

מערכות ספרתיות

חלק א

מערכות צירופיות

מהדורה ראשונה: אוקטובר 2011



הוצאת שורש (אלי מיטב) 052 – 2671210

email: elmtv@netvision.net.il

web: <http://www.shoresh1.co.il>



כל הזכויות שמורות למחבר

**אין לצלם או לסרוק מספר זה ללא אישור מהמחבר או מהמוציא לאור
צילום או סריקה מספר זה ללא אישור הינו עבירה על החוק**

(ויותר חשוב: זה גם לא הוגן)

תוכן עניינים

1	..... פרק המבוא
2	..... הקדמה
4	..... מבנה הספר
7	..... תודות
9	..... פרק 1 - אלגברה בוליאנית
10	..... מבוא לפרק
11	..... אלגברה בוליאנית ויישומיה
12	..... לוגיקה סימבולית ו statements
13	..... פעולות לוגיות על statements
16	..... מושגים בתורת הקבוצות
17	..... פעולות בוליאנית שנעשות על קבוצות
20	..... חוקים באלגברה בוליאנית ודפוסי החשיבה ההגיונית שלנו
22	..... בדיקת זהויות באמצעות Venn Diagrams
26	..... הגדרות בסיסיות באלגברה בוליאנית
28	..... אוסף חוקים בסיסי
31	..... תיאור פונקציות לוגיות בטבלת אמת
32	..... הוכחת זהויות באמצעות טבלת אמת
34	..... הוכחת כמה הרחבות לחוקי היסוד
36	..... דף חזרה וסיכום לחוקים של אלגברה בוליאנית
37	..... דוגמה מורכבת יותר להוכחת זהות
39	..... חוקים משותפים לאלגברה רגילה ולאלגברה בוליאנית
40	..... חוקים באלגברה בוליאנית שאינם קיימים באלגברה רגילה
41	..... דוגמה נוספת להוכחת זהות
43	..... זהירות מביצוע פעולות שאינן חוקיות באלגברה בוליאנית !
45	..... צורות רישום של פונקציה כסכום מכפלות (Sum Of Products)
46	..... צורת רישום של פונקציה כסכום מכפלות מלאות
48	..... צורות רישום של פונקציה כמכפלת סכומים (Product Of Sums)
49	..... צורת רישום של פונקציה כמכפלת סכומים מלאים
51	..... רישום של צורות קנוניות באופן מקוצר
52	..... הצגת נוספת של הקשר בין טבלת אמת וייצוג קנוני של הפונקציה *
55	..... הוכחת חוקים שימושיים נוספים
57	..... מקבץ תרגילים
61	..... פרק 2 - מימוש לוגי באמצעים שונים
62	..... מבוא לפרק
64	..... מתגים מכאניים וצורות הסימון שלהם
68	..... מצבים לוגיים וסוגי מגעים של מתגים
70	..... מימוש פעולות לוגיות בסיסיות באמצעות מגעי מתגים
72	..... מימוש פונקציות לוגיות כל שהן באמצעות מגעי מתגים
78	..... מימוש מערכת לוגית באמצעות חומרת מתגים
80	..... סימולציה (הדמיה) ידנית
82	..... צמצום אלגברי של הפונקציה
84	..... תפקידם של מתגים בעולם הספרתי המודרני
85	..... הממסר

88	..... מימוש לוגי באמצעות ממסרים
92	..... האם יש לממסרים תפקיד בעולם הספרתי המודרני ?
94	..... מימושים אלקטרוניים ראשוניים
95	..... התפתחות הטכנולוגיה האלקטרונית – טרנזיסטורים
97	..... החומרים שמהם בנויים רכיבים אלקטרוניים *
100	..... פעולה אלקטרונית עקרונית של שער NOT
103	..... פעולה אלקטרונית עקרונית של שערי OR ו AND
105	..... התפתחות הטכנולוגיה האלקטרונית - מעגלים משולבים
110	..... התפתחותן של משפחות לוגיות וחשיבותן
112	..... היסטוריה קצרה של משפחות לוגיות *
116	..... כמה דוגמאות ל I/O Standards של משפחות לוגיות *
122	..... האם עדיין קיימות כיום משפחות לוגיות ? *
128	..... שימוש באבני הבניה שלנו - בשערים
129	..... מעבר מעשי בין שערים עם מספר גדול וקטן של כניסות
131	..... כללי חיווט – חיווט כניסות שאינן בשימוש
133	..... כללי חיווט – איסור חיווט בין יציאות
137	..... סכימה של מימוש שנעשה עם שערים ומעבר ממנה לפונקציה
139	..... הפיכת פונקציה לסכימה לוגית שממומשת באמצעות שערים
140	..... מימוש אלקטרוני של המערכת של הדיירים החסכנים
142	..... צורות מימוש הפוכות
144	..... סימולציה (הדמיה) ידנית על שערים
146	..... מימושים ישנים עם רכיבים סטנדרטיים
147	..... מימוש אלקטרוני מודרני באמצעות רכיב מתוכנת
151	..... לוגיקה חיובית ושלילית *
152	..... מקבץ תרגילים
159	..... פרק 3 - מימוש באמצעות טבלאות שונות ובלעדיהן
160	..... מבוא לפרק
161	..... טבלת אמת עם דרגות חופש (Φ) ביציאות
163	..... טבלת אמת עם משתנים בצד ימין של הטבלה
164	..... רישום הפונקציה של טבלה עם משתנים
166	..... הפיכת טבלת אמת עם משתנים בצד ימין לטבלה רגילה
167	..... הפיכת טבלת אמת רגילה לטבלת אמת עם משתנים בצד ימין
169	..... תיאור מילולי של טבלת אמת עם אותיות בצד ימין של הטבלה
172	..... משתנים מצד שמאל שמופיעים גם בצד ימין
173	..... טבלאות דו ממדיות
176	..... טבלאות אמת עם ברירת מחדל
177	..... טבלאות אמת עם Φ בצד שמאל של הטבלה
179	..... טבלאות מקוצרות שאינן ממצות או שכוללות סתירות פנימיות
180	..... הפיכת טבלה רגילה למקוצרת
184	..... קבלת טבלת אמת מקוצרת ישירות מבעיה מילולית
185	..... דוגמה למציאת הפונקציה במקרה של טבלה מעורבת
186	..... מקבץ תרגילים

