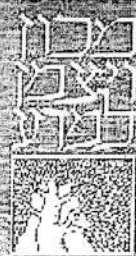
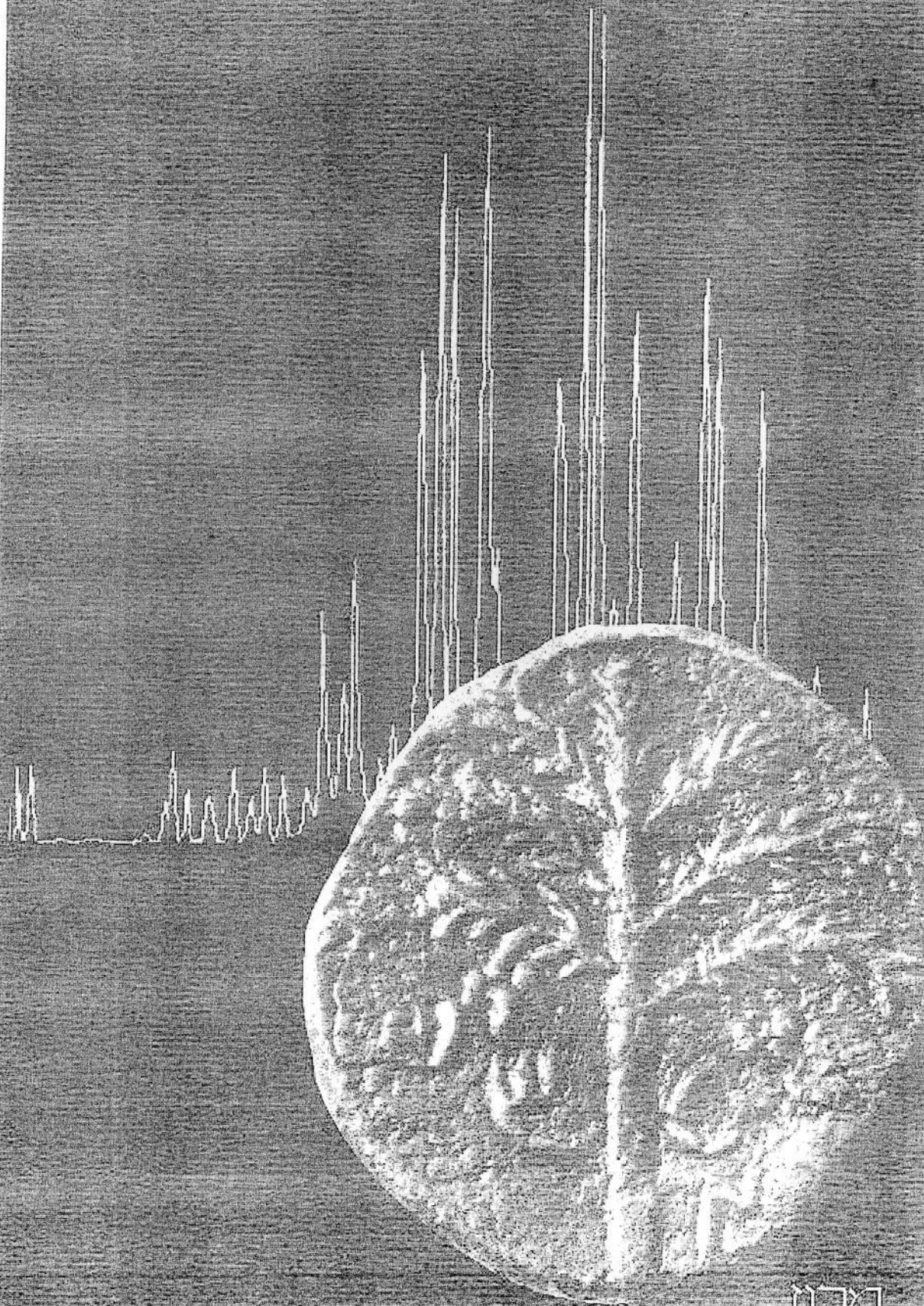
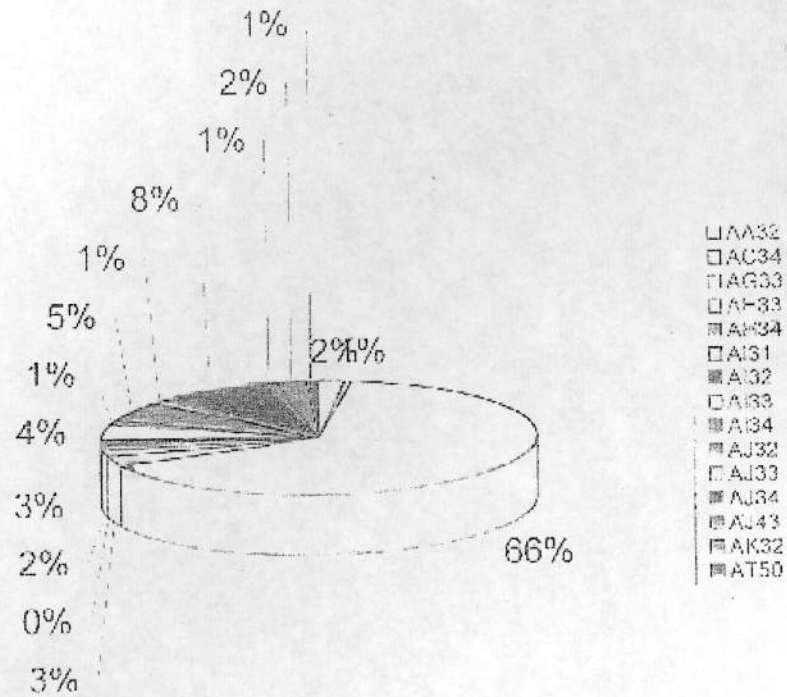


