Shahid Beheshti University

رمزنگاری

هادی سلیمانی

پژوهشکده فضای مجازی دانشگاه شهید بهشتی

مجوز استفاده و نشر

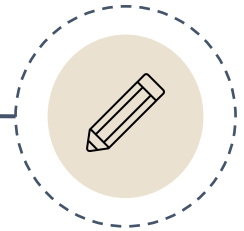
- اجازه‌ی ایجاد نسخه‌های دیجیتالی جدید براساس بخشی یا تمام مطالب این اسلاید بدون پرداخت هزینه اعطا می‌شود، مشروط بر این‌که:
  - فقط به‌منظور و در راستای استفاده‌ی آموزشی (شخصی و یا کلاسی) ساخته شده باشند و برای کسب هرگونه سود و یا مزیت تجاری استفاده نشوند.
  - نسخه‌های جدید حاوی ارجاع مستقیم به نام تهیه‌کننده اسلاید (هادی سلیمانی) و محل کار وی (پژوهشکده فضای مجازی دانشگاه شهید بهشتی) باشند.
- مجموعه‌ی حاضر براساس نظرات ارزشمند دانشجویان (سابق) دانشگاه شهید بهشتی و همکاران محترم تهیه شده است که از تمام آن‌ها قدردانی می‌شود؛

  (به‌خصوص خانم‌ها **سارا زارعی** و **فاطمه عزیزی** نقش مهمی را در تهیه نسخه‌ی نهایی بر عهده داشته‌اند. خانم مهندس زارعی علاوه بر کمک در آماده‌سازی نسخه‌ی فعلی اسلایدها، در تصحیح اشتباهات نسخه‌ی قبلی و همچنین تکمیل و بازتعریف محتوای درس‌ها بسیار تاثیرگذار بوده‌اند).
- برای مشاهده‌ی اسلایدها و ویدئوهای تدریس این درس به آدرس زیر مراجعه فرمایید:

http://facultymembers.sbu.ac.ir/h_soleimany/cryptography-course/

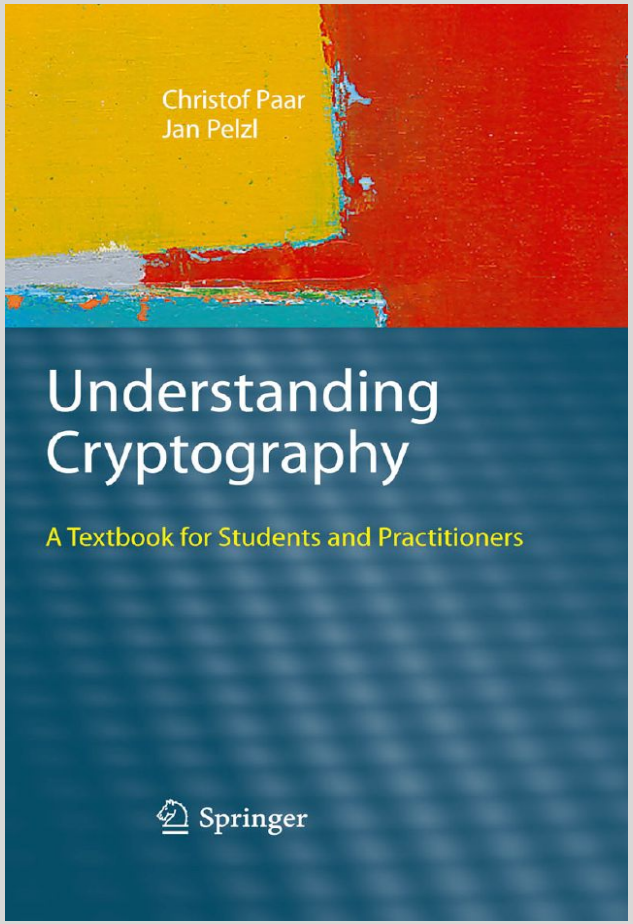
درس پنجم

رمزهای قالبی



معرفی مـرجع

رمزهای قالبی



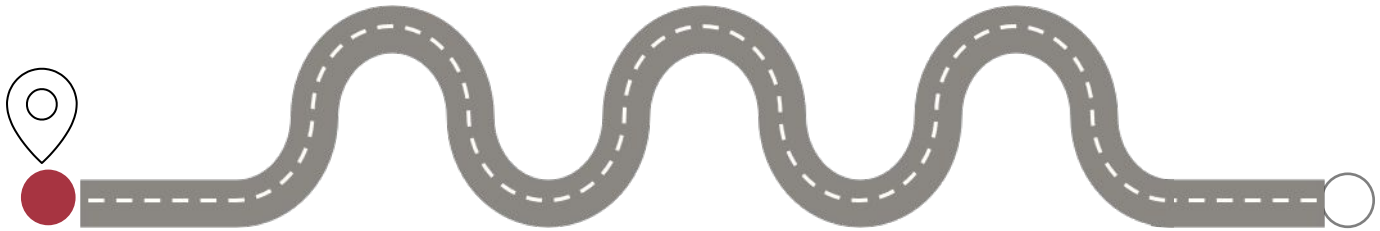
Paar, C., & Pelzl, J. (2009). Understanding cryptography: a textbook for students and practitioners. Springer Science & Business Media.

مثال‌ها و تصاویر این بخش از درس از کتاب مرجع است (در غیر این صورت مرجع شکل ذکر شده است).

فهرست عناوین درس

رمزهای قالبی

- مقدمه
- آشفته‌سازی و پراکنش
- رمزهای قالبی تکرارپذیر
- رمزهای قالبی فیستلی
- رمزهای قالبی SPN
- مقایسه‌ی رمزهای جریانی و رمزهای قالبی
- جمع‌بندی مطالب



مقدمه

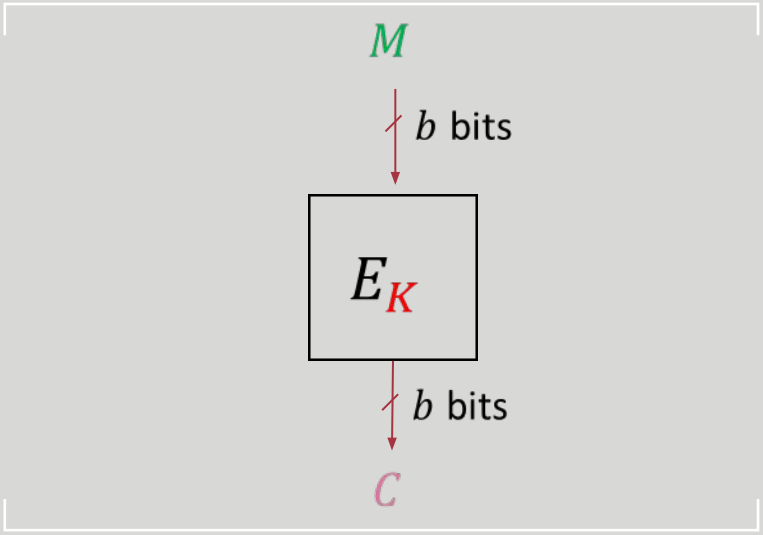
رمز قالبی

(Block Cipher)

- الگوریتم رمزگذاری E_K، یک متن اصلی b بیتی را براساس کلید الگوریتم (K) به یک متن رمزشده‌ی b بیتی تبدیل می‌کند.
- الگوریتم رمزگشایی D_K، معکوس الگوریتم رمزگذاری E_K است، یعنی:

$$D_K\left(E_K(M)\right) = M$$

- بنابراین الگوریتم رمزگذاری E_K به ازای هر کلید، باید یک جایگشت b بیتی معکوس‌پذیر باشد.
- از آنجایی‌که ورودی به صورت قالب‌های b بیتی است، این دسته از الگوریتم‌های رمزنگاری را رمز قالبی نامیده‌اند.

