נגה
ניהול
מערכת
החשמל

קריטריון האמינות לתכנון מערכת ייצור החשמל לטווח ארוך

אייר תשפ"א - מאי 2021

קריטריון האמינות לתכנון מערכת ייצור החשמל לטווח ארוך

העבודה הוכנה ע"י: עוזי דנה, רועי מאיר,אושרי גולוב, דוד אפללו, יואל שטרנטל, יעקב (קובו) ניומן

ד"ר ולדימיר גורביץ

מאשר: ד"ר עוזי זרחיה

אייר תשפ"א - מאי 2021

תוכן העניינים

עמוד

תקציר מנהלים 4

1. מבוא 6

2. הנחות יסוד 8

3. קריטריוני אמינות לתכנון מערכת הייצור 9

4. קריטריון אמינות בשימוש בתפ"ט 11

5. יתרונות השימוש בקריטריון אמינות הסתברותי 13

6. איבוד משמעות העתודה המותקנת בעידן האנרגיה המתחדשת 17

7. חשיבות תמהיל יחידות הייצור במערכת בעידן האנרגיות המתחדשות 19

8. מתודולוגיה לחישוב קריטריון האמינות 24

9. קריטריון האמינות ובדיקות רגישות 29

10. סיכום 38

נספח 39

תקציר מנהלים

- שינויים רבים המתרחשים במשק החשמל בשנים האחרונות מחייבים בדיקת הצורך לעדכון המתודולוגיה לקביעת קריטריון האמינות ובהתאם, לעדכון הערך האופטימאלי של הקריטריון האמינות לתכנון מערכת הייצור.
- החלטת ממשלת ישראל להגדיל באופן משמעותי את היקף הייצור באנרגיה מתחדשת על ידי הוספה מסיבית של תחנות סולריות מחייב שילוב של מתקני אגירת אנרגיה במערכת בהיקפים גדולים.
- אפשרות לשפר את אמינות המערכת על ידי הוספת מתקני אגירת אנרגיה כיחידות ייצור המיועדות לספק עומסי שיא בעלות נמוכה, מעלה את החשיבות לעדכון קריטריון האמינות לתכנון המערכת.
- עתודה מותקנת הינו מדד נקודתי על ציר הזמן שאינו תלוי בזמינות יחידות הייצור, בפרופיל הגנרציה של אמצעי ייצור באנרגיה מתחדשת ובפרופיל עקום הביקוש לאורך השנה. השימוש בעתודה המותקנת בתור קריטריון האמינות יכול להביא למסקנות שגויות בהקשר לאמינות ההספקה ולתכנון לקוי של מערכת הייצור.
- תכנון מערכת הייצור באמצעות קריטריון אמינות הסתברותי כמו **LOLH** לוקח בחשבון את כל הנקודות החיוניות, כפי שמפורט במסמך, בתהליך האופטימיזציה וזאת הסיבה שהוא הקריטריון המקובל בעולם לתכנון המערכת.
- נבנתה בעבודה זו מתודולוגיה מפורטת לחישוב קריטריון האמינות לתכנון מערכת הייצור לטווח ארוך. המתודולוגיה מתארת מנגנון ממוחשב לעדכון קריטריון האמינות במידה ויהיה צורך בכך.
- הקריטריון האמינות ששימש בשש השנים האחרונות לתכנון פיתוח מערכת ייצור החשמל בישראל הינו חסם עליון של 2.9 שעות בשנה של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש לחשמל.
- הערך האופטימאלי המעודכן שהתקבל בעבודה זו, מהיבט כלכלי-חברתי, של קריטריון האמינות לתכנון מערכת ייצור החשמל בעזרת מודל **EGEAS** (המשמש לאופטימיזציה של פיתוח המערכת לטווח ארוך) הינו כ- **1.8 שעות בשנה לכל היותר של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש** וזאת בהנחת עלות האנרגיה הבלתי מסופקת של כ-30 דולר לקוט״ש.

- בנוסף, נבדקה הרגישות של הערך האופטימאלי של קריטריון האמינות לשינוים בפרמטרים עיקריים כגון עלות האנרגיה הבלתי מסופקת, עלות ההקמה וזמינות של יחידות הייצור המיועדות להספקת שיאי העומס ושינוי בתחזית הביקוש לחשמל.

1. מבוא

תכנון משקי החשמל מתבצע תוך עמידה בקריטריון אמינות הספקת החשמל שנקבע בהתאם להיבט הכלכלי-חברתי. עדכון קריטריון האמינות נדרש כאשר מתרחשים שינויים מהותיים, קרי בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת למשק (בעקבות העלייה ברמת החיים והתלות הגוברת של הצרכנים בהספקה אמינה של אנרגיה חשמלית), בנתונים טכנו- כלכליים של יחידות הייצור הקיימות והמועמדות לפיתוח מערכת ייצור החשמל, בשער הניכיון ובצורת עקום הביקוש.

ככל שהיקף הייצור באנרגיות מתחדשות גובר, גדלה החשיבות בהערכה מדויקת של השפעת משאבים אלה על אמינות הספקת החשמל.

החלטת ממשלת ישראל להגדיל באופן משמעותי את היקף הייצור בתחנות סולריות מביאה לשינוי משמעותי במבנה משק החשמל. כמו כן, חדירה גורפת של תחנות סולריות מחייבת שינוי בתפעול המערכת.

כל השינויים לעיל מצריכים לעדכן את המתודולוגיה לקביעת קריטריון האמינות ובהתאם לעדכן את הערך האופטימאלי של הקריטריון לתכנון מערכת הייצור.

מתכנני המערכת בתפ"ט עושים שימוש בשיטת האופטימיזציה הכלכלית-חברתית לקביעת קריטריון האמינות לתכנון מערכת ייצור החשמל בישראל המתוארת בדו"ח RD-715 ממאי 2014. ערכו של הקריטריון לפי שיטה זו הינו פונקציה של היקף ההוצאות הנוספות הנדרשות לשיפור האמינות מחד גיסא ושל החיסכון הצפוי להיגרם בעקבות זאת בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת למשק מאידך גיסא.
בהתאם לאמור לעיל, יש צורך למצוא את הפונקציה של ההוצאות הנוספות הנדרשות במערכת הייצור להשגת חיסכון נוסף בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת כתלות ברמת האמינות וזאת עבור עלות סגולית נתונה של האנרגיה הבלתי מסופקת.
בדרך כלל במערכת הייצור המאופיינת ע"י רמת אמינות נמוכה, ניתן בעקבות השקעות כספיות קטנות יחסית לשפר את רמת האמינות באופן משמעותי ואילו במערכות מאוד אמינות, כל שיפור נוסף באמינות דורש השקעות גדולות.

רמת האמינות שהחל ממנה ההוצאות הנוספות הנדרשות לשיפורה עולות על החיסכון בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת הינה הרמה שוות הערך לקריטריון האמינות האופטימאלי.

המסמך הנוכחי מציג בשלב ראשון סוגיות בקביעת קריטריון אמינות בעידן אנרגיות מתחדשות ומסביר את הסיבות המחייבות שימוש בקריטריונים הסתברותיים.

בשלב שני, נבנתה מתודולוגיה מפורטת לחישוב קריטריון האמינות לתכנון מערכת הייצור לטווח ארוך. המתודולוגיה מתארת מנגנון ממוחשב לעדכון קריטריון האמינות במידה ויהיה צורך בכך.

בשלב הסופי, בהתבסס במתודולוגיה לעיל, חושב קריטריון האמינות האופטימאלי מההיבט הכלכלי-חברתי לתכנון מערכת ייצור החשמל באמצעות מודל **EGEAS*** המשמש את תפ"ט לאופטימיזציה של פיתוח מערכת הייצור לטווח ארוך.

בנוסף, בוצעה בחינת הרגישות של קריטריון האמינות לשינויים בגורמים בעלי השפעה מהותית על בחירתו.

*** תוכנת EGEAS (Electric Generation Expansion Analysis System) פותחה בארה"ב ע"י EPRI ו-Stone&Webster לצורך אופטימיזציה של פיתוח מערכת הייצור.**

2. הנחות יסוד

תחזית הביקוש לטווח ארוך: תחזית הביקוש לטווח ארוך מבוססת על נתוני המחלקה לסטטיסטיקה וחקר שווקים, עדכון מ- 8.2017. תרחיש זה מניח גידול שנתי של 3.5% בתמ"ג ותנאי מזג אוויר קיצוני – גידול שנתי בביקוש של כ- 2.8% (ראה נספח א').

שילוב אמצעי הייצור באנרגיה מתחדשת במערכת החשמל: עלייה הדגרתי בייצור באנרגיה מתחדשת עד לשיעור של 30% בשנת 2030 ושמירה על היקף זה (באחוזים) בשנים לאחר מכן.

מועמדים לפיתוח: מחז"מ – 670MW, LMS - 120MW , סוללות – 100MW.
הנתונים הטכנו-כלכליים של המועמדים לפיתוח ששימשו אותנו לביצוע עבודה זו מתוארים בטבלה מס' 1. נתונים אלו התקבלו מד"ר אלכסנדר ליטינצקי, מנהל מחלקת פיתוח טכנולוגיות אנרגיה, תפ"ט.

טבלה מס' 1: נתונים טכנו כלכליים של המועמדים לפיתוח

יחידה	הספק ברוטו	הספק מזערי	דלק	עלות הקמה	צריכה עצמית	תצרוכת חום נקובה ברוטו	ימי אחזקה בשנה	EUOR	עלות שנתית של תפעול ותחזוקה (O&M)	
									קבועה	משתנה
	MW	%		$/kW	%	Kcal/kWh		%	$/kW	$/MWh
מחז"מ עם ט"ג תעשייתית בטכנולוגיה H, טכנולוגיה מוכחת	670	40	גז טבעי	1070	2.5	1343	20	4	38.4	3.57
ט"ג סילונית	120	40	גז טבעי	780	1.0	1954	10	4	16.0	5.2
סוללות* 4 שעות אחסון אנרגיה	100	0	-	*1200	-	87% (יעילות)	10	2	*18.0	-

* הונח אורך חיים של 16 שנה לסוללות. עלויות הקמה ותפעול שבטבלה נכונים לשנת 2021. הונחה ירידה שנתית מתמדת בעלות ההקמה של הסוללות כשעלות זו יורדת לכ- 680 דולר לקוו"ט מותקן בשנת 2030. הונחה עלות תפעול ותחזוקה שנתית שווה ערך לכ- 1.5% מעלות ההקמה של הסוללות באותה שנה.

3. <u>קריטריוני אמינות לתכנון מערכת הייצור</u>

במשקי חשמל בעולם משתמשים במדדי אמינות שונים על מנת לקבוע קריטריוני אמינות המשמשים לתכנון מערכת הייצור. קריטריון האמינות הוא חסם למדד אמינות שנקבע, שאין לחרוג ממנו בכל שנה משנות התקופה הנבדקת.

Loss of Load Hours – **<u>LOLH</u>**

LOLH הוא מדד הסתברותי הנותן ביטוי למספר השעות הצפוי של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש. בכל נקודת זמן ניתן לחשב את ההסתברות לכך שיכולת הייצור של המערכת תהיה נמוכה מהביקוש הכולל החזוי. מחישוב הסתברות זו עבור כל העומסים השעתיים לאורך השנה, מתקבל המדד של מספר צפוי של שעות שבהן לא ניתן לספק את מלוא הביקוש השעתי לחשמל במהלך השנה.

חסם עליון ל-LOLH הינו קריטריון הסתברותי נפוץ לתכנון מערכות ייצור חשמל במדינות שונות בעולם והוא בשימוש כיום בארץ.

$$\mathrm{LOLH} = \sum_{ih=1}^{T} \sum_{j \in \Omega_{ih}} P[C_{ih}^{j} < L_{ih}]$$

כאשר

- T - מספק שעות בשנה
- ih - מספר שעה
- L_{ih} - עומס שעתי בשעה ih
- Ω_{ih} - קבוצת ערכים אפשריים של סך הספק מערכתי זמין בשעה ih
- j - מספר סידורי של אלמנט בקבוצת Ω_{ih}
- C_{ih}^{j} - סך הספק זמין אפשרי בשעה ih בהתחשב במגבלות תפעוליות
- P - פונקצית הסתברות

Loss of Load Expectation – **LOLE**

LOLE הוא מדד הסתברותי הנותן ביטוי למספר הימים הצפוי בתקופה מוגדרת בה עומס השיא היומי עולה על כושר הייצור הזמין.

בארה"ב מקובל עד היום להתבסס על הקריטריון "יום אחד בעשר שנים".