הזמיון, הוליווד והאסון

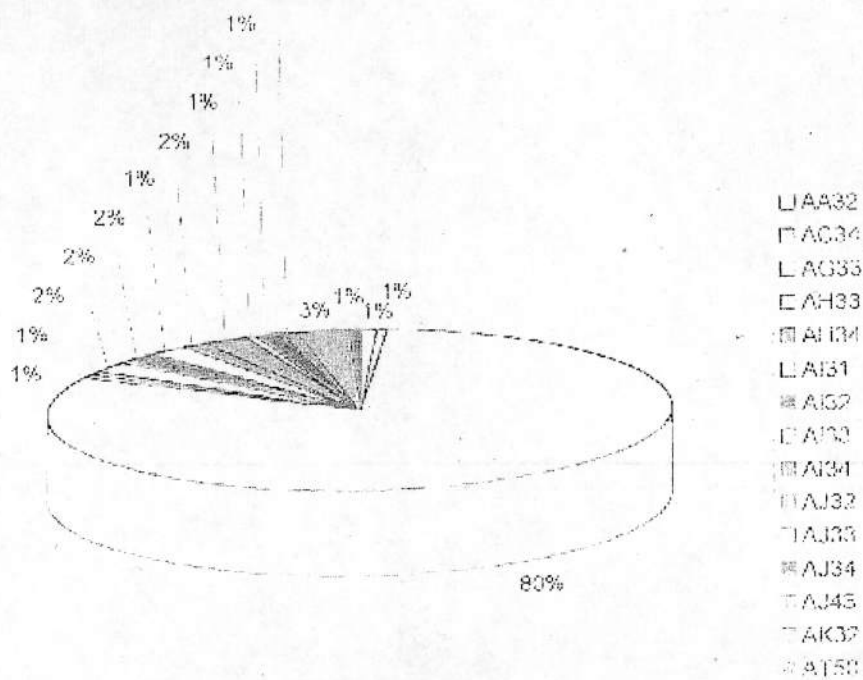


ביולטין מס' 7 ■ אפריל 1999

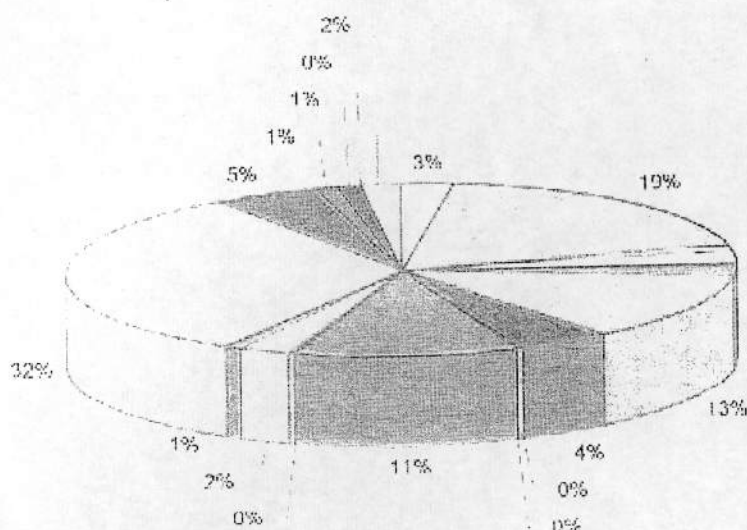
תרשים 1 - התפלגות משקל הסיגים בגר' ברבועים השונים - שטח G