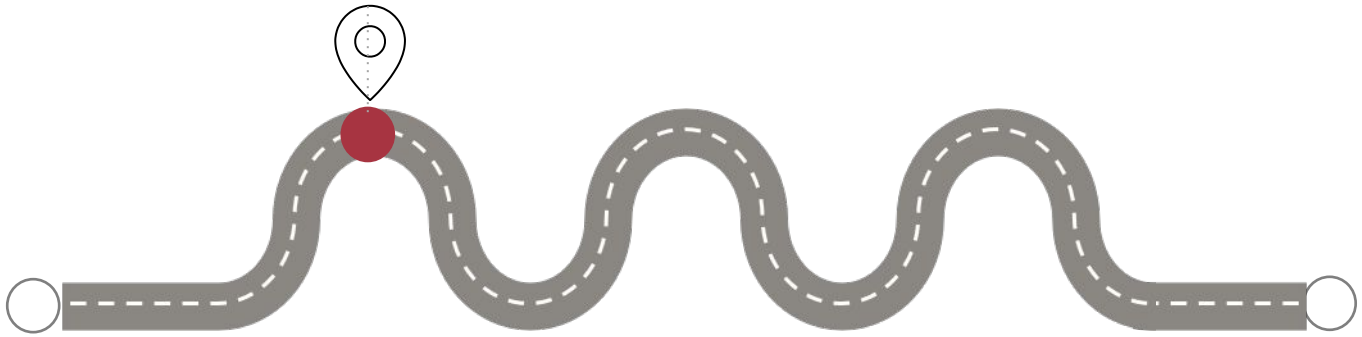


$$E: \{0,1\}^b \times \{0,1\}^k \rightarrow \{0,1\}^b$$

امنیت رمز قالبی

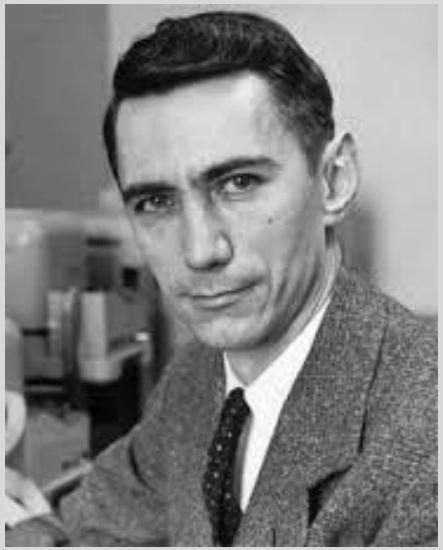
- تعداد جایگشت‌های b بیتی ممکن $2^b! \approx 2^{(b-1)2^b}$ است که به مراتب از تعداد جایگشت‌های یک رمز قالبی 2^k بیشتر است (مطلقا قابل قیاس نیست!).
- از منظر امنیتی، هدف کلی از طراحی یک رمز قالبی انتخاب کاملا تصادفیِ 2^k جایگشت از $2^b!$ حالت ممکن است.
- به عبارت دیگر، ویژگی‌های رمز قالبی باید به ازای هر کلید دلخواه کاملا تصادفی به نظر برسد.
- ساخت الگوریتم‌های رمزنگاری قالبی متاثر از دو مفهوم کلیدی است که توسط شانون ارائه شدند: آشفته‌سازی و پراکنش.

آشفته‌سازی و
پراکنش



مقدمه

دو مفهوم کلیدی در مقاله شانون



- Claude E. Shannon:

Two methods suggest themselves for frustrating a statistical analysis. These we may call the methods of **diffusion** and **confusion**.

آشفته‌سازی

(Confusion)

- تعریف اولیه‌ی شانون: رابطه‌ی بین متن رمزشده و کلید حتی‌المقدور پیچیده باشد.
- مفهوم: با داشتن تعداد زیادی متن رمزشده، نتوان کلید را کشف کرد.
- در برخی از متون علمی از آشفته‌سازی به عنوان «پیچیدگی رابطه‌ی متن اصلی و متن رمزشده» نیز یاد می‌شود.

آشفته‌سازی

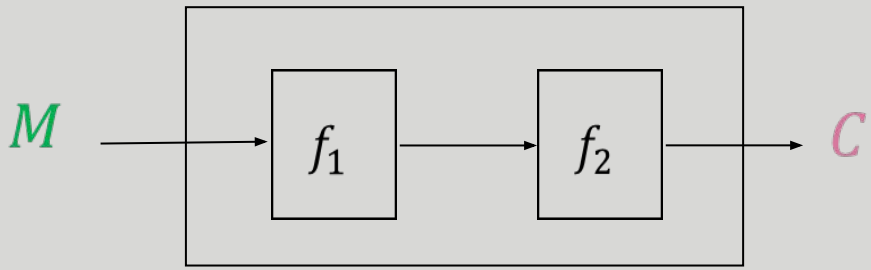
مثال (یک رمز آفینی ترکیبی)

- فرض کنید که یک الگوریتم رمزنگاری از ترکیب دو تبدیل آفینی تشکل شده باشد:

$f_1(x) = A_1x + B_1$ و $f_2(x) = A_2x + B_2$

که مقادیر (A_1,B_1) و (A_2,B_2) کلید مخفی هستند.

- نتیجه: دو تبدیل آفینی معادل یک تبدیل آفینی هستند.
- بنابراین برای شکست سیستم می‌توان به جای پیدا کردن چهار مقدار (A_1,B_1) و (A_2,B_2)، دو مقدار (A_3,B_3) را حدس زد و پیدا کرد (نقطه‌ی ضعف این الگوریتم).
- دلیل: وجود یک رابطه‌ی ساده بین ورودی و خروجی تابع!



$$C = f_2f_1(M) = A_2(A_1M + B_1) + B_2$$
$$= A_2A_1M + (A_2B_1 + B_2)$$
$$= A_3M + B_3$$

آشفته‌سازی

... ادامه

- استفاده از توابع غیرخطی برای آشفته‌سازی ضروری است.
- راه‌کار معمول استفاده از توابع غیرخطی کوچک است که تحت عنوان جعبه‌های جانشانی (Substitution box) شناخته می‌شوند.
  - تاکنون در بسیاری از رمزهای قالبی به کار رفته‌اند (نظیر رمزهای استاندارد AES و DES).
  - به خاطر وجود کارهای نظری فراوان در این حوزه، امنیت آن‌ها به خوبی فهمیده می‌شود.
- راه‌کار دیگری که در برخی از رمزهای قالبی به کار رفته نیز استفاده از جمع پیمانه‌ای است.
  - در پیاده‌سازی‌های نرم‌افزاری کارایی بهتری دارد، اما امنیت آن برای جامعه‌ی رمزنگاری به روشنی جعبه‌های جانشانی نیست.

پراکنش

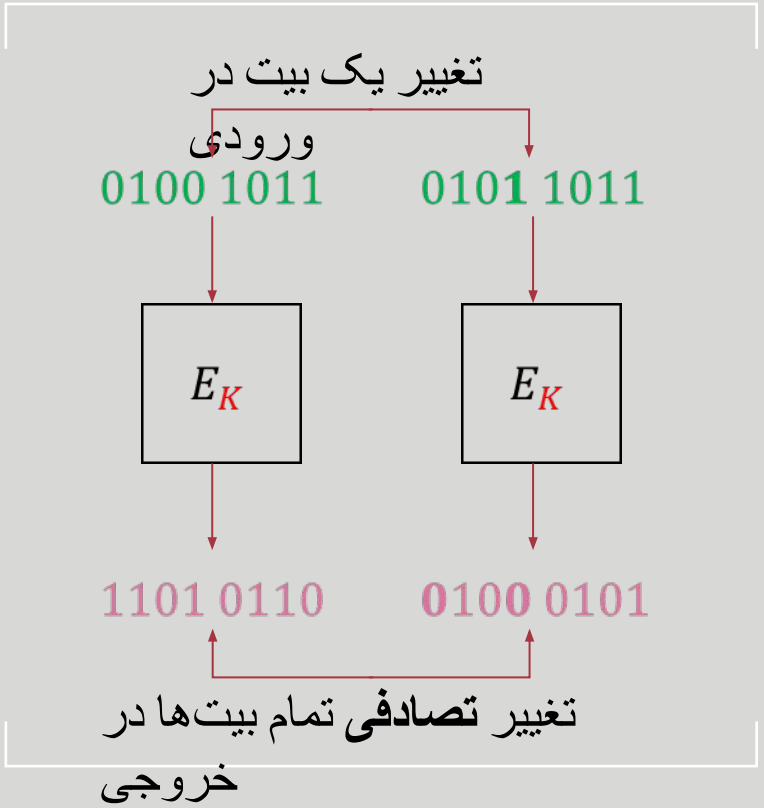
(Diffusion)

