המשרד להגנת הסביבה
الوزارة لحماية البيئة
Israel Ministry of Environmental Protection

הנחיות לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב להערכת נוחות ובטיחות במרחבי תכנון עירוניים



מאי 2025

תודות

צוות כותבי המסמך

רן אברהם
מנהל אגף א' – בנייה ירוקה תקינה ותיווי
המשרד להגנת הסביבה

אסף טורק
חברת אנווירוניט בע"מ

יפעת סלע דדון
סלע – בניה ירוקה ומתקדמת

תודות מיוחדות

צוות מחלקת אקלים
השירות המטאורולוגי

הנחיות לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD להערכת נוחות מכנית ובטיחות עבור הולכי הרגל

תוכן עניינים

1. מבוא ומטרות 5

1.1. מיקרו אקלים עירוני 5
1.2. מטרת בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD 6
1.3. מטרות מסמך ההנחיות 7
1.4. מקורות הידע והבסיס לגיבוש ההנחיות 7

2. מקרים בהם נדרשת בדיקת רוחות 8

3. מתודולוגיה 9

3.1. תרשים זרימה לתהליך העבודה 9
3.2. הסבר תמציתי לשלבים העיקריים 10
3.3. תוכנת CFD מוכרות 11

4. תכולת מודל תלת מימד 12

4.1. מבנים 12
4.2. טופוגרפיה 15
4.3. אלמנטים צמחיים בפתרון לרוחות טורדניות 16
4.4. אלמנטים אדריכליים קבועים בפתרון לרוחות טורדניות ומסוכנות 16

5. הגדרות בתוכנת ה-CFD 17

5.1. קופסת החישוב (Computation Box \ Grid) 17
5.2. אזורי בדיקה 17
5.3. נקודת/גובה ייחוס 18
5.4. רמת MESH 19
5.5. מקדמי חספוס באזור התכנית המוצעת 19

6. נתונים מטאורולוגיים 20

6.1. כללי 20
6.2. מקורות לנתונים מטאורולוגיים 20
6.3. אטלס פוטנציאל אנרגיית רוח 21
6.4. מאגר נתונים מטאורולוגיים מייצגים לאזורים נבחרים בישראל 22

7. קריטריונים להערכה 23

7.1. מטרת הקריטריונים 23
7.2. מדד מהירות רוח שקולה 23
7.3. מבנה הקריטריונים 23
7.4. בחינת ממצאי הבדיקה אל מול הקריטריונים להערכה 24

8. משטר הרוחות החזוי ובחינתו 25

8.1. הפקת תחזית למשטר הרוחות 25
8.2. סימון שימושים וסוגי פעילויות 28
8.3. איתור חריגות מהקריטריונים ותכנון פתרונות למיתון הרוח 29

9. הכנת דו"ח בדיקת רוחות 31

9.1. תכולה נדרשת לדו"ח 31
9.2. טופס סיכום בדיקה 32

10. עקרונות לתכנון מרחבי התומך במיתון רוח, ודוגמאות לפתרונות אדריכליים 36

10.1. עקרונות לתכנון מרחבי 36
10.2. אלמנטים אדריכליים מפורטים 37

הנחיות לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD להערכת נוחות מכנית ובטיחות עבור הולכי הרגל

תוכן עניינים

רשימת טבלאות

טבלה 1 | תכולת מודל תלת מימד | רמת פירוט מינימלית נדרשת 14
טבלה 2 | הגדרות בתוכנת ה-CFD | רמת MESH מינימלית נדרשת 19
טבלה 3 | הגדרות בתוכנת ה-CFD | מקדמי חספוס 19
טבלה 4 | קריטריונים להערכה | שיעור הזמן המרבי המותר למהירות רוח שקולה חזויה לפי אופי הפעילות והשימוש 24
טבלה 5 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | סיווג חריגות מהקריטריונים 30
טבלה 6 | הכנת דו"ח בדיקת רוחות | תכולה נדרשת לדו"ח 31

רשימת תרשימים

תרשים 1 | מתודולוגיה | תרשים זרימה לתהליך העבודה 9
תרשים 2 | תכולת מודל תלת מימד | מבנים שנדרש לכלול 12
תרשים 3 | תכולת מודל תלת מימד | אטימות מבנים 12
תרשים 4 | תכולת מודל תלת מימד | כיסי אויר 13
תרשים 5 | תכולת מודל תלת מימד | מתי נדרש לכלול טופוגרפיה 15
תרשים 6 | תכולת מודל תלת מימד | רציפות ואטימות הטופוגרפיה 15
תרשים 7 | הגדרות בתוכנת ה-CFD | נקודת ייחוס 18
תרשים 8 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | תרשימים לדוגמא | נוחות מכנית 26
תרשים 9 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | תרשימים לדוגמא | בטיחות הולכי רגל 27
תרשים 10 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | תרשימים לדוגמא | סימון שימושים וסוגי פעילויות 28
תרשים 11 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | אפקטים נפוצים להגברת רוח בסביבה בנויה 29

הנחיות לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD להערכת נוחות מכנית ובטיחות עבור הולכי הרגל

מבוא ומטרות

1. מבוא ומטרות

1.1. מיקרו אקלים עירוני

סיפורו של המיקרו-אקלים העירוני: כיצד אנו מבטיחים מרחבים ציבוריים נוחים ובטוחים

נוחות הרוח להולכי רגל היא מרכיב מרכזי בתכנון עירוני מודרני, המשפיע ישירות על חוויית המשתמשים במרחב הציבורי ועל יצירת מקומות מזמינים ונעימים (Place Making). כאשר מתכננים ערים ורחובות, חשוב להבין כיצד מבנים, שטחים פתוחים ואלמנטים עירוניים נוספים משפיעים על זרימת הרוח, על מנת ליצור סביבה נוחה, בטוחה ומזמינה לכלל המשתמשים.

מדוע נוחות רוח היא קריטית למרחבים ציבוריים ול-Place Making

Place Making מתמקד ביצירת מרחבים ציבוריים חיים, אטרקטיביים ושימושיים, המעודדים אינטראקציה חברתית, מסחרית ותרבותית. עם זאת, רוחות בלתי מבוקרות יכולות להפוך אזורים עירוניים ללא נעימים לשהייה, לצמצם את השימוש בהם ולפגוע בפעילויות כמו ישיבה בבתי קפה פתוחים, הליכה נינוחה ברחובות מסחריים או שימוש בפארקים עירוניים.
בתקופה בה חל האצה בבנייה לגובה, חשוב לקחת בחשבון כי מבנים גבוהים יוצרים שינויים משמעותיים במשטר הרוחות העירוני, כגון האצת זרימות בין מבנים, מערבולות רוח או משבי רוח פתאומיים. ללא תכנון נכון, תופעות אלו עלולות לפגוע בנוחות הולכי הרגל ולהקטין את הפוטנציאל של מרחבים ציבוריים להפוך למקומות חיוניים ומוצלחים.

מהו מיקרו אקלים עירוני?

מיקרו-אקלים עירוני הוא האקלים המקומי שנוצר באזורים עירוניים בשל השפעות מבנים, כבישים, צמחייה ושימושי קרקע. הוא מתאפיין בטמפרטורות גבוהות יותר (תופעת אי החום העירוני), שינויים בזרימת הרוח, שינויי לחות והשפעה על איכות האוויר. גורמים כמו גובה וצפיפות המבנים, חומרים סופגי חום ומיעוט של שטחים ירוקים משפיעים על היווצרותו. הבנת מיקרו-האקלים המקומי חיונית לתכנון עירוני מיטבי, במיוחד להבטחת נוחות תרמית (חום וקור), לנוחות מכאנית (רוח) ולהפחתת השפעות שינויי אקלים.

הקשר בין בינוי עירוני למטרדי רוח

בניה צפופה ובניה גבוהה מאוד מצד אחד מאיטה את הרוח הכללית ומאידך מייצרת טורבולנטיות גבוהה ורוח משבית אשר עשויה ליצור מצבים לא נוחים או מסוכנים בנקודות מסוימות בהם מתפתחים התנאים.

כיצד נוחות רוח נמדדת, או מתי לא נוח לי?

הערכת נוחות הרוח נעשית באמצעות שילוב של מספר כלים:

- מדדים איכותיים כמו סקרי תחושות של משתמשים ונתוני שטח מצטברים.
- תקנים וקריטריונים בינלאומיים כגון מדד LAWSON הבריטי או תקן NEN 8100 ההולנדי, הקובעים מדדים כמותיים וספי נוחות בהתאם לפעילויות שונות, כולל ישיבה נינוחה, הליכה ופעילויות דינמיות יותר.

אוורור טבעי

אוורר טבעי ברחובות גם הוא חלק מניהול מיקרו האקלים המקומי ואוורר טוב משפיע באופן דרמטי על הנוחות התרמית ועל איכות האוויר במרקם העירוני. נושא האוורר הטבעי אינו נדון במסמך זה, אך המתודולוגיה המוצגת במסמך זה לעריכת מחקרי CFD תהיה נכונה להבנת תנאי הרוח העירוניים באשר הם.

הנחיות לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD להערכת נוחות מכנית ובטיחות עבור הולכי הרגל

מבוא ומטרות

1.2. מטרת בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD

בדיקת רוחות מתבצעת על מנת לחזות ולהעריך את השפעתם של מבנים מתוכננים על משטר הרוחות במפלס הולכי הרגל בשטחים הציבוריים והפרטיים הנמצאים בתחומי התכנית המוצעת ובסביבתה הקרובה.
כאשר אנו מתכננים את פני העיר, חשוב לנו לוודא שהמרחבים הציבוריים יהיו נוחים ונעימים לשימוש עבור כולם. אחד הגורמים המשמעותיים ביותר שמשפיעים על חוויית השהייה בעיר הוא האקלים המקומי שנוצר כתוצאה ממשטר הרוחות.
כאשר הרוח חזקה מדי, היא עלולה להפוך רחובות לכמעט בלתי נסבלים, לפגוע באיכות השימוש באזורים פתוחים, ואף להוות סכנה של ממש במקרים קיצוניים.

מטרת הבדיקה היא להבטיח שמירה על הבטיחות ועל הנוחות המכנית של הולכי הרגל בסביבה הבנויה שהולכת וצומחת בישראל לגבהים חדשים, ע"י איתור של מטרדי רוח פוטנציאלים ומציאת פתרונות למיתון הרוח באמצעות התאמות תכנוניות של הבינוי והפיתוח, ובהתאם לקביעת השימושים המתוכננים.
משטר הרוחות החזוי נבחן אל מול קריטריונים המגדירים שכיחות מקסימלית מותרת לרוחות מסוכנות עבור הבטחת הבטיחות של הולכי הרגל, ושכיחויות מקסימליות מותרות לרוחות טורדניות (לא נוחות) לפי סוג השימושים והפעילויות בהם תובטח הנוחות המכנית של הולכי הרגל.

הנחיות לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD להערכת נוחות מכנית ובטיחות עבור הולכי הרגל

מבוא ומטרות

1.3. מטרות מסמך ההנחיות

מסמכי התכנון הקיימים בישראל והנחיות לעריכת דוחות רוח מתבססים על מחקרים וידע משנות ה-80, אשר היוו תשתית חשובה להבנת השפעות הרוח בסביבה הבנויה. מחקרים אלו הניחו את היסודות לפיתוח מודלים ממוחשבים, המשמשים עד היום לניתוח דינמיקת הרוח. עם זאת, ההנחיות דורשות התאמות ועדכונים, על מנת ליישר קו עם ההתפתחויות הטכנולוגיות בתוכנות ההדמיה וכן בזמינות נתוני אקלים חדשים, ולהתאים את תהליכי התכנון למגמות גלובליות בתכנון עירוני מודרני.

מכיוון שאמינות ומהימנות ממצאי ההדמיה תלויים באופן משמעותי בשיטות העבודה ובנתוני האקלים בהם נעשה שימוש במודל, ישנה חשיבות גבוהה להטמעת הנחיות אחידות סדורות עם יכולת בקרה על הנתונים ועל הממצאים בהתאמה.

מטרת מסמך הנחיות זה הנה לקבוע תהליך עבודה נכון ואחיד בקרב העוסקים בתחום. במסמך זה מוגדרת מתודולוגיה מפורטת לתהליך העבודה על כל שלביו: מידול תלת-מימד, הגדרות בתוכנת ה-CFD, בחירת מקור הנתונים המטאורולוגיים וטיפול בנתונים, קריטריונים להערכה, מידע לגבי שיטות ופתרונות למיתון הרוח, אופן הצגת הממצאים ותוכן נדרש במסמכים. במסמך ניתנה התייחסות להתאמות הנדרשות לתהליך העבודה עבור ביצוע הבדיקה במדרגי התכנון השונים (תב"ע / היתר). בנוסף, המסמך נועד לשרת גם את גופי התכנון והבקרה התכנונית והוא כולל לשם כך עזרים והנחיות.

1.4. מקורות הידע והבסיס לגיבוש ההנחיות

מסמך ההנחיות גובש על בסיס:

- חומרי המחקר והתאוריה של פרופ' פורה ושל פרופ' גולדרייך.
- היוועצות עם גורמי מקצוע בשירות המטאורולוגי.
- היוועצות עם חברת METEODYN יצרנית תוכנת ה-CFD , URBAWIND.
- סקירת מחקרים מהעולם בנושא בדיקות להערכת מטרדי רוח.
- מקרי בוחן השוואתיים שבוצעו ונבחנו ע"י כותבי המסמך.
- תקנים ומסמכי הנחיות מקבילים מהעולם, בדגש על התקן הולנדי NEN 8100 2006.
- ת"י 5281 (התקן הישראלי לבנייה ירוקה), משנת 2016.
- ניסיונם הרב של כותבי המסמך בביצוע בדיקות רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD.

הערה: המסמך מניח כי לקורא הכרה בסיסית של החומר התיאורטי, ואינו כולל חזרה מלאה על כלל ההסברים והנוסחאות שהוצגו במסמכים הקודמים שנכתבו בנושא .(ראה/י רשימת מקורות).

2. מקרים בהם נדרשת בדיקת רוחות

המסמך אינו מגדיר את המקרים בהם נדרשת בדיקת רוחות.
ועדות התכנון הארציות, המחוזיות, המקומיות או רשויות רישוי, רשאיות להגדיר תנאי חלות לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD, בהתאם לסמכותן.