Expected Unserved Energy – **EUE**

EUE הוא מדד הסתברותי הנותן ביטוי לאנרגיה הבלתי מסופקת הצפויה במערכת הייצור במצבים של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש (בעקבות תקלות ביחידות הייצור או מגבלות תפעוליות).

$$\mathrm{EUE} = \sum_{ih=1}^{T} \sum_{j \in \Omega_{ih}} \{\max\left(L_{ih} - C_{ih}^{j}, 0\right) * P[C_{ih}^{j}]\}$$

Normalized Expected Unserved Energy – **NEUE**

NEUE הוא מדד הסתברותי הנותן ביטוי ליחס בין האנרגיה הבלתי מסופקת הצפויה במערכת הייצור (EUE) לבין הייצור הכולל השנתי הנדרש במערכת על פי תחזית הביקוש.

$$\mathrm{NEUE} = \frac{EUE}{\sum_{ih=1}^{T} L_{ih}}$$

Installed Reserve – **IR**

IR (עתודה מותקנת) הינו מדד דטרמיניסטי אשר מחושב כיחס בין ההספק המותקן במערכת ייצור החשמל לבין שיא הביקוש השנתי.

$$\mathrm{IR} = \frac{IC - \max\limits_{ih=1,T}(L_{ih})}{\max\limits_{ih=1,T}(L_{ih})}$$

כאשר

- IC - הספק מותקן

4. קריטריון אמינות בשימוש בתפ"ט

מתכנני מערכת ייצור החשמל בתפ"ט משתמשים מזה שנים רבות במודל **EGEAS** לצרכי אופטימיזציה של פיתוח מערכת הייצור לטווח ארוך. מודל זה מאפשר להשתמש במספר מדדי אמינות כגון:

- חסם עליון למספר שעות של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש (Loss of Load Hours, LOLH)
- חסם עליון ליחס בין האנרגיה הבלתי מסופקת הצפויה (EUE) לבין הייצור הכולל השנתי הנדרש (Normalized Expected Unserved Energy, NEUE)
- חסם עליון ותחתון לעתודה מותקנת (Installed Reserve, IR)

תכנון מערכת הייצור לטווח הארוך מתבצע על ידינו באמצאות שימוש בקריטריון אמינות הסתברותי - מספר שעות של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש (LOLH). בכל נקודת זמן ניתן לחשב את ההסתברות לכך שיכולת הייצור של המערכת תהיה נמוכה מהביקוש הכולל החזוי. מחישוב הסתברות זו עבור כל העומסים השעתיים לאורך השנה, מתקבל המדד של מספר צפוי של שעות שבהן לא ניתן לספק את מלוא הביקוש השעתי לחשמל.

יש לציין ששימוש בקריטריון LOLH מאפשר להתחשב בביקוש ברמה שעתית, בניגוד לקריטריון LOLE אשר מתייחס לשיאים יומיים בלבד. שימוש ב-LOLH בבדיקות תהליכים התלויים בשעות, כגון הפעלה אופטימלית של אמצעי אגירה למניעת אנרגיה בלתי מסופקת הינו מדויק יותר מכיוון שהוא מאפשר לבצע ניתוח, אותו לא ניתן לבצע עם קריטריון שבוחן את המערכת לפי שיאי ביקוש יומיים. הדבר חשוב במיוחד במערכות עם היקף ייצור באנרגיה מתחדשת מוגבר.

קביעת הערך המספרי האופטימאלי של קריטריון האמינות כמו LOLH תלויה במספר גורמים:

- עלות האנרגיה הבלתי מסופקת למשק הלאומי
- שער הניכיון
- צורת עקום הביקוש (מקדם העומס)
- נתונים טכנו- כלכליים (כגון זמינות, שינוי עונתי בהספק התפעולי ועלויות הקמה ותפעול) של יחידות הייצור הקיימות והמועמדות לפיתוח ובמיוחד של יחידות הייצור המיועדות להספקת שיאי הביקוש

בנוסף, יש לציין שהערך המספרי של קריטריון האמינות תלוי במודלים המשמשים לתכנון לטווח ארוך. בתפ"ט חישוב קריטריון האמינות האופטימאלי מההיבט הכלכלי-חברתי לתכנון מערכת ייצור החשמל לטווח ארוך מבוצע באמצעות מודל **EGEAS** המשמש אותנו לאופטימיזציה של פיתוח מערכת הייצור.

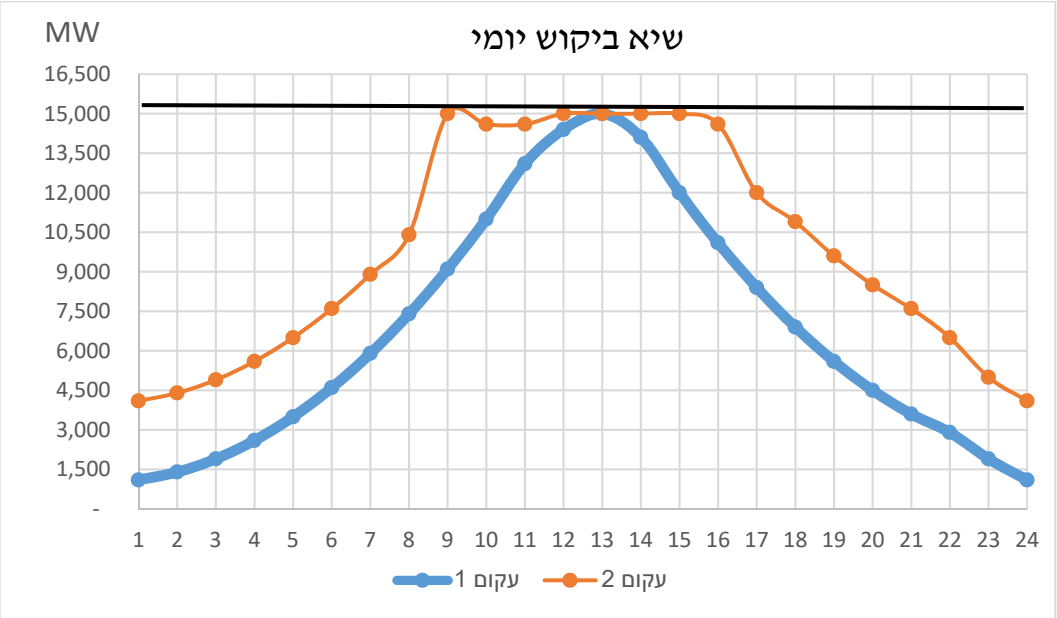
5. יתרונות השימוש בקריטריון אמינות הסתברותי

יש להדגיש בנקודה זו את יתרונות השימוש בקריטריון אמינות הסתברותי כמו LOLH לעומת מדד דטרמיניסטי כגון עתודה מותקנת:

- העתודה המותקנת מודדת את היחס בין ההספק המותקן במערכת לבין שיא הביקוש בלבד ולא מתייחסת לעומסים השעתיים של כל השעות האחרות של השנה. במילים אחרות, אין התייחסות לפרופיל הביקוש. הגדלת הביקוש בעונות שפל לא משנה את הערך השנתי של העתודה המותקנת אך מצמצמת חלונות לביצוע שיפוצים של יחידות ייצור בעונות אלו. כתוצאה מכך יגדל הצורך לביצוע שיפוצים בעונות בעלות עומס גבוה תוך הקטנת ההספק הזמין. כמובן הקטנת ההספק הזמין בשעות בהן עומס גבוה עלולה לפגוע באמינות הספקת החשמל.

מקרה נוסף לחיסרון במדידת אמינות על ידי עתודה מותקנת הנובע מהאי התחשבות בפרופיל הביקוש, ניתן לראות בדוגמא של שני עקומי ביקוש יומיים בעלי מקדם עומס שונה אחד לשני, המוצגים באיור מס' 1:

איור מס' 1 : <u>השוואה בין שני עקומי ביקוש יומיים בעלי אותו שיא עם פרופיל שונה</u>



שיאי הביקוש בשתי העקומות זהה: 15,000 מגוואט. נניח שההספק המותקן במערכת זו הינו 18,000 מגוואט, אזי העתודה המותקנת IR שווה ערך ל:

$$\mathrm{IR}(\%) = \frac{18{,}000 - 15{,}000}{15{,}000} * 100 = 20\%$$

יחד עם זאת, ההסתברות לאי הספקת מלוא הביקוש יותר גבוהה בעקום הביקוש 2 בעל מקדם עומס גבוה יותר. כדי להמחיש זאת, נניח מערכת בעלת סיכוי שההספק הזמין בה יהיה 14,500 מגוואט (עקב תקלות ו/או יחידות ייצור הנמצאות בתחזוקה). באירוע זה:

- במקרה של עקום 2, יתרחשו 7 שעות של אי הספקת מלוא הביקוש (בין השעות 9:00 -16:00).
- במקרה של עקום 1, תהיה שעה אחת בלבד של אי הספקת מלוא הביקוש (שעה 13:00).

- ערכי זמינות (ימי אחזקה ושיעורי הפסקות מאולצות EFOR/FOR) של יחידות הייצור הקיימות והמועמדות לפיתוח לא נלקחים בחשבון בחישוב העתודה. **מערכת עם עתודה מותקנת יותר גדולה לא בהכרח הינה המערכת עם אמינות טובה יותר** (כפי שבאופן טבעי ניתן לצפות).

לשם המחשה, נציג דוגמא פשוטה של משק עם שתי יחידות ייצור, ונבדוק את הערך המתקבל עבור שלושה מדדים: מדד **עתודה מותקנת** וכן שני מדדים שלוקחים בחשבון את זמינות יחידות הייצור:

- LOLH (Loss of Load Hours)
- EUE (Expected Unserved Energy)

נניח, בדוגמא זו תקופה של שעה אחת בלבד עם ביקוש של 90 MW,

וזאת, כפי שצוין, במערכת הכוללת שתי יחידות ייצור בלבד:

<u>מקרה א'</u> (שיעור תקלות נמוך) :

- יחידה U_1 : הספק של 50 MW ו- FOR שווה ל- 20%
- יחידה U_2 : הספק של 70 MW ו- FOR שווה ל- 10%

ההספק המותקן C שווה ערך ל:

$$C = 70 + 50 = 120\ \mathrm{MW}$$

העתודה המותקנת IR שוות ערך ל:

$$IR = \frac{120 - 90}{90} * 100 = 33\%$$

כעת נציג מדדים שלוקחים בחשבון את הזמינות של יחידות הייצור.

על מנת לחשב מדדים מסוג זה , יש להתחשב בארבעת המצבים האפשריים של מערך הייצור:

מצב		1	2	3	4
יחידות זמינות		אף יחידה	U_1 בלבד	U_2 בלבד	U_1 ו-U_2
סך הספק		0	50	70	120
הסתברות למצב זה		0.02	0.08	0.18	0.72

$$LOLH = 0.02 + 0.08 + 0.18 = 0.28$$
$$EUE = 90*0.02+40*0.08+20*0.18=8.6\ MWh$$

<u>מקרה ב'</u> (שיעור תקלות גבוה) :

- יחידה U_1 : הספק של 50 MW ו- FOR שווה ל- 30%
- יחידה U_2 : הספק של 80 MW ו- FOR שווה ל- 20%

ההספק המותקן C שווה ערך ל:

$$C = 80 + 50 = 130\ MW$$

העתודה המותקנת IR שווה ערך ל:

$$IR = \frac{130 - 90}{90} * 100 = 44\%$$

בשיטה דומה ארבעת המצבים האפשריים במקרה ב' הינם כדלקמן:

מצב	1	2	3	4
יחידות זמינות	אף יחידה	U_1 בלבד	U_2 בלבד	U_1 ו-U_2
סך הספק	0	50	80	130
הסתברות למצב זה	0.06	0.14	0.24	0.56

$$LOLH = 0.06 + 0.14 + 0.24 = 0.44$$
$$EUE=90*0.06+40*0.14+10*0.24=13.4\ MWh$$

למרות שהעתודה המותקנת במקרה ב׳ יותר גבוהה מזו של מקרה א׳ רמת אמינות הספקת החשמל במקרה ב׳ פחות טובה.

- שינויים עונתיים בהספק התפעולי של המחז״מים וטורבינות הגז לא נלקחים בחשבון בחישוב העתודה.

ההספק התפעולי של יחידות אלו יורד בכ- 10% בחודשי הקיץ.

אם ניקח לדוגמא את שנת 2030, ההיקף הצפוי של יחידות מחז״מים וטורבינות גז במערכת שווה ערך לכ- 14,000 מגוואט. היקף זה מבוסס על היחידות הקיימות והמתוכננות להשתלב במערכת על פי הנחות היסוד הנוכחיות.

