה, עלולה לעבור את החשיפה המרבית המותרת.
   2. מוצר לייזר - התקן, מכשיר או מכונה הפולטים קרינת לייזר, לרבות מוצרים שאינם מוגמרים.
   3. "מוצר לייזר "כלוא" EMBEDDED" - מוצר לייזר שהותקנו בו אמצעים הנדסיים המגבילים את רמת הפליטה המרבית הנגישה של קרינת הלייזר.  
      הלייזר מסווג ברמת סיכון נמוכה מזו שנקבעה לו.
   4. מוצר לייזר מסוכן - מוצר לייזר המסווג ברמת סיכון 3R, הפולט קרינת לייזר שאינה בתחום האור הנראה, או מוצר לייזר בדרגת סיכון 3B או 4.
   5. משקפי מגן למוצרי לייזר - משקפי מגן לפי ת"י 4141 חלק 10.
   6. "קרינת לייזר - קרינת אור קוהרנטית, כיוונית, המרוכזת בתחום צר של אורכי גל, המיוצרת או מוגברת באמצעות תהליך מבוקר של פליטת קרינה מאולצת.
   7. רמת סיכון - סיווג הסיכון של מוצרי לייזר על פי גבול הפליטה הנגישה שלהם.
   8. רמת סיכון 1 (Class 1) - מוצר לייזר שרמת קרינתו אינה מסוכנת.
   9. רמת סיכון 3B (Class 3B) - מוצר לייזר שפגיעת קרינתו באלומה ישירה מסוכנת לעין בכל זמן חשיפה שהוא, אך בדרך כלל איננה מסוכנת לעור.
   10. 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.
3. **רקע**

במכון ויצמן למדע עובדים עם מערכות לייזר שונות. חלק ממערכות הלייזר בנויות כך, שאלומת הלייזר כלואה ומוגנת באמצעות מס' התקני בטיחות הנדסיים, המונעים חשיפה לאלומת הלייזר.

מיקרוסקופ קונפוקאלי: עיקרון המיקרוסקופ הקונפוקאלי הוא שימוש בפילטרים המבטלים אור שמקורו מחוץ לפוקוס, אור המפריע להיווצרות תמונה ברורה במיקרוסקופ. תכונה זו מאפשרת לצפות בדוגמאות באיכות גבוהה יותר מאשר במיקרוסקופ רגיל.

FACS: מיון תאים על ידי פלורסנציה (Fluorescence Activated Cell Sorting)לפי מאפייני גודל, גרגור. בשיטה זו לוקחים את אוכלוסית התאים הנבדקת ומזריקים אותה לתוך זרם דק של נוזל. התא עובר מול מספר מקורות אור ולייזרים, ופיזור האור/פלורסנציה נמדדים ונשמרים.

* 1. מקור התאורה הוא לייזר המסווג בדרך כלל ברמת סיכון Class 3B, או Class 4.
  2. במיקרוסקופ קונפוקאלי מותקנים אמצעי מיגון הנדסיים, כגון: דלת ואינטרלוק המונעים יציאה של קרן הלייזר מחוץ למיקרוסקופ כך שרמת הסיכון שלו יורדת לרמת סיכון של Class1 (מערכת מסוג 1- EMBEDDED). לפיכך, בשימוש רגיל לפי הוראות היצרן, אין סכנה מהלייזר, ולכן העובדים אינם זקוקים לאמצעי מיגון מיוחדים.
  3. בעת מתן שירות (תיקון, כיוון וכד'), כאשר עוקפים את האינטרלוק וחושפים את האלומה רמת הסיכון של המערכת הינה בהתאם לדרגת הסיכון של הלייזר, כלומר דרגה 3B או דרגה 4.  
     בעת מתן שירות יש להשתמש בכל דרישות הבטיחות המתאימות לדרגת הסיכון של הלייזר כפי שמפורט להלן.

1. **סמכות ואחריות**
   1. באחריות ראש המעבדה/מיתקן לוודא כי כל משתמש במערכת לייזר סגורה ו/או במיקרוסקופ קונפוקאלי:
      1. ביצע הדרכת בטיחות שנתית (משתמש חדש יודרך עם תחילת עבודתו) בנושא סיכוני קרינת לייזר והגנה מפניהם, (מיקרוסקופ קונפוקאלי - הוראות לעבודה בטוחה) .
      2. קרא את הוראות הבטיחות מספר הוראות הפעלת המכשיר.
      3. חתם על טופס התחייבות בו הוא מתחייב למלא את כל הוראות הבטיחות בעבודה עם מיקרוסקופ קונפוקאלי
      4. בדק, לפחות פעם בשישה חודשים, או לאחר כל טיפול או ביקורת טכנאי, את תקינות האינטרלוק של מקור הלייזר (פתיחת הדלת תפסיק את פעולת הלייזר) ורשם את פרטי ותאריך הבדיקה ביומן השירות של המיקרוסקופ.
   2. במקרה תקלה או צורך בשינוי במערכת, באחריות ראש המעבדה/מיתקן:
      1. להזמין נציג שירות או טכנאי מוסמך של ספק מערכת הלייזר הסגורה ו/או המיקרוסקופ לטפל בתקלה או לבצע שינויים.
      2. לוודא כי הטיפול במערכת הלייזר הסגורה ו/או המיקרוסקופ הקונפוקאלי בוצע כנדרש והתקני הבטיחות לא נפגמו.
2. **שיטה/מהות**

על ספק מערכת הלייזר הסגורה ו/או המיקרוסקופ לספק:

* + 1. מדבקה על גבי מערכת הלייזר הסגורה ו/או המיקרוסקופ המגדירה את רמת הסיכון של הלייזר לפי דרישות תקן ת"י 60825 חלק 1.
    2. אינטרלוק SAFE FAIL מעל תא הלייזר המחובר למערכת הלייזר ומפסיק את פעולתו ברגע פתיחת הדלת או המכסה.

1. **דרישות בטיחות מהמשתמשים במערכת לייזר כלואה:**

* לפני התחלת העבודה/שימוש במיקרוסקופ יש לקבל, מראש המעבדה/ היחידה, הדרכה על מבנה המיקרוסקופ, אופן הפעלתו, הסיכונים, כולל סיכוני לייזר ודרישות הבטיחות בעבודה.
* לקרוא (כמשתמש חדש או עובד מתרענן פעם בשנה) את הדרכות בטיחות בנושא סיכוני קרינת לייזר והגנה מפניהם, ממיקרוסקופ קונפוקאלי - הוראות לעבודה בטוחה).
* לקרוא (כמשתמש חדש או עובד מתרענן פעם בשנה) את הוראות הבטיחות שבספר הוראות הפעלת המכשיר.
* לחתום על טופס התחייבות למלא את כל הוראות הבטיחות בעבודה עם מיקרוסקופ קונפוקאלי.
* אסור לפרק או לפתוח את המכסים של המיקרוסקופ.
* יש לדווח לממונה הישיר/טכנאי אחראי על כל תקלה או חשש לתקלה במערכת.
* אסור למפעיל/משתמש לעשות כל שינוי בחלקי המסלול האופטי של המערכת.
* בעת מתן שירות למערכת אין כניסה לחדר בו מצויה המערכת לעובדי מכון ויצמן בכל סטטוס.

