

مروری بر پیاده‌سازی آستانه‌ای به‌عنوان روشی برای مقابله با حملات تحلیل توان

سارا زارعی^۱ و هادی سلیمانی^{۲*}

^۱ پژوهشکده فضای مجازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
s.zareei@mail.sbu.ac.ir

^۲ استادیار پژوهشکده فضای مجازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
h_soleimany@sbu.ac.ir

چکیده

از جمله روش‌های کشف اطلاعات حساس و پارامترهای مخفی الگوریتم‌های رمزنگاری، استفاده از داده‌هایی است که به‌صورت فیزیکی از دستگاه‌ها نشت می‌یابند. حملات تحلیل توان، از نوع حملات کانال جانبی بوده و بسیار کاربردی هستند؛ بنابراین اتخاذ روش‌هایی به‌منظور مقاوم‌سازی ابزارهای رمزنگاری در برابر این‌گونه حملات از اهمیت بالایی برخوردار است. روش‌های مقاوم‌سازی می‌توانند از رویکردهای مختلفی استفاده کرده و در سطوح متفاوتی اعمال شوند. یکی از روش‌های مؤثر و متداول، روش نقاب‌گذاری است که در سطح الگوریتم، امنیت اثبات‌پذیر ایجاد می‌کند. با این حال می‌توان نشان داد که برخی از الگوریتم‌های نقاب‌گذاری شده نیز، در زمان پیاده‌سازی سخت‌افزاری دچار گونه‌هایی از نشت اطلاعات هستند که گاهی آن‌ها را در برابر حملات تحلیل توان آسیب‌پذیر می‌سازد. روش پیاده‌سازی آستانه‌ای روشی است که به‌منظور مواجهه با این چالش معرفی شده و طی سالیان اخیر توجه بسیاری از پژوهش‌گران را به خود جلب کرده است. در این مقاله ابتدا مدل‌های مختلف حملات وارده به رمزهای قالبی را توضیح داده و سپس با تمرکز بر مدل جعبه خاکستری و حملات تحلیل توان، روش نقاب‌گذاری را شرح می‌دهیم. در ادامه با بیان چالش این روش در پیاده‌سازی‌های سخت‌افزاری، روش پیاده‌سازی آستانه‌ای را معرفی و بررسی خواهیم کرد.

واژگان کلیدی: رمزهای قالبی، امنیت سخت‌افزاری، پیاده‌سازی آستانه‌ای

۱- مقدمه

حملات بازبایی کلید، از انواع مهم حملات ارائه شده به الگوریتم‌های رمزنگاری محسوب می‌شوند. در این سناریو مهاجم تلاش می‌کند با توجه به میزان اطلاعاتی از الگوریتم که می‌تواند به آن‌ها دسترسی داشته باشد، حمله خود را اجرایی کند. بر همین اساس، سطوح دسترسی مختلفی که یک مهاجم می‌تواند به دستگاه مورد هدف داشته باشد، حملات متفاوتی را محتمل می‌سازند که آن‌ها را در سه دسته کلی طبقه‌بندی و تعریف می‌کنیم.

۱-۱- مدل جعبه سیاه

در این مدل مواجهه مهاجم با الگوریتم رمزنگاری تنها به مثابه یک تابع معلوم ریاضی است که به ورودی‌ها (متون اصلی) و خروجی‌ها (متون رمز شده) بی‌از آن دسترسی دارد و تنها با دانستن این اطلاعات و بدون دسترسی داشتن به

مقادیر میانی و پردازش‌های داخلی، باید کلید مخفی را با پیچیدگی کمتر از جستجوی کامل^۱ استخراج کند. چنین حمله‌ای فارغ از نحوه پیاده‌سازی است و تنها مبتنی بر الگوریتم و ضعف‌های احتمالی آن است. تحلیل‌هایی از جمله تحلیل‌های خطی^۲ و تفاضلی^۳ مهم‌ترین و مشهورترین حملاتی هستند که در این مدل جای می‌گیرند [1].
گفتنی است الگوریتم‌های استاندارد که امروزه در پیاده‌سازی‌ها به‌کار می‌روند در برابر چنین حملاتی امن‌سازی شده‌اند.

۱-۲- مدل جعبه سفید

در این مدل برخلاف مدل قبلی، مهاجم به تمام جزئیات و مراحل پیاده‌سازی از جمله مقادیر میانی تحت پردازش،

^۱ Exhaustive search
^۲ Linear cryptanalysis
^۳ Differential cryptanalysis

اجرای آن را بی‌فایده می‌سازد؛ از جمله این‌که در صورت وجود نوفه (پایین‌بودن SNR^{11}) مهاجم نخواهد توانست الگوهای دقیقی از مصرف توان به‌دست آورد؛ هم‌چنین در صورت ندانستن جزئیات پیاده‌سازی ابزار مورد هدف و یا عدم دسترسی به ابزاری به‌طور دقیق مشابه به‌منظور به‌دست‌آوردن الگوهای مصرف توان (فاز پروفایلینگ^{۱۲} یا آفلاین)، مهاجم امکان مقایسه و تحلیل نخواهد داشت.

در مقابل، تحلیل تفاضلی به‌علت عدم وابستگی به جزئیات پیاده‌سازی کاربردی‌تر است. این حمله با توجه ممان^{۱۳} آماری که به‌عنوان ابزار مقایسه الگوها استفاده می‌کند (تفاضل، واریانس، انحراف از معیار و...)، می‌تواند روابط میان الگوهای توان و در نتیجه مقادیر میانی حساس یا وابسته به کلید و یا حتی خود کلید را کشف کند؛ بنابراین هر الگوریتمی حتی اگر در مدل جعبه سیاه استاندارد و امن باشد، در صورتی‌که با روشی غیرمقاوم در مقابل تحلیل توان پیاده‌سازی شود، در معرض آسیب خواهد بود.

۳- روش‌های مقاوم‌سازی

با توجه به توضیحات داده‌شده، طراحی و ارزیابی روش‌هایی برای پیاده‌سازی امن رمزهای قالبی، به‌گونه‌ای که در برابر حملات تحلیل توان ایمن باشند، از اهمیت بالایی برخوردار است. این روش‌ها در سطوح مختلفی ارائه و به‌کار گرفته شده‌اند که از سطوح بالای سیستمی^{۱۴} تا سطح دستورالعمل‌ها^{۱۵} و سلول‌های منطقی^{۱۶} مورد استفاده در پیاده‌سازی را شامل می‌شوند.

• دسته نخست

روش‌هایی که تلاش می‌کنند بر الگوریتم تمرکز کرده و آن را به‌گونه‌ای محدود سازند که تعداد عملیات‌هایی که با یک کلید یکسان انجام می‌شوند، برای انجام حمله تحلیل توان توسط مهاجم کافی نباشند [8] [9]. بدیهی است، چنین روش‌هایی با تحمیل هزینه‌های فراوان به‌منظور تأمین کلیدهای متعدد همراه خواهند بود. این هزینه‌ها بر عملکرد سیستم تأثیر گذاشته و موجب افت شدید آن می‌شوند. کاهش عملکرد سیستم در کاربردهای بسیاری به‌ویژه در تراشه‌های کم‌حجم و سبک قابل قبول و مطلوب نیست.