193	.....	פרק 4 - צמצום של מערכות צירופיות
194	.....	מבוא לפרק
195	.....	צמצום אלגברי
198	.....	מפות קרנו
202	.....	מינימיזציה של סכומי מכפלות באמצעות מפות קרנו של שני משתנים
209	.....	מינימיזציה SOP באמצעות מפות קרנו של שלושה וארבעה משתנים
216	.....	הקצוות של מפות קרנו
217	.....	מינימיזציה של מכפלות סכומים וצורות הפוכות
220	.....	טיפים נוספים בקשר למינימיזציה עם מפות קרנו
223	.....	מינימיזציה עם מפות קרנו לחמישה ושישה משתנים
229	.....	מינימיזציה עם דרגות חופש
231	.....	צמצום פונקציות עם משתנים שמוכנסים בטבלה (Map Entered Variables)
235	.....	צמצום מכפלות סכומים (POS) עם משתנים שמוכנסים בטבלה
238	.....	טיפים נוספים בקשר לצמצום עם משתנים שמוכנסים בטבלה
241	.....	שימוש ב - MEV יוצר צמצום אך לא מינימיזציה
242	.....	צמצום באמצעות שיתוף משאבים ברמת הפונקציות והשערים
245	.....	שיתוף משאבים עם פונקציה סגורה
249	.....	ביצוע פעולות במפות קרנו כפעולות על קבוצות
254	.....	צמצום קבוצתי (Group Reduction)
256	.....	הכרת מושגים: Implicants ו Prime Implicants *
262	.....	מינימיזציה בשיטת QM – מציאת Prime Implicants של הפונקציה *
266	.....	מציאת כיסוי מינימלי לפונקציה (בשיטת Quine McClusky) *
268	.....	שיטות צמצום לטבלת הכיסוי של Quine McClusky *
271	.....	מימוש POS (בשיטת Quine McClusky) *
273	.....	צמצום טבלת כיסוי במקרה של הסתעפות (בשיטת Quine McClusky) *
277	.....	רישום המכפלות בטבלת הכיסוי - כביטוי לוגי (בשיטת Quine McClusky) *
278	.....	מינימיזציה קבוצתית (Group Minimization) בשיטת Quine-McClusky *
283	.....	מקבץ תרגילים
287	.....	פרק 5 - שערים מיוחדים
288	.....	מבוא לפרק
288	.....	מערכת שערים שלמה
291	.....	שערי NAND
294	.....	שערי NOR
297	.....	ניתוח מערכות עם שערי NAND ו NOR
300	.....	מימוש מערכות עם שערי NAND
303	.....	מימוש מערכות עם שערי NOR
305	.....	שערי XOR
313	.....	מעבר מאלגברה בוליאנית לאלגברת Reed Muller
315	.....	פעולת XNOR
318	.....	הוכחת משפט כביטוי שתמיד שווה ל - '1' לוגי *
319	.....	מפות קרנו של פעולות XOR ו XOR הפוך

323	..... דוגמה למימוש פונקציה באמצעות שערי XOR
326	..... שימוש בשערי XOR ו XNOR ליישום של יצירת ובדיקת Parity
327	..... קצת על תכונות אלגבריות של שדות סופיים (Finite Fields) *
330	..... השדה הסופי הבינארי GF(2) *
332	..... מקבץ תרגילים
343	..... פרק 6 - גורם הזמן במערכות צירופיות
344	..... מבוא לפרק
345	..... זמן השהיית מעבר
347	..... האם tpd יכול להיות אפסי ?
348	..... השפעת קיבול היציאה הפרזיטי
351	..... דוגמאות לזמני השהייה בדפי היצרן
353	..... זמני השהייה שמדווחים בכלי פיתוח בתכן מודרני
356	..... דוגמה להפרעות לוגיות שנוצרות כתוצאה מהשהייה
360	..... התנאי ההכרחי הנדרש ליצירת מימוש ללא הפרעות לוגיות
360	..... טענת עזר ראשונה
363	..... יצירת Spike במתכוון באמצעות גוזרים א-סינכרוניים
365	..... טענת עזר שנייה
366	..... מתי נוצרים Static Hazards במימוש SOP ?
370	..... כיצד נוצר Hazard סטטי במימוש SOP ?
371	..... כיצד מונעים Hazard סטטי במימוש SOP ?
372	..... מניעת Hazards במימושים מסוג SOP חיובי ושלילי
375	..... מניעת Hazards במימושים מסוג POS חיובי ושלילי
378	..... טיפול במכפלות משיקות באופן אלגברי *
381	..... טיפול בסכומים משיקים באופן אלגברי *
382	..... דיאגרמת זמנים של מכונת מצבים לעומת מערכת צירופית
386	..... משוב שיוצר מרוצים
388	..... מודלים ממוחשבים לזמני השהייה *
389	..... מקבץ תרגילים
399	..... פרק 7 - חשבונות בבסיסים שונים וקודים
400	..... מבוא לפרק
401	..... ספירה בשיטות שונות
408	..... כללים אריתמטיים בסיסיים בשיטת ייצוג בינארית
409	..... חיבור בינארי
413	..... חיסור בינארי
416	..... כפל בינארי
419	..... חילוק בינארי לעומת עשרוני
423	..... חילוק בינארי עם שארית
433	..... חילוק בינארי עם תוצאה של שבר מתמשך
434	..... עיגול שברים בבסיס הבינארי
435	..... המשמעות של שיטות ייצוג של מספרים
436	..... הדגמה מדוע הערך של הספרות צריך להיות קטן מהבסיס ?
437	..... הוכחה שהייצוג של כל מספר הוא אחד ויחיד *
439	..... דוגמאות קוד בשפת VHDL להמרת ערך בינארי לעשרוני באמצעות הנוסחה *
440	..... המרה מעשרוני לבינארי של שלמים - בשיטת החלוקות ב - 2
443	..... מדוע האלגוריתם של חלוקה ב - 2 עובד ? *

