

Acoustic numerical simulations

Yael Yasur

Rotem Industries Ltd.

June 2019

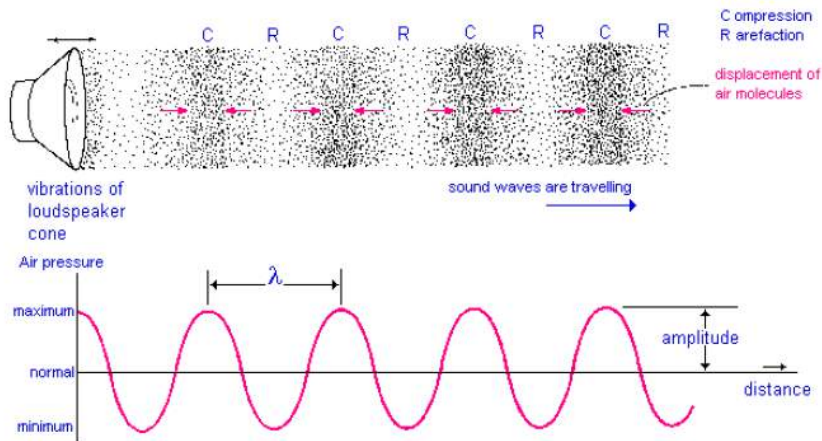
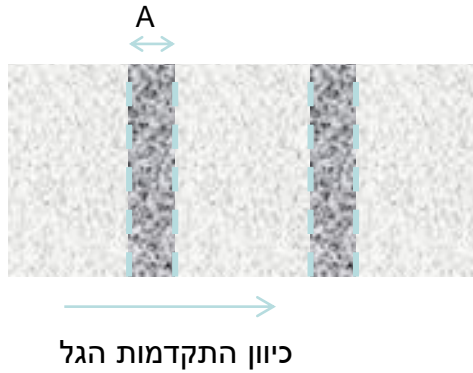
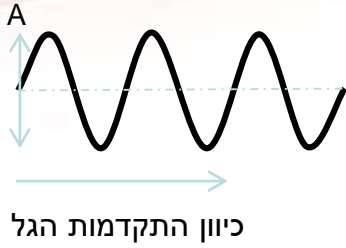
Introduction to acoustic simulations

- Acoustic applications
- Frequency/spectrum map
- Governing equations
- Boundary conditions and meshing
- Simulation methodology
- Examples

Acoustic applications

- מכשירי שמיעה ואמצעי הגברה
- השתקה אקוסטית
- סונאר- בעלי חיים (עטלפים, לווייתנים, דולפינים)
- שימושים ברפואה- אולטראסאונד
- תכנון אולמות אקוסטיים (הנדסה אזרחית)
- אקוסטיקה ימית
- הסוואה אקוסטית

מושגי יסוד



• מהירות הקול באוויר: $c = \sqrt{\gamma RT}$

• מהירות הקול באוויר בטמפ' סטנדרטית הינו 343m/s

• מהירות הקול במים כ- 1500m/s

• עבור גל קול: $f(Hz) = \frac{c(\frac{m}{s})}{\lambda(m)}$

• מספר הגל- wave number $k(\frac{rad}{m}) = \frac{2\pi}{\lambda}$

• ולכן: $\frac{\omega}{k} = c$

• SPL-sound pressure level

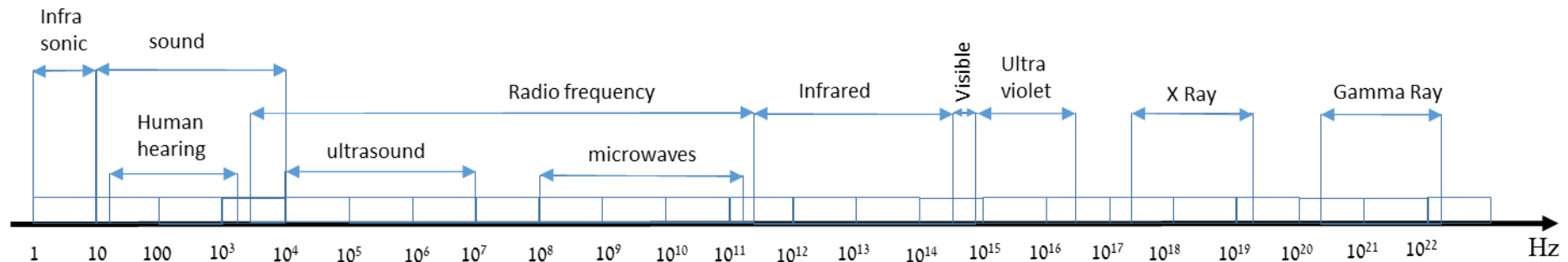
• $P_{total} = P_{static} + P$

• $dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)$

• ρc^2 is the bulk modulus.

• $Acoustic\ impedance = p/U = \rho c$

Frequency map



Infrasonic 1-10Hz

Sound 10-10e4Hz

Ultrasound 10e4-10e7Hz

Human hearing 20Hz-20kHz

Radio spectrum 3kHz-300GHz (30,000m-0.3cm)

Microwave 100MHz-200GHz

Infrared 300GHz-430THz

Visible 400THz-789THz

Ultraviolet 800THz-30e15Hz (400nm-10nm)

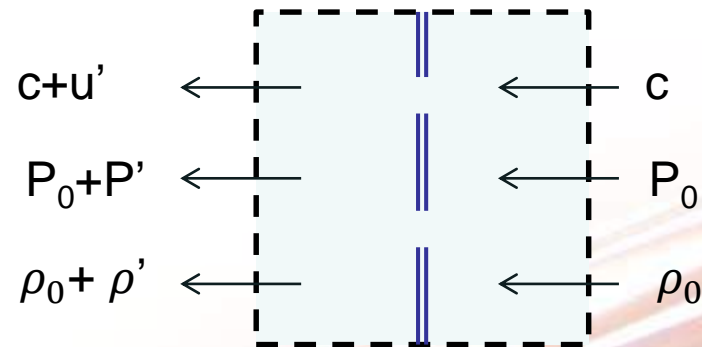
X Ray 300e15Hz-30e18Hz

Gamma ray 300e18Hz...

