אנטנת שופר
ב־COMSOL

בניית המודל וחישוב הקרינה

שופר פירמידלי בהזנת מוליך גלים מלבני

תדר עבודה: 10 GHz

ד״ר נצח בלל

מדריך המשך לקורס ״סימולציות פיזיקליות עם קומסול״

אוקטובר 2026

תוכן העניינים

1 היכרות עם הדוגמה 2

2 הגדרות ראשוניות 3

3 בניית האנטנה ותחום האוויר 5

4 הגדרת החומרים ותנאי השפה 7

5 יצירת רשת והרצת החישוב 9

6 הצגת תוצאות הסימולציה 11

7 בדיקת דיוק התוצאות 14

8 תרגול נוסף ופתרון תקלות 16

1 היכרות עם הדוגמה

נבנה אנטנת שופר פירמידלית: קטע של מוליך גלים מלבני המתרחב בהדרגה אל פתח רחב. ההתרחבות מאפשרת לגל המתקדם במוליך הגלים להיפלט למרחב החופשי. בדוגמה נחשב את ההחזרה בהזנה, נציג את השדה החשמלי ונפיק עקום קרינה. המטרה היא ללמוד את תהליך העבודה; המידות נבחרו להדגמה ואינן תכנון מיטבי של אנטנה מסחרית.

התרגול מתאים לאחר היכרות עם פרמטרים, גאומטריה, בחירות ורשת חישוב. נדרשת התקנה של COMSOL Multiphysics 6.4 ורישיון הכולל את RF Module. נשתמש בממשק Electromagnetic Waves, Frequency Domain (emw) ובניתוח Frequency Domain תלת־ממדי.

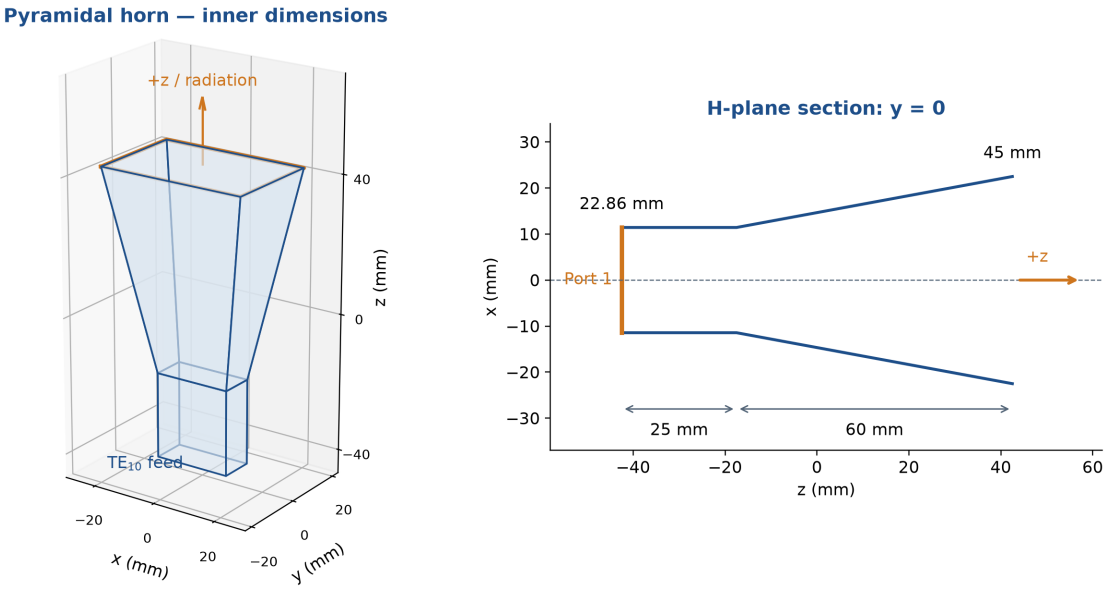
התוצאות שיופקו במודל

מקדם ההחזרה S_{11} בתדר העבודה; מפת גודל השדה החשמלי בחתך מרכזי; ושני חתכים מנורמלים של עקום הקרינה. לאחר מכן נשנה את הרשת ואת תחום האוויר ונבדוק עד כמה התוצאות משתנות.

1.1 מבנה האנטנה והנחות המודל

כל החללים ממולאים באוויר חסר הפסדים. דופנות המתכת מיוצגות כמוליך חשמלי מושלם, Perfect Electric Conductor (PEC). לכן המודל אינו מחשב הפסדי הולכה או התחממות. ההזנה היא מקור אידאלי של אופן ההתפשטות TE_{10}, ולא מחבר קואקסיאלי או מתאם ממשי.

מסביב לאנטנה נמצא כדור אוויר. על פניו נגדיר Scattering Boundary Condition מסדר שני, כדי לקרב יציאה של גלים למרחב פתוח. זהו קירוב נומרי, ולכן נבדוק גם הגדלה של הכדור. לחישוב השדה הרחוק נשתמש במשטח הכדורי הסגור המקיף את האנטנה כולה.



איור 1: הגאומטריה הלימודית: מוליך גלים, מקטע מתרחב ופתח השופר. הציר z הוא כיוון הקרינה העיקרי. האיור מציג מידות גאומטריות, ואינו תוצאת סימולציה.

2 הגדרות ראשוניות

2.1 פתיחת קובץ והזנת פרמטרים

פתחו Model Wizard > New > File. בחרו 3D, הוסיפו את Radio Frequency > Electromagnetic Waves, Frequency Domain, ובחרו Frequency Domain. שמרו בשם `horn_beginner.mph`.

ב־Global Definitions > Parameters הזינו את הערכים הבאים. שמות הפרמטרים יופיעו בהמשך בביטויי הגאומטריה. האותיות הגדולות `A,B` שונות מהאותיות הקטנות `a,b`.

Name	Expression	Meaning
f0	`10[GHz]`	Operating frequency
a	`22.86[mm]`	Guide inner width, x
b	`10.16[mm]`	Guide inner height, y
Lwg	`25[mm]`	Straight guide length
Lh	`60[mm]`	Flare length
A	`45[mm]`	Aperture inner width, x
B	`30[mm]`	Aperture inner height, y
t	`1[mm]`	Wall and rear-cap thickness
Rair	`60[mm]`	Air sphere radius
hmax	`8[mm]`	Initial maximum mesh size
zc	`(Lwg+Lh)/2`	Half total antenna length

הגדירו גם `ao=a+2*t`, `bo=b+2*t`, `Ao=A+2*t` ו־`Bo=B+2*t`. אלה המידות החיצוניות של מעטפת המתכת. עובי הדופן נמדד כאן בכיוווני x, y; הוא אינו עובי קבוע בניצב לדופן המשופעת.

