

## אפיון אתגר PFAS

"כיצד לנטר, להרחיק ולטפל בתרכובות PFAS במים וקולחים ממקורות שונים"

האתגר עוסק בניטור שדה, הרחקה סלקטיבית, פירוק מזרמים שונים וכל טכנולוגיה או רצף תהליכים שיממש מטרה זו. על הפתרון המוצע לשמור על איכות הסביבה ולעמוד בתקנים הקיימים בתחום ובהתאם להמלצת משרד הבריאות. את הפתרון ניתן להציע למי שתיה, מים מושבים, מים אפורים, רכז התפלה וכל מים המוחזרים לסביבה.

### רקע

PFAS (Per- and polyFluorinated Alkyl Substances) הנה משפחה של קרוב ל-5,000 תרכובות מעשה ידי אדם אשר אינן מצויות בסביבה באופן טבעי, המכילות שרשראות יציבות של פחמן ופלואור. תרכובות אלה הן בעלות תכונות כימיות ופיזיקליות ייחודיות הכוללות דחיית שמן ומים, עמידות בטמפרטורה ותכונות פני שטח נוספות. בשל תכונות אלה, חומרים ממשפחת ה-PFAS נפוצים מאד במוצרי צריכה רבים וביניהם מוצרי קוסמטיקה, אריזות מזון, ציפוי לבדים ליצירת לבוש עמיד במים, ציפוי כלי בישול, צבעים וצילום, וכן בשימוש תעשייתי בקצף לכיבוי שריפות (אשר נמצא בשימוש נרחב גם בשדות תעופה).

ניתן לחלק את משפחת ה-PFAS לשתי קבוצות עיקריות לפי הקבוצה הפונקציונלית השלטת:

1. קבוצה פונקציונלית מסוג חומצה סולפונית (Sulfonic Acid) המתאפיינת במטען שלילי; התרכובת הנפוצה ביותר ממשפחה זו הנה PFOS (perfluorooctane sulfonic acid)
2. קבוצה פונקציונלית מסוג חומצה אורגנית המתאפיינת במטען נייטרלי (כתלות בתנאים סביבתיים); התרכובת הנפוצה ביותר ממשפחה זו הנה PFOA (perfluorooctanoic acid) אשר טעונה שלילית בתנאים סביבתיים.

## קריטריונים להצלחה

### ניטור:

- מדידת ריכוזי תרכובות PFAS כערך סכומי או עבור תרכובות ספציפיות.
- גישות גבוהה- מדידה בריכוזים של 10 ppt עבור תרכובות ספציפית ו-50 ppt עבור ערך סכומי.
- 4 TRL ומעלה

### הרחקה:

- יעילות הרחקה של מעל ל-80%.
- הרחקה של מגוון תרכובות PFAS, בדגש על תרכובות קצרות.
- פתרונות הרחקה סלקטיביים יהווה יתרון.
- 4 TRL ומעלה

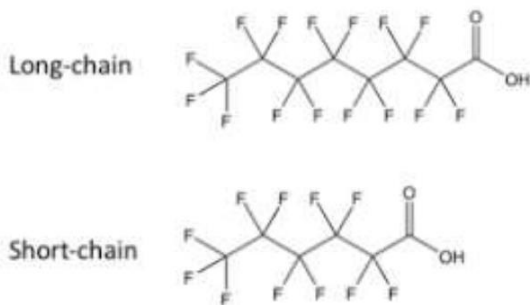
### פירוק:

- יעילות פירוק של מעל ל-80%.
- פירוק של מגוון תרכובות PFAS, בדגש על תרכובות קצרות.
- דגש על תנאי הפירוק ושמירה על איכות הסביבה, כולל מעקב אחר תוצרי הפירוק.
- 4 TRL ומעלה