Cosmic Ray ...

מודלים מתמטיים לאנליזה אקוסטית

- משוואת התנועה עבור זורם דחיס, לא צמיג, וללא הפסדים תרמיים הינה משוואת Euler
- $$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla P$$
- משוואת הרציפות:
- $$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0$$
- עבור זורם בעל צפיפות ρ_0 ולחץ P_0 ההתפשטות בעקבות הלחץ האקוסטי מוגדרת על ידי:
- $P = P_0 + P'$
- $\rho = \rho_0 + \rho'$
- $u = 0 + u'$
- Where $P' \ll P_0, \rho' \ll \rho_0$



מודלים מתמטיים לאנליזה אקוסטית

- בהכללת המשוואות ובהשמטת התגיות נקבל:

- $$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla P) \right) = 0$$

- Where ρc^2 is the bulk modulus.

- עבור תווד שיש בו גם מקור, נוספים האיברים:

- $$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla P - q_d) \right) = Q_m$$

Where

- q_d is an acoustic dipole source,
- Q_m is an acoustic monopole source.

מודלים מתמטיים לאנליזה אקוסטית

- ניתן לפתור את המשוואה במרחב התדר עבור כל תדר ובכל זמן. הפתרון ההרמוני הינו בעל הצורה:
- $P(x, t) = P(x) \sin(\omega t)$
- או באמצעות משתנה קומפלקסי:
- $P(x, t) = P(x)e^{i\omega t}$
- בהנחה של פתרון הרמוני, המשוואה תלויה הזמן הופכת למשוואת הלמהולץ:
- $$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla P - q_d) \right) - \frac{\omega^2}{\rho c^2} P = Q_m$$

דגשים במידול בעיות אקוסטיקה- רישות

- סקאלות אורך בבעיה:

- אורך הגל, $\lambda = \frac{c}{f}$

- הגודל הגיאומטרי המינימלי L_{min}

- גודל ה- $h, mesh$

- עובי שכבת הגבול האקוסטית δ

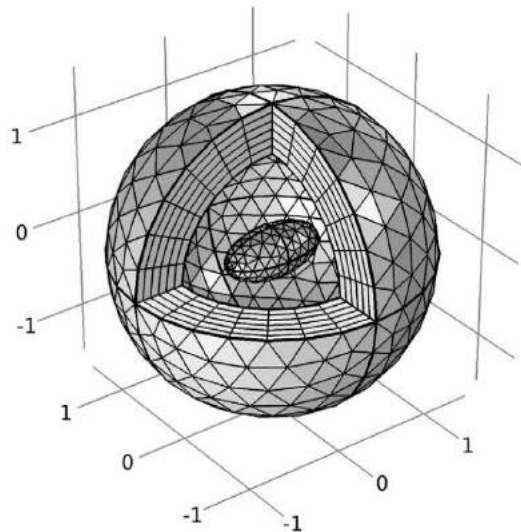
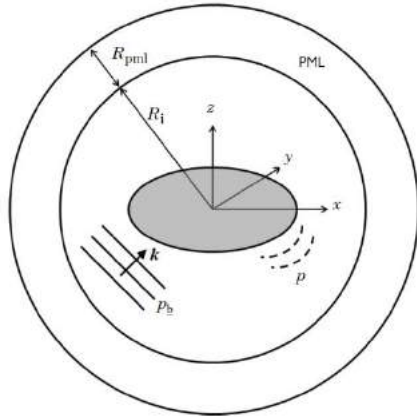
- ככלל אצבע, גודל הרשת המקסימלי:

- $h \leq \frac{\lambda}{N}$, where N is between 5 to 10.

- כאשר בעיית האקוסטיקה היא בטרנזיאנט:

