

בניין עזריאלי טאון – CFD ואווירואלסטיות

כנס חישובים נומריים 2019

ד"ר דורון שלו

דורון שלו הנדסה בע"מ

Doron Shalev eng. LTD.



מבוא

- מגמת הבנייה לגובה של בניינים מעל 100 מ' הולכת וגוברת בישראל.
- התכנון האדריכלי מציג יותר ויותר מבנים לא רגולריים בצורתם החיצונית.
- התקן הישראלי לעומסי רוח, ת"י 414, אינו נותן מענה הולם ואמין למבנים אלו בהיבט פילוגי זרימת רוח.
- מדובר בבעיות קריטיות של זרימה המשפיעה הן על תגובה גלובלית של המבנה והן על חיפויים חיצוניים המחוברים למבנה ועלולים להיכשל ולנשור תוך סיכון ממשי לסביבה.
- מתוך הכרה בבעיה, מנחה התקן כי במקרים אלו, יש לפנות לגורמים נוספים בכדי לקבל פילוג לחצים מהימן כתוצאה מעומסי רוח,
 - ניסויים, מנהרת רוח.
 - שיטות אנליטיות – CFD – Computational Fluid Dynamic.

מבוא

- להלן האיזכור מת"י 414 (סעיף 1.1 – חלות התקן),

קביעת עומסי הרוח והשפעתם על מבנים בעלי צורות מיוחדות או/וגם תכונות מיוחדות או/וגם מיקום מיוחד או/וגם המוזכרים בגוף התקן כדורשי התייחסות מיוחדת, תושתת על שיטות אנליזה נאותות ומוכרות או/וגם על ניסויים מתאימים בשיטות מקובלות ומוכחות, כגון ניסויים ומדידות במנהרות רוח.

מבוא

מנהרת רוח –

- ביצוע ניסוי על דגם מוקטן של המבנה, נהוג לכלול בדגם גם מבנים הממוקמים סביב המבנה לצורך ניתוח אינטראקציות.
- הניסוי מבוצע במתקן ניסוי על ידי חברה המתמחה בתחום. לא בישראל!
- היתרון בניסוי מנהרה הוא – דיוק עד כדי רמת הדיוק בבניית המודל וסביבתו..
- החסרונות – בעלויות (מעל USD 300,000) וזמן הדרוש לביצוע (כחצי שנה). כמו כן - חוסר היכולת לנתח אזורים מקומיים שלא הוגדרו מראש, וחוסר היכולת להתחשב בגמישות המבנה הנבחן.

מבוא - שיטות אנליטיות

- CFD – לחישוב פילוגי לחצים
- אווירואלסטיות – לחישוב מהירויות פרפור ודיברגנציה.
- מדובר על בניית מודל מתמטי הן של המבנה והן של התווך (האוויר).
- פתרון נומרי של משוואות הזרימה ומשוואות האווירואלסטיות
- יחסי גומלין בין תווך האוויר לבין התווך המוצק המייצג את המבנה
- ביצוע אנליזות לקבלת תגובת המבנה לעומסי הרוח הפועלים עליו.

שימוש בשיטה זו מאפשר בין היתר:

- ניתוח התנהגות גלובאלית של המבנה תחת פילוגי לחצים מדויק.
- התנהגות של אזורים מקומיים כולל סביבה טורבולנטית: קירות מסך, מרפסות, מעקות, פרגולות ועוד.
- טיפול במבנים גמישים.
- מתן מענה לתופעות דינאמיות תוך התחשבות באינטראקציה בין גמישות המבנה לרוח (FSI – Fluid Structure Interaction).
- VIV – Vortex Induced Vibration, השלת מערבולות. תרנים.
- הצורך לקבל את רמת התנודה האופקית של מבנים ייחודיים, לדוגמא – כאלה הכוללים מעבדות וציוד רגיש לתנודת המבנה.
- ניתוח אווירואלסטי דינמי (פרפור) וסטטי (דיברגנציה).

בניין עזריאלי טאון, תל אביב.

מספר קומות - 40
גובה - 145 מ'



תיאור כללי

- התכנון האדריכלי של המבנה כולל קיר מסך במערך היקפי ולכל הגובה, של משטחים אנכיים רדיאליים באורכים משתנים עד 350 מ"מ.
- משטחים אלה עומדים בזרימות רוח בפילוגים משתנים בכל ההיקף והגובה.
- זרימות הרוח מייצרות פילוגי לחצים אשר על פיהם יש לבחון את התגובה המבנית הן של המשטחים והן של שרשרת המחברים עד לאחרון הקשור אל הבניין עצמו.
- היות ומדובר בזרימה על משטחים גמישים, יש חובה לבדוק השפעות אווירואלסטיות אשר עלולות לגרום לאי יציבות סטטית (דיברגנציה) ודינמית (פרפור).
- נציין כי בכך – מדובר בתגובת משטח לזרימה ממש כמו כנף אווירון!!

כללי (המשך)

- כאמור - התקן הישראלי לעומסי רוח, ת"י 414, אינו נותן מענה הולם ומדויק למבנה מסוג זה בהיבט השפעות של גיאומטריה לא רגולרית על זרימה – מערבולות בפינות, הצטברות זרימה במפגשי שורש הזיזים וכד'.
- על כן הוחלט לבצע:
 - אנליזות זרימה (Computational Fluid Dynamics - CFD)
 - אנליזות אווירואלסטיות כשלב מקדים לאנליזות חוזק לזיזים בקיר המסך.

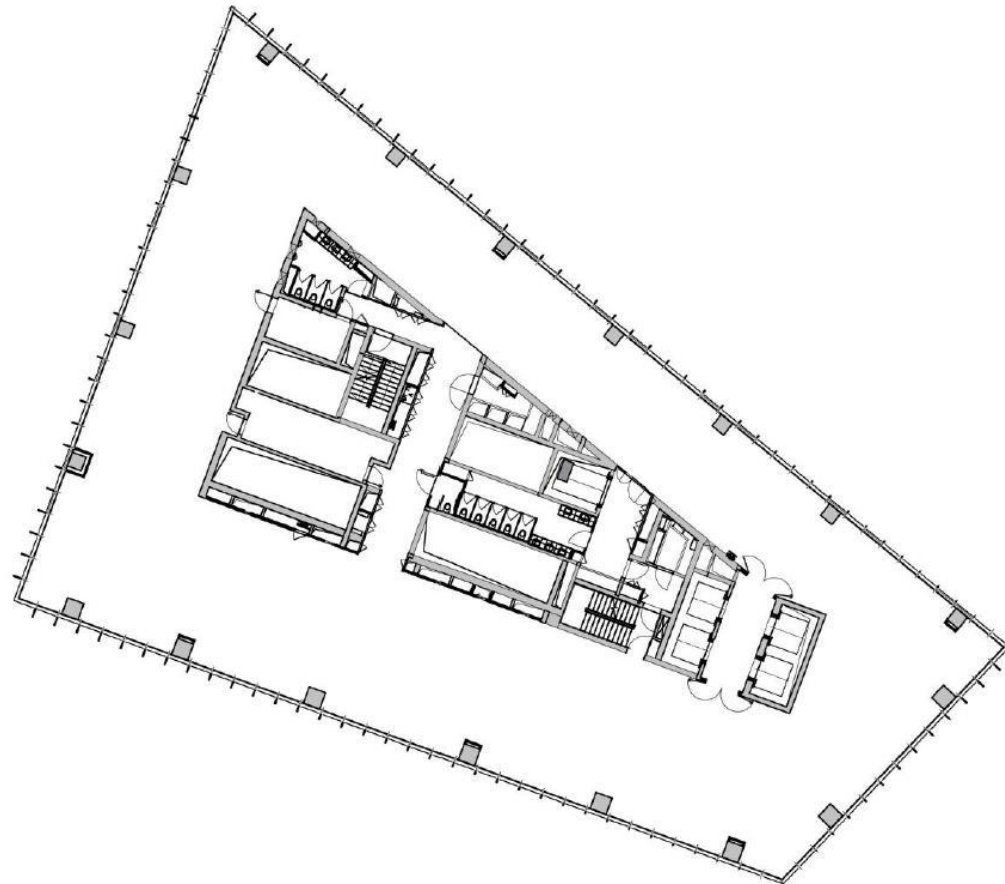
כללי (המשך)

