

שם הפרויקט:	אופטיקה משטחית
שם המסמך:	תעלים מבוססי מוליכי גל מנודפים
מספר המסמך:	4599-0000-00GA
מהדורה:	01
תאריך:	ינואר 2022
סיווג:	בלמ"ס

Date of Publication:
18 January 2022

הוכן ע"י:

יחידה עסקית תצוגות

אלביט מערכות אלקטרואופטיקה אלאופ בע"מ

ת.ד. 1165, רחובות 76111, ישראל

תיעוד מהדורות

תאור השינויים	תאריך	מהדורה
--	ינואר 2022	Initial freeze

תוכן העניינים

5.....	רקע	.1
5.....	עקרונות פעולה קיימים בעולם	1.1
6.....	נידופים – עקרון פעולה חדש	1.2
7.....	אבני בניין חדשות	.2
7.....	פלטה	2.1
8.....	קומביינר	2.2
9.....	מוט	2.3
9.....	פריסת אישון	3.
9.....	פריסה בפלטה ובקומביינר	3.1
10.....	פריסה במוט	3.2
13.....	פריסה במוט בעזרת סריגים	3.3
14.....	משולש – מקשר בין מוליכי גל	3.4
15.....	מוליך גל מנודף - סוגיות ומימוש	.4
15.....	אחידות עוצמה	4.1
16.....	נצילות אורית	4.2
16.....	שמירת חזית הגל	4.3
16.....	מניעת החזרי אור חיצוניים	4.4
17.....	תצורות תעלים מבוססי מוליך גל מנודף באלאופ	.5
17.....	חצי משטחי	5.1
17.....	קומביינר חצי משטחי	5.2
18.....	משטחי מלא נידופים	5.3
18.....	משטחי מלא סריגים	5.4
19.....	קומביינר משטחי מלא נידופים	5.5
19.....	קומביינר משטחי מלא סריגים	5.6
20.....	איורי התצורות השונות	5.7
25.....	סיכום	.6

רשימת האיורים

- איור 1: מוליך גל בתצורת פלטה (אבן בניין חדשה) 8
- איור 2: מוליך גל בתצורת מוט (אבן בניין חדשה) 9
- איור 3: פריסת האישון במוט 11
- איור 4: פריסת האישון במוט סריגים 14
- איור 5: תצורת תע"ל "חצי משטחי" 20
- איור 6: תצורת תע"ל "קומביינר חצי משטחי" 21
- איור 7: תצורת תע"ל "משטחי מלא נידופים" 22
- איור 8: תצורת תע"ל "משטחי מלא סריגים" 23
- איור 9: תצורת תע"ל "קומביינר משטחי מלא נידופים" 24
- איור 10: תצורת תע"ל "קומביינר משטחי מלא סריגים" 25

1. רקע

תצוגות עיליות למטוסים (תעלי"ם) משמשים כבר עשרות שנים במגוון של מטוסים, כאמצעי עזר להצגת נתוני טיסה לטייס על רק הנוף החיצוני. תע"ל קונוונציונאלי מורכב ממקור תמונה, שרשרת עדשות המשמשות לקולימציה (יצירת תחושה לטייס שהתמונה מגיעה מאינסוף), וכן קומביינר, המאחד את התמונה שמייצר התע"ל עם תמונת הנוף שמגיע מחוץ למטוס.

בעשור האחרון נעשתה קפיצה טכנולוגית משמעותית בתכן תעלי"ם. במסלול האופטי שולב מוליך גל (Waveguide או גלבו) באופן שאיפשר לספק לטייס ביצועים דומים לאלו של תע"ל קונוונציונאלי, תוך הקטנה משמעותית של מקור התמונה ועדשות הקולימציה. התכן החדש מתבסס על יצירת אישון תמונה קטן בעזרת מקור התמונה ועדשות הקולימציה, והרחבה של האישון לגודלו המלא (הדומה לתע"ל קוונבנציונאלי) באמצעות מוליך הגל. מוליך הגל עשוי חומר שקוף, בדרך כלל זכוכית, ובו זוגות של פאות (לפחות זוג אחד) מקבילות.

השימוש במוליך גל לצורך הרחבת אישון הכניסה התרחב הרבה מעבר לתעלי"ם, והוא משמש כאן יסוד ברבים מהתכנים האופטיים של משקפי מציאות רבודה (Augmented Reality - AR).

בכל הטכנולוגיות מכניסים את האור דרך אישון (מפתח) קטן, מוליכים אותו בתוך מוליך הגל ומוציאים אותו דרך אישון גדול יותר. באופן זה נוצרת הרחבת האישון הרצויה. התנועה בתוך מוליך הגל כוללת פגיעה לסירוגין של האור בפאות המקבילות של המוליך, תוך כדי התקדמות לאורכו. לרוב משמשת אחת הפאות כפאת היציאה דרכה יוצא האישון המורחב. בכל אחת מהפגיעות החוזרות בפאת היציאה מוציאים רק חלק מהאור, בעוד רוב האור נשאר בתוך מוליך הגל בדרכו לפגיעה הבאה. הוצאת האור גורמת לצפיפות האור הנע בתוך המוליך ללכת ולרדת. לרוב מעוניינים בעצמת אור אחידה על פני האישון, ומאזנים את הירידה בכמות האור ע"י הגדלת חלקו של האור היוצא על חשבון אחוז האור הנשאר במוליך.

1.1 עקרונות פעולה קיימים בעולם

שתי טכנולוגיות עיקריות משמשות כיום להרחבת אישון הכניסה באמצעות מוליך גל. לכל אחת מהן מספר וריאנטים שונים. המשותף לכל טכנולוגיות ההרחבה, השתיים הנפוצות, כמו לטכנולוגיות ההרחבה אחרות נפוצות פחות, הוא שבכולן האור נע בתוך מוליך הגל ופוגע בפאות המוליך בזוויות גדולות מהזווית הקריטית (Total Internal Reflection - TIR). באופן זה, לא קיימת בריחה לא מתוכננת של אור אל מחוץ למוליך. הצורך להמצא תמיד בזווית גדולה מהזווית הקריטית יוצר אילוץ על גודל שדה הראיה שניתן

להכניס לתוך מוליך הגל. מסיבה זו קיימת נטייה בתעשייה להשתמש במוליך גל העשוי מחומר גלם בעל מקדם שבירה גבוה, עבורו הזווית הקריטית קטנה יותר. שתי הטכנולוגיות העיקריות יפורטו להלן בקצרה.

1.1.1 סריגים

הטכנולוגיה הנפוצה ביותר מבוססת על שימוש בסריגים על מנת להכניס ולהוציא את האור ממוליך הגל. הסריגים משמשים להטיית כיוון ההתקדמות של האור. בין סריג הכניסה לסריג היציאה האור מצוי כאמור ב-TIR, אולם מחוצה להם האור חופשי להכנס ולצאת מהמוליך. לרוב מוסיפים סריגי ביניים נוספים, בין סריג הכניסה ליציאה. הסריגים הנוספים משמשים לעיתים למימוש הרחבת האישון במימד נוסף על מנת לקבל הרחבה דו צרית. במקרים אחרים משמשים הסריגים הנוספים לאיחוד שני מקורות תאורה למקור אחד, וקיימים גם שימושים נוספים.

ריבוי החברות העושות שימוש בסריגים במוליכי גל הביא למגוון רב של וריאנטים. במקור שימשו סריגי surface relief בלבד. בהמשך נכנסו לשימוש גם סריגים נפחיים, סריגים עשויים "Pancharatnam—Berry deflectors and lenses", ועוד.

קיימות שתי חברות המייצרות תעלי"ם המבוססים על מוליכי גל: Collins ו-BAE. שתיהן עושות שימוש בסריגים בווריאנטים שונים.

1.1.2 מראות בתוך מוליך הגל

טכנולוגיה זו אינה משמשת עדיין באף תע"ל, אך נעשה בה שימוש במשקפי AR. לשם הוצאת האור הלכוד ב-TIR בתוך מוליך הגל, נעשה שימוש במראות חצי מעבירות החוצות אלכסונית את מוליך הגל לרוחבו. האור המתנדנד בין פאות מוליך הגל פוגע במראות החצי מעבירות, וחלקו המוחזר מהמראה משנה את כיוונו כך שהוא אינו נמצא עוד ב-TIR ובאופן זה יוצא החוצה ממוליך הגל. החברה המובילה כיום בשימוש בטכנולוגיה זו היא Lumus, אבל קיימות חברות נוספות המשתמשות בווריאנטים של התצורה. דוגמא לווריאנט אחר היא יישום "נקודות" של מראה מושלמת והשארת שאר המשטח האלכסוני שקוף, כתחליף למראה חצי מעבירה.