## הרחבה

תרכובות (PFAS (Per - and PolyFluoroAlkyl Substances משמשות במגוון רחב מאוד של יישומים, ובהם ציפויים למחבתות וסירים, תוספים דוחי שמן ומים למוצרי טקסטיל, חומרים מעכבי בערה וכן קצף כיבוי אש. בשל תכונותיהן הייחודיות של תרכובות אלו, הן יציבות מאוד בסביבה, נודדות למרחקים גדולים ממוקדי הזיהום ומצטברות ברקמות ביולוגיות בסביבה ובגוף האדם. PFAS מוגדרים כחומרים מופלרים המכילים לפחות אטום פחמן מתילן או מתילן מופלר אחד. הנוסחה הכללית של חומרים פר-פלואורואלקילים היא  $C_nF_{2n+1}-R$ , כאשר  $n$  מייצג את אורך השרשרת ( $n < 2$ ) ו- $R$  היא הקבוצה הפונקציונלית. לפי ה- $R$  מבחינים בשתי קבוצות: חומצות פרפלואורוקרבוקסיליות (כאשר הקבוצה הפונקציונלית (R) היא  $-COOH$ ), או חומצות פרפלואורו-אלקן סולפוניות (כאשר הקבוצה הפונקציונלית (R) היא  $-SO_3H$ ). חומרים פוליפלואורואלקיל נבדלים מחומרים פרפלואורואלקיל במידת החלפת הפלואור בעמוד השדרה האלקאן: לפחות פחמן אחד לא יהיה קשור לאטום פלואור ולפחות שני פחמנים חייבים להיות מופלרים במלואם. תרכובות PFAS יכולות להתקיים גם כפולימרים. פולימרי PFAS אלה הם מולקולות גדולות שנוצרו על ידי חיבור של מונומרים קטנים זהים של PFAS רבים. מידע עדכני מצביע על כך שה-PFAS הלא-פולימרי מהווה את הסיכון הגדול ביותר לזיהום סביבתי ולרעילות, אם כי חלק מפולימרי PFAS יכולים להיות מתכלים.

נהוג גם לחלק את קבוצת החומרים הנדונה לפי אורך השרשרת: תרכובות PFAS ארוכות שרשרת (8 פחמנים ומעלה מותמרים בפלואור) ותרכובות קצרות שרשרת (6 פחמנים ומטה מותמרים בפלואור).



התרכובות ארוכות השרשרת ובייחוד PFOA ו-PFOS הוכחו כרעילות ביותר בחשיפה לריכוזים נמוכים מאוד.

תרכובות אלו נכללות באמנת שטוקהולם, כאשר PFOA נכלל ברשימת הכימיקלים האסורים ו PFOS נכלל ברשימת הכימיקלים המוגבלים. מחקרים אפידמיולוגיים רבים הראו כי תרכובות PFAS מצטברות בגוף האדם ועלולות לגרום למגוון השפעות בריאותיות שליליות כולל השפעות על הריון והתפתחות העובר, להגברת הסיכון לתחלואה בסרטן הכליות והאשכים, לפגיעה במערכת החיסונית ולעלייה ברמת הכולסטרול. נמצאה עלייה בסיכון למשקל לידה נמוך (small for gestational age) בקרב תינוקות שנולדו לנשים באזור עם זיהום PFAS באיטליה. באזור בשוודיה עם זיהום מי תהום בקרבת שדה

תעופה, נמצאה עלייה בסיכון להימצאות רמות גבוהות של שומנים בדם. בקרב ילדים, נמצאה השפעה שלילית של חשיפה ל PFAS על רמת נוגדנים לאחר קבלת חיסונים. מזהמים אלו נמצאו בשנים האחרונות ברחבי העולם במקורות מים ובמערכות אספקת מי שתייה שמהם שותים מיליוני בני אדם. מחקרים מעידים על כך שזיהום PFAS במי תהום נמצא בעיקר בקרבה לתעשייה יצרנית של מוצרים מבוססי מרכיבי PFAS, כיבוי שריפות דלק גדולות, שדות תעופה צבאיים ואזרחיים, אתרי אימון כיבוי אש מרכזיים ומטמנות. בגלל המסיסות הגבוהה של PFAS במי שתייה והמוביליות המהירה, חומרי PFAS במי תהום עלולים לזהם קידוחים סמוכים.

