

הפחתת פליטת מזהמים ממנועי אוטובוסים על ידי שימוש בממירים קטליטיים מחמצנים

מאת

ל. טרטקובסקי, מ. גוטמן, י. אלייניקוב, ו. בייביקוב, מ. ויינבלט ו- י. זבירין

מוגש למשרד איכות הסביבה, מסי מחקר 9-504

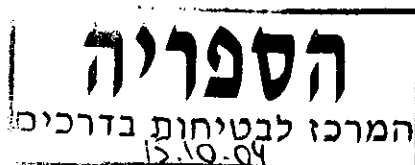
המעבדה למנועי שריפה פנימית
המרכז להנדסת אנרגיה ושימור הסביבה
הפקולטה להנדסת מכונות
הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
חיפה 32000

פרויקט מסי 115-197

דו"ח מחקר מסי 296/2003

המכון לחקר התחבורה

ספטמבר 2003



000007413841



הטכניון מכון טכנולוגי לישראל

מספר המחקר
במשרד לאיכות
הסביבה 9-504

המכון לחקר התחבורה
הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

הפחתת פליטת מזהמים ממנועי אוטובוסים על ידי שימוש
בממירים קטליטיים מחמצנים

דו"ח מסכם

מוגש ע"י

חוקרים ראשיים:

חוקרים

	פרופ' יורם זבירין – אחראי
	ד"ר לאוניד טרטקובסקי
	ד"ר מרצל גוטמן

נוספים:

	ד"ר יורי אלייניקוב
	ד"ר ולדימיר בייביקוב
	ד"ר מרק ויינבלט

מוגש למדען הראשי
המשרד לאיכות הסביבה

ספטמבר 2003

תודות

המחקר בוצע במימון המשרד לאיכות הסביבה. תודתנו נתונה למדען הראשי של המשרד ד"ר אלי שטרן, מנהלת האגף לאיכות האוויר גבי שולי נזר ולאנשי האגף: מר אבי מושל ו-גבי נועה שפיץ על הסיוע, התמיכה ושיתוף הפעולה.

תודה מיוחדת שמורה ל"אגד" על שיתוף הפעולה לאורך שנים, תרומת כוח אדם וציוד לצורך ביצוע מחקרים ולמען שיפור איכות הסביבה בארץ. ללא עזרה של "אגד" לא היה כל סיכוי לבצע הן ניסויי דרך והן בדיקות מעבדתיות של ממירים מתמצנים.

המחברים מודים לחברת "טק-פיקס" ולמר גרשון דורות על העזרה והתמיכה ברכישת הממירים והתקנתם באוטובוסים.

מספר עמוד	תוכן עניינים
7	תקציר בעברית ^{1,2,3}
8	תקציר באנגלית ³
9	מילות מפתח ^{2,3}
10	הצגת הנושא ^{1,2,3} מבוא
10	סקר ספרות ^{2,3}
11	מטרות העבודה ^{1,2,3}
11	רקע מדעי ^{1*,2,3}
12	תיאור העבודה
14	ניסויים ו/או חישובים ^{1,2,3}
18	תוצאות ^{1,2,3}
18	דיון בתוצאות
24	השוואה בין ממיר מחמצן לבין משתיק קול תקני
28	ניסוי דרך
29	בדיקת יעילות של ממיר מחמצן בניסוי מעבדתי
31	המשך הפעלת הממיר באוטובוס
31	מסקנות ^{1*,2,3}
31	אפשרויות יישום
31	תוצאות העבודה
31	בישראל ^{2*,3}
32	המלצות להמשך המחקר ³
	סיכום ^{1,2,3}
	רשימת ספרות ³

רשימת תרשימים

מספר עמוד	התרשימים	מספר התרשים
11	סכימה עקרונית של התהליך בממיר קטליטי מחמצן	1
12	השפעת טמפרטורת גזי הפליטה על היעילות של ממיר קטליטי מחמצן	2
14	סכימה של מערכת הניסוי לבדיקת מפל לחץ בממיר מחמצן	5
15	סכימה של מערכת המדידות שהותקנה באוטובוסים	6
17	סכימה של מערכת הניסוי למדידת יעילות הממיר המחמצן	8
18	השוואת מפל הלחץ בממיר מחמצן ובמשתיק קול תקני של אוטובוסים	9
19	סכימה של שיפור המבנה המכני שמנע היווצרות הסדקים בחיבור בין גוף הממיר לצינור היציאה ממנו	11
20	תוצאות מדידת הספק – אוטובוס 2	12
20	השוואת תצורות הדלק של אוטובוסים עם וללא ממיר מחמצן	13
21	תוצאות מדידת פליטת עשן – אוטובוס 2	14
22	שעורי לחץ נגדי באוטובוס 1, כפי שנמדדו במשך ניסוי הדרך	15
22	שעורי לחץ נגדי באוטובוס 2, כפי שנמדדו במשך ניסוי הדרך	16
23	התפלגות של טמפרטורות גזי הפליטה, כפי שנמדדה בניסויים	17
24	השפעת מסלול נסיעת של אוטובוס עירוני על טמפרטורת גזי פליטה [8,9]	18
25	התפלגות של מהירויות סיבוב המנוע של אוטובוס עירוני בארץ, [8]	20
26	התפלגות של מומנט המנוע של אוטובוס עירוני בארץ, [8, 10]	21
26	הטמפרטורה בכניסה לממיר	22
27	מפל הלחץ בממיר קטליטי מחמצן	23
27	פליטות חלקיקים לפני ואחרי הממיר המחמצן	24
28	יעילות המרת חלקיקים בממיר קטליטי מחמצן לאחר הנסועה של כ- 100,000 ק"מ	25

רשימת תמונות

מספר עמוד	התמונה	מספר התמונה
13	ממיר קטליטי מחמצן AZ חדש – מבט מבפנים	3
13	ממיר קטליטי מחמצן מדגם AZ תוצרת חברת ESC מותקן באוטובוס O-405	4
16	מד חלקיקים מדגם 1105-TEOM	7
19	סדק שנתגלה במעטפת החיצונית של הממיר	10
25	התקנת ממיר מחמצן במתקן הניסוי של "אגד"	19
29	ממיר קטליטי מחמצן לאחר 100,000 ק"מ וניסוי המעבדה – מבט מבפנים	26

תקציר

המטרה העיקרית של המחקר הייתה להעריך אפשרות הפחתת פליטות מזהמים (בעיקר – חלקיקים) מאוטובוס עירוני בעזרת ממיר קטליטי מחמצן בתנאי נסיעה האופייניים למדינת ישראל. כמו כן, הוערכו היבטים תפעוליים של השימוש בממיר מחמצן באוטובוס עירוני.

במסגרת המחקר בוצע סקר ספרות מקיף. הסקר כלל: סקירת פעילות בעולם בתחום של פיתוח ממירים קטליטיים מחמצנים למנועי דיזל, סקר מגמות בתקינה בינלאומית המתייחסת לפליטות מזהמים מכלי רכב דיזל, סקירת הניסיון העולמי של השימוש בממיר מחמצן באוטובוסים עירוניים, סקר חברות העוסקות בפיתוח ממירים קטליטיים מחמצנים וניתוח השוואתי. בהתאם לסקר שבוצע ובהתבסס גם על היבטים כלכליים, לוגיסטיים וכו', בשיתוף עם המשרד לאיכות הסביבה, התקבלה ההחלטה לבצע ניסויים בפועל עם שני ממירים מחמצנים מתוצרת חברת ECS Ltd זגם

AZ.

במסגרת הפרויקט הותקנו שני ממירים קטליטיים מחמצנים באוטובוסים של "אגד" מדגם Mercedes-Benz O-405, דור טכנולוגי Euro 2. האוטובוסים נסעו עם הממירים כ- 100,000 וכ- 65,000 ק"מ בהתאמה. במשך הניסוי לא הועלו תלונות ע"י נהגי האוטובוסים ו/או צוות טכני אחר לגבי פגיעה כל שהיא בביצועי האוטובוסים עקב התקנת ממיר מחמצן בהם, למעט מקרה של גילוי סדק במעטפת החיצונית של הממיר באוטובוס אחד.

נתגלה שעבור קוי אוטובוס שעוברים במרכז העיר, טמפרטורות גזי פליטה נמוכות מאד. במסלולים הללו עלולה להיווצר בעיה עם פעילות יעילה של התקני טיפול בגזי הפליטה של מנועי דיזל. הבעיה תהיה חמורה יותר בתקופת החורף, כאשר מערכת מיזוג אוויר לא מופעלת והעומס על המנוע הוא נמוך יותר.

הממיר שעבד באוטובוס כ- 100,000 ק"מ, עבר לאחר מכן את בדיקת יעילות בניסויי מנוע מעבדתיים. מתוצאות ניסויים אלה נובע שיעילות הממיר שנמדדה, היא בתחום של 0.13 – 0.61 ובהחלט מתאימה להצהרות היצרן ולנתונים שפורסמו בספרות מקצועית.

דו"ח זה כולל: מבוא, רקע מדעי, תאור העבודה, תוצאות המחקר ודיון בהן, מסקנות, אפשרויות יישום של תוצאות המחקר בישראל והמלצות להמשך המחקר.

Abstract

The main objective of this research work was to evaluate the possibility of reducing air pollution (especially particulates) from city buses by diesel oxidation catalytic converters in the realistic Israeli driving conditions, and to evaluate also their influence on driving behavior and maintenance.

Within the framework of this work, a comprehensive literature survey was carried out (published in the first report of the Project), which contains up to-date developments in diesel oxidation catalytic converters, the experience accumulated in the world concerning after-treatment devices for city buses, a search concerning diesel oxidation catalyst manufacturers, and a comparative analysis of the available equipment. Based on the conclusions from the first part of this work, the research team of the Technion Internal Combustion Engines Laboratory, together with the representatives of the Israeli Ministry of the Environmental, have decided to perform a fleet test with two city buses equipped with two diesel oxidation catalytic converters of the type AZ, manufactured by ECS Ltd.

Two such diesel oxidation catalysts were installed on two Mercedes Benz type O-405 Egged buses, equipped with two Euro 2 generation diesel engines. These buses have accumulated, with the diesel oxidation catalysts, 100000 and 65000 km, respectively. During the fleet tests, no registered reclamations of the bus drivers or from the maintenance technicians have been noted, with a single exception of a fissure observed in one oxidation catalyst, on its exterior envelope.

Low temperatures of the exhaust gases were monitored in the city center, due to the low speed of the buses. This might pose a problem in winter time, when the air conditioning system is not operated and the engine load is lower.

The diesel oxidation catalytic converter which was mounted on the bus which has accumulated 100000 km was tested in a dynamometer-engine test bench. The measured efficiency of the catalyst was in the range 0.13 - 0.61, in agreement with the manufacturer published performance data.

This report contains: introduction, scientific background, work description, results and discussion, conclusions, possibility of application in Israel and recommendations for continuation of this research work.

