

תבנית תבנית תבנית תבנית

חזית החוקר

השפעות שרפת יער על תכונות כימיות ופיזיקליות של קרקע ועל תהליכי נגר וסחף

אסף ענבר^[1], מרקוס לאדו^[2], מרסלו שטרנברג^[3] ומני בן-חור^[4]*

^[1] בית הספר ללימודי הסביבה ע"ש פורטר, אוניברסיטת תל-אביב

^[2] הפקולטה למדעים, אוניברסיטת לה קורוניה, ספרד

^[3] המחלקה לביולוגיה מולקולרית ואקולוגיה של צמחים, אוניברסיטת תל-אביב

^[4] המכון למדעי הקרקע, המים והסביבה, מנהל המחקר החקלאי - מכון וולקני

* meni@volcan.agri.gov.il

תקציר

שָׂרָפוֹת יַעַר יְכוּלוֹת לַגְרוֹם לְשִׁינׁוּיִים בִּיחִסֵּי גַשֵּׁם/נֶגֶר/סַחֲף בְּאִזּוֹר הַשָּׂרָפָה, וְעַל־יְדֵי כֶךְ לַגְרוֹם לְנִזְקִים אֶקוֹלוֹגִיִּים, סְבִיבִתִּים וְהִנְדְּסִיִּים. מִטְרַת הָעֵבֹדָה הַנוֹכַחִית הַיִּיטָה לְבַחֹן אֶת הַהִשְׁפָּעָה שִׁישׁ לְחִשְׁפּוֹת שׁוֹנוֹת שֶׁל קֶרְקַע רִנְדִּזִינָה לְשָׂרָפַת יַעַר, מִבְּחִינַת הַתְּכוּנוֹת הַכִּימִיּוֹת וְהַכִּימִיּוֹת־פִּיזִיקָלִיּוֹת שֶׁל הַקֶּרְקַע, הַמְּבַנָּה שֶׁלָּה וְתֵהִלִּכִי נֶגֶר וְסַחֲף בְּסוּפּוֹת גַּשֵּׁם עוֹקְבוֹת. דְּגִימּוֹת קֶרְקַע נִדְּגָמוּ מִיעַר בִּירִיָּה מֵאִזּוֹר שֶׁנִּשְׂרַף בְּאוֹתָהּ שָׁנָה (קֶרְקַע שֶׁנִּחְשַׁפָּה לְשָׂרָפָה יִשְׂרָאֵל), וּמֵאִזּוֹר שֶׁלֹּא נִשְׂרַף (קֶרְקַע לֹא שְׂרׁוּפָה). חֶלֶק מֵהַקֶּרְקַע שֶׁנִּדְּגָמָה מֵהֵאִזּוֹר שֶׁלֹּא נִשְׂרַף חוֹמָמָה ב־300 מַעֲלוֹת צֶלְזִיּוֹס בְּמִשְׁךְ 8 שְׁעוֹת בְּתַנּוּר (קֶרְקַע שֶׁנִּחְשַׁפָּה לְחוֹם). דְּגִימּוֹת אֵלֶּה הוֹמְטוּ בְּשִׁלוֹשׁ סוּפּוֹת גַּשֵּׁם עוֹקְבוֹת בְּמַדְמָה גַּשֵּׁם לְקִבְעֵת עֵרְכִי חִידוֹר וְשִׁיעוּרֵי סַחֲף. מִתּוֹצֵאוֹת הַנִּיִּסוּי עוֹלָה כִּי בְּקֶרְקַע לֹא שְׂרׁוּפָה חִלּוֹ יִרִידָה בְּעֵרְכִי הַחִידוֹר וְעַלִּיָּה בְּכִמְיּוֹת הַסַּחֲף בְּמַהֲלֵךְ סוּפָה גַּשֵּׁם כְּתוֹצָאָה מֵהֶרֶס תְּלִכִּידִים, מִיִּצִּירַת קְרוֹם בְּפָנֵי הַקֶּרְקַע וּמְעַלִּיָּה בְּשִׁיעוּרֵי הַנֶּגֶר. עֵרְכִי הַחִידוֹר הָיוּ גְבוּהִים יוֹתֵר וְכִמְיּוֹת הַסַּחֲף הָיוּ נִמְוָכוֹת יוֹתֵר בְּקֶרְקַע שֶׁנִּחְשַׁפָּה לְחוֹם וּבְקֶרְקַע שֶׁנִּחְשַׁפָּה לְשָׂרָפָה יִשְׂרָאֵל מֵאִשֶׁר בְּקֶרְקַע הֵלֹא שְׂרׁוּפָה. תּוֹצֵאוֹת אֵלֶּה נִבְעוּ מִכֶּךְ, שֶׁחִשְׁפָּה הַקֶּרְקַע ל־300 מַעֲלוֹת גְּרָמָה לְשִׁינׁוּיִים כִּימִיִּים וּמְבִנִּיִּים בְּתַחמוֹצוֹת הַבְּרָזֵל וְהַאֲלוֹמִינִיּוֹם בְּמִקְטַע הַחֶרְסִיתִי בְּקֶרְקַע, שֶׁהֶעֱלוּ אֶת יִצִּיבוֹת הַתְּלִכִּידִים כִּנְגַד מְכוֹת טִיפּוֹת הַגַּשֵּׁם וְכוּחוֹת הַהִתְפּוֹרְרוֹת (slaking) הַנוֹבְעִים מֵהֶרְטָבָה מֵהִירָה שֶׁל הַקֶּרְקַע. נוֹסֵף עַל כֶּךְ, חִשְׁפָּה הַקֶּרְקַע לְשָׂרָפָה יִשְׂרָאֵל וְלְחוֹם גְּרָמָה לְעַלִּיָּה בְּרִיכוֹז הָאֶלְקֶטְרוֹלִיטִים וְלִירִידָה בְּעֵרְךְ מִנֵּת סְפִיחַת הַנֶּתֶרֶן (SAR) בְּתַמְסִיטָה הַקֶּרְקַע בְּמַהֲלֵךְ הַגַּשֵּׁם. כְּתוֹצָאָה מִכֶּךְ, נִמְנָעוּ פִּיזוֹר (dispersion) חֶלְקִיקֵי הַחֶרְסִית בְּמִים וְהַתְּפַתְחוֹת קְרוֹם מְפּוֹתָח, וְשִׁיעוּרֵי הַנֶּגֶר וְהַסַּחֲף פָּתְחוּ. אוֹלָם, תֵּהִלִּכִים אֵלֶּה פָּתְחוּ עִם סוּפּוֹת הַגַּשֵּׁם הָעוֹקְבוֹת. נִיתֵן לְהַסִּיק מֵהָעֵבֹדָה הַנוֹכַחִית, שֶׁשָּׂרָפַת יַעַר יְכוּלָה לְהַגְדִּיל אֶת יִצִּיבוֹת מְבַנָּה הַקֶּרְקַע, וְעַל־יְדֵי כֶךְ לְהַקְטִין אֶת הַנִּזְקֵי שִׁיכוֹל לְהִיגְרֵם מִבְּחִינַת נֶגֶר וְסַחֲף כְּתוֹצָאָה מִשָּׂרָפַת הַחוֹמֵר הַצְּמַחִי וְחִשְׁפָּה הַקֶּרְקַע.