ההספק התפעולי של יחידות אלו אמור לרדת בכ- 1,400 מגוואט בחודשי הקיץ (כולל בעת התרחשות שיאי הביקוש). הירידה בהספק התפעולי בקיץ הינה משמעותית וגדלה משנה לשנה בהתאם להיקף של יחידות מחז״מים וטורבינות גז שמתווספות למערכת.

בניגוד לקריטריון דטרמיניסטי כמו עתודה מותקנת, שינויים אלו נלקחים בחשבון בתכנון המערכת על ידי שימוש בקריטריון אמינות הסתברותי.

6. איבוד משמעות העתודה המותקנת בעידן האנרגיה המתחדשת

התרומה של אמצעי הייצור באנרגיה מתחדשת לאמינות המערכת היא פונקציה חזקה של פרופיל הגנרציה שלהם. הייצור הסולרי, שהוא עיקר הייצור באנרגיה מתחדשת המתוכנן להשתלב במערכת, מאופיין ע"י מקדם יכולת נמוך וייצור בשעות בעלות קרינה סולרית בלבד. כתוצאה מכך, בהנחת שילוב רחב של יחידות סולריות במערכת, התחשבות בהספקן בחישוב העתודה המותקנת הינה חסרת משמעות בעידן שתוספת הגנרציה למניעת חוסר הספקה נדרשת בעיקר בשעות הערב כשיחידות הסולריות כמעט ולא תורמות לאמינות המערכת.

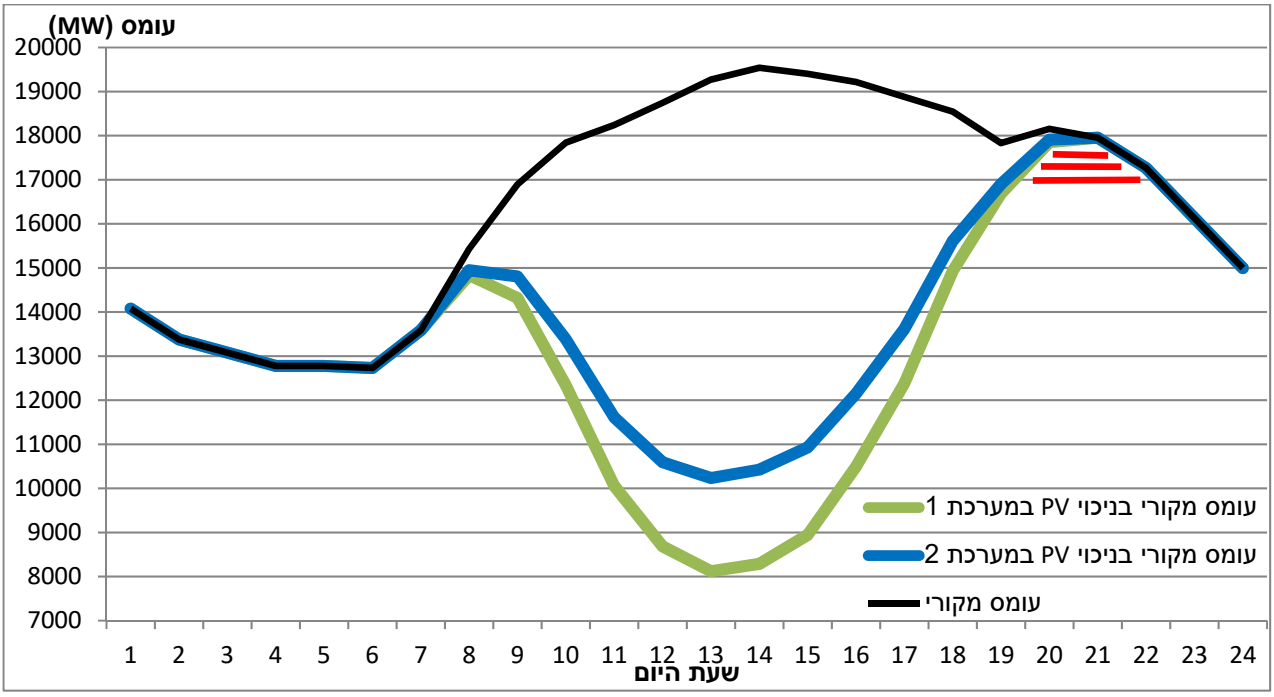
כדי להדגים את הנקודה , נניח שתי מערכות עם היקפים שונים של ייצור באנרגיה מתחדשת:

מערכת 1 : 30% ייצור באנרגיה מתחדשת בשנת 2030

מערכת 2: 25% ייצור באנרגיה מתחדשת בשנת 2030

איור מס' 2 מתאר את הביקוש הצפוי במערכת ביום שמתרחש שיא הביקוש בקיץ של שנת 2030 על פי תחזית הביקוש הנוכחית לפני ולאחר ניקוי התרומה של יחידות PV במערכות 1 ו-2 בהתאמה.

איור מס' 2 : הביקוש הצפוי ביום התרחשות שיא הביקוש ב-2030 לפני ולאחר ניקוי התרומה של יחידות PV במערכות 1 ו-2



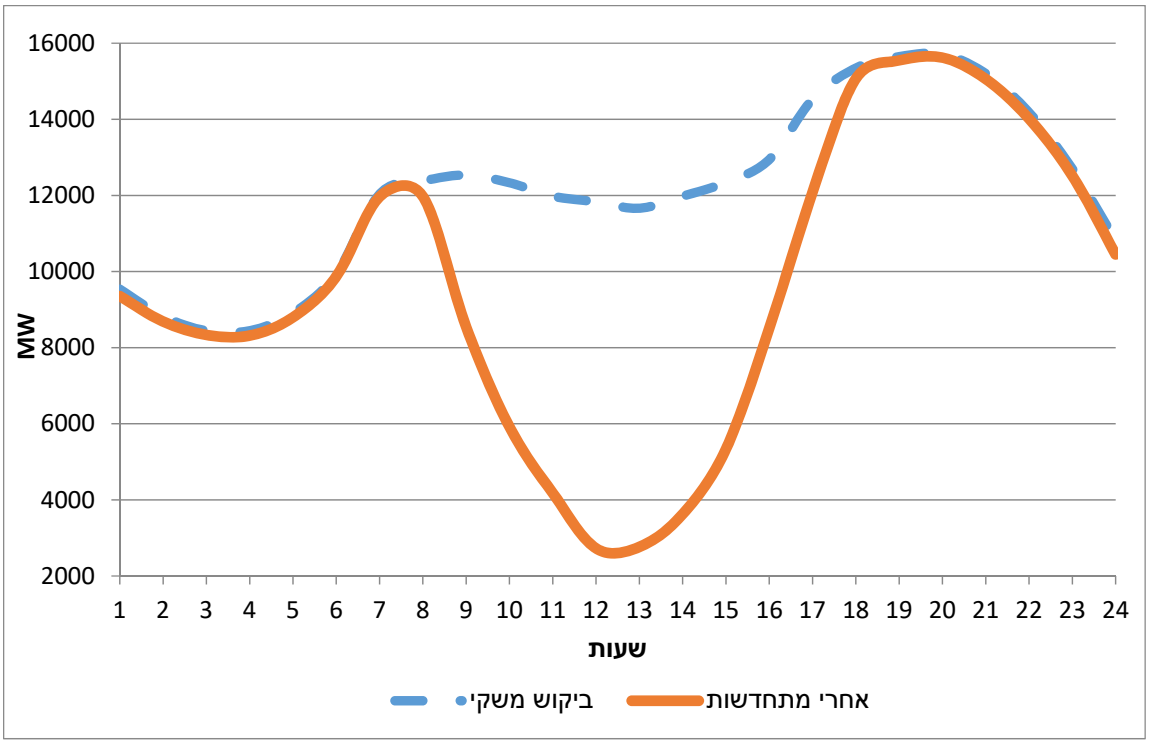
בהתחשב בתפוקה של יחידות PV, במערכת 1 נדרשת הוספה של כ- 2,800 מגוואט ביחידות PV יחסית למערכת 2 בשנת 2030.

כפי שניתן לראות באיור מס' 2, הגדלת ההיקף של יחידות PV במערכת 1 יחסית למערכת 2 כמעט ולא תורמת לשיפור אמינות המערכת לאחר שעות הצהריים המאוחרות ובשעות הערב שהן השעות שבגללן נדרשת תוספת גנרציה על מנת למנוע שעות חוסר הספקה. יחד עם זאת, העתודה המותקנת במערכת 1 גדולה בכ- 2800 מגוואט מהעתודה המותקנת במערכת 2 וזאת כשאמינות ההספקה של שתי המערכות כמעט זהה.

7. חשיבות תמהיל יחידות הייצור במערכת בעידן האנרגיות המתחדשות

לאור הייצור המוגבר באנרגיה מתחדשת בהתאם ליעד של 30%, בחירה נכונה של תמהיל יחידות הייצור במסגרת תוכנית הפיתוח הופכת להיות קריטית לתפעולה התקין של המערכת. עקום הייצור השיורי לאחר הפחתת האנרגיות המתחדשות (Residual Load) מתאפיין בשינויים חדים ומהירים והוא מקבל את צורת ה- Duck Curve (ראה איור מס' 3).

איור מס' 3: עקום ביקוש יומי אופייני בחורף בשנת 2030



בשעות עליית השמש קיימת ירידה חדה בעקום, שנובעת מכניסה של אמצעי ייצור פוטוולטאיים. בשנת 2030 ניתן לראות שקצב הירידה האופייני לשעות הללו הוא 8000-9500 מגוואט בארבע שעות. בשעות הללו, מנהל המערכת יידרש להוריד את רמת העמסה בחלק גדול מיחידות הייצור שבפעולה ולהפסיק יחידות אחרות.

בשעות ירידת השמש קיימת עלייה חדה בעקום שמתרחשת עם הירידה בהיקף הקרינה בשעות השקיעה. גם כאן, קצב שינוי העומס הוא גדול ומגיע לכ- 9000-10000 מגוואט לארבע שעות בתקופת החורף, ולכ- 8000 מגוואט לארבע שעות בתקופת הקיץ. בשני המקרים שתוארו, קצב השינוי לשעה מגיע לכ- 4000

מגוואט (67 מגוואט לדקה) וככל שהביקוש יגדל עם השנים, השינויים יגדלו גם הם (5000 מגוואט לשעה בשנת 2040).

בשעות הללו מנהל המערכת יידרש לבצע מספר רב מאוד של פעולות במקביל הכוללות:

- ✓ התנעות של יחידות מחז"מ
- ✓ התנעות של ט"ג במחזור פתוח
- ✓ מעבר ממצב אגירה למצב ייצור ביחידות אגירה שאובה
- ✓ מעבר ממצב טעינה למצב ייצור בסוללות
- ✓ העלאת עומס חדה ביחידות הייצור הפחמיות המוסבות לגז

היות ועם עליית השמש יהיה צורך להפסיק את פעולתם של מחז"מים רבים, הרבה יחידות לא יהיו זמינות להתנעה בשל הדרישה הטכנית לזמן הפסקה מזערי. המשמעות היא שבזמן שקצב עליית העומס השיורי צובר תאוצה, לא כל היחידות זמינות להתנעה, מה שהופך את ההתמודדות עם השינויים החדים בעומס למורכבת הרבה יותר.

כמובן שכמות הפעולות הגדולה, שאינה מזכירה ולו במעט את התפעול הנוכחי, תגדיל את רמת הסיכון והסיכוי לכשלים במערכת הייצור. מערכת הכוללת בעיקר יחידות "כבדות" כגון מחז"מים, המתאפיינות בתהליכי התנעה ממושכים ואיטיים ובזמני הפסקה מזעריים ארוכים עשויה להוביל לאנרגיה בלתי מסופקת על בסיס קבוע.

בטבלה מס' 2 ניתן לראות דוגמא למקרה שתואר, בו המערכת לא מצליחה להתמודד עם עליית העומס שמתרחשת בשעות ירידת השמש. להלן תיאור קצר של הפעלת המערכת בשעות הרלוונטיות:

- ✓ בין השעות 8:00 ל-10:00, עם התעצמות קרינת השמש ועלייה בהיקף הייצור הסולארי מתבצעת הפסקה של 10 מחז"מים
- ✓ החל משעה 14:00, השעה בה השמש מתחילה לדעוך יחידות מחז"מ נכנסות לתהליכי ההתנעה
- ✓ בשעה 14:00 יש 6 מחז"מים שנמצאים בתהליכי התנעה
- ✓ בשעות 15:00 ו-16:00 יש 12 מחז"מים שנמצאים בתהליכי התנעה
- ✓ בשעות לעיל ניתן לראות שכל הפיקרים הזמינים מופעלים
- ✓ העומס ביחידות מוסבות וקוגנרציה עולה לרמה המקסימאלית האפשרית
- ✓ יחידות אגירה שאובה עוברות ממצב שאיבה למצב ייצור

למרות כל הפעולות שנעשו, עם ירידת התפוקה ביחידות ה-PV, בשעות 17:00 ו-18:00 אין אפשרות לספק את כל הביקוש, מהסיבה שלא כל המחז"מים מצליחים לסיים את תהליכי ההתנעה ולעבור לרמות העמסה גבוהות.

