



ועדת ההיגוי של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים להתמודדות עם משבר האקלים

נייר עמדה מספר 1 | מאי 2022

הערכת צורכי כוח החישוב הלאומי הנחוץ לחיזוי האקלים בישראל - סקירה והמלצות

חברי הוועדה: יו"ר פרופ' דן יקיר, פרופ' צבי בן־אברהם, פרופ' נעמה גורן־ענבר,
פרופ' יוסף ג'בארין, פרופ' נדב דוידוביץ', פרופ' יואב יאיר, פרופ' יוסי לוי,ה,
פרופ' שלומית פז, פרופ' טליה פישר, פרופ' דניאל רוזנפלד, פרופ' איתן ששינסקי

לעמוד הוועדה באתר האקדמיה

<https://www.academy.ac.il/News/NewsItem.aspx?nodeId=837&id=2134>

תקציר מנהלים

שינויי האקלים הצפויים להחריף בעתיד משפיעים על חיינו בתחומים רבים (חקלאות, מים ומזון, אנרגיה ותשתיות, בריאות הציבור, המגוון הביולוגי, אסונות טבע ואירועי מזג אוויר קיצוניים, הגירה וגאור-אסטרטגיה). מובן שעל ישראל להשתתף במאמץ העולמי לעצירת שינויי האקלים הנגרמים בידי האנושות (הפחתת פליטות), אולם בשל ההתקדמות האיטית בנושא נוצרת דחיפות לפתח את היכולות להתמודד עם השינויים ולהסתגל אליהם. לפיכך יש לגבש תוכנית לאומית בנושא ולהקצות את המשאבים הדרושים לכך.

בחינת הנושא "יכולת ההתמודדות של ישראל עם שינויי האקלים" מעלה שמרכיב הכרחי ובסיסי לפיתוח מדיניות יעילה הוא קיומן של תחזיות ותרחישי אקלים מפורטים לטווח הארוך (עשרות שנים), שתהיה מיוחדת לאזורנו וביכולת הפרדה מרחבית גבוהה, ובכלל זה כימות השינויים הצפויים בכל רכיב גאוגרפי ורמת אי-הוודאות בתחזית. לישראל אין כיום יכולות חיזוי כאלה, ויש דחיפות ביצירתן.

התחזיות העולמיות המחושבות במרכזי האקלים המובילים בחו"ל נעשות ברזולוציה נמוכה של כ-50 קילומטרים. השפעת שינויי האקלים בישראל בעלת הטופוגרפיה המורכבת ואזורי האקלים השונים אינה מאובחנת ברזולוציה הנמוכה של תחזיות האקלים העולמיות והיא אף עלולה להטעות. לפיכך יש צורך ביצירת תחזית אקלימית ארצית ואזורית ברזולוציה גבוהה של 2-3 קילומטרים הדורשים כוח חישובי רב שאינו קיים בישראל למטרה זו.

הערכה ראשונית מצביעה על הצורך בהשגת כוח חישוב מינימלי לביצוע ההרצות האקלימיות הנחוצות של כ-15,000 ליבות מחשוב עתיר ביצועים לשנה וכן נפח אחסון של כ-4 פטה בייט עבור הפלט מתהליך החישובים האקלימיים שיהווה בסיס להכנת דוחות ותוכניות לגופי הממשל השונים, ובסיס להרחבת מחקר האקלים באזורנו. העלות לקבלת התחזית הלאומית הראשונה למדינת ישראל צפויה להיות כ-10 מיליון דולר. תחזית זו צריכה להתעדכן בכל כחמש שנים, והדבר ידרוש המשך השקעה לאורך זמן של כ-2 מיליון דולר בשנה. דרך יעילה ליישום התוכנית היא השתלבות במחשב הלאומי לפיתוח בינה מלכותית ומדע הנתונים, שכבר מצוי בשלבי ביצוע, והקמת ועדת היגוי מדעית ושיתוף פעולה הדוק בין האקדמיה לשירות המטאורולוגי ולגופים הצורכים את נתוני האקלים.

מדוע אנו זקוקים לאסטרטגיות הסתגלות לשינויי האקלים?

