



# המכשירים המבוססים על קרינת לייזר משמשים למיגון יישומים בתחומים רבים, הודות לתכונותיה המיוחדות של קרן הלייזר. אותן תכונות, בתנאים מסוימים, הופכות את אלומת הקרניים למסוכנת למערכת הראייה ולעור הגוף, עם פוטנציאל לנזקים פנימיים

מאת אריה אמיצי, מנחם מרגליות ואבי בן-שלמה

**מ**כשירי ה"לייזר" הראשונים פותחו כבר בשנות ה-60. היישום הראשון של האמצעים החדשים הללו היה מדידת טווחים. במשך למעלה מ-40 השנים שעברו התפתח תחום קרינת הלייזר והמכשירים משמשים כיום למיגון יישומים ברפואה, בתעשייה, בתקשורת, במדע, בצבא, בבידור ועוד. הפיתוחים הללו התאפשרו הודות לתכונות המיוחדות של קרינת הלייזר. מאידך, אותן תכונות, בתנאים מסוימים, הופכות את אלומת קרני הלייזר למסוכנת עבור מערכת הראייה ועור הגוף, כולל פוטנציאל לגרימת נזקים פנימיים. בישראל נרשמו מספר תאונות שמקורן בקרינת הלייזר. בסוף שנת 2003 נפגעו במועדון ריקודים 3 נערים בעיניהם, ממערכת לייזר ששימשה למטרות בידור.

## מדוע הלייזרים מסוכנים?

קרן הלייזר היא קרינה אלקטרומגנטית (פוטונים). זהו מקור אור ייחודי, שהמיוחד בו היא אחידות כמעט מושלמת של אלומת הקרניים שלו. האלומה היא חד-צבעית (מונוכרומטית) וכל הגלים שבה הם במופע זהה (מונופאזית). השילוב של שתי התכונות הללו יוצר את האחידות (הקוהרנטיות) של האלומה. האחידות הזאת מאפשרת לאלומת הלייזר לעבור מרחקים גדולים עם זווית פתיחה ("התבדרות") מיזערית.

הכותבים הם מדענים בשטח בטיחות קרינה, מ"מ"ג שורק

# מתי קרינת לייזר נחשבת

## מבנה העין

להבנת סיכוני הלייזר לעיניים נדרשת היכרות עם מבנה העיניים. אורך 1 מציג חתך של גלגל העין. קרן אור החודרת לעין, ממוקדת ע"י הקרנית והעדשה ונבלעת ברשתית. ברשתית, תאי עצב מיוחדים מתרגמים את האור הנבלע לאותות עצביים, המועברים דרך העצב האופטי אל המוח לשם בניית התמונה הנצפית.



במרכז הרשתית מצויים שני אזורים רגישים מאוד: "מקולה" - שהוא מרכז עצבי צפוף, האחראי לראיית צבעים ולכושר הפרדה גבוהה של הראייה. "הנקודה העיוורת" - האזור שבו מצויה נקודת היציאה של העצב האופטי מהעין אל המוח.

הקרנית ועדשת העין מרכזות את אלומת הלייזר לנקודת מוקד ברשתית, בצפיפות הספק גבוהה פי 100,000, בקירוב, מצפיפות ההספק המקורית שלה, לפני החדירה לעין. בעקבות זאת עלול להתרחש הרס של רקמות במקום כלשהו ברשתית. הפגיעות החמורות ביותר בראייה, עד כדי עיוורון, נגרמות כשהאלומה פוגעת בנקודה העיוורת ו/או במקולה שבעין. העיניים עלולות להיפגע גם מקרינת לייזר בתחום האולטרה-סגול והאינפרא-אדום. בתחומים אלה האלומה איננה חודרת לתוך העין וגם לא מתמקדת על הרשתית, אלא גורמת נזקים לקרנית ולחלקים נוספים בעין, בהתאם לעוצמת הקרינה ולמשך החשיפה.