1.2 נידופים – עקרון פעולה חדש

העקרון החדש מבוסס על הולכת האור בתוך מוליך הגל בזווית נמוכה מזווית ה-TIR, בניגוד לכל עקרונות הפעולה האחרים. על מנת למנוע את זליגת האור החוצה כאשר הוא פוגע מבפנים בפאות המקבילות של המוליך, מצופות הפאות בנידוף מראתי. הכנסת האור מתבצעת דרך אזור באחת הפאות בו לא מיושם הנידוף המראתי. שחרור מבוקר של האור, ליצירת אישון הכניסה המורחב, מושג באמצעות פגיעה מסויימת במידת ההחזרה של הנידוף המראתי של פאת היציאה. ניתן להשיג זאת בשתי דרכים שונות. דרך אחת היא באמצעות יישום של נידוף מראה לא מושלם, המאפשר בריחה מסויימת של אור

דרכו. דרך שנייה היא באמצעות יצירה של חורים זעירים בנידוף מראה מושלם, דרכם זולג אור החוצה מהמוליך.

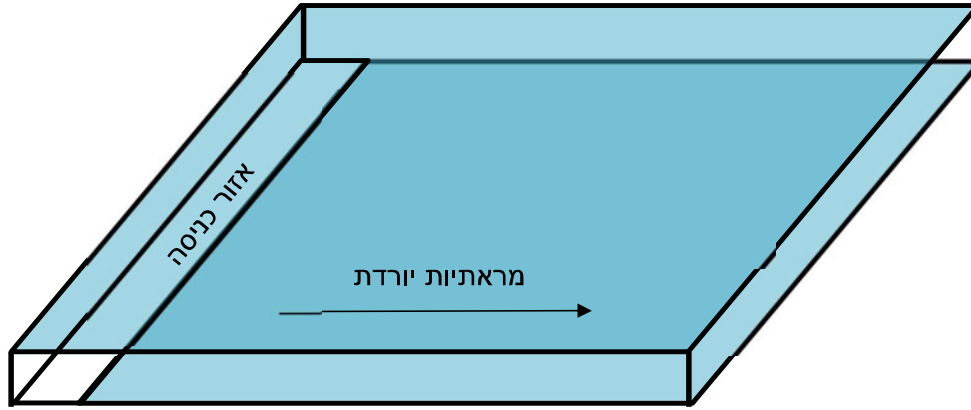
גם בנידופים, בדומה לתנועת הקרניים בשאר עקרונות הפעולה, הקרניים מכל נקודות השדה חייבות להכיל רכיב וקטורי מסויים בכיוון הכללי של מוליך הגל אותו מעוניינים למלא. רק בדרך זו יכולות הקרניים להתקדם בכיוון ציר המוליך ולבנות בהדרגה את אישון היציאה. בנידופים לא קיימים אלמנטים אופטיים המשנים את כיוון תנועת הקרניים, לא בכניסה לא ביציאה ולא בתוך המוליך, ולכן נדרש להכניס למוליך הגל ולהוציא ממנו את האור בהטיה מסויימת. העובדה שאין אלמנטים אופטיים המשנים את כיוון הקרניים ושאינם אלמנטים היוצרים כוח אופטי, מביאה גם לכך ששדות הראיה בכניסה וביציאה מהפלטה זהים.

2. אבני בניין חדשות

2.1 פלטה

מוליך גל בתצורת פלטה עשוי גוש זכוכית, ששתי הפאות הגדולות שלו מישוריות ומקבילות. על גבי אחת הפאות מנודפת מראה מושלמת, בעוד על גבי הפאה השנייה מנודפת מראה עם עבירות משתנה. אזור הכניסה, שעשוי להימצא על גבי כל אחת מהפאות, הוא פס לרוחב המוליך עם נידוף נגד החזרה (Anti Reflection – AR) הממוקם סמוך לקצה הפלטה. ארבע הפאות שבהיקף הפלטה אינן משתתפות

ישירות בתהליך פריסת האישון. עם זאת, שאריות מהאור הנע בפלטה עשויות להגיע אליהן, ולכן פני הפאות לא ממורקות וגם צבועות בצבע שחור בולע.



איור 1: מוליך גל בתצורת פלטה (אבן בניין חדשה)

2.2 קומביינר

תצורת קומביינר דומה במידה מסויימת לתצורת פלטה. בדומה לה, הקומביינר עשוי גוש זכוכית, ששתי הפאות הגדולות שלו מישוריות ומקבילות. על גבי אחת הפאות מנודפת מראה מושלמת, בעוד על גבי הפאה השנייה מנודפת מראה עם עבירות משתנה. אזור הכניסה, שעשוי להימצא על גבי כל אחת מהפאות, הוא פס עם נידוף נגד החזרה (Anti Reflection – AR) הממוקם סמוך לקצה הפלטה.

ההבדל המשמעותי בין שתי התצורות נובע ממכך שמוליך גל בתצורת קומביינר נדרש גם להעביר אחוז גבוה (70-75%) מהאור המגיע מהנוף שמחוץ למטוס. אם לאור ממקור התמונה אורך גל צר יחסית, ניתן לממש את התצורה באמצעות נידופי מראה סלקטיביים לאורכי גל שונים על שתי הפאות הגדולות. אם האור ממקור התמונה גם מקוטב, ניתן להסתייע גם בכך שנידופי המראה יהיו סלקטיביים לקיטובים שונים, מאחר שהאור המגיע מהנוף לעולם אינו מקוטב. במקרה כזה נידופי המראה על שתי הפאות הגדולות יהוו מראה מושלמת עבור אורכי הגל והקיטוב של האור ממקור התמונה, אבל יהיו שקופים לחלוטין בשאר הספקטרום הנראה. העליה הנדרשת בעבירות של פאת היציאה, ממומשת בעזרת חורים זעירים בנידוף בקוטר של כמה עשרות מיקרונים. חורים אלו הם כמעט בלתי נראים בעין בלתי מזויינת. צפיפות

החורים הולכת ועולה לאורך ציר ההתקדמות של האור, ובהתאם עולה גם עבירות האור ממקור התמונה דרך הנידוף.

2.3 מוט

מוליך גל בתצורה זו עשוי גוש זכוכית מוארך, דמוי עפרון, בעל חתך מלבני מדוייק. הוא כולל שני זוגות פאות מקבילות, הניצבות זו לזו. על גבי אחת מארבע הפאות מנודפת מראה מושלמת, בעוד על גבי הפאה הנגדית מנודפת מראה עם עבירות משתנה. אזור הכניסה, שעשוי להימצא על גבי כל אחת משתי הפאות האמורות, הוא פס לרוחב המוליך עם נידוף נגד החזרה (Anti Reflection – AR) הממוקם סמוך לקצה המוט. בניגוד לפלטה, כל ארבע הפאות שבהיקף המוט משתתפות בתהליך פריסת האישון.



איור 2: מוליך גל בתצורת מוט (אבן בניין חדשה)

3. פריסת אישון

3.1 פריסה בפלטה ובקומביינר

האור בכניסה למוליך הגל הוא מקולמט, ולכן בהגדרה כל קרני האור היוצאות מנקודת שדה מסויימת מקבילות זו לזו ויוצרות חזית גל מישורית. נסתכל על קרן אחת מתוך אוסף הקרניים המשווייכות לנקודת שדה אחת. הקרן שתכנס למוליך הגל דרך אזור הכניסה השקוף תנוע בתוך המוליך, תפגע בפאה הנגדית המקבילה של המוליך, ולבסוף תפגע בחזרה בפאה דרכה נכנסה. אם נקודת הפגיעה החוזרת היא עדיין באזור הכניסה, הקרן תצא כלעומת שבאה ותלך לאיבוד. לעומת זאת, אם נקודת הפגיעה החוזרת בפאת הכניסה היא כבר באזור המראתי, אזי הקרן תוחזר מהפאה ותמשיך לנוע במוליך וכך תפגע בפאה שוב ושוב באופן מחזורי.

נתבונן כעת על אוסף כל הקרניים שייצאו מאותה נקודת שדה. כל הקרניים שנקודת הפגיעה החוזרת שלהן היא כבר באזור המראתי, תכסינה שטח על גבי הפאה שצורתו זהה לצורת השטח באזור הכניסה דרכו הן עברו. אוסף הפגיעות הבא של כל הקרניים בפאה יכסה בהמשך שוב ושוב שטח זהה לשטח זה. נשים לב לכך שבאזור הקו המפריד בין אזור הכניסה לאזור המראתי, הקרניים האחרונות

שנכנסות דרך אזור הכניסה, צמודות לקרניים הראשונות החוזרות מהאזור המראתי. באופן דומה, גם הקרניים האחרונות שחוזרות משטח הפגיעה השני צמודות לקרניים הראשונות שחוזרות משטח הפגיעה השלישי. כך נוצר למעשה רצף של קרניים הנעות באותו כיוון ומכסות באופן אחיד, ללא "חורים" וללא "כיסוי כפול". הניתוח עד כה התמקד בנקודת שדה אחת, אבל הוא נעשה בלי הגבלת הכלליות, כך שהוא נכון לכל הנקודות שבשדה הראייה. אוסף נקודות השדה יוצר למעשה את הרחבת האישון.