- $CFL = \frac{c \cdot \Delta t}{h_{min}} \approx 0.2$

דגשים במידול בעיות אקוסטיקה-תנאי שפה

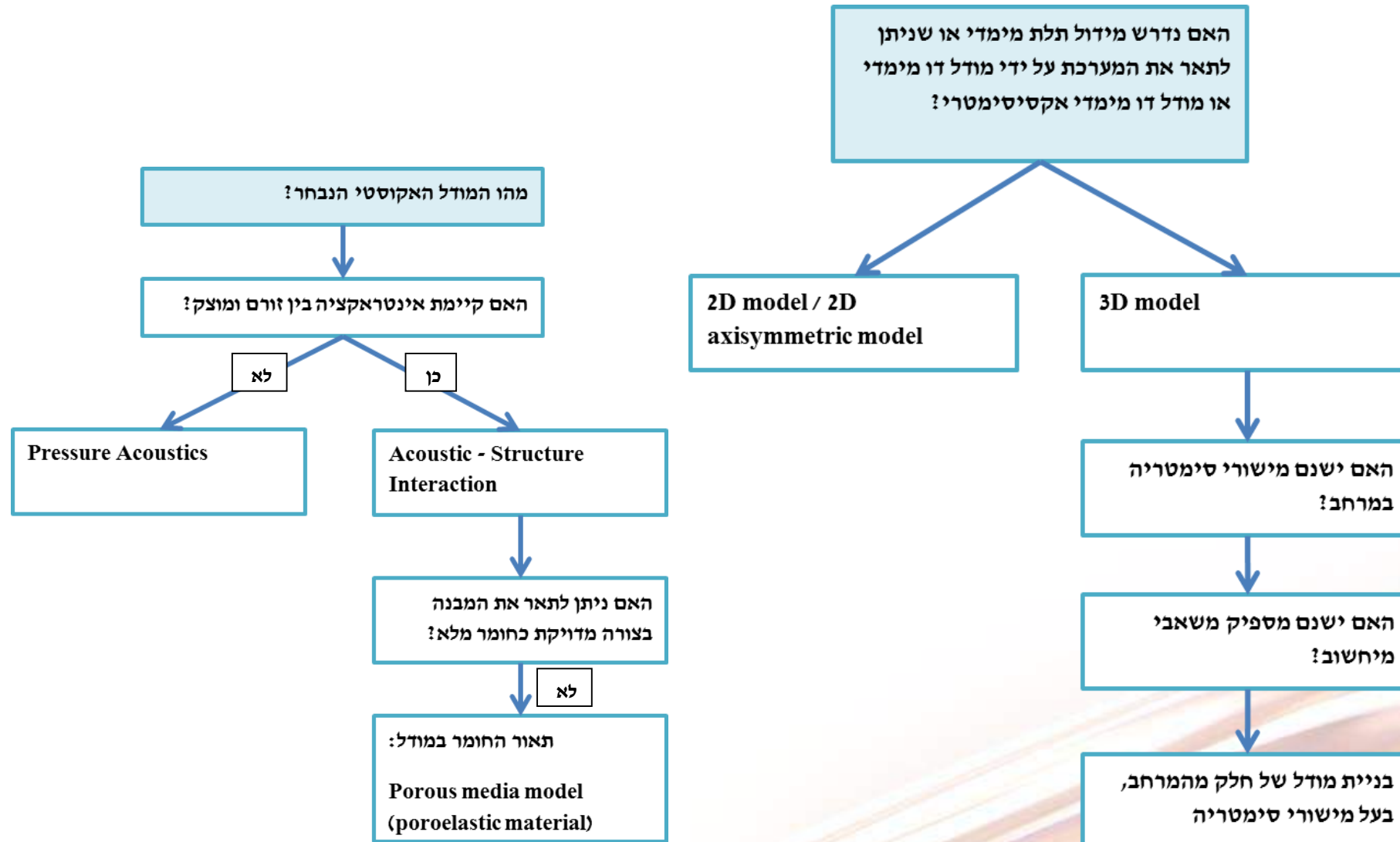


- מגע בין מוצק וזורם : התקדמות גל קול במוצק מתרחשת ע"י תנודות אלסטיות בעלות אמפליטודה קטנה. בחישוב Acoustic Structure Interaction הלחץ בזורם מועבר אל המוצק בצורת עומס, המתורגם לתאוצות.
- תנאים פיזיקליים ממשיים כגון sound hard wall.
- ישנם תנאי שפה מלאכותיים שנועדו לקצר את המרחב, לדוגמא על מנת לתאר open boundary שאינו מחזיר קול, או PML- Perfectly matched layer.

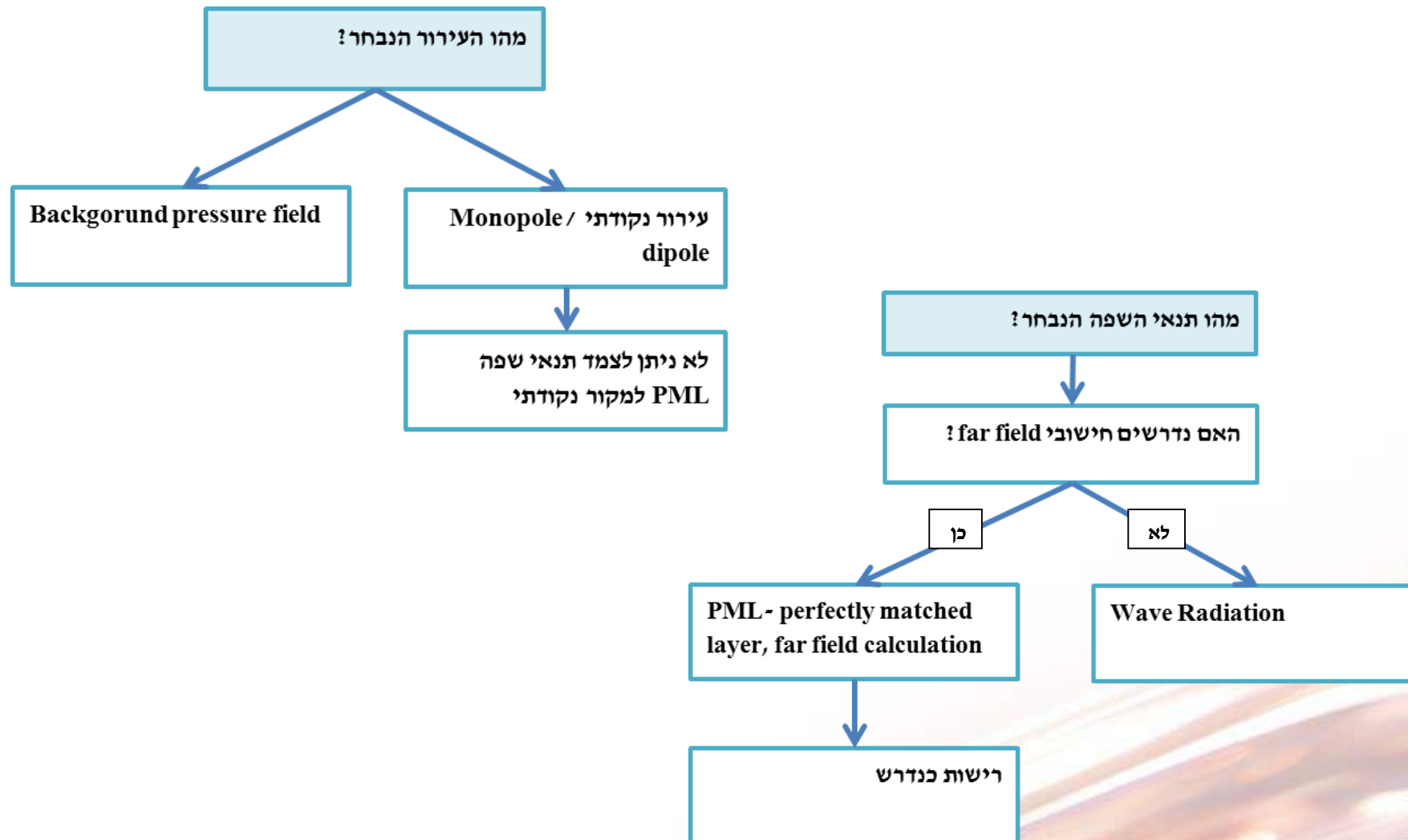
דגשים במידול בעיות אקוסטיקה-מודלים נוספים

