

בית ספר לאודר  
למשל, דיפלומטיה  
ואסטרטגיה



עבודת גמר לתואר M.A

ממשל ואסטרטגיה בהתמחות מנהל ציבורי

מנחה: ד"ר עמית מור

## אנרגיית גרעין במדינת ישראל

שאלת מחקר: האם תחנת כוח גרעינית היא פתרון מתאים למדינת ישראל?

מיקוד הרחבה לעבודת גמר ל-M.A: סקירה של כמה "ירוקה" תחנת כוח גרעינית?

מגיש

אייל וינר-Eyal Winer

15 בנובמבר 2014

## תוכן עניינים

עמ' 3	1. מבוא
עמ' 4	2. רקע
עמ' 4	2.1. המצב הקיים ומגמות
עמ' 4	2.2. תועלות הנובעות מהוספת חלופות אנרגיה לתמהיל האנרגיה בישראל
עמ' 6	3. אנרגיה גרעינית
עמ' 6	3.1. איך זה עובד? סקירה טכנולוגית כללית
עמ' 7	3.2. אנרגיה גרעינית – אנרגיה ירוקה
עמ' 8	3.3. תאונות והשלכות
עמ' 10	4. צרכים, מגבלות ובטיחות במאקרו ותכלס בישראל
עמ' 10	4.1. דעת קהל
עמ' 10	4.2. תוצרי לוואי ופסולת של תחנת גרעינית
עמ' 11	4.3. הקמת תשתיות
עמ' 11	4.4. חידושים קיימים ופיתוחים עתידיים ברי-ביצוע
עמ' 12	4.5. תמהיל אנרגיה ועצמאות אנרגטית
עמ' 12	4.6. מודל Build, Own, Operate-BOO
עמ' 13	4.7. "גרעין" – תדמית שלילית- "קונספירציה"
עמ' 13	4.8. חסם כלכלי
עמ' 13	4.9. כוח אדם ייעודי
עמ' 14	4.10. תדמית "ירוקה"
עמ' 14	4.11. איומים ביטחוניים והשלכות כלכליות
עמ' 14	4.12. בחירת מיקום
עמ' 15	4.13. מאזן אנרגיה אזורי
עמ' 15	4.14. מוכנות לעתיד- "לפני שיהיה מאוחר"
עמ' 16	4.15. פרובוקציה-NPT
עמ' 16	5. סיכום חלק ראשון-בשאלת התאמתה של תחנת כוח גרעינית לישראל
עמ' 18	6. כללי- הרחבה לעבודת גמר ל-M.A- עד כמה ירוקה תחנת כוח גרעינית?
עמ' 18	7. מבוא
עמ' 19	8. אנרגיה גרעינית – אנרגיה מקיימת (Sustainable)
עמ' 19	8.1. יתרונות "מקיימים" – עקיפים
עמ' 20	8.2. חסרונות של תחנת כוח גרעינית בהיבט Sustainability
עמ' 21	9. כור Fast Neutron Reactor-FNR
עמ' 22	10. פסולת רדיו אקטיבית – הגדרות וטיפול
עמ' 22	10.1. שלבי טיפול בפסולת
עמ' 23	10.2. אחסנה ארוכת טווח של פסולת רדיו-אקטיבית
עמ' 24	11. פליטת גזי חממה
עמ' 24	11.1. מחזור חיים של כור גרעיני בהיבט פליטות Co2
עמ' 25	12. שטח תחנה לעומת יחס הפקת אנרגיה
עמ' 25	13. סיכום חלק שני- בשאלה עד כמה ירוקה תחנת כוח גרעינית?
עמ' 27	14. סיכום כולל
עמ' 28	15. ביבליוגרפיה חלק ראשון
עמ' 30	16. ביבליוגרפיה חלק שני

## 1. מבוא

את העיסוק בעולם הגרעין ניתן לבחון תחת שתי מטריות מרכזיות. הראשונה- נשק גרעיני לסוגיו והשני שימוש באנרגיית הגרעין להפקת חשמל. בעבודה זו נבחן את היבטי הפקת החשמל מאנרגיית גרעין בלבד ולא ניגע בהיבטים הצבאיים של גרעין הן מתוקף שאלת המחקר והן מתוקף זה, שנושאים אלו שונים עד מאוד ונדרשת בחינה מסוג אחר לגמרי של כל נושא.

תחנות כוח גרעיניות הינן סוגיה שנויה במחלוקת. זוהי סוגיה שנויה במחלוקת ממגוון היבטים: איכות סביבה, בטיחות, עלויות הקמה, משמעותיות ארוכות טווח וקצרות טווח ועוד.

חסמים לנושא זה הם אבני הבניין אליהם מתייחס כל פרויקטור גדול, בעבודתנו ננסה לצד הסקת מסקנות בשאלה "האם תחנת כוח גרעינית מתאימה לישראל?" גם לעסוק מעט בחסמי הביצוע עליהם יש להתגבר ולהתייחס ובכך לנבא לצד הצורך או אי הצורך בהקמה גם את יכולת הביצוע, הקשיים ופוטנציאל ההיתכנות הכרוכים בכך.

בעבודה זו נסקור באופן מקיף את הצורך למקור אנרגיה חלופי כמו אנרגיה גרעינית, נבצע סקירה של תחנות כוח גרעיניות על היבטיהן השונים ולבסוף ננתח את ישראל ואת התאמתה בשלל המישורים, זאת על מנת לנסות ולגבש המלצה שתענה על השאלה "האם תחנת כוח גרעינית מתאימה לישראל?". יש לזכור שכיום ישנן טכנולוגיות שונות לתחנות כוח גרעיניות, לכל טכנולוגיה יתרונות וחסרונות משלה המשליכים על התאמתה לכל אזור, מדינה וצורך. בעבודה זו אנו נתמקד בשאלה עקרונית האם תחנת חשמל גרעינית מתאימה לישראל ופחות בדקויות של כל טכנולוגיה, אלא בסקירה קצרה. חשוב לציין כי קבלת החלטה מבין הטכנולוגיות הינה החלטה מן הנישה המקצועית יותר שאין להפרידה מההחלטה הכוללת, אך היא אכן דורשת בחינה תחת "משקפיים" מקצועיות יותר.

\*\*יש לציין כי החלק הראשון של העבודה בצורתו המקורית נכתב בשיתוף עם מיטל רוזנברג כהן, ת.ז: 036859932, כחלק מעבודה מסכמת בקורס מדיניות אנרגיה של ד"ר עמית מור.

## 2. רקע

בפרק זה נסקור את המצב הנוכחי בישראל בהיבט אנרגיה, מהם היתרונות והחסרונות של הצעת חלופות לתמהיל האנרגיה הקיים במספר היבטים ובעצם בתמונת מצב המוליכה לצורך לבחון מקורות אנרגיה חלופיים כמו תחנת כוח גרעינית ועוד.

### 2.1 המצב הקיים ומגמות

בעידן הטכנולוגי בו אנו חיים לא ניתן לדמיין חיים ללא נגישות ויכולת שימוש באמצעים שונים כמו רכב, טלוויזיה, תאורה ועוד. המשותף לכל אלו ולעוד רבים אחרים המהווים חלק כה אינטגרלי וחיוני בחיים המודרניים הוא שכולם באופן ישיר או עקיף דורשים אנרגיה על מנת להפעילם ולייצרם. עם ההתפתחות הטכנולוגית נוצרה בחברה המודרנית תלות אמתית באנרגיה זמינה. עם העלייה בכמות החשמל המופק מהמקורות השונים החלו להגיע תוצרי הלוואי המזהמים לרמות משמעותיות ואשר את נזיקתם אנו חווים כבר בימינו ונחוה אף יותר בעתיד. המרדף אחר מקורות אנרגיה חלופיים בכלל ואחרי מקורות אנרגיה ירוקים בפרט הופך יותר ויותר למנת חלקו של העולם כולו והעולם המערבי בפרט.

הבסיס להבנת הצורך בפיתוח ושילוב חלופות נוספות למקורות האנרגיה הקיימים מתחיל בהבנה הכללית שהמגמה העולמית והמגמה בישראל היא של עלייה בצריכת האנרגיה, על אף מגמות התייעלות שונות המגמה הכללית הינה עדיין של עלייה בצריכת האנרגיה. ב-2008 נצרכה כמות אנרגיה כפולה מזו שנצרכה בישראל ב-1990, מגמה זו מראה על גידול שנתי ממוצע של 4 אחוזים. ניתן להרבות בנתונים בנושא הגידול בצריכת החשמל ולהסבירו בכל מיני צורות כמו גידול באוכלוסייה, צריכה לנפש שגדלה ועוד, אך בהיבט עיסוקה של עבודה זו הסיבה לגידול בצריכה אינה מהותית, השורה התחתונה של גידול משמעותי בצריכת אנרגיה בישראל ובעולם היא החשובה. איננו מתעלמים ממגמות התייעלות טכנולוגית ומודעות לצורך בחיסכון באנרגיה, אך על פי הנתונים מסתמן שמגמת העלייה אינה קרובה להיעצר בעתיד הקרוב וכי יש להיערך לכך על כל המשתמע מכאן (אידלמן, יבין, 2011).

בישראל מפיקים נכון להיום אנרגיה מ-4 מקורות עיקריים: סולר, מזוט, פחם וגז טבעי. בעשר השנים האחרונות ירד חלקם היחסי של סולר ומזוט בתמהיל הדלקים לכדי מינימום (בין 1-2 אחוזים), חלקו של הפחם נשאר יציב (77 אחוז לערך) ואילו חלקו של הגז הטבעי הכפיל עצמו בעשרות מונים (19 אחוז אל מול 0.1 אחוז בשנת 2000) עקב גילוי מצבורים גדולים בים והסבת תחנות כוח לשימוש בגז. בישראל קיים כיום מרכיב שולי של ייצור אנרגיה ממקורות ירוקים ומתחדשים, אך נכון להיום אין הוא מהווה מרכיב משמעותי מסך כמות האנרגיה המיוצרת בישראל (אידלמן, יבין, 2011).

### 2.2 תועלות הנובעות מהוספת חלופות אנרגיה לתמהיל האנרגיה בישראל

בחלק זה מופיעה סקירה מקוצרת לתועלות שינבעו מהוספת חלופות לתמהיל האנרגיה של ישראל. סקירה זו הינה כללית ואינה מתייחסת לאף חלופה באופן ספציפי. ברור מאליה שיתרונות מסוימים וחסרונות מסוימים יבואו לידי ביטוי בעוצמה שונה כתלות בחלופה הנבחרת.

### 2.2.1 תועלות בתחום האסטרטגי-ביטחוני :

- ישראל כמדינה מוקפת אויבים תרוויח מהיכולת לייצר לעצמה את החשמל הנדרש בלי תלות בייבוא של נפט, פחם וכדומה, היכולת לייבא עלולה להיפגע הן עקב העלאת מחירים בשווקים הבין לאומיים והן עקב החרמה של ישראל.
- היכולת של ישראל לקדם חלופות "ירוקות" לסוגיהן בתמהיל אנרגיה שלה יתרום ליחסי הציבור של ישראל בעולם באמצעות שימוש בתדמית "מדינת ירוקה".
- יצירת תמהיל המורכב ממספר רב של חלופות ייצור יתירות וגיבוי במידה וחלק ממערך ייצור החשמל בישראל ייפגע מסיבה כלשהי כמו תקלה, פגיעה מכוונת, מחסור במשאב ועוד.
- ייתכן כי בעתיד חומרי הגלם המהווים את עיקר מקורות האנרגיה שלנו יהיו במחסור, היכולת לייצר חשמל ממקורות מתחדשים (כאלו שאינם נגמרים כמו רוח, שמש ועוד) יוכל לאפשר לישראל להתמודד עם חוסר בפחם לדוגמא או בגז טבעי.
- פיתוח טכנולוגי, היווצרות כוח אדם מיומן ועוד הן יכולות היכולות להוות נכס אסטרטגי בתרחיש עתידי לישראל, כמו גם בעלות תועלות כלכליות.

### 2.2.2 תועלות בהיבטים סביבתיים :

- המעבר לאנרגיות מתחדשות לסוגיהן יוריד מנפח הייצור של חשמל מדלקים מאובנים, תהליך הפולט מזהמים רבים וגזי חממה אל הסביבה על כל תופעות הלוואי הנגזרות מכך שיימנעו.
- העלאת המודעות לאיכות סביבה, עיסוק בתחום אחד יוביל במישרין ובעקיפין לשיפורים טכנולוגיים ותודעתיים בהיבט איכות הסביבה.

### 2.2.3 תועלות בהיבטים כלכליים :

- היכולת לייצר לעצמנו את החשמל תקטין את התלות במחירים העולמיים לחומרי גלם כמו נפט, גז טבעי ועוד. יתאפשר תכנון כלכלי ארוך טווח, תחזיות מדויקות יותר והמשך פיתוח של משק האנרגיה בפרט ושל ישראל ככלל.
- בטווח הארוך יהיו מקורות האנרגיה המתחדשים אנרגיה זולה יותר וזמינה יותר, יתרון זה יהיה מובהק יותר ויותר ככל שהטכנולוגיה ויעילות ההפקה תשתפר.
- גידול במספר מקורות האנרגיה בישראל, תיצור תחרות על צרכנים (אזרחים), התחרות תוביל לשיפור השירות המוענק לאזרח ולהורדת מחירים.
- הקמת מתקני הפקת חשמל יהוו כמו כל מפעל חשוב אחר בישראל, מוקד לתעסוקה ומוקד לפריחה כלכלית סביבו, בתי עסק נלווים, נותני שירותים וכדומה.