תרשים 2 - התפלגות מס' הסיגים ברבועים השונים בשטח G

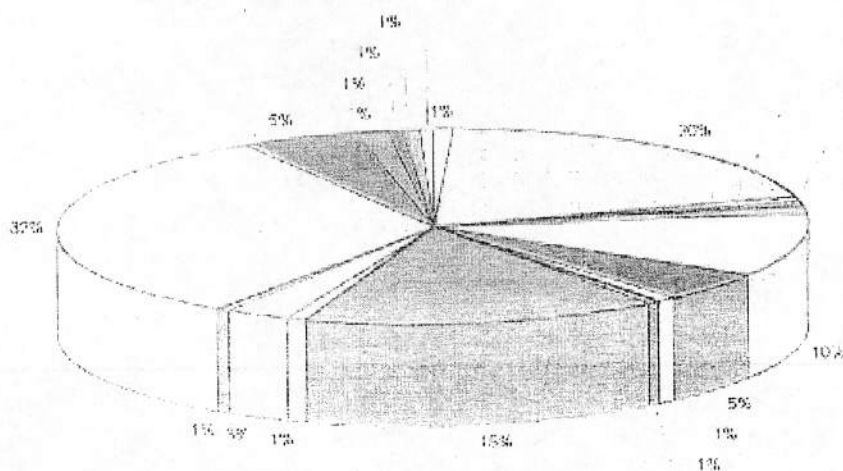


תרשים 3 - התפלגות משקל הסיגים בגר' בתקופות השונות - שטח G

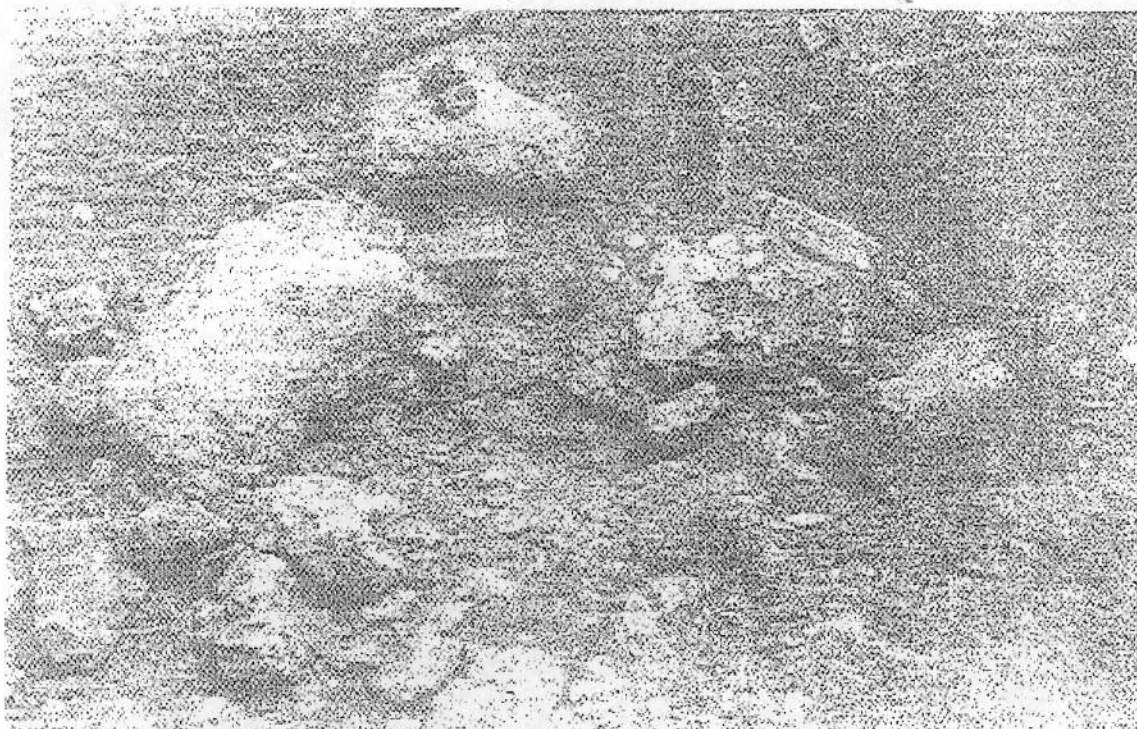


- גר' פרסי+מנט+ברזל
- גר' פרסי
- גר' 2+פרסי
- גר' מאונר+פרסי+הלניסטי
- גר' מאונר+פרסי
- לא ידוע
- מאה 10
- מאה 10/מאה 8
- מאה 8/מאה 7
- מאה 8
- סוף המאה 11
- סוף המאה 11 תחילת המאה 10
- סוף המאה 12 תחילת המאה 11
- פרסי
- גר' עד פרסי
- רומי
- רומי מ. הלניסטי+פרסי
- גר' עד רומי
- פרסי עד רומי

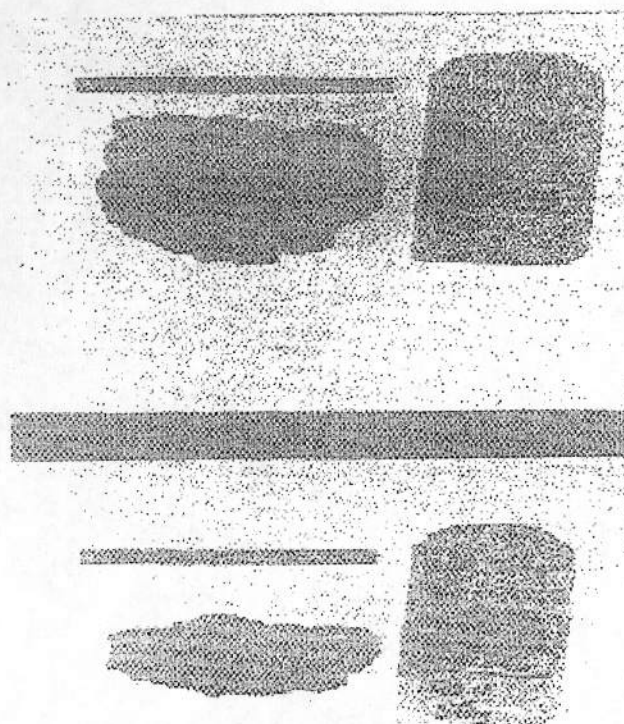
תרשים 4 - התפלגות מס' הסיגים בתקופות השונות - שטח G



- גר' פרסי+מנט+ברזל
- גר' פרסי
- גר' 2+פרסי
- גר' מאונר+פרסי+הלניסטי
- גר' מאונר+פרסי
- לא ידוע
- מאה 10
- מאה 10/מאה 8
- מאה 8/מאה 7
- מאה 8
- סוף המאה 11
- סוף המאה 11 תחילת המאה 10
- סוף המאה 12 תחילת המאה 11
- פרסי
- גר' עד פרסי
- רומי
- רומי מ. הלניסטי+פרסי
- גר' עד רומי
- פרסי עד רומי



איור 1 - מדורה קטורה בשטח 2ט, אגניה ורצפתה מסויחות היטב. על הרצפה נמצאו ראווה וזרי שיגית.



