

## جواب سوال ۱

### پاسخ بخش آ:

آ. مراحل تبادل کلید بین آزاده و بهرام در پروتکل X3DH :

در پروتکل DH<sup>۳</sup>X که بخشی از پروتکل Signal است، تبادل کلید به صورت زیر انجام می‌شود:

کلیدهای بلندمدت:

- آزاده (A) : دارای یک جفت کلید بلندمدت (IKA و SKA) است که کلید عمومی IKA و کلید خصوصی SKA هستند.
- بهرام (B) : نیز دارای جفت کلید بلندمدت (IKB و SKB) می‌باشد.

کلیدهای پیش‌نویس (Prekeys) :

- بهرام (B) : علاوه بر کلیدهای بلندمدت، یک کلید Signed PreKey (SPKB) دارد که با کلید بلندمدت خود امضا شده است. همچنین مجموعه‌ای از کلیدهای یکبار مصرف (OPKB) را در سرور منتشر می‌کند.

فرآیند تبادل کلید:

آزاده (A) :

- الف) ابتدا اطلاعات کلیدهای عمومی بهرام (OPKB، IKB و SPKB) را از سرور دریافت می‌کند.
- ب) یک کلید موقت (EKA) تولید می‌کند.

ج) محاسبات دیفرانسیل (Differential Computations) را با استفاده از کلیدهای دریافتی انجام می‌دهد:

$$DH1 = DH(IKA, SPKB)$$

$$DH2 = DH(EKA, IKB)$$

$$DH3 = DH(EKA, SPKB)$$

$$DH4 = DH(EKA, OPKB)$$

- د) از یک تابع مشتق کلید (KDF) برای ترکیب نتایج دیفرانسیل (SK) استفاده می‌کند:

$$SK = KDF(DH1 || DH2 || DH3 || DH4)$$

ه) پیام اولیه شامل IKA، EKA و شناسه‌های OPKB مورد استفاده را به بهرام ارسال می‌کند.

## بهرام (B) :

- الف) پیام اولیه از آزاده را دریافت می‌کند.
- ب) با استفاده از اطلاعات دریافتی و کلیدهای خود، همان محاسبات دیفی-هلمن را انجام داده و کلید مشترک SK را محاسبه می‌کند.

## نتیجه:

هر دو طرف، آزاده و بهرام، به یک کلید مشترک SK دست می‌یابند که برای رمزگاری ارتباطات بعدی استفاده می‌شود.

## پاسخ بخش ب:

### ب. اجزای قابل تعویض و اجزای ثابت در پروتکل X3DH :

در پروتکل X3DH ، برخی اجزا به طور منظم تعویض می‌شوند تا امنیت سیستم افزایش یابد، در حالی که برخی اجزا باید ثابت باقی بمانند تا هویت کاربران حفظ شود.

#### اجزای قابل تعویض:

- کلیدهای **PreKey** یکبار مصرف (OPKB) : این کلیدها تنها برای یک نشست خاص استفاده می‌شوند و پس از استفاده حذف می‌گردند. تعویض مکرر OPKB ها از بازپخش و استفاده مجدد توسط مهاجم جلوگیری می‌کند.
- کلید **PreKey Signed** (SPKB) : این کلید به طور دوره‌ای (مثالاً هر چند هفته یک بار) تعویض می‌شود تا از خطر فاش شدن یا سوء استفاده از کلیدهای قدیمی جلوگیری شود و امنیت ارتباطات آینده تضمین شود.

#### اجزای ثابت:

- کلیدهای هویت بلندمدت (IKA و IKB) : این کلیدها باید ثابت باقی بمانند تا کاربران بتوانند هویت یکدیگر را به طور معتبر اثبات کنند. تغییر این کلیدها می‌تواند فرآیند احراز هویت را مختل کند و اعتماد کاربران را تحت تاثیر قرار دهد.

#### چرا برخی اجزا باید ثابت باشند؟

- حفظ هویت کاربران: کلیدهای هویت بلندمدت برای تأیید هویت کاربران ضروری هستند. اگر این کلیدها تغییر کنند، دیگر امکان تأیید هویت کاربر به درستی وجود نخواهد داشت.
- یکپارچگی امنیت: تعویض دوره‌ای OPKB و SPKB باعث می‌شود که حتی اگر یک کلید به خطر بیفت، تنها ارتباطات آینده تحت تاثیر قرار گیرند و ارتباطات گذشته همچنان امن باقی بمانند.