2.2 תדר העבודה ואורכי הגל

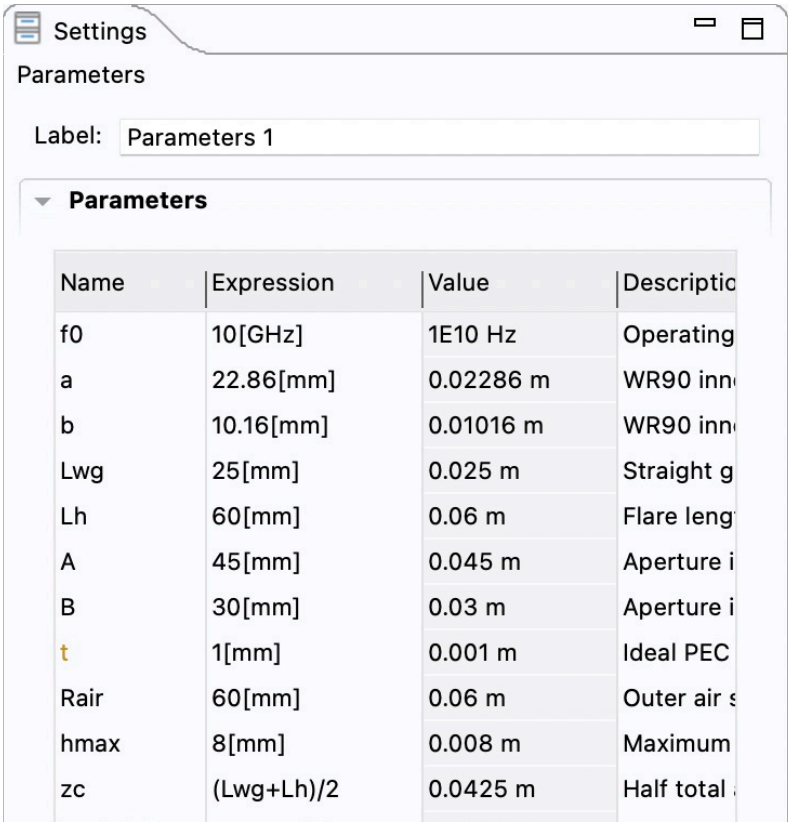
מידות a, b הן מידותיו הפנימיות של מוליך גלים WR90. במוליך גלים מלבני מלא אוויר, תדר הקיטעון של האופן היסודי הוא

$$f_{c,10} = \frac{c_0}{2a} \approx 6.56\,\text{GHz}.$$

בתדר $10\,\text{GHz}$ האופן יכול להתפשט. תדרי הקיטעון הבאים הם בקירוב $13.11\,\text{GHz}$ עבור TE_{20}, ו־$14.75\,\text{GHz}$ עבור TE_{01}. לכן בקטע הישר, בתדר העבודה, רק האופן היסודי מתפשט. אופנים שאינם מתפשטים עדיין יכולים להופיע סמוך לאי־רציפות.

אורך הגל באוויר ואורך הגל המונחה הם

$$\lambda_0 = \frac{c_0}{f_0} \approx 29.98\,\text{mm}, \qquad \lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1-(f_{c,10}/f_0)^2}} \approx 39.7\,\text{mm}.$$



איור 2: טבלת הפרמטרים ב־Global Definitions > Parameters. שימו לב ליחידות המפורשות במ״מ ובגיגה־הרץ.

אל תשתמשו באורך הגל המונחה כאילו היה אורך הגל באוויר שמחוץ לשופר. בדיקת היחידות ותדר הקיטעון נעשית לפני ההרצה.

3 בניית האנטנה ותחום האוויר

3.1 תחום החישוב ומידות מוליך הגלים

המשוואות נפתרות באוויר שבתוך מוליך הגלים, בתוך השופר ומחוץ לאנטנה. לא ניצור תחום מתכת שנרשת את נפחו: נבנה מעטפת מתכת לצורך פעולות החיסור, ואז נחסר אותה מכדור האוויר. הפאות שנוצרות בממשק אוויר–מתכת יקבלו תנאי PEC.

ב־Geometry 1 קבעו יחידת אורך mm. השתמשו בשמות משמעותיים לצמתים. בכל תיבה של Block, בחרו בסיס Corner; המיקומים בטבלה הבאה מתייחסים לפינה התחתונה.

Object	Size	Position
Outer guide	`ao, bo, Lwg+t`	`-ao/2, -bo/2, -zc-t`
Inner guide	`a, b, Lwg`	`-a/2, -b/2, -zc`

הקטע הישר הפנימי מתחיל ב־$z = -z_c = -42.5\,\text{mm}$ ומסתיים ב־$z = L_{\text{wg}} - z_c = -17.5\,\text{mm}$. התיבה החיצונית מתחילה ב־$z = -z_c - t$, ולכן לאחר החיסור נשארת פאה אחורית בעובי t. פאת האוויר הפנימית של המכסה, ב־$z = -z_c$, תשמש את פורט ההזנה.

3.2 בניית החלק המתרחב של השופר

הוסיפו Hexahedron ובחרו הגדרה באמצעות שמונה קודקודים. לארבע הפינות הראשונות חתך $a \times b$ במישור $z = L_{\text{wg}} - z_c$; לארבע האחרונות חתך $A \times B$ במישור $z = L_{\text{wg}} + L_h - z_c$. שמרו על סדר הקודקודים שבטבלה, כדי למנוע גוף מוצלב.

Vertex	x	y	z
1	`-a/2`	`-b/2`	`Lwg-zc`
2	`-a/2`	`b/2`	`Lwg-zc`
3	`a/2`	`b/2`	`Lwg-zc`
4	`a/2`	`-b/2`	`Lwg-zc`
5	`-A/2`	`-B/2`	`Lwg+Lh-zc`
6	`-A/2`	`B/2`	`Lwg+Lh-zc`
7	`A/2`	`B/2`	`Lwg+Lh-zc`
8	`A/2`	`-B/2`	`Lwg+Lh-zc`

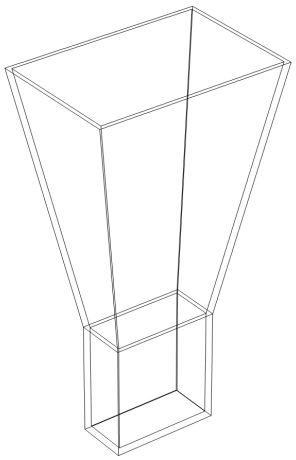
זהו השופר הפנימי. צרו גוף מתרחב נוסף באותו סדר, והחליפו בו `a,b,A,B` ב־`ao,bo,Ao,Bo`. כך מתקבלים הגוף הפנימי והגוף החיצוני באותם מישורי התחלה וסיום.