1. **נוהל ביצוע עבודות תחזוקה למוצרי לייזר כלואים (דרגה 1) בהם קיימת אלומת לייזר בדרגת סיכון 3B או 4**
   1. עבודות התחזוקה והשירות יבוצעו רק ע"י נציגי היצרן, שהוסמכו לכך והמכירים היטב את מערכת הלייזר ואת כל הסיכונים הנלווים.
   2. איש השירות יציג אישור בר תוקף על הרשאתו לעבוד בלייזרים מסוכנים.
   3. איש השירות יחתום על טופס הצהרה (להלן: "נספח א' - הצהרת נותן שירות למערכת לייזר/מערכת כוללת לייזר") בו הוא מתחייב לעבוד בהתאם לתקנות והוראות הבטיחות בעבודה בלייזרים.
   4. איש השירות ישתמש בציוד מגן אישי לכיוון והגנה מפני קרני לייזר לפי ת"י 4141 חלק 10 וחלק 11 ( EN207, EN208 )
   5. איש השירות ישתמש אך ורק בציוד אשר הביא אתו ולא בציוד של מכון ויצמן למדע.
   6. יש לשלט את האזור המגודר בשלטים הבאים: "סכנה! הכניסה למורשים בלבד" ושלט אזהרה מקרינת לייזר עם כיתוב בהתאם לרמת סיכון הלייזר.
   7. בעת ביצוע העבודה לא יימצא איש בחדר/אולם פרט לאיש/אנשי השירות הנ"ל.
   8. לפני ביצוע עבודות תחזוקה יש להציב מסכי מגן בין המערכת ודלתות הכניסה לחדר/אולם או להציב ווילון עמיד מפני אלומת לייזר סמוך לדלת כניסה. יש לכסות את כל החלונות בחדר בווילון חסין אש.
   9. יש לוודא שכל דלתות הכניסה לחדר נעולות ונורות האזהרה דולקות, ואין אפשרות כניסה לחדר.
   10. אם לא נדרש להפעיל את מערכת הלייזר בעת ביצוע עבודת התחזוקה, יש לכבותה. אם קרן הלייזר הכרחית לצורך העבודה, אזי יש לצמצם ככל האפשר את משך זמן ההפעלה ואת עוצמת האלומה למינימום ההכרחי.
   11. חובה להשתמש באמצעי מיגון כולל משקפי מגן המתאימות לסוג הלייזר.
   12. הקרן תכוון לאזורים מבוקרים בתוך המערכת בלבד. בשום אופן אין להפעיל את הלייזר, כאשר הוא מכוון לאזורים אחרים כגון: גוף המפעיל, דלת הכניסה או החלונות.
   13. באזור העבודה לא יימצאו חומרים דליקים או נפיצים.
   14. עבודות שירות ותחזוקה והעובדים שיבצעו את העבודה מותנים באישור ממונה בטיחות לייזר.
   15. רק אנשים שעברו הדרכת בטיחות מתאימה והמצוידים באמצעי מיגון מתאימים לסיכון הלייזר (משקפי מגן מתאימות לסוג הלייזר, לבוש וכד') רשאים להישאר באזור סיכון הלייזר.
   16. בסיום השירות, על הטכנאי להחזיר את המערכת למצב עבודה רגיל, כולל כל התקני הבטיחות שלה.
   17. בסיום העבודה יש לבדוק ולוודא כי האינטרלוק ומערכות בטיחות אחרות, במידה שיש כאלה, פועלים כהלכה, יש לרשום זאת ביומן השירות של המיקרוסקופ.
2. **במקרה חרום:**
   1. יש לפעול לפי הוראות החירום ולדווח למוקד המכוני 08-934**2999**.

8.2 על כל מקרה של תאונה או כמעט תאונת לייזר יש לדווח מיידית למוקד

המכוני 08-934-2999 , לממונה בטיחות לייזר, מושיאב יהודה טל'

050-9001995, 08-9345155 ולממונה הישיר.

8.3 בכל מקרה של פגיעה או חשד לפגיעה מלייזר יש לפנות מיידית למיון בבי"ח.

**5. טופס הצהרת נותן שירות למערכת לייזר/מערכת כוללת לייזר**

שם החברה הנותנת שירות:\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

סיווג העבודה:\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

משך עבודה: מתאריך: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ ועד תאריך: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

אני החתום מטה מצהיר כי יש ברשותי אישור בתוקף מהחברה בה אני מועסק, לעסוק במכשירים ו/או מוצרי לייזר, לרבות, הכרה של הוראות ואמצעי בטיחות בעבודה בלייזר מהיצרן ומהחברה, ברמת סיכון הלייזר בו אני נותן שירות.

אני מתחייב בזאת לפעול על פי תקנות הבטיחות בעבודה (גהות תעסוקתית ובטיחות העוסקים בקרינת לייזר), התשס"ה―2005 \* וכל דין או חוק בישראל וכי אין בהוראות אלה לגרוע מאחריותי לפי כל דין.

אני מתחייב לנקוט באמצעי בטיחות בהתאם לתקנים ישראלים בעיקר ת"י 60825 חלק 1 ואמצעי מיגון באישי בהתאם לתקן ישראלי ת"י 4141 חלק 10 ו 4141 חלק 11 (207EN ו 208EN) ויש ברשותי הציוד לביצוע השירות כולל ציוד מגן אישי.

אני החתום מטה, המועסק בשטח מכון ויצמן למדע, מצהיר בזאת כי הובאו לידיעתי הוראות ונהלי הבטיחות הנהוגים במכון ויצמן למדע, כמו כן נהירים לי הסיכונים האפשריים בשטחו ובמתקניו.

הנני מתחייב בזאת לקיים את כל דרישות הבטיחות והגהות, סדרי העבודה והמשמעת הנהוגים במכון ויצמן למדע, ולנהוג בהתאם לכל הוראות אנשי יחידת הבטיחות של מכון ויצמן למדע כפי שיינתנו לי מעת לעת.

ידוע לי כי במידה שלא אעמוד בדרישות הבטיחות יינקטו נגדי צעדים שונים כגון: הפסקת עבודה זמנית ועד להרחקתי ממקום העבודה. במקרה זה לא אהיה זכאי לכל תשלום או פיצוי בגין כך.

על החתום, נותן השירות:

שם: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

מס' ת"ז \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

שם החברה: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

כתובת: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

חתימה: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

תאריך: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**6. משקפי מגן וסנן אופטי לאלומת לייזר**

המסנן האופטי המשולב במשקפי המגן צריך להנחית את עוצמתה של אלומת הלייזר, הפוגעת בו, לערך נמוך יותר מהערך של MPE המוגדר ללייזר הנתון.

ע"פ התקן האירופי EN 60825 שאומץ בתקן הישראלי ת"י 60825, דרישות למשקפי המגן נקבעות לכל סוגי הלייזרים: DL - לייזר רציף, IL - לייזרי פולסים בהם משך הפולס בתחום מילי ומיקור שניות,  RL עבור לייזרי פולסים, בהם משך הפולס בתחום ננו שניות, ו-ML  עבור לייזרי פולסים, בהם משך הפולס בתחום פנטו שניות. ערכים אלה מופיעים על המשקפיים.

ערכי ה- DL, IL, RL ML נקבעים ע"פ עוצמת הלייזר, כלומר צפיפות ההספק או צפיפות האנרגיה של האלומה. ככל שעוצמת הלייזר גבוהה יותר, כך הערכים הנ"ל גבוהים יותר. הערכים המספריים מופיעים צמוד ל- DL, IL, RL ML מביעים את חוזק ההנחתה של המשקפיים. במידה והמשקפיים מתאימים ללייזר, הנחתה זו אמורה להפחית את עוצמת האלומה לערכים נמוכים מ- MPE.

לדוגמא, ללייזר Fiber שאורך הגל שלו 1550 nm, עבור אלומה רציפה שצפיפות ההספק שלה היא 2 x105 W/m2 נדרש DL 3 @ 1550 nm, ואילו עבור אלומה רציפה שעוצמתה 5 x109 W/m2 נדרשים משקפי מגן עם DL 7 @ 1550 nm.

דוגמא נוספת – להגנה ללייזר ירוק Nd :YAG באורך גל 532 nm עם פולסים במשך זמן של 3 nsec וצפיפות אנרגיה של 4 J/m2 נדרשים משקפי מגן RL 3 @ 532 nm, ואילו בעוצמת פולס של 7 x105 J/m2 נדרש RL 9 @ 532 nm. ערכים אלה נתונים בטבלה בתקן, לפי צפיפות ההספק והאנרגיה לאורכי הגל השונים של האלומות.

ללייזרים רציפים ערכי ה-DL נקבעים לפי צפיפות ההספק ואורך הגל של האלומה. ללייזרי פולסים ערכי ה-IL, RL ו ML נקבעים לפי צפיפות האנרגיה של האלומה, משך הפולסים ואורך הגל של הלייזר.

הערכים הנ"ל מופיעים על משקפי המגן כאשר מובא בחשבון באילו תחומי אורכי גל המשקפיים מספקים את ההגנה הנ"ל. משקפיים המספקים הגנה ללייזרים בתחום אורך גל מסוים עלולים להיות שקופים בתחום אורכי גל אחרים. על כן, המשתמשים חייבים להיות מודעים לתחום אורכי הגל בו המשקפיים מספקים את ההגנה, ולא להשתמש במשקפיים המתאימים למערכת אחת בעבודה עם מערכת אחרת. כמו כן, אין להעביר משקפיים בין מעבדות ללא אישור ממונה בטיחות לייזר.

**. מכשירי לייזר במכון ויצמן למדע**

במכון ויצמן למדע נמצאות בשימוש מערכות לייזר פתוחות ומערכות לייזר כלואות: **מערכות לייזר פתוחות** – מערכות אופטיות עם גישה ישירה לאלומות הלייזר אשר נמצאות על שולחנות אופטיים. מהלך אלומת הלייזר ממוקם במקביל למישור השולחן האופטי.

**מערכות לייזר כלואות (סגורות**) - מערכות הבנויות כך שאלומת הלייזר כלואה ומוגנת בתוך המכשיר באמצעות התקני בטיחות הנדסיים המונעים גישה וחשיפה לא מבוקרת לאלומת הלייזר, בהם: מערכת FACS ומרבית המיקרוסקופים הקונפוקאליים.

יש להתחשב בעובדה שפגיעתה האקראית של אלומת הלייזר בגוף האדם עלולה להסתיים בנזק ממשי, ולכן יש לעשות ככל שניתן כדי למנוע זאת. באתר זה נציג את תכונותיה העיקריות של אלומת הלייזר, מנגנוני האינטראקציה שלה עם הרקמה הביולוגית, ואת מערך הבטיחות שנבנה במכון ויצמן למדע. המידע נועד לתת כלים למשתמשים במערכות הלייזר על מנת למנוע חשיפה לסיכונים הפוטנציאליים מאלומת הלייזר.

