



מבוא

האם זהו השימוש הטוב ביותר לכספנו? חד משמעית לא. הוויכוח הנוקב והנמרץ בקהילה המדעית בנוגע ליחסי הסיבה והמסובב של שינויי האקלים והאדם הוא במקרה הטוב ביותר וויכוח שטרם הוכרע ובמקרה הגרוע ביותר, כזה המונע באופן פוליטי על ידי שחקנים נוקשים.

מוטב היה לו השתמשו בכמויות הכספים האדירות המוזרמות למיתון השפעת שינויי האקלים לצורך השקעה ישירה ומידית במדע ובטכנולוגיה שיחליפו דלקי מאובנים וביקוע גרעיני. בתנאים אלו, השינוי האקלימי הנגרם על ידי האדם הוא נקודה שנויה במחלוקת ואין להכלילה בדיון רציני. אז יוכל המין האנושי ליהנות מאנרגיה זולה ובלתי מוגבלת, מי שתייה ושפע מזון לנצח.

בתחילת שנות השבעים, כשלמדתי לתואר הראשון בפיזיקה כמקצוע ראשי, למדנו שתהליך זה קורם עור וגידים. הדגמות היו אמורות להתבצע בשנות התשעים. האנרגיה אמורה היתה להזין את רשת החשמל בשנת 2000 והתהליך אמור היה להפוך למסחרי בקנה מידה נרחב בשנת 2005. המדע והטכנולוגיה הללו מכונים "היתוך גרעיני מבוקר". לדאבונו, נכשלנו במשימה והאשם אינו במדע. כעת, עלינו לגרום לזה להתממש.

חובתנו לעשות זאת מכיוון שעתיד המין האנושי תלוי בכך. ניתוח של דרישות האנרגיה של העולם בארבעים השנים הבאות, בהשוואה לכמות האנרגיה המוגבלת שניתן לקבל היום מ"מקורות חלופיים וירוקים", מצביע על הכרח לממש את תהליך ההיתוך הגרעיני המבוקר.

יש לקבוע במדויק את דרישות האנרגיה של מגזר התחבורה, הכולל מטוסים, תעבורה ימית, משאיות, רכבות ורכבים וכן מגזרי התעשייה, המסחר והמגורים, בהתבסס על רמת החיים הנמצאת בעלייה מתמדת ברחבי העולם, במסגרת הגידול הצפוי באוכלוסיית העולם. בחישוב זה עלינו

ברצוני להודות על העידוד שקבלתי מהפיזיקאי ד"ר ג'ארלד שרדר מירושלים, ועל עזרתו בתחום הטכני. ד"ר שרדר עשה לילות כימים כדי לעיין בכתובים ולהחליף עמי מידע בשנה האחרונה והודות למאמציו אלו נכתב מאמר זה. עבודתו של ד"ר שרדר בתחום הפיזיקה הגרעינית ופרסומיו הרבים מובאים בסוף מאמר זה. אני גם מוקיר תודה ומביע הערצתי העמוקה למרשה פרימן, המחברת העיקרית של מאמר זה. הגברת פרימן היא מחברת בעלת מוניטין, שהקדישה שלושים שנים לחיפוש אחר מדיניות האנרגיה הנכונה.

-- טום תמרקין

ביוני 2009, קיבל בית הנבחרים של ארה"ב את הצעת החוק המכונה Cap and Trade HR2454 ("מסחר וסחר בפליטות") ברוב של 219:211. הצעת חוק זו עשויה להפוך לחוק. בהצעת חוק זו קונסים למעשה חברות תעשייה כולל יצרני כוח חשמלי הגורמים לפליטת דו-תחמוצת הפחמן ו"גזי חממה" אחרים מעל לשיעורי סף שרירותיים ומחלקים שוב את הקנס הזה או "מס זיהום" בין חברות דומות הפועלות באופן משמעותי מתחת לסף.

לדברי משרד התקציב של ארה"ב, הצעת חוק המסחר והסחר בפליטות תעלה לאמריקאים \$175 לשנה למשק בית בארה"ב או מעל \$22 מיליארד דולרים מדי שנה, בשנת 2020.

בדצמבר 2009, התגבשה תנועה בינלאומית בקופנהגן, דנמרק במטרה להפוך את תפיסת המסחר והסחר בפליטות לתוכנית בינלאומית. ארה"ב ומדינות אחרות הסכימו "לתרום" \$100 מיליארד בשנה, בשנת 2020, למדינות פחות מפותחות, כדי לאכוף הפחתת פליטות גזי חממה על ידי המדינות המתועשות.

מוגבלת וזולה... אנרגיה שמקורה בהיתוך גרעיני מבוקר... מיושמת ומזינה את רשתות החשמל בעולם בשנת 2005. לדאבוננו, זה לא התממש.

מאמר זה בוחן בעין ביקורתית מדוע גישה מדעית וטכנולוגיה זו לא זכתה להוקרה הולמת מצד מדינאים והקהילה המדעית. היתה זו תפיסתם השגויה שהביאה, פעם אחר פעם, לעצירת המחקר והפיתוח המדעי הדרושים לנושא.

העם בארה"ב ומנהיגיו הנבחרים צריכים להבין את לקחי שגיאות העבר ולהתכונן להשקת "פרויקט מנהטן"¹ נוסף בסוף העשור הנוכחי. היתוך גרעיני מבוקר הוא הפיתרון המציאותי היחיד לבעיית האנרגיה ושורה של בעיות נוספות.

לא מדובר כאן רק על פתרון בעיית האנרגיה בארה"ב והפגת מתחים במזרח התיכון. אלא, מדובר על שמירת מעמדה הרם של ארה"ב בעולם בהתבסס על חינוך מתקדם, מחויבות לערכים, והיתרונות המסחריים לטווח ארוך של ייצור ציוד להפקת אנרגיה, שיימכר ברחבי העולם, על בסיס הוגן וצודק. אין ספק ולו הקלוש ביותר, שזה הסיכוי האחרון של ארה"ב לעשות זאת.



טום ד. תמרקין
נשיא ומנכ"ל
חברת USCL

USCL Corporation
2433 Garfield Avenue
Carmichael, CA 95608
<http://www.usclcorp.com>

לכלול את האנרגיה הדרושה להפקת מי שתייה על ידי התפלת מי ים והובלת המים על פני מרחקים ארוכים. גם את התוצרת החקלאית יש להכפיל פי כמה וכמה מונים. אלו הן הדרישות הבסיסיות לקיום האוכלוסיה החזויה בעולם במחצית המאה. לשם כך יש לחשב את צורכי האנרגיה הדרושה ולשלבם ביחידות הנדסיות המייצגות את דרישות האנרגיה העולמית, ברוטו (World GER).

השלב הבא הוא לנתח על בסיס כל מקרה לגופו, מהו בדיוק האחוז של דרישות האנרגיה העולמית, ברוטו, אותו יכולים לספק כעת מקורות אנרגיה חלופית ו/או ירוקה; דהיינו, אנרגיית השמש, אנרגיה מתאים פוטו וולטאים, אנרגיית הרוח או הגאות, אנרגיה גיאותרמית ודלקים ביולוגיים.

ניתוח זה צריך להתבסס על אפס שימוש בדלקי מאובנים וסתימת הגולל על הביקוע הגרעיני בעוד שלוש שנים, בהתחשב בסוגיות של סילוק פסולת רדיואקטיבית שנוצרה בביקוע וכן איום פוטנציאלי של שימוש בחומרי ביקוע בשוק השחור לצורך התחמשות.

ההערכה הטובה ביותר שלנו היא ש"כל מקורות האנרגיה החלופית ו/או האנרגיה הירוקה" הקיימים כיום, יוכלו יחד להפיק פחות מ-5% מדרישות האנרגיה של המין האנושי, בשנת 2050.

צוות במרכז המחקר של אוניברסיטה ישראלית עובד כעת עבורנו ועורך ניתוח זה של תחזית היצע וביקוש. התשובה הסופית אמורה להתקבל ברבעון השלישי של 2010. מוכרחים לקבל את התשובה לפני הבחירות הבאות לקונגרס בארה"ב. מדוע בחרנו באוניברסיטה ישראלית? אצטט מדברי וורן באפט: "אם מחפשים נפט במזרח התיכון, ישראל היא לא המקום. אבל אם מחפשים מוחות, אנרגיה ויושרה, זה המקום היחיד לעצור בו." מדוע לא צוות מאוניברסיטה אמריקאית או אירופאית? זה פשוט בלתי אפשרי לאור ההשלכות הפוליטיות.

עם השלמת מחקר זה, יתבררו מסגרת הזמן והמערך האופטימלי של ההחזר על ההשקעה בפרויקט זה.