מִלּוֹת מִפְתָּח: הֶרֶס תְּלִכִּידִים · מְבַנָּה קֶרְקַע · מִנֵּת סְפִיחַת הַנֶּתֶרֶן · עֵרְכִי חִידוֹר · קְרוֹם קֶרְקַע · קֶרְקַע רִנְדִּזִינָה



מבוא

סַחֲף קֶרְקַע נּוֹבַע מִנִּיתוֹק חֶלְקִיקִים מִגּוֹף הַקֶּרְקַע עֵקֶב מְכוֹת טִיפּוֹת הַגַּשֵּׁם וְכוּחוֹת הַגְּזִירָה שֶׁל זְרִימַת הַנֶּגֶר הָעִילִי, וּמֵהִסְטַעַת חֶלְקִיקִים שֶׁנּוֹתְקוּ עַל־יְדֵי הַנֶּגֶר אוֹ כּוּחוֹת הַהִתְזָה שֶׁל טִיפּוֹת הַגַּשֵּׁם [30,31]. מִכֵּאן, שֶׁלְשָׂרָפַת הַיַּעַר הַמְּשִׁפִּיעָה עַל יִצִּיבוֹת מְבַנָּה הַקֶּרְקַע, יְכוּלָה לְהִיּוֹת הַשְּׁפָעָה גַם עַל הַסַּחֲף.

לְעוֹצַמַת הַשָּׂרָפָה, הַמוֹגְדֵרֵת כִּמְכַפְּלָה בֵּין הָאֲנֶרְגִּיָּה הַמְּשִׁתְּחַרְרֵת מִשָּׂרָפָה שֶׁל חוֹמֵר בְּעִירָה הַנִּמְצָא בִּיחִידַת שֶׁטַח לְבִין מֵהִירוֹת הַתְּפִשְׁטוֹת הַשָּׂרָפָה [7,8], וְלְחוֹמֵרֵת הַשָּׂרָפָה, שֶׁהִיא מִדָּד אִיכוֹתִי הַמְּשַׁקֵּף אֶת הַתְּגוּבָה שֶׁל הַמַּעֲרַכַת הָאֶקוֹלוֹגִית בִּיעַר לְשָׂרָפָה [7,8], יֵשׁ שׁוֹנוֹת מֵרַחֲבִית וְעִתִּית גְּבוּהָ בְּזִמְן הַשָּׂרָפָה. לְכֵן, אִזּוֹרִים שׁוֹנִים בִּיעַר נִחְשָׁפִים בְּאוֹפֵן שׁוֹנֵה לְשֵׁנִי מִדְּדִים אֵלֶּה. נִיתֵן לְאִפְיִין שְׁלוֹשָׁה טִיפּוֹסֵי חִשְׁפָּה עִיקָרִיִּים שֶׁל הַקֶּרְקַע לְשָׂרָפָה: (א) אִיִּים שֶׁל קֶרְקַע בִּיעַר שֶׁלֹּא נִחְשָׁפוּ לְשָׂרָפָה; (ב) קֶרְקַע שֶׁנִּחְשַׁפָּה לְחוֹם מֵהָאֵשׁ וְלֵאפֵר שֶׁנּוֹצַר מִשָּׂרָפַת חוֹמֵר צְמַחִי; (ג) קֶרְקַע שֶׁנִּחְשַׁפָּה לְחוֹם שֶׁנִּפְלַט מֵהָאֵשׁ, אֲבָל לֹא נִחְשַׁפָּה לְאֵפֵר, מִכִּיוּן שֶׁהַקֶּרְקַע הַיִּיטָה לְלֹא חִיפּוֹי צְמַחִי אוֹ נֶשֶׁר.

עֵבֹדוֹת רַבּוֹת נַעֲשׂוּ בְּאַרְץ עַל הַשְּׁפָעַת שָׂרָפַת יַעַר עַל הַצּוֹמָח,

שָׂרָפוֹת יַעַר הֵן תּוֹפְעוֹת שְׁכִיחוֹת בְּאֵגֵן הַיָּם הַתִּיכוֹן. שְׁכִיחוֹת וְעוֹצַמַתֵן גְּדוֹלוּ בְּעִשְׂוֹרִים הָאֲחֵרוֹנִים [29], וְאֶחַת הַהִשְׁפָּעוֹת שֶׁלָּהֵן הִיא שִׁינׁוּי בִּיחִסֵּי גַשֵּׁם/נֶגֶר/סַחֲף בְּאִזּוֹר הַשָּׂרָפָה [6,9,24,25,26,32]. שִׁיעוּרֵי נֶגֶר יְכוּלִים לְעֵלוֹת בְּמַהֲלֵךְ סוּפָה גַּשֵּׁם כְּתוֹצָאָה מִירִידָה בְּעֵרְכִי הַחִידוֹר הַנוֹבְעֵת מִשְׁנֵי גוֹרְמִים עִיקָרִיִּים [14]: (א) פְּחִיתָה בְּמִפְּל הַהִידְרָאוֹלִי הַמְּנִיעַ אֶת תְּנוּעַת הַמִּים לְעוֹמֵק הַקֶּרְקַע עִם הֶרְטָבְתָּה; (ב) הַיּוּצָרוֹת קְרוֹם צְפוּף עִם מוֹלִיכוֹת הַיִּדְרָאוֹלִית נִמְוָכָה בְּפָנֵי הַקֶּרְקַע [4,22]. הַקְרוֹם נּוֹצַר כְּתוֹצָאָה מִשְׁנֵי מְנַגְנוֹנִים עִיקָרִיִּים [2,4,23]: (א) מְנַגְנוֹן פִּיזִיקָלִי הַגּוֹרֵם לְהֶרֶס מְכִנֵּי שֶׁל הַתְּלִכִּידִים עֵקֶב מְכוֹת טִיפּוֹת הַגַּשֵּׁם וְהֶרְטָבָה מֵהִירָה שֶׁלָּהֵם. נוֹכַחוֹת בְּקֶרְקַע שֶׁל חוֹמֵרִים מִתְּלִכִּידִים, כְּגוֹן חוֹמֵר אוֹרְגָנִי [19], תַּחמוֹצוֹת פְּעִילוֹת שֶׁל בְּרָזֵל וְאֲלוֹמִינִיּוֹם [27] וְחֶרְסִית [4,18], מִחֻזְקַת אֶת מְבַנָּה הַתְּלִכִּידִים וְעַל־יְדֵי כֶךְ קֵטְנָה הַשְּׁפָעַת מְנַגְנוֹן זֶה בְּהַיּוּצָרוֹת הַקְרוֹם; (ב) מְנַגְנוֹן כִּימִי־פִיזִיקָלִי, הַנוֹבַע מִירִידָה בְּרִיכוֹז הָאֶלְקֶטְרוֹלִיטִים בְּתַמְסִיטָה הַקֶּרְקַע עִם שְׁטִיפַת הַקֶּרְקַע בְּמִי הַגַּשֵּׁם, הַגּוֹרֵם לְפִיזוֹר (dispersion) שֶׁל חֶלְקִיקֵי חֶרְסִית הַקֶּרְקַע בְּמִים לְיִצִּירַת תְּרַחִף הָאוֹטָם אֶת הַנִּקְבּוּבִים בְּקְרוֹם [4].

