

אלון גרינברג דנה

תכנית האנרגיה בטכניון ע"ש סטיב ונסי גרנד, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

אורן אלישב

תכנית האנרגיה בטכניון ע"ש סטיב ונסי גרנד, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

גנדי שטר

הפקולטה להנדסה כימית, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

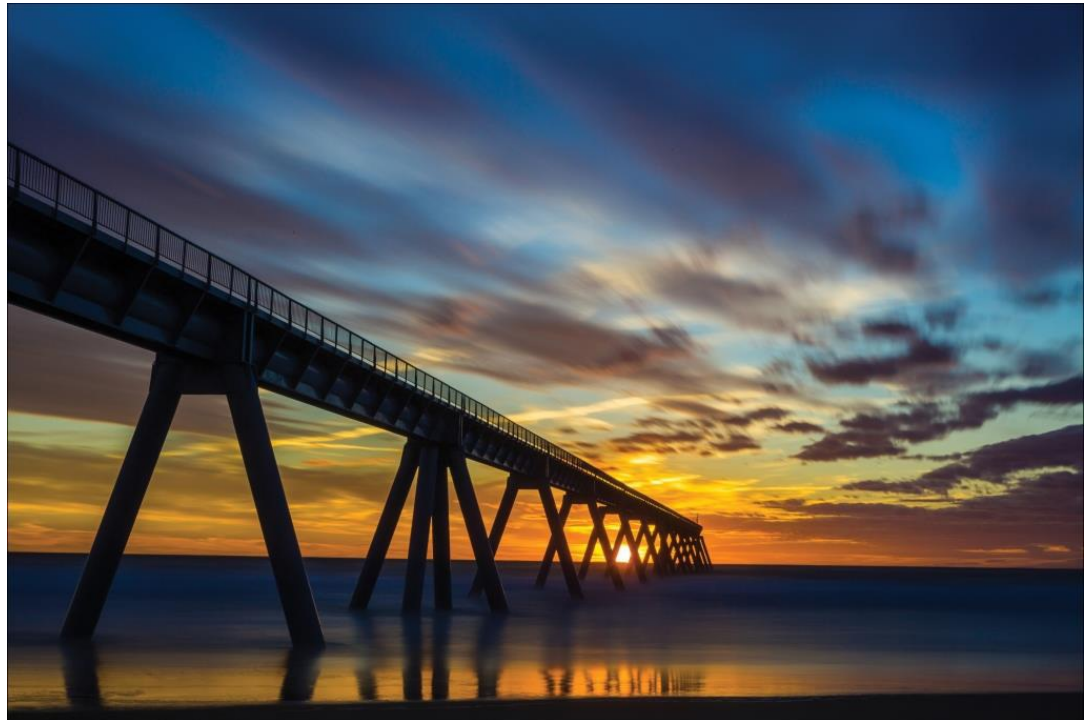
גדעון גרד

הפקולטה להנדסה כימית, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

מאמר זה עבר שיפוט עמיתים

ציטוט מומלץ

גרינברג דנה א, אלישב א, שטר ג וגרד ג. 2015. דלק חלופי מבוסס חנקן לאחסון כימי בר-קיימא של מימן. *אקולוגיה וסביבה* 6(3).



בעתיד מימן יוכל להיות מיוצר ממי הים באמצעות אנרגיות מתחדשות. שילוב מימן אטמוספרי יכול להוכיח את עצמו כטכנולוגיה מבטיחה העושה שימוש בחומרי גלם נפוצים ובני-קיימא | צילום: Adrien Sifre

דלק חלופי מבוסס חנקן לאחסון כימי בר-קיימא של מימן

גיליון סתיו 2015 / כרך 6(3) / דלקים חלופיים ואנרגיה 19 באוקטובר, 2015

[חזית המחבר](#)

על קצה המזלג

- השאיפה להתנתק מדלקי מחצבים ולהתבסס על אנרגיה מתחדשת מציבה אתגר בדמות הצורך לאגור את האנרגיה לשימוש עתידי בזמנים שהמקורות המתחדשים אינם זמינים.
- מימן הוא מקור אנרגיה חלופי ידידותי לסביבה, היות שהוא נמצא במי הים, ותוצר הלואי היחיד מבעירתו הוא מים. עם זאת, הבעיות הכרוכות באחסונו ובהובלתו הן מכשול העומד בפני השימוש בו.
- פתרון אפשרי לבעיה הוא אחסון מולקולות המימן, עתירות האנרגיה, בתמיסה מימית מבוססת חנקן.
- לבדיקת היתכנות השימוש בדלק נוזלי מבוסס חנקן נבדקו יעילות תהליך בעירת הדלק וכמות המזהמים הנפלטים בתהליך.
- בבעירה בתנאי לחץ גבוה (25 מגה-פסקל) התקבלה נצולת ייצור חנקן הקרובה ל-100%, ופליטת מזהמים נמוכה מהתקן האמריקאי לשרפת גז טבעי בתחנות כוח.
- ניתן אף להפחית את הזיהום הנלווה לבעירה על-ידי פיתוח רזז מתאים ונאקטור ייעודי.

