



כנס הרצליה ה-14

עתיד המזרח התיכון והשפעת הטלטלה האזורית על תפיסת הביטחון של ישראל

אנרגיה גרעינית לשימוש אזרחי: השלכות על המו"פ הישראלי

נייר מסכם לדיון שהתקיים במסגרת כנס הרצליה ה-14

הקדמה

הקמת כור גרעיני לשימושים אזרחיים בישראל נידונה שוב ושוב בעשרים השנים האחרונות. בפעם האחרונה, בשנת 2010 הדיון אף הפך לממשי ורציני כשהחל תכנון ראשוני שכלל בחירת מקום מתאים לכור והתחלת תכנון הקמת תשתית אנושית ומחקרית לנושא. הארוע בכור בפוקושימה קטע הערכויות אלה.

לכאורה, אנרגיה גרעינית היא נושא אסטרטגי בעל שתי רגליים עיקריות: הראשונה היא רגל כלכלית – עלות כור גרעיני גבוהה אולם מחיר הדלק נמוך וזמינותו גבוהה. הרגל השניה היא אסטרטגית – גיוון מקורות יצור החשמל שאינם תלויים בדלקים פוסיליים היא צורך לאומי בטחוני שאף זוהה ע"י ממשלת ישראל בשנים האחרונות. מכיוון שהקמת כור גרעיני סבוכה מאין כמוהו, יש סבירות גבוהה לכך כי במידה ותעבור החלטה חיובית הרי שיקנה כור כזה מהמדף.

לכן, נשאלת השאלה מהו מקומה של המולמו"פ (והמו"פ הישראלי בכלל) בדיון כזה?

תפקיד המו"פ בהקמת כור גרעיני חשוב מאין כמוהו במספר מישורים:

1. המישור הראשון הוא תחומי הליבה- גם אם המחקר הישראלי לא יתרום בשלביו הראשוניים לפיתוח תעשיית הגרעין, הרי שמשמעות פיתוח פקולטות המחקר בישראל הינו יצירת אנשי מקצוע מעולים.
2. המישור השני הוא תחומי המעטפת – בהם ישראל יכולה לתרום גם היום, החל מקירור, ניטור קרינה ואכסון.
3. המישור השלישי נוגע באבטחת כורים גרעיניים – לישראל ידע רב והצלחות מוכחות בתחום האבטחה בכלל מאבטחה אקטיבית ועד ללוחמת סייבר. ניתן להסב חלק מהידע לתחום זה[1].
4. המישור הרביעי הינו תחומים משיקים, כגון התייעלות אנרגטית, אנרגיות מתחדשות ואכסון על מנת לייצר גיוון במקורות האנרגיה של מדינת ישראל ולייצר תעשיית יצוא משמעותית בתחום האנרגיה בכלל ובתחום הגרעין בפרט.

דיון זה מבקש להביא לחידוש השיח בנושא וליצירת מודעות ציבורית לחשיבותו ולצורך בו.

פרופ' יצחק בן ישראל

י"ר המועצה הלאומית למחקר ופיתוח

הדוברים בדיון:

מנחה: **צביה ברון**, המועצה הלאומית למחקר ופיתוח

גדעון פרנק, לשעבר ראש הוועדה לאנרגיה אטומית

ד"ר שלמה ולד, מדען ראשי, משרד האנרגיה והמים

ד"ר ארז גלעד, המחלקה להנדסה גרעינית, הפקולטה להנדסה, אוניברסיטת בן גוריון

ד"ר עמית מור, אקו-אנרגי

רקע לדיון

האנרגיה הגרעינית כשאלה מרכזית שכדאי להקדיש לה תשומת לב, האם מיקומו הנמוך של הנושא בסדר היום האנרגטי והמדעי בישראל הוא נכון ומוצדק בנסיבות ובסביבה הטכנולוגית העדכנית וזו החזויה. חשוב לציין שמספר מדינות באזור (ירדן, תורכיה, סעודיה ואיראן) נמצאות בשלבים אופרטיביים שונים במסלול לייצור של חשמל גרעיני, כך שדיון בנושא רלוונטי בהקשר המדיני-אזורי.

כיוון אחר לדיון באנרגיה גרעינית הוא כיוון מחקרי מתודולוגי, אנרגיה גרעינית כדוגמה לקשר שבין ממשלה-מחקר בסיסי באקדמיה-מו"פ-תעשייה/שוק פרטי ויחסים ביניהם. מצב המו"פ הגרעיני לשימושים מסחריים נובע במידה רבה מהאופן בו עוצב תחום האנרגיה הגרעינית כענף בתעשיית האנרגיה. ההחלטה האמריקאית מסוף שנות החמישים של המאה הקודמת לכונן את האחריות למו"פ הגרעיני תחת אחריות התעשייה, היינו הסקטור הפרטי, היא אחד הגורמים שייטכן ובדיעבד גרמו להתקדמות האיטית ואף לכמעט עצירה בהתפתחות המו"פ של ענף זה.

יחד עם זאת, ניתן לחלק את המחקר והפיתוח באנרגיה גרעינית אזורית לארבעה מישורים שונים.

1. המישור הראשון הינו תחום המו"פ התפקודי – קרי מו"פ שמתעסק בתכנון כורים גרעיניים ובתפקודם.
2. המישור השני הינו תחום מו"פ המעטפת – קרי טכנולוגיות עוטפות ומשלימות כגון: קירור, ניטור ומערכות היקפיות נוספות
3. המישור השלישי מתייחס למו"פ משלים ו"מושאל", קרי מו"פ השאול מעולמות תוכן אחרים אך דרוש למכלול התפקוד החלק של כורים גרעיניים. בתחום זה ניתן לכלול את האבטחה של כורים: פיזית וסייבר.
4. המישור הרביעי הינו מישור המו"פ התחליפי – קרי מו"פ שחותר תחת הנושא הגרעיני ומשלים אותו, קרי יצור חשמל ואנרגיה ממקורות אלטרנטיביים.

מבחינות רבות יכול דיון בנושא אנרגיה גרעינית, ובמיוחד בנושא מו"פ גרעיני בהקשר הישראלי, להחשב כתרגיל אקדמי שאיננו רלוונטי למצב ולסביבה הנוכחיים. אנרגיה גרעינית נמצאת כיום במגמת נסיגה בעולם כולו בכל הנוגע למשקל היחסי בתמהיל מקורות יצור החשמל, כשקצב הקמתם של כורי חדשים אינו מקוז את קצב הסגירה הצפוי של כורים ישנים. אנרגיות מתחדשות, בעיקר רוח, תופסות נתח גדל והולך בתמהיל מקורות האנרגיה, ובמדינות ה-OECD הן המקור הצומח ביותר של מתקני יצור חדשים. התרחבות השימוש במקורות אנרגיה מתחדשת, יחד עם אי-צמיחה של הביקוש לחשמל ברוב מדינות ה-OECD, פגע מאד בריווחיות של יצרניות חשמל ברובד האספקה הבסיסי ובכלל זה בחברות המפעילות כורים גרעיניים. בנסיבות אלה נעצרה במדינות רבות ההשקעה בהקמת כורים חדשים וזאת במקביל לסגירה של כורים וותיקים, במספר מקרים גם קודם לתאריך תום רשיון ההפעלה¹.