דגימות קרקע מופרות נדגמו ב־28.10.2009 מעומק של כ־3 ס"מ מאזור שרוף ביער ומאזור לא שרוף סמוך, לאחר הסרה זהירה של שכבת האפר או הנשר מעל פני הקרקע. דגימות הקרקע יובשו ליובש אוויר, נכתשו ונופו בנפה של 4 מ"מ. חלק מהקרקע שנדגמה מהאזור שלא נשרף, נארזה בשכבה בעובי 5 ס"מ במגשים בגודל של 1 מ"ר, שחוממו בתנור ב־300 מעלות במשך 8 שעות כדי לוודא שכל שכבת הקרקע נחשפה לטמפרטורה הנתונה. קרקע זו שימשה כדוגמה לקרקע שנחשפה רק לחום, ותיקרא להלן קרקע שנחשפה לחום. הקרקע שנדגמה מאזור שלא נשרף ולא חוממה בתנור, שימשה כדוגמה לקרקע לא שרופה, ותיקרא קרקע לא שרופה. הקרקע שנדגמה מהאזור שנשרף, שימשה כדוגמה לקרקע שנחשפה לחום מהאש ולאפר שנוצר מהשרפה של החומר הצמחי, ותיקרא קרקע שנחשפה לשרפה ישירה. תכונות פיזיקליות וכימיות של הקרקעות לאחר טיפולי השרפה השונים נקבעו בשלוש חזרות בשיטות סטנדרטיות (טבלה 1).

ניסוי במדמה גשם

הקרקע הלא שרופה, הקרקע שנחשפה לשרפה ישירה והקרקע שנחשפה לחום נארזו בעובי של 2 ס"מ במגשים מחוררים בגודל 50x30 סמ"ר ובצפיפות גושית של 1.2, 1.1 ו־1.0 גרם לסמ"ק, בהתאמה. המגשים הוצבו בשיפוע 30% במדמה גשם [21] והומטרו בשלוש סופות עוקבות של 80 מ"מ מים מזוקקים לסופה עם עוצמת גשם של 47 מ"מ לשעה ובארבע חזרות. בין הסופות העוקבות יובשו הקרקעות במגשים ב־37 מעלות במשך 72 שעות. במהלך כל סופת גשם, נפח הנקז שחלחל דרך שכבת הקרקע נאסף בזמנים שונים מכל מגש, ונפחו נמדד לקביעת ערכי החידור. נוסף על כך, ארבעה מקטעים של מי נקז ונגר נאספו מכל מגש לאחר כל 20 מ"מ גשם במהלך שלוש סופות הגשם העוקבות, ואיכותם הכימית נקבעה. כמות הסחף נקבעה על־ידי ייבוש דגימות הנגר ב־105 מעלות ושקילת הסחופת.

יציבות תלכידים

השפעת חשיפת הקרקע לתנאי שרפה שונים על יציבות תלכידים כנגד כוחות התפוררות (slaking - כוחות הגורמים להרס תלכיד הקרקע כתוצאה מהרטבה מהירה שלהם) ופיזור נקבעה בשלושת טיפולי הקרקע השונים בשלוש חזרות בשיטה שפותחה על־ידי בן־חור ואחרים [5]. פירוט מתומצת של קביעת ערכי ההתפוררות והפיזור מובא להלן:

ערכי התפוררות נקבעו על־ידי הרטבה מהירה או אטית של תלכידים יבשים בגודל 2-4 ס"מ שנדגמו מכל קרקע, ונופו בעדינות במערכת נפות בגדלים שונים. קוטר ממוצע משוקלל (MWD) של התלכידים לאחר ההרטבה המהירה והאטית חושב לכל דגימת קרקע על פי נוסחה [1]

על השתקמותו, על זמינות חומרים מזינים (nutrients) ועל תכולת חומר אורגני בקרקע [15,16,17,20,29,31]. אולם מעט עבודות נעשו על השפעת השרפה על התכונות הכימיות והכימיות־פיזיקליות של הקרקע והשפעתן על מבנה הקרקע ועל תהליכי נגר וסחף. קרקע רנדזינה היא קרקע גירית, בעלת מרקם סייני ולפרקים חרסיתי, הנפוצה ביערות הארץ [1]. מטרת העבודה הנוכחית הייתה לבחון את השפעת חשיפות שונות של קרקע רנדזינה לשרפת יער על תכונות כימיות וכימיות־פיזיקליות, על המבנה שלה ועל תהליכי נגר וסחף בסופות גשם עוקבות ומבוקרות. עבודה זו אינה בוחנת את השפעת שכבת האפר מעל פני הקרקע, אלא רק את השפעת האפר שהתערבב עם חלקיקי הקרקע.

על קצה המזלג

- * לפי הידע המקובל, שרפות יער גורמות לחשיפת הקרקע ובמהלך סופות גשם גם לעלייה בשיעורי הנגר והסחף, שגורמים נזקים רבים.
- * בוצע ניסוי מעבדה על קרקעות רנדזינה מיער ביריה שנחשפו לשרפת יער או לחימום בתנור, כולל הדמיית סופות גשם.
- * המחקר סותר את הידע המקובל - בקרקע רנדזינה שנחשפת לשרפה יש דווקא עלייה ביציבות ובערכי החידור.
- * שרפה אמנם עשויה לייצב את הקרקע ולהפחית נגר וסחף, אך שיעורם עלול לגדול בהשפעת שינויים אקולוגיים וקרקעיים אחרים.
- * לאור העלייה בשכיחות שרפות יער ובשל העיסוק הציבורי והמחקרי בהן יש לממצאים אלה חשיבות מדעית ויישומית.