- על פי ת"י 414, מהירות הרוח הבסיסית באזור זה הינה 30 מ\שנ'.
- מהירות בסיסית של הרוח מוגדרת בהתאם לסעיף 1.3.12 בתקן כמהירות הרוח הממוצעת במשך 10 דק' בגובה 10 מ' מעל פני השטח.
- הכלים האנליטיים הנבחרים לביצוע האנליזות המתוארות לעיל הינם:
 - תכנת LS-DYNA אשר משמשת בעיקר לחישובים בתחום אוילריאני ומעצם כך מבצעת בין היתר חישובי CFD לצורך קבלת פילוג לחצים תחת זרימה (במקרה זה זרימת אוויר),
 - תוכנת ZAERO לביצוע אנליזות אווירואלסטיות
 - תוכנת NX/NASTRAN לביצוע אנליזות חוזק.

תיאור המבנה

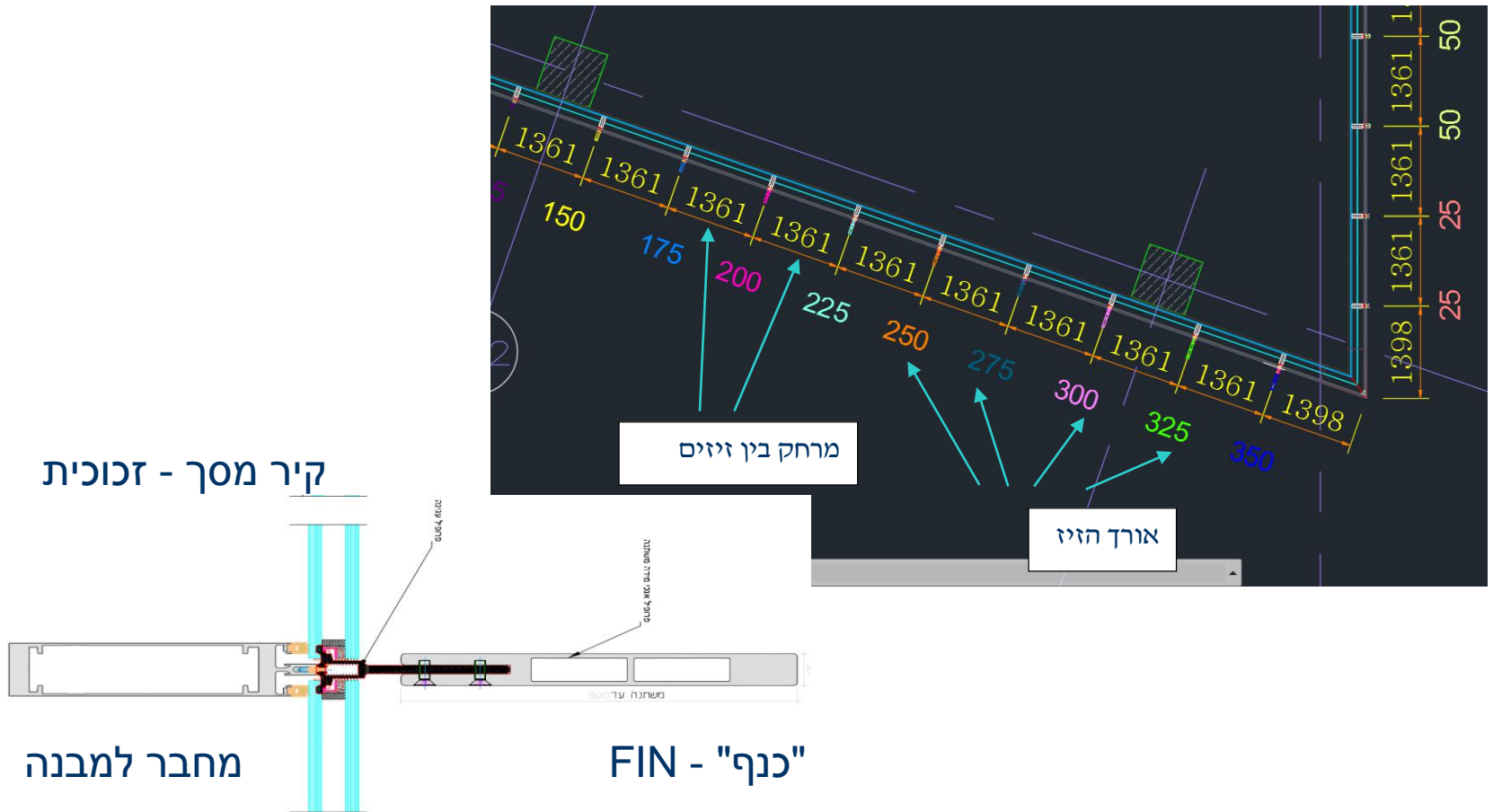
- מבנה "עזריאלי טאון" נבנה ברחוב מנחם בגין 146 תל אביב.
- גובהו 145 מ' מעל הקרקע וכולל 40 מפלסים.
- צורתו הכללית של המבנה מעין טרפז מחופה בכל החזיתות ולכל הגובה בקיר מסך מזכוכית וכולל מערכת כנפונים זיזיים (FINS) במרחקים שונים לגובה המבנה.
- אורך הזיזים משתנה מ25מ"מ עד 350מ"מ.
- להלן איורים המתארים תכנית מפלס אופיינית וסכמת זיזים בחזית המבנה,

מערך הכנפונים הזיזיים מסביב, באורך משתנה גם בהיקף וגם בגובה המבנה.





תיאור ה FINS



- מודל הזרימה כולל את המבנה והתווך סביב למבנה, קרי האוויר.
- בוצעו ההנחות הבאות,

- שלושה כיווני זרימת רוח, בהתאם נבנו שלושה מודלים מתמטיים.
- אנליזת הזרימה היא דו ממדית ומציגה את פילוגי הלחצים המתפתחים בזיזים למטר גובה. פילוגי לחצים אלו הוכפלו במקדם הגובה $C_e(Z_e)$ עפ"י הנקוב בתקן הישראלי כהתאמה לנתון הבסיסי המתאים לגובה 10 מ' (זהה ליורוקוד!).
- המודל המתמטי כולל שני אלמנטים. אלמנטים דו ממדיים המייצגים את תווך האוויר ואלמנטים חד ממדיים המייצגים את החזיתות. יש לציין כי לצורך בניית המודל המתמטי בונים גאומטריות חד ממדיות המגדירות את התווך ולאחר מכן נבנה המודל הדו ממדי באופן אוטומטי.
- מהירות הרוח 30 מ'שנ'.