המסמך ממליץ לאמץ את תנאי החלות המוגדרים בת"י 5281 לבניה ירוקה, בהתאם לאופי הבינוי כמפורט להלן:

- התכנית כוללת מבנה שגובהו 60 מ' ומעלה (כולל קומת מתקנים טכניים על הגג).
- התכנית כוללת מבנה שאורכו 90 מ' ומעלה, וגובהו 15 מ' ומעלה (כולל קומת מתקנים טכניים על הגג), או מבנה בעל נפח חריג.
- התכנית כוללת מבנה שגובהו 45 מ' ומעלה (כולל קומת מתקנים טכניים על הגג), וכאשר מתקיים לפחות אחד מהתנאים הבאים:
  - ❖ מפלס הכניסה הראשית בגובה 200 מ' ומעלה מעל פני הים.
  - ❖ הגרש במרחק של 500 מ' ומטה מהים.

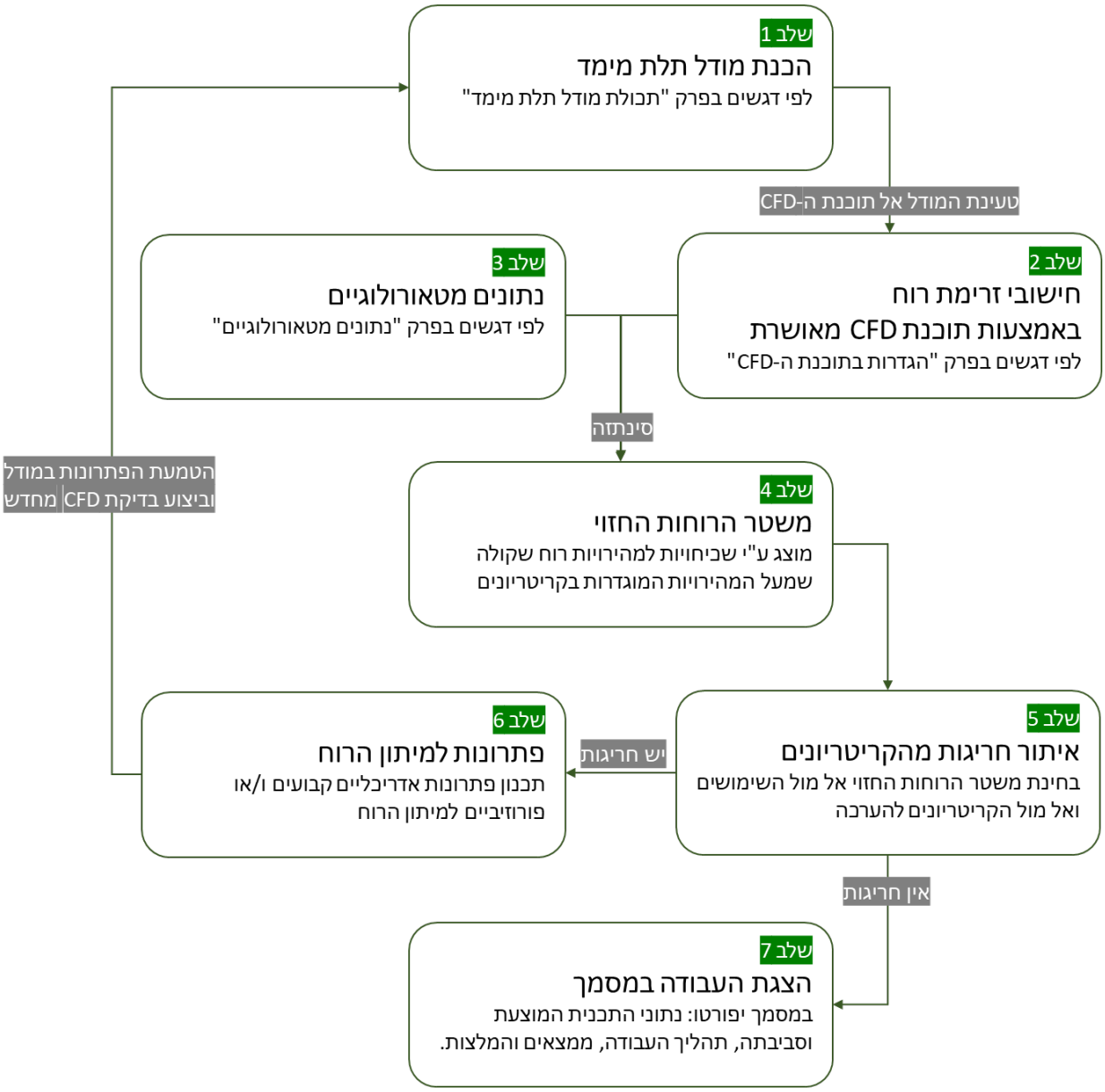
3. מתודולוגיה

תהליך העבודה מורכב ממספר שלבים עיקריים, כאשר חלקם יכולים להתבצע במקביל אחד לשני, וחלקם תלויים בביצוע של השלבים הקודמים להם.

3.1. תרשים זרימה לתהליך העבודה

להלן תרשים המציג את השלבים העיקריים של תהליך העבודה לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD:

תרשים 1 | מתודולוגיה | תרשים זרימה לתהליך העבודה



3.2. הסבר תמציתי לשלבים העיקריים

להלן הסבר תמציתי עבור השלבים העיקריים של תהליך העבודה לביצוע בדיקת רוחות באמצעות תוכנת CFD:

שלב 1 | מודל תלת מימד

בניית מודל תלת מימד של התכנית המוצעת וסביבתה בהתאם לדגשים בפרק "תכולת מודל תלת מימד".

שלב 2 | חישובי CFD

ביצוע חישובי CFD לזרימת הרוח סביב הבינוי עבור 12 כיווני רוח לפחות. את החישובים יש לבצע באמצעות תוכנת CFD מאושרת (ראה/י פירוט בסעיף סקירת תוכנות CFD מאושרות) תוך שימוש בהגדרות בהתאם לדגשים בפרק "הגדרות בתוכנת ה-CFD".

שלב 3 | נתונים מטאורולוגיים

שימוש בנתונים מטאורולוגיים יתבצע ע"י אחת מהאפשרויות הבאות:

- יצירת קובץ נתונים מטאורולוגיים עבור הקואורדינטות הפרטניות בהם ממוקם הפרויקט במרחב. את הקובץ יש לייצא מתוך יישומון שכבת המידע הגיאוגרפי: "אטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח" שהוכן על ידי השירות המטאורולוגי ושמור במאגר המפות הממשלתי GOVMAP , ולהמירו לקובץ נתונים המתאים לטעינה אל תוכנת ה-CFD . ההמרה תבוצע ע"י שימוש בכלי ייעודי שפותח לשם כך (כמפורט בפרק נתונים מטאורולוגיים).
- שימוש בקובץ נתונים מטאורולוגיים מתאים לאזור הפרויקט מתוך מאגר קבצי נתונים מטאורולוגיים מייצגים שהופקו לאזורים נבחרים בישראל, מתוך אטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח של השירות המטאורולוגי.

שלב 4 | משטר הרוחות החזוי

הפקת תחזית למשטר הרוחות באזור התכנית המוצעת ע"י שילוב בין חישובי ה-CFD (שלב 2) לבין הנתונים המטאורולוגיים שהוזנו אל תוכנת ה-CFD (שלב 3), תוך שימוש בפרמטרים המתאימים לקריטריונים להערכה.
משטר הרוחות החזוי מוצג ע"י השכיחויות החזויות לקבלת רוח שקולה מעל המהירויות המוגדרות בקריטריונים להערכה.

שלב 5 | איתור חריגות מהקריטריונים

סימון השימושים באזור התכנית המוצעת וסיווגם לסוגי פעילויות, ואיתור מטרדי רוח ע"י בחינת משטר הרוחות החזוי אל מול השימושים ואל מול הקריטריונים.

שלב 6 | פתרונות למיתון הרוח

במידת ואותרו חריגות מהקריטריונים ובהתאם לשיקול דעת היועץ ודרישת הרשות המוסמכת, יוטמעו במודל פתרונות אדריכליים קבועים ו/או פורוזיביים למיתון הרוח, ותבוצע בדיקת CFD חדשה לבחינת יעילות הפתרונות המתוכננים.

שלב 7 | הכנת מסמך

הכנת מסמך בו יפורטו: נתוני התכנית המוצעת, תהליך העבודה על כל שלביו, סיכום ממצאים והמלצות.

3.3. תוכנת CFD מוכרות

- ההדמיה תיעשה בעזרת תוכנת CFD שעונה על הקריטריונים להלן:
  - ❖ התוכנה הינה מוכרת ומאומתת.
  - ❖ התוכנה מאפשרת ביצוע סימולציות מ-12 כיווני שמיים לפחות.
  - ❖ התוכנה מאפשרת הזנת מקדמי החספוס של הקרקע והתכסית לכל כיוון.
  - ❖ התוכנה מאפשרת הגדרת גובה נקודת ייחוס עבור החישובים.
  - ❖ התוכנה מאפשרת הגדרת משטחי בדיקה ברזולוציה 1X1 מטרים עבור הצגת הממצאים.
  - ❖ התוכנה מאפשרת חישוב מהירויות רוח ממוצעות וטורבולנציה ביחס אל נקודת הייחוס.
  - ❖ התוכנה מאפשרת הגדרת מקדם הטורבולנטיות עבור נוסחת מהירות רוח שקולה.
  - ❖ התוכנה מאפשרת חישוב השכיחויות למהירויות רוח שקולה הגבוהות מהמהירויות הנדרשות לפי הקריטריונים להערכה, עבור כלל משטחי הבדיקה שהוגדרו, באמצעות שילוב בין חישובי ה-CFD של כלל כיווני הרוח לבין הנתונים מטאורולוגיים המוזנים אל נקודת הייחוס שהוגדרה.
- להלן רשימת תוכנות CFD מוכרות ומקובלות (בעת כתיבת מסמך זה):
  - ❖ URBAWIND
  - ❖ SIMSCALE
  - ❖ ANSYS FLUEN
- **אין ברשימה זאת משום המלצה מסחרית על תוכנה או מוצר ספציפי, וייתכן שתוכנות נוספות קיימות או עתידיות עונות על הקריטריונים ויתאימו לביצוע הרצות החיזוי.**
- בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD מחויבת בשמירה על כלל עקרונות המתודולוגיה הכתובים במסמך זה, ללא תלות בתוכנת ה-CFD בה נעשה שימוש.

4. תכולת מודל תלת מימד

4.1. מבנים

4.1.1. איזה מבנים יש לכלול במודל ?

- יש לכלול את כל המבנים בתחומי התכנית המוצעת ובסביבתה הנמצאים ברדיוס 300 מ' לפחות מגבולות התכנית המוצעת.
- יש לכלול מבנים קיימים ומבנים של תכניות מאושרות (תכניות בסטטוס "פרסום אישור" ומעלה).
- בהתאם לשיקול דעתו, רשאי מוסד התכנון לדרוש מידול של תכניות עתידיות נוספות בסביבה שטרם אושרו.
- המבנים ייצגו את הגובה המקסימלי ואת זכויות הבנייה וייצגו גושנית את נספח הבינוי ואת הוראות התכנית המאושרת. במידה ואין נספח בינוי מנחה, המידול יתבצע על בסיס קווי הבניין והגבהים המוגדרים במסמך הוראות התכנית.

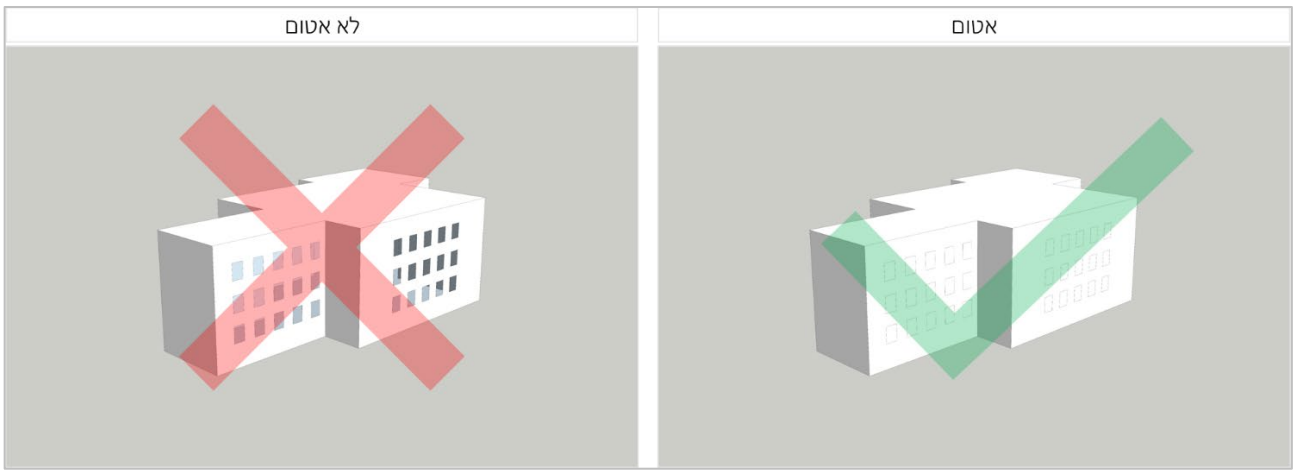
תרשים 2 | תכולת מודל תלת מימד | מבנים שנדרש לכלול



4.1.2. אטימות המבנים במודל

יש למדל את המבנים כך שהמעטפת תהיה אטומה, ללא פתחים כגון חלונות ודלתות. מעברים קבועים להולכי רגל יש למדל.