למרות היותו של התחום מחוץ למוקדי העניין העכשוויים מצאנו לנכון להקדיש לנושא דיון במסגרת כנס הרצליה ה-14 ראשית מתוך ההבנה שתוך פרק זמן של קצת יותר מעשור תצטרך ישראל להכפיל את יכולת יצור החשמל וזאת במקביל לירידה בהיקף החשמל המיוצר באמצעות פחם ובמסגרת מגבלות של היקף מכסימלי לייצור בגז ובאנרגיה מתחדשת. במסגרת אילוצים אלה נמצא נושא

1. התמריצים והסובסידיות הנדיבים לעידוד השימוש באנרגיות מתחדשות יצרו פגיעה קשה בריווחיות של חברות המיצרות חשמל באמצעים קונבנציונליים. הפגיעה העיקרית נובעת ממתן עדיפות לחשמל אנרגיה מתחדשת בשעות צריכת השיא, אז משולמים לחברות החשמל תעריפי השיא. בתנאים אלה נפגעת גם יכולתם של יצרנים קונוונציונליים לתכנן את היצור בהתאם לביקוש הצפוי. הפגיעה בתזרים ובריווחיות יחד עם עצירת הגידול לביקושים לחשמל ברבות ממדינות המפותחות בלמה השקעות בפיתוח תשתית יצור רובד בסיס "Base-load" חדשה. במסגרת מגמה זו נפגע ענף הגרעין באופן מיוחד עם הקשחת הרגולציה בעקבות אירוע פוקושימה (ה-IEA מעריכה כי אירוע פוקושימה יצר החמרה בתקני הבטיחות לייצור בגרעין שמשמעותן ב-EU היא תוספת של 4 יורו לעלות היצור של כל מגה-וואט) ובעקבות ההתנגדות הציבורית לגרעין. משק החשמל הבריטי הוא חריג בתמונה זו כשמשקוללים של בטחון אנרגיה החליטה הממשלה לפתח את תחום האנרגיה הגרעינית ובמסגרת זו אף התחייבה בפני חברות שניגשו למכרז להקמת תחנות גרעין על תעריף קבוע וידוע לרכישת החשמל עד לשנת 2030, תעריף שיגדל אם תבחר החברה הזוכה להפעיל תחנת גרעינית נוספת. מחוץ למדינות ה-OECD ישנם פרויקטים רבים, הבולטים שבהם בהודו ובסין, של הקמת תחנות גרעיניות חדשות.

הדיון שהתקיים במסגרת כנס הרצליה התמקד בשני התחומים הראשונים והברורים לדיון, אך יידרש דיון נוסף באשר לשני התחומים הנוספים וההשפעה שלהם על התפתחות התחום.

עלות ההקמה של כורים היא גבוהה מאד אך עלות זאת מתקזזת עם המחירים הנמוך של הדלק הדרוש להפעלתם לאורך שנים כשכורים וותיקים נחשבים לפי מודלים מסויימים כריווחיים ביותר. לכורים גרעיניים יש יתרונות רבים שהשימוש באנרגיה גרעינית מקנה, ובהם יתרונות כלכליים משמעותיים בתכנון מחירי הדלק הגרעיני וציבותם, אמינות תפעולית רבה ויכולת לחזות מחזורי תחזוקה. יחד עם זאת מדובר בתחום הסובל מבעיות משמעותיות בדעת הקהל ובמערכת הפוליטית מאז הוטלו פצצות הגרעין על יפן ובעקבות סדרה של ניסויים בפצצות תרמו-גרעיניות בשנים הראשונות של המלחמה הקרה. אנרגיה גרעינית זכתה לעדנה מסוימת רק בשנות החמישים אז נראתה כהבטחה לחשמל בלתי נדלה במחירים נמוכים במיוחד. מאז שהתבהרו העלויות והסיכונים הקשורים בגרעין, הציבור והמערכת הפוליטית מגלים נכונות גדולה יותר לקבל פיתוח אנרגיה גרעינית רק בתקופות בהן מתרחשת עלייה דרמטית במחירי הדלקים הפוסיליים. אולם מדובר בחלונות זמן מוגדרים שכשתוקפם פג נראה כי והציבור בכללותו מגלה חשש ועוינות לסוג אנרגיה זה ומסרב להשתכנע גם בנימוקים וניתוח רציונלי אותם משמיעים מומחים רבים. העליה במודעות הסביבתית וההכרה בבעיית פליטת הפחמן יצרה אהדה ודחיפה לתחום האנרגיה המתחדשת ובמידה מסויימת גם לתחום הגרעין. מחקר שנעשה לאחרונה על בסיס נתוני משרד האנרגיה האמריקאי ואשר ניתח אפקטיביות של סוגי מדיניות שונים על פליטות של גזי חממה, העלה כי אנרגיה גרעינית נמצאת במקום השלישי בצמצום פליטות של גזי חממה, הרבה מעל אנרגיות מתחדשות ודלקים ביולוגיים² העלייה הדרמטית במחירי הדלקים הפוסיליים במחצית השנייה של העשור הקודם הביאה מדינות רבות בעולם לקדם תכניות לפיתוח אנרגיה גרעינית במסגרת מגמה שזכתה לכינוי "רנסנס גרעיני". מגמה זו נעצרה באחת עם התקלה הגרעינית בכורים בפוקושימה באפריל 2011.

הדיון שהתקיים במסגרת כנס הרצליה ה-14 הוא מפגש ראשון בפרוייקט רחב יותר שמיועד להתמקד באנרגיה הגרעינית כסוגיה תכנונית ממנה ניתן ללמוד על תכנון אנרגטי והקשר בינו לבין מ"פ, חיזוי טכנולוגי, פיתוח מדיניות ויישומה. תחום האנרגיה הגרעינית הוא דוגמה למאפיינים היחודיים לעיסוק באנרגיה, תחום ייחודי המשלב מימד קריטי-אסטרטגי, השקעות עצומות של מאות ואף מיליארדי דולרים. פיתוח גרעיני דורש תכנון ארוך טווח במסגרתו החלטות המתקבלות כיום יגיעו לכדי בשלות רק בעוד פרקי זמן של בין 15 ל-20 שנה, וכשקצב ההבשלה של פיתוחי מחקר בסיסי התברר עד כה כאיטי ביותר. מדובר באופק תכנוני וטכנולוגי גדול משמעותית מזה הנתפש בדיון הציבורי, הפוליטי והכלכלי המקובל. מדובר במפגש ראשון וראשוני. חלק גדול מהנקודות והרעיונות שהועלו בדיון יפותחו וינתחו בהרחבה במפגשים נוספים אותם אנו מתכננים לקיים בהמשך.

אנו מבקשים להודות לכל המשתתפים על תרומתם לדיון, על המצגות, על ההערות ותובנות שהעלו בדיון ובמהלך העבודה על נייר מסכם זה. תודה לדוברים, גדעון פרנק, עמית מור, שלמה ולד וארז גלעד. כמו כן אנו מבקשים להודות לגרשון גרוסמן (הטכניון ומוסד שמואל נאמן), לעודד ברוש (המכון למדיניות ואסטרטגיה שבמרכז הבינתחומי), ולעידן לוי (המכון למדיניות ואסטרטגיה שבמרכז הבינתחומי) על ההערות שהעבירו אלינו במהלך העבודה על הטיוטה.

אורי סלונים

עמית מחקר
המכון למדיניות
ואסטרטגיה

צביה ברון

יועצת הוועדה הלאומית לאנרגיה
המועצה הלאומית למחקר ופיתוח

2. Charles R. Frank, Jr., The net-benefits of Low and Non-Carbon Electricity Technology. Working paper no. 74 (May, 2014), The Brookings Institute.

של יצור 1 מגה-ווט באמצעות גז מחזור משולב⁴. כ"כלל האצבע" מקובל להניח עלות של \$1000 לקילו-ווט מותקן⁵.