איור 2 - שיג חדש ברזל אופייני. שטוח - קמור. בתמונה העליונה מראה תחתיתו הקמורה, בתמונה התחתונה מראה מוצד

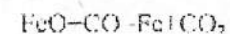
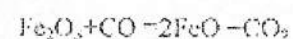
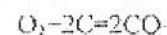
תאור הממצא

שלא כמו שאר המתכות, הברזל יוצר בעבר רק במצבו המוצק (solid state). טכנולוגיה זו קרויה ה"תהליך הישיר" של ייצור הברזל, דהיינו ייצור של ברזל חשיל ישר מהעפרה. ניתן לחלק את התהליך לכמה שלבים:

- המתכת הוצאה מהעפרה ע"י תהליך של התכה (smelting).
- המתכת נוקתה ע"י חרש (smithing).
- מן המתכת יוצרו החפצים על ידי אותו חרש או על ידי חרש אחר (secondary smithing).

התהליכים כולם, יצרו כמויות גדולה של סיגים ופסולת ייצור (ראה להלן). שלב א - התנור הבסיסי, לצורך תהליך ההתכה, היה גלילי, עשוי טין בגובה של 1-2 מ' וקוטרו הפנימי 0.3-1 מ'. קירותיו היו, בדרך כלל, בעובי של יותר מ 0.2 מ' כדי לתקטין אובדן החום. הניחת האוויר התאפשרה דרך צינורות אוויר המכונים *tyers*. הללו מוקמו במרחק של כ 0.3-0.5 מ' מהבסיס. בחלק מן התנורים יציאה קטנה אפשרה הוצאה של סיגים ופסולת, מעט תנורים מעין אלה נחפרו באירופה ואפריקה (Craddock 1995: 241-264).

הענתקה של תנורים אלה אפשרה ייצור ניסויי של ברזל, בשלביו השונים. על ידי קרו וצוותו (Crew 1991: 21-36) הדלק הנדרש הוא פחם. עץ וזמינותו קבעה לא מעט את מיקומו של התנור שהיו וניה צורך בכמות רבה של פחם (לפי Craddock 1995: 189-194 כ 50 ק"ג פחם לכל ק"ג של סיגים). בתהליך ההתכה - התנור נטען בפחם וחומם כתחילה, כאשר היה חם דיו תוזן התנור בעפרה ופחם. האוויר הוזרם אל התנור במפוח. כנראה שהטמפרטורות שהושגו אפשרו הפחתה ראשונית (*initial reduction*) ב 800°C ועד נזילות של הסיגים בלמעלה מ 1000°C . במהלך ההתכה אירעו הדברים הבאים: הפחתה של תחמוצות הברזל לברזל מטאלי בעזרת הפחמן החד - חמצני.



הריאקציה השנייה המתחוללת בתנור היא ההפרדה של התחמוצות המקוריות מהברזל (צורך, אלומיניום ועוד). זו מושגת ע"י כך שהללו הופכים לנוזלים ונקווים בתחתית התנור. הטמפרטורה הייתה חיה להיות מספקת לצורך העניין ואם לא כך ארע, הרי שנמצא בתנור ונעזובת של ברזל וסיגים יחדיו. כאשר העפרה הייתה באיכות טובה, לא נוצרה פסולת רבה. עפרה באיכות ירודה דרשה פתח לזרימת הפסולת החוצה. לא נמצאו סיגים האופייניים לשלב זה של התהליך בתל דור (Rostoker & Bronson 1990: 29-30; Tylecole 1962: 183-202; Craddock 1995: 234-253).

בשלב ב - ג - הברזל שהוצא הוכח ע"י החרש כזי להרחיק ממנו נתכים וסיגים. עבודת החרש יכולה הייתה להיעשות בכל מקום, אפילו במדורה ביתית קטורה (איור 1). רק בתקופה הרומית נבנו מבנים גבוהים ומיוחדים לשם כך. העובדות הארכיאולוגיות יהיו לפיכך עלובות. היה צורך בהפחה, ע"י מפוח פשוט, כדי להשיג טמפרטורות מספיק גבוהות וכן בפחם - עץ.

חימום הברזל עלול היה להופכו לתחמוצת ברזל ולפיכך לחסר תועלת. חייבת להיות, אם כן, שליטה בטמפרטורה וכן פיזור חול על פני הברזל. עבודת החרש אף היא יצרה פסולת ברזל, שמתאפיינת בסיגים שבצדם האחד קמורים ובצדם השני קעורים או שטוחים (*plano-convex*), צורת תחתית המדורה, כאלה הם הסיגים של תל דור (איור 2).