444	..... דוגמה לקוד VHDL עם אלגוריתם החלוקות ב - 2 *
445	..... המרה מעשרוני לבינארי שלמים - בשיטת החלוקות בחזקות של 2
447	..... מדוע האלגוריתם של חלוקה בחזקות של - 2 עובד ?
448	..... המרה של שברים עשרוניים לבינאריים
449	..... רישום מקוצר של המרה של שברים עשרוניים לבינאריים
450	..... מדוע האלגוריתם של כפל ב - 2 עובד ?
451	..... דוגמה לקוד VHDL עם אלגוריתם הכפלות ב - 2 *
452	..... המרת שברים עשרוניים לבינאריים באמצעות חלוקה בחזקות שליליות *
453	..... מעבר מעשרוני לבינארי כאשר החישובים נעשים בבינארי *
454	..... מעברים בין עשרוני ואוקטלי
456	..... חשיבותה של שיטת הייצוג האוקטלית
459	..... מעברים בין עשרוני והקסדצימלי
460	..... דוגמה לתרגיל מעבר בין שני שלמים מבסיסים כלשהם
462	..... דוגמאות לקודים של המרה מבסיס לבסיס בשפת C *
464	..... קוד BCD
465	..... מעבר ישיר מ - BCD לבינארי באמצעות חיבור בינארי של משקלי סיביות BCD *
466	..... מעבר ישיר מבינארי ל - BCD באמצעות חיסור בינארי של משקלי סיביות BCD *
467	..... מעבר ישיר מ - BCD לבינארי באמצעות הזזות ימינה והתאמות *
469	..... מעבר ישיר מבינארי ל BCD בשיטת התאמות והזזות שמאלה *
471	..... הכפלה וחילוק ייצוג בינארי בחזקות של 2 ופעולת הזזה
472	..... קיצוץ של מספר בינארי שלם משמאל ופעולת השארית של חלוקה בחזקות של 2
473	..... חשבון במספר מוגבל של ספרות - מקרה פרטי
474	..... חשבון במספר מוגבל של ספרות - מקרה כללי
477	..... המשלים המוקטן לבסיס
478	..... המשלים המלא (האמיתי) לבסיס
480	..... מציאת המשלים האמיתי לבסיס 2 בשתי דרכים מקוצרות
482	..... ייצוג מספרים בעלי סימן בשיטות שונות
482	..... שיטת הסימן וגודל
483	..... שיטת המשלים ל - 1
485	..... שיטת המשלים ל - 2
488	..... שיטת ההיסט הבינארי
490	..... מקבץ תרגילי המרה משיטת ייצוג אחת לשניה
493	..... המרות עקיפות וישירות עם עשרוני
496	..... גלישה בחיבור וחסור מספרים ב - 2C
499	..... הכפלה של ייצוג 2C בחזקות של 2
503	..... הוכחה שהזזה לוגית שמאלה של ייצוג ב - 2C אכן מכפיל את המספר ב - 2 *
504	..... חילוק של ייצוג 2C בחזקות של 2
506	..... הוכחה שהזזה אריתמטית ימינה של ייצוג ב - 2C אכן מחלק את המספר ב - 2 *
507	..... הרחבה וצמצום של רוחב מערכת ב - 2C
508	..... קוד Gray
514	..... דוגמאות לקוד המרה בין בינארי ו Gray בשפת VHDL *
515	..... כמה תכונות מעניינות נוספות של קוד Gary
518	..... קוד אלפאנומרי - למשל ASCII
519	..... מקבץ תרגילים

523	..... פרק 8 - רכיבים אריתמטיים
524	..... מבוא לפרק
525	..... דוגמה למימוש מחבר ברוחב שתי סיביות
529	..... מימוש מחבר מודולרי לסיבית אחת
533	..... השם המוזר Full-Adder ומימושים אלטרנטיביים שלו
539	..... מחבר מודולרי לכמה סיביות
542	..... גילוי שגיאה בחיבור של שני מספרים
545	..... חיבור מספרים באמצעות מחסר מודולרי
548	..... גילוי שגיאה בפעולת חיבור
551	..... מבנים פנימיים אפשריים של מחבר ברוחב של כמה סיביות *
554	..... יצירת Carry מהיר בשיטת Carry Look Ahead *
564	..... שימוש ב- CLA בהיררכיה גבוהה יותר *
570	..... דוגמה לתכן עם רכיב מחבר - מימוש מחבר מחסר
573	..... דוגמה ליחידה אריתמטית לוגית - ALU
578	..... דוגמה נוספת לתרגיל תכן עם מחבר (ממיר מ- 1C ל- 2C)
582	..... דוגמה נוספת לתרגיל תכן עם מחבר (ממיר מ- 2C ל- 1C)
585	..... משווה זהות
587	..... משווה גודל
593	..... חיבור טורי ומקבילי בין משוויים והמהירות שלהם *
597	..... השוואה של מספרים מכוונים
598	..... תכנון מערכת איטרטיבית
601	..... רכיבי LPM אריתמטיים בסיסיים *
604	..... מקבץ תרגילים
617	..... פרק 9 - רכיבי ניתוב וקידוד מידע
618	..... מבוא לפרק
619	..... הבורר - Multiplexer
623	..... הרחבה של בוררים במבנה של עץ
627	..... צמצום של בוררים
629	..... מימוש של פונקציה באמצעות בוררים
634	..... המפלט - De-Multiplexer
638	..... הרחבה של מפלגים במבנה של עץ
640	..... הרחבה דו ממדית של מפלגים
642	..... צמצום של מפלגים
643	..... מימוש פונקציה באמצעות מפלגים
647	..... מימוש פונקציה באמצעות מפלגים עם יציאות שפעילות בנמוך
654	..... תרגיל עם בורר ומפלט
655	..... מפענחים - Decoders
658	..... מפענח עם כניסת אפשרור
664	..... הרחבות של מפענחים באופן דו-ממדי
665	..... מימוש פונקציות לוגיות באמצעות מפענח
666	..... מקודד והבעייתיות שלו
668	..... מקודד עדיפויות שניתן להרחבה
671	..... רכיבי ניתוב מידע כרכיבים חשבוניים *
674	..... דוגמאות לקודים בשפת VHDL *
677	..... מקבץ תרגילים