מול גישה זו של הכרח כמעט דטרמיניסטי לשימוש בחשמל גרעיני צוינו שורה של בעיות ומכשולים עמם יש להתמודד בדרך לפיתוח של מקור אנרגיה זה:

- מחסור בידע טכנולוגי ויכולת ביצוע הנדסית: בקרב יצרניות הציוד הגרעיני קיימת נורמה לפיה מדינות שאינן חתומות על האמנה למניעת התפוצה של נשק גרעיני מנועות מגישה לציוד, ידע וחומרים המשמשים בתעשיית הגרעין. עיקרון זה נפרץ בשנת 2005 בהסכם בי-לטרלי בין ארה"ב להודו. הסכם שיצר משטר פיקוח נפרד לתחום האזרחי. הדעות מסביב לשולחן בדיון לא היו אחידות ביחס לסוגיה זו. מספר משתתפים טענו כי בישראל לא קיימים הידע והיכולת ההנדסית להקים עצמאית כור, לעומתם היו אחרים שטענו כי ישראל יכולה להתמודד עם פרויקט הקמה של תחנה גרעינית אלא שהדבר יהיה כרוך בעלות עצומה שתהפוך את הפרויקט לבלתי ישים.

- בעיית הטיפול בפסולת הגרעינית: רבים ממשתתפי הדיון התייחסו לנושא זה כסוגייה משנית שהבעייתיות המיוחסת לה נובעת מרגש ציבורי ולא ממצאות אובייקטיבית. נקודה זו לא פותחה במסגרת הדיון אך ייתכן והבסיס לטעון זה הוא התפתחות טכנולוגית עתידית (ראו הרחבה בחלק העוסק במו"פ).

- טיפול בכורים שסיימו את מהלך חייהם (DECOMMISSIONING) הוא היבט נוסף של תוצאות שימוש באנרגיה גרעינית. בריטניה עסוקה בעשור האחרון בפירוקם של מספר כורים ותיקים לגביהם הוחלט כי לא יינתנו רשיונות להארכה נוספת בהפעלתם. עלות הפרויקטים לפירוק התחנות הישנות מוערכת כקרובה לכ-100 מיליארד ליש"ט.

- איום בטחוני: נושא האיום הבטחוני הוא ברור בהקשר הישראלי אך כעת נתפש כרלוונטי במדינות רבות נוספות. מיגון כורים כנגד אמל"ח ופעילויות טרור מצריך תכנון והשקעה נוספת דוגמת השקעת הכור באדמה או קירוי בכיפת מגן כפולה.

- צפיפות אוכלוסיה ובעיית זמינות משאבי קרקע: האילוצים הדמוגרפיים והגיאוגרפיים הקיימים בישראל יוצרים

במסגרת הרכב הדוברים שהשתתפו בדיון התקיימה הסכמה בדבר הנחיצות העתידית של אנרגיה גרעינית בישראל. הסכמה זו נגזרת מתחזיות ביקוש המעריכות קצב גידול אקספוננציאלי בצריכת החשמל, כ-3% תוספת ביקושים בשנה, עד לשנת 2050 ומעבר לה. **בקרוב מומחי אנרגיה מתקיים קונצנזוס לפיו תוך 15 שנה תצטרך ישראל יותר מלהכפיל את היכולת המותקנת לייצור חשמל תוך שמירה על עקרונות אמינות אספקה וניהול סיכונים**³. הרכב הדוברים בדיון ביטא דעה לפיה בתנאים אלה לא יהיה תחליף אחר לשימוש בחשמל גרעיני בעתיד, כמקור אספקה יציב לחשמל בהיקפים גדולים וכממלא מקום לתחנות הפחמיות, שמשקלן בתמהיל מקורות הייצור צפוי לרדת משמעותית, 20% עד 2030 ולמטה מכך בהמשך. הנחת העבודה שהתקיימה בדיון ציינה כי המועד הקרוב ביותר הרלוונטי לפעילות של תחנה גרעינית בארץ היא שנת 2050 כשמעל הדיון ריחפה אפשרות ההקמה של תחנה גרעינית בשבטה כמקרה יחוס. הוערך כי במגבלות הקרקע והמים המתקיימות באתר שבטה ניתן יהיה להקים, בטכנולוגיות כורים דור III משופר, תחנה בהספק של 3000 מגה-ווט (לשם השוואה, תחנת הכח בחדרה היא בעלת כשר ייצור מותקן בהיקף של 2500 מגה-ווט). בין הדברים נרמז כי בתכנית האב החדשה למשק האנרגיה הוקצו לאנרגיה גרעינית כ-1 עד 4.5 ג'יגה-ווט. הדוברים בדיון הדגישו כי במידה ולא תפותח בישראל אנרגיה גרעינית יהיה צורך להמשיך ולפתח את תחנות הייצור באמצעות פחם או לפתח רמה גבוהה מעל המקובל של יתירות וגיבוי של הייצור באמצעות גז טבעי.

השימוש באנרגיה גרעינית בהקשר הישראלי מגלם יתרונות רבים, בעיקר בכל הנוגע לבטחון אנרגטי. מדובר במקור אנרגיה שעלות הדלק שלו נמוכה וכמעט חסרת תנודות. מקור הדלק הגרעיני הוא במדינות מערביות יציבות והכמות הנדרשת לתפעול היא קטנה יחסית כך שמתאפשרת אגירה של עתודה אסטרטגית לשעת חירום. תחנה פחמית למשל המייצרת 1000 מגה-ווט צורכת מדי שנה כ-3 מיליון טונות של פחם ואילו תחנה גרעינית בעלת הספק דומה צורכת דלק גרעיני במשקל 25 טונות בלבד, מתוכם משקל הדלק עצמו הוא פחות מטון. העלויות הגבוהות הקשורות באנרגיה גרעינית נובעות כאמור **מעלות ההקמה** של הכור עצמו. עקב שיטות חישוב שונות של עלות ההקמה קשה לנקוב בנתון אחיד ומוסכם אך עלות יצור של 1 מגה-ווט חשמל במודל המשקלל הן את עלות ההקמה והן את עלויות התפעול השוטפות לאורך חיי הכור גבוהה ב-30% מהעלות

4. מתוך דוח לחישוב עלויות ייצור חשמל בטכנולוגיות שונות של הסוכנות של ה- Energy Information Agency במשרד האנרגיה האמריקאי:

http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/electricity_generation.pdf

5. ראו למשל תחשיבי עלות הייצור וההתקנה של כורי כח אצל Frank, ibid, עמ' 14.

3. בתחזית שהציגה רשות החשמל בפני ועדת יוגב הוערך קצב הגידול הגידול השנתי בצריכת החשמל ב-3.5% עד שנת 2025.

מגבלות נוספות כשבמרכזן השאלה האם ישראל תוכל להתמודד עם אירוע של תקלה גרעינית.

הדיון בישימות ובצורך בהקמה של תחנה או תחנות כח גרעיניות בישראל הוא הבסיס לשאלת הצורך בהשקעה במו"פ גרעיני מקומי איכותי. מדובר בקשר מעגלי במסגרתו מחקר בסיסי ומחקר בסיסי-יישומי, בתחומי פיזיקה גרעינית והנדסה גרעינית שהם תנאי הכרחי בהתפתחותה של תעשייה גרעינית. פעילות מחקרית היא חלק מרכזי בהכשרה לצורך פיתוח מיומנות, הבנה, ניסיון וידע הדרושים הן לתפעול מערכות כורים והן לרגולציה המורכבת הנדרשת עבורם. במקרה זה קשר אורגני מקומי של מחקר, רגולציה ותפעול שוטף של כור נמצא כגורם משמעותי בהבטחת רמה בטיחותית גבוהה. מדובר בידע ובמיומנות שנדרש פרק זמן ארוך למדי להתפתחותם, לכל הפחות 10 שנים.