בראשית שנות השבעים גיבשה ממשלת ארה"ב דרך פעולה שאמורה היתה לספק לאזרחי ארה"ב והעולם כולו מקור אנרגיה כגון זו, בלתי-

¹ שם הצופן לפיתוח הפצצה האטומית הראשונה במלחמת העולם השנייה.

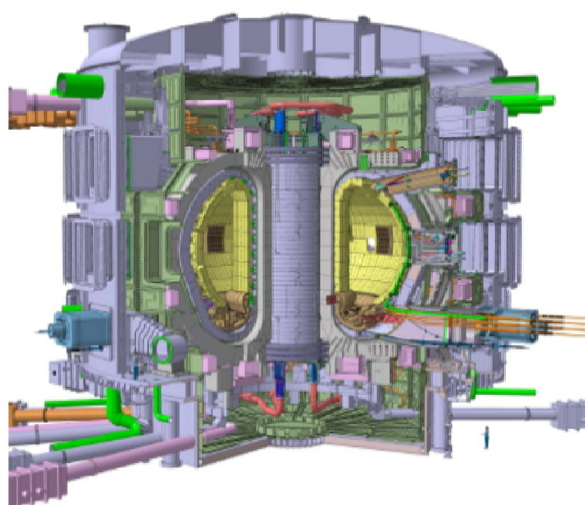
מי ניסה לרצוח את תהליך ההיתוך?

מאת מרשה פרימן

לעלות של טריליוני דולרים שמוציא המשק האמריקאי ליבוא נפט. בשנות השבעים כבר נערכו מחקרים מקיפים שהצביעו על יישום אנרגיית היתוך בצפיפות גבוהה, לא רק כדי לייצר חשמל, אלא גם דלקים סינטטיים, כגון מימן, להפיק מי מתוקים מהים, באמצעות התפלה; ליצור מקורות מינרלים חדשים ובאופן חסכוני באמצעות אבוקת היתוך; להטיס חלליות למאסר ומעבר לו; ושפע יישומים אחרים.

העובדה שארה"ב לא התקדמה בתוכנית ההיתוך נובעת כולה מהיעדר רצון פוליטי, היעדר חזון וקידום מדיניות כלכלה ואנרגיה כוזבת והרסנית, שכעת הותירה אותנו מפגרים אחרי יתר מדינות העולם, בפיתוח אנרגיית היתוך יישומית.

כאשר ארה"ב פרשה מפרויקט ההיתוך הבינלאומי, ITER, כל השותפים האחרים במאמץ לא התכוונו לוותר על הפרויקט. אף אחד אינו מחכה שארה"ב תנהיג את פיתוח כוח ההיתוך. השאלה היא, האם ארה"ב תתרום תרומה נכבדה למאמץ ההיתוך הבינלאומי? או האם נשב על הגדר ואפילו לא נוכל לנצל את היתרונות ההתקדמות שהושגה בתוכניות בינלאומיות, בגלל הפיחות החד שחל ביכולתנו? האם במחצית המאה ארה"ב תייבא כורי היתוך מרוסיה, אירופה, יפן, סין, הודו או דרום קוריאה?



עיבוד אמנותי של הכור של ITER בעל הספק של 500 מגה וואט שהופיע באיחור של עשרים שנים.

אין חולק על כך שהעולם ניצב בפני משבר אנרגיה שמימדיו עצומים. אולם, ניתן היה למנוע זאת. מזה יותר מחמישים שנים, ידוע למדענים, מהנדסים, מתכנני אנרגיה, קובעי מדיניות ולעתים אף הציבור הרחב, מהי החלופה המוחלטת למשאבי האנרגיה הסופיים שלנו – היתוך גרעיני. אנרגיה זו המניעה את השמש והכוכבים כולם ויכולה להשתמש בפועל בהיצע בלתי מוגבל של איזוטופי מימן, הזמינים ממי הים, ניצבת לפתחנו מזה שנים, אך נראה כי מעולם לא היתה בהישג יד. מדוע?

האגדה אומרת כי הבעיות בדרך להשגת היתוך גרעיני מבוקר רבות יותר מכפי שצפו המדענים וכי הושגה התקדמות מועטה בלבד. הפזמון החוזר של הספקנים אומר: "ההיתוך נמצא עדיין במרחק חמישים שנים מאיתנו וכך היה תמיד." אך הסיבה מדוע אנרגיית היתוך אינה מצויה עדין באופן מסחרי אינה מה שמקובל לחשוב.

בשנת 1976, מנהל מחקר ופיתוח אנרגיה (ERDA) – הגוף שקדם למחלקת האנרגיה (ארה"ב) – פרסם תרשים המציג אופציות שונות של מדיניות ומימון לתוכנית המחקר בנושא אנרגיית היתוך מגנטי. כל אופציה, שכונתה "לוגיקה", תיארה כיצד רמת המימון למחקר תקבע מהי אנרגיית ההיתוך שתהיה זמינה בפועל. על פי הפרופיל ה"תוקפני" ביותר, "לוגיקה V", תקציב שנתי של \$600 מיליון בקירוב, תעלה את התוכנית העתידית על מסלול שיוביל להפעלת כור הדגמה, בשנת 1990. בצד האחר של הסקאלה, "לוגיקה 1" שנקבעה על רמת תקצוב של \$150 מיליון לשנה, היתה האופציה המכונה בשפה המדוברת, "היתוך לעולם לא". זאת מכיוון שהמימון מעולם לא הגיע לרמה שבה ניתן להתגבר על האתגרים שעוד נותרו בתהליך זה. בשלושים השנים האחרונות, תוכנית ההיתוך בארה"ב נשארה ברמה שוות ערך לאופציה של "היתוך לעולם לא", או למטה מזה.

טעות לטעון כי מעולם לא היה בנמצא הכסף הנדרש למחקר נמרץ של ההיתוך, אם נשווה זאת

השקעה זו הניחה את הבסיס, לפני יותר משלושים שנים, להתקדמות דרמטית בתוכנית ההיתוך של ארה"ב. ההשקעה השתלמה באוגוסט 1978, דיווחו מדענים ב"מעבדה לפיזיקת הפלסמה של פרינסטון" כי בחודש יולי אותה שנה, הטוקאמאק של פרינסטון המכונה Princeton Large Torus (PLT) הגיע לטמפרטורת שיא של 60 מיליון מעלות. זהו נתון גבוה יותר מטמפרטורת ההצתה של 44 מיליון מעלות שנקבעה בטמפרטורה הדרושה לתגובת היתוך מתמשכת. כך התגברו על אחד המכשולים העיקריים



כבר בשנת 1972, המחקר בתחום ההיתוך האנרגיה נראה כה מבטיח. חברת Westinghouse Nuclear Energy Systems פיתחה דגם אמנותי זה של תחנת כוח שפועלת באנרגיית היתוך, עבור ממשלת ארה"ב. כור הדגמה זה אמור היה לפעול בשנות התשעים.

באותה עת, התוכנית

מינהל מחקר ופיתוח אנרגיה (ארה"ב) הרחבה בארה"ב בתחום ההיתוך

המגנטי תמכה בחוכמה במערך

שלם של אמצעים. נערך מחקר לא רק של טוקאמאקים, אלא מגוון מכונות בתצורות גיאומטריות שונות, עם תפיסות חדשניות להשגת אנרגיית היתוך. ההתקדמות שהושגה באמצעות הטוקאמאק, שפותח בברה"מ בשנות השישים הבטיחה רבות. אך בו-זמנית נחקרו במתקני ניסוי במעבדות לאומיות ובאוניברסיטאות ברחבי המדינה וכן בכל העולם, בעיות כגון: טוהר הפלסמה, טכנולוגיה המבוססת על מוליכות-על מגנטית, חומרים חדשים הדרושים לכורי ההיתוך, שיטות להפקת אנרגיה מכור ההיתוך ואתגרים אחרים. אולם, כפי שדיווח בגאווה, ד"ר מלווין גוטליב, מנהל המעבדה בפרינסטון, בשנת 1978, ישנם אומנם יותר מ-100 טוקאמאקים של מחקר ברחבי העולם, המבצעים עבודה חשובה, אך התוצאות שהושגו בפרינסטון הן ייחודיות.

התגובה להכרזה של פרינסטון היתה מחשמלת. ברעיון לחדשות CBS, ד"ר סטפן דין, מנהל ה"יחידה למערכות כליאה מגנטית" ממשרד

ארה"ב מובילה

יש לזכור כי בזמנו היתה ארה"ב המדינה המובילה בעולם במחקר אנרגיית היתוך. זאת הודות לחזון של קובעי המדיניות וכן האופטימיזם והעבודה הקשה של מאות מדענים ומהנדסים, שהיו מחויבים לפיתוח תהליך ההיתוך.