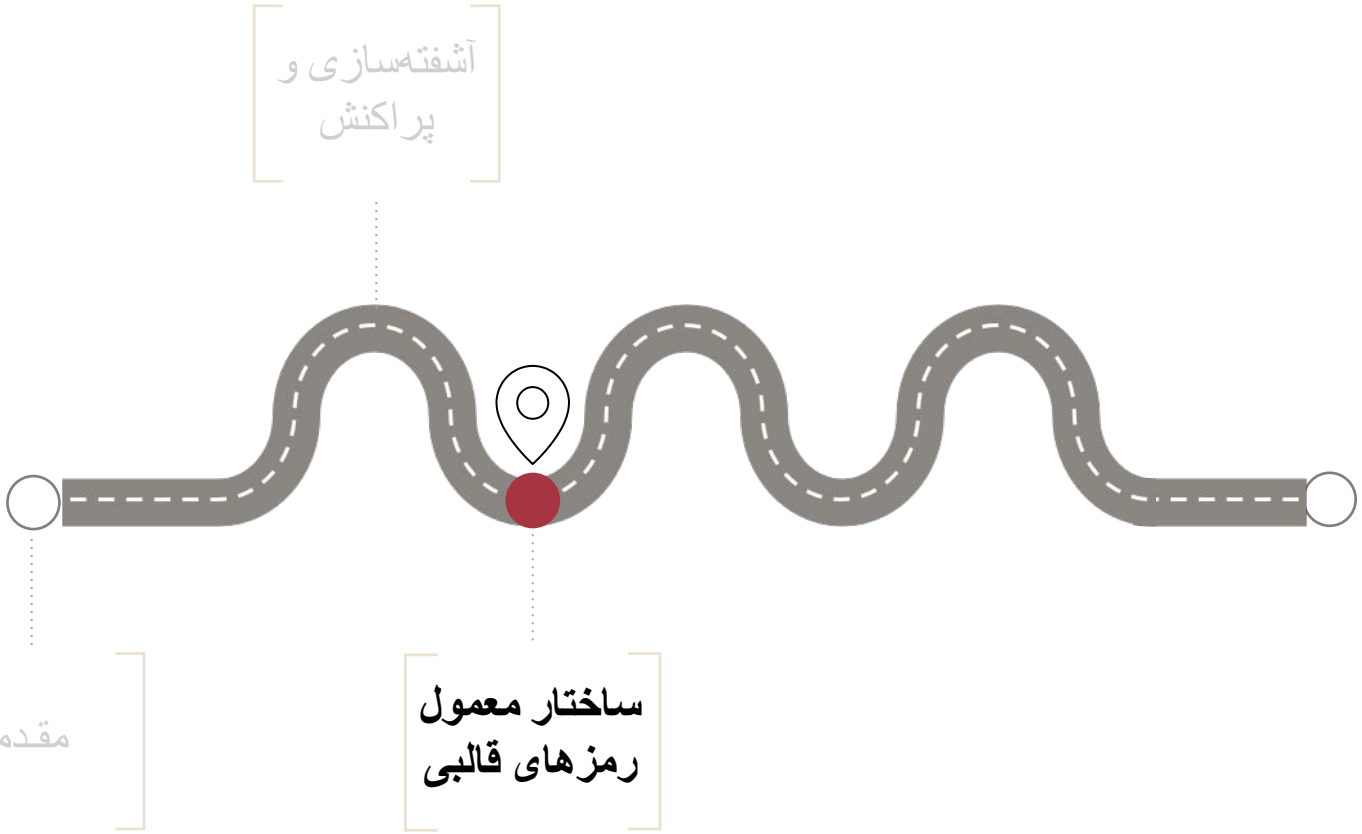
- تعریف شانون: از بین بردن هرگونه رابطه‌ی آماری بین دسته‌ای از متون اصلی و متون رمز شده.
- یعنی اگر متون اصلی با یکدیگر رابطه داشته باشند، متون رمزشده‌ی معادل آن‌ها با یکدیگر رابطه‌ی آماری خاصی نداشته باشند.
- بنابراین، برای برآورده کردن ویژگی پراکنش، هر دسته‌ی خاص از متون اصلی باید بتوانند به تمامی 2^b مقدار ممکن منتقل شوند.
- استفاده از توابع خطی نقش مهمی در ایجاد پراکنش دارد.

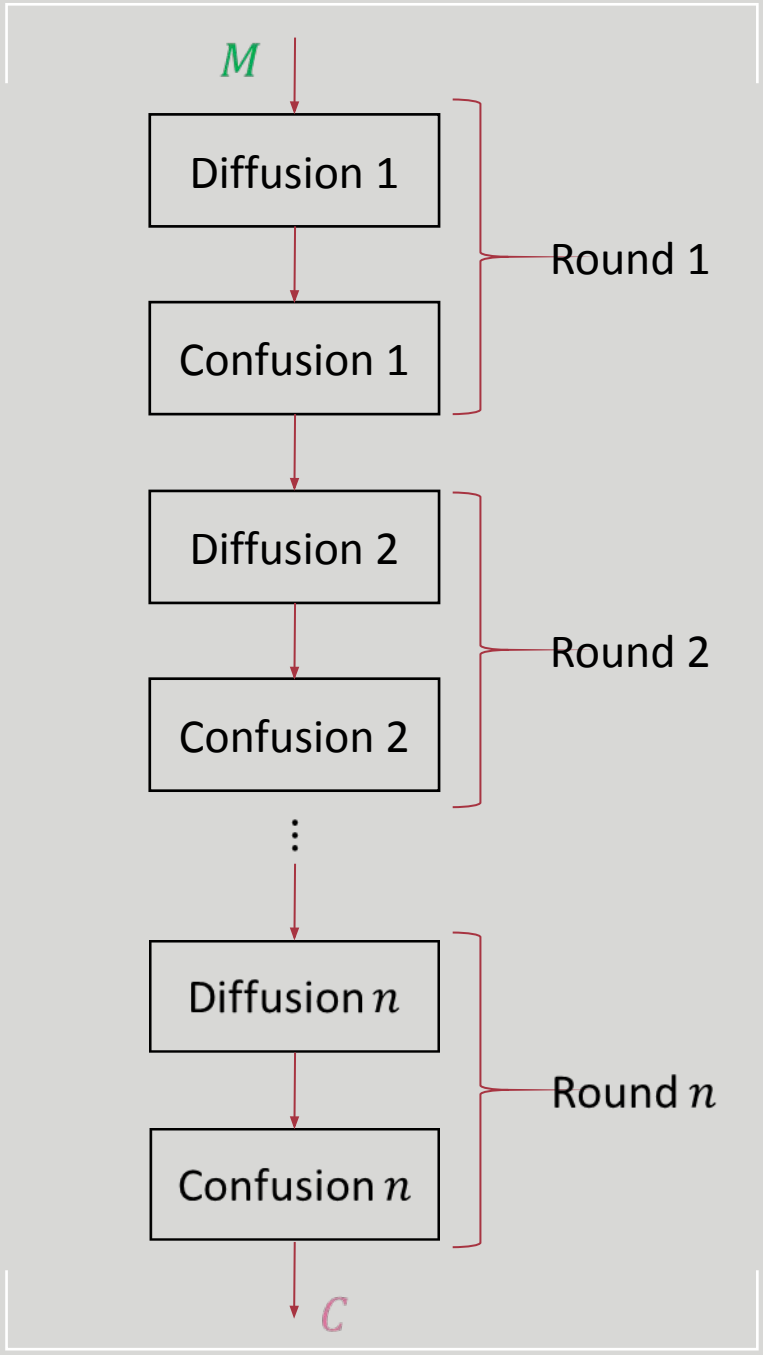
اثر بهمنی

(Avalanche Effect)

- اثر بهمنی: بر اثر تغییر یک بیت از ورودی، هر بیت از خروجی با احتمال تقریبا 50 درصد تغییر کند.
- **مفهوم**: با تغییر کم متن اصلی، متن رمزشده به صورت کاملا تصادفی تغییر کند.
- یا به عبارت دیگر، یك دسته‌ی خاص از متون اصلي منجر به یك دسته‌ی خاص از متون رمزشده نشوند.
- معیار بهمنی اکید (Strict Avalanche Criterion): با تغییر یک بیت از ورودی، هر بیت از خروجی با احتمال دقیقا 50 درصد تغییر کند.