פיתוח יכולת גרעינית לייצור חשמל נמצאת בפועל במקום נמוך בסדר העדיפויות האנרגטי של ישראל. האינדיקטור הבולט ביותר לכך הוא מספרם המצומצם של אנשי אקדמיה העוסקים באופן פעיל במחקר גרעיני. במסגרת הדיון הוערך מספרם בכ-5 חוקרים בלבד ובתוך כך תואר גם תהליך הצימצום של המחלקה שעסקה בתחום הגרעין במסגרת הפקולטה להנדסה באוניברסיטת בן גוריון והצמצום במספר הסטודנטים שפונים לנושא. כמו כן צויינה נסיגה מקבילה בעיסוק של חברת החשמל בנושא שגם בה ירדה תשומת הלב הארגונית לנושא הגרעיני ומספר העובדים העוסקים בו.

מתוך כוונה לשמר יכולת מקצועית ברמה מינימלית שתאפשר במקרה הצורך "התנעה" של פרויקט גרעיני פועל משרד האנרגיה במספר מסלולים:

- המשרד פועל לתקצוב שני פרויקטים מרכזיים שיצרו תשתית מחקר משמעותית בתחום הגרעין. **הפרוייקט הראשון מכונה "כור בהספק אפס" שתכליתו בחינת היתכנות של רעיונות טכנולוגיים וכן לקדם מחקר שתכליתו פיתוח מענים לבעיות אספקה של דלק גרעיני במסגרת המגבלות המוטלות על ישראל בהיותה מדינה שאיננה חתומה על ה-NPT. הקמה של מעבדה תרמו-הידראולית היא פרויקט שני.** מעבדה זו תוקם ככל הנראה במישור רותם ותשמש כרכיב משלים למתקן ה"כור הספק אפס". שני הפרוייקטים הם בגדר הצהרת רצינות מצד הממשלה בנוגע למו"פ הגרעיני ולעתידי ההשקעה בו.

- אימוץ עקרונות מפת הדרכים אותה פירסמה הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית: מדובר במסמך עקרונות

אותו פרסמה סבא"א⁶ המפרט את הצעדים אותם נדרשת מדינה למלא בדרך להשגת יכולת לייצור של אנרגיה גרעינית. תכנית סבא"א מתייחסת למסגרת זמן של 15 שנה אולם במתווה הישראלי רווחו פרקי הזמן למסגרת כוללת של 20 שנה⁷.

- השתתפות והשתלבות בפעילויות סבא"א לשמירה על מגע עם הענף וההתפתחויות המתרחשות בו. במסגרת מתכנן הצוות היעודי לנושא הפועל במסגרת משרד האנרגיה סדנא משותפת עם סבא"א שתעסוק בנושא מיקום אופטימלי לתחנות כח גרעיניות. הסדנא מתוכננת להתקיים בשנת 2015.

- הכללת נושא האנרגיה הגרעינית בקולות הקוראים אותם מפרסם המשרד לקבלת בקשות למענקי מחקר. במסגרת הדיון צויין כי עד כה הוגשו כ-5 בקשות לקבלת מענקי מחקר אך לא צויין מספר הפרוייקטים בתחום שזכו למימון בפועל.

חלק נוסף של הדיון עסק בבחינה פרטנית של תחומי מו"פ גרעיני בהם יכולה ישראל להשתלב. כל משתתפי הדיון העריכו כי אין לישראל יכולת וצורך לעסוק במו"פ הקשור ברכיבים המרכזיים של פעילות כורי כח (ליבה, מערכות בקרת כורים, מחזור דלק וכד'). מדובר בתחומים שהם בגדר נחלה בלעדית של מדינות העוסקות לאורך שנים בייצור, הפעלה ותחזוקה של כורי כח. יש לציין כי החולשה ממנה סובלת תעשיית הגרעין בשנים האחרונות יצרה אקו-סיסטמה של התפתחות טכנולוגית במסגרתה הלחץ מכיוון השוק/תעשייה מרוכז בשיפור דור קיים של כורים, בעיקר בכל הנוגע להוזלת העמידה בתקני בטיחות. הצמדות זו לשיפור טיפוסים כורים קיימים נובעת מהיתרון הכלכלי הנגזר הן מייצור סדרתי והן מהמשך השימוש ברגולציה הגזורה למאפייני הטיפוס וניסיון הנצבר של פעילות⁸.

מאמצי מו"פ לפיתוח דור טכנולוגי חדש ופריצות דרך מתבצעים ברובם הגדול באקדמיה במימון ממשלתי. ייתכן

6

http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/nuclear_ro_admap.pdf. דוגמה נוספת לעקרונות מפת הדרכים של סבא"א, ראו: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Infrastructure/meetings/2010-08-23-27-RTWS/11.Roadmap-for-the-implementation-of-safety-standards.pdf>

7. התייחסות מקוצרת למפת הדרכים הטכנולוגית שגיבשה סבא"א עבור מדינות המעוניינות לפתח יכולת יצור אנרגיה גרעינית ראו: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/nuclear_ro_admap.pdf

8 חשוב לציין כי המחלקה להנדסה גרעינית באוניברסיטת בן גוריון עוסקת ב-30 השנים האחרונות במחקר אקדמי מתקדם בתחומי תכנון פיסיקלי ותרמו-הידראולית של ליבת הכור ופיתוח מחזורי דלק מתקדמים. תחום זה כולל תכנונים חדשניים ופיתוח קונספטים מתקדמים של ליבות, תכנון וחישוב של כורים דוגרים (breeders), פיתוח מחזורי דלק סגורים (כלומר דלק המוקרן של כור אחד משמש כדלק לכור אחר), ניתוח תקלות בכורים, פיתוח כלי חישוב ייעודיים ועוד. יחד עם זאת מוערך כי פעילות זו אינה מספקת "נפח" מספק למו"פ או אפליקציות יישומיות בתחומי הליבה של כורים גם במסגרת הפעלה של כור כח בישראל.

שהעדר לחץ חיובי מצד התעשייה/שוק גורם להתארכות קצב הפיתוח. במעבדות ובמתקני הניסוי נבחנים כיום רעיונות שנהגו לראשונה עוד בתחילת שנות החמישים. חלק מרעיונות אלה, לדוגמה הטכנולוגיה המכונה "כור מהיר", הגיעו לשלבים יישומיים מתקדמים וננטשו אפילו לאחר ההקמה בפועל לאחר שנפגשו עם תנאי השוק והרגולציה. לדוגמה פרויקט ה-superphenix הצרפתי שהדגים קפיצת מדרגה טכנולוגית אך כשל מבחינה מסחרית ובשנת 1996 נסגר לאחר 10 שנות פעילות. בין היתר בלחץ רשויות הפיקוח לאחר שהתקשו לפתח לגביו פרוטוקול בטיחות. רעיונות לפיתוח טכנולוגיה זו, השייכת למשפחה המכונה כורים "דוגרים" או כורי "תרבית"

(breeder reactors), נהגו בעיקר על רקע חשש למחסור באורניום זמין. זינוק במחירי האורניום או מחסור עתידי בוודאות גבוהה באורניום צפויים להאיץ מחדש את הפיתוח של כורים אלה.⁹