המערכת

תקציר

מכיוון שאנרגיות מתחדשות, כגון שמש ורוח, הן מקוטעות מטבען, יש צורך לאחסן אותן כדי לגשר על פרקי הזמן שהן אינן זמינות בהם. דלקים חלופיים (סינתטיים) עתידיים הם החוליה המקשרת הדרושה לכל מערכת אנרגיה בת-קיימא בקנה מידה גדול המטמיעה אנרגיות מתחדשות. מימן, לדוגמה, הוא דלק ידידותי לסביבה הפולט מים בלבד כאשר הוא מתחמצן. עם זאת, הבעיות הכרוכות באחסון ובהובלה של המימן מהוות מכשול להטמעתו כמטבע האנרגיה הישיר. מאידך גיסא, ניתן לאחסן את המימן בצורה כימית על-ידי ייצור דלקים חלופיים נוזליים בעלי צפיפות אנרגיה גבוהה. במאמר זה מוצג מחקר תהליך הבעירה של דלק חלופי מבוסס חנקן, שמשמש לאחסון מימן בצורת תמיסה מימית של אמוניום חנקתי ואוריאה. אחת התוצאות הבולטות של מחקר זה היא הפחתת המזהמים בצורת תחמוצות החנקן הנפלטות מהדלק אל מתחת לרמת האסדרה הנהוגה בארה"ב עבור בעירת גז טבעי בתחנות כוח. דלק זה יכול לשמש פתרון עתידי לבעיות הטכנולוגיות והבטיחותיות הקשורות לשימוש במימן כאמצעי לאחסון אנרגיה.

הקדמה

דלקי מחצבים, שנוצרו במהלך מאות מיליוני שנים, הם חלק מאבני הבניין המרכזיות של החברה המודרנית. בזכות טכנולוגיות לשימוש בדלקים אלה התאפשר השפע המאפיין את תרבותנו בעידן הנוכחי. עם זאת, יש להם השפעות הרסניות על הסביבה שלנו ושל שאר בעלי החיים, כמו גם על האקלים. דו"ח של הפאנל הבין-ממשלתי לשינוי האקלים (IPCC), שהוקם על-ידי האו"ם, קבע לאחרונה כי פעילות אנתרופוגנית נמצאה כגורם האחראי לשינוי האקלים ברמת ודאות של 95–100%^[7].

מכיוון שפליטות גזי החממה העולמיות נמצאות במגמת עלייה, ישנה דחיפות לפעול בכל האמצעים שברשותנו כדי לקדם ולפתח טכנולוגיות אנרגיה נקייה. על כן, אחד האתגרים המדעיים המשמעותיים שעלינו להתייבץ מולם במאה ה-21 הוא כינון מערכת אנרגיה עולמית יציבה, כלכלית ובת-קיימא. אך מה הן החלופות לדלקי המחצבים, בהינתן פרדיגמת הדלקים הנוכחית – הפקת דלקי מחצבים, זיקוקם במידת הצורך והפצתם? כיצד עלינו לפעול כדי לגנון ולהעשיר את סל הדלקים שלנו תוך כדי מזעור השפעות על הסביבה ועל האקלים? ולבסוף, האם מערכות האנרגיה שלנו יכולות באמת להיעשות ניטרליות מבחינת פליטות הפחמן?

חלק חשוב מהפתרון לשאלות אלה נעוץ במחקר ובפיתוח של דלקים חלופיים בקנה מידה עולמי שיאפשרו שימוש במקורות אנרגיה מתחדשים אך מקוטעים, כגון שמש ורוח, באופן יציב ורציף. דלקים אלה, בתורם, יישענו, בין היתר, על פיתוח טכנולוגיות עתידיות יעילות וכלכליות לייצור מימן (H₂) ממי ים. לכשייושמו טכנולוגיות ייצור המימן, אחסון מימן באופן כימי יהיה נחוץ כדי לגשר על הבעיות הטכנולוגיות והבטיחותיות הכרוכות בשימוש בו באופן ישיר כדלק. במאמר זה נתאר מודל חדשני לדלק מבוסס חנקן, המתבסס על מחקרים קודמים שנערכו בקבוצה שלנו^[3, 4, 5, 6].