מילות מפתח:

- בקרת פליטות – דיזל
- ממיר קטליטי מחמצן – דיזל
- מערכות לטיפול בגזי פליטה – מנועי דיזל

Key Words

- Emission Control – Diesel
- Oxidation Catalytic Converters – Diesel
- After-treatment devices for diesel engines exhaust gases

מבוא

הצגת הנושא

התחבורה הציבורית במדינת ישראל מבוססת רובה ככולה על מנועי דיזל. מנועים אלה מותקנים ברוב המוחלט של האוטובוסים והמוניות, כמעט בכל המשאיות וברכבות.

שימוש כה רחב במנועי דיזל נובע מיתרונותיהם הידועים לעומת מנועי בנזין: צריכת דלק נמוכה יותר (בערך ב- 30% - 20) אורך חיים גדול יותר ודלק זול הרבה יותר לעומת הבנזין. עקב נצילות מנוע גבוהה, כלי רכב עם מנועי דיזל פולטים לאטמוספירה פחות פחמן דו-חמצני (CO_2), שהוא גז חממה, בחישוב ליחידת האנרגיה המופקת. תהליך שריפת הדלק במנוע דיזל (שריפה בסביבה מחמצנת עם עודף אויר גדול) גורם לפליטות הרבה יותר נמוכות, לעומת מנוע בנזין, של פחמימנים (HC) ופחמן חד-חמצני (CO). יחד עם זאת, תהליך השריפה במנוע דיזל, שבו מתרחשת בעירה בתערובת הטרוגנית, גורר מספר לא מבוטל של חסרונות, כגון: רמת רעש גבוהה יותר ופליטות גבוהות יותר, לעומת מנוע בנזין, של חלקיקים (particulates), PM, ותחמוצות חנקן (NO_x).

החסרונות של מנועי דיזל, שתוארו לעיל, בלתי רצויים במיוחד לתחבורה עירונית הפועלת בסביבה עם אוורור מוגבל ומספר גדול של אנשים החשופים לפליטותיה. בהתייחס לעובדה זו, במספר מדינות החלו בקביעת תקנים המגבילים במיוחד את פליטותיהם של כלי רכב לתחבורה עירונית, כמו אוטובוסים, [1-4]. לפי הדרישות האמריקאיות, מנוע דיזל חדש של אוטובוס עירוני רשאי לפלוט רק 50% מפליטות החלקיקים המותרת למנוע של אוטובוס בינעירוני.

סקר ספרות

במסגרת המחקר בוצע סקר ספרות מקיף הנכלל בדו"ח הביניים [5]. הסקר כולל: סקירת פעילות בעולם בתחום של פיתוח ממירים קטליטיים מתמצנים למנועי דיזל, סקר מגמות בתקינה בינלאומית המתייחסת לפליטות מזהמים מכלי רכב דיזל, סקירת הניסיון העולמי של השימוש בממיר מחמצן באוטובוסים עירוניים, סקר חברות העוסקות בפיתוח ממירים קטליטיים מתמצנים וניתוח השוואתי.

על סמך המידע שנאסף בסקר ובהתבסס על הניתוח ההשוואתי שמוצג בדו"ח הביניים [5], הומלץ שיש לשקול ביצוע ניסויים באוטובוסים עירוניים בארץ עם אחת או כמה מהמערכות המפורטות להלן:

- ממיר מחמצן של Johnson Matthey (אנגליה);
- ממיר מחמצן של ECS Ltd (אנגליה);
- מסנן חלקיקים מסוג DPX של חברת Engelhard (ארה"ב).

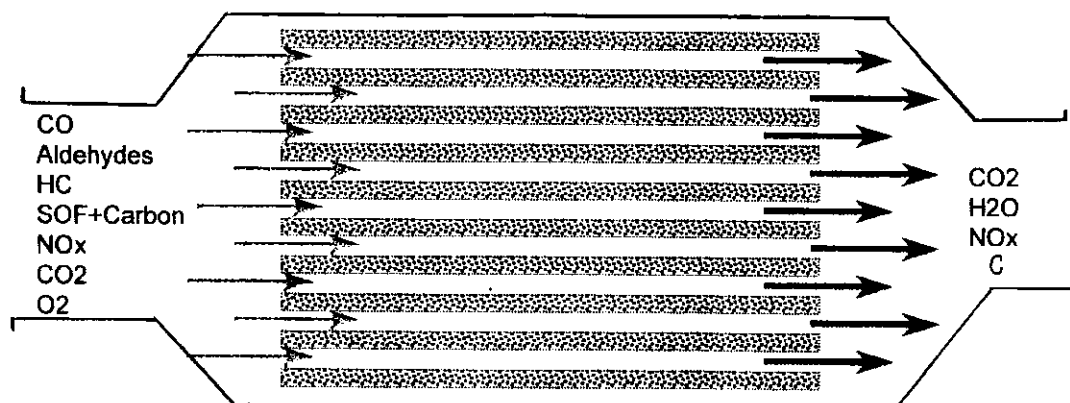
בהתאם לסקר שבוצע ובהתבסס גם על היבטים כלכליים, לוגיסטיים וכו', בשיתוף עם המשרד לאיכות הסביבה, התקבלה ההחלטה לבצע ניסויים בפועל עם שני ממירים מתוצרת חברת ECS Ltd דגם AZ.

מטרות העבודה

המטרה העיקרית של המחקר הייתה להעריך אפשרות הפחתת פליטות מזהמים (בעיקר – חלקיקים) מאוטובוס עירוני בעזרת ממיר קטליטי מחמצן, בתנאי נסיעה האופייניים למדינת ישראל. כמו כן, הוערכו היבטים תפעוליים של השימוש בממיר מחמצן באוטובוס עירוני.

רקע מדעי

מבנהו של ממיר קטליטי מחמצן (DOC) למנועי דיזל דומה באופן כללי לזה של ממיר קטליטי המיועד לרכב עם מנוע בנזין. שני הממירים מורכבים מבסיס (support), הבנוי בדרך כלל בצורת חלת - דבש (honeycomb), שכבת חומר מיוחד עם שטח פנים גדול מצפה את הבסיס (washcoat) ושכבה דקה מאד של חומר פעיל (catalyst), בדרך כלל מתכות יקרות כגון: (Pd, Rh, Pt, של ציפוי על ה-washcoat. החומר הקטליטי בא במגע עם גזי הפליטה, מוריד את אנרגיית האקטיבציה של מולקולות CO, HC, מפחית את חלקם האורגני של החלקיקים, וכתוצאה מכך - תורם לחמצונם, ראה ציור 1.

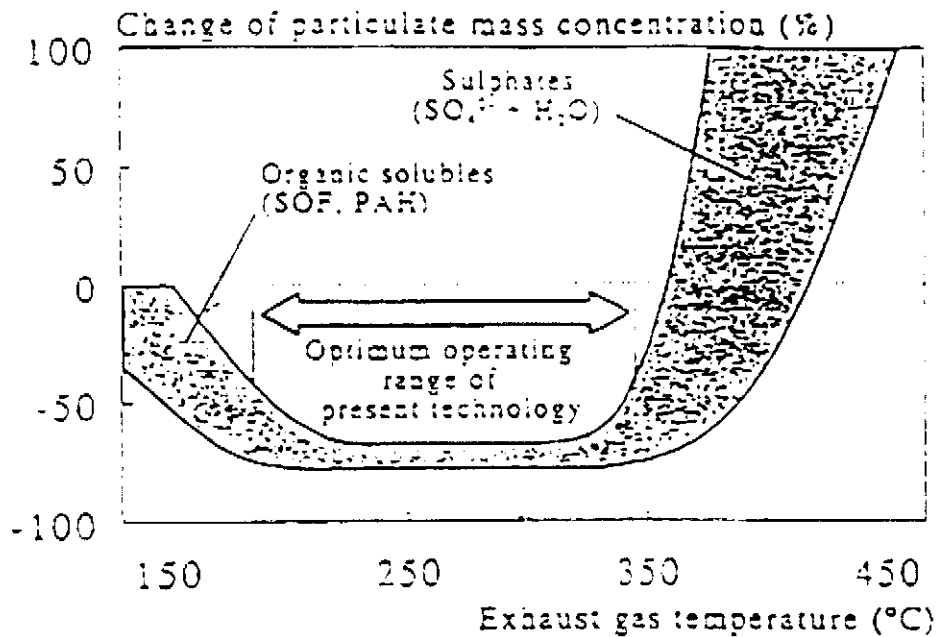


Schematic of Oxidation Catalyst

CO + 1/2O ₂	→	CO ₂
HC + O ₂	→	CO ₂ H ₂ O
SOF + O ₂	→	CO ₂ H ₂ O
Aldehydes + O ₂	→	CO ₂ H ₂ O

ציור 1. סכימה עקרונית של התהליך בממיר קטליטי מחמצן

שטח המעבר של בסיס הממיר נבחר כדי לאפשר שטח מגע מרבי עם גזי הפליטה מצד אחד ולשמור על רמה מינימלית של לחץ נגדי מאידך. צפיפות תעלות הבסיס, המקובלת כיום באירופה, היא 46.5 cells/cm², [4,1]. במקור [6] פורסם שהיעילות המרבית של ה-DOC מתקבלת כאשר נפח הבסיס שווה בערך לנפח המנוע (displacement). יעילות פעולת הממיר ברכב ככלי להפחתת פליטת חלקיקים תלויה במגוון גורמים נוספים, חוץ מהמבנה עצמו: מיקום התקנת הממיר, הרכב החלקיקים, טמפרטורת גזי הפליטה, איכות הדלק, תנאי הנהיגה וכו'. הבעיה העיקרית כאן היא שבטמפרטורות גזי פליטה גבוהות מאיץ הממיר את תהליך החימצון של גופרית דו-חמצנית (SO₂) לסולפטים (SO₄), דבר שעלול לגרום לעליה ניכרת בפליטה הכוללת של חלקיקים – ראה ציור 2.



ציור 2. השפעת טמפרטורת גזי הפליטה על היעילות של ממיר קטליטי מחמצן [7].