- מודל poroelastic לחישוב גלים המתקדמים בתווך פורוזיבי.
 - Aeroacoustics - המשתנים מחושבים כתנודות מעל ערכי הרקע של השדה.
 - אקוסטיקה גיאומטרית- בתדרים גבוהים, כאשר אורך הגל קטן הרבה יותר מאשר האורך האופייני של המרחב הממודל. שיטות אלו משמשות למידול חדרים אקוסטיים, אולמות קונצרטים וכו'.
 - מודל תרמו- אקוסטי, נדרש כאשר נמצאים בשכבת הגבול האקוסטית
- $\delta_{\mu} = \sqrt{\frac{\mu}{\pi f \rho}}$, $\delta_{th} = \sqrt{\frac{k}{\pi f \rho C_p}}$, where:
 - μ is dynamic viscosity, k is conductivity and C_p is constant pressure specific heat

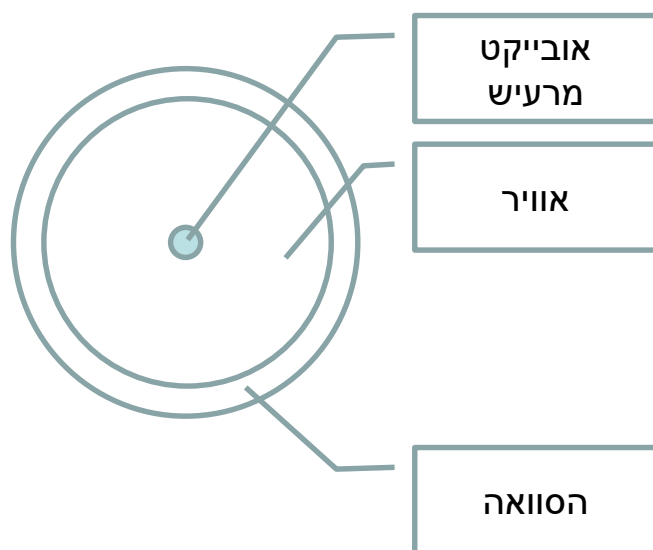
מתודולוגית סימולציות אקוסטיות



מתודולוגית סימולציות אקוסטיות



הסוואה אקוסטית של גוף מרעיש בתוך תווך כדורי



- Munteanu et al. הראו ב 2011 הסוואה אקוסטית של גוף מרעיש הנמצא בתוך תווך אלטרנטיבה נוספת להסוואת האובייקט היא השתקה אקטיבית, antinoise, ביטול הגל האקוסטי באמצעות מקורות משניים.

מכשירי שמיעה ואמצעי הגברה

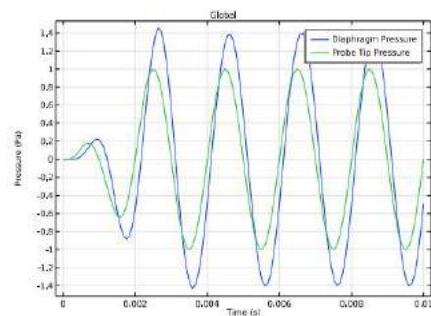


Figure 2: Pressure as function of time at the probe tip (green line) and at the microphone diaphragm (blue line).

Time=0.01 s Slice: Pressure (Pa) Slice: Pressure (Pa) Line: Pressure (Pa)

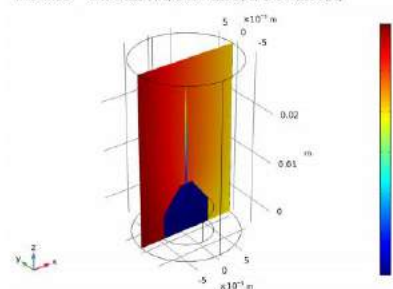
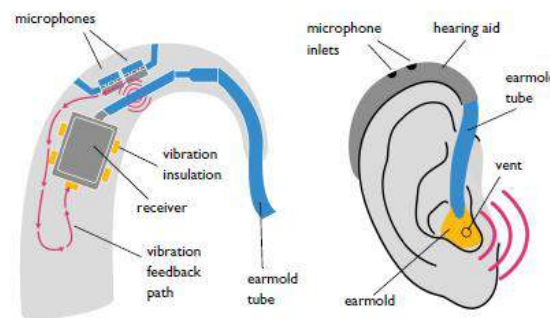


Figure 3: Pressure distribution in the xz -plane at time $t = 10$ ns.



אקוסטיקה ימית

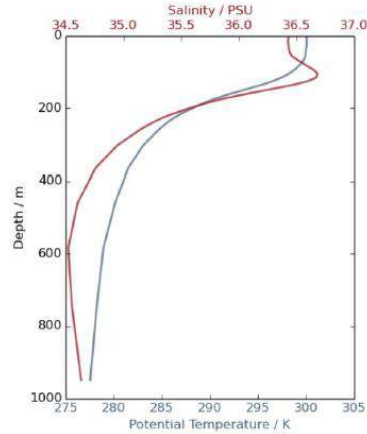


Figure 4: salinity and temperature as a function of depth.