3.3 יצירת מעטפת המתכת ותחום האוויר

1. צרו Union של התיבה החיצונית והגוף המתרחב החיצוני. בטלו Keep interior boundaries, משום שאין צורך בפאה מלאכותית בחיבור ביניהם.
2. צרו Union נוסף של שני הגופים הפנימיים, וגם בו בטלו שמירת גבולות פנימיים.
3. צרו Difference: הגוף החיצוני פחות הגוף הפנימי. התוצאה היא מעטפת המתכת, עם פתח קדמי ומכסה אחורי.
4. הוסיפו Sphere ברדיוס `Rair` ובמרכז `0,0,0`. הפעילו Create selections עבור הכדור, להצגת בחירות התוצר בהמשך.
5. צרו Difference נוסף: הכדור פחות מעטפת המתכת. בנו את הגאומטריה הסופית עם Form Union. נותר תחום האוויר שבו נפתור.

תנאי השפה בפתח השופר

לא מגדירים PEC על מלבן פתח השופר. האוויר בתוך השופר מחובר לאוויר שמחוץ לו. פאה מלאכותית הסוגרת את הפתח כמוליך תמנע את הקרינה הרצויה.



איור 3: תצוגת הגאומטריה שיוצאה מתוך COMSOL. מעטפת השופר נוצרת מחיסור הגוף הפנימי מהגוף החיצוני. זהו ייצוא גרפי של המודל, ולא צילום של חלון ההגדרות.

4 הגדרת החומרים ותנאי השפה

4.1 תכונות האוויר ודופנות המתכת

הוסיפו Blank Material והקצו אותו לכל תחום האוויר. הגדירו מקדם דיאלקטרי יחסי 1, מקדם חדירות מגנטית יחסית 1, ומוליכות חשמלית `0[S/m]`. אפשר להשתמש גם בחומר Air מהספרייה, ולוודא שההגדרות האלקטרומגנטיות זהות.

תנאי Perfect Electric Conductor של ברירת המחדל יישאר על דופנות האנטנה. תנאי זה מאפס את הרכיב המשיק של השדה החשמלי: $\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0$. אין צורך ברשת בתוך המתכת, אבל יש רשת באוויר הסמוך לשפותיה.

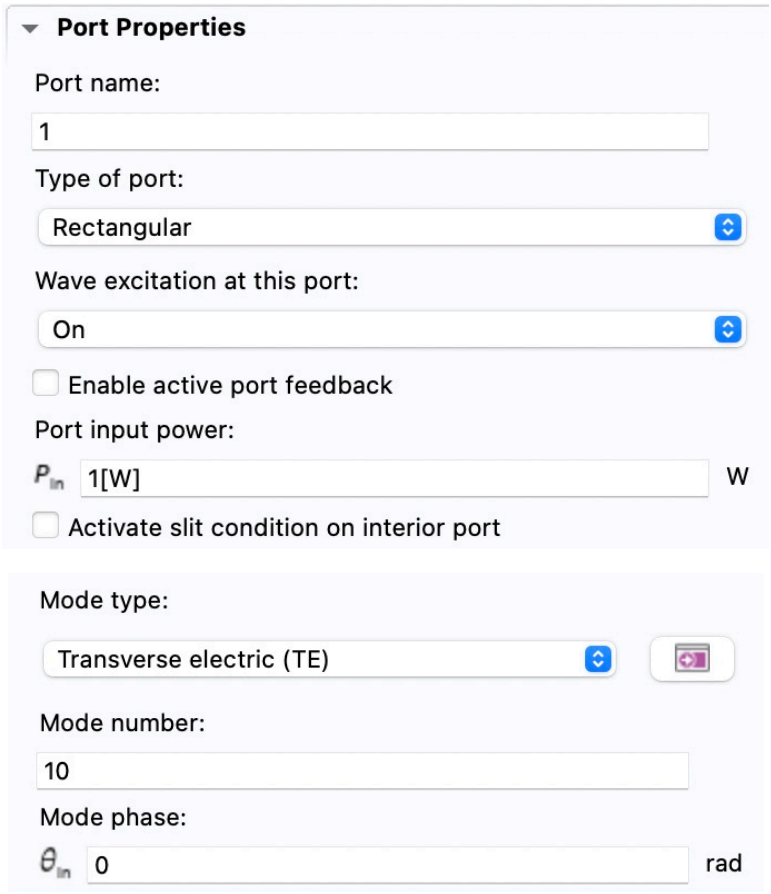
4.2 הגדרת פורט ההזנה

צרו בחירה בשם `feed` עבור הפאה הפנימית שב־$z = -z_c$, בגודל $a \times b$. אפשר לבחור אותה ידנית בתצוגת חיתוך, או להשתמש ב־Box Selection ברמת Boundary, עם עובי קטן סביב $z = -z_c$, גבולות $\pm a/2$ ו־$\pm b/2$, והגדרה Inside. בחירה תקינה מכילה פאה מלבנית אחת בלבד.

תחת Electromagnetic Waves, Frequency Domain הוסיפו Port. הגדירו:

- Port type: Rectangular; Mode type: TE; מספרי אופן $m = 1, n = 0$.
- Port name: 1; Wave excitation: On; הספק עירור 1 W.
- כיוון ההספק הנכנס: לתוך מוליך הגלים, בכיוון $+z$.

זהו פורט של אופן במוליך גלים, ולא Lumped Port של $50\,\Omega$. אין להחליף ביניהם לצורך התאמה לכבל; מתאם קואקסיאלי דורש מודל נפרד. S_{11} כאן מתייחס לאופן המוזן ולמישור הפורט שהוגדר.