התלות של ארה"ב באספקת אנרגיה מיובאת קיבלה ביטוי דרמטי במהלך "משבר האנרגיה" של אמצע שנות השבעים, בעקבות המלחמה במזרח התיכון בשנת 1973 וחרם הנפט. ממשל ניקסון/פורד ומתכנני מדיניות האנרגיה הגיבו ביוזמה של מו"פ בתחום האנרגיה, בתקצוב נדיב, שכללה הגדלת המימון לביקוע גרעיני מתקדם ולמחקר ההיתוך. בשנת הכספים 1974, הגיע תקציב המימון של מחקר ופיתוח בתחום אנרגיית היתוך גרעינית ל-\$43.4 מיליונים. בשנת הכספים 1997 הוא גדל ל-\$316.3 מיליונים.

ה"מחלקה לאנרגיית היתוך" הצהיר: "קיבלנו את התשובה לשאלה האם ההיתוך בר-ביצוע מבחינה מדעית." פריצת הדרך בתחום ההיתוך שהושגה בפרינסטון פורסמה בעמודי החדשות הראשונים בעיתונים ברחבי העולם.

ציר בית הנבחרים צ'ארלס רנגל (הדמוקרטים, ניו-יורק), הביע דעתו: "פריצת דרך זו מחייבת אותנו להפנות שוב את מרצנו ולהזרים כספים ושימת לב למחקר ההיתוך הגרעיני שמבטיח רבות והוא חיוני ביותר." העיתונות שיבחה את ההישג, בהכירה בחשיבות המהותית של פיתוח אנרגיית היתוך לשגשוג העתידי של האנושות.

אך לא הכול התלהבו מפריצת הדרך, לאמיתו של דבר, מלחמה שפרצה במידת מה מאחורי הקלעים נגד מדיניות האנרגיה, קיבלה פומבי.

במשך ימים, מחלקת האנרגיה של ארה"ב הפעילה לחצים על מדעני פרינסטון לא "לעשות עניין" מהתוצאות. אסיפת עיתונאים שעמד לקיים הצוות של פרינסטון לצורך ההכרזה כמעט ובוטלה. כאשר התקיימה לבסוף, פקידי מחלקת האנרגיה בראשית ג'יימס רודני שלזינגר, לא חסכו מאמצים כדי להפחית מחשיבות התוצאות. כפי שדווח במאמר שהופיע ב-Christian Science Monitor, בגיליונו מיום 16 באוגוסט, "הפקידים לענייני הציבור במחלקת האנרגיה של ארה"ב... אומרים כי במחלקה נדהמים ונבוכים לנוכח מה שהם רואים כהכרזה בלתי-מורשית ומוגזמת של העבודה שנעשתה בפרינסטון." מנהל ענייני הציבור במחלקת האנרגיה, ג'ים בישופ הדגיש כי, "העבודה של פרינסטון היא הישג מדעי חשוב, אך היא כנראה לא תקצר את משך הזמן או העלות של פיתוח אנרגיית היתוך!" מזכיר האנרגיה, ג'יימס רודני שלזינגר, רתח לנוכח האופטימיזם שליווה את ההכרזה על ההיתוך בפרינסטון.

מדוע?

ממשל הנשיא ג'ימי קרטר החל בשנת 1977, שלוש שנים אחרי חרם הנפט ה"ערבי", כאשר הוכח שלא ה"ערבים" יצרו את המניפולציה

הזו, אלא קרטל הנפט הבינלאומי. קווי הבנזין ועליית מחירי האנרגיה פי ארבע, אירעו כתוצאה ממחסור מתוכנן זה. כך נוצרה ההזדמנות ליישום מדיניות אנרגיה וכלכלה של "שימור", אפס צמיחה. מדיניות זו קודמה על ידי "מועדון רומא" התנועה למען ה"סביבה" שתמכה במדיניות אנטי-גרעינית, על ידי קרן פורד וצוותי חשיבה אחרים, מאז שלהי שנות השישים.

לראשונה בתולדות ארה"ב, הרעיון של "פחות זה יותר", ש"קטן זה יפה", ש"יש גבול לצמיחה" ושמשאבי העולם אוזלים, הפך למדיניות של הממשלה הפדרלית. האפשרות שיתכן להפיק אנרגיית היתוך בלתי מוגבלת למעשה הפך ללעג את מדיניות ה"שימור" וקווי מדיניות אחרים מסוג של "לכבות את הווסת" ו"הידוק החגורה" שקודמו על ידי הבית הלבן בתקופת קרטר.

הארגון הציבורי החשוב והבולט ביותר, שהגן על רעיון הפיתוח, בשיא הקיטור, של אנרגיית ההיתוך, בזמן בו הושגה פריצת הדרך של אוניברסיטת פרינסטון היה ה-Fusion Energy Foundation ("הקרן לאנרגיית היתוך"), מניו יורק. הקרן פרסמה סקירה על תוצאות המחקר בפרינסטון באוקטובר 1978 ובה הצעת תקציב לפיתוח תהליך היתוך, שהוגשה כתזכיר לקונגרס. במזכר הוצע להאיץ את תוכנית מחקר ההיתוך בתחום כליאה מגנטית ואינרטי, להגביר את שיתוף הפעולה הבינלאומי ולהנהיג תקצוב ברמה של תוכנית החלל "אפולו" משנות השישים. ההצעה כללה מימון של מכונות ניסוי לדור הבא על פני קשת רחבה של טוקאמאקים, בתוספת ניסויים במראות מגנטיות, וכן התקני scyllac, theta, pinch, סטלרטורים ותצורות מגנטיות, גיאומטריות אחרות. לייזר מתקדם, קרן יונים, קרן אלקטרונית ומתקני ניסוי אחרים לכליאה אינרטי, הנדסה בסיסית, חומרים, רכיבים ומתקני ניסוי נכללו אף הם בתוכנית המשודרגת והמואצת.

באותה עת והודות לכך ש"הקרן לאנרגיית היתוך" הפיצה בשורתה בציבור הרחב, באמצעות כתב העת שלה, Fusion, שמנה קהל קוראים גדול, התגברה המודעות בקונגרס לכך שמסלול הטכנולוגיה הגבוהה הוא הדרך האמיתית לעצמאות בתחום האנרגיה. הבית הלבן של קרטר

בלתי מוגבלים איום על האינטרסים המשוריינים שלהם, התגייסו כדי לשכך את ההתלהבות.

ביוני 1978, קבוצה שתוארה כ"מועדון הגרעין של וול סטריט" עזרה להרכיב את הגוף שנקרא Society To Advance Fusion Energy (SAFE), "החברה לקידום אנרגיית היתוך", שנוסדה תחילה על ידי "קרן סלנר". מטרתה המוצהרת היתה לקדם מחקר בתחום אנרגיית היתוך. אולם, מתקפותיה על אנרגיה גרעינית, אותה כינתה כ"לא בטוחה" ("unSAFE") ועל תוכנית הטוקאמאק, שהיתה אז תוכנית מובילה, גילו כי מטרתה אינה לקדם תמיכה באנרגיית היתוך. למעשה, כפי שהסבירו לשאלות שהוצגו להם, מטרתם היחידה היתה להטיל דופי בהשפעת ה"קרן לאנרגיית היתוך" ולהטיח בה ביקורת.

חדור מרץ בהשפעת התוצאות של פרינסטון וההבטחה לפריצות דרך גורליות שעוד יבואו בעתיד בתחום ההיתוך, ציר בית הנבחרים, מייק מקקורמק, דימוקרט שנבחר לקונגרס ב-1970 ממדינת וושינגטון, אחרי קריירה מדעית בת עשרים שנים, הגיש הצעת חוק בינואר 1980, להאצת הפיתוח של אנרגיית היתוך. צוות יעוץ מדעי שזומן על ידי הציר מקקורמק שנה לפני כן, הסכים להערכתו כי המחסום העיקרי שעומד בפני הפיתוח המסחרי של היתוך הוא היעדר מחויבות לאומית ורמת מימון בלתי מספקת. עד מהרה קמו לחוק 140 תומכים.

שבוע לפני שהגיש את הצעת החוק שלו נאם הציר מקקורמק בוועידה בעיר וושינגטון בנושא בטיחות גרעינית. שם נחשפה מדיניות ה"אנרגיה" האנטי-גרעינית של ממשל קרטרי במערומיה. תת-מזכיר מחלקת האנרגיה, ג'ון דויטש, שמונה על ידי שלזינגר הצהיר כי הכוח הגרעיני הוא מקור אנרגיה בגדר ה"מוצא האחרון". הוא המשיך ואמר כי מחלקת האנרגיה רוצה "לצמצם את השימוש באנרגיה גרעינית באמצעות שימור והשימוש בפחם".