- שינוי מליחות עם העומק
- שינוי מהירות הקול

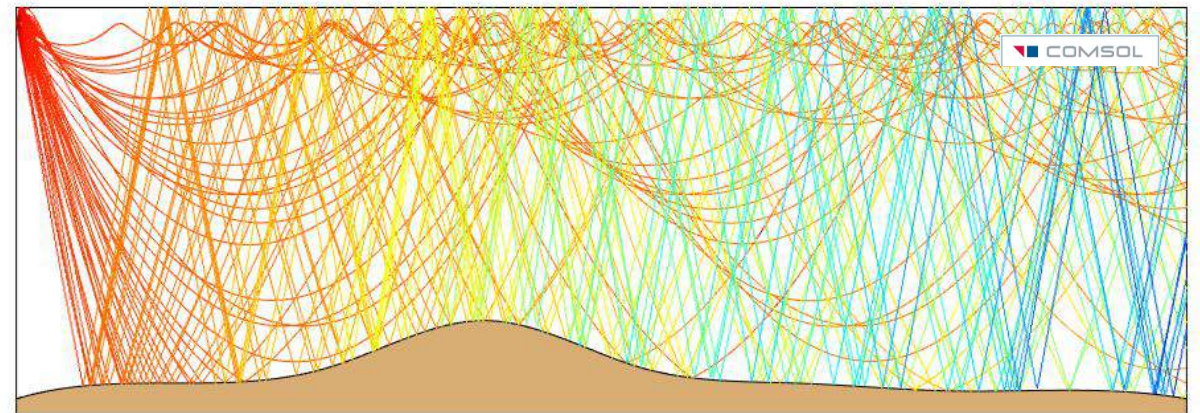
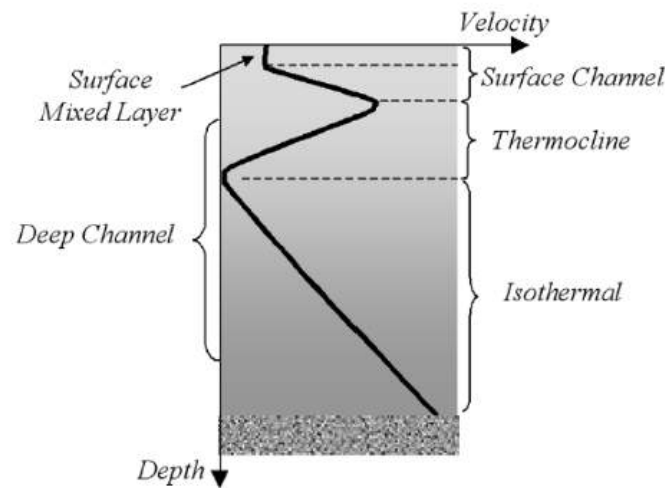
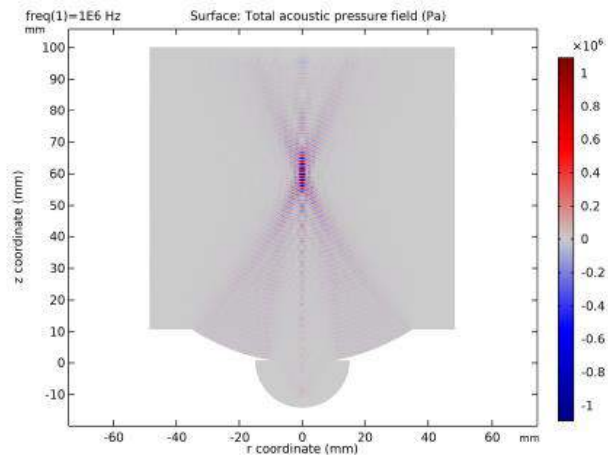
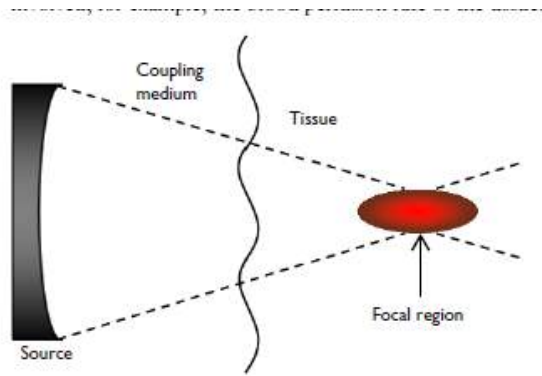


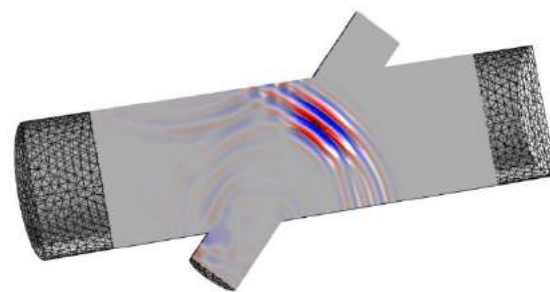
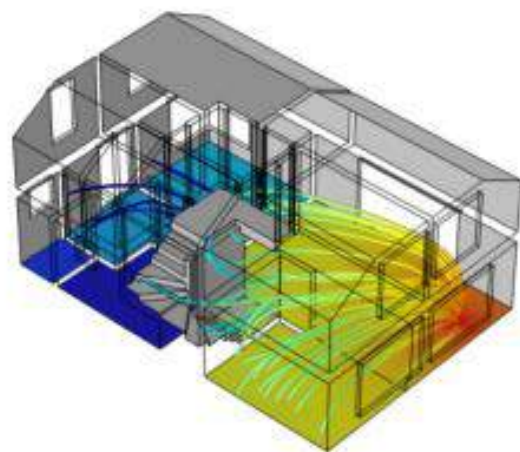
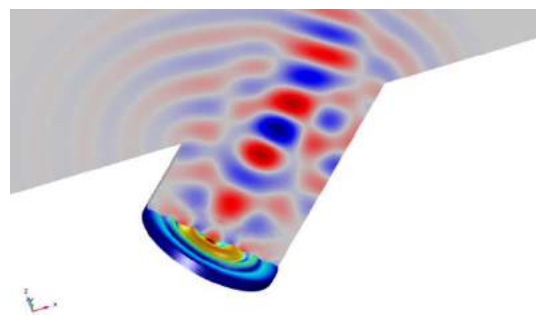
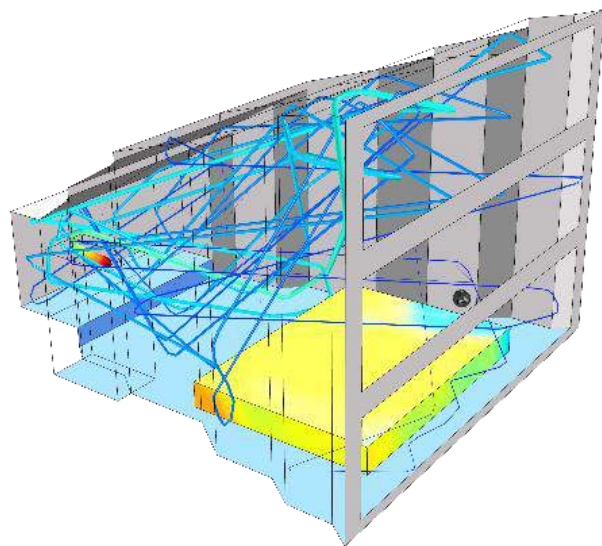
Figure 5: The different elements of a typical sound-velocity profile. The profile is in accordance with an oceanic svp, measured in winter season [4].