**2. הלייזר ושימושו**

**2.1 תכונות אלומת הלייזר**

המונח  **LASER** נגזר מהמשפט  Light by Amplification Stimulated Emission of Radiation

דהיינו, הגברת אור המתקבלת בתהליך של פליטה מאולצת של קרינה. תהליך זה מקנה לאלומת הלייזר שתי תכונות חשובות: קוהרנטיות ומונוכרומטיות.

אלומת הלייזר הינה אלומת "אור" בעלת צבע מוגדר, המשוגרת לכיוון מוגדר וידוע במרחב. התוצאה המעשית מתבטאת ביכולת לבצע עבודה יעילה עם אלומת לייזר, מה שלא ניתן (או קשה מאוד) לבצע עם מקורות האור האחרים. הסיבה לכך נובעת מחוקי האופטיקה השולטים על אלומת האור העוברת דרך עדשה אופטית. כידוע, עדשה מסוגלת למקד אלומת אור, העוברת דרכה, על מטרה הנמצאת במישור המוקד של העדשה, לכתם בעל קוטר מזערי. צפיפות הספק (או אנרגיה) האלומה על המטרה, נמצאת ביחס ישר להספק (או אנרגיה) אלומת האור העוברת דרך העדשה, וביחס הפוך לריבוע קוטר המוקד, שיוצרת האלומה על המטרה. לפיכך, כל מרכיבי אלומת הלייזר, בהיותם בעלי אורך גל זהה ואותה זווית פגיעה בעדשה, יתמקדו במרחק המוקד המוגדר לעדשה, ויצרו כתם בעל קוטר מזערי. התוצאה המעשית מכך היא שבאמצעות עדשה ניתן לאסוף את כל התפוקה של אלומת הלייזר, ולייצר על מטרה (המוצבת במישור המוקד של העדשה) צפיפות הספק גבוהה, לאין שיעור, מצפיפות ההספק שיכולה להיות מושגת ממקורות האור האחרים.

## צפיפות אנרגיה והספק אלומת הלייזר

אחת התכונות המייחדות את אלומת הלייזר ממקורות האור האחרים היא יכולתה להציג צפיפות הספק (או אנרגיה) גבוהה ביותר. תכונה זו מיושמת ביעילות לחיתוך חומרים, אבל אותה תכונה גורמת לאלומת הלייזר להיות מסוכנת במקרה של פגיעה בגוף האדם, במיוחד בעיניו.

**צפיפות ההספק** מבטאת את עוצמת שטף ההספק, ונמדדת ביחידות של וואט לסמ"ר (W/cm2). אלומת לייזר בהספק נומינלי של W 10, ניתן למקד לכתם זעיר, שקוטרו 0.2 מ"מ בלבד, ובו צפיפות הספק אדירה בערך של  3∙104 W/cm2. בלייזרים פולסיים ניתן להגיע בקלות לצפיפות הספק (הספק שיא בתוך הפולס) בערכים של W/cm2 109 ואף יותר.

## מהותה של אלומת הלייזר

קרינת הלייזר, על כל סוגיה, משתייכת לתחום הקרינה האלקטרומגנטית, שבה השדה החשמלי והשדה המגנטי מתקדמים כשהם מצומדים וניצבים זה לזה.

מערכות הלייזר, הרלוונטיות לשימושים השונים של הלייזר, מפיקות קרינה בתחום האופטי, הכולל את קרינת האולטרה סגול, האינפרה אדום, והתחום הנראה הנמצא בתווך שביניהם.

קרינת האולטרה סגול : UV הינה בעלת אורכי הגל הקצרים ביותר בתחום האופטי - מ-400nm )אולטרה סגול קרוב(  ועד 10nm (אולטרה סגול עמוק).

אורכי הגל בתחום הנראה נעים בין 400nm (סגול) ל- 700nm (אדום).

בתחום האינפרה אדום אורכי הגל ארוכים יותר, החל מ-700nm (אינפרה אדום קרוב) ועד 1mm (קצה האינפרה אדום הרחוק).

הגל האלקטרומגנטי המכיל את מנת האנרגיה הבסיסית בתחום האופטי, נקרא **פוטון**. הפוטון נושא אנרגיה ("מנת קרינה" בסיסית) התלויה בתדירות (**f**) הספציפית שלו.

ערך אנרגיה זה (**Ep**) ניתן לחישוב, לפי: **Ep = h·f = h(c/l)**

 כאשר **h** מייצג את הערך 6.626**·**10-27 erg∙sec, הידוע בשם **קבוע פלנק** (על שם הפיזיקאי Max Planck).

משמעות הקשר היא שהאנרגיה שמכיל פוטון גדלה, ככל שגדלה תדירות התנודה של הפוטון f. באותו אופן, ניתן לומר שאנרגיית הפוטון גדלה, ככל שאורך הגל (l) שלו מתקצר. פוטונים בתחום האולטרה סגול נושאים את האנרגיה הגבוהה ביותר בתחום האופטי, ומשום כך הם מהווים פוטנציאל סיכוני שיש לנקוט באמצעי הגנה מפניו.

**2.2 אלומת הלייזר במעבדות מחקר**

המניע העיקרי בפיתוח סוגים שונים של לייזרים הוא קבלה של אורכי גל שיתאימו לשימוש זה או אחר. למעשה, אורך הגל הוא הפרמטר העיקרי המבדיל בין הלייזרים השונים, והתאמת השימוש הנתון נקבעת לפי אורך הגל. מרבית הלייזרים מפיקים אלומה, המאופיינת ע"י אורך גל יחיד, הנקבע ממבנה רמות האנרגיה שבתווך הלזירה. ישנם לייזרים שבתווך הלזירה שלהם נוצרים תנאים להפקה של שני אורכי גל, ולפעמים גם יותר. בנוסף, ניתן לקבל מאורכי הגל הקיימים אורכי גל אחרים באמצעות הכפלה הרמונית (HG) ומתנדים פרמטריים (OPO).

**אלומת הלייזר ורכיבים אופטיים במעבדה**

הסיכון הטמון באלומת הלייזר נובע מיכולתה להציג צפיפות הספק גבוהה במיוחד. כאשר אלומת לייזר פוגעת ברכיבים אופטיים, נוצרים יחסי גומלין ביניהם, באופן שמאפייניה של אלומת הלייזר עשויים להשתנות. הדבר עשוי להשפיע על כיוון המשך התקדמותה של האלומה ו/או שינוי צפיפות ההספק שבתוך האלומה. לכן, בהערכת הסיכונים, יש חשיבות לדעת מהם השינויים החלים במאפייני האלומה כתוצאה מפגיעתה ברכיבים אופטיים שעשויים להימצא במעבדה.

**משטחים מחזירים ומפזרים**

אלומת הלייזר עשויה לפגוש, במהלך התקדמותה, משטחים החוסמים את התקדמותה בכיוון המקורי ומפנים אותה לכיוון (או לכיוונים) אחר. תוצאות המפגש בין אלומת הלייזר והמשטח תלויות באורך הגל של אלומת הלייזר ובאופי המשטח. קיימים שני סוגי החזר: החזרת ראי (Specular Reflection) או החזרה מפוזרת (Diffused Reflection).

**החזרת ראי**

החזרת ראי מתקבלת כאשר המשטח המחזיר מלוטש היטב, עד כדי כך שאי הרגולריות של המשטח קטנה מאורך הגל של אלומת הלייזר. בדרך כלל, נדרש ליטוש בדרגת אי רגולריות נמוכה מ- l/4, דהיינו כ- 0.15 mm עבור אלומת לייזר בתחום נראה. בתחום האינפרה אדום, מקובל להשתמש במראות מתכתיות מלוטשות המצופות בשכבה דקה של כסף או זהב כדי לשפר את יעילות ההחזר.

**החזרה מפוזרת**

החזרה מפוזרת מתקבלת כאשר אי הרגולריות של המשטח המחזיר גדולה מאורך הגל של אלומת  הלייזר. לגבי אלומת לייזר בתחום הנראה, אי  רגולריות  בשיעור של כ-5 mm, די בה כדי שתגרום להחזרה מפוזרת. האלומה המוחזרת מפוזרת למחצית המרחב, עם משקל עוצמה יחסי לפונקציית הקוסינוס.

**3. סיכוני לייזר**

**3.1 סיכונים בעבודה עם לייזר**

תכונת הכיווניות של אלומות הלייזר מקנה לה את היכולת להציג צפיפות הספק (W/cm2) גבוהה במיוחד. תכונה זו, יחד עם היות אלומת הלייזר בעלת אורך גל מוגדר (או מספר אורכי גל בדידים ומוגדרים), מאפשרת, בעזרתה של עדשה מצויה, למקד את אלומת הלייזר לכתם זעיר, שבו גדלה צפיפות ההספק, הגבוהה ממילא, בכמה סדרי גודל.