הציר מקקורמק נאם אף הוא בוועידה, באומרו, "עלינו לתקוף את נושא האנרגיה הגרעינית", חבר הקונגרס המשיך ואמר: "הטענה כי הכוח הגרעיני הוא 'המוצא האחרון' מעולם לא היתה מציאותית וכעת היא בלתי אחראית. ארה"ב

"חייבת להגיע לאנרגיה גרעינית של 500 ג'יגה וואט בשנת 2000 וזו אינה משימה שאפתנית מדי." זאת כדי להבטיח צמיחה כלכלית ועלייה ברמת החיים. אנרגיה גרעינית ופחם יהיו מקורות האנרגיה ה"מגשרים" אל העתיד. בהזדמנות זו הכריז כי הוא יציג חקיקה שלפיה "מדיניות ממשלת ארה"ב תהיה להפעיל את מתקן הכוח הגרעיני הראשון שייצר חשמל לפני שנת 2000." מקקורמק אמר, "עלינו לצעוד לשלב ההנדסה בתחום ההיתוך, אסור לנו להמתין שמישהו אחר יעשה זאת."

הציר מקקורמק התייחס להחלטה להמשיך בתוכנית ההיתוך בסגנון "תוכנית אפולו", כפי שהוא מבקש לקדם בהצעת החוק שלו וכינה אותה: "אירוע האנרגיה היחיד והחשוב ביותר בתולדות האנושות." הוא הסביר כי, "כאשר נפתח את ההיתוך, נהיה במצב שבו נפיק מספיק אנרגיה לכול הזמן, לכל האנושות. זה אינו משל, זו עובדה." בראיון שערכתי אתו אחרי הצגת הצעת החוק, הציר מקקורמק גם הוסיף ואמר כי ההיתוך שאותו צריך לפתח "עבור כל האנושות" עשוי להיות "הגורם המרתיע החשוב ביותר כנגד מלחמות בכל ההיסטוריה."

החוק אישר בניית מתקן ניסויים להנדסת היתוך בשנת 1987. הכור הניסויי הראשון יפותח בשנת 2000, ייצר כוח נקי ויניח את הבסיס לפיתוח המסחרי. ההערכה שהובאה בהצעת החוק היתה כי לצורך התוכנית תידרש הוצאה של \$20 מיליארד במשך עשרים השנים מ-1980 עד לסיום המאה; במונחים דולריים לשנת 1980, מדובר בהוצאה נמוכה בהרבה מזו שהוציאה ארה"ב כדי להנחית אדם על הירח. המימון כלל הרחבה של תוכניות החינוך המדעי במדינה ושדרוגן.

ה"קרן לאנרגיית היתוך" גייסה עשרות אלפי תומכים שהנחו את צירי הבית הנבחרים, המייצגים אותם, בווישינגטון לתמוך בהצעת החוק של מקקורמק. הצהרות תמיכה התקבלו ממנהיגי פועלים, כמרים, פעילי זכויות אדם, מחוקקים של המדינה, ונושאי משרות נבחרים אחרים, מנהיגים מהתעשייה וכן קהילת המחקר בתחום ההיתוך.

ב-27 באוגוסט, קיבל בית הנבחרים את הצעת חוק ההיתוך ברוב של 365:7. זמן קצר

עצומים כדי לבצע את תוכנית הפיתוח לעשרים שנים, הדרושה כדי להפוך את ההיתוך למציאות."

גם כאשר התנהלו דיונים על הצעת חוק ההיתוך של מקקורמק, צירי קונגרס "שמרנים" הגיבו לגירעון בתקציב הפדרלי, שנוצר בגלל המדיניות הכלכלית הכושלת של ממשל קרטר, בדרך של ניסיון להפחית את ההוצאה הפדרלית למו"פ בתחום האנרגיה. רק התערבות באולם בית הנבחרים של הציר דון פוקוואה (דימוקרט מפלורידה), יו"ר וועדת המדע והטכנולוגיה, הביאה לביטול הצעה לקצץ בתקציב שנת הכספים 1981. קיצוץ זה היה גורם לעיכוב בבניית טוקאמק היתוך ניסיוני מתקדם יותר, (TFTR), של פרינסטון, למשך שנה לפחות.

הכתובת היתה על הקיר. לא עבר זמן והתוכנית שהפכה לחוק, להציג אנרגיית היתוך ברת-קיימא מבחינה מסחרית בסוף המאה, "הורדה מהפסים". בממשל הנכנס של רייגן,

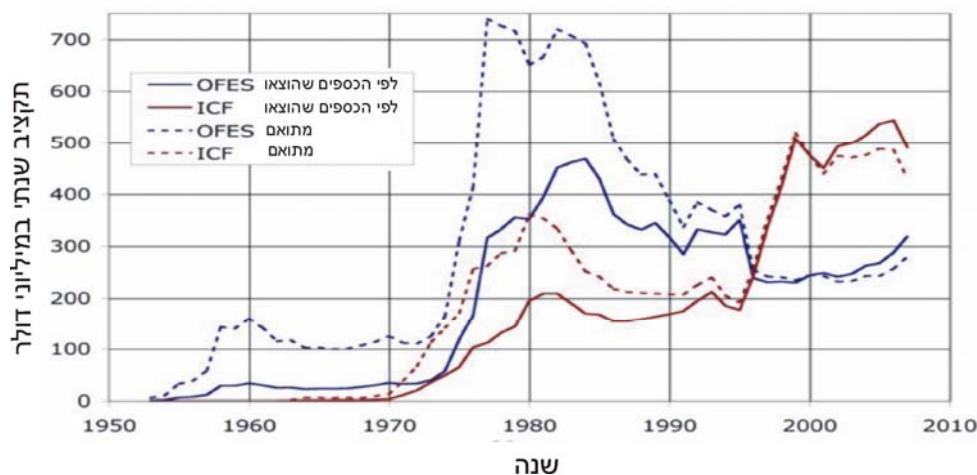
ב-27 באוגוסט, קיבל בית הנבחרים את הצעת חוק ההיתוך ברוב של 365:7. זמן קצר לאחר מכן, קיבל הסנט הצעת חוק מקבילה בהצבעה קולית. הנשיא קרטר חתם על הצעת החוק והיא הפכה לחוק ב-7 באוקטובר. כך נסללה הדרך לאנרגיית היתוך מסחרית.

אולם, חודש לאחר מכן, איבד הנשיא קרטר מכוחו, מכיוון שרונאלד רייגן זכה בבחירות לנשיאות בשנת 1980. המדענים הזהירו כי ללא קשר עם מדיניות הממשל הבא בנושא ההיתוך, כל ממשל חדש מבקש לבחון שוב את הנושא והדבר רק יעכב את ההתקדמות. גרועה יותר היתה העובדה כי הנשיא קרטר הודה בהפסד בבחירות עוד לפני שהקלפיות נסגרו בחוף המערבי. הדמוקרטים במדינות מפתח כגון, וושינגטון אפילו לא טרחו ללכת לקלפי ולבחור. הציר מקקורמק והשותף העיקרי שלו, המושל דיקסי לי ריי, הפסידו את זכותם להיבחר שנית.

מתוך ידיעה כי עמידה בהתחייבויות של חוק ההיתוך תדרוש מחויבות של הקונגרס למשך דורות רבים, פרסמה תת-הוועדה למחקר וייצור אנרגיה של וועדת בית הנבחרים למדע וטכנולוגיה, שבראשה עמד הציר מקקורמק, דו"ח, בדצמבר 1980 ובו סקירה של תוכנית אנרגיית ההיתוך, עבור הממשל הנכנס של רייגן. במבוא לדו"ח נאמר כי "החתימה על הצעת החוק והפיכה לחוק סימנה את סיום

ההתחלה" של "מה שעשוי להיחשב לדרך ההיסטורית החשובה ביותר בה בחרה האנושות אי פעם." אולם, הדו"ח מזהיר כי "הקרבות הקשים ביותר עדיין לפנינו. ידרשו היתרים מתמשכים מדי שנה ובעקבות זאת הקצבות כספים." הדו"ח סיכם במלים: "האומה תידרש להפגין דריכות ונחישות

תקציב ההיתוך של ארה"ב עבור OFES ו-ICF



תקציב אנרגיית ההיתוך המגנטי כיום, במונחים ריאליים של דולרים מתואמים לאינפלציה, הוא כשליש בערך ממה שהיה בשלהי שנות השבעים. בעקומה נכללים נתונים מתוכנית הכליאה המגנטית של "המשרד למדע אנרגיית היתוך" (OFES) ו"כליאת היתוך אינרטי" (ICF), הממומנת במסגרת תוכניות הגנה.