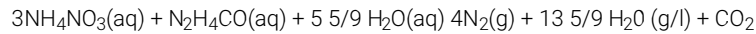
מימן נחשב בעיני רבים כדלק מבטיח וידידותי לסביבה, בעיקר מכיוון שלאחר חמצונו מתקבלים מים ואנרגיה בלבד. נוסף על כך, מימן הוא יסוד שכח, ובעתיד ניתן יהיה לייצר גז מימן ישירות ממי ים^[12]. זאת ועוד, למימן יש צפיפות אנרגיה משקלית מרשימה של 120.0 מגה-ג'אול לקילוגרם. עם זאת, כגז יש למימן צפיפות אנרגיה נפחית גרועה בתנאי הסביבה עקב צפיפותו הנמוכה. כלכלת המימן מתימרת בסופו של דבר להחליף את דלקי המחצבים בגז מימן דחוס או במימן מעובה כנשאי אנרגיה^[8]. עיבוי המימן אכן מעלה את צפיפות האנרגיה הנפחית באופן משמעותי, אך הדבר כרוך במחיר לא מבוטל: נוסף על בזבוז של כ-30%–24 מהאנרגיה של המימן, לאורך זמן יאבד חומר (boil-offs), וזאת עקב הטמפרטורות הנמוכות הדרושות לשימור המימן כנוזל^[10, 11]. על אף היותו אלמנט מהותי לדלקים חלופיים עתידיים, מימן לא יוכל לשמש מטבע האנרגיה העיקרי. נוסף על כך, כלכלת מימן טהורה בקנה מידה עולמי טומנת בחובה אתגרים רבים לא פתורים, כגון סכנות פיצוץ ועלויות תשתיות גבוהות^[2].

גישה עדיפה, אם כן, היא אחסון כימי של אטומי מימן בצורה של תרכובות דחוסות יותר, כגון דלקים כימיים נוזליים. קשה להתחרות בדלקים מבחינת צפיפות האנרגיה, ומבחינה לוגיסטית ניתן לשנעם בקלות ולהשתמש בהם ליישומים בקנה מידה גדול. אחסון מימן באופן כימי בצורת דלק נוזלי יכול להיעשות תוך הטמעת פחמן^[9] או חנקן^[3] כנשאי המימן על-ידי שימוש בפחמן דו-חמצני (CO₂) או בגז חנקן (N₂), בהתאמה. בעוד שאת החנקן, המהווה כ-78% מהרכב אטמוספירת כדור הארץ, אפשר להפריד ישירות מהאוויר, ישנם שני מקורות אפשריים עקרונית לפחמן הדו-חמצני: מקורות טבעיים כמו האטמוספירה, ומקורות אנתרופוגניים מרכזיים יותר (5–15%), כדוגמת תחנות כוח. עם זאת, לכידת פחמן דו-חמצני ממקורות אנתרופוגניים רבים ושינועו לאתרים שבהם מופק מימן ומיוצר דלק חלופי, יכולים להפוך במהרה לתהליך יקר מאוד. נוסף על כך, בטווח הארוך יינתן דגש על פיתוח מקורות אנרגיה מתחדשים, ובהדרגה ייעשה פחות שימוש בדלקי מחצבים. כלומר, כפועל יוצא משני

המניעים שלעיל, לכידת הפחמן הדו-חמצני בקנה מידה עולמי למטרת הפקת דלק מבוסס פחמן תוכל להיעשות בעיקר מהאטמוספירה. עם זאת, הפרדה של פחמן דו-חמצני אטמוספרי בריכוז של כ-0.04% בקנה מידה גדול היא אתגר הנדסי. מאידך גיסא, הנגישות העולמית לחנקן אטמוספרי בריכוז של כ-78% מאפשרת כבר כיום ייצור של אמוניה ונגזרותיה הכימיות בהיקף רחב. נגזרות אלה, כגון אוריאה (שינן, urea ammonium nitrate – UAN) ואמוניום חנקתי, מיוצרות כבר כיום בהיקף של מאות מיליוני טונות בשנה, בעיקר לשימושים בתעשיית הדשנים.

אחרונה הדגמנו תהליך שרפה רציף ויציב של דלק חלופי מבוסס חנקן בצורת תמיסה מימית של אמוניום חנקתי ואוריאה [5,3]. הדלק הזה בטוח לשימוש [5], מבוסס על תרכובות המיוצרות כבר כיום בקנה מידה תעשייתי בכל העולם, ויכול להניב באופן תאורטי פליטות המורכבות ממים (73.0%), מחנקן (21.6%) ומפחמן דו-חמצני (5.4%) על בסיס מולרי (תגובה 1).