כושרו של הלייזר לרכז הספק גבוה בנקודה זעירה הוא הבסיס לשימושי הלייזר בתחומים רבים במדע, וככלי חיתוך רב עוצמה של מתכות, חומרים קרמיים קשים ואף יהלומים. מנגד, צפיפות ההספק הגבוהה מעוררת היבטים בטיחותיים בסביבת העבודה עם מערכות לייזר, שכן התפוקות הנומינליות של מרבית מערכות הלייזר גדולות לאין שיעור מרמות הסף המותרות בחשיפה לעיניים או לעור.

**סיכונים ביולוגיים של הלייזר**

חשיפת העין לאלומת הלייזר עלולה במקרים רבים להסתיים בפגיעה קשה ביכולת הראייה, וגם פגיעתה בעור עלולה להסתיים בכוויה עמוקה ומכאיבה. משום כך, חשוב להכיר את הנזק הפוטנציאלי ותלותו במאפייניה השונים של אלומת הלייזר, כגון: אורך גל, עוצמה, משך החשיפה ועוד. מידע זה יאפשר לנו, בשלב הראשון, לבנות סולם סיכונים שחומרתם הולכת וגדלה במעלה הסולם, ובשלב השני נוכל לבחון כל לייזר נתון, ולמפות את מיקומו בסולם הסיכונים. אורך הגל הספציפי של לייזר נתון, יחד עם מיקומו בסולם הסיכונים, יאפשרו לקבוע, במידה רבה של ודאות, את אמצעי המיגון הנדרשים לעבודה בטוחה עם הלייזר המסוים ובסביבתו.

חשיפה רגעית (או ארוכה יותר) של רקמה כלשהי לאלומות הלייזר עלולה להסתיים בנזק ממשי הנגרם באמצעות אחד, או יותר, משלושת מנגנוני הנזק הבאים:

1. **נזק פוטו תרמי:** קרן הלייזר גורמת לתנודות במולקולות ברקמה הביולוגית, נוצר חום ברקמה. הנזקים לרקמה נעים משינוי תכונות החלבון (אלבומין) לכוויות, אידוי רקמה עד להתפחמות .
2. **נזק פוטו אקוסטי:** צפיפות הספק גבוהה גורמת לטמפ' מקומית גבוהה, הנוזלים בתאי הרקמה משנים את מצב הצבירה לגזים המשנים את נפחם, נוצר גל הלם מכני המתפשט לתאים הסמוכים ועלול לגרום לקריעתם.
3. **נזק פוטו כימי:** אורכי גל מסוימים בתחום ה-UV והאור הכחול יוצרים תגובות בין מולקולות אורגניות או שהם שוברים קשרים כימיים במולקולות. האפקט ארוך טווח.

בפועל, מנגנון הנזק הדומיננטי, בכל מקרה ומקרה, תלוי במאפייני אלומת הלייזר ובמאפייני הרקמה כאחד.

**סיכונים פיזיקליים של הלייזר**

**גרימת אש ופיצוץ**: לייזרים בעוצמות גבוהות עלולים לגרום להתלקחות חומרים דליקים (בד, נייר, פלסטיק, עץ וכו') ולפיצוץ במגע עם נוזלים וגזים דליקים.

**סכנת התחשמלות**: נגרמת עקב מתח הזנה גבוה למערכות לייזר.

**סיכוני קרינה UV** (בלתי מייננת): קרינה בתחום ספקטראלי זה, מקורה במנורות הבזק ושפופרות פריקה של לייזר רציף (CW), במיוחד כאשר משתמשים בצנרת או במראות להעברה של אלומות קרינת ה-UV (כמו קוורץ).

**סיכוני קרינה מייננת וקרינה בלתי מייננת**:

לייזר אקסימר בו משתמשים בשפופרות פריקת גז אלקטרוניות ((gas electron tubes, שפופרות אלה פועלות במתח גבוה בין האלקטרודות שלהם. 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 וקרינת חשמל (ELF)
* פליטת קרינת רנטגן (X-ray).

**סיכונים כימיים של הלייזר**

**אידוי חומרים רעילים**: פגיעה של קרן הלייזר בחומרים כימיים עלולה לגרום לאידוי חומרים רעילים לחלל החדר.

**סיכונים כימיים ממקור הלייזר עצמו**:

* לייזר צבע המכיל כימיקלים רעילים
* לייזרים המכילים גז רעיל כגון פלואור
* דליפה של נוזלי קירור של הלייזר
* סכנת דחיקת חמצן בשימוש בלייזרים עם שימוש בגזים אינרטיים (חנקן, הליום)

**3.2 נזקי הלייזר לעור ולעיניים**

מכל איברי הגוף, העור והעיניים הם היחידים העלולים להיחשף לקרינת לייזר מזיקה. מקור הנזק לאיברים אלה עשוי להיות מורכב מכל שלושת מנגנוני הנזק שתוארו קודם (תרמי, אקוסטי וכימי), אבל התרומה היחסית (לנזק) של כל אחד מהם עשויה להיות מושפעת מהאנטומיה וממרכיבי הרקמות המיוחדים לעור או לעין. בנוסף, כשאנו דנים באופי הנזק העלול להיווצר, יש לקחת בחשבון את מנגנוני ההגנה הטבעיים העוזרים לנו, בתנאים מסוימים, ולהקטין את חומרת הנזק באופן הבא:

* תחושת הכאב המתפתחת בתחילתה של כוויה גורמת לנו להסיט את האיבר שנחשף לאלומת הלייזר, ובכך להקטין את חומרתה של הכוויה האפשרית. תחושת הכאב מורגשת בעיקר בחשיפה לאלומות לייזר, בתחום הנראה והאינפרה אדום, בעלות צפיפות הספק גדולה יחסית.
* רפלקס העפעוף (סגירת העפעף) המופעל, כשהעין נחשפת לבהירות גבוהה של אור בתחום הנראה, מסייע בידנו להקטין את מידת הנזק העלול להתפתח מחשיפת העין לאלומת לייזר בתחום זה. זמן התגובה המרבי של העפעוף מוערך ברבע שנייה, ולכן הוא מספק הגנה מסוימת רק כנגד חשיפה הנמשכת למעלה מזמן זה.

קביעה של הנזקים המיוחדים לעור או לעיניים דורשת, אפוא, התייחסות למבנה הרקמות, בכל איבר בנפרד, ומיקום נזקי הלייזר האפשריים.

**נזקי עור**

עובי שכבת העור העליונה - האפידרמיס (Epidermis)0.1-0.2   מ"מ, כשלעניין האינטראקציה עם הלייזר מניחים שבשכבה זו קיימת תכולה רבה של מים ובתחתיתה גרנולות של מלנין. מתחת לאפידרמיס מצויה שכבת הדרמיס (Dermis), שעובייה עשוי להגיע עד 2 מ"מ, הבנויה מסיבי קולגן ואלסטין, וגם היא בעלת תכולת מים מרובה. בחלק זה מצויים כלי הדם הקפילריים, הקטנים, וכלי דם בקטרים גדולים יותר. השכבה התת-עורית מכילה בעיקר שומן (Fat). בפועל, בגלל המרכיבים הנמצאים ברקמת העור, מסוגלות אלומות הלייזר לגרום נזקי עור מכל הסוגים: תרמי, אקוסטי וכימי, כשאופי הנזק בכל מקרה ומקרה תלוי באורך הגל הנתון של אלומת הלייזר, בעוצמתה, ובגודלו של שטח החשיפה. לעניין הנזקים התרמיים והאקוסטיים, יש להזכיר שוב שחומרת הנזק יחסית לצפיפות ההספק של האלומה (W/cm2) במקום פגיעתה בעור.

**נזקי עיניים**

לעניין נזקי הלייזר הפוטנציאליים חשוב להדגיש את הנקודות הבאות:

1. הקרנית (Cornea) והעדשה (Lens) מהוות יחד את מערך ההדמיה האופטי של העין, שהוא בעל חוזק אופטי כולל של כ- 50 דיופטר (Diopter). למילוי תפקידן צריכות הקרנית והעדשה להיות בעלות דרגת שקיפות גבוהה, באופן שהדמות שהן יוצרות על הרשתית תהיה חדה וברורה. פגיעה פיזית ברקמות הקרנית והעדשה או פגיעה בדרגת שקיפותן ייחשבו לנזק.
2. הנוזל הזגוגי (Vitreous) נותן לגלגל העין את מבנהו הכדורי. בנוסף לכך, הוא חייב להיות בעל דרגת שקיפות גבוהה, מאותה סיבה (של הקרנית והעדשה). פגיעה בשקיפות הנוזל הזגוגי תיחשב לנזק.
3. הרשתית (Retina) משמשת משטח רגיש לאור שבו נבנית דמות האובייקט הנצפה, ובה מתבצעת התמרה של הדמות האופטית לאותות חשמליים המועברים למוח לעיבוד התמונה. הרשתית נמצאת על מישור המוקד של מערך ההדמיה האופטי, ותפקודה התקין מחייב הישארות צמודה לדופן הפנימית של גלגל העין. היפרדות הרשתית מהדופן הפנימית של גלגל העין או פגיעה בחלק משטחה ייחשבו לנזק.
4. מכל שטחה של הרשתית, למרכז הראייה (Macula, הכתם הצהוב) תפקיד מכריע בפעולת הראייה, שכן רק באזור זה קיימת יכולת הבחנה בין צבעים, ורק במרכזו של אזור זה (Fovea, שקוטרו כ- 0.25 מ"מ בלבד הנמצא על הציר האופטי של מערך ההדמיה) נוצרת דמות בעלת כושר הפרדה גבוה. במקרים רבים, נזק במרכז הראייה מסתיים, בפגיעה קשה ביכולת הראייה.