מחלקת האנרגיה של ארה"ב; הסוכנות למידע אנרגיה, ארה"ב

ההתנגדות להיתוך לא הגיעה מצד ה"שמאל" הרדיקלי שצייד באפס צמיחה, אלא מנשיא בעל כוונות טובות כביכול, שנשבה בתפיסה השמרנית של "זכות" השוק החופשי.

מדיניות של בינוניות

תקציב הבית הלבן של רייגן לשנת הכספים 1982, שנשלח לגבעת הקפיטול בתחילת 1981, הפך באחת על פיו את האישור שהושג בבית הנבחרים לתוכנית פיתוח הנדסת ההיתוך, ברוח החוק של מקקורמק. בתדרוך ב-26 בפברואר, השיב מזכיר האנרגיה לשאלת כתב ואמר כי "אנחנו נממן את ההיתוך", אך הוסיף, "אבל לא נזרוק כספים על העניין באופן בלתי-אחראי". באותו תדרוך אמר מזכיר האוצר, דון רייגן, כי היעד הכלכלי של ממשל רייגן הוא "להחזיר את הכלכלה לעם". קיצוצי מיסים ודה-רגולציה עלו על סדר היום ולא השקעות פדרליות במו"פ.

ב-6 במרץ פרסמה ה"קרן לאנרגיית ההיתוך" הודעה לעיתונות ובה הזהירה כי הקיצוצים שמציע ממשל רייגן במימון של תוכניות החלל של נאס"א ובמחקר ההיתוך יביאו ליישום מדיניות הדה-תיעוש² של עידן קרטר. אותה מדיניות שהנשיא רייגן נבחר במטרה לשנותה. עשרה ימים לאחר מכן, שלחה הקרן מכתב לכל התומכים בהצעת חוק ההיתוך של הציר מקקורמק והזהירה אותם מפני מכת המחץ שהבית הלבן מציע להנחית על תוכנית פיתוח ההיתוך וטענה כי זו הפרה של החוק החל במדינה.

ב-31 ביולי, שישה חודשים אחרי שהנשיא רייגן החל לכהן, הצירה מרילין בוקארד, דמוקרטית מטנסי, שהחליפה את מייק מקקורמק בתפקיד יו"ר תת-הוועדה למחקר וייצור אנרגיה, כתבה מכתב נוקב למזכיר האנרגיה אדוארדס. מחלקת האנרגיה הציעה כי במקום לבקש כספים כדי לייסד את המרכז להנדסת ההיתוך, שינוהל על התעשייה בתחום, כפי שאושר על ידי חוק ההיתוך, יש לבקש כספים עבור "פרויקט ההכנות להיתכנות של הנדסת ההיתוך". זאת כדרך לעכב את היום בו יתמודדו עם אתגרי הנדסת ההיתוך. הצירה בוקארד הגיבה לדברים אלו באמרה כי היא "תמהה וחרדה" וביקשה ל"הביע בפניכם אי שביעות רצוני במלוא מובן המלה."

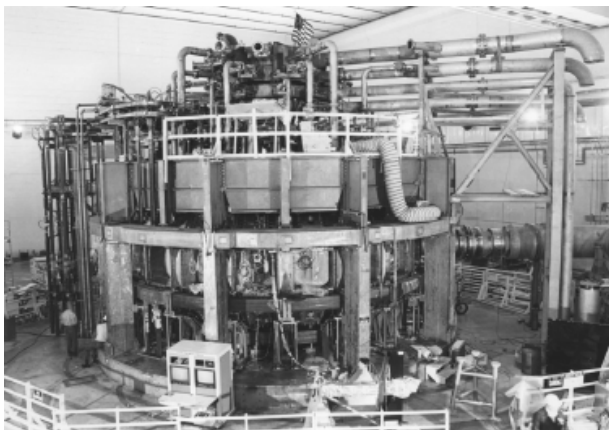
² Deindustrialization – ירידה מהותית בחלק התפוקה הלאומית הנובע מהמגזר התעשייתי היצרני.

בעקבות הפרת ההבטחה בתחום ההיתוך התפטר אדווין קינטר מתפקידו במחלקת האנרגיה, בנובמבר 1981, לאחר שכיהן מאז אפריל 1976 בתפקיד מנהל המשרד לאנרגיית ההיתוך. קינטר הגיע למחלקה אחרי 22 שנות שירות בצי של ארה"ב, שמתוכן 14 הוקדשו ל"תוכנית הכורים של הצי", בכפוף לאדמירל היימן ריקובר. הוא הצהיר בפומבי כי התפטרותו באה על רקע הקיצוצים בתקציב ההיתוך שהצביעו על שינוי במדיניות ודחיית התוכנית שהקונגרס עיגן בחוק, או ביטולה.

קינטר פרסם מאמר בגיליון מאי/יוני 1992 של כתב העת MIT's Technology Review. הוא כתב כי הבקשה הראשונה ממשרד ההיתוך שבמחלקת האנרגיה היתה אמנם \$596 מיליון לשנת 1982-3 ולדעתו, הסכום של \$557 מיליון שהוצע היה מספיק, אם כי בקושי, למילוי ההתחייבויות של חוק ההיתוך. אולם, כאשר המשרד לניהול ותקציבים, בראשות דייוויד סטוקמן, הציג את תקציב 1983 לקונגרס, ובו סכום כולל של \$444 מיליון לצורכי ההיתוך, במלים אחרות, 25% פחות מתקציב 1977, במונחים ריאליים, הקיץ הקץ על חוק ההיתוך. מדיניות הבית הלבן היתה שהממשלה לא צריכה לממן פרויקטים של הדגמה, אלא להשאיר את המימון לתעשייה הפרטית.

חודש לאחר מכן, יועץ המדע של הנשיא רייגן, ג'ורג' קיוורס אמר לוועדת המדע והטכנולוגיה של בית הנבחרים כי ארה"ב "אינה יכולה לצפות להתבלט בכל התחומים המדעים וזה גם אינו רצוי בהכרח". בהיסטוריה של המדע בארה"ב עד לנקודה זו, מעולם לא סומנה הבינוניות כיעד. קיוורס הצהיר כי "מדיניות בתחום המדע, המגובשת מבלי להתחשב בקפדנות הכספית, אינה רלבנטית". לדעתו, המתניות הכלכלית מנמיכה "גבולות" והמו"פ צריך להתחרות בתוכניות אחרות, על תקציבים פדרליים. חברים בוועדה ציינו בתבונה כי ההיפך הוא הנכון: ההשקעות במדע ובטכנולוגיה הן המנוע לצמיחה כלכלית; הן אינן מהוות "מעמסה" על הכלכלה. באותו דיון, קיוורס הגן על הצעתו שנאס"א תפסיק את תוכנית מחקר כוכבי הלכת, מכיוון ש"איננו יכולים להרשות זאת לעצמנו."

המשמשת לחימום הפלסמה, אך המדענים דיווחו כי הם "קרובים מאוד" לכך. באותה שנה עברו משימוש בדלק דיאטורים טהור לדיאטורים-טריטיום, בדומה למה שמשתמשים בכור אנרגיה. שנתיים לאחר מכן, נרשם שיא של טמפרטורה – 510 מיליון מעלות.



בשלהי שנות השמונים ובתחילת שנות התשעים, הטוקאמאק (TFTR) של פרינסטון רשם תוצאות שיא של טמפרטורת פלסמה ואנרגיית היתוך שהופקה. המכונה הושבתה בשנת 1995, לפני השלמת כל הניסויים שתוכננו, בגלל קיצוצים בתקציב.

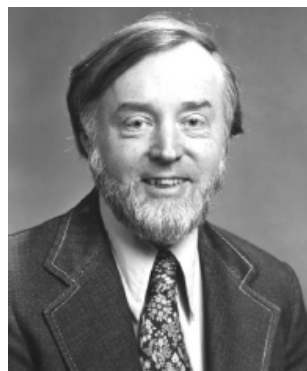
ה"מעבדה לפיזיקת הפלסמה של פרינסטון".

לאור התוצאות המדהימות הללו, מן הראוי היה שלא להסס ולאשר את מתקן הניסוי של השלב הבא בתוכנית הטוקאמאק, כהמשך ל-TFTR. פרינסטון הציעה "טוקאמאק מסוג Compact Ignition (CIT)", כדי ליצר אנרגיית היתוך מתמשכת. אולם באוקטובר 1989, נציג של מחלקת האנרגיה בממשל של בוש האב, רוברט האנטר, הודיע בדיון בקונגרס כי הממשל הציע לקצץ \$50 מיליון נוספים מתקציב ההיתוך, מכיוון שה-CIT הוא בעל סיכון גדול מדי וכנראה שגם לא יצליח! ד"ר סטפן דין השיב לו תשובה ראויה כי הסיבה שמנהלים ניסויים היא כדי ללמוד. "עלינו ליטול סיכונים מסוימים אם בכוונתנו לפתח מכונה שמייצרת חשמל. לו קולומבוס היה מחכה לגילוי הראדר לפני שיצא לדרך, לא היינו כאן היום." בו-זמנית, ב"מעבדה לפיזיקת הפלסמה של פרינסטון" פוטר 120 עובדים שעבדו בחוזים ואמורים היו להתחיל לעבוד על ה-CIT, לאחר שהתגברו החששות האם יבנה אי פעם.