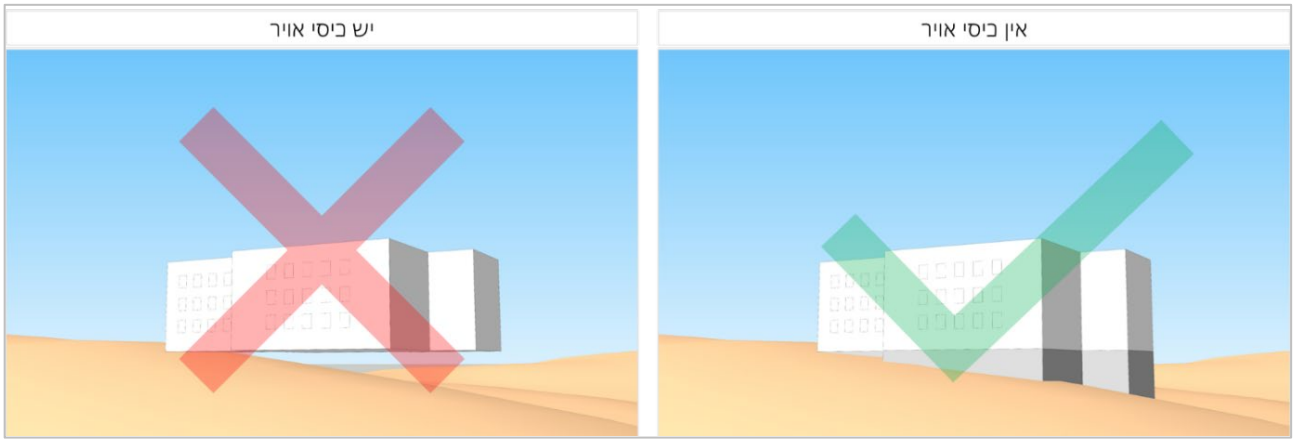
תרשים 3 | תכולת מודל תלת מימד | אטימות מבנים



4.1.3. מרווחים בין הבינוי לבין הטופוגרפיה

יש לוודא שאין במודל מרווחים בין הבינוי לבין הטופוגרפיה במודל, גם אם היא הוגדרה כמישורית לחלוטין (הושמטה).

תרשים 4 | תכולת מודל תלת מימד | כיסי אויר



4.1.4. רמת פירוט מינימלית נדרשת

יש למדל את המבנים בהתאם לרמת הפירוט המינימלית הנדרשת, לפי הטבלה הבאה:

טבלה 1 | תכולת מודל תלת מימד | רמת פירוט מינימלית נדרשת

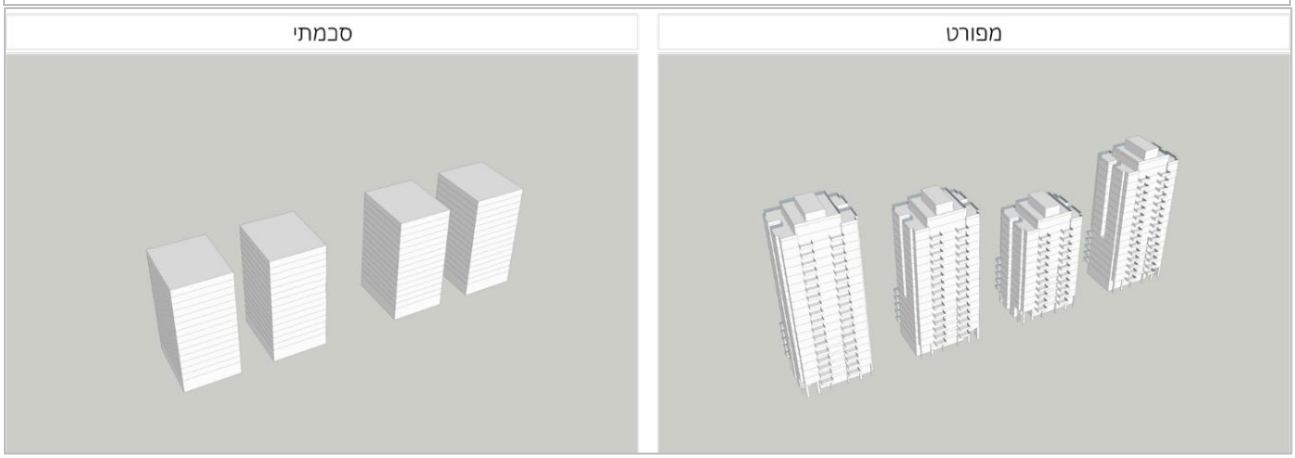
אלמנט	לשלב תב"ע	לשלב היתר
מבנים של התכנית המוצעת	סכמתי [1]	מפורט [2],[3],[4]
מבנים בסביבה של התכנית המוצעת	סכמתי [1]	סכמתי [1]
אלמנטים למיתון הרוח	מפורט [2],[3]	מפורט [2],[3]
הערות והבהרות		

(1) מידול סכמתי | מידול גושני של המבנים תוך דיוק בהעמדתם, גובהם וצורתם הכללית.

(2) מידול מפורט | מידול הכולל הבחנה בין סוגי הקומות השונים, מרפסות, גגות טכניים, גדרות בקומת הקרקע, מעקות בגגות ירוקים ואלמנטים קבועים נוספים, תוך דיוק מירבי בהעמדתם, גובהם וצורתם. אין צורך במידול פתחים (חלונות ודלתות למיניהם).

* אפשרות להקלה: עבור בדיקת מפלס הקרקע בלבד, יש למדל באופן מפורט רק את קומת הקרקע ואת 2 הקומות שמעליה, בעוד את שאר המבנה ניתן למדל באופן סכמתי.

(3) מומלץ להימנע ממידול מפורט יתר על המידה שעלול להקשות על חישובי ה-CFD. להלן דוגמאות לאלמנטים המהווים פירוט יתר במידול מבנים וסביבתם הקרובה: חיפויים, פרופילים של חלונות ופתחים, אנשים ומכוניות וכו'.

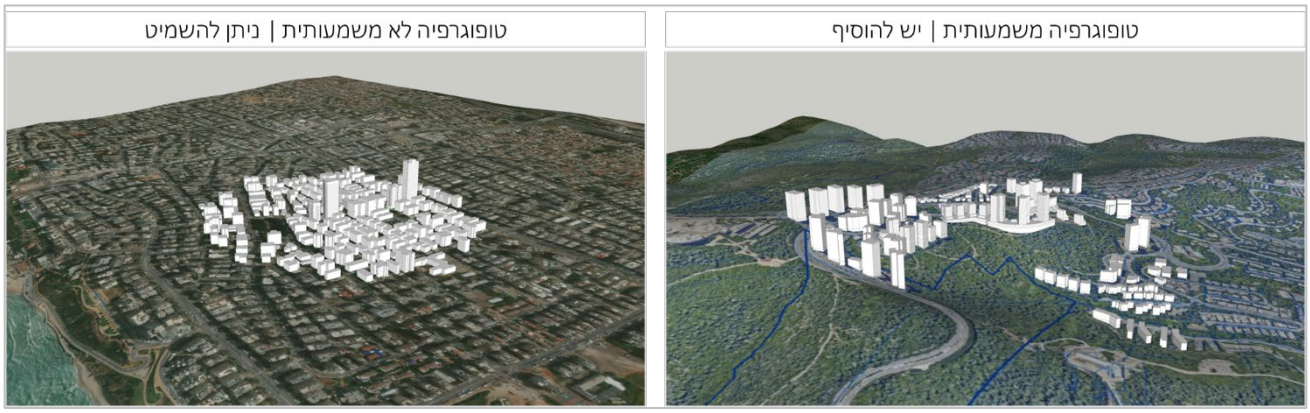


4.2. טופוגרפיה

4.2.1. מתי צריך להטמיע טופוגרפיה במודל?

במידה ובסביבת התכנית המוצעת קיימת טופוגרפיה משמעותית (למשל: סביבה הררית, סביבה גבעית, מצוק וכדומה), אזי יש לשלב את הטופוגרפיה במודל. במידה וסביבת התכנית המוצעת הינה מישורית בקירוב, ניתן להשמיט את הטופוגרפיה מהמודל.

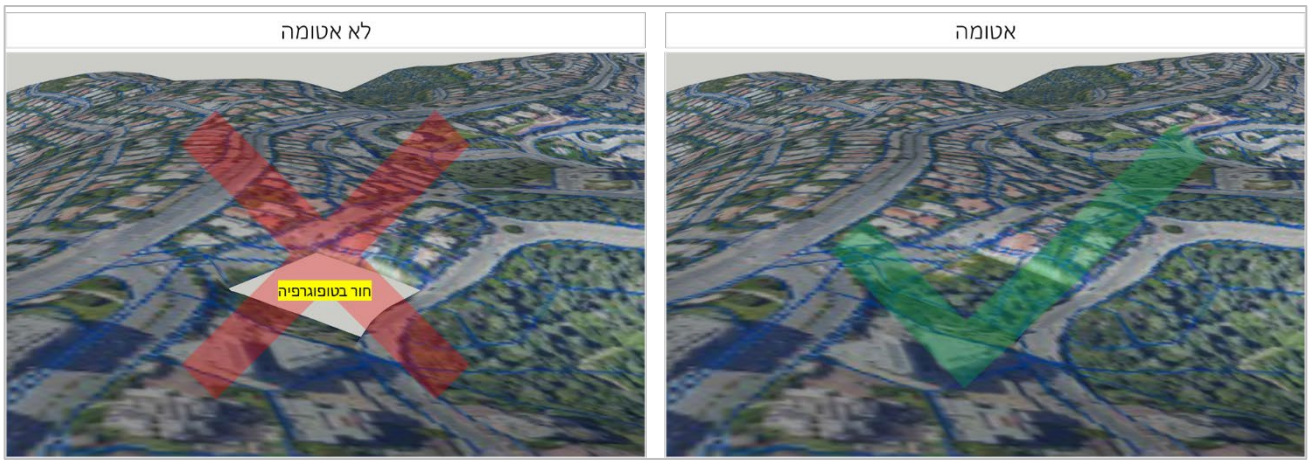
תרשים 5 | תכולת מודל תלת מימד | מתי נדרש לכלול טופוגרפיה



4.2.2. אטימות

יש למדל את הטופוגרפיה כך שתהיה רציפה, אטומה וללא חורים.

תרשים 6 | תכולת מודל תלת מימד | רציפות ואטימות הטופוגרפיה



4.2.3. הוראות יצרן

יש למדל את הטופוגרפיה ולטעון אותה אל תוכנת ה-CFD בהתאם להוראות יצרן התוכנה.

4.3. אלמנטים צמחיים כפתרון לרוחות טורדניות

אלמנטים צמחיים הינם אלמנטים פורוזיביים (נקבוביים) כגון: שיחים ועצים, ויכולים לסייע במיתון מהירויות הרוח.

4.3.1. מתי ניתן לשלב אלמנטים צמחיים במודל?

- ראשית, חובה לבצע בדיקת רוחות ללא אלמנטים צמחיים במודל.
- במידה ואותרו חריגות מקריטריון נוחות מכנית בבדיקה הראשונית, מומלץ לשלב אלמנטים צמחיים במודל כפתרונות למיתון הרוח בהתאם לתכנית פיתוח עדכנית המפרטת את מיקומם ואת נתוניהם (סוג, גובה, רדיוס). כמו כן, ניתן לשלב במודל עצים בוגרים קיימים בתנאי והם ומיועדים לשימור באופן מחייב ומסומנים בתכנית הפיתוח.
- למרות יעילותם של אלמנטים צמחיים במיתון רוחות, אין להשתמש בהם כפתרון בלעדי לחריגות מקריטריון בטיחות.

4.3.2. הגדרת רמת הפורוזיביות

רמת פורוזיביות הינה מידת הנקבוביות של האלמנט, והיא נמדדת ביחס הפוך למידת מעבר הרוח דרך האלמנט.
יש לטעון את האלמנטים הצמחיים אל תוכנת ה-CFD בהתאם להוראות יצרן התוכנה.
יש להגדיר את רמת הפורוזיביות בהתאם לאופי האלמנט ובהתאם להוראות יצרן התוכנה.

4.4. אלמנטים אדריכליים קבועים כפתרון לרוחות טורדניות ומסוכנות

אלמנטים אדריכליים קבועים הינם אלמנטים מבונים קבועים שאינם צמחיים כגון: פרגולות, קולונדות, גדרות ומעקות.
אלמנטים אלה יכולים להיות אטומים או פורוזיביים ובכוחם למתן או לחסום מעבר רוחות חזקות.

4.4.1. מתי ניתן לשלב אלמנטים אדריכליים קבועים במודל ?

- ניתן לשלב אלמנטים אדריכליים קבועים במודל בכל שלבי בדיקת הרוחות החל מההרצה הראשונה, בהתאם לתכנית פיתוח עדכנית ו/או תכנית אדריכלית המפרטת את מיקומם ואת נתוניהם (סוג ומידות).
- ניתן לשלב אלמנטים אדריכליים קבועים במודל כפתרון למיתון הרוח ללא תלות בסוג החריגה.

5. הגדרות בתוכנת ה-CFD

להלן הנחיות להגדרות הנדרשות בתוכנת ה-CFD:

5.1. קופסת החישוב (Computation Box \ Grid)

קופסת החישוב הינה "הקופסא" המהווה את מנהרת הרוח הווירטואלית במודל ה-CFD.

5.1.1. מימדי קופסת החישוב

יש להגדיר את מימדי קופסת החישוב בהתאם להוראת היצרן של תוכנת ה-CFD, אשר לרוב נקבעים כפונקציה של: רדיוס הבינוי וגובהו, מימדי הטופוגרפיה (במידה והוטמעה במודל), מיקומם וגודלם של אזורי הבדיקה שהוגדרו.
במידה וקיימת האפשרות בתוכנה, מומלץ להשתמש בהגדרה אוטומטיות לפרמטרים אלה.

5.1.2. רזולוציית קופסת החישוב

ככלל, יש להגדיר את הרזולוציה של קופסת החישוב הבדיקה ל: 1X1X1 מטרים.
במקרים בהם מתבצעת בדיקת רוחות בשלב התב"ע לתכנית בעלת שטח גדול מאד, ועל מנת להקל על תהליך חישובי ה-CFD ועל תהליך עיבוד התוצאות, ניתן להגדיר את הרזולוציה של קופסת חישוב הבדיקה לערכים גדולים יותר, אך לא מעבר לרזולוציה של: 5X5X5 מטרים. במידה ואותרו חריגות, נדרש לבצע בדיקה נוספת ברזולוציה 1X1X1 מטרים הממוקדת באזורי החריגות.
הערה: בבדיקת רוחות לשלבי תכנון מתקדמים חובה להגדיר את ערכי רזולוציית קופסת החישוב ל-1X1X1 מטרים.

5.2. אזורי בדיקה

אזורי הבדיקה הינם משטחים אופקיים עבורם יחושבו הפרמטרים השונים של זרימת האויר במודל עבור כל אחד מכיווני הרוח שהוגדרו בהרצת ה-CFD. לאחר שילוב הנתונים המטאורולוגיים המותאמים עם הפרמטרים שחושבו בהרצת ה-CFD יחושב ויוצג משטר הרוחות החזוי על גבי אזורי הבדיקה שהוגדרו.