בגלל תכונת הכיווניות הגבוהה של אלומת הלייזר, היא נראית למערך ההדמיה האופטי כאובייקט הנמצא באינסוף (במרחק רב), שדמותו נבנית כנקודה זעירה על הרשתית. יתרה מכך, כאשר מתבוננים ישירות על אלומת לייזר, דמות זעירה זו נופלת ממש במרכז הראייה של הרשתית, צפיפות ההספק גדולה פי 122,500 עם סיכוי גבוה לפגיעה חמורה ביכולת הראייה, עד כדי עיוורון.

**3.3 ערכי סף לנזקים ביולוגיים**

מגוון הסיכונים הביולוגיים שמקורם בחשיפה לאלומת הלייזר, הוצגו בסעיף הקודם בהיבט האיכותי בלבד, מבלי לקשור בין הערכים של פרמטרי אלומת הלייזר (אורך גל, עוצמה וכד') למידת הנזק הצפויה. בעולם הממשי חייבים לכמת את מידת הנזק הצפוי, ולקשור אותו לערכי הפרמטרים של אלומת הלייזר. ניתוח כמותי של מידת הנזק, ואופן ההתייחסות לרמות הנזק השונות, נעשים בשלושת השלבים הבאים:

1. קביעת רמות חשיפה מותרות שאין בהן כל סיכון.
2. חלוקת רמות החשיפה הגבוהות יותר למספר דרגות סיכון.
3. קביעת אמצעי ההגנה הדרושים למניעת החשיפה לדרגות הסיכון השונות.

רמות חשיפה שאין בהן כל סיכון ביולוגי, הן כאלה שלא ניתן להבחין בהן באמצעי האבחון המקובלים (למשל, אופטלמוסקופ) מיד לאחר החשיפה לאלומת הלייזר, או מאוחר יותר. בגלל הפיזור הקיים במרכיבים האנטומיים של אנשים שונים (רמת פיגמנטציה שונה של העור, עובי האפידרמיס וכד'), ובגלל התלות של מידת הנזק בערך הממשי של מרכיבים אלה באזור החשיפה, לא ניתן לקבוע רמות חשיפה מותרות שיתאימו לכלל האוכלוסייה. במקום זאת, ניתן להגדיר רמות סף הנעזרות בממוצעים סטטיסטיים. משום כך, הקביעה של רמות הסף המותרות נעשית בשני השלבים הבאים:

1. קביעת ערך החשיפה **E**xposure **D**ose) ED50 )
2. קביעת סף החשיפה המותר MPE.

ערך החשיפה ED50 מציין את רמת החשיפה העלולה לגרום נזק מינימלי, שניתן להבחין בו, ב- 50% מכלל האוכלוסייה שנחשפה לרמה זו. ערך זה כולל בתוכו את ההתייחסות הסטטיסטית הנובעת מפיזור הערכים של המרכיבים האנטומיים. כמובן שרמת החשיפה הזו מסוכנת למחצית מכלל האוכלוסייה. לכן, כדי להגן על מרבית האוכלוסייה מגדירים רמת חשיפה נמוכה יותר :

MPE - **M**aximum **P**ermissible **E**xposure

המקיימת את הקשר הבא: **MPE = (ED50)/10**

ערך זה מציין את החשיפה המירבית המותרת בה אין סיכון. ההנחה היא שהגבלת החשיפה לעשירית הערך שמסוגל לגרום נזק מינימלי ב-50% מהאוכלוסייה, יש בה מקדם בטחון מספיק גדול להגנה על כלל האוכלוסייה. אבל, כבר כאן חשוב להדגיש, שלא ניתן לצאת בהנחה גורפת שכזו, ולמעשה חלק (קטן, אמנם) מהאוכלוסייה עלול להינזק גם בחשיפה לערך המוגדר ע"י MPE. הסיבה לכך קשורה באופן הגדרת הערך MPE, הגדרה המתבססת על ממוצע סטטיסטי. במקרים אלה, לכל רף שיוצב, נמוך ככל שיהיה, תמיד יימצא האינדיבידואל שיינזק גם בערכים הקטנים מהרף שנקבע. כלומר, גם הורדת הרף של MPE למאית ערכו של ED50 (או לפחות מכך) אין בה כדי להבטיח הגנה על כלל האוכלוסייה. מן הצד האחר, קביעת MPE על ערך השווה ל- ED50/100, או קטן יותר, הייתה מקשה מאוד על אפשרויות השימוש בטכנולוגיית הלייזר מבלי להבטיח הגנה מלאה לכלל האוכלוסייה. הפשרה בין הסיכונים לצרכים נמצאה בהגדרת ערכו של MPE בתוספת ההוראה הכללית, האומרת: "לא לנקוט בפעולות שאינן נחוצות, גם אם הן כרוכות בחשיפה לערכים נמוכים יותר מהמותר".

**3.4 סיווג רמות הסיכון של מערכות הלייזר**

רמת הסיכון של הלייזר מסווגת על פי גבול הפליטה הנגישה לאלומת הלייזר, ומאפשרת להתאים ללייזר "חבילת בטיחות". הסיווג (Classification) נעשה לפי דרגת הנזק הפוטנציאלי שאלומת הלייזר מסוגלת לגרום, בהתאם לקריטריונים הבאים:

* עוצמת אלומת הלייזר ביחס לערך החשיפה המירבית המותרת (MPE).
* יכולת האלומה הישירה או המפוזרת לגרום לנזק לעין.
* ****יכולת האלומה הישירה לגרום נזק לעור או לגרום להצתה של חומרים דליקים.

**רמת סיכון 1: (Class 1)**

מוצר לייזר שרמת קרינתו אינה מסוכנת. ייתכן גם מצב בו לייזר מסוכן נמצא בתוך מעטפת, ומערכות הבטיחות אינן מאפשרות מעבר אלומת לייזר מסוכנת. עקיפת מערכת הבטיחות עלולה להעלות את רמת הסיכון של הלייזר.

**רמת סיכון 1M: (Class 1M)**

מוצר לייזר שרמת קרינתו אינה מסוכנת דרך כלל; מוצר זה עלול להיות מסוכן לעין כאשר צופים בקרן הלייזר בעזרת מערכת אופטית מרכזת.

**רמת סיכון 2: (Class 2)**

מוצר לייזר הפולט בתחום האור הנראה (nm 400-700).רמת קרינתו מסכנת את העין רק אם החשיפה נמשכת יותר מ-0.25 שניות (זמן התגובה הארוך ביותר לרפלקס המצמוץ).

**רמת סיכון 2M: (Class 2M)**

מוצר לייזר הפולט בתחום האור הנראה (nm 400-700). 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 בקרן 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.

עד חמש פעמים רמת סיכון 1 בשאר התחומים. מסוכן לעין בתחום הבלתי נראה החל מ-0.7mW.

**רמת סיכון 3B: (Class 3B)**

מוצר לייזר שפגיעת קרינתו באלומה ישירה או בהחזרת מראה 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 כזה עלולה להצית חומרים דליקים. כמו כן, קרן הלייזר, באינטראקציה עם חומר, יכולה ליצור פלסמה וחומרים נדיפים רעילים.

**4. הנחיות ונהלים**

**4.1 הוראות לעבודה בטוחה עם מערכות לייזר בדרגת סיכון 3B/4**

**הגדרה: "עובד בסיכוני לייזר"**- אדם העובד במקום עבודה והעשוי להימצא באזור סיכוני לייזר, לרבות סטודנט, תלמיד, חוקר, מתנדב וכל מי שנמצא באזור זה באופן סדיר לצורך עבודתו או הכשרתו המקצועית;

**1**. הכר את הסיכונים ונהלי הבטיחות של מערכות הלייזר הנמצאות במעבדה, ופעל בהתאם להוראות היצרן ולנהלי הבטיחות.

**2**. הכניסה למעבדה מתאפשרת רק באמצעות קוד כניסה.

**3**. **סיכוני הלייזר**

\* אלומת לייזר Class 4 ישירה או מוחזרת ממשטח מלוטש, או מפוזרת ממשטח מחוספס, עלולה להצית חומרים

דליקים, לגרום לכוויה בעור, ועלולה לפגוע בעיניים ולגרום נזק חמור לראייה.

\*\* אלומה ישירה של לייזר Class 3B עלולה לפגוע בעיניים ולגרום נזק חמור לראייה.