שיטות המחקר

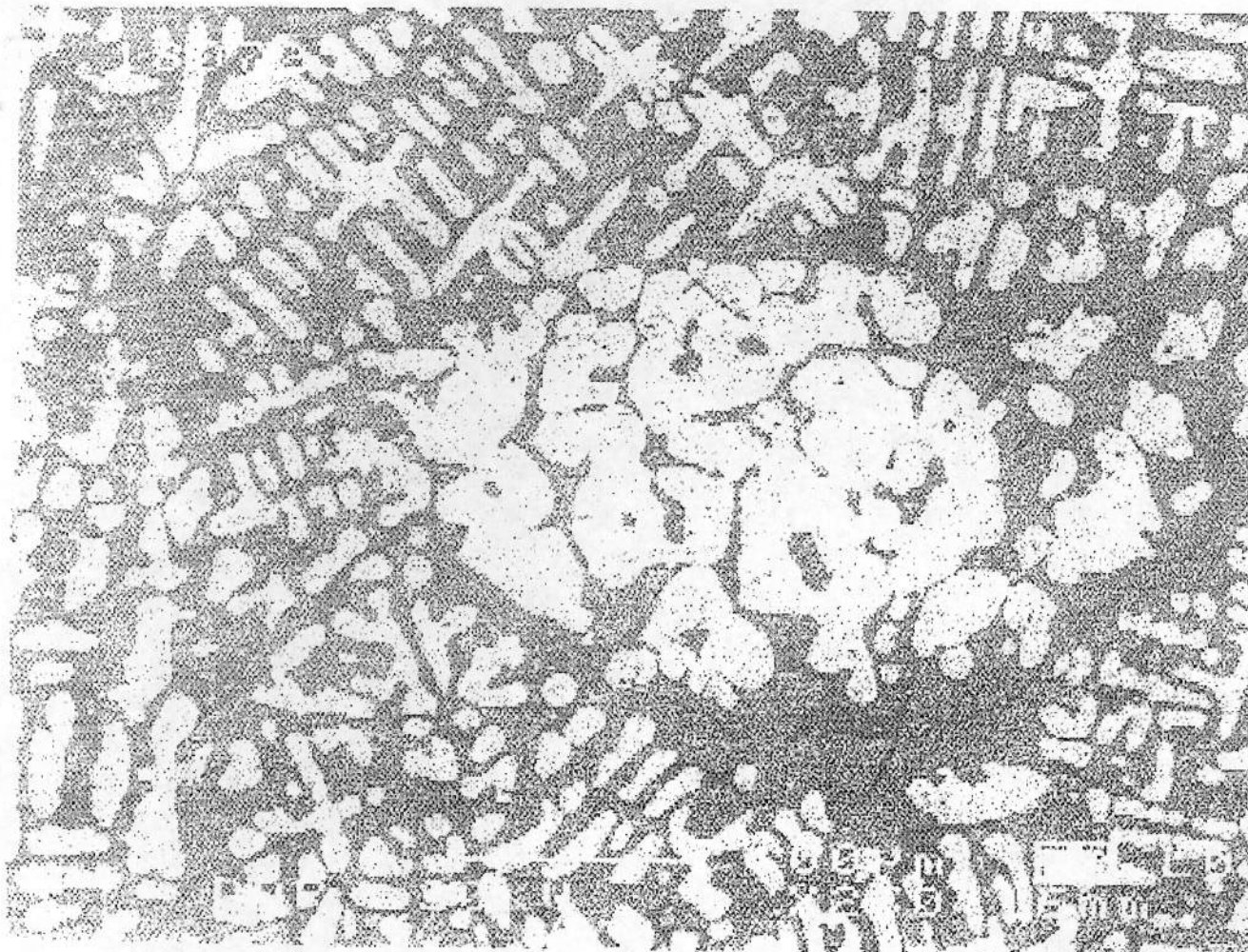
נבחנו כ-300 סיגים שונים, לאחר חיתוך ראשוני של כ-100 מהם, נמצאו בלתי מתאימים להגדרה, כמתצית מתוך ה-300, דהיינו הם היו אבנים, אדמה מועשרת בתחמוצת ברזל ותחמוצת ברזל. כ-50 דגימות נוספות נבחנו מטלוגרפית (Scott 1991) במיקרוסקופ אופטי, לאחר הכנה שנעשתה כדלהלן: איתור-אזור הדגימה, חיתוך הדגם- ללא לחץ או גזירה, בדיסק יהלום ובקירור מתאים, זפיחה בפולימר ולבסוף השחזה עדינה וליטוש מכני. לבסוף 20 דגימות נוספות נבחנו במיקרוסקופ אלקטרוני סורק JEOL 6400 (SEM) של ויצמן והאנליזר Energy dispersive X ray analysis (EDX) הצמוד אליו ומתופעל בעזרת מערכת ISIS. השימוש במיקרוסקופ מאפשר בחירה של השטח הנבדק במדויק ובהתעלמות משטחים בעייתיים כמו קורוזיה. רב האלמנטים, יכולים להיבדק עד לרמה של סחירות או קרבו. אנליזה כמוניטור מלאה יכולה להתקבל.

גלגל אי האחידות של המבנה נעשו כ-150 אנליזות ופעולות מיפוי כגון גודל גבישים, ספירת מזחמים, חללים או תרכובות בין מתכתיות, גודלם ופיזורם, מדידות נקבוביות, חישוב אחוזי של יחסי פאזות ועוד (ראה להלן).

חלק מן הדגימות הללו נבדקו במיקרופרוב Cameca SEMPROBE (EPMA) והאנליזר Wavelength dispersive X-ray analysis (WDX) שצמוד אליו במעבדה למחקר ארכיאולוגי וההיסטוריה של האימננט באוקספורד כדי לאמת את התוצאות. התוצאות היו דומות בעיקרן, מלבד השיפור באלמנטים הנדירים.

תוצאות האנליזות

הדגימאות מראות מיקרו- מבנה האופייני לסיגי חרש ברזל, שזה ביסודו פיזור לא הומוגני התחלתי של ברזל מחומצן בתוך מטריצה של לוחות אוליון ומרכיבים אלקליים. הכרזל המחומצן מפורז באזורים השונים בצפיפויות שונות מרמה של דנדריטים עדינים ועד לאלו שהם מעוגלים ועבים ולוחות והאליזון גיט כמעט ולא קיימים. צפיפויות הוונדריטים השונות מראות מבנה של טיפות שונות שנוספו לסיג במהלך התהליך (איור 3). בנוסף לכך נמצאו בתוך הסיגים חתיכות של ברזל מתכתי ונתגי פטיש (hammer scales - איור 4).