כך, לדוגמה, יכולה אלומת לייזר הנפלטה מ"מצביע" (pointer) פשוט להגיע עד לטווח של קילומטר, כשקוטר כתם האור הנוצר בהתבדרות הוא בקוטר של מטר אחד בלבד. באמצעות מערך אופטי מתאים ניתן להקטין את קוטר ההתבדרות. זוהי התכונה הבסיסית המאפשרת שימוש בלייזרים לקביעה מדויקת מאוד של טווחים (כולל המרחק לירח!). בנוסף, הקוהרנטיות מאפשרת למקד את אנרגיית האלומה, בעזרת עדשות מתאימות, למוקד נקודתי בקוטר קטן מאוד. תכונה זו היא הבסיס לשימוש בלייזר לעיבוד חומרים. הדוגמה הבולטת והנפוצה היא חיתוך יהלומים. האלומה המופקת ממכשיר לייזר בעל הספק צנוע (וואטים בודדים) ממוקדת לנקודה זעירה. המיקוד יוצר "צפיפות הספק גבוהה" (וואטים לסמ"ר -  $\text{watt/cm}^2$ ), באזור שאליו מכוונת הקרן הממוקדת. צפיפות ההספק הזאת מספיקה להעלות את הטמפרטורה באזור המסוים לכמה אלפי מעלות צלזיוס תוך פרק זמן קצר ממיקרו-שנייה ( $10^{-6}$ ), ובכך לגרום לנידוף של חומר הגלם, הקשה ביותר עלי אדמות.

גם הסיכון היחסי העיקרי של קרן הלייזר - בהשוואה למקורות אור אחרים - נובע מצפיפות גבוהה של הספק או אנרגיה ליחידת שטח.

קרני לייזר הנשלחות למרחב פתוח אינן משנות באופן משמעותי את צפיפות ההספק שלהן לאורך כל הטווח. כך הן יוצרות סיכון משמעותי בחשיפה אליהן, גם כאשר היא מתרחשת במרחק גדול יחסית מהמקור.

האפשרות למקד את האלומה היא גם לרועץ: חדירת אלומת קרני לייזר לעין גורמת להתמקדות האלומה על הרשתית (ריקמת עצבים רגישים לאור בקרקעית העין), הודות למבנה המעולה של עדשת העין האנושית, בעלת מנגנון למיקוד עצמי (auto focus). צפיפות ההספק הנוצרת על הרשתית עלולה לגרום לכוויה באזור הרגיש הזה. הנוק מתבטא, בד"כ, באבדן כושר הראייה של העין.

על השילוט מצויינים גם נתונים נוספים כגון: אורך הגל, חומר הלזירה, האם הקרן נראית או בלתי נראית, הספק הקרן/אנרגיה לפולס ועוד. דוגמאות לשילוט ניתן לראות באיור 3.

הגדרות מדויקות לשילוט נמצאות בסעיף 5 של תקן הבטיחות ללייזרים\*.



”**הלייזר יהיה בטוח לעיניים רק כאשר עוצמת הקרינה המגיעה לעין תהיה נמוכה מאוד, ברמה שלא תגרום לנזקים בתנאים סבירים.**“

קבוצות הסיכון של לייזרים*	
הערות	קבוצת סיכון Hazard Class
הלייזר בטוח לשימוש בתנאים סבירים	1
הלייזר מסוכן רק כאשר מרכזים את הקרן באמצעות מיכלול אופטי מרכז עוצמת קרן נמוכה בתחום הנראה; העין מוגנת ע"י רפלקס סגירת העפעף הפועל תוך 0.25 שנייה	1M
עוצמת הקרן נמוכה בתחום הנראה. העין מוגנת ע"י רפלקס סגירת העפעף; הקרן מסוכנת רק כאשר מרכזים אותה באמצעות מיכלול אופטי מרכז רמת הסיכון של קרן ישירה לעין היא נמוכה עד גבולית	2
קרן ישירה מסוכנת לעין	2M
קרן ישירה ומחזרת מסוכנת לעין ולעור, וגם יכולה להצית אש	3R
	3B
	4

\* International Standard IEC 60825-1 - Safety of Laser Products; Edition 1.2 2001-08