**4**. **הפעלת מערכת הלייזר**

* 1. מערכת הלייזר תופעל אך ורק ע"י עובדים שקיבלו הדרכה לפני פחות משנה ע"י ממונה בטיחות לייזר, וקיבלו הדרכה ממנהל המעבדה להפעלת מערכת הלייזר על כל רכיביה.
  2. לפני הפעלת המערכת יש לוודא כי:
     1. מנורת האזהרה, המוצבת מעל דלת הכניסה למעבדה, דולקת.
     2. חלונות המעבדה מכוסים.
     3. כל מי שנמצא במעבדה מרכיב משקפי מגן מתאימים לאלומת הלייזר.
     4. בעבודה עם לייזר בדרגת סיכון Class 4 בתחום האולטרה סגול בלבד, מומלץ ללבוש חלוק מעבדה עם שרוולים ארוכים ולעטות כפפות.
  3. פעולות כוונון האלומה ייעשו בעוצמת הלייזר הנמוכה ביותר האפשרית, תוך שימוש במשקפי מגן ייעודיים ומתאימים לאלומת הלייזר.
  4. במהלך פעולות הכוונון, יש להשתמש בחוסם אלומה, שיוצב בכל פעם לאחר הקטע האופטי המצוי בתהליך הכוונון.
  5. במהלך ניסוי ארוך, המחייב להשאיר את המערכת פועלת ללא נוכחות המפעיל, יש לסגור את הדלת, ולוודא שמנורת האזהרה בכניסה למעבדה דולקת. זאת, כדי להבטיח שאדם שאינו מוסמך לא יוכל להיכנס לחדר (לרבות עובדי ניקיון). כמו כן, יש להתקין מצלמות וידאו כדי לפקח על הניסוי מרחוק.
  6. בגמר הפעלת הלייזר, יש לכבות את מנורת האזהרה המוצבת מעל דלת הכניסה.

**5**. **מקרים ותגובות**

* 1. במקרה של חשד לפגיעה בעיניים מאלומת הלייזר דווח למוקד 2999.

פגיעה בעיניים מחייבת **פינוי מיידי לחדר המיון** במרכז הרפואי "קפלן" לשם בדיקה רפואית.

* 1. במקרה שנגרמת כוויה בעור מפגיעה של אלומת הלייזר, כסה את אזור הכוויה במשחה לטיפול בכוויות, המצויה בערכת העזרה הראשונה שבחדר, ודווח מייד למוקד 2999.
  2. במקרה הצתה של חומר דליק, החל בפעולות הכיבוי תוך שימוש במטף לכיבוי אש ודווח מיידית למוקד 2999.
  3. במקרה של תקלה/חשד לכשל בהפעלת מערכת הלייזר, יש להפסיק מיידית את המתח למכשיר ע"י לחיצה על מפסק החירום, או ניתוק זרם החשמל הראשי בלוח החשמל הצמוד. יש להודיע מיידית לממונה בטיחות הלייזר.

**6.** **דגשי בטיחות**

* 1. אסור לבטל או לעקוף את התקני הבטיחות הקיימים במערכת הלייזר !!!
  2. יש לדווח לממונה בטיחות הלייזר על כל טיפול או שינוי שבוצע במערכת הלייזר, או כאשר מבקשים להשמיש מערכת שלא הופעלה תקופה ארוכה. חידוש השימוש במערכת הלייזר מחייב בדיקת בודק לייזר מוסמך לפני ההפעלה, וזאת בתיאום עם ממונה בטיחות הלייזר.
  3. יש לקבל מראש את אישורו של ממונה בטיחות הלייזר לביצוע פעולה לא שגרתית במערכת הלייזר. האישור השנתי מתייחס אך ורק להפעלה שגרתית של מערכת הלייזר, כל פעולה אחרת מחייבת אישור מיוחד בכתב.

**4.2 הנחיות בטיחות לעבודת כוונון אלומת לייזר**

1. **המטרה**

מניעת תאונות עבודה במהלך כיוון אלומת לייזר הנובעת מחשיפה לאלומת הלייזר.

1. **השיטה**
   1. להצביע על סיכוני הלייזר בעת כיוון אלומת הלייזר.
   2. היערכות וביצוע כיוון אלומת לייזר במעבדות עם מערכות לייזר פתוחות ברמת סיכון Class 3B/4 ו-Class 3R בתחום הבלתי נראה.
2. **הגבלת גישה**
   1. הכניסה למעבדה תהיה רק לעובדים המבצעים את הכיוון של אלומת הלייזר.
   2. כאשר קיימים תנאים יוצאי דופן בזמן הכיוון, יוצב בכניסה למעבדה שלט אזהרה (כניסה אסורה/סכנה מיוחדת - לייזר בכיוון).
   3. יש לוודא כי אמצעי האזהרה והבטיחות בכניסות למעבדה פועלים (לדוגמא: אינטרלוק, מנורת האזהרה), והעובדים יודעים היכן נמצא מפסק החירום ללייזר.
   4. דלת המעבדה סגורה, הוילון ברחבת ההיערכות מוגף ומונע יציאת האלומה מהמעבדה.
3. **הכנת ציוד**
   1. הכן וזהה את כל הציוד והחומרים הדרושים לכיוון לפני תחילת העבודה, כגון: כלים, מטרות, חוסמי אלומה, מד -הספק, אמצעים לקביעת פרופיל האלומה, משקפי מגן מתאימים לתכונות וסיכוני הלייזר, מטף וציוד עזרה ראשונה.
   2. כל דרישה הנוגעת למידע או אמצעים בנושא בטיחות לייזר יש להפנות בדוא"ל ל: Yehuda.moshayev@weizmann.ac.il.
4. **בטיחות בשולחן האופטי**
   1. יש להסיר מהגוף, תכשיטים (שעונים, טבעות, תגים, שרשראות) וכל אביזר העלול לבצע החזרה של אלומת הלייזר לפני התחלת הכיוון. יש להשתמש בכלים שאינם מחזירים.
   2. הסר את כל הציוד המיותר שאינו נחוץ לכיוון, כמו: כלים (מברגים, מפתחות, רכיבים אלקטרוניים, אופטיקה), כדי למזער את האפשרות של השתקפות והחזרת אלומה.
   3. פנה גישה ומפגעי בטיחות סביב השולחן האופטי כגון: כבלים, סיבים אופטיים, פינות חדות וחומרים מסוכנים.
   4. השתמש בחסמי אלומה כדי לחסום את אלומת הלייזר מפגיעה ישירה ומאלומה מוחזרת.
   5. בעת הכיוון, יש להימנע מלבוש סינטטי דליק. מומלץ ללבוש חלוק כותנה.
   6. יש לבחון היבטים למניעת חשמל סטטי במעבדה (חיכוך בווילונות, חוסר לחות).
5. **משקפי מגן ללייזר**
   1. יש לוודא שמשקפי המגן מותאמים ללייזר שבשימוש.
   2. חובה על כל הנוכחים באזור סכנת הלייזר, להרכיב משקפי מגן ללייזר
   3. (אזור סכנת הלייזר, בעת הכיוון, הינו כל שטח המעבדה שיש בה לייזר. הפרת סעיף זה מהווה סכנה מיידית לנוכחים במעבדה).
6. **זיהוי אלומת הלייזר** 
   1. צפייה ישירה בעין (intra beam) לכיוון האלומה הינה אסורה. הצפייה מותרת באמצעות עזרים לצפייה בלבד, לדוגמה, התקנים פלורוסנטיים.
   2. בעת שימוש בעזרים להדמיית האלומה, יש להגיע אל האלומה לאט ובזהירות עם כרטיס נטוי מעט כלפי מטה, על מנת לראות את השתקפות האלומה המפוזרת. יש להתאים את האופטיקה, כך שהאלומה תפגע בכרטיס ממש לפני שטח הרכיב.
   3. כאשר צופים בקרינה בלתי נראית, על ידי שימוש בכרטיסי IR, על המכוון להיות מודע לכך שעלולות להיות השתקפויות והחזרות ספקולטיביות בחלק מן האמצעים הללו.
7. **הנחיות בכיוון האלומה**
   1. כיוון אלומת הלייזר יבוצע בעוצמת האלומה המינימלית האפשרית.
   2. בצע את ההכוונות לפי ספר השירות של הלייזר.
   3. חסום כל מהלך אלומת לייזר שלא בשימוש או אלומת לייזר מוחזרת.
   4. הכנס אלמנטים אופטיים רק כאשר האלומה חסומה. הדק את האלמנטים, שקול אפשרויות ההחזרות והפיזורים וטפל בסכנות הנובעות מכך. הוסף חוסם אלומה לאחר האלמנט האופטי, ולאחר מכן העבר את האלומה אל האלמנט האופטי הבא.
   5. הקפד, במידת האפשר, שהאלומה תהיה אופקית ומקבילה לשולחן האופטי.
   6. במקרה שיש צורך להגביר את עוצמת האלומה, שים לב כי תיתכן הצתה מאלומת הלייזר.
8. **סיום הכיוון:**
   1. בסוף הכיוון החזר את המערכת למצב פעולה רגיל (שים לב לכיסוי המגן, אינטרלוק, וחסמים).
   2. וודא הפעלה רגילה.
9. **במקרה חרום:**
   1. בכל מקרה חירום, תאונה או כמעט תאונת לייזר יש לדווח מיידית למוקד החירום 08-9342999 ,לממונה בטיחות לייזר, מושיאב יהודה טל' 050-9001995 , 08-9345155 ולממונה הישיר.

