

משרד החינוך
המינהל למדע ולטכנולוגיה
הפיקוח על מגמת הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים
ומגמת מערכות בקרה ואנרגיה

מגמת הנדסת אלקטרוניקה ומחשבים
התמחות מערכות אלקטרוניות

תכנית לימודים למקצוע הבחירה

תקשורת אלקטרואופטית

סמל מקצוע 11.9115

כיתה י"ד

תכנית הלימודים למקצוע

תקשורת אלקטרואופטית – 96 שעות

כיתה י"ד

מספר שעות	ראשי פרקים
6	.1 מבוא למערכות אופטיות ואלקטרואופטיות
12	.2 מושגים בסיסיים באופטיקה
12	.3 רכיבים אופטיים
12	.4 הסיב האופטי
4	.5 מקורות אור לא קוהרנטיים
10	.6 הלייזר
8	.7 גלאים
8	.8 תקשורת סיב-אופטית
18	.9 מערכות הדמיה אלקטרואופטיות
6	.10 מערכות מבוססות לייזר
<hr/> 96	סך-הכול

1. מבוא למערכות אופטיות ואלקטרואופטיות

תיאור קצר של המערכות האלקטרואופטיות האלה:

- 1.1 רשתות של תקשורת סיב-אופטית.
- 1.2 מכשור רפואי: חיישנים רפואיים, לייזר-חם.
- 1.3 שימושים באלקטרואופטיקה לצורך בידור.
- 1.4 צגים.
- 1.5 ציוד נלווה למחשב: מקלדת וירטואלית, עכבר אופטי. מערכות הדמיה.

2. מושגים יסודיים באופטיקה

2.1 תכונות האור:

- 2.1.1 שתי דרכי ההתייחסות לאור: אור כגל ואור כחלקיק.
- 2.1.2 תכונות של גל אור: ההתפשטות בחזית הגל, אורך הגל, התדר, הקוהרנטיות, ספקטרום הגלים האלקטרומגנטיים.
- 2.1.3 תכונות של חלקיק אור (פוטון): אנרגיה, הקשר בין אנרגיה לאורך הגל.
- 2.1.4 קרן אור: הגדרה, אלומת קרניים. דוגמאות: אלומה מקבילה (גל מישורי), אלומה מתבדרת (גל כדורי).
- 2.2 אופטיקה גיאומטרית
 - 2.2.1 חוקי ההחזרה והשבירה, חישובים מתאימים.
 - 2.2.2 זווית קריטית, חישובים מתאימים.
- 2.3 אופטיקה פיזיקאלית.
 - 2.3.1 התאבכות בין שני גלים: הגדרה, תיאור של תבנית התאבכות. דוגמאות: תיאור של תבנית התאבכות בין שני גלים מישוריים, כאשר בין כיווני ההתפשטות שלהם יש זווית, תיאור של תבנית התאבכות של גל מישורי עם גל כדורי.
 - 2.3.2 התאבכות של גל עם עצמו (גל עומד) בתוך שכבה דקה: הגדרה של גל עומד. דוגמאות: התאבכות בטיפת נוזל, מסנן התאבכות חד-שכבתי, רישום משוואות וביצוע של חישובים מתאימים.
 - 2.3.3 עקיפה: הגדרה, תבנית עקיפה. דוגמאות: עקיפה של אור הבוקע מחרץ, עקיפה של אור הבוקע מקצה מכשול, עקיפה של אור הבוקע משולשת.
 - 2.3.4 נפיצה: הגדרה, נפיצת אור לבן ממנסרה משולשת.
 - 2.3.5 קיטוב: הגדרה, סוגי קיטוב: ליניארי, מעגלי, אליפטי. משוואות פרנל-מקדמי החזרה ומקדמי העברה.

לפרק 2

ביצוע של חישובים

אנרגיה של פוטון, הזוויות במעבר בין תווכים אופטיים, חתך של התפלגות העוצמה של הגל לאורך תבנית התאבכות בין שני גלים מישוריים, תבנית עקיפה מחרץ, מקדם השבירה של חומר באורכי גל שונים, זווית הנפיצה של צבעים שונים ממנסרה, מקדמי העברה ומקדמי החזרה.