תגובה 1:



חומרים ושיטות מחקר

הדלק שנחקר הוא תמיסה מימית המכילה 60% אמוניום חנקתי ($\leq 99\%$, 15%, Sigma-Aldrich) ואוריאה ($\leq 99.5\%$, Sigma-Aldrich) ו-25% מים (Milli-Q@ ultrapure water) על בסיס משקלי. דלק זה הוזרק בספיקות משתנות (1–10 מ"ל לדקה) באמצעות משאבת בוכנה דרך צינור אנכי באורך 170 מ"מ ובקוטר פנימי של 3.175 מ"מ לראקטור בנפח 500 מ"ל, שחומם מראש לטמפרטורה של 450 מעלות צלזיוס. בתוך הראקטור התרחשה הצתה תרמית, והשרפה יצרה לחץ עבודה יציב בטווח של 10–250 אטמוספרות הנשלט באמצעות ברז מבוקר פנאומטי. תוצרי השרפה דוללו בחנקן בדרגת טוהר של 99.995%, והועברו לאנליזה בספקטרוסקופיית פורייה בספקטרום התת-אדום (FTIR, Gasmet CX-400002) לאחר כיול כנדרש עבור H_2O , CO_2 , CO , N_2O , NO , NO_2 , NH_3 , HNO_3 . מולקולות דו-אטומיות סימטריות, כגון חמצן, חנקן ומימן, שקופות בתחום התת-אדום, ולכן לא כומתו. תדירות הדגימה הייתה 10 הרץ עם מיצוע על פרק זמן של חמש דקות.

יש לציין כי הלחץ הרב במערכת זו נוצר ללא כל צורך בשלב דחיסה מקדים של תערובת אוויר ודלק, המאפיין את תהליכי השרפה של דלקים פחמניים במנועים קונבנציונליים. זאת מכיוון שלמערכת הוזרק דלק נוזלי בלבד שאיננו דחיס, ועל כן העבודה הנדרשת כדי להעלות את לחץ הכניסה שלו ללחץ המערכת זניחה יחסית לזו הנדרשת מדחיסה של גזים לתא השרפה. יתרון זה של הדלקים מבוססי החנקן נובע מכך שהמחזור והמחמצן נכנסים יחד לתא השרפה בפאזה הנוזלית (monofuel), והדלק ניצת כאשר הוא מתחמם לטמפרטורה שגבוהה מטמפרטורת הצתה העצמאית שלו (בערך 300–350 מעלות צלזיוס, כתלות בלחץ העבודה).

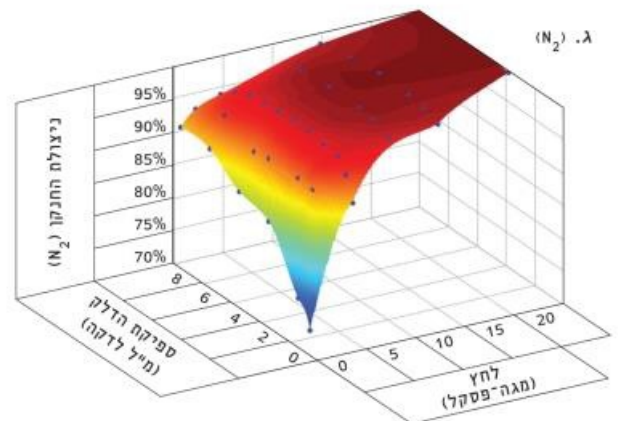
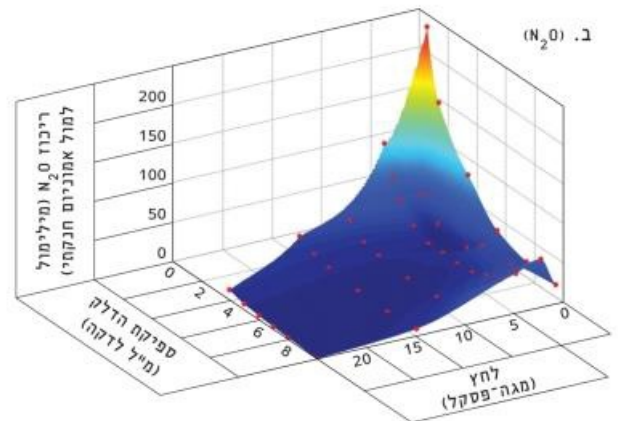
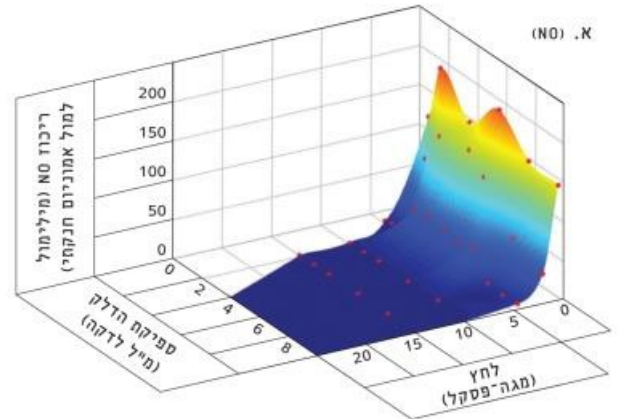