איור 3 - דנדריטים וול ברזל אוקסידי (wüstite) בצפיפויות שונות. בחלקה בעלי מעין שצורתו טיפה. הללו הן מיפות שונות שנוספו במהלך ההוליר.



איור 4 - נתני פטיש (hammer scales) ושל חרש ברזל שולכדו בתוך תסיג.

למרות שתבדיקה הראשונית הראתה שהצורה התיצונית והמבנה הפנימי הם של סיגים טיפוסיים של ונתית מוקד החרש, בדיקה קפדנית יותר הראתה שקיים מאפיין חריג. נוכחות גבוהה, יחסית לסיגים דומים, של קלציום בתוך האוליון. אנליות רבות של לוחות האוליון בסיגים השונים נתנו ברב המקרים תתן ויחס מלקולרי של אוקסידי סידן - צורן - ברזל ($\text{CaO to SiO}_2 \text{ to FeO}$) שבו כל אחד מהם מהווה שליש או כמעט שליש (איור 5). לפיכך יש לפנינו תמיסה מוצקה (solid solution) שאיננה ה "Fayalite" (Fe_2SiO_4) האופיינית בסיגי החרש. קרוב לוודאי שיש להתייחס לתמיסה מוצקה זו כ "Hedenbergite" ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$) או "Kirschsteinite" (CaFeSiO_4). בסיג אחד בלבד נמצאו שני סוגי האוליון זה בצד זה (איור 6).

במקומות בהם יש מיעוט של אוקסידי ברזל, החומר בין לוחות האוליון מתחלק לשני מרכיבים, האחד חנו גבישי ואחר כנראה זכוכיתו. לוחות האוליון גדולים בינוניים או קטנים ומראים על התקררות שונה, בהתאם למיקום במוקד ובהתאם לאירועים השונים, דבר שבהחלט מונאיח לסיגי החרש.

בחללים שבין לוחות האוליון, בדרך כלל בסיגים, מצוי המינרל אצאורוניט (פלדשפר סידני מקבוצת הפלגיוקלז - נוסחה כללית $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). כאן, בנוסף וכמאפיין, בכיסים קטנים ומצומצמים קיים פלדשפר אשלגני (potassic aluminosilicates) - מהקבוצה של פלדשפרים אלקאליים - נוסחה כללית KAlSi_3O_8 . כאשר פחות צורן קיים במינרל ורמת חימצון אחרת, קרוב לוודאי, שמתקבל מינרל נוסף שהינו ליאופיט ($\text{Leucite - KAlSi}_2\text{O}_6$ מקבוצת הפלדשפרואידים).