3 מודלים ל3 כיווני אוויר

3



תנאי שפה

- תנאי השפה במודלים מסוג זה נחלקים לשלוש,
- SLIP – משטח שאינו משפיע על מהירות הרוח. דהיינו, רוח מחליקה על המשטח, מייצג תנאי שפה סימטריים.
- NON-SLIP – משטח בו מהירות הרוח היא אפס. מייצג קרקע או כל גוף המפריע לזרימה.
- INLET – המשטח שהנורמל שלו מנוגד לכיוון הרוח.
- OUTLET – המשטח שהנורמל שלו במקביל לכיוון הרוח

תנאי שפה



תכונות חומר, יחידות

חומר	צפיפות [ק"ג/מ ³]	צמיגות [מ ² /שני]
אוויר	1.205	1.57E-5

תוצאות האנליזות מוצגות ביחידות,

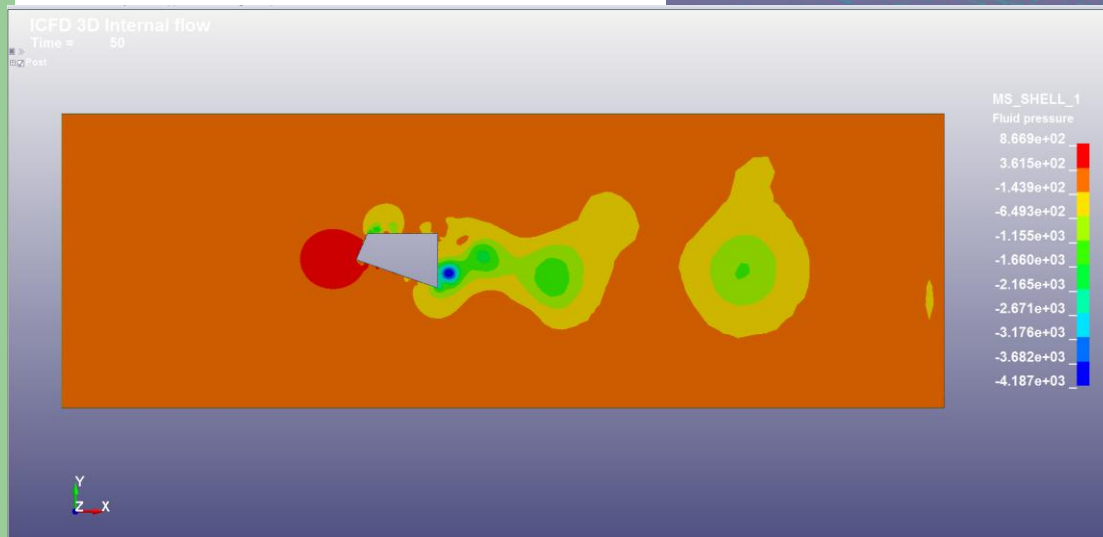
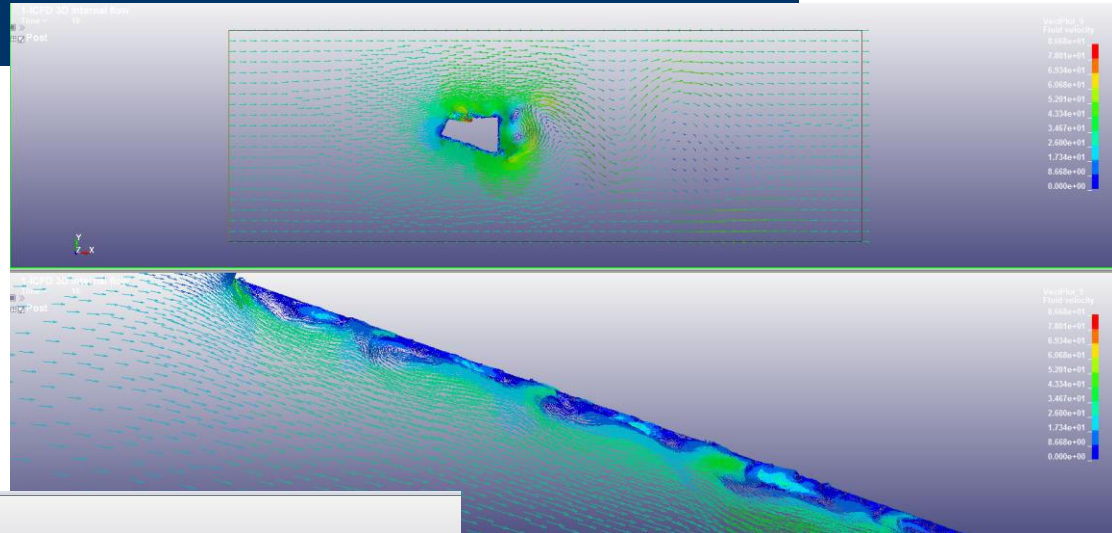
אורך – מ".

לחץ – פסקל.

מהירות – מ/שני.

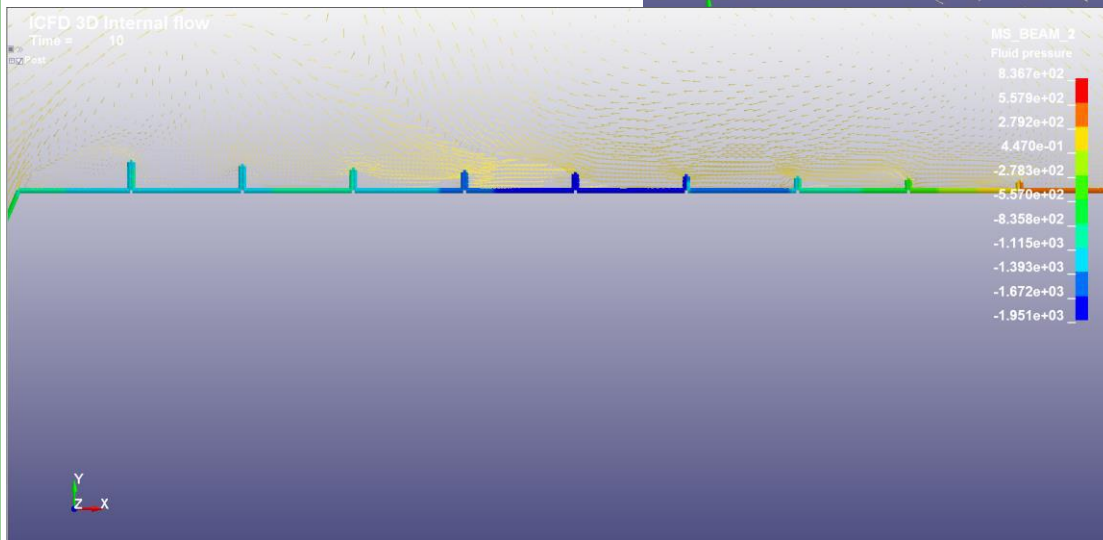
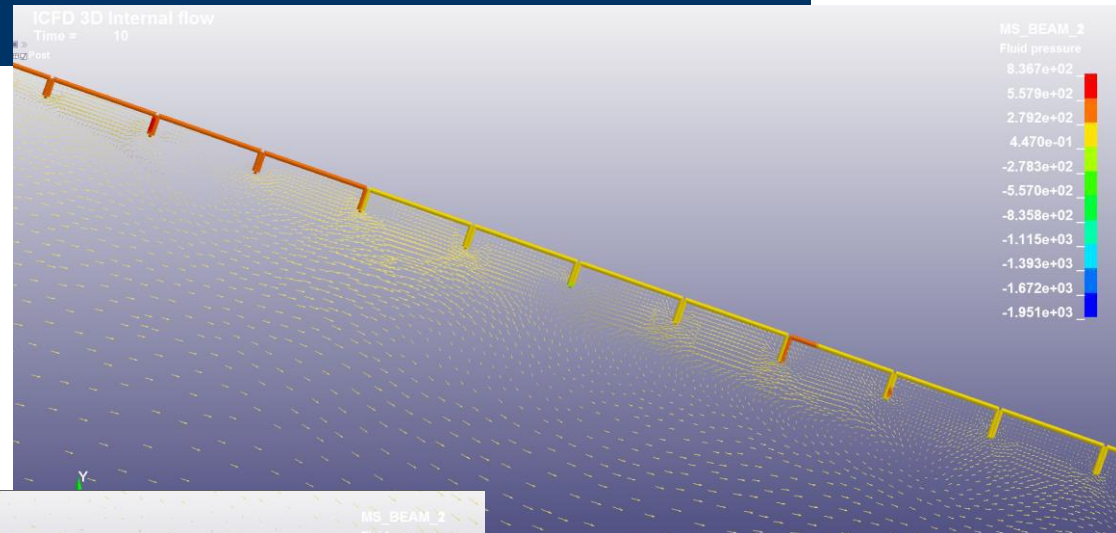
רוח ממערב