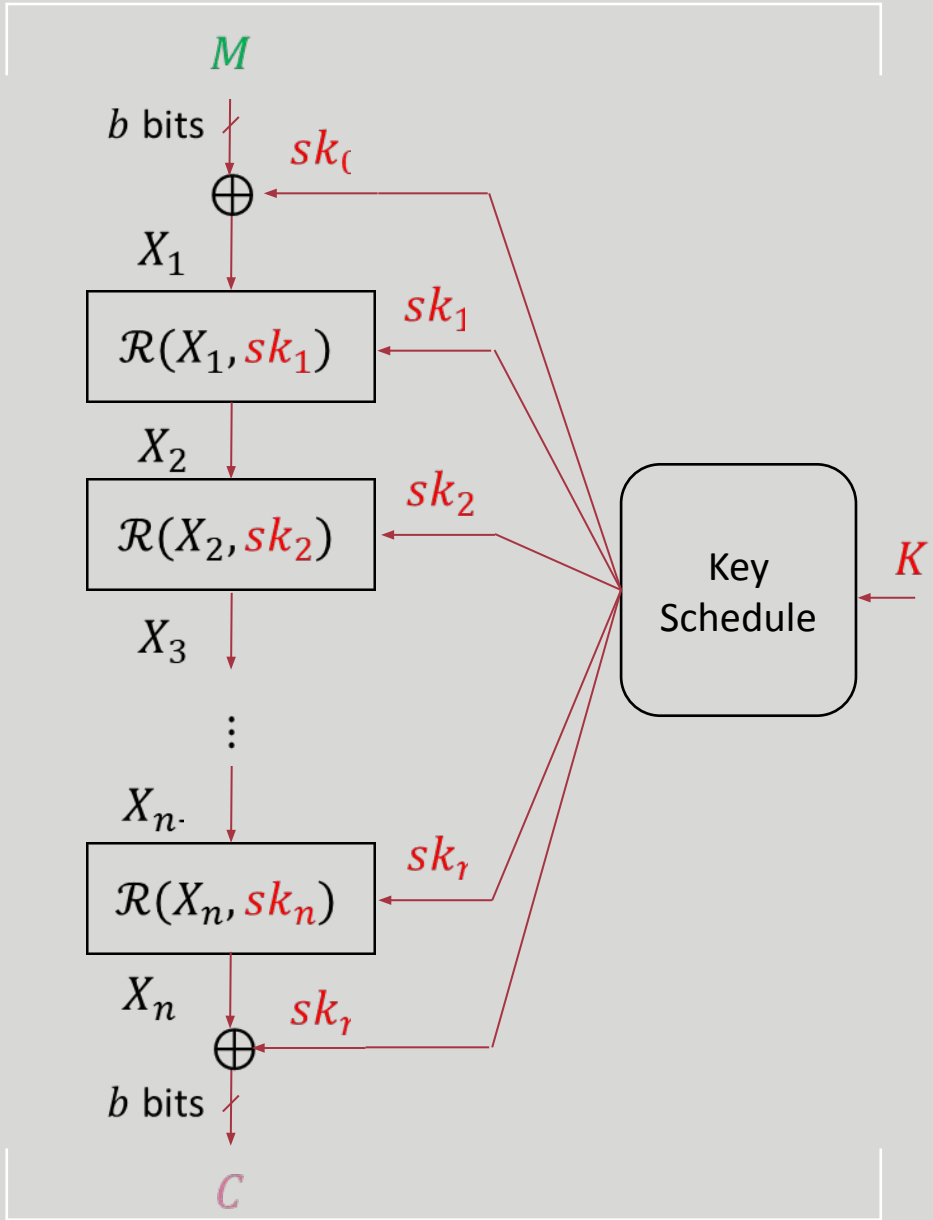

آشفته‌سازی و
پراکنش
مقدمه
ساختار معمول
رمزهای قالبی



استفاده‌ی هم‌زمان از جانشانی و جابه‌جایی

- شانون: روش‌های جانشانی و جابه‌جایی باید به صورت هم‌زمان و متناوب استفاده شوند.
- به همین علت، رمزهای قالبی عموما با استفاده از تکرار یک عملیات به نام دور (Round) ساخته می‌شوند.
- هر دور شامل تعدادی تابع (ساده) خطی و غیرخطی است.
- عملیات دور باید یک‌به‌یک باشد تا رمزگشایی نیز ممکن باشد.
- معمولا طراحان ساختار دورها را یکسان (یا بسیار شبیه به هم) در نظر می‌گیرند تا امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌ها با کارایی بالاتری وجود داشته باشد.
- به این دسته از رمزها، رمزهای قالبی تکرارپذیر (Iterated) گفته می‌شود.