¹¹ Signal-to-Noise Ratio

¹² Profiling

¹³ Moment

¹⁴ System level

¹⁵ Instruction level

¹⁶ Cell level

منابع حافظه، مراحل اجرای الگوریتم و... اشراف و کنترل دارد. به‌عبارتی تمام اطلاعات به‌جز کلید مخفی الگوریتم، در دسترس مهاجم قرار خواهند داشت [2]. قابل پیش‌بینی است که در صورت لحاظ‌نکردن ملاحظات امنیتی مرتبط، چنین حملاتی می‌توانند در محیط‌هایی هم‌چون تلفن‌های هوشمند^۱، سرورها و ... بسیار خطرآفرین باشند که البته از حوزه بررسی ما در این مقاله خارج است.

۳-۱- مدل جعبه خاکستری

در مدل جعبه خاکستری تمرکز مهاجم بر پیاده‌سازی الگوریتم رمزنگاری و سوءاستفاده از اطلاعاتی است که به‌موجب پیاده‌سازی نشد می‌یابند؛ از قبیل زمان اجرای الگوریتم‌ها^۲ [3]، تشعشعات الکترومغناطیسی^۳ [4] و مصرف توان^۴ [5]. به این ترتیب مهاجم علاوه‌بر داده‌های ورودی و خروجی و خود الگوریتم، اطلاعاتی در اختیار خواهد داشت که می‌تواند در مجموع منجر به یافتن کلید یا مقادیر حساس شوند؛ بنابراین فرض اولیه در این مدل حملات این است که مهاجم به ابزار مورد هدف دسترسی فیزیکی دارد و می‌تواند چنین اطلاعات نشستی را از آن به‌دست آورده و ثبت کند. رویکرد به‌دست‌آوردن این اطلاعات می‌تواند به‌صورت تهاجمی^۵ [6]، نیمه‌تهاجمی^۶ [7] و یا غیرتهاجمی^۷ [3] [4] [5] باشد. به‌عنوان یک دسته‌بندی دیگر، حملات به یکی از دو دسته فعال یا غیرفعال تقسیم می‌شوند. حملات تحلیل توان در دسته غیرتهاجمی و غیرفعال (حملات کانال جانبی) قرار می‌گیرند. این دسته از سایر انواع کاربردی‌تر، ارزان‌تر و موثرتر هستند.

۲- حملات تحلیل توان

تحلیل توان می‌تواند به دو صورت ساده^۸ [5] و تفاضلی^۹ [5] انجام شود. در حملات تحلیل توان ساده، مهاجم با دادن ورودی‌های یکسان به دستگاه، الگو^{۱۰} (ها)یی از مصرف توان به‌دست آورده و با تحلیل آن (ها) به مقدار مطلوب می‌رسد؛ با این حال این روش در عین سادگی و اختصار نسبت به روش تفاضلی، ضعف‌هایی نیز دارد که در برخی از موارد

¹ Smart phone

² Execution time

³ Electromagnetic (EM) Emission

⁴ Power consumption

⁵ Invasive

⁶ Semi-Invasive

⁷ Non-Invasive

⁸ Simple Power Analysis

⁹ Differential Power Analysis

¹⁰ Trace

• دسته دوم

در این دسته رویکرد و هدف کلی کاهش بیشینه‌ای ارتباط میان مقادیر میانی با مقادیر حساس و مخفی است. هرچند که این روش‌ها در موارد متعددی مؤثر و کارآمد هستند، با این حال با افزایش زمان حمله، توان محاسباتی و تحلیلی، مهاجم قادر است، در نهایت بر آن‌ها غلبه کند [10] [11] [12].

• دسته سوم

رویکردهایی که به دنبال حذف تناظر میان مصرف توان الگوریتم و مقادیر حساس و مخفی هستند. به این ترتیب مهاجم هر تعداد الگوی مصرف توان را هم که از ابزار به دست آورد، با تحلیل آن‌ها نخواهد توانست به مقادیر میانی واقعی و در نتیجه پارامترهای حساس و مخفی برسد. به این روش، نقاب‌گذاری^۱ گفته می‌شود که در آن با استفاده از طرح‌های تسهیم راز^۲، مقادیر میانی به گونه‌ای تصادفی‌سازی می‌شوند که الگوی توان به دست آمده ارتباط مستقیمی با داده‌های واقعی نداشته باشد.

۱-۳- روش نقاب‌گذاری

نخستین طرح‌های نقاب‌گذاری پیشنهادی با استفاده از قواعد جبر بولین^۳، هر مقدار میانی X را با دو مقدار تصادفی X_1 و X_2 نقاب‌گذاری می‌کنند؛ به صورتی که رابطه (۱) برقرار باشد:

$$X_1 \oplus X_2 = X \quad (1)$$

X_1 به صورت تصادفی انتخاب و X_2 به نحوی تنظیم می‌شود که XOR آن‌ها برابر با مقدار داده اصلی یعنی X باشد. به هر یک از مقادیر X_1 و X_2 یک سهم گفته می‌شود. مهاجم تنها در صورتی می‌تواند مقدار X را پیدا کند که مقادیر تصادفی X_1 و X_2 را بداند. این اتفاق در عمل غیرممکن است؛ چون که X_1 و X_2 تصادفی هستند؛ اما فرض کنیم که مهاجم از حمله کانال جانبی استفاده کرده و بخواهد با تحلیل الگوهای مصرف توان، به اطلاعات ناشی دسترسی پیدا کند که در پیدا کردن X مؤثر باشند.

اگر اطلاعات ناشی را با استفاده از وزن همینگ^۴ مدل کنیم، مهاجم با میانگین گرفتن از داده‌های ناشی به

اطلاعاتی در مورد X نخواهد رسید؛ اما با اعمال واریانس، همان‌طور که در جدول (۱) می‌بینیم، نتایج به دست آمده به نحوی هستند که به ازای مقادیر مختلف X متفاوت‌اند؛ بنابراین مهاجم می‌تواند بدون نیاز به پیدا کردن دقیق X_1 و X_2 ، مقدار داده X را به دست آورد.

(جدول-۱): الگوی نشت اطلاعات در نقاب‌گذاری درجه

نخست داده یک بیتی

X	X_1	X_2	$L(X)$	$Mean(L(x))$	$Var(L(x))$
0	0	0	0	1	1
	1	1	2		
1	0	1	1	1	0
	1	0	1		

۲-۳- نقاب‌گذاری مرتبه بالا

به‌طور کلی، یک طرح نقاب‌گذاری مرتبه d ، یک روش ایمن‌سازی در برابر حمله تحلیل توان مرتبه d است که در آن هر مقدار میانی به $d+1$ سهم تقسیم و سهم‌ها به صورت تصادفی و یکنواخت^۵ انتخاب می‌شود. مهاجمی با توان مرتبه d ، تنها قادر است که به d مقدار از این $d+1$ مقدار دسترسی پیدا کند و با داشتن این مقادیر، قادر به بازسازی مقدار میانی مورد نظر نخواهد بود.