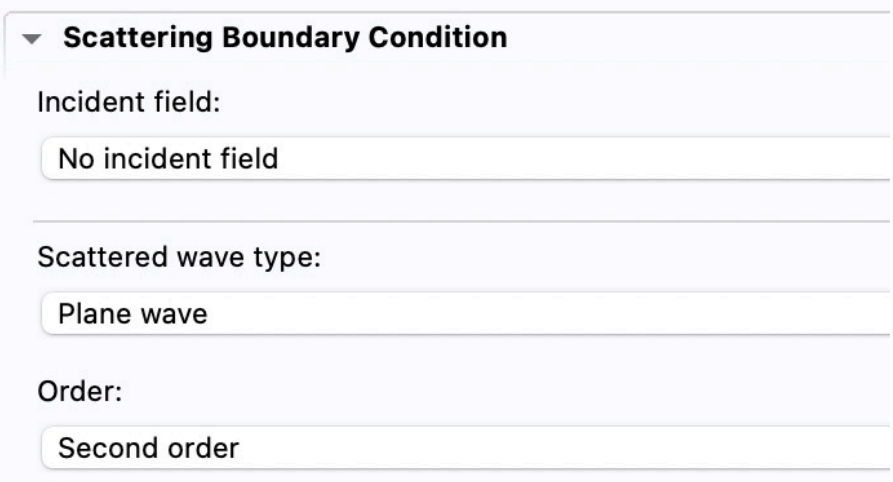


איור 4: שני חלקים מחלון הגדרות הפורט ב־COMSOL: סוג פורט מלבני, עירור פעיל והספק של 1 W; ובהמשך, אופן TE ומספר אופן 10, שפירושו $m = 1, n = 0$.

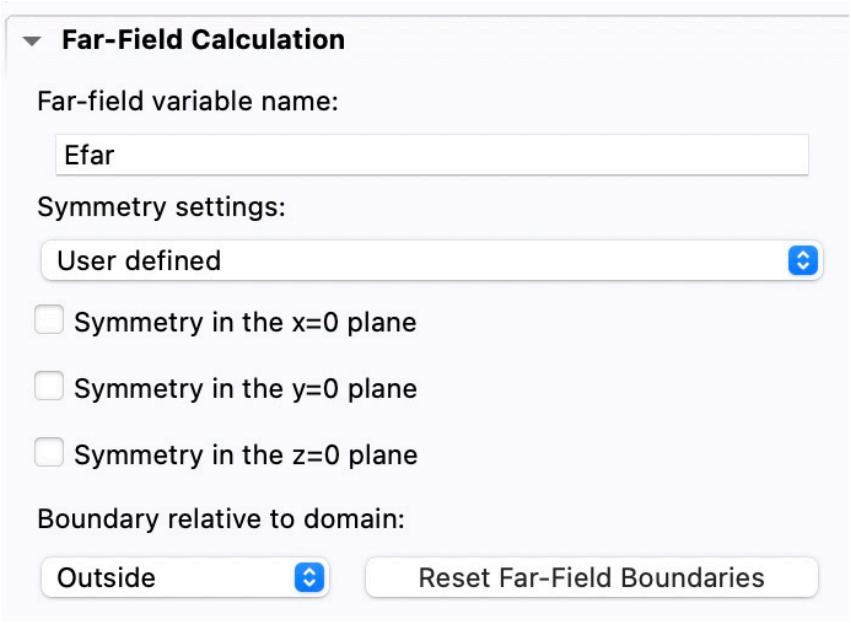
4.3 גבול הקרינה וחישוב השדה הרחוק

בחרו את כל חלקי המשטח הכדורי החיצוני בלבד, באמצעות בחירת התוצר של Sphere או בחירה מפורשת. הוסיפו Scattering Boundary Condition, ללא גל פוגע, ובחרו Second order. אל תחילו תנאי זה על דופנות השופר או על הפורט.

הוסיפו Domains > Far-Field Domain ובחרו את האוויר. בתת־הצומת Far-Field Calculation בחרו את אותו משטח כדורי חיצוני. הבחירה צריכה להקיף את האנטנה במשטח סגור; אין לבחור גם את דופנות המתכת או את פאת ההזנה. אין להפעיל אפשרויות סימטריה, משום שכאן נבנה מודל מלא.



איור 5: הגדרות הגבול החיצוני: ללא גל פוגע ותנאי פיזור מסדר שני. בחירת הפאות שמעל אזור זה כוללת את המשטח הכדורי החיצוני בלבד.



איור 6: הגדרות Far-Field Calculation: שם המשתנה `Efar`, סימטריות כבויות והאפשרות Outside. המשטח שנבחר זהה למשטח הכדורי של הגבול החיצוני.

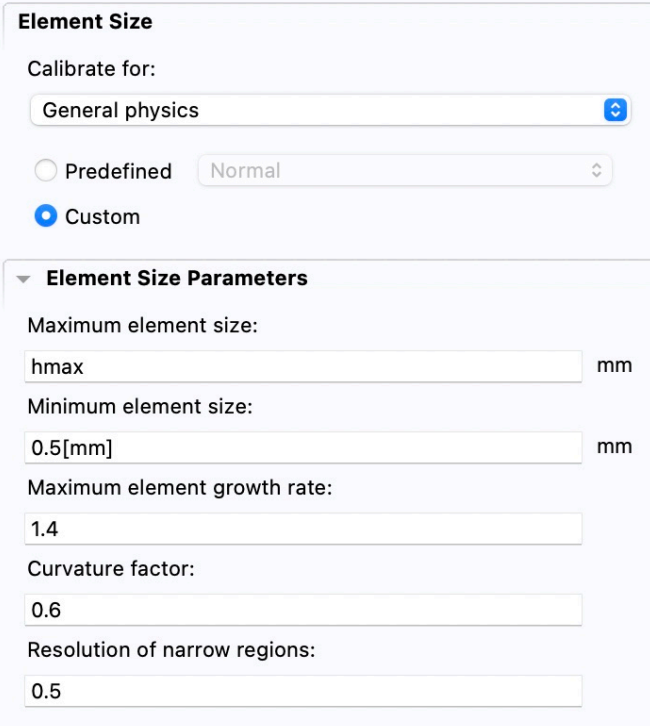
5 יצירת רשת והרצת החישוב

5.1 הגדרות הרשת

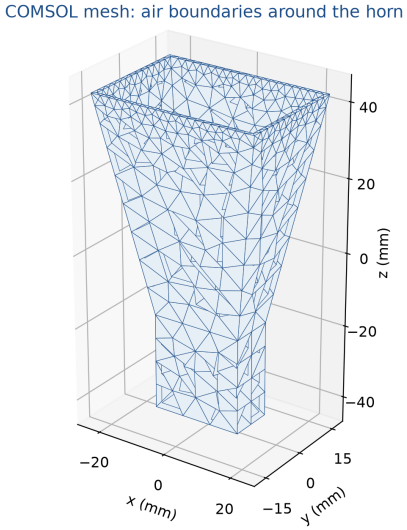
עברו ל־Mesh 1 > User-controlled mesh. הוסיפו Free Tetrahedral. בצומת Size בחרו Custom: גודל מרבי `hmax`, גודל מזערי `0.5[mm]` וקצב גידול מרבי `1.4`. השאירו בתחילה את סדר הקירוב של השדה בערך ברירת המחדל של הממשק, ובדקו שהרשת ממלאת את האוויר שבתוך מוליך הגלים והשופר.

