



# קוגנרציה בגז: תועלות ואתגרים בראי סביבתי

ד"ר יצחק קדם  
אגף אנרגיה ושינוי אקלים  
[isaacke@sviva.gov.il](mailto:isaacke@sviva.gov.il)

6.1.2025

מדינת ישראל  
המשרד להגנת הסביבה  
אגף בכיר שינויי אקלים - מיטיגציה



# תחומי השפעה סביבתית

## שינוי אקלים

- גזי חממה הנפלטים מהמתקן
- נזקים גלובליים
- מושפע רק מכמות וסוג גזי החממה

## זיהום אוויר

- מזהמי אוויר הנפלטים מהמתקן
- נזקים מקומיים
- מושפע ממספר גורמים שונים

## השפעות רוחביות

- ביזור משק החשמל – השפעה על גמישות הרשת וביטחון אנרגטי
- קיבוע תשתיות דלק מאובנים (האם תיתכן גמישות בדלק?)

**השפעות סביבתיות נבחנות תמיד ביחס לחלופה!**

# זיהום אוויר

- במדינת ישראל מתים כ 2,500 איש בשנה\* כתוצאה מזיהום אוויר
- בנוסף נגרמות שלל פגיעות בבריאות כולל החמרת תחלואה קיימת ויצירת תחלואה חדשה
- מקורות הזיהום העיקריים הם תחבורה, תעשייה, וייצור חשמל
- כדי להעריך השפעה של זיהום אוויר יש לשקלל (בין היתר):
  - סוג המזהמים הנפלטים
  - כמות ומשך הזיהום
  - גובה הפליטה
  - מרחק הפליטה מאוכלוסייה
  - נתונים מרחביים – טופוגרפיה, משטר רוחות, מיקרו-אקלים
  - חפיפה עם מקורות זיהום קיימים – ריכוזי רקע

# זיהום אוויר

מזהמים מרכזיים ממתקני קוגנרציה בגז:

- תחמוצות חנקן (NoX) – פגיעה במערכות נשימה ודם, הגברת מומים מולדים
- תחמוצות גופרית (SoX) – פגיעה בדרכי הנשימה
- פחמן חד חמצני (CO) – פגיעה בהולכת חמצן בדם, הפרעות בהתפתחות עוברית
- זיהום חלקיקי (PM 2.5, PM 10) – פגיעה במערכות נשימה ודם, התפתחות עוברית, מסרטנים
- חומרים אורגניים נדיפים (VOC) – גירויים בעיניים ודרכי הנשימה, בחילות וסחרחורות, פגיעה בכבד, כליות ומערכת העצבים המרכזית. חלקם מסרטנים
- פורמלדהיד (בעיקר ממנועי בע"פ) – גירויים בעיניים ובדרכי הנשימה, בחילות ושיעול. מסרטן וודאי

עבור כל מזהם קבועים בחוק ערכי סביבה קצרי טווח (חצי שעה-יום) וארוכי טווח (שנה)  
בנוסף במתקנים דרושי היתר פליטה נקבעים ערכי פליטה מהארובה (אחידים עד MW 50)

# שינוי אקלים

גזי חממה נפלטים ממתקני קוגנרציה בגז:

- פחמן דו חמצני ( $\text{CO}_2$ )
- מתאן (דליפות גז) – אפקט חממה גבוה פי 28 מ- $\text{CO}_2$
- תחמוצות חנקן ( $\text{NoX}$ ) אפקט חממה גבוה פי 265 מ- $\text{CO}_2$

לרוב במתקני אנרגיה הדגש הינו על פחמן דו-חמצני בתור גז החממה העיקרי שנפלט בניגוד למזהמי אוויר, מיקום הפליטה ותנאי המרחב אינם משפיעים על גודל הנזק



אם כך, האם מתקני קוגנרציה טובים או רעים לסביבה?

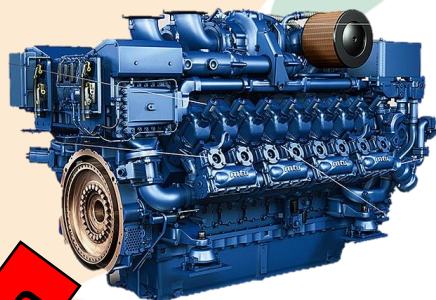
השפעות סביבתיות נבחנות תמיד ביחס לחלופה!



