

עדכון שיטת חישוב מחיר השוק MCP

דצמבר 2025

הצהרת הבהרה

1. מסמך זה נועד להציג לציבור את עמדת נגה בנוגע עדכון שיטת חישוב מחיר השוק (MCP) ולשתף גורמים בעלי עניין במהות השינויים והשפעתם על המחיר.
2. מסמך זה אינו מתיימר להקיף ו/או לכלול את כל המידע הרלוונטי ו/או העשוי להיות רלוונטי, בקשר למחיר השוק במשק החשמל ו/או דרך חישובו.
3. המידע המופיע במסמך זה אינו בהכרח שלם ו/או מדויק ואין בהכרח קשר, מפורש או משתמע, בין השיטה המוצגת לבין מחירי השוק והשיטה לקביעת או מחירי השוק שתיושם לאחר ובכפוף להחלטת רשות החשמל. ככל שיוחלט על ידי רשות החשמל על אימוץ המתודולוגיה המתוארת במסמך זה ייתכן שיידרש עדכון של הרגולציה בהתאם.
4. נגה אינה אחראית כלפי צד שלישי כלשהו לגבי חישוב מחיר השוק הנהוג כיום או שהיה נהוג בעבר או לגבי השינוי שיחול, אם יחול, כתוצאה מקבלת המלצותיה ע"י רשות החשמל.
5. מבלי לגרוע מן האמור לעיל, אין המסמך בא ו/או יבוא במקומה של רגולציה מתאימה כפי שנקבעה ו/או תיקבע ע"י רשות החשמל, לרבות בנושאי מחירים בכלל ומחירי שוק בפרט.
6. בכל מקרה של סתירה בין המסמך לאמות מידה ו/או החלטות רשות החשמל יגברו ההחלטות ואמות המידה של הרשות לחשמל על האמור במסמך, ללא יוצא מן הכלל.
7. המידע הכלול במסמך ניתן על בסיס AS IS ואינו מהווה ייעוץ ו/או המלצה ו/או חוות דעת בקשר לכל החלטה עסקית או אחרת שתתקבל ע"י בעל רישיון ייצור ו/או ע"י כל מי מטעמו ו/או כל צד שלישי אחר.
8. כל העושה שימוש במסמך זה לכל צורך ו/או מטרה שהם, לרבות החלטות עסקיות, הרי שהוא עושה זאת על דעתו ואחריותו בלבד ולא יהיו לו כל טענות ו/או תביעות מכל מין ו/או סוג שהוא כנגד נגה ו/או רשות החשמל במשרד האנרגיה ו/או מדינת ישראל בגין הסתמכות באופן מלא או חלקי, מפורש או משתמע, על האמור במסמך זה.

תוכן העניינים

1.	מבוא.....	4
2.	הגדרת מחיר השוק.....	6
3.	אופן החישוב.....	9
4.	תרחישי קביעת מחיר השוק.....	16
5.	דוגמאות.....	17
6.	נספח.....	41

1. מבוא

1.1. במשך השנתיים האחרונות פעלה נגה לעדכון שיטת חישוב מחיר השוק הקיימת ("SMP – System Marginal Price") אשר הוחלט להגדירה במסגרת הרפורמה במשק החשמל בשנת 2018. לאור השינויים הרבים אשר חלו במשק החשמל וברגולציה בפרט, נדרש לבצע עדכון בשיטת החישוב, על מנת שמחיר השוק יגלם את השינויים שחלו ויספק איתות כלכלי למשק. לצורך השגת היעדים שצוינו, נגה ערכה מחקר מעמיק בנושא לצד התקשרות עם שתי חברות ייעוץ בינלאומיות (N-SIDE ו-Compass Lexecon), חברות בעלות שם עולמי בתחום, עם ניסיון רב בניתוח ועיבוד נתונים הנדרשים לפעילות זו.

1.2. לאורך כל הדרך, החברה פעלה בשיתוף מלא עם רשות החשמל כאשר כלל המסמכים, הממצאים, תוצאות הסימולציות וחומרים נוספים, כולל הדו"ח המלא היו חשופים לרשות.

1.3. פרסום מסמך זה הינו תוצר תהליך ארוך שבו נגה:

1.3.1. פרסמה את המתווה לשינוי השיטה לכלל הציבור באוגוסט 2024

1.3.2. קיימה שיח פתוח עם כלל הציבור באמצעות מפגש חשיפה אשר נערך בדצמבר 2024

1.3.3. קיבלה מענה והתייחסות הציבור למתווה שפורסם

1.3.4. קיימה מפגשים פרטניים עם חלק ניכר מבעלי עניין במשק בנוגע לשינוי שיטת חישוב מחיר השוק.

1.3.5. כחלק מקדים ליישום השיטה, מפרסמת באתר החברה את המחיר החדש Market Clearing Price –MCP החל מחודש ינואר 2025.

1.4. בהמלצת חברות הייעוץ ובאישורה של רשות החשמל, שיטת חישוב מחיר השוק אשר מתאימה למשק הישראלי בהתאם לתנאי הרגולציה הקיימים, הינה שיטת **Marginal Pricing**.

1.5. מסמך זה מתאר את עיקרי שיטת חישוב מחיר השוק החדש ודוגמאות אשר נועדו להבהיר לציבור את מהות השינויים והשפעתם על המחיר, ביחס לשיטה הקיימת.

1.6. אחת המסקנות וההמלצות בשיטת חישוב מחיר השוק החדש הינה **לבטל** את

חישוב מחיר השוק הלא המאולץ, בשונה מהשיטה הקיימת. החברה סבורה שאין הצדקה להמשיך בחישוב מחיר זה שכן הוא אינו מבטא את העלויות והאילוצים הקיימים ברמה יומית, כאשר אחד המהותיים בהם הוא היקף אספקת גז לא מוגבלת ברמה יומית ושעתית בנוסף, החברה מתיישרת עם רוב הפרקטיקות המקובלות בעולם, בהן כלל האילוצים הקיימים בשוק הסיטונאי נכללים במחיר השוק שהינו

מחיר בו מספקים בשוק הקמעונאי רוכשים אנרגיה ממנהל המערכת או מבצעים עסקאות בילטרליות ביחס אליו.

1.7. השיטה המתוארת מטה, מספקת את המענה הנדרש בסוגיות הקשורות לחישוב מחיר השוק כגון:

- 1.7.1. אכיפת גודל הרזרבה הסובבת הזמינה הניתנת למימוש.
- 1.7.2. התחשבות בקצב עליה וירידה בעומס של היצרנים.
- 1.7.3. התחשבות בשימוש בפחם והשפעתו על אופן קביעת מחיר השוק.
- 1.7.4. התחשבות במתקני אגירה: אגירה שאובה – Pumped Storage, אגירה בסוללות – BESS, ומתקני אגירה משולבי PV - HYBRID PV+ BESS.
- 1.7.5. התחשבות בניהול ביקוש.
- 1.7.6. התחשבות בנושא של Non Convexity.
- 1.7.7. קביעת מחיר שוק ע"י מתקני אנרגיה מתחדשת בעת קטימות.
- 1.7.8. קביעת מחיר השוק באמצעות מחיר להורדת אנרגיה.
- 1.7.9. התמודדות עם מקרים של מחסור ברזרבה סובבת הנדרשת לירידה או עליה, יכולת נדרשת לאספקת אנרגיה יחד ולחוד, זמינות יחידות יצור.
- 1.7.10. הצורך להתחשב ביחידות MUST RUN בעת חישוב מחיר השוק.

1.8. מקרי קצה בהם מחיר השוק נקבע במתודולוגיה שונה (שתאושר על ידי רשות החשמל)

- 1.8.1. מחסור בגז.
- 1.8.2. קביעת מחיר השוק ע"י יחידות המופעלות בסולר.
- 1.8.3. מחסור ברזרבות.
- 1.8.4. מחסור ביכולת ייצור יחידות במשק.
- 1.8.5. ניהול מחסור.

1.9. לצורך התחלת יישום השיטה החדשה נדרשת החלטה של רשות החשמל על אימוץ המתודולוגיה החדשה לרבות קביעת מחיר השוק במקרי קצה כמפורט בסעיף 4.1.

2. הגדרת מחיר השוק

2.1. מחיר זה מייצג את העלות השולית המערכתית הזולה ביותר בעת שינוי הביקוש בכל פרק זמן בו מתבצע החישוב (למשל 30 דקות), בהתחשב באילוצים מערכתיים כגון : מגבלות טכניות ופיזיות של מתקני יצור, רשת הולכה, מערכת הגז וכדומה אשר נדרש לאכוף לצורך ניהול מערכת החשמל בהתאם לעקרונות המשטר התפעולי באופן אמין, בטוח ותוך מזעור עלויות יצור במשק. אילוצים אלו מתייחסים ל:

- 2.1.1. פרמטרים טכניים של מתקני ייצור, כולל למתקני אגירה :
 - 2.1.1.1. קצב שינוי עומס (MW\דקה) לעליה וירידה.
 - 2.1.1.2. יכולת זמינה (MW).
 - 2.1.1.3. משך זמן להפעלה\הפסקה מינימאלי אשר נדרש.
 - 2.1.1.4. פרופילים של תהליכי התנעה והדממה.
 - 2.1.1.5. פרמטרים אשר תלויים בסוג הדלק העיקרי והמשני.
 - 2.1.1.6. היקף מאגר לשאיבה ו/או יצור של מתקני אגירה שאובה.
 - 2.1.1.7. יכולת פריקה/טעינה מקסימלית של מתקני אגירה בסוללות.
 - 2.1.1.8. State of Charge -SOC של מתקני אגירה בסוללות
 - 2.1.1.9. וכו'.
- 2.1.2. עקרונות המשטר התפעולי של מערכת החשמל – אוסף אילוצים מערכתיים המשפיעים על כלל היצרנים. לדוגמא :
 - 2.1.2.1. מגבלת גז הזמין לטובת יצור החשמל במשק מכלל ספקי הגז ברמה יומית ושעיתית
 - 2.1.2.2. מגבלות מערכת הולכת הגז היבשתית והימית.
 - 2.1.2.3. הנחיות משרד האנרגיה בדבר צמצום ייצור בפחם.
 - 2.1.2.4. מדיניות שמירת רזרבה סובבת.
 - 2.1.2.5. מדיניות קטימת אנרגיות מתחדשות.
 - 2.1.2.6. הפעלת יחידות יצור לטובת שרידות המערכת במשטר MUST RUN.
 - 2.1.2.7. מגבלת היקף וכמות יחידות יצור מסוג מחזור משולב הניתנת להפסקה יומית – Two Shift Mode.
 - 2.1.2.8. מדיניות והנחיות של משרד להגנת הסביבה בדבר הפעלת מתקני יצור בדלק משני.
 - 2.1.2.9. מגבלות וסדר הפעלת יצרנים בסולר בהתאם להיתר פליטה של משרד להגנת הסביבה.

2.1.2.10. וכו'.

2.2. מחיר השוק מבוסס על הצעות מחיר אינקרמנטליות בלבד לירידה ועליה בעומס

(בדלק עיקרי ומשני – כל אחד לפי העניין) של כלל היצרנים לכל חצי שעה:

2.2.1. יצרנים פרטיים – בהתאם לאסדרות אשר תקפות לכל יצרן בהתאם לאמות

מידה, החלטות הרשות והאישור התעריפי הרלוונטי.

2.2.2. חברת החשמל כבעלת רישיונות ייצור – בהתאם להחלטות רשות החשמל

בנוגע לשימוש במחיר הגז של חברת החשמל לטובת חישוב מחיר השוק

הסיטונאי ובסיס התעריף של יחידות ייצור של חברת החשמל

2.2.3. מתקני אגירה אשר יפעלו לפי כללי השוק – הצעות מחיר לפריקה וטעינת

אנרגיה.

2.2.4. יצרני אנרגיה מתחדשת אשר אינם מגישים הצעות מחיר לפי אישור

התעריפי הפועלים לפי הסדרים של FEED IN TARIFF משתתפים בשוק

האנרגיה עם הצעת מחיר השווה ל-0 MWh.

2.2.5. מתקני אגירה שאובה הפועלים לפי אסדרה 27902 נלקחים בחשבון

בהתאם למגבלות הטכניות של המתקן בהתאם יכולת פריקה וטעינה ביחס

להיקף המאגר ונצילות המתקן.

2.3. מחיר השוק מחושב עבור שני שווקים :

2.3.1. שוק יום מראש (DAY AHEAD MARKET) ברזולוציה של 30 דקות.

2.3.2. שוק זמן אמת (REAL TIME MARKET) ברזולוציה של 30 דקות.

2.4. מחיר שוק יום מראש מבוסס על תכנית העמסה יום מראש. (EXANTE

(CALCULATION).

2.5. מחיר שוק זמן אמת מחושב בדיעבד (EXPOST CALCULATION) ומבוסס על

תכנית העמסה זמן אמת.

2.6. לאחר הפעלתה המסחרית של מערכת MMS (Management System Market)

מחיר השוק יחושב באופן מחזורי (בהתאם לרזולוציית החישוב, למשל כל 10 דקות)

בזמן אמת.

