# بهبود معیار پوشش کد برای کشف آسیب پذیری در پروتکل‌های شبکه دارای حالت توسط فازینگ ترکیبی

**حمید رضایی رهورد*  محمد مهدی سالخورده حقیقی****

*کارشناس ارشد شبکه، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه سجاد، مشهد

**هیئت علمی، دانشکده مهندسی کامپیوتر و فناوری اطلاعات، دانشگاه سجاد، مشهد

**چکیده**

فازینگ نرم‌افزار، روشی برای یافتن آسیب‌پذیری‌های امنیتی در برنامه‌های کاربردی است. در این روش با ارسال داده‌های تصادفی به برنامه، سعی می‌شود مواردی پیدا شود که منجر به رفتارهای نامطلوب و خطاهایی همچون خرابی حافظه یا دسترسی‌های غیرمجاز شود. یکی از روش‌های پیشنهادی برای بهبود و اثربخشی فازینگ، استفاده از تحلیل نمادین و اجرای پویا-نمادین است. در این روش علاوه بر تولید داده‌های تصادفی، از تحلیل منطقی برنامه و اجرای نمادین آن برای تولید داده‌هایی استفاده می‌شود که بتوانند مسیرهای جدیدی از اجرای برنامه را پوشش دهند. در این پژوهش نشان داده‌ایم که می‌توان از روش اجرای پویا-نمادین برای فازینگ پروتکل‌های شبکه استفاده نمود و همچنین این فرایند را بهبود بخشید. بدین منظور اولین چارچوب برای فازینگ ترکیبی پروتکل‌های شبکه طراحی و پیاده‌سازی شده است. نتایج بر روی دو سرویس dcmtk و dnsmasq نشان می‌دهد که فازینگ ترکیبی در معیار پوشش کد نسبت به فازینگ سنتی عملکرد بهتری دارد. پوشش شاخه در سرویس dcmtk مقدار ۲.۷۱ درصد نسبت به AFLNet بهبود داشته است که توانسته عملکرد منفی NyxNet نسبت به AFLNet را مثبت نماید. همچنین پوشش شاخه در سرویس dnsmasq نسبت به AFLNet مقدار ۳۷.۷۲ درصد و نسبت به NyxNet مقدار ۱۱.۸۲ درصد بهبود داشته است.

**واژگان کلیدی:** آزمون فازینگ, آزمون پروتکل های شبکه, آسیب پذیری, اجرای نمادین, اجرای پویا-نمادین

نویسنده مسئول: مهدی سالخورده حقیقی
haghighi@sadjad.ac.ir

## ۱. مقدمه

فازینگ به عنوان یکی از مهمترین تکنیک‌های آزمون امنیت نرم‌افزار، نقش بسزایی در شناسایی آسیب‌پذیری‌های امنیتی دارد. با توجه به بررسی‌های انجام شده طی ده سال گذشته [1]، روش فازینگ به طور قابل توجهی نسبت به روش‌های دیگر همچون آنالیز ایستا و یا استفاده از روش تحلیل نمادین به تنهایی، مورد توجه قرار گرفته است. همچنین ترکیب روش فازینگ با سایر روش‌ها، خروجی‌های بسیار بهبود یافته و قابل توجهی داشته است که می‌توان گفت استفاده از چند تکنیک، ضعف‌های سایر تکنیک‌ها را پوشش می‌دهد.

از آنجایی که پروتکل‌های شبکه پایه و اساس ارتباطات شبکه‌ای هستند، فازینگ آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با این حال، فازینگ پروتکل‌های شبکه به دلیل ماهیت پیچیده آنها، همواره یک چالش بزرگ محسوب می‌شده است. تاکنون پژوهش‌های اندکی در زمینه فازینگ پروتکل‌های شبکه صورت گرفته و عمدتاً محدود به بهبود حفظ وضعیت پروتکل و همچنین نحوه ایجاد داده تست به صورت ساختارمند بوده‌اند. از سوی دیگر، تحقیقات انجام شده در زمینه فازینگ ترکیبی که یکی از روش‌های افزایش معیار پوشش کد می‌باشد، بیشتر معطوف به بهبود فازینگ تجزیه‌گر فایل[۱] بوده و کمتر به پروتکل‌های شبکه پرداخته‌اند. فازینگ تجزیه‌گر فایل ها یکی از انواع فازینگ است که در آن فایل‌های ورودی برنامه‌های کاربردی مورد هدف تست قرار می‌گیرند. این فایل‌ها معمولاً شامل فایل‌های پیکربندی، فایل‌های ورودیXML ، فایل‌های ورودی کاربر و فایل‌های داده‌ای هستند.

با توجه به اهمیت فازینگ پروتکل‌های شبکه و کمبود تحقیقات در این حوزه، در این مقاله سعی شده است با بررسی راهکارهای موجود و نقاط ضعف آنها ، یک معماری فازینگ ترکیبی متناسب با پروتکل های شبکه دارای‌حالت ارائه دهد و گامی در جهت بهبود فرآیند فازینگ برداشته شود. در این معماری، با ترکیب ویژگی‌های مختلف روش‌های فازینگ، سعی شده است. مهمترین چالش‌های بررسی شده در فرآیند فازینگ این پروتکل ها شامل حفظ وضعیت برنامه‌های چندنخی[۲] در تحلیل پویا-نمادین و همچنین تحلیل نمادین از نقطه دلخواه در طی فرآیند اجرا و پردازش بسته ها می‌باشد. همچنین برخی از راهکارها در جهت افزایش سرعت اجرا و همچنین کاهش بار پردازشی در بخش های مختلف خواهد بود.

پس از معرفی معماری پیشنهادی، نتایج حاصل از پیاده‌سازی و ارزیابی آن ارائه می‌شود که بیانگر برتری روش پیشنهادی نسبت به فازرهای موجود است. امید است نتایج این تحقیق بتواند گامی موثر در راستای بهبود فرآیند حساس فازینگ پروتکل‌های شبکه باشد.

با توجه به پیشینه فازینگ و کشف باگ، بیشتر تحقیقات در گذشته بیشتر به صورت آکادمیک و تئوریک بر روی مباحثی مانند اجرای نمادین، آزمون های جعبه سیاه و جعبه سفید تمرکز داشته‌اند. اما پس از انتشار عمومی ابزار فازینگ AFL [2]، تحقیقات گسترده‌ای در سطوح مختلف برای بهبود و بهینه‌سازی روش‌های ارائه شده در این ابزار آغاز شد. همچنین ابزارهای فازینگ متعددی الهام گرفته از روش‌های AFL به عنوان فازرهای جعبه خاکستری توسعه یافته‌اند.

## ۲. مفاهیم پایه

### ۱.۲. تست فازینگ

در فازینگ، داده‌های غیرمنتظره و تصادفی و گاهاً ساختارمند، به برنامه‌ها ارسال می‌شود. این داده‌ها می‌توانند شامل مقادیر نامعتبر، خارج از محدوده و یا الگوهای غیرمنتظره‌ای باشند که هدف از ارسال آن‌ها، بررسی واکنش برنامه در برابر ورودی‌های غیراستاندارد است. اگر برنامه به درستی کار نکند به عنوان مثال خراب شود یا به اشتباه عمل کند، نشان می‌دهد مشکلی[۳] وجود دارد. فازینگ برای پیدا کردن مشکلات امنیتی مانند اجرای کد دلخواه، مشکلات مرتبط با حافظه و انکار سرویس مفید است.

### ۲.۲ اجرای نمادین[۴]

اجرای نمادین تلاش می‌کند به طور سیستماتیک با بررسی یک برنامه به صورت نمادین، مسیرهای مختلف اجرای برنامه را شناسایی کند. این روش به طور کلی با تغییر مقادیر شرطی، حالت‌های مختلف اجرا را بررسی می‌کند و برای هر حالت اجرا، مسیر مجزایی ایجاد می‌شود. سپس حل‌کننده‌های SMT[۵]برای تعیین امکان‌پذیری مسیرها و انتخاب راه‌حل‌ها استفاده می‌شوند. در صورت امکان‌پذیر بودن یک مسیر، خروجی SMT منجر به تولید ورودی‌های متفاوت خواهد شد. یکی از مهم‌ترین مشکلات روش اجرای نمادین، انفجار مسیرها[۶] است که منجر به کاهش کارایی الگوریتم برای استفاده روی برنامه‌های بزرگ و واقعی می‌شود. افزایش تصاعدی تعداد مسیرهای اجرا با افزایش شاخه‌ها[۷]

---

۱ File Parser

۲ Multi-thread

۳ Bug

۴ Symbolic Execution

۵ Satisfiability Modulo Theories

۶ Path Explosion

۷ Branch

در کد، پیچیدگی فضای جستجو را به شدت افزایش داده و مانع از به کارگیری این روش بر روی برنامه‌های پیچیده واقعی می‌گردد.

### ۳.۲. اجرای پویا-نمادین[8]

در اجرای