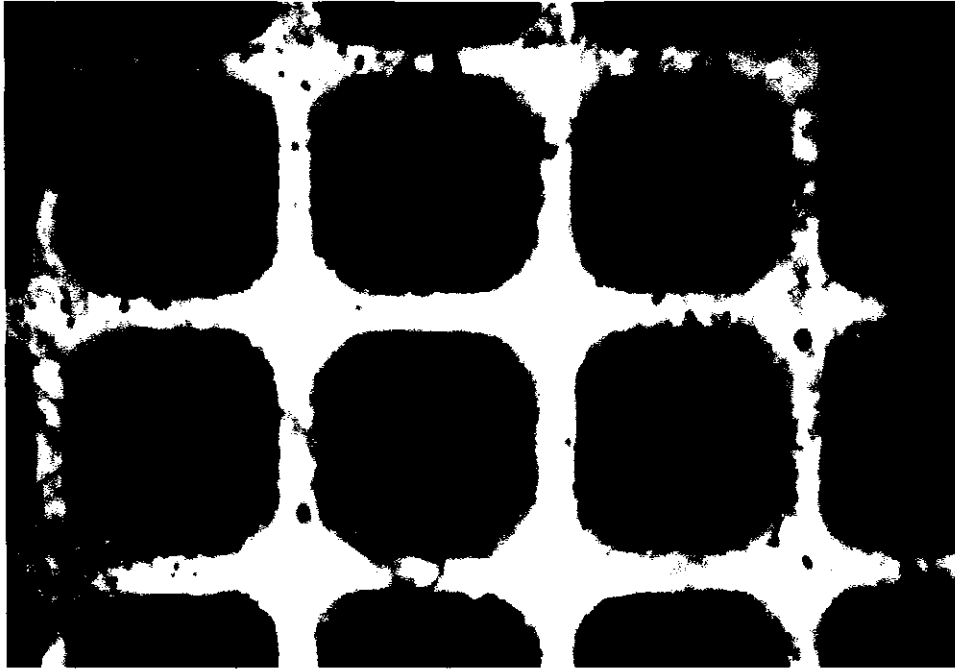
לפי נתונים שפורסמו בספרות [7], תחום היעילות המיטבית של ממיר מחמצן נמצא בתחום טמפרטורות גזי הפליטה שבין 200 ל-350 °C. טמפרטורת גזי הפליטה היא פונקציה של משטר פעולת מנועת והוא התלוי בתנאי הנהיגה. לכן, חשוב מאד ידע של תנאי נסיעה ריאליים של אוטובוסים עירוניים בארץ, על מנת להעריך באופן מבוסס את יעילות הפעולה של ממיר קטליטי מחמצן. מובן, שהפחתת תכולת הגופרית בסולר מקלה על הבעיה ותורמת להורדה נוספת בפליטת חלקיקים.

תאור העבודה

שיטות המחקר

המחקר בוצע לפי השיטה הבאה. לאחר בחירת הממיר, נבחר בשיתוף פעולה עם "אגד" ועל סמך ההמלצות של יצרני האוטובוסים, סוג האוטובוס שבו יותקנו הממירים. הדגם שנבחר לביצוע הניסויים הוא אוטובוס עירוני מתוצרת Mercedes-Benz דגם O-405, עם מנוע מדגם OM - 447hLA מהדור הטכנולוגי של Euro 2. אוטובוסים מדגם זה הם בין הנפוצים ביותר בארץ.

התקנת הממיר מבוצעת במקום המשותף התקני. תמונות של פנים הממיר החדש והממיר המותקן באוטובוס מופיעות בציורים 3 ו-4.



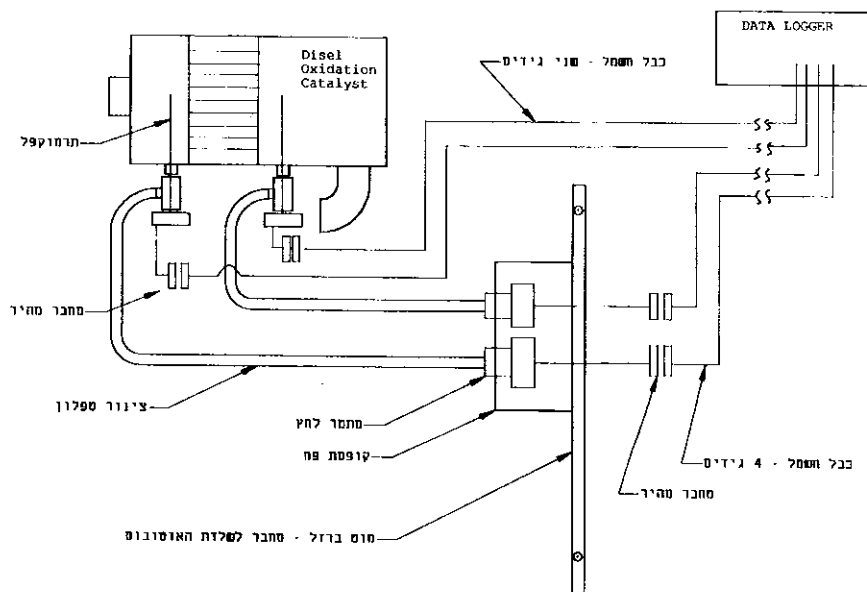
ציור 3. ממיר קטליטי מחמצן AZ חדש – מבט מבפנים.



ציור 4. ממיר קטליטי מחמצן מדגם AZ תוצרת חברת ESC מותקן באוטובוס O-405.

ממיר מחמצן מהסוג הנ"ל הותקן בשני אוטובוסים זהים: האחד פועל בחיפה והשני – באזור הקריות. לפני התקנת הממירים באוטובוסים בוצעה סידרת ניסויים מעבדתיים שמטרתה הייתה להעריך השפעת ממיר מחמצן על שעורי הלחץ הנגדי (back pressure) ביציאה מהמנוע ולהשוותם עם הערכים המתקבלים כאשר באוטובוס מותקן משתיק תקני.

מאחר ועל המערכת להיות מופעלת בתנאי סביבה קשים, בתחתית האוטובוס, כאשר היא נתונה לרעידות מתמידות, קרובה למקור חום וכן חשופה לרטיבות, נעשה שימוש במתקן מיוחד שנבנה לצורך אחסון של מתמרי לחץ ועיגונם לשלדת האוטובוס. כמו כן, הושם דגש על אמינות החיבורים של מתמרי הלחץ ושל הצמדים התרמיים לערוצי אוגר הנתונים.



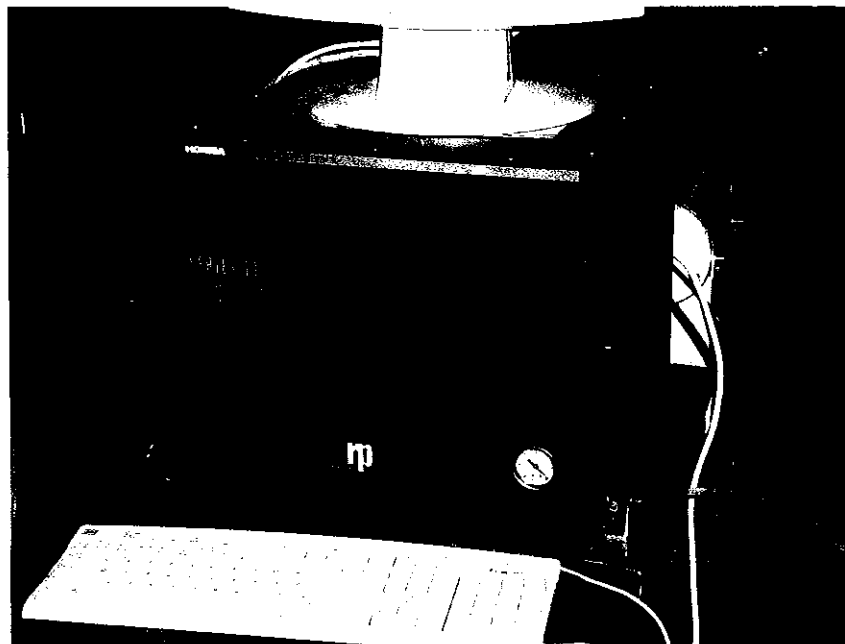
ציור 6. סכימה של מערכת המדידות שהותקנה באוטובוסים.

כפי שהוזכר לעיל, ממיר מחמצן ומערכת המדידות הני"ל הותקנו בשני אוטובוסים, כאשר אוגר הנתונים הותקן בהם לסירוגין. תוצאות המדידה שנשמרו ע"י האוגר, הורדו ממנו בעזרת מחשב נייד. הממיר המחמצן הראשון הותקן באוטובוס הנוסע בחיפה (אוטובוס 1) בתאריך 18 בינואר 2002 והורד ממנו לצורך ביצוע ניסויים מעבדתיים ב- 27 באפריל 2003. בתקופה זו נסע האוטובוס בפעילותו השוטפת כ- 100,000 ק"מ. הממיר המחמצן השני הותקן באוטובוס הנוסע בקרית (אוטובוס 2) ב- 14 בפברואר 2002. עקב תקלה לוגיסטית הורד ממיר זה מהאוטובוס בנובמבר 2002 בלי שנתגלתה תקלה הדורשת להחליפו. לפי הערכתנו, נסע האוטובוס בתקופת הניסוי כ- 65,000 ק"מ.

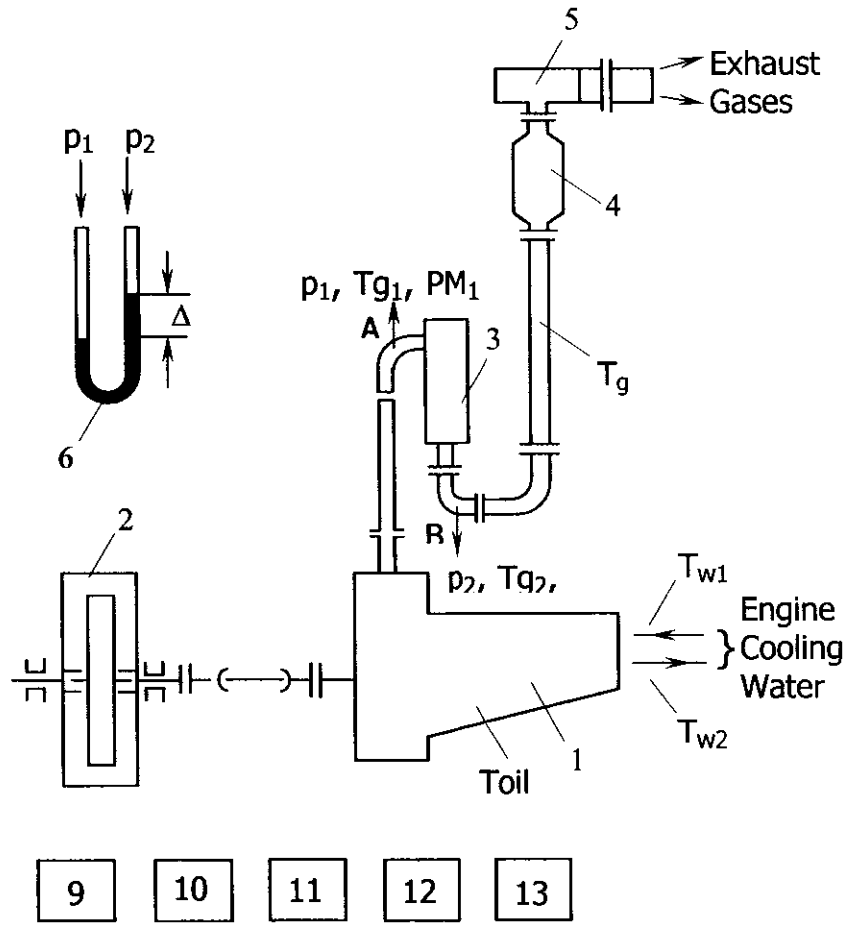
תוך כדי ניסויי הדרך נמדדו תקופתית ערכי טמפרטורה ולחצים בכניסה וביציאה מהממירים המחמצנים. בהתחלת הניסוי המדידות בוצעו כל מספר ימים. בהמשך, כאשר התברר שהממירים עובדים כצפוי, המדידות בוצעו לעתים רחוקות יותר. בתקופת ניסויי הדרך נמדד מספר פעמים ההספק של מנוע האוטובוס ובוצעה השוואה עם ההספק שנמדד לפני התקנת הממיר המחמצן. מדידות אלו בוצעו על מנת להעריך את השפעת הממיר על ביצועי המנוע של האוטובוס. מדידות ההספק נעשו בדינמומטר שילדה של "אגד" במוסד "עיר גנים". שעורי ההספק נמדדו במשטר פעולת המנוע שבו מבוצעת, לפי תקן ישראלי, בדיקת עשן. מובן, שבאותן בדיקות בוצעו גם מדידות של רמת העשן הנפלט. על מנת לוודא נתונים ידועים מהספרות לגבי אי-השפעתו של ממיר קטליטי מחמצן על פליטת תחמוצות חנקן, בוצעה מדידה חד-פעמית של ריכוזי NO_x בגזי הפליטה עם וללא

ממיר. כמו כן, במסגרת ניסויי הדרך בוצעה השוואה של צריכת הדלק על ידי האוטובוסים לפני ואחרי התקנת הממירים. נתוני צריכת הדלק סופקו לטכניון ע"י "אגד". בנוסף לכך, נהגי האוטובוסים שבהם הותקנו הממירים וצוותי התחזוקה הונחו לדווח על כל שינוי שיתגלה בביצועי האוטובוס או בסדרי התחזוקה.