מטלות Matlab:

1. חישוב של תבנית עקיפה של חריץ ושל זוג חריצים, הצגה, כגרף וכתמונת פסי בהירות (רמות אפור), של תבנית העקיפה כתלות במאפייני הבעיה (אורך הגל, רוחב החריצים והמרווח ביניהם, המרחק מן המסך).
2. חישוב של תמונת נפיצה כתלות במאפייני הבעיה (מקדם השבירה, אורך הגל, זווית הראש של המנסרה, זווית הפגיעה של הקרן הלבנה, המרחק מן המסך).
3. חישוב של מקדמי ההחזרה ומקדמי ההעברה כתלות במאפייני הבעיה (זווית הפגיעה, מקדמי השבירה של שני התווכים, קיטוב של הגל הפוגע).

12 שעות

3. רכיבים אופטיים

- 3.1 עדשות: הגדרה, סרטוט הטבלה של סוגי העדשות.
 - 3.1.1 עדשות כדוריות: הגדרה.
 - 3.1.2 עדשות כדוריות דקות: הגדרה, סוגים של עדשות דקות.
 - 3.1.3 עדשה דקה מרכזת: הדמיה בעדשה מרכזת (תיאור איכותי, נוסחת החישוב של מרחק הדמות, נוסחת החישוב של מרחק המוקד, הגדרת ההפרדה בין שתי נקודות סמוכות בעצם), מיקוד של אלומה מקבילה (הרלוונטיות של אלומה מקבילה בהדמיה של עצם מרוחק, הגדרת ההפרדה הזוויתית בין שתי אלומות מקבילות סמוכות), מקבול של אלומה ממקור נקודתי, הגדלה, הגדרת הכוח האופטי של עדשה בדיאופטרים, מפתח העדשה (הגדרת מספר המוקד).
 - 3.1.4 עדשה דקה מפזרת: הצגת תכונותיה העיקריות של העדשה המפזרת בהשוואה לאלו של העדשה המרכזת.
 - 3.1.5 שימושים של צירופי עדשות פשוטים: כוח המיקוד של זוג עדשות צמודות, הטלסקופ האסטרונומי (קפלריאני), הטלסקופ הגלילאי, מיקרוסקופ.
 - 3.1.6 מגבלות בהדמיה של עדשה כדורית: (1) עדשה עבה – הגדרה, הגדרת עומק המוקד ועומק השדה, עיוות כדורי ועיוות צבעי, השפעת מספר המוקד על העיוות הצבעי. (2) השפעת העקיפה: השפעת מפתח העדשה ומספר המוקד על הירידה באיכות המיקוד עקב תופעת העקיפה, קריטריון ריילי לגבול ההפרדה הזוויתית של העדשה.
- 3.2 עדשות אספריות: הגדרה, דוגמאות לביצועים משופרים.
- 3.3 מקטב: הגדרה, מאפיינים, מעבר אלומה במקטב (חוק מאלוס), סוגי מקטבים.
- 3.4 סריג: הגדרה, מאפיינים, סוגי סריגים: סריג מופע, סריג אמפליטודה, עקיפה מסריג.

לפרק 3

ביצוע של חישובים

חישוב של מרחק דמות, חישוב של מרחק המוקד של עדשה, הגדלה של עדשה בודדת, כוח אופטי של זוג עדשות, חישוב של מרחק המוקד השקול שלהן, חישוב של מספר המוקד, חישוב של קריטריון ריילי לעדשה נתונה, חישוב ההגדלה של מיקרוסקופ ושל טלסקופ, חישוב של העברת הספק אור במקטב כתלות בזווית הקיטוב שלו.

מטלות Matlab:

1. חישוב מרחק הדמות מהעדשה כתלות במרחק העצם ובאורך המוקד.
2. הערכה כמותית של מידת העיוות הצבעי בעדשה שממקדת אלומה מקבילה של אור לבן, באמצעות חישוב קוטר כתם המיקוד שנוצר במישור המוקד, בעבור פונקציה נתונה של תלות מקדם השבירה של העדשה באורך הגל.
3. חישוב גרף ההעברה של מקטב כנגד זווית האור המקוטב.