טבלה מס׳ 2 : דוגמא להפעלת מערכת ביום טיפוסי בעונת מעבר (MW)

שעות	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
ביקוש משקי	9,512	10,378	10,756	10,935	10,955	10,915	11,097	11,073	11,136	11,887	12,270	12,266	12,049
אנרגיות מתחדשות	3,564	7,502	9,401	10,508	10,705	9,457	7,782	5,347	2,848	740	129	103	79
ייצור(+)/אגירה(-) אגירה שאובה	-150	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-328	0	800	800	800	800
ביקוש בניכוי מתחדשות ואגירה	6,098	3,677	2,155	1,228	1,050	2,258	4,115	6,053	8,288	10,347	11,341	11,363	11,169
יח' פחמיות מוסבות וקוגנרציה	2,547	2,005	1,379	1,379	1,379	1,379	2,005	2,005	2,416	2,849	2,845	2,005	2,005
מחז"מים בפעולה	3,552	1,671	776	568	568	583	631	1,472	3,179	3,943	6,503	8,382	8,382
מחז"מים בהתנעה	0	0	0	0	0	0	930	1,715	1,755	1,600	640	0	0
ט"ג במחזור פתוח ופיקרים נוספים	0	0	0	0	0	296	548	861	937	1,494	1,353	975	782
אנרגיה בלתי מסופקת (+)/אנרגיה מושלכת(-)	0	0	0	-719	-897	0	0	0	0	461	0	0	0

הדוגמא שהוצגה ממחישה עד כמה נושא תמהיל היחידות במערכת הייצור הופך להיות קריטי בעידן האנרגיות המתחדשות. טעות בבחירת התמהיל עשויה להוביל, בתדירות גבוהה, לאירועים של אי הספקת מלוא הביקוש או לקיטום אנרגיה מתחדשת בהיקפים נרחבים ולכן להוצאות כספיות עודפות.
הגדלת ההספק המותקן במערכת על ידי תוספת יחידות מסוג מחז"מ בלבד לא מספיק כדי למנוע התרחשות של האירועים המתוארים לעיל. תמהיל נכון המשלב יחידות ייצור פוסיליות עם אמצעי אגירה שונים בהיקפים הנדרשים, יאפשר הפעלה תקינה של המערכת.

בהתבסס על עיקרון של מתן עדיפות לאנרגיות מתחדשות בסדר ההעמסה, יש לשאוף, בתכנון המערכת לטווח ארוך, לצמצום ואף למניעה של המצבים שיאלצו את מנהל המערכת להפסיק או לצמצם את הייצור שלהן בשל סיכון ליציבות המערכת. הניסיון מראה שאת המענה לבעיה זו ניתן להבטיח רק ע"י הקמת אמצעי ייצור גמישים בתפעול ואמצעי אגירת אנרגיה.
אמצעי אגירת אנרגיה הינם חיוניים מאוד במערכת בה היקף האנרגיות המתחדשות הינו גבוה אולם בניגוד ליחידות הייצור הקונבנציונאליות אותן ניתן להפעיל כמעט ללא הגבלה, יחידות אגירה מוגבלות על ידי הקיבולת שלהן.

התחשבות בקיבולת של יחידות האגירה (מספר שעות טעינה ומספר שעות ייצור), הינה הכרחית לחישוב אנרגיה בלתי מסופקת בעיקר בשעות לקראת הערב כאשר המחז"מים עדיין בהתנעה ועד אשר הם נכנסים לעבודה מלאה. יש לציין בנקודה זו את חשיבות הביצוע של הדמיה כרונולוגית מפורטת של פעולת מערכת הייצור (בהתבסס על אלגוריתמים לאופטימיזציה) על מנת לקבוע את ההפעלה האופטימלית של מתקני אגירה במהלך היום.

בהתחשב בטבע האקראי של זמינות אנרגית שמש, קליטת הטכנולוגיה הזו בהיקף עצום במערכת המבודדת של ישראל מהווה אתגר משמעותי עבור מתכנני משק החשמל. הדבר מחייב חקירה עמוקה בכל מה שנוגע לבניית מתודולוגיה לקביעת קריטריון האמינות לתכנון מערכת הייצור.

8. מתודולוגיה לחישוב קריטריון האמינות

בעבודה הנוכחית נעשה שימוש בשיטה כלכלית-חברתית לקביעת קריטריון האמינות לתכנון מערכת ייצור החשמל בישראל. ערכו של הקריטריון לפי שיטה זו הינו פונקציה של היקף ההוצאות הנוספות הנדרשות לשיפור האמינות מחד גיסא ושל החיסכון הצפוי להיגרם בעקבות זאת בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת למשק מאידך גיסא.

במילים אחרות, יש צורך למצוא את הפונקציה של ההוצאות הנוספות הנדרשות במערכת הייצור **(RC)** להשגת חיסכון נוסף בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת כתלות ברמת האמינות **(LOLH)** וזאת עבור עלות סגולית נתונה של האנרגיה הבלתי מסופקת **(UEC).**

$$RC(LOLH, UEC) = -\left(\frac{dTC(LOLH)}{dLOLH}\right)/\left(\frac{dTUEC(LOLH, UEC)}{dLOLH}\right)$$

כאשר:

- TC - סך עלות הייצור במערכת עבור תוכנית פיתוח נתונה הכוללת את: השקעה בהקמת אמצעי ייצור, עלות דלק, עלות תפעול ואחזקה ועלויות חיצוניות.
- TUEC - סך עלות אנרגיה בלתי מסופקת שהתקבלה עבור תוכנית הפיתוח.

אפשר לכתוב את הנוסחה לעיל בצורה הבאה:

$$RC(LOLH, UEC) = -\frac{dTC(LOLH)}{dTUEC(LOLH, UEC)}$$

עבור עלות סגולית של אנרגיה בלתי מסופקת נתונה **(UEC)** מחפשים את הערך של קריטריון האמינות האופטימאלי $\mathrm{LOLH_{opt}(UEC)}$ שמוביל לפתרון המשוואה הבאה:

$$RC(LOLH, UEC) = 1$$

בדרך כלל במערכת הייצור המאופיינת ע״י רמת אמינות נמוכה, ניתן בעקבות השקעות כספיות קטנות יחסית לשפר את רמת האמינות באופן משמעותי ואילו במערכות עם אמינות גבוהה, כל שיפור נוסף באמינות דורש השקעות גדולות.

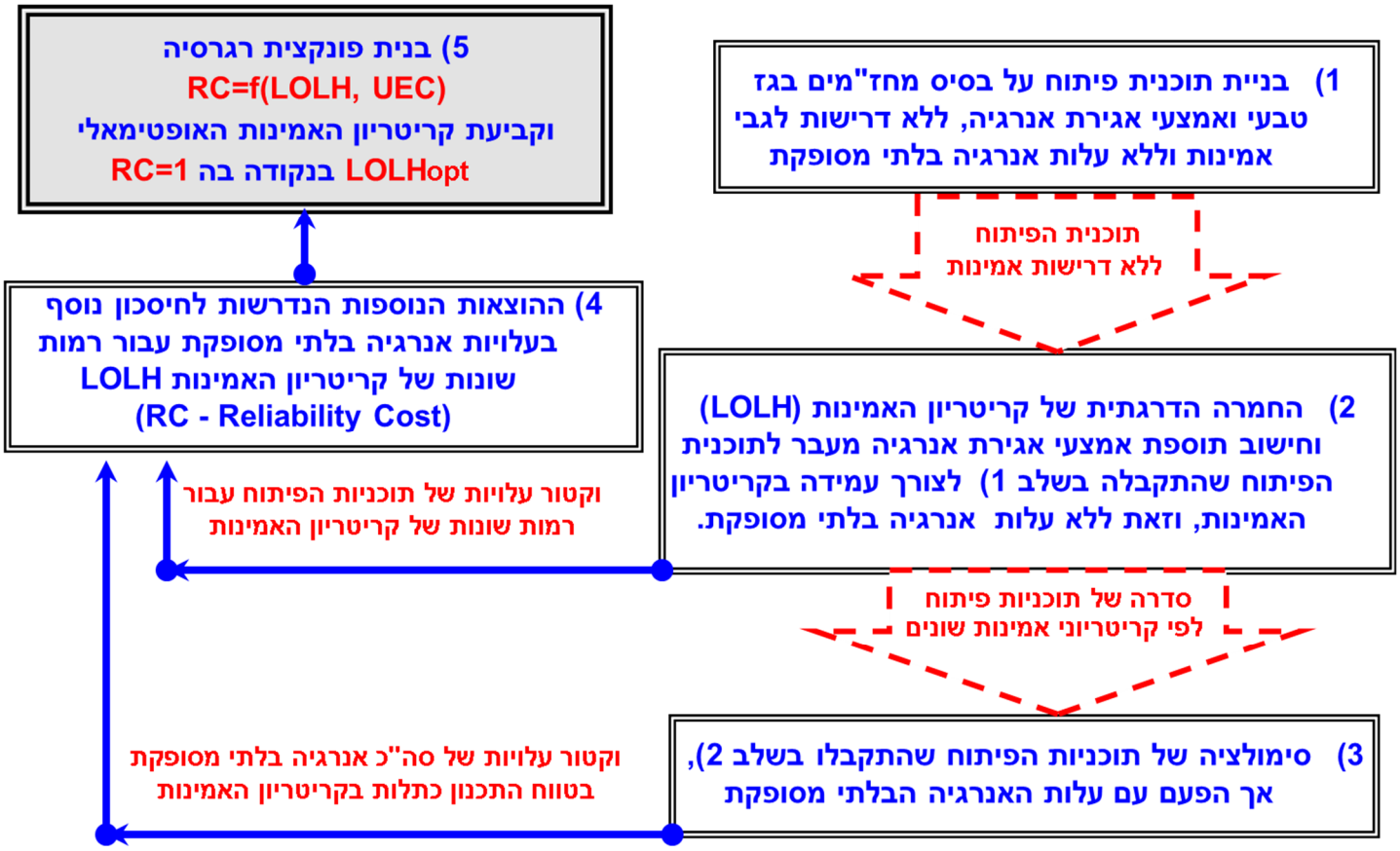
<u>רמת האמינות שהחל ממנה ההוצאות הנוספות הנדרשות לשיפורה עולות על החיסכון בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת הינה הרמה שוות הערך לקריטריון האמינות האופטימאלי.</u>

יחידות ייצור מכל סוג המתווספות למערכת הייצור תורמות לשיפור האמינות. יחד עם זאת, בעבודה זו המטרה היא קביעת <u>קריטריון האמינות</u> אשר יהווה ערך סף לתכנון של פיתוח המערכת ויסנן את כל חלופות הפיתוח שלא עומדות בערך הסף. לכן בעת ביצוע האופטימיזציה של השתלבות היחידות לצורך קביעת קריטריון האמינות, יש למנוע, ככל הניתן, אפשרות שהיחידות החדשות תשתלבנה משיקולים אחרים, כגון חיסכון בדלק או צמצום פליטות, אלא שהשתלבותן תיגרם ע״י דרישות האמינות.

שיטת חישוב קריטריון האמינות לתכנון מערכת הייצור שאומצה בעבודה הנוכחית מתוארת באיור מס׳ 4.

איור מס׳ 4

תהליך קביעת קריטריון האמינות לתכנון מערכת ייצור החשמל בעזרת מודל EGEAS



שלושת השלבים הראשונים מתבססים על סימולציות מערכת ייצור החשמל ע״י מודל EGEAS.

יש להזכיר שעל פי השיטה המוצעת בפרק זה, יש להתחשב בכל שלב בחיסכון באנרגיה הבלתי מסופקת, אך לא בצמצום המחסור (הגרעון) בהספקת החשמל אשר קורה כאשר כושר הייצור המותקן במערכת יורד קרוב לרמת הביקוש. בהקשר זה, יש להדגיש שהעלות הסגולית של האנרגיה הבלתי מסופקת לצרכן, אשר מוערכת מפעם לפעם במחקרים, שנעשים במיוחד לצורך זה, מבטאת את התלות של הצרכן באספקה אמינה של חשמל במצב כשלא קיים מחסור בכושר הייצור

שלב 1

מטרת השלב הראשון היא לקבוע את ההיקף והעיתוי של שילוב תוספות כושר הייצור לאורך טווח התכנון על מנת לספק את הביקוש לחשמל (אשר עולה משנה לשנה) ללא דרישות האמינות וגם ללא התחשבות בעלות של האנרגיה הבלתי מסופקת (UEC=0).