השפעות שינויי האקלים מורגשות כבר כמה עשרות שנים, ובשנים האחרונות הן הולכות וגוברות. השינויים הללו כבר משפיעים על היבטים רבים בחיינו, וצפוי שיחריפו בטווח הקצר והארוך גם יחד. השפעות שליליות ניכרות בתחומים רבים – החקלאות, הביטחון התזונתי, הספקת המים, מגזר האנרגיה, בריאות הציבור, המגוון הביולוגי, אסונות טבע ואירועי מזג אוויר קיצוניים, תשתיות, הגירה וגאור-אסטרטגיה.

אגן הים התיכון הוא בגדר מוקדה (hotspot) של שינויי אקלים: היקף השינויים בו ועוצמתם עולים על הממוצע הכלל-עולמי (אף כי לא ברור באיזו מידה). אף שברור כי עלינו להתכונן ולהסתגל לשינויים אלה, לישראל, בניגוד לרוב המדינות המפותחות, אין תוכנית לאומית מוסכמת לתכנון צעדי ההסתגלות הנחוצים נוכח משבר האקלים.

כדי לגבש את המדיניות שיש לנקוט לצורך הסתגלות לשינויי האקלים, בהתבסס על נתונים ועל כלים מדעיים, צריכים לעמוד לנגד עיני הממשלה, גופים ציבוריים ומגזרים שונים בכלכלה תרחישים מפורטים של ההתפתחויות האקלימיות בטווח הארוך: אלו הערכות ותחזיות לעשורים הבאים, בשונה מתחזיות מזג האוויר לטווח הקצר. הינה כמה דוגמאות:

◀ **מגזר המים:** ייתכן שבשל שינויים במאזן המים (משטר הגשמים וההתאדות), ובעקבותיהם – בכמות המים הזמינים לצריכה, יהיה צורך בפיתוח מקורות חדשים או נוספים להספקת מים (כגון התפלת מים מלוחים והעברת מים) בישראל עצמה, וכן לקבוע הסדרי הקצאת מים עם שכנותיה.

◀ **ניקוז:** ייתכן שבשל שינויים בעוצמות הגשמים וההצפות יהיה צורך בתכנון שונה של מערכות הניקוז וצנרת המים, הן בערים עצמן והן במערכות בין-עירוניות.

◀ **מגזר האנרגיה:** שינויים בטמפרטורות ובעומס החום עלולים לגרום שינויים בצריכת החשמל ובדפוסי צריכת החשמל, ובעקבות זאת יהיה צורך בתוכניות ליצירת מקורות אנרגיה נוספים. שינויים במשטר העננות/הקרינה או במשטר הרוחות עלולים להשפיע על תפוקת מתקני האנרגיה המתחדשת ועל תרומתם היחסית למכלול מקורות האנרגיה.

◀ **חקלאות:** שינויים במשטר הגשמים, בהתאדות ובטמפרטורות יחייבו ביצוע שינויים בעונת הצמיחה באזורים המתאימים לעיבוד חקלאי, וכן גידול זנים חדשים ונקיטת אמצעים חדשים לשם הגנה מפני מחלות/טפילים חדשים.

◀ **עליית מפלס פני הים:** ייתכן שכדי לבצע התאמות לעליית מפלס פני הים וחדירת מים מלוחים ליבשה יהיה צורך בתכנון נמלים ואזורי חוף עירוניים בהשקעה עצומה.

◀ **כוחות הביטחון:** יהיה צורך בהכשרה של גורמים אלה ובציודם לפי החמרת המצב, הן בישראל והן באזור כולו.