במקרה של פגיעה או חשד לפגיעה מלייזר יש להתפנות מיידית למיון בבית חולים.

**4.3 הנחיות בטיחות לעבודה במערכות לייזר כלואות (סגורות)**

1. **המטרה**  
   להצביע על סיכוני הלייזר בעבודה עם לייזר במערכת כלואה/סגורה (כגון: מיקרוסקופ קונפוקאלי, מכשירי Facs וכד') ולהימנע מפגיעה הנובעת מחשיפה לאלומת הלייזר המופעלת במערכת לייזר כלואה בעת העבודה.
2. **הגדרות**
   1. אזור סיכוני לייזר - אזור שבו מופקת קרינת לייזר, והחשיפה הצפויה בו בפעילות שגרתית, בתקלה או בתאונה, עלולה לעבור את החשיפה המרבית המותרת.
   2. מוצר לייזר - התקן, מכשיר או מכונה הפולטים קרינת לייזר, לרבות מוצרים שאינם מוגמרים.
   3. "מוצר לייזר "כלוא" EMBEDDED" - מוצר לייזר שהותקנו בו אמצעים הנדסיים המגבילים את רמת הפליטה המרבית הנגישה של קרינת הלייזר.  
      הלייזר מסווג ברמת סיכון נמוכה מזו שנקבעה לו.
   4. מוצר לייזר מסוכן - מוצר לייזר המסווג ברמת סיכון 3R, הפולט קרינת לייזר שאינה בתחום האור הנראה, או מוצר לייזר בדרגת סיכון 3B או 4.
   5. משקפי מגן למוצרי לייזר - משקפי מגן לפי ת"י 4141 חלק 10.
   6. "קרינת לייזר - קרינת אור קוהרנטית, כיוונית, המרוכזת בתחום צר של אורכי גל, המיוצרת או מוגברת באמצעות תהליך מבוקר של פליטת קרינה מאולצת.
   7. רמת סיכון - סיווג הסיכון של מוצרי לייזר על פי גבול הפליטה הנגישה שלהם.
   8. רמת סיכון 1 (Class 1) - מוצר לייזר שרמת קרינתו אינה מסוכנת.
   9. רמת סיכון 3B (Class 3B) - מוצר לייזר שפגיעת קרינתו באלומה ישירה מסוכנת לעין בכל זמן חשיפה שהוא, אך בדרך כלל איננה מסוכנת לעור.
   10. 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.
3. **רקע**

במכון ויצמן למדע עובדים עם מערכות לייזר שונות. חלק ממערכות הלייזר בנויות כך, שאלומת הלייזר כלואה ומוגנת באמצעות מס' התקני בטיחות הנדסיים, המונעים חשיפה לאלומת הלייזר.

מיקרוסקופ קונפוקאלי: עיקרון המיקרוסקופ הקונפוקאלי הוא שימוש בפילטרים המבטלים אור שמקורו מחוץ לפוקוס, אור המפריע להיווצרות תמונה ברורה במיקרוסקופ. תכונה זו מאפשרת לצפות בדוגמאות באיכות גבוהה יותר מאשר במיקרוסקופ רגיל.

FACS: מיון תאים על ידי פלורסנציה (Fluorescence Activated Cell Sorting)לפי מאפייני גודל, גרגור. בשיטה זו לוקחים את אוכלוסית התאים הנבדקת ומזריקים אותה לתוך זרם דק של נוזל. התא עובר מול מספר מקורות אור ולייזרים, ופיזור האור/פלורסנציה נמדדים ונשמרים.

* 1. מקור התאורה הוא לייזר המסווג בדרך כלל ברמת סיכון Class 3B, או Class 4.
  2. במיקרוסקופ קונפוקאלי מותקנים אמצעי מיגון הנדסיים, כגון: דלת ואינטרלוק המונעים יציאה של קרן הלייזר מחוץ למיקרוסקופ כך שרמת הסיכון שלו יורדת לרמת סיכון של Class1 (מערכת מסוג 1- EMBEDDED). לפיכך, בשימוש רגיל לפי הוראות היצרן, אין סכנה מהלייזר, ולכן העובדים אינם זקוקים לאמצעי מיגון מיוחדים.
  3. בעת מתן שירות (תיקון, כיוון וכד'), כאשר עוקפים את האינטרלוק וחושפים את האלומה רמת הסיכון של המערכת הינה בהתאם לדרגת הסיכון של הלייזר, כלומר דרגה 3B או דרגה 4.  
     בעת מתן שירות יש להשתמש בכל דרישות הבטיחות המתאימות לדרגת הסיכון של הלייזר כפי שמפורט להלן.

1. **סמכות ואחריות**
   1. באחריות ראש המעבדה/מיתקן לוודא כי כל משתמש במערכת לייזר סגורה ו/או במיקרוסקופ קונפוקאלי:
      1. ביצע הדרכת בטיחות שנתית (משתמש חדש יודרך עם תחילת עבודתו) בנושא סיכוני קרינת לייזר והגנה מפניהם, (מיקרוסקופ קונפוקאלי - הוראות לעבודה בטוחה) .
      2. קרא את הוראות הבטיחות מספר הוראות הפעלת המכשיר.
      3. חתם על טופס התחייבות בו הוא מתחייב למלא את כל הוראות הבטיחות בעבודה עם מיקרוסקופ קונפוקאלי
      4. בדק, לפחות פעם בשישה חודשים, או לאחר כל טיפול או ביקורת טכנאי, את תקינות האינטרלוק של מקור הלייזר (פתיחת הדלת תפסיק את פעולת הלייזר) ורשם את פרטי ותאריך הבדיקה ביומן השירות של המיקרוסקופ.
   2. במקרה תקלה או צורך בשינוי במערכת, באחריות ראש המעבדה/מיתקן:
      1. להזמין נציג שירות או טכנאי מוסמך של ספק מערכת הלייזר הסגורה ו/או המיקרוסקופ לטפל בתקלה או לבצע שינויים.
      2. לוודא כי הטיפול במערכת הלייזר הסגורה ו/או המיקרוסקופ הקונפוקאלי בוצע כנדרש והתקני הבטיחות לא נפגמו.
2. **שיטה/מהות**

על ספק מערכת הלייזר הסגורה ו/או המיקרוסקופ לספק:

* + 1. מדבקה על גבי מערכת הלייזר הסגורה ו/או המיקרוסקופ המגדירה את רמת הסיכון של הלייזר לפי דרישות תקן ת"י 60825 חלק 1.
    2. אינטרלוק SAFE FAIL מעל תא הלייזר המחובר למערכת הלייזר ומפסיק את פעולתו ברגע פתיחת הדלת או המכסה.

1. **דרישות בטיחות מהמשתמשים במערכת לייזר כלואה:**

* לפני התחלת העבודה/שימוש במיקרוסקופ יש לקבל, מראש המעבדה/ היחידה, הדרכה על מבנה המיקרוסקופ, אופן הפעלתו, הסיכונים, כולל סיכוני לייזר ודרישות הבטיחות בעבודה.
* לקרוא (כמשתמש חדש או עובד מתרענן פעם בשנה) את הדרכות בטיחות בנושא סיכוני קרינת לייזר והגנה מפניהם, ממיקרוסקופ קונפוקאלי - הוראות לעבודה בטוחה).
* לקרוא (כמשתמש חדש או עובד מתרענן פעם בשנה) את הוראות הבטיחות שבספר הוראות הפעלת המכשיר.
* לחתום על טופס התחייבות למלא את כל הוראות הבטיחות בעבודה עם מיקרוסקופ קונפוקאלי.
* אסור לפרק או לפתוח את המכסים של המיקרוסקופ.
* יש לדווח לממונה הישיר/טכנאי אחראי על כל תקלה או חשש לתקלה במערכת.
* אסור למפעיל/משתמש לעשות כל שינוי בחלקי המסלול האופטי של המערכת.
* בעת מתן שירות למערכת אין כניסה לחדר בו מצויה המערכת לעובדי מכון ויצמן בכל סטטוס.