מכל לאכסון מימן נוזלי במרכז החלל על שם קנדי. אין ספק שבעתיד מימן יהיה מרכיב מפתח באנרגיות מתחדשות, אבל אכסונו בצורתו הטבעית יוצר סכנה בטיחותית חמורה, בייחוד בגלל הצורך לשנע אותו על פני מרחקים גדולים. על כן, יש עדיפות לייצור דלקים חלופיים המאכסנים את המימן בצורה כימית | צילום: CC Tom Fawls

תוצאות המחקר

כדי לבחון את היתכנות השימוש בדלק החלופי מבוסס החנקן, נחקר תהליך שרפתו הרציף בסדרת ניסויים בלחצי עבודה ובספיקות משתנים. ניתן לראות כי קיימת השפעה של לחץ העבודה על כמות המזהמים המתקבלים בתהליך השרפה, ונמצא כי פליטות המזהמים שהתגלו (NO_2 , NO , N_2O , NH_3 , CO) פחתו באופן משמעותי עם העלייה בלחץ. לדוגמה, ריכוז הגזים המזהמים המייצגים NO ו- N_2O ירד משמעותית עם העלייה בלחץ (איור 1א ו-1ב). השפעת הספיקה על ריכוז המזהמים תלויה בלחץ העבודה בעצמה, שכן הערכים המינימליים של המזהמים מגיעים לערך אסימפטומטי ככל שהלחץ עולה. נוסף על כך, חושבה נצולת ייצור התוצר הרצוי – חנקן – ביחס לתעובה¹, המאפשרת קבלת אינדיקציה לגבי המידה שבה תהליך השרפה תואם לתעובה¹ המועדפת. ניתן לראות כי נצולת ייצור החנקן עלתה באופן משמעותי ככל שלחץ העבודה עלה, בעיקר בתחום של 1 עד 5 מגה-פסקל (איור 1ג). בתנאי לחץ עבודה של 25 מגה-פסקל וספיקה של 10 מ"ל לדקה התקבלה נצולת חנקן קרובה ל-99.9%. בתנאים אלה ירדה כמות המזהמים מסוג תחמוצות החנקן (NO_2 , NO , N_2O) הנפלטים מהדלק, לרמה של 127 מיליגרם למגה-ג'אול. תוצאה זו היא מתחת למה שנקבע באסדרה הנהוגה בארה"ב עבור שרפת גז טבעי בתחנות כוח, שעומדת כיום על 290 מיליגרם למגה-ג'אול^[1]. עבודה ראשונית זו נעשתה ללא שימוש בזרז (קטליזטור), והטמעת זרז ועבודה עם ראקטור מיטבי צפויות להפחית אף יותר את כמות המזהמים הנפלטים.

איור 1. רמות פליטה של מזהמים מייצגים ונצולה החנקן עבור תהליך בעירה רציפה של UAN כנגד לחץ העבודה וספיקת הדלק (א-ב) רמות הגזים NO , N_2O , הנקודות האדומות מייצגות תוצאות ניסויים; (ג) נצולת החנקן, הנקודות הכחולות מייצגות ערכים מחושבים. מחוך Grinberg Dana ואחרים^[3], מוצג באישור האגודה המלכותית לכימיה.