תחום אפשרי אחר שהועלה בדיון כבעל פוטנציאל מסוים להשתלבות ישראלית הוא תחום כורי כח קטנים-מודולאריים, SMRs-Small Modular Reactors¹⁰. מדובר בענף מתפתח של כורים המיועדים לייצר חשמל בהספקים של עד 450 מגה-וואט בטכנולוגיות שונות, בחלקן מדובר על שיפור טכנולוגיה קיימת ובחלקן על טכנולוגיות פורצות דרך. הכורים הקטנים אמורים להיות זולים ופשוטים יותר להקמה ותפעול ובכך להפיק חשמל במחיר זול יותר. גודלם שמאפשר הקמה פשוטה יחסית מתחת פני הקרקע מצמצם את הסיכון הפוטנציאלי הנובע מהפעלתם. חלק מהעיצובים מתמקדים בכורים קטנים שיונחו על קרקעית הים. מאפיין שעשוי לפשט מאד את נושא הקירור. מאחר ומדובר בפעילות גרעינית בעצמות לחצים נמוכה יותר מזו המאפיינת כורים גדולים מהטיפוסים המוכרים לנו ייתכן וקיימת כאן הזדמנות עבור ישראל. הכורים הראשונים מסוג זה צפויים להיות זמינים לשימוש מסחרי בסביבות שנת 2035.

9. "הכינוי 'כור מהיר', מתייחס להתפלגות אנרגיית הניטרונים המשתתפים בתהליך הביקוע. בכורים קונבנציונליים (תרמיים) הניטרונים מואטים לאנרגיות נמוכות, אך לא בכורים מהירים. הדלק הגרעיני בכור המהיר מבוסס על תחמוצות אורניום ופלוטוניום (דלק MOX) והדגירה (breeding) מתבססת על לכידת ניוטרון ע"י גרעין של אורניום-238 או תוריום-232, שיוצרת גרעין של פלוטוניום-239 או אורניום-233, בהתאמה. הן הפלוטוניום-239 והן האורניום-233 הם חומרים בקיעים ומשמשים כדלק גרעיני. תכנונים חדשניים של מעגל דלק סגור מתבססים על כורים דוגרים מהירים, המסוגלים לייצר יותר חומר בקיע מהכמות שהם צורכים. בכורים מהירים לא ניתן להשתמש במים כנוזל קירור, ולכן משתמשים במתכות נוזליות כגון נתרן או עופרת או מלחים מומסים שונים. עובדה זו מעלה את רמת הסיבוכיות של תפעול ובטיחות הכור ומהווה בעיה מרכזית בפיתוח טכנולוגיית כורים מהירים. בעיה נוספת של כורים אלה היא מניעת תפוצת נשק גרעיני, כיוון שכ-30%-5 מהדלק הטרי מכיל פלוטוניום ותהליך הדגירה מייצר כמויות נוספות של פלוטוניום. חשוב לציין כי ביחס לכורים קונבנציונליים (תרמיים), הכורה מהיר יעיל יותר מבחינת ניצול החומר הבקיע בליבה, ונקי יותר, כלומר מייצר פסולת רעילה פחות באופן משמעותי ובכמויות קטנות יותר."

¹⁰ [/http://www.iaea.org/NuclearPower/SMR](http://www.iaea.org/NuclearPower/SMR)

מלבד תחום הכורים הועלו בדיון שורה של נושאים אחרים שזוהו כבעלי פוטנציאל לפתח בהם פעילות מו"פ:

- ניטור קרינה
- מיגון מתקנים וטיפול בקרינה
- איחסון יבש של פסולת גרעינית
- הנדסת חומרים בכל הנוגע למגע עם חומר קורן
- פיתוחים הקשורים במעגלי קירור

למרות שהדיון במסגרת הכנס היה דיון ראשוני בו ניסינו להתמקד בסוגיית המו"פ, עלתה במהלכו מספר פעמים סוגיית הקשר עם סבא"א ושאלת היכולת להעמיק את ההשתלבות בפעילותה גם מבלי שישראל תצטרף לחותמות על האמנה למניעת התפוצה של נשק גרעיני. המודל ההודי אוזכר מספר פעמים אך בנוסף הועלתה גם אפשרות נוספת של פיתוח מערכת למידה וקשר בי-לטרלי עם רשויות מדינתיות לאנרגיה גרעינית, בארצות הברית ובמדינות ידועות דוגמת אנגליה, גרמניה, צרפת וקנדה.

לסיכום - למרות מיקומה הנמוך של פיתוח אנרגיה גרעינית אזרחית ליצור חשמל בישראל, הרי שנעשים מספר צעדים על מנת לשמר את היכולת להתניע את התהליך בבוא היום. פיתוח הדרגתי של פעילות גרעינית אזרחית מחייב התפתחות, הן בתחומי המו"פ, התמיכה, העבודה והרגולציה השוטפת. כמו כן, במידה והקמת כור גרעיני אזרחי תעלה על הפרק, הרי שתידרש תכנית לשיתוף הציבור ולחינוכו בנושא.

1. Nuclear Power Plants in Israel - Dr. Shlomo Wald



Ministry of National Infrastructures, Energy and Water Resources

Nuclear Power Plants in Israel

Dr. Shlomo Wald

Chief Scientist

Herzlia Conference, June 9th 2014



Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

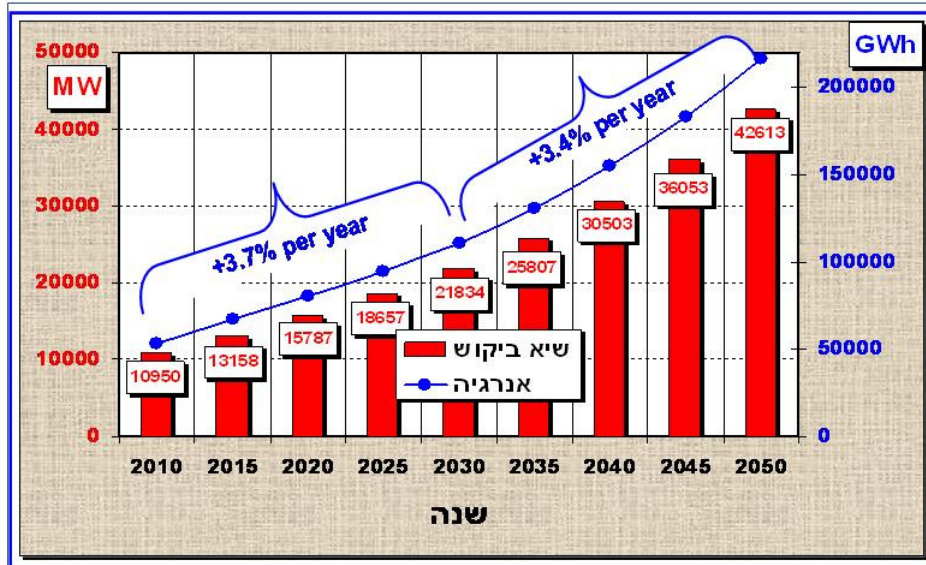
The ministry vision

- Provide sustainable supply of all needs of energy, water and natural resources to the people of Israel regularly and in a case of emergency.
- All these, while complying with the highest environmental standards and in economically affordable way