בשל כך, בהנחת שילוב מוגבר של יחידות מבוססות על אנרגיה סולרית במערכת, המועמדים העיקריים לפיתוח ששימשו לביצוע שלב זה בעבודה הינם:

- מחז״מים בטכנולוגיה **H** חדישים עם נצילות גבוהה המוסקים בגז טבעי
- אמצעי אגירת אנרגיה הנחוצים לתפעול המערכת (ראה בפרק 7) והמיועדים לייצר חשמל בשעות הערב (השעות שבגללן נדרשת תוספת גנרציה על מנת למנוע שעות חוסר הספקה).

שלב 2

תוכנית הפיתוח שהתקבלה בשלב הראשון (ללא דרישות האמינות) מהווה את המצב ההתחלתי עבור השלב השני שבו מגדירים את דרישות האמינות (חסם עליון על מספר שעות של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש - **LOLH**) ומחשבים, באמצעות סדרה של הרצות של המודל **EGEAS**, את התוספת של יחידות הייצור המשמשות להספקת עומסי שיא ובהתאם, תוספת העלות של תוכנית הפיתוח (לתקופה 2021-2040) הנובעת מהחמרה הדרגתית של דרישות האמינות (הקטנת ערך ה- **LOLH** מ- 6 עד ל- 0.2 שעות בשנה).

מן הראוי לציין שבתנאים של משק החשמל בארץ, עם דגש לייצור הצפוי באנרגיה מתחדשת בהיקף מוגבר, אמצעי אגירה כגון סוללות מצד אחד נדרשים להשתלב במערכת מבחינת תפעולית ומצד שני, מהווים את האמצעי הזול ביותר לשיפור אמינות המערכת בגלל עלויות הקמה נמוכות יחסית. זאת הסיבה שבהרצות שבוצעו בשלב 2 עם החמרה הדרגתית של קריטריון האמינות נעשה שימוש ביחידות אגירת אנרגיה כגון סוללות כאמצעי לשיפור האמינות. במערכות מקושרות של מדינות מפותחות מתחשבים, לעיתים קרובות, גם ביכולת לרכוש חשמל ממערכות שכנות כאמצעי לשיפור אמינות הספקת החשמל.

שלב 3

סדרת תוכניות הפיתוח שהתקבלה בשלב 2 נשארת ללא שינוי, אך כל תוכנית מחושבת שוב בהתחשב בעלות הסגולית של האנרגיה הבלתי מסופקת (**UEC**) נתונה. כתוצאה מביצוע השלב הזה, מתקבל וקטור של סה״כ עלויות האנרגיה הבלתי מסופקת עבור כל תוכנית פיתוח שהתקבלה בשלב 2.

שלב 4

על בסיס העלויות הנדרשות לשיפור רמת האמינות, שהתקבלו בשלב 2 והעלויות של האנרגיה הבלתי מסופקת, שהתקבלו בשלב 3, מחשבים את מערך **RC** עבור כל הערכים של **LOLH** ששימשו לבניית תוכניות הפיתוח בשלב 2.

שלב 5

על סמך המידע שהתקבל בשלב 4 נבנו פונקציה הרגרסיה $RC(LOLH, UEC)$ המוצגות כפונקציות החזקה

$$RC(LOLH, UEC) = a(UEC) * LOLH^{b(UEC)}$$

כפי שהוזכר לעיל, הערך האופטימאלי של קריטריון האמינות $LOLH_{opt}(UEC)$ מתקבל כאשר $RC(LOLH, UEC) = 1$

במילים אחרות, עבור ערך UEC נתון יש לפתור את המשוואה הבאה:

$$a(UEC) * LOLH^{b(UEC)} = 1$$

לאחר הפעלת פונקציית הלוגריתם משני צידי של המשוואה, מקבלים

$$ln\big(a(UEC)\big) + ln(LOLH) * b(UEC) = 0$$

ומכן מקבלים

$$LOLH_{opt}(UEC) = e^{-\frac{ln(a(UEC))}{b(UEC)}}$$

9. קריטריון האמינות ובדיקות רגישות

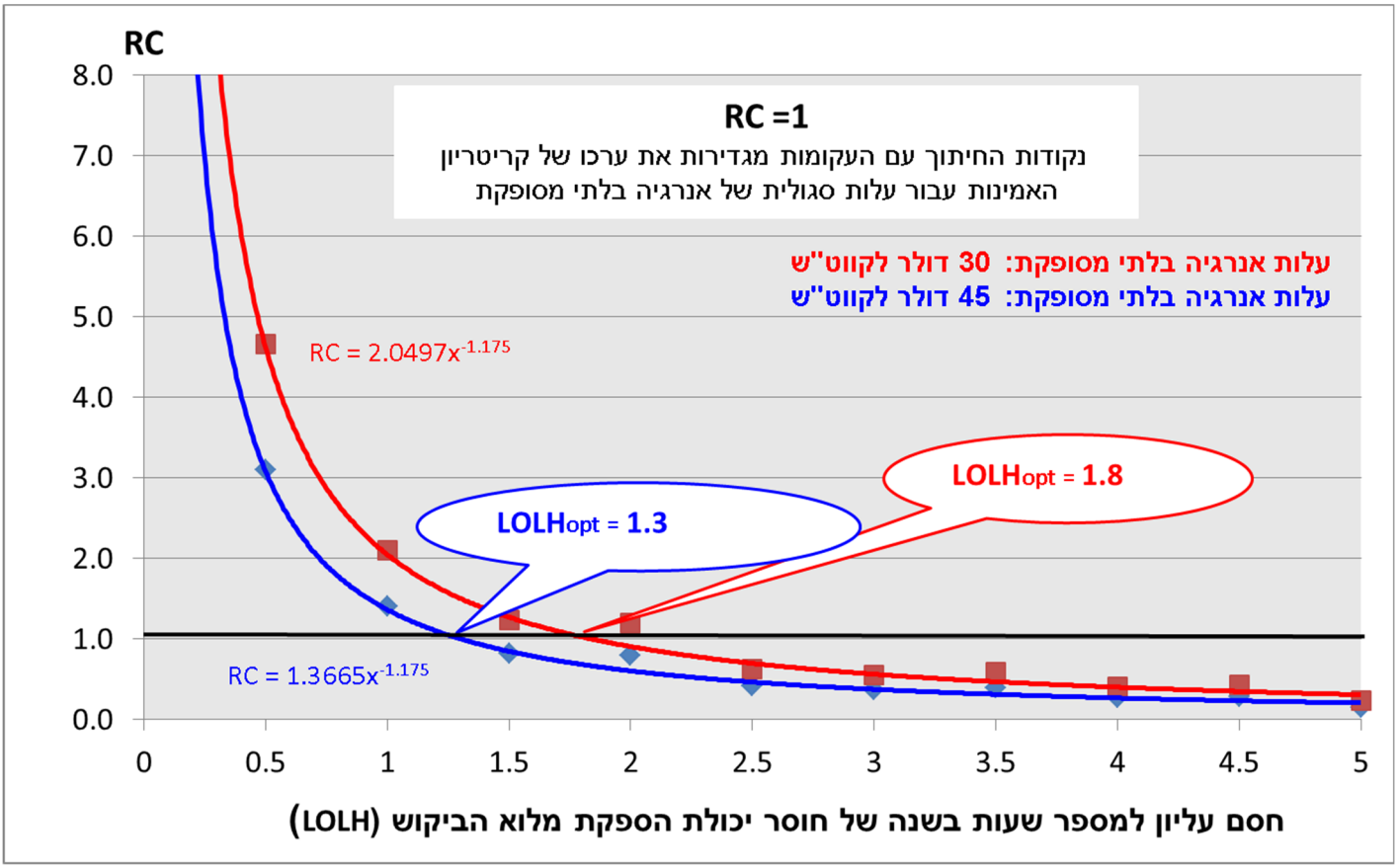
9.1 קריטריון האמינות ועלות האנרגיה הבלתי מסופקת

בעבודה זו נעשה חישוב של קריטריון האמינות האופטימאלי **LOLHopt** עבור ערכים שונים של עלות סגולית של האנרגיה הבלתי מסופקת וזאת בהתאם לבקשת רשות החשמל.

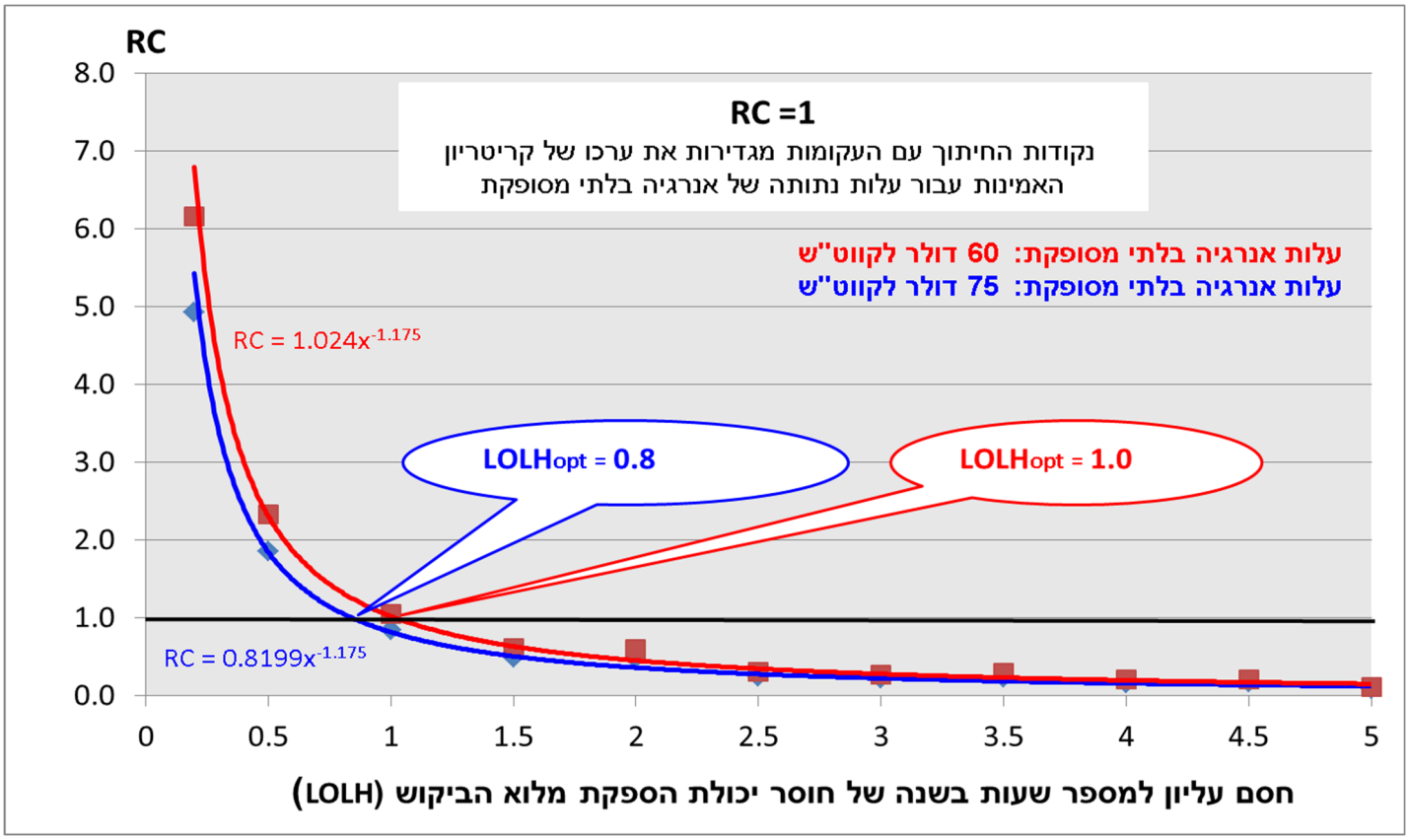
בהתאם למתודולוגיה המתוארת בפרק 8 לעיל, חושב עבור כל עלות סגולית של אנרגיה בלתי מסופקת, היחס בין תוספת ההוצאות לשיפור האמינות לבין החיסכון בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת **RC** וזאת לכל רמת אמינות **LOLH** נדרשת. תוצאות החישובים מתוארות באיורים מס' 5א'-5ג'.