הידע שהצטבר לגבי הרעילות של חומרים ממשפחת ה PFAS הוביל להליכי חקיקה ברחבי העולם שמטרתם להגביל את הריכוז המותר של תרכובות ממשפחת ה PFAS במי שתייה (טבלה 1). משד הבריאות הישראלי נמצא במעקב מתמיד אחר התקדמות התקינה העולמית עבור ריכוזי PFAS במי שתייה, ובשלב זה החליט להמליץ על אימוץ התקנות הקנדיות כערך סף מומלץ ל PFOA ו PFOS במי שתייה. השיקול המרכזי בבחירה היה שאלו התקנות היחידות בשלב זה אשר הן סופיות ומחייבות ולא בגדר המלצה. יחד עם זאת, לאור ההתקדמות המהירה בתקינה בנושא זה בעולם הוחלט להמשיך ולבחון מהו ערך הסף שנכון להחיל בארץ ולא מן הנמנע כי לבסוף יקבע ערך מחמיר יותר מהקנדי.

טבלה 1 - מהלכי רגולציה ברחבי העולם להגבלת ריכוז PFAS במי שתייה

מדינה (שנת קביעת התקן)	מזהם	ערך סף (ng/L)	סטטוס התקן
קנדה (2018)	PFOA	200	מחייב
	PFOS	600	
האיחוד האירופי (2021)	PFAS, סכום מתוך רשימה מוגדרת	100	מחייב (החל מ-2026)
	PFAS, סה"כ כללי	500	
אוסטרליה (2021)	PFOA	560	מחייב
	PFOS + PFHxS	70	
WHO EU (2017)	PFOA	4000	המלצה
	PFOS	400	
USEPA (2020)	PFOA	70	מחייב
	PFOS	70	

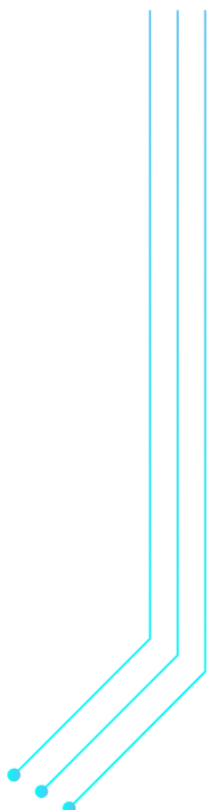


המגמה בעולם היא להחמרה משמעותית בתקינה.  
קנדה - ערך הסף לסך תרכובות ה-PFAS צפוי לרדת ל-30 ננוגרם לליטר  
USEPA - ערכי סף צפויים להתעדכן עבור התרכובות:

- PFOA - 0.004 ננוגרם לליטר
- PFOS - 0.004 ננוגרם לליטר

בישראל משרד הבריאות צפוי לאמץ את התקן המחמיר באירופה (מחייב החל מ-2026) ומתייחס לרשימה מוגדרת של תרכובות PFAS (כ-20) וערך סף סכומי של 100 ננוגרם לליטר.

[https://bit.ly/Challenge\\_By\\_Mekorot](https://bit.ly/Challenge_By_Mekorot)



## סקירת טכנולוגיות אפשריות להרחקת PFAS

את השיטות הקיימות להרחקת PFAS ניתן לחלק ל-2 קבוצות עיקריות:

1. שיטות שמטרתן לפרק את התרכובות באופן חלקי או מלא
  2. שיטות שמרחיקות PFAS ממי הגלם ע"י העברתו לפאזה נוזלית/מוצקה/זרם צידי
- פירוק יעיל של PFAS אינו מתאפשר בשיטות קונבנציונליות בשל היציבות יוצאת הדופן של תרכובות אלה. מכיוון שכך, מתקיימים מאמצי מחקר רבים כדי לאתר שיטות לפירוק יעיל ומלא של תרכובות אלה הכוללים טכנולוגיות כגון חמצון אלקטרוכימי, שריפה, חמצון בתנאים סופרקריטיים ועוד. לשיטות אלה יעילות משתנה בפירוק PFAS ובשלב זה אינן נחשבות לשיטות לפירוק PFAS ממי גלם לשתייה והשימוש בהן למטרה זו עודנו נחשב מחקרי.