## پاسخ بخش ج:

ج. اجزایی که اصالت دوچاره را تضمین می‌کنند و راهکارهای مقابله با حمله شخص میانی:  
تضمین اصالت دوچاره:

- کلیدهای هویت بلندمدت (IKA و IKB) : این کلیدها برای امضای دیجیتال پیام‌ها استفاده می‌شوند. هر کاربر با استفاده از کلید خصوصی خود پیام‌ها را امضا کرده و طرف مقابل با استفاده از کلید عمومی طرف دیگر صحت امضای را بررسی می‌کند.
- کلید SPKB (PreKey Signed) : این کلید با کلید هویت بلندمدت امضا شده است، که اطمینان می‌دهد SPKB از طرف صاحب اصلی آن صادر شده و قابل اعتماد است.

راهکارهای مقابله با حمله شخص میانی (Man-in-the-Middle) :

- بررسی دقیق امضاهای دیجیتال: کاربران باید تمامی امضاهای دیجیتال را به دقت بررسی کنند تا از صحت و اعتبار آن‌ها اطمینان حاصل کنند.
- استفاده از پروتکل‌های امن‌تر مانند TLS : افزودن لایه‌های امنیتی اضافی می‌تواند از نفوذ مهاجم در مسیر ارتباط جلوگیری کند.
- احراز هویت چندعاملی: استفاده از روش‌های احراز هویت اضافی مانند رمزهای یک‌بار مصرف یا گواهی‌های دیجیتال می‌تواند امنیت ارتباط را افزایش دهد و از حملات شخص میانی جلوگیری کند.

اگر سرور معتمد نباشد:

- پروتکل‌های احراز هویت قوی: کاربران می‌توانند از پروتکل‌هایی که نیاز به تأییدیه‌های اضافی دارند استفاده کنند تا از صحت هویت طرف مقابل اطمینان حاصل کنند.
- تبادل کلید به صورت مستقیم: در صورت امکان، تبادل کلید به صورت مستقیم بین کاربران بدون استفاده از سرور می‌تواند از حملات شخص میانی جلوگیری کند.

## پاسخ بخش د:

د. اجزایی که ویژگی‌های Backward Secrecy و Forward Secrecy را تضمین می‌کنند و روش‌های انجام آن‌ها:

Forward Secrecy (محرمانگی پیشرو):

- کلیدهای یک‌بار مصرف (OPKB) : استفاده از OPKB ها که تنها برای یک نشست خاص استفاده می‌شوند، تضمین می‌کند که حتی اگر یک کلید جلسه فعلی فاش شود، ارتباطات قبلی همچنان امن باقی می‌مانند.
- کلید موقت (EKA) : تولید کلید موقت برای هر نشست جدید باعث می‌شود که هر نشست دارای کلید جدید و مستقل باشد، که از دسترسی به ارتباطات گذشته جلوگیری می‌کند.

## Backward Secrecy (محرمانگی پسرو):

- تولید کلیدهای جدید برای هر نشست: با تولید کلیدهای موقت جدید برای هر جلسه و حذف کلیدهای قدیمی پس از استفاده، ارتباطات آینده نیز از دسترسی مهاجمان محافظت می‌شود.
- حذف کلیدهای قدیمی پس از استفاده: با حذف کلیدهای یکبار مصرف پس از استفاده، مهاجم نمی‌تواند از کلیدهای قدیمی برای رمزگشایی ارتباطات جدید استفاده کند.

چگونگی تضمین این ویژگی‌ها:

- ترکیب کلیدهای موقت و یکبار مصرف: پروتکل X3DH همراه با پروتکل Double Ratchet با استفاده از ترکیب کلیدهای موقت و یکبار مصرف، اطمینان می‌دهد که هر نشست جدید دارای کلید جدید و مستقل است.
- حذف کلیدها پس از استفاده: با حذف کلیدهای یکبار مصرف و کلیدهای موقت پس از استفاده، پروتکل از ایجاد نقاط ضعف برای مهاجمان جلوگیری می‌کند و امنیت ارتباطات را تضمین می‌نماید.