### 2.2.4 תועלות בהיבטים חברתיים :

- צדק אקולוגי- בעצם נובע מתוך גישה אנתרופוצנטרית. בעצם אסכולה זו מדברת על שימוש של האדם במשאבי הטבע, אך מתוך מודעות, בקרה ודאגה לטבע עצמו ולשימורו.
- צדק סביבתי- חלוקה ראויה של העלויות והתועלות הנוצרות עקב השימוש במשאבי הסביבה בין קבוצות חברתיות (מדינות) ואו קבוצות אוכלוסייה.
- נדרשת בדיקה של פגיעות משניות באזרחים ואיכות הסביבה בהיבטי: הקמת תשתיות להולכת חשמל שעלויות לפגוע באיכות חיי אזרחים בהיבט ויזואלי ובהיבט בריאותי במקרה של תשתיות מתח גבוה, סכנה הנובעת מקרבה למתקנים מסוכנים כמו תחנת כוח גרעינית,

זיהום מקומי כתוצאה מתהליכי בניה מורכבים, ערעור מאזן סביבתי עקב שינוי פני שטח נרחבים בהקמת חוות רוחו חוות סולאריות ועוד (דו"ח וועדת קנדל), (חסון), (גרוסמן, גולדרט, 2012).

### 3. אנרגיה גרעינית

#### 3.1 איך זה עובד? סקירה טכנולוגית כללית

כאשר אנו מתייחסים לתחנת כוח גרעינית, הכוונה היא לתחנה שמטרתה להפיק חשמל באמצעות אנרגיית גרעין. ישנם מספר סוגים של עקרונות פעולה ומבלי להיכנס יותר מדי לפרטים הטכניים הספציפיים שבכל סוג, מדובר על הפקת אנרגיה מתהליך הביקוע, בעזרת האנרגיה אנו מחממים מים לקיטור, הקיטור מניע טורבינות אשר מסובבות גנרטורים המפיקים חשמל.

ישנם תוצרי לוואי בדמות מתכות כבדות ודלק מוקרן לתהליך הפקת החשמל. ישנם 3 עקרונות פעולה לסוגי הכורים השונים, את ההבדלים ביניהם נבחן ע"פ מספר משתנים מרכזיים: כלכלי או לא, כמות פסולת לוואי בטווח קצרארוך ורמת בטיחות. (תיאור 3 עקרונות הפעולה הינו כללי ובא להראות מספר אופציות קיימות ומתפתחות בעלות השלכות רלוונטיות על היתכנות הקמת כור מסוג זה או אחר בישראל והמשמעות הכרוכות בכך.

#### הכורים נבדלים ע"פ ה- "Fuel Cycle" שלהם:

1. **תרמי קונבנציונלי - "Once Through"** - זהו סוג כור המייצר הרבה פסולת לוואי (דלק מוקרן ומתכות כבדות), הוא אינו מבצע שימוש חוזר בדלק שלא נוצל, בעל בטיחות ברמה גבוהה ועלות הקמה נמוכה יחסית.
2. **תרמי רגיל - "Close Cycle"** - ממחזר שימוש בדלק שלא נוצל, בעל תוצרי לוואי בטווח השימוש הקצר פרו- צבאיים ← פלוטוניום, בטוח הארוך מייצר מעט יותר תוצרי לוואי.
3. **"Fast Reactors - "Close Cycle"** - דומים לכור התרמי הרגיל, גם בעלי יכולת מחזור מסוים של דלק שלא נוצל,

אם נסכם את ההבדלים בין שלושת המחזורים, הכור התרמי הקונבנציונלי ("Once Through") בעל יתרונות בהיבטי עלות, בטיחות וחסרון רק בהיבט הפקת פסולת לוואי, לשני הכורים המבוססים על מעגל סגור ישנם יתרונות בהיבטי פסולת בטווח הקצר וחסרונות לעומת הכור התרמי הרגיל בהיבטי עלות ובטיחות.

ע"פ מחקר שבוצע ב- MIT נמצא שהכורים התרמיים הרגילים הם הפתרון הטוב ביותר כרגע בהיבטי עלות נמוכה, ועמידות בסכנות ואירועים חריגים (MIT, THE FUTURE OF NUCLEAR POWER, study).

חלוקה נוספת של סוגי כורים היא על פי אופן הקירור של ליבת הכור, קיימות מספר אופציות ומספר נוסף שאינו קטן הנמצא בשלבי פיתוח ומחקר מתקדמים. הסוגים העיקריים בתחום הינם: כור

"מים קלים" הנפוץ ביותר כיום ואשר גם לו כבר יש גרסאות מתקדמות יותר בפיתוח, כור "מים כבדים", כור מקורר גז- בעל יתרון מרכזי שאינו דורש קרבה למקור מים (זהו אלמנט המהווה חסם שכיח באיתור אתר מתאים להקמת תחנות כוח גרעיניות).

אורך חיים של כור גרעיני הינו ל-40 שנה לערך, הארכת פעילותו של כור והפרוצדורה הכרוכה בכך משתנה בין מדינה למדינה. יש לציין כי הסוכנות לאנרגיה אטומית מהווה גורם תומך ומפקח, אך לא כל כך גורם מכתוב ומעורב אקטיבי. רבות מהמדינות רוצות להאריך את חיי הכורים הקיימים על חשבון הקמת כורים חדשים מהיבטי עלויות, זמן בנייה ועוד (WORLD NUCLEAR INDUSTRY -2012-2013 - STATUS REPORT), (International status and prospects for nuclear power 2012, IAEA).

### 3.2 אנרגיית גרעין – אנרגיה ירוקה

כנראה שלעצם השאלה – "האם אנרגיית גרעין הינה אנרגיה ירוקה? אין תשובה חד משמעית והתשובה טמונה אפוא בהגדרה שבה אנו משתמשים לאנרגיה ירוקה. אם נגע על קצה המזלג בנושא זה ניתן לומר שיש הקובעים מהי אנרגיה ירוקה כאשר על מנת לייצר אותה לא נפלט חומר מזהם, לדוגמא: אנרגיית סולארית הרוטמת את אנרגיית השמש לייצור חשמל, לכאורה ללא פליטת מזהמים. מן הצד השני גורסים כי יש להתייחס לכל מעגל "חיי האנרגיה", זאת אומרת שהפאנלים הסולאריים המפיקים מאנרגיית השמש חשמל עשויים מחומרים שאינם כל כך ידידותיים לסביבה וברי מחזור ושיש לשקלל אותם במאזן "הירוק" כאשר קובעים האם אנרגיה הינה אנרגיה ירוקה או לא.

גם במקרה שלנו הקביעה אינה חד משמעית, לכאורה הפקת חשמל מאנרגיית גרעין הינה הפקה ללא מזהמים כלל, ללא לכלוך וללא פליטת גזי חממה, אך אם ניקח בחשבון את פסולת הלואי הנוצרת לאורך חיי הכור כמו: דלק מוקרן (ספוג בקרינה רדיואקטיבית ומתכות כבדות למיניהן), אזי שה"מאזן הירוק" של האנרגיה הגרעינית יכול להתערער. אסף צוראל במאמרו "הדרך ארוכה לאנרגיה ירוקה" מתייחס גם הוא לאנרגיה הגרעינית בציינו את ייצור החשמל הנקי עד מאוד לצד פסולת לוואי שנוצרת.

נדבך נוסף המעלה את דירוגה של האנרגיה הגרעינית כאנרגיה ירוקה ועליו נדבר עוד בהרחבה בהמשך הוא העובדה שתחנת כוח גרעינית אינה תופסת הרבה שטח, אין מן הנדרש להקצות שטחים של קמ"רים מרובים לטובת התחנה, ואילו לטובת שדה סולארי נדרשת ביעילות ההפקה של ימינו הקצאת שטחים מרובים הפוגעים בנוף ובטבע.

מעצם קיומה של תחנת כוח גרעינית ניתן להפיק תועלות נוספות שאינן שוליות כלל, מעצם פעולת הכור הגרעיני ניתן להפיק מימן באופן קל יחסית, שימושים אפשריים למימן הקיימים כבר קיום בחלק מתחנות הכוח הגרעיניות בעולם הם: שדרוג מאגרי אנרגיה באיכות נמוכה כמו "פצלי נפט", תמיכה בייצור של דלקי ביו-דיזל ושימוש במימן כמקור ירוק להנעת רכבים מונעי מימן. נוסף על ייצור המימן והיתרונות שבכך ניתן להיעזר במתקני התחנה להתפלת מים המאפשר פתרון לקירור תחנה במקומות בהם אין זמינות למים מתוקים בכמות מספקת ומספקת מים מותפלים-מתוקים בפני עצמם לכל שימוש נדרש. ניתן להשליך יישומים נלווים אלו הן לאספקט "הירוק" של תחנת כוח כזו והן לאספקט הכלכלי, יש לזכור שככל שתחנה מסוג זה תהיה רווחית יותר כך יגדלו מקורות המימון לתחנות חדשות ועל כל המשתמע מכך.

על מנת להגיע למסקנה מגובשת בנושא זה נדרש לגבש שיטה לבחינת הנושא ובחינה מדוקדקת על פיה. אך אין זה מעיסוקה של עבודה זו (צוראל, 2010), (אוניברסיטת תל אביב, אנרגיה מתחדשת), (International status and prospects for nuclear power 2012, IAEA).

### 3.3 תאונות והשלכות

בפרק זה נסקור בקצרה מספר אסונות ותאונות שקרו בכורים ותחנות כוח גרעיניות, הסקירה הינה לטובת מתן רקע כללי ותמונת מצב כמו כן ננסה להדגיש גורמים לתקלה באופן כללי ונגזרות רלוונטיות לנושא שלנו אליהן נחזור בפרק שיעסוק בהתאמה לישראל.

*Three miles island* - פנסילבניה, ארה"ב, 1979, עומס חום שנבע מתקלה במערכת הקירור הוביל לפתיחת שסתום אוטומטי - המיועד לשחרור לחץ קיטור עודף. השסתום אמור היה להיפתח אוטומטית וגם להיסגר אוטומטית מה שלא קרה וגרם בהמשך לדליפת מים מן הכור, מה שהוביל להתחממות של הכור ולדליפת מים מזוהמים ובהמשך להמסת ליבת הכור. מערכת קירור חירום שהופעלה עוד בשלב נזילת המים כובתה על ידי מפעיל (טעות אנוש) כתוצאה מההתראה שגוייה שהופיעה במערכת. מספר גזים רדיואקטיביים נפלטו לאטמוספירה, אך בכמות מועטה ורובם כאלו שאינם רעילים לאדם (ויקיפדיה, אי שלושת המיליון).

*צ'רנוביל* - האסון בצ'רנוביל התרחש בשנת 1986, במהלך תרגול של עובדי הכור תרחיש "עבודה במקרה של אי-אספקת חשמל לכור", כתוצאה מתפעול לא נכון, נהלי עבודה ותדרוך לקויים התחממה ליבת הכור, לחץ הקיטור העודף גרם לפיצוץ גג הכור שלא הייתה מבוטנת ובעלת שכבה כפולה כנהוג בכורים מערביים, מה שגרם לשחרור של נשורת רדיואקטיבית לאזור נרחב באוקראינה (ויקיפדיה, אסון צ'רנוביל).

*פוקושימה* - 2011, יפן, כתוצאה מרעידת אדמה חזקה באזור מפסיקה מערכת אוטומטית את פעולת הכורים. רעידת האדמה פוגעת בחיבור הכור לרשת החשמל המקומית מה שגורם למערכת אוטומטית להפעיל את גנרטור (רבים) החירום של הכור האחראים לספק חשמל למערכות הקירור והחירום בעת משבר. צונאמי שהתלווה לרעידת האדמה מציף את חדרי הגנרטורים וגורם להשבתתם, לאורך מספר ימים ללא קירור של הכורים מומסות ליבות חלק מהכורים וגורמות לפיצוץ משנה ולפליטה של נשורת רדיו-אקטיבית (ויקיפדיה, האסון הגרעיני בפוקושימה).

כאשר אנו מדברים על אסון גרעיני אנו בעיקר מתמקדים בהשפעות המקומיות, זאת אומרת מי ייפגע מקרינה, מה נהרס, מה נשבר, ואיזה אזור אינו מקבל חשמל. כל אלו הן השפעות מהותיות וחשובות עד מאוד שיש לקחת בחשבון במקרה של תקלה, אך לא פחות ואולי אף יותר יש לקחת בחשבון את ההשפעות ברמת המאקרו: כיצד זה עלול להשפיע בזירה בפוליטית ביטחונית, כיצד זה ישפיע על הכלכלה, על הרצון של אנשים לקנות מוצרים שהגיעו מישראל (האם הם חשופים לקרינה), עלייה של פרמיות של חברות ביטוח לאנשים המתגוררים ברדיוסים קרובים לאזור האסון, תחלואה עתידית והוצאות משרד הבריאות לתמיכה וסיוע לחולים קיימים ועתידיים.