683	..... פרק 10 - יציאות מתנתקות וחיבור ל – BUS
684	..... מבוא לפרק
685	..... אופן הפעולה של יציאה רגילה
689	..... יציאה מסוג Open-Drain
691	..... חיווט בין יציאה Open-Drain וכניסה של רכיב
693	..... שימוש ביציאות Open-Drain ליצירת Wired-Logic
695	..... שימוש ביציאות Open-Drain ליצירת Shared-BUS
699	..... רכיבים בעלי יציאות מתנתקות מסוג Tri-State
701	..... התנאים שבהם מותר לחבר בין יציאות מסוג Tri-State
705	..... שימוש ביציאות Tri-State ליצירת Shared-BUS
707	..... שימוש Shared-BUS לעומת Dedicated Buses
710	..... הפיכת Tri-State ל – Open Drain
711	..... מצבים לוגיים בשפות תיאור חומרה *
713	..... פונקצית רזולוציה לחיווט בשפות תיאור חומרה *
718	..... פונקצית לוגיות עם מצבים חלשים ובלתי ידועים בשפות תיאור חומרה *
722	..... דוגמאות לקוד בשפת VHDL ו Verilog *
723	..... מקבץ תרגילים
733	..... פרק 11 - פרק הנספחים
734	..... אלגברה בוליאנית באמצעות מספר מצומצם של אקסיומות (הרחבה לפרק 1)
739	..... דיאגרמות סולם (הרחבה לפרק 2)
743	..... הסבר פשטני על שער NOT בטכנולוגיית CMOS (הרחבה לפרק 2)
747	..... הסבר פשטני על שער AND בטכנולוגיית CMOS (הרחבה לפרק 2)
750	..... הסבר פשטני על שער OR בטכנולוגיית CMOS (הרחבות לפרק 2)
753	..... דוגמאות ל – I/O Standards של זרמים (הרחבה לפרק 2)
759	..... חיווט מתגים לרכיבים ספרתיים (הרחבה לפרק 2)
762	..... חיבור נוריות LED לרכיב ספרתי (הרחבה לפרק 2)
767	..... דוגמה לממשק בין מערכת ספרתית (TTL) וממסר זעיר (הרחבות לפרק 2)
771	..... צמצום באמצעות שיתוף משאבים ברמת הבלוקים (הרחבה לפרק 4)
772	..... צמצום באמצעות התכנית ESPRESSO והמבנה של קבצי PLA (הרחבה לפרק 4)
775	..... הפעלת התכנית ESPRESSO (הרחבה לפרק 4)
781	..... אופן החישוב של נגד ה – Pull-Up (הרחבה לפרק 10)

פרק המבוא

הקדמה

הספר בא לתת מענה רחב בהיקפו, מעמיק ובהיר לנושאים הנלמדים במסגרת המקצוע "מערכות ספרתיות", שהוא מקצוע בסיסי ומרכזי לאנשי אלקטרוניקה חשמל ומחשבים ושלמד בקורסים באוניברסיטאות, במכללות אקדמיות, במכללות להנדסאים, בבתי ספר תיכון מקצועיים ובקורסי הסבה שונים. הספר מתאים לכל המסגרות הללו. המקצוע מערכות ספרתיות (Digital Systems) נקרא לעתים גם באחד מהשמות האלטרנטיביים הבאים: תכן- לוגי (Logic Design), תכן-ספרתי (Digital Design) או בשמו הישן יותר: תורת המיתוג (Switching Theory).

הספר מבוסס על התנסות אינטנסיבית של המחבר בהעברת קורסים בנושא "מערכות ספרתיות" וניסיון רב בתחום של "רכיבים מתוכנתים". ההרצאות השונות שוכתבו במשך הזמן וחומרי רקע נוספים הוספו להעשרה. הספר מכיל הסברים מפורטים, מגוון דוגמאות ותרגילים לתרגול עצמי. מכיוון שהיקף החומר הוא רב, הוחלט מראש לפצל את הספר לשני כרכים. כרך זה שהוא הכרך הראשון מבין שניים, עוסק במערכות צירופיות והכרך השני שיצא בהמשך יעסוק במערכות עם זיכרון (מכונות מצבים).

הספר בנוי באופן גמיש. תת-פרקים שבספר שמסומנים בתו *, מכילים בדרך כלל תכנים מתקדמים יותר והם פרקים שניתן לדלג על קריאתם מבלי לפגוע בהמשך ההבנה והלימוד. שאר הפרקים (אלו שאינם מסומנים ב - *) מהווים את הגרעין המינימלי של הספר שעליו כדאי שלא לדלג. באופן כזה הקורא יכול להתאים לעצמו את חומרי הלימוד שנדרשים לו. תרגילי רשות גם הם מסומנים ב *.

הספר מטפל הן באופן תיאורטי והן באופן מעשי בחומרה (Hardware). לימוד המקצוע מקנה בסיס להכרת חומרת המחשב בפרט וחומרה ספרתית בכלל. בשנים האחרונות אנו עדים לתחומים רבים באלקטרוניקה שבעבר היו אנלוגיים ושנהפכים במשך השנים לספרתיים. מדובר בתחומים כגון: פיקוד ובקרה, מכשור ומדידות, תקשורת, ווידאו (Video), שמע (Audio), עבוד אותות ספרתי (DSP), אלקטרוניקה רפואית, אלקטרוניקת רכב, ותחומים רבים נוספים. הספר מהווה קדם חשוב למקצועות רבים אחרים בתחום האלקטרוניקה והמחשבים כגון: אלקטרוניקה ספרתית, מיקרו-פרוססורים, מעבדות ספרתיות, תקשורת ספרתית, תקשורת מחשבים ומקצועות נוספים.

הספר מכסה גם אספקטים עכשוויים של חומרה ספרתית כהכנה הכרחית גם לנושאים של: **תכן ספרתי, רכיבים מתוכנתים ושפת תיאור חומרה.** מהתנסות רבה של המחבר בהעברת קורסים בנושא "רכיבים מתוכנתים" ו"שפות תיאור חומרה" (באקדמיה ובתעשייה) וגם מהדרכה והנחייה של פרויקטים, נלמד שאחת הבעיות הנפוצות שנתקלים בה הלומדים שמנסים להיכנס לתחום מודרני זה, עלולה להיות חוסר רקע מספיק והעמקה בנושא מערכות ספרתיות. ידע בסיסי וחלקי בתחום של מערכות ספרתיות, עשוי להיות אולי מספיק כרקע כללי להבנת נושאים כגון מיקרופרוססורים או תקשורת ספרתית ונושאים אחרים, אך לשם ביצוע תכן ספרתי בפועל, דרוש ידע רב יותר. כאשר מבצעים תכן ספרתי **חשוב למשל להבין היטב:** את ההבדל בין מפענח ובורר או מפלג, מהם Hazards ו Spikes שנוצרים במערכת צירופית וכיצד ניתן לחיות עם הפרעות אלו, איך מחברים בין מונים, איך מחברים בין רגיסטרים ומהן בעיות התזמון שעלולות להיווצר בחיבורים כאלה, להבין למשל איך פועלת יציאה של Tri-State BUS ו Open-Drain ומהם מצבים לוגיים חלשים וחזקים, להכיר את החוקים שקשורים לפעולת XOR (אלגברה של AND ו XOR), מהם ההבדלים בין מכונת Mealy ו Moore וההשלכות המעשיות של הבדלים אלו על תכן ספרתי, מהי מכונת Moore ישירה ויתרונותיה בתכן מעשי,