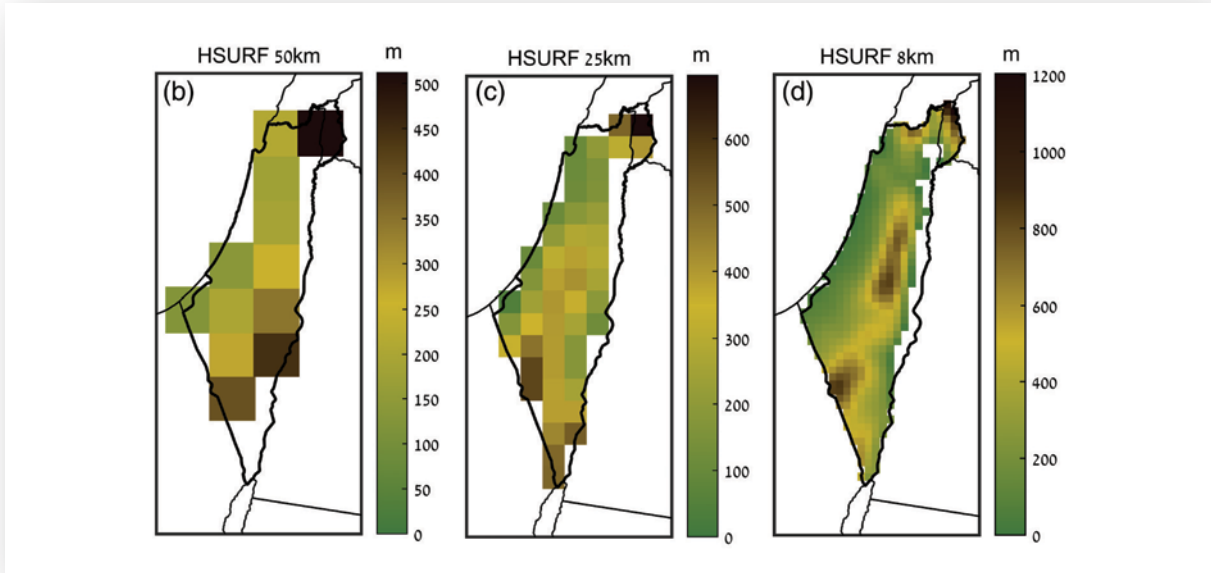
המצב הנוכחי

אומנם עריכת תצפיות ואיסוף נתונים מאפשרים לנו להעריך שינויים בעבר ובהווה, אך הכלי היחיד שיכול לתת בידינו תחזיות והערכות הוא מודלים. המודלים האקלימיים משתפרים במהירות, והתברר שבעשורים האחרונים הם הפיקו הערכות ותחזיות אמינות בנוגע לשינויי האקלים. עם זאת ואף שהמודלים מבוססים על ידע מדעי, גם הם אינם נקיים מאי-ודאות. והיות שאנו מתנהלים מתוך אי-ודאות זו, עלינו לשפר את הכלים שבידינו כדי שנוכל לגבש תכנון אמין יותר ולא נצטרך להמשיך להפיק הערכות שחלקן הוא בגדר ניחוש או אומדן על סמך הנתונים הקיימים ומגמות כלליות בלבד. זהו צעד חיוני שעל ישראל לנקוט בהקשר זה.

המודלים האקלימיים שעליהם תוכנית ההסתגלות הלאומית יכולה להסתמך כיום הם ברזולוציה גסה – כ-50 קילומטרים (במסגרת מרחב [domain] המזרח התיכון-צפון אפריקה בתוכנית CORDEX)², והם מבוססים על הדמיות כלל-עולמיות שבוצעו לפני כעשר שנים (CMIP5). במודלים אלו אין יכולת להציג בבירור ובחדות אזורים גאוגרפיים חשובים בישראל – עמק הירדן ומפרץ ים סוף, אגן הניקוז של הכינרת (מאגר המים העיקרי של המדינה), ואפילו לא את צורתו ואת מיקומו של קו החוף של הים התיכון.

1. פרק זה הוכן בהתייעצות עם מר ניר סתיו, מנכ"ל השירות המטאורולוגי הישראלי.

2. https://cordex.org/wp-content/uploads/2012/11/CORDEX-domain-description_231015.pdf



איור 1. הטופוגרפיה וקו החוף של ישראל בהדמיות ברזולוציות שונות (על פי Hochman et al. 2018). משמאל - הסריג (grid) הגס המשמש גם כיום בהדמיות של CORDEX (גודל הנקודה [pixel] מציין את קנה המידה של סריג ההדמיה).