## پاسخ بخش ۵:

### ۵. مدیریت پیام‌های از دست رفته در پروتکل X3DH و Double Ratchet :

در شرایطی که برخی پیام‌ها به مقصد نرسند، پروتکل‌های X3DH و Double Ratchet از روش‌های مختلفی برای مدیریت این وضعیت استفاده می‌کنند تا امنیت و تداوم ارتباطات حفظ شود:

استفاده از کلیدهای یکبار مصرف جدید (OPKB) :

در صورت از دست رفتن پیام‌ها، کاربران می‌توانند از OPKB های جدید برای ادامه ارتباطات استفاده کنند. این امر تضمین می‌کند که پیام‌های بعدی امن باقی می‌مانند و پیام‌های از دست رفته تاثیری بر امنیت ارتباط ندارند.

پروتکل Double Ratchet :

این پروتکل با استفاده از فرآیندی دو مرحله‌ای برای تبادل کلید، اطمینان می‌دهد که حتی اگر برخی پیام‌ها از دست بروند، پیام‌های بعدی بدون مشکل ارسال و دریافت می‌شوند. همچنین، مکانیزم‌های همگام‌سازی و حفاظت در برابر ارسال مجدد پیام‌ها (Replay Protection) به حفظ امنیت ارتباطات کمک می‌کنند.

: (Out-of-Order Messages) پیام‌های ناهمگام

سیستم قادر است پیام‌های ناهمگام را شناسایی کرده و آن‌ها را به ترتیب صحیح مرتب‌سازی کند تا ارتباط به درستی ادامه یابد.

بازسازی ارتباط:

در صورت از دست رفتن پیام‌های کلیدی یا پیام‌های اصلی، کاربران می‌توانند مجدداً کلیدهای جدید تولید کرده و ارتباط را بازسازی کنند تا از ادامه امنیت ارتباط اطمینان حاصل شود.

نتیجه‌گیری:

پروتکل‌های X3DH و Double Ratchet با استفاده از کلیدهای یکبار مصرف و مکانیزم‌های همگام‌سازی، توانایی مدیریت پیام‌های از دست رفته را دارند و از تداوم امنیت و محروم‌انگی ارتباطات اطمینان می‌دهند.

## پاسخ بخش و:

### و. اهمیت OPKB و نقش SPKB در امنیت پروتکل:

اهمیت (One-Time PreKey) OPKB:

- افزایش امنیت: OPKB‌ها تنها برای یک نشست خاص استفاده می‌شوند و پس از استفاده حذف می‌گردند، که این امر از استفاده مجدد و بازپخش آن‌ها توسط مهاجم جلوگیری می‌کند.
- مقاومت در برابر حملات Replay: با استفاده از OPKB‌های یکبار مصرف، ارسال مجدد پیام‌ها یا استفاده از کلیدهای قدیمی برای نفوذ به ارتباطات جدید غیرممکن می‌شود.

نقش SPKB در امنیت پروتکل (Signed PreKey):

- احراز هویت: SPKB‌ها با استفاده از کلید هویت بلندمدت امضا شده‌اند، که این امر اطمینان می‌دهد SPKB‌ها از طرف صاحب اصلی خود صادر شده و قابل اعتماد هستند.
- پشتیبانی از Forward Secrecy: SPKB‌ها به طور دوره‌ای تعویض می‌شوند و همراه با آنها، ویژگی‌های Forward Secrecy را تضمین می‌کنند، زیرا کلیدهای جدید امنیت ارتباطات جدید را حفظ می‌کنند حتی اگر کلیدهای قبلی فاش شوند.

اهمیت تأمین OPKB و نقش SPKB در امنیت مکالمه:

- تأمین OPKB: تأمین کافی از OPKB‌ها اطمینان می‌دهد که همیشه یک کلید یکبار مصرف برای برقراری ارتباط جدید در دسترس باشد. کمبود OPKB‌ها ممکن است منجر به استفاده مجدد از OPKB‌های قبلی شود که امنیت ارتباطات را کاهش می‌دهد.
- نقش SPKB: SPKB‌ها به عنوان کلیدهای امضا شده توسط کلید هویت بلندمدت، نقش مهمی در احراز هویت و تضمین اصالت ارتباطات دارند. این کلیدها مانع از ایجاد SPKB‌های جعلی توسط مهاجم می‌شوند و امنیت ارتباطات را حفظ می‌کنند.