מהי הקצאת מצבים One-Hot ויתרונותיה בארכיטקטורות LUT, איך מחשבים תדר שעון מכסימלי של מערכת ואיך מגדילים אותו, מהם כללים לביצוע תכן סינכרוני, מהם הסכנות של סגירת משוב סביב מכונת Mealy והשימוש במשוב צירופי, איך מתגברים על בעיות כגון אי קיום זמן הכנה או זמן החזקה של מערכת, איך מחשבים נתוני תזמון של מערכת, איך מקטינים הסתברות להיווצרות של Meta-stable-State ומונעים החטאה בכניסה שאינה מסונכרנת ועוד...

נסכם ונאמר, שהמקצוע מערכות ספרתיות כפי שהוא נלמד בספר זה, מהווה הכנה טובה עבור המקצועות הבאים: "שפות תיאור חומרה" (כגון VHDL ו Verilog), מקצועות של "תכן עם רכיבים מתוכנתים" (קורסים, מעבדות ופרוייקטים). לספר זה ולכרך השני שלו (שיצא בהמשך) מתלווים שני ספרי המשך מאת אותו המחבר:

- לימוד שפת VHDL לסימולציה וסינתזה
- תכן ספרתי ומבוא לפרוייקטים עם רכיבי Altera

בעתיד המחבר ייתן גם גיבוי לנושאים הללו בשפת Verilog. כל הספרים הנ"ל יכולים להילמד ברצף ישיר לספר הנוכחי במערכות ספרתיות וכיחידות לימוד משותפות.

כדאי גם לדעת, ששאלות וחידות במערכות ספרתיות הן גם בדרך כלל השאלות הפופולריות ביותר בקבלה לעבודה בחברות הייטק רבות. חלק מהתרגילים נוצרו ברוח זו.

בשני כרכי הספר, מתבצעת הכרות עם כלים ועזרים תיאורטיים שונים, כגון: אלגברה בוליאנית (Boolean Algebra), טבלאות ועזרים גרפיים שונים כמו טבלאות אמת (Truth Tables) מסוגים שונים, טבלאות מצבים מסוגים שונים, דיאגרמות מצבים ודיאגרמות זמנים. בספר מוסבר גם איך לבצע פעולות חשבוניות על מספרים שמיוצגים בשיטות ספירה ובקודים. בעזרת כלים ועזרים תיאורטיים אלו, תוכל לנתח לאפיין ובעיקר לתכנן מערכות ספרתיות. למרות אופיים התיאורטי של חלק מהכלים הנלמדים, הספר גם נותן דגש רב לשימוש המעשי בהם.

במסגרת הספר מתבצעת הכרות גם עם רכיבים (אבני בנייה יסודיים) רבים. בספר הראשון מתבצעת הכרות עם אבני בנייה צירופיים שונים כמו: שערים, רכיבים אריתמטיים (כמו למשל מחברים מחסרים משווים), רכיבים לניתוב וקידוד מידע (כמו למשל בוררים, מפלגים, מפענחים מקודדים), רכיבים שמיועדים להתחברות ל-BUS. בספר השני מתבצעת הכרות עם אבני בנייה שהם בעלי זיכרון (כמו רכיבי Latch, פליפ-פלופים, מונים, טיימרים ורגיסטרים). בכרך זה מבוצעת גם הכרות בסיסית עם ארכיטקטורות של רכיבים מתוכנתים.

הספר וקורסים במערכות ספרתיות אינם עוסקים במבנה האלקטרוני הפנימי של רכיבים ברמת הטרנזיסטור או המוליך למחצה. ההתייחסות לסוגיות חשמליות נעשית בספר זה על קצה המזלג בלבד, ורק במקומות מעטים שבהם הדבר בהחלט נחוץ (חוקי חיווט, BUS, Tri-State, Open-Drain). מהסיבה שמוזכרת לעיל, ניתן להבין מדוע ניתן ללמוד מקצוע זה גם ללא ידע מוקדם רציני בתורת החשמל וללא ידע מוקדם כל שהוא במעגלים אלקטרוניים. בנושא המבנה הפנימי עוסקים ספרים וקורסים באלקטרוניקה ובמוליכים למחצה, ובעיקר הקורס שנקרא אלקטרוניקה ספרתית.

אני מאחל לכל הקוראים קריאה מועילה ולא פחות חשוב מכך - הנאה וסיפוק מהפנמה של הבסיס החשוב כל כך של הטכנולוגיה הספרתית המודרנית.

הספר מחולק לאחד עשר פרקים :

1. אלגברה בוליאנית
2. מימוש לוגי באמצעים שונים
3. מימוש באמצעות טבלאות אמת שונות ובלעדיהן
4. צמצום של מערכות צירופיות
5. שערים מיוחדים
6. גורם הזמן במערכות צירופיות
7. חשבונות בבסיסים שונים וקודים
8. רכיבים אריתמטיים
9. רכיבי ניתוב וקידוד מידע
10. יציאות מתנתקות וחיבור ל - BUS
11. פרק הנספחים

הפרק הראשון עוסק ב**אלגברה בוליאנית**. שלא כפי שהדבר נעשה בספרי לימוד אחרים, בחרנו לפתוח את הספר בפרק שעוסק באלגברה בוליאנית ולא בפרק שעוסק בחשבונות אריתמטיים בבסיסים שונים - במתכוון. מניסיון שנצבר בהוראת המקצוע, למדנו שפתיחת הלימוד בפרק שעוסק בשיטות ספירה ומיד לאחר מכן בפרק שעוסק באלגברה בוליאנית, מכביד על הלומד, מכיוון שהוא מעמיס עליו כמות גדולה מדי של מושגים חדשים בבת אחת. בנוסף לכך, קשה בשלב מוקדם גם להראות את הקשר שקיים בין שני הנושאים. ההחלטה שלנו היא לדחות את לימוד הפרק שעוסק בשיטות ספירה ופעולות אריתמטיות (פרק 7), לשלב שבא לפני ההכרות עם הרכיבים האריתמטיים (פרק 8). **לומדים שבכל שאת רוצים להתחיל את הלימוד דווקא בפרק 7 בהחלט יכולים לעשות זאת.**