۳-۳- چالش احتمالی روش نقاب‌گذاری در

پیاده‌سازی سخت‌افزاری

در طرح‌های نقاب‌گذاری موجود [13] [14] [15] [16] [17]، فرض می‌شود که تغییرات متغیرهای میانی به صورت پایدار بوده و تغییرات کوتاه ناگهانی در آن‌ها رخ نمی‌دهد؛ مسأله‌ای که در بسیاری از پلت‌فرم‌های سخت‌افزاری که با گیت‌های متداول CMOS پیاده‌سازی می‌شوند، تحت عنوان گلیچ^۶ شناخته می‌شود. گلیچ‌ها تغییرات ناگهانی، ناخواسته و کوتاه‌مدت سیگنال‌ها هستند که ممکن است به دلایل مختلفی از جمله تفاوت تأخیر المان‌های مدار، چندسطحی^۷ و پیچیده بودن مدارها و ... ایجاد شوند و می‌توان گفت که به‌طور تقریبی اجتناب‌ناپذیر هستند. این تغییرات ناخواسته می‌توانند اطلاعات ناشی بیش از مقدار متصور از یک طرح نقاب‌گذاری معمولی را در اختیار مهاجم قرار دهند. به این ترتیب این اطلاعات اضافه‌تر، منجر به یافتن مقادیر سهم‌ها خواهند شد. در مثال زیر تأثیر گلیچ را بر یک طرح نقاب‌گذاری به‌طور دقیق‌تر می‌بینیم.

⁵ Uniform

⁶ Glitch

⁷ Cascaded circuits

¹ Masking

² Secret Sharing

³ Boolean Masking

⁴ Hamming Weight

1	1	0	1	0	1	2
1	0	1	0	1	0	2
1	1	0	0	1	0	2
1	0	1	1	1	1	3
1	1	0	1	1	1	4

۴- پیاده‌سازی آستانه‌ای

روش پیاده‌سازی آستانه‌ای^۱ نخستین بار در سال ۲۰۰۶، به منظور رفع چالش روش نقاب‌گذاری در پیاده‌سازی‌های سخت‌افزاری، ارائه شد [18] [19]. پس از آن در سال ۲۰۱۴، نسخه اولیه آن که امنیت مرتبه نخست را برآورده می‌ساخت، به امنیت‌های مرتبه بالاتر نیز تعمیم پیدا کرد [23]. این روش تاکنون بر روی اولیه‌های رمزنگاری مختلفی از جمله AES [24]، Keccak [25] و ... اجرا شده است و بهبود و بهینه‌سازی پیاده‌سازی این اولیه‌ها با استفاده از روش پیاده‌سازی آستانه‌ای همچنان نیز به‌عنوان یکی از موضوعات مهم مورد پژوهش و بررسی شناخته می‌شود. این طرح در واقع نسخه اصلاح‌شده طرح‌های نقاب‌گذاری است که در سخت‌افزارها و در حضور گلیچ‌ها نیز، امنیت اثبات‌پذیر ارائه می‌کند. مزیت‌های این طرح را می‌توان نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی در سه حوزه برشمرد [20]. نخست آن‌که برخلاف سایر راه‌کارهایی که ارائه شده‌اند، امنیت اثبات‌پذیر ایجاد می‌کند. به این معنا که از نظر ریاضی و براساس اصول تسهیم راز، می‌توان ثابت کرد که یک طرح پیاده‌سازی آستانه‌ای از مرتبه ld ، در برابر حملات تا مرتبه ld امنیت دارد. دوم آن‌که قابل اعمال به طیف وسیعی از پلت‌فرم‌ها، از جمله مدارات شبه CMOS^۲ است که در برخی از طرح‌های پیشنهادی دیگر، با مشکل مواجه بودند. مزیت سوم آن‌که در مقایسه با سایر روش‌ها، کم‌ترین میزان منابع^۳ را به ما تحمیل می‌کند.

از آن‌جا که روش پیاده‌سازی آستانه‌ای، نسخه ارتقایافته روش نقاب‌گذاری است که به منظور به‌کارگیری در سخت‌افزارها مناسب‌سازی شده مبتنی بر همان مفاهیم تسهیم راز و MPC^۴ بنا شده است و چهار ویژگی کلی دارد که دو ویژگی نخست میان تمام طرح‌های نقاب‌گذاری مشترک هستند، اما ویژگی‌های سوم و چهارم تنها مختص روش آستانه‌ای هستند. در ادامه این ویژگی‌ها به ترتیب توضیح داده می‌شوند.

¹ Threshold Implementation
² CMOS-like
³ Resources
⁴ Multi-Party Computation

تابع رابطه (۲) را در نظر می‌گیریم:

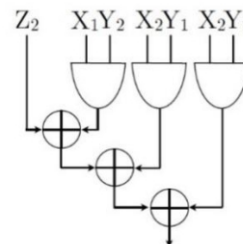
$$f(X, Y, Z) = XY \oplus Z \quad (2)$$

این تابع با روش نقاب‌گذاری مرتبه نخست به صورت رابطه (۳) پیاده‌سازی می‌شود:

$$f_1(X_1, Y_1, Z_1) = Z_1 \oplus X_1Y_1 \quad (3)$$

$$f_2(X_2, Y_2, Z_2) = ((Z_2 \oplus X_1Y_2) \oplus X_2Y_1) \oplus X_2Y_2$$

چنانچه f_2 را با گیت‌های منطقی که از مدارهای CMOS ساخته می‌شوند، پیاده‌سازی کنیم، مداری مشابه شکل (۱) خواهیم داشت.



(شکل-۱): پیاده‌سازی منطقی سهم دوم از خروجی تابع

$$f(X, Y) = Z \oplus XY$$

فرض کنیم مدار در حالت اولیه صفر است و به صورت تصادفی به یکی از حالت‌های دیگر می‌رود. متغیر X_2 نیز با تأخیر بیشتری نسبت به بقیه ورودی‌ها تغییر می‌کند. در این شرایط همان‌طور که در جدول (۲) می‌بینیم، بر اثر تغییر ورودی‌ها به هر یک از حالت‌های ممکن، گیت‌های AND و OR دچار گلیچ‌های متعدد و متفاوتی می‌شوند که بر مصرف مدار تأثیر گذاشته و توسط مهاجم قابل ردیابی هستند. به این ترتیب مهاجم می‌تواند مقدار نقاب‌گذاری نشده و اصلی داده Y را با استفاده از این تفاوت مصرف توان به دست آورد (متوسط مصرف توان در حالتی که $Y = 0$ باشد، با حالتی که $Y = 1$ باشد متفاوت است).

(جدول-۲): تعداد گلیچ‌های گیت‌های AND و XOR، ناشی از

تأخیر ورودی X_2

Y	Y1	Y2	X2	$Z_2 \oplus X_1Y_2$	AND	XOR
0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
0	1	1	1	0	2	1
0	0	0	0	1	0	2
0	1	1	0	1	0	2
0	0	0	1	1	0	2
0	1	1	1	1	2	3
1	0	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0
1	0	1	1	0	1	1

در این مثال تعداد سهام‌های ورودی برابر با دو سهم و تعداد سهام‌های خروجی نیز برابر با دو سهم شده است.

۴-۳- ویژگی سوم: Non-Completeness

براساس این ویژگی، هر کدام از توابعی که سهام‌ها را پردازش می‌کنند، لازم است که دست‌کم یکی از سهام‌های هر متغیر را به‌عنوان ورودی نداشته باشند. به این ترتیب، مهاجمی که به مقادیر این توابع دسترسی پیدا می‌کند، نخواهد توانست هیچ یک از متغیرها را بازسازی کند، چرا که از هر کدام دست‌کم یک سهم را در اختیار ندارد.