ב־$10\,\mathrm{GHz}$, גודל מרבי של $8\,\mathrm{mm}$ הוא בקירוב $\lambda_0/3.75$. זהו ערך התחלה, ולא הוכחת דיוק. שפות

המתכת והחיבור למוליך הגלים מחייבים לעיתים אלמנטים קטנים יותר. רשת צפופה מאוד בכל הכדור עלולה להגדיל מאוד את זמן החישוב ואת הזיכרון.



איור 7: ב־Mesh > Size נבחרה האפשרות Custom. הגודל המרבי הוא הפרמטר `hmax`, הגודל המזערי הוא 0.5 mm, וקצב גידול האלמנטים הוא 1.4.



איור 8: משולשי הרשת על גבולות האוויר הסמוכים לשופר ולפורט. האיור שורטט מנתוני הקודקודים והמשולשים שיוצאו מ־COMSOL, לאחר הסתרת הכדור החיצוני. בנפח האוויר משמשים אלמנטים טטראדריים.

5.2 פתרון המודל

ב־Study 1 > Frequency Domain הזינו `f0`. התחילו בתדר אחד; סריקת תדר רחבה תתווסף רק לאחר שהגאומטריה ותנאי השפה נבדקו. לחצו Compute, קראו הודעות אזהרה ושמרו את הפתרון.

אם הפותר האיטרטיבי אינו מתכנס, אפשר לבדוק שימוש בפותר ישיר ב־Solver Configurations. הפותר הזמין תלוי במערכת ההפעלה; אין להניח שאותו שם פותר זמין בכל מחשב. מודל תלת־ממדי של אנטנה דורש יותר משאבים מדוגמאות החום והמגנטיות שבקורס. בריצות ששימשו להכנת הפרק דווח על שיא זיכרון של כ־13.4 GB בריצת הבסיס וכ־32.1 GB בבדיקת תחום האוויר הגדול. הזיכרון והזמן תלויים במחשב, בפותר וברשת; אין צורך להתחיל את התרגול מהבדיקה הגדולה.

6 הצגת תוצאות הסימולציה

6.1 החזרה בכניסה לאנטנה

פתחו Results > Derived Values > Global Evaluation והעריכו את `emw.S11dB`. זהו

$$S_{11,\mathrm{dB}} = 20\log_{10}|S_{11}|.$$

למשל, $-10\,\mathrm{dB}$ פירושו ש־10% מההספק המתקדם מוחזר לאופן ההזנה, ואילו $-20\,\mathrm{dB}$ פירושו 1%. ערך שלילי יותר מציין החזרה קטנה יותר. אין להסיק מהחזרה קטנה לבדה שהאנטנה מכוונת, יעילה או בעלת שבח גדול.

תוצאות ריצת הבסיס: 10 GHz, עירור של 1 W

בריצת הבסיס התקבלו $S_{11} \approx -32.25\,\mathrm{dB}$, והספק מוחזר של כ־$0.060\%$ מהספק העירור. רוחב האלומה בין נקודות חצי ההספק הוא כ־43.8° במישור H, וכ־51.7° במישור E. רוחבי האלומה נאמדו מדגימה כל 2° ומאינטרפולציה בין הדגימות.

הביטוי `emw.maxDdB` נותן כיווניות מרבית של כ־11.92 dBi. זהו ערך כיווניות מחושב במודל האידאלי, ולא שבח שנמדד באנטנה ממשית. לצורך הערכה זו מרכז כדור האוויר נמצא בראשית הצירים.

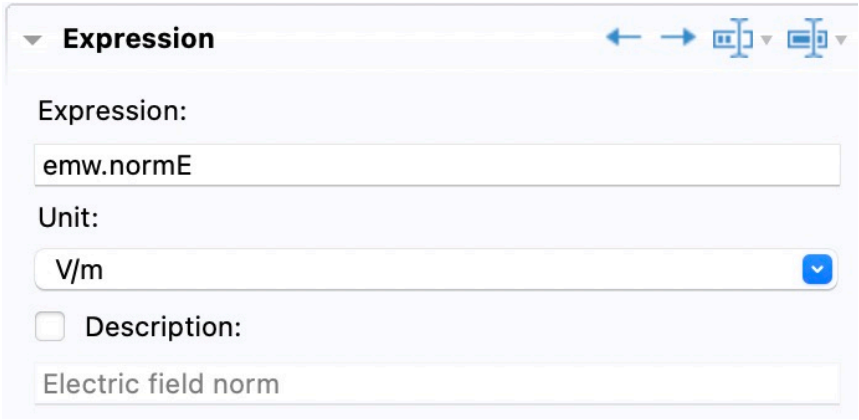
הנתונים הם תוצאות הרצה, ולא ערכי יעד. בדיקות ההמשך מראות שהאלומה הראשית יציבה יחסית, אך שההחזרה ומאזן ההספק עדיין מושפעים מקירובי החישוב.