על מנת להעריך את היעילות של הממיר המחמצן בטמפרטורות שונות של גזי הפליטה, בוצעה סידרה מיוחדת של ניסויים מעבדתיים, שבהם נמדדו ריכוזי חלקיקים בכניסה וביציאה מהממיר המחמצן. הניסויים בוצעו במתקני "אגד" עם מנוע מדגם OM – 447hLA (זהה לזה המותקן באוטובוסים המשתתפים בניסוי), המחובר לדינמומטר מנוע. מדידת פליטת חלקיקים בוצעה בעזרת מד חלקיקים מסוג TEOM זגם 1105 – ראה תמונה בציור 7. ציוד מודרני זה נרכש לאחרונה ע"י הטכניון. סכימה של מערכת הניסוי מתוארת בציור 8.



ציור 7. מד חלקיקים מדגם TEOM-1105.



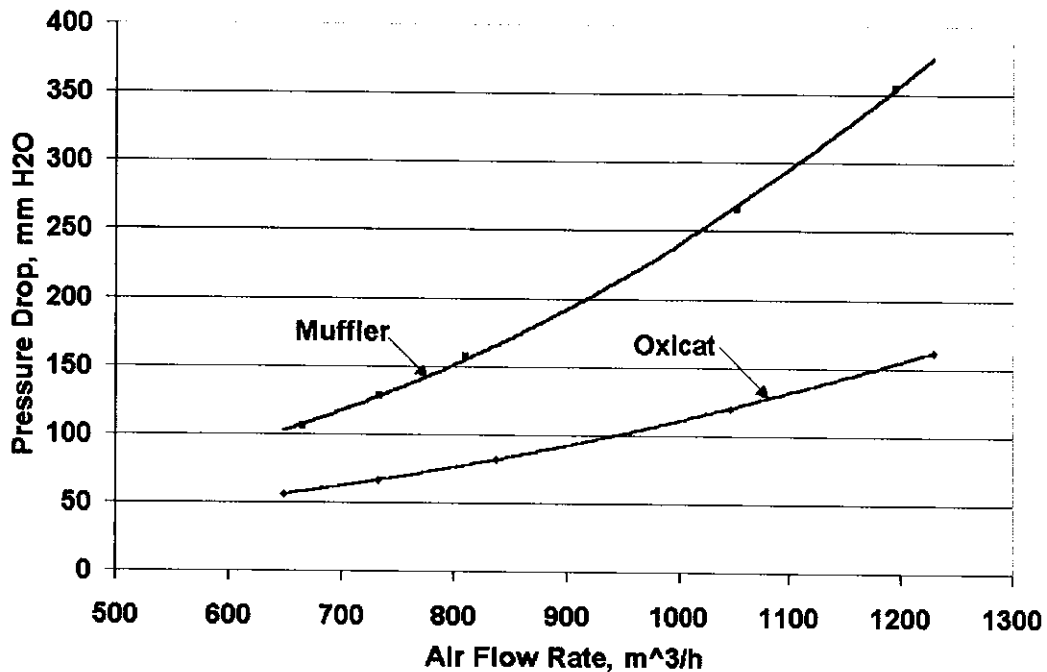
1 - B 7 Diesel oxidation catalytic converter; 4 - Silencer; 5 - Exhaust gases blower; 6 - U manometer; 7 - Dynamometer command and control computer; 8 - Display; 9 - Engine speed indicator; 10 - Dynamometer load or brake power indicator; 11 - Digital pressure meter; 12 - Digital thermometer; 13 - Diesel particulates mass monitor.

A, B - Diesel oxidation catalytic converter inlet and outlet points for exhaust gases sampling for measuring PM and gases pressures (p_1 and p_2) and temperatures (T_{g1} and T_{g2}); T_{w1} , T_{w2} , T_{oil} , T_g - Thermocouples for measurement of engine cooling water (inlet and outlet), engine oil and exhaust gases temperatures, respectively.

ציור 8. סכימה של מערכת הניסוי למדידת יעילות הממיר המחמצן.

השוואה בין ממיר מחמצן לבין משתיק קול תקני

כפי שהוזכר לעיל, על מנת להעריך את השפעת הממיר הקטליטי המחמצן על הלחץ הנגדי ביציאה מהמנוע, בוצעה סידרה מיוחדת של ניסויים מעבדתיים שבהם נמדדו שעורי מפל הלחץ בממיר חדש והתוצאות הושוּו עם הערכים שנתקבלו בניסוי הייחוס עם משתיק הקול התקני (גם הוא חדש). הסכימה של מערכת הניסוי מתוארת בציור 5 לעיל. כיוון שהניסוי בוצע על ידי הזרמת אוויר קר דרך המערכת, הערכים המוחלטים של הספיקה הנפחית היו שונים מאלה הקיימים בתנאי פעולה ריאליים, אבל הדבר אינו מהותי לצורכי ההשוואה. תוצאות הניסוי מתוארות בציור 9.



ציור 9. השוואת מפל הלחץ בממיר מחמצן ובמשתיק קול תקני של אוטובוס.

כפי שניתן לראות מהציור, הממיר המחמצן מסוג AZ, שהותקן בשני אוטובוסים לצורכי הניסוי, גורם למפלי לחץ נמוכים יותר בהשוואה למשתיק קול תקני. הדבר מאמת הצהרה דומה של יצרן הממיר ומוביל להערכה (שצריכה להיבדק, כמובן) שהתקנת הממיר באוטובוס במקום משתיק קול אינה אמורה לגרום להרעה בביצועי המנוע של אוטובוס.

ניסוי דרך

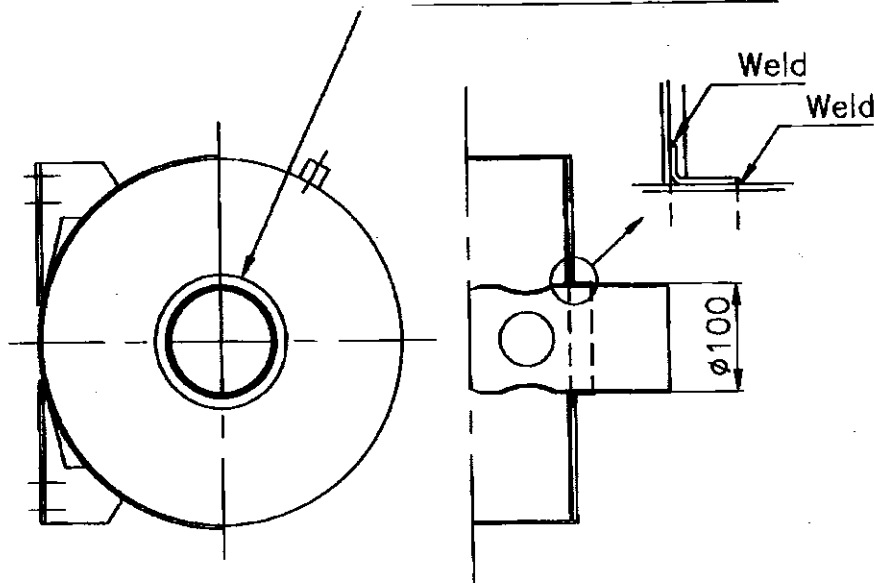
כפי שצוין לעיל, האוטובוסים שבהם הותקנו ממירים עברו במסגרת הניסוי כ- 100,000 ק"מ (אוטובוס 1) וכ- 65,000 ק"מ (אוטובוס 2). במשך הניסוי לא הועלו תלונות ע"י נהגי האוטובוסים, ואו צוות טכני אחר לגבי פגיעה כל שהיא בביצועי האוטובוסים עקב התקנת ממיר מחמצן בהם, למעט מקרה של גילוי סדק במעטפת החיצונית של הממיר באוטובוס 1 – ראה תמונה בציור 10.



ציור 10. סדק שנתגלה במעטפת החיצונית של הממיר.

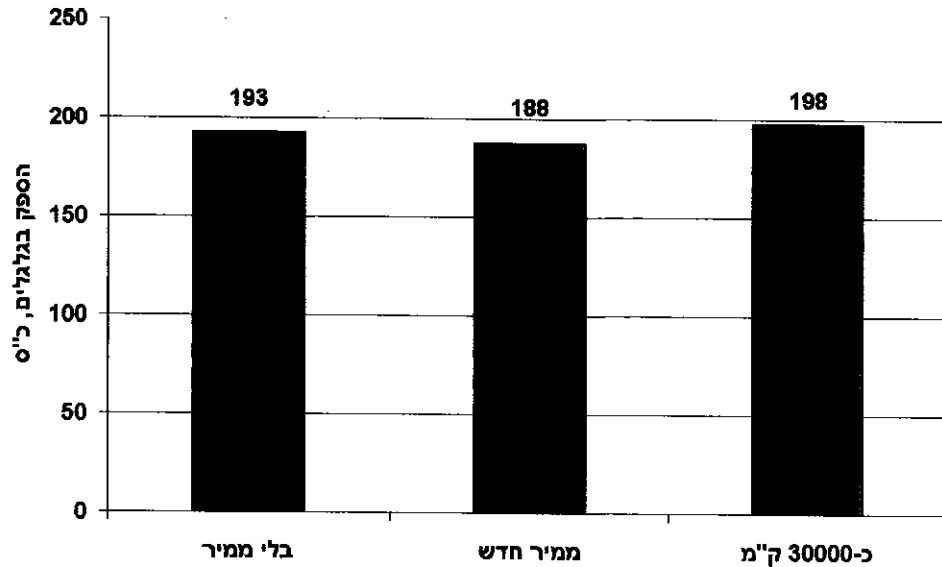
הסדק נתגלה לאחר כשלושה חודשי פעולת הממיר באוטובוס (נסועה של כ- 20,000 ק"מ). הסיבה להיווצרותו לפי ספק הממיר – חברת טק-פיקס בע"מ (שאומתה ע"י היצרן), היא שגיאה בתכנון החיבור בין גוף הממיר לבין צינור היציאה ממנו. היצרן ביצע תיקון לפי הסכימה המתוארת בציור 11 ומאז לא נתגלו בעיות נוספות כלשהן.