12 שעות

4. הסיב האופטי

- 4.1 מבנה של סיב אופטי.
- 4.2 הנחיית אור במנחה גל שכבתי (slab).
 - 4.2.1 אופנים מונחים: תיאור של תנאי ההנחיה (תנאי ההחזרה הפנימית המלאה, (תנאי המופע), תכונות בסיסיות של אופן מונחה.
 - 4.2.2 חישוב האופנים על-פי מודל האופטיקה הגיאומטרית – חישוב של זוויות הקרניים המותרות.
 - 4.2.3 חישוב האופנים על-פי מודל האופטיקה הפיזיקלית – מקדם ההתפשטות, פילוג השדה הקרוב.
- 4.3 הנחיית אור בסיב אופטי.
 - 4.3.1 חישוב האופנים המונחים על-פי מודל האופטיקה הפיזיקלית – מקדם ההתפשטות, פילוג השדה הקרוב.
 - 4.3.2 פילוג השדה הרחוק והקשר בינו ובין זווית הקליטה והמפתח הנומרי.
- 4.4 מגבלות ההתפשטות של אור בסיב אופטי.
 - 4.4.1 ניחות: תיאור של מנגנוני הניחות, תיאור של תלות מקדם הניחות באורך הגל בעבור סיבי זכוכית ופלסטיק (PMMA).
 - 4.4.2 נפיצה: מנגנוני נפיצה (נפיצה בין-אופנית, נפיצה צבעית, נפיצת קיטוב), מקדם הנפיצה, תלות מקדם הנפיצה באורך הגל.
 - 4.4.3 תיאור האופן של בחירת אורך הגל המיטבי משיקולי ניחות ומשיקולי נפיצה.
- 4.5 סוגי סיבים: חד-אופניים, רב-אופניים, סיבי זכוכית, סיבים פלסטיים.
- 4.6 חברי סיבים: SMA, PC/FC.
- 4.7 כלי עבודה של טכנאי תקשורת אלקטרואופטית.
- 4.8 טכניקות של חיבור סיבים – חיבור של סיב לסיב, חיבור של סיב למחבר.

4 לפרק

ביצוע של חישובים

חישוב של זווית ההחזרה המלאה במנחה גל שכבתי, חישוב של מקדמי הנפיצה, חישוב של מידת הרחבת הדפקים עקב נפיצה, חישוב של ניחות הדפקים, חישוב של זווית הקליטה, חישוב של המפתח הנומרי, חישוב של מאזן ההפסדים של מעבר אות בסיב.

מטלות Matlab

1. חישוב מקדם הנפיצה הכולל של סיב רב-אופני כתלות באורך הגל ובמאפייני הסיב (קוטר ליבה, מקדמי שבירה).
2. חישוב גרף הניחות (תלות הניחות במרחק) עבור אורכי גל שונים.
3. חישוב מקדמי ההתפשטות ופילוגי השדה של האופנים בסיב, על-פי תכנית מוכנה.
4. חישוב צורת הדופק במוצא סיב, כתוצאה מניחות ונפיצה בתוך הסיב.

5. מקורות אור לא קוהרנטיים 4 שעות

- 5.1 מאפיינים של מקור אור: אופן הפעולה (רציף, בדפקים), הספק המוצא, היעילות, תחום אורכי הגל, פילוג זוויתי של האלומה, שטח פעיל, זמן תגובה.
- 5.2 מקורות אור שונים הפועלים באור נראה: עקרון הפעולה, המאפיינים, הערכים האופייניים:
 - 5.2.1 נורת להט.
 - 5.2.2 נורה פלואורסצנטית.
 - 5.2.3 נורת כספית.
 - 5.2.4 דיודה פולטת אור (LED).

6. הלייזר 10 שעות

- 6.1 תיאור המבנה ועקרון הפעולה של מערכת לייזר: היפוך אוכלוסין, עקרון ההגברה האופטית, מיהוד אופטי, אופנים אורכיים של מיהוד (תדרי התהודה האורכית).
- 6.2 אלומה גאוסית.
 - 6.2.1 תכונות: הפילוג הרחבי של עוצמת האלומה ותלותו במרחק ההתפשטות, מושג המותן, זווית ההתבדרות, מרחק ריילי, חישוב קוטר כתם האלומה במרחק נתון מן המותן.
 - 6.2.2 מעבר של אלומה גאוסית בעדשה כדורית: תיאור מוכלל, מיקוד ומקבול של אלומה גאוסית.
- 6.3 סוגי לייזר
 - 6.3.1 לייזר גאזי: לייזר הליום ניאון.
 - 6.3.2 לייזר מצב מוצק: לייזר ניאודימיום יאג.
 - 6.3.3 דיודות לייזר: תיאור המבנה של דיודת לייזר פשוטה, מעגל הפעלה של דיודת לייזר, סקירת מגוון דיודות לייזר.