אלגברה בוליאנית מהווה את הבסיס התיאורטי לתיאור של כל חומרה ספרתית. חשיבותו של הפרק רבה מכיוון שכל הפרקים שבאים בהמשך מבוססים עליו. מומלץ לקוראים שאינם שולטים באלגברה זו, להקדיש מאמץ לקריאת והבנת פרק זה במלואו (פרט לחלקים האחרונים בפרק שמסומנים ב - *). בתחילתו של הפרק מציגים בקיצור רב את היישומים של אלגברה בוליאנית לתורת הקבוצות וללוגיקה סימבולית. יישומים אלו של אלגברה בוליאנית מוכרים לקוראים רבים ומוטבעים בדפוסי החשיבה ההגיונית שלנו. בהמשך הפרק מוצג אוסף חוקים. בהמשך הפרק אנו גם מציגים את הנושא של פונקציות לוגיות והתיאור שלהן באמצעות טבלת אמת והאפשרות להשתמש בטבלאות אמת גם ככלי להוכחת זהויות. בהמשך מוצגת צורות התיאור של פונקציות לוגיות בצורת סכום מכפלות ובצורת מכפלת סכומים ושתי הצורות הקנוניות של צורות רישום אלו. הצורות הקנוניות של פונקציות, מאפשרות לקורא להפוך טבלת אמת לפונקציה.

הפרק השני עוסק ב**מימוש לוגי באמצעים שונים**. עד לשלב זה בספר לא הוצגו רכיבים ספרתיים כל שהם, אלא הוצגה האלגברה הבוליאנית עם נגיעה קלה ביישומים היסטוריים בתורת הקבוצות ובלוגיקה סימבולית. בפרק זה יתוודע הקורא לצורות מימוש שונות שהתפתחו במהלך השנים. הפרק נותן סקירה בסיסית שמוצגת בסדר היסטורי החל ממתגים ועד לשערים אלקטרוניים. בהנחה שלקורא אין עדיין ידע ברכיבים אלקטרוניים ולכן צורת ההצגה היא מאוד בסיסית. הפרק כולל באופן ספציפי את הנושאים הבאים : מימוש פונקציה לוגית על ידי מתגים, סימון מגע שמוליך ב - '0' לוגי ומגע שמוליך ב - '1' לוגי, מימוש על ידי ממסרים, חסרונות של מימוש אלקטרו-מכני, מימוש על ידי שערים לוגיים אלקטרוניים, משפחות לוגיות, מתחי '0' לוגי ו '1' לוגי ברכיבי TTL ו CMOS, היסטוריה קצרה על התפתחות משפחות לוגיות וטכנולוגית מימוש ספרתי, הרחבה וצמצום של שערים, מימוש על ידי פונקציה הפוכה.

הפרק השלישי עוסק בתכנון באמצעות טבלאות שונות ובלעדיהן. בפרק הראשון שבספר, הוצגו טבלאות אמת בסיסיות שהן מאוד מוגבלות. במציאות (למשל בדפי יצרן ובתיאורים של רכיבים אמיתיים) טבלאות אמת הן בדרך כלל מורכבות יותר ומאפשרות לתאר מערכות עם מספר גדול של כניסות ודרגות חופש. פרק זה עוסק ספציפית בנושאים הבאים: טבלאות אמת הכוללות Φ (Don't care) בצד ימין של הטבלה, טבלאות הכוללות משתנים בעמודת הפונקציה (Truth Table entered Variables), טבלאות אמת מקוצרות הכוללות Φ או "else" בצד שמאל של הטבלה, טבלאות דו ממידיות, שילוב בין טבלאות אמת מסוגים שונים ולבסוף גם תכנון מערכת צירופית באופן ישיר וללא שימוש בטבלת אמת.

הפרק הרביעי עוסק בצמצום ומינימיזציה של מערכות צירופיות. המטרה של מינימיזציה היא לממש מערכת עם כמה שפחות רכיבים במטרה להוריד עלויות. בשנים האחרונות החשיבות העיקרית של מינימיזציה היא לנסות להכניס תכן כל שהוא לרכיב מתוכנת נתון שנקבע לעתים מראש (כלומר רכיב שנקבע וחווט ללוח לפני תחילת התכן). הפרק עוסק ספציפית בנושאים הבאים: מינימיזציה (Minimization) לעומת צמצום (Reduction), מינימיזציה בצורת סכום ומכפלות ומכפלת סכומים, שימוש בצירופי ברירה (טבלאות אמת הכוללות Φ בצד ימין של הטבלה), מפות קרנו לארבעה חמישה ושישה משתנים. צמצום של Map-Entered Variables (משתנים שמוכנסים בטבלת האמת). מינימיזציה בשיטת Quine-Mcclusky, צמצום קבוצתי (Group Reduction) לעומת צמצום נפרד לכל פונקציה. צמצום באמצעות שיתוף משאבים (Resource Sharing).

הפרק החמישי עוסק בשערים מיוחדים. עד לשלב זה השערים שבהם השתמשנו הם AND, OR ו NOT. במציאות חשוב להכיר גם שערים אחרים. הפרק עוסק באופן ספציפי בנושאים הבאים: מערכת לוגית שלמה, שער אוניברסלי והחשיבות של שערים מסוג זה, שער NAND ומימוש כסכום מכפלות, שער NOR ומימוש כמכפלת סכומים, שיטות גרפיות (הזזת מהפכים), שער XOR וחוקי אלגברה שקשורים לפעולה זו, דוגמאות ליישומים פשוטים לשערי XOR בטיפול בזוגיות ובהצפנה, המרת אופרטורים בוליאניים לאופרטורים של אלגברת ריד-מילר (הכוללת AND ו XOR), שער XNOR.

הפרק השישי עוסק בגורם הזמן במערכות צירופיות. עד לשלב זה, התייחסנו לרכיבים הספרתיים כאל אבני בניה אידיאליים שבהם היציאה משתנית מיד כאשר הכניסה משתנית. במציאות לוקח זמן ליציאות להשתנות (למרות שהוא מאוד קטן). פרק זה מטפל בהפרעות שעלולות להיווצר ביציאות של מערכת צירופית אמיתית. ספציפית הפרק עוסק בנושאים הבאים: דיאגרמות זמנים, זמני השהיית מעבר (tpd - Propagation Delay - Time), ערכי Maximum, Minimum ו Typical בדפי יצרן, התייחסות לפולסים צרים יותר מזמן השהיית המעבר: (מודל Inertia ומודל transport), היווצרות Hazard סטטי ו Hazard דינמי ביציאה של מערכת צירופית, מניעת Hazard סטטי במערכת שמומשה כסכום מכפלות או מכפלת סכומים, הכרת כמה הבדלים בין מערכת צירופית ומכונת מצבים.