שדה הזרימה.
מערבולות סביב הזיזים



פילוג לחצים

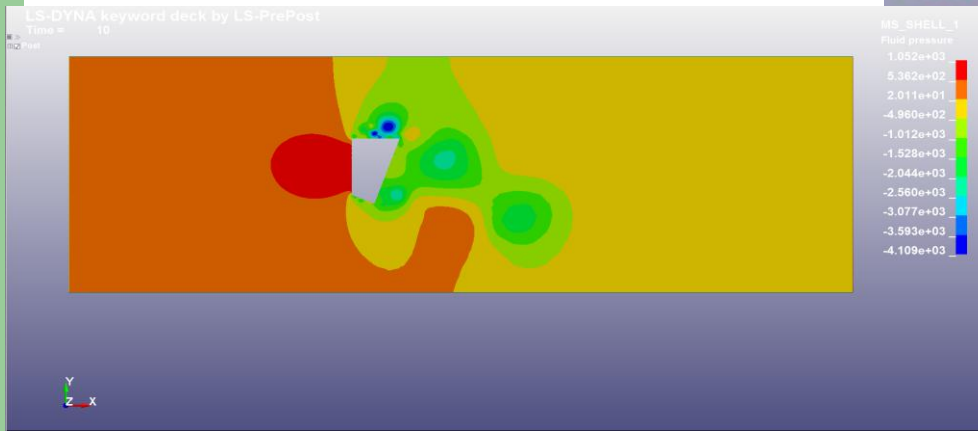
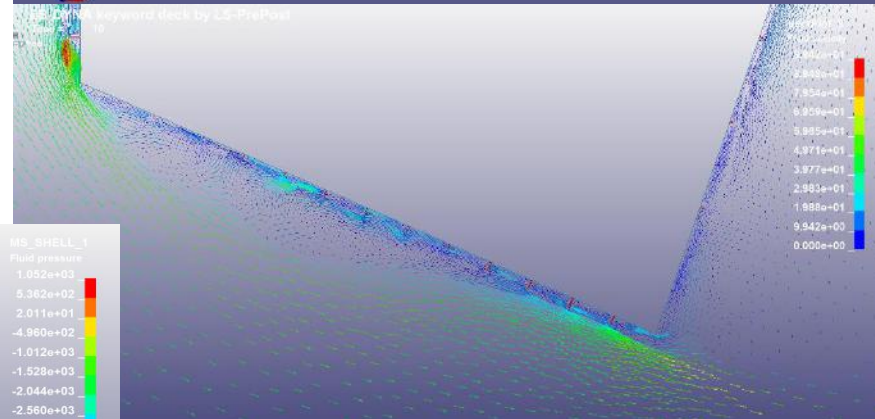
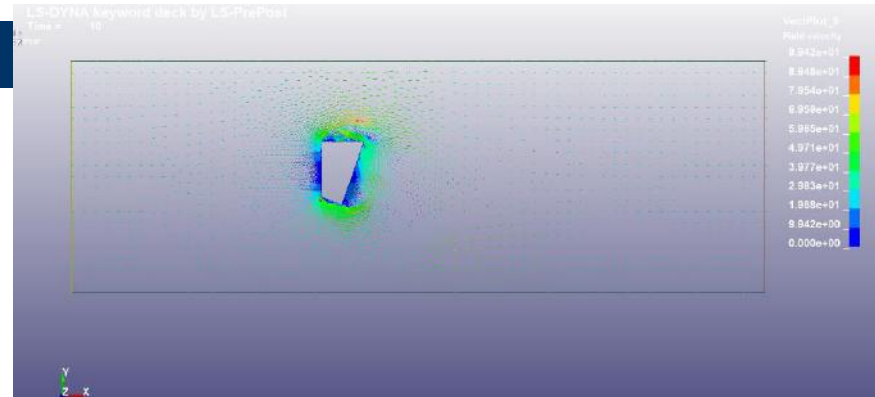
בחינת הפרש לחצים משני צידי הזיזים