2.7. להלן ריכוז הנתונים אשר משמשים כקלט לצרכי החישוב:

טבלה 1 קלט לחישוב מחיר השוק

הקלט	מחיר שוק יום מראש	מחיר שוק זמן אמת
הביקוש המשקי לחשמל	תחזית ביקוש המשמשת לחישוב תכנית העמסה יום מראש	ביקוש בפועל
זמינות מתקני ייצור (דלק ראשי ומשני)	בהתאם לתכנית ייצור יום מראש אשר שימשה לחישוב תכנית העמסה יום מראש	בהתאם לזמינות בפועל כפי שנמדדה במערכות מנהל המערכת
תוכנית ייצור טרם אופטימיזציה	העמסה עצמית – לפי תכנית ייצור אשר שימשה להעמסה יום מראש	יצרנים בהעמסה עצמית אשר אינם שחקנים פעילים בשוק האנרגיה - לפי ייצור וזמינות בפועל יצרנים בהעמסה מרכזית ועצמית - לפי תכנית העמסה אחרונה
אנרגיה מתחדשת	תחזית יום מראש	בהתאם לייצור בפועל, בנטרול קטימה
רזרבה	בהתאם לדרישת הרזרבה מתוכננת	
הצעות מחיר לרכישת / מכירת אנרגיה	הצעות מחיר יום מראש	הצעות מחיר זמן אמת
מגבלות רשת ההולכה	נכללות	
אילוץ מערכת הולכת ואספקת הגז	כולל	
מדיניות השר - הפחתת הייצור בפחם	כולל	
בדיקות מתקני ייצור (טרם הפעלה מסחרית, במהלך הפעלה המסחרית - כגון לאחר)	כולל	
מגבלות איכות הסביבה	כולל	

לאור הוראות סעיף 25א לחוק אויר נקי, וכן מסמך המתווה להפעלת יחידות 1-4 בתחנת הכוח "אורות רבין" (מסמך מיום 31.10.2024 של ראש הרשות העליונה לאנרגיה ומישם במשרד האנרגיה), יחידות ייצור קיטוריות אשר מופעלות בפחם אינן מועמסות לפי שיקול כלכלי אלא אחרונות בסדר ההעמסה, טרם הפעלת יחידות המופעלות בסולר או מזוט לפי העניין. בהתאם להוראה זו, הצעות המחיר של יחידות אלו לא תשתתפנה בקביעת מחיר השוק. פרט להוראות מעלה, עקב ניתוק הקשר הכלכלי בין העלאת עומס יחידות אלו לשאר היחידות במשק, עלול להיווצר תרחיש בו היקף הייצור בפחם גדול אך, עקב מחירו הזול של הפחם, מחיר השוק עלול לרדת. למעשה מתרחש תהליך NON CONVEXITY בו הביקוש גדל אך מחיר השוק יורד. לאור זאת, ככל שהצעת המחיר של יחידה קיטורית אשר מופעלת בפחם תקבע את מחיר השוק, הצעה זו תוחלף בהצעת המחיר הגבוהה ביותר שמומשה באותו האינטרוול.

נציין כי לפי סעיף 25א לחוק אויר נקי קיימות מגבלות סביבתיות על הפעלת יחידות מוגבלות, כהגדרתן בחוק זה, כולל יחידות ייצור שאינן פחמיות, כך שהפעלתן מתאפשרת רק לצורך מענה למצב סיכון כהגדרתו בחוק זה, קרי לצורך הבטחת הספקת חשמל לצרכנים ושמירה על שרידות המערכת.

3. אופן החישוב

3.1. חישוב מחיר השוק מבוסס על תוצאות ההעמסה האופטימלית של מתקני ייצור (כולל

מתקני אגירה) עבור יום מסחר נתון תוך מתן מענה לביקוש המשקי לחשמל, עמידה באילוצים מערכתיים, ושמירת רזרבות בהתאם לדרישות תפעוליות.

3.2. תכנון העמסת מתקני הייצור מתבצע באמצעות תוכנת אופטימיזציה PLEXOS

אשר משתמשת במנועים מתמטיים שונים לצורך מתן מענה אופטימלי למזעור עלות הייצור ברמה היומית.

3.3. תוכנת PLEXOS משתמשת באלגוריתם (Mixed Integer Linear Programming)

(Programming) שהינו אלגוריתם מתמטי לצרכי אופטימיזציה אשר מחשב את הפתרון המינימאלי הקרוב לפתרון "המושלם", תוך שימוש במשתנים רציפים ו\או בדידים.

להלן¹ נוסחאות שבבסיס האופטימיזציה בעת תכנון העמסה יומי, כאשר המטרה הינה מזעור סך העלות המורכבת מ: עלות אנרגיה מתחדשת (OR), עלות ניהול ביקוש (OL), עלות אנרגיה (OC):

$$\text{minimize} \quad \sum_{t \in T} \left[OR_t + OL_t + \sum_{u \in U} OC_{u,t} \right]$$

עלות אנרגיה המבוססת על הצעות מחיר להתנעה, מינימום ואנרגיה מעל המינימום:

$$OC_{u,t} = \left[\sum_{s \in S} SC_{s,u} \cdot s_{s,u,t} + MLC_u \cdot u_{u,t} + \sum_{i \in I_u} Q_i \cdot PQ_i \cdot x_{i,u,t} \right] \quad \forall t \in T, u \in U.$$

עלות אנרגיה בעת שימוש בדלק משני:

$$OC_{u,t} = \left[\sum_{s \in S} SC_{s,u} \cdot s_{s,u,t} + (FP_{u,t} \cdot HR_u + VOM_u) \cdot p_{u,t} \right] \quad \forall t \in T, u \in U.$$

עלות אנרגיה מתחדשת לצרכי העמסה:

$$OR_t = 0.1 \cdot r_t \quad \forall t \in T$$

השימוש בערך 0.1 (ש\מ"ש) הינו לצרכי דוגמא בלבד, על מנת לתעדף אנרגיה זו על פני אנרגיה אחרת.

עלות ניהול ביקוש:

$$OL_t = VOLL \cdot l_t \quad \forall t \in T$$

עלות זו מחושבת בעת מחסור ביכולת ייצור במערכת החשמל.

¹ ראה נספחים לצורך הבהרת משמעות המשתנים בנוסחאות

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize} \quad \sum_{t \in T} \left[OR_t + OL_t + \sum_{u \in U} OC_{u,t} \right] \\
 & \text{subject to} \quad (7) - (53) \\
 & 0 \leq p_{u,t} \leq P_u^{\max} \quad \forall u \in U, t \in T \\
 & g_{u,t} \geq 0 \quad \forall u \in U_{Gas}, t \in T \\
 & u_{u,t}, v_{u,t}, w_{u,t} \in \{0, 1\} \quad \forall u \in U, t \in T \\
 & 0 \leq r_{u,t}^D, r_{u,t}^U \leq P_u^{\max} - P_u^{\min} \quad \forall u \in U, t \in T \\
 & 0 \leq x_{i,u,t} \leq 1 \quad \forall i \in I_u, u \in U_{IPP}, t \in T \\
 & \tilde{u}_{z,u,t} \in \{0, 1\} \quad \forall z \in Z, u \in U_{FZ}, t \in T \\
 & \tilde{p}_{z,u,t} \leq 0 \quad \forall z \in Z, u \in U_{FZ}, t \in T \\
 & s_{s,u,t} \in \{0, 1\} \quad \forall s \in S, u \in U, t \in T \\
 & 0 \leq r_t \leq R_t \quad \forall t \in T \\
 & 0 \leq l_t \leq D_t \quad \forall t \in T \\
 & E_b^{\min} \leq e_{b,t} \leq E_b^{\max} \quad \forall t \in T, b \in B \\
 & u_{b,pump,t}, v_{b,pump,t}, w_{b,pump,t} \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, t \in T \\
 & u_{b,gen,t}, v_{b,gen,t}, w_{b,gen,t} \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, t \in T \\
 & u_{b,pump,t,g}, u_{b,gen,t,g} \in \{0, 1\} \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \\
 & 0 \leq p_{b,pump,t,g} \leq P_{b,pump,g}^{\max} \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \\
 & 0 \leq p_{b,gen,t,g} \leq P_{b,gen,g}^{\max} \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \\
 & 0 \leq r_{b,t,g}^D, r_{b,t,g}^U \leq P_{b,gen,g}^{\max} - P_{b,gen,g}^{\min} \quad \forall u \in U, t \in T
 \end{aligned}$$

פירוט סט האילוצים:

משוואת איזון הספקים

$$(\lambda_t) : r_t + \sum_{u \in U} p_{u,t} + \sum_{b \in B, g \in G_b} (p_{b,gen,t,g} - p_{b,pump,t,g}) = D_t - l_t \quad \forall t \in T \quad (7)$$

אילוץ זה מוודא כי סך הייצור של כלל יחידות הייצור (קונבנציונלי ומתחדשות) שווה לסך הביקוש בכל

נקודת זמן t .

דרישת רזרבה סובבת חיובית ושלילית

$$\sum_{u \in U_{RD}} r_{u,t}^D + \sum_{b \in B, g \in G_b} r_{b,t,g}^D \geq RD \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{u \in U_{RU}} r_{u,t}^U + \sum_{b \in B, g \in G_b} r_{b,t,g}^U \geq RU \quad \forall t \in T \quad (9)$$

אילוץ זה מוודא אכיפת הדרישה לרזרבה חיובית (מתן מענה לצורך עלייה בעומס) ורזרבה שלילית

(מתן מענה לצורך ירידה בעומס) בכל נקודת זמן t .

דרישת ייצור בגבולות מינימום ומקסימום מוצהר

$$P_u^{\min} \cdot u_{u,t} \leq p_{u,t} \leq P_u^{\max} \cdot u_{u,t} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (10)$$

אילוץ זה מוודא כי יחידת הייצור תועמס בגבולות המותרים בהתאם להצהרת הייצור, בכל נקודת זמן t .

דרישת הפעלה רציפה

$$u_{u,t} = 1 \quad \forall u \in U_{MR}, t \in T \quad (11)$$

$$p_{u,t} \geq P_u^{MR} \quad \forall u \in U_{MR}, t \in T \quad (12)$$

אילוץ זה מוודא כי יחידת ייצור אשר נדרשת לייצר באופן רציף עקב משטר עבודה או אילוץ מערכתי, אכן תפעל כך.

הגדרת קשר בין התנעה והדממה של יחידת ייצור

$$u_{u,t} - u_{u,t-1} = v_{u,t} - w_{u,t} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (13)$$

אילוץ זה מוודא קיום קשר בין תנאי התחלה של יחידה u בנקודת זמן t וההחלטה על הצורך בתהליך התנעה/הדממה.

הגדרת תהליך התנעה מתאים למשך זמן הדממה

$$v_{u,t} = \sum_{s \in S} s_{s,u,t} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (14)$$

$$s_{s,u,t} \leq \sum_{\substack{k \in [ST_{s,u}, ST_{s+1,u}-1] \\ \text{if } k < t}} w_{u,t-k} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (15)$$

אילוץ המקשר בין בחירת תהליך ההתנעה המתאים s של יחידה u בנקודת זמן t בהתאם למשך זמן ההדממה.

אילוץ שמירת קצב שינוי עומס

$$p_{u,t} - p_{u,t-1} \leq RR_u^U + (P_u^{\max} - RR_u^U) \cdot v_{u,t} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (16)$$

$$p_{u,t-1} - p_{u,t} \leq RR_u^D + (P_u^{\max} - RR_u^D) \cdot w_{u,t} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (17)$$

אילוץ זה אוכף כי קצב שינוי העומס כלפי מעלה או מטה, לא יחרוג מהקצב המוצהר.

אילוף אכיפת מינימום זמן הפעלה/הדממה

$$\sum_{k \in [t-MUT_u+1:t]} v_{u,k} \leq 1 - u_{u,t} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{k \in [t-MDT_u+1:t]} w_{u,k} \leq 1 - u_{u,t} \quad \forall u \in U, t \in T \quad (19)$$

אילוף זה מוודא עמידה בדרישת הזמן המינימאלי להפעלה/הדממה, בהתאם להצגת היצור, בכל נקודת זמן t .

דרישת ייצור בדלק אחד בלבד (יחידה דו דלקית)

$$u_{u_1,t} + u_{u_2,t} \leq 1 \quad \forall t \in T, (u_1, u_2) \in U_D \quad (20)$$

אילוף זה מוודא כי יחידת ייצור דו דלקית לא תייצר בשני סוגי הדלקים במקביל.

אכיפת אזור אסור להעמסה

$$u_{u,t} = \sum_{z \in Z} \tilde{u}_{z,u,t} \quad \forall u \in U_{FZ}, t \in T \quad (21)$$

$$p_{u,t} = \sum_{z \in Z} \tilde{p}_{z,u,t} \quad \forall u \in U_{FZ}, t \in T \quad (22)$$

$$P_u^{\min} \cdot \tilde{u}_{1,u,t} \leq \tilde{p}_{1,u,t} \leq \underline{P}_u^{FZ} \cdot \tilde{u}_{1,u,t} \quad (23)$$

$$\overline{P}_u^{FZ} \cdot \tilde{u}_{2,u,t} \leq \tilde{p}_{2,u,t} \leq P_u^{\max} \cdot \tilde{u}_{2,u,t} \quad (24)$$

אילוף זה מוודא כי אף יחידת ייצור לא תועמס באזור שלא ניתן להעמסה.

אכיפת הקשר בין דרישת רזרבה ליכולת זמינה

$$r_{u,t}^U \leq P_u^{\max} \cdot u_{u,t} - p_{u,t} \quad \forall t \in T, u \in U_{RU} \setminus U_{FZ} \quad (25)$$

$$r_{u,t}^U \leq (P_u^{\max} \cdot \tilde{u}_{2,u,t} - \tilde{p}_{2,u,t}) + (\underline{P}_u^{FZ} \cdot \tilde{u}_{1,u,t} - \tilde{p}_{1,u,t}) \quad \forall t \in T, u \in U_{RU} \cap U_{FZ} \quad (26)$$

$$r_{u,t}^D \leq p_{u,t} - P_u^{\min} \cdot u_{u,t} \quad \forall t \in T, u \in U_{RD} \setminus U_{FZ} \quad (27)$$

$$r_{u,t}^D \leq (\tilde{p}_{1,u,t} - P_u^{\min} \cdot \tilde{u}_{1,u,t}) + (\tilde{p}_{2,u,t} - \overline{P}_u^{FZ} \cdot \tilde{u}_{2,u,t}) \quad \forall t \in T, u \in U_{RD} \cap U_{FZ} \quad (28)$$

אילוף זה מוודא שסך תרומת היחידה לרזרבה הינה בגבולות שהוגדרו.