# סוגי גנרציה בגז

טרי-גנרציה

גז



חום

צילר ספיחה

קור

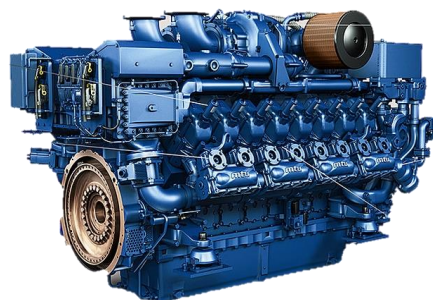
צריכה  
מקומית

צריכה/  
ייצוא

חשמל

קו-גנרציה

גז



חום

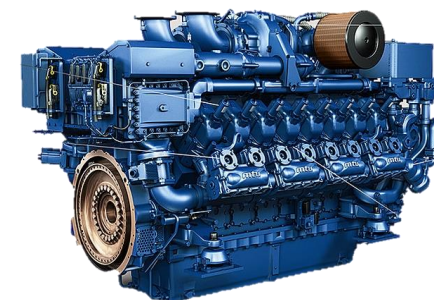
צריכה  
מקומית

חשמל

צריכה/  
ייצוא

גנצריה

גז



חשמל

צריכה מקומית/  
ייצוא לרשת



01/08/2019

## נייר עמדה בנושא השפעות זיהום אוויר כתוצאה מהקמת מרכזי אנרגיה קטנים

### 1. תקציר

בעקבות הסדרה מנובמבר 2018 של רשות החשמל לתחנות כוח וחום קטנות (להלן: "מרכזי אנרגיה") עד 16MW ישנן יוזמות רבות בשלבי תכנון שונים להקמת מתקנים כאלו לרבות בשכונות מגורים ומרכזים עירוניים צפופים. מרכזי אנרגיה מבוססי גז טבעי פולטים מזהמי אוויר שונים הגורמים לתחלואה ולתמותה מוקדמת. הקמת מרכזי אנרגיה בלב שכונות מגורים ומרכזים עירוניים צפופים עם מבנים רבי קומות עלולה להביא לפגיעה חמורה בבריאותם של אלפי אנשים אשר חשופים לזיהום הנפלט מארובות מתקנים אלו. עמדת המשרד להגנת הסביבה היא כי יש לאפשר הקמת מרכזי אנרגיה קטנים **מחוץ לשכונות מגורים ומרכזים עירוניים צפופים**. בנוסף, המשרד ממליץ לתעדף הקמת מרכזי אנרגיה בסמוך למפעלים ומתחמים עסקיים אשר פרופיל צריכת האנרגיה התרמית שלהם מאפשר למרכז האנרגיה להשיג **ניצולת אנרגטית גבוהה של כ-80%** ובכך למזער את פליטת גזי החממה ליחידת אנרגיה מיוצרת כפי שנהוג במדינות OECD אחרות.

מסמך זה מתמקד רק בהשלכות הסביבתיות בהיבט של איכות אוויר, ואינו מתייחס להשלכות ולסיכונים נוספים שנובעים מתשתיות הגז הללו ומהשימוש בהן בלב מרכזי אוכלוסייה צפופים.