6.2 התפלגות השדה החשמלי

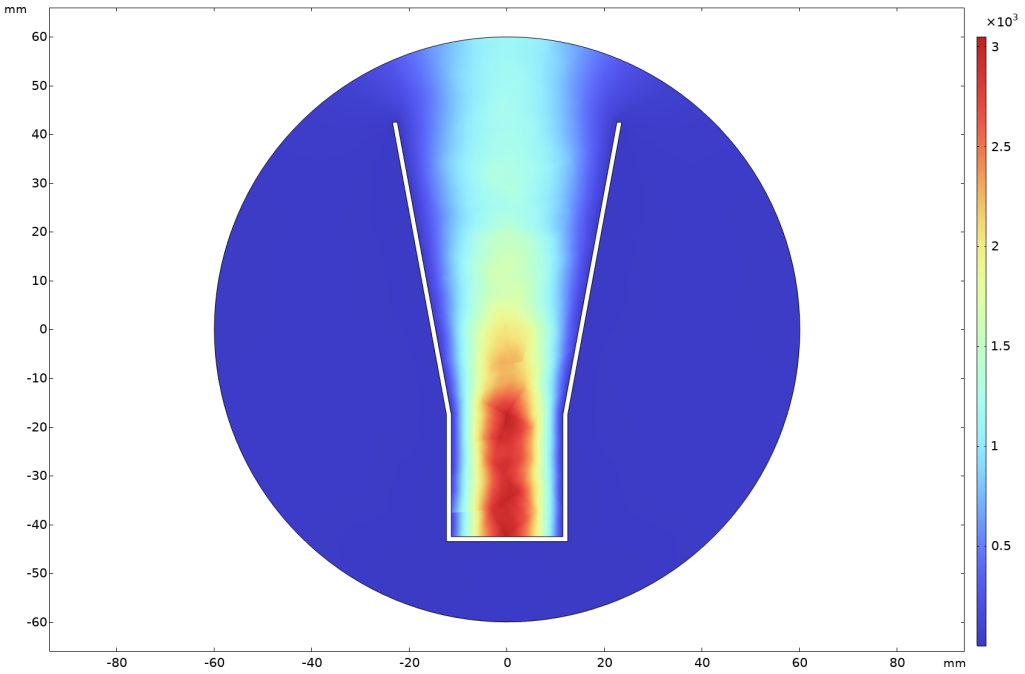
צרו Results > Datasets > Cut Plane במישור $y = 0$. הוסיפו קבוצת תצוגה תלת־ממדית עם Surface, בחרו את מערך הנתונים של החתך והזינו `emw.normE` ביחידות V/m. שמרו את סרגל הצבעים ואת יחידות האורך.

בתוך מוליך הגלים צפוי שדה מתאים לאופן TE_{10}, ובפתח השופר רואים את התרחבותו ויציאתו אל האוויר. `emw.normE` הוא גודל משרעת השדה המרוכבת, ולא תמונת זמן של הגל. אם מציגים

`real(emw.Ey)`, מתקבלת תמונת פאזה אחת; אין לפרש את שני הביטויים כאותה תוצאה.



איור 9: הביטוי `emw.normE` והיחידה V/m בחלון Surface. החתך והביטוי נקבעים בנפרד מסולם הצבעים.



איור 10: מפת גודל השדה החשמלי בחתך $y = 0$, שיוצאה מהפתרון ב־COMSOL. הציר האופקי הוא x, והאנכי הוא z, שניהם במ״מ. סרגל הצבעים מציג V/m, עם גורם כפל 10^3.

6.3 עקום הקרינה בשני המישורים הראשיים

צרו Polar Plot Group > Radiation Pattern ובחרו `emw.normEfar`. ודאו שמערך הנתונים הוא הפתרון של Study 1. עבור האנטנה המכוונת ל־$+z$, נגדיר את הזווית θ ביחס לציר z, ואת הזווית האזימוטלית ϕ ביחס לציר x.

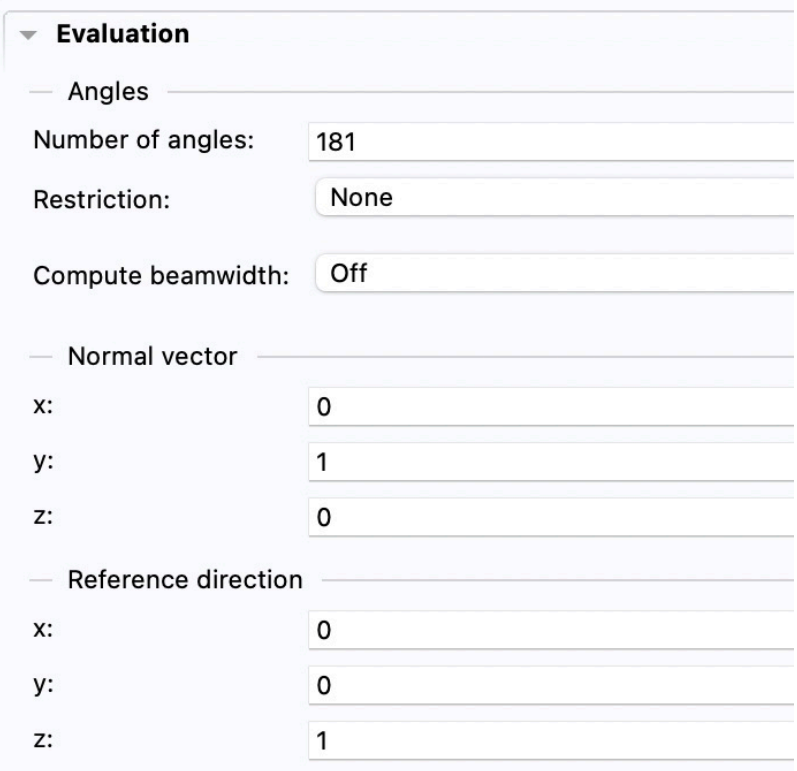
השדה החשמלי בהזנה מקוטב בכיוון y. לכן מישור E הוא yz, כלומר $\phi = 90°$, ומישור H הוא xz, כלומר $\phi = 0°$. בהגדרות Evaluation של התרשים קבעו את וקטור הנורמל למישור החתך ואת כיוון הייחוס: עבור מישור H, נורמל (0,1,0); עבור מישור E, נורמל (-1,0,0). בשני המקרים כיוון הייחוס

הוא (0,0,1), ולכן זווית אפס מצביעה אל $+z$. בחרו Unit circle, מרכז בראשית ו־181 זוויות לאורך מעגל מלא.