אקוסטיקה ברפואה

Ultrasound heat source •



אקוסטיקה בהנדסה אזרחית



- תכנון אולמות קונצרטים
- ארכיטקטורה
- מדידת מהירויות זרימה

Bio Sonar

Sound navigation and ranging

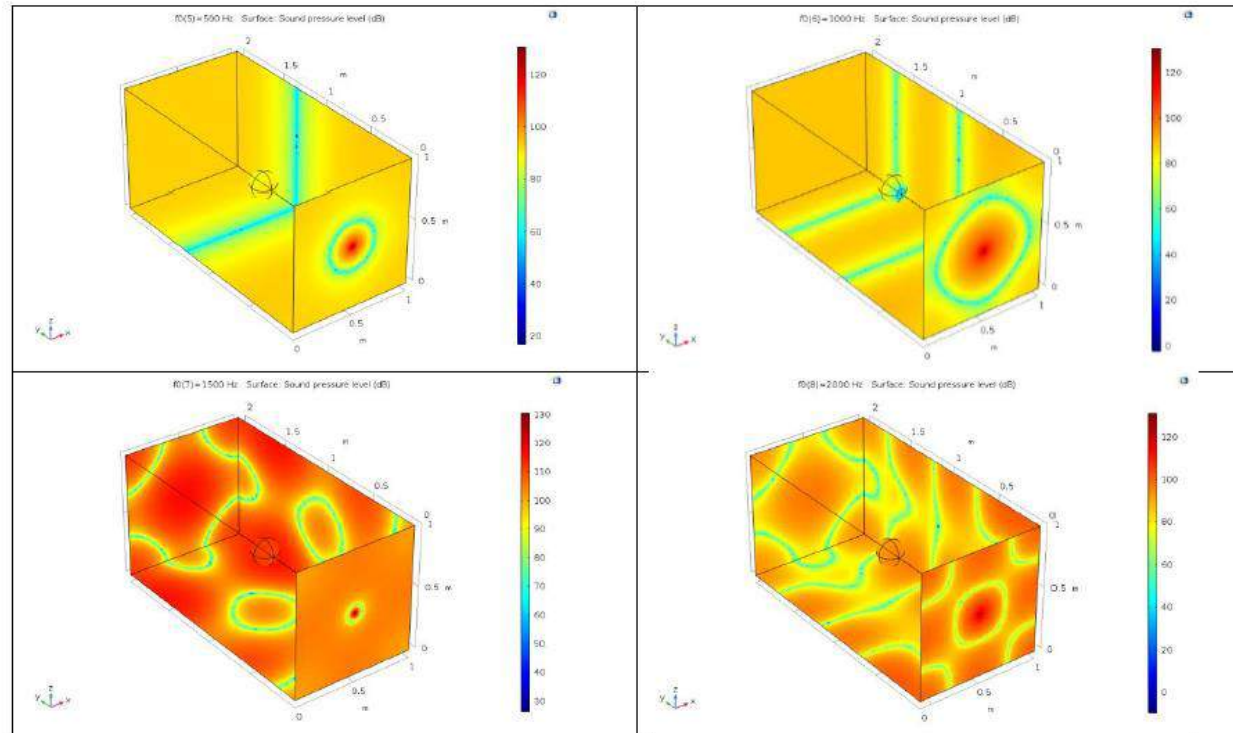
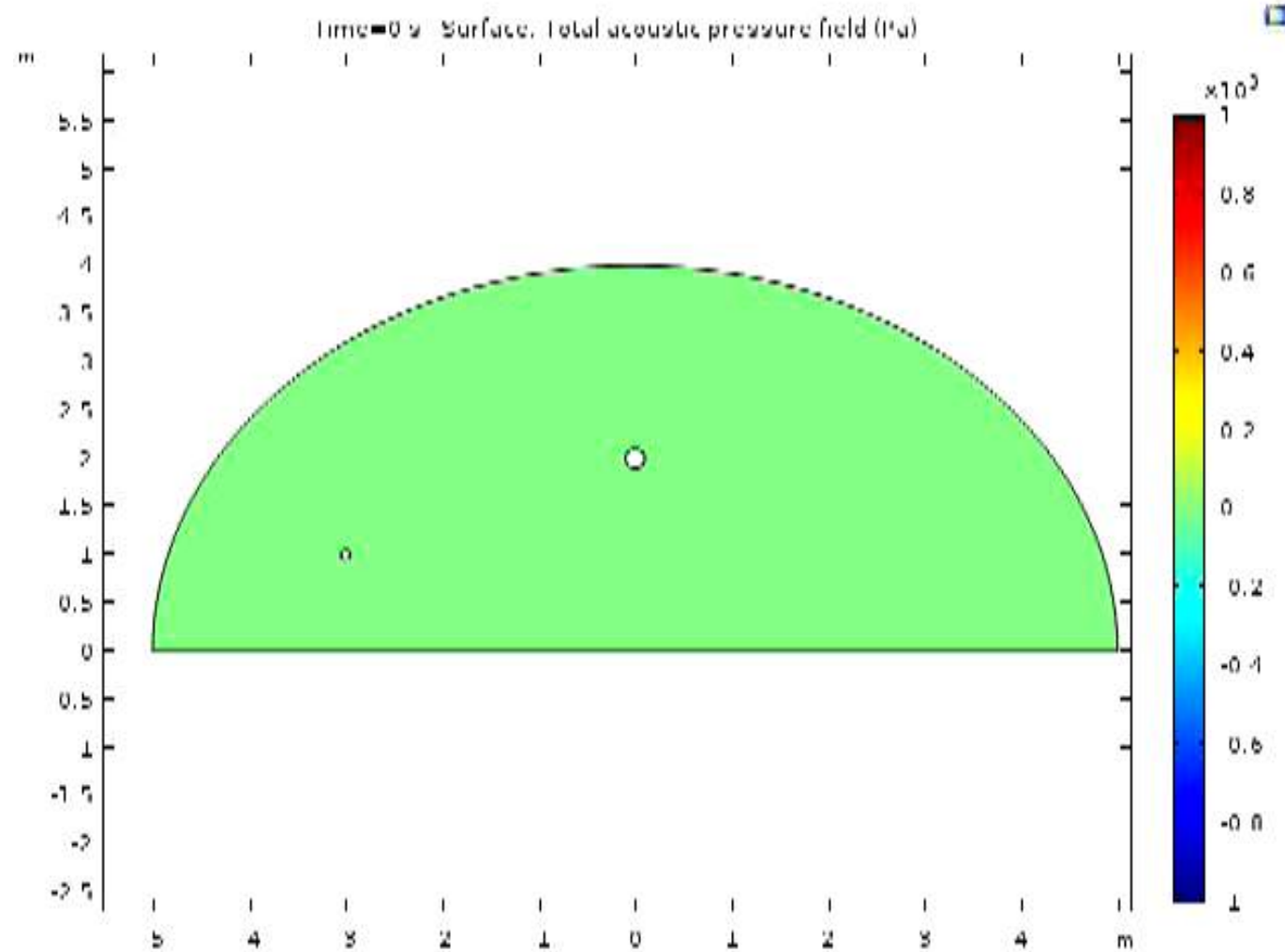