הדמיות אלו הן גסות מדי, ואין בכוחן להבחין בתהליכים מטאורולוגיים חשובים אשר מעצבים את האקלים בארץ – התכנסות והיווצרות של עננים לאורך קו החוף (במודל ברזולוציה של 50 קילומטרים מיטשטש קו החוף, ובמקום שיוצג אזור של התכנסות זרימה, מוצג מעבר הדרגתי מן הים ליבשה); עליית אוויר והיווצרות גשם מעל אזורי העמקים, הגבעות ובקעת הירדן; ירידת אוויר והצטמצמות כמויות הגשם באזורים השוכנים ב"צל" ההרים (מדבר יהודה, הבקע הסורי-אפריקני והגליל המזרחי). מודלים ברזולוציות גסות כאלו אינם יכולים להציג בצורה אמינה את דפוסי העננים הקונבקטיביים (שבישראל הם ענני הגשם העיקריים), ומשום כך אינם מסוגלים להציג את עוצמות הגשם ואת מגמות ירידת הגשם בארץ.

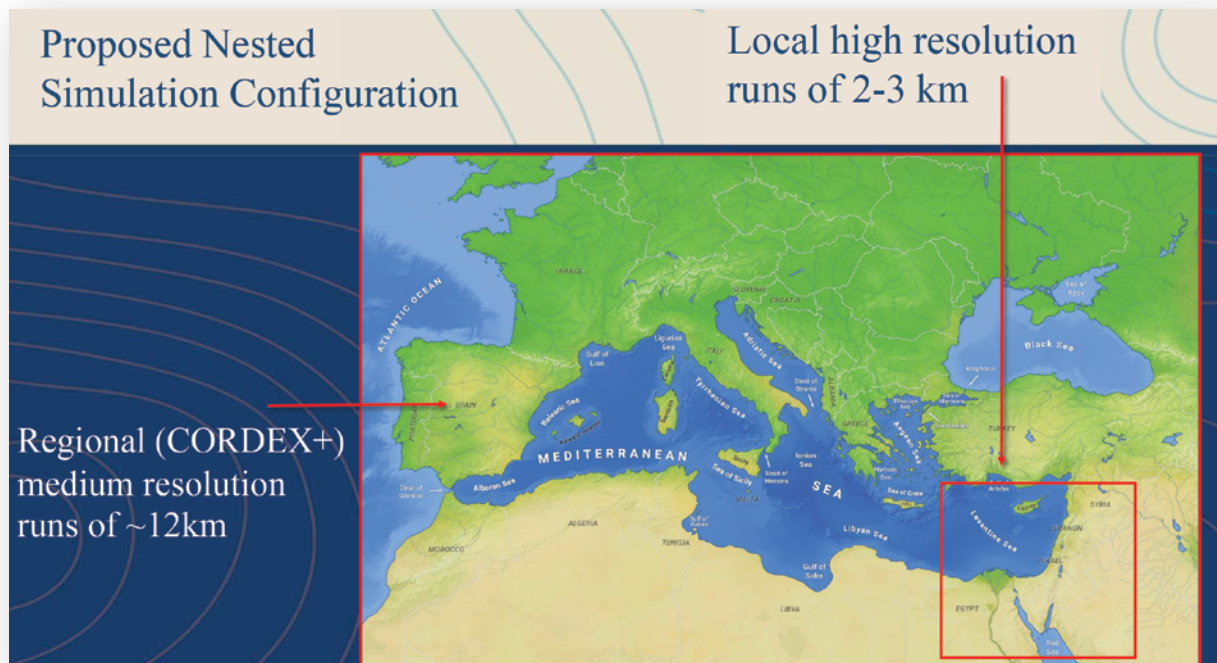
כך למשל על פי מודלים גסים אלו, באקלים הנוכחי אמורה הטמפרטורה הממוצעת בצוהריים במהלך הקיץ בירושלים להיות כ־36 מעלות צלזיוס, אך בפועל נמדדות לרוב 29 מעלות צלזיוס; על פי ההדמיות של המודלים יורדים בירושלים במהלך החורף 250 מילימטרים גשם בלבד, ואילו בפועל כמות המשקעים השנתית היא כ־550 מילימטרים.