חומרים ושיטות

שטח המחקר ודגימת קרקע

שטח המחקר ממוקם ביער ביריה (32°59'52N, 35°30'27E), הכולל עצי אורן קפריסאי (*Pinus brutia*) ואורן ירושלים (*Pinus halepensis*) על גבי קרקע רנדזינה בהירה בעלת מרקם סייני חרסיתי חולי. שרפה קלה־בינונית שהתרחשה ב־21.7.2009 כילתה את הצומח העשבוני והנשר על פני הקרקע, חרכה את גזעי העצים הבוגרים עד לגובה של מספר מטרים, ושרפה כליל חלק מהעצים הצעירים.



חזית המחקר

טבלה 1. ערכים ממוצעים של תכונות כימיות ופיזיקליות של הקרקע לאחר טיפולי השַרְפָה השונים וריכוז והרכב היונים במיצי מימי שלהם (יחס משקלי קרקע:מים של 1:1.5).
 אותיות שונות סמוך למספרים מציינות הבדלים מובהקים ($\alpha=0.05$) בין טיפולי השַרְפָה השונים לכל מדד שנמדד.

עַרְךְ פִּיזוֹר [%]	תמיסת מיצי קרקע (יחס משקלי קרקע:מים 1:1.5)			קק"ח [מא"ק לק"ג] ¹¹	תכולת גיר [%]	חומר אורגני כללי [%]	אנליזה מכנית			טיפולי שַרְפָה
	מנת ספיחת נתרן ^{0.5} [מא"ק לליטר]	מוליכות חשמלית [דציסימנס למטר]	ערך הגבה (pH)				חול [%]	סילט [%]	חרסית [%]	
12.3 a	0.14 a	0.42 b	7.31 a	209 b	61.4 b	6.5 b	52 a	23 b	26 a	קרקע לא שרופה
11.5 a	0.10 b	0.34 b	7.21 a	235 a	57.6 b	10.7 a	50 a	24 b	25 a	שַרְפָה ישירה
7.7 b	0.07 c	2.26 a	7.34 a	149 c	68.4 a	4.5 c	47 b	36 a	17 b	חשיפה לחום

[1] קק"ח - קיבול קטיונים חליפיים. מא"ק - מיליאקווילנט

תוצאות ודיון

שַרְפָת יער יכולה להשפיע על ההרכב הכימי ועל מרקם הקרקע, כפי שניתן לראות ב**טבלה 1**. תכולת החומר האורגני הכללי בקרקע שנחשפה לחום פחתה באופן מובהק ל-4.6% לעומת 6.5% בקרקע הלא שרופה (**טבלה 1**). ירידה זו נבעה בעיקר משַרְפַת החומר האורגני במהלך חשיפת הקרקע לטמפרטורה של 300 מעלות [7, 8, 10, 11, 12, 13, 28]. לעומת זאת, תכולת החומר האורגני בקרקע שנחשפה לשַרְפָה ישירה הייתה גבוהה באופן מובהק מאשר בקרקע הלא שרופה (**טבלה 1**). ככל הנראה, במהלך דגימת הקרקע שנחשפה לשַרְפָה ישירה, נוספו חלקיקי אפר, שמקורם משַרְפָה לא שלמה של החומר הצמחי והנשר, והם שגרמו לעלייה זו בתכולת החומר האורגני.

תכולות המקטע החרסיתי והחולי קטנו, ותכולת המקטע הסילטי עלתה בקרקע שנחשפה לחום לעומת הקרקע הלא שרופה (**טבלה 1**). הירידה בתכולת המקטע החרסיתי בקרקע שנחשפה לחום נבעה כנראה משחרור של מולקולות מים ספוחות בפני החרסית ומשינויים כימיים ומבניים בתחמוצות הברזל והאלומיניום במקטע החרסיתי כתוצאה מהחימום שלהן ב-300 מעלות [7, 11, 28]. שינויים אלה גרמו כנראה להתקרבות בין חלקיקי החרסית, לעלייה בכוחות המשיכה ביניהם ולהתלכדותם למיקרו-תלכידים בגודל מקטע סילטי שלא התפרקו במהלך קביעת ההרכב המכני של הקרקע (התפלגות מקטעי הגודל של חול, סילט וחרסית בקרקע). לעומת זאת, הירידה בתכולת החומר האורגני הכללי בקרקע שנחשפה לחום (**טבלה 1**) גרמה כנראה להתפרקות של מיקרו-תלכידים בגודל מקטע חול לחלקיקים קטנים יותר (מיקרו-תלכידים אלה לא התפרקו במהלך קביעת ההרכב המכני בקרקע הלא שרופה), ומכאן הירידה בתכולת מקטע החול בקרקע

$$MWD = \sum_{i=1}^7 \bar{x}_i w_i \quad [1]$$

כאשר w_i הוא משקל המקטע של התלכידים בקבוצת גודל i עם ממוצע קוטר X_i .

ערך ההתפוררות (slv) של כל דגימת קרקע חושב על פי נוסחה [2]

$$SLV = \frac{MWD_s}{MWD_f} \quad [2]$$

כאשר MWD_s ו- MWD_f הם קוטר ממוצע משוקלל של התלכידים לאחר הרטבה אטית ומהירה, בהתאמה. $slv=1$ מורה על חוסר השפעה של כוחות ההתפוררות בהרס התלכידים, וככל שערך ה- slv גדל, השפעת כוחות ההתפוררות בהרס התלכידים רבה יותר.

ערך הפיזור (DV) נקבע על-ידי טלטול הקרקע במים מזוקקים, קביעת ריכוז החרסית בתרחיף על-ידי ספקטרופוטומטר, וחישוב הערך על פי נוסחה [3]

$$DV = \frac{M_d}{M_t} \times 100 \quad [3]$$

כאשר M_d הוא משקל החרסית שהפכה לתרחיף עקב פיזור, מדגימה של 2 גרם קרקע שטולטלה במים מזוקקים, ו- M_t הוא משקל החרסית הכללית בדגימה של 2 גרם קרקע.