הרחקת PFAS ממי גלם המיועדים לשתייה מתאפשרת ע"י ארבע קבוצות תהליכים מרכזיות:

1. תהליכים ממברנליים בלחץ גבוה (NF או RO) הנם יעילים מאד בהרחקת PFAS לסוגיו. חסרונות השיטה הנם ביצירת רכז המכיל PFAS ודורש טיפול מיוחד, במורכבות התפעול ובעלות התפעול הגבוהה יחסית הכוללת גם צורך בהשבת מלחים למים לפני אספקתם.
2. הרחקה בשימוש במחליפי יונים ייעודיים (IX) הנה אולי השיטה היעילה ביותר להרחקה PFAS ממי גלם לשתייה. מחליפי יונים משתמשים בגודל חלקיקי המצע ובמטענם החשמלי כדי להרחיק חומרים שונים מהמים. קיימים בשוק מחליפי יונים מסוגים שונים המתאימים להרחקת PFAS אשר יעילותם משתנה כתלות בהרכב ה PFAS במי הגלם המטופלים. עקרון הבסיס לשימוש בשיטה זו עבור הרחקת PFAS הנו שימוש במצע עד הגעה למיצויו (ללא 'רגרציה') ותוך ביצוע מספר מינימלי של שטיפות ריענון (לתחזוקה מבנית של מצע הסינון), וזאת כדי לפשט את הפעלת המערכת ולמנוע יצירת תשטיפים המכילים ריכוז גבוה של PFAS המצריך טיפול. לשיטה זו יתרונות רבים וביניהם: ספציפיות גבוהה והרחקה יעילה מאד של PFAS (כתלות בהרכב הספציפי במי הגלם), פשטות התפעול והשטח הקטן שהיא דורשת. חסרונותיה המרכזיים הנם עלות המצע ויצירת פסולת הדורשת הטמנה כחומ"ס בשל תכולת ה PFAS הגבוהה בסוף חיי המצע. יש לציין כי שיטה זו יעילה במיוחד במי גלם בעלי ריכוז חומר אורגני (TOC) נמוך, המאפיין בד"כ את מי התהום בארץ (בשונה ממי גלם שמקורם במים עיליים, הנפוצים בחו"ל).
3. הרחקה בספיחה על גבי פחם פעיל גרנולרי (GAC) אינה ספציפית להרחקת PFAS. מחקר השוואתי שבוצע ע"י Orange County Water District (OCWD) הראה שניתן להרחיק PFAS ביעילות טובה באמצעות GAC והצביע על הבדל גדול ביכולת הרחקת ה PFAS ע"י GAC מסוגים

שונים, הנובע ככל הנראה מהבדלים במבנה וגודל אתרי הספיחה במצעים השונים וכן מהשפעת החומר האורגני הקיים במי הגלם על תהליך הספיחה. היתרון המרכזי של פתרון זה הנו בזמינות מצע הספיחה ועלותו הנמוכה, וכן בפשטות התפעול.

חסרון השיטה הנו בשטח שהיא דורשת (שהנו גדול יותר מאשר לשימוש במחליפי יונים) וביעילות ההרחקה הנמוכה יותר בהשוואה למחליפי יונים (למרות שזו מתקזזת עם עלות החומר הנמוכה בחלק מהמקרים). חסרון נוסף של פתרון זה הנו בחוסר הספציפיות של המצע להרחקת תרכובות ממשפחת ה PFAS, אולם חסרון זה מהווה גם יתרון שכן הוא מספק הגנה נוספת לנדרשת ומרחיק גם תרכובות נוספות שטרם זוהו והתגלו כמזיקות ואשר הרחקתן אולי תידרש בעתיד.

4. אמצעי נוסף להרחקת PFAS הנו באמצעות מצעי טיפול חדישים (**Novel technologies**). מצעים אלה פועלים בשיטות שונות (לדוגמה ע"י סלקטיביות לגודל ומבנה חלקיקים ללא שימוש בממברנה) להרחקת PFAS ממי גלם ויכולים להיות בעלי יעילות מרשימה במיוחד להרחקת PFAS. היתרונות בשיטה זו דומים ליתרונות הקיימים בשימוש במחליפי יונים, כשעיקרם הנו יעילות ההרחקה ודרישות השטח המצומצמות יחסית. החסרון המרכזי של מצעים אלה הנו החדשנות שבהם והעובדה כי נכון להיום הם עדיין אינם מיושמים במתקן תפעולי בקנה מידה גדול.

#### למידע נוסף ושאלות

יוני עמר, מנהל חדשנות הנדסה, מקורות

כתובת מייל: [yamar@mekorot.co.il](mailto:yamar@mekorot.co.il)

טלפון: 052-4898045