به‌طورکلی در مرتبه d ، هر ترکیب d تایی از توابع پردازش‌گر، لازم است دست‌کم یک سهم از هر کدام از متغیرها را نداشته باشند، به این ترتیب مهاجمی که بتواند از هر طریقی به d مقدار میانی دسترسی پیدا کند، با ترکیب و تحلیل اطلاعات این توابع، قادر به بازسازی هیچ یک از متغیرها نخواهد بود [20]، چرا که براساس ویژگی یک‌نواختی، هر کدام از متغیرها از هر ترکیب $s - 1$ تایی از سهام‌های شان مستقل هستند.

واضح است که برای برقراری این ویژگی به تعداد معینی از سهام‌های خروجی و ورودی نیازمند خواهیم بود و نمی‌توان هر تعدادی دل‌خواهی برگزید. ایده‌های مختلفی پیشنهاد و آزمایش شده‌اند که بتوان به‌وسیله آن‌ها تعداد سهام‌ها را به‌نحوی تنظیم کرد که پیاده‌سازی‌های توابع ویژگی non-complete بودن را برآورده سازند. به‌عنوان مثال یکی از روش‌های پیشنهادی این است که توابع را با کم‌ترین سهام‌های متغیرهای ورودی و خروجی تنظیم کنیم و پس از آن در صورتی که ویژگی سوم برقرار نبود، تعداد سهام‌های ورودی یا خروجی را تا جایی که ویژگی برقرار می‌شود، افزایش دهیم. واضح‌ترین اشکال این روش سوژه محور بودن آن است. به‌عبارت دیگر، نمی‌توان یک قاعده کلی که برای همه توابع صادق باشد از آن استخراج کرد؛ بنابراین لازم بود روشی قاعده‌مند مشخص شود که با استفاده از آن بتوان توابع غیرخطی را با روشی واحد به‌صورتی که ویژگی سوم را برآورده سازند، پیاده‌سازی کرد. روش تسهیم مستقیم^۲ به همین منظور ارائه شد [21]. این روش که در مرتبه‌های مختلف قابل اجرا است، به این ترتیب است که برای یک تابع غیرخطی درجه دو، توصیف منطقی هر یک از توابع پردازش‌گر یعنی A_i ها را به این شکل قرار می‌دهیم که جملات خطی آن‌ها دارای اندیس

² Direct Sharing

۴-۱- ویژگی نخست: یک‌نواختی نقاب‌گذاری

به این معنا که تمام حالت‌های مجازی که بتوان برای تسهیم یک متغیر به S سهم متصور شد، احتمال رخ‌دادن یکسانی داشته باشند و نتوان میان آن‌ها تمایزی قائل شد. این ویژگی تضمین می‌کند در صورتی که متغیر X به s سهم تقسیم‌بندی شود، مقدار X از هر ترکیب $s - 1$ تایی از سهام‌ها مستقل خواهد بود [20].

۴-۲- ویژگی دوم: صحت

تمام پردازش‌هایی که در حالت بدون نقاب، بر روی خود متغیر X اتفاق می‌افتاد تا خروجی حاصل شود، در این حالت بر سهام‌های آن اعمال می‌شوند و به جای یک خروجی، سهام‌های خروجی را خواهیم داشت. این پردازش‌ها دو گونه هستند، یا خطی و یا غیر خطی هستند. در توابع خطی وجود نقاب‌گذاری چالشی به‌دنبال نخواهد داشت، زیرا با توجه به خواص توابع خطی، همواره داریم:

$$\begin{aligned} L_{in}(X) &= L_{in}(X_1 \oplus X_2) \\ &= L_{in}(X_1) \\ &\oplus L_{in}(X_2) \end{aligned} \quad (4)$$

اما چالش اصلی در مورد توابع غیرخطی نظیر جعبه‌های جانمایی^۱ یا ... است که رابطه بالا در مورد آن‌ها صادق نیست؛ یعنی:

$$\begin{aligned} S_{in}(X) &= S_{in}(X_1 \oplus X_2) \\ &\neq S_{in}(X_1) \\ &\oplus S_{in}(X_2) \end{aligned} \quad (5)$$

بنابراین لازم است که توابع پردازش‌گر را به‌نوعی بازتعریف کنیم که همان خروجی مطلوب را در حالت نقاب‌گذاری شده نیز به ما بدهند. به این معنا که مجموع نتیجه‌های حاصل از پردازش سهام‌های یک متغیر یا به‌عبارت دقیق‌تر؛ مجموع سهام‌های خروجی، برابر با همان خروجی باشد که از پردازش خود آن متغیر به‌دست می‌آید. به‌عنوان مثال تابع رابطه (۲) را در نظر بگیرید. در رابطه (۳) پیاده‌سازی مرتبه نخست تابع با روش نقاب‌گذاری تصریح شده که در آن تعداد سهام‌های متغیرهای ورودی برابر با دو است. ملاحظه می‌شود که دو تابع پردازش‌گر f_1 و f_2 به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده‌اند که با پردازش سهام‌های ورودی‌ها، در مجموع به‌طور دقیق همان حاصلی را به‌دست دهند که تابع f با پردازش متغیرهای اصلی می‌داد؛ بنابراین

¹ Substitution Box

۴-۴- ویژگی چهارم: یکنواختی خروجی توابع پردازشگر

در پیاده‌سازی مدارها، در بسیاری از موارد با حالتی مواجه هستیم که خروجی بخشی از مدار به‌عنوان ورودی بخشی دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ مانند خروجی توابع دور در الگوریتم‌های رمزنگاری. در چنین حالتی، در صورتی که بخواهیم ویژگی نخست یعنی یکنواختی نقاب‌گذاری، برای مدار دوم برقرار باشد، به این معنا خواهد بود که خروجی‌های مدار نخست لازم است، یکنواخت باشند.

با این حال، برقراری این ویژگی برخلاف سه ویژگی نخست با چالش‌هایی همراه است. به‌طور کلی و تاکنون، توابعی که بتوانند هر چهار ویژگی را به‌صورت توأمان و قطعی برقرار سازند، پیشنهاد نشده‌اند [20]. به‌طور معمول لازم است که برقرار بودن یا نبودن ویژگی چهارم بررسی شده و در صورت عدم برقراری، با روش‌هایی جبران‌ساز آن را برآورده ساخت. تاکنون روش‌های متعددی به این منظور پیشنهاد شده‌اند که هر یک مزایا و معایبی دارند.

• نقاب‌گذاری مجدد^۱

رویکرد این روش نقاب‌گذاری مجدد مقادیر میانی در تمام مراحل است [22]. این کار از طریق اضافه‌شدن مجدد مقادیر تصادفی به الگوریتم انجام می‌شود. بدیهی است که نخستین هزینه این روش تولید مقادیر تصادفی مازادی است که در هر مرحله مورد نیاز خواهند بود. هرچند که اصلاحاتی نیز بر روی طرح اولیه این روش انجام شد و تعداد مقادیر تصادفی مورد نیاز تا حدودی نسبت به ایده اولیه کاهش پیدا کرد، با این وجود هزینه اجرایی آن همچنان بالا محسوب می‌شود. البته مزیت اعمال این روش نیز در این خواهد بود که در الگوریتمی که مجهز به نقاب‌گذاری مجدد است، برقرار بودن یا نبودن ویژگی نخست نیز فاقد اهمیت خواهد بود.