ערכי החידור התחיליים (ערכי החידור בתחילת סופת הגשם) של הקרקע בשלושת טיפולי השרפה היו גדולים מ-47 מ"מ לשעה, והם ירדו לערכים סופיים שנעו בין 10.5 ל-39.8 מ"מ לשעה בסוף סופת הגשם הראשונה (טבלה 2). ירידה זו בערכי החידור נבעה מהרס התלכידים כתוצאה מכוחות ההרס של טיפות הגשם ומיצירת קרום בפני הקרקע עם מוליכות הידראולית נמוכה יחסית [4, 22]. בסופת הגשם הראשונה הייתה הירידה בערכי החידור מתונה יותר, וערכי החידור הסופיים היו גבוהים יותר בקרקע שנחשפה לשרפה ישירה ובקרקע שנחשפה לשרפה וחיסום הקרקעות עם טיפולי השרפה השונים מורים שהשרפה וחיסום הקרקע גרמו לעלייה ביציבות מבנה הקרקע שהפחיתה את היווצרות הקרום. בקרקע הלא שרופה לא ירדו ערכי החידור הסופיים במהלך סופות הגשם העוקבות, ובקרקעות עם שני טיפולי השרפה האחרים ירדו ערכי החידור הסופיים באופן מובהק בסופות העוקבות (טבלה 2). תוצאות אלה מורות שיציבות המבנה של הקרקע שנחשפה לשרפה ישירה ושל הקרקע שנחשפה לחום פחתה בסופת הגשם השנייה והשלישית. כמויות סחף כלליות לכל סופת גשם עוקבת בשלושת טיפולי

זו (טבלה 1). לעומת זאת, ההרכב המכני של הקרקע הלא שרופה ושל הקרקע שנחשפה לשרפה ישירה היה דומה (טבלה 1). תוצאות אלה מרמזות שעוצמת השרפה באזור הנלמד ביער ביריה הייתה נמוכה יחסית.

הירידה בתכולת החומר האורגני בקרקע שנחשפה לחום הייתה כנראה הגורם העיקרי לירידה המובהקת בקיבול הקטיוניים החליפיים (קק"ח) של קרקע זו לעומת הקרקע הלא שרופה [7], והעלייה בתכולת החומר האורגני בקרקע שנחשפה לשרפה ישירה גרמה לעליה מובהקת בקק"ח שלה לעומת הקרקע הלא שרופה (טבלה 1). חשיפת הקרקע לחום של 300 מעלות גרמה לעלייה מובהקת בתכולת הגיר לעומת הקרקע הלא שרופה (טבלה 1). ייתכן כי עלייה זו בתכולת הגיר נבעה מעלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני והסידן בתמיסת הקרקע שנחשפה לחום כתוצאה משרפת החומר האורגני ודחיקת הסידן מהקומפלקס הסופח על ידי יוני אמון ושקיעתם כגיר.

ערכי החידור של הקרקעות בשלושת טיפולי השרפה בסוף כל סופת גשם עוקבת (ערכי חידור סופיים) מובאים בטבלה 2, וערכי החידור של קרקעות אלה כתלות בכמות הגשם המצטברת של שלוש סופות הגשם העוקבות מובאים בטבלה 1 (באתר כתב העת).



קרקע יער לאחר השרפה הגדולה בכרמל, דצמבר 2010 | צילום: חני קריסטל ©

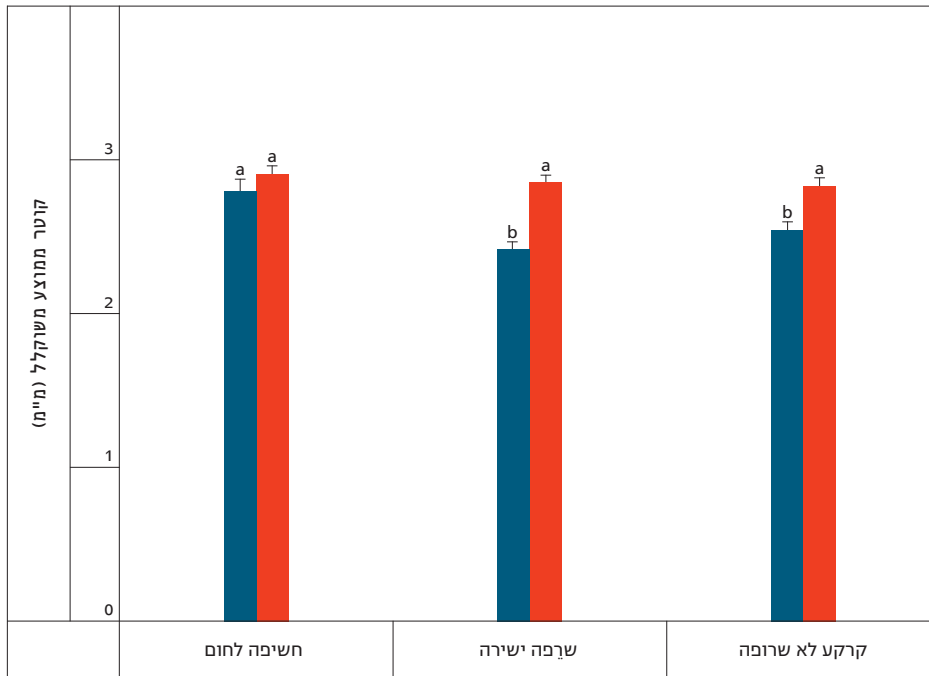
טבלה 2. ערכים ממוצעים של ערכי חידור סופיים וכמויות סחף כלליות בטיפול השָרְפָה השונים ובשלוש סופות הגשם העוקבות אחריות קטנות שונות סמוך למספרים מציינות הבדלים מובהקים ($\alpha=0.05$) בין טיפולי השָרְפָה השונים לכל סופת גשם. אחריות גדולות שונות מציינות הבדלים מובהקים ($\alpha=0.05$) בין סופות הגשם העוקבות בכל טיפול שָרְפָה.