איור 3: דוגמאות לשילוט לייזרים

**קרינת לייזר**  
אין להסתכל ישירות אל קרן הלייזר  
**לייזר מקבוצת סיכון 2**

**סיכום**

לייזרים הקורנים בתחום הספקטראלי המתמקד על הרשתית, הן בתחום הנראה והן הבלתי נראה, יוצרים סיכון גבוה גם בעוצמות קרינה נמוכות יחסית לתחומים הספקטראליים האחרים. הסיכונים האלה מתבטאים בפוטנציאל לכוויות בעין ובעור, עם אפשרות לפגיעה גם באיברים פנימיים. כיום נמצאת בתהליכי חקיקה סופיים תקנה ישראלית העוסקת בבטיחות ובגיהות בעבודה עם מוצרי לייזר. ובנוסף נדרש גם לספק מענה בתחום בטיחות הציבור בחשיפה לקרינת לייזר. תאונות שאירעו לאחרונה מדגישות את הצורך הדחוף בחקיקה ברורה ובאכיפה יעילה בנושא. ■

ריכוז של אלומת הלייזר באמצעות התקנים אופטיים מרכזים, יכול להפוך אלומה בטוחה למסוכנת. ציון האות M (Magnification) בקבוצת הסיכון מסמן כי הלייזר עלול להיות מסוכן כאשר צופים בו באמצעות מיכלול אופטי מרכז. לדוגמה: משקפת 50x7 תוריד את סף הקרינה הבטוחה בתחום המסוכן לרשתית פי 51. כך, במקרים מסוימים עלול לייזר בטוח עין להפוך ללייזר מסוכן (ראו איור 2).

כל יצרן של מכשירי לייזרים ומערכות לייזרים חייב, בין היתר, לסווג את הלייזר לפי קבוצת הסיכון המתאימה ולשלט אותו בהתאם לדרישות התקן.



**כיצד משלטים לייזרים?**

הלייזרים מסומנים בשלטי אזהרה עם רקע צהוב, עפ"י קבוצת הסיכון שלהם, ועם אזהרה כתובה, כגון: "אין לחשוף את העין לקרינה ישירה או מחזרת".

לא תמיד ניתן להבחין בקרני הלייזר המצויות בסביבתנו. תחום אורכי הגל המסוגלים לחדור לעין הוא בין 400 ל-1,400 ננומטר, אך רק תת-התחום של 400-700 ננומטר נחשב לתחום שאותו אנו רואים. כל מכשירי הלייזר הפועלים בתחום הספקטראלי הזה, ואפילו בעוצמות נמוכות יחסית, עלולים להיות מסוכנים לעיניים. העובדה הזאת הודגמה כבר במספר תאונות. הקרינה בתחום שבין 700 ועד ל-1,400 ננומטר מסוכנת במיוחד, משום שהעין איננה "רואה" את הקרניים ולכן לא מופעל רפלקס ההגנה של העין (מנגנון הגורם לסגירת העפעפיים).

לפיכך, הגדרת מכשיר לייזר כ"לא מסוכן" תלויה בעוצמתו וביכולת החדירה של אלומת הקרניים שהוא מייצר לעין. הלייזר יהיה בטוח לעיניים רק כאשר עוצמת הקרינה המגיעה לעין תהיה נמוכה מאוד, ברמה שלא תגרום לנזקים בתנאים סבירים. מושג חשוב המופיע במיפריטי הבטיחות של מיתקני לייזר מתאר מדד בעל חשיבות רבה: **MPE (Maximum Permissible Exposure)**. המדד הזה מהווה את הגבול העליון של צפיפות הספק הקרינה, ביחידות של הספק או אנרגיה ליחידת שטח, שלא יגרום נזק לרקמת העין. ערכי הגבול הזה מוגדרים בנפרד לעיניים ובנפרד לעור - שהרי נזק הנגרם בעקבות צריבת רשתית העין הרגישה איננו דומה, בד"כ, לנזק שגורמת הצריבה לעור. העור מסוגל להגליד מכוויה, אך כווייה ברשתית גורמת, בד"כ, להרס הרקמה, לצמיתות.

**כיצד מזהים לייזרים מסוכנים?**

מכשירי הלייזר מסווגים במיפריטים ל-4 קבוצות סיכון עיקריות (Hazard Class). 3 מהקבוצות הללו מסווגות סיווג נוסף, ל-2 תת-קבוצות. קביעת ההכללה לקבוצות הסיכון נעשית עפ"י מספר מדדים המאפיינים את אלומת הלייזר. ללא הסיווג ב"קבוצות סיכון" לא ניתן לזהות בצורה פשוטה, מיידית, אם הלייזר מסוכן או לא.