חשוב לשים לב שאין חשיבות לתוואי של הקו המפריד בין אזור הכניסה לאזור המראתי. הוא עשוי להיות בעל כל צורה שהיא ועדיין תיווצר פריסה טובה של האישון. יחד עם זאת, קיימת חשיבות רבה לחדות הקו. אזור ביניים שאינו מעביר במלואו או מראתי במלואו יגרום לחוסר בין השכפולים השונים של אלומת הקרניים.

נוסף על כך, לנקודות שדה שונות עשוי להיות גודל אזור כניסה שונה. אזור הכניסה של כל נקודות השדה מסתיים תמיד בקו המחבר בין האזור השקוף לאזור המראתי, אבל לכל נקודת שדה הוא עשוי להתחיל במקום אחר. לנקודת שדה שאזור הכניסה שלה לא יואר במלואו יוצר שטח פגיעה שחלקו חשוך. חלק חשוך זה ישופל שוב ושוב לאורך האישון המורחב. לעומת זאת, הארת שטח הגדול מאזור הכניסה אינה משפיעה על האישון המורחב, מאחר שקרניים הפוגעות מחוץ לאזור הכניסה המתאים לשדה אינן מצליחות להכנס למוליך הגל.

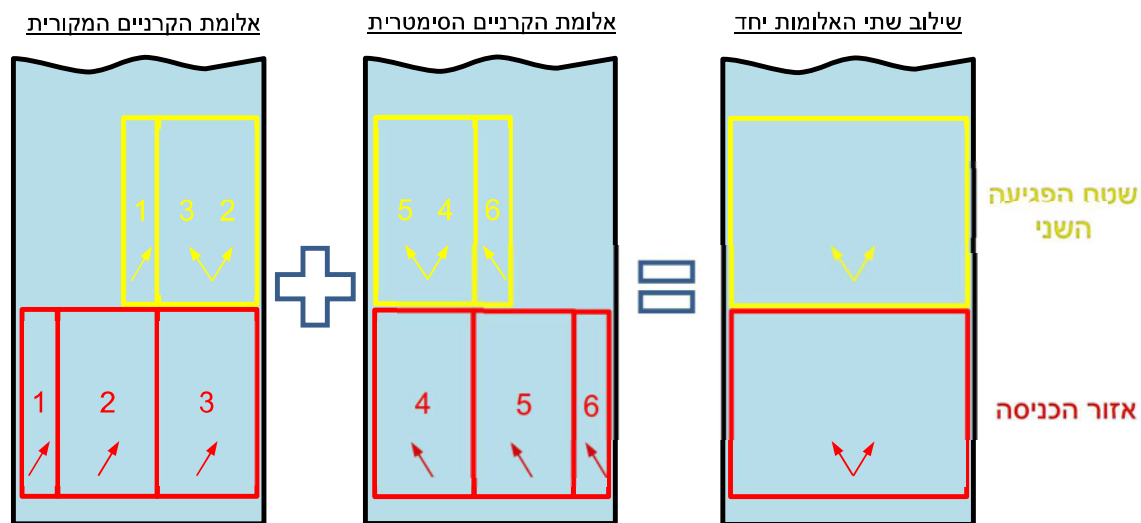
3.2 פריסה במוט

קיים דימיון מסויים בין הפריסה בפלטה או בקומביינר ובין הפריסה במוט. להלן יוצג תהליך הפריסה במוט תוך חידוד הייחודיות שבו. האור בכניסה למוליך הגל הוא מקולמט, ולכן בהגדרה כל קרני האור היוצאות מנקודת שדה מסויימת מקבילות זו לזו ויוצרות חזית גל מישורית. נסתכל על קרן אחת מתוך אוסף הקרניים המשוייכות לנקודת שדה אחת. הקרן שתכנס למוליך הגל דרך אזור הכניסה השקוף תנוע בתוך המוליך, תפגע בפאה הנגדית המקבילה של המוליך, ולבסוף תפגע בחזרה בפאה דרכה נכנסה. אם נקודת הפגיעה החוזרת היא עדיין באזור הכניסה, הקרן תצא כלעומת שבאה ותלך לאיבוד. לעומת זאת, אם נקודת הפגיעה החוזרת בפאת הכניסה היא כבר באזור המראתי, אזי הקרן תוחזר מהפאה ותמשיך לנוע במוליך וכך תפגע בפאה שוב ושוב באופן מחזורי.

במהלך התנועה במוט, עשויה הקרן לפגוע מדי פעם באחת משתי פאות הצד המקבילות. לאחר פגיעה בפאת צד הקרן משנה את כיוונה, אבל הניצבות בין זוגות הפאות גורמת לקרן להמשיך לנוע בכיוון שהוא סימטרי לכיוונה לפני הפגיעה, סביב מישור הסימטריה של פאת הצד. פגיעה נוספת של הקרן בפאה

השניה תחזיר אותה שוב לכיוון התנועה המקורי. באופן זה יכולה הקרן לנוע במוט באחד משני כיוונים שונים, סימטריים זה לזה.

נתבונן כעת על אוסף כל הקרניים שייצאו מאותה נקודת שדה. כל הקרניים שנקודת הפגיעה החוזרת שלהן היא כבר באזור המראתי, תכסינה שטח כולל על גבי הפאה שצורתו זהה לצורת השטח באזור הכניסה דרכו הן עברו. יודגש, שבמוט שטח זה יורכב בדרך כלל משני חלקים – אחד מהם כולל את הקרניים שבכיוון התנועה של הקרן המקורית, והשני כולל את הקרניים בכיוון הסימטרי. שני תתי השטחים עשויים לחפוף זה לזה כך שהשטח על גבי המוט דרכו יוצאות קרניים ייקטן. באופן זה יוצרו "חורים" בפריסה וגם חלק מהאור יאבד בתנועה לכיוון הסימטרי הלא רצוי. עם זאת, אוסף הפגיעות הבא של כל הקרניים בפאה יכסה בהמשך שוב ושוב שטח זהה לשטח כולל זה. מפגיעה לפגיעה עשוי להשתנות שטחם היחסי של תתי השטחים, אבל השטח הכולל יישמר. על מנת להתגבר על הבעיה ולקבל פריסה במוט, משכפלים את אלומת הקרניים שפגעה באזור הכניסה, ומכניסים למוט אלומה נוספת, סימטרית לאלומה המקורית. האלומה הנוספת משלימה בדיוק את ה"חורים" שנוצרו בכיסוי של האלומה המקורית. באופן זה המילוי הכפול של אזור הכניסה בשתי אלומות סימטריות יוצר כיסוי מושלם בדומה לכיסוי של הפלטה או הקומביינר. תהליך הכיסוי במוט מומחש ויזואלית באיור 3, במבט על פאת הכניסה של המוט מהיטל על.



איור 3: פריסת האישון במוט

דרך פשוטה למימוש שתי אלומות סימטריות היא באמצעות שילוב מראה נוספת. המראה מוצבת כך שהיא למעשה ממשיכה אל מחוץ למוט את אחת הפאות הצדדיות שלו. אם אלומת הקרניים הפוגעת גדולה

מספיק, חלקה יפגע ישירות בפאת הכניסה וחלקה יפגע בפאת הכניסה רק לאחר שכבר פגע במראה. הקרניים שפגעו תחילה במראה תהיינה סימטריות לקרניים שלא פגעו.

באזור הקו המפריד בין אזור הכניסה לאזור המראתי, הקרניים האחרונות שנכנסות דרך אזור הכניסה, צמודות לקרניים הראשונות החוזרות מהאזור המראתי. באופן דומה, גם הקרניים האחרונות שחוזרות משטח הפגיעה השני צמודות לקרניים הראשונות שחוזרות משטח הפגיעה השלישי. כך נוצר למעשה רצף של קרניים הנעות באותו כיוון ומכסות באופן אחיד, ללא "חורים" וללא "כיסוי כפול". הניתוח עד כה התמקד בנקודת שדה אחת, אבל הוא נעשה בלי הגבלת הכלליות, כך שהוא נכון לכל הנקודות שבשדה הראייה. אוסף נקודות השדה יוצר למעשה את הרחבת האישון.

חשוב לשים לב שבניגוד לפלטה או לקומביינר לצורך פריסה במוט קיימת חשיבות רבה לתוואי של הקו המפריד בין אזור הכניסה לאזור המראתי. התוואי חייב להיות קו ישר לרוחב ציר המוט. קיימת חשיבות רבה גם לחדות הקו. אזור ביניים שאינו מעביר במלואו או מראתי במלואו יגרום לחוסר בין השכפולים השונים של אלומת הקרניים.