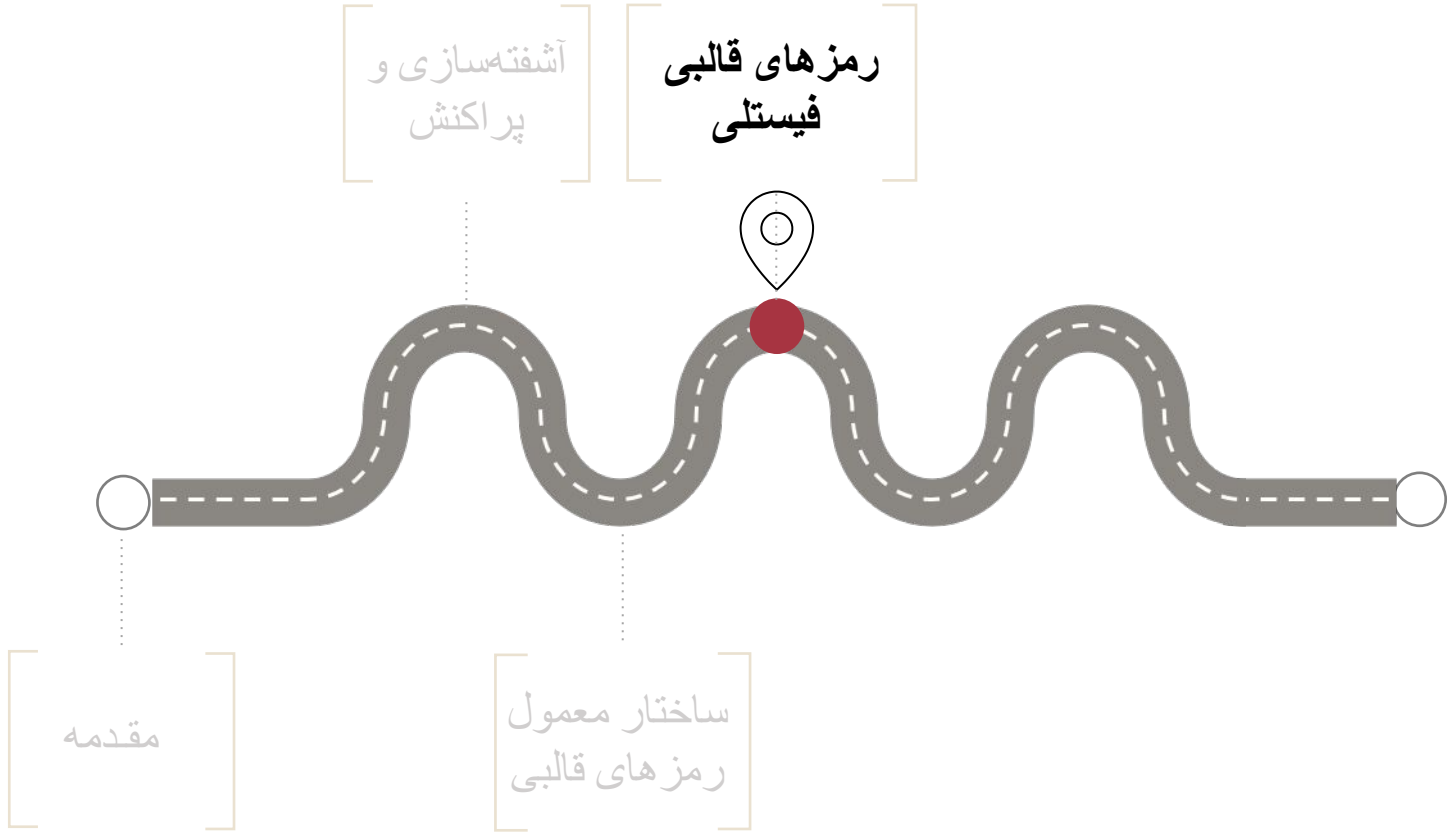
رمزهای قالبی تکرارپذیر



- از روی کلید اصلی (K) توسط طرح تولید زیرکلیدها (Key Schedule)، بر هر دور یک زیرکلید (Subkey) ساخته می‌شود.
- در دور rام، مقدار b بیتی ورودی (X_r) با استفاده از تابع دور و زیرکلید دور به یک مقدار b بیتی (X_{r+1}) تبدیل می‌شود.
- بعضا در برخی از رمزهای قالبی در ابتدا و (یا) انتهای الگوریتم نیز یک کلید اضافه می‌شود که به کلید سفیدسازی (Whitening Key) معروف است.

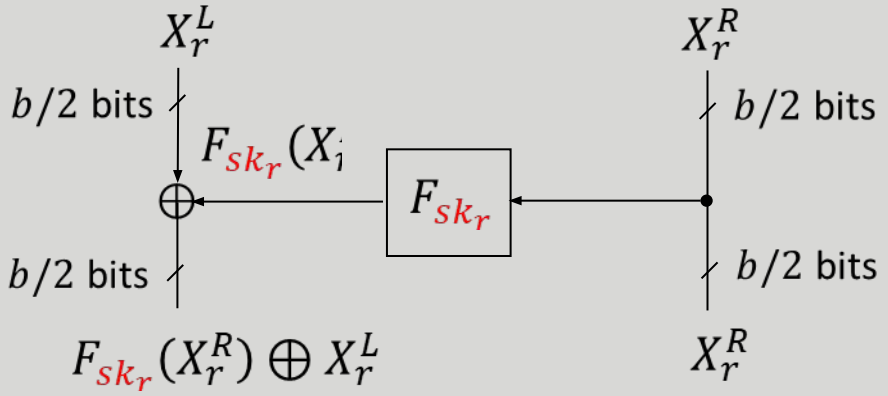
دسته‌بندی فیستلی و جانشینی-جایگشتی

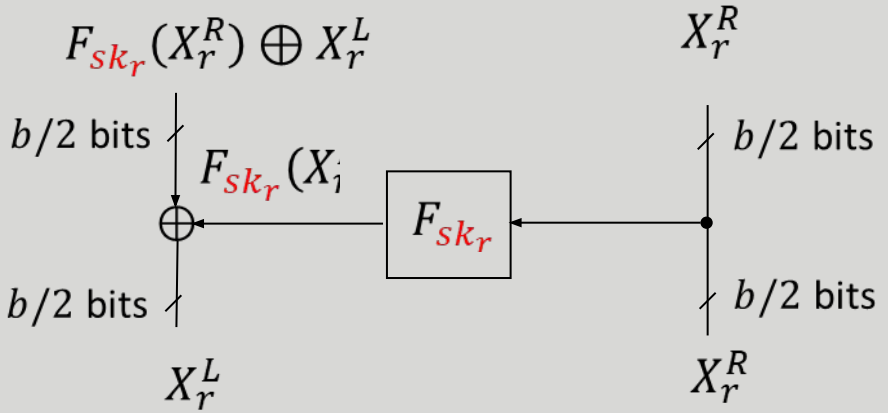
- ساختار تابع دور در بسیار از رمزهای قالبی به صورت شبکه‌ی فیستلی و یا شبکه‌ی جانشینی-جایگشتی (SPN) است.
- هر یک از این دو ساختار ویژگی‌ها و کاربردهای مخصوص به خود را دارند.
- به عنوان مثال اولین رمز قالبی استاندارد ارائه شده (DES) از ساختار فیستل استفاده می‌کرد.
- و یا رمز قالبی شناخته شده‌ای مانند AES که از ساختار جانشینی-جایگشتی استفاده می‌کند.
- در بخش‌های پیش رو به معرفی بیشتر این دو ساختار می‌پردازیم.


رمزهای قالبی فیستلی
آشفته‌سازی و پراکنش
مقدمه
ساختار معمول رمزهای قالبی

ساختار فیستل

(Feistel)





- ساختار فیستل اولین بار توسط یکی از محققین IBM به نام Horst Feistel ارائه شد.

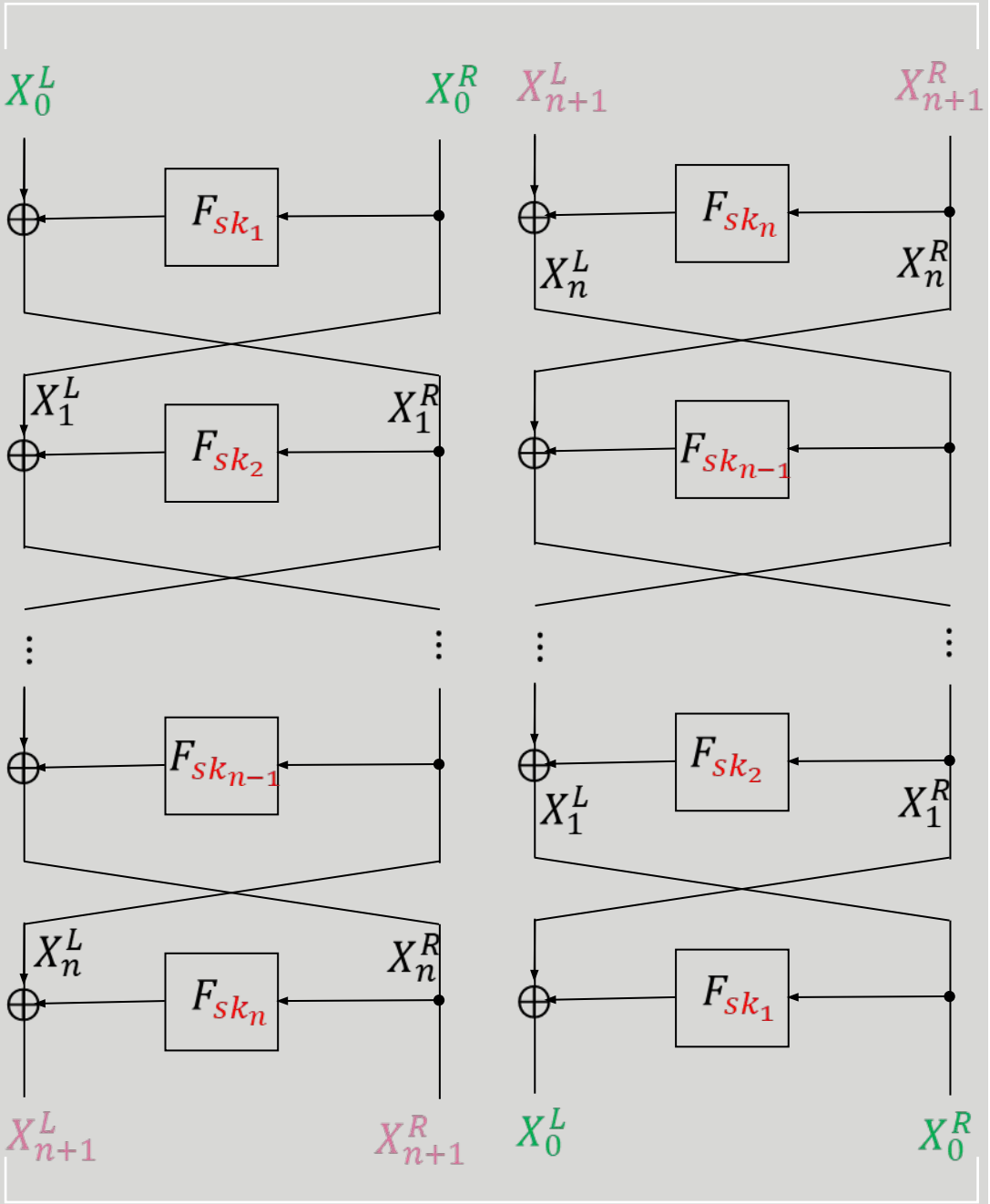
1. حالت (State) ورودی دور (X_r) به دو بخش مساوی X_r^R و X_r^L تقسیم می‌شود.
2. نیمی از آن (X_r^R) از تابع دور (F) عبور کرده و با نیمه‌ی دیگر xor می‌شود.
3. X_r^R بدون تغییر به خروجی منتقل می‌شود.