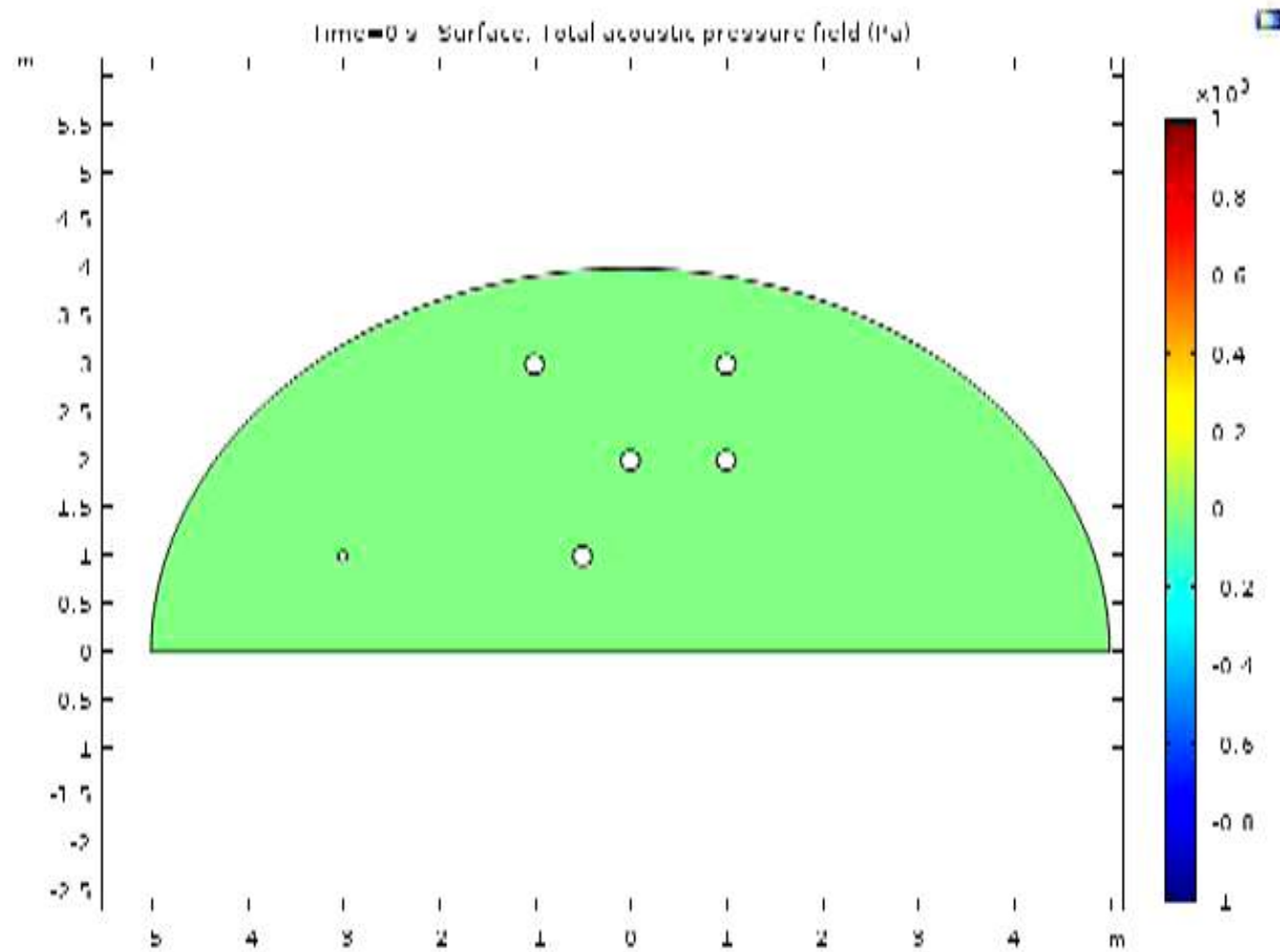
Table 18: Simulation result for the case of a small sphere placed in a middle of a $2 \times 1 \times 1 [m^3]$ tank.