נוסף על כך, גודל אזור הכניסה עשוי להיות שונה עבור נקודות שדה שונות. אזור הכניסה של כל נקודות השדה מסתיים תמיד בקו המחבר בין האזור השקוף לאזור המראתי, אבל לכל נקודת שדה הוא עשוי להתחיל במקום אחר. לנקודת שדה שאזור הכניסה שלה לא יואר במלואו יוצר שטח פגיעה שחלקו חשוך. חלק חשוך זה ישוכפל שוב ושוב לאורך האישון המורחב. לעומת זאת, הארת שטח הגדול מאזור הכניסה אינה משפיעה על האישון המורחב, מאחר שקרניים הפוגעות מחוץ לאזור הכניסה המתאים לשדה אינן מצליחות להכנס למוליך הגל.

נשוב כעת לקרניים היוצאות דרך פאת היציאה של המוט בעלת העבירות המשתנה. כאמור, ביציאה מהמוט יוצאות למעשה שתי תמונות סימטריות יחסית לקו האמצע האורכי של פאת היציאה. אם חלקים בשדה הראיה יימצאו משני צידיו של מישור הסימטריה של המוט, חלקים מהתמונה המקורית ומתמונת הסימטריה יפלו זה על גבי זה ויינעו באותו כיוון. במקרה כזה לא ניתן יהיה להפריד עוד בין התמונות. על מנת להמנע ממצב כזה, מטרים הצידה את שדה הראיה של התמונה בכניסה למוט במידה כזו שכולו נמצא באחד מצידיו של מישור הסימטריה. דרישה זו מצמצמת את גודלו התאורטי של שדה הראיה מ- 180° ל- 90° . ניתן לאחד בחזרה את שתי התמונות לתמונה אחת באמצעות הצבת מראה בצמוד ליציאה מהמוט, כך שהיא למעשה ממשיכה אל מחוץ למוט את אחת הפאות הצדדיות שלו, בדומה למראה שהוצבה בכניסה

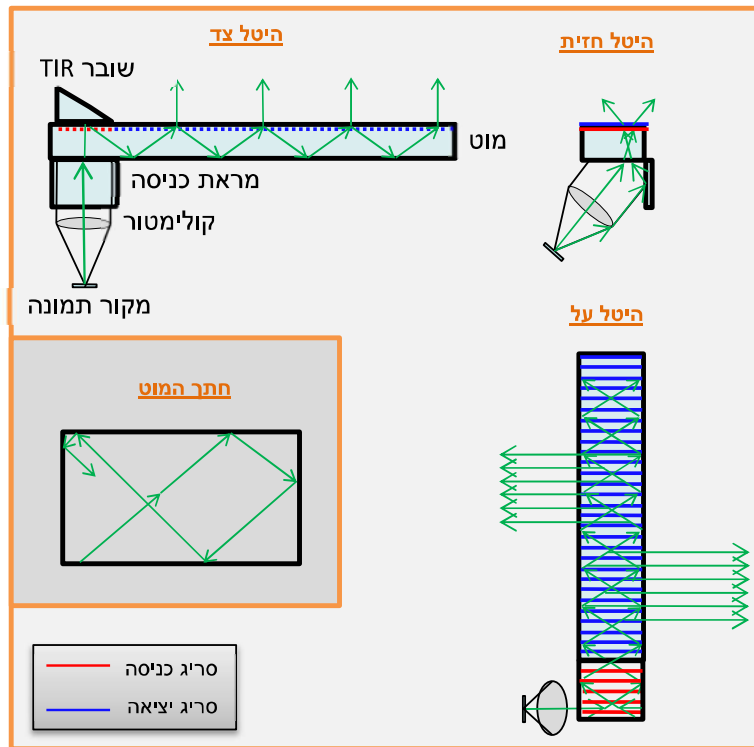
למוט. אחת מהתמונות היוצאות (המקורית או הסימטרית) תפגע בה, תשנה את כיוונה לכיוון התמונה שלא פגעה במראה, ותיצור אישון יציאה כפול ברוחבו מאישון היציאה שיוצרת תמונה בודדת.

3.3 פריסה במוט בעזרת סריגים

בפסקה 3.2 הוצג תהליך פריסת האישון במוט נידופים, אולם ניתן לפרוס אישון במוט גם ע"י מימוש של סריגים על גבי אזורי הכניסה והיציאה של המוט. שימוש במוט סריגים אינו חדשני בפני עצמו כאמור בפסקה 1.1.1, אבל קיימת חדשנות בצימוד שלו למוליכי הגל האחרים שפיתחנו, וגם בהתאמות שביצענו במימוש המדויק של מוט הסריגים לצורך הצימוד. סריג הוא הפרעה מחזורית משטחית, לדוגמה הטבעה של חריצים מקבילים בפני המוט, הגורמת לשינוי כיוון התנועה של אור הפוגע בסריג. אופן המימוש המדויק של הסריג קובע את מידת שינוי הכיוון ואת יעילות התגובה בין האור והסריג. סריג הכניסה וסריג היציאה פועלים כצמד. סריג הכניסה מסובב את האור הפוגע בו לכיוון ציר המוט באופן שגורם לאור לעבור את הזווית הקריטית של הזכוכית ולהילכד בתוך המוט. סריג היציאה מסובב חלק מהאור חזרה לזווית הכניסה המקורי וכך מאפשר לו לצאת מהמוט. מתכננים את סריג הכניסה ליעילות מקסימאלית, על מנת לגרום למלוא האור הפוגע בו לנוע בתוך המוט. את סריג היציאה לעומת זאת, מתכננים בכוונה עם יעילות נמוכה יותר ומשתנית על מנת לקבל עצמה אחידה על פני אזור היציאה, כפי שיוסבר בפסקה 4.1.

במוט סריגים אזור הכניסה מתקבל על גבי סריג הכניסה, כך שכל קרן שהגיבה עם סריג הכניסה והסתובבה על ידיו נחשבת ככזו שהגיעה לאזור הכניסה. בתהליך הפריסה במוט נידופים ראינו שאם נקודת הפגיעה החוזרת היא עדיין באזור הכניסה, הקרן תצא כלעומת שבאה ותלך לאיבוד. התנהגות זו חשובה למניעת "כיסוי כפול" באישון היציאה. משיקולים דומים, יש לגרום לאור המיותר לצאת גם ממוט הסריגים, רק שהפעם האור המיותר פוגע שוב באזור הכניסה כאשר הוא כבר ב-TIR בגלל הסיבוב ע"י הסריג. משחררים את האור המיותר באמצעות אלמנט אופטי נוסף, המכונה "שובר TIR", ועשוי מחומר בעל מקדם

שבירה זהה למוט. שובר ה-TIR וסריג הכניסה חייבים להסתיים יחד באופן חד, בדומה למעבר בין אזור הכניסה למראה במוט נידופים. הפריסה במוט סריגים מוצגת גרפית באיור 4.



איור 4: פריסת האישון במוט סריגים

3.4 משולש – מקשר בין מוליכי גל

כאמור, ביציאה מהמוט יוצאות למעשה שתי תמונות סימטריות יחסית לקו האמצע האורכי של פאת היציאה, ועל מנת לאחד את שתי התמונות לתמונה אחודה בעלת שטח כפול עושים שימוש במראה נוספת. נוח לממש מראה זו כחלק ממוליך גל נוסף. מוליך גל זה עשוי לוח זכוכית החתוך בצורת משולש, וששתי הפאות הגדולות שלו מנודפות מראה מושלמת, למעט פס בגודל פאת היציאה של המוט הצמוד ליתר של המשולש, על גבי אחת הפאות הגדולות, שנתר ללא נידוף. המוט מוצמד לאזור לא מנודף זה של המשולש. כך אחת התמונות נעה ישירות מהמוט אל תוך המשולש, בעוד התמונה השנייה נעה לכיוון הנגדי. התמונה השנייה פוגעת בפאת היתר של המשולש, הניצבת לפאות הגדולות והמראתיות, ומוחזרת ממנה. לאחר ההחזרה שתי התמונות נעות באותו כיוון והן פורסות יחד את התמונה לאורך המשולש. לפאה המהווה את

אחד מהניצבים של המשולש מצמידים מוליך גל בתצורת פלטה. אל השילוב של המשולש והפלטה ניתן להתייחס כאל מוליך גל בתצורת פלטה שאינו מוציא כלל את אור הנע בתוכו בתחילת התנועה (במשולש) אלא רק מחלקו השני (בפלטה). הוספת המשולש מאפשרת להעביר ביעילות את האור בין מוליך גל בתצורת מוט למוליך גל בתצורת פלטה או קומבינר.

4. מוליך גל מנודף - סוגיות ומימוש

4.1 אחידות עוצמה

כפי שצויין לעיל, הוצאת האור מתוך מוליך הגל גורמת לצפיפות האור הנע בתוכו לדעוך בהדרגה. אנו מעוניינים בעצמת אור אחידה על פני אישון היציאה, ולכן אנו מאזנים את הירידה בכמות האור ע"י הגדלת חלקו של האור היוצא על חשבון אחוז האור הנשאר במוליך. המשמעות היא שנדרש ליצור נידוף עם רמת עבירות משתנה לאורך ציר פריסת האור על גבי פאת היציאה ממנה יוצא האישון המורחב.