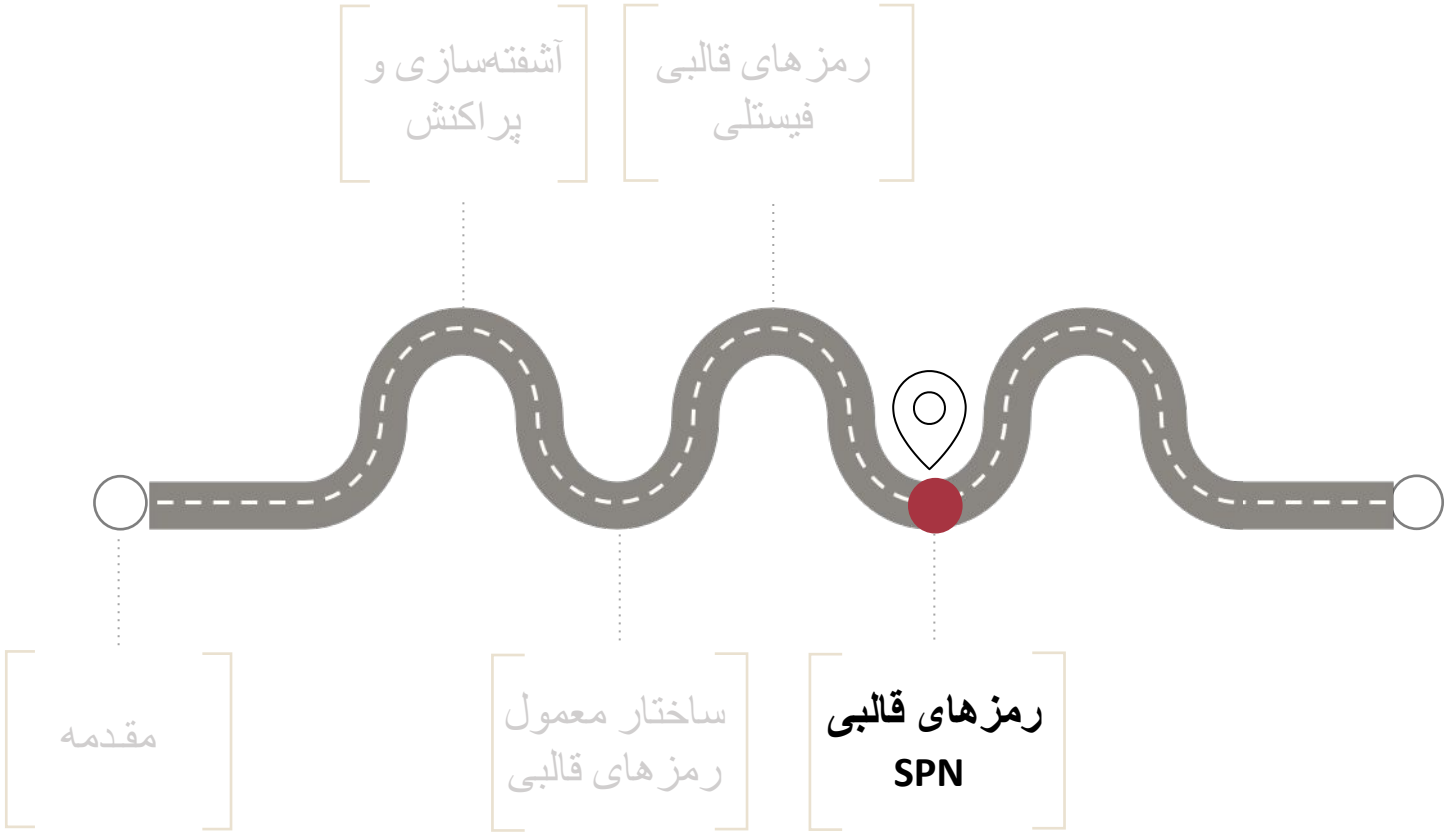
- یک دور فیستلی خود وارون است.
- مستقل از تابع F (حتی اگر یک‌به‌یک نباشد)، عملیات دور یک‌به‌یک است.

ساختار فیستل

... ادامه

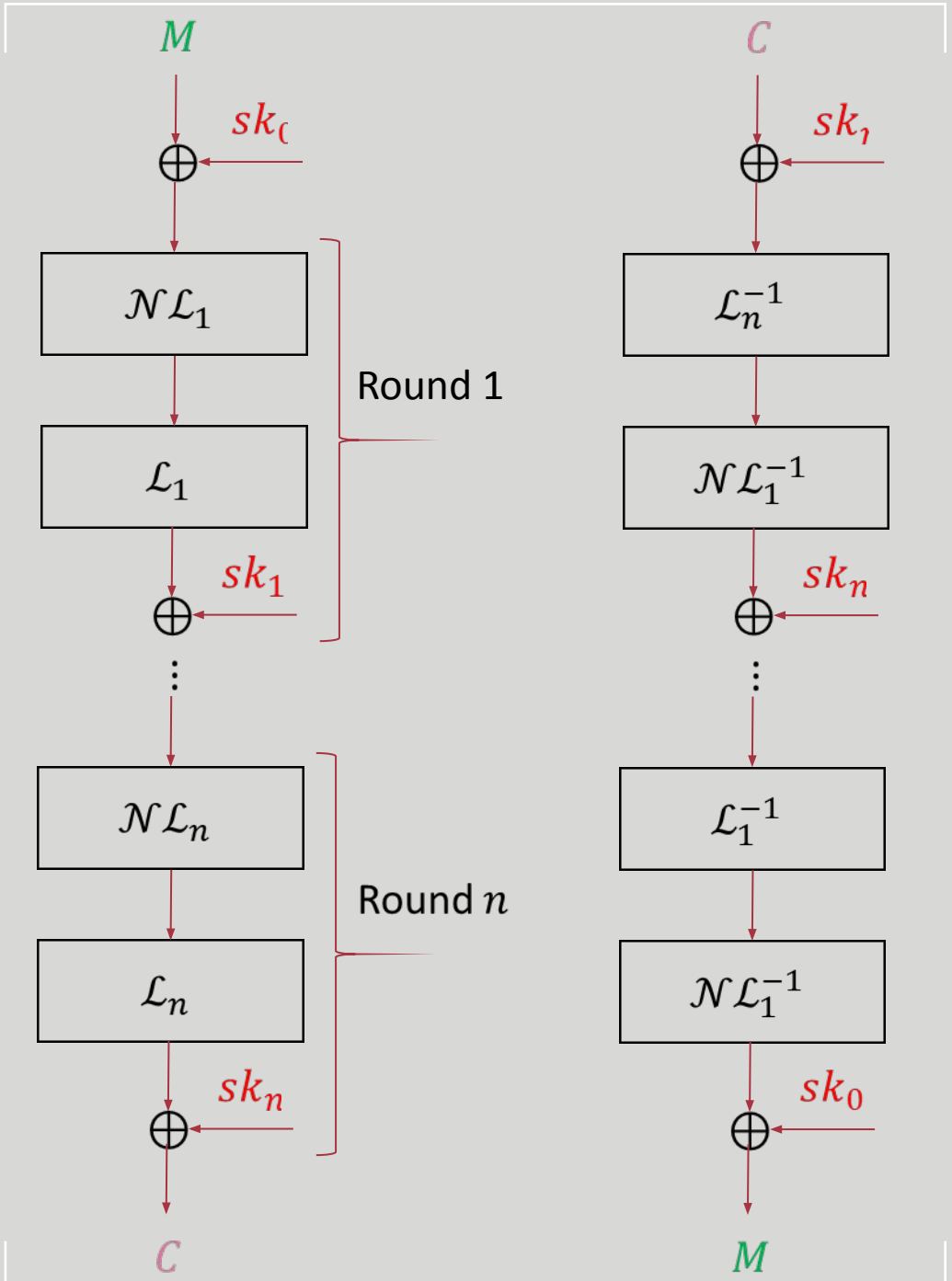
- با استفاده از ساختار فیستلی، می‌توان الگوریتم‌های رمز قالبی با تعداد دورهای بیشتری طراحی کرد.
- به جز دور آخر، هر دور یک عمل جابه‌جایی (Swapping) است، که جای بخش‌های چپ و راست حالت را عوض می‌کند.
- در چنین ساختاری رمزگشایی با استفاده از همان الگوریتم رمزگذاری و صرفا با تغییر ترتیب زیرکلیدها انجام می‌شود.