5.2.1. היכן להגדיר אזורי בדיקה?

יש להגדיר אזורי בדיקה עבור מפלס הקרקע, באופן שיכסו את כל שטח הקו הכחול של התכנית המוצעת, בתוספת של 15 מ' מסביבו לפחות.
מומלץ (אך לא חובה) להגדיר אזורי בדיקה עבור מפלסים גבוהים יותר הנגישים לציבור הרחב כגון גגות פעילים ציבוריים.

5.2.2. גובה אזורי הבדיקה

יש להגדיר את אזורי הבדיקה בגובה של 1.5 מ' מעל: פני הקרקע / פני רצפת המפלס הנבדק.

5.2.3. רזולוציית אזורי הבדיקה

ככלל, יש להגדיר את הרזולוציה של אזורי הבדיקה ל: 1X1 מטרים.
במקרים בהם מתבצעת בדיקת רוחות בשלב התב"ע לתכנית בעלת שטח גדול מאד, ועל מנת להקל על תהליך חישובי ה-CFD ועל תהליך עיבוד התוצאות, ניתן להגדיר את הרזולוציה של אזורי הבדיקה לערכים גדולים יותר, אך לא מעבר לרזולוציה של: 5X5 מטרים. במידה ואותרו חריגות, נדרש לבצע בדיקה נוספת ברזולוציה 1X1 מטרים הממוקדת באזורי החריגות.
הערה: בבדיקת רוחות לשלבי תכנון מתקדמים חובה להגדיר את ערכי רזולוציית אזורי הבדיקה ל-1X1 מטרים.

5.3. נקודת/גובה ייחוס

- נקודת ייחוס הינה הנקודה במודל ה-CFD אשר ביחס אליה מחושבים הפרמטרים להתפלגות הרוח בכל נקודה באזורי הבדיקה שהוגדרו, לפי כיווני הרוח עבורם נעשו חישובי ה-CFD.
- למעשה, נקודת הייחוס היא הנקודה במודל ה-CFD אליה "מוזנים" הנתונים המטאורולוגיים, וממנה הם מומרים אל אזורי הבדיקה שהוגדרו.
- על נקודת הייחוס להיות מוגדרת באזור ניטרלי במודל ככל הניתן, כזה שזרימת האויר בו מושפעת באופן המינימלי ביותר האפשרי מתכולת המודל (בינוי, טופוגרפיה ושאר האלמנטים).
- **<u>להגדרה נכונה של נקודת/גובה הייחוס ישנה חשיבות מהותית, שכן ממצאי הבדיקה רגישים במידה רבה להגדרה זו.</u>**

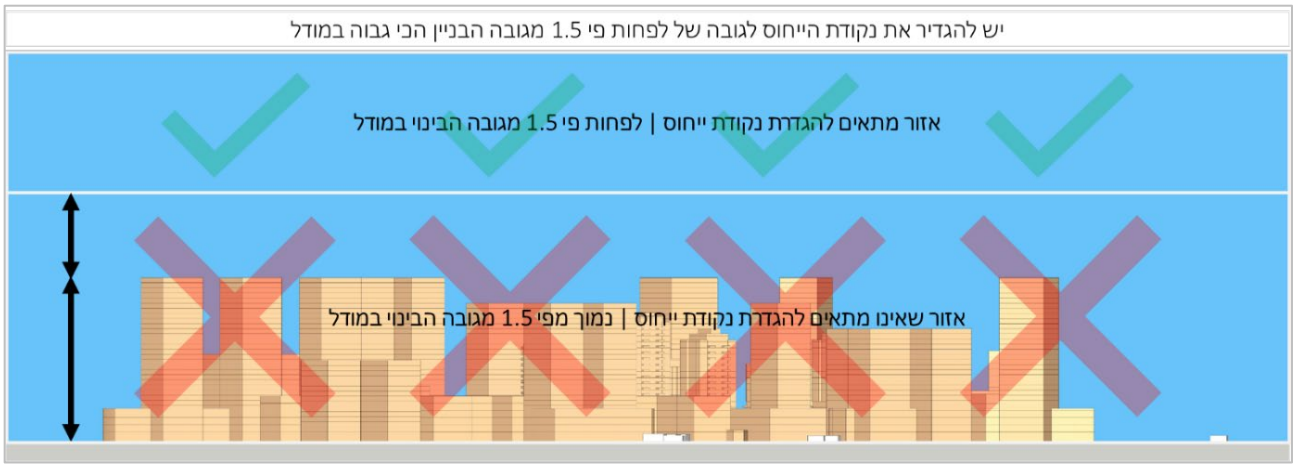
5.3.1. היכן להגדיר את נקודת הייחוס?

- ככלל, יש להגדיר את נקודת הייחוס מעל הבינוי, בגובה של לפחות פי 1.5 מגובה המבנה הכי גבוה שהוזן למודל.
- עם זאת, אין להגדיר נקודת ייחוס לגובה של מעל 150 מ' מעל פני הקרקע. [1]

בגבהים שמעל 150 מ' מעל פני הקרקע מתרחשים שינויים מהותיים בהתנהגות הרוח ביחס למודלים של פרופיל הרוח, באופן המקשה מאד על הכנת קובץ נתונים מטאורולוגיים מייצג.

- יש להתייעץ עם יצרן תוכנת ה-CFD בנוגע לאופן בו מגדירים את נקודת הייחוס בתוכנה.

תרשים 7 | הגדרות בתוכנת ה-CFD | נקודת ייחוס



5.3.2. הגדרת גובה ייחוס

- בתוכנות מסוימות ניתן להגדיר גובה ייחוס במקום הגדרת נקודת ייחוס ספציפית בודדת.
- כאשר מוגדר גובה ייחוס במודל ה-CFD מחושבים הפרמטרים להתפלגות הרוח באזורי הבדיקה שהוגדרו ביחס לממוצע מהירויות הרוח בגובה הייחוס שהוגדר.
- הגדרת גובה ייחוס, במידה ואפשרית, הינה עדיפה על הגדרת נקודת ייחוס.

---

[1] הוחלט בהתייעצות עם פאנל מומחים מהשירות המטאורולוגי.

- בחירת גובה הייחוס המתאים והגדרתו תעשה בהתאם לאותם כללים של נקודת ייחוס.

5.4. רמת MESH

רמת MESH הינה הגדרת הרזולוציה של קופסת החישוב באזורים הסמוכים מסביב לאלמנטים הנטענים אל מודל ה-CFD.

5.4.1. כיצד להגדיר את רמת ה-MESH?

ככל ותוכנת ה-CFD מאפשרת, יש להגדיר את רמת ה-MESH לאלמנטים שנטענו למודל למינימום הנדרש לפי הטבלה הבאה:

טבלה 2 | הגדרות בתוכנת ה-CFD | רמת MESH מינימלית נדרשת

אלמנטים במודל ה-CFD	לשלב תב"ע	לשלב היתר
מבנים של התכנית המוצעת	בינונית (medium)	מירבית (thin)
מבנים בסביבה של התכנית המוצעת	נמוכה (coarse)	נמוכה (coarse)
טופוגרפיה	נמוכה (coarse)	נמוכה (coarse)
אלמנטים פורוזיביים	בינונית (medium)	בינונית (medium)
אלמנטים אטומים למיתון רוח	בינונית (medium)	מירבית (thin)

5.5. מקדמי חספוס באזור התכנית המוצעת

- מקדמי חספוס הינם ערכים המוגדרים לכל כיוון רוח עבורו מתבצע חישוב CFD, ומטרתם היא להביא לידי ביטוי בחישובים אופי התכסית שמשפיע על מהירותה המשתנה של הרוח ועל מידת הטורבולנציה הנוצרת כנגד שמתקרבים אל הקרקע.
- ישנם שני סוגים מקובלים של "נוסחאות פרופיל הרוח" להמרת נתוני רוח לגבהים שונים: נוסחה מעריכית ונוסחה לוגריתמית.
- ערכי מקדמי החספוס האופייניים לתכסית מסוג מסוים הינם שונים בין שתי הנוסחאות, ולכן חשוב לוודא מול יצרן תוכנת ה-CFD באיזה נוסחה נעשה שימוש, ומהם ערכי מקדמי החספוס המתאימים לשימוש עבור כל סוג תכסית.

5.5.1. הגדרת מקדמי החספוס

- יש להגדיר מקדם חספוס עבור כל אחד מכיווני הרוח המוגדרים לחישובי ה-CFD בהתאם לאופי הקרקע והתכסית הנמצאים מעבר לרדיוס 300 מ' בכיוון הרוח הנתון.
- מומלץ להגדיר את ערכי החספוס בהתאם לערכים האופייניים שהגדיר יצרן תוכנת ה-CFD.
- לחילופין, ניתן להגדיר את ערכי החספוס לפי הערכים האופייניים המפורטים בטבלה להלן:

(הערה: חובה לוודא התאמת ערכי החספוס המוגדרים אל נוסחת פרופיל הרוח בה נעשה שימוש בתוכנת ה-CFD)

טבלה 3 | הגדרות בתוכנת ה-CFD | מקדמי חספוס

תאור פני הקרקע	ערכים לנוסחה מעריכית	ערכים לנוסחה לוגריתמית
שדה פתוח, ים, מדבר	0.15	0.03 – 0.0002
שדה מעובד, צמחייה נמוכה ועצים בודדים, בנייה כפרית בצפיפות נמוכה	0.20	0.1 – 0.03
אזורים מיוערים, אזורים עירוניים, בנייה בצפיפות נמוכה עד בינונית, גובה טיפוסי של בתים 10 מ'	0.25	0.4 – 0.1
מרכזי ערים, בנייה בצפיפות בינונית עד גבוהה, גובה טיפוסי של בתים 30 מ'	0.28	0.8 – 0.4
מרכזי ערים, בנייה לגובה צפופה, אזורי תעשייה מפותחים	0.36	1.6 – 0.8

6. נתונים מטאורולוגיים

6.1. כללי

- שילוב נתונים מטאורולוגיים מייצגים עם חישובי ה-CFD (זרימת אויר) שבוצעו על מודל תלת המימד של התכנית המוצעת וסביבתה, מהווה את ליבת תהליך העבודה בבדיקת רוחות.
- מטרת בדיקת רוחות היא לספק תחזית מדויקת ככל הניתן למשטר הרוחות החזוי סביב הבינוי של התכנית המוצעת, ולכן ישנה חשיבות רבה לבחירה נכונה של מקור נתונים מטאורולוגיים כך שייצגו באופן המדויק ביותר האפשרי את משטר הרוחות הכללי בסביבת התכנית המוצעת.
- רגישותם הגבוהה של ממצאי הבדיקה לשינויים בנתונים המטאורולוגיים המוזנים למודל, מעצימים את החשיבות לבחירת מקור נתונים מטאורולוגיים נכון, לביצוע בקרה על הנתונים, ולהתאמה נכונה של נתוני המקור בטרם הזנתם אל המודל.

6.2. מקורות לנתונים מטאורולוגיים

- תחנות מטאורולוגיות

אין להשתמש במקור נתונים זה.

- ❖ מקור הנתונים המטאורולוגיים הנפוץ ביותר בו נעשה שימוש בעבודות לבדיקת רוחות עד כה הינו מדידות מתחנות מדידה מטאורולוגיות הנמצאות ברחבי הארץ.
- ❖ בעבר ניתנו קווים מנחים עבור: בחירת תחנה מטאורולוגית מייצגת מתאימה, בקרה על הנתונים והתאמתם אל נק' הייחוס במודל ה-CFD תוך התחשבות במקדמי החספוס באזור התחנה ובאזור התכנית המוצעת.
- ❖ שימוש בנתונים מטאורולוגיים שמקורם בתחנות המדידה מייצר מקום רב לשגיאות ולחוסר אחידות ועקביות.
- ❖ בנוסף לכך, ישנם חסרונות רבים נוספים לשימוש בשיטה זו ביחס לאלטרנטיבה.

- אטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח

חובה להשתמש במקור נתונים זה.

- ❖ בהתייעצות שנערכה עם פאנל מומחים של השירות המטאורולוגי, הומלץ באופן חד משמעי להשתמש לצורך בדיקות רוחות באמצעות מודל CFD אך ורק במאגר הנתונים המטאורולוגיים: **"אטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח".**
- ❖ **"אטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח"** הינו מקור הנתונים המטאורולוגיים המדויק והנגיש ביותר הקיים כיום, המבוסס על מודלים מתקדמים ובעל רמת כיסוי גבוהה בכל הארץ.
- ❖ השימוש בנתוני האטלס מצמצם את הפעולות בהן קיימת סבירות גבוהה ליצירת חוסר עקביות והטייה בממצאים: בחירת נכונה של תחנה מטאורולוגית מייצגת ו-התאמת נתוני התחנה אל אזור הפרויקט.

6.3. אטלס פוטנציאל אנרגיית רוח

6.3.1. כללי

אטלס פוטנציאל אנרגיית רוח הינו מאגר נתונים שפותח ע"י השירות המטאורולוגי והונגש לציבור דרך יישום בפורטל המפות הממשלתי GOVMAP. האטלס מאפשר קבלת מידע מפורט אודות התפלגות הרוח עבור נקודה נבחרת במדינת ישראל ברמת כיסוי גבוהה.

6.3.2. איכות וזמינות הנתונים

- המידע באטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח מבוסס על הרצת מודלים מתקדמים, כאשר הנתונים המופקים בעזרתו עבור נקודה נבחרת מדמים בצורה מדויקת ככל האפשר את תנאי הרוח המאפיינים תקופה ארוכה של כ-30 שנה.
- המידע באטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח מכסה את כל שטח מדינת ישראל ברזולוציה של 100 על 100 מטר.
- בנקודות מסוימות הסמוכות לקו החוף הנתונים המופקים הינם מתוך המאגר הימי ברזולוציה של כ-3 על 3 ק"מ.

6.3.3. מבנה הנתונים

- עבור כל נקודה נבחרת ניתן להוריד קובץ נתונים בפורמט CSV. (COMMA-SEPARATED VALUES)
- נתוני התפלגות הרוחות לנקודה נבחרת מיוצגים ע"י פרמטרים להתפלגות סטטיסטית מסוג WEIBULL.
- נתוני התפלגות הרוחות לנקודה נבחרת ניתנים ל-12 כיווני רוח בנפרד (בקפיצות של 30 מעלות) וכממוצע כולל. כמידע משלים ניתנת השכיחות לכל כיוון רוח.
- נתוני התפלגות הרוחות לנקודה נבחרת ניתנים עבור 4 גבהים מעל פני הקרקע: 30 מ', 60 מ', 100 מ' ו-150 מ'.
- נתוני התפלגות הרוחות לנקודה נבחרת ניתנים לפילוח לפי חודשי השנה ולפי ממוצע שנתי.