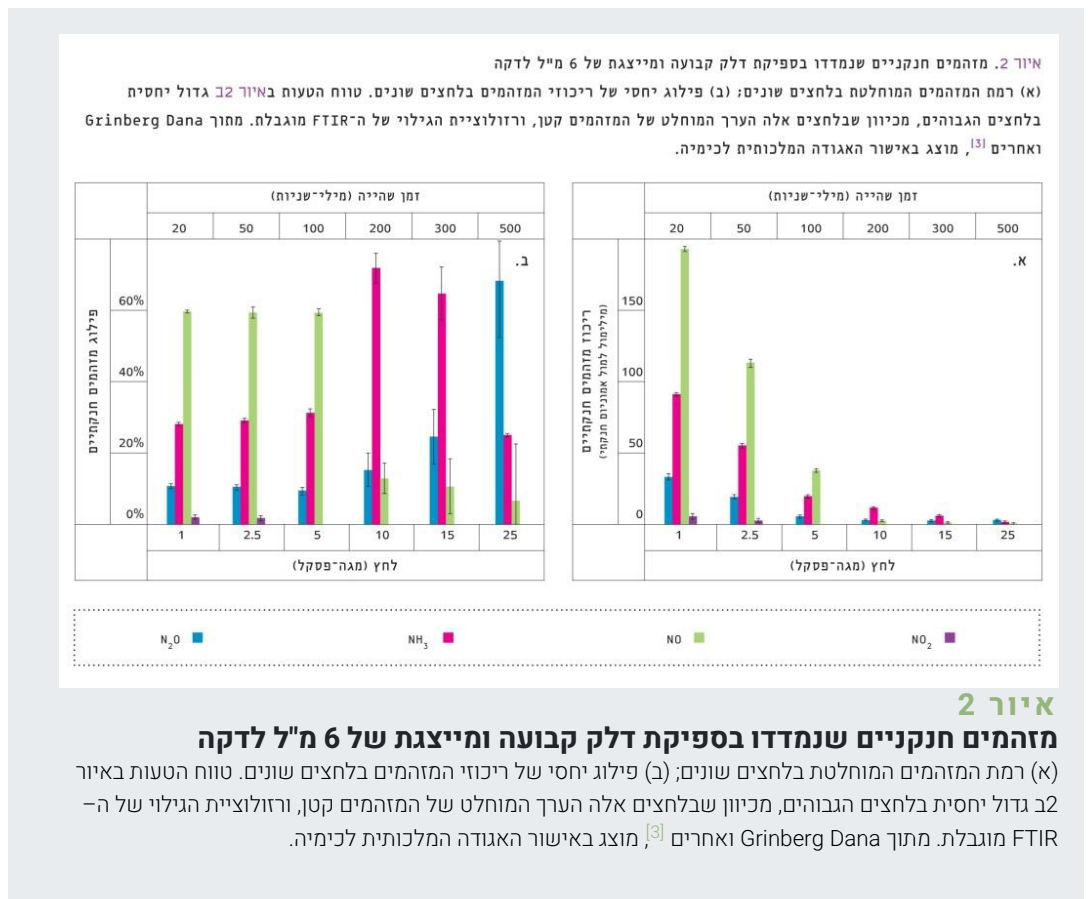


איור 1

רמות פליטה של מזהמים מייצגים ונצולת החנקן עבור תהליך בעירה רציפה של UAN כנגד לחץ העבודה וספיקת הדלק (א-ב) רמות הגזים NO , N_2O , הנקודות האדומות מייצגות תוצאות ניסויים; (ג) נצולת החנקן, הנקודות הכחולות מייצגות ערכים מחושבים.

ערכים מחושבים. מתוך Grinberg Dana ואחרים^[3], מוצג באישור האגודה המלכותית לכימיה.

על סמך תוצאות הניסויים שהוצגו, נבחנה כמות המזהמים שהתקבלה בלחצי עבודה משתנים ובספיקת דלק קבועה של 6 מ"ל לדקה. התוצאות מראות כי העלייה בלחץ מסייעת בהפחתת כל המזהמים שנמדדו. למשל, ריכוז ה-NO ירד בשלושה סדרי גודל כאשר לחץ העבודה עלה מ-1 מגה-פסקל ל-25 מגה-פסקל. גם כאן ניתן לזהות כי קיימים שני אזורי לחץ, מתחת ומעל 5 מגה-פסקל, הנבדלים זה מזה בהרכב המזהמים החנקניים (איור 2). בתחום הלחצים הנמוך, כאשר מתרחשת עלייה בלחץ, מתקבלת ירידה בכמות המזהמים (איור 2א) אך עם זאת לא חל שינוי מהותי בפילוג המזהמים מבוססי החנקן (איור 2ב). כך, למשל, NO מהווה 60% מכלל המזהמים מבוססי חנקן לכל אורך תחום לחצים זה. ניתן להסיק כי בתחום הלחצים הנמוך מנגנון הראקציה אינו משתנה מהותית, מכיוון שפילוג המזהמים נותר כמעט קבוע, אף על פי שכמות המזהמים הכוללת נמצאת במגמת ירידה. מאידך גיסא, בתחום הלחצים הגבוה (מעל 5 מגה-פסקל) כמות המזהמים החנקניים הכוללת יורדת בקצב פחות עם עלייה בלחץ (איור 2א). בניגוד לתחום הלחצים הנמוך, פילוג המזהמים בתחום הלחצים הגבוה משתנה מהותית. כך, למשל, NO בלחצים הגבוהים מ-5 מגה-פסקל מהווה פחות מ-20% מסך המזהמים מבוססי החנקן, ואף יורד לכ-6.7% בלחץ עבודה גבוה במיוחד של 25 מגה-פסקל. מצד שני, ובהתאמה, כמותו היחסית של N₂O עולה, ובלחץ של 25 מגה-פסקל הוא מהווה כ-70% מכלל המזהמים מבוססי החנקן (איור 2ב). עם זאת, כזכור, כמות ה-N₂O יורדת מונוטונית באופן מוחלט ככל שהלחץ עולה (איור 2א). מגמה זו מעידה על שינוי במסלולי התקדמות הראקציות הרדיקליות שבמנגנון השרפה. ייתכן שמעל 5 מגה-פסקל מגיעים מרכיבי ביניים החיוניים להתקדמות הראקציות לריכוז קריטי נמוך.