صورت کلی یک طرح نقاب‌گذاری مجدد به این ترتیب است که اگر فرض کنیم تابعی مانند r داشته باشیم که سهم‌های خروجی آن A_i ها باشند و تعداد آن‌ها برابر با S_{out} باشد، در صورتی که A_i ها یکنواخت نباشند، برای یکنواخت‌شدن‌شان کافی است $S_{out} - 1$ مقدار تصادفی M_i را تولید کرده و به توابع اضافه کنیم. رابطه (۹) فرآیند اضافه‌شدن را نشان می‌دهد:

$i + 1$ و جملات درجه دوم آن‌ها دارای اندیس‌های $(i + 1, i + 1)$ ، $(i + 1, i + 2)$ و $(i + 2, i + 1)$ باشند. رابطه (۶) مثالی برای پیاده‌سازی با روش تسهیم مستقیم را نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= 1 \oplus X_2 \oplus (X_2Y_2 \oplus X_2Y_3 \\
 &\quad \oplus X_3Y_2) \\
 &\quad \oplus (X_2Z_2 \\
 &\quad \oplus X_2Z_3 \\
 &\quad \oplus X_3Z_2) \\
 &\quad \oplus (Y_2Z_2 \oplus Y_2Z_3 \oplus Y_3Z_2) \\
 A_2 &= X_3 \oplus (X_3Y_3 \oplus X_3Y_1 \\
 &\quad \oplus X_1Y_3) \\
 &\quad \oplus (X_3Z_3 \\
 &\quad \oplus X_3Z_1 \\
 &\quad \oplus X_1Z_3) \\
 &\quad \oplus (Y_3Z_3 \oplus Y_3Z_1 \oplus Y_1Z_3) \\
 A_3 &= X_1 \oplus (X_1Y_1 \oplus X_1Y_2 \\
 &\quad \oplus X_2Y_1) \\
 &\quad \oplus (X_1Z_1 \\
 &\quad \oplus X_1Z_2 \\
 &\quad \oplus X_2Z_1) \\
 &\quad \oplus (Y_1Z_1 \oplus Y_1Z_2 \oplus Y_2Z_1)
 \end{aligned} \tag{۶}$$

این قاعده پیاده‌سازی به همین ترتیب قابل تعمیم به درجات بالاتر نیز هست.

با به‌کارگیری این روش دیگر نیاز نخواهد بود که تعداد سهم‌های ورودی و خروجی را به‌صورت دستی تنظیم کنیم؛ بلکه به تعداد مورد نیاز برای تکمیل قاعده تسهیم مستقیم اکتفا می‌کنیم.

نکته‌ای که در این‌جا مشهود است، افزایش تعداد سهم‌ها تحت تأثیر درجه توابع تغییر می‌کند و مطابق با یک قاعده کلی، در صورتی که تعداد سهم‌های ورودی و خروجی در روابط زیر صادق باشند، ویژگی سوم برقرار خواهد بود [20]:

$$S_{in} \geq t \times d + 1 \tag{۷}$$

$$S_{out} \geq \binom{S_{in}}{t} \tag{۸}$$

در روابط بالا t برابر با درجه تابع مورد پیاده‌سازی d برابر با مرتبه پیاده‌سازی است.

گفتنی است که ممکن است، پیاده‌سازی‌های دیگری نیز وجود داشته باشند که با تعداد سهم‌های کمتری ویژگی سوم را برآورده سازند؛ اما بازه بالا تضمین می‌کند که ویژگی سوم به‌حتم برقرار باشد.

^۱ Re-Masking

خروجی را نیز از سه به چهار افزایش داده‌ایم. نتیجه به‌شکل رابطه (۱۲) خواهد بود:

$$\begin{aligned} A_1 &= (X_3 \oplus X_4)(Y_2 \oplus Y_3) \\ &\quad \oplus Y_2 \oplus Y_3 \oplus Y_4 \\ &\quad \oplus X_2 \oplus X_3 \oplus X_4 \\ A_2 &= (X_1 \oplus X_3)(Y_1 \oplus Y_4) \\ &\quad \oplus Y_1 \oplus Y_3 \oplus Y_4 \\ &\quad \oplus X_1 \oplus X_3 \oplus X_4 \quad (12) \\ A_3 &= (X_2 \oplus X_4)(Y_1 \oplus Y_4) \oplus Y_2 \\ &\quad \oplus X_2 \\ A_4 &= (X_1 \oplus X_2)(Y_2 \oplus Y_3) \oplus Y_1 \\ &\quad \oplus X_1 \end{aligned}$$

پیاده‌سازی به‌دست‌آمده در خروجی نیز یک‌نواخت است.

• کاهش تعداد سهم‌های توابع پردازش‌گر

در مواردی که تعداد سهم‌های خروجی، بیش از تعداد سهم‌های ورودی است، می‌توان با روش‌هایی هم‌چون ترکیب‌کردن سهم‌های خروجی به‌وسیله توابع آفینی^۱، تعداد آن‌ها را کاهش داد و در نتیجه ویژگی یک‌نواختی را در مورد آن‌ها برقرار ساخت [20]. با این وجود کاهش تعداد سهم‌های خروجی نمی‌تواند از مرتبه معینی بالاتر رود؛ چون در این صورت احتمال نقض شدن ویژگی سوم و یا نشت اطلاعات وجود دارد؛ بنابراین می‌توان گفت که این روش تنها در مواردی محدود قابل اعمال است. برای مثال تابع رابطه (۲) را در نظر می‌گیریم که در پیاده‌سازی رابطه (۱۳) خروجی‌های یک‌نواختی ندارد:

$$\begin{aligned} A_1 &= X_1Y_1 \oplus Z_1 \\ A_2 &= X_1Y_2 \\ A_3 &= X_2Y_1 \oplus Z_2 \\ A_4 &= X_2Y_2 \end{aligned} \quad (13)$$

فرض کنیم A_i ها را به‌شکل رابطه (۱۴) با هم ترکیب کنیم تا تعداد سهم‌های خروجی از چهار به دو کاهش یابد:

$$\begin{aligned} B_1 &= A_1 \oplus A_3 \\ B_2 &= A_2 \oplus A_4 \end{aligned} \quad (14)$$

در این حالت سهم B_2 نشت اطلاعات خواهد داشت؛ چرا که مقدار آن مطابق با رابطه (۱۵) برابر با XY_2 می‌شود که مقدار بدون نقاب و اصلی متغیر X را آشکار ساخته است.

$$XY_2 = X_1Y_2 \oplus X_2Y_2 \quad (15)$$

^۱ Affine Function

$$\begin{aligned} B_1 &= r_1(A_1, M_1) = A_1 \oplus M_1 \\ B_2 &= r_2(A_2, M_2) = A_2 \oplus M_2 \\ &\dots \\ B_{Sout-1} &= r_{Sout-1}(A_{Sout-1}, M_{Sout-1}) \\ &= A_{Sout-1} \oplus M_{Sout-1} \quad (9) \\ B_{Sout} &= r_{Sout}(A_{Sout}, M_1, M_2, \dots, M_{Sout-1}) \\ &= A_{Sout} \oplus \oplus M_i \end{aligned}$$

B_i های حاصل‌شده یک‌نواخت هستند و می‌توانند به‌عنوان ورودی تابع بعدی مورد استفاده قرار گیرند.