6.3.4. אופן השימוש בנתונים בתוכנת ה-CFD

- קובץ הנתונים אותו ניתן להוריד מיישום אטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח עבור נקודה נבחרת אינו מתאים לטעינה לתוכנת ה-CFD כפי שהוא.
- פותח יישום מבוסס EXCEL בשם WEIBULLEXTRA, בעזרתו ניתן לטעון את קובץ הנתונים מהאטלס, ולהפיק ממנו כפלט:
  - ❖ קובץ נתונים מטאורולוגיים בפורמט TAB אותו ניתן לטעון לתוכנת ה-CFD.
  - ❖ דף מידע בפורמט PDF הודות התפלגות הרוחות הכולל את: שושנת הרוחות, היסטוגרמת הרוחות ומידע נוסף.
- יישום WEIBULLEXTRA מאפשר להפיק את קובץ הנתונים בפורמט TAB ואת דפי המידע לכל אחד מתוך 4 הגבהים הנתונים מעל פני הקרקע, לממוצע השנתי או לכל אחד מחודשי השנה.
- הערה: במרבית הבדיקות יידרש שימוש בקובץ נתונים המייצג ממוצע שנתי לגובה 150 מ' מעל פני הקרקע. 150 מ' הנו הגובה המירבי וניתן לעשות בו שימוש גם למבנים גבוהים מ-100 מ'.

6.3.5. כיצד ניתן לקבל את יישום WEIBULLEXTRA

- היישום WEIBULLEXTRA מפורסם וזמין להורדה ע"י המשרד להגנת הסביבה בכפוף לתנאי השימוש.

6.4. מאגר נתונים מטאורולוגיים מייצגים לאזורים נבחרים בישראל

- לצורך שיפור הנוחות בביצוע המתודולוגיה, גובש מאגר נתונים מטאורולוגיים מייצגים שהופקו לאזורים נבחרים בישראל מתוך אטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח של השירות המטאורולוגי (באמצעות יישום WEIBULLEXTRA).
- מאגר הנתונים המטאורולוגיים המייצגים מפורסם להורדה ע"י המשרד להגנת הסביבה.
- ככלל, ישנה עדיפות לשימוש בקובץ נתונים מטאורולוגיים שהופק עבור הקואורדינטות המדויקות של הפרויקט באמצעות אטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח תוך שימוש ביישום WEIBULLEXTRA כפי שמתואר בסעיף הקודם.
- עם זאת, ניתן להשתמש בקובץ מטאורולוגי מתאים לאזור הפרויקט מתוך מאגר הנתונים המטאורולוגיים המייצגים.
- במקרה של שימוש בקובץ נתונים מטאורולוגיים מייצג מתוך המאגר, יש להראות עמידה בתנאים הבאים:
  - **מיקום** | המיקום המייצג שנבחר (ממנו נלקח קובץ הנתונים המטאורולוגיים) לא יעלה על 10 ק"מ ממיקום הפרויקט הנבדק.
  - **גובה מעל פני הים** | הפרש גבהי הקרקע (במונחי גובה מעל פני הים) בין המיקום המייצג שנבחר לבין מיקום הפרויקט לא יעלה על 1/6 (שישית) מהמרחק האווירי ביניהם.
  - **סביבה** | תנאי הטופוגרפיה ואופי התכסית (בינוי וצמחייה) בסביבת מיקום קובץ הנתונים המטאורולוגיים המייצג שנבחר יהיו דומים במידה רבה לסביבת הפרויקט הנבדק.

7. קריטריונים להערכה

7.1. מטרת הקריטריונים

הקריטריונים להערכה עבור בדיקות רוחות מוגדרים במטרה להבטיח ככל הניתן כי פעילות הולכי הרגל במפלס הקרקע תהיה בטוחה ונוחה מבחינה מכנית בהתאם לסוגי השימושים.

7.2. מדד מהירות רוח שקולה

מטרתו של מדד מהירות רוח שקולה הינה להעריך את האופן בו הולכי רגל מרגישים את הרוח בהיבט המכני (ולא התרמי).
המדד משקלל בתוכו את מהירות הרוח הממוצעת ואת עוצמת הטורבולנטיות (סטיית התקן חלקי מהירות הרוח הממוצעת).
תקנים שונים בעולם מציעים משקולות שונות לשני מרכיבי המדד.
נוסחת מדד רוח שקולה כללית כפי שמוצגת במרבית התקנים והקריטריונים בעולם הינה:

$$Veq = \overline{V}\,(1 + a\,I)$$

כאשר:

Veq	מהירות רוח שקולה
$\overline{V}$	מהירות רוח ממוצעת
I	עוצמת הטורבולנטיות (סטיית תקן לחלק למהירות הרוח הממוצעת)
a	מקדם הטורבולנטיות (משקולת עוצמת הטורבולנטיות במדד)

7.3. מבנה הקריטריונים

- כלל הקריטריונים בעולם עושים שימוש במדד מהירות רוח שקולה ומגדירים:
  - ❖ מקדם הטורבולנטיות (משקל עוצמת הטורבולנטיות במדד).
  - ❖ דרגות שונות של נוחות (למשל: נוח, לא נוח, קשה, לא סביל, מסוכן) לפי תחומי מהירויות רוח שקולה.
  - ❖ שביחויות מקסימליות מותרות למהירויות רוח שקולות, לפי סוגי השימושים.
- בכל מקום בעולם, יש לצפות שלפחות באחוז קטן מן הזמן תהיינה רוחות חזקות מאד ותנאי הנוחות יהיה קשים, ולעיתים אף לא סבילים ומסוכנים. על כן:
  - ❖ בהיבט **הנוחות המכנית**, קובעים הקריטריונים באיזה אחוז מן הזמן מותר שתנאי הרוח יחרגו מדרגת הנוחות הרצויה עבור סוגי השימושים השונים.
  - ❖ בהיבט **הבטיחות**, קובעים הקריטריונים אחוזים מזעריים של זמן בו מותר שתנאי הרוח יחרגו לדרגות לא סבילות ומסוכנות, לרוב ללא הבחנה בין סוגי השימושים.

7.4. בחינת ממצאי הבדיקה אל מול הקריטריונים להערכה

- יש לבחון את ממצאי בדיקת הרוחות אל מול הקריטריונים להערכה העדכניים ביותר המוגדרים ע"י המשרד להגנת הסביבה לעניין זה[2].
- המלצה עבור קריטריונים להערכה להלן:
  - ❖ יש להשתמש במדד מהירות רוח שקולה עם מקדם טורבולנטיות 3.
  - ❖ יש לעמוד בשיעור הזמן המירבי למהירות רוח שקולה חזויה לפי הטבלה להלן:

טבלה 4 | קריטריונים להערכה | שיעור הזמן המרבי המותר למהירות רוח שקולה חזויה לפי אופי הפעילות והשימוש

		רוח לא נוחה	רוח לא נוחה	רוח לא בטוחה
		6 מ/ש ומעלה	9 מ/ש ומעלה	20 מ/ש ומעלה
אופי הפעילות	**סוג השימוש**	**f (V_{eq} > 6 m/s)**	**f (V_{eq} > 9 m/s)**	**f (V_{eq} > 20 m/s)**
הליכה קצרה, פעולה קצרה	רחובות, חניונים, מדרכות	f ≤ 35%	f ≤ 15%	אזור לא רגיש f ≤ 0.2% (כ-16 שעות בשנה במצטבר)
הליכה רגילה, עמידה לזמן קצר	אזור עסקים ומסחר, כניסות לבניינים	f ≤ 25%	f ≤ 10%	אזור לא רגיש f ≤ 0.2% (כ-16 שעות בשנה במצטבר)
שהות ממושכת בישיבה	שהות ממושכת בישיבה- אזורי שהות בישיבה כגון ב: מסעדות פתוחות, ביכרות עירוניות, אזורי שהות בשטחים ציבוריים פתוחים או בשטחים פתוחים לרווחת המשתמש.	f ≤ 20%	f ≤ 5%	אזור רגיש f ≤ 0.1% (כ-8 שעות בשנה במצטבר)

הערות

- V_{eq} – מהירות רוח שקולה חזויה.
- f – שכיחות.
- אזור רגיש – חצרות גני ילדים ובתי ספר, אזורי שהות ממושכת וכד'.
- הקריטריונים מבוססים על העבודה של: מ. פורה, מ.פציוק, "קריטריונים להבחנת בעיות רוח בשלבי תכנון".

[2] ככל שלא פורסם אחרת, יש לפעול בהתאם לקריטריונים הנקובים בת"י 5281.

8. משטר הרוחות החזוי ובחינתו

8.1. הפקת תחזית למשטר הרוחות

8.1.1. כללי

- תחזית למשטר הרוחות מופקת ע"י סינתזה בין תוצאות חישובי זרימת האויר (CFD) על מודל תלת המימד לבין הנתונים המטאורולוגיים המותאמים, ובהתאם להגדרות הקריטריונים להערכה.
- יש להפיק את התחזית למשטר הרוחות ע"י הצגת השכיחויות למהירויות רוח שקולה שמעל הערכים המוגדרים בקריטריונים להערכה, ובכך לאפשר ניתוח משטר הרוחות ועמידה בקריטריונים בהתאם לסוגי הפעילויות בסביבת התכנית המוצעת.

8.1.2. דגשים והגדרות להפקת התחזית

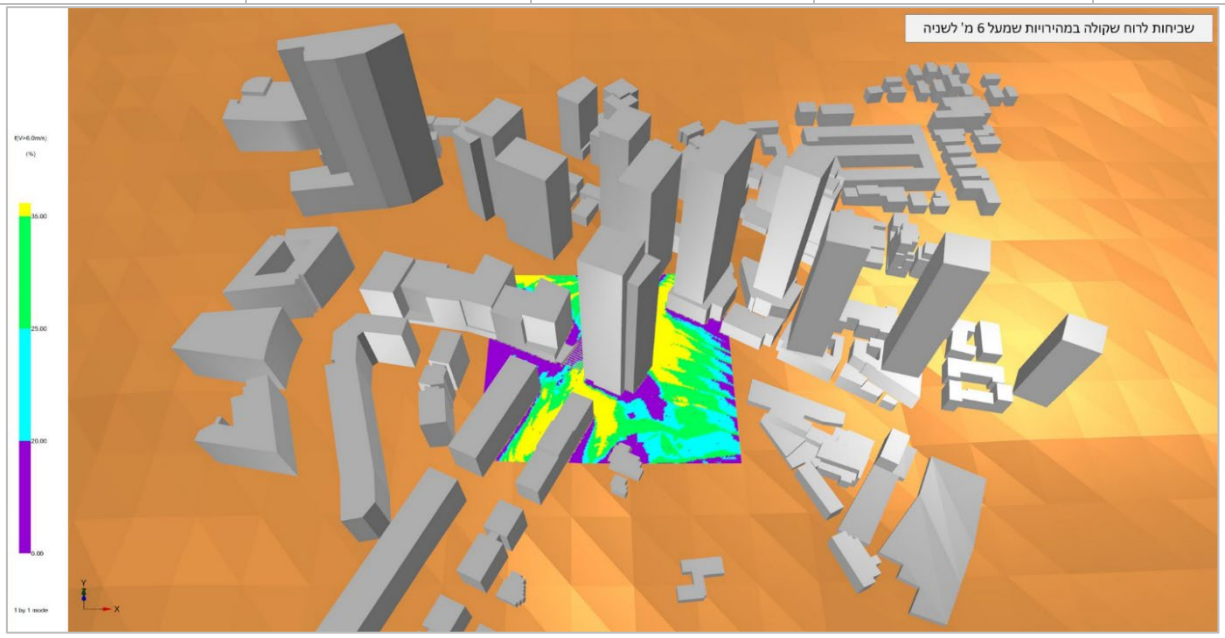
- יש לוודא את תקינות תוצאות חישובי זרימת האויר בהתאם להוראות יצרן תוכנת ה-CFD.
- יש לוודא שקובץ הנתונים המטאורולוגיים הותאם אל גובה נק' הייחוס שהוגדרה לחישובי זרימת האויר, והוזן אל מודל ה-CFD בהתאם (לגובה נק' הייחוס).
- יש להגדיר את ספי מהירויות הרוח השקולה לחישובי השכיחויות בהתאם לערכים המוגדרים בקריטריונים להערכה.
- יש להגדיר את מקדם הטורבולנציה לערך המוגדר בקריטריונים להערכה.

8.1.3. אופן הצגת התחזית

- את תחזית משטר הרוחות יש להציג ע"י תרשימים בהם ניתן לראות באופן ברור את ערכי השכיחויות לרוח שקולה שמעל המהירויות המוגדרות בקריטריונים להערכה, תוך חלוקה ברורה לצבעים לפי ערכי השכיחויות המותרים המוגדרים בקריטריון נוחות מכנית ובקריטריון בטיחות הולכי רגל.
- תרשימי דוגמא לתחזית משטר הרוחות מוצגים בעמודים הבאים.