21 מרץ 2024  
י"א אדר ב תשפ"ד

**בחינת כדאיות סביבתית של הקמת מרכזי אנרגיה קטנים בהיבטי איכות אוויר ופליטת גזי חממה**

# שלושה עקרונות לבהינת הצעות לגנרציה קטנה

## פליטות לאוויר

- בחינה בהתאם לרצפטורים (ערכי סביבה)
- ערכי סף לפי BImSchV 44

## יעילות אנרגטית

- מינימום 70%
- מחייב קוֹטר־גנרציה
- חייב לבטא צריכה בפועל

## חיסכון באנרגיה

- חיסכון של לפחות 10%
- חישוב לפי PES, מתבסס על דירקטיבה 2004/8/EU

# שלושה עקרונות לבהינת הצעות לגנרציה קטנה

## יעילות אנרגטית

סקר פוטנציאל ייצור אנרגיה בטכנולוגיית קוגנרציה בגוש דן

8. נספחים

8.1 דף נתוני יצרן מנוע 2.5 מגוואט תוצרת Caterpillar לדוגמא

### G3520H

### GAS ENGINE TECHNICAL DATA

### CATERPILLAR®

ENGINE SPEED (rpm):	1500	RATING STRATEGY:	HIGH EFFICIENCY
COMPRESSION RATIO:	12.1	APPLICATION:	GENSET
AFTERCoolER TYPE:	SCAC	RATING LEVEL:	CONTINUOUS
AFTERCoolER - STAGE 2 INLET (°F):	118	FUEL:	NAT GAS
AFTERCoolER - STAGE 1 INLET (°F):	192	FUEL SYSTEM:	CAT LOW PRESSURE
JACKET WATER OUTLET (°F):	210		WITH AIR FUEL RATIO CONTROL
ASPIRATION:	TA	FUEL PRESSURE RANGE (psig):	2,0-5,0
COOLING SYSTEM:	JW+OC+1AC, 2AC+GB	FUEL METHANE NUMBER:	85
CONTROL SYSTEM:	ADEM4 W/ IM	FUEL LHV (Btu/scf):	905
EXHAUST MANIFOLD:	DRY	ALTITUDE CAPABILITY AT 77°F INLET AIR TEMP. (ft):	2461
COMBUSTION:	LOW EMISSION	POWER FACTOR:	0,8
NOx EMISSION LEVEL (g/bhp-hr NOx):	1,0	VOLTAGE(V):	4160-13800

	RATING	NOTES	LOAD	100%	75%	50%	
GENSET POWER	(WITH GEARBOX, WITHOUT FAN)	(1)(2)	ekW	2469	1852	1235	
GENSET POWER	(WITH GEARBOX, WITHOUT FAN)	(1)(2)	kVA	3086	2315	1543	
ENGINE POWER	(WITHOUT GEARBOX, WITHOUT FAN)	(2)	bhp	3448	2591	1742	
GENERATOR EFFICIENCY		(1)	%	96,8	96,6	95,8	
GENSET EFFICIENCY (@ 1,0 Power Factor)		(ISO 3046/1)	(3)(4)	%	44,7	43,8	41,8
THERMAL EFFICIENCY		(3)(5)	%	41,0	42,4	44,8	
TOTAL EFFICIENCY (@ 1,0 Power Factor)		(3)(6)	%	85,7	86,2	86,6	

# שלושה עקרונות לבהינת הצעות לגנרציה קטנה

## יעילות אנרגטית

RATING	NOTES	LOAD	100%	75%	50%
GENSET POWER (WITH GEARBOX, WITHOUT FAN)	(1)(2)	ekW	2469	1852	1235
GENSET POWER (WITH GEARBOX, WITHOUT FAN)	(1)(2)	kVA	3086	2315	1543
ENGINE POWER (WITHOUT GEARBOX, WITHOUT FAN)	(2)	bhp	3448	2591	1742
GENERATOR EFFICIENCY יעילות הרכיב החשמלי (לא מעניין)	(1)	%	96,8	96,6	95,8
GENSET EFFICIENCY(@ 1,0 Power Factor) יעילות ייצור החשמל (ISO 3046/1)	(3)(4)	%	44,7	43,8	41,8
THERMAL EFFICIENCY יעילות ייצור החום (השימושי)	(3)(5)	%	41,0	42,4	44,8
TOTAL EFFICIENCY (@ 1,0 Power Factor)	(3)(6)	%	85,7	86,2	86,6

Load – העמסת המנוע (בפועל, כמה סל"ד ביחס למקסימום)  
 Power Factor – כמה מהאנרגיה המיוצרת נצרכת. פקטור של 1.0 משמעותו שכל החום והחשמל שמיוצרים נצרכים  
 מדיניות המשרד – יעילות של לפחות 70%