تأثیر کمبود OPKB و SPKB بر امنیت مکالمه:

- کمبود OPKB: ممکن است کاربران مجبور به استفاده مجدد از OPKB‌های قبلی شوند که این امر می‌تواند امنیت ارتباطات را تهدید کند، زیرا کلیدهای تکراری ممکن است توسط مهاجم شناسایی و مورد سوء استفاده قرار گیرند.
- کمبود SPKB: نبود SPKB‌های جدید می‌تواند احراز هویت کاربران را مختل کند و مهاجم ممکن است بتواند حملات جعل هویت را انجام دهد. همچنین، نبود SPKB‌های جدید ویژگی‌های Forward Secrecy را تحت تاثیر قرار می‌دهد و امنیت ارتباطات جدید را کاهش می‌دهد.

## پاسخ بخش ز:

ز. نیاز آزاده به انتظار آنلاین شدن بهرام برای تبادل کلید در صورت آفلاین بودن بهرام:

خیر، آزاده نیازی ندارد که منتظر آنلاین شدن بهرام بماند تا تبادل کلید انجام شود. دلیل این امر استفاده از کلیدهای پیش تعیین شده و ذخیره شده توسط بهرام در سرور است.

توضیح:

- کلیدهای PreKey از قبل آپلود شده: بهرام قبل مجموعه‌ای از کلیدهای یکبار مصرف (OPKB) و کلیدهای (SPKB) Signed PreKey را به سرور آپلود کرده است.
- دریافت کلیدها توسط آزاده: هنگامی که آزاده قصد ارسال پیام به بهرام را دارد، می‌تواند این کلیدهای یکبار مصرف را از سرور دریافت کند بدون نیاز به آنلاین بودن بهرام.
- ارسال پیام اولیه: آزاده با استفاده از این کلیدهای دریافت شده، پیام اولیه خود را به بهرام ارسال می‌کند. وقتی بهرام آنلاین می‌شود، پیام اولیه را دریافت و پردازش می‌کند و ارتباط رمزگذاری شده را برقرار می‌کند.

مزایا:

- ایجاد ارتباط حتی در شرایط آفلاین: این روش امکان ارسال پیام‌ها به کاربران آفلاین را فراهم می‌کند بدون اینکه ارسال‌کننده نیاز به انتظار داشته باشد.
- افزایش انعطاف‌پذیری و کارایی: کاربران می‌توانند در هر زمانی با ارسال پیام‌های امن ارتباط برقرار کنند بدون نیاز به هماهنگی زمان‌های آنلاین.

## پاسخ بخش ح:

ح. انکارپذیری در پروتکل سیگنال و تأثیر آن بر اصالت پیام‌ها:

تعريف انکارپذیری:

انکارپذیری به معنای این است که فرستنده پیام نمی‌تواند سپس ادعای نکند که آن پیام را ارسال کرده است. در پروتکل سیگنال، این ویژگی به گونه‌ای پیاده‌سازی شده که فرستنده نمی‌تواند بعداً از ارسال پیام انکار کند.

تضاد انکارپذیری با اطمینان از اصالت پیام‌ها:

- اصالت پیام‌ها: اصالت پیام‌ها تضمین می‌کند که پیام از طرف فرستنده واقعی ارسال شده است.
- انکارپذیری: در حالی که اصالت پیام‌ها را تضمین می‌کند، انکارپذیری باعث می‌شود که فرستنده نمی‌تواند پس از ارسال پیام آن را انکار کند.

## جزئیات بیشتر:

**انکارپذیری توسط هر دو طرف:** در پروتکل سیگنال، هر دو طرف مکالمه می‌توانند پیام‌ها را انکار کنند زیرا پیام‌ها با استفاده از کلیدهای موقت امضا می‌شوند که تنها طرف مقابل قادر به تأیید آن‌هاست. این امر باعث می‌شود که هیچ‌کدام از طرفین نتوانند بعداً ادعا کنند که پیام خاصی را ارسال نکرده‌اند.