לסיכום חלק זה, ניתן לראות שנסיונות ותקלות מסוגים שונים הובילו לאורך השנים לתקלות חמורות בכורים גרעיניים, כמובן שישנן רבות נוספות של תקלות עליהן לא פירטנו. ניתן לראות שאסון טבע גורם לתקלה, חוסר במיגון מספק מחמיר נזקים, טעות אנוש, בקרה לקויה ועוד. עלינו ללמוד ולהשכיל שכור גרעיני לצד רמת הבטיחות הגבוהה והבקרה שלו בפרט ובדורות 3 ו-4 בפרט הינו מערכת מורכבת מאוד וככל מערכת מורכבת כמספר הרכיבים כך מספר נקודות הכשל האפשריות ועל כן בבחינתנו



את התאמת הסוגיה לישראל, אל לנו להתעלם מן הסיכון הקיים בכך ומן הנסיבות הרבות והמשונות שעלולות להוביל לאסון ולא פחות למשמעויות המתבקשות ברמה המקומית ואולי אף יותר למשמעויות הלא ישירות במאקרו הלאומי והבין לאומי (ויקיפדיה, אי שלושת המילין), (ויקיפדיה, אסון צרנוביל), (ויקיפדיה, האסון הגרעיני בפוקושימה), (דורון, 2011), (WORLD NUCLEAR INDUSTRY STATUS REPORT).

## 4. צרכים, מגבלות ובטיחות במאקרו ותכלס בישראל

### 4.1 דעת קהל

כאשר מתייחסים להקמת תחנת כוח גרעינית ככלל ובישראל בפרט או בעצם בכל מהלך משמעותי בהיבטי תקציב, טכנולוגיה, משמעויות ועוד יש לקחת בחשבון את דעת הקהל. דעת הקהל במקרים אלו היא המעצבת, משנה ו"מקבלת החלטות" מעין אלו. במדינה כמו ישראל החלטה מעין זו הינה החלטה פוליטית לא פחות מהחלטה כלכלית, טכנית, ביטחונית או כל אספקט נוסף אחר.

במדינה כמו ישראל, בה קיימת תרבות של הבעת דעה וחשיפה מקסימלית או מינימלית של מידע בפני הציבור, החלטה מעין זו של הקמת תחנת כוח גרעינית בישראל תושפע רבות מדעת הקהל הישראלית. מנגד יש לזכור, שאת דעת הקהל הישראלי בנושא גרעין כמו גם את דעת הקהל הישראלי בנושאים אחרים ניתן לעצב ולהכווין, זאת דרך שימוש בהסברה, חשיפה של מידע, שיתוף וכדומה. דעת הקהל הינה רק משתנה אחד על פיו יוחלט להקים או לא תחנת כוח גרעינית בישראל, משתנה המושפע ממגוון גורמים ואספקטים. יש לומר כי לא כל שיקול משפיע על דעת הקהל של כלל האזרחים באותה עוצמה.

### 4.2 תוצרי לוואי ופסולת של תחנה גרעינית

לתחנות כוח גרעיניות יש פסולת וחומרים עודפים לאורך חיי הכור. סוג וכמות החומרים משתנה מעט על פי סוג "מחזור הדלק" בכל כור, אך ההתייחסות ככלל הינה דומה. ככלל נתייחס ונאמר שכמות הפסולת הנוצרת במהלך ייצור יחידת חשמל אחת בכור גרעיני הינה קטנה מאות ואלפי מונים מכמות הפסולת הרעילה הנוצרת ייצור של אותה יחידת חשמל על ידי תחנת כוח פחמית לדוגמא.

ככלל אם נחלק את כל המערכת סביב הכור נוכל לזהות 3 מודולים מרכזיים: מתקן להעשרת אורניום ברמה נמוכה אותו דורש כל כור, הכור עצמו ומערכת למחזור וטיפול בפסולת/חומרי לוואי מתהליך הפקת החשמל. מן הפן הצבאי מתקנים המעשירים פלוטוניום בדירוג נמוך שאינו מיועד ומתאים לשימוש צבאי, אך באזורי עימות גם זו אופציה ויש הרואים בהקמת מתקן שכזה חיסרון גדול.

#### פסולת המופקת מהכור ניתן לחלק למספר קטגוריות:

פסולת בדירוג נמוך- זוהי פסולת המופקת גם על ידי בתי חולים ומעבדות, כדוגמת מגבונים, וציוד בעל רמת קרינה נמוכה מאוד שאינה מסוכנת לאדם ושאינה נשארת לאורך זמן. פסולת בדירוג בינוני- זוהי פסולת בעלת רמה גבוהה יותר של קרינה רדיו אקטיבית- בדרך כלל נוזלים ולא מוצקים.

פסולת בדירוג גבוה- נוצרת משריפת האורניום, רעיל ורדיו-אקטיבי ביותר, דורש קירור ואחסנה ייעודית ממוגנת, כולל דלק משומש שנשרף וחלקיקי אורניום של נשרפו, בעל אורך חיים ארוך, ככלל נהוג לומר "כלל אצבע" שכעבור 40 שנים לערך מגיעה הפסולת בדירוג גבוה לרמת רדיו-אקטיביות כזו המאפשר טיפול ופירוק כמעט מוחלט. חשוב לציין שנכון להיום אין בעולם מתקן בעל הטכנולוגיה הנדרשת על מנת לפרק באופן מלא פסולת בדירוג גבוה וזוהי סוגיה, שתהווה חסם הולך וגדל ככל שיתרבו הכורים בעולם וכמות הפסולת בדירוג גבוה תגדל.

אז איך מתמודדים עם פסולת בדירוג גבוה: ההתמודדות מחלוקת לשתיים, הראשונה הינה אחסנה בבריכות אחסנה שעל פי רוב נמצאות בשטח הכור שם נמצא המיגון והפיקוח הנדרש לאחסנה

ראויה של חומרים כאלו, בהיבט המחזור בעצם נעשית הפרדה של האורניום והפלוטוניום הניתנים לשימוש חוזר בכור והשאר הולך גם הוא לאחסון. האחסון מתבצע על פי רוב או בכורים עצמם או במקומות הטמנה הדורשים טכנולוגיה גבוהה, פיקוח ובקרה. כל אלו ועוד מעידים על עלויות רבות הכרוכות רק בטיפול בפסולת מתפעול הכור (אסכולאי, 2009), (International status and prospects for nuclear power 2012, IAEA), (WNA, 2013).

#### 4.3 הקמת תשתיות

המרחק בין שיבטה (האתר המיועד להקמתה של תחנת כוח גרעינית) לתל אביב הינו יותר מ-150 ק"מ. הקמה של תחנת כוח מכל סוג תדרוש הערכות בהיבט חיבורה לרשת החשמל הארצית, במקרה זה אם תוקם תחנת כוח גרעינית תידרש הקמת תשתית לאורך המדינה לחיבור עם התשתית הקיימת. להקמת כבלי מתח גבוה מוטמנים באדמה או תלויים מעמודים ישנן מספר השפעות: היבט איכות הסביבה-נוף, העברת כבלים שיכערו את הטבע ויפיעו אל מול מרפסותיהם של אנשים, תפגע באיכות חייהם ויש שאומרים אף בזכות הקניין שלהם (ירידה בערך הנכסים שבסמוך אליהם יעברו הכבלים). היבט נוסף הוא השראה מגנטית הנוצרת מכבלים בהם עובר מתח גבוה, תופעה זו יש לקחת בחשבון ולבדוק בהיבט מיקום הכבלים, הסכנות, השפעתם על בעלי החיים, הצומח ובני האדם. ככלל הקמת תשתית מסוג זה שתחבר מתקן יחסית מרוחק בצפון הנגב למדינת ישראל תדרוש השקעה כלכלית לא מעטה לבניית התשתית עצמה והן לוודא תשתית באיכות שתהיה מתאימה והולמת את התלות שסביר שתפתח סביר תחנת כוח מסוג זה שצפויה להוות מקור חשמל מרכזי בישראל אם וכשתוקם (דו"ח וועדת קנדל).

תשתיות נוספות שיידרשו להיות מוקמות הינן תשתית להעשרת פלוטוניום, ותשתית לאחסנת תוצרי הלואי של התחנה. בפרק המתייחס לפסולת המופקת מהכורים הראינו את דירוגי הפסולת השונים ונגענו במורכבות הטיפול והאחסנה שלהם. הקמה של תשתיות אלו בארץ יובילו לעלות כלכלית מוגדלת, לגורמי סיכון נוספים לאזרחים ולסביבה.

#### 4.4 חידושים קיימים ופיתוחים עתידיים ברי-ביצוע

הבנייה של כורים חדשים כיום מסתמכת גם על הטכנולוגיה והשיטה המקורית אתה החלו להקים תחנות כוח גרעיניות לראשונה, אך דגש רב ניתן כיום למספר פרמטרים: אורך חיים של 60 שנה ויותר, אחזקה פשוטה ובאינטרוולים גדולים ככל האפשר, אחזקה שתאפשר ללא השבת של הכור, בנייה פשוטה ומהירה יותר, יישום דגשי בטיחות כבר משלב התכנון, בנייה פשוטה יותר עם דגש על צמצום בחלקים נעים ומסתובבים, הוספה של ציוד לטיפול במקרי חירום.

חידוש התופס תאוצה כיום הוא בנייה של כורים קטנים (SMRs-small and medium sized reactors), כורים אלו מתאימים למדינות להן יש קושי תקציבי לעמוד בתהליך הקמה ארוך ויקר של כור גדול. בעולם כיום כבר מדובר על שינוע של כור קטן שלם ממקום הבנייה שלו למקום ההצבה שלו על מנת להתמודד עם קשיי בנייה והקמה במדינות מתפתחות ובאזורים מרוחקים.

#### 4.5 תמהיל אנרגיה ועצמאות אנרגטית

סעיף זה המתקשר למשק החשמל בישראל, מבטא את היתרונות הרבים והמובהקים שבגיוון תמהיל מקורות האנרגיה של ישראל ובמעבר למצב של צמצום התלות במשאבים חיצוניים. בפרק זה נסקור יתרונות אלו מעט יותר בהרחבה מתוקף היותם רלוונטיים גם לתחנת כוח גרעינית כמקור אנרגיה פוטנציאלי בישראל.

נתחיל בתמהיל האנרגיה, בישראל כיום מפיקים חשמל מ-5 מקורות שונים, כאשר מעל 90 אחוז מהם נובע מגז ופחם והשאר מאנרגיות מתחדשות למיניהן (רוח, שמש ועוד), ביצירת גיוון הכוונה היא להוספת אלטרנטיבה שתוכל גם ברמת הכדאיות הכלכלית וגם ברמת היעילות והזמינות להוות חלופה ומתחרה לגז ולפחם ולקחת על עצמה אחוז נכבד ממשק החשמל. גיוון זה יבזר את הסיכון, זאת אומרת שבמידה של תקלה באספקת גז למדינת ישראל יהיו חלופות בהיקף לא קטן שיוכלו להחזיק חלק משמעותי מהמדינה ולא ייגרמו לקריסה כוללת. ריבוי מקורות כמו ריבוי מתחרים ייצור תחרות, הורדת מחירים ושיפור התנאים לצרכן (האזרח).

בנוגע לעצמאות אנרגטית, אם ניקח את תחנות הפחם כדוגמא, אזי שתחנות הכוח אכן נמצאות בשטח מדינת ישראל, אך הפעלתן תלויה בייבוא פחם מחוץ למדינת ישראל, מה שמייצר תלות בגורם חיצוני שאין לנו בהכרח השפעה עליו. מנגד תחנת כוח גרעינית הינה משהו עצמאי ביותר, נכון שבשלב ראשוני נידרש לתמיכה וסיוע, אך כחלק ממגמה של יכולת ניהול עצמאית של תחנה מסוג זה. גם בהיבט הפלוטוניום נידרש לקבל החלטה האם להיעזר בשירותי העשרה ואחסנה לאחר התהליך ממדינות "שמעבר לים". השיקולים לכאן או לכאן בהיבט שיקול עצמאות אנרגטית הינו ברור. יש לזכור שגם אם תחליט ישראל להקים את כל המכלולים הנדרשים לתחנת כוח גרעינית, כולל מכלולי העזר והאחסנה, אזי שפלוטוניום הינו משאב שאין בישראל ולעולם נידרש לייבאו בפרוצדורה זו או אחרת, עם זאת בניגוד לתחנה פחמית הדורשת אספקה של הרבה פחם, תחנה גרעינית מייצרת מכל יחידת פלוטוניום כמות רבה עד מאוד של אנרגיה ביחס המאפשר הקמה ברת ביצוע של מאגר פלוטוניום בארץ באופן שיבטיח לפחות זמינות של החומר לכמה עשרות שנים קדימה. ללא ספק זו תהיה תלות מצומצמת למדי לעומת תלות בייבוא פחם בהיבט הכמויות הנדרשות לעומת חשמל מיוצר (International status and prospects for nuclear power2012, IAEA).

#### 4.6 מודל Build, Own, Operate -BOO

זהו מודל המוקם בתורכיה ובמדינות מסוימות בחצי האי – ערב, מודל זה בעצם מבין את החיסרון של המדינה ביכולתה הטכנולוגית, מקצועית, כוח אדם ועוד לתפעל תחנת כוח מסוג זה, בראש ובראשונה באופן בטיחותי ובנוסף גם באופן יעיל. במודל זה "מעסיקה" המדינה בעצם קבלן חיצוני בעל הידע, בעל המשאבים ובכך אף ממתנת מעט את הסיכון ואת העלות הנלווית בכל בנייה של פרויקט כה מורכב ומתמשך מבחינה כרונולוגית.