הפרק השביעי בספר עוסק בחשבונות בבסיסים שונים וקודים. עד לשלב הזה, כל היישומים שהודגמו בספר היו יישומים לוגיים שאינם מבצעים חישובים חשבוניים. בהמשכו של הספר נרצה להציג גם יישומים שמבצעים פעולות חשבוניות. במערכת ספרתית חישובים נעשים בדרך כלל בשיטה הבינארית או בקודים שקרובים לשיטה זו. מדובר בחישובים שמבוססים בעצם על ה"אלגברה הרגילה". תפקידו של פרק זה הוא להיות המבוא לנושא חשוב זה.

באופן ספציפי הפרק עוסק בנושאים הבאים : הצגת מספרים (שלמים ושברים) חסרי סימן (Unsigned) בבסיסים לא עשרוניים. מתן דגש על בסיס בינארי (2), אוקטלי (8) והקסדצימלי (16). חשבונות בבסיס הבינארי : חיבור חיסור כפל וחילוק. ייצוג שלמים ושברים ומעבר בין שיטות ייצוג. חשבון במספר מוגבל של ספרות וגלישה. ייצוג מספרים בעלי סימן (signed) בשיטות הבאות : סימן וגודל (Sign & Magnitude), משלים ל - 1 (One's Complement), משלים ל - 2 (2's Complement), היסט בינארי (Offset-Binary). ביצוע חיבור וחיסור בשיטות הנ"ל. דוגמאות : קוד gray, קוד BCD, קוד ASCII.

הפרק השמיני עוסק ברכיבים אריתמטיים. ביצוע חישובים מספריים, הוא אחד מהתפקידים החשובים של מערכת ספרתית. פרק זה מטפל ספציפית בנושאים הבאים : מחבר, מחבר איטרטיבי (מודולרי) - Full Adder, מחסרים, החשת תהליך החיבור (CLA), חיבור Unsigned ו Signed, סיביות ה - Carry ו - Over Flow. משוויים (Comparators) כיוניים וחסרי כיוון, דוגמא ליחידה אריתמטית לוגי (ALU), הזזות כפעולות כפל וחילוק, מיסוך כפעולת mod של חזקות של 2.

הפרק התשיעי בספר עוסק ברכיבי ניתוב וקידוד מידע. פרק זה עוסק בכמה מהתפקידים הנוספים החשובים שאותה מבצעת מערכת ספרתית. בניתוב מידע עוסקים שני הרכיבים הבאים שנקראים בורר (Multiplexer) ומפלט (Demultiplexer). בנושא בוררים, הפרק עוסק באופן ספציפי בנושאים הבאים : תיאור בוררים, סימון שלהם ומימושם, הרחבה של בוררים במבנה של עץ, שימוש בבוררים למימוש אוניברסלי של פונקציות לוגיות. בנושא מפלגים, הפרק עוסק באופן ספציפי בנושאים הבאים : תיאור מפלגים, סימון שלהם ומימושם, הרחבה של מפלגים במבנה של עץ ובאופן דו-ממדי, שימוש במפלגים למימוש אוניברסלי של פונקציות לוגיות - כולל מפלגים בעלי יציאות שהן "פעילות בנמוך". המשכו של הפרק עוסק במפענחים (Decoders) ובמקודדים (Encoder). רכיבים אלו עוסקים בתרגום קוד בינארי לקוד ישיר (המפענח) ובתרגום קוד ישיר לקוד בינארי (המקודד). בנושא מפענחים, הפרק עוסק באופן ספציפי בנושאים הבאים : תיאור מפענחים, סימון שלהם ומימושם, יצירת מפענחים שהם בעלי יכולת הרחבה באמצעות כניסת אפשר (Enable), הזהות בין מפענחים שכוללים כניסת אפשר למפלגים, הרחבה של מפענחים במבנה של עץ, הרחבה של מפענחים באופן דו-ממדי ושימוש במפענחים למימוש אוניברסלי של פונקציות לוגיות - כולל מפענחים בעלי יציאות שהן "פעילות בנמוך". בנושא מקודדים, הפרק עוסק באופן ספציפי בנושאים הבאים : תיאור מקודדים, הבעייתיות של הזנה של צירופים שאינם נחשבים לקוד ישיר חוקי למקודד ופתרון הבעיה על ידי מימוש מקודד עדיפויות (Priority Encoder), סימון מקודדים ומימושם, יצירת מקודדים שהם בעלי יכולת הרחבה והרחבתם, כולל במקרה של מקודדים שהם בעלי אותות "שפעילים בנמוך".

הפרק העשירי בספר עוסק ביציאות מתנתקות וחיבור ל - BUS. במערכות ספרתיות רבות קיימות מערכות משותפות של חוטים שמאפשרות להעביר מידע בין חלקים שונים של המערכת. צורת ניתוב מידע זו נקראת בדרך כלל בשם BUS משותף (או פס משותף או Shared-BUS). פרק זה עוסק ברכיבים שהיציאות שלהן מסוגלות להעביר מידע ל - BUS משותף. לרכיבים אלו יש יציאות בעלות תכונות חשמליות מיוחדות, שמאפשרות ניתוב שלהן. מדובר בשני סוגי רכיבים או סוגי יציאות : יציאות מסוג Tri-State ויציאות מסוג Open-Collector או Open Drain. רכיבים אלו גם משמשים בתנאים מסוימים גם ליצור לוגיקה צירופית באמצעות חיבור בין יציאות (Wired Logic) וגם כרכיבי קישור (Interface) בין משפחות לוגיות שונות. הפרק עוסק באופן ספציפי בנושאים הבאים : מצבים לוגיים והמשמעות החשמלית שלהם ביציאה רגילה של רכיב, מדוע אסור לחבר בין יציאות רגילות,

יציאות מסוג Open-Collector או Open-Drain והשימוש בהם ב - Wired Logic והצורך ב - Pull-Up Resistor, שימוש ב - Open Collector או Open-Drain בהתחברות ל - BUS משותף. רכיבים בעלי יציאות Tri-State והשימוש בהם ב - BUS משותף, הפיכת Tri-State ל - Open Drain, הצורך למניעת קונפליקטים על ה - BUS (contention). מצבים לוגיים חזקים וחלשים.