לפרק 6

ביצוע של חישובים

התבדרות האלומה, מרחק ריילי, קוטר הכתם הפוגע במרחק נתון, מאפייני אלומה נתונה במוצא עדשה כדורית.

מטלות Matlab

1. חישוב של קוטר כתם האלומה הפוגעת בעצם הנמצא במרחק נתון ממקור הלייזר כתלות במאפייני הבעיה (קוטר הכתם ההתחלתי, אורך הגל, המרחק). אופטימיזציה (מזעור) של הקוטר ההתחלתי של האלומה, ליצירת קוטר כתם נתון על העצם.

2. חישוב מאפייני העדשה הדרושה (אורך מוקד, קוטר) למיקוד של אלומה גאוסית נתונה (אורך גל, קוטר מותן).

8 שעות

7. גלאים

7.1 תיאור המאפיינים של גלאי: שטח חישה, NEP, זמן תגובה, רוחב פס, תחום דינמי, תגובתיות ספקטראלית.

7.2 מנגנוני רעש הגילוי: רעש ירי, רעש פוטוני, רעש תרמי, רעש המגבר.

7.3 פוטודיודה: הגדרה, מנגנון הגילוי בצומת PN, פער האנרגיה, יעילות קוונטית, משטרי עבודה (פוטומולך, פוטוולטאי).

7.3.1 פוטודיודה פשוטה: תלות התגובתיות באורך הגל בפוטודיודה אידיאלית, מגבלות של פוטודיודה פשוטה, חומרים עיקריים (סיליקון, גליום ארסניד).

7.3.2 פוטודיודת PIN: עקרון הפעולה, ביצועים אופייניים, אופייני גילוי (I-V, I-P).

7.3.3 פוטודיודת מפולת: עקרון הפעולה, ביצועים אופייניים, אופייני גילוי.

7.3.4 תא שמש: אופיינים, יעילות המרה, חומרים עיקריים (סיליקון, פולי-סיליקון, תאי שכבה דקה, גליום-ארסניד).

7.4 מעגלי הגברה לאות החשמלי המתקבל מגלאי פוטודיודה.

לפרק 7

ביצוע של חישובים

זרם גילוי, רעש גילוי, יחס אות לרעש, תגובתיות ספקטראלית של פוטודיודה אידיאלית, נקודת עבודה של פוטודיודה במגבר עקרוני, הספק המוצא של תא שמש.

8 שעות

8. רשת תקשורת סיב-אופטית

8.1 ארכיטקטורת הרשת: ערוצים עורקיים, רשת עירונית (מטרו) ורשת הגישה (לביט, למשרד).

8.2 ערוץ עורקי: מרכיבי הערוץ (משדר, סיב, מגבר או מהדר, מקלט), מגבלת אורך הערוץ, בעיית ריבוב ערוצי נתונים על-גבי סיב יחיד.

8.2.1 מגבלת אורך הערוץ: השפעת הניחות (מאזן ההפסדים של הערוץ האופטי), השפעת הנפיצה (מגבלת הקצב).

8.2.2 ריבוב בחריצי זמן (TDM): עיקרון הפעולה (אפנון דפקים, מבנה של מסגרת), מדרג הריבוב בזמן (מסגרות OC-x), תקן העברת הנתונים ב-TDM (SONET), רכיבים עיקריים ברשת (מתגים, מרבבים).

8.2.3 ריבוב אורכי גל (WDM): עיקרון הפעולה, רכיבים עיקריים ברשת (מתגים, מרבבים).

8.3 רשת גישה סיב-אופטית.