הקבלן מקים את התחנה, הוא המספק את כוח האדם המתפעל את התחנה והוא גם הבעלים, כך שקיים הסכם עסקי כלשהו בנוגע לרווחים ותשלום בין הקבלן לבין המדינה. מדינות מסוימות רואות התקשרות זו כמעמד ביניים בו המדינה רוכשת את הידע, רוכשת את המתקן (פיזית) מתוך כוונה לתפעל

ולחיות בעלי התחנה בהמשך הדרך לכשתהיה מוכנות לכך בכל האספקטים. בישראל ייתכן ופתרון זה יהיה מתאים, מכיוון שניסיונו בתחום נובע רק מהתחום הצבאי שאינו זהה לתחום זה. בכלל בישראל ישנו חוסר בכוח אדם מיומן בתחום זה ובתחום הפיננסי בהחלט שישראל לא בעלת תקציב עודף משום סוג. החיסרון בנקיטה בשיטה זו בישראל, היא יצירת התלות במדינה נוספת וואו בחברה פרטית שאינה ישראלית, זוהי תלות שעל אף היותה זמנית (אם כי במודל BOO מדובר על מספר שנים טובות לפחות) עלולה להפוך למסוכנת לאור המצב הגיעו-פוליטי הבעייתי של ישראל והמתרחש בזירה הבינלאומית) (Starez).

#### 4.7 גרעין-תדמית שלילית- "קונספירציה"

לאור מצבה הגיאוגרפית של ישראל בזירה הבינלאומית, קידם פרויקט המשויך לגרעין הינו בעייתי. יש לזכור כי לעיתים רבות יש הבדל גדול בין העובדות לכאורה בתקשורת והפוליטיקה הבינלאומית לבין העובדות בשטח. הרי בוודאי שעיסוק של ישראל בהקמת תחנת כוח גרעינית, שאינה משויכת באף אופן לפן הצבאי של נשק גרעיני בלתי קונבנציונאלי יוביל בעידודם של תקשורת אנטי-ישראלית לעיסוק וקידום נושא הגרעין בישראל למטרות צבאיות תחת מעטה אזרחי של תחנת כוח להפקת חשמל. "שמועה" זו בזירה הבינלאומית עלולה לפגוע בישראל ולערער את עמדתה ומצבה בזירה הבינלאומית. בתזמון הלא נכון מהלך זה עשוי אף להוביל לנזקים של ממש במגעים מסוגים שונים ואף להזיק לקשרים עסקיים סמי-צבאיים (כמו עסקאות נשק, עסקאות ביטחוניות ועוד), אם לסכם סוגיה זו במשפט הרי שהקמת תחנה שכזו דורשת בהחלט בנוסף לכל שאר השיקולים גם תיזמון מוצלח והערכת נכונה ושקולה של ההשפעות האפשריות בזירה הבינלאומית.

#### 4.8 חסם כלכלי

הקמה של תחנת כוח גרעינית הינה השקעה כספית עצומה הנובעת מהמורכבות של המבנה, הסטנדרטיים הגבוהים הנדרשים, זאת אפילו לפני תשתית היקפית נדרשת, השקעה בפיתוח כוח אדם, מנגנוני משנה תומכים וכדומה. בנוסף על העלות הגבוהה, לאור מורכבות הבנייה נדרשת השקעה עצומה, אך התהליך עצמו אורך הרבה זמן והתוצאות מגיעות לאחר תקופה ארוכה ולא מבוטלת כלל. ישראל של היום הינה מדינה בעלת שיקולי תקציב משמעותיים, אין כסף שמונח בצד ומימון פרויקט שכזה יהיה משימה לא פשוטה כלל. תמיד קיימת האופציה של השגת מימון חיצוני אפילו ממדינה אוהדת ותומכת את ישראל כמו ארה"ב. יש לזכור כי במידה וישראל תמצא מימון חיצוני, הרי שבכך יתכן ותיווצר תלות וואו התחייבות מסוג כלשהו לגורם המממן, בנוסף לאור רגישותו של נושא הגרעין ייתכן והשגת מממן חיצוני תהיה לא פשוטה כלל ועל כן מימון פרויקט שכזה גם אחרי שיוחלט שביצועו נידרש ומאושר עשוי להיות חסם של ממש בפני ישראל של היום (Starez).

#### 4.9 כוח אדם ייעודי

תחנות כוח גרעיניות הינן מערכות מורכבות מאוד הדורשות כוח אדם ייעודי מקצועי הן בשלב הבנייה ובשלב התפעול והשגרה ולאחר שהוקמה בפרט. בעולם כיום קיימת מגמה של עזיבה של התחום מה שגורם למצוקה וצורך שאינו מקבל מענה לכוח אדם עובד ומקצועי לתחנות הכוח הגרעיניות והמודולים הנלווים להם.

המצב הינו כה בעייתי עד שגם ארה"ב וגם מדינות ה-OECD הקימו גופים שתפקידם לרכז את ההכשרה והגיוס של אנשים למקצועות הרלוונטיים לעיסוק זה. סוגיה זו מתקשרת גם לסוגיית העצמאות האנרגטית שתיפגע במידה ותהיה לישראל תלות כוח אדם מקצועי מחו"ל, בנוסף הסוגיה הינה חסם בפני עצמו להקמה ותפעול של תחנה מסוג זה, ישראל כמדינה קטנה תתקשה לאתר כוח אדם מתאים וללא ספק תידרש להיערך, לתכנן ולהכשיר במוסדות ובערוצים המתאימים את כוח האדם העתידי שיפעיל וינהל מתקנים אלו (International status and prospects for nuclear power2012, IAEA).

#### 4.10 תדמית "ירוקה"

ישראל כמדינה הנבחנת תחת זכוכית מגדלת בכל צעדיה בתחומים השונים, תוכל לנסות למנף הקמת תחנת כוח גרעינית תחת "מטריית" האנרגיה הירוקה. זאת אומרת שישראל תוכל ולנסות לקדם את האינטרסים שלה בזירה הבינלאומית בעזרת "מנוף" של מדינה המודעת לאיכות הסביבה ופועלת על מנת לצמצם פליטת גזי חממה לאוויר על ידי צמצום הפקת חשמל מדלקים פוסיליים ומעבר לאנרגיה ירוקה (אנרגיה גרעינית).

#### 4.11 איומים ביטחוניים והשלכות כלכליות

בעידן המודרני לאחר אסונות טבע גדולים שהובילו לתאונות בכורים גרעיניים ולצד אסונות כמו "אסון התאומים" והפיגועים במומבאי, מדינות רבות שאינן נמצאות תחת אותו איום ביטחוני מידי כמו ישראל לוקחות בחשבון אסונות טבע ומעשה ידי אדם שעתידיים לבוא וממגנות את הכורים הגרעיניים בהתאמה. ישראל בפרט הנמצאת תחת שלל איומים ביטחוניים אל מול תשתיות אסטרטגיות בשטחה בין השאר תחנות כוח תידרש לבצע ניתוח מקיף ומלא של האיומים הקמים לתחנת כוח גרעינית בשטחה אם תוקם, ההשלכות של התממשות כל איום והסבירות לקיומו. היערכות לשלל אסונות ואיומים הינה אפשרית, אך יש לזכור כי כבכל מקרה שכזה יש לקחת בחשבון פגיעה בתחנה על רקע ביטחוני והשלכות מקרה שכזה לצד העלויות האין סופיות שהיערכות ומיגון לקראת מקרים שכאלו יובילו.

ייתכן ולאחר שתבוצע הערכת מצב מקיפה של כלל האיומים הפוטנציאליים תגלה ישראל כי הסיכון לאסון לאור האיומים וסבירותם אינו סיכון המתקבל על הדעת או שהתכונות לשלל האיומים והמיגון הנדרש הינו כה יקר שאין באפשרותה של ישראל לממן זאת ואו גם אם האפשרות למימון מתאים קיימת אזי שיתכן והיא תהפוך את התחנה ללא רווחית לתקופה "ראשונה" כה ארוכה, שלא תאפשר הקמה בפועל של התחנה ומימונה (International status and prospects for nuclear power2012, IAEA).

#### 4.12 בחירת מיקום

בכל החלטה חשובה המיקום מהווה שחקן מפתח, אם בבחירת אולם חתונות, מקום מגורים ועד למיקום להקמת תחנת הכוח הגרעינית בישראל. החלטה הינה בעייתית לכל מדינה, אך בישראל בפרט לאור גודלה של ישראל ומספר המקומות הפוטנציאליים המצומצם עד מאוד העומד בפני מקבל ההחלטות. בבחירת מיקום יש לקחת קודם כל שיקולים טכניים ובטיחותיים. זאת אומרת במידה ובחרים בכור הדורש כמות מים גדולה וזמינה לקירור, אזי שנדרש להקים את הכור קרבת מאגר מים שכזה, לצד

שיקולים טכניים אלו ישנם שיקולי הבטיחות: רדיוס בטוח ללא מגורים, רדיוס שייפגע במקרה אסון ועוד. הרדיוס "הבטוח" וכל שאר מדדי הבטיחות למיניהם הם כמובן נושא שנמצא על סדר היום באופן שוטף אצל העוסקים בתחום זה, גם זו החלטה בפני עצמה, 2 קילומטר, 5 קילומטר, 20 קילומטר? האם בוחרים להחמיר? או שמא מקלים, מכיוון שאין בנמצא מיקום המאפשר הקמה של תחנה תחת כל תקני הבטיחות המחמירים (טברון ומרואני).

#### 4.13 מאזן אנרגיה אזורי

מדינות ערב הסובבות את ישראל, סובלות כולן הן ממצוקה כלכלית והן ממחסור במקורות וברציפות באספקת חשמל. הקמת תחנה גרעינית בישראל תוכל לספק לישראל את יתירות האנרגיה לספק גם לרשות הפלשתינאית ולמדינות כמו מצריים, ירדן ואף לבנון. אספקה של חשמל לאלו תפעל לטובתה במספר מישורים. הראשון הוא במבחן דעת הקהל העולמית- ישראל תיתפס כהומנית וכהוגנת. השני- אספקת חשמל למקומות אלו תאפשר יציבות ועלייה ברמת החיים, עלייה ברמת החיים תעלה את רמת ההשכלה ותקטין את יכולת הגיוס של פעילים על ידי ארגוני הטרור על בסיס ניצול מצוקה כלכלית והצעת הטבות להם ולמשפחות. היתרון השלישי הינו ברמה הטקטית והאסטרטגית- העובדה שישראל תספק חשמל למדינות אלו תיצור עם הזמן תלות מצד מדינות אלו באספקה מישראל אם מרצון ואם לאו, מצב זה יאפשר לישראל לשלב מצב זה בהתנהלות במשאים ומתנים למיניהם והן "לסגור את השאלתר" כאשר נדרשת פעולה טקטית-צבאית.

#### 4.14 מוכנות לעתיד- "לפני שיהיה מאוחר"

סוגיה זו הינה יותר סוגיה אסטרטגית אותה יידרש מקבל ההחלטות לקחת בחשבון (כך אנו מקווים). הכוונה היא לכך שכיום אנו אכן מודעים לכך שמקורות האנרגיה הולכים ואוזלים, אך ברמה היום יומית עדיין אין מחסור במקורות אנרגיה לחשמל. כניסה לעולם של חשמל גרעיני על ידי ישראל תאפשר לה להיות מוכנה ובשלה ולא בוסרית לקראת "יום הדין" בו תהפוך המצוקה לחומרי גלם לייצור חשמל לכה גדולה עד שלא יהיה לכל דורש וואו לחילופין שהמחירים ירקיעו שחקים ולא כל מדינה תוכל להרשות לעצמה רכישת משאבים אלו.

#### 4.15 פרובוקציה-NPT

האמנה למניעת נשק גרעיני, אמנה עולמית עליה חתומות כל מדינות העולם פרט ל: הודו, פקיסטאן, ישראל, דרום סודאן וצפון קוראה. האמנה באופן כללי קוראת לפיתוח גרעין לצורכי שלום ולצמצום מחסני נשק גרעיני. ישראל כמדיניות שומרת לארוך השנים על עמימות בנושא תכנית הגרעין שלה. יש לקחת בחשבון שעובדה זו תקשה על ישראל בכל המישורים בהיבט הבינלאומי. ההיבט הבינלאומי יכלול את דעת הקהל, סיוע טכני וכוח אדם ממדינות בעל ניסיון וידע בתחום וכדומה. ייתכן ומהלך שכזה לאור אי החתימה של ישראל אף יגרור גינוי מצד מדינות מערביות שבדרך כלל אוהדות את ישראל וואו בוחרות שלא להביע דעתן באופן ישיר וגלוי על ישראל בהקשר של נושא הגרעין (ויקיפדיה- אמנת NPT).