**ساخت مکالمات جعلی توسط اشخاص ثالث:** فرد ثالثی مانند سودابه می‌تواند بدون داشتن هیچ پیام واقعی بین آزاده و بهرام، مجموعه‌ای از پیام‌های جعلی را ایجاد کند که به نظر می‌رسد از طرف یکی از کاربران ارسال شده‌اند. از آنجا که پیام‌های جعلی نیز با استفاده از کلیدهای یک‌بار مصرف و موقت ایجاد می‌شوند، کاربران نمی‌توانند به سادگی تشخیص دهند که این پیام‌ها واقعی هستند یا جعلی.

## کاربردهای انکارپذیری در دنیای واقعی:

- **حفظ حریم خصوصی:** انکارپذیری به کاربران اجازه می‌دهد که پس از ارسال پیام‌ها، دیگر نتوانند آن‌ها را به‌طور قانونی برای اثبات ارسالشان مورد استفاده قرار دهند، که این امر حریم خصوصی را تقویت می‌کند.
- **پیشگیری از استفاده نادرست:** در مواردی که افراد ممکن است تحت فشار قانونی قرار گیرند تا پیام‌های خاصی را ارسال کنند، انکارپذیری به آن‌ها امکان می‌دهد که از الزام به ارسال پیام‌های ناخواسته جلوگیری کنند.
- **تسهیل ارتباطات آزاد و امن:** کاربران می‌توانند با اطمینان بیشتر و بدون نگرانی از ثبت دائمی پیام‌ها، ارتباطات خود را برقار کنند.

## نتیجه‌گیری:

اگرچه انکارپذیری ممکن است در برخی موارد تضاد با تأیید اصالت پیام‌ها داشته باشد، اما در پروتکل سیگنال این دو ویژگی به گونه‌ای پیاده‌سازی شده‌اند که همزمان حفظ حریم خصوصی کاربران و امنیت ارتباطات امکان‌پذیر باشد. انکارپذیری در دنیای واقعی به کاربران کمک می‌کند تا ارتباطات خود را بدون ترس از سوء استفاده‌های قانونی یا ثبت دائمی پیام‌ها حفظ کنند.

در نتیجه پروتکل Double Ratchet در پروتکل سیگنال با استفاده از ترکیب کلیدهای بلندمدت، موقت و یک‌بار مصرف، امنیت ارتباطات را از طریق ویژگی‌هایی مانند Backward Secrecy و Forward Secrecy تضمین می‌کنند. همچنین، با مدیریت دقیق تبادل کلید و جلوگیری از حملات شخص میانی، اصالت و امنیت ارتباطات حفظ می‌شود. اهمیت OPKB و SPKB در افزایش امنیت و جلوگیری از حملات Replay و جعل هویت نقش کلیدی دارد. علاوه بر این، ویژگی انکارپذیری در پروتکل سیگنال با حفظ حریم خصوصی و جلوگیری از سوء استفاده‌های قانونی، به کاربران امکان می‌دهد تا ارتباطات خود را به صورت امن و مطمئن برقار کنند.

## جواب سوال ۲

### بخش اول

وقتی یک پیام  $m$  ابتدا توسط الگوریتم فشرده‌سازی  $C(m)$  فشرده می‌شود و سپس با استفاده از رمزنگاری بلوکی با اندازه بلوک ۸ بیت پد شده و رمزگذاری می‌گردد، طول نهایی پیام رمزگذاری شده مستقیماً به طول پیام فشرده شده  $C(m)$  بستگی دارد. مهاجم که تنها تعداد بلوک‌های ارسال شده را مشاهده می‌کند، می‌تواند اطلاعاتی درباره طول  $C(m)$  به دست آورد. از آنجایی که طول  $C(m)$  نشان‌دهنده تعداد و طول رشته‌های ۱ متواتی در پیام اصلی  $m$  است، مهاجم می‌تواند استنتاج‌هایی درباره الگوی تکراری در  $m$  انجام دهد.

با یک مثال درباره این مورد بیشتر توضیح می‌دهم. مثال:

پیام  $m_1$ : ۱۱۱۱۱۱۱۱۱۰۱۱۱۱۱۰۱۰۱۱۱

$C(m_1) = ۱۰۱۰۰۱۰۱۰۰۰۱۰۰۱۱$

طول ۱۶ =  $C(m_1)$  بیت → ۲ بلوک ۸ بیتی

پیام  $m_2$ : ۱۱۱۱۱۰۱۱۱۱۱۰۱۱۱۱۱۰۱۰۱۱۱

$C(m_2)$  ممکن است طول بیشتری داشته باشد (فرضًا ۲۴ بیت) → ۳ بلوک ۸ بیتی

در این حالت، اگر مهاجم مشاهده کند که دو بلوک ارسال شده‌اند، احتمال می‌دهد پیام  $m_1$  با الگوی تکراری مناسب فشرده شده است. اگر سه بلوک ارسال شود، ممکن است پیام  $m_2$  با الگوی کمتر تکراری فشرده شده باشد.