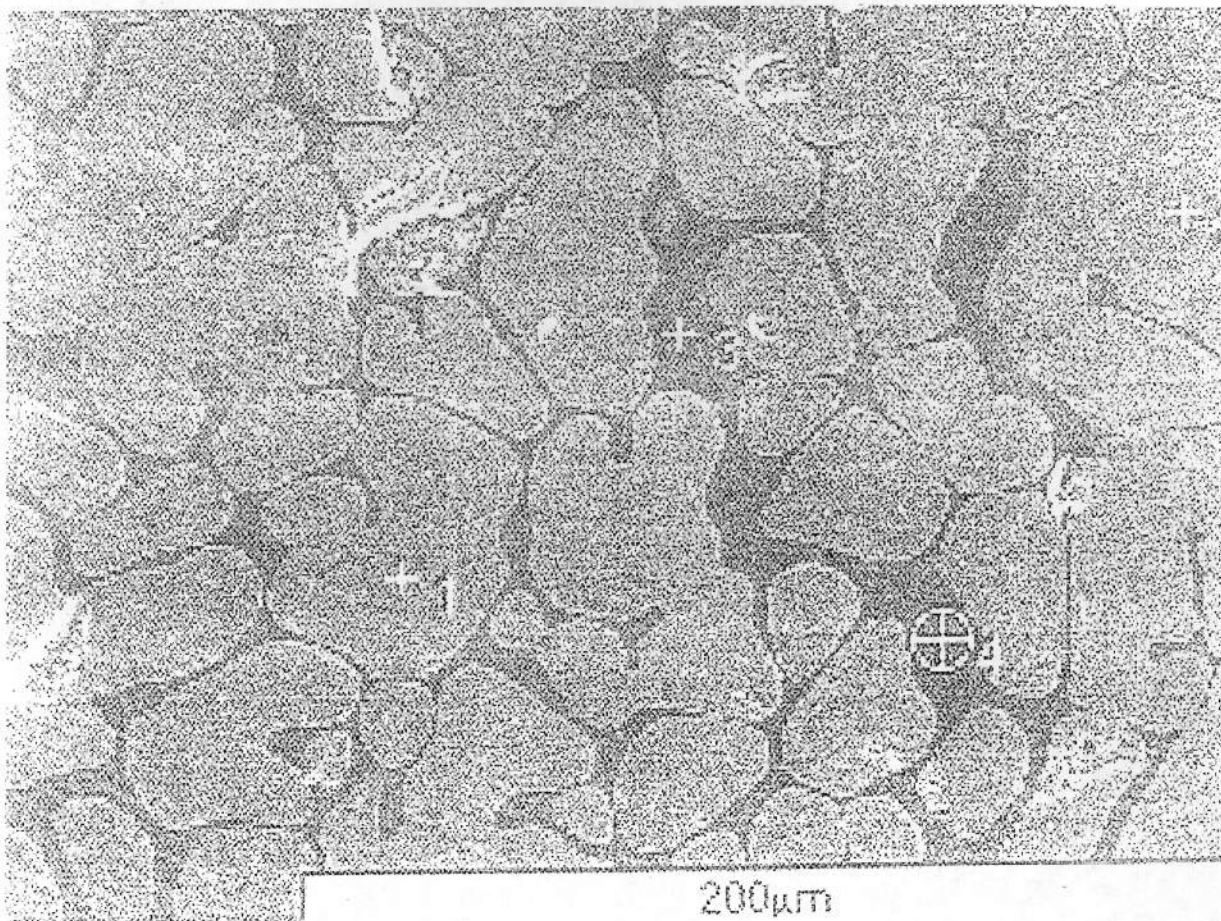
דיון ומסקנות

סיגי חרש הברזל נוצרים כאשר פני תפצי הברזל מתחמצנים במהלך החימום לצורך החישול. שכבות הברזל המחומצן מתקלפות ונפלות אל תוך המוקד ונוצרת ריאקציה בין ובין האפר (alkali) הנוצר מפתח העץ, תוספי (flux) הצורן שעוזרים לריתוך (welding), סיגים המשתחררים מן המתכת וציפוי (lining) הטיט של התנור. סיגים אלה, הנוצרים במוקד מטווח, בדרך כלל, הנם מטיפוס של וחמוצות ברזל- פייליט (ראה לעיל) עם כמות קטנה של חומר שהינו אנאורתיט (anorthitic interstitial material) בחללים. סיגים שהאוליון שלהם חורג מאזור הפייליט של דיאגרמת הפאזות קשורים לטביכה שהינה סיננית.

1. מקור העפרה הוא אזור עשיר בסידן (כרגע נערכת בדיקה משווה בעזרת הצוות האיטלקי שניתח את מבנה העפרה בסוריה).

2. טיח הטיט של המדורה הקטורה נלקח מאזור עשיר בסידן. תנאי זה, מתקיים ללא ספק, במקרה של תל - דור.

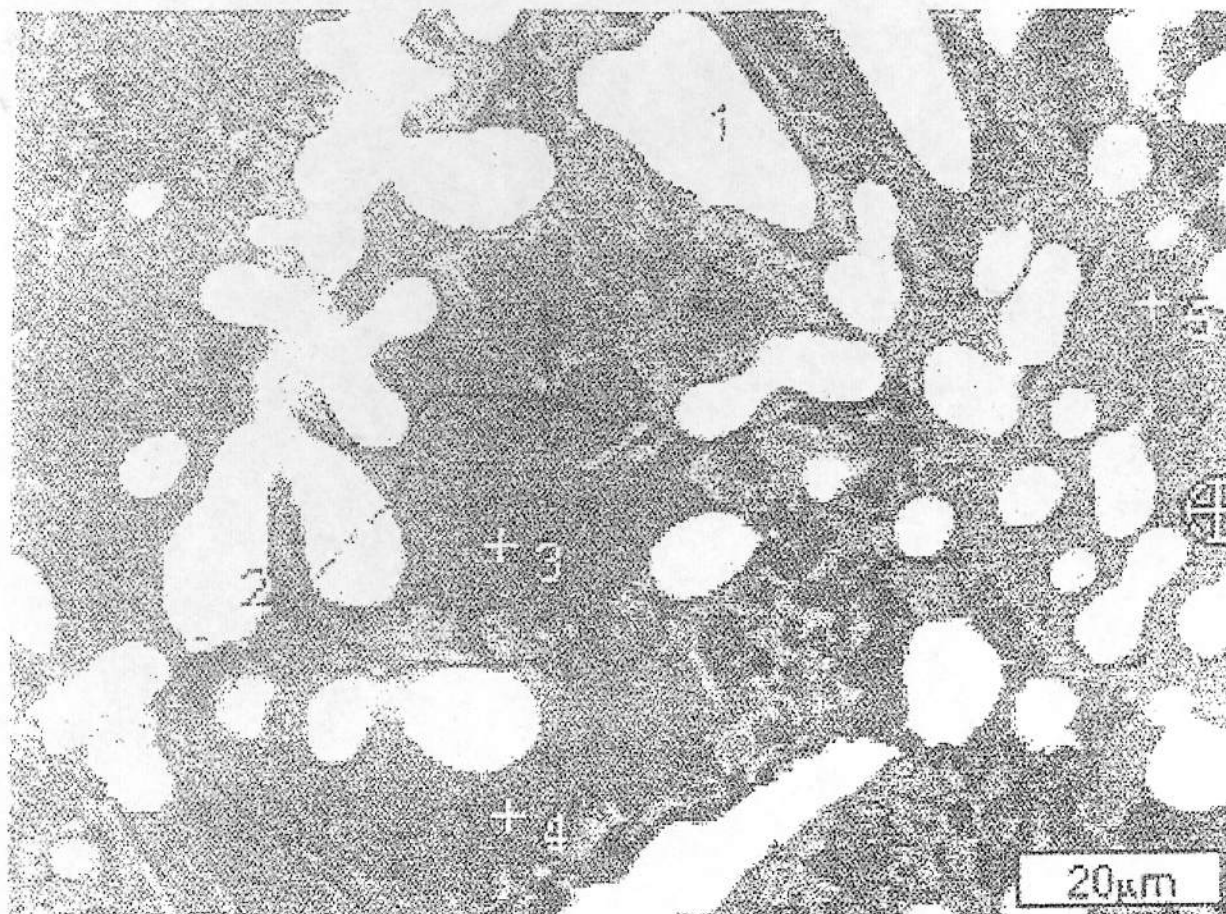
* ייתכן גם מצב ששני התנאים הללו קיימים בעת ובעונה אחת.