למידת העבירות הנדרשת בכל מיקום לאורך ציר הפריסה ישנו קשר חד חד ערכי עם מספר הפגיעות הצפוי לאורך הציר בפאת היציאה. נסמן את כיוון ציר הפריסה ב- z. בפגיעה האחרונה מעוניינים בעבירות מלאה (100%) מאחר שאין טעם לשמור עוד אור להמשך. בפגיעה האחת לפני האחרונה מעוניינים בעבירות של 50% על מנת לחלק את האור שווה בשווה בין שתי הפגיעות האחרונות. בפגיעה השתיים לפני האחרונה מעוניינים בעבירות של 33% על מנת לחלק את האור שווה בשווה בין שלוש הפגיעות האחרונות, הנוכחית והשתיים שעוד נותרו. ניתן לראות באינדוקציה שעל מנת לקבל עצמת אור אחידה על פני אישון היציאה נדרש ליצור נידוף עם רמת עבירות המשתנה כמו $1/n$ לאורך ציר פריסת האור על גבי פאת היציאה ממנה יוצא האישון המורחב, כאשר n הוא מספר הפגיעות הצפוי לאורך הציר. אם צפוי איבוד אור קבוע בין פגיעה לפגיעה, ניתן לקחת אותו בחשבון בחלוקת האור ולתקן בהתאם את פונקציית השתנות העבירות.

בשלב זה חשוב לשים לב שמספר הפגיעות לאורך אישון היציאה אינו קבוע. לכל נקודה בשדה שהוכנס למוליך הגל עשוי להיות מספר פגיעות שונה. מאחר שקיימת תלות חד חד ערכית בין המיקום בשדה ובין זווית הפגיעה בפאת היציאה (Angle Of Incidence - AOI), נדרש שהנידוף יגרום לכך שהעבירות תשתנה גם כתלות בזווית הפגיעה, כלומר $T(z, AOI)$. שינוי העבירות הוא לאורך ציר z בלבד, בעוד שוקטור הקרן הפוגעת עשוי להכיל רכיב גם בכיוון הציר הניצב לרוחב המוליך, ולכן ניתן לשלוט רק על $T(z, AOI_z)$. מסיבה זו, ככל ש-AOI קרוב יותר ל-AOI_z כך ניתן תיאורטית לתכנן נידוף שיביא לאחידות

טובה יותר של האור ביציאה. מעניין לציין שנדרשת עבירות T גבוהה יותר ככל שזווית הפגיעה AOI גדולה יותר.

4.2 נצילות אורית

לנצילות האורית של מוליך הגל חשיבות מרובה, מאחר שתעלי"ם מוגבלים בדרך כלל בפרמטר זה. ירידה בנצילות האורית נגרמת בגלל הבדלים בגודל אזור הכניסה בין נקודות שדה שונות, כמוסבר בפסקה 3.1. אישון הכניסה המכיל את כל נקודות השדה, ושבזו מאירים את אזור הכניסה למוליך הגל, חייב להיות גדול יותר מאזור הכניסה. עבור מרווח נתון בין הפאות המקבילות, אזור הכניסה גדל ככל שה-AOI גדל, ולכן, נקודות שדה עבוך ה-AOI קטן יחסית צפויות להפסיד אחוז גדול יותר מהאור באישון הכניסה שלא יצליח להכנס למוליך הגל. כך עשוי להווצר חוסר אחידות בעצמת ההארה בין נקודות שדה שונות. באופן כללי, האחידות על פני השדה צפויה להיות טובה יותר ככל שגודל השדה קטן יותר. ניתן כמובן להפחית את עצמת ההארה של נקודות השדה החזקות יותר ע"י יצירת חוסר אחידות מכוון בעצמת ההארה של מקור התמונה, אבל המשמעות היא ירידה כללית בעצמת ההארה, ופגיעה בנצילות האורית.

4.3 שמירת חזית הגל

תמונה שהוכנסה למוליך הגל תלך ותאבד חדות במהלך התנועה בתוך המוליך. הגורם העיקרי לירידה בחדות הוא פגיעה בחזית הגל כאשר פאות המוליך בהן פוגע האור אינן מישוריות לחלוטין. הירידה בחדות תתבטא בירידה ב-MTF ובתוספת אור מפוזר שייפגע בקונטרסט (Contrast Ratio Low) Ambient – CRLA). אופי התנועה בתוך מוליך הגל מביא לפגיעות מרובות בפאות המוליך, בניגוד למתרחש בתע"ל קונוונציונאלי שבו חזית האור פוגעת רק פעם אחת בכל משטח אופטי במהלך התקדמות האור. הפגיעות הרבות מביאות לפגיעה מצטברת בחדות. מסיבה זו מוליך הגל נדרש למישוריות טובה במיוחד של הפאות המשתתפות בהולכת האור.

4.4 מניעת החזרי אור היצוניים

כמוסבר בפסקה 4.1, הנידוף המיושם על גבי פאת היציאה צריך לאפשר לאור עבירות המשתנה בקירוב כמו $1/n$, כאשר n הוא מספר הפגיעות הצפוי לאורך הציר. המשמעות היא שלאורך רוב פאת היציאה מידת העבירות הנדרשת היא נמוכה למדי, וההחזר בהתאם הוא גבוה. טייס שיביט לתוך התע"ל עשוי לראות את עצמו משתקף בתמונה, או לחילופין לראות החזר של מקורות אור חזקים בקוקפיט או את השמיים. על מנת למנוע את החזר ניתן למקם על גבי מוליך הגל פויל של $\lambda/4$ ומעליו מקטב (השילוב מכונה 'מקטב מעגלי'), היוצרים יחד פילטר חד כיווני לאור. אור היצוני שעובר דרך הפויל הלוך ושוב ייחסם

ביציאה, בעוד שאור היוצא מהתע"ל ועובר דרך הפויל רק פעם אחת – יעבור. חשוב לשים לב, שבאופן כללי, למעט במקרים מיוחדים, חצי מהאור היוצא ממוליך הגל ייבלע במעבר.

5. תצורות תעלים מבוססי מוליך גל מנודף באלאופ

בעזרת אבני הבניין המתוארות בפרק 2 ניתן להרכיב מגוון תצורות חדשות של תעלי"ם, שלא היו ניתנות למימוש עד היום. התצורות השונות מפורטות להלן. איורים של כל התצורות מוצגים בפסקה 5.7.

5.1 חצי משטחי

בתע"ל זה נעשה שימוש במוליך גל בתצורת פלטה. למוליך הגל משודך מקור תמונה שזהה למקור התמונה של תע"ל קונונציונאלי, למעט שיפור אופציונאלי שיוסבר בהמשך. האור היוצא ממקור התמונה מושלך לאינסוף באמצעות קולימטור עשוי עדשות פחוסות. עדשות אלו הן עדשות סטנדרטיות, בדומה לאלו המשמשות בתע"ל קונונציונאלי, שעברו קטימה בחלקן העליון והתחתון. באופן זה לשרשרת העדשות של הקולימטור מבנה דמוי פלטה – רחב במימד אחד וצר בשני. לאישון שנוצר במוצא הקולימטור צורת פס, והוא מוטל על אזור הכניסה של מוליך הגל כך שהציר האופטי שלו מוטה במקצת על מנת לאפשר לכל נקודות השדה להתקדם במוליך.

האור היוצא ממקור תמונה קונונציונאלי מתפזר לרוב באופן שווה לכל זווית אזימוטלית מכל נקודה על גביו. מאחר שלאזור הכניסה למוליך הגל צורה לא סימטרית של פס, כמות משמעותית של אור כלל לא תצליח להכנס למוליך. לאור זאת ניתן להשתמש בדיפוזר אליפטי בעל זוויות פיזור שונות בין הצירים שלו, שיטיל את האור רק על גבי אזור הכניסה וישפר את הנצילות האורית.

במוצא הפלטה נוצר אישון יציאה מורחב לאחר שפס הכניסה משתכפל. אישון היציאה דומה בגודלו לאישון במוצא עדשת היציאה של תע"ל קונונציונאלי, והוא יוצא מהפלטה עם ציר אופטי מוטה מעט, בדומה להטיה שבכניסה לפלטה. אישון היציאה פוגע בקומביינר רגיל בדומה לקומביינר של תע"ל קונונציונאלי, ומשם ממשיך לעבר הטייס. על מנת להפחית החזרי אור לא רצויים מהפלטה המראתית, מיישמים על גביה מקטב מעגלי.