Collar I.D.100 welded
to outlet end and pipe.



ציור 11. סכימה של שיפור המבנה המכני שמנע היווצרות הסדקים בחיבור בין גוף הממיר לצינור היציאה ממנו.

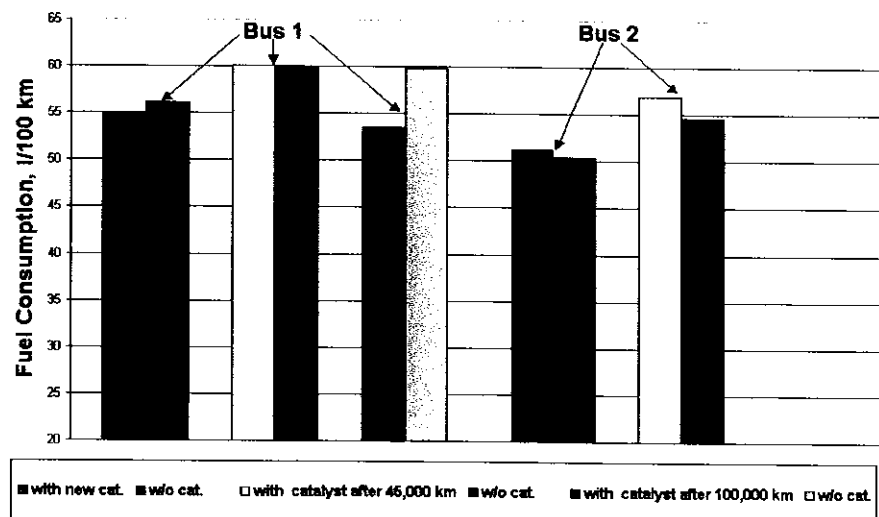
על מנת להעריך את ההשפעה של התקנת הממיר על ביצועי האוטובוס, בוצעו במסגרת ניסוי הדרך מספר מדידות של הספק על הגלגלים במשטר פעולת המנוע המשמש לצורך מדידת פליטת העשן. תוצאות הניסויים מתוארות בציור 12.



ציור 12. תוצאות מדידת הספק – אוטובוס 2.

כפי שניתן לראות מהציור, לא נתגלו שינויים מהותיים בהספק על הגלגלים שנמדדו בדינמומטר שילדה של "אגד". השינויים בהספק שנמדדו נובעים, כנראה, מדיוק המדידה. יש לציין גם ששינוי בהספק לעומת המצב ללא ממיר הוא לשני הכיוונים, דבר המאמת את המסקנה לגבי השפעת הממיר על הספק המנוע.

בנוסף למדידות ההספק, בוצעה השוואה של תצרוכת הדלק של האוטובוסים ללא ועם הממיר, בהתחלה, באמצע ובסוף הניסוי. הנתונים של צריכת הדלק נתקבלו מ"אגד". עבור כל מצב עובדו נתוני צריכת הדלק של כחודש – חודש וחצי והשוונו עם הנתונים מאותה העונה כאשר הממיר לא היה מותקן. תוצאות השוואה מתוארות בציור 13.



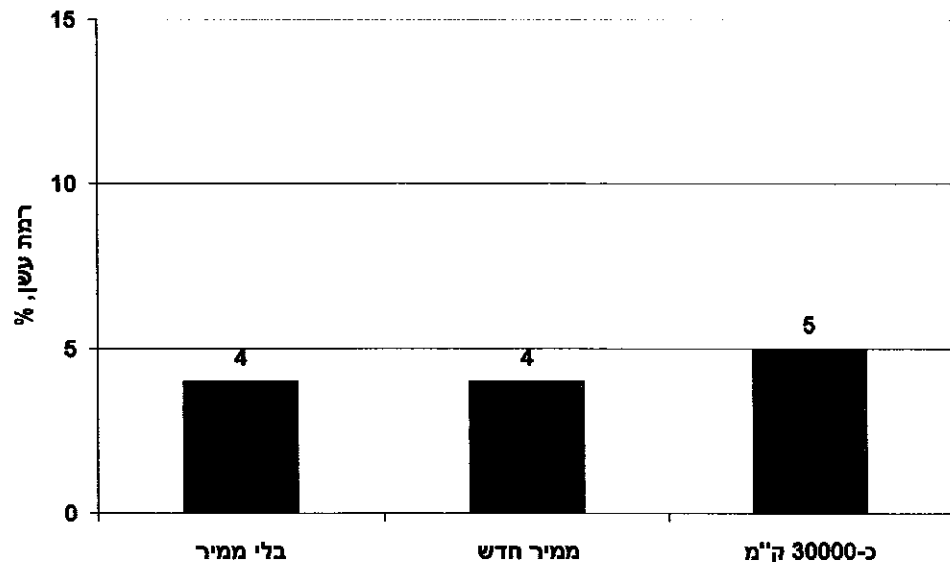
ציור 13. השוואת תצרוכת הדלק של אוטובוסים עם וללא ממיר מחמצן.

חשוב לציין שנתוני צריכת הדלק עבור ממיר חדש נלקחו בעונת החורף; עבור ממיר לאחר נסועה של כ- 45,000 ק"מ – בעונת הקיץ; ועבור הממיר בסוף הניסוי, לאחר 100,000 ק"מ – בעונת המעבר (חודשים מרץ ואפריל). התוצאות המתוארות בצירור 13 אינן מצביעות על עליה בתצרוכת הדלק עקב התקנת הממיר המחמצן. ההבדל המשמעותי בין צריכת הדלק עם וללא ממיר בסוף הניסוי (צריכת דלק עם ממיר הרבה יותר נמוכה) הוא עקב תקופת המדידה שהיא תקופת המעבר. יש גם לציין שחודשי מרץ ואפריל של 2003 היו קרים יחסית לעומת תקופה מקבילה ב-2002, דבר שגרם לשימוש מופחת במערכת מיזוג האוויר. הערכה זו מאומתת על ידי השוואה עם צריכות דלק שנמדדו בתקופות קיץ וחורף עבור אותו האוטובוס. כפי שניתן לראות מצירור 13, צריכת הדלק עם ממיר לאחר 100,000 ק"מ שנמדדה באביב 2003 קרובה מאד לזאת שנמדדה בחורף; לעומת זאת, צריכת הדלק שנמדדה ללא ממיר באביב 2002 קרובה מאד לתוצאות שנתקבלו בקיץ.

צירור 14 מתאר תוצאות של מדידת פליטת העשן מהאוטובוס, אשר נמדדה בו-זמנית עם ההספק על הגלגלים. תוצאות אלה מצביעות על שני דברים עיקריים:

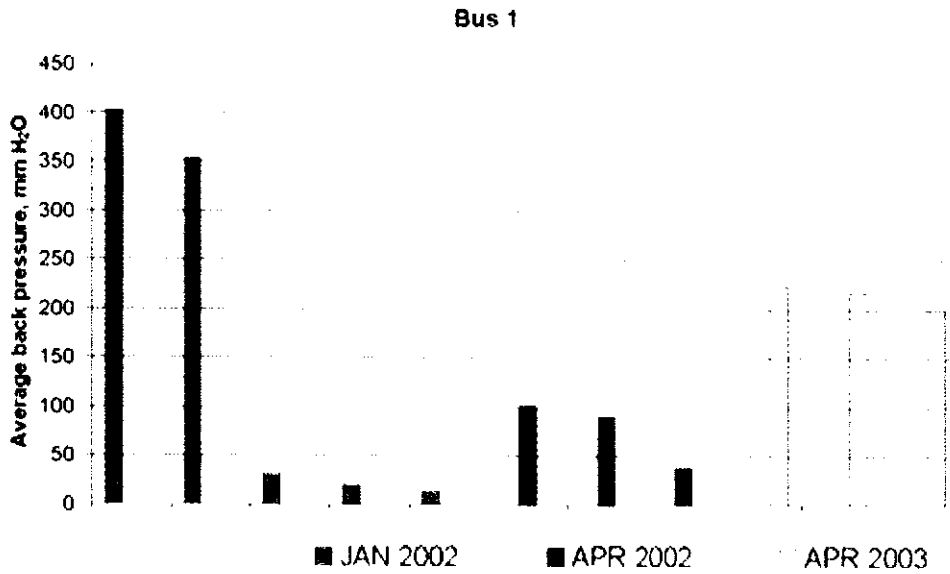
- רמת עשן נמוכה מאד באוטובוסים מדור Euro 2, כאשר הם מתחזקים היטב.
- חוסר האפשרות להעריך השפעת הממיר בהתבסס על מדידות עשן בלבד. לכן, נחוץ במקרים האלה למדוד פליטת חלקיקים, ולא עשן.

כפי שניתן לראות מהצירור, השינויים בערכים שנמדדו הם במסגרת דיוק המדידה ($\pm 1\%$) ואינם יכולים להצביע על יעילות הממיר. יש לציין, שבעת התקנת הממיר באוטובוס אחד בוצעו גם מדידות של פליטות תחמוצות החנקן. כצפוי, לא נתגלו שינויים מהותיים במצבים עם וללא הממיר המחמצן. הסיבה לכך ידועה – ממיר מחמצן אינו פעיל בתחום הפחתת NO_x .

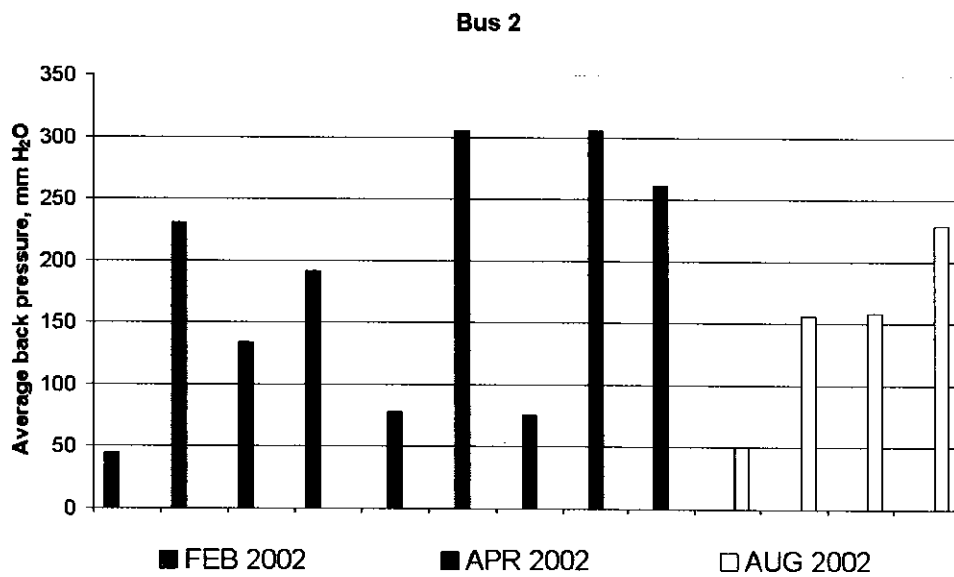


צירור 14. תוצאות מדידת פליטת עשן – אוטובוס 2.