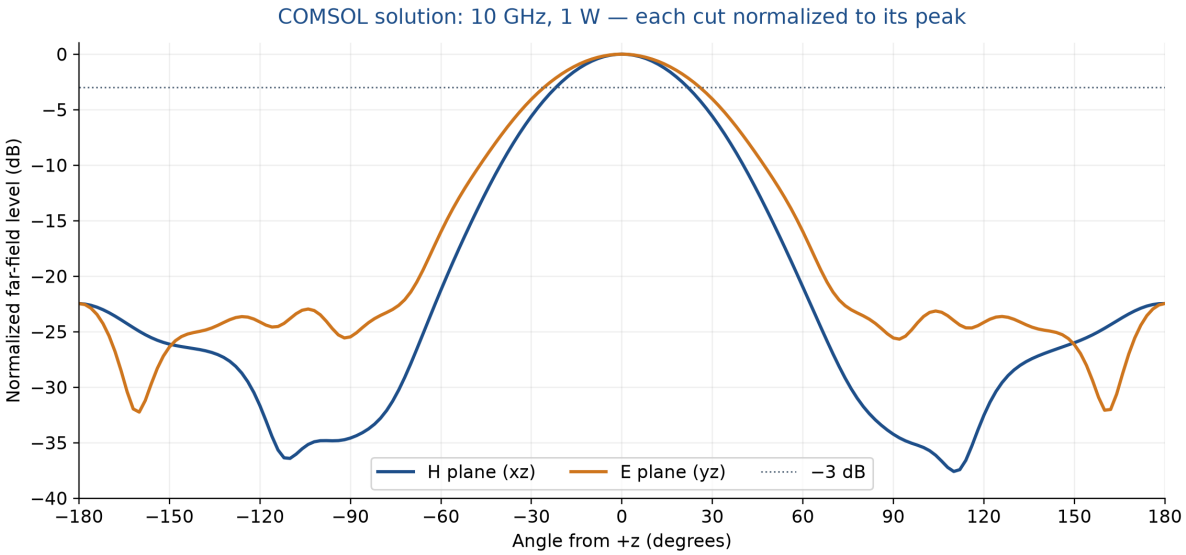
אפשר להציג את הנתונים גם בגרף רגיל: 1D Plot Group > Radiation Pattern. ייצאו את הנתונים באמצעות Plot Data אם ברצונכם להשוות ריצות. הפיקו חתך לכל מישור ונרמלו כל עקום לשיאו לצורך השוואת צורת האלומה:

$$F_{\mathrm{norm,dB}}(\theta) = 20\log_{10}\!\left(\frac{|E_{\mathrm{far}}(\theta)|}{\max_{\theta}|E_{\mathrm{far}}(\theta)|}\right).$$

הנרמול מבטל את המידע על הגודל המוחלט. עקום ששיאו 0 dB אינו אנטנה בעלת שבח של 0 dBi. כדי לחשב כיווניות נדרש גם הספק הקרינה הכולל בכל הזוויות, ולא רק שני חתכים.



איור 11: הגדרת חתך H בחלון Radiation Pattern: 181 זוויות, נורמל (0,1,0) וכיוון ייחוס (0,0,1). הגרף במודל מוצג בתחום 0° עד 360°; באיור הבא הזוויות מסודרות סביב כיוון הקרינה.



איור 12: חתכי עקום הקרינה במישורי E ו־H, מנורמלים לשיא. ההשוואה מראה את רוחב האלומה ואת אונות הצד; היא אינה תחליף לתרשים תלת־ממדי או למדידה.

7 בדיקת דיוק התוצאות

7.1 השפעת הרשת ותנאי הגבול

שמרו את ריצת הבסיס, ושנו רק פרמטר אחד בכל ריצה:

1. הקטינו את הגודל המרבי של האלמנטים. רשמו את מספר דרגות החופש, S_{11}, רוחב האלומה ואת שינוי עקום הקרינה.
2. הגדילו את `Rair`, בלי לשנות את האנטנה. אם התוצאה משתנה משמעותית, הגבול החיצוני משפיע על הפתרון; יש להרחיקו או לבדוק שימוש ב־PML.
3. בחנו גם את אורך הקטע הישר. פורט קרוב מדי לאזור ההתרחבות עלול להיות מושפע מאופנים דועכים, אף שרק אופן אחד מתפשט בתדר העבודה.

השוואה של S_{11} בלבד אינה מספיקה. רשת יכולה להפיק החזרה דומה, אך לשנות את גודל השדה ליד שפה או את רמת אונות הצד. מצד שני, שיא השדה בדיוק בשפה אידאלית חדה אינו תמיד גודל שמתכנס היטב; עדיף לבחור גם מדדים משולבים ועקום קרינה.

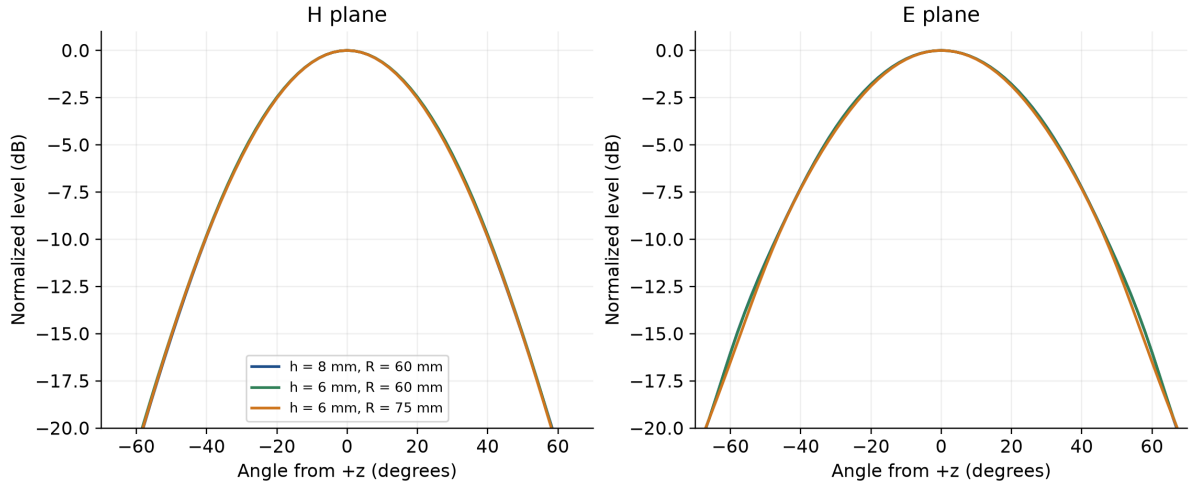
7.2 השוואת תוצאות החישוב

בטבלה מוצגות ריצת הבסיס, ריצה עם רשת עדינה יותר וריצה עם תחום אוויר גדול יותר. ההזנה, התדר ומידות האנטנה נשארו זהים. $h_{\max}$ הוא גודל האלמנט המרבי, ו־R הוא רדיוס כדור האוויר. מספר האלמנטים מתייחס לאלמנטים טטראדריים.