• افزایش تعداد سهم‌های متغیرهای ورودی

در روابط (۷ و ۸)، گفته شد که تعداد سهم‌های ورودی و خروجی، لازم است از مقدار معینی بیشتر باشند. درحقیقت آن مقادیر معین، کمینه تعداد سهم‌ها به منظور برقراری ویژگی Non-completeness هستند؛ بنابراین افزایش تعداد سهم‌ها نیز در برقراربودن آن ویژگی اختلالی ایجاد نمی‌کند. افزایش سهم‌های ورودی آنتروپی سیستم را بالا برده و به یک‌نواخت شدن خروجی منجر می‌شود [18]. هزینه اجرایی این روش نیز افزایش تعداد سهم‌ها و در نتیجه افزایش میزان پردازش‌های لازم و کاهش کارایی خواهد بود. به‌عنوان مثال تابع رابطه (۱۰) را در نظر می‌گیریم که در رابطه (۱۱) با روش تسهیم مستقیم پیاده‌سازی شده است:

$$A = f(X, Y) = XY \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= f_1(X_2, X_3, Y_2, Y_3) \\ &= X_2Y_2 \oplus X_2Y_3 \\ &\quad \oplus X_3Y_2 \\ A_2 &= f_2(X_1, X_3, Y_1, Y_3) \\ &= X_3Y_3 \oplus X_1Y_3 \\ &\quad \oplus X_3Y_1 \quad (11) \\ A_3 &= f_3(X_1, X_2, Y_1, Y_2) \\ &= X_1Y_1 \oplus X_1Y_2 \\ &\quad \oplus X_2Y_1 \end{aligned}$$

با بررسی، مشخص می‌شود که پیاده‌سازی بالا در خروجی‌ها یک‌نواخت نیست؛ بنابراین سعی می‌کنیم با اعمال روش افزایش تعداد سهم‌های ورودی‌ها، آن را یک‌نواخت سازیم. سهم‌های ورودی‌ها را از سه به چهار افزایش می‌دهیم و خروجی‌ها را نیز به‌نحوی مدیریت می‌کنیم که ویژگی صحت برقرار باشد. در این‌جا سهم‌های

$$\begin{aligned} B_1 &= A_1 \oplus X_2 \oplus X_3 \\ B_2 &= A_2 \oplus X_3 \oplus X_1 \\ B_3 &= A_3 \oplus X_1 \oplus X_2 \end{aligned} \quad (18)$$

می‌بینیم که جملات اصلاحی اضافه شده به نحوی هستند که در مجموع تأثیر یکدیگر را خنثی کرده و بر کلیت تابع تأثیری نمی‌گذارند.

• استفاده از متغیرهای مجازی^۲

گاهی می‌توان با اضافه کردن متغیرهایی علاوه بر متغیرهای اصلی خود تابع، خروجی را یکنواخت کرد [20]. با این شرط که متغیر اضافه شده که متغیر مجازی و سهم‌های آن که سهم‌های مجازی خوانده می‌شوند، در کلیت تابع تغییری ایجاد نکنند و برای مهاجم نیز قابل پیش‌بینی نباشند. می‌توان در مواردی این روش را معادل با نوعی پیاده‌سازی هوشمندانه از روش نقاب‌گذاری مجدد گرفت که در آن از تعداد کمتری عدد تصادفی استفاده می‌شود. با این حال، هزینه‌های تحمیلی هم‌چنان قابل صرف نظر نخواهند بود.

به‌عنوان مثال مجدداً تابع رابطه (۱۰) با پیاده‌سازی غیریک‌نواخت به فرم رابطه (۱۱) در نظر می‌گیریم.

اگر بخواهیم برای یک‌نواخت‌سازی آن از روش افزودن متغیر مجازی استفاده کنیم، متغیر Z را با سهم‌های Z_1, Z_2 و Z_3 در نظر گرفته و به‌صورت رابطه (۱۹) به پیاده‌سازی اضافه می‌کنیم:

$$\begin{aligned} A_1 &= f_1(X_2, X_3, Y_2, Y_3) \\ &= X_2Y_2 \oplus X_2Y_3 \\ &\quad \oplus X_3Y_2 \oplus X_2Z_2 \\ &\quad \oplus X_3Z_3 \oplus Y_2Z_2 \\ &\quad \oplus Y_3Z_3 \\ A_2 &= f_2(X_1, X_3, Y_1, Y_3) \\ &= X_3Y_3 \oplus X_1Y_3 \\ &\quad \oplus X_3Y_1 \oplus X_3Z_3 \\ &\quad \oplus X_1Z_1 \oplus Y_3Z_3 \\ &\quad \oplus Y_1Z_1 \\ A_3 &= f_3(X_1, X_2, Y_1, Y_2) \\ &= X_1Y_1 \oplus X_1Y_2 \\ &\quad \oplus X_2Y_1 \oplus X_1Z_1 \\ &\quad \oplus X_2Z_2 \oplus Y_1Z_1 \\ &\quad \oplus Y_2Z_2 \end{aligned} \quad (19)$$

² Virtual Variable

بنابراین همان‌طور که در مثال بالا می‌بینیم، روش کاهش سهم‌های خروجی همواره کارآمد نیست و لازم است که با لحاظ دقت‌های امنیتی کافی از آن استفاده شود.

• استفاده از جملات اصلاحی^۱

جملاتی از جنس متغیرهای موجود در یک تابع، که در رابطه منطقی توصیف‌کننده آن وجود ندارند؛ اما با اضافه‌شدن‌شان می‌توانند به یک‌نواخت‌شدن خروجی کمک کنند [18]. به‌عبارت دیگر، می‌توان این جملات را به‌گونه‌ای که تأثیر یکدیگر را خنثی کرده و رابطه اصلی تابع را تغییر ندهند به پیاده‌سازی توابع اضافه و ویژگی یک‌نواختی را در آن‌ها برقرار کرد. چالش اصلی این روش وجود یا عدم وجود چنین جملاتی برای هر دسته از توابع غیرخطی و چگونگی یافتن روش‌مند آن‌ها در صورت وجود داشتن است.