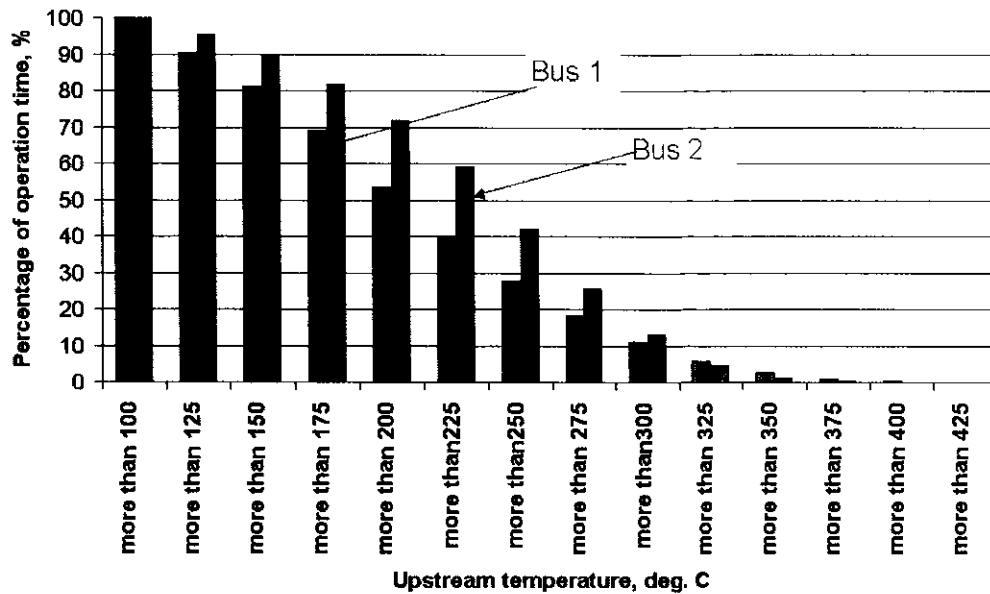
במשך ניסוי הדרך נמדדו תקופתית שעורי לחץ וטמפרטורת גזי הפליטה לפני ואחרי הממיר. תוצאות של המדידות הללו מתוארות בצירורים 15 – 17.



ציור 15. שעורי לחץ נגדי באוטובוס 1, כפי שנמדדו במשך ניסוי הדרך.



ציור 16. שעורי לחץ נגדי באוטובוס 2, כפי שנמדדו במשך ניסוי הדרך.

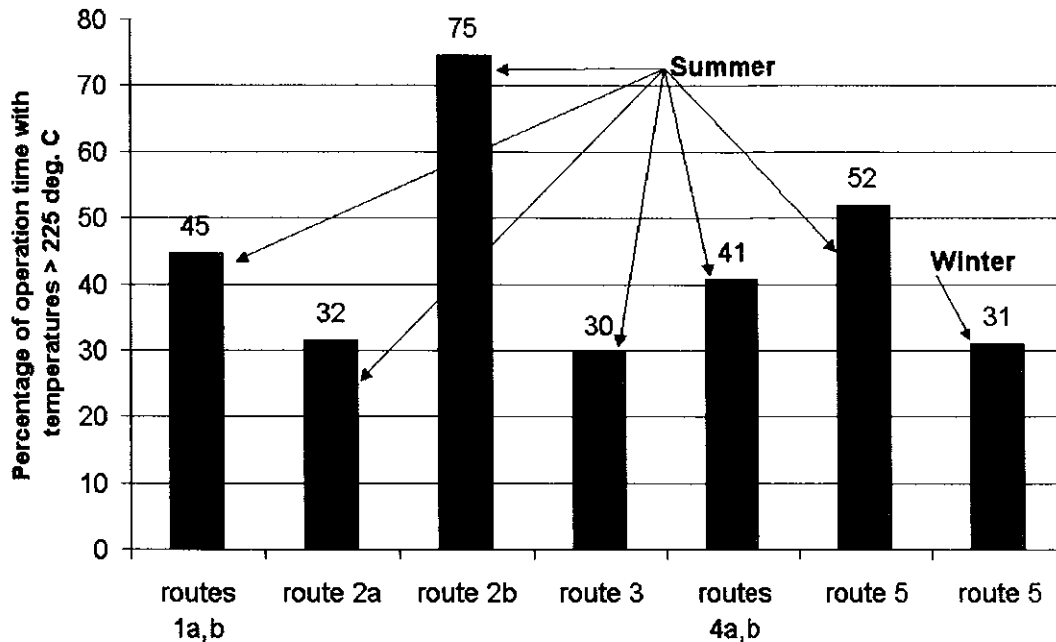


ציור 17. התפלגות של טמפרטורות גזי הפליטה, כפי שנמדדה בניסויים.

מצויורים 15, 16 נובע שלאורך כל ניסויי הדרך בשני האוטובוסים, הלחץ הנגדי הממוצע תוך כדי נסיעה (מהחישוב הוצאו משטרי פעולת מנוע בסרק) לא עלה על 45 mbar. הדבר מאמת תוצאות שתוארו לעיל לגבי חוסר השפעה מהותית של התקנת הממיר המחמצן על ביצועי המנוע של אוטובוס. יש לציין שבשני האוטובוסים נמדדו ערכים דומים של לחץ נגדי. ההפרשים בשעורי הלחץ עבור אוטובוס אחד נובעים משינויים של מסלולי הנסיעה תוך כדי הפעילות הריאלית לפי סידור העבודה יומי.

התפלגות של טמפרטורות גזי הפליטה שנמדדה בשני האוטובוסים שהשתתפו בניסוי (ראה ציור 17) מפתיעה במקצת בכך שבאוטובוס 2, שנסע בקריות בשטח מישורי בלבד, נמדדו אחוזי פעילות עם טמפרטורות גבוהות מ- 225°C - גבוהים יותר מאשר באוטובוס 1, שקווי הפעילות שלו כללו בין היתר גם נסיעות בכבישים משופעים. הסיבה לכך היא כנראה מהירויות נסיעה גבוהות יותר של אוטובוס 2, דבר שגרם לאחוזי פעילות גבוהים יותר עם טמפרטורות בייניות ($200^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$). לעומת זאת, נסיעות של אוטובוס 1 בכבישים משופעים גרמו לאחוזי פעילות גדולים יותר עם טמפרטורות גבוהות - מעל 325°C .

הנתונים בציור 18 מתארים את ההשפעה של מסלול פעילות האוטובוס על טמפרטורת גזי הפליטה, כפי שנמדדו בפרויקט ARTEMIS [8,9].



ציור 18. השפעת מסלול נסיעת של אוטובוס עירוני על טמפרטורת גזי פליטה [8,9].

מציור 18 נובע שישנם שינויים גדולים בין טמפרטורות גזי הפליטה של אוטובוסים עירוניים בארץ, כתלות במסלול נסיעתם תוך כדי פעילות סדירה. למשל, טמפרטורות גבוהות מ- 225°C נמדדות בתחום שבין 30 עד 75 אחוז מסה"כ זמן פעילות האוטובוס בקווים שונים, כאשר טמפרטורות נמוכות נמדדו במסלולי נסיעה במרכז העיר – ראה מסלול 3 בציור 18. הדבר מצביע על כך, שבמסלולים הללו עלולה להיווצר בעיה ביעילות של התקני טיפול בגזי הפליטה של מנועי דיזל – ראה ציור 2 לעיל. חשוב לציין, שכאשר האוטובוס עובד בתקופת החורף, מערכת המיזוג שלו אינה מופעלת. הדבר גורם להפחתה משמעותית בעומס המנוע, וכתוצאה מכך – לטמפרטורות גזי פליטה נמוכות עוד יותר. דוגמה לכך מופיעה בציור 18 עבור מסלול 5, שבו המדידות בוצעו הן בתקופת הקיץ והן בחורף. אחוז הפעילות עם טמפרטורות גבוהות מ- 225°C ירד בחורף מ-52% ל-31% בלבד – פי 1.7! מכך נובע שתקופת החורף היא עונה בעייתית מבחינת השימוש באמצעי טיפול בגזי פליטה של אוטובוסים עירוניים בארץ.

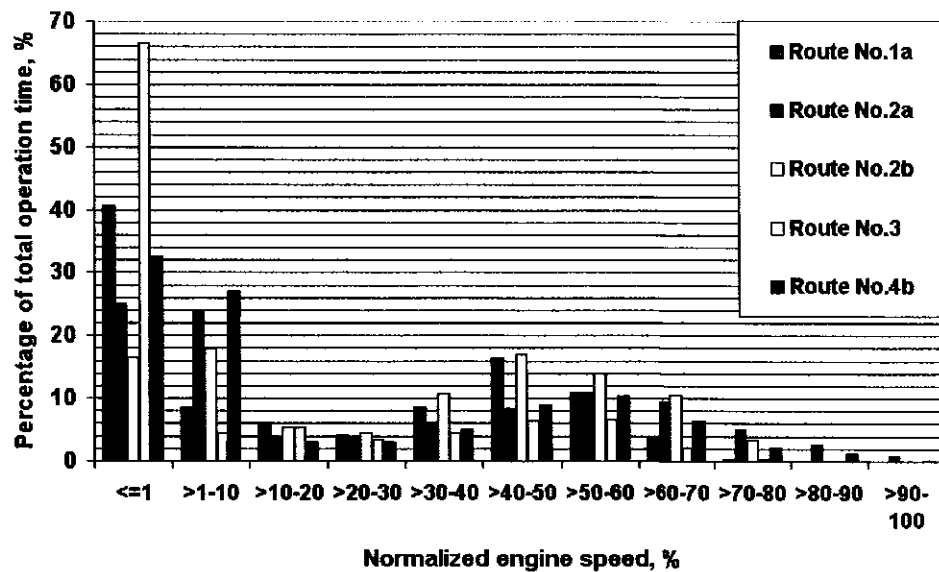
בדיקת יעילות של ממיר מחמצן בניסוי מעבדתי

כפי שהוזכר לעיל, הממיר שעבד באוטובוס כ-100,000 ק"מ, עבר לאחר מכן בדיקת יעילות בניסוי מנוע מעבדתיים. הניסויים בוצעו במתקן ניסויים (test bench) המבוסס על דינמומטר מנוע של "אגד" – ראה ציור 8 ותמונה בציור 19.