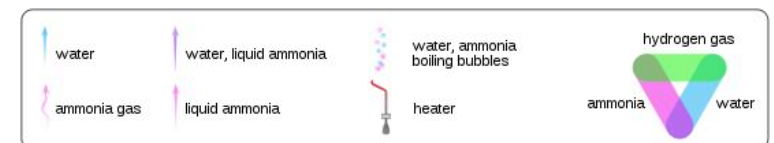
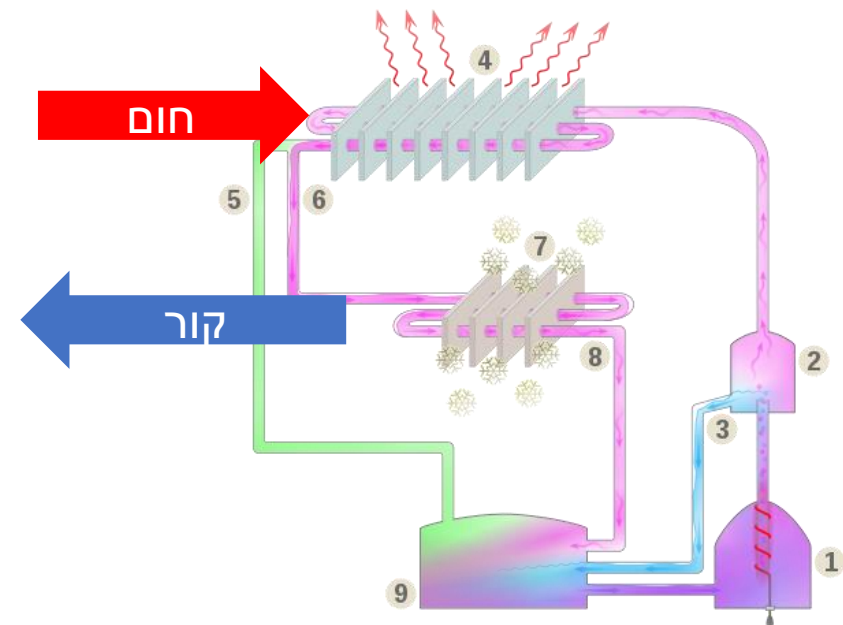
כדי להבין מה היעילות בפועל, צריך לדעת מה פרופיל ההעמסה והצריכה הצפוי

# שלושה עקרונות לביחנת הצעות לגנרציה קטנה

## יעילות אנרגטית

- COP – יחס קור יוצא\חום נכנס
- בצ'ילר ספיחה נע בין 0.7 ל 2, במכשירים חדשים עשוי להיות אף גבוה יותר
- למזגן "רגיל" (צ'ילר דחיסה) COP (קור יוצא\חשמל נכנס) בין 3 ל 5
- אי אפשר לקחת בחשבון בחישוב היעילות!

## צ'ילר ספיחה





נספח 2: בחינת נצילות מרכז אנרגיה קטן (קלט תרמי מתחת ל-50MW)

חישוב ערך ה-PES - החיסכון הכולל באנרגיה (primary energy savings)

חישוב החיסכון הכולל באנרגיה מבוסס על נספח 3 של הדירקטיבה 2004/8/EC ומבוצע עפ"י:

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{CHP H\eta}{Ref H\eta} + \frac{CHP E\eta}{Ref E\eta}} \right] \times 100\%$$

כאשר:

PES - החיסכון הכולל באנרגיה (primary energy savings)

$CHP H\eta$  - נצילות ייצור החום ממתקן הקוגנרציה המוגדרת ככמות החום השנתית הניתנת לשימוש שתופק במתקן הקוגנרציה, מחולקת בסך צריכת הדלק השנתית שצפויה במתקן הקוגנרציה להפקת החשמל והחום.

$Ref H\eta$  - נצילות היחוס לייצור נפרד של חום.

$CHP E\eta$  - נצילות ייצור החשמל ממתקן הקוגנרציה המוגדרת ככמות החשמל השנתית שתופק במתקן הקוגנרציה מחולקת בסך צריכת הדלק השנתית שצפויה במתקן הקוגנרציה להפקת החשמל והחום.