Run	$h_{\max}$ (mm)	R (mm)	Tetrahedra	S_{11} (dB)	$D_{\max}$ (dBi)
Baseline	8	60	33,959	-32.25	11.92
Finer mesh	6	60	73,420	-32.31	11.92
Larger air	6	75	141,758	-29.06	11.98

עידון הרשת שינה את S_{11} בכ־0.06 dB, אך הגדלת תחום האוויר שינתה אותו בכ־3.24 dB. במונחי הספק מוחזר, השינוי האחרון הוא מכ־0.059% לכ־0.124% מהספק העירור. שני הערכים קטנים, אך אי אפשר להסיק מכך שערך ההחזרה המדויק כבר התכנס.

רוחבי האלומה במישורי H,E, בהתאמה, השתנו מ־$43.8°, 51.7°$ בריצת הבסיס, ל־$44.1°, 51.6°$ בעידון הרשת ול־$43.5°, 50.5°$ בהגדלת התחום. יציבות האלומה הראשית אינה מוכיחה יציבות של כל האונות החלשות.



איור 13: השוואת האלומה הראשית בשלוש הריצות. העקומים מנורמלים בנפרד; חפיפה באזור השיא אינה מעידה שמאזן ההספק או מקדם ההחזרה מדויקים באותה מידה.

משמעות הבדיקות

אפשר להיעזר בדוגמה כדי ללמוד בניית שופר ולקבל אומדן לצורת האלומה. לפני דיווח על התאמה מדויקת או שימוש בתכנון הנדסי נדרשות בדיקות נוספות: עידון רשת מקומי, בדיקת תנאי הגבול ובמידת הצורך הוספת שכבת PML. סיום מוצלח של הפותר אינו הוכחת דיוק פיזיקלי.

7.3 מאזן ההספק

במודל חסר הפסדים ובהזנה יחידה נצפה בקירוב ל־

$$P_{\text{rad}} \approx P_{\text{in}} \left(1 - |S_{11}|^2\right).$$

אפשר לחשב את ההספק היוצא דרך כדור האוויר באמצעות אינטגרל משטחי של הרכיב הנורמלי של וקטור פוינטינג הממוצע בזמן. בדקו שההספק חיובי כלפי חוץ ושהיחידה היא ואט. אי־התאמה משמעותית מחייבת לבדוק את בחירת המשטח, הכיוון, הרשת ותנאי הקרינה.

לצורך הבדיקה הוסיפו ב־Integration אופרטור בשם Definitions > Component Couplings > intout, ובחרו את המשטח הכדורי החיצוני. לאחר מכן העריכו ב־Global Evaluation את הביטוי הבא:

```
intout(emw.Poavx*nx+emw.Poavy*ny+emw.Poavz*nz)
```

בריצת הבסיס התקבל הספק יוצא של כ־1.044 W, לעומת הספק מתקבל של כ־0.9994 W. השארית היחסית היא כ־4.46%. בעידון הרשת היא ירדה לכ־2.67%, ובהגדלת התחום התקבלה שארית של כ־3.22%. הספק יוצא הגדול מהספק המקור אינו "נצילות מעל מאה אחוז"; במודל פסיבי חסר הפסדים זהו סימן לשגיאה נומרית בחישוב או בהערכת השטף. יש לשפר את הבדיקה לפני חישוב נצילות או דיווח על הספק קרינה מדויק.

8 תרגול נוסף ופתרון תקלות

8.1 שינויים בתדר, במידות ובהספק

1. שנו את תדר העבודה ל־9 GHz ול־11 GHz. בנו מחדש את הרשת לפי אורך הגל הקצר ביותר. השוו החזרה וצורת אלומה; אין להניח שהתוצאה ב־10 GHz מייצגת את כל התחום.
2. הגדילו את רוחב הפתח A תוך שמירת שאר המידות. בדקו אם האלומה במישור H נעשית צרה יותר, ואם מופיע שינוי בהחזרה. פתח גדול יותר אינו מבטיח שיפור בכל מדד.
3. הכפילו את הספק העירור. במודל הליניארי משרעת השדה אמורה לגדול פי $\sqrt{2}$, בעוד S_{11} ועקום הקרינה המנורמל אמורים להישאר ללא שינוי.

8.2 תקלות נפוצות ודרכי פתרון

- **אין כמעט קרינה:** בדקו שלא הוגדר PEC על פתח השופר, ושהפורט אכן פעיל ומזין לכיוון הנכון.
- **החזרה חריגה:** בדקו תדר קיטעון, מספרי אופן, מידות פנימיות ובחירת הפאה. אין לשנות לרוחב חיצוני במקום רוחב האוויר הפנימי.
- **האלומה פונה לכיוון לא צפוי:** בדקו את הצירים ואת הגדרת θ, ϕ, לפני שמסיקים שהמודל שגוי.
- **הקרינה משתנה עם גודל הכדור:** בדקו את קירוב הגבול ואת הרשת. הגדלת תחום בלי שמירה על צפיפות רשת מתאימה אינה בדיקה מבודדת.
- **אין די זיכרון:** התחילו בתדר יחיד וברשת התחלתית סבירה. אל תציגו תוצאה מרשת גסה כאילו אומתה; בצעו בדיקת התכנסות לפני שימוש הנדסי.

סיכום התרגול

לבנות גאומטריה פרמטרית, להבדיל בין פורט מוליך גלים לתנאי קרינה, לבחור משטח סגור לחישוב שדה רחוק ולבחון תוצאה מספרית באמצעות רשת, גבול חיצוני ומאזן הספק. זהו בסיס לתכנון אנטנות מורכבות יותר, כולל הזנה קואקסיאלית, הפסדי מתכת ועדשה דיאלקטרית.

8.3 מקורות להרחבה

1. COMSOL 6.4: Far-Field Calculation: בחירת משטח סגור והגדרות חישוב השדה הרחוק.
2. COMSOL 6.4: Far-Field Calculations: רכיבי השדה הרחוק ופונקציות הכיוון.
3. COMSOL 6.4: The Radiation Pattern Plots: עקומי קרינה, כיווניות ושבח.
4. Pyramidal Horn Antenna, Application Exchange: דוגמה פרמטרית לשופר פירמידלי. המודל וההסברים בפרק הנוכחי נבנו בנפרד; קובץ הדוגמה החיצוני אינו נכלל בחבילה.