אילוח צריכת גז שעתית ויומית

$$g_{u,t} = HR_u \cdot p_{u,t} \quad \forall u \in U_{Gas}, t \in T \quad (29)$$

$$\sum_{u \in U_{Gas}} g_{u,t} \leq G_t^{max} \quad \forall t \in T \quad (30)$$

$$\sum_{t \in T_d} \sum_{u \in U_{Gas}} g_{u,t} \leq G^{max} \quad \forall d \in D \quad (31)$$

האילוח מוודא שאין חריגה ממגבלת הגז היומית והשעתית.

מגבלת ייצור עקב אילוצי רשת ההולכה \ איכות הסביבה

$$p_{u,t} \leq PL_u \cdot u_{u,t} \quad \forall u \in U_{PL}, t \in T \quad (34)$$

האילוח מוודא כי העומס של היחידות הרלוונטיות לא יחרוג מסף מוגדר מראש.

עמידה בדרישות רזרבה

$$\sum_{u \in U_{CCGT}} u_{u,t} \geq N_{CCGT} \quad \forall u \in U_{CCGT}, t \in T \quad (35)$$

$$\sum_{u \in U_{CCGT}} r_{u,t}^D \geq R_{CCGT} \quad \forall u \in U_{CCGT}, t \in T \quad (36)$$

$$\sum_{u \in U_{CCGT}} r_{u,t}^U \geq R_{CCGT} \quad \forall u \in U_{CCGT}, t \in T \quad (37)$$

האילוח מוודא כי סך התרומה של היחידות לסוגי רזרבות שונות הינו מעבר לסף הנדרש.

אילוצי מתקני אגירה (שאובה וסוללות)

$$e_{b,t} = e_{b,t-1} + \Delta t \cdot \left[\sum_{g \in G_b} (\eta_{b,pump} \cdot p_{b,pump,t,g} - \eta_{b,gen} \cdot p_{b,gen,t,g}) \right] \quad \forall b \in B, t \in T \quad (38)$$

$$u_{b,pump,t} - u_{b,pump,t-1} = v_{b,pump,t} - w_{b,pump,t} \quad \forall b \in B, t \in T \quad (39)$$

$$u_{b,gen,t} - u_{b,gen,t-1} = v_{b,gen,t} - w_{b,gen,t} \quad \forall b \in B, t \in T \quad (40)$$

$$u_{b,pump,t} + u_{b,gen,t} \leq 1 \quad \forall b \in B, t \in T \quad (41)$$

$$v_{b,pump,t} + v_{b,gen,t} \leq 1 \quad \forall b \in B, t \in T \quad (42)$$

$$w_{b,pump,t} + w_{b,gen,t} \leq 1 \quad \forall b \in B, t \in T \quad (43)$$

$$u_{b,pump,t,g} \leq u_{b,pump,t} \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \quad (44)$$

$$u_{b,gen,t,g} \leq u_{b,gen,t} \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \quad (45)$$

$$u_{b,pump,t,g} + u_{b,gen,t,g} \leq 1 \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \quad (46)$$

$$P_{b,pump,g}^{\min} \cdot u_{b,pump,t,g} \leq p_{b,pump,t,g} \leq P_{b,pump,g}^{\max} \cdot u_{b,pump,t,g} \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \quad (47)$$

$$P_{b,gen,g}^{\min} \cdot u_{b,gen,t,g} \leq p_{b,gen,t,g} \leq P_{b,gen,g}^{\max} \cdot u_{b,gen,t,g} \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \quad (48)$$

$$\sum_{t \in T_d} (v_{b,pump,t} + v_{b,gen,t}) \leq MST_b \quad \forall b \in B, d \in D \quad (49)$$

$$\sum_{k \in [t-MUT_b+1:t]} (v_{b,pump,k} + v_{b,gen,k}) \leq 1 - (u_{b,pump,t} + u_{b,gen,t}) \quad \forall u \in U, t \in T \quad (50)$$

$$\sum_{k \in [t-MDT_b+1:t]} (w_{b,pump,k} + w_{b,gen,k}) \leq 1 - (u_{b,pump,t} + u_{b,gen,t}) \quad \forall u \in U, t \in T \quad (51)$$

$$r_{b,t,g}^U \leq P_{b,gen,g}^{\max} \cdot u_{b,gen,t,g} - p_{b,gen,t,g} \quad \forall t \in T, b \in B, g \in G_b \quad (52)$$

$$r_{b,t,g}^D \leq p_{b,gen,t,g} - P_{b,gen,g}^{\min} \cdot u_{b,gen,t,g} \quad \forall t \in T, b \in B, g \in G_b \quad (53)$$

3.4. לצורך חישוב מחיר השוק מתבצעת סימולציה נוספת בה כלל המשתנים הבינאריים

– יחידת ייצור פועלת או לא, מתקני אגירה - מצב טעינה או פריקה, הינם מקובעים

בהתאם לתוצאות של תכנית ההעמסה. השפעת השינוי בביקוש בכל אינטרוול

נבחנת על תכנית זו, כאשר סכום כלל השינויים בהעמסת היחידות הינו מחיר השוק

המייצג לאותו האינטרוול.

להלן השינוי (אדום) בתנאי היישום של פונקציית המטרה:

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize} \quad \sum_{t \in T} \left[OR_t + OL_t + \sum_{u \in U} OC_{u,t} \right] \\
 & \text{subject to} \quad (7) - (53) \\
 & 0 \leq p_{u,t} \leq P_u^{\max} \quad \forall u \in U, t \in T \\
 & g_{u,t} \geq 0 \quad \forall u \in U_{Gas}, t \in T \\
 & (u_{u,t}, v_{u,t}, w_{u,t}) = (u_{u,t}^*, v_{u,t}^*, w_{u,t}^*) \quad \forall u \in U, t \in T \\
 & 0 \leq r_{u,t}^D, r_{u,t}^U \leq P_u^{\max} - P_u^{\min} \quad \forall u \in U, t \in T \\
 & 0 \leq x_{i,u,t} \leq 1 \quad \forall i \in I_u, u \in U_{IPP}, t \in T \\
 & \tilde{u}_{z,u,t} = \tilde{u}_{z,u,t}^* \quad \forall z \in Z, u \in U_{FZ}, t \in T \\
 & \tilde{p}_{z,u,t} \leq 0 \quad \forall z \in Z, u \in U_{FZ}, t \in T \\
 & s_{s,u,t} = s_{s,u,t}^* \quad \forall s \in S, u \in U, t \in T \\
 & 0 \leq r_t \leq R_t \quad \forall t \in T \\
 & 0 \leq l_t \leq D_t \quad \forall t \in T \\
 & E_b^{\min} \leq e_{b,t} \leq E_b^{\max} \quad \forall t \in T, b \in B \\
 & (u_{b,pump,t}, v_{b,pump,t}, w_{b,pump,t}) = (u_{b,pump,t}^*, v_{b,pump,t}^*, w_{b,pump,t}^*) \quad \forall b \in B, t \in T \\
 & (u_{b,gen,t}, v_{b,gen,t}, w_{b,gen,t}) = (u_{b,gen,t}^*, v_{b,gen,t}^*, w_{b,gen,t}^*) \quad \forall b \in B, t \in T \\
 & (u_{b,pump,t,g}, u_{b,gen,t,g}) = (u_{b,pump,t,g}^*, u_{b,gen,t,g}^*) \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \\
 & 0 \leq p_{b,pump,t,g} \leq P_{b,pump,g}^{\max} \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \\
 & 0 \leq p_{b,gen,t,g} \leq P_{b,gen,g}^{\max} \quad \forall b \in B, t \in T, g \in G_b \\
 & 0 \leq r_{b,t,g}^D, r_{b,t,g}^U \leq P_{b,gen,g}^{\max} - P_{b,gen,g}^{\min} \quad \forall u \in U, t \in T
 \end{aligned}$$

4. תרחישי קביעת מחיר השוק

4.1. להלן המלצת מנהל המערכת לאופן קביעת מחיר השוק בתרחישי קצה²:

טבלה 2 תרחישי מחיר השוק

מספר	התרחיש	תיאור	מחיר נקבע על ידי
1	שגרה	עמידה בדרישות הביקוש ואילוצים מערכתיים	³ העלות השולית הזולה ביותר בגז
2	מחיר שוק נקבע על ידי יחידת יצור המופעלת בפחם	חוסר יכולת לייצר בגז או חוסר גז ברמה משקית לטובת יצור החשמל	⁴ הצעת המחיר היקרה ביותר בגז שנרכשה באותו פרק זמן
3	ניהול מחסור (ללא ניהול ביקוש)	חוסר יכולת מספקת במשק לייצור חשמל כמענה לביקושים ועמידה בדרישות הרזרבות	לצרכי תשלום אנרגיה - לפי הצעת המחיר הגבוהה ביותר שמומשה, לצרכי סטיות ייצור/צריכה לפי עלות אנרגיה לא מסופקת
4	קטימת ייצור של אנרגיה מתחדשת, לא מסיבות של מגבלות הולכה מקומיות	אי עמידה בדרישות אילוצים תפעוליים כגון: אינרציה מערכתית לצורך מניעת הפרעות מערכתיות	0 MWh
5	מחסור ביכולת זמינה בגז	חוסר יכולת ייצור בגז, למרות שישנו גז זמין	במידה ומחיר הפחם קבע את מחיר השוק - הצעת המחיר היקרה ביותר בגז שנרכשה באותו פרק זמן, אחרת - מחיר יחידת יצור שהופעלה בסולר
6	מחסור בגז	אי זמינות ספק גז אחד או יותר	הצעת המחיר היקרה ביותר בגז שנרכשה באותו פרק הזמן
7		תקלה בהולכת גז	הצעת המחיר היקרה ביותר בגז שנרכשה באותו פרק הזמן

² הכללים לקביעת מחיר השוק בתרחישים אלה ייקבעו על ידי רשות החשמל ויעוגנו באמות המידה

³ העלות השולית יכולה לנבוע מהצעת מחיר להעלאת/הורדת הספק או כל שילוב ביניהם

⁴ העמסת יחידות בפחם אינו שיקול כלכלי אלא לפי הנחייה רגולטורית

5. דוגמאות

5.1. הדוגמאות המתוארות מטה מתייחסות למקרים שונים של העמסת יחידות הייצור

לצורך הדגמת אופן חישוב מחיר השוק.

התרחישים מציינים מס' הגבלות/אילוצים בודדים עבור אינטרוול בודד, כאשר בתהליך תכנון העמסה הרשמי ישנם עשרות ואף מאות אילוצים אשר מייצרים מורכבות בזיהוי היחידה הקובעת ו/או הסיבה לאותו המחיר.

5.2. האילוצים אשר נדרש לאכוף בדוגמאות הן:

- רזרבה לוויסות התדר – רזרבה הממומשת מיחידות ייצור מסונכרנות באמצעות LFC (Load Frequency Control) בעת חריגה מסף מערכתי נדרש.
רזרבה זו רלוונטית לשינויים חיוביים ושלייליים ברמת התדר, אך למען הפשטות, ההתייחסות היא לשינויים חיוביים.
- רזרבה סובבת ידנית – רזרבה הממומשת מיחידות ייצור מסונכרנות באמצעות מתן הנחייה פרטנית כמענה לאירועים לא מתוכננים ממושכים, למשל סטייה בביקוש המשקי.
רזרבה זו יכולה לתת מענה לשינויים חיוביים ושלייליים בביקוש, אך למען הפשטות, ההתייחסות היא לשינויים חיוביים בלבד.
- נדרש לאכוף את שתי הרזרבות במקביל.
- הדרישה לרזרבה לוויסות התדר יכולה להיכלל ברזרבה הסובבת.
- אין התייחסות לעלות ההתנעה ועלות ייצור בעומס מינימום.

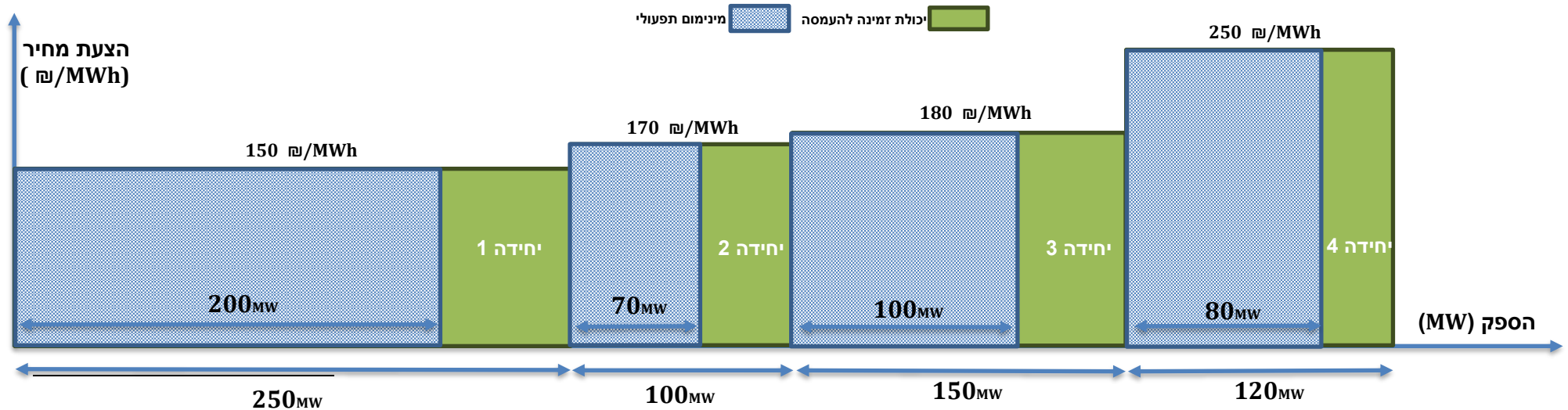
5.3. תרחיש 1 – שגרה

ביקוש משקי – MW 480, דרישת רזרבה סובבת – MW 100, דרישת רזרבה לוויסות תדר – MW 60

טבלה 3 תרחיש 1 – קלט

היצרן	יכולת זמינה (MW)	עומס מינימום (MW)	קצב שינוי עומס ⁵ (MW/דקה)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	תרומה לרזרבה לוויסות (MW)	הצעת מחיר (₪/MWh)
יחידה 1 (גז)	250	200	0.33	40	40	150
יחידה 2 (גז)	100	70	2	20	20	170
יחידה 3 (גז)	150	100	1	40	0	180
יחידה 4 (גז)	120	80	3	40	0	250