1. **נוהל ביצוע עבודות תחזוקה למוצרי לייזר כלואים (דרגה 1) בהם קיימת אלומת לייזר בדרגת סיכון 3B או 4**
   1. עבודות התחזוקה והשירות יבוצעו רק ע"י נציגי היצרן, שהוסמכו לכך והמכירים היטב את מערכת הלייזר ואת כל הסיכונים הנלווים.
   2. איש השירות יציג אישור בר תוקף על הרשאתו לעבוד בלייזרים מסוכנים.
   3. איש השירות יחתום על טופס הצהרה (להלן: "נספח א' - הצהרת נותן שירות למערכת לייזר/מערכת כוללת לייזר") בו הוא מתחייב לעבוד בהתאם לתקנות והוראות הבטיחות בעבודה בלייזרים.
   4. איש השירות ישתמש בציוד מגן אישי לכיוון והגנה מפני קרני לייזר לפי ת"י 4141 חלק 10 וחלק 11 ( EN207, EN208 )
   5. איש השירות ישתמש אך ורק בציוד אשר הביא אתו ולא בציוד של מכון ויצמן למדע.
   6. יש לשלט את האזור המגודר בשלטים הבאים: "סכנה! הכניסה למורשים בלבד" ושלט אזהרה מקרינת לייזר עם כיתוב בהתאם לרמת סיכון הלייזר.
   7. בעת ביצוע העבודה לא יימצא איש בחדר/אולם פרט לאיש/אנשי השירות הנ"ל.
   8. לפני ביצוע עבודות תחזוקה יש להציב מסכי מגן בין המערכת ודלתות הכניסה לחדר/אולם או להציב ווילון עמיד מפני אלומת לייזר סמוך לדלת כניסה. יש לכסות את כל החלונות בחדר בווילון חסין אש.
   9. יש לוודא שכל דלתות הכניסה לחדר נעולות ונורות האזהרה דולקות, ואין אפשרות כניסה לחדר.
   10. אם לא נדרש להפעיל את מערכת הלייזר בעת ביצוע עבודת התחזוקה, יש לכבותה. אם קרן הלייזר הכרחית לצורך העבודה, אזי יש לצמצם ככל האפשר את משך זמן ההפעלה ואת עוצמת האלומה למינימום ההכרחי.
   11. חובה להשתמש באמצעי מיגון כולל משקפי מגן המתאימות לסוג הלייזר.
   12. הקרן תכוון לאזורים מבוקרים בתוך המערכת בלבד. בשום אופן אין להפעיל את הלייזר, כאשר הוא מכוון לאזורים אחרים כגון: גוף המפעיל, דלת הכניסה או החלונות.
   13. באזור העבודה לא יימצאו חומרים דליקים או נפיצים.
   14. עבודות שירות ותחזוקה והעובדים שיבצעו את העבודה מותנים באישור ממונה בטיחות לייזר.
   15. רק אנשים שעברו הדרכת בטיחות מתאימה והמצוידים באמצעי מיגון מתאימים לסיכון הלייזר (משקפי מגן מתאימות לסוג הלייזר, לבוש וכד') רשאים להישאר באזור סיכון הלייזר.
   16. בסיום השירות, על הטכנאי להחזיר את המערכת למצב עבודה רגיל, כולל כל התקני הבטיחות שלה.
   17. בסיום העבודה יש לבדוק ולוודא כי האינטרלוק ומערכות בטיחות אחרות, במידה שיש כאלה, פועלים כהלכה, יש לרשום זאת ביומן השירות של המיקרוסקופ.
2. **במקרה חרום:**
   1. יש לפעול לפי הוראות החירום ולדווח למוקד המכוני 08-934**2999**.

8.2 על כל מקרה של תאונה או כמעט תאונת לייזר יש לדווח מיידית למוקד

המכוני 08-934-2999 , לממונה בטיחות לייזר, מושיאב יהודה טל'

050-9001995, 08-9345155 ולממונה הישיר.

8.3 בכל מקרה של פגיעה או חשד לפגיעה מלייזר יש לפנות מיידית למיון בבי"ח.

**5. טופס הצהרת נותן שירות למערכת לייזר/מערכת כוללת לייזר**

שם החברה הנותנת שירות:\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

סיווג העבודה:\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

משך עבודה: מתאריך: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ ועד תאריך: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

אני החתום מטה מצהיר כי יש ברשותי אישור בתוקף מהחברה בה אני מועסק, לעסוק במכשירים ו/או מוצרי לייזר, לרבות, הכרה של הוראות ואמצעי בטיחות בעבודה בלייזר מהיצרן ומהחברה, ברמת סיכון הלייזר בו אני נותן שירות.

אני מתחייב בזאת לפעול על פי תקנות הבטיחות בעבודה (גהות תעסוקתית ובטיחות העוסקים בקרינת לייזר), התשס"ה―2005 \* וכל דין או חוק בישראל וכי אין בהוראות אלה לגרוע מאחריותי לפי כל דין.

אני מתחייב לנקוט באמצעי בטיחות בהתאם לתקנים ישראלים בעיקר ת"י 60825 חלק 1 ואמצעי מיגון באישי בהתאם לתקן ישראלי ת"י 4141 חלק 10 ו 4141 חלק 11 (207EN ו 208EN) ויש ברשותי הציוד לביצוע השירות כולל ציוד מגן אישי.

אני החתום מטה, המועסק בשטח מכון ויצמן למדע, מצהיר בזאת כי הובאו לידיעתי הוראות ונהלי הבטיחות הנהוגים במכון ויצמן למדע, כמו כן נהירים לי הסיכונים האפשריים בשטחו ובמתקניו.

הנני מתחייב בזאת לקיים את כל דרישות הבטיחות והגהות, סדרי העבודה והמשמעת הנהוגים במכון ויצמן למדע, ולנהוג בהתאם לכל הוראות אנשי יחידת הבטיחות של מכון ויצמן למדע כפי שיינתנו לי מעת לעת.

ידוע לי כי במידה שלא אעמוד בדרישות הבטיחות יינקטו נגדי צעדים שונים כגון: הפסקת עבודה זמנית ועד להרחקתי ממקום העבודה. במקרה זה לא אהיה זכאי לכל תשלום או פיצוי בגין כך.

על החתום, נותן השירות:

שם: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

מס' ת"ז \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

שם החברה: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

כתובת: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

חתימה: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

תאריך: \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**6. משקפי מגן וסנן אופטי לאלומת לייזר**

המסנן האופטי המשולב במשקפי המגן צריך להנחית את עוצמתה של אלומת הלייזר, הפוגעת בו, לערך נמוך יותר מהערך של MPE המוגדר ללייזר הנתון.

ע"פ התקן האירופי EN 60825 שאומץ בתקן הישראלי ת"י 60825, דרישות למשקפי המגן נקבעות לכל סוגי הלייזרים: DL - לייזר רציף, IL - לייזרי פולסים בהם משך הפולס בתחום מילי ומיקור שניות,  RL עבור לייזרי פולסים, בהם משך הפולס בתחום ננו שניות, ו-ML  עבור לייזרי פולסים, בהם משך הפולס בתחום פנטו שניות. ערכים אלה מופיעים על המשקפיים.

ערכי ה- DL, IL, RL ML נקבעים ע"פ עוצמת הלייזר, כלומר צפיפות ההספק או צפיפות האנרגיה של האלומה. ככל שעוצמת הלייזר גבוהה יותר, כך הערכים הנ"ל גבוהים יותר. הערכים המספריים מופיעים צמוד ל- DL, IL, RL ML מביעים את חוזק ההנחתה של המשקפיים. במידה והמשקפיים מתאימים ללייזר, הנחתה זו אמורה להפחית את עוצמת האלומה לערכים נמוכים מ- MPE.

לדוגמא, ללייזר Fiber שאורך הגל שלו 1550 nm, עבור אלומה רציפה שצפיפות ההספק שלה היא 2 x105 W/m2 נדרש DL 3 @ 1550 nm, ואילו עבור אלומה רציפה שעוצמתה 5 x109 W/m2 נדרשים משקפי מגן עם DL 7 @ 1550 nm.

דוגמא נוספת – להגנה ללייזר ירוק Nd :YAG באורך גל 532 nm עם פולסים במשך זמן של 3 nsec וצפיפות אנרגיה של 4 J/m2 נדרשים משקפי מגן RL 3 @ 532 nm, ואילו בעוצמת פולס של 7 x105 J/m2 נדרש RL 9 @ 532 nm. ערכים אלה נתונים בטבלה בתקן, לפי צפיפות ההספק והאנרגיה לאורכי הגל השונים של האלומות.

ללייזרים רציפים ערכי ה-DL נקבעים לפי צפיפות ההספק ואורך הגל של האלומה. ללייזרי פולסים ערכי ה-IL, RL ו ML נקבעים לפי צפיפות האנרגיה של האלומה, משך הפולסים ואורך הגל של הלייזר.

הערכים הנ"ל מופיעים על משקפי המגן כאשר מובא בחשבון באילו תחומי אורכי גל המשקפיים מספקים את ההגנה הנ"ל. משקפיים המספקים הגנה ללייזרים בתחום אורך גל מסוים עלולים להיות שקופים בתחום אורכי גל אחרים. על כן, המשתמשים חייבים להיות מודעים לתחום אורכי הגל בו המשקפיים מספקים את ההגנה, ולא להשתמש במשקפיים המתאימים למערכת אחת בעבודה עם מערכת אחרת. כמו כן, אין להעביר משקפיים בין מעבדות ללא אישור ממונה בטיחות לייזר.

**=========**