אך למרות העיכובים במימון בשנות השמונים, ההשקעות במחקר ההיתוך שנעשו בעשור הקודם המשיכו לשאת פרי.

הטוקאמאק (כור היתוך תרמו-גרעיני ניסיוני) (TFTR) של פרינסטון, שהחל לפעול בשנת 1975, ייצר את הפלסמה הראשונה שלו, יום לפני חג המולד של 1982. במאי 1983 שיגר הנשיא רייגן ברכות לצוות ההיתוך של פרינסטון, בהתייחסו להבטחה של אנרגיית היתוך בלתי-מוגבלת. דברי הנשיא רייגן הוצגו בטקס החנוכה הרשמי של הטוקאמאק ב-5 במאי. ה-TFTR אכן עתיד היה להוכיח עצמו כמתקן מחקר חזק ובעל תפוקה גבוהה.

אולם, בסתיו 1983, בדיון על ההיתוך, הזהיר ד"ר דין את הקונגרס כי "ארה"ב כבר אינה



ד"ר סטפן דין, מייסד Fusion Power Associates³

(התמונה באדיבות ד"ר דין)

המנהיגה הבלתי-מעוררת של העולם בפיתוח תהליך ההיתוך. תוכניות ההיתוך בארה"ב, ברה"מ, אירופה ויפן הגיעו לרמה שווה של הישגים, מתקנים ותנופה. הוא הדגיש כי שיעור ההתקדמות הדרמטית הנוכחית "מבוסס על

התחייבויות להשקעות הון שהתקבלו בשנות השבעים. "אך כעת, ארה"ב אינה מתחייבת להתקדם.

ביולי 1986 הגיע ה-TFTR לשיא טמפרטורת פלסמה של 200 מיליון מעלות. למרות הקיצוצים בתקציב ושנים של עיכובים, נערכו ניסויים בשנת 1993 שהביאו לשיא אנרגיית היתוך של 10.7 מגה וואט, שיא עולמי ופי 90 מיליון יותר מכפי שניתן היה לייצר בשנת 1974, כאשר הוצע פרויקט ה-TFTR. אולם נקודת ה"איזון" של האנרגיה לא הושגה, כלומר מצב שבו כמות האנרגיה שהופקה מההיתוך היא הכמות

³ קרן מחקר וחינוך, ללא מטרות רווח, המספקת מידע על מצב הפיתוח של תהליך ההיתוך ויישומים אחרים של מדע הפלסמה ומחקר ההיתוך.

לפיתוח אנרגיית היתוך, "שתתמוך הן בהשתתפות ארה"ב ב-ITER והן בבניית ה-TPX בפרינסטון.

ההתנצחות בקונגרס בשאלת תקציב תוכנית ההיתוך הביאה להחלטה המפתיעה להפסיק את פעולת ה-TFTR ב-1995, אחרי שהגיע לשיא טמפרטורת פלסמה של 510 מיליון מעלות, על אף שהמדענים עדיין תכננו ניסויים מתקדמים יותר.

בשנת התשעים היינו עדים למתקפות על כל הפרויקטים הגדולים בתחום המדע והמחקר. בשנת 1988 אישר הקונגרס לבנות בטקסס את ה-Superconducting Super Collider, שהיה אמור להיות מאיץ החלקיקים החזק ביותר. בנוסף ליישומי המחקר שלו בפיזיקה בסיסית, ההתקדמות בתחום הטכנולוגיה של מוליכות על מגנטית היתה תורמת רבות לחדשנות בתחום הרפואה, אחסון אנרגיה והיתוך. בשנת 1993 לאחר מנהרה באורך 24 ק"מ בקירוב, ביטל הקונגרס את הפרויקט.

בתקופת הכהונה הראשונה של ממשל רייגן תקציב המחקר של ההיתוך המגנטי היה בתחום של \$450 מיליון. כאשר הנשיא רייגן עזב את תפקידו, הגיע התקציב ל-\$331 מיליון. כאשר ג'ורג' בוש האב סיים את כהונתו, הגיע תקציב ההיתוך המגנטי ל-\$322 מיליון. תקציב זה הידרדר בשמונה שנות כהונתו של קלינטון בבית הלבן. האופוזיציה בקונגרס גם לא שאבה סיוע מהעובדה כי סגן הנשיא אל גור מונה לאחראי על פיתוח מדיניות האנרגיה. גור השקיע מיליארדי דולרים בטכנולוגיות בזבזניות, המכונות "ירקות" ו"נקיות".

במהלך שנות התשעים, צנח תקציב ההיתוך המגנטי לתחום של \$200 מיליון +. אמנם היו עליות ומורדות, אך בהסתמך על נתונים מתואמים לאינפלציה של הסוכנות למידע אנרגיה, ארה"ב, תקציב ההיתוך בשיעור \$286 מיליון בשנת 2008, הוא שליש מתקציב 1977. מדוע להתפלא, אפוא, שארה"ב לא הגיעה לפריצת דרך חדשה בתחום ההיתוך?

שאר העולם צועד קדימה

בשלהי שנות השמונים ובתחילת שנות התשעים, ה-TFTR של פרינסטון הגיע אמנם

תוכנית הטוקאמאק לא היתה היחידה שסבלה מקיצוצים, כאשר האומה נסוגה ממחקר ההיתוך המגנטי. בשנים 1973 עד 1984 ה"אלמו באמפי טורוס" (Elmo Bumpy Torus) של המעבדה הלאומית באוק רידג' הגיע לתוצאות מבטיחות, כתפיסת היתוך מגנטי המשמשת חלופה לטוקאמאק. בשנת 1981, נולד התכנון הראשוני לתחנת כוח של 1200 מגה וואט. נבחרה המכונה של השלב הבא לצורך שדרוג להוכחת העיקרון. המכונה לא נבנתה מעולם.

לא יאומן – באותו יום שבו הכור הניסיוני Mirror Fusion (שימוש במראה מגנטית) של מעבדת לורנס ליברמול אמור היתה להתחיל לפעול, ב-1986, הוא בוטל. המתקן שהושלם לא הופעל מעולם ופורק.

גורל תוכנית ההיתוך לא שפר גם בימי ממשל קלינטון, במיוחד אחרי שה"מהפיכה השמרנית" של ניוט גינגריץ' השתלטה על הקונגרס ב-1994.

בדצמבר 1993, מזכירת האנרגיה, הייזל אולירי שלחה ברכות ל"מעבדה לפיזיקת הפלסמה של פרינסטון" על ייצור יותר משלושה מיליון וואט של אנרגיית היתוך – שיא עולמי. "זהו יום גדול למדע", אמרה המזכירה. "שיא עולמי זה הוא צעד גדול בפיתוח אנרגיית היתוך. הוא מבליט את ההתקדמות האדירה שהושגה בתחום". היא הוסיפה ואמרה: "זהו ההישג החשוב ביותר באנרגיית היתוך בשני העשורים האחרונים." מדעני פרינסטון הציעו לתכנן את ה-Tokamak Physics Experiment (TPX) כדי שיחליף את ה-TFTR כשיושלמו הניסויים בזה האחרון. מכונה זו מסוג long-pulse (פעימה ארוכה במיוחד) תוכל להשתמש ברבים מהאמצעים הקיימים של ה-TFTR ותפתח את הבסיס לטוקאמאק בעל פעולה מתמשכת.

על אף שאולירי ופקידים אחרים בממשל של ארה"ב המשיכו לתמוך במאמצי ההיתוך, ההתנגדות מהקונגרס עיכבה את הצעדים הבאים בתחום זה, מבחינת ההשתתפות ב-ITER ובתוכנית הניסוי המקומית. הנשיא עצמו, במכתב מתאריך 13 ביולי 1994 שהופנה למושל ניו ג'רסי, כריסטין טוד ויטמן, תמך ב"תוכנית מאוזנת מאוד

את מתקני הכוח הגרעיני של ברה"מ. הוא קרא שוב להקים פרויקט היתוך בינלאומי אותו כינה INTOR.