8.3.1 FTTx

8.3.2 PON

18 שעות

9. מערכות הדמיה אלקטרואופטיות

- 9.1 העין: מבנה ותכונות (הפרדה זוויתית, שדה ראייה, רגישות, ראיית צבע, הבחנה בשינויים בזמן).
- 9.2 מערכת הדמיה אלקטרו-אופטית: מבנה עקרוני, יצירת דמות על-ידי תירה. מאפיינים עיקריים: תחום אורכי הגל, הפרדה מרחבית, שדה ראייה, רגישות, קצב עדכון התמונה, הקשר בין זמן החשיפה לכמות הרעש בתמונה, פונקציית התמסורת האופטית, MTF, והתגובה להלם מרחבי, PSF.
- 9.3 חיישני הדמיה אלקטרו-אופטיים: מערכי גלאים דו-ממדיים (2D-CCD, CMOS), מערכי גלאים חד-ממדיים (1D-CCD) והצורך בסריקה מכנית.
- 9.4 סוגים של הדמיה – הדמיה באור נראה והדמיה תרמית: מקור האור בשני המקרים (החזרה לעומת פליטה), ההתנהגות של גוף שחור, תחומי אורך הגל הרלוונטיים (נראה, 3-5 מיקרון, 8-12 מיקרון), בעיית הרגישות.
- 9.5 מערכות הדמיה מעשיות.
- 9.5.1 מערכת הדמיה תרמית: תמונה תרמית בהשוואה לתמונה רגילה, הכרת הגורמים שקובעים את הניגודיות בתמונה התרמית (טמפרטורת העצם, מקדם הפליטה שלו) של האות האופטי, בעיית האות החלש, בעיית הסריקה (מקבילית, טורית), מגבלת העקיפה, רכיבים אופטיים לתחום התת-אדום, מאפיינים ייחודיים של מערכת הדמיה תרמית (NET, MRT).
- 9.5.2 מצלמה ספרתית: מבנה, מאפיינים בסיסיים, מגבלת הפרדה, מגבלת הזיכרון, הצורך בדחיסה, קריטריונים לבחירת המצלמה.
- 9.5.3 מצלמת רשת: מבנה, ערכים אופייניים, מגבלת הערוץ וחשיבות הדחיסה.
- 9.5.4 עכבר אופטי, מבוסס על דפ"א: מבנה ועקרון הפעולה.

לפרק 9

ביצוע של חישובים

ההפרדה הזוויתית הגבולית ושדה הראייה במערכת בעלת חיישן נתון ואופטיקה נתונה, ההפרדה הגבולית בעצם המרוחק מרחק נתון מן המערכת, חישוב ההפרדה באמצעות שימוש בפונקציית ה-MTF של המערכת, חישוב של סריקה ותירה בסיסיים, הקשר בין ההפרדה, קצב המסגרות ורוחב הפס של הערוץ, השפעת קצב המסגרות על רמת הרעש בתמונה.

6 שעות

10. מערכות מבוססות לייזר

- 10.1 מד טווח לייזר: מבנה ועקרון פעולה, חישוב הטווח המרבי, חישוב דיוק מדידת הטווח.
- 10.2 קורא תקליטורים: מבנה ועקרון הפעולה, ההבדל בין צריבה לקריאה, הקשר בין אורך הגל לבין קיבולת התקליטור, סוגי תקליטורים.
- 10.3 עכבר אופטי מבוסס לייזר: מבנה ועקרון הפעולה.
- 10.4 ביו-חיישנים מבוססי התאבכות: תכונות ושימושים.

ספרות מומלצת

1. מבוא לאופטיקה קלאסית ומודרנית, כרך א, הוצאת האוניברסיטה הפתוחה, 1997
 2. מבוא לאופטיקה קלאסית ומודרנית, כרך ב, הוצאת האוניברסיטה הפתוחה, 1997
 3. לייזרים – עקרונות ושימושים, הוצאת האוניברסיטה הפתוחה, 1992
 4. מבוא לתקשורת חזותית, הוצאת מטח, 2006
 5. מבוא לתקשורת חזותית, ניסויים ופרויקטים, הוצאת מטח, 2006
 6. תקשורת אופטית, הוצאת מטח, 2007
 7. *Understanding Optical Communications*, IBM Red Book
 8. ספרות MATLAB, למשל:
 - *Getting Started with MATLAB 7*, Mathworks, 2004
 - *Programming in MATLAB 7*, Mathworks, 2004
 - Data Acquisition Toolbox Product Documentation
- <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/daq/daq.shtml>