## 5. סיכום חלק ראשון – בשאלת התאמתה של תחנת כוח גרעינית לישראל

אם ננסה לסכם עבודה זו ולענות על השאלה "האם תחנת כוח גרעינית הינה פתרון הולם ומתאים לישראל?" נגלה תשובה מורכבת ומסועפת. זוהי סוגיה הדורשת לצד הבנה מקצועית והכרעות מקצועיות גם קבלת החלטות ברמה האסטרטגית והמדינית בה הדברים מובהקים הרבה פחות לעומת העולם המקצועי. לאורך כל העבודה גם בפרקים שעסקו ברקע הכלכלי והטכני אוזכרו נקודות בעלות חשיבות ומשמעות לסוגיה שעל הפרק. כתבנו עבודה זו מתוך כוונה שתהווה מעין תקציר וקו מנחה לתהליך הנדרש להתבצע על ידי מקבל החלטות בסיוע גורמים מקצועיים במסגרת ההכרעה בשאלת הקמת תחנת גרעינית בישראל. פרק מספר 2 (2.0 רקע) מראה תוך ניתוח מגמות צריכת האנרגיה בישראל וניתוח הפיתוחים הטכנולוגיים כי ללא ספק נדרש פתרון. פתרון שיבטיח מענה לצריכת החשמל העולה ושיהווה מקור אנרגיה אמין, חסכוני וחשוב לא פחות "ירוק". ההבנה של התועלות בתחום האסטרטגי-ביטחוני, סביבתי, כלכלי וחברתי מוליכה באופן מובהק לצורך במציאת פתרון. פתרון שיאפשר את גיוון תמהיל האנרגיה. מקור נוסף שיוכל על כל ההיבטים לשאת בעומס ולהוות אחוז מהותי מאספקת החשמל בישראל.

כמענה אפשרי לצורך זה העולה ומוסבר כאן לעיל בחנו את סוגיית תחנת הכוח הגרעינית. בפרק מספר 3 (3.0 אנרגיה גרעינית) הבאנו סקירה כללית, אך מקיפה של עיקרון הפעולה של תחנה גרעינית והוריאציות הטכנולוגיות לכורים שונים עם שימת דגש על סוג טכנולוגיית הקירור בה משתמשים, סוגיה המהווה מאפיין מרכזי בכור ובעל השלכות משמעותיות על היבטיה השונים של השיקולים בהקמת תחנה גרעינית. ניתן לראות שלצורך בזמינות התחנה למקור מים בישראל, קיימים פתרונות המאפשרים הקמת תחנה גם באזור שיבטה (המרוחק ממקורות מים זמינים), פתרונות כמו כור מקורר גז הינו פתרון מתאים לסוגיה זו.

להלן סיכום השיקולים הרלוונטיים בראשי פרקים: דעת קהל – על אף העוצמה הרבה של משתנה זה ודעת הקהל שנעה כעת ברובה בין התנגדות לניטרליות, מסתמן שעם הסברה נכונה וחשיפה נכונה ניתן לנטרל גורם זה ואף ליצור אהדה לפרויקט מסוג זה. תוצרי לוואי ופסולת של תחנה גרעינית – מסתמן שהבעייתיות מתמקדת בפסולת בדירוג גבוה ושהפתרון היחידי הקיים כרגע הינו הטמנה, ייתכן ופתרון של ייצוא הפסולת הינו פתרון מתאים לישראל לצד מחקר טכנולוגי ובדיקת היתכנות לאתר הטמנה בישראל. הקמת תשתיות – על אף המרחק הגדול משבטה למרכז, קיימת יכולת להקמת תשתיות מתאימות ואף כאלו שימזערו את הנזקים הוויזואליים הכרוכים בכך, נדרשת מעורבות גורמים ירוקים להפיכת התשתיות לידידותיות לסביבה, לצד בדיקת משמעותיות כלכליות של הקמת תשתיות נוספות. תמהיל אנרגיה ועצמאות אנרגטית – ללא ספק הקמת תחנה בשטח ישראל יאפשר קפיצת מדרגה משמעותית מאוד לקראת עצמאות אנרגטית של ישראל וצמצום התלות וואו מוכנות למקרה של נזק במקור הפקה קיים כמו גז ועוד. BOO – על אף הקושי באיתור כוח אדם וחוסר הידע לכאורה בישראל בנושא זה, נראה שלאור הידע הקיים בתחום הנשק הגרעיני בישראל מודל זה אינו טוב לישראל, עקב התלות הנוצרת בגורם. עם זאת יש לקחת בחשבון היבטי מימון שבמידה ולא יימצא להם פתרון יכול להיות וזהו הפתרון היחידי שיאפשר לישראל להקים כור בשטחה. "גרעין" – תדמית שלילית – "קונספירציה" – גם נושא זה הינו חסם משמעותי, יש לנתחו ולפתחו בשני מישורים: האחד, בחירת תיזמון מוצלח בזירה העולמית המלווה בהסברה מקדימה ומלווה בהמשך הדרך. השני, ניתוח התועלות שייצמחו לישראל לצד הפגיעה התדמיתית



לכאורה. **חסם כלכלי**- העלויות הגבוהות של פרויקט זה יכולות לקבל מענה על ידי שימוש במודל BOO, בהם גורם חיצוני יישא בעלויות במסגרת עסקה כוללת, אך זוהי אינה המלצתנו לאור התלות הגבוהה שנוצרת בהסכם זה. ישראל תידרש לגייס סכום גבוה בשאיפה מארה"ב וואו מגורם עסקי פרטי ובמשיכה מייתרות התקציב השנתי מהשנים הבאות במקביל לפריסה לאורך זמן. **תדמית ירוקה**- בהחלט מנוף רציני לישראל גם בהיבט איכות הסביבה וגם כמנוף תדמיתי. **איומים ביטחוניים והשלכות כלכליות**- גם בנושא זה נדרש ניתוח מעמיק יותר של סיכונים, סבירותם והעלות הנדרשת להתמודדות עימם. כל זאת על מנת להבין האם יש ביכולתנו להתמודד באופן סביר עם הסיכונים הנובעים מהמצב הגיאוגרפי-פוליטי של ישראל. ככלל ניתן לומר שברמה הטכנית ניתן להתמודד עם הסיכונים והאיומים הרלוונטיים, אך יש לבדוק משמעותיות היקפיות וכלכליות. **מיקום**- הטכנולוגיות החדשות של קירור כורים כמו גז מאפשרות הקמת כור רחוק מגורם מים מה שמאשר היתכנות להקמה באזור שיבטה, את טווחי הביטחון מאזורי המגורים יש לבדוק באופן רחב יותר. **מאזן אנרגיה אזורי**- ללא ספק אספקת חשמל למצריים ולרשות הפלשתינאית תאפשר עלייה ברמת החיים, תוריד את העוינות כלפינו ובד בבד תאפשר הורדת השאלטר בהתאם לשיקולים צבאיים-טקטיים ואף אסטרטגיים-מדיניים.

לדעתנו, לאחר הסקירה שלעיל המענה לשאלה זו אינו חד משמעי. נדרשת בחינה מעמיקה יותר של מספר נושאים על מנת להבין באופן מלא וארוך טווח את המשמעות של הקמה של תחנת כוח גרעינית בשטחה של ישראל. ניתן לראות שישנם חסרונות מובהקים כמו התמודדות עם פסולת בדירוג גבוה והסכנה שבאסון, אך מנגד ישנם יתרונות מובהקים כמו אפס פליטות של גזי חממה, הוזלת מחירי החשמל ועוד. אם ננסה למקד את המשך התחקיר הנדרש על מנת לענות באופן מלא יותר על שאלה זו הרי שנדרש לבדוק את נושא מיגון הכור אל מול איומים ביטחוניים וההשלכות הכלכליות לכך. נושא נוסף הדורש בדיקה הינו התמודדות עם פסול בדירוג גבוה (ייצוא, הטמנה ועוד), בנוסף נדרשת הערכת סיכונים כוללת של תחנה גרעינית בישראל בהיבטי תקלות ואסונות טבע שונים.

בסופו של עניין שום החלטה בסדר גודל שכזה אינה חד משמעית לאף צד ואינה פשוטה וברורה. נדרשת הערכת כלל הגורמים, ניתוחם וקבלת החלטה ברמה מדינית-אסטרטגית הנתמכת על עמוד התווך המקצועי לצד עמודי תווך נוספים כמו: איכות הסביבה, מחירי חשמל, פוטנציאל לתקלה ועוד. לדעתנו גדולים היתרונות מהחסרונות ועל כן בסופו של מסמך ארוך זה המבטא שלל נקודות: יתרונות, חסרונות, נקודות לבחינה נוספת ועוד נמליץ להמשיך לבחון ברצינות נושא זה תוך אמירת ביניים: ש"מסתמן שלכאורה זהו בחלט פתרון הולם ומתאים לישראל".

## M.A הרחבה לעבודת גמר לתואר

### 6. כללי

חלק זה מהווה הרחבה של העבודה המקורית לטובת הרחבתה לעבודת גמר לתואר M.A. חלק זה ישיק לפרק 3.2 המדבר על אנרגיית גרעין כאנרגיה ירוקה וירחיב אותו. בנוסף לפרק 4.2 המתיחס לתוצרי לוואי ופסולת של תחנת כוח גרעינית וכמובן ירחיב גם אותו. הפרקים בחלקה הראשון של העבודה יושארו כמו שהם על מנת לשמור על תבנית מסודרת ועל הפורמט המקורי של העבודה. חלק זה ייכתב כחלק נוסף העוסק בתחנת כוח גרעינית והאספקטים ה"ירוקים" הקשורים אליה. מטרתו של חלק זה הינה פשוט ליצור מסמך המכיל מידע מתכלל ומקיף על כלל האספקטים הירוקים של מקור אנרגיה זה. אנסה בעצם לענות עד כמה שאפשר על השאלה כמה ירוקה היא תחנת כוח גרעינית תוך הצגת סקירה של ההיבטים השונים הנוגעים לכך.

### 7. מבוא

חלק זה המתווסף לעבודה המקורית יתמקד בסקירת ובחינת תחנות הכוח גרעיניות מן המשקפיים ה"ירוקים". אבצע סקירה רחבה יותר של סוגי הפסולת השונים הנוצרים לאורך מחזור החיים של תחנת כוח גרעינית והטיפול בהם. בנוסף אסקור את פליטת גזי החממה בשלבי הפעילות השונים של הכור. יש לציין כי על מנת להגיע למסקנות אופרטיביות יש לבצע סקירה השוואתית של מקור אנרגיה זה לעומת מקורות אנרגיה אחרים, סקירה שהפרמטרים ה"ירוקים" הינם רק חלק ממנה. הרחבה זו ועבודה זו כולה תתבצע תוך התמקדות בתחנות כוח גרעיניות בפני עצמן ומטרתה לשמש מצע ידע לקורא ובסיס לתוכנית עבודה מקיפה לבחינת משמעויות של תחנת כוח גרעינית בישראל. הרחבה זו באה להתמקד בפן ה"ירוק" של תחנת כוח גרעינית ומחזור חייה.

עבודה זו תתמקד במספר תחומים הנושקים לתחנת כוח גרעינית ולשאלה עד כמה היא ירוקה? אני אגע בתחום הפסולת והסכנות הסביבתיות הנוצרות מפעולתה של תחנה גרעינית בכל השלבים השונים, החל משלב כריית האורניום ועד לשלב פירוק תחנה גרעינית כאשר הגיעה לסוף חייה בממוצע כעבור 40-60 שנה. בנוסף אסקור את פליטת ה-Co<sub>2</sub> הנובעת מפעולתה של תחנת כוח גרעינית באופן השוואתי למקורות אנרגיה אחרים. אראה פתרונות ופיתוחים בתחום הגרעין הצפויים לשנות את תפיסתנו בנוגע לתחנות כוח גרעיניות ולהגדרתה כמקור אנרגיה מסוג מסוים.

## **8. אנרגיה גרעינית – אנרגיה מקיימת (Sustainable)**

כדי להתייחס לסוגיה זו עלינו לפרט מעט על ההגדרה של אנרגיה מקיימת. אנרגיה מקיימת אינה הגדרה בעלת קריטריונים קשיחים והיא זוכה להגדרות שונות בחוגים שונים ובמחקרים שונים. זוהי הגדרה שמהותה השתנתה לאורך השנים עם העלייה במודעות לאיכות הסביבה ולצד פיתוחים טכנולוגיים שונים. פעם נתפסה הגדרה זו פשוטו כמשמעו כאנרגיה זמינה ביחס לצורך. היום כבר באים לידי ביטוי שיקולי איכות סביבה רבים כמו פליטת גזי חממה ופסולת הנוצרים בתהליך ייצור החשמל ובתהליכים העוטפים אותו. בטיחות הינה אספקט נוסף גם כן. רתימה של מקורות אנרגיה מתחדשים (כאלו שאינם נדלים כמו רוח, ים ועוד) הפכה לאופציה הראויה ביותר בתפיסה של אנרגיה מקיימת. מקורות אלו הינם ראויים הן מבחינת זמינות המקור, בטיחות, כמות זיהום ועלות. האם אנרגיה גרעינית והפקת חשמל ממנה גם כן עולים בקנה אחד עם אמות מידה אלו? כיום מקוטלגת האנרגיה הגרעינית מחוץ להגדרת האנרגיה המתחדשת, אך האם באמת כך הדבר? כיום המקור להפקת אנרגיה גרעינית הינו המחצב אורניום המצוי בשפע בעולם ומחסור בו אינו נראה לעין כרגע, בנוסף על כך ישנם יסודות נוספים העשויים לשמש כמקור להפקת אנרגיה גרעינית כמו טאוריום הנמצא עוד יותר בשפע ולצדו טכנולוגיות מתאימות כמו כורי FNR (Fast Neutron Reactor) עליהם אפרט בהמשך. מידע זה יראה כי ישנם בהחלט טיעונים המצדיקים את הגדרת האנרגיה הגרעינית כאנרגיה מקיימת ולשינוי הגישה העולמית כלפיה.