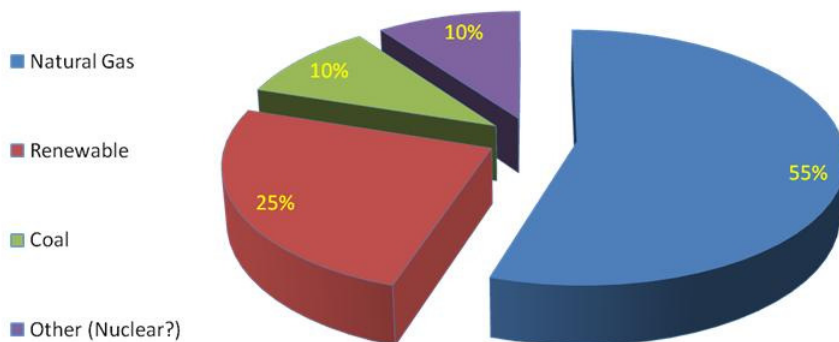
Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

Prediction of the electricity demand in Israel



Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

Prediction of the power production distribution in Israel 2030



Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

Prefeasibility Study of a Nuclear Power Program (NPP) in Israel

- The program was initiated two years ago by the Ministry, in cooperation with the IAEC and the Prime Minister's Office.
- The program's main goals:
 - To determine if there is a need to NPP in Israel
 - If needed, to analyze the major obstacles implementing NPP's in Israel.
- The report was submitted (Feb. 2013) and most of its major recommendations have been adopted.



Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

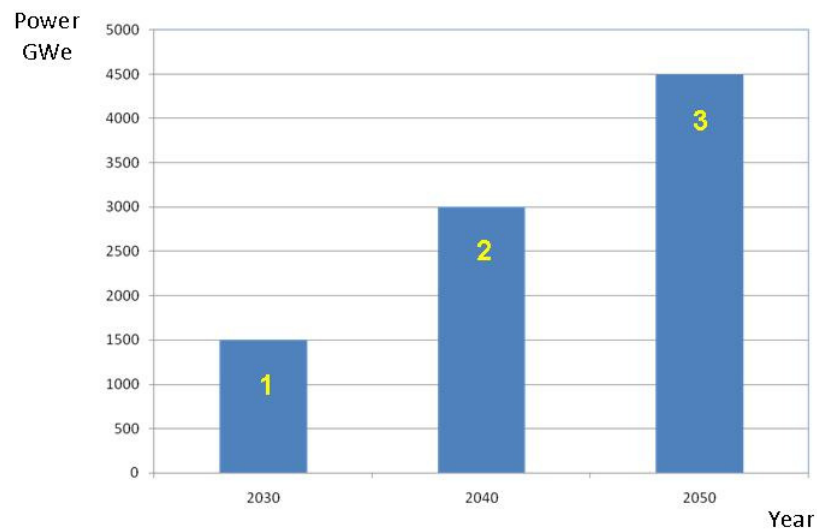
Prospects for NPP in Israel

- At present, no formal decision to construct a first NPP was taken by the government of Israel.
- However, some preliminary work has to be done in order to allow the project in the future, if a decision will be taken.



Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

Number of nuclear reactors needed



Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

The way forward

- Continue with the prefeasibility study in order to:
 - Remove or minimize the major obstacles on the way to implement of NPPs in Israel
 - Establishing a sustainable infrastructure (experts and research facilities) needed in order to enable the execution of a full feasibility study for a NPP in Israel



Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

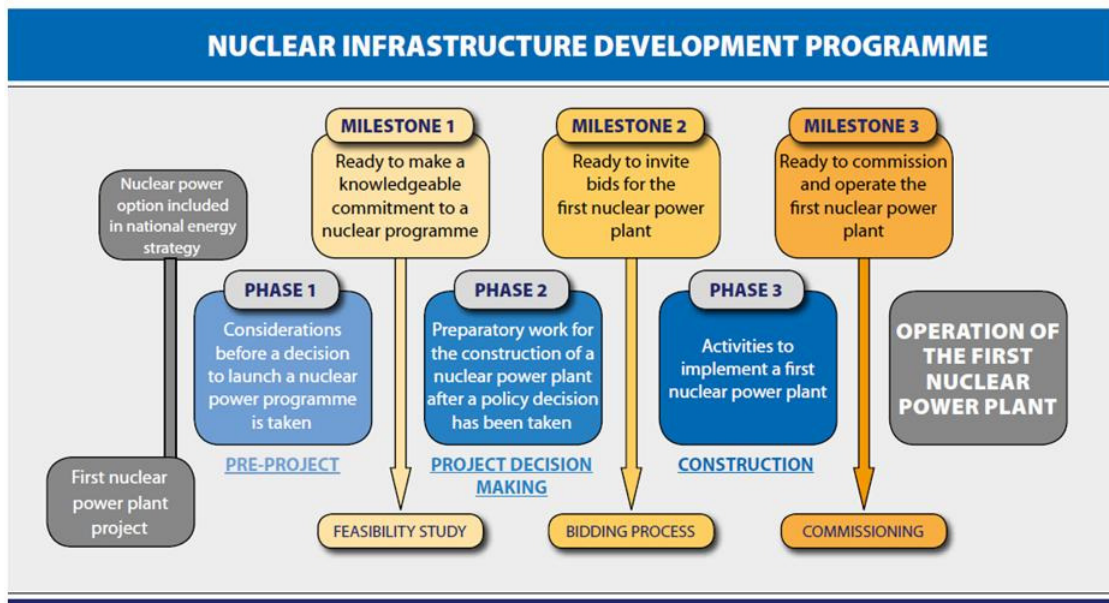
Preparing the human resources – R&D

- NPP is included in the Ministry's Call-for-Proposals for R&D projects
- Planning two "light-house" projects to attract scientists:
 - Nuclear experimental facility (within international collaboration)
 - Thermohydraulic laboratory
- Upcoming events:
 - Energy & Environment (2014 Eilat-Eilat Conference)
 - International workshop on NPP Siting Criteria



Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

The IAEA framework for a first NPP

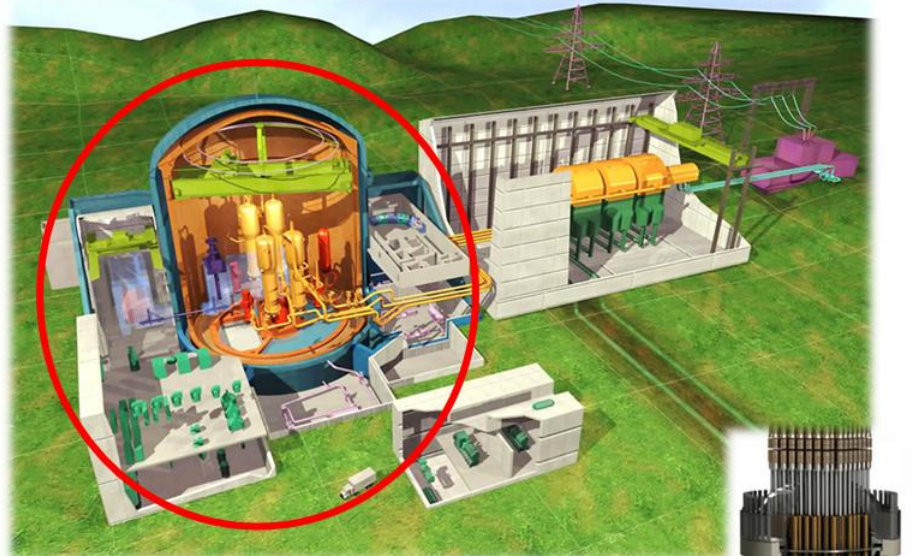


Ministry of National Infrastructures,
Energy and Water Resources
www.energy.gov.il

אנרגיה גרעינית לשימוש אזרחי: הזדמנויות למו"פ הישראלי

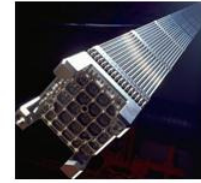
ד"ר ארז גלעד

המחלקה להנדסה גרעינית
הפקולטה למדעי ההנדסה
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב



No R&D Opportunities

- Fuel cycle & Supply chain
 - Mining, enrichment, fabrication, Reprocessing
 - Waste management
- Design of Gen III+/IV reactors
- Control room & operational hardware
- Operation & maintenance
- Manufacturing
- Construction



Possible R&D Opportunities

- Radioactivity Management
- Nuclear Power Plant (NPP) Physical Protection
- NPP Regulation
- Human Resource
- In-Core Fuel Management
- Spent Fuel Storage
- Safeguards



Radioactivity Management

- Radiation detection & monitoring
- Radiation protection & shielding
- Radioactive materials handling

- Israel currently has very good academic and technological R&D capabilities.
- Number of researchers is small and decreasing.