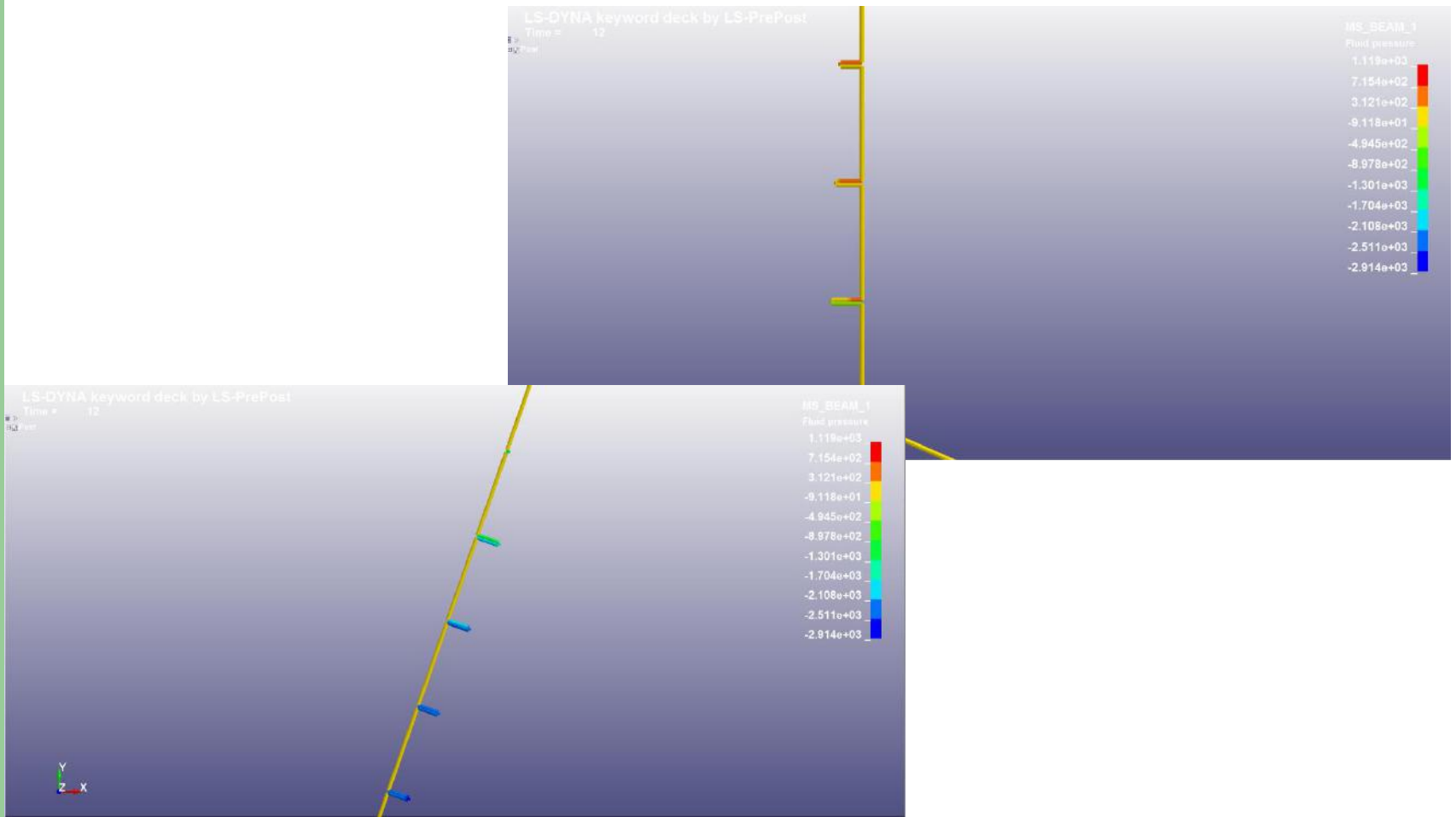
רוח מדרום

שדה הזרימה.
מערבולות סביב הזיזים



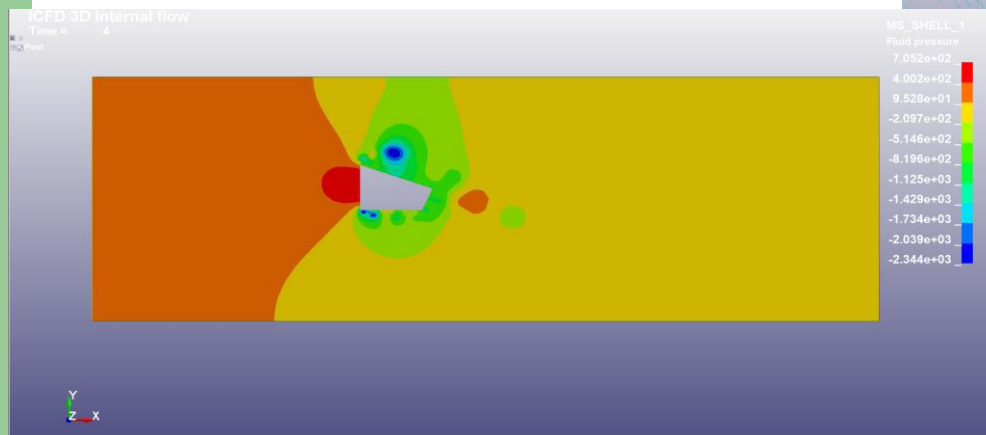
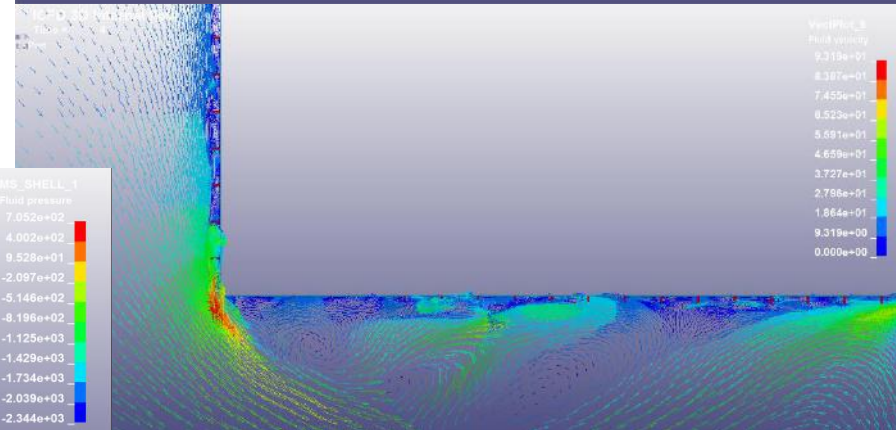
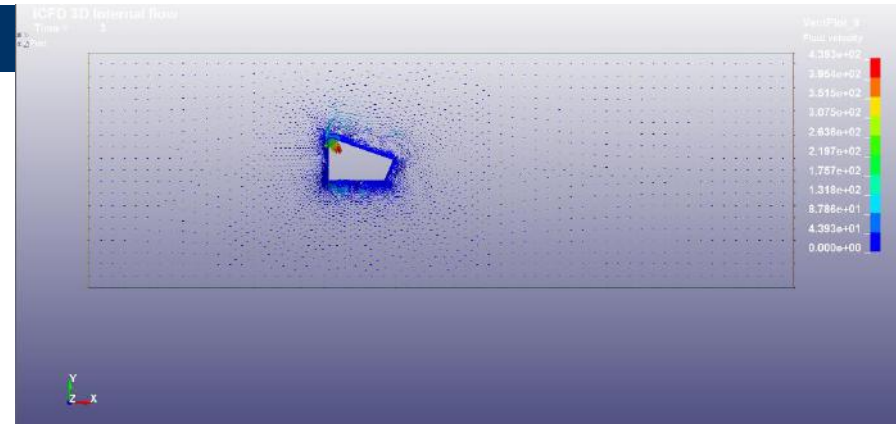
פילוג לחצים