5.2 קומביינר חצי משטחי

התע"ל בתצורה זו מתבסס על מוליך גל בתצורת קומביינר. למוליך הגל משודך מקור תמונה שזהה למקור התמונה של תע"ל קונונציונאלי. האור היוצא ממקור התמונה מושלך לאינסוף באמצעות קולימטור עשוי עדשות פחוסות. עדשות אלו הן עדשות סטנדרטיות, בדומה לאלו המשמשות בתע"ל קונונציונאלי,

שעברו קטימה בחלקן העליון והתחתון. באופן זה לשרשרת העדשות של הקולימטור מבנה דמוי פלטה – רחב במימד אחד וצר בשני. לאישון שנוצר במוצא הקולימטור צורת פס, והוא מוטל על אזור הכניסה של מוליך הגל כך שהציר האופטי שלו מוטה במקצת על מנת לאפשר לכל נקודות השדה להתקדם במוליך.

במוצא הקומבינר נוצר אישון יציאה מורחב לאחר שפס הכניסה משתכפל. אישון היציאה דומה בגודלו לאישון במוצא עדשת היציאה של תע"ל קונוונציונאלי, והוא יוצא מהפלטה עם ציר אופטי מוטה מעט, בדומה להטיה שבכניסה לפלטה. אישון היציאה בתצורה זו ממשיך ישירות לעבר הטייס ללא צורך באלמנטים אופטיים נוספים.

5.3 משטחי מלא נידופים

תע"ל זה מתבסס על שילוב של מוליך גל בתצורת פלטה עם מוליך גל בתצורת מוט. מקור התמונה זעיר בהשוואה לתעלי"ם קונוונציונאליים. האור היוצא ממנו מושלך לאינסוף באמצעות קולימטור עשוי עדשות בקוטר קטן, בהתאמה לגודלו הזעיר של מקור התמונה. האור מוטל על אזור הכניסה של המוט כך שהציר האופטי שלו מוטה במקצת על מנת לאפשר לכל נקודות השדה להתקדם במוליך. בנוסף, המוט עצמו מוטה בזווית יחסית לכיוון יציאת האור מהתע"ל. בכניסה למוט מוצבת מראה ליצירת התמונה הסימטרית הנדרשת לצורך הפריסה במוט, כמוסבר בפסקה 3.2. לאחר שהמוט פורס את האישון לאורכו עובר האור למשולש וממנו לפלטה כמוסבר בפסקה 3.4. במוצא הפלטה נוצר אישון יציאה מורחב לאחר שפס הכניסה משתכפל. אישון היציאה דומה בגודלו לאישון במוצא עדשת היציאה של תע"ל קונוונציונאלי, והוא יוצא מהפלטה עם ציר אופטי מוטה מעט, בדומה להטיה שבכניסה למוט. אישון היציאה פוגע בקומבינר רגיל בדומה לקומבינר של תע"ל קונוונציונאלי, ומשם ממשיך לעבר הטייס. על מנת להפחית החזרי אור לא רצויים מהפלטה המראתית, מיישמים על גביה מקטב מעגלי.

5.4 משטחי מלא סריגים

בתע"ל זה מקור התמונה זעיר בהשוואה לתעלי"ם קונוונציונאליים, בדומה לתע"ל משטחי מלא נידופים. האור היוצא ממנו מושלך לאינסוף באמצעות קולימטור עשוי עדשות בקוטר קטן, בהתאמה לגודלו הזעיר של מקור התמונה. מאחר שסריג הכניסה מסובב את האור הנכנס למוט, אין צורך להטיל את האור על אזור הכניסה של המוט בהטייה. מסיבה זו גם אין צורך ליצור הטייה מכוונת בין המוט ובין כיוון יציאת האור מהתע"ל ולכן המוט פשוט מוצמד מתחת לפלטה לאזור הכניסה שלה, ואין צורך במשולש. בכניסה למוט מוצבת מראה ליצירת התמונה הסימטרית הנדרשת לצורך הפריסה במוט, כמוסבר בפסקה 3.2. לאחר שהמוט פורס את האישון לאורכו הוא עובר כאמור ישירות לפלטה. במוצא הפלטה נוצר אישון יציאה מורחב לאחר שפס הכניסה משתכפל. אישון היציאה דומה בגודלו לאישון במוצא עדשת היציאה של

תע"ל קונוונציונאלי, והוא יוצא מהפלטה עם ציר אופטי מוטה מעט, בדומה להטיה שבכניסה למוט. אישון היציאה פוגע בקומביינר רגיל בדומה לקומביינר של תע"ל קונוונציונאלי, ומשם ממשיך לעבר הטייס. על מנת להפחית החזרי אור לא רצויים מהפלטה המראתית, מיישמים על גביה מקטב מעגלי.

5.5 קומביינר משטחי מלא נידופים

תע"ל זה מתבסס על שילוב של מוליך גל בתצורת פלטה עם מוליך גל בתצורת מוט. מקור התמונה זעיר בהשוואה לתעלי"ם קונוונציונאליים. האור היוצא ממנו מושלך לאינסוף באמצעות קולימטור עשוי עדשות בקוטר קטן, בהתאמה לגודלו הזעיר של מקור התמונה. האור מוטל על אזור הכניסה של המוט כך שהציר האופטי שלו מוטה במקצת על מנת לאפשר לכל נקודות השדה להתקדם במוליך. בנוסף, המוט עצמו מוטה בזווית יחסית לכיוון יציאת האור מהתע"ל. בכניסה למוט מוצבת מראה ליצירת התמונה הסימטרית הנדרשת לצורך הפריסה במוט, כמוסבר בפסקה 3.2. לאחר שהמוט פורס את האישון לאורכו עובר האור למשולש וממנו לקומביינר כמוסבר בפסקה 3.4. האור מוטל על אזור הכניסה של הקומביינר כך שהציר האופטי שלו מוטה במקצת על מנת לאפשר לכל נקודות השדה להתקדם במוליך.

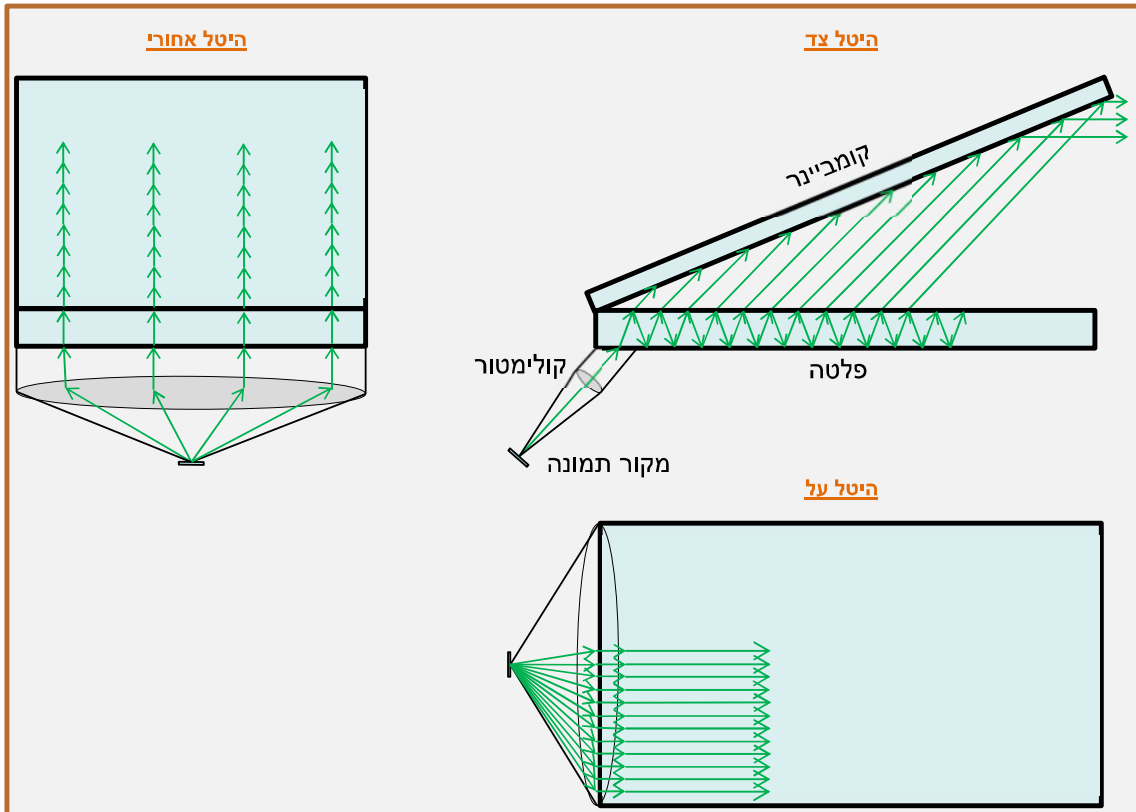
במוצא הקומביינר נוצר אישון יציאה מורחב לאחר שפס הכניסה משתכפל. אישון היציאה דומה בגודלו לאישון במוצא עדשת היציאה של תע"ל קונוונציונאלי, והוא יוצא מהפלטה עם ציר אופטי מוטה מעט, בדומה להטיה שבכניסה לפלטה. אישון היציאה בתצורה זו ממשיך ישירות לעבר הטייס ללא צורך באלמנטים אופטיים נוספים.