مهاجم می‌تواند از تفاوت‌های فشرده‌سازی بین دو پیام با طول اصلی برابر استفاده کند تا تشخیص دهد کدام پیام رمزگذاری شده است. اگر دو پیام  $m_1$  و  $m_2$  دارای طول اصلی یکسان باشند اما الگوهای متفاوتی از رشته‌های ۱ متواتی داشته باشند، فشرده‌سازی آن‌ها نیز متفاوت خواهد بود. پیام با الگوی فشرده‌تر (بیشتر رشته‌های تکراری و طولانی‌تر ای) منجر به  $C(m)$  کوتاه‌تر و در نتیجه تعداد بلوک‌های کمتر خواهد شد.

با یک مثال درباره این مورد بیشتر توضیح می‌دهم. مثال:

پیام  $m_1$ : ۱۱۱۱۱۱۱۱۱۱۰۱۱۱۱۱۰۱۰۱۱۱

$C(m_1) = ۱۰۱۰۰۱۰۱۰۰۰۱۰۰۱۱$

تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده: ۲ بلوک

پیام  $m_2$ : ۱۱۱۱۱۰۱۱۱۱۱۰۱۱۱۱۱۰۱۰۱۱۱۱

$C(m_2) = ۱۰۱۰۱۰۱۰۱۰۱۰۱۰۱$

تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده: ۳ بلوک

در این حالت، اگر مهاجم مشاهده کند که تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده ۲ بلوک است، نتیجه می‌گیرد که پیام  $m_1$  رمزگذاری شده است. اگر ۳ بلوک مشاهده کند، نتیجه می‌گیرد که پیام  $m_2$  رمزگذاری شده است.

این روش به مهاجم اجازه می‌دهد تا با تحلیل طول پیام‌های رمزگذاری شده و مقایسه آن‌ها با الگوهای مختلف فشرده‌سازی، اطلاعاتی درباره محتوای پیام اصلی بدست آورد. این نوع حمله نشان‌دهنده آسیب‌پذیری‌های احتمالی در ترکیب فشرده‌سازی و رمزنگاری است که پس از حملات CRIME در پروتکل‌های جدید مانند TLS 1.3 حذف شده‌اند تا از چنین تهدیداتی جلوگیری شود.

## بخش دوم

در این بخش، مهاجم توانایی افزودن بیت‌های دلخواه به ابتدای پیام‌های اصلی را دارد و با انجام این کار، می‌خواهد تعداد ۱ های رشته اول پیام  $m$  را کشف کند. برای این منظور، مهاجم از ویژگی‌های الگوریتم فشرده‌سازی بی‌اتلاف  $C(m)$  استفاده می‌کند که تعداد ۱ های هر رشته را به صورت یک مقدار ۴ بیتی نمایش می‌دهد و محدودیت‌هایی در تعداد ۱ های متوالی دارد.

### روش حمله

#### افزودن بیت‌های کنترل شده به ابتدای پیام

مهاجم می‌تواند به تعداد دلخواه بیت‌های ۱ یا ۰ را به ابتدای پیام  $m$  اضافه کند. هدف این است که با تنظیم تعداد بیت‌های ۱ اضافه شده، تغییراتی در فشرده‌سازی رخ دهد که به کمک آن بتوان تعداد ۱ های رشته اول  $m$  را تعیین کرد.

#### تعیین نقطه تغییر در فشرده‌سازی

از آنجا که الگوریتم فشرده‌سازی  $C(m)$  فقط تا پانزده ۱ متوالی را به درستی فشرده می‌کند و اگر تعداد ۱ ها بیشتر از ۱۵ شود، فقط پانزده ۱ اول را فشرده می‌کند و بقیه را نادیده می‌گیرد، مهاجم می‌تواند با افزایش تدریجی تعداد ۱ های اضافه شده، نقطه‌ای را پیدا کند که در آن تعداد ۱ های متوالی به ۱۵ برسد.