איור 1 תרחיש 1 קלט



⁵ קצב שינוי העומס לצרכי אנרגיה שונה מקצב שינוי העומס לטובת תרומה לרזרבה

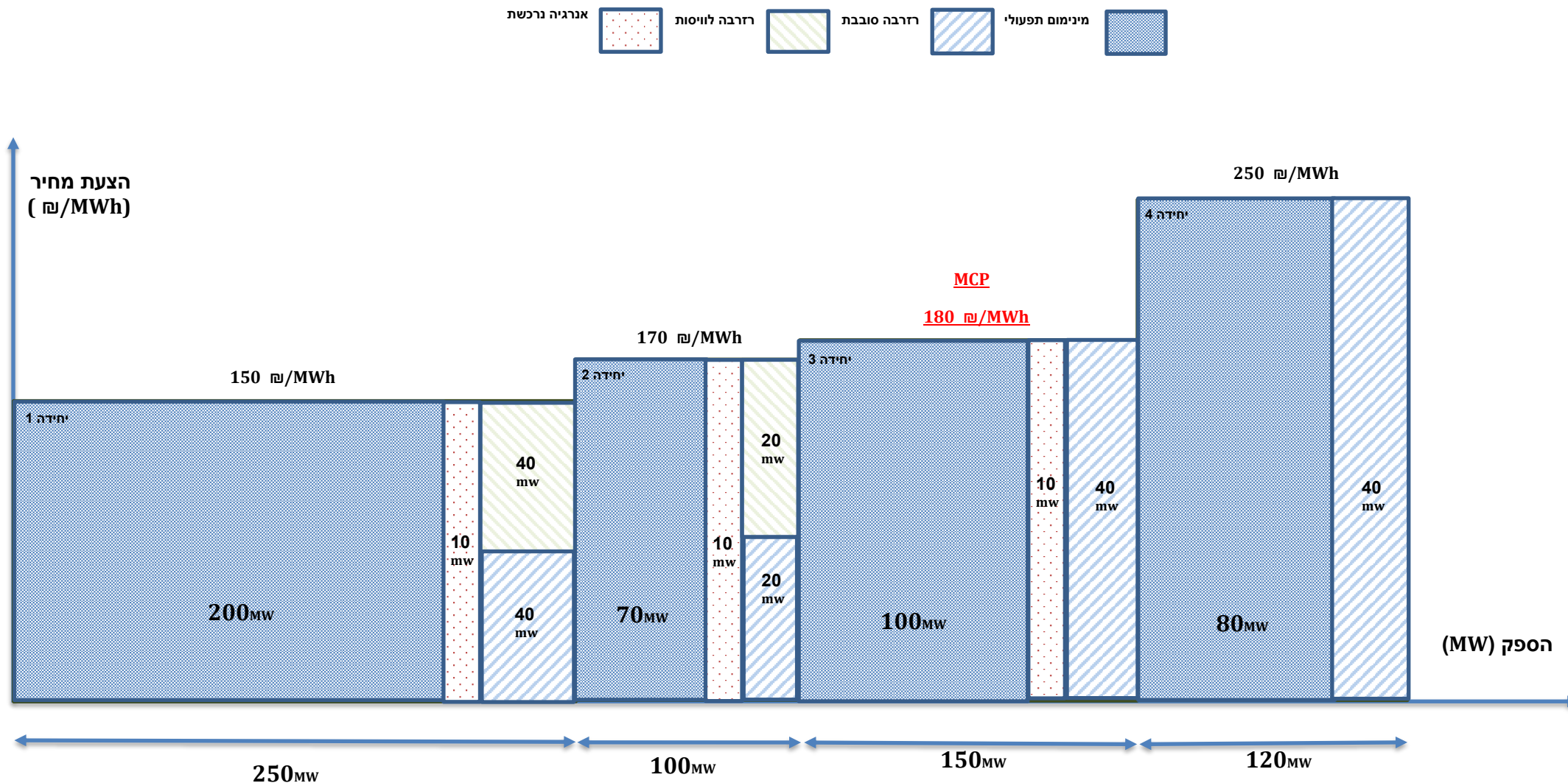
תוצאות העמסה עבור אינטרוול זה:

טבלה 4 תרחיש 1 – פלט

היצרן	מימוש הצעת מחיר לאנרגיה (MW)	סך העמסה (MW)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	תרומה לרזרבה לוויסות (MW)	תרומה למחיר השוק	מחיר השוק (MWh)
יחידה 1	10	210	40	40	לא	180 (יחידה 3)
יחידה 2	10	80	20	20	לא	
יחידה 3	10	110	40	0	כן	
יחידה 4	0	80	40	0	כן	
סה"כ	30	480	140	60		

- יחידות 1,2 מספקות **מענה לדרישה לרזרבה לוויסות** ולכן העומס שלהן מוגבל לרמה של MW 210 ו-MW 80 בהתאמה.
- יחידות אלו **לא מסוגלות** לתת מענה בעת עליית הביקוש ולכן הן אינן משתתפות בקביעת מחיר השוק.
- יחידה 3 מועמסת באופן כלכלי ובמקביל מספקת מענה לדרישה לרזרבה סובבת.
- יחידה 4, אשר הינה היקרה ביותר, מספקת מענה לביקוש בלבד.
- יחידות 3,4 מסוגלות **לקבוע את מחיר השוק** ללא פגיעה בדרישות הרזרבה.
- הצעת המחיר של יחידה 3 יותר **זולה** ולכן היא זו **שקובעת את מחיר השוק**.

איור 2 תרחיש 1 פלט



5.4. תרחיש 2 – השתתפות פחם בקביעת המחיר

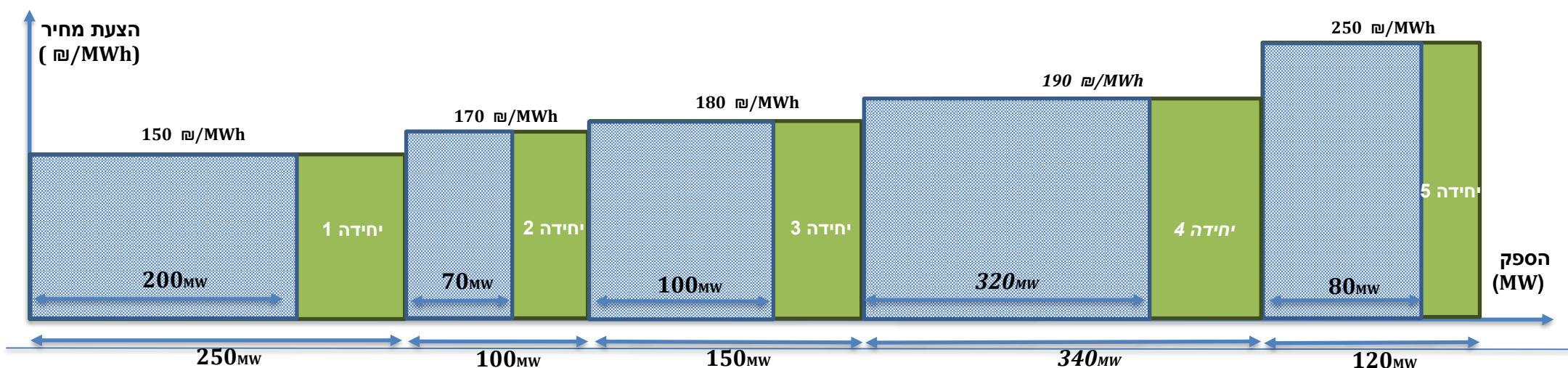
ביקוש משקי – MW 810, דרישת רזרבה סובבת – MW 130, דרישת רזרבה לוויסות תדר – MW 100

טבלה 5 תרחיש 2 - קלט

היצרן	יכולת זמינה (MW)	עומס מינימום (MW)	קצב שינוי עומס (MW/דקה)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	תרומה לרזרבה לוויסות (MW)	הצעת מחיר (₪/MWh)
יחידה 1 (גז)	250	200	0.33	40	30	150
יחידה 2 (גז)	100	70	2	20	20	170
יחידה 3 (גז)	150	100	1	50	30	180
יחידה 4 (פחם)	340	320	5	0	0	190
יחידה 5 (גז)	120	80	3	40	20	250

איור 3 תרחיש 2 קלט

יכולת זמינה להעמסה מינימום תפעולי



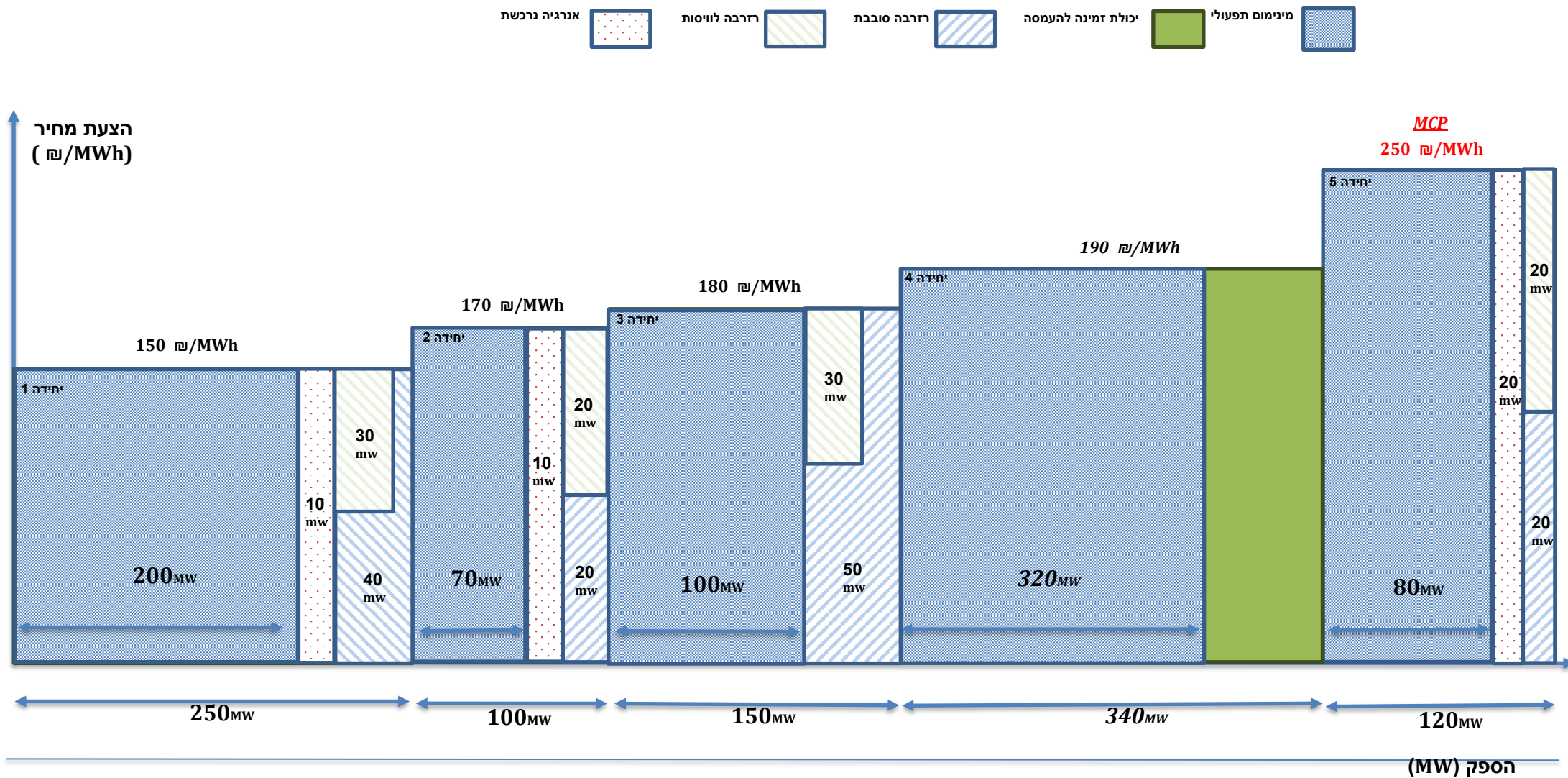
תוצאות העמסה עבור אינטרוול זה:

טבלה 6 תרחיש 2 פלט

היצרן	מימוש הצעת מחיר להעלאת אנרגיה (MW)	סך העמסה (MW)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	תרומה לרזרבה לוויסות (MW)	תרומה למחיר השוק	MCP (₪/MWh)
יחידה 1 (גז)	10	210	40	30	לא	250 (יחידה 5)
יחידה 2 (גז)	10	80	20	20	לא	
יחידה 3 (גז)	0	100	50	30	לא	
יחידה 4 (פחם)	0	320	0	0	כן	
יחידה 5 (גז)	20	100	20	20	לא	
סה"כ	40	810	130	100		

- יחידות 1-3,5 נותנת **מענה לדרישות הרזרבה** ולכן אינן יכולות לשנות את העמסתן. המשמעות היא כי אינן יכולות לתת מענה לשינוי בביקוש ולכן **לא משתתפות** בקביעת מחיר השוק.
- יחידה 4, המופעלת בפחם, מועמסת בעומס חלקי לאור ההנחייה לצמצום שימוש בפחם, למרות שמבחינת מזעור עלויות הייתה אמורה להיות מועמסת לרמה גבוהה יותר. כמו כן, עקב מגבלות טכנולוגיות היא אינה תורמת לאף רזרבה.
- למרות שיחידה 4 הינה היחידה השולית בעת עליית הביקוש, על מנת למנוע אי קמירות (Non Convexity) במחיר השוק, **יחידה זו מוחרגת** מקביעת המחיר ובמקומה נבחרת הצעת המחיר היקרה ביותר **בגז** אשר כבר נרכשה באותו פרק זמן.
- הצעת המחיר של יחידה **5**, 250 ₪/MWh, הינה ההצעה אשר **קובעת את מחיר השוק**.