היחס בין תוספת ההוצאות לשיפור האמינות לבין החיסכון בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת, RC

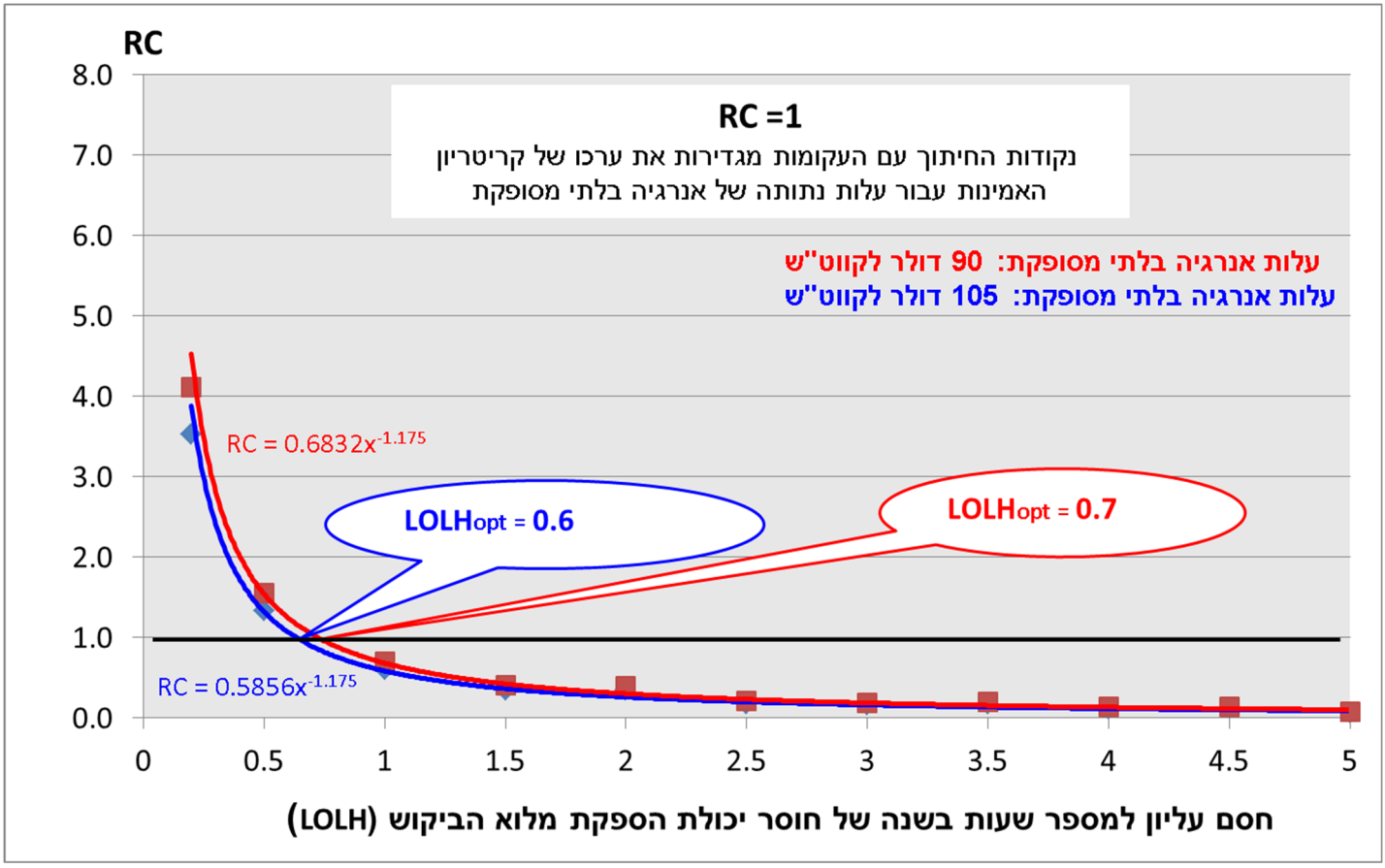
איור מס' 5א'



איור מס' 25ב'



איור מס' 25ג'

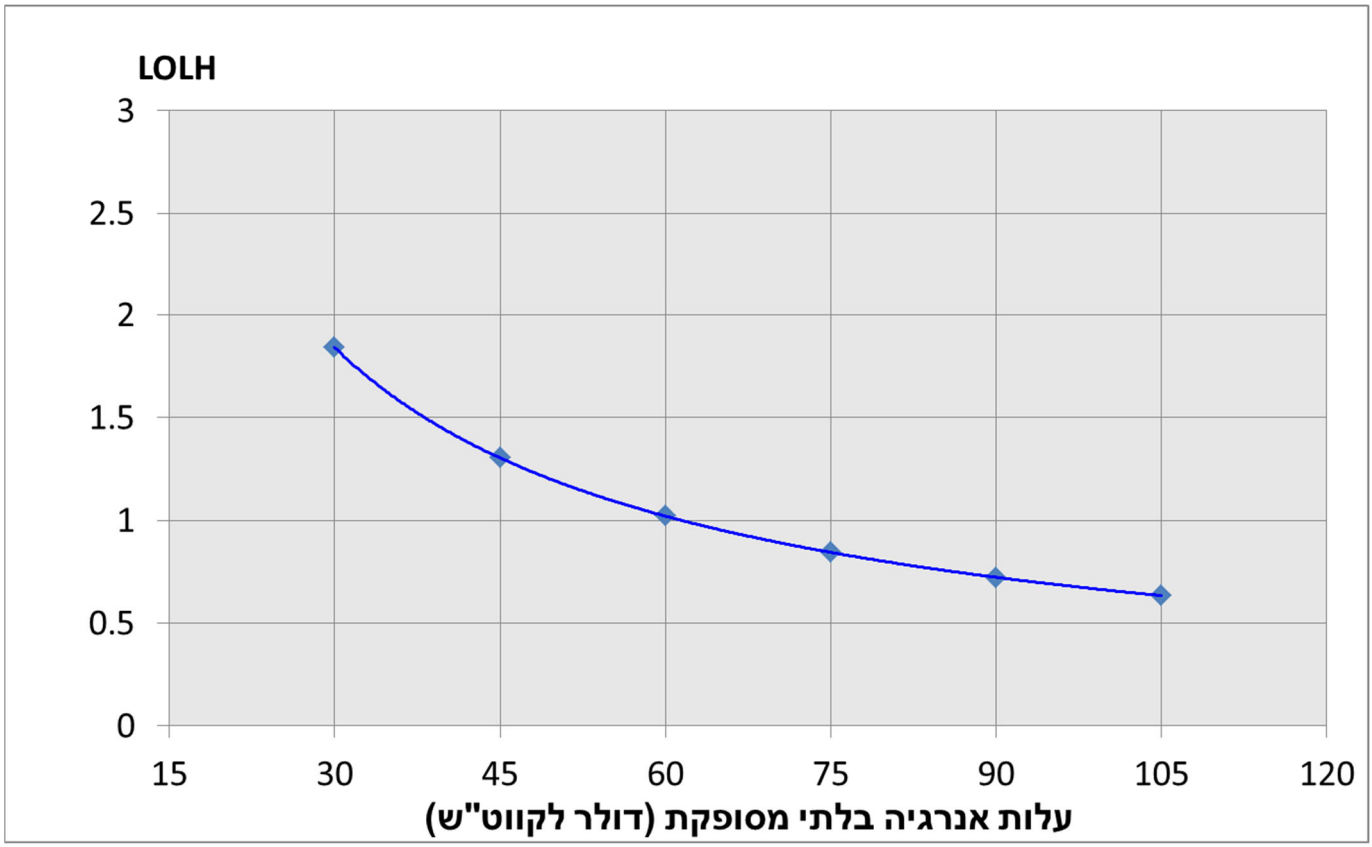


כפי שצוין בפרק 8 ומתואר באיורים מס' 5א'-5ג' , במערכת המאופיינת ע"י רמת אמינות נמוכה, ניתן בעקבות השקעות כספיות קטנות יחסית לשפר את רמת האמינות באופן משמעותי ואילו במערכות עם אמינות גבוהה, כל שיפור נוסף באמינות דורש השקעות גדולות.

קריטריון האמינות האופטימאלי לתכנון מערכת הייצור שהתקבל עבור ערכים שונים של עלות סגולית של אנרגיה בלתי מסופקת מתואר באיורים מס' 5א'-5ג' ובאיור מס' 6.

<u>איור מס' 6</u>

קריטריון האמינות האופטימאלי לתכנון מערכת הייצור עבור ערכים שונים של עלות סגולית של אנרגיה בלתי מסופקת



בהתאם לעבודה האחרונה שבוצעה על ידי משרד האנרגיה לגבי העלות הסגולית של האנרגיה הבלתי מסופקת, עלות זו שווה ערך ל- 30 דולר לקווט"ש. ערך זה משמש אותנו כתרחיש בסיסי בעבודה הנוכחית.

קריטריון האמינות האופטימאלי LOLHopt המתקבל עבור העלות הסגולית של אנרגיה בלתי מסופקת (UEC) של 30 דולר לקווט"ש הינו **1.8 שעות בשנה לכל היותר של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש** (ראה איורים מס' 5א' ו- 6).

קריטריון זה חמור יותר מהקריטריון שהתקבל בעדכון האחרון (**LOLH=2.9**) וזאת בעיקר בעקבות האפשרות לשפר את אמינות המערכת על ידי הוספת יחידות ייצור המיועדות לספק עומסי שיא בעלות נמוכה יותר.

בדיקות נוספות שבוצעו בעבודה זו מראות שאופטימיזציה של פיתוח המערכת <u>ללא הפעלת קריטריון האמינות אבל בהתחשב בעלות האנרגיה הבלתי מסופקת</u> מביאה ברוב השנים לערכי אמינות קרובים לאלו שהתקבלו בעקבות הפעלת קריטריון האמינות האופטימלי המתאים לאותו ערך של עלות האנרגיה הבלתי מסופקת.

חשוב לציין שקיימים גורמים נוספים מלבד העלות הסגולית של אנרגיה בלתי מסופקת שלהם השפעה ניכרת על ערך קריטריון האמינות האופטימאלי, כגון:

- מאפיינים טכנו-כלכליים של יחידות הייצור הקיימות והחדשות ובמיוחד של יחידות הייצור המיועדות להספקת שיאי העומס
- צורת עקום העומס (למשל, השפעת חדירה מסיבית של רכבים חשמליים על פרופיל הביקוש)
- מודל המשמש לאופטימיזציה של תכנון מערכת הייצור (לדוגמא EGEAS) וצורת הדימוי של עקום העומס ופילוג האחזקות של יחידות הייצור. לכן, מן הראוי שחישוב הקריטריון ייעשה באמצעות אותו המודל שישמש לתכנון המערכת.

9.2. <u>קריטריון האמינות ועלות ההקמה של יחידות הייצור המיועדות להספקת שיאי העומס</u>