به‌عنوان مثال؛ تابع رابطه (۱۶) را بررسی می‌کنیم که در پیاده‌سازی تصریح‌شده در رابطه (۱۷)، ویژگی چهارم در مورد خروجی‌های آن برقرار نیست.

$$A = f(X, Y, Z) = 1 \oplus X \oplus XY \oplus XZ \oplus YZ \quad (16)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= 1 \oplus X_2 \oplus (X_2Y_2 \\ &\quad \oplus X_2Y_3 \\ &\quad \oplus X_3Y_2) \\ &\quad \oplus (X_2Z_2 \\ &\quad \oplus X_2Z_3 \\ &\quad \oplus X_3Z_2) \\ &\quad \oplus (Y_2Z_2 \oplus Y_2Z_3 \oplus Y_3Z_2) \\ A_2 &= X_3 \oplus (X_3Y_3 \oplus X_3Y_1 \\ &\quad \oplus X_1Y_3) \\ &\quad \oplus (X_3Z_3 \\ &\quad \oplus X_3Z_1 \\ &\quad \oplus X_1Z_3) \\ &\quad \oplus (Y_3Z_3 \oplus Y_3Z_1 \oplus Y_1Z_3) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} A_3 &= X_1 \oplus (X_1Y_1 \oplus X_1Y_2 \\ &\quad \oplus X_2Y_1) \\ &\quad \oplus (X_1Z_1 \\ &\quad \oplus X_1Z_2 \\ &\quad \oplus X_2Z_1) \\ &\quad \oplus (Y_1Z_1 \oplus Y_1Z_2 \oplus Y_2Z_1) \end{aligned}$$

با افزودن چند جمله اصلاحی به A_i ها به رابطه (۱۸) می‌رسیم که ویژگی یک‌نواختی خروجی‌ها در آن برقرار است.

¹ Correction Terms

$$sbox(X) = f(g(X)) \quad (21)$$

۵- جمع‌بندی

پیاده‌سازی‌های متداولی که برای الگوریتم‌های امن در مدل جعبه‌سیاه وجود دارند، اغلب در مدل حمله جعبه‌ خاکستری دارای نشت اطلاعات هستند. این نشت اطلاعات معلول روش‌های پیاده‌سازی و ابزارهای فیزیکی مورد استفاده است و در صورت عدم کنترل می‌توانند تا دست‌یافتن به کلید مخفی الگوریتم‌ها برای مهاجم سودمند باشد؛ لذا ضروری است، روش‌هایی ابداع و اعمال شوند که بتوان به‌کمک آن‌ها این جریان‌های نشت اطلاعات را مدیریت کرد.

در همین راستا، روش پیاده‌سازی آستانه‌ای مبتنی بر روش کلی نقاب‌گذاری، به‌منظور برقراری امنیت در سخت‌افزارها که با مسائلی هم‌چون گلیچ‌ها و ... مواجه هستند، ارائه شده است و امنیتی قابل اثبات فراهم می‌کند. با این حال خود این روش نیز هم‌چنان با چالش‌های مواجه است که افق مدنظر در تأمین امنیت سخت‌افزاری را که همانا برقراری امنیت در برابر مهاجم با هر مرتبه‌ای از توان است، با سؤال مواجه می‌کنند. نخستین طرح‌های پیشنهادی این روش، پیاده‌سازی‌های آستانه‌ای مرتبه دوم بودند که امنیت را در برابر مهاجمان با توان مرتبه یک، ایجاد می‌کردند؛ اما به‌مرور ایده‌های مقابله با مهاجمان مرتبه بالاتر نیز مطرح و پرداخته شدند که در این مقاله ویژگی‌های مورد نیاز برای نیل به این منظور توضیح داده شد؛ اما هم‌چنان پرسش‌هایی نظیر مدیریت بده‌بستان‌های ابعاد امنیت اعداد تصادفی مطرح هستند که لازم است در مورد آن‌ها بررسی‌های بیشتری به‌عمل آید. نتایجی که تاکنون به‌دست آمده‌اند، نشان می‌دهند که به‌الزام ارتباط مستقیمی میان کاهش تعداد سهم‌ها و به تبع کاهش اعداد تصادفی مورد نیاز، با کاهش ابعاد وجود ندارد و یا آن‌که هرچند افزایش سهم‌ها منجر به افزایش امنیت خواهد شد، اما افزایش سهم‌ها از یک میزان به بعد، افزایش چشم‌گیر ابعاد و منابع مورد نیاز را رقم می‌زند که در مواردی به هیچ وجه مقرون به صرفه نخواهد بود.

از دیگر پرسش‌های موجود، چالش‌های ناظر به ویژگی‌های چهارگانه پیاده‌سازی آستانه‌ای است؛ نظیر یافتن روش‌هایی بهینه برای یک‌نواخت‌سازی خروجی‌ها و ...

می‌بینیم که جملات اضافه‌شده به‌واسطه متغیر مجازی و سهم‌های آن، در مجموع تابع اصلی را تغییر نداده، اما در عین حال ویژگی چهارم را در آن ایجاد کرده‌اند.

• تغییر تعداد سهم‌های ورودی

در روش افزایش تعداد سهم‌های متغیرهای ورودی، سهم‌های متغیرهای خروجی نیز به تناسب افزایش می‌یابند که ویژگی صحت برقرار بماند؛ اما در برخی از پیاده‌سازی‌های مرتبه نخست، تابعی وجود دارند که می‌توان بدون نیاز به تغییر دادن تعداد سهم‌های خروجی آن‌ها، تعداد سهم‌های ورودی را افزایش داد و در عین این‌که ویژگی چهارم برقرار می‌شود، ویژگی‌های قبلی نیز هم‌چنان برقرار بمانند. این روش در جلوگیری از افزایش هزینه‌های ناشی از افزایش تعداد سهم‌ها بسیار مؤثر است؛ اما همان‌طور که مشخص است، تنها در موارد محدودی قابل اعمال است [20].

برای مثال همان تابع رابطه (۱۰) را در نظر می‌گیریم که پیاده‌سازی غیریک‌نواخت آن با روش تسهیم مستقیم دارای سه سهم ورودی و سه سهم خروجی بود. در روش افزایش تعداد سهم‌های ورودی‌ها که در رابطه (۱۲) بررسی شد، ملاحظه شد که می‌توان با افزایش سهم‌های ورودی و هم‌چنین خروجی از سه به چهار، یک تابع یک‌نواخت ساخت؛ اما همین تابع را می‌توان با افزایش سهم‌های ورودی از سه به چهار و ثابت‌نگه‌داشتن سهم‌های خروجی در همان سه سهم نیز، به‌صورت یک‌نواخت پیاده‌سازی کرد. رابطه (۲۰) این پیاده‌سازی را نشان می‌دهد:

$$\begin{aligned} A_1 &= (X_2 \oplus X_3 \oplus X_4)(Y_2 \\ &\quad \oplus Y_3) \oplus Y_4 \\ A_2 &= (X_1 \oplus X_3)(Y_1 \oplus Y_4) \\ &\quad \oplus X_1 Y_3 \oplus X_4 \\ A_3 &= (X_2 \oplus X_4)(Y_1 \oplus Y_4) \\ &\quad \oplus X_1 Y_2 \oplus X_4 \\ &\quad \oplus Y_4 \end{aligned} \quad (20)$$

• تجزیه توابع درجه بالا به درجات پایین‌تر

در مواردی که توابع غیرخطی مانند جعبه جانشانی، با درجات بالا داریم، می‌توانیم با تجزیه این توابع به توابعی با درجات پایین‌تر که یا خود یک‌نواخت هستند یا ویژگی یک‌نواختی راحت‌تر در موردشان برقرار می‌شود، پیچیدگی مسأله را کاهش دهیم [20]. برای مثال می‌توان یک تابع غیر خطی با درجه جبری سه را به دو تابع غیرخطی با درجه جبری دو تجزیه کرد.