איור 4 תרחיש 2 פלט



5.5. תרחיש 3 – הגבלת קצב שינוי עומס

להלן תנאי ההתחלה של החישוב, כאשר אינטרוול הבדיקה הוא אינטרוול 2:

טבלה 7 תרחיש 3 - תנאי התחלה

הפרמטר	אינטרוול 1	אינטרוול 2	אינטרוול 3
ביקוש משקי (MW)	480	510	480
רזרבה סובבת (MW)	100	100	100
רזרבה לוויסות (MW)	80	80	80

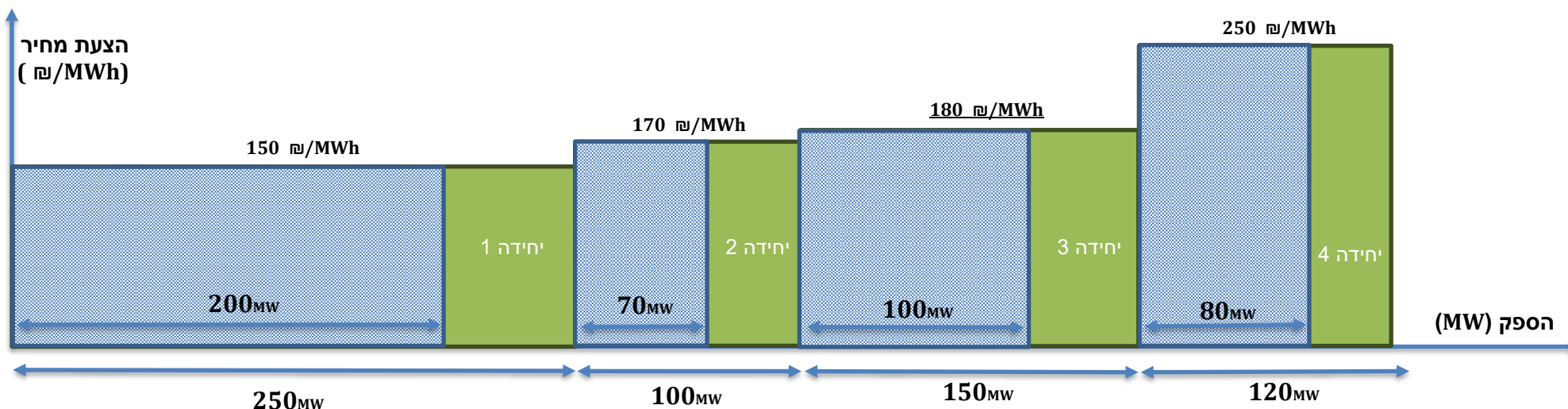
נתוני היחידות:

טבלה 8 תרחיש 3 - קלט

היצרן	יכולת זמינה (MW)	עומס מינימום (MW)	קצב שינוי עומס (MW\דקה)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	תרומה לרזרבה לוויסות (MW)	הצעת מחיר (ש"ח\MWh)
יחידה 1	250	200	0.33	40	40	150
יחידה 2	100	70	2	20	20	170
יחידה 3	150	100	0.33	40	30	180
יחידה 4	120	80	3	40	20	250

איור 5 תרחיש 3 קלט

מינימום תפעולי יכולת זמינה להעמסה



תוצאות העמסה עבור האינטרוולים:

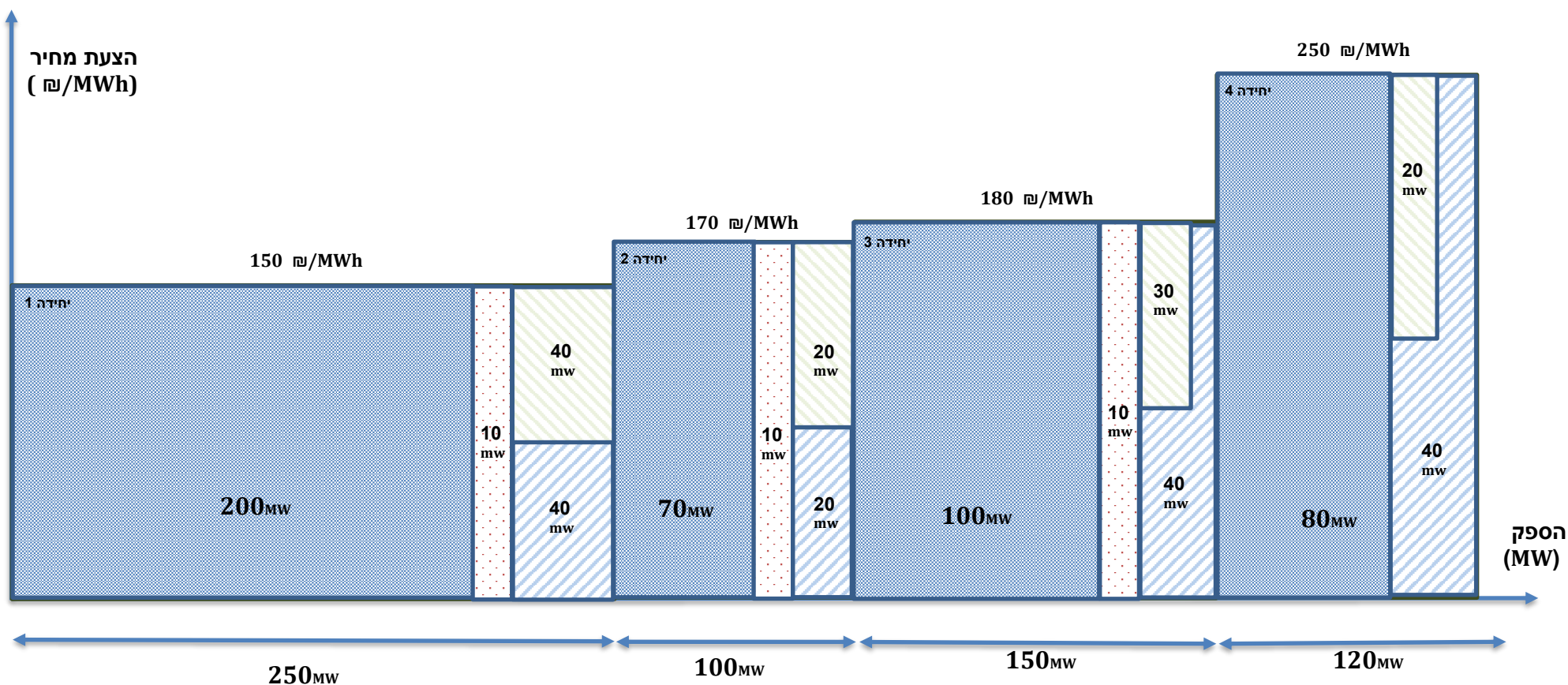
טבלה 9 תכנית העמסה

תרומה לרזרבה לוויסות (MW)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	סה"כ ייצור (MW)	יחידה 4	יחידה 3	יחידה 2	יחידה 1	
110	140	480	80	110	80	210	אינטרוול 1
90	110	510	80	110	100	220	אינטרוול 2
120	140	480	80	110	80	210	אינטרוול 3

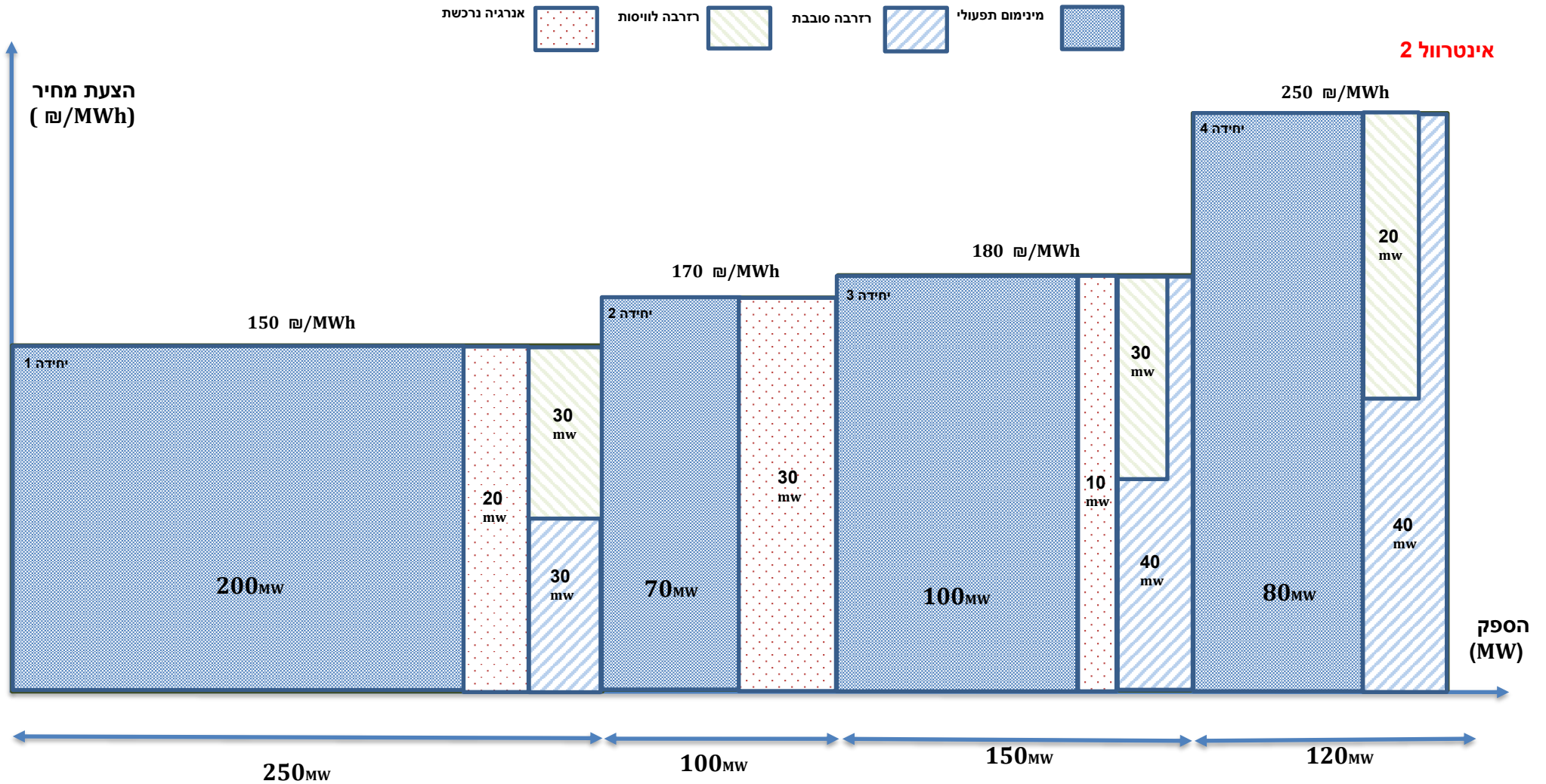
איור 6 תרחיש 3 פלט אינטרוול 1

אינטרוול 1

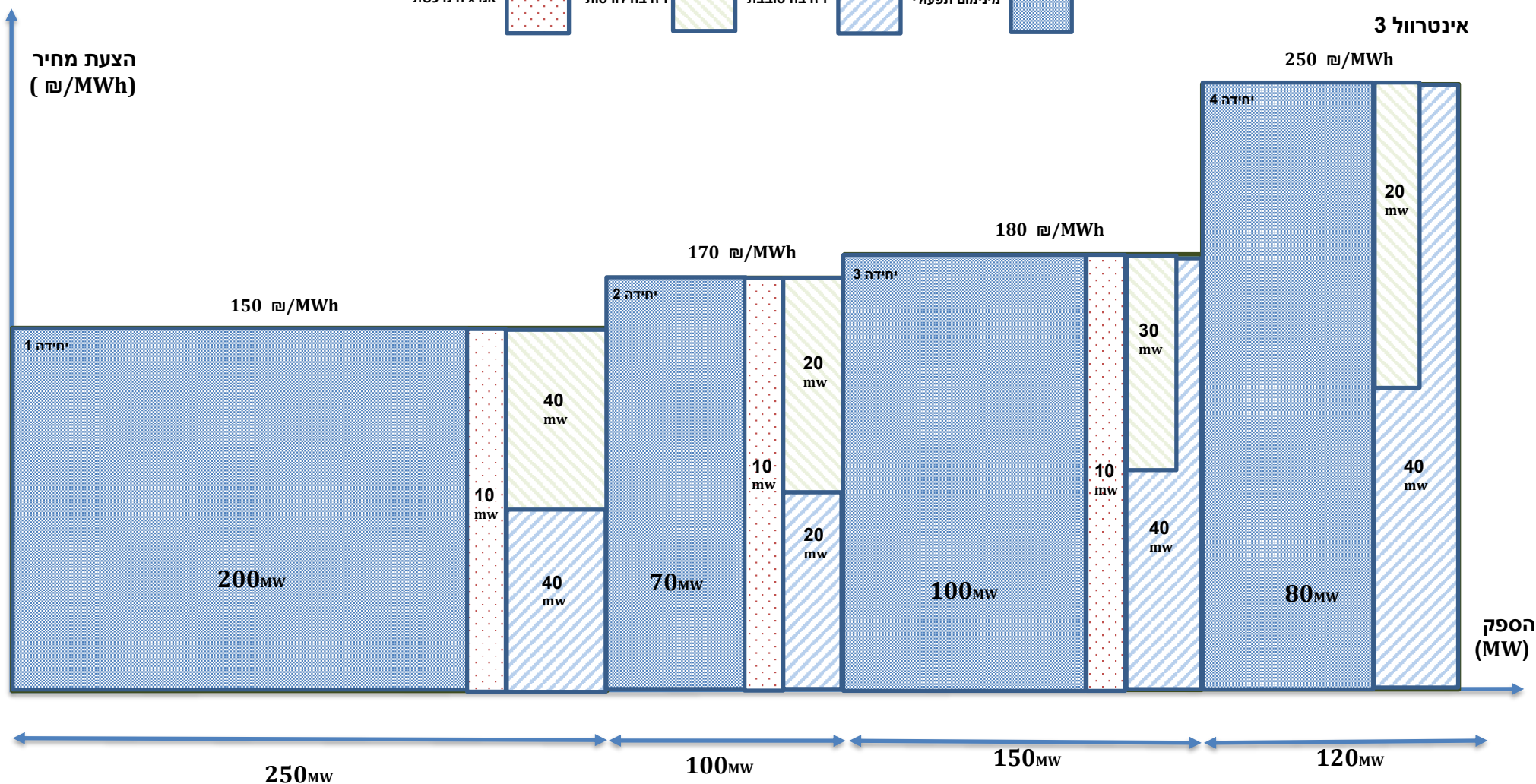
מינימום תפעולי רזרבה סובבת רזרבה לוויסות אנרגיה נרכשת



איור 7 תרחיש 3 פלט אינטרוול 2

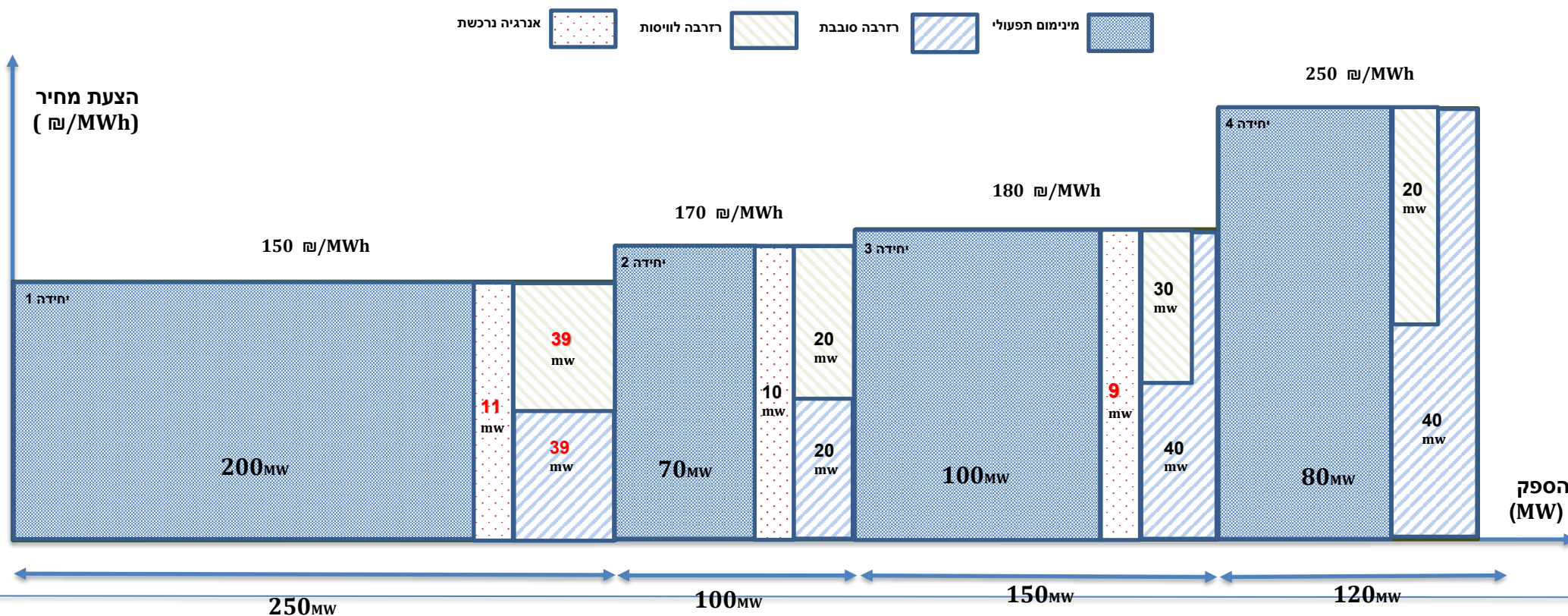


מינימום תפעולי רזרבה סובבת רזרבה לוויסות אנרגיה נרכשת



אינטרוול 2 מייצג את העמסת היחידות בהתאם למגבלת קצב שינוי העומס והצעות המחיר. בהתאם לתוצאות, מענה לעלייה בביקוש לצורך קביעת מחיר השוק השולי ניתן לקבל על העלאת העומס של יחידה 4 תוך שמירת דרישת הרזרבות ולכן המחיר האפשרי הוא 250 ₪/MWh. יחד עם זאת, מחיר זה אינו עולה בקנה אחד עם מזעור עלויות שכן ניתן למצוא פתרון יותר זול לתוספת הביקוש. בתרחיש המתואר, פתרון זול יותר יוכל להתקבל אם יחידה 1 תוכל להעלות בעומס באינטרוול זה, למעשה נדרש ליצור את התנאים כך שמגבלת קצב שינוי העומס לא תהיה חסם. לצורך "שחרור" החסם, יש לבצע שינויים החל מאינטרוול 1:

איור 9 תרחיש 3 שינוי אינטרוול 1



באיור 9 מוצג כי נדרש להעלות את העומס של יחידה 1 ב MW (MW211) על מנת לתמוך בהעלאת העומס באינטרוול 2 בהתאם לאילוף קצב שינוי העומס. על מנת לשמור על איזון הביקוש, יש לבצע הורדה בעומס של יחידה 3 – ל MW 109. סך הדרישה לרזרבות באינטרוול אינה חורגת מהסף המותר ולכן לא נדרש לבצע שינויים נוספים.

יחידה 3 ו-2 הינן היחידות אשר מסוגלות לבצע את ההורדה בעומס, אך משיקולי מזעור עלות ישנה כדאיות לבצע את השינוי ביחידה 3. יחידה זו "מחזירה" את הצעת המחיר של 180 ₪/MWh, לעומת 170 ₪/MWh. סך השינוי:

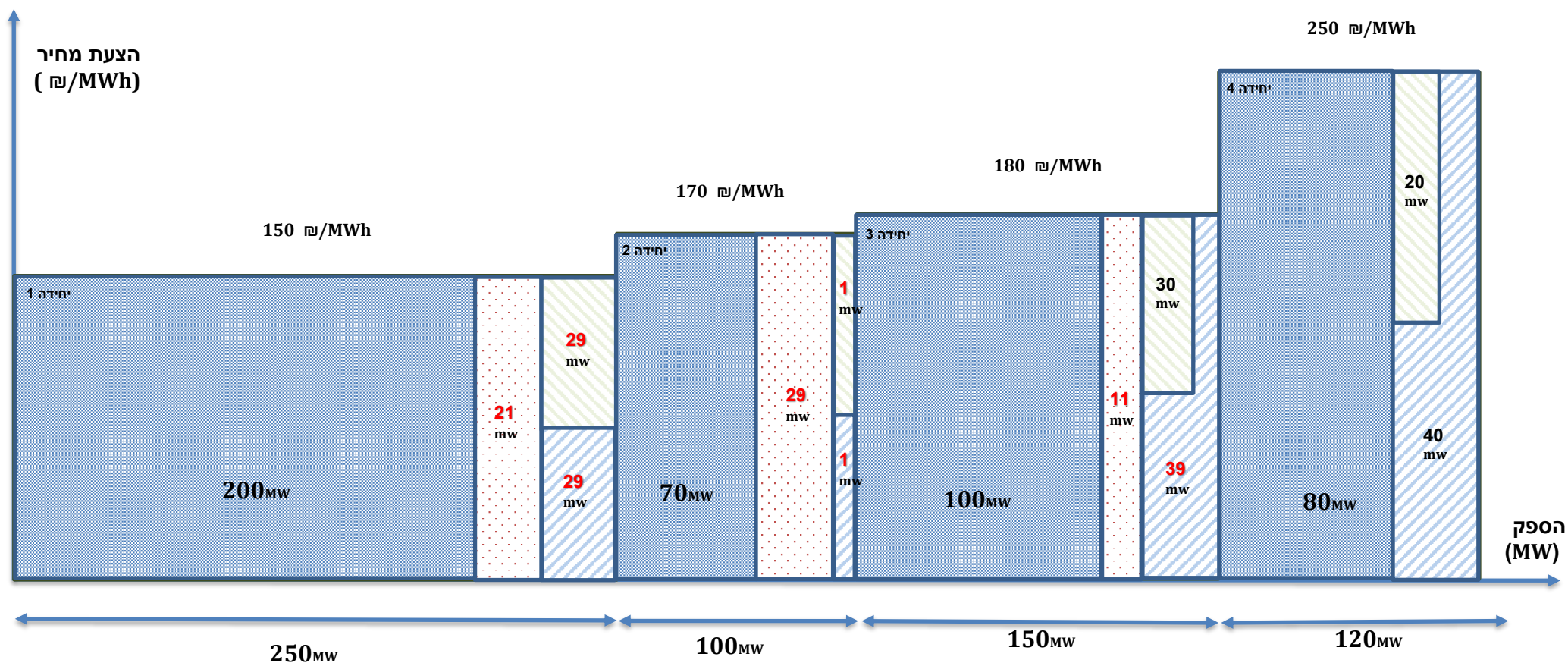
טבלה 10 תרחיש 3 שינויים באינטרוול 1

אינטרוול 1	יחידה 1	יחידה 2	יחידה 3	יחידה 4	סה"כ
השינוי (MW)	+1		-1		0
השפעה (₪)	150		- 180		- 30

בעקבות השינויים באינטרוול 1, להלן ההשפעה באינטרוול 2:

איור 10 תרחיש 3 שינויים באינטרוול 2

מינימום תפעולי רזרבה סובבת רזרבה לוויסות אנרגיה נרכשת



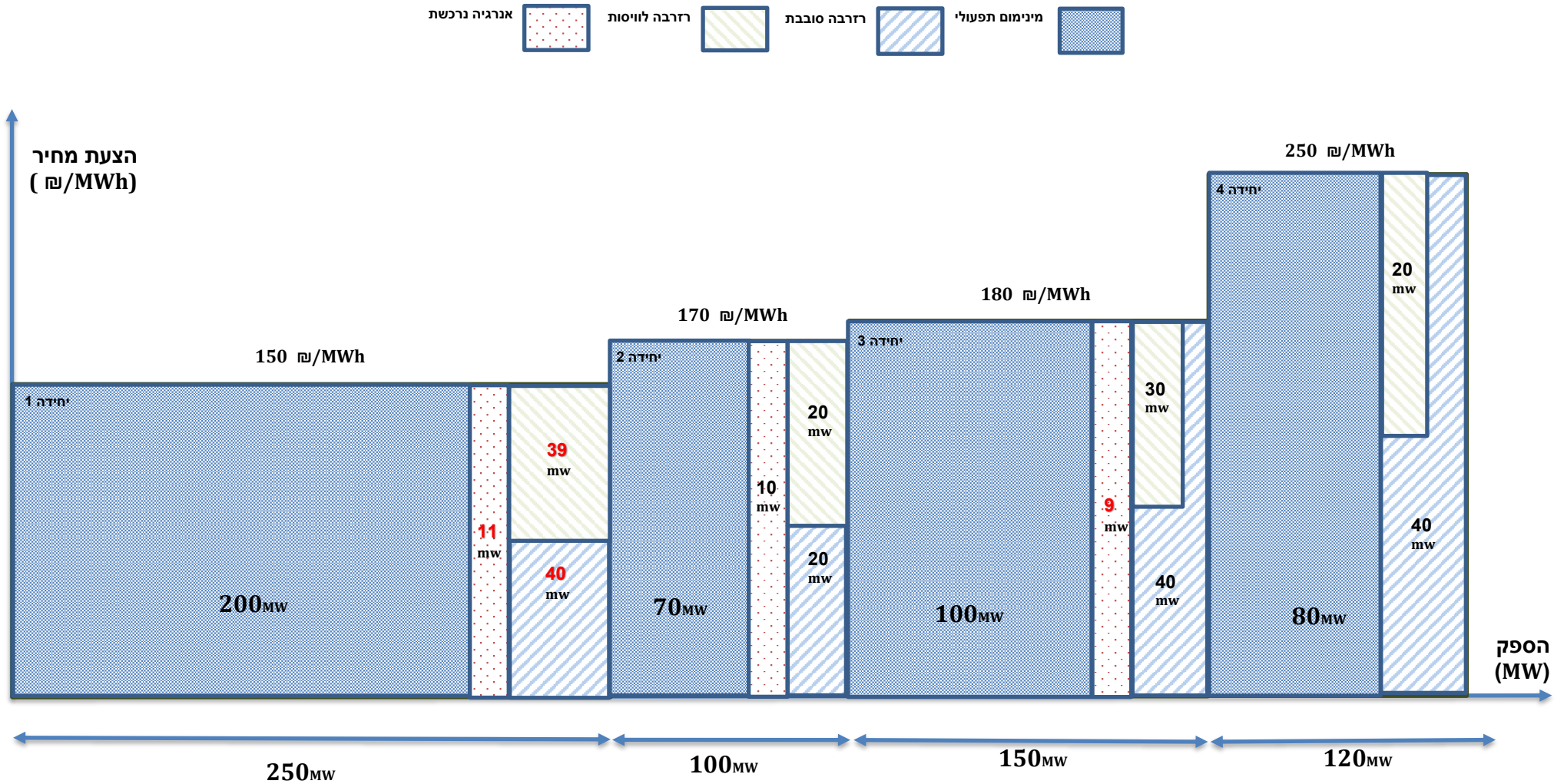
כעת, קצב שינוי העומס של יחידה 1 אינו מגביל אותה ולכן ניתן להעלותה לעומס MW 221. עקב העלאת העומס נוצר מחסור ברזרבה לוויסות: סך התרומה של יחידה 1,3,4 הוא MW 79 כאשר נדרש לשמור לפחות MW 80. מענה למחסור זה ניתן על ידי הקטנת רמת הייצור של יחידה 2 ל MW99 ובכך תתאפשר תוספת של MW 1 לטובת הרזרבה. יחד עם זאת, שינוי זה מפר את האיזון בין הביקוש לייצור ולכן נדרש להעלות את רמת העומס של יחידה 3 או 4. משיקולי מזעור עלויות, הצעת המחיר של יחידה 3 הינה נמוכה יותר ולכן ישנה כדאיות להעמיסה ל MW 111. סך השינויים באינטרוול זה:

טבלה 11 תרחיש 3 שינויים באינטרוול 2

אינטרוול 2	יחידה 1	יחידה 2	יחידה 3	יחידה 4	סה"כ
השינוי (MW)	+1	-1	+1		+1
השפעה (ש)	150	- 170	180	-	160

האינטרוול השלישי נדרש לשינוי עקב העלאת העומס ביחידה 1 ל-MW 221. עקב מגבלת קצב שינוי העומס היחידה אינה מסוגלת לרדת ל MW 210, אלא רק ל MW 211. המשמעות היא שנדרש לבצע הורדה של MW 1 ביחידה אחרת, על מנת לשמור על האיזון בין הביקוש לייצור. משיקולי מזעור עלויות, הורדה בעומס של יחידה 3 מ MW 110 ל MW 99 הינה הפתרון המתאים.

איור 11 תרחיש 3 שינויים באינטרוול 3



להלן סך השינויים ב3 האינטרוולים:

טבלה 12 תרחיש 3 סיכום השינויים

פרק הזמן	יחידה 1	יחידה 2	יחידה 3	יחידה 4	סה"כ
אינטרוול 1 (ש)	150		-180	-	- 30
אינטרוול 2 (ש)	150	- 170	180	-	160
אינטרוול 3 (ש)	150		-180	-	- 30
סה"כ (ש)	450	- 170	- 180	-	100

לסיכום, מחיר השוק המייצג של האינטרוול השני הוא **100 ₪/MWh**.

המחיר מורכב משילוב של הוספת והחסרת הצעות המחיר, כתלות באופי השינוי בכל אינטרוול אשר בו נדרש לבצע שינוי.

מחיר זה מייצג את ההשפעה הכללית של מס' אינטרוולים על מנת למזער את העלות, בעת העלאת הביקוש.

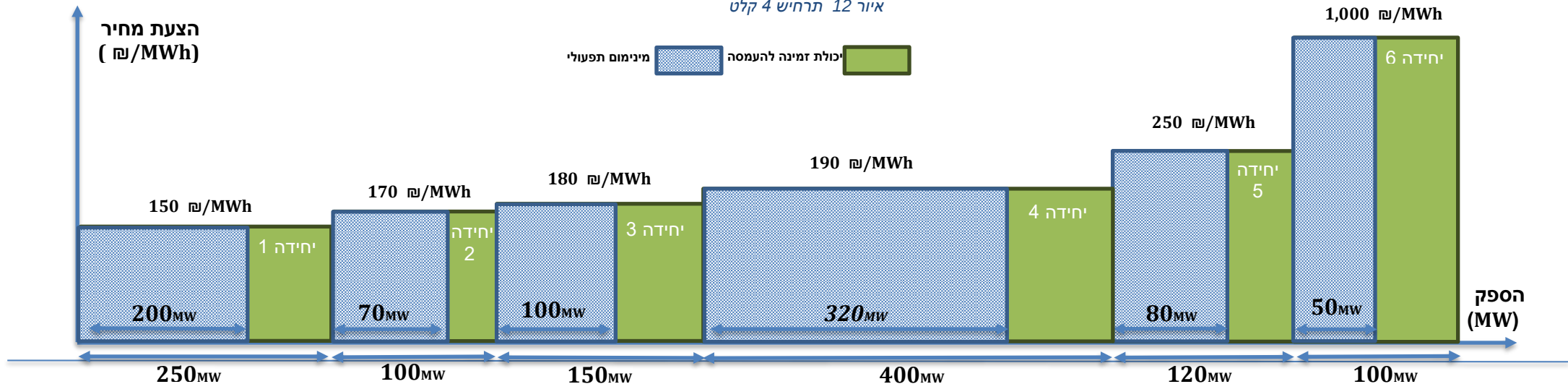
5.6. תרחיש 4 – היעדר יכולת ייצור בגז

תרחיש זה בוחן את ההשפעה על מחיר השוק כאשר המענה לביקוש מתקבל מיחידה אשר אינה מייצרת בגז עקב היעדר יכולת זמינה בגז. ביקוש משקי – MW 1000, דרישת רזרבה סובבת – MW 100, דרישת רזרבה לוויסות תדר – MW 50

טבלה 13 תרחיש 4 קלט

היצרן	יכולת זמינה (MW)	עומס מינימום (MW)	קצב שינוי עומס (MW/דקה)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	תרומה לרזרבה לוויסות (MW)	הצעת מחיר (₪/MWh)
יחידה 1 (גז)	250	200	0.33	40	30	150
יחידה 2 (גז)	100	70	2	20	20	170
יחידה 3 (גז)	150	100	1	40	30	180
יחידה 4 (פחם)	400	320	5	0	0	190
יחידה 5 (גז)	120	80	3	40	20	250
יחידה 6 (סולר)	100	50	2	20	0	1,000

איור 12 תרחיש 4 קלט



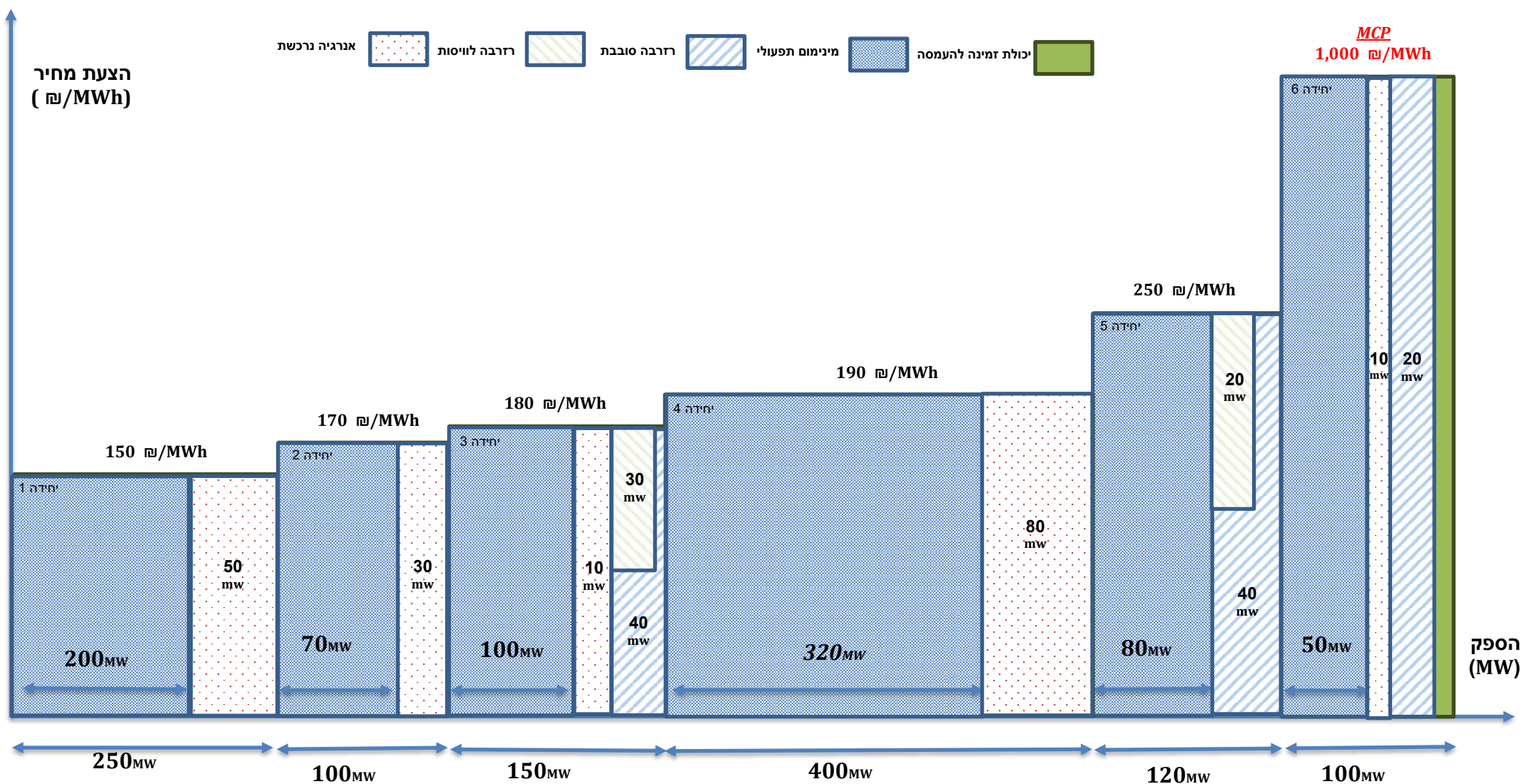
להלן אופן העמסת היחידות בהתאם לתנאי התרחיש:

טבלה 14 תרחיש 4 פלט

היצרן	מימוש הצעת מחיר להעלאת אנרגיה (MW)	סך העמסה (MW)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	תרומה לרזרבה לזמינות (MW)	תרומה למחיר השוק	MCP (₪/MWh)
יחידה 1	50	250	0	0	לא	1,000
יחידה 2	30	100	0	0	לא	
יחידה 3	10	110	40	30	לא	
יחידה 4 (פחם)	80	400	0	0	לא	
יחידה 5	0	80	40	20	לא	
יחידה 6 (סולר)	10	60	20	0	כן	
סה"כ	180	1,000	100	50		

על מנת למזער את העלות המשקית תוך כדי שמירה על דרישות הרזרבה:

- יחידות 1,2 אשר הינן הזולות ביותר מבין צי היחידות הזמין, מועמסות לעומס מלא (250 ו-100 MW בהתאמה) ולכן אינן שותפות לתרומה לדרישת הרזרבות. יחידות אלו אינן יכולות לתרום למחיר השוק עקב מיצוי היכולת.
 - יחידה 3,5 מועמסות לעומס חלקי (110 ו-80 MW בהתאמה) על מנת לתת מענה לביקוש ולדרישה לרזרבה סובבת וזמינות. למרות שיחידה 5 יקרה יותר מיחידה 4, בהתאם להנחייה לצמצום ייצור בפחם, העומס ביחידה 4 מועלה רק לאחר מיצוי היכולת בגז ולצרכי שרידות (מענה לדרישה לרזרבה). יחידות אלו אינן יכולות לתרום למחיר השוק עקב מתן מענה לדרישה לרזרבה.
 - על מנת למזער את צריכת הסולר (דלק יקר ומזהם), יחידה 4 מועמסת לעומס מלא (400 MW).
 - יחידה זו מועמסת באופן מלא ולכן אינה יכולה לתרום למחיר השוק.
 - יחידה 6 אשר מופעלת בסולר, מועמסת אחרונה לצרכי מענה לביקוש (תרומה של 10 MW) ולצרכי רזרבה סובבת (20 MW).
- ליחידה זו ישנה יתרת אנרגיה אשר ניתנת למימוש ללא פגיעה בדרישות הרזרבה ובהתאם לתרחישי טבלה 2, היא זו שקובעת את מחיר השוק 1000 ₪/MWh.



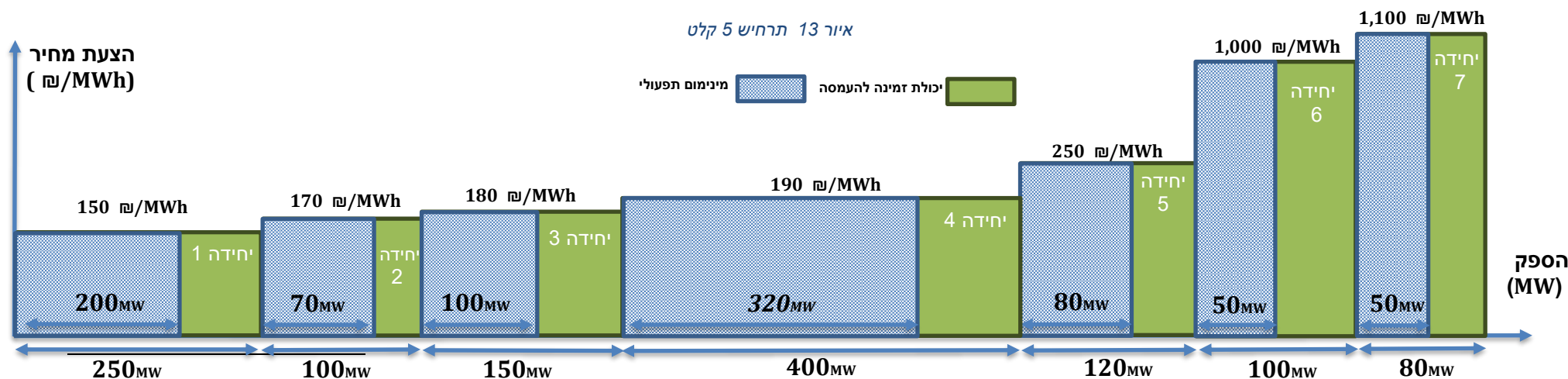
5.7. תרחיש 5 – מחסור באספקת גז במשק החשמל

ביקוש משקי – MW 950, דרישת רזרבה סובבת – MW 100, דרישת רזרבה לוויסות תדר – MW 50, מגבלת ייצור בגז – MW 440

טבלה 15 תרחיש 5 קלט

היצרן	יכולת זמינה (MW)	עומס מינימום (MW)	קצב שינוי עומס (MW\דקה)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	תרומה לרזרבה לוויסות (MW)	הצעת מחיר (ש"ח/MWh)
יחידה 1 (גז)	250	200	0.3	40	30	150
יחידה 2 (גז)	100	70	2	20	20	170
יחידה 3 (גז)	150	100	1	40	30	180
יחידה 4 (פחם)	400	320	5	0	0	190
יחידה 5 (גז)	120	80	3	40	20	250
יחידה 6 (סולר)	100	50	2	20	0	1,000
יחידה 7 (סולר)	80	50	2	20	0	1,100

איור 13 תרחיש 5 קלט



⁶ מגבלת גז שעתית מיושמת באמצעות הגבלת צריכה של MMBTU\שעה. לצרכי הדוגמא היקף הצריכה תורגם להספק (MW) בגז

להלן אופן העמסת היחידות בהתאם לתנאי התרחיש:

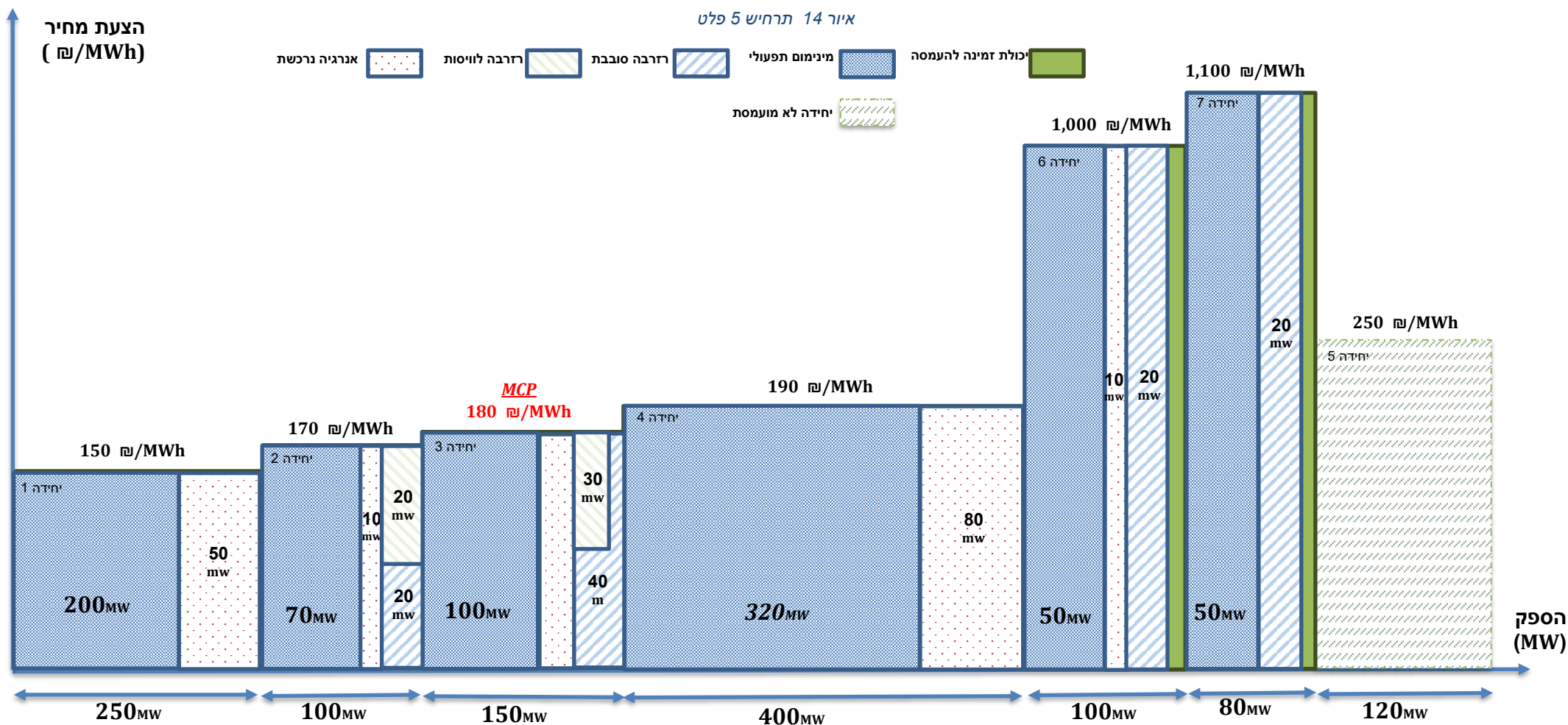
טבלה 16 תרחיש 5 פלט

היצרן	מימוש הצעת מחיר להעלאת אנרגיה (MW)	סך העמסה (MW)	תרומה לרזרבה סובבת (MW)	תרומה לרזרבה לוויסות (MW)	תרומה למחיר השוק	MCP (₪/MWh)
יחידה 1	50	250	0	0	לא	180
יחידה 2	10	80	20	20	לא	
יחידה 3	10	110	40	30	לא	
יחידה 4 (פחם)	80	400	0	0	לא	
יחידה 5	0	0	0	0	לא	
יחידה 6 (סולר)	10	60	20	0	לא	
יחידה 7 (סולר)	0	50	20	0	כן	
סה"כ	160	950	100	50		

במסגרת תנאי התרחיש ועל מנת למזער את העלות המשקית תוך כדי שמירה על דרישות הרזרבה:

- **יחידות 1,2,3** אשר צורכות גז והינן הזולות בתרחיש, **מועמסות** ראשונות, פרט ליחידה 4 (MUST RUN) אשר מועמסת למינימום. יחידה 1 שהינה הזולה ביותר מועמסת לעומס מלא. יחידות 2,3 מועמסות לעומס חלקי על מנת לאפשר עמידה בדרישת הרזרבה הסובבת והרזרבה לוויסות.
- סך הייצור בגז של 3 היחידות הינו **MW440** ולמעשה זוהי **המגבלה המשקית**.
- הפעלה של יחידה נוספת בגז (5) **אינה אפשרית** ולכן נדרש להעמיס את היחידה הפחמית (MUST RUN) **לעומס מלא** MW400.
- יחידה 6 אשר מופעלת **בסולר**, מועמסת **לעומס חלקי** MW60 על מנת לספק מענה לביקוש (תרומה של 60 MW) ולצרכי רזרבה סובבת (20 MW).
- על מנת לספק מענה לדרישת הרזרבה הסובבת, נדרש להעמיס את יחידה 7 לעומס מינימום MW50.
- בהתאם להעמסת היחידות והמענה לביקוש והרזרבות, רק יחידה 7 יכולה לקבוע את מחיר השוק שכן רק היא תוכל להעלות את העומס ולספק מענה לתוספת ביקוש ללא פגיעה בכלל הדרישות. יחד עם זאת, בהתאם **לתרחיש טבלה 2**, במקרה זה, הצעת המחיר של יחידה 7 **תוחלק** בהצעת מחיר של היחידה **היקרה ביותר בגז** (יחידה 3) שמומשה באותו הפרק הזמן - 180 ₪/MWh.

- לסיכום, מחיר השוק הקובע בתרחיש זה הוא **180 ₪/MWh**.



6. נוספח

להלן משמעות המשתנים אשר מופיעים בנוסחאות מימוש העמסת יחידות:

- T : משך פרק הזמן הרלוונטיים
- D : מס' הימים הרלוונטיים
- U : סט יחידות ייצור
- U_{MR} : סט יחידות ייצור הפועלות במשטר מחייב
- U_{FZ} : סט יחידות עם תחום אסור להעמסה
- U_{Coal} : יחידות ייצור הפועלות על בסיס הדלק פחם
- U_{Gas} : סט יחידות הפועלות על בסיס הדלק גז
- U_D : סט יחידות דו דלקיות
- B : יחידות אגירה, כולל אגירה שאובה
- $U_{RD} \subset U$: סט יחידות התורמות לרזרבה סובבת שלילית
- $U_{RU} \subset U$: סט יחידות התורמות לרזרבה סובבת חיובית
- S : תהליכי התנעה אפשריים (חמה, פושרת, קרה, קרה מאוד)
- Z : מס' טווחים האסורים להעמסה
- I_u : הצעות מחיר
- $T_u^{OFF} \subset T$: מינימום זמן הדממה
- $U_{PL} \subset U$: סט יחידות המוגבלות עקב אילוצי רשת ההולכה
- $U_{CCGT} \subset U$: סט יחידות התורמות לרזרבה
- G_b : יחידות אגירה שאובה

סט המשתנים הבא משמש לצרכי אופטימיזציה, בהתבסס על המשתנים שצוינו ברשימה מעלה:

- $p_{u,t}$: הספק אקטיבי של יחידה (MW)
- $g_{u,t}$: צריכת גז של יחידה (MMBTU)
- $u_{u,t}$: משתנה בינארי המתייחס למצב היחידה: 1 היחידה מייצרת, 0 היחידה לא מייצרת
- $v_{u,t}$: משתנה בינארי המזהה אם היחידה נמצאת בתהליך התנעה
- $w_{u,t}$: משתנה בינארי המזהה אם היחידה נמצאת בתהליך הדממה
- $r_{u,t}^D$: סך התרומה הפרטנית של יחידה לטובת רזרבה סובבת שלילית (MW)
- $r_{u,t}^U$: התרומה הפרטנית של יחידה לטובת רזרבה סובבת חיובית (MW)

- $x_{i,u,t}$: מזהה מימוש הצעת מחיר
- $\tilde{u}_{z,u,t}$: מזהה אזור העמסה של היחידה
- $\tilde{p}_{z,u,t}$: הספק אקטיבי באזור העמסה (MW)
- $s_{s,u,t}$: מזהה בינארי לסוג ההתנעה הנדרש
- r_t : סך ההספק האקטיבי של האנרגיה המתחדשת (MW)
- l_t : סך ניהול הביקוש (MW)
- $e_{b,t}$: אנרגיה אגורה במאגר עליון, אגירה שאובה (MWh)
- $u_{b,pump,t}, u_{b,gen,t}$: מזהה בינארי של מאגר עבור מתקן אגירה שאובה: ייצור, שאיבה, הדממה
- $v_{b,pump,t}, v_{b,gen,t}$: מזהה בינארי להתנעה של מתקן אגירה שאובה בסטטוס מסוים
- $w_{b,pump,t}, w_{b,gen,t}$: מזהה בינארי להדממה של מתקן אגירה שאובה
- $u_{b,pump,t,g}, u_{b,gen,t,g}$: מזהה בינארי לפעילות גנרטור של מתקן אגירה שאובה: ייצור, שאיבה, הדממה
- $p_{b,pump,t,g}, p_{b,gen,t,g}$: הספק אקטיבי של מתקן אגירה שאובה (MW)
- $r_{b,t,g}^U, r_{b,t,g}^D$: רזרבה המשויכת לטובת תרומה לרזרבה סובבת חיובית ושלילית (MW)

להלן הפרמטרים אשר משמשים לתיאור תכונות יחידות הייצור והאגירה:

- MK_{coal} : קנס לצורך הפחתת ייצור בפחם
- D_t : ביקוש משקי לחשמל (MW)
- R_t : סך הייצור באנרגיה מתחדשת (MW)
- RU : סך הדרישה לרזרבה סובבת חיובית (MW)
- RD : סך הדרישה לרזרבה סובבת שלילית (MW)
- $VOLL$: עלות אנרגיה לא מסופקת למשל: 100 000 \$/MWh
- $SC_{s,u}$: עלות התנעה עבור סוג התנעה (\$)
- $FP_{u,t}$: מחיר הגז (MMBTU/\$)
- HR_u : תצרוכת חום סגולית (MMBTU/MWh)
- VOM_u : עלות תפעול ותחזוקה (\$/MWh)
- MLC_u : עלות ייצור במינימום למשך שעה (\$/time period)
- Q_i : כמות הספק עבור הצעת מחיר (MW)
- PQ_i : הצעת מחיר עבור טווח (\$/MWh)
- p_u^{min} : יכולת מינימום (MW)
- p_u^{max} : יכולת מקסימום (MW)
- p_u^{MR} : פרופיל העמסה עצמית (MW)

- $ST_{s,u}$: מס' פרקי זמן נדרשים ליישום משך זמן הדממה מינימאלי
- RR_u^U : קצב שינוי עומס כלפי מעלה (MW/time period)
- RR_u^D : קצב שינוי עומס כלפי מטה (MW/time period)
- MUT_u (MUT_b): משך זמן הפעלה מינימאלי
- MDT_u (MDT_b): משך זמן הדממה מינימאלי
- $[P_u^{FZ}, \bar{P}_u^{FZ}]$: גבולות אזורים אסורים להעמסה (MW)
- PL_u : מגבלת עומס יחידה עקב אילוצי רשת ההולכה (MW)
- N_{CCGTL} : כמות מינימאלית של יחידות אשר נדרשות לייצר
- R_{CCGTL} : סך התרומה המינימאלית לרזרבה של סט יחידות
- Δt : רזולוציה של מודל ההעמסה, חצי שעה עבור המשק הישראלי
- $\eta_{b,pump}, \eta_{b,gen}$: נצילות מתקני אגירה במצב ייצור ושאיבה
- MST_b : מגבלת התנועות ביום חשמל
- $p_{b,pump,g}^{min}, p_{b,gen,g}^{min}$: יכולת מינימום של מתקני אגירה שאובה לטובת ייצור ושאיבה (MW)
- $p_{b,pump,g}^{max}, p_{b,gen,g}^{max}$: יכולת מקסימום של מתקני אגירה שאובה לטובת ייצור ושאיבה (MW)
- E_b^{min} : מינימום אנרגיה במאגר (MWh)
- E_b^{max} : מקסימום אנרגיה במאגר (MWh)