בסופו של דבר עלה נושא ההיתוך על סדר היום של הדיפלומטיה הבינלאומית. אחרי וועידת הפסגה בין נשיא רייגן ומנהיג ברה"מ מיכאל גורבאצ'וב, הם יצאו בהצהרה משותפת לשתי המדינות ובה נאמר כי הם "הדגישו את החשיבות הפוטנציאלית של העבודה המכוונת לניצול היתוך תרמו-גרעיני מבוקר למטרות שלום, ובהקשר זה, המליצו על הפיתוח הרחב ביותר האפשרי של שיתוף פעולה בינלאומי, לשם השגת מקור אנרגיה זה, בלתי מתכלה במהותו, לטובת האנושות." אירופה ויפן הוזמנו להצטרף לפרויקט החדש, ITER, ראשי תיבות באנגלית של International Thermonuclear Experimental Reactor (כור ניסיוני תרמו גרעיני, בינלאומי). גם קנדה הצטרפה.

מלאכת תכנון הכור בוצעה בשנות התשעים, כאשר מדענים מיותר מתריסר מדינות תרמו למאמץ זה. מדובר ביוזמה מאוד שאפתנית. הטוקאמאק מתוכנן לייצר 500 מגה וואט כוח היתוך למשך מאות שניות, צעד חשוב לקראת יצירת אנרגיית ערך קבוע שתידרש לתחנת הכוח המסחרית. עם התקדמות עבודת התכנון של ITER, הצטרפו סין ודרום קוריאה ל-ITER בשנת 2003. הודו הצטרפה שנתיים לאחר מכן.

כפי שקורה כמעט בכל פרויקט מדעי והנדסי, בינלאומי, תכנון הכור נמשך זמן רב יותר מכפי שתוכנן לראשונה. ב-1998, נדרשו הרחבות לעבודה. אירופה, רוסיה ויפן חתמו על הסכם הארכה לשלוש שנים. מזכיר האנרגיה, ביל ריצ'ארדסון ניסה לעקוף את האופוזיציה לפרויקט בקונגרס. ב-22 בספטמבר הוא הכריז כי חתם על הסכם חד-צדדי המאריך את תמיכת ארה"ב ב-ITER. אולם הקונגרס בהנהגת הרפובליקנים, נחוש לקצץ בהוצאה הפדרלית, ללא קשר עם התוצאות, ביטל את הסכום הפעוט של \$12 מיליון לשנת הכספים 1999, שיועד לעבודה של ארה"ב בפרויקט ITER. "הפרויקט נכשל" הכריז בגאווה יו"ר וועדת המדע של בית הנבחרים, הציר הרפובליקני, ג'ימס סנסנברנר, מויסקונסין. הוא המשיך ואמר, "זה בניגוד לשכל הישר לטעון

לתוצאות מרעישות. אולם, גם האומות האחרות לא שקטו על שמריהן. בשנת 1991, אותה שנה שבה ממשלת ארה"ב ביטלה באופן רשמי את פרויקט ה-Joint European CIS בפרויקט, החל לפעול ה-JET Torus (שהיה הטוקאמאק הראשון שהשתמש בטריטיום; הטוקאמאק מדגם JT-60 של יפן עלה אף הוא על המסלול להשגת שיאים משלו.

כיום, ארה"ב אינה מחזיקה בשיאי עולם בתחום ההיתוך, השיאניות הן בעיקר אירופה ויפן, שהקציבו סכומים באופן קבוע בעשרים השנים האחרונות כדי לשדרג ניסויים ולבנות מתקנים חדשים. התקדמות נוספת הושגה בפרויקטים חדשים של היתוך, כגון בסין ובדרום קוריאה. שתי המדינות הללו מנהלות את שני הפרויקטים היחידים של ניסויים בטוקאמאקים הפועלים בטכנולוגיה מתקדמת, המבוססת על מוליכות-על מגנטית. אלו יידרשו לתחנות הכוח המסחריות שיפעלו בתהליך ההיתוך, בעתיד הקרוב.

במשך שנים הכירו האומות בעובדה כי מאמץ בינלאומי משותף לפתור את הבעיות ההנדסיות של תהליך ההיתוך ולהתקדם להדגמה מסחרית הוא הגישה הטובה ביותר. אם בונים מקור אנרגיה שיהיה זמין לכלל המין האנושי, מדוע לא לגייס את כלל המוחות והכישרונות של כל האנושות כדי שיעבדו על הנושא.

באפריל 1978, מדען רוסי מכובד וסגן נשיא האקדמיה הסובייטית למדעים, א.פ. וליקוב, הציע באופן פרטי לפקידים בווינגטון לקיים ניסוי טוקאמאק בינלאומי. ההצעה הפכה לרשמית חודש לאחר מכן, בישיבה של "וועדת התיאום המשולבת של ארה"ב וברה"מ בנושא אנרגיית היתוך", שנערכה במוסקבה. באותה עת, אומות אחרות הגיבו באופן דומה למשבר האנרגיה העולמי. ראש ממשלת יפן, טקיאוו פוקודה, היצע תוכנית משותפת לפיתוח אנרגיית היתוך, בעלות של \$1 מיליארד, במהלך ביקור הנשיא קרטרי בשנת 1978. הצעות אלו נדחו.

שנתיים לאחר מכן, ב-10 במרץ 1980, הרצה המדען וליקוב בפני האקדמיה למדעי ההנדסה בשטוקהולם. וליקוב, שבמהלך השנים הפך ליועץ מדעי למנהיגי הממשלה הרוסית, תיאר

שארה"ב צריכה להסכים ולהמשיך להשתתף בפרויקט שהגיע למבוי סתום וממשיך לבזבז את כספי משלם המסים האמריקאי. יתר השותפות הבינלאומיות הוכו בתדהמה.

עבודת התכנון הנדסי של ITER המשיכה ללא השתתפות ארה"ב. בסיום שלב התכנון, החלו השותפות בתהליך בחירת אתר לכור. בשנת 2003 הכריז הנשיא בוש כי ארה"ב תצטרף למו"מ המתנהל על בחירת אתר ל-ITER. יתכן כי העובדה כי סין ודרום-קוריאה הפכו לשותפות בפרויקט ITER, גרמה לממשל בארה"ב לשקול שוב את נושא אנרגיית ההיתוך. ביוני 2005, נבחר מרכז המחקר הגרעיני בקאדארש, צרפת, לאתר שבו יוקם כור ה-ITER. כיום, השטח נקי ועבודת ההכנה לשלב הבא של הבנייה מתקדמת יפה.

כעת, כשפרויקט ITER מתקדם, חובה לחזור שוב לתוכנית אמריקאית נמרצת בתחום אנרגיית ההיתוך. זאת כדי שארה"ב תתרום את החלק שהיא חייבת לתת ל-ITER וכן שתהא מוכנה לנצל את ההתקדמות שהושגה בפרויקט זה.

אחד האתגרים העיקריים של הנדסת כור ההיתוך מפיק אנרגיה היא פיתוח חומרים חדשים שמסוגלים לעמוד בסביבת ההיתוך הקשה. בכנס השנתי של ה-Fusion Power Associates, שנערכה בעיר וושינגטון ב-2-3 בדצמבר, הדגישו ראשי תוכניות ההיתוך במעבדות הלאומיות, באוניברסיטאות ובתעשייה של ארה"ב כי תפיסת ההיתוך כמאמץ "מדעי" מובהק, של מחלקת האנרגיה, צריכה לפנות מקומה לדרך של פיתרון בעיות מעשיות.

בוועידת FPA, אד סינקובסקי, שעמד בראש המשרד למדעי אנרגיית ההיתוך של מחלקת האנרגיה, הצהיר כי הגיע העת שבה תהליך ההיתוך "יפרוץ את הבידוד המדעי והפוליטי שבו הוא נתון". הוא אמר כי האומה זקוקה לתוכניות "הגיונית" בתחום חקר חומרים וניסויים שיפתרו בעיות מדעיות תלויות ועומדות.

ההצהרות של מובילי תהליך ההיתוך בארה"ב באותה וועידה, בלטו בניגוד לדבריו של ד"ר ג'ונג-סו לי, ראש המכון הלאומי למחקר

ההיתוך של דרום קוריאה. המכון עורך כעת ניסויים בטוקאמאק מתקדם הפועל בטכנולוגיית מוליכות-על, KSTAR. מדענים מכל העולם שלחו חוקרים להשתתף בניסויי ה-KSTAR. ד"ר לי הסביר כי חוקרים אלו יהיו מיומנים ומנוסים בעקבות עבודתם ב-KSTAR, כאשר ITER יהיה מוכן לפעולה, בעוד כעשר שנים.