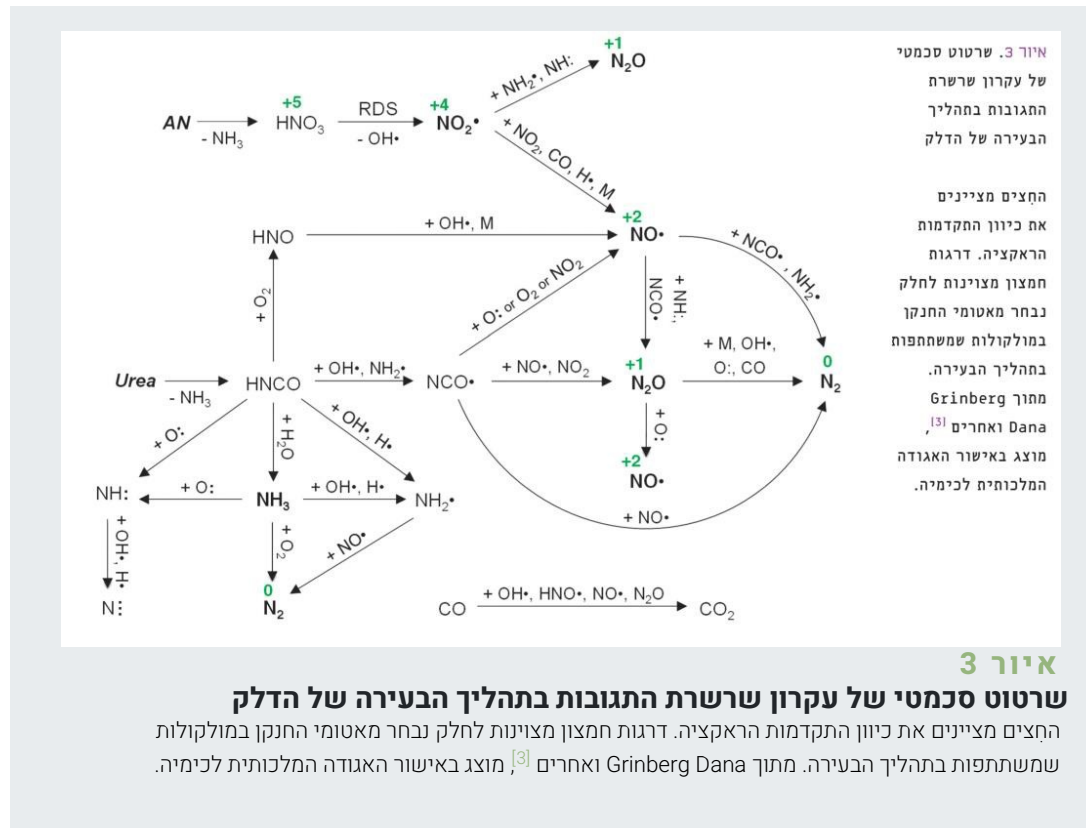
איור 2

מזהמים חנקניים שנמדדו בספיקת דלק קבועה ומייצגת של 6 מ"ל לדקה

(א) רמת המזהמים המוחלטת בלחצים שונים; (ב) פילוג יחסי של ריכוזי המזהמים בלחצים שונים. טווח הטעות באיור 2ב גדול יחסית בלחצים הגבוהים, מכיוון שבלחצים אלה הערך המוחלט של המזהמים קטן, ורזולוציית הגילוי של ה-FTIR מוגבלת. מתוך Grinberg Dana ואחרים^[3], מוצג באישור האגודה המלכותית לכימיה.

שרפתו של הדלק UAN מאופיינת תחילה בתהליך קולט חום (endothermic), שמוביל בהמשך לראקציית שרפה פולטת חום (exothermic). התהליך קולט החום מתחיל באידי המים הנמצאים בתמיסת הדלק, ולאחר מכן מתרחש פירוק תרמי של אמוניום חנקתי לאמוניה ולחומצה חנקתית (HNO₃). כמו כן, מתרחש פירוק של אוריא לאמוניה ולחומצה איזו-ציאנית (HNCO). החומצה החנקתית והחומצה האיזו-ציאנית לא התגלו בקריאות ה-FTIR, ולכן הוסק כי הן עברו פירוק מלא בראקטור. החומצה החנקתית מתפרקת לרדיקלים NO₂ ו-OH. תוצרי פירוק האוריא ממשכיכים להגיב עם מחמצנים שונים במערכת ליצירת רדיקלים פעילים נוספים, כגון NH₂, NH, N₂H, המשך שרשרת התגובות הרדיקליות מוביל לבסוף להיווצרות חנקן (N₂), כמתואר באיור 3. לאטום החנקן בחומצה החנקתית דרגת החמצון הגבוהה ביותר במערכת, ועם התקדמות תהליך השרפה

משתנה דרגת החמצון שלו עד הגעתו לדרגת חמצון אפס בצורה של מולקולת חנקן יציבה (איור 3).