כמות סחף סופית כללית [גרם למ"ר]			ערכי חידור סופיים [מ"מ לשעה]			טיפול שָרְפָה
סופה ראשונה	סופה שנייה	סופה שלישית	סופה ראשונה	סופה שנייה	סופה שלישית	
585.0 aA	646.2 aA	580.0 aA	11.9 cB	14.1 cA	10.5 cC	קרקע לא שרופה
589.0 aA	506.0 bB	396.9 bC	15.0 bC	18.0 bB	18.4 bA	שָרְפָה ישירה
318.8 bA	195.8 cB	68.0 cC	20.6 aC	26.6 aB	39.8 aA	חשיפה לחום

הלא שרופה והקרקע שנחשפה לשָרְפָה ישירה היו דומים וגבוהים מערך 1 (איור 1). תוצאות אלה מורות שמבחינה פיזיקלית, יציבות המבנה של הקרקע שנחשפה לשָרְפָה ישירה הייתה נמוכה יחסית, ודומה ליציבות המבנה של הקרקע הלא שרופה. זאת אף על פי שתכולת החומר האורגני הכללי בקרקע שנחשפה לשָרְפָה ישירה הייתה גבוהה מאשר בקרקע הלא שרופה (טבלה 1). תוצאות אלה מחזקות את ההשערה שמקורו של החומר האורגני באפר בשָרְפָה חלקית של חומר צמחי, וכי הוא אינו יוצר אינטראקציה עם חלקיקי הקרקע, ולכן השפעתו על יציבות מבנה הקרקע שולית. גורם נוסף שיכול להסביר את ההבדלים בערכי החידור הסופיים ובכמויות הסחף בין טיפולי השָרְפָה השונים בסופות הגשם העוקבות (טבלה 2) הוא שינויים בתכונות הכימיות-פיזיקליות של תמיסת הקרקע בטיפול השָרְפָה ובמהלך סופות הגשם השונות. ערכי המוליכות החשמלית (EC), שמשמשת מדד לריכוז האלקטרוליטים בתמיסה, וה-SAR במי הנקז שהתקבלו מטיפול השָרְפָה השונים כתלות בכמות הגשם המצטברת בשלוש סופות הגשם העוקבות, מובאים באיור 2. ערכים אלה של ה-EC וה-SAR במי הנקז הם מדד טוב לערכים שלהם בתמיסת הקרקע במהלך סופות הגשם. ערכי ה-EC במי הנקז בקרקע שנחשפה לחום היו גבוהים באופן מובהק מאשר בקרקע הלא שרופה ובקרקע שנחשפה לשָרְפָה ישירה בשלוש סופות הגשם העוקבות (איורים 2א, 2ב ו-12). לעומת זאת, ערכי ה-SAR במי הנקז מהקרקע שנחשפה לחום היו, באופן כללי, נמוכים יותר מאשר בקרקע הלא שרופה (איורים 2ג, 2ד ו-12). מגמה דומה של ערכי ה-EC ו-SAR נמצאה בתמיסת המיצוי של טיפולי הקרקע השונים (טבלה 1). חימום הקרקע ל-300 מעלות גרם כנראה לעלייה במכפלת המסיסות של מינרלי הקרקע [12], והעלייה במכפלת המסיסות של המינרלים שהכילו סידן ומגנזיום הייתה גבוהה יותר מאשר של המינרלים שהכילו נתרן, ומכאן ערכי ה-SAR הנמוכים בקרקע שנחשפה לחום (טבלה 1 ואיור 2). ערכי ה-EC הגבוהים וערכי ה-SAR הנמוכים בתמיסת הקרקע שנחשפה לחום במהלך סופות

השָרְפָה מובאות בטבלה 2, וכמויות הסחף שנאספו ב-4 מקטעי גשם עוקבים בכל סופת גשם כתלות בכמות הגשם המצטברת מובאות בנספח 2 (באתר כתב העת). בסופת הגשם הראשונה כמויות הסחף היו הגבוהות ביותר (580 גרם למ"ר) בקרקע הלא שרופה, הנמוכות ביותר (68 גרם למ"ר) בקרקע שנחשפה לחום, ובערכי ביניים (396.9 גרם למ"ר) בקרקע שנחשפה לשָרְפָה ישירה (טבלה 2). ההבדלים בכמויות הסחף בין טיפולי השָרְפָה קטנו במהלך הסופות העוקבות. מכאן, שגם תוצאות אלה מורות על כך שחשיפת הקרקע לשָרְפָה ישירה או לחום גרמו לעלייה ביציבות מבנה הקרקע, וכי יציבות זו פחתה בסופות העוקבות. חשיפת הקרקע לשָרְפָה ישירה או לחום יכולה להשפיע על יציבות מבנה הקרקע בשני אופנים עיקריים: (א) שינוי בהרכב הכימי והמינרלי של הקרקע המגדיל את הכוחות המלכדים בין חלקיקי הקרקע ואת היציבות הפיזיקלית של מבנה הקרקע נגד כוחות הרס פיזיקליים חיצוניים, כגון מכות טיפות גשם והרטבה מהירה של הקרקע; (ב) שינויים כימיים-פיזיקליים (ריכוז יונים והרכבם) בתמיסת הקרקע במהלך סופת הגשם, שיכולים להשפיע על פיזור החרסית בקרקע [2, 4, 23]. ערכי MWD של התלכידים בשלושת טיפולי הקרקע, כפי שחושבו מנוסחה [1], וערכי ההתפוררות שלהם, כפי שחושבו מנוסחה [2], מובאים באיור 1. ערכי התפוררות אלה הם מדד ליציבות פיזיקלית של תלכיד הקרקע נגד מכות טיפות הגשם והרטבה מהירה שלהם. בקרקע שנחשפה לחום, לא נמצאו הבדלים מובהקים בערכי ה-MWD בין ההרטבה האטית והמהירה, וערך ההתפוררות היה כ-1 (איור 1). דבר זה מורה על יציבות מבנה גבוהה מבחינה פיזיקלית של קרקע זו, אף על פי שתכולת החומר האורגני הכללי בקרקע הייתה נמוכה (טבלה 1). יציבות מבנה זו של הקרקע שנחשפה לחום נבעה כנראה מהשפעת החימום על הגדלת כוחות המשיכה בין חלקיקי הקרקע בתלכיד, כפי שהוסבר למעלה, שמנעו היווצרות של קרום מפותח, ירידה חדה בערכי החידור ועלייה בכמות הסחף בקרקע שנחשפה לחום (טבלה 2). ערכי ההתפוררות של הקרקע





איור 1. ערכים של קוטר ממוצע משוקלל של תלכידים לאחר הרטבה מהירה או אטית בשלושת טיפולי הקרקע השונים וערכי ההתפוררות (SLV) שלהם. אותיות שונות בקצה העמודות מציינות הבדלים מובהקים (α=0.05) בערכי הקוטר הממוצע המשוקלל בין ההרטבה המהירה והאטית לכל טיפול קרקע.