לסכם, ניתן לראות מהסקירה הקצרה לעיל והטיעונים שבה, עליהם ארחיב בהמשך, כי ישנם טיעונים לכאן ולכאן בהיבט הגדרתה של האנרגיה הגרעינית כאנרגיה מקיימת. חלק מטיעונים אלו הינם תוצאתו של פיתוח טכנולוגי וחלקם הינם תוצאתם של שינויים בתפיסה ותובנות חדשות.

(Johnson, 2014), (Chowdhury, 2012), (World Nuclear Association, 2013).

### **8.1 יתרונות "מקיימים" - עקיפים**

היתרונות והחסרונות הישירים מפעולתה של תחנת כוח גרעינית נסקרו לעיל וייסקרו עוד בהמשך. ישנם יתרונות עקיפים המשפרים את מיתוגה של אנרגיה גרעינית כאנרגיה מקיימת. כאלו התורמים לסביבה ומאפשרים צמצום משמעותי של נזקים הנגרמים מתעשיות אחרות.

תעשיית המימן - סוגים מסוימים של כורים הפועלים בטמפרטורות עבודה גבוהות הינם בעלי יכולת להפיק מימן שעשוי עם הזמן להפוך ל"דלק" של המאה ה-21 ולשמש להנעת מכוניות, יצירת מצברים ועוד ובכך לפצות על המאזן השלילי של תחנת כוח גרעינית הנובע מהפסולת אותה היא מייצרת. על הטיפול בפסולת ארחיב בהמשך, אך יש לציין כי תעשיית החשמל הגרעינית הינה היחידה המטפלת ודואגת לכל הפסולת הנוצרת בתהליך ייצור החשמל מתחילתו ועד סופו. טיעון נוסף להיותה של האנרגיה הגרעינית אנרגיה מקיימת היא פליטת ה-Co2 הנמוכות שלה ביחס למקורות האנרגיה האחרים.

גורם נוסף, גם הוא תורם למאזן "הקיימות" של אנרגיה גרעינית הינו הפקת החום של התחנה. תחנה גרעינית מעצם פעולת מייצרת חום רב, חום זה הוא המחמם מים ההופכים לקיטור המניע את הטורבינות מייצרות החשמל, אבל חום רב הולך לאיבוד ואינו מנוצל. כיום נבחנות אפשרויות לשימוש בחום זה לחימום מים שיוכלו לבתי מגורים לחימום בתים ולחימום מים למקלחות. כמובן שעל מנת

שאספקט זה יהיה ישים וכלכלי על התחנה הגרעינית להיות קרובה מספיק לאזורי המגורים - גורם שילך וישתפר עם הזמן, עם השיפור בבטיחות התחנות ועם השינוי החיובי של טכנולוגיה זו בעיני דעת הקהל.

התפלת מים, גם התפלת מים בפני עצמה הינה תעשייה הדורשת חום רב. הפקת חום רב במתקני ההתפלה דורשת אנרגיה רבה הגורמת לפליטת גזי חממה ומזהמים אחרים לסביבה. רתימת החום העודף מפעולתה של התחנה הגרעינית תאפשר התפלת מים תוך צמצום משמעותי של פליטת גזי החממה מפעולתם של מתקני ההתפלה.

שלושה יישומים עקיפים אלו, ייצור מימן, ניצול חום לחימום בתים ומים והתפלת מים מהווים גורמי חיוביים המשפרים את המאזן הירוק "המקיים" של אנרגיה גרעינית.

(International Status and Prospects for Nuclear Power 2012, IAEA).

## **8.2 חסרונותיה של תחנת כוח גרעינית בהיבט Sustainability**

מאמרו של גושוע פירס, סוקר את הצעדים והשיפורים הנדרשים על מנת שנוכל להתייחס לאנרגיה גרעינית כאנרגיה מקיימת. יש לזכור כי כמו האמור לעיל הגדרתה של אנרגיה כאנרגיה מקיימת אינו משהו קשיח ואחיד וכי ישנן אסכולות ותפיסות שונות להגדרה זו. לדוגמא: בבחינה של כמות פליטת גזי החממה של מקורות אנרגיה שונים, יש המתמייחים רק לשלב בתהליך בו התחנה מפיקה חשמל - במקרה של תחנה גרעינית אין פליטה של גזי חממה כלל ואילו מנגד יש המסתכלים הסתכלות רחבה ופרטנית יותר ולוקחים בחשבון את כמות גזי החממה הרבה מאוד יחסית הנפלטת בתהליך בנייתה של תחנה גרעינית ותהליך הפירוק שלה בסוף חייה.

נתמקד במספר נושאים:

גזי חממה - כאן מתמקד פירס באומרו שאנרגיה גרעינית אינה באמת נטולת גזי חממה ושבביצוע בחינה השוואתית בין מקורות אנרגיה יש לקחת בחשבון את תהליכי הבנייה, תהליכי הפירוק ותהליכים נלווים נוספים כמו שינוע פסולת ועוד. עם זאת הוא אכן מודה כי לאנרגיה גרעינית אכן יש שיעור נמוך יחסית של פליטת גזי חממה.

נזקים חיצוניים - פירס מדבר על נזקים שמקורם בתהליכים הנלווים וההיקפיים ולא הישירים, זאת אומרת הוא מדבר לא על הפסולת הנוצרת בתהליך הפקת החשמל ולא על נזקים פוטנציאליים אחרים מפעילות התחנה עצמה. הוא מדבר על פגיעה במערכות אקולוגיות הנגרמת ממכרות האורניום הרבים המהווים תנאי לפעילותן של תחנות גרעיניות, הוא מדבר על זיהום פוטנציאלי ישיר ועקיף של מי תהום ומקורות מים הנמצאים בסמוך לתחנות. מחקר נוסף שביצע ניסאם אל-חיננאוי, חוקר בכיר ב-IAEA מראה כי בהסתכלות על נזקים סביבתיים הנובעים ממכרות האורניום אכן ישנה סכנה לסביבה עצמה ולמי התהום, אך לדבריו מכרה פחם מייצר זיהום סביבתי רב יותר מאשר מכרה אורניום כאשר שניהם נדרשים לספק לתחנות כוח באותו ההספק. הוא מרחיב לגבי הנשורת הנלווית לכרייה עצמה ומציין כי פעמים רבות נשורת זו שהינה בעלת רמת סיכון נמוכה, אינה מאוחסנת כמו שצריך באזור המכרה והיא נישאת ברוח ובכך נוצרת סכנה ופגיעה אקולוגית לאזורים הסובבים את המכרות, אזורים שאינם מבוקרים, מנוטרים ונלקחים בחשבון בניהול הסיכונים.

בטיחות- הוא מתייחס לאסונות ולתקלות בתחנות עצמן. על אף השיפורים הרבים הן במודעות לבטיחות והן בטכנולוגיה, עדיין קיים סיכון בטיחותי רב בתחנות גרעיניות (כמפורט בחלקה הראשון של העבודה בפרק 3.2).

טיפול ארוך טווח בפסולת- כמפורט לעיל קיימים פתרונות טכנולוגיים לאחסנה של פסולת גרעינית, אך בהסתמך על גידול קיים וגידול פוטנציאלי בכמות התחנות כך תגדל גם כמות הפסולת ויש להבטיח קיומם של מתקני אחסנה ארוכות טווח על כל המשתמע מהם להכיל את הפסולת שתיווצר ולהבטיח מוכנות בהקשר זה לדור הזה ולדורות הבאים.

לסיכום, פירס וחינאווי מעלים נקודות אשר נמצאו להן כבר פתרונות טכנולוגיים חלקיים יותר או פחות, אך אף אחד מהם אינו מושלם. מאמרו של פירס בוחן את האנרגיה הגרעינית כאנרגיה מקיימת יותר מנקודת מבט צרה, זאת אומרת מקור אנרגיה אל מול ההגדרה ופחות באופן השוואתי. בבחינה השוואתית ניתן לראות לצד החסרונות שהוצגו כאן המונעים לכאורה מאנרגיה גרעינית להיחשב כאנרגיה מקיימת גם את היתרונות היחסיים בתחומים מסוימים על מקורות אנרגיה אחרים.

(Pearce, 2012), (El-Hinnawi).

## **9. כור Fast Neutron Reactor -FNR**

כור נויטרונים מהיר הינו פיתוח טכנולוגי חדש הפותר בעיות ודילמות רבות הקשורות לפסולת הנוצרת מהפעלתו של הכור. הכור מציע את האפשרות לשריפה של אחוז גבוה מאוד של פסולת הרדיו אקטיבית בדירוג גבוה הנוצרת בכורים אחרים ומכאן שכמות הפסולת הנוצרת הינה מינימלית עד לא קיימת כלל בכורים מסוג זה. כורים מדור רביעי ברובם מעוצבים בטכנולוגיה זו. בכורים אלו היחס בין האורניום המוכנס לכור לכמות האורניום שנשרפת בפעולת הכור הינה כמעט 1:1.

תהליך הפיתוח של כורים מסוג זה החל כבר לפני מספר עשורים ונדחה, תהליך זה החל בתחילתו מתוך רצון לתת מענה לחוסר במחצב אורניום בעולם, אך משהתברר כי יסוד זה נמצא בשפע ולא צפוי להיות חסר בעשרות שנים הקרובות נזנח המחקר. מחקר זה חזר לכותרות בשנים האחרונות כשעולם הקיימות ואיכות הסביבה הפך להיות שיקול מרכזי בבחירת מקורות אנרגיה. יכולתו של הכור לצמצם במאות אחוזים את כמות הפסולת הרדיואקטיבית הנוצרת ממנו המהווה שיקול מרכזי בהקמתן של תחנות כוח גרעיניות מהווה פריצת דרך ושינוי מצב משמעותי מאוד.

בנוסף, ישנה אפשרות הנבדקת בימים אלו בנוגע ליכולת ל"שריפת" פלוטוניום מועשר – עודף מהתעשייה הביטחונית. בעצם ייתכן וכורי נויטרונים מהירים יאפשרו להיפתר מפלוטוניום מועשר בדירוג צבאי המהווה בעיה בפני עצמה בימים אלו.

(World Nuclear Association, 2014).

## 10. פסולת רדיו אקטיבית- הגדרות וטיפול

פרק 4.2 התייחס לפסולת הרדיואקטיבית הנוצרת מפעולתה של תחנת כוח גרעינית על פי שלושת הדירוגים: גבוה, בינוני ונמוך. חלק זה של העבודה הינו הרחבה של פרק 4.2. הפרק יסקור בהרחבה את קטגוריות הפסולת ואת שלבי הטיפול השונים בפסולת וקווים מנחים כללים לטיפול בה.

**הגדרה כללית לפסולת רדיואקטיבית הינה-** כל חומר שהוא רדיואקטיבי בעצמו ו/או שנחשף לקרינה רדיואקטיבית.

**פסולת בדירוג גבוה-** על פי הגדרה זוהי פסולת רדיואקטיבית ברמה כזו הפולטת קרינה המעלה את הטמפרטורה של החומר עצמו ושל סביבתו, שיקולים הנדרשים לקחת בחשבון בשלב אחסון הפסולת.

**פסולת בדירוג בינוני-** זוהי פסולת בעלת רמת רדיואקטיביות גבוהה מהדירוג הנמוך, אך לא ברמה המייצרת חום להעלאת הטמפרטורה של עצמה וסביבתה בדומה לפסולת בדירוג גבוה, הטיפול בה עדיין דורש מיגון ומתקנים מיוחדים. פסולת זו נוצרת בעיקר משלב מחזור הדלק של הכור ומתחזקה במקומות שונים בכור.

**פסולת בדירוג נמוך-** פסולת זו מחולקת ל-2 תת-קטגוריות: בעלות נפח קטן- Low Volume ובעלות נפח גדול- High Volume.

Low Volume - פסולת שיכולה להיזרק לאתרי השלכת פסולת עירוניים שאינם ייעודיים. הסיכון מקרינה רדיואקטיבית הינו כה נמוך שלא נדרש, פיקוח ברגע שהוצאה מאתר הכור.

High Volume - פסולת שנידרש לזרוק לאתרי אחסון ייעודיים. נדרשים פיקוח ובקרה גם לאחר ההוצאה מאתר הכור עצמו.

היחס בין סוגי הפסולת הנוצרת מפעולתה של תחנת כוח גרעינית הינו של כ-90 אחוז מכמות הפסולת בכלל הינה בדירוג נמוך ומתוכה רק 1 אחוז הינו רדיואקטיבי, כ-7 אחוז מסך הפסולת בכלל הינו בדירוג בינוני ומתוכו כ-4 אחוז הינו רדיואקטיבי וכ-3 אחוזים מסך הפסולת בכלל הינו בדירוג גבוה וממנו כ-95 אחוז הינו רדיואקטיבי.

סוג משני נוסף של פסולת הנוצרת הוא האבק הרדיואקטיבי הנוצר במכרות האורניום/טאוריום, העובדים בתחנות אלו כמובן ממוגנים ומנוטרים בהתאמה. האבק הנוצר מקוטלג בדירוג נמוך-בינוני ומטופל במסגרת מערכות הבקרה והבטיחות של המכרות עצמם שכמובן נתונים לפיקוח.