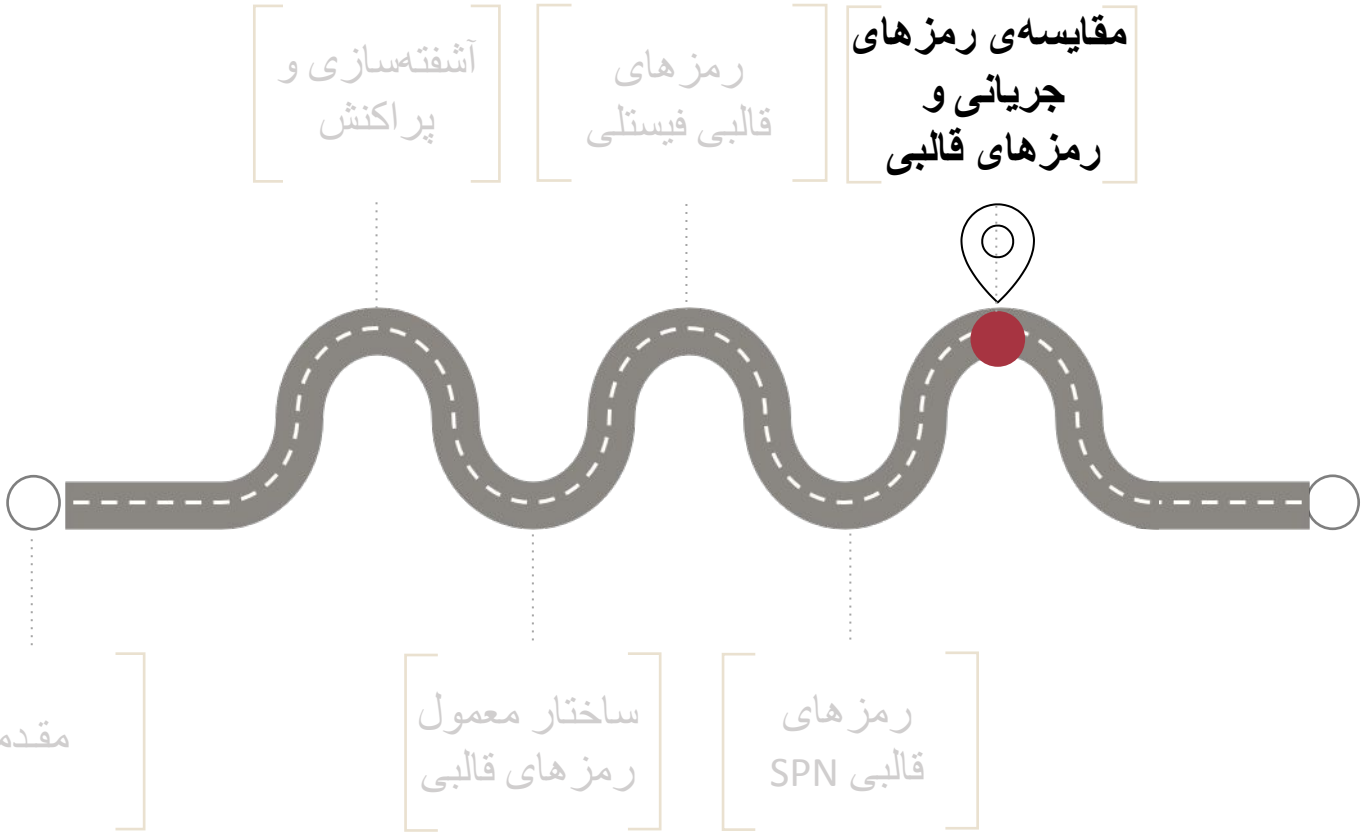

آشفته‌سازی و
پراکنش
رمزهای قالبی
فیستلی
مقدمه
ساختار معمول
رمزهای قالبی
رمزهای قالبی
SPN

شبکه‌ی جانشانی ـ جایگشتی

(Substitution-Permutation Network)



- کلید سفیدسازی در ابتدای الگوریتم به متن اصلی اضافه می‌شود.
- هر دور شامل سه بخش است:
  - لایه‌ی غیرخطی ($\mathcal{NL}$) که معمولاً از توابع غیرخطی کوچک به نام جعبه‌های جانشانی (Sbox) تشکیل می‌شوند.
  - لایه‌ی خطی ($\mathcal{L}$) که می‌تواند شامل چند تابع مختلف خطی باشد.
  - زیرکلید با استفاده از عملگر Xor در انتهای هر دور اضافه می‌شود.
- توابع به کار رفته در دور باید یک‌به‌یک باشند تا عملیات رمزگشایی نیز امکان‌پذیر باشد.
- معمولا لایه‌های خطی و غیرخطی به‌کاررفته در دورهای مختلف به صورت یکسان یا بسیار شبیه به هم انتخاب می‌شوند.


مقایسه‌ی رمزهای جریانی و رمزهای قالبی
آشفته‌سازی و پراکنش
رمزهای قالبی فیستلی
مقدمه
ساختار معمول رمزهای قالبی
رمزهای قالبی SPN

مقایسه‌ی رمزهای جریانی و رمزهای قالبی

مزیت‌های رمزهای قالبی در مقایسه با رمزهای جریانی

- با به‌کارگیری رمزهای قالبی به عنوان یک اولیه‌ی رمزنگاری، می‌توان سایر اولیه‌های رمزنگاری (مانند MAC، رمز جریانی و ...) را نیز ساخت.
- امنیت رمزهای قالبی بهتر از رمزهای جریانی توسط جامعه‌ی رمزنگاری فهمیده می‌شود و بنابراین بیشتر مورد اعتماد هستند.

مزیت‌های رمزهای جریانی در مقایسه رمزهای قالبی

- رمزهای جریانی در مقایسه با رمزهای قالبی عموما به مساحت پیاده‌سازی کمتری نیاز داشته و می‌توانند به سرعت (بسیار) بالاتری دست یابند.
- از آنجایی‌که طول متن اصلی در رمزهای جریانی متغیر است، استفاده از آن‌ها در پروتکل‌های امنیتی راحت‌تر است.