תרשים 8 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | תרשימים לדוגמא | נוחות מכנית

מקדם הטורבולנטיות (α)	**מתאים לפעילות שהות ממושכת בישיבה** מסעדות פתוחות, גני משחקים	**מתאים לפעילות הליכה רגילה** רחובות שכונתיים, כניסות למבנים	**מתאים לפעילות שהות קצרה** רחובות, חניונים	**לא מתאים לכל סוגי הפעילויות** יש להימנע למעט באזורים בהם אין צפי לפעילות הולכי רגל כלל (כגון: כבישים ראשיים ללא מעברי חצייה)
3	f (Veq > 6 m/s) < 20% f (Veq > 9 m/s) < 5%	f (Veq > 6 m/s) < 25% f (Veq > 9 m/s) < 10%	f (Veq > 6 m/s) < 35% f (Veq > 9 m/s) < 15%	f (Veq > 6 m/s) > 35% f (Veq > 9 m/s) > 15%



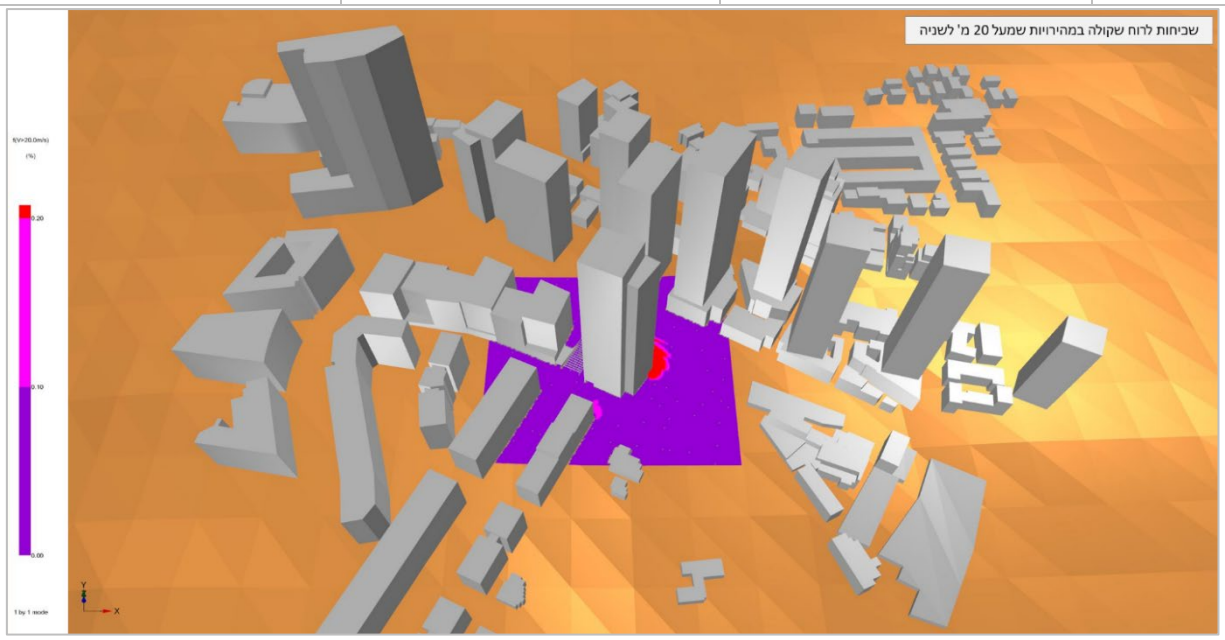
הערה: בחירת הצבעים בתרשים הינה להמחשה בלבד והם אינם מחייבים

הנחיות לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD להערכת נוחות מכנית ובטיחות עבור הולכי הרגל

משטר הרוחות החזוי ובחינתו

תרשים 9 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | תרשימים לדוגמא | בטיחות הולכי רגל

מקדם הטורבולנטיות (α)	**אזור בטוח** רצוי לכל סוגי הפעילויות והאוכלוסייה	**אזור מסוכן לפעילויות רגישות** יש להימנע לחלוטין עבור אזורים רגישים: חצרות גני ילדים ובתי ספר, אזורי שהות ממושכת וכד'	**אזור מסוכן** יש להימנע לחלוטין למעט באזורים בהם אין צפי לפעילות הולכי רגל כלל (כגון: כבישים ראשיים ללא מעברי חצייה)
3	f (Veq > 20 m/s) < 0.10%	f (Veq > 20 m/s) > 0.10%	f (Veq > 20 m/s) > 0.20%



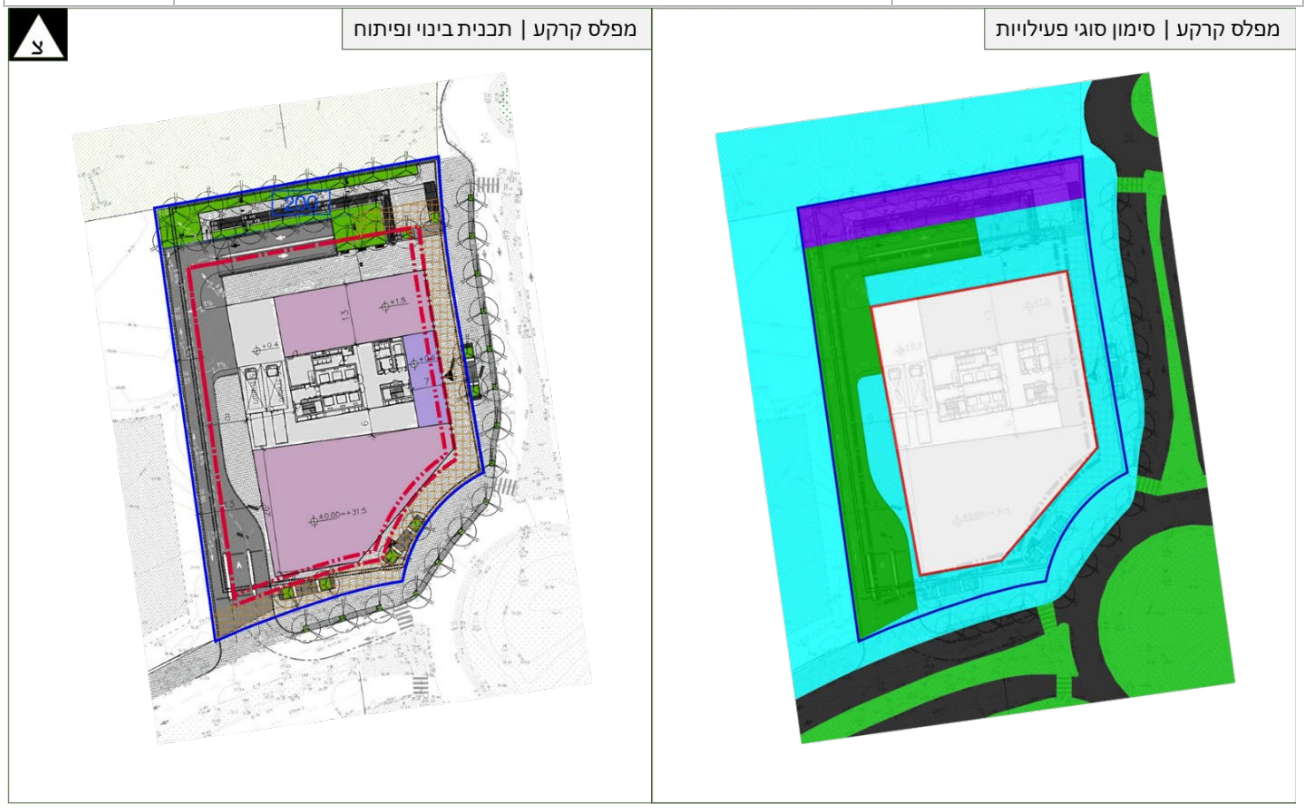
<u>הערה</u>: בחירת הצבעים בתרשים הינה להמחשה בלבד והם אינם מחייבים

8.2. סימון שימושים וסוגי פעילויות

- מומלץ לסמן את סוגי פעילויות בתחום אזורי הבדיקה שהוגדרו על פי השימושים המופיעים בתכנית הבינוי והפיתוח, ו/או התשריט המוצע.
- מומלץ להציג את סימון סוגי הפעילויות על גבי תכנית הבינוי והפיתוח. ראה/י דוגמא בתרשים להלן:

תרשים 10 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | תרשימים לדוגמא | סימון שימושים וסוגי פעילויות

סוג פעילות בתחום הבדיקה	שימושים	מסומן בצבע
1. הליכה מהירה ופעולות קצרות	רחובות, חניונים, מעברי חצייה.	
2. הליכה רגילה ועמידה לזמן קצר	רחובות שכונתיים, כניסות למבנים, רחובות מסחריים, גנים ציבוריים.	
3. שהות ממושכת בישיבה / בעמידה	מסעדות פתוחות, חצרות גני ילדים, פינות משחק וישיבה.	
4. ללא פעילות הולכי רגל	בבישים ראשיים ללא מעברי חצייה.	
5. תכסית מבנים במפלס הבדיקה	-	
6. קו כחול תכנית מוצעת	-	

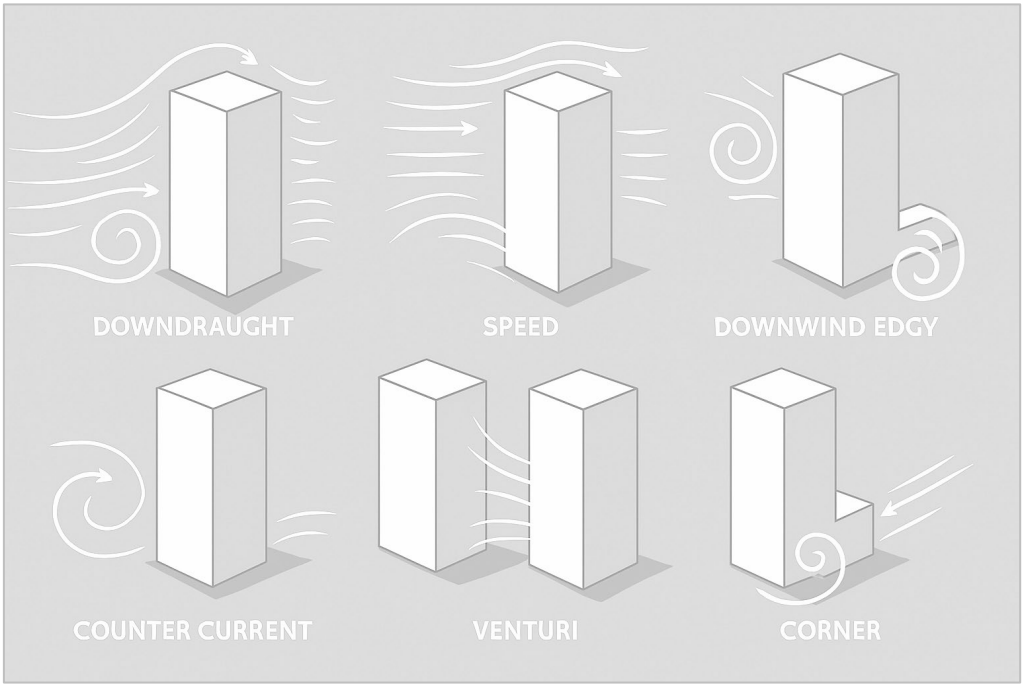


הערה: בחירת הצבעים בתרשים הינה להמחשה בלבד והם אינם מחייבים

8.3. איתור חריגות מהקריטריונים ותכנון פתרונות למיתון הרוח

- יש לבחון עמידה בקריטריונים להערכה על בסיס תרשימי "תחזית משטר הרוחות" אל מול סוגי הפעילויות. רצוי להיעזר בתרשים סימון סוגי פעילויות או לכל הפחות בתכנית הבינוי והפיתוח, ובתשריט המוצע.
- במידה ואותרו חריגות מהקריטריונים להערכה, יש לתכנן פתרונות למיתון הרוח בהתאם ל: סוג החריגה, השלב התכנוני (תב"ע / עיצוב אדריכלי והיתר), שיקול דעת עורך הדוח ודרישות מוסד התכנון.
- על מנת לתכנן פתרונות למיתון הרוח באופן יעיל, מומלץ לנסות לאפיין עבור כל חריגה את:
  - ❖ כיווני הרוח בהם נוצרת הגברת רוח משמעותית, ע"י בחינת מקדמי הגברת הרוח לכל כיוון אל מול שושנת הרוחות.
  - ❖ אפקטים מיוחדים להגברת הרוח בסביבה בנויה על פי ניסיון עורך הדוח. ראה/י דוגמאות בתרשים להלן:

תרשים 11 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | אפקטים נפוצים להגברת רוח בסביבה בנויה



- מומלץ כי שימוש באלמנטים שהוצגו בדו"ח כפתרונות אשר ממתנים או מבטלים את החריגות מהקריטריונים, יהיה מלווה בעדכון מסמכי התכנית / היתר.
  - ❖ בתב"ע: יש להוסיף למסמך הוראות התכנית הנחיה לשלב ההיתר המחייבת הטמעת הפתרונות שהוצגו בדו"ח. מומלץ להטמיע את הפתרונות גם בתכנית הפיתוח.
  - ❖ בהגשה להיתר: יש להוסיף לתכנית ההגשה את כל הפתרונות שהוצגו בדו"ח.
- בטבלה בעמוד הבא מוצגים עקרונות מומלצים לתכנון פתרונות למיתון הרוח לפי סוג החריגה.

הנחיות לביצוע בדיקת רוחות באמצעות מודל ממוחשב CFD להערכת נוחות מכנית ובטיחות עבור הולכי הרגל

משטר הרוחות החזוי ובחינתו

טבלה 5 | משטר הרוחות החזוי ובחינתו | סיווג חריגות מהקריטריונים

קריטריון	סוג חריגה	תאור סוג החריגה	פתרונות אפשריים לפי סוג חריגה				ביצוע בדיקת CFD לבחינת יעילות הפתרונות
			שינויים בבינוי המתוכנן (העמדה, צורה וגובה)	**אלמנטים קבועים** (פרגולות, קולונדות, מעקות וכו')	**אלמנטים צמחיים**	**שינוי שימושים וסוגי פעילויות**	
בטיחות הולכי רגל	מסוכן	**חריגה המתקבלת כאשר השכיחויות למהירויות הרוח השקולה המסוכנות גבוהה מהמקסימום המותר.** מומלץ להימנע לחלוטין מחריגה זו. ניתן לקבל אך ורק באזורים בהם לא צפויה פעילות הולכי רגל כלל.	✓	✓	-	✓	חובה החל משלב תב"ע
נוחות מכנית	לא נוח	**חריגה המתקבלת כאשר השכיחויות למהירויות הרוח השקולה הלא נוחה גבוהה מהמקסימום המותר לכלל סוגי הפעילויות.** מומלץ להימנע לחלוטין מחריגה זו. ניתן לקבל אך ורק באזורים בהם לא צפויה פעילות הולכי רגל כלל.	✓	✓	✓	✓	חובה החל משלב עיצוב אדריכלי
נוחות מכנית	סביר	**חריגה המתקבלת כאשר השכיחויות למהירויות הרוח השקולה אינן תואמות את סוג הפעילות המתוכנן.** מומלץ להימנע מחריגה זו ככל הניתן. אין לקבל באזורים בהם מתוכננת פעילות של אוכלוסיות פגיעות.	✓	✓	✓	✓	מומלץ אין חובה

הערה: סיווג החריגות בטבלה אינו מציג שכיחויות מותרות למהירויות הרוח השקולה. יש לבצע את הסיווג בהתאם למוגדר בקריטריונים להערכה העדכניים ביותר.