איור 5 - סיג חרש ברזל מס' 99622 (הרכב באחוזים - compound)
 1-2 ברזל אוקסידי
 3-4 אוליטון

"= ≤ 2 sigma

FeO	MnO	Flu.	CuO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	
97.91	*0.16	*0.09	*-0.06	0.34	*0	*0.25	0.5	0.67	*0.57	1
97.64	*-0.20	*-0.19	*0.09	*0.11	*-0.18	*-0.29	*0.24	0.74	0.73	2
25.85	*0.04	*0.27	23.35	4.84	*0.50	1.29	34.27	8.39	0.91	3
26.94	*0.06	*0.09	23.51	4.68	*0.13	1.02	35.50	7.88	0.63	4



איור 6 - סג חרש ברזל מסי 98749 (הרכב באחוזים - compound)
 1-2 ברזל אוקסידי
 3-4 אוליגין כהה (fayalite)
 5-6 אוליגין כהיר (kirschsteinite)

*= ≤ 2 sigma

FeO	MnO	TiO ₂	CuO	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	
96.39	*0.06	0.36	0.29	*0.11	*0.21	*0.35	0.63	0.74	0.73	1
98.02	*0.27	0.60	*0.26	*-0.05	*-0.10	*-0.30	*0.01	0.64	0.59	2
43.59	*-0.21	*0.36	4.22	0.34	*0.27	*0.52	47.29	1.15	1.34	3
44.89	*0.19	*0.11	3.87	0.47	*0.09	*0.67	47.14	*0.54	1.59	4
30.97	*0.03	*-0.10	33.53	*0.13	*0.20	0.71	32.53	0.50	1.12	5
29.56	*0.10	*0.07	34.55	*0.05	*0.06	1.00	33.09	*0.32	1.33	6

עם זאת, כל הסיגים שנבדקו הנם סיגי חרש ברזל ולא נמצאו בהם ריכוזים או אי - ניקיונות שיעידו אחרת.

סלטר והירנרייך (Saller and Hirnreich 1984) סבורים על סמך ייצור ניסויי שיחס בין הסיגים של חרש הברזל למוצרים המוגמרים הוא 1 : 10 . כלומר 7.5 קילוגרם של סיגים בתל - דור משמעותם 75 קילוגרם של מוצרים מוגמרים בכל התקופות המיוצגות.

שניים מן הסיגים, המוקדמים ביותר מאלו שנבדקו, מכילים בתוכם כיסיה של מנגניט (מינרל השייך לעפרה), דבר שמעיד לדעתי על חישול ראשוני ולא על ייצור של מוצרים מוגמרים. בסיגים המאוחרים קיימת תופעה אחרת, איבוד רב של ברזל מתכתי. דבר זה נובע מפעולת ריתוך, כנראה וניקון של כלים ישנים ועבודה רשלנית ולא מיזמנת של חרש הברזל. שני הסיגונים הללו אינם תומכים בטענה שנוצרו מוצרים מוגמרים במשקל של 75 קילוגרם. כך או כך, מדובר בייצור בקנה מידה זעיר, כנראה חרש ברזל שעבד בחצר תחת קרוי של סכך, כפי שנהוג באפריקה גם היום (Brown 1995). עבודתם נעשתה, אה וכאשר, היו להם מספיק כלים לשיפוץ. סלטר (Sa) אף טוען (בשיחה אישית) שכל סיג מייצג אירוע אחד בלבד, יום עבודה אחד של חרש הברזל. לפיכך במקרה של תל - דור, נכון למידע המצוי ביד, עבדו החורשים 144 פעמים לאורך כל התקופות כולן.

מרבית העבודה נעשתה, כמשך כל התקופות באזור של ריבוע AG33, תחום של 5 X 5 מטר. וינן נוסף, בהתפלגות מראה שמרבית עבודת החרש היא מהתקופה הפרסית.

ביבליוגרפיה

- Bachmann, H.G. 1982, *The Identification of Slags from Archaeological Sites*. London. The Institute of Archaeology.
- Brown, J. 1995, *Traditional Metalworking in Kenya*. Oxbow Monograph 44.
- Craddock, P.T. 1995, *Early Metal Mining and Production*. Edinburgh, Edinburgh University Press.
- Crew, P., 1991, The experimental production of prehistoric bar iron. *Journal of the Historical Metallurgy Society* 25(1), pp. 21-36.
- Rostoker, W. and Bronson, B. 1990, *Pre-Industrial Iron, Its Technology and Ethnology*. Archaeomaterials Monograph 1.
- Tylecote, R.F. 1962, *Metallurgy in Archaeology*. London, Edward Arnold.
- Scott, D.A. 1991, *Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals*. Singapore, Tien Wah Press (by Paul Getty Trust)

Salter C.J. and Ehrenreich R., 1984. Iron Age metallurgy in central southern Britain, in *Aspects of the Iron Age in central southern Britain*, eds B. Cunliffe and D. Miles, OUCA,2, Oxford, pp. 146-61

Salter C.J., 1994 Analysis of iron smithing slag. In Hojlund, F and Andersen H.J.L., *Qala'at al- Bahrain, The northern city wall the Islamic fortress and I. Aarhus*, pp. 382-385