مقایسه‌ی رمزهای جریانی و رمزهای قالبی

کاربردها

- در تعداد قابل توجهی از کاربردهای مهم، رمزهای قالبی به مرور زمان جایگزین رمزهای جریانی شده‌اند.
- در حالی‌که نسل دوم تلفن همراه از رمز جریانی A5/1 استفاده می‌کرد، نسل سوم از رمز قالبی Kasumi استفاده می‌کند.
- در حالی‌که استاندارد قبلی شبکه‌های بی‌سیم (802.11.a) WiFi از رمز جریانی RC4 استفاده می‌کرد، استاندارد جدید (802.11i) از رمز قالبی AES استفاده می‌کند.
- دو دلیل عمده برای توجه بیشتر به رمزهای قالبی:

1. چالش‌های امنیتی رمزهای جریانی
2. کم‌رنگ شدن مزایای رمزهای جریانی در برخی کاربردهای عملی

مقایسه‌ی رمزهای جریانی و رمزهای قالبی

پروژه‌ی NESSIE

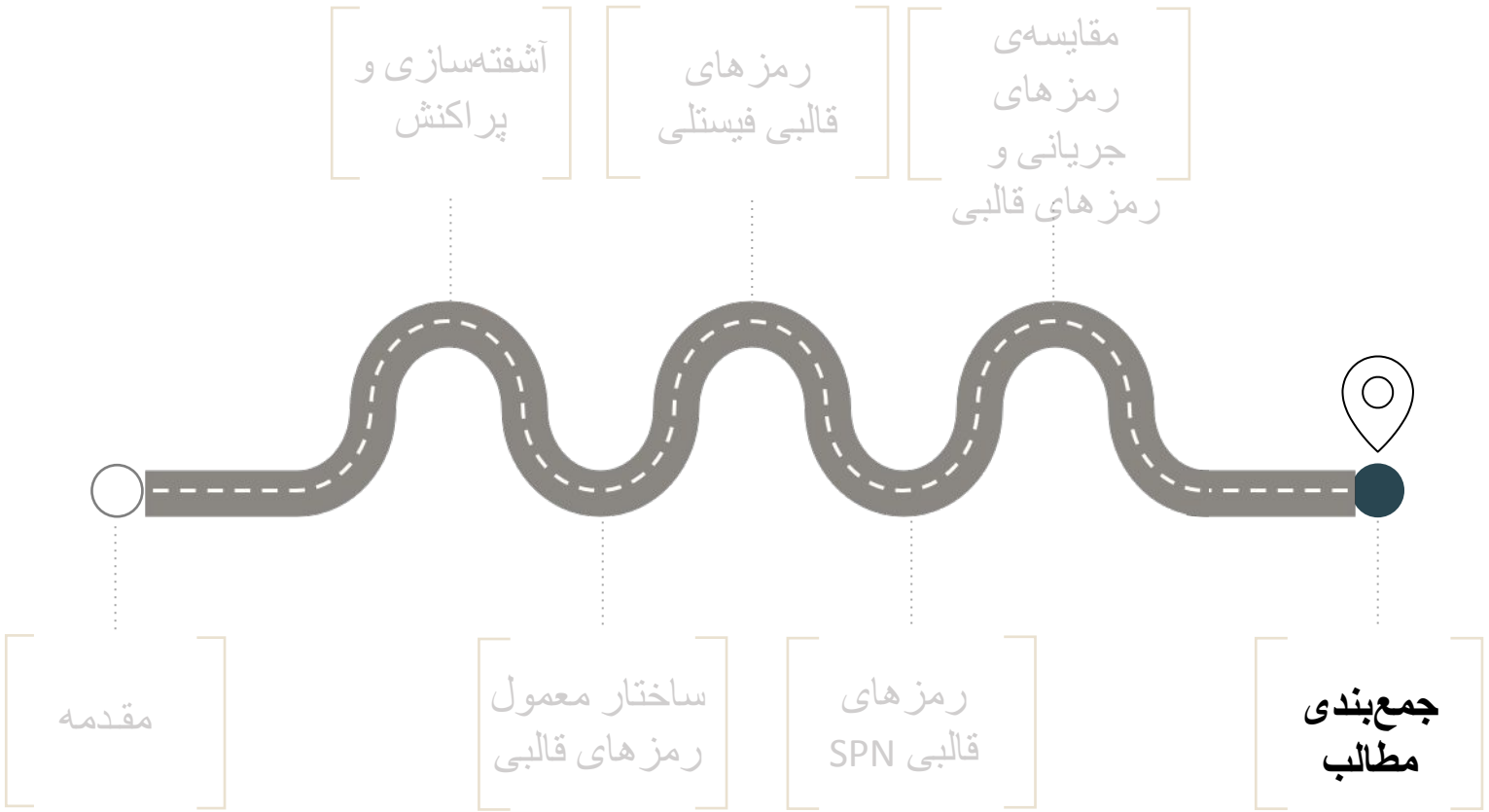
- (با الهام از پروژه‌ی AES) پروژه‌ی NESSIE از سال 1999 تا 2003 توسط اتحادیه‌ی اروپا برگزار شد.
- هدف از این پروژه، طراحی اولیه‌های امن و کارای رمزنگاری بود.
- در پایان پروژه، هیچ‌کدام از کاندیداهای رمز جریانی به علت نداشتن امنیت کافی، انتخاب نشدند!

کم‌رنگ شدن مزایای رمزهای جریانی

- پیشرفت‌های سریع در پیاده‌سازی مدارهای مجتمع سبب شده است که پیاده‌سازی‌های بزرگ‌تر به‌راحتی امکان‌پذیر شده و مساحت پیاده‌سازی تاثیر کم‌تری بر روی قیمت داشته باشد.
- رمزهای قالبی مدرن (نظیر AES) سرعت کافی برای بیشتر کاربردهای مهم را دارند و در عمل به سرعت‌های خیلی بالاتر از آن نیاز چندانی وجود ندارد.
- بنابراین در شرایطی که طراحی رمزهای قالبی راحت‌تر و امنیت آن‌ها قابل فهم‌تر است، تمایل به استفاده از رمزهای جریانی کم‌تر می‌شود.

مسابقه eSTREAM

- البته مطالب گفته شده به معنای حذف کامل رمزهای جریانی نیست!
- در نوامبر ۲۰۰۴ توسط یک پروژه‌ی از اتحادیه اروپا (ECRYPT) فراخوانی به منظور طراحی رمزهای جریانی اعلام شد.
- هدف انتخاب رمزهای جریانی در قالب مسابقه‌ای به نام eSTREAM بود.
- مسابقه در آپریل ۲۰۰۸ به اتمام رسید.
- ۴ الگوریتم با نام‌های HC-128, Rabbit, Salsa20/12 و SOSEMANUK برای کاربردهای نرم‌افزاری با سرعت بسیار بالا انتخاب شدند.
- ۳ الگوریتم با نام‌های Grain, MICKEY و Trivium برای پیاده‌سازی سخت‌افزاری با محدودیت زیاد انتخاب شدند.
- برخی از این الگوریتم‌ها نظیر Grain در صنعت مورد استفاده قرار گرفته است.


مقایسه‌ی رمزهای جریانی و رمزهای قالبی
رمزهای قالبی فیستلی
آشفته‌سازی و پراکنش
جمع‌بندی مطالب
رمزهای قالبی SPN
ساختار معمول رمزهای قالبی
مقدمه

جمع‌بندی مطالب

- امروزه مزایای رمزهای جریانی نسبت به رمزهای قالبی با توجه به نیازهایی که در کاربردهای عملی وجود دارند، کم‌رنگ‌تر شده‌اند.
- رمزهای قالبی استاندارد (به خصوص AES) در طیف وسیعی از کاربردها استفاده می‌شوند.
- رمزهای جریانی نیز در برخی از کاربردهای خاص استفاده می‌شوند.
  - به عنوان مثال، رمز جریانی ZUC که در استاندارد شبکه‌های موبایل LTE استفاده می‌شود.