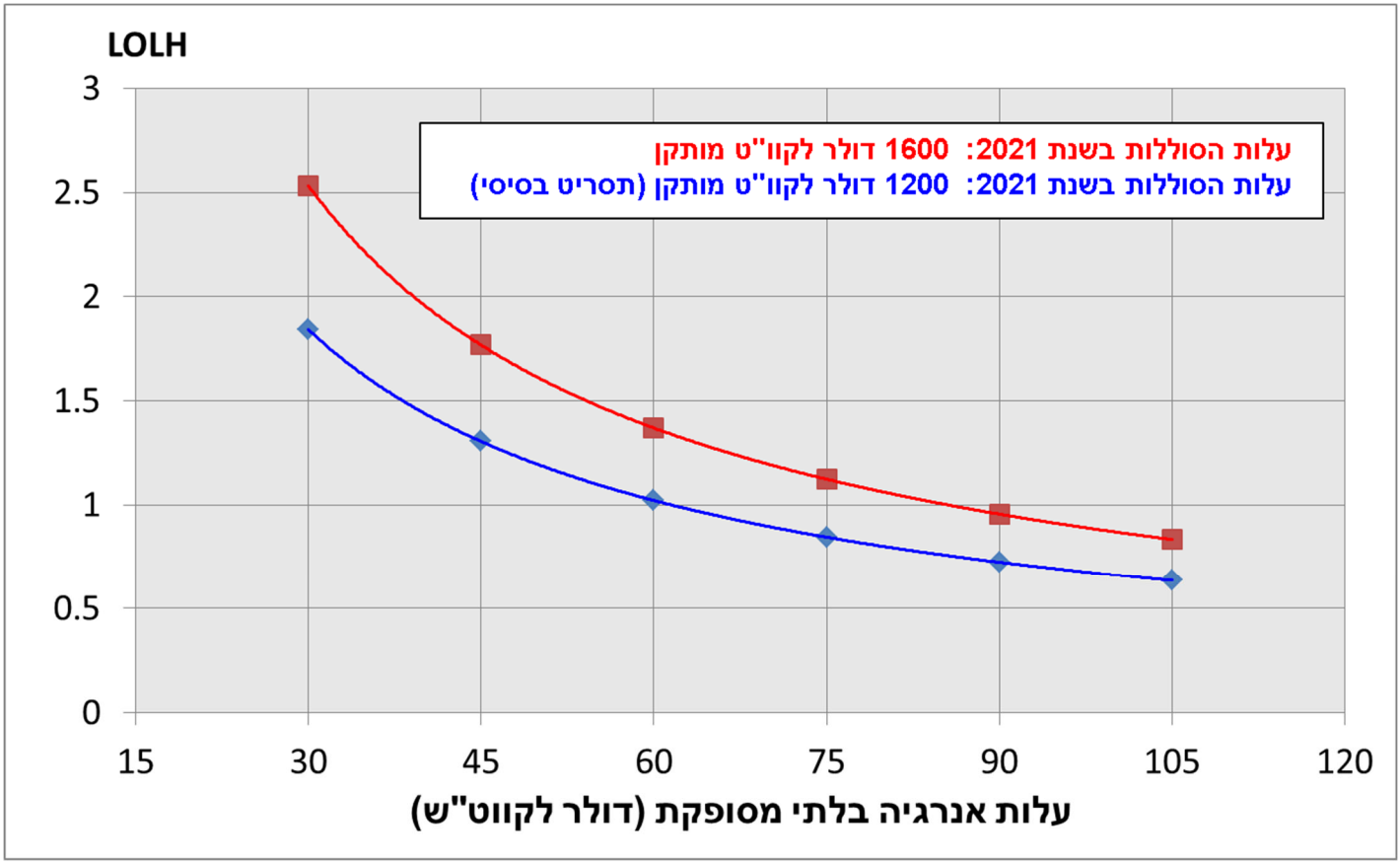
בתסריט הבסיסי קריטריון האמינות חושב בהנחת עלות הקמה של סוללות של כ- 1200 דולר לקוו"ט מותקן עם הוזלה במהלך השנים לכ- 680 ולכ-460 דולר לקוו"ט מותקן בשנים 2030 ו-2040 בהתאמה.

בעבודה זו נבדקה רגישות קריטריון האמינות לעלות הקמה של סוללות של כ- 1600 דולר לקוו"ט מותקן עם הוזלה במהלך השנים לכ- 910 ולכ-610 דולר לקוו"ט מותקן בשנים 2030 ו-2040 בהתאמה.

ניתן לראות את התוצאות באיור מס' 7.

איור מס׳ 7

השפעת עלות ההקמה של יחידות המיועדות להספקת שיאי העומס על קריטריון האמינות



כפי שניתן להסיק, ככל שעלות ההקמה של הסוללות יותר גבוהה, קריטריון האמינות האופטימלי הופך להיות פחות חמור.

בהנחה בסיסית של עלות אנרגיה בלתי מסופקת שווה ערך ל- 30 דולר לקווט״ש, עליה בעלות ההקמה הנוכחית של הסוללות בהיקף של 400 דולר לקוו״ט מותקן תצביע על שינוי בקריטריון האמינות האופטימלי לתכנון מערכת הייצור מ- 1.8 לכ-2.5 שעות בשנה של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש לכל היותר.

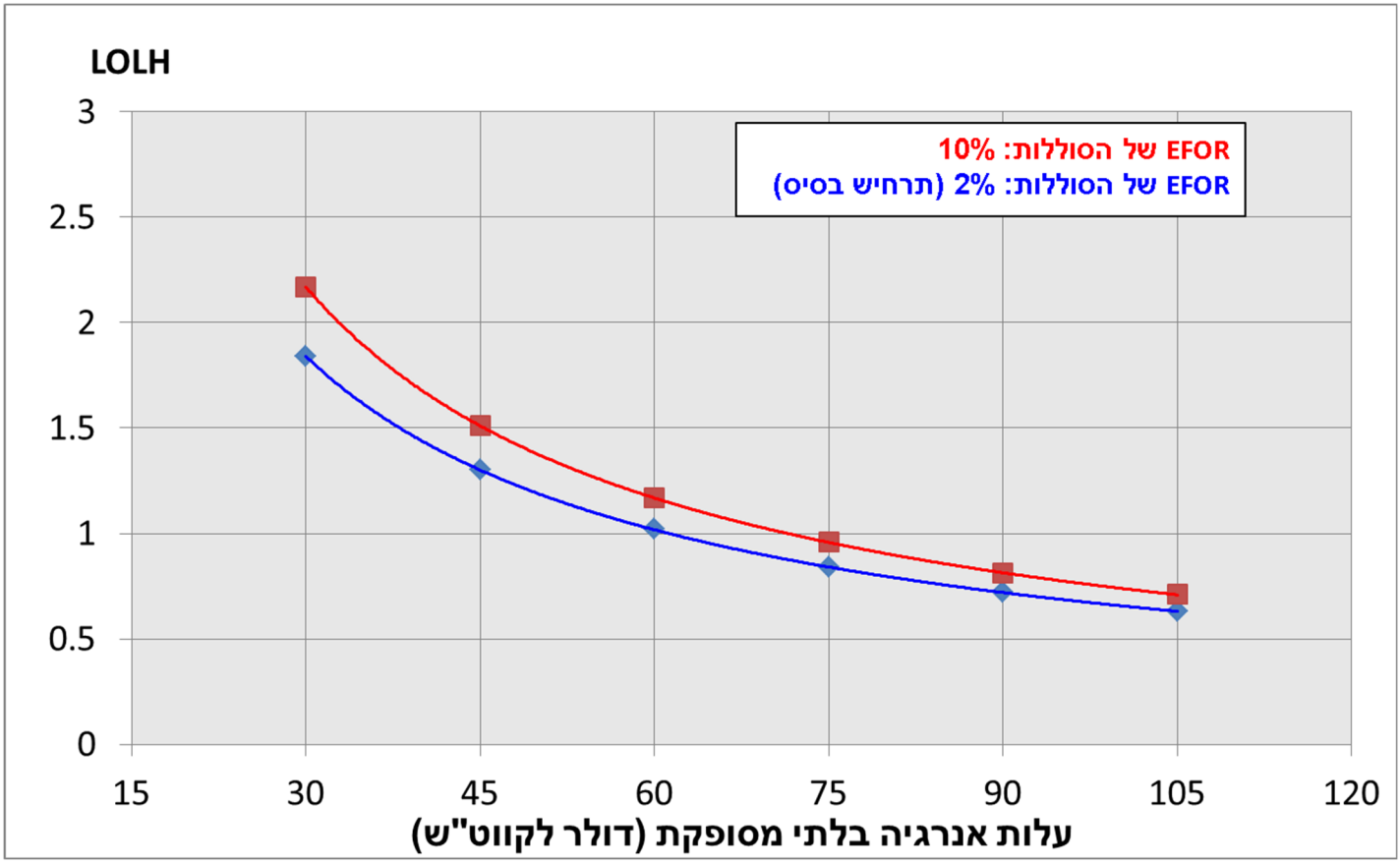
9.3. קריטריון האמינות וירידת הזמינות של יחידות הייצור המיועדות להספקת שיאי העומס

ממצאי הבדיקות מראים שככל ששיעור התקלות המאולצות של הסוללות עולה - קריטריון האמינות האופטימאלי הופך להיות פחות חמור.

בבדיקת הרגישות שנערכה בהקשר זה בהנחה ששיעור התקלות המאולצות (EFOR) של הסוללות עולה מ- 2% לכ- 10% , קריטריון האמינות האופטימאלי (שהתקבל בהנחת עלות האנרגיה הבלתי מסופקת של 30 דולר לקווט״ש) משתנה מ- 1.8 ל- 2.2 שעות בשנה של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש לכל היותר (ראה איור מס׳ 8).

איור מס' 8

השפעת זמינות של יחידות המיועדות להספקת שיאי העומס על קריטריון האמינות



9.4. קריטריון האמינות בהתחשב בפרופיל הביקוש המניח חדירה מסיבית של רכבים חשמליים במדינת ישראל

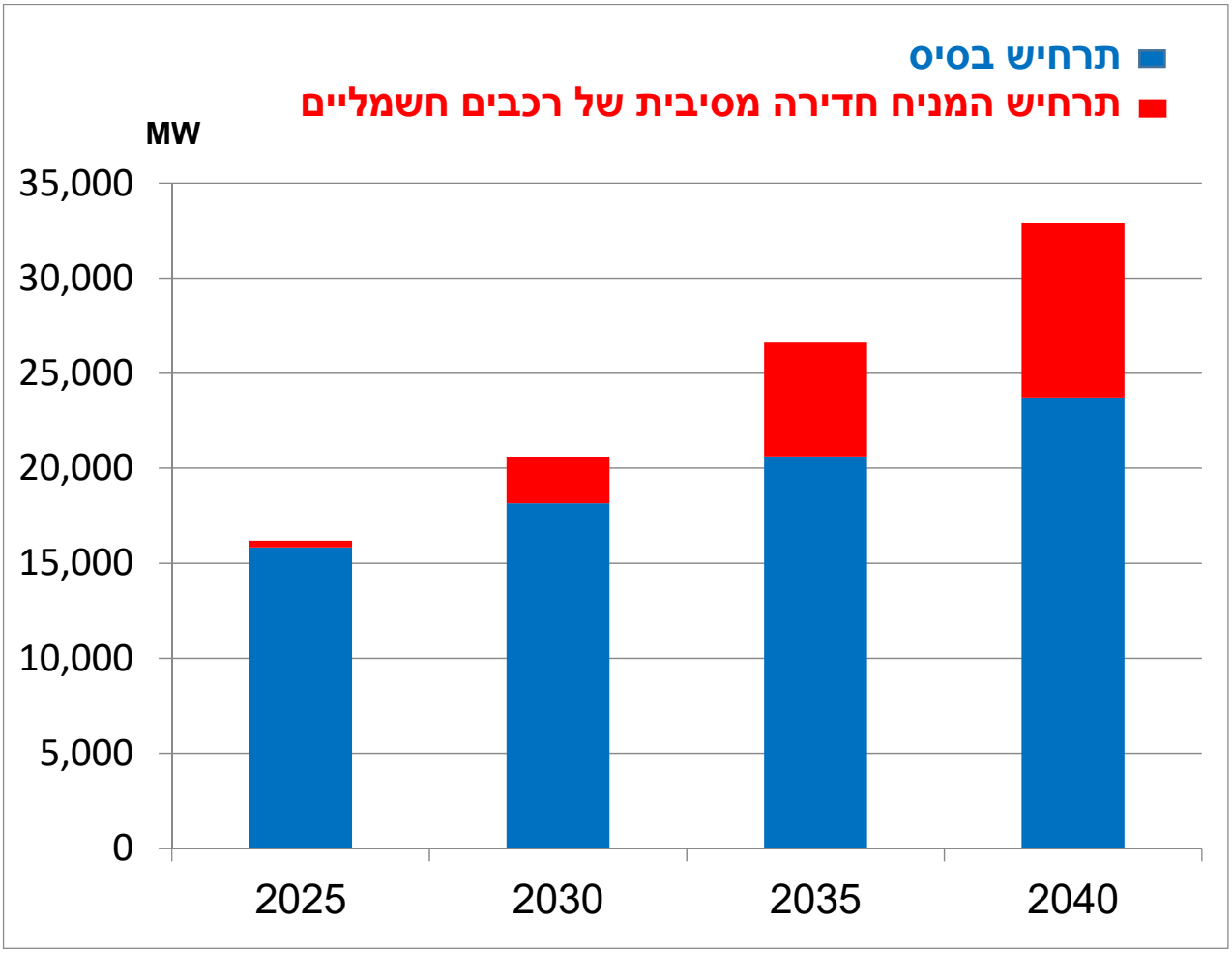
חדירה מסיבית של רכבים חשמליים במדינה תגרום לעלייה בביקוש לחשמל. העלייה בביקוש תלויה בפרמטרים שונים כגון היקף הרכבים, סוג הרכבים, סוג הטעינה ושעות ומשך הטעינה.

בעבודה זו נבדקה ההשפעה של חדירה מסיבית של רכבים חשמליים במדינה (על פי תחזית ראשונית) על היקף ופרופיל הביקוש לחשמל לטווח הארוך ועל הקריטריון האמינות.

בהתאם לתחזית זו, צפויה עלייה משמעותית בביקוש לחשמל בעיקר בשעות הערב. כפי שמתואר באיורים מס' 9א'-9ב' , בשנת 2040 שיאי הביקוש בשעות הערב של הקיץ ושל החורף אמורים לעלות בכ- 9,000 מגוואט כתוצאה מחדירה מסיבית של רכבים חשמליים במדינה.