5.6 קומביינר משטחי מלא סריגים

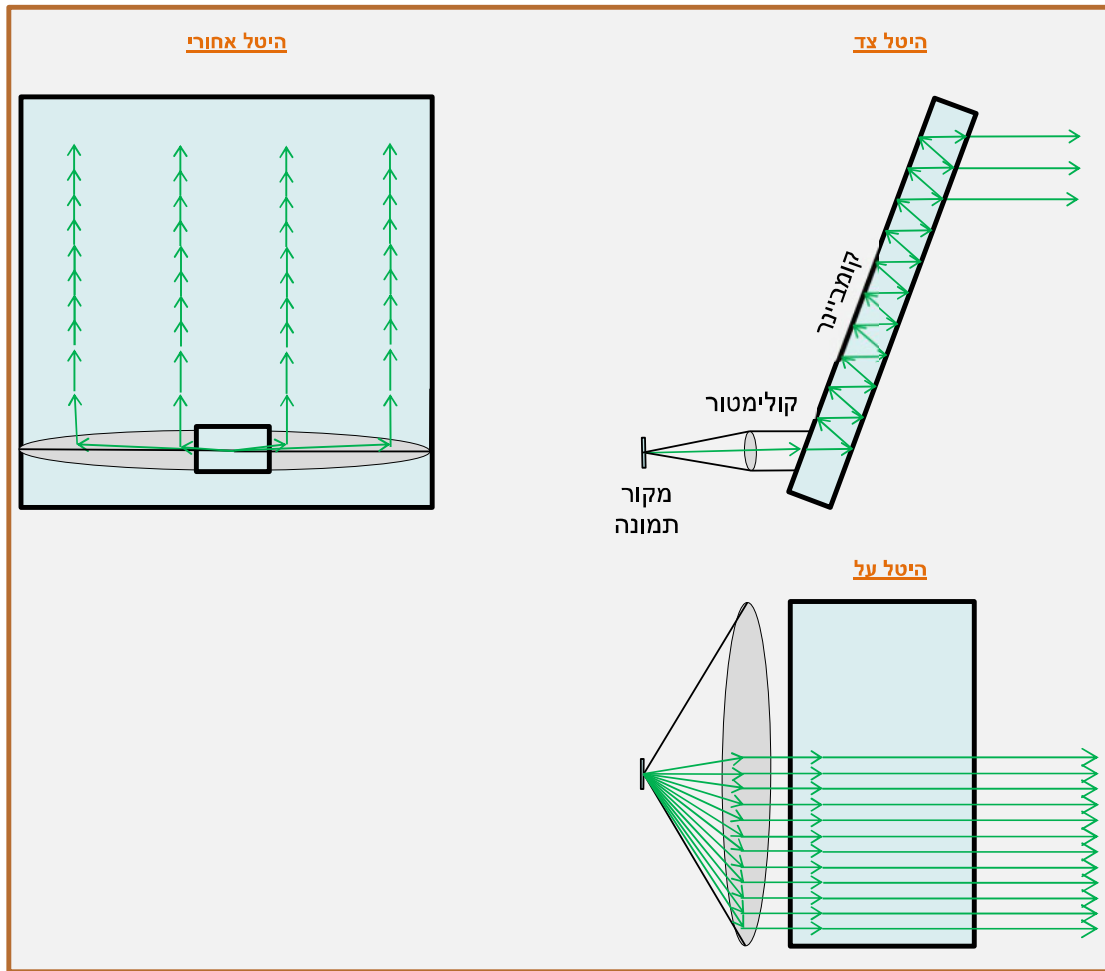
בתע"ל זה מקור התמונה זעיר בהשוואה לתעלי"ם קונוונציונאליים, בדומה לתעלי"ם המשטחיים המלאים האחרים (נידופים וסריגים). האור היוצא ממנו מושלך לאינסוף באמצעות קולימטור עשוי עדשות בקוטר קטן, בהתאמה לגודלו הזעיר של מקור התמונה. מאחר שסריג הכניסה מסובב את האור הנכנס למוט, אין צורך להטיל את האור על אזור הכניסה של המוט בהטייה. מסיבה זו גם אין צורך ליצור הטייה מכוונת בין המוט ובין כיוון יציאת האור מהתע"ל, ולכן המוט פשוט מוצמד מתחת לפלטה לאזור הכניסה שלה, דבר המייתר גם את המשולש. בכניסה למוט מוצבת מראה ליצירת התמונה הסימטרית הנדרשת לצורך הפריסה במוט, כמוסבר בפסקה 3.2. לאחר שהמוט פורס את האישון לאורכו הוא עובר כאמור ישירות לפלטה. במוצא הפלטה נוצר אישון יציאה מורחב לאחר שפס הכניסה משתכפל. אישון היציאה דומה בגודלו לאישון במוצא עדשת היציאה של תע"ל קונוונציונאלי, והוא יוצא מהפלטה עם ציר אופטי מוטה מעט, בדומה להטיה שבכניסה למוט. אישון היציאה פוגע בקומביינר רגיל בדומה לקומביינר של תע"ל

קונוונציונאלי, ומשם ממשיך לעבר הטייס. על מנת להפחית החזרי אור לא רצויים מהפלטה המראתית, מיישמים על גביה מקטב מעגלי.