### 10.1 שלבי טיפול בפסולת

**טיפול מקדים - Pretreatment-** זהו הטיפול מיד אחרי היווצרות הפסולת. השלב כולל איסוף, מיון, וייתכן ויכלול שלב ביניים של אחסון באתר הכור עצמו טרם המשך הטיפול. מטרת השלב הזה הוא להפריד את הפסולת לסוגיה ולהפריד פסולת שאינה רדיואקטיבית על מנת לצמצם את כמות הפסולת הדורשת טיפול.

**טיפול- מטרותו של שלב זה הינה צמצום נפח הפסולת.** תהליך זה נעשה על ידי הפיכה למוצק של חלק מן הנוזלים וסינון.

**ייצוב-Conditioning-** מטרותו של שלב זה הינה הפיכת הפסולת למצב בו ניתן יהיה לטפל בה בהיבטי שינוע, העברה ואחסון. שלב זה כולל אחסנה זמנית במתקנים ניידים המאפשרים העברה על גבי משאיות וכדומה.

**אחסנה-** מטרותו של שלב זה הינה לבדוד את הפסולת הרדיואקטיבית ולעזור להגן על הסביבה. אחסנה יכולה להיות תחנתו האחרונה של הפסולת או לחילופין אחסנה זמנית לשנים מספר בהן מתקררת מעט הפסולת ורמת הקרינה יורדת במעט ואז מתאפשר המשך טיפול. האחסנה לסוגיה השונים מתרחשת או באתר הכור עצמו או באתרי אחסנה ייעודיים וזאת כתלות בסוג הפסולת ובאתרים עצמם.

**אחזור- Retrieval-** הבאה והחזרה מחדש של פסולת שכבר אוחסנה לצורך בדיקה או לצורך אחסנה מחדש באתרי אחסון אחרים.

**אחסנה ללא אחזור -** במתקנים מסוימים וסוגי פסולת מסוימים מאוחסנים באופן שלא ניתן יהיה לאחזרם כמו מתקני אחסון תת קרקעיים וכדומה.

(U.S Nuclear Regulatory Commission, 2002), (World Nuclear Association), (HSE, 2007).

## 10.2 אחסנה ארוכת טווח של פסולת רדיואקטיבית

אחרי תהליך הטיפול בפסולת הרדיואקטיבית היא מאוחסנת לטווח ארוך. האחסנה מתרחשת כמובן במתקנים יעודים בשני אופנים מרכזיים: אחסנה יבשה ואחסנה רטובה. יש לזכור כי שני המאפיינים מפניהם אנו נוהרים ושאותם יש לבקר לאורך תהליך האחסנה הם: פליטת הקרינה הרדיואקטיבית ההולכת ויורדת עם השנים, אך מהווה סכנה לאנשים המטפלים בפסולת ובנוסף פליטת חום מהחומר ספוג הקרינה המעלה את הטמפרטורה באזור האחסון ועלולה לגרום להיתוך עצמי ועל כן גם על הטמפרטורה להיות מבוקרת.

אחסנה רטובה- נכון להיום רוב הדלק המשומש מאוחסן בבריכות רטובות, האחסנה קורה בתוך מוטות המאפשרים הגנה ראויה למי שנמצא בסמוך לבריכה, המוטות ובתוכם הדלק המשומש מובלים בתוך צינורות מים מן הכור לאזור האחסנה, כך שתמיד מסופקת הגנה מקרינה.

אחסנה יבשה- שיטת האחסנה היבשה גם כן דורשת בקרה על פליטות קרינה ועל עליית טמפרטורה, בשיטת האחסנה היבשה התחליף למי הבריכה הינו גז אינרטי הנדחס ל"ארונות" בתוכם נמצאים מוטות הדלק. האחסנה בשיטה היבשה הינה פשוטה יותר ודורשת הרבה פחות בקרה וניטור לעומת האחסנה הרטובה.

יש לציין, כי קיימות שיטות וטכנולוגיות מגוונות הן לאחסנה יבשה והן לאחסנה רטובה כמו גם לשלבי הטיפול השונים. כולן כמובן משרתות את אותה המטרה, עם יתרונות וחסרונות משלהן.

(U.S Nuclear Regulatory Commission, 2002).

## 11. פליטת גזי חממה

פליטת גזי חממה הינו נושא אחר המתקשר למידת הקיימות של מקורות אנרגיה, כמות גזי החממה הנפלטים כמובן משתנה בהתאם לשלבים השונים במחזור חיים של מקור האנרגיה- בנייה, תפעול, ופירוק בסוף חיים. ישנם מקורות אנרגיה כמו פחם אשר מירב פליטת גזי החממה מתרחשת בשלב התפעול-ייצור החשמל ואילו מקורות אנרגיה כמו רוח, וגרעין משחררים את מירב גזי החממה בשלבי הבנייה והפירוק. כיום נבחנים מקורות האנרגיה בהסתכלות על כל מחזור החיים שלהם על מנת לאפשר בחינה השוואתית באספקט זה. מחקרים השוואתיים בין מחזור חיים של מקורות אנרגיה של מגוון מקורות כמו: גרעין, פחם, גז טבעי, נפט, סולארי, ביו-מאסה ורוח הראו כי תחנות כוח גרעיניות פלטו משמעותית פחות גזי חממה מגז טבעי, נפט, פחם וסולארי. יש לזכור כי פעמים רבות תהליכי ייצור משניים של חלקים ואו כרייה של חומרי הגלם הם אלו המייצרים פליטות גזי חממה מרובות שכמובן נלקחות בחשבון במחקר זה המוצג כאן (World Nuclear Association, 2011).

### 11.1 מחזור חיים של כור גרעיני בהיבט פליטות CO2

כאשר בוחנים את השלבים לאורך מחזור פעולתה של תחנת כוח גרעינית תחילה נחלק לשני "חלקי-על"- הראשון הוא ה-Frontend- כריית האורניום, הטיפול בנסורת מהכרייה, העשרת ועיבוד האורניום, בנייתו של הכור עצמו והתפעול היומיומי שלו. השני הוא ה-Backend- המחזור בו מטופל הדלק, האחסון, הטיפול ופירוק המפעלים בסוף חייהם.

כרייה, נשורת, העשרה ועיבוד- בתהליכים עתירי אנרגיה אלו, כורים את האורניום מן האדמה, משנעים אותו למתקני העשרה והופכים אותו לאורניום מועשר (לא בדירוג צבאי) מה שמאפשר לו להיות החומר שמניע את הכור.

בניית הכור- כור גרעיני הינו מכלול מורכב מאוד, הדורש השקעה רבה של מתכות שונות וחומרים רבים כמו טונות רבות של בטון, פלסטיק ומתכות רבות אשר כמובן אינן ידידותיות לסביבה. חושב שכור גרעיני ממוצע שנבנה צריך: 170,000 טון בטון, 32,000 טון ברזל, 1300 טון נחושת ועוד כ-200 אלף טון חומרים אחרים.

תפעול הכור- האנרגיה הנדרשת בשלב זה הינה בעיקרה לקירור הכור, כמובן לצד מערכות תמיכה, גיבוי ובטיחות נלוות. כורים כיום צפויים לעבוד בשירות 30-40 שנה כשהכורים מהדור הרביעי המיוצרים בימינו מתוכננים כבר ל-50 שנה ואף יותר.

פירוק הכור- פירוק הכור גם הוא דורש אנרגיה רבה, זאת לצד פסולת ברמות קרינה שונות שחלקה נשארת מסוכנת לאף 50-100 שנה ודורשת אחסון מבוקר ומנוטר.



ללא ספק בהסתכלות על מלוא מחזור החיים של תחנת כוח גרעינית, אזי שזהו אינו מקור נקי מגזי חממה. אף על פי כן זהו מקור שבאופן יחסי למקורות אחרים בהחלט פולט באופן מועט גזי חממה. התיאורים הקצרים של הנעשה בכל שלב באים להדגיש את התהליכים המרכזיים שבמישרין ובעקיפין גורמים לפליטתם של גזי חממה, אפילו אם רק מתוקף שימוש בחשמל המופק בתחנת כוח הפולטת גזי חממה בעצמה.

(Sovacool, 2008).

## **12. שטח תחנה לעומת יחס הפקת אנרגיה**

יתרון נוסף שיש לתחנות כוח גרעינית המעדיף אותה על פני מקורות אנרגיה מתחדשת כמו רוח ושמש הינו השטח הנדרש לתחנה. תחנת כוח גרעינית המפיקה 1800 מגהוואט תדרוש 1.7 מייל רבוע הקטן פי 99 משדה מלא בטורבינות באותו הספק שידרוש 169 מיילים רבועים והקטן פי 12 משדה של קולטים סולאריים באותו הספק שידרוש 21 מיילים רבועים. אין ספק כי הדרישה הקטנה של שטח להפקת חשמל מהווה יתרון, פחות שטח הופך לשטח מסחרי ושטח בנוי, פחות שטח חשוף לחומרים שונים ולהשפעות הבנייה והתיעוש (Entergy).

## **13. סיכום חלק שני בשאלת הקיימות של תחנת כוח גרעינית**

בחלק השני של העבודה, בהרחבתה של העבודה המקורית, ניסיתי להציג ולסקור את השיקולים העיקריים והנושאים שיש לקחת בחשבון כאשר באים לבחון את מידת הקיימות של מקור אנרגיה כמו תחנת כוח גרעינית. עלינו לזכור שסקירה זו ברובה בוצעה תוך בחינת והעלאת נקודות חשובות והסברי תהליכים מרכזיים במחזור חייה של תחנת כוח גרעינית, אך סקירה זו לא בוצעה באופן השוואתי למקורות אנרגיה אחרים. בנוסף, עלינו לזכור שההגדרה של מקור אנרגיה מקיים ואו מתחדש אינה הגדרה קשיחה וכי ישנן אסכולות שונות ודעות שונות לגבי אופייה המדויק של ההגדרה ולגבי מיקומה של אנרגיה גרעינית תחת "משקפיים" הגדרה זו.

אם נסכם את השיקולים והטיעונים התומכים בתפיסתה של אנרגיה גרעינית כאנרגיה מקיימת ואת אלו הפוסלים אותה מהגדרתה כמקור אנרגיה מקיים נוכל להתייחס למספר ראשי פרקים מרכזיים כמתואר בעבודה: #1 פליטות גזי חממה אותן יש לקחת בחשבון הן במחזור הפעולה של תחנה גרעינית החל משלב כריית האורניום ועד לטיפול בחלקי התחנה בסוף חייה וכלה בפליטות גזי החממה העקיפות כמו אלו הנובעות מאספקת חשמל למקורות אחסנה של פסולת רדיו-אקטיבית, הובלה של אורניום ועוד. #2 פסולת רדיו-אקטיבית בדרגות השונות הנובעת מפעילותו של הכור ומהשלים השונים במחזור הפעולה שלו. #3 תועלות עקיפות שניתן להפיק מעצם פעולתו של הכור ובכך לשפר את "מאזן הקיימות שלו" על ידי צמצום פגיעה בסביבה על ידי תעשיות אחרות. זאת בא לידי ביטוי על ידי הפקת מימן לתעשייה, התפלת מים וחימום מים על ידי הכור עצמו בנוסף על הפקת החשמל.

להלן השיקולים הרלוונטיים שהוצגו בעבודה בראשי פרקים: **חסמים לקיימות של אנרגיה גרעינית**- נדרש שיפור וקידום נושא בטיחות, דעת הקהל כלפי מקור אנרגיה זה ושיקולי איכות סביבה. אלו כולם נושאים אותם נדרש לקדם ולבחון על מנת לשפר את מיתוגה של האנרגיה הגרעינית ב"מדרג הקיימות". **יתרונות "מקיימים"** – **עקיפים**- רתימה של פעולתו של הכור לטובת הפקת מימן לתעשייה,

התפלת מים וחימום מים לשימוש בייתי, שלושת אלו ועוד יחסכו באופן עקיף זיהום סביבתי על ידי המפעלים המקוריים שמשקיעים אנרגיה רבה בפעולתם ובנוסף ישפרו את הכלכליות של הכור המהווה חסם בעייתי בפני עצמו לתחום הגרעין. **השפעות סביבתיות חיצוניות**- פעולת התחנה החל משלב כריית האורניום עלולה להשפיע על המערכת האקולוגית, מי התהום וכדומה, הן כתוצאה מזיהום ישיר והן מזיהום עקיף. **כור FNR** - זוהי טכנולוגיה שלא ספק עומדת לשנות את מיצובן של תחנות כוח גרעיניות. טכנולוגיה זו תדע לצמצם משמעותית את הבעיה הגדולה וייתכן אף הכי גדולה של תחנות כוח גרעיניות והיא הפסולת הרדיו-אקטיבית בדירוג גבוה. כור זה יוכל לצמצם משמעותית את הכמות על ידי שיפור התהליך ושדרוגו. **טיפול ארוך טווח בפסולת**- בהיעדר כמות מספקת של מתקני אחסון בטוחים ומבוקרים לאחסנה ארוכת טווח של פסולת גרעינית מהווה חסם ונקודה שלילית בהיבט איכות הסביבה לתחום הגרעין, אך ישנה עלייה במודעות לנושא זה הבאה לידי ביטוי בקידום בניית מתקנים ראויים לצד פיתוח ומחקר לשיפור וייעול האחסנה. **גזי חממה**- פעולתה השוטפת של תחנת כוח גרעינית אינה פולטת גזי חממה, עם זאת כשאנו בוחנים את מלוא מחזור חייה ניתן להבחין בפליטת משמעותית של גזי חממה בשלב בניית התחנה ופירוקה בסוף חייה, עם זאת מחקרים השוואתיים הראו כי עדיין נחשבת הפקת חשמל מתחנה גרעינית לידידותית יותר לסביבה בהיבט פליטות גזי חממה מאשר תחנה פחמית.