דבריו המלהיבים של ד"ר לי התייחסו לא רק להתקדמות הטכנית של קוריאה, אלא גם למחויבותה ליצור טכנולוגיה חדשה למעשה של אנרגיה. הוא הסביר כי כאשר הממשלה אישרה את תוכנית ההיתוך באמצע שנות התשעים, היא רצתה להבטיח שהמחקר לא יישאר בגדר ניסוי, אלא יוביל לכור. בידיעה כי מדובר במאמץ ארוך טווח, שיצטרך לשרוד שינויים רבים במפלגות השליטות וחמישה נשיאים שונים, התקבל בשנת 2007 ה"חוק לפיתוח וקידום אנרגיית ההיתוך". בעקבות החוק הוקמה ועדה פדרלית שתפקח על המשכיות התוכנית, והחוק מתחדש מדי חמש שנים.

כדי לממש את היעד של פיתוח מקור אנרגיה מעשי, כאמור בחוק, אמר ד"ר לי כי המכון שלו כבר בוחן אתרים שונים שם פועלים מתקנים גרעיניים קונבנציונאליים, כאתרים פוטנציאליים עבור כור ההיתוך להדגמה. בעוד הניסויים ב-ITER נמשכים, ימשך תכנון של מתקן הדגמה קוריאני בעל הספק של 700 מגה וואט. בנייתו תחל בשנת 2027. קוריאה מתכננת לבנות תחנות כוח של אנרגיית ההיתוך, בעשור הבא.

אין ספק כלל כי תוכנית ההיתוך של ארה"ב מצריכה חשיבה נוספת, שאם לא כן יישאר לה רק לרטון בעוד אומות אחרות שועטות קדימה. צירת בית הנבחרים ז'ואה לופגרן (דמוקרטית מקליפורניה) עשתה צעד אחד בדרך להתמודדות עם הסוגיה, כאשר הציגה חוק "חוק מדע הנדסת ההיתוך ותכנון אנרגיית ההיתוך", 2009, ב-10 ביולי. על פי דרישות החוק, בתוך שנה מקבלתו, תגיש מחלקת האנרגיה לקונגרס תוכנית מקיפה להגדרת תחום המו"פ הנדרש כדי ל"השיג אנרגיית ההיתוך בפועל". הצעת החוק מדגישה במיוחד תחומי הנדסה של חקר חומרים. ניתן לתהות האם עוד מחקר אחד, שיעכב את הפעולה בשנה נוספת,

הודות להיתוך תעמוד לרשותנו אנרגיה בכמות ובאיכות שלא ניתן לקבל ממקור אחר. בעזרת טכנולוגיה זו הניצבת לפתחנו נוכל לייצר חשמל וכן ליצור דלקים סינטטיים, להפיק מי שתייה, חומרים חדשים שיתקבלו מעיבוד הפלסמה, בעלות נמוכה, וכן להנהיג יישומים שעוד נגלה בעתיד. המרכיב העיקרי להצלחה הוא הרצון לעשות זאת.

בשנות השבעים, אד קינטר, שניהל את המשרד לנושא ההיתוך כתב על דלתו את הפסוק המקראי: "באין חזון, יפרע עם." אין נכון מזה לזמננו.

בכלל דרוש. אולם, התנופה של הצעת החוק מציבה שוב, חד וחלק, את שאלת ההיתוך בפני הקונגרס.



ד"ר מיון קון (Myeun Kwon), מנהל מחקר KSTAR, משמאל, המחברת מרשה פרימן במרכז וויליאם ג'ונס, מימין, הסביר כי אחת ממטרות המתקן היא להכשיר מדענים קוריאנים, בעוד קוריאה חותרת לעמדה מובילה בפיתוח כורי אנרגיית היתוך.

על המחברת:

מרשה פרימן נולדה בעיר ניו יורק ולמדה ב"קווינס קולג'" ובאוניברסיטת קולומביה. היא כתבה מאות מאמרים על תוכנית החלל של ארה"ב ומאמריה הופיעו בפרסומים הבאים: Fusion Magazine, Space World, Astronautica, Acta Space, Science Books & Films, The Encyclopedia of the Midwest, Governance Journal, of the Midwest. נוספים.



בשנת 1993 כתבה את הספר המפורסם "How We Got to the Moon: The Story of the German Space Pioneers" (בתרגום חופשי: "כיצד הגענו לחלל: סיפורם של החלוצים הגרמנים בתחום החלל"). בשנת 2000 כתבה את הספר "Challenges of Human Space Exploration" (בתרגום חופשי: אתגרים של חקר החלל האנושי). בשנת 2009 חיברה את הספר: "Krafft Ehrlicke's⁴ Extraterrestrial Imperative".

מרשה העידה בדיונים של הקונגרס בארה"ב בנושאי תקציבים ומדיניות בתחום המדע, אנרגיה, חלל ותחבורה.

מרשה מוזמנת להרצות בוועידות וימי עיון בנושאי אנרגיה, חלל וטכנולוגיה; היא מרצה אורחת באוניברסיטת ניו יורק; מרצה אורחת ב"מכון האמריקאי לאווירונאוטיקה ואסטרונאוטיקה" (AIAA) ונאס"א ומרצה ב-International Astronautical Federation Congress. היא מתגוררת בוירג'יניה עם בעלה.

הפרויקטים הגדולים ביותר ובעלי החזון בתחום המדע וההנדסה בארה"ב מדשדשים במקום. התוכנית למחקר מאויש של הירח ומאדים, שהוכרזה רשמית בתקופת הכהונה הקודמת של בוש, סובלת מתקצוב כה נמוך עד כי החלו פיטורים בתוכנית החלל. אם הקונגרס שאישר את התוכנית אינו רוצה להגיע למצב שבו תאבד ארה"ב את מעמדה כמעצמה מובילה בחקר בחלל, עליו לעשות יותר מאשר להתלונן. חייבים להזרים משאבים כדי לשמור על המנהיגות בעולם.

כל הטיעונים שנשמעו בקול תרועה רמה כנגד תוכנית ההיתוך הם נטולי בסיס. העובדה שהתהליך טרם התממש ועדיין נמצא במרחק שנים מאיתנו, היא תוצאה ישירה של מדיניות כושלת בתחום האנרגיה והכלכלה וחוסר רצון לספק את המשאבים לפיתרון הבעיות התלויות ועומדות. בנייתו סופי, אין זה משנה כמה עולה לפתח אנרגיית היתוך מסחרית, מכיוון שאין מנוס – חייבים לעשות זאת. אין זה משנה כמה יעלה כור ההדגמה המסחרי, הראשון, או האם יהיה "תחרותי" לפחם, קולטים לאנרגיית שמש, או טחנות רוח. אנרגיית ההיתוך תהיה זמינה לכל אומות העולם. לראשונה בהיסטוריה, המשאבים הטבעיים והסופיים של מדינה לא יהוו גורם מגביל בהתפתחותה הכלכלית.

⁴ מהנדס גרמני שקידם את רעיון המסעות בחלל

כאשר שאלנו לראשונה את ד"ר ג'ארלד שרדר מה דעתו על אנרגיית היתוך כפיתרון אנרגיה הוא אמר: "לאחר שחזיתי בהתפוצצות של 6 אטומים בעבודתי בוועדה לאנרגיה אטומית של ארה"ב, אני יכול להעיד על העוצמה של: $E=MC^2$ ". "אנרגיית היתוך היא הפיתרון הריאלי היחיד."



ג'ארלד ל. שרדר הוא בעל תואר ראשון ושני במדעים מ"המכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס" (MIT) ובעל תואר דוקטור בשני תחומים, מדעי כדור הארץ ופיזיקה. הוא עבד בוועדה לאנרגיה אטומית של ארה"ב, בתחום המורכב של מדידות נתוני אנרגיה גרעינית. לאחר מכן עבר להתגורר בישראל, הצטרף למכון ויצמן ולאחר מכן לאוניברסיטה העברית בירושלים. עבודתו זכתה לדיווחים ב-Time, Newsweek ו-Scientific American. במשך שנה הוא ניצב ברשימת רבי המכר באתר אמזון וכתב את הספרים: *Genesis and the Big Bang* (בתרגום חופשי, "הבריאה והמפץ הגדול"), *The Science of God* (בתרגום חופשי: "מדע האל"), *The Hidden Face of God* (בתרגום חופשי: "פניו הסמויות של האל") ולאחרונה *God according to God* (בתרגום חופשי: "האל על פי האל").

ד"ר שרדר מתגורר בירושלים, ישראל, עם אשתו ברברה. הוא מרצה בעל שם בכל העולם. לפרטים על ד"ר שרדר ועבודתו, עיינו באתר האינטרנט: <http://www.geraldschroeder.com>.

ד"ר שרדר הרצה בנובמבר 2009, בבלטימור מרילנד בנושא קוסמולוגיה, המפץ הגדול ויצירת היקום החומרי מאנרגיה.