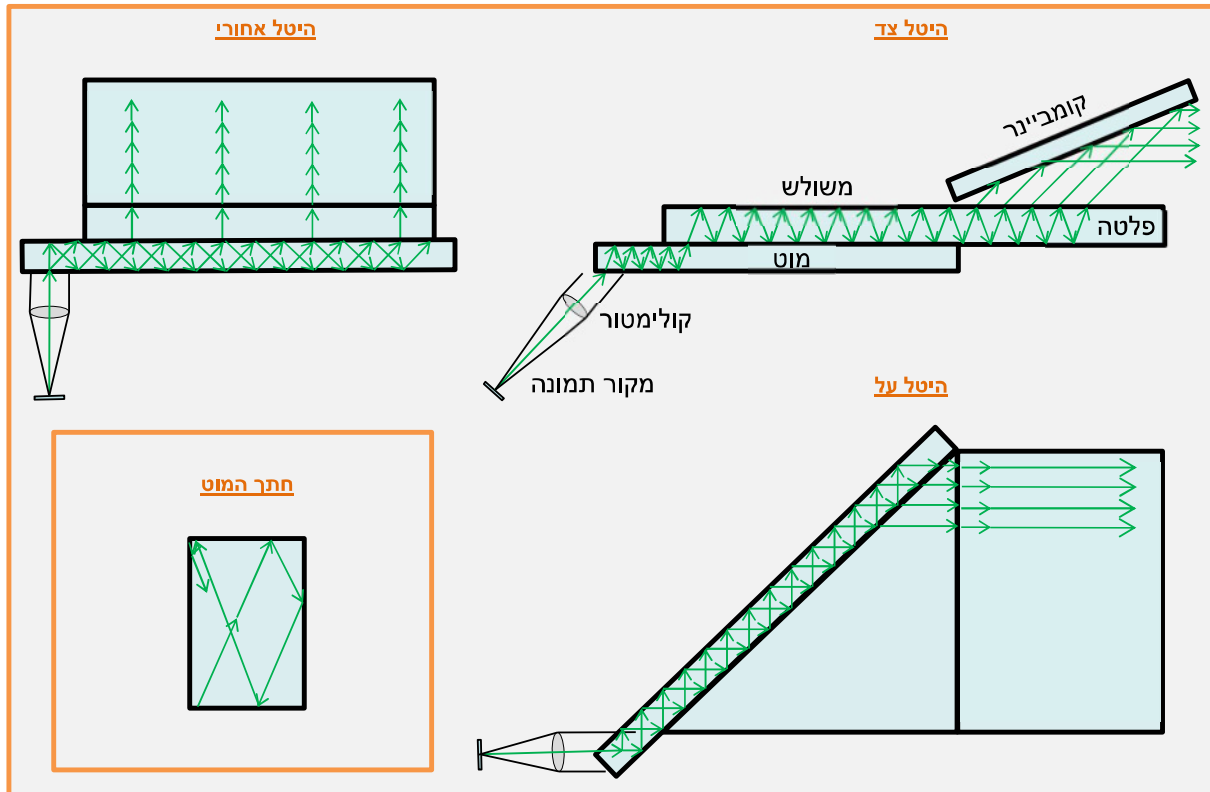
5.7 איורי התצורות השונות



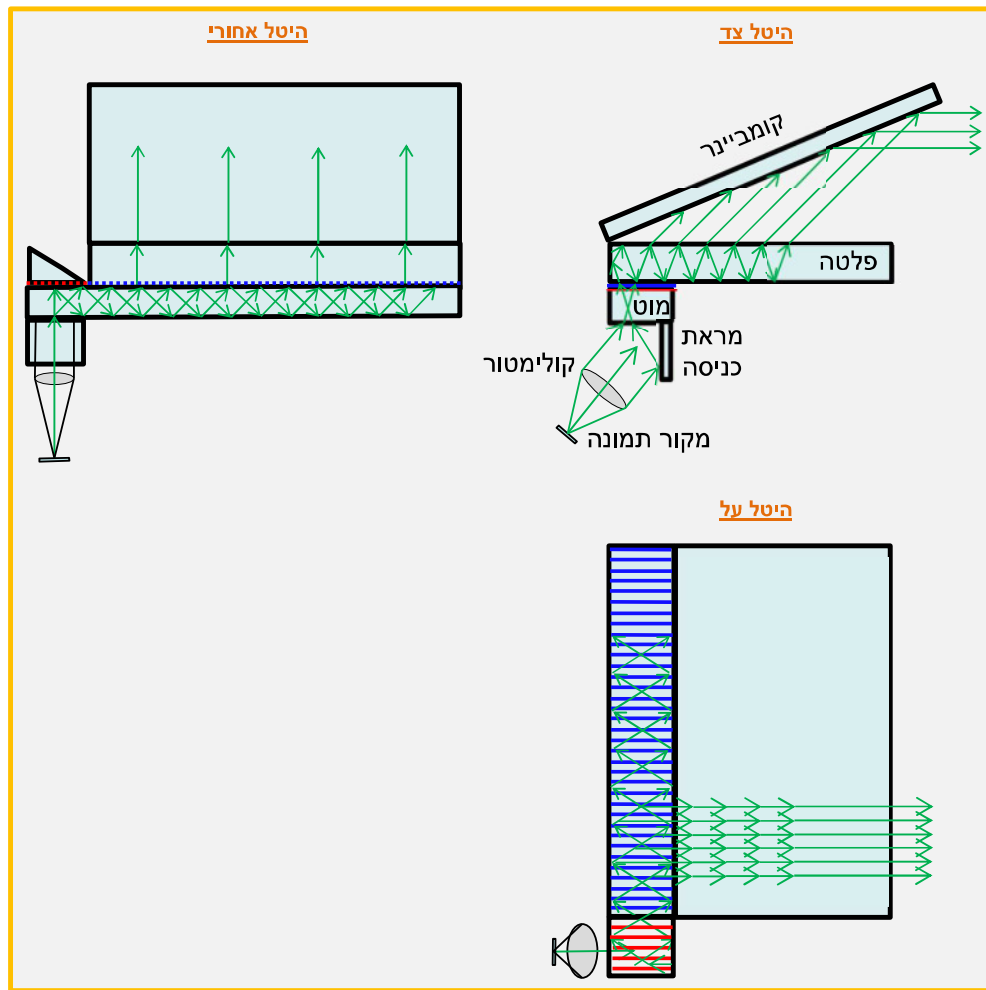
איור 5: תצורת תע"ל "חצי משטחי"



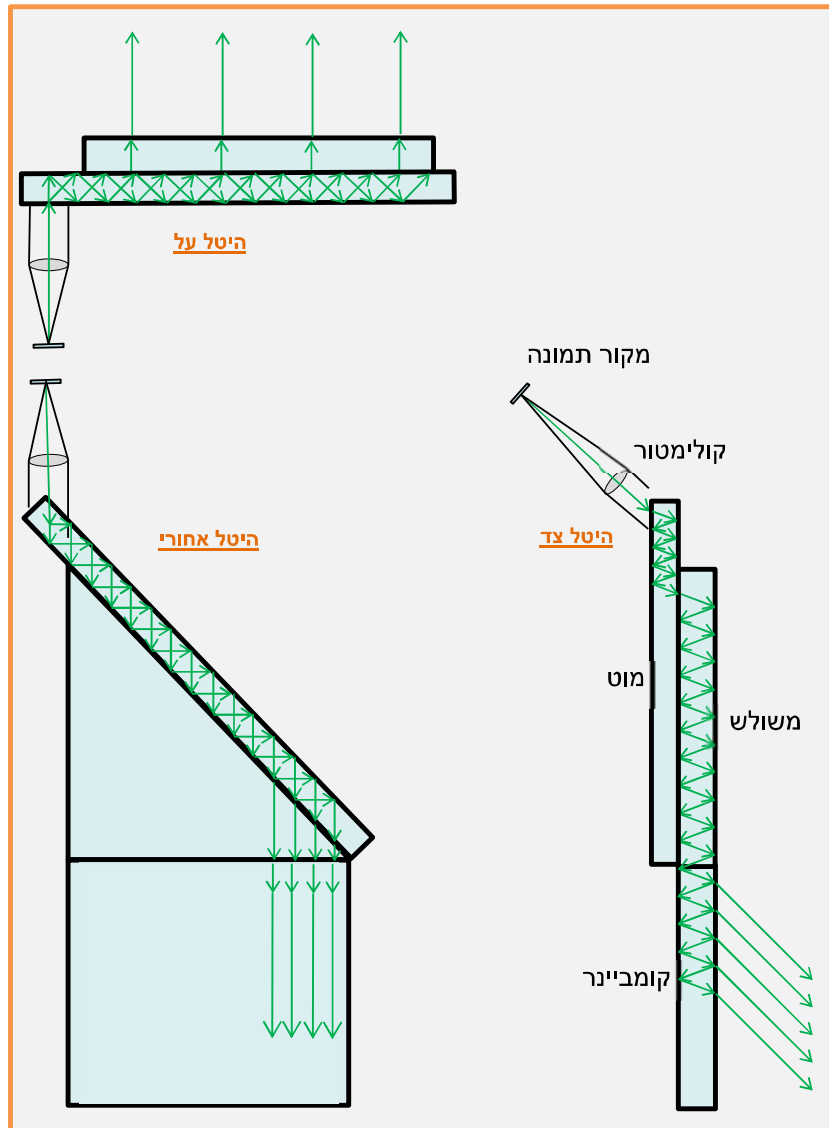
איור 6: תצורת תע"ל "קומביינר חצי משטחי"



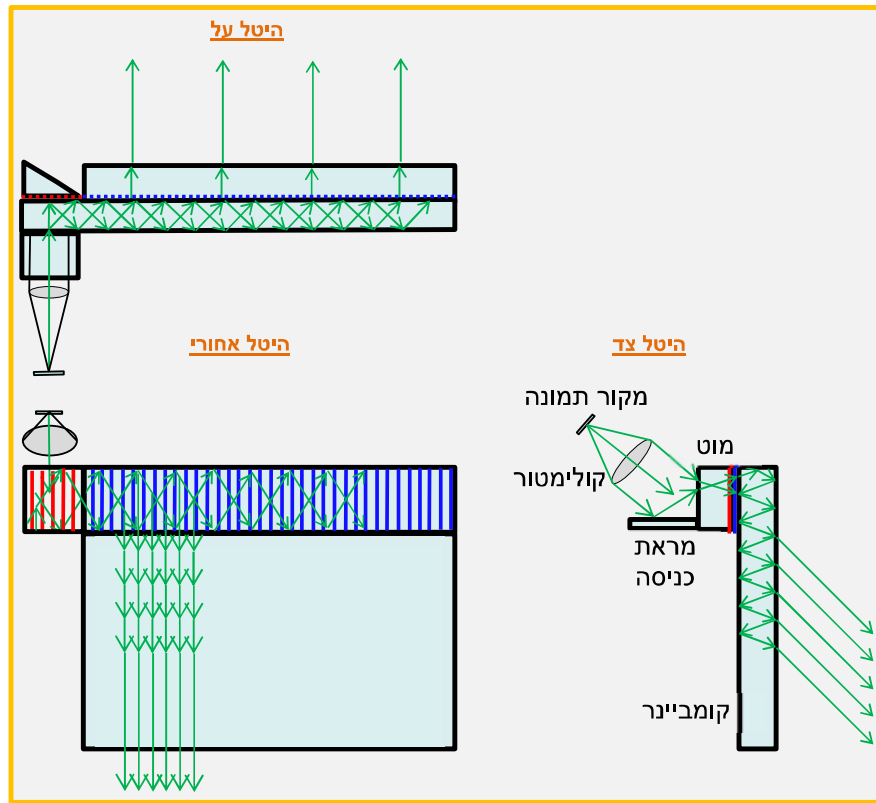
איור 7: תצורת תע"ל "משטחי מלא נידופים"



איור 8: תצורת תע"ל "משטחי מלא סריגים"



איור 9: תצורת תע"ל "קומביינר משטחי מלא נידופים"



איור 10: תצורת תע"ל "קומביינר משטחי מלא סריגים"

6. סיכום

מסמך זה מסכם את החידושים האחרונים בנושא מוליכי גל מנדופים, ומציג תצורות חדשות של תעלי"ם, אותן ניתן לממש בעזרת מוליכי גל אלו. מאחר שהפעילות בתחום זה נמשכת, ניתן לצפות בהמשך לפיתוחים נוספים של מוליכי גל מנדופים ובהתאם למגוון רחב עוד יותר של תצורות תעלי"ם חדשות.