#### تحلیل تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده

پس از افزودن بیت‌های کنترل شده و فشرده‌سازی پیام، پیام فشرده شده به بلوک‌های ۸ بیتی تقسیم می‌شود و رمزگذاری می‌گردد. تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده به طور مستقیم به طول پیام فشرده شده بستگی دارد. مهاجم با مشاهده تعداد بلوک‌ها می‌تواند تشخیص دهد که آیا تعداد ۱ های متوالی افزوده شده به  $m$  به ۱۵ رسیده یا نه.

#### گام‌های دقیق حمله

ابتدا یک سری فرضیات اولیه داریم.

– فرض کنید پیام اصلی  $m$  با  $k$  عدد ۱ در ابتدای آن شروع می‌شود.

– مهاجم قصد دارد تعداد ۱ های  $k$  را تعیین کند.

افزودن بیت‌های ۱ کنترل شده مهاجم به ترتیب از  $t = 0$  تا  $t = 15$  به ابتدای پیام  $m$  اضافه می‌کند، یعنی پیام‌های زیر را ارسال می‌کند:

$$t = 0 : m -$$

$$t = 1 : 1m -$$

$$t = 2 : 11m -$$

...

$$t = 15 : 11111111111111m -$$

مشاهده تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده برای هر مقدار  $t$ ، مهاجم تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده را مشاهده می‌کند.

## تجزیه و تحلیل تغییرات

- اگر  $15 \leq t + k$  باشد: تعداد ۱ های متوالی در پیام فشرده شده برابر با  $t + k$  است و فشرده‌سازی به طور بهینه انجام می‌شود.

- اگر  $t + k > 15$  باشد: فشرده‌سازی فقط پانزده ۱ اول را در نظر می‌گیرد و بقیه نادیده می‌گیرد، که منجر به افزایش طول پیام فشرده شده و در نتیجه افزایش تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده می‌شود.

### تعیین تعداد ۱ های اولیه (k)

مهاجم به دنبال کمترین مقداری از  $t$  است که در آن  $15 < t + k \leq 16$  می‌شود. این نقطه تغییر نشان‌دهنده آن است که  $t = 16 - k$ . بنابراین، با یافتن مقداری از  $t$  که در آن تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده افزایش می‌یابد، مهاجم می‌تواند مقدار  $k$  را محاسبه کند.

حالا برای مثال بدین شکل داریم:

فرض کنید پیام اصلی  $m$  با  $k = 10$  عدد ۱ شروع می‌شود:

### افزودن ۰ بیت ۱

- پیام تغییر یافته:  $m' = 10$  عدد ۱ متوالی

- تعداد ۱ های فشرده شده: ۱۰

- تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده: به عنوان مثال، ۲ بلوک

### افزودن ۵ بیت ۱

- پیام تغییر یافته:  $m'' = 10 + 5 = 15$  عدد ۱ متوالی

- تعداد ۱ های فشرده شده: ۱۵

- تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده: همچنان ۲ بلوک

### افزودن ۶ بیت ۱

- پیام تغییر یافته:  $m''' = 10 + 6 = 16$  عدد ۱ متوالی

- تعداد ۱ های فشرده شده: فقط ۱۵ عدد ۱ اول

- تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده: افزایش به ۳ بلوک

با مشاهده افزایش تعداد بلوک‌ها زمانی که  $t = 6$  است، مهاجم می‌داند که  $16 - 6 = 10$  از این رو  $t + k = 16$  است.

## نتیجه‌ی بخش دوم

با استفاده از افزودن بیت‌های کنترل شده به ابتدای پیام و تحلیل تغییرات در تعداد بلوک‌های رمزگذاری شده، مهاجم قادر است تعداد ۱ های متوالی در ابتدای پیام اصلی  $m$  را به طور دقیق تعیین کند. این روش نشان‌دهنده آسیب‌پذیری ترکیب فشرده‌سازی و رمزگذاری در پروتکل‌های امنیتی مشابه TLS 1.2 است که منجر به حملاتی مانند CRIME شده است. به همین دلیل، در نسخه‌های جدیدتر مانند TLS 1.3، قابلیت فشرده‌سازی حذف شده تا از چنین حملاتی جلوگیری شود.

## بخش سوم

حمله (side-channel attack) CRIME (Compression Ratio Info-leak Made Easy) یک حمله جانبی (side-channel attack) است که از ویژگی فشرده‌سازی داده‌ها سوء استفاده می‌کند. در این حمله، مهاجم با استفاده از قابلیت فشرده‌سازی و مشاهده تغییرات در طول داده‌های رمزگذاری شده، می‌تواند اطلاعات حساس مانند کوکی‌های کاربر را به دست آورد.

### شرایط لازم برای موفقیت حمله CRIME

#### فعال بودن فشرده‌سازی در ارتباط TLS

پروتکل TLS باید قابلیت فشرده‌سازی داده‌ها را فعال کرده باشد. در نسخه‌های قدیمی‌تر مانند 1.2 TLS این ویژگی وجود دارد، در حالی که در نسخه‌های جدیدتر مانند 1.3 TLS به منظور جلوگیری از حملات مشابه، فشرده‌سازی حذف شده است.

#### توانایی مهاجم در تزریق داده به جریان اطلاعات

مهاجم باید بتواند داده‌هایی را به جریان اطلاعاتی که بین کاربر و سرور رد و بدل می‌شود، اضافه کند. این معمولاً از طریق ضعف‌های موجود در مرورگرها یا کاربردهای مبتنی بر وب انجام می‌گیرد.

#### قابلیت مشاهده طول داده‌های رمزگذاری شده

مهاجم باید بتواند طول داده‌های رمزگذاری شده را قبل و بعد از فشرده‌سازی مشاهده کند. این اطلاعات به او کمک می‌کند تا تغییرات در فشرده‌سازی را تحلیل کند.

### نحوه انجام حمله CRIME

#### تزریق داده‌های کنترل شده

مهاجم داده‌های خاصی را به درخواست‌های HTTP ارسال می‌کند که در کنار کوکی‌های کاربر قرار می‌گیرند. هدف این است که داده‌های تزریق شده با بخش‌های مخفی (مانند کوکی‌ها) تکراری شوند.

#### تحلیل تغییرات در طول فشرده‌سازی

زمانی که داده‌های تزریق شده با کوکی‌ها تکراری باشند، الگوریتم فشرده‌سازی می‌تواند این تکرارها را به طور موثرتری فشرده کند، که منجر به کاهش طول داده‌های رمزگذاری شده می‌شود. مهاجم با مقایسه طول‌های مختلف داده‌های رمزگذاری شده برای حدس‌های مختلف، می‌تواند تشخیص دهد که کدام حدس‌ها صحیح هستند.

#### بازسازی کوکی‌ها به صورت مرحله‌ای

مهاجم به صورت تدریجی و با حدس‌های ترتیبی، بخش‌های مختلف کوکی را بازسازی می‌کند. هر بار که یک حدس صحیح باشد، کاهش قابل توجهی در طول داده‌های فشرده شده مشاهده می‌شود که به مهاجم نشان می‌دهد که آن بخش از کوکی صحیح حدس زده شده است.

حالا در یک مثال این مورد را بررسی می‌کنم.

فرض کنید کوکی کاربر شامل رشته‌ای مخفی مانند session id=ABC123 است:

## تزریق داده‌های کنترل شده توسط مهاجم

مهاجم داده‌هایی مانند A، AB، ABC و ... را به ابتدای درخواست‌های HTTP اضافه می‌کند.

## تحلیل تغییرات طول داده‌های رمزگذاری شده

هر بار که یک بخش از حدس‌های مهاجم با کوکی واقعی مطابقت داشته باشد (مثلاً A با A یا AB با AB)، فشرده‌سازی بهینه‌تر انجام شده و طول داده‌های رمزگذاری شده کاهش می‌یابد.

## بازسازی کامل کوکی

مهاجم با تحلیل این تغییرات طول، به تدریج می‌تواند کل کوکی را بازسازی کند.

حمله CRIME نشان‌دهنده آسیب‌پذیری‌های ترکیب فشرده‌سازی و رمزنگاری در پروتکل‌های امنیتی است. با حذف قابلیت فشرده‌سازی در نسخه‌های جدیدت

### جواب سوال ۳

جواب سوال ۴