איור 3

שרטוט סכמטי של עקרון שרשרת התגובות בתהליך הבעירה של הדלק

החצים מציינים את כיוון התקדמות הראקציה. דרגות חמצון מצוינות לחלק נבחר מאטומי החנקן במולקולות שמשתתפות בתהליך הבעירה. מתוך Grinberg Dana ואחרים^[3], מוצג באישור האגודה המלכותית לכימיה.

מסקנות

המגמה העולמית של מעבר לאנרגיות מתחדשות ובנות-קיימא והפחתת השימוש בדלקי מחצבים חייבת להיות מתמדת בטכנולוגיות מתאימות לאחסון ולשינוע של האנרגיה לזמנים ולמקומות שהיא אינה זמינה בהם. אחת הדרכים המבטיחות לאחסון אנרגיה היא ייצור דלק חלופי. דלקים אלה, שאוגרים באופן כימי מימן שמקורו בפיצול מים, יכולים להיות מבוססי פחמן או חנקן. בעת בחירת סוג הדלק העתידי יש להתחשב בשיקולים של זמינות חומרי הגלם, צריכת האנרגיה בתהליך ייצור הדלק, ענייני בטיחות ולוגיסטיקה הקשורים בשינוע הדלק שיוצר, ועוד. אנו מראים כי ישנה כדאיות לשימוש בדלק מבוסס חנקן, בעיקר לאור זמינותו של החנקן האטמוספרי. בשימוש בדלק מסוג זה אין סכנה סביבתית בכל שלבי האחסון, השינוע הימי והיבשתי והשרפה.

במאמר זה הדגמנו את שרפת הדלק מבוסס החנקן המורכב מתמיסה מימית של אמוניום חנקתי ואוריאה בתנאים משתנים של לחץ וספיקה, המשפיעים באופן ניכר על כמות המזהמים שהתקבלו בתהליך השרפה. בלחצי עבודה של עד 5 מגה-פסקל התקבלה ירידה ניכרת בכמות הכוללת של המזהמים עם העלייה בלחץ תוך שמירה על פילוג מזהמים דומה. מאידך גיסא, בלחצי עבודה גבוהים יותר לא נרשמה ירידה ניכרת בכמות הכוללת של המזהמים, אך פילוג המזהמים השתנה מהותית. על סמך התוצאות הוצע מנגנון רדיקלי ראשוני לתהליך השרפה של הדלק. הדלק מבוסס החנקן שאופיין כאן יכול לשמש לייצור חשמל במוקדים נייחים, כגון תחנות כוח. על-ידי שימוש בדלק זה ניתן לאגור אנרגיה תוך פגיעה מזערית בסביבה ועמידה בתנאי אסדרה מחמירה.



אוטובוס המונע בתא דלק מימני, אוקלנד (קליפורניה) | צילום: Eric Fischer (CC BY 2.0)

מקורות

1. Ahluwalia R, Hua T, Peng J, et al. 2010. Technical assessment of cryo-compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy* **35**: 4171-4184
2. Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use. 2004. The hydrogen economy: Opportunities, costs, barriers, and R&D needs. The Washington D.C.: National Academies Press
3. Grinberg Dana A, Shter GE, and Grader GS. 2014. Nitrogen-based alternative fuel: An environmentally friendly combustion approach. *RSC Advances* **4**(20): 10051-10059
4. Grinberg Dana A, Shter GE, and Grader GS. 2014. Thermal analysis of aqueous urea ammonium nitrate alternative fuel. *RSC Advances* **4**(66): 34836-34848
5. Grinberg Dana A, Shter GE, Grader GS. 2015. Nitrogen-based alternative fuel: Safety considerations. *Energy Technology*, DOI: 10.1002/ente.201500180R1
6. Grinberg Dana A, Tvil G, Winter L, Shter GE, Grader GS. 2015. Pressure effect on the combustion of aqueous urea ammonium nitrate alternative fuel. *Fuel* **159**: 500-507, DOI: 10.1016/j.fuel.2015.06.099

- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The .7
.Physical Science Basis. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1
- Jones LW. 1970. Toward a liquid hydrogen fuel economy. Ann Arbor, MI: University of .8
.Michigan, Environmental Action for Survival Teach In
- Olah GA. 2005. Beyond oil and gas: The methanol economy. *Angewandte Chemie* .9
International Edition **44**: 2636-2639
- Satyapal S, Petrovic J, Read C, et al. 2007. The US Department of Energy's National .10
Hydrogen Storage Project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle
.requirements. *Catalysis Today* **120**: 246-256
- U.S. Environmental Protection Agency. 2006. Standards of Performance for Stationary .11
.Combustion Turbines, Final Rule, Federal Register vol. 71, no. 129, p. 38505
- W Luo, Z Yang, Z Li, et al. 2011. Solar hydrogen generation from seawater with a .12
.modified BiVO₄ photoanode. *Energy & Environmental Science* **4**: 4046-4051