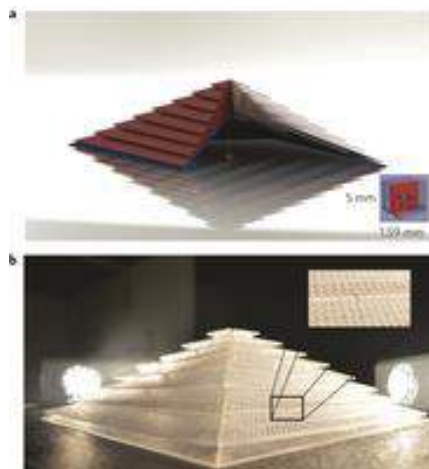
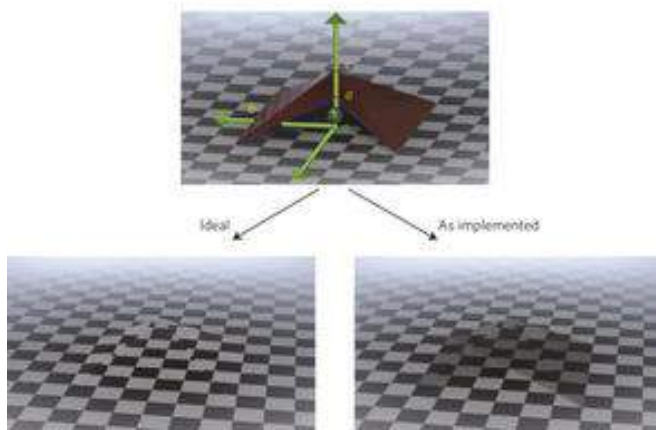
סימולציה בטרנזיאנט



סימולציה בטרנזיאנט



"הסוואת קרקע"- Ground cloak



(גודל יחידה במקרה זה קטן פי 23 מאורך הגל בתדר הנתון)

- זוהי מעטפת חומר שכאשר מניחים אותה מעל גוף הנמצא על משטח מחזיר (כלומר הקרקע, או הרקע) הופכת את הגוף לבלתי נראה על ידי הקרנת גלי הקול באופן שיתנו תמונה זהה או דומה לתמונת הקרקע.
- בעבודה של Zigoneanu, Popa & Cummer מודגם השימוש בטרנספורמציה על ידי הסתרת גוף בצורת כדור.
- העבודה מצביעה על כך כי ניתן לבצע הסתרה אקוסטית תלת ממדית.

"הסוואת קרקע" - Ground cloak

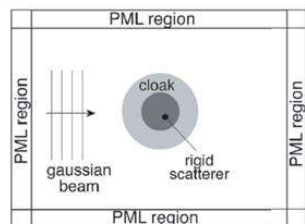


Figure 1. The 2D computational domain, in which an acoustic gaussian beam is incident on an cylindrical object.

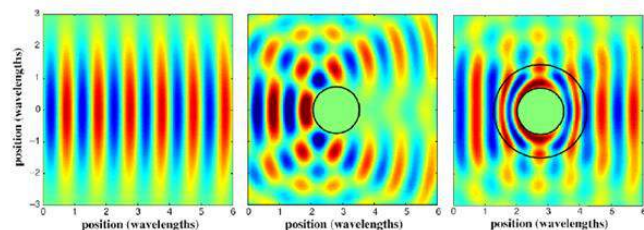
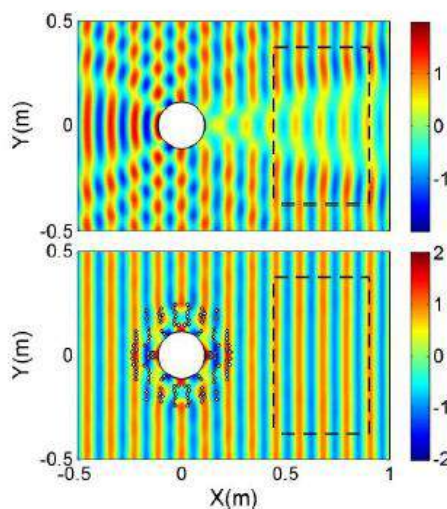


Figure 2. Left panel: The acoustic pressure p in the absence of a scatterer. Middle panel: The acoustic pressure with an incompressible cylindrical scatterer. Right panel: The acoustic pressure with the same scatterer surrounded by the cloaking sh described in the text.



• Cummer and Schuring, 2007 הציגו פתרונות נומריים להסוואת

אובייקט באורכי גל קצרים.

• הפתרון מודגם על ידי מעטפת גלילית בעלת פיזור מרחבי של צפיפות

המסה (חומר אנאיזוטרופי), ושל מודול הבאלק, היכולה "לכופף" את

שדה הגלים מסביב למרכז המעטפת.

• עבור מקרה זה הוגדרו צפיפות המסה ומודול הבאלק באופן הבא :

$$\rho_r = \frac{r}{r-R_1}, \quad \rho_\phi = \frac{r-R_1}{r}$$

$$\beta^{-1} = \left(\frac{R_2}{R_2-R_1}\right)^2 \cdot \frac{r-R_1}{r}$$

• R_1 הינו רדיוס האזור המוסווה

• R_2 רדיוס חיצוני של מעטפת ההסוואה

סיכום

- אפליקציות אקוסטיות קיימות במגוון רחב של תחומים מחיי היומיום.
- סימולציות אקוסטיות עשויות לתרום רבות במחקר ופיתוח, כפי שמוכר בתחומים הנדסיים אחרים.
- בסקירת ספרות בתחום האקוסטיקה, בלטה תוכנת Comsol multiphysics, והיותו והיא גם התוכנה המובילה במרכז הנדסה ומכניקה חישובית ברותם תעשיות הוצגו מספר סימולציות שבוצעו בעזרתה.
- בסימולציות אקוסטיות ישנה חשיבות לנושא הרישות, חשיבות בחירת המודל האקוסטי המתאים ותנאי השפה המתאימים.
- הוצגה המתודולוגיה העומדת בבסיס בחירת המרחב, תנאי השפה, המודל הפיזיקלי והעירור.
- הוצגו מספר אפליקציות מעשיות, בתקווה לקדם ולפתח את תחום הסימולציות האקוסטיות היישומיות.

תודה רבה