NPP Physical Protection

- Some new designs can withstand the direct impact of a commercial airplane.
- No protection against rockets or missiles.
- **Unique threats to Israel.**



- Israel has very good academic and technological R&D capabilities in advanced protective technologies.
- No experience with NPP.



NPP Regulation

- Under the state responsibility.
- A very wide range of expertise, integrated science/technology
 - Physics, Chemistry, Geology, ...
 - Mechanical/Material engineering
 - Radiation/Control technology
 - Accidents management
- **Independent, competent & effective regulator is of crucial importance.**
- Large number of personnel, heavily funded.

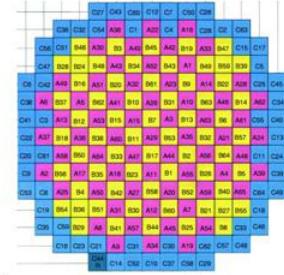


Human Resource

- Skilled workforce requires time and money.
- HR development is a national-scale task.
- **Must involve International cooperation.**
- Expertise are mostly technical and management related.
- Few are scientific or R&D related.
- Knowledgeable customer

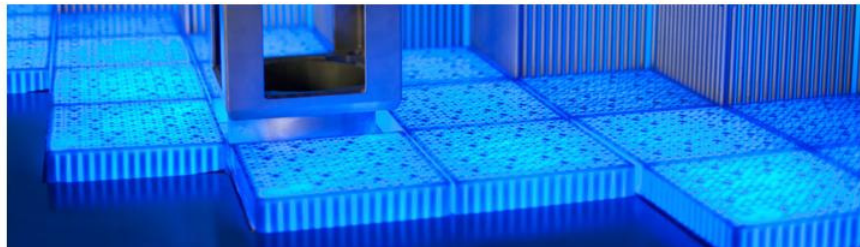
In-Core Fuel Management

- Done by the operating utility.
- Operation cycles design and fuel inventory management.
- NPP reactor core calculation capabilities,
 - Neutronics
 - Thermal-Hydraulics
 - Materials
 - Safety analysis
- Israel has a very good experience and capabilities in this field.



Spent Fuel on-site Storage

- Short & medium term storage
- Wet & dry spent fuel storage
- Materials & radiation
- Corrosion
- Radiation damages



Safeguards

- Facilities protection
- Nuclear materials handling and transport
- Non-proliferation techniques
- Cyber and Information Security



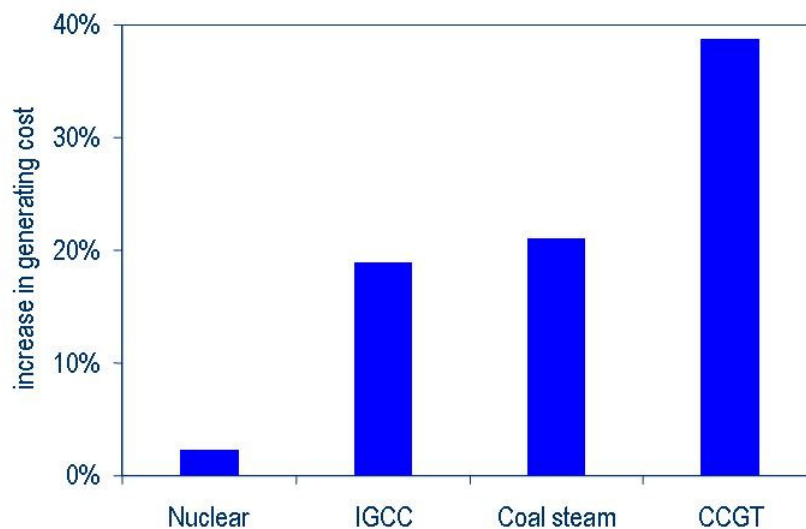
1. מחיר דלק גרעיני

- היתרון הייחודי של אנרגיה גרעינית-תכולת אנרגיה עצומה:
 - תחנת כח פחמית של 1000 מגווט חשמל שורפת כ-3 מליון טון בשנה;
 - תחנת כח גרעינית באותו הספק צורכת כ-25 טון דלק לשנה;
- מרכיב הדלק במחיר החשמל קטן מאד (מחיר האורניום 5% ממחיר החשמל):
 - רגישות נמוכה לשינויים במחיר הדלק;
 - מחירי חשמל יציבים וצפויים.

גפרנק 2014

2

Impact of 50% increase in Fuel Costs



גפרנק 2014 Sources: IEA "World Energy Outlook 2006" - "Reference Scenario"

3

2. אספקת דלק מובטחת

- אורניום מחצב נפוץ;
- 90% מהעתודות המוכחות נמצאות באוסטרליה וקנדה ולא במזה"ת;
- דלק גרעיני ניתן לאגירה קלה לאבטחת אספקת אנרגיה (הבעיה הדמיונית שמציבה איראן-מעולם לא נמנעה אספקת דלק למדינות ה-NPT ומעבר לכך...);
- אלה המניעים למדיניות צרפת (75%) ויפן (30%) והתפתחות בסין והודו.

גפרנק 2014

4

המאפיינים (היציבים) של אנרגיה גרעינית

1. מחירי דלק נמוכים מאד אשר מבטיחים מחיר חשמל יציב וניתן לניבוי;
 2. אבטחת אספקת אנרגיה יציבה;
 3. מעשית, ללא פליטת פחמן לאטמוספירה
- התאמה לצרכי תעשייה וחברה מפותחות [תחום רחב
ליכולת ייצור חשמל (10-1600 מגוואט)]