ערך התפוררות	טיפול
1.11	קרקע לא שרופה
1.16	שרפה ישירה
1.04	חשיפה לחום

הרטבה מהירה	■
הרטבה אטית	■

ב. חשיפת הקרקע לחום ולשרפה ישירה גרמה לעלייה בריכוז האלקטרוליטים ולירידה בערכי ה-SAR בתמיסת הקרקע במהלך הגשם. כתוצאה מכך נמנעו פיזור החרסית והתפתחות קרום מפותח, ושיעורי הנגר והסחף פחתו. אולם גורם זה פחת עם סופות הגשם העוקבות.

ג. שרפה יכולה לגרום לשינויים אקולוגיים וקרקעיים רבים ביער, המשפיעים על יחסי גשם/נגר/סחף. שינויים אלה כוללים: ירידה בנזילות של הצומח ביער, הגדלה בחשיפת פני הקרקע לכוחות ההרס של מכות טיפות הגשם ושינוי בתכונות הקרקע. אף על פי ששרפה בעוצמה גבוהה יכולה להוביל לעלייה ביציבות מבנה הקרקע ועל-ידי כך להפחית את שעורי הנגר והסחף ביער, עלולים שיעורים אלה לגדול לאחר שרפה כתוצאה מהשפעתם הרבה יותר של הגורמים האחרים המעלים את הנגר והסחף.

הגשם העוקבות הקטינו את הפיזור של חלקיקי החרסית בקרקע, כפי שניתן לראות מערך הפיזור הנמוך באופן מובהק בקרקע זו מאשר בקרקע עם שני טיפולי השרפה האחרים (טבלה 1). לעומת זאת, הירידה המשמעותית בערכי ה-EC בקרקע שנחשפה לחום בין סופת הגשם הראשונה (איור 2) לסופות הגשם השנייה והשלישית (איורים 2 ו-12) העלתה כנראה את פיזור החרסית בסופות עוקבות אלה, שגרם לירידה בערכי החידור הסופיים ולעלייה בכמויות הסחף בסופות אלה (טבלה 2). בקרקע שנחשפה לשרפה ישירה, היו ערכי ה-SAR במי הנקז, באופן כללי, נמוכים יותר מאשר במי הנקז של הקרקע הלא שרופה, וערכי ה-EC במי הנקז בשני טיפולי שרפה אלה היו דומים (איור 2). מגמה דומה נמצאה בתמיסת המיצוי של הקרקעות (טבלה 1). ערכים אלה של SAR ו-EC גרמו לפחיתה בפיזור החרסית בקרקע שנחשפה לשרפה ישירה, שגרמה לעלייה ביציבות מבנה הקרקע ובערכי החידור הסופיים ולירידה בכמויות הסחף הכללית בקרקע זו (טבלה 2).

מסקנות

א. חימום הקרקע ב-300 מעלות שינה את ההרכב הכימי והמינרלי של קרקע רנדזינה. כתוצאה מכך, כוחות המשיכה בין החלקיקים בתלכיד הקרקע ויציבות המבנה שלהם כנגד מכות טיפות הגשם וכוחות ההתפוררות עלו, ערכי החידור של הקרקע במהלך הגשם נשארו גבוהים ושיעורי הנגר והסחף פחתו.

מקורות

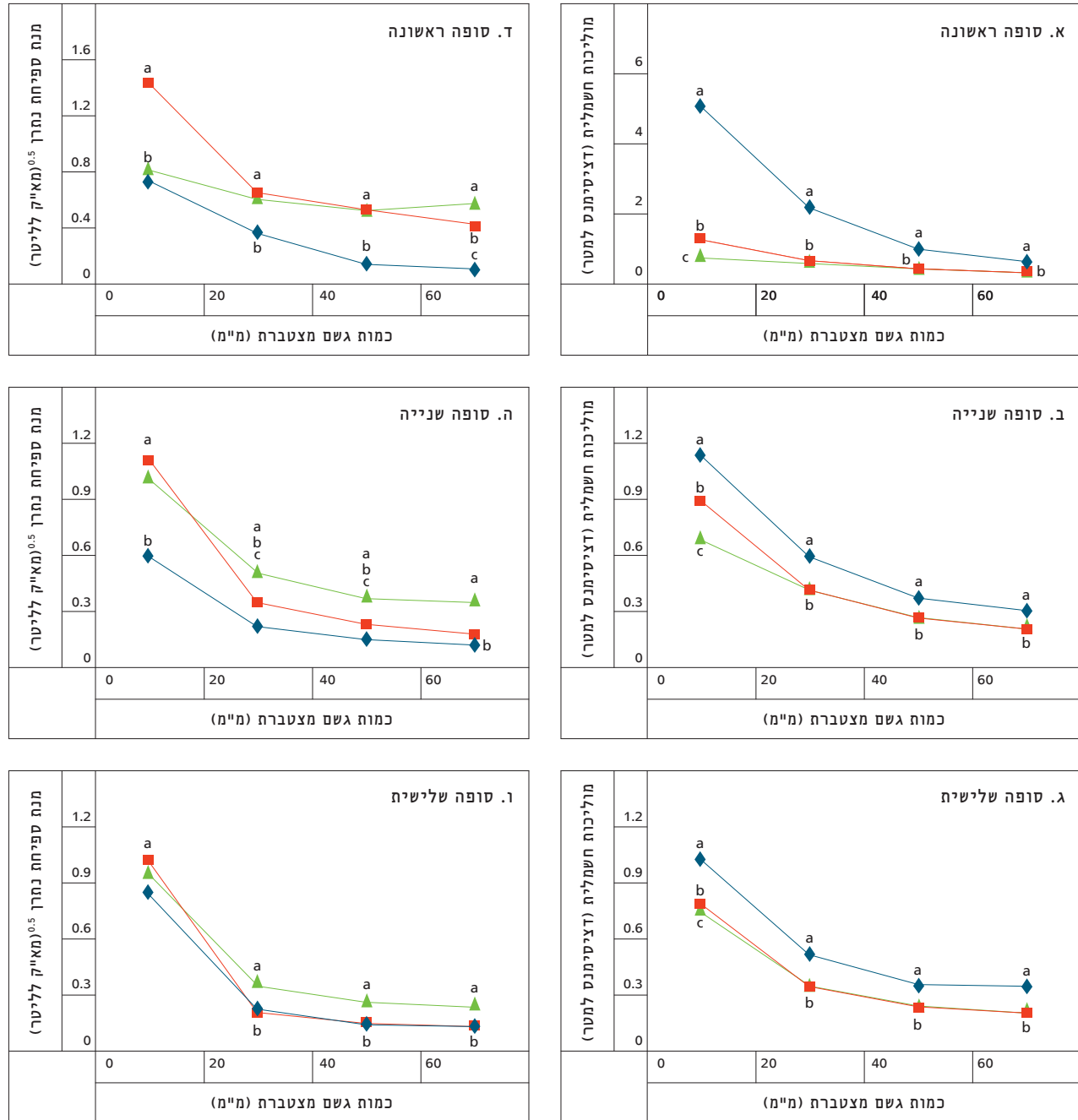
[1] רביקוביץ ש. 1981. קרקעות ישראל: התהוותן, טבען ותכונותיהן. תל-אביב: הוצאת הקיבוץ המאוחד.