9. הכנת דו"ח בדיקת רוחות

9.1. תכולה נדרשת לדו"ח

טבלה 6 | הכנת דו"ח בדיקת רוחות | תכולה נדרשת לדו"ח

פרק / סעיף	תיאור תוכן נדרש
1. פרטי הפרויקט	1.1. פרטי מקרקעין. 1.2. פרטי צוות התכנית: יזם, מגיש, אדריכל, אנשי צוות רלוונטים נוספים. 1.3. פרטי עורכ/י ההדמיות וכותב/י המסמך. 1.4. תיאור מילולי להסבר הפרויקט (התכנית המוצעת / הגשה להיתר). 1.5. תיאור תכנון הפרויקט (מתוך מסמכי התכנית המוצעת / תכנית ההגשה להיתר).
2. פרטי סביבת הפרויקט	2.1. תיאור סביבת הפרויקט הקיימת ע"י הצעת מיפוי: תצ"א וייעודי קרקע. 2.2. תיאור וסימון תכניות מאושרות בסביבת הפרויקט (ברדיוס 300 מ'). 2.3. תיאור מילולי על אופי הטופוגרפיה.
3. מודל תלת מימד	3.1. תיאור מילולי / בטבלה לתוכן מודל תלת המימד שהוכן עבור הבדיקה. 3.2. הדמיות מתוך מודל תלת המימד (מ-3 זוויות לפחות).
4. קריטריונים להערכה	4.1. תיאור הקריטריונים להערכה.
5. נתונים מטאורולוגיים	5.1. פרטי הנתונים המטאורולוגים שנבחרו מאטלס פוטנציאל אנרגיית הרוח: קואורדינטות, גובה מעל פני הקרקע, תקופה בשנה שנבחרה. 5.2. שושנת רוח והיסטוגרמה עבור הנתונים המטאורולוגים שנבחרו.
6. הגדרות בתוכנת CFD ונתונים נוספים.	6.1. פרטי תוכנת ה-CFD והגירסה. 6.2. פרטי קופסת החישוב (מימדים ורזולוציה). 6.3. פרטי אזורי הבדיקה (מימדים, גובה ורזולוציה). 6.4. פרטי נקודת/גובה הייחוס. 6.5. כיווני רוח לחישובי CFD, מקדמי החספוס שהוגדרו והתכנסות הנתונים (convergence). 6.6. רמת MESH לאובייקטים שנטענו למודל (במידה ורלוונטי). 6.7. רמת פורוזיביות לאלמנטים פורוזיביים (במידה ורלוונטי).
7. ממצאי הבדיקה ופתרונות למיתון הרוח	7.1. תרשימים לשכיחויות הרוח הממוצעת/שקולה לפי המהירויות הרלוונטיות. 7.2. תרשימים לסימון סוגי הפעילויות לפי שימושים (מומלץ). 7.3. סימון סיווג ותאור חריגות מהקריטריונים. 7.4. הצגת פתרונות למיתון הרוח והצגת בדיקת ה-CFD לבחינת יעילותם. הערה: חובה להציג גם את ממצאי הבדיקה ללא אמצעיים צמחיים למיתון רוח.
8. סיכום והמלצות	8.1. סיכום ממצאי הבדיקה. 8.2. המלצות והנחיות היועץ. 8.3. טופס סיכום בדיקה (ראה/י טופס מצורף בסעיף הבא).

9.2. טופס סיכום בדיקה

9.2.1. חלק א'

(1) פרטי התכנית המוצעת		
(1.1) שם ומספר התכנית / היתר		
(1.2) גירסה ותאריך של תכנית הבינוי		
(1.3) מצב סטטוטורי	תב"ע / היתר / אחר	(פרט/י אם אחר)
(1.4) קואורדינטות	(X)	(Y)
(1.5) גובה 00 (כניסה קובעת)	(מ' מעל פני הים)	
(1.5) עיר / יישוב		
(1.6) כתובת		
(1.7) הסבר תמציתי על התכנית המוצעת		
(2) פרטי מבצע הבדיקה		
(2.1) שם פרטי ומשפחה		
(2.2) שם חברה		
(2.3) פרטי התקשרות	(טלפון)	(אימייל)
(3) פרטי התוכנות בהן נעשה שימוש		
(3.1) תוכנת מידול תלת מימד	(שם התוכנה וגירסה)	
(3.2) תוכנת ה-CFD	(שם התוכנה וגירסה)	

9.2.2. חלק ב'

(4) תכולת המודל וטעינה אל תוכנת ה-CFD			
פריט	**נטענו למודל CFD ?**	**רמת פירוט / פורוזיביות**	**רמת MESH** (אם רלוונטי)
(4.1) מבנים של הפרויקט	כן / לא	סכמתי / מפורט	נמוכה / בינונית / גבוהה
(4.2) מבנים בסביבה (רדיוס 300 מ')	כן / לא	סכמתי / מפורט	נמוכה / בינונית / גבוהה
(4.3) טופוגרפיה	כן / לא	סכמתי / מפורט	נמוכה / בינונית / גבוהה
(4.4) אלמנטים צמחיים	כן / לא	נמוכה / ממוצעת / גבוהה	נמוכה / בינונית / גבוהה
(4.5) אלמנטים אדריכליים קבועים	כן / לא	סכמתי / מפורט	נמוכה / בינונית / גבוהה
(5) הגדרות פרמטרים בתוכנת ה-CFD			
(5.1) גובה המבנה הכי גבוה במודל	(מ' מעל הקרקע)		
(5.2) גובה ייחוס	(מ' מעל הקרקע) (יש לציין האם הוגדרה נק' ייחוס או גובה ייחוס)		
(5.3) כיווני רוח להרצת חישובי CFD ומקדמי חספוס באזור התכנית המוצעת לכל כיוון רוח			
(5.4) קופסת החישוב	הגדרה ידנית / אוטומטית	רדיוס (מ')	רזולוציה
(6) נתונים מטאורולוגיים			
(6.1) סוג בסיס נתונים	אטלס פוטנציאל אנרגיית רוח		
(6.2) סוג קובץ הנתונים	קובץ לקואורדינטות הפרויקט / קובץ מתוך מאגר נתונים מטאורולוגיים מייצגים		
(6.3) קואורדינטות	(X)	(Y)	
(6.4) גובה נתונים	(מ' מעל הקרקע)		
(6.5) הערות נוספות			

9.2.3. חלק ג'

(7) הגדרות משטחי הבדיקה בתוכנת ה-CFD (הוסף שורות במידת הצורך)			
מפלס	**תאור**	**גובה (מ')**	**רזולוציה**
(7.1) מפלס קרקע		1.5	
(8) בקרה על תוצאות חישובי CFD לפי כיוון רוח			
(8.1) התכנסות נתונים (Convergence)	תקין / לא תקין (פרט אם לא)		
(8.2) תקינות ויזואלית	תקין / לא תקין (פרט אם לא)		
(9) ממצאי הבדיקה (יש למלא עבור כל בדיקה שהוצגה. יש להציג גם ממצאי בדיקה שבוצעה ללא אמצעיים צמחיים)			
מפלס	**עמידה בקריטריון בטיחות**	**עמידה בקריטריון נוחות מכנית**	
(9.1) מפלס קרקע	כן / לא (יש להוסיף תיאור מילולי)	כן / לא (יש להוסיף תיאור מילולי)	
(9.2) מפלסים אחרים	כן / לא (יש להוסיף תיאור מילולי)	כן / לא (יש להוסיף תיאור מילולי)	
(10) אלמנטים נוספים למיתון הרוח			
(10.1) האם נדרש תכנון אלמנטים נוספים למיתון הרוח?	כן / לא (יש לפרט במידה וכן)		
(10.2) האם יש צורך בביצוע בדיקת CFD נוספת?	כן / לא (יש לפרט במידה וכן)		

9.2.4. חלק ד'

(11) הנחיות להוראות התכנית	
(11.1) נדרשות הנחיות להוראות התכנית?	כן / לא (יש לפרט במידה וכן)

10. עקרונות לתכנון מרחבי התומך במיתון רוח, ודוגמאות לפתרונות אדריכליים

10.1. עקרונות לתכנון מרחבי

בשלבי התכנון המרחבי לעיתים ניתן לבצע אופטימיזציה מושכלת של כמה פרמטרים גאומטריים-מורפולוגיים כדי להפחית האצות רוח בלתי-רצויות, ובו-בזמן לאפשר זרימת אוויר מתונה הדרושה לאוורור בעונת הקיץ. מחקרים עדכניים מאמתים את תרומתם של פרמטרים אלו לנוחות הולכי-הרגל ולבקרת האקלים העירוני. להלן מספר המלצות לתכנון המרחבי:

כיוון צירי הרחובות

רחוב עירוני, במיוחד כאשר מדובר בציר ארוך וישר, המוקף בבינוי גבוה משני צדדיו, המתוכנן במקביל לרוח השלטת, עלול להפוך ל"תעלת רוח" שבה הרוח מואצת לאורך כל הציר ובכך ליצור תנאי אי-נוחות עבור הולכי הרגל. כדי לצמצם תופעה זו, יש לבחון את זווית הציר ביחס לרוח השלטת. לעיתים ניתן לשבור את הציר או לשנות את כיוונו, תוך הקפדה על הימנעות מזוויות אלכסוניות (כמו 45° ו-135°) הידועות כמגבירות זרימה בפינות מבנים (Cui & Liu, 2024).

יחס מרווח-לגובה (L/D) בין מבנים

מחקר עדכני (Cui & Liu, 2024) מראה כי כאשר המרווח האופקי בין מבנים גדול בערך פי שלושה וחצי עד ארבעה מגובהם, מהירויות הרוח במפלס הולכי-הרגל קטנות באופן ניכר. כאשר היחס בין המרווח האופקי לבין גובה המבנים קטן יותר צפויות האצות רוח.

גיוון בגבהי הבינוי ורציפות קיר הרחוב

שילוב מסות בנייה בגבהים משתנים ופתחים מקוטעים מווסת זרימה ומעודד אוורור מתון. מחקר קודם (Iqbal & Chan, 2016) הראה כי עיצוב מסות בצורות וגבהים מגוונים, לצד ריווחים הולמים, מצמצם אזורי לחץ-רוח קריטי סביב בניינים גבוהים.

חתך הרחוב

קביעת רוחב מדרכות המאפשר תוספת רצועת עצים וצמחייה משמעותית וכן תוספת של אלמנטים חצי-חדירים) כגון גדרות ומסתורים משפיעה באופן ישיר על עוצמת הרוח החודרת למפלס הולכי הרגל וכן תורמת לנוחות התרמית בקיץ.

אימות תכנון באמצעות מודל ממוחשב

יישום ההמלצות בנ"ל כבר בשלבי התכנון הראשוניים, לרבות בחינת חלופות תכנון, תורם ליצירת מרחב ציבורי נוח ומאוורר, אך כאמור מומלץ לבחון כל מקרה לגופו באמצעות בדיקה במודל ממוחשב.

מקורות נבחרים

Cui, H., Ma, M., Li, J., Yang, L., Han, Z., & Liu, Q. (2024). Integrated Impacts of Building Space Ratio and Wind Direction on Pedestrian-level Wind Environment around High-rise Buildings with Equilateral Triangle Arrangement. Journal of Applied Fluid Mechanics, 17(9), 2016-2027. https://doi.org/10.47176/jafm.17.9.2511

Iqbal, Z., & Chan, A. L. S. (2016). Pedestrian-level Wind Environment Assessment around Group of High-rise Cross-shaped Buildings: Effect of Building Shape, Separation and Orientation. Building and Environment, 101, 45-63. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.015

10.2. אלמנטים אדריכליים מפורטים

להלן מקבץ פתרונות להפחתת השפעת הרוח בקרבת מבנים גבוהים בסביבה עירונית. הפתרונות המוצגים מוכרים כיעילים, אך על מנת לוודא כי יישום הפתרון נכון למקרה הפרטי, מומלץ לבחון את תרומתו באמצעות בדיקה במודל ממוחשב.

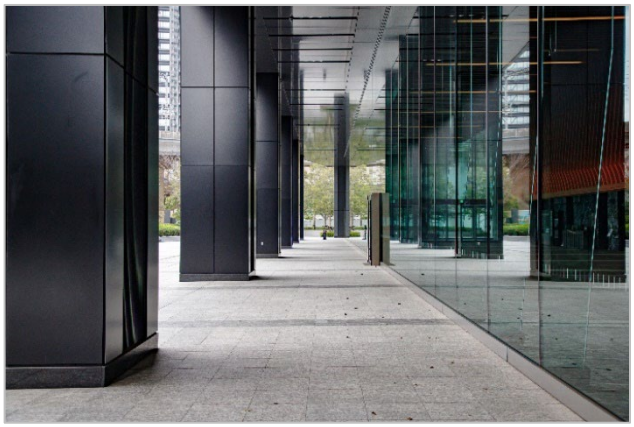
אלמנטים אופקיים - חופה/ פרגולה מעל כניסות וקולונדה עירונית

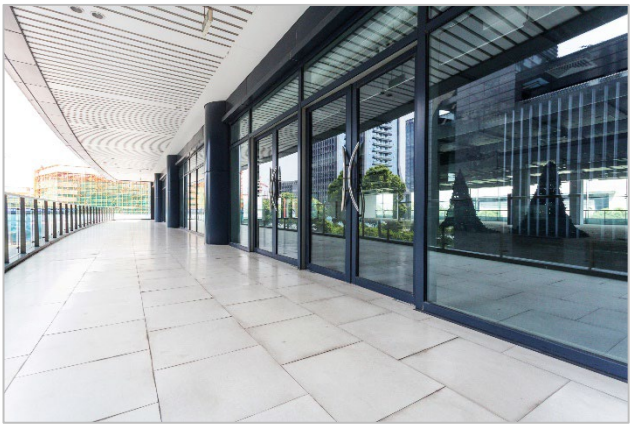
שימוש בקירוי אדריכלי הבולט מחזית המבנה כגון סככות, פרגולות מעל הכניסות או קולונדה עירונית לאורך הרחוב יכול לספק הגנה על הולכי הרגל מפני זרימות רוח אנכיות חזקות הנובעת מטורבולנציה של הרוח במפגש עם קיר הבניין. הקירוי יוצר חיץ פיזי בין הרוח המגיעה מהגובה לבין המרחב הקרקעי.