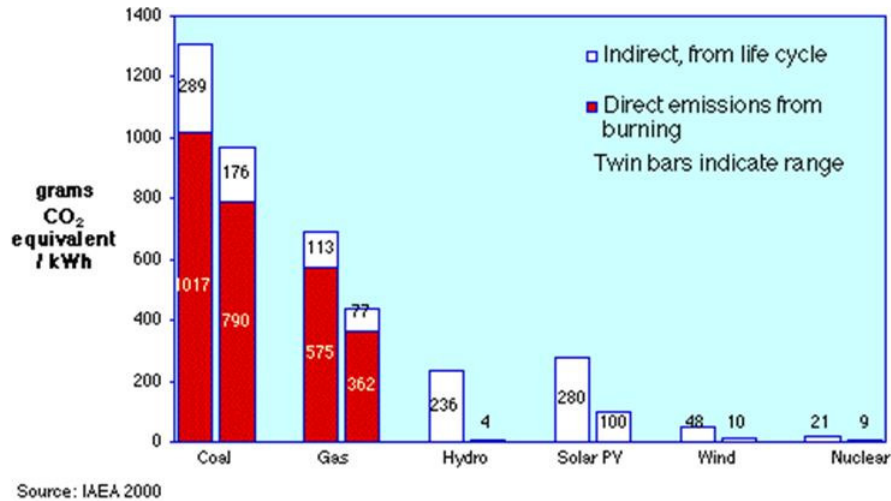
גפרנק 2014

5

פליטות מיצור השמל

גרעין רק 17% מיצור השמל הגלובלי

Greenhouse Gas Emissions from Electricity Production



גפרנק 2014

6

אנרגיה גרעינית בעיות ואתגרים

- כדאיות כלכלית מול מקורות אנרגיה מסורתיים;
« מחיר דלק נמוך מאד אבל מחיר הקמה יקר.
- בטיחות;
« באופן מובהק—מורשת צ'רנוביל (אבל במובלע גם צל פטריית הירושימה) ומ-2011 מורשת פוקושימה;
- פסולת גרעינית;
« הרושם של זיהום הסביבה לדראון עולם;
- סכנות פרוליפרציה;
« האם תהפוך איראן למודל חיקוי לאחרים?

גפרנק 2014

7

Table 1. Estimated levelized cost of new generation resources, 2018

Plant type	Capacity factor (%)	U.S. average levelized costs (2011 \$/megawatthour) for plants entering service in 2018					Total system levelized cost
		Levelized capital cost	Fixed O&M	Variable O&M (including fuel)	Transmission investment		
Dispatchable Technologies							
Conventional Coal	85	65.7	4.1	29.2	1.2	100.1	
Advanced Coal	85	84.4	6.8	30.7	1.2	123.0	
Advanced Coal with CCS	85	88.4	8.8	37.2	1.2	135.5	
Natural Gas-fired							
Conventional Combined Cycle	87	15.8	1.7	48.4	1.2	67.1	
Advanced Combined Cycle	87	17.4	2.0	45.0	1.2	65.6	
Advanced CC with CCS	87	34.0	4.1	54.1	1.2	93.4	
Conventional Combustion Turbine	30	44.2	2.7	80.0	3.4	130.3	
Advanced Combustion Turbine	30	30.4	2.6	68.2	3.4	104.6	
Advanced Nuclear	90	83.4	11.6	12.3	1.1	108.4	
Geothermal	92	76.2	12.0	0.0	1.4	89.6	
Biomass	83	53.2	14.3	42.3	1.2	111.0	
Non-Dispatchable Technologies							
Wind	34	70.3	13.1	0.0	3.2	86.6	
Wind - Offshore	37	193.4	22.4	0.0	5.7	221.5	
Solar PV ¹	25	130.4	9.9	0.0	4.0	144.3	
Solar Thermal	20	214.2	41.4	0.0	5.9	261.5	
Hydro ²	52	78.1	4.1	6.1	2.0	90.3	

מדוע באמת לא בונים כורים חדשים בארה"ב

¹ Costs are expressed in terms of net AC power available to the grid for the installed capacity.
² Pumped storage hydro is assumed to have seasonal storage so that it can be dispatched within a season, but overall operation is limited by resources available by site and season.

2014

NEI 2013 Financial Modelling

	EPC cost	capacity	Electricity cost	
EPC- Engineering Procurement Construction	Gas combined cycle, gas @ \$3.70/GJ	\$1000/kW	90%	\$44.00/MWh
	Gas combined cycle, gas @ \$5.28/GJ	\$1000/kW	90%	\$54.70/MWh
	Gas combined cycle, gas @ \$6.70/GJ	\$1000/kW	90%	\$61.70/MWh
	Gas combined cycle, gas @ \$6.70/GJ, 50-50 debt-equity	\$1000/kW	90%	c \$70/MWh
	Supercritical pulverised coal, 1300 MWe	\$3000/kW	85%	\$75.70/MWh
	Integrated gasification combined cycle coal, 1200 MWe	\$3800/kW	85%	\$94.30/MWh
	Nuclear, 1400 MWe (EIA's EPC figure)	\$5500/kW	90%	\$121.90/MWh
	Nuclear, 1400 MWe (NEI suggested EPC figure)	\$4500-5000/kW	90%	\$85-90/MWh
	Wind farm, 100 MWe	\$1000/kW	30%	112.90/MWh

5% cost of debt, 15% return on equity and a 70-30 debt equity capital structure.

2014

9

יצור חשמל באנרגיה גרעינית בישראל

• יתרונות

- אבטחת אספקת אנרגיה
- הקטנת פליטת פחמן לאטמוספירה

• אתגרים כיום

- כדאיות כלכלית (כולל קרדיט לאי פליטת פחמן?)
- משמעויות בטיחותיות
 - לקחי פוקושימה
 - סכונים בטחוניים (עלות מיגון)
- המטרה – יצור חשמל אמין וכדאי כלכלית
- פיתוח עצמי של כור כח (אפילו אם תבנה התשתית התעשייתית הנחוצה) לא ישיג את המטרה
- קניית כור כיום אינה אפשרית מבחינה מדינית

2014גפרנק

10

אפשרויות לעתיד

- אם יוסרו מגבלות מדיניות לקניה
 - בעית הכדאיות הכלכלית (בהתחשב במיגון (-) ובאי פליטת פחמן(+))
 - בנית יכולת "לקוח חכם"
 - הגדלת המרכיב המקומי בייצור והקמה

• משמעויות של שינויים טכנולוגיים

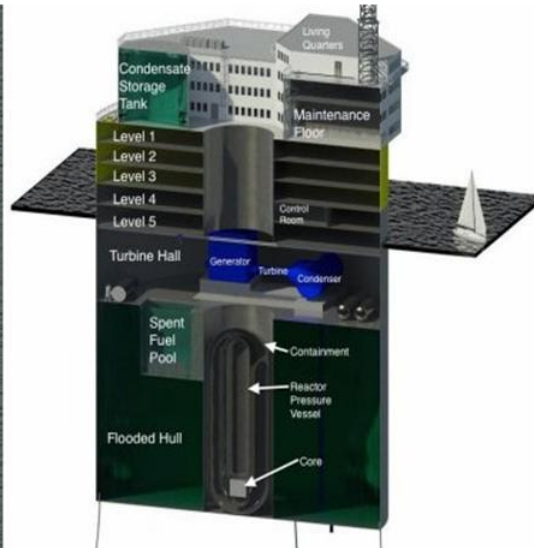
- הפוטנציאל ב-SMR
 - יתרונות כלכליים (סטנדרטיזציה, בניה במפעל, יצור מבוזר)
 - האם מחייב תשתית תעשייה כבדה? אי תלות?
 - בעיות רישוי? (הגדלה מודולרית)
 - גישות מהפכניות (בניה בים - מענה בטיחותי מלא?)

2014גפרנק

11



2014גפרנק



12

• מה בינתיים?

– טיפוח יכולת מקצועית איכותית בהקף צנוע שתאפשר מעקב ומחקר בקונפיגורציות (SMR) חדשניות.

• הערה

– אמצעי יצור אנרגיות חילופיות אינם זמינים חלק נכר מהזמן (סולרי בעולם המערבי 30%, רוח 20% זמינות).

אם בעתיד מחיר ההשקעה יקטן ויהיה תחרותי – תשאר בעית האגירה

– אגירת חשמל – אתגר טכנולוגי משמעותי ביותר (משימוש באנרגיות חילופיות ועד מכונות חשמליות וחיבותן)

2014גפרנק

13