תודות

ברצוני להודות תחילה לחברי הטוב יאן לרון, שהוא כותב ספרים פורה ביותר בתחומים רבים ומגוונים באלקטרוניקה. ציינתי קודם, שספר זה אינו עוסק במבנה האלקטרוני הפנימי של רכיבים ספרתיים וקיימים לשם כך ספרים בתחום של אלקטרוניקה ספרתית. ליאן יש בין שאר הספרים שכתב, ספר מצוין בן שני כרכים שעוסק בנושא של אלקטרוניקה ספרתית.

בתחילת הכתיבה של ספר זה, הייתה מחשבה ליצור אולי ספר שהוא פרוייקט משותף של שנינו או ליצור במשותף שני ספרים: ספר תיאורטי וספר לתרגילים. הרעיון הזה עבר גלגולים שונים ונותב בסופו של דבר לכתיבה של הספר הזה כפרוייקט נפרד שלי. בכל אופן יאן, שיש לו ניסיון בהרצאת המקצוע עבר על חלקים גדולים של החומר הכתוב בגרסאות המוקדמות והמאוחרות שלן והעיר הערות מקצועיות ודידקטיות רבות שערכן לא יסולא בפז. על כך נתונה לו תודתי. אני גם מודה לו מאוד על העידוד הרב בכתיבה הארוכה שנתמשכה מעבר למצופה.

תודה מיוחדת מגיעה גם לחבר נוסף - שי מלול, שהוא הכותב של ספרים מעולים בתחום המיקרו-בקרים 89C51, ושעמו התייעצתי לעתים בזמן כתיבת הספר. שי שמרצה את הקורס הנוכחי ותרגל אותו ועבר גם על הכתב והעיר הערות בונות רבות. חלק מהערות החשובות שקיבלתי ממנו היו כיצד להסביר דברים מסובכים באופן פשוט יותר וכיצד לכתוב בסגנון שיהיה מובן יותר לכולם. העידוד שלו והתבוננות שלו היו חשובות ועל כל אלו אני מודה לו רבות.

תודה מיוחדת לעתליה זיו. עתליה קראה את החומר בעיון רב ומילאה את הטקסט המוקדם במספר עצום של הערות שנכתבו באותיות אדומות קטנות. הערות אלו כללו: תיקון שגיאות רבות בניסוח, תיקון שיבושי לשון, הצעות רבות לשינויים ושיפורים בניסוח, הערות דידיקטיות ותיקון שגיאות טכניות שונות בטבלאות בנוסחאות והמשוואות הרבות שבספר. ספר זה לא יכל לצאת לאור בצורתו הנוכחית, ללא מכבש הביקורת היסודי שלה ועל כך נתונה לה תודתי הרבה.

תודה מיוחדת גם לרקפת רוזנטל. רקפת תיקנה שגיאות והציעה הצעות מצוינות לשיפורים בניסוח אך בעיקר חפרה עמוק מאוד בכל הדוגמאות ובהסברים וגם במסובכים ביותר שבהם ומצאה בהם שגיאות והציעה הצעות לתיקון. מיותר לציין שלומד חדש שמתוודע לחומר שמכיל שגיאות כאלו עשוי לאבד את ביטחונו העצמי. רקפת עזרה מאוד להקטין את ממדי הבעיה הזו ועל כך נתונה לה תודתי הרבה.

קוראת קפדנית נוספת היא אוריין אדרי שתיקנה שגיאות קטנות ומעצבנות. יש לה חלק לא קטן בתיקון שגיאות שקשה לראות אותן.

אני חב תודות רבות גם לקורא המאוד מסור, חרוץ ויסודי יורי סברנסקי שקרא את הטקסט במהירות רבה ותיקן טעויות לא מעטות. תודה גם לרן שושני אל מלאכת הקריאה שלו וההערות שנתן.

תודה מיוחדת גם לשני קוראים מסורים נוספים: עודד שחם, ויותם סופר, שקראו במהירות את הספר והעירו הערות מאוד חשובות בקשר לניסוחים, העירו הערות לתכנים ברמה הגבוהה יותר של הספר, הציעו הצעות רבות וחשובות לשיפורים, וגם תיקנו לא מעט טעויות.

תודה לאריה ליבנה שהצביע ללא לאות על הצורך בכתיבה של ספר רציני בתחום. תודה גם למוציא לאור: אלי מיטב על האמון וגם על הסבלנות.

תודה לאירנה לבילב על דוגמאות הקוד בשפת C. תודה לחיים אלגרבל על ההערות והתיקונים החשובים שלו ובעיקר לאלו בעלי אופי מתמטי.

תודה לסטודנטים רבים ולאנשי אלקטרוניקה רבים בתעשייה שאותם לימדתי ושאותם הנחתי. מאנשים אלו למדתי רבות ותכנים רבים בספר שופרו בעקבות תהליך הלמידה שלי.

תודה לדן זסלבסקי ולאורי זסלבסקי, שהם סבא ונכדו שאינם מצויים בתחום. גם כמה מההערות וההצעות החשובות שלהם שולבו בטקסט.

למרות כל המאמצים שלי בכתיבת הספר ולמרות המשוב המועיל הרב של האנשים המצוינים שהעירו לי הערות ותקנו לי שגיאות בגרסאות המוקדמות של הספר, עדיין עלולות להיות בספר זה טעויות והן כמובן כולן באחריותי הבלעדית וכמובן איני חולק אחריות זו עם אחרים.

אודה לכל מי שישלח לי הערות בקשר לטעויות שכאלה או לכל מי שיצביע על בעיות כלשהן בהבנה של הטקסט או יציע לי הערות בונות כל שהן. כל הערה קטנה כגדולה, תתקבל על ידי בברכה.

ליצירת קשר ניתן להשתמש באחת מכתובות הדואר הבאות:

amos.zaslavsky@gmail.com

amos.books@gmail.com

amos@eguru-il.com

או שניתן להתקשר לטלפונים הבאים:

050-7270673

04-8230219 (בערב)

אתר האינטרנט שרלוונטי לספר זה ולספרים האחרים שקשורים אליו הוא:

<http://www.amos.eguru-il.com/>

הספר מוקדש באהבה להורי דן ואביבה ולשתי אחיותיי מיכל ורותי.