לסיכום, אחרי סקירה מפורטת של אספקטים שונים הקשורים להשפעה הסביבתית של תחנת כוח גרעינית. ניתן לומר כי לתחנת כוח גרעינית בהחלט ישנם יתרונות ומאפיינים ישירים ועקיפים המחזקים את מעמדה והגדרתה כ-מקור אנרגיה המיטיב עם הסביבה וניתן לומר "מקיים". מנגד, בהחלט ישנן עדיין סוגיות הדורשות טיפול רב ושיפור, סוגיות אלו הינן לעיתים ברירת המחדל הטובה ביותר בבחינה השוואתית בין מקורות אנרגיה, אך אין זה מוריד מהבעייתיות של אספקטים אלו ומהצורך לשפר ולפתח אותם. סביר שעם העיסוק ההולך וגובר בתחנות כוח גרעיניות סביר שיימצאו פיתוחים ושיפורים טכנולוגיים שיצמצמו את החסרונות הסביבתיים של מקור אנרגיה זה. אף על פי כן, כאשר אנו בוחנים את השאלה כמה "ירוקה" תחנת כוח גרעינית? עלינו לבחון את מקור האנרגיה עצמו ולהכיר את כלל האספקטים הקשורים אליו, אך לא פחות חשוב מכך עלינו לייצר בסיס ומכנה משותף להשוואה בין מקורות האנרגיה. במציאות שלנו כיום לא קיים פיתוח טכנולוגי משנה מצב שישנה את תפיסתנו ואת הצורך באנרגיה זמינה ועל כן הצורך במקור אנרגיה הינו בלתי ניתן לשינוי ומכאן שהבחירה וההסתכלות על מקורות אנרגיה צריכה בסופו של דבר להוביל להבנה והחלטה מהו המקור העדיף כחלק מתמהיל מועדף. קבלת החלטות מושכלת בצורה זו היא שתוביל אותנו למקום אליו אנו מכוונים הן בסוגיית מקורות אנרגיה חלופיים בכלל והן בסוגיה של בחינת רמת ה"קיימות" של תחנת כוח גרעינית בפרט.

#### 14. סיכום עבודה כללי

בסופו של כל אחד משני חלקי העבודה (הראשון- האם תחנת כוח גרעינית מתאימה לישראל?; השני- האם תחנת כוח גרעינית הינה מקור אנרגיה מקיים?) סקרתי וסיכמתי את מכלול הנקודות שהועלו מתוך סקירת ספרות נרחבת. ניכר שגם בשאלת ההתאמה של תחנת כוח גרעינית לישראל וגם בשאלת מידת הקיימות של תחנת כוח גרעינית אין תשובות חד - משמעיות. כתבתי מסמך זה על מנת שיהווה מצע ידע רחב בעל בסיס מקצועי, על מנת שישמש את מקבלי ההחלטות לתכנון מדיניות וליצירת בסיס ידע מספק ורחב מספיק, כך שיוכלו להבין איזה נושאים דורשים בדיקה נוספת ואיזה תהליכים ארוכי טווח יש להתוות על מנת ליצור בסיס ידע רחב מספיק לקבלת החלטות מעין אלו, שהינן ללא ספק ברמה האסטרטגית. ללא ספק, החלק השני הסוקר את מידת הידידותיות של תחנת כוח גרעינית לסביבה מהווה גורם משמעותי מאוד בהחלטה האם ישנה התאמה לישראל ובכלל לעתיד מקור אנרגיה זה. החשיבות בהתאמה הסביבתית של מקור זה אינה טמונה בשאלה האם היא עומדת בהגדרה זו או אחרת, אלא במאפייניה בשטח ובבחינה השוואתית אל מול מקורות אחרים.

לדעתי, אנרגיית גרעין כמקור להפקת חשמל הינו מקור טוב ובר- ביצוע. אני חושב כי הסיכונים הטמונים בתחום זה קטנים לעומת היתרונות. יש להשקיע היום על מנת לבסס יכולות בכל המישורים הקשורים אליה. זאת על מנת שבעוד עשרות שנים כאשר באמת ניתקל במחסור בחומרי גלם לתחנות הכוח הקונבנציונליות, כאשר השפעות הפגיעה האקולוגית יהיו מורגשות ברמה היומיומית וכאשר המודעות אליהן תלך ותגדל, נוכל להשתמש במקור אנרגיה חלופי זה על מנת להמשיך ולקיים את צרכינו.

## 15. ביבליוגרפיה-חלק ראשון- בשאלת התאמתה של תחנת כוח גרעינית לישראל

- אוניברסיטת תל אביב, מחליפים כוח, אנרגיה מתחדשת, עמ' 1-20, נדלה מתוך: [http://www.tau.ac.il/sites/default/files/media\\_server/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5%20%D7%A1%D7%95%D7%A4%D7%99RenewableEnergy.pdf](http://www.tau.ac.il/sites/default/files/media_server/%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5%20%D7%A1%D7%95%D7%A4%D7%99RenewableEnergy.pdf)
- אידלמן, עמיר, יבין, יעל, (2011), פרויקט תחזית קיימות לישראל 2030 - מזדים-קיימות אתמול, היום ומחר- צריכת אנרגיה, מתוך: קיימות 2030, נדלה מתוך: [http://www.kayamut2030.org/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=62&Itemid=](http://www.kayamut2030.org/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=62&Itemid=)
- אסכולאי. אפריים, (2009), בעד ונגד חשמל גרעיני במזרח התיכון, מתוך: מבט עיל, גיליון 118, 8 ביולי 2009, נדלה מתוך: <http://heb.inss.org.il/index.aspx?id=4354&articleid=777>
- גרוסמן. גרשון, גולדרט. טל, (2012), תחנת כוח גרעינית בישראל, סיכום והמלצות דיון פורום אנרגיה של מוסד שמואל נאמן, הטכניון, נדלה מתוך: <http://www.neaman.org.il/Neaman2011/Templates/ShowPage.asp?DBID=1&TMID=581&LNGID=2&FID=646&IID=9688>
- דורון. אלכס, (2011), במדינה מתוקנת מדיניות אנרגיה גרעינית לחשמל נידונה בגלוי, Energinews, נדלה מתוך: <http://www.energianews.com/article.php?id=9943>
- וועדת קנדל- דוח הוועדה לבחינת התועלת הכלכלית של אנרגיות מתחדשות, משרד ראש הממשלה, נדלה מתוך: <http://www.tashtiot.co.il/wp-ontent/uploads/2013/07/%D7%93%D7%95%D7%97-%D7%95%D7%A2%D7%93%D7%AA-%D7%A7%D7%A0%D7%93%D7%9C.pdf>
- ויקיפדיה, אי שלושת המיילין, נדלה בתאריך: 26.05.2014, מתוך: [http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%AA%D7%90%D7%95%D7%A0%D7%AA\\_%D7%90%D7%9%D7%A9%D7%9C%D7%95%D7%A9%D7%AA\\_%D7%94%D7%9E%D7%99%D7%9C%D7%99%D7%9%D7%9](http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%AA%D7%90%D7%95%D7%A0%D7%AA_%D7%90%D7%9%D7%A9%D7%9C%D7%95%D7%A9%D7%AA_%D7%94%D7%9E%D7%99%D7%9C%D7%99%D7%9%D7%9)
- ויקיפדיה, אסון צ'רנוביל, נדלה בתאריך: 26.05.2014, מתוך: [http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%90%D7%A1%D7%95%D7%9F\\_%D7%A6%27%D7%A8%D7%A0%D7%95%D7%91%D7%99%D7%9C](http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%90%D7%A1%D7%95%D7%9F_%D7%A6%27%D7%A8%D7%A0%D7%95%D7%91%D7%99%D7%9C)
- ויקיפדיה, האסון הגרעיני בפוקושימה, נדלה בתאריך: 26.05.2014, מתוך: [http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%94%D7%90%D7%A1%D7%95%D7%9F\\_%D7%94%D7%92%D7%A8%D7%A2%D7%99%D7%A0%D7%99\\_%D7%91%D7%A4%D7%95%D7%A7%D7%95%D7%A9%D7%99%D7%9E%D7%94](http://he.wikipedia.org/wiki/%D7%94%D7%90%D7%A1%D7%95%D7%9F_%D7%94%D7%92%D7%A8%D7%A2%D7%99%D7%A0%D7%99_%D7%91%D7%A4%D7%95%D7%A7%D7%95%D7%A9%D7%99%D7%9E%D7%94)
- ויקיפדיה, NPT, נדלה בתאריך: 20.05.2014, מתוך: <http://he.wikipedia.org/wiki/NPT>

- חסון שלמה, **אתיקה ופוליטיקה סביבתית**, המחלקה לגיאוגרפיה, האוניברסיטה העברית בירושלים, נדלה מתוך: [www.mishkenot.org.il](http://www.mishkenot.org.il)
- טברון. ד, מרואני.ד, **היבטי שילוב תג"ר במשק החשמל**, חברת החשמל לישראל, נדלה מתוך: [...www.neaman.org.il/Neaman2011/userdata/SendFile.asp?DBID=1...2](http://www.neaman.org.il/Neaman2011/userdata/SendFile.asp?DBID=1...2)
- צוראל, אסף, (2010), **הדרך ארוכה לאנרגיה ירוקה**, טכנולוגיות, עמ' 66-72, נדלה מתוך: <http://www.tzurel.co.il/media/articles/%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%94%20%D7%99%D7%A8%D7%95%D7%A7%D7%94.pdf>
- An interdisciplinary MIT study ,**The future of nuclear power** , Downloaded from: <http://web.mit.edu/nuclearpower/>
- **International status and prospects for nuclear power 2012**, IAEA, Downloaded from: <http://www.worldnuclearreport.org/World-Nuclear-Report-2013.html>
- WNA-World Nuclear Association, (2013), **Radioactive Waste Management**, Downloaded from: <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Nuclear-Wastes/Radioactive-Waste-Management/>
- Schneider. Mycle, Froggatt. Anthony, **2012-2013 world nuclear industry status report**, Bulletin of the atomic scientists, Downloaded from: <http://www.worldnuclearreport.org/>
- Starez. Anne, **Alternative Contracting and Ownership of NPPs: Build-OwnOperate/Transfer**, IAEA, Nuclear Energy Department, Downloaded from: <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2011/2011-May-Africa/AlternativeContracting-A.Starz-IAEA.pdf>

## 16. ביבליוגרפיה-חלק שני- בשאלת כמה "ירוקה תחנת כוח גרעינית

- Chowdhury, Navid, (2012), **Is Nuclear Energy Renewable Energy?**, Stanford University, Retrieved at: <http://large.stanford.edu/courses/2012/ph241/chowdhury2/>
- El-Hinnawi, Essam, **Review of the Environmental impact of Nuclear Energy**, IAEA Bulletin, Vol 2.0, No 2, p.32-42, Retrieved at: <http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull202/20205083242.pdf>
- Entergy, **A Comparison: Land Use by Energy Source - Nuclear, Wind and Solar**, Retrieved at: [http://www.entropy-arkansas.com/content/news/docs/AR\\_Nuclear\\_One\\_Land\\_Use.pdf](http://www.entropy-arkansas.com/content/news/docs/AR_Nuclear_One_Land_Use.pdf)
- HSE, (2007), **Fundamentals of the management of radioactive waste**, Retrieved at: <http://www.onr.org.uk/wasteintro.pdf>
- **International status and prospects for nuclear power 2012**, IAEA, Downloaded from: <http://www.worldnuclearreport.org/World-Nuclear-Report-2013.html>
- Johnson, Keith, (2014), **Is nuclear power Renewable Energy?**, Wall Street Journal, Retrieved at: <http://blogs.wsj.com/environmentalcapital/2009/05/21/is-nuclear-power-renewable-energy/>
- Pearce. M, Joshua, (2012), **Limitations of Nuclear Power as a Sustainable Energy Source, Sustainability**, 07 June 2012, Num 6, 1173-1187, Retrieved at: <http://www.mdpi.com/2071-1050/4/6/1173>
- U.S Nuclear Regulatory Commission, (2002), **Radioactive Waste: Production, Storage, Disposal**, Office of Public Affairs, Retrieved at: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/brochures/br0216/r2/br0216r2.pdf>
- World Nuclear Association, **What are nuclear wastes and how are they managed?**, Retrieved at: <http://www.world-nuclear.org/Nuclear-Basics/What-are-nuclear-wastes/>
- World Nuclear Association, (2011), **Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources**, WNA Report, Retrieved at: [http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working\\_Group\\_Reports/comparison\\_of\\_lifecycle.pdf](http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/comparison_of_lifecycle.pdf)
- World Nuclear Association, (2013), **Sustainable Energy**, Retrieved at: <http://www.world-nuclear.org/info/Energy-and-Environment/Sustainable-Energy>

- World Nuclear Association, (2014), **Fast Neutron Reactors**, Retrieved at: <http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Fast-Neutron-Reactors/>
- Sovacool.K, Benjamin, (2008), **Valuing the Greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey**, Energy Policy, National University of Singapore, Retrieved at: [https://www.nirs.org/climate/background/sovacool\\_nuclear\\_ghg.pdf](https://www.nirs.org/climate/background/sovacool_nuclear_ghg.pdf)