הפרש לחצים משני צדי הזיזים



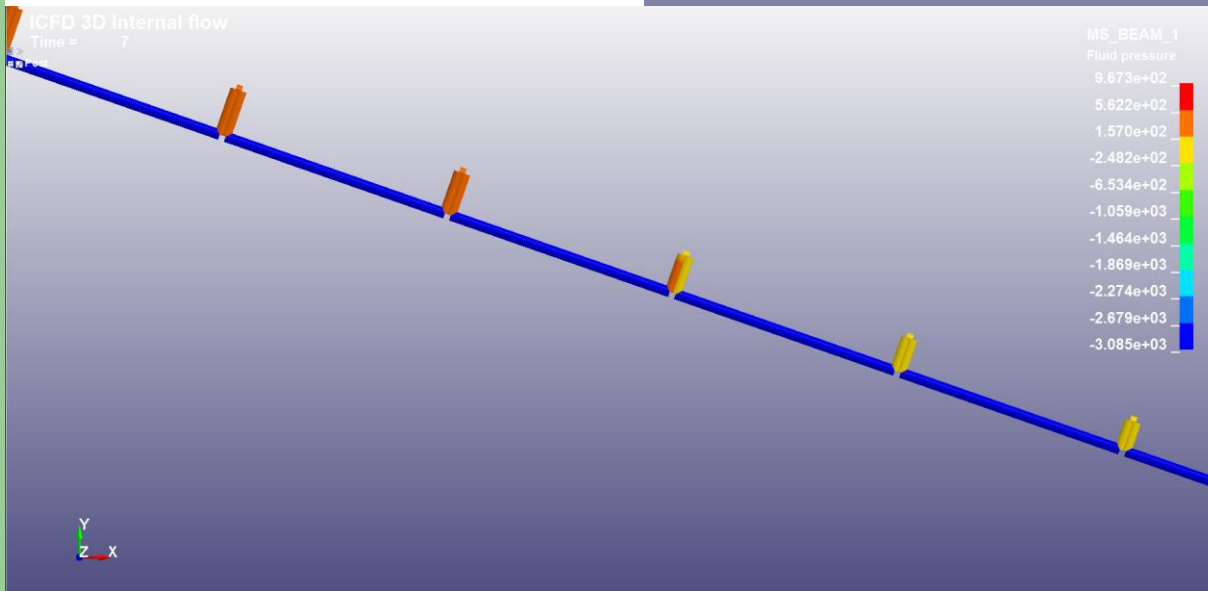
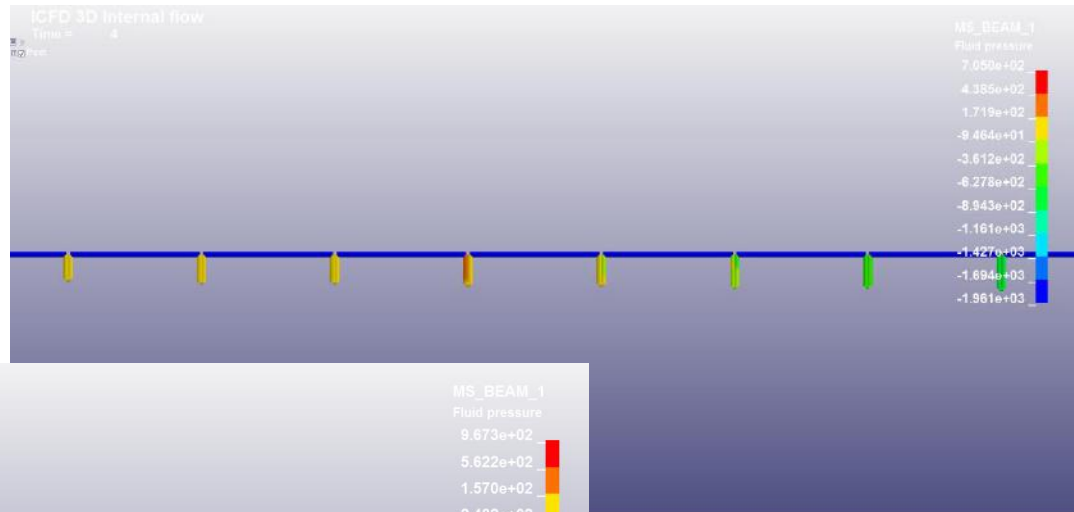
רוח מצפון

שדה הזרימה.
מערבולות סביב הזיזים



פילוג לחצים

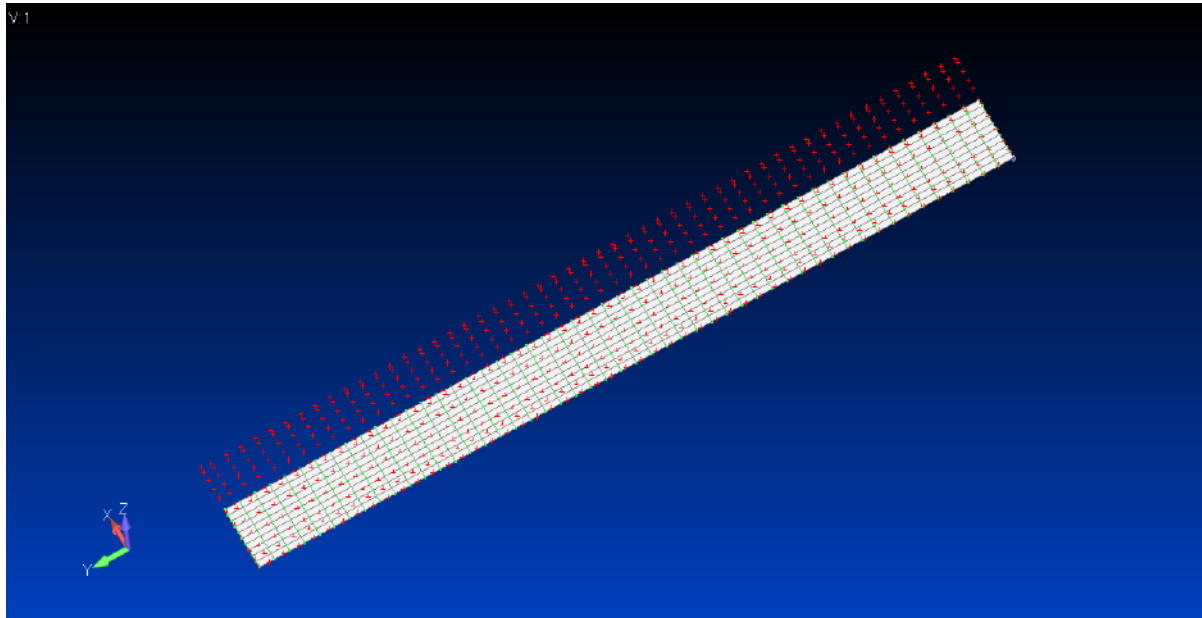
הפרש לחצים משני צדי הזיזים



אווירואלסטיות

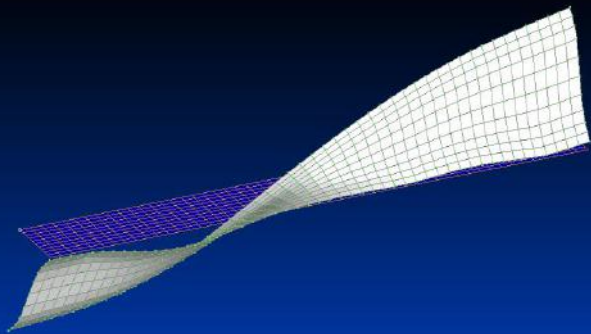
- המודל האווירודינמי המשמש לחישוב אברי המטריצה האווירודינמית הלא-תמידיית, נבנה בשיטת הפנלים של תכנת ZAERO.
- ע"פ שיטה זו מחולק משטח ה FIN לפנלים טרפזיים באופן שצלעותיהם המקבילות נמצאות בכיוון הזרימה המציפה.
- אברי המטריצה האווירודינמית מתקבלים תוך פתרון משוואה אינטגרלית במספר שלבים השווה למספר הפנלים כאשר בכל שלב מניחים עבור פנל נדון ערך downwash מנורמל = 1 ובשאר 0 ומתוך כך מתקבלת חלוקת לחצים אשר ממנה נובעים כוחות דיסקרטיים בפנלים.
- חלוקת הפנלים האווירודינמיים בכנפונים הינה 50 בכיוון המוטה ו 10 בכיוון המיתר.

- ניתן לראות את המודל האווירודינמי באיורים הבאים כאשר הנקודות האדומות מציגות את מיקום הצמתים של המודל המבני ביחס למודל האווירודינמי.