- against side-channel attacks: A comprehensive study with cautionary note," *Advances in Cryptology – ASIACRYPT*, vol. 7658 of LNCS, pp. 740–757, 2012.
- [12] F. Durvaux, M. Renauld, F.-X. Standaert, L. van Oldeneel tot Oldenzeel, and N. Veyrat-Charvillon, "Random delay countermeasure," *Cryptanalysis of the CHES 2009/2010*.
- [13] Y. Ishai, A. Sahai, and D. Wagner, "Private circuits: Securing hardware against probing attacks," *Advances in Cryptology - CRYPTO*, vol. 2729 of LNCS, pp. 463–481, 2003.
- [14] L. Goubin and J. Patarin, "DES and differential power analysis the "duplication" method," *Cryptographic Hardware and Embedded Systems*, vol. 1717 of LNCS, pp. 158–172, 1999.
- [15] S. Chari, C. Jutla, J. Rao, and P. Rohatgi, "Towards sound approaches to counteract power-analysis attacks," *Advances in Cryptology – CRYPTO*, vol. 1666 of LNCS, pp. 398–412, 1999.
- [16] T. S. Messerges, "Securing the AES finalists against power analysis attacks," *Fast Software Encryption*, vol. 1978 of LNCS, pp. 150–164, 2001.
- [17] E. Trichina, T. Korkishko, and K. Lee, "Small size, low power, side channel immune AES coprocessor: Design and synthesis results," *Advanced Encryption Standard – AES*, vol. 3373 of LNCS, pp. 113–127, 2005.
- [18] S. Nikova, C. Rechberger, and V. Rijmen, "Threshold implementations against side-channel attacks and glitches," *Information and Communications Security*, vol. 4307 of LNCS, pp. 529–545, 2006.
- [19] E. Prouff and T. Roche, "Higher-order glitches free implementation of the AES using secure multi-party computation protocols," *Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES*, vol. 6917 of LNCS, pp. 63–78, 2011.
- [20] B. Bilgin, "Threshold implementations: as countermeasure against higher-order differential power analysis," 2015.
- [21] S. Nikova, V. Rijmen, and M. Schl affer, "Secure hardware implementation of nonlinear functions in the presence of glitches," *Cryptology*, vol. 24, no. 2, pp. 292–321, 2011.
- [22] A. Moradi, A. Poschmann, S. Ling, C. Paar, and H. Wang, "Pushing the limits: A very compact and a threshold implementation of AES," *EUROCRYPT*, vol. 6632 of LNCS, pp. 69–88, 2011.
- [23] B. Bilgin, B. Gierlichs, S. Nikova, V. Nikov, and V. Rijmen, "Higher-order threshold implementations." In International Con-

همچنین با توجه به اهمیت یافتن برقرای امنیت در پیاده‌سازی‌هایی که امروزه با سرعتی بسیار زیاد به سمت کاهش ابعاد و کاهش مصرف توان پیش می‌روند، مفید خواهد بود که از مدل‌های نشت اطلاعات دقیق‌تری استفاده شود که در آن‌ها تأثیرات المان‌های مدار بر یک‌دیگر، نشتی‌های ناشی از این تأثیرات و ... نیز در نظر گرفته شوند.

۶- مراجع

- [1] H. M. Heys, "A tutorial on linear and differential cryptanalysis," vol. 26, no. 3, 2002.
- [2] S. Chow, P. Eisen, H. Johnson, & P.C. Van Oorschot, "White-box cryptography and an AES implementation," *International Workshop on Selected Areas in Cryptography*, pp. 250-270, 2002.
- [3] P. C. Kocher, "Timing attacks on implementations of Diffie-Hellman, RSA, DSS, and other systems," *Annual International Cryptology Conference*, pp. 104-113, 1996.
- [4] K. Gandolfi, C. Moutrel, and F. Olivier., "Electromagnetic analysis: Concrete results," *Cryptographic Hardware and Embedded Systems—CHES*, pp. 675, 2001.
- [5] P.Kocher, J.Jaffe, & B. Jun, "Differential power analysis," *Annual International Cryptology Conference*, pp. 388-397, 1999.
- [6] O. K ommerling, & M.G.Kuhn, "Design Principles for Tamper-Resistant Smartcard Processors," *Smartcard*, vol. 99, pp. 9-20, 1999.
- [7] D.Samyde, S. Skorobogatov , R.Anderson, & J. J. Quisquater, "On a new way to read data from memory," *First International IEEE Security in Storage Workshop*, pp. 65-69, 2002.
- [8] K.Pietrzak ,and S. Dziembowski, "Leakage-resilient cryptography," *Foundations of Computer Science*, pp. 293–302, 2008.
- [9] M. Medwed, F. Standaert, and A. Joux, "Towards super-exponential side-channel security with efficient leakage-resilient prfs," *Cryptographic Hardware and Embedded Systems - CHES*, vol. 7428 of LNCS, pp. 193–212, 2012.
- [10] K. Tiri and I. Verbauwhede, "A logic level design methodology for a secure DPA resistant ASIC or FPGA implementation," *IEEE Computer Society*, 2004.
- [11] N. Veyrat-Charvillon, M. Medwed, S. Kerckhof, and F.-X. Standaert, "Shuffling

ference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security, pp. 326-343. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.

- [24] T. Sugawara, "3-share threshold implementation of AES S-box without fresh randomness." *IACR Transactions on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*, 2019, pp.123-145.
- [25] J. Daemen, "Changing of the guards: A simple and efficient method for achieving uniformity in threshold sharing." In *International Conference on Cryptographic Hardware and Embedded Systems*, pp. 137-153. Springer, Cham, 2017.



سارا زارعی کارشناسی الکترونیک خود را در سال ۱۳۹۶ از دانشگاه تهران دریافت کرد و در سال ۱۳۹۹، از مقطع کارشناسی ارشد در رشتهٔ مخابرات امن و رمزنگاری از دانشگاه شهید بهشتی فارغ‌التحصیل شد.

از جمله زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه او می‌توان به حملات فیزیکی، پیاده‌سازی امن، تحلیل و ارزیابی امنیت سخت‌افزارها و نیز مباحث مربوط به زنجیره بلوکی اشاره نمود.



هادی سلیمانی در سال ۱۳۸۷ مدرک کارشناسی مخابرات را از دانشگاه علم و صنعت ایران، کارشناسی‌ارشد را از دانشگاه امام حسین (ع) با گرایش مخابرات رمز در سال ۱۳۸۹ و سپس مدرک دکترا را در

دانشکده علوم کامپیوتر دانشگاه آلتو فنلاند در سال ۱۳۹۴ اخذ کرد. همچنین طی دو دوره کوتاه مدت پس‌دکترای در گروه رمزنگاری دانشگاه DTU دانمارک در خصوص تحلیل و طراحی رمزهای قالبی نوین مشغول به پژوهش و شد. وی هم‌اکنون، ضمن همکاری با پژوهشکده‌ها و مراکز پژوهشی مختلف در حوزه رمزنگاری و امنیت اطلاعات، به‌عنوان استادیار گروه امنیت شبکه و رمزنگاری پژوهشکده فضای مجازی دانشگاه شهید بهشتی مشغول به کار است. موضوعات پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل و طراحی اولیه‌های رمزنگاری، پیاده‌سازی امن و حملات کانال جانبی است.