[2] Agassi M, Shainberg I, and Morin J. 1981. Effects of electrolyte concentration and soil sodicity on the infiltration rate and crust formation. *Soil Science Society of America Journal* 45: 848-851.



חזית המחקר

איור 2. ערך המוליכות החשמלית (EC) וערך מנת ספיחת הנחרן (SAR) במי הנקז שנאספו בארבעה מקטעי גשם עוקבים בכל סופת גשם בשלושת טיפולי הקרקע השונים, כחלות בכמות הגשם המצטברת אותיות שונות סמוך לסימן מציינות הבדלים מובהקים ($\alpha=0.05$) בערכי ה-EC וה-SAR בין טיפולי הקרקע השונים לכמות גשם נתונה ולכל סופת גשם עוקבת.



▲ קרקע לא שרופה
 ■ שרפה ישירה
 ◆ חשיפה לחום

- [18] Lado M and Ben-Hur M. 2004. Soil mineralogy effects on seal formation, runoff and soil loss. *Applied Clay Science*. **24**: 209–224.
- [19] Lado M, Paz A, and Ben-Hur M. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation and soil loss. *Soil Science Society of America Journal* **68**: 935–942.
- [20] Lavee H, Kutiel P, Segev M, and Benyamini Y. 1995. Effect of surface roughness on runoff and erosion in a Mediterranean ecosystem: The role of fire. *Geomorphology* **11**: 227–234.
- [21] Morin J, Goldberg D, and Seginer I. 1967. A rainfall simulator with a rotating disc. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **10**: 74–77.
- [22] Morin J, Benyamini Y, and Michaeli A. 1981. The effect of raindrop impact on the dynamics of soil surface crusting and water movement in the profile. *Journal of Hydrology* **52**: 321–335.
- [23] Shainberg I and Letey J. 1984. Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia* **52**: 1–57.
- [24] Shakesby RA. 2011. Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews* **105**: 71–100.
- [25] Shakesby RA, and Doerr SH. 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews* **74**: 269–307.
- [26] Sidle RC, Ziegler AD, Negishi JN, et al. 2006. Erosion processes in steep terrain - Truths, myths, and uncertainties related to forest management in Southeast Asia. *Forest Ecology and Management* **224**: 199–225.
- [27] Singer A. 1994. Clay mineralogy as affecting dispersivity and crust formation in Aridisols. In: Etchevers JD (Ed). Transaction of the 15th World Congress of Soil Science, Vol. 8a; 1994 Jul 10–16; Acapulco, Mexico. International Society of Soil Science. and Mexican Society of Soil Science.
- [28] Terefe T, Mariscal-Sancho I, Peregrina F, and Espejo R. 2008. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study. *Geoderma* **143**: 273–280.
- [29] Tessler N, Wittenberg L, Malkinson D, and Greenbaum N. 2008. Fire effects and short-term changes in soil water repellency - Mt. Carmel, Israel. *Catena* **74**: 185–191.
- [30] Watson DA and Laflen JM. 1986. Soil strength, slope rainfall intensity effect on interrill erosion. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* **29**: 98–102.
- [31] Wittenber L and Inbar M. 2009. The role of fire disturbance on runoff and erosion processes - a long-term approach, Mt. Carmel case study, Israel. *Geographical Research* **47**(1): 46–56.
- [32] Zhang I, Dawes WR, and Walker GR. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* **37**: 708–710.
- [3] Ben-Hur M and Agassi M. 1997. Predicting interrill erodibility factor from measured infiltration rate. *Water Resources Research* **33**: 2409–2415.
- [4] Ben-Hur M. 2008. Seal formation effects on soil infiltration and runoff in arid and semiarid regions under rainfall and sprinkler irrigation conditions. In: Zereini F and Jaeschke W (Eds). Climatic changes and water resources in the Middle East and in North Africa. New York: Springer-Verlag.
- [5] Ben-Hur M, Yolcu G, Uysal H, et al. 2009. Soil structure changes: Aggregate size and soil texture effects on hydraulic conductivity under different saline and sodic conditions. *Australian Journal of Soil Research* **47**: 688–696.
- [6] Ben-Hur M, Fernandez C, Sarkkola S, and Cerezal JCS. 2011. Overland flow, soil erosion and stream water quality in forest under different perturbations and climate conditions. In: Bredmeier M, Cohen S, Godbod DL, et al. (Eds). Forest management and the water cycle. An ecosystem-based approach. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer.
- [7] Certini G. 2005. Effects of fire on properties of forest soils: A review. *Oecologia* **143**: 1–10.
- [8] DeBano LF, Neary DG, and Folliott PF. 1998. Fire's effect on ecosystems. New York: Wiley.
- [9] Farley KA, Jobbagy EG, and Jackson RB. 2005. Effects of afforestation on water yield: A global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* **11**: 1565–1576.
- [10] Garcia-Corona R, Benito E, de-Blas E, and Varela ME. 2003. Effects of heating on some soil physical properties related to its hydrological behavior in two North-Western Spanish soils. *International Journal of Wildland fire* **13**(2): 195–199.
- [11] Giovannini G, Luchéis S, and Giachetti M. 1988. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science* **146**: 255–262.
- [12] Giovannini G, Luchéis S, and Giachetti M. 1990. Effects of heating on some chemical parameters related to soil fertility and plant growth. *Soil Science* **149**: 344–350.
- [13] Gonzalez-Pereza JA, Gonzalez-Vila FJ, Almendros G, and Knicker H. 2004. The effect of fire on soil organic matter - A review. *Environment International* **30**: 855–870.
- [14] Hillel D. 2004. Introduction to environmental soil physics. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- [15] Kutiel P and Naveh Z. 1987. The effect of fire on nutrients in a pine forest soil. *Plant and Soil* **104**: 269–274.
- [16] Kutiel P and Shaviv A. 1992. Effects of soil types, plant composition and leaching on soil nutrients following a simulated forest fire. *Forest Ecology and Mana* **53**: 329–343.
- [17] Kutiel P and Inbar M. 1993. Fire impact on soil nutrients and soil erosion in a Mediterranean pine forest plantation. *Catena* **20**: 129–139.