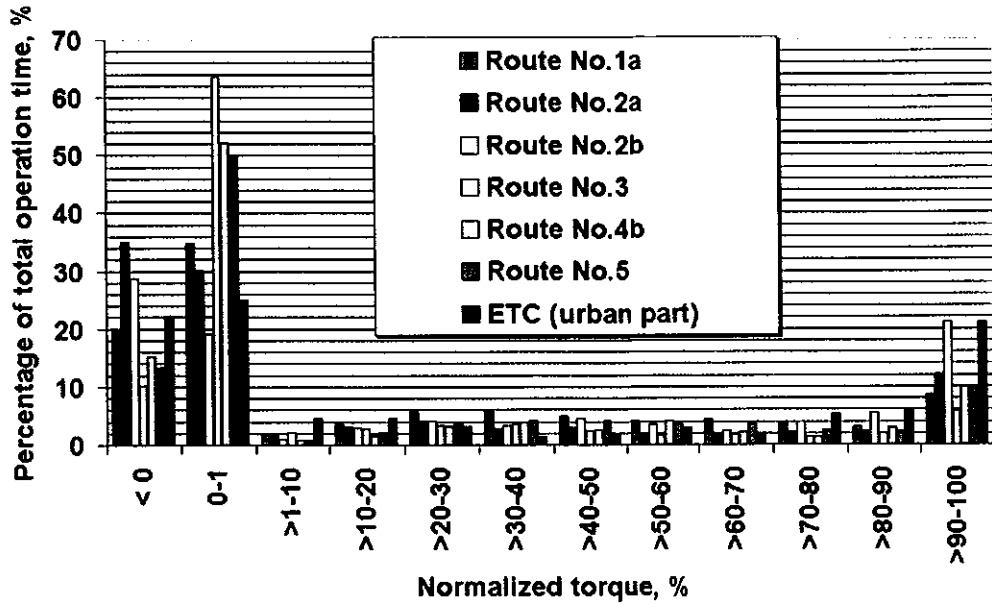


ציור 19. התקנת ממיר מחמצן במתקן הניסוי של "אגד".

המדידות בוצעו במשטרי פעולת מנוע שהם הנפוצים ביותר בנסיעה ריאלית של אוטובוס עירוני. המשטרים הללו נבחרו בהתבסס על תוצאות הניסויים שבוצעו במסגרת הפרויקט ARTEMIS [8]. בציורים 20 ו-21 ניתן לראות את ההתפלגויות של מהירויות סיבוב המנוע ושל מומנט המנוע, בהתאמה, כפי שנמדדו בפרויקט זה.

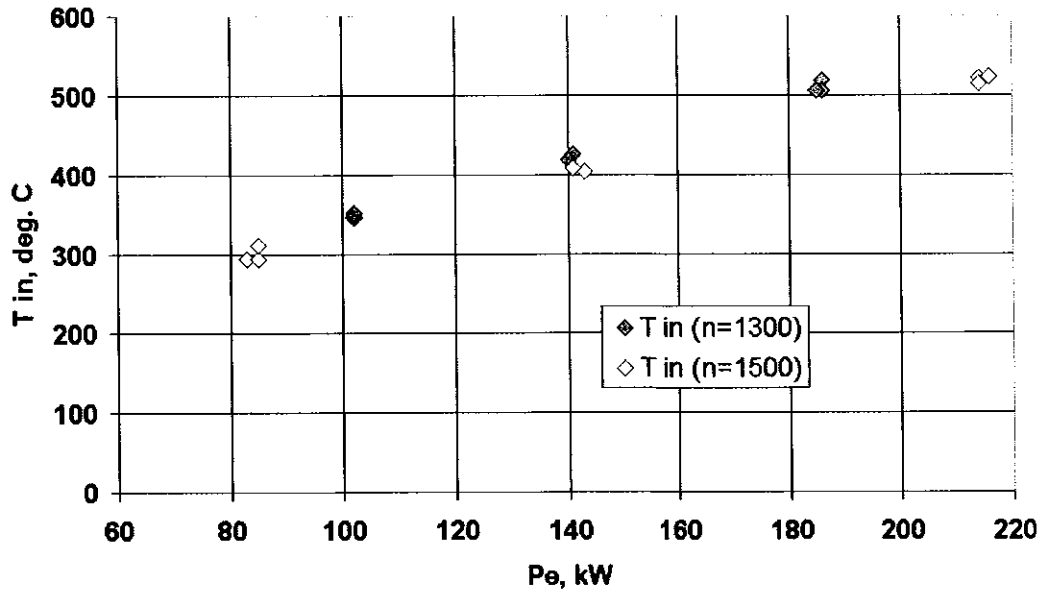


ציור 20. התפלגות של מהירויות סיבוב המנוע של אוטובוס עירוני בארץ, [8].

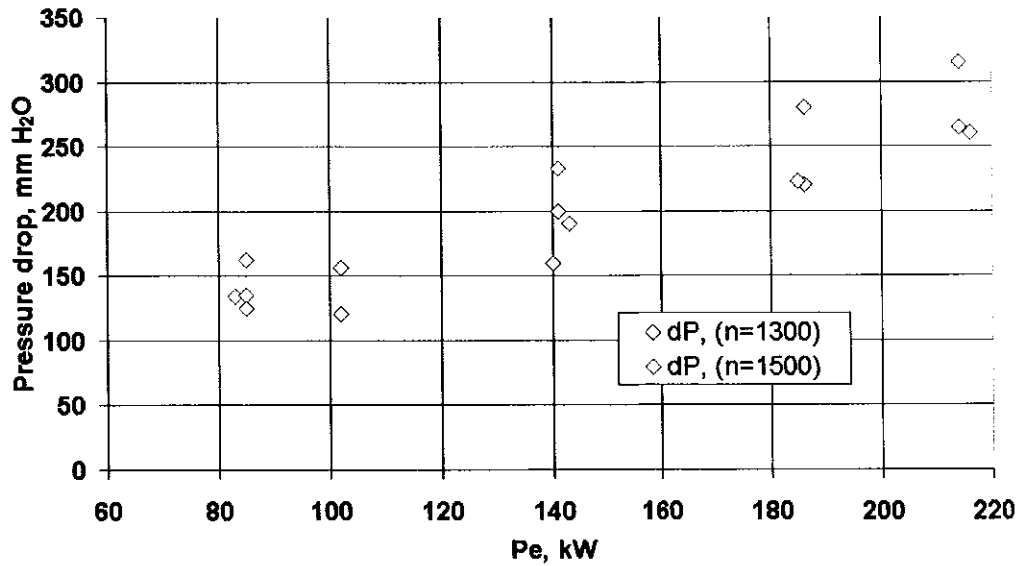


ציור 21. התפלגות של מומנט המנוע של אוטובוס עירוני בארץ, [8, 10].

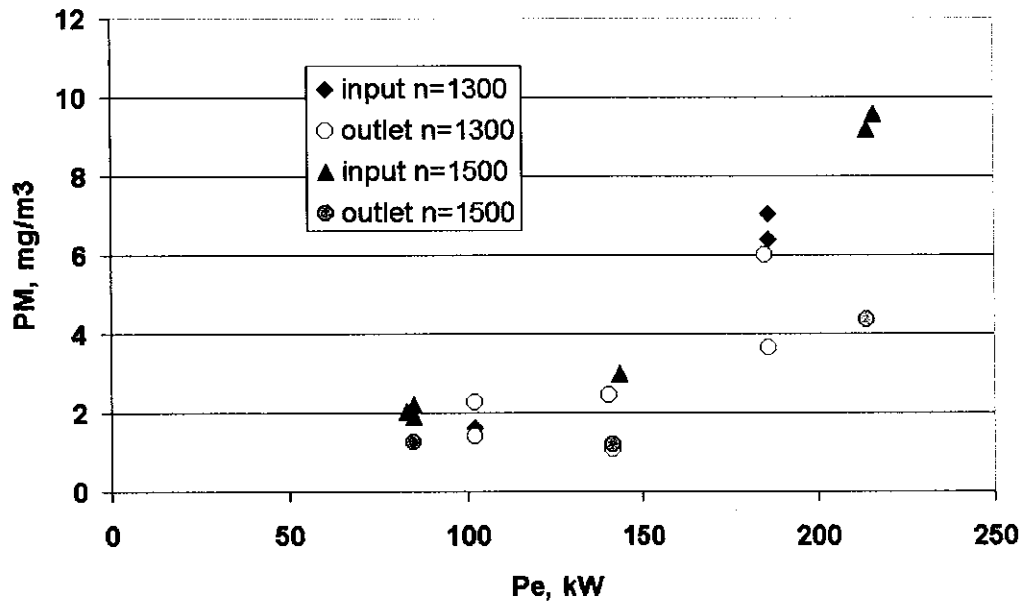
מהנתונים המתוארים בציור 20 נובע, שעבור המנוע מסוג OM-447hLA מהירויות הסיבוב האופייניות בנסיעת אוטובוס ריאלית הן 1300, 1500 סל"ד, וכן סיבובי סרק. בהתבסס על תוצאות אלה, הוחלט לבצע ניסויים של בדיקת יעילות הממיר בסרק ובעומסים שונים במהירויות הסיבוב שהוזכרו לעיל. תוצאות הניסויים מתוארות בציורים 22 – 24.



ציור 22. הטמפרטורה בכניסה לממיר.

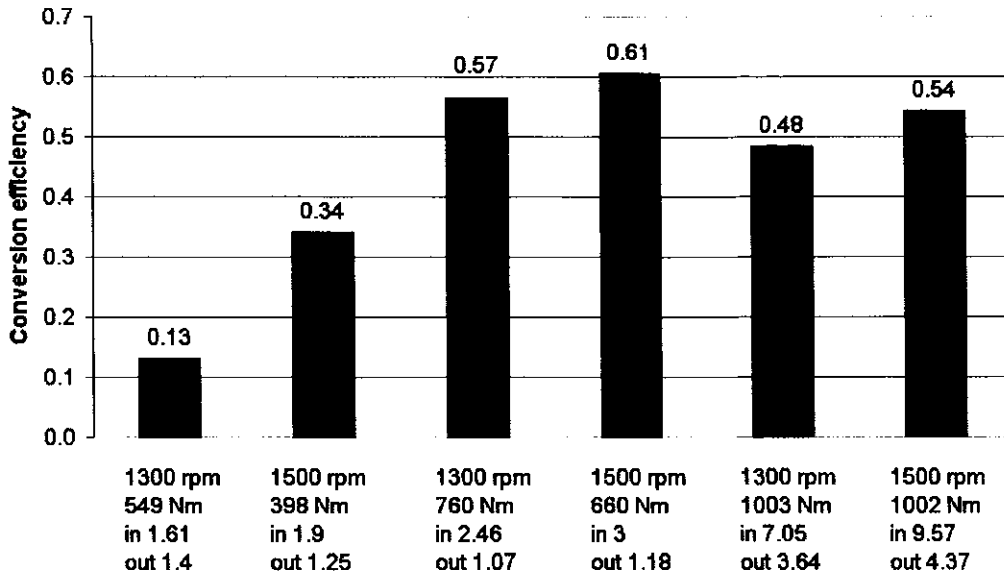


ציור 23. מפל הלחץ בממיר קטליטי מחמצן.