איור 1 מלמד בבירור כי כדי להציג במדויק את עיקרי המבנה הטופוגרפי של ישראל, הכרחי ליצור הדמיה של האקלים בה ברזולוציה של קילומטרים מועטים (2.5 קילומטרים לערך). ביצוע הדמיות ברזולוציה כה גבוהה, המסתייעת בטכניקות דינמיות של ירידה בסקאלה (downscaling), מצריך משאבי חישוב נכבדים, שנכון להיום אינם עומדים לרשות המוסדות להשכלה גבוהה או רשות לאומית כלשהי בישראל. בהיעדר משאבים אלו כמעט כל ההערכות בנוגע לשינויי האקלים המבוצעות כיום בארץ מבוססות על מודלים גסים שמפעילות מדינות באירופה, שלא כוילו כדי להתאימם לאקלים ולטופוגרפיה בישראל. ואולם, היות שלאחרונה (לקראת IPCC AR6) נוצרה המערכת החדשה של הדמיות כלל-עולמיות (CMIP6 ומסגרת המידול ICON), ניתן כעת לבצע ירידה דינמית בסקאלה ברזולוציה גבוהה כדי לבנות בסיס ידע שבעזרתו נוכל להיערך לפיתוח פתרונות נאותים לשינויי האקלים בישראל, בכל האמור בתשתיות, במדיניות ובטכנולוגיות.

כוח חישוב וצורכי אחסון

מן האמור לעיל עולה בבירור כי כדי לגבש תוכניות לאומיות להתמודדות עם שינויי האקלים ולהסתגלות אליהם, כדי להתוות מדיניות נאותה בהקשר זה ואת האמצעים למימושה, וכדי להקצות את המשאבים הדרושים לכך בצורה אופטימלית, נחוצים תרחישי אקלים מפורטים לטווח הארוך, ובכלל זה כימות השינויים הצפויים בכל רכיב גאוגרפי וכן כימות אי-הוודאות בתחזית.

כימותים מעין אלו אפשר לבצע רק על סמך מכלול של הרצות מודל הנוגע לאקלים האזורי, דהיינו: עשרות הרצות של מודלים ברזולוציה גבוהה אשר מאפשרים להציג את יריעת התרחישים העתידיים האפשריים בשינויי האקלים.



איור 2. הצעה לקונפיגורציה של הדמיה דו-שלבית (על פי הצעת השירות המטאורולוגי הישראלי): באמצעות הרצות אזוריות מורחבות של CORDEX בסריג של 12 קילומטרים לערך יתקבלו הגבולות המתאימים להרצות מקומיות ברזולוציה גבוהה בסריג של 2-3 קילומטרים.

כדי ליצור מכלול של הרצות תרחישים שונים ברזולוציה גבוהה – ולכך נחוצים שני תרחישי SSP (Shared Socioeconomic pathways של IPCC) לפחות, ו-5-10 הרצות לפחות לכל תרחיש – יש צורך בביצוע המערך המינימלי הזה של הדמיות דו-שלביות:

- < 10 הרצות של מודל אזורי (המבוסס על מודלים אקלימיים כלל-עולמיים) – במרחב מורחב של CORDEX – בסריג ברזולוציה של כ-12 קילומטרים (ראו איור 2).
- < 10 הרצות של מודל מקומי (המבוסס על הדמיות אזוריות) – במרחב המרוכז סביב ישראל – בסריג ברזולוציה של קילומטרים מעטים (2.5 קילומטרים לערך).
- < לפי פרוטוקול הניסויים של CORDEX, כל הדמיה מורצת תחילה מאמצע המאה העשרים (כדי לוודא את תנאי האקלים בעבר ובהווה), ולאחר מכן היא מורצת קדימה – עד סוף המאה העשרים ואחת. מומלץ לבצע בכל הרצה הדמיה של כ-150 שנה בסך הכול.

ועדת ההיגוי של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים להתמודדות עם משבר האקלים | נייר עמדה מספר 1 | מאי 2022 הערכת צורכי כוח החישוב הלאומי הנחוץ לחיזוי האקלים בישראל - סקירה והמלצות

במונחי כוח חישוב, אלה הדברים הנחוצים לביצוע הדמיות אלו:

< הרצה של מודל אזורי ל-150 שנה במרחב מורחב של CORDEX בסריג של 12 קילומטרים מצריכה מחשוב עתיר ביצועים (HPC; מע"ב) המצויד בכ-350 ליבות במשך 12 חודשים, כלומר 3,500 ליבות כאלו עבור 10 הרצות על פני 12 חודשים.