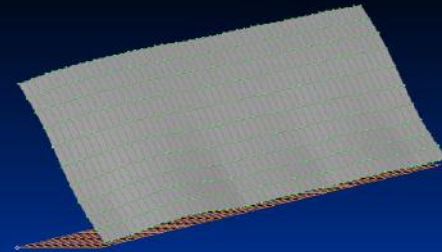


תנודות חופשיות. מודים בגריד האוירודינמי

V:1

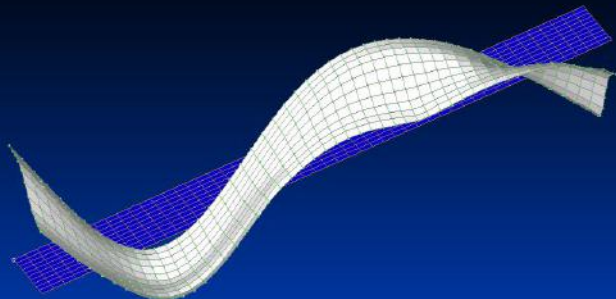


Output Set: Mode 2 47.014 Hz
Deformed(2661); ZAERO Total Translation

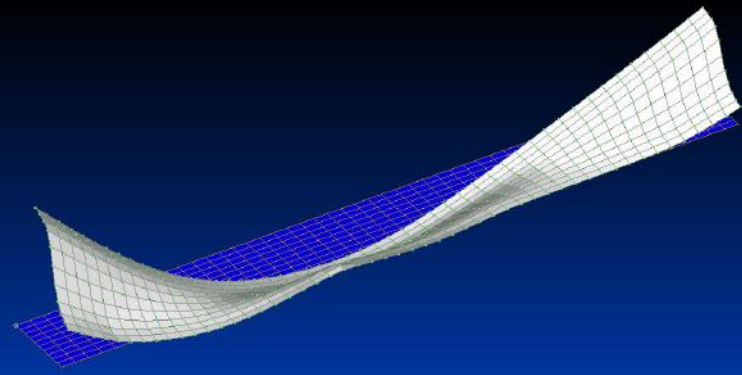


Mode 1 20.508 Hz
(2661); ZAERO Total Translation

V:1



Output Set: Mode 4 81.632 Hz
Deformed(2661); ZAERO Total Translation



Mode 3 72.757 Hz
(2661); ZAERO Total Translation

- לאחר חישוב צורות התנודה האופייניות של המבנה, בוצעה אנליזת פרפור ודיברגנציה עבור מבנה ה FIN.
- אנליזת הפרפור בוצעה בשיטת g באמצעות תוכנת ZAERO, על פי נתוני רוח שונים לפי הגדרות תקניות והתייחסות לדו"ח מעבדת RDWI.
- חושבו 20 מודים וכולם הובאו בחשבון באנליזת הפרפור. כמו כן נלקח בחשבון ריסון מבני קבוע של $g=1\%$ לכל המודים בכל מרווח התדרים (הערכה שמרנית מקובלת ובעלת השפעה זניחה במקרה הנוכחי).

- תוצאות הריצה מתקבלות באמצעות שני גרפים.
- הראשון מציג את השתנות תדרי התנודות עם השתנות המהירות מאפס ועד 200 מ'/שנ' (פי שניים מנתוני הרוח הצפויים).
- הגרף השני מציג את השתנות מנת הריסון המודאלי כפונקציה של המהירות. מנות ריסון אלו מתארות ריסונים שיש להוסיף למערכת כדי להביאה לסף היציבות. לכן, המערכת יציבה רק כאשר כל מנות הריסון המודאליות שליליות.
- למען הבהירות, הגרפים שיובאו להלן מראים רק את ענפי התדר והריסון המיוחסים למודים האלסטיים הרלוונטיים כלומר עד לאלה המציגים תנועות FIN, כלומר ללא מודים בעלי תדר גבוה יותר אשר אינם רלוונטיים לצורך ניתוח פרפור.

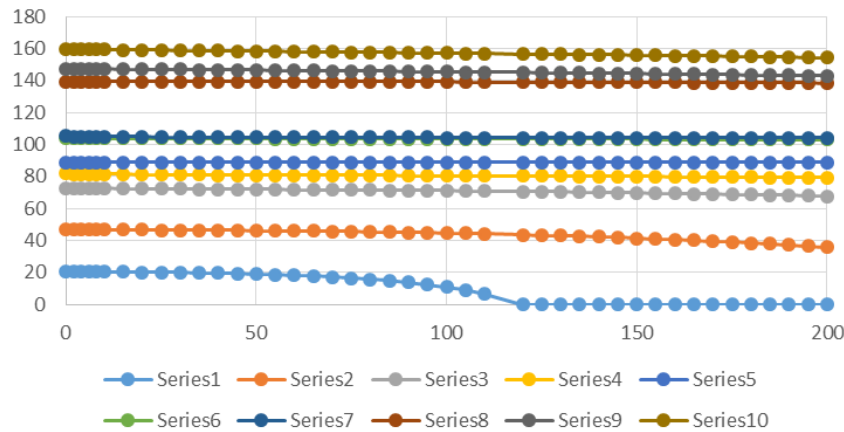
- המהירות הקריטית לפרפור (V_f) מתקבלת במהירות המינימלית בה חוצה ענף של מנת הריסון המודאלי, עבור מוד מסוים את קו האפס.
- דיברגנציה מתקבלת כאשר מוד אלסטי מסוים משנה את תדירותו (ω) כפונקציה של המהירות, עד לכדי איפוס, שם מתקבלת מהירות הדיברגנציה (V_d).
- התוצאות מוצגות בגראפים הנקראים $V-g-\omega$.

- להלן צמדי גראפים עבור נתונים גיאומטריים שונים כפי שנקבע – FIN באורך 350 מ"מ בתנאי שפה של 3 ו 4 נקודות אחיזה.
- מהירות רוח נקבעה על פי הגדרות RDWI ל 100 מ'/שנ' כנקודת ייחוס קריטית.
- כל צמד גראפים כולל גראף אחד המציג השתנות תדרים כפונקציה של המהירות וגראף שני המציג השתנות מנת ריסון מודאלית נדרשת לייצוב כפונקציה של המהירות.

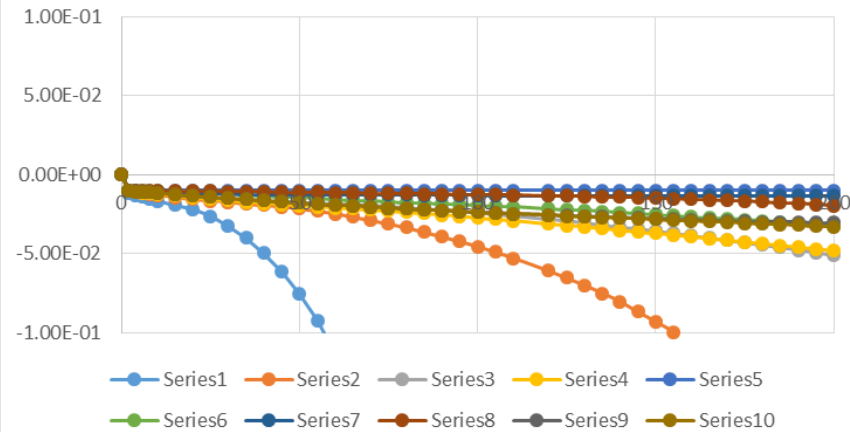
4 נקודות אחיזה של FIN באורך 350 מ"מ

אין פרפור בטווח עד 200 מ"מ/שני.
מתקבלת דיברגנציה במהירות רוח של 120 מ"מ/שני.