ציור 24. פליטות חלקיקים לפני ואחרי הממיר המחמצן.

יש לציין, שמדידות בעומסים נמוכים אינן מתוארות כאן, כיוון שבעומסים אלה פליטות החלקיקים הן נמוכות מאד (מתחת ל- 2 mg/m^3) – על סף רגישות המכשיר. כפי שניתן לראות מציור 23, מפלי הלחץ שנמדדו בממיר לאחר הנסועה של כ- $100,000 \text{ ק"מ}$ הם נמוכים ודומים מאד לאלה שנרשמו תוך כדי פעולת הממיר באוטובוס. בהתבסס על מדידות של פליטות חלקיקים בכניסה וביציאה מהממיר החמצן, חושבו ערכים של יעילות המרת החלקיקים בממיר קטליטי מחמצן בכל משטרי הפעולה שבהם בוצעו מדידות. תוצאות החישוב מתוארות בציור 25.

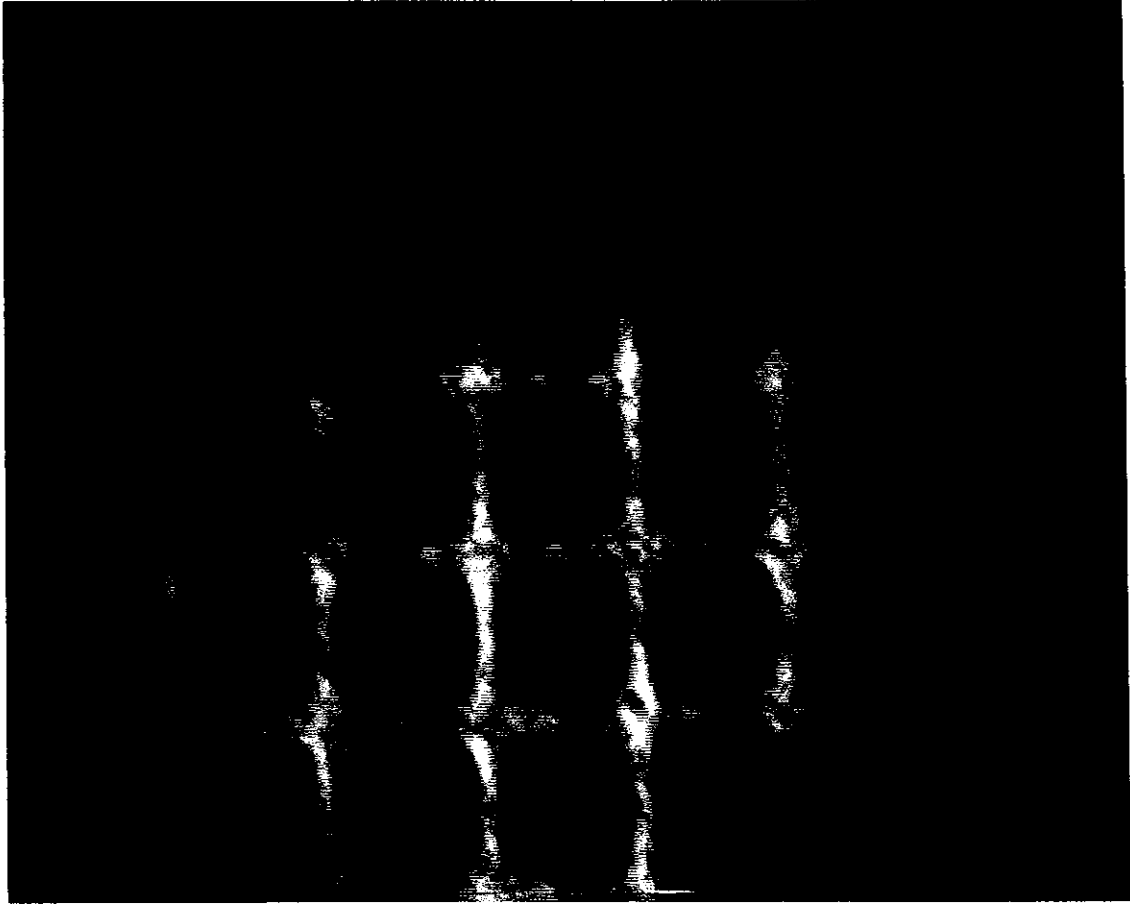


ציור 25. יעילות המרת חלקיקים בממיר קטליטי מתמצן לאחר הנסועה של כ- 100,000 ק"מ.

מהנתונים המופיעים בציור 25 נובע שיעילות הממיר, כפי שנמדדה בניסויים מעבדתיים, היא בתחום של 0.13 – 0.61 (תלוי במשטר פעולת המנוע). ערכים אלה מתאימים בהחלט להצהרות היצרן, ו גם לנתונים שפורסמו בספרות [5].

המשך הפעלת הממיר באוטובוס

לאחר הסיום של בדיקת יעילות הממיר, הוא צולם מבפנים (על מנת להשוות עם המצב החדש) – ראה תמונה בציור 26, והותקן באוטובוס מאותו הדגם להמשך ההפעלה. במידה ויושג סיכום עם המשרד, קיימת אפשרות (בתאום עם "אגד") להמשיך ולעקוב אחרי פעילות הממיר באוטובוס.



ציור 26. ממיר קטליטי מחמצן לאחר 100,000 ק"מ וניסוי המעבדה – מבט מבפנים.

מסקנות

1. במסגרת הפרויקט הותקנו שני ממירים קטליטיים מחמצנים באוטובוסים של "אגד" מדגם Mercedes-Benz O-405, דור טכנולוגי Euro 2. האוטובוסים נסעו עם הממירים כ- 100,000 וכ- 65,000 ק"מ בהתאמה.
2. על מנת להעריך את ההשפעה של ממיר קטליטי מחמצן על הלחץ הנגדי ביציאה מהמנוע ולפני התקנת הממירים באוטובוסים, בוצעה סידרה מיוחדת של ניסויים מעבדתיים שבהם נמדדו שעורי מפל הלחץ בממיר חדש והתוצאות הושוּוּ עם הערכים שנתקבלו בניסוי הייחוס עם משתיק הקול התקני. התוצאות שנתקבלו מצביעות על כך, שהממיר המחמצן מסוג AZ, שהותקן בשני אוטובוסים לצורכי הניסוי, גורם למפלי לחץ נמוכים יותר בהשוואה למשתיק הקול התקני.
3. במשך הניסוי לא הועלו תלונות ע"י נהגי האוטובוסים ו/או צוות טכני אחר לגבי פגיעה כלשהי בביצועי האוטובוסים עקב התקנת ממיר מחמצן בהם, למעט מקרה של גילוי סדק במעטפת

- החיצונית של הממיר באוטובוס 1. הסיבה להיווצרותו היא שגיאח בתכנון החיבור בין גוף הממיר לבין צינור היציאה ממנו. היצרן ביצע תיקון ומאז לא נתגלו בעיות נוספות כלשהן.
4. על מנת להעריך את ההשפעה של התקנת הממיר על ביצועי האוטובוס, בוצעו במסגרת ניסויי הדרך מספר מדידות של הספק על הגלגלים במשטר פעולת המנוע המשמש לצורך מדידת פליטת העשן. לא נתגלו שינויים מהותיים בהספק על הגלגלים שנמדדו בדינמומטר שילדה של "אגד".
5. בנוסף למדידות ההספק, בוצעה השוואה של תצרוכת הדלק של האוטובוסים ללא ועם הממיר בהתחלה, באמצע ובסוף הניסוי. הנתונים של צריכת הדלק נתקבלו מ"אגד". תוצאות ההשוואה אינן מצביעות על עליה בתצרוכת הדלק, עקב התקנת הממיר המחמצן.
6. בעת התקנת הממיר באוטובוס אחד בוצעו גם מדידות של פליטות תחמוצות החנקן. כצפוי, לא נתגלו שינויים מהותיים במצבים עם וללא הממיר המחמצן. הסיבה לכך ידועה – ממיר מחמצן אינו פעיל בתחום הפחתת NO_x .
7. במשך ניסוי הדרך נמדדו תקופתית שעורי לחץ וטמפרטורת גזי הפליטה לפני ואחרי הממיר. לאורך כל ניסויי הדרך בשני האוטובוסים, הלחץ הנגדי הממוצע תוך כדי נסיעה (מהחישוב הוצאו משטרי פעולת מנוע בסרק) לא עלה על 45 mbar. הדבר מאמת את התוצאות שתוארו לעיל לגבי חוסר השפעה מהותית של התקנת הממיר המחמצן על ביצועי המנוע של אוטובוס.
8. ישנם שינויים גדולים בין טמפרטורות גזי הפליטה של אוטובוסים עירוניים בארץ, כתלות במסלול נסיעתם תוך כדי פעילות סדירה. חשוב לציין, שכאשר קו אוטובוס עובר במרכז העיר, טמפרטורות גזי הפליטה נמוכות מאד. במסלולים הללו עלולה להיווצר בעיה של יעילות ל התקני טיפול בגזי הפליטה של מנועי דיזל.
9. כאשר האוטובוס עובד בתקופת החורף, מערכת המיזוג שלו אינה מופעלת. הדבר גורם להפחתה משמעותית בעומס המנוע, וכתוצאה מכך – לטמפרטורות גזי הפליטה נמוכות עוד יותר. מהמדידות שבוצעו ע"י הטכניון במסגרת הפרויקט ARTEMIS נובע, למשל, שאחוז זמן הפעולה עם טמפרטורות גבוהות מ- $225^{\circ}C$ יורד בחורף פי 1.7 לעומת תקופת הקיץ. מכך נובע שתקופת החורף היא עונה בעייתית מבחינת השימוש באמצעי טיפול בגזי פליטה של אוטובוסים עירוניים בארץ.
10. הממיר שעבד באוטובוס כ- 100,000 ק"מ עבר לאחר מכן בדיקת יעילות בניסויי מנוע מעבדתיים. הניסויים בוצעו במתקן הניסויים של "אגד". מתוצאות ניסויים אלה נובע שיעילות הממיר שנמדדה היא בתחום של 0.13 – 0.61 (תלוי במשטר פעולת המנוע) ובהחלט מתאימה להצהרות היצרן ולנתונים שפורסמו בספרות מקצועית.
11. לאחר הסיום של בדיקת יעילות הממיר, הוא הותקן באוטובוס מאותו הדגם להמשך ההפעלה. במידה ויושג סיכום עם המשרד, קיימת אפשרות (בתאום עם "אגד") להמשיך ולעקוב אחרי פעילות הממיר באוטובוס.

- and Analysis of Real-World Driving Behavior of Urban Buses”. Proceedings of the 12th International Symposium on Transport and Air Pollution, Avignon (France), June 2003.
10. L. Tartakovsky, Y. Zvirin, M. Veinblat, V. Baybikov, Y. Aleinikov and M. Gutman “Driving Patterns of Urban Buses in Israel”. Proceedings of the 29th Israel Conference on Mechanical Engineering, Haifa, 12-13 May 2003.