$Ref E\eta$  - נצילות היחוס לייצור נפרד של חשמל.

ערכי הייחוס יקבעו בהתאם לערכים שפורטו בנספח 2 בהחלטת הוועדה EU/2011/877 ובעדכונה EU/2015/2402 המתייחסים לשימושי הגז הטבעי בלבד:

$$Ref H\eta = 92\%$$

$$Ref E\eta = 53\%$$

תיקון בשל הפסדי חשמל ברשת:

הפחתה ביחס לנצילות הייחוס לייצור החשמל ( $Ref E\eta$ ) בשל הפסדי החשמל ברשת תבוצע בהתאם לנספח 4 ANNEX IV בעדכון החלטת הוועדה EU/2015/2402.

תיקון בשל הבדלים בטמפרטורות הממוצעות במיקום המתקן:

החיסכון הכולל באנרגיה יתוקן עפ"י נספח 3 בהחלטת הוועדה בהתאם לטמפרטורה הממוצעת באזור המתוכנן להקמת המתקן כך ש:

- 0.1% הפחתה בחסכון באנרגיה בגין כל מעלה מעל טמפרטורה ממוצעת של 15 מ"צ.
- 0.1% תוספת לחסכון באנרגיה בגין כל מעלה מתחת לטמפרטורה ממוצעת של 15 מ"צ.

קטנה

שלו



## חיסכון באנרגיה

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{42.4}{Ref H\eta} + \frac{43.8}{Ref E\eta}} \right] \times 100\%$$

RATING		NOTES	LOAD	100%	75%	50%
GENSET POWER	(WITH GEARBOX, WITHOUT FAN)	(1)(2)	ekW	2469	1852	1235
GENSET POWER	(WITH GEARBOX, WITHOUT FAN)	(1)(2)	kVA	3086	2315	1543
ENGINE POWER	(WITHOUT GEARBOX, WITHOUT FAN)	(2)	bhp	3448	2591	1742
GENERATOR EFFICIENCY		(1)	%	96,8	96,6	95,8
GENSET EFFICIENCY(@ 1,0 Power Factor)	(ISO 3046/1)	(3)(4)	%	44,7	43,8	41,8
THERMAL EFFICIENCY		(3)(5)	%	41,0	42,4	44,8
TOTAL EFFICIENCY (@ 1,0 Power Factor)		(3)(6)	%	85,7	86,2	86,6

## חיסכון באנרגיה

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{42.4}{92} + \frac{43.8}{45.1}} \right] \times 100\% = 30.2\%$$

*Ref Eη* - יעילות הייחוס לייצור נפרד של חשמל.

### עמוד 8 בתקנה

ערכי הייחוס יקבעו בהתאם לערכים שפורטו בנספח 2 בהחלטת הוועדה EU/2011/877

ובעדכונה EU/2015/2402 המתייחסים לשימושי הגז הטבעי בלבד:

Connection voltage level	Correction factor (Off-site)	Correction factor (On-site)
≥ 345 kV	1	0,976
≥ 200 - < 345 kV	0,972	0,963
≥ 100 - < 200 kV	0,963	0,951
≥ 50 - < 100 kV	0,952	0,936
≥ 12 - < 50 kV	0,935	0,914
≥ 0,45 - < 12kV	0,918	0,891
< 0,45 kV	0,888	0,851

$$Ref H\eta = 92\%$$

$$Ref E\eta = 53\%$$

תיקון בשל הפסדי חשמל ברשת :

$$Ref E\eta = 53\% \times 0.851 = 45.1\%$$

הפחתה ביחס ליעילות הייחוס לייצור החשמל (*Ref Eη*) בשל הפסדי החשמל ברשת תבוצע

בהתאם לנספח 4 ANNEX IV בעדכון החלטת הוועדה EU/2015/2402.