< הרצה של מודל מקומי ל-150 שנה במרחב המרוכז סביב ישראל בסריג של 2-3 קילומטרים מצריכה כ-1,000 ליבות מע"ב במשך 12 חודשים, כלומר 10,000 ליבות מע"ב עבור 10 הרצות על פני 12 חודשים.

< 1,500 ליבות מע"ב נוספות על פני 12 חודשים ישמשו לשם יצוא של המודלים ובחינתם.

< בסך הכול, כוח החישוב המינימלי הדרוש לביצוע מערך ההרצות הנחוץ הוא 15,000 ליבות מע"ב לערך לשנה (שהן כ-30,000 ליבות אם ההרצות מרוכזות בתוך שישה חודשים, וכן הלאה).

< יש לשים לב שההדמיות הללו מצריכות פעולה מסונכרנת של אלפי מעבדים בד בבד, ולפיכך נחוצה ארכיטקטורת מחשב המותאמת לחישוב מקביל (למשל, רשת Infiniband או רשת דומה).

נוסף על כוח החישוב הזה יהיה צורך בנפחי אחסון בהיקף של 4 פטה בייט. הדבר הכרחי לשם אחסון הקלט והפלט כחלק מתהליך החישובים האקלימיים עצמו, וניהול בסיס נתונים לטווח ארוך שיכלול את המרכיבים האלה:

< תחזיות בנוגע לפרמטרים מטאורולוגיים קרוב לקרקע נחוצות כדי לערוך חישובים ולבנות את האינדקסים האקלימיים השונים עבור מגזרים שונים, אינדקסים אשר ישמשו בסיס לגיבוש דרכי הסתגלות לשינויי האקלים.

< תחזיות תלת-ממדיות בנוגע לאטמוספירה ישמשו במחקרים בעניין שינויים בתהליכים האטמוספריים השונים.

< וחשוב לא פחות - מאגר הנתונים והתוצאות הזה שיופק בעזרת המודל יכיל מידע עשיר עבור מחקרי האקלים והסביבה, שיהיה זמין למוסדות ההשכלה הגבוהה ולגופי מחקר אחרים, ארציים ובין-לאומיים.

ואחרון, יש לשים לב שתחזיות אקלימיות ברזולוציה גבוהה, בדומה לאלו שנדונו כאן, צריך לעדכן רק אחת לכמה שנים. לכן תוכנית המחשוב המוצעת יכולה להיות שיתופית ולשמש לצורכי מחקרי האקלים שמבצעים המוסדות האקדמיים. כך יתרחב במידה ניכרת המחקר בישראל על שינויי האקלים.

עלות משוערת ודרך פעולה

לשם המחשה, עלות ליבת מחשב מבוססת-ענן עשויה לנוע בין 30 דולר לחודש ל-50 דולר לחודש, והעלות השנתית של 15,000 ליבות מע"ב, בהיקף המינימלי המצוין לעיל לקבלת התחזית הלאומית הראשונה למדינת ישראל, צפויה להיות כ-10 מיליון דולר. תחזית זו צריכה להתעדכן כל כחמש שנים, והדבר ידרוש המשך השקעה לאורך זמן של כ-2 מיליון דולר לשנה וצריכה לכלול את צורכי שמירת הנתונים לאורך זמן ולשימוש נרחב בהם.

היות שקיימות לא מעט אפשרויות בהקשר זה, עשויה עלותה מהשוערת של תוכנית המחשוב המוצעת לנוע בטווח רחב למדי. אם בונים מרכז מחשוב פיסיקלי, כולל תחזוקת התשתית, ההשקעה בצוות התמיכה עשויה להיות נכבדה, והיא תלויה במיקום ובתמיכה הזמינים.

חלופה יעילה כיום היא כוח חישוב מבוסס-ענן. גם כאן קיימות אפשרויות שונות (למשל פלטפורמת הענן של HP Greenlake). כיום הדרך היעילה ליישום התוכנית היא השתלבות במחשב הלאומי לפיתוח בינה מלכותית ומדע הנתונים, המצוי בשלבי הקמה, בשילוב עם הקמת ועדת היגוי מדעית ושיתוף פעולה הדוק בין האקדמיה לשירות המטאורולוגי ולגופים הצורכים את נתוני האקלים.