כאשר הקירוי אטום ואינו חדיר, זרימת הרוח פונה לצדדים או מעל ראשי העוברים והשבים. במידה והקירוי חדיר לאוויר הוא מהווה שובר רוח בכך שמפחית את האנרגיה הקינטית של הרוח וממתן את עצימותה.

מעבר לנוחות, פתרון זה עשוי לתרום גם למניעת טריקות דלת חזקות ומסוכנות ולצמצום כניסת אוויר קר או חם לבניין דרך הפתחים ולתרום לחיסכון בצריכת האנרגיה.

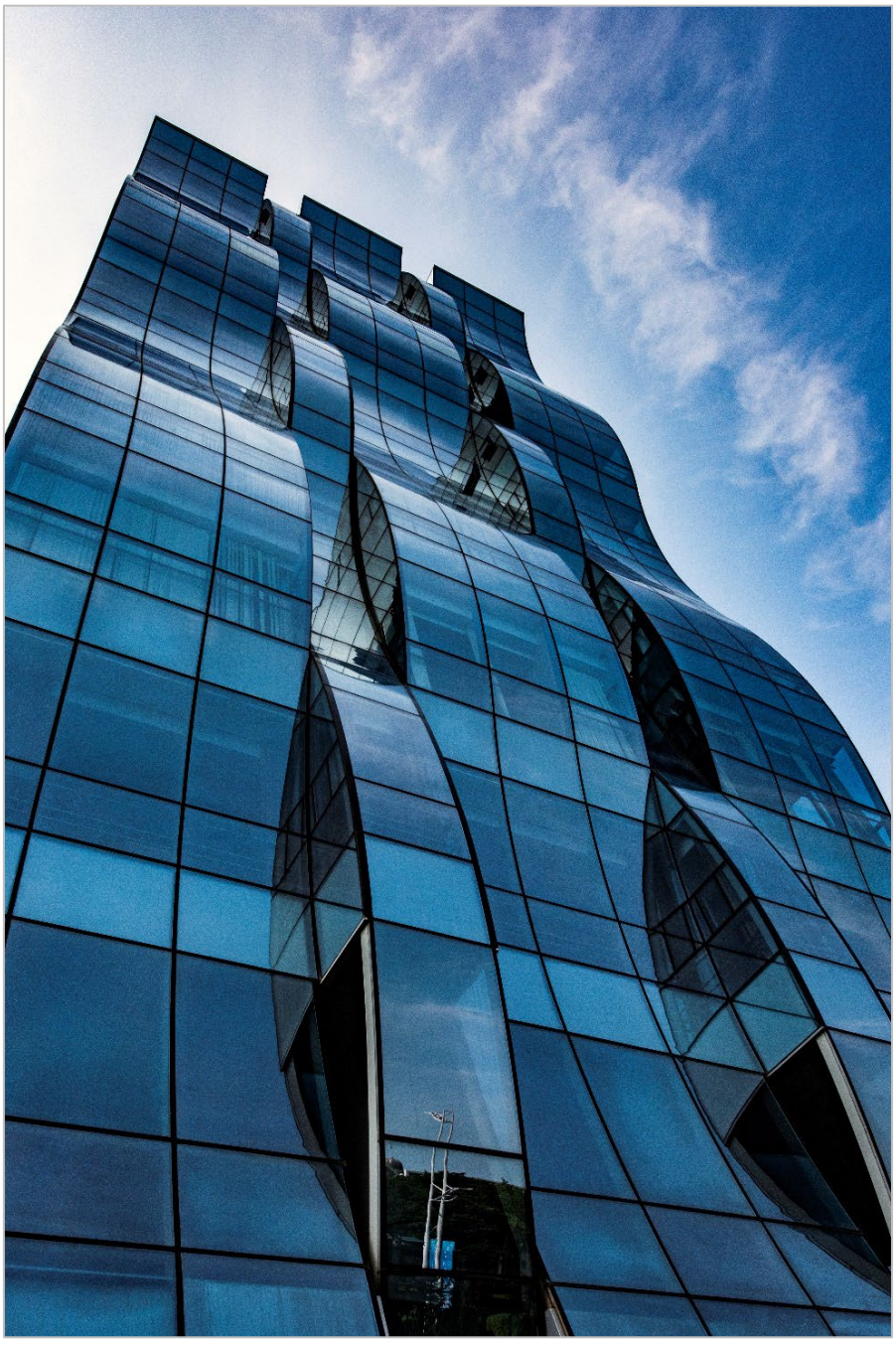
תכנון קולונדה ומעברים מקורים הסגורים למחצה יוצרים רצועת הגנה אפקטיבית עבור הולכי רגל לאורך רחובות עם מבנים גבוהים. קולונדה מייצרת אזורים מוצלים ומוגנים חלקית המפחיתים את מהירות הרוח, ובו זמנית שומרים על שקיפות ופתיחות אורבנית. שימוש נרחב נעשה בפתרון זה בעיקר ברחובות מסחריים.





דירוג ונסיגה של חזית המגדל

יצירת נסיגה של המגדל או שילוב של פודיום – כלומר חלק תחתון נמוך ורחב בבסיס המגדל הוא אחד הכלים היעילים ביותר להסטת זרימת הרוח הרחק ממפלס הולכי הרגל. כאשר רוח פוגעת במבנה גבוה, היא נוטה לנוע כלפי מטה לאורך חזיתו בתנועה אנכית עזה ומרוכזת באזור הכניסות ובמפלס הקרקע. פתרון הפודיום פועל כמעין סף בלימה, שבו הרוח נבלמת חלקית, מופנית לצדדים או מתפזרת לגובה בינוני – ובכך מפחיתה את העומסים הקרקעיים. פתרון זה מאפשר גם שילוב של פונקציות מסחריות ושרותיות בקנה מידה אנושי, תוך חיזוק הקשר בין הבניין לרחוב.

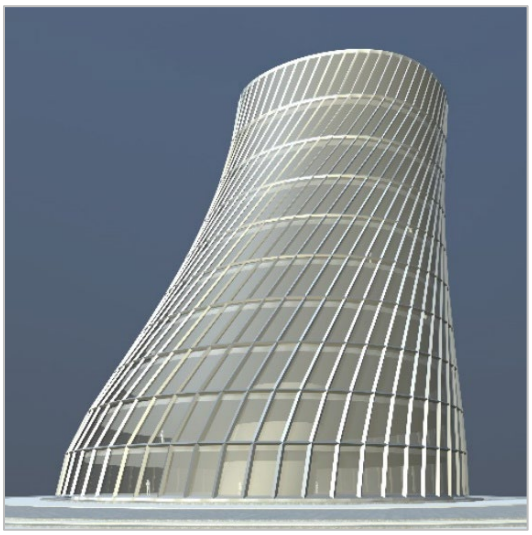


צורת מגדל מדורגת / מתחדדת

עיצוב מגדלים באופן מדורג או מתחדד ככל שעולים בגובה – כאשר למבנה צורת פירמידה מדורגת או מעין דירוג טרסה, רוח הפוגעת בו נבלמת בהדרגה במקום לנחות ישירות אל הקרקע. תכנון מדורג מחלק את העומסים לאורך גובה המבנה מקטין את עצמת הרוח האנכית ומפחית את מהירות הרוח במפלס הרחוב.



פינות מגדל מעוגלות או משופעות



לבניינים בעלי פינות חדות יש נטייה להפריד את זרימת הרוח באופן פתאומי, מה שמוביל ליצירת מערבולות בפינות המבנה, אזורי לחץ נמוך ותנועות אוויר בלתי יציבות. לעומת זאת, כאשר קצות הבניין מעוגלים או משופעים, הזרימה הופכת רציפה ורכה יותר, דבר המקטין את היווצרותם של אזורי מערבולות ואת תנודות הרוח סביב הבניין. פתרון זה מסייע לא רק להפחתת אי נוחות בקרבת הבניין, אלא גם מקטין את מאמצי החזיתות ומונע עומסים דינמיים שעלולים להשפיע על יציבות המבנה.

חזיתות מחוררות / משרביה:

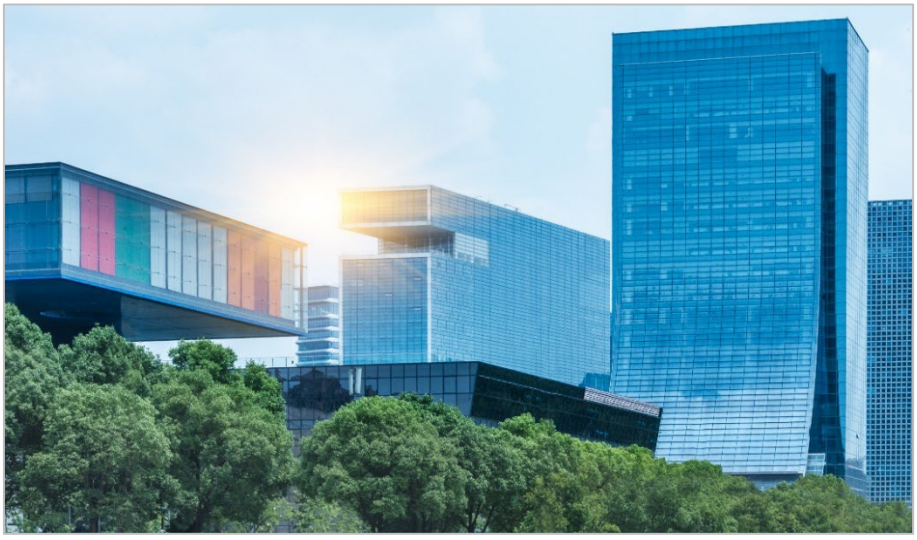
הוספת סבכות או חיפויים מחוררים לפני מעטפת הבניין תורמים לשבירה והאטה של זרימת הרוח. האלמנטים מסוג זה יוצרים שכבת חיץ שמפזרת את לחץ הרוח לפני שהוא פוגע בחזית עצמה ובכך מונעים האצה חדה בין מבנים סמוכים. כאשר מתכננים את רמת הצפיפות והפרופיל של המסך, ניתן לשלוט בכמות האוויר שחודרת דרכו ולכוון את זרימתו – פתרון זה מתאים במיוחד לאזורים חשופים או צרים בין מגדלים.

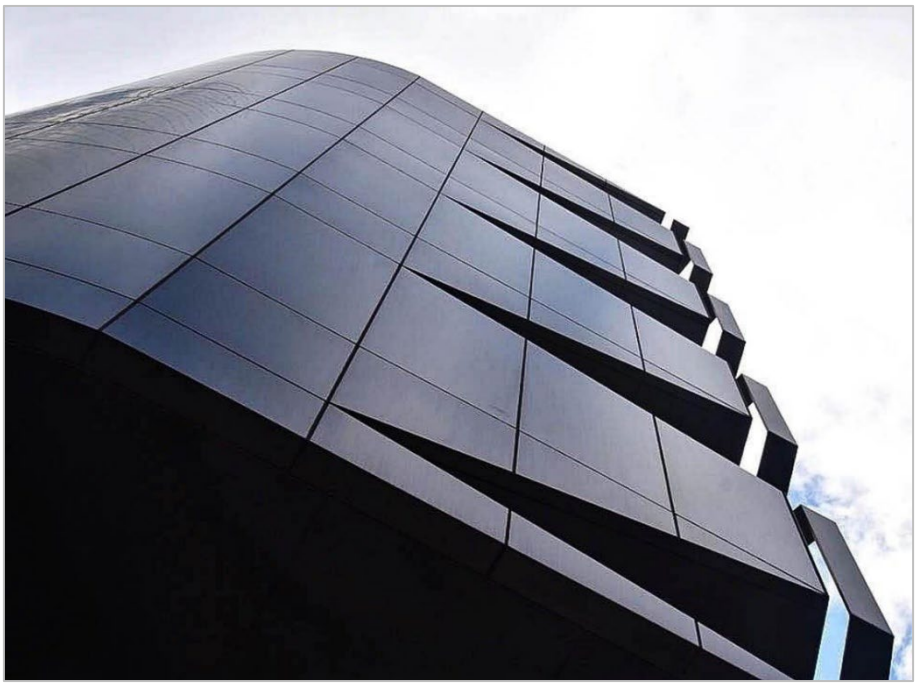




פתחים בגוף המגדל

שילוב של פתחים מתוכננים מראש בגוף המגדל, כגון מרפסות רחבות, פתחים מצד לצד מהווים אמצעי לפיזור זרימות הרוח לאורך החזית בגובה. באמצעות פתחים אלו, הרוח מנותבת לעבור דרך חלקים מהמבנה, מה שמפחית יצירת מערבולות אזוריות, עומסי רוח לא אחידים, ואי נוחות ברמת הרחוב. הפתחים גם תורמים לשיפור החשיפה לתאורה טבעית ולאוורור הפנימי של הבניין.





צמחייה צפופה ועצים

שילוב של עצים גבוהים ירוקי עד בעלי עלווה צפופה, שיחים צפופים וצמחייה רבת שכבות משמש כחיץ ירוק טבעי המפחית משמעותית את מהירות הרוח. להבדיל מאלמנטים קשיחים, צמחייה מאפשרת מעבר חלקי של אוויר תוך שבירה והאטה של זרימתו. מבנה הצמחייה - גובה, צפיפות, וסוג העלווה – קובע את אפקטיביות ההגנה. באזורים עירוניים, נטיעת עצים לאורך רחובות ובמרחבי שהייה חשופים יכולה להוות פתרון אפקטיבי למניעת "קניוני רוח" ולהגברת נוחות הולכי הרגל. רצוי להקפיד על בחירת סוגי עצים בוגרים בעלי עלווה צפופה וירוקי עד.





קירות שוברי רוח / גדרות פתוחות

שימוש בקירות נמוכים או גדרות מחוררות או סבכות מהווה פתרון יעיל להפחתת עוצמת הרוח במרחבים ציבוריים ופרטיים באחד. להבדיל ממחסומים אטומים לחלוטין, מחסום חלקי שמאפשר חדירה מבוקרת של אוויר יוצר מערבולות קטנות שמפזרות את אנרגיית הרוח ומפחיתות את מהירותה. כך ניתן להגן על אזורי ישיבה, מרפסות או מסלולים חשופים, תוך שמירה על אוורור טבעי, תאורה ושקיפות ויזואלית.