תדרים לעומת מהירות רוח

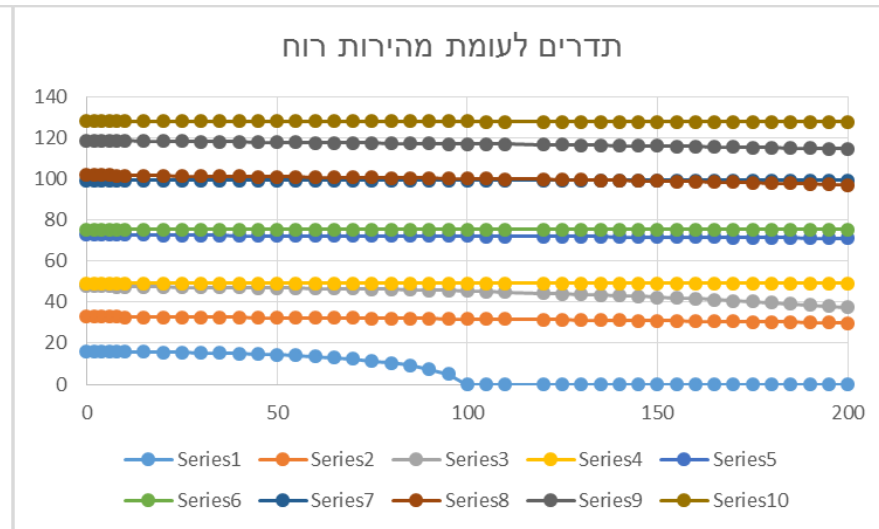
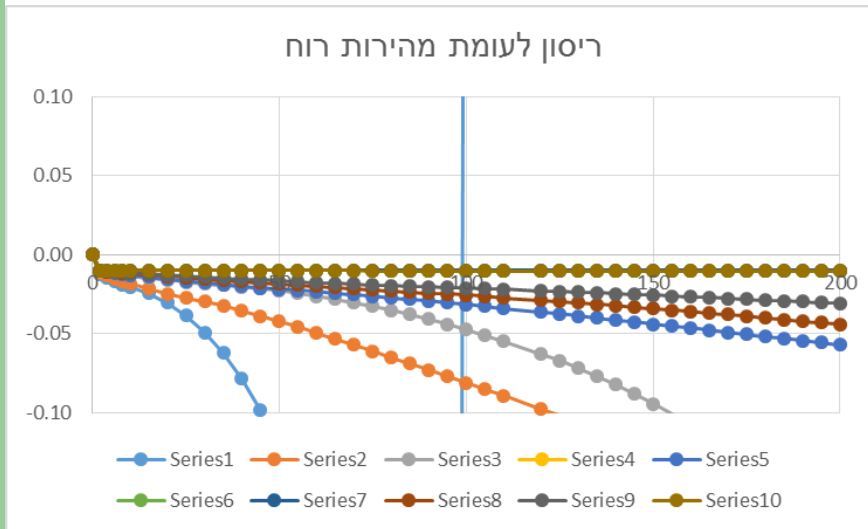


ריסון לעומת מהירות רוח



3 נקודות אחיזה של FIN באורך 350 מ"מ

מתקבל פרפור במהירות רוח של 100 מ'/שנ'.
מתקבלת דיברגנציה במהירות רוח של 100 מ'/שנ'.



סיכום - CFD

- נבנו שלושה מודלים מתמטיים לצורך ביצוע אנליזות זרימה דו ממדיות למבנה, המייצגות את מהירות הרוח בגובה 10 מ' מהקרקע. המודלים נבדלים זה מזה בכיוון זרימת הרוח.
- האנליזות בוצעו על מנת לאתר ולאפיין את משטר הזרימה ופילוגי הלחצים סביב המבנה בנוכחות מערכת זיזים אנכית באורכים משתנים בין 25 מ"מ ל 350 מ"מ. (מכונים "סכינים" או FINS)
- מטרת האנליזות הייתה לאתר הפרשי לחצים בין שתי פאות זיז נגדיות המתפתחים כתוצאה ממשטר זרימת האוויר סביב המבנה. הפרש לחצים כזה מהווה את העומס לניתוח.

סיכום - CFD

- נמצא כי: עבור מהירות זרימה של 30 מ'שנ' המייצגת את מהירות האוויר בגובה 10 מ' מהקרקע התפתחו פילוגי לחצים מקסימאליים של 100 ק"ג/מ².
- למבנה שבנידון 40 קומות וגובהו כ 142.5 מ', בהתאם יש לנרמל את מפלי הלחצים שהתקבלו לגובה זה. הנרמול בוצע על סמך מקדם החשיפה כפי שהוא נתון בת"י 414.
- על בסיס תוצאות האנליזות ונירמול מפלי הלחצים לרום המבנה, הפרש הלחצים המקסימאלי הפועל על סכין הוא 350 ק"ג/מ².

סיכום - אוירואלסטיות

- בוצעו אנליזות אוירואלסטיות למבנה ה FIN כולל הקשר אל המוליון דרך הקמרטונים כולל השפעת איטומי הסיליקון בממשק אל משטחי הזכוכית משני הצדדים וכן מחברי המוליונים אל הבניין.
- האנליזות בוצעו על מנת לאתר את מהירות הפרפור (אי יציבות אוירואלסטית דינמית) ואת מהירות הדיברגנציה (אי יציבות אוירואלסטית סטטית) אל מול נקודת מהירות רוח קריטית אשר הוגדרה על ידי מעבדת RWDI כ 100 מ'/שנ'.
- מטרת חישוב מהירויות הפרפור והדיברגנציה הינה לברר האם מהירות הרוח הקריטית נמצאת תחת מהירויות אלה במרווח בטחון מספיק מקובל של לפחות 20%.

סיכום - אוירואלסטיות

- האנליזות בוצעו עבור 4 מצבים מייצגים אשר על פיהם ניתנת האפשרות למקם FIN באורכים שונים ולבחור אופי מחברי קמרטונים שונים הן מבחינת מספרם והן מבחינת מיקומם לאורך ה FIN.
- המקרים אשר נבחרו הינם: FIN באורך 350 מ"מ (מירבי), פעם אחת ב 4 נקודות חיבור למוליון ופעם נוספת ב 3 נקודות חיבור למוליון.

סיכום - אוירואלסטיות

- נמצא כי:

– עבור FIN באורך של 350 מ"מ עם 4 תפיסות למוליון מתקבלת דיברגנציה במהירות רוח של 120 מ'/שנ' ולא מתקבל פרפור כלל בטווח עד 200 מ'/שנ'. כלומר בכל מקרה נשמר טווח בטחון של 20% גם אל מול מהירות הדיברגנציה.

– עבור FIN באורך של 350 מ"מ עם 3 תפיסות מתקבלות מהירויות פרפור ודיברגנציה של 100 מ'/שנ'. כלומר מרווח בטחון מאופס. בשום אופן אין להשתמש בתכנון זה עבור איזור בבניין בו מוגדרת מהירות הרוח המירבית של 100 מ'/שנ'.

תודה על תשומת הלב