איור מס' 9א'

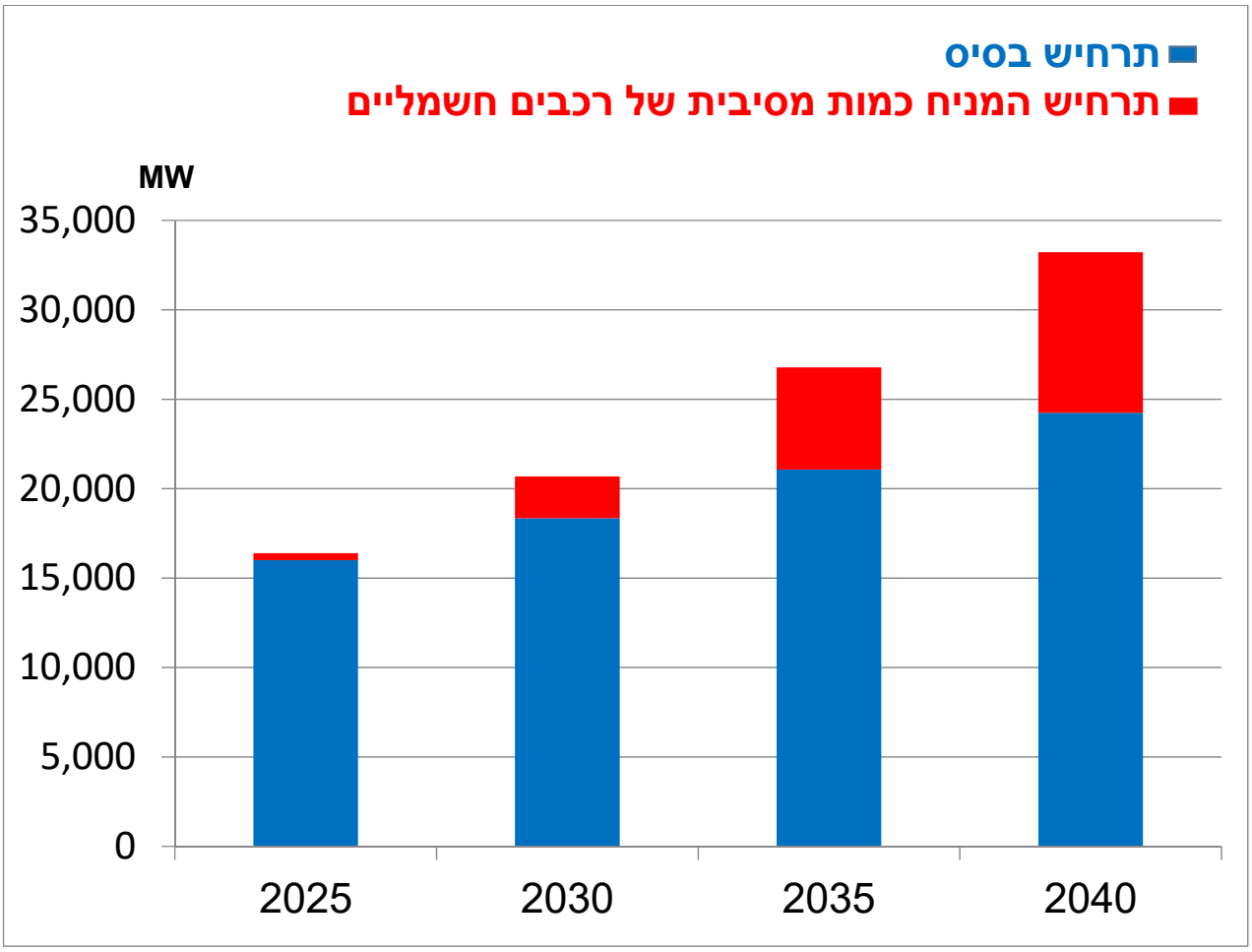
עלייה בשיא הביקוש בשעות הערב של הקיץ כתוצאה מחדירה מסיבית של רכבים חשמליים*



* בהתבסס בתחזית חדירת רכבים חשמליים ראשונית

איור מס' 9ב'

עלייה בשיא הביקוש בשעות הערב של החורף כתוצאה מחדירה מסיבית של רכבים חשמליים*



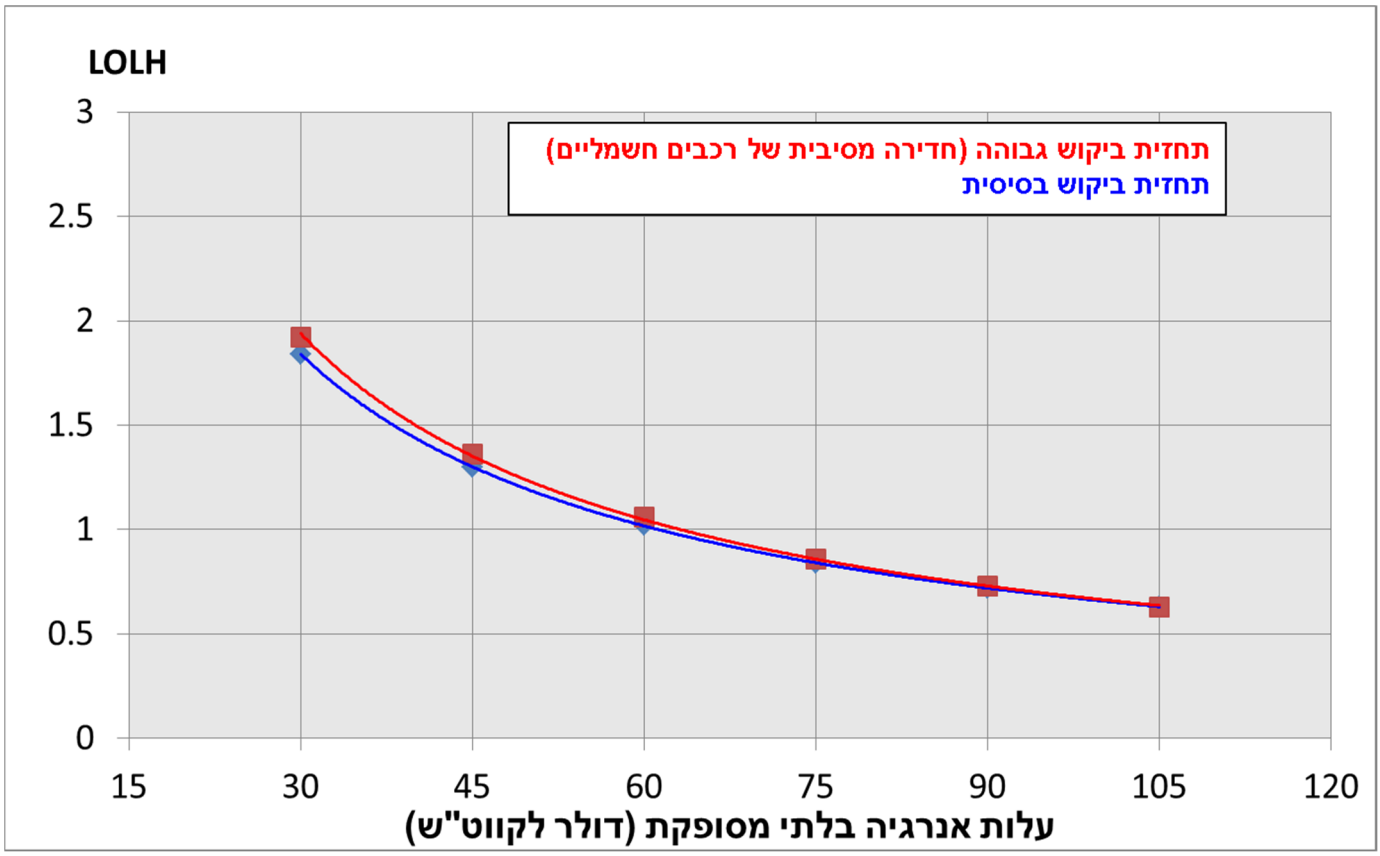
* בהתבסס בתחזית חדירת רכבים חשמליים ראשונית

כמובן עלייה כזו בביקוש תצביע על צורך הוספת גנרציה במערכת בסדר גודל דומה לעליית הביקוש על מנת למנוע אנרגיה בלתי מסופקת.

למרות העלייה הגדולה הצפויה בביקוש, על פי הבדיקות שביצענו, ההשפעה על הקריטריון האמינות האופטימאלי לתכנון מערכת הייצור הייתה קטנה מאוד כפי שמתואר באיור מס' 10. הסיבה לכך הינה שלמרות העלייה ברמות הביקוש, השינוי בפרופיל הביקוש באותן שעות הבודדות בהן מתרחשים שיאי העומס לא היה משמעותי. כתוצאה, ההשקעות הנדרשות ביחידות נוספות על מנת למנוע כמות נוספת של אנרגיה בלתי מסופקת בשעות לעיל היו דומות לאלו שהתקבלו בבדיקות שנעשו בהתחשב בתחזית הביקוש הבסיסית (ללא הנחת חדירה מסיבית של רכבים חשמליים).

איור מס׳ 10

השפעת תחזית הביקוש על קריטריון האמינות *



* בהתבסס בתחזית חדירת רכבים חשמליים ראשונית

10. <u>סיכום</u>

- עתודה מותקנת הינו מדד נקודתי על ציר הזמן שאינו תלוי בזמינות יחידות הייצור, בפרופיל הגנרציה של אמצעי ייצור באנרגיה מתחדשת ובפרופיל עקום הביקוש לאורך השנה. השימוש בעתודה המותקנת בתור קריטריון האמינות יכול להביא למסקנות שגויות בהקשר לאמינות ההספקה ולתכנון לקוי של מערכת הייצור.
- תכנון מערכת הייצור באמצעות קריטריון אמינות הסתברותי כמו **LOLH** לוקח בחשבון את כל הנקודות החיוניות, כפי שמפורט במסמך, בתהליך האופטימיזציה וזאת הסיבה שהוא הקריטריון המקובל בעולם לתכנון המערכת.
- נבנתה בעבודה זו מתודולוגיה מפורטת לחישוב קריטריון האמינות לתכנון מערכת הייצור לטווח ארוך. המתודולוגיה מתארת מנגנון ממוחשב לעדכון קריטריון האמינות במידה ויהיה צורך בכך.
- הערך האופטימאלי המעודכן שהתקבל בעבודה זו של קריטריון האמינות לתכנון מערכת ייצור החשמל הינו כ- **1.8 שעות בשנה לכל היותר של חוסר יכולת הספקת מלוא הביקוש** וזאת בהנחת עלות האנרגיה הבלתי מסופקת של כ-30 דולר לקוט״ש.
- בנוסף, נבדקה הרגישות של הערך האופטימאלי של קריטריון האמינות לשינוים בפרמטרים עיקריים כגון עלות האנרגיה הבלתי מסופקת, עלות ההקמה וזמינות של יחידות הייצור המיועדות להספקת שיאי העומס ושינוי בתחזית הביקוש לחשמל.

נספח א' – תחזית הביקוש המשקי לחשמל

תחזית הביקוש המשקי לחשמל בהנחה שהתמ"ג יעלה ב 3.5% לשנה (עדכון אוגוסט 2017)			
שנה	שיא ביקוש בעומס חום/קור קיצוני (מגוואט)		ייצור משקי * (מיליוני קוט"ש)
	חורף	קיץ	
2017	12,353	13,709	69,203
2018	13,317	14,093	70,681
2019	13,607	14,490	72,121
2020	13,978	14,885	74,090
2021	14,360	15,292	76,112
2022	14,753	15,711	78,196
2023	15,158	16,142	80,342
2024	15,575	16,585	82,552
2025	16,004	17,042	84,824
2026	16,446	17,513	87,166
2027	16,901	17,997	89,578
2028	17,369	18,496	92,064
2029	17,852	19,010	94,620
2030	18,349	19,540	97,256
2031	18,862	20,086	99,971
2032	19,389	20,648	102,771
2033	19,933	21,227	105,653
2034	20,494	21,824	108,624
2035	21,072	22,439	111,686
2036	21,667	23,073	114,844
2037	22,281	23,727	118,096
2038	22,914	24,401	121,451
2039	23,567	25,096	124,910
2040	24,240	25,813	128,481
2041	24,934	26,552	132,157
2042	25,650	27,314	135,951
2043	26,388	28,101	139,866
2044	27,150	28,912	143,908
2045	27,937	29,750	148,072
2046	28,748	30,614	152,373
2047	29,585	31,505	156,811
2048	30,450	32,426	161,395
2049	31,342	33,376	166,121
2050	32,263	34,357	171,005

* כולל ייצור עבור רש"פ