## חיסכון באנרגיה

$$PES = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{42.4}{92} + \frac{43.8}{45.1}} \right] \times 100\% = 30.2\% - 0.6\% = \underline{\underline{29.6\%}}$$

תיקון בשל הבדלים בטמפרטורות הממוצעות במיקום המתקן :

החיסכון הכולל באנרגיה יתוקן עפ"י נספח 3 בהחלטת הוועדה בהתאם לטמפרטורה הממוצעת באזור המתוכנן להקמת המתקן כך ש :

- 0.1% הפחתה ביעילות בגין כל מעלה מעל טמפרטורה ממוצעת של 15 מ"צ.
- 0.1% תוספת ליעילות בגין כל מעלה מתחת לטמפרטורה ממוצעת של 15 מ"צ.

טמפ' ממוצעת שנתית בישראל שנת  
2021 – 21.2 מעלות (נתוני שירות  
מטראולוגי).

פירוט אזורי אפשר למצוא [כאן](#)

# שלושה עקרונות לבהינת הצעות לגנרציה קטנה

## פליטות לאוויר

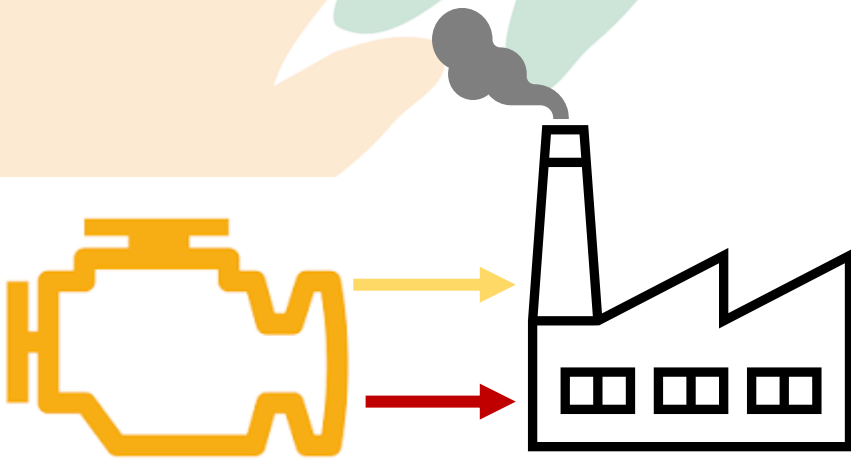
44th BImSchV

הספק תרמי מותקן (מגוואט תרמי)	סוג הדלק	סוג המתקן	ערכי פליטה (מ"ג/מק"ת)
(א) : דו תחמוצת גופרית			
$10 \leq P < 50$	גז מחצבים	כלי*	10 (מנורמל ל-3% חמצן)
$1 < P < 50$	גז מחצבים	טורבינת גז	3 (מנורמל ל-15% חמצן)
$1 < P < 50$	גז מחצבים		9 (מנורמל ל-5% חמצן)
(ב) : תחמוצות חנקן (מבוטאות כ- דו תחמוצת חנקן)			
$1 < P < 50$	גז מחצבים	כלי*	100 (מנורמל ל-3% חמצן)
$1 < P < 50$	גז מחצבים	טורבינת גז	50 (בעומס מעל 70%, מנורמל ל-15% חמצן)
$1 < P < 50$	גז מחצבים	מנוע בעירה פנימי המוקם מ2025 והלאה	100 (מנורמל ל-5% חמצן)
$1 < P < 50$	גז מחצבים	מנוע בעירה פנימי המוקם לפני שנת 2025	250 (מנורמל ל-5% חמצן)
(ג) : חומר חלקיקי			
$10 \leq P < 50$	גז	כלי	10** (מנורמל ל-3% חמצן)



# לסיכום – כיצד ייראה מתקן קוגנרציה אידיאלי סביבתית?

## מצב עם קוגנרציה



בנוסף:

- מרוחק מאוכלוסייה
- קרוב לתשתית גז קיימת
- טורבינה ולא מנוע ב"פ
- מתואם לזמני והיקף צריכת החום באתר
- תכנית תחזוקה ברורה למתקני בעירה וטיפול לאחר הבעירה
- התאמה מראש למעבר לדלקים נקיים

- צריכת חשמל וחום מקוגנרציה
- הקטנת הפליטות בתחנת הכוח
- תכנון, תפעול ותחזוקה בדגש על נצילות והקטנת פליטות
- פליטות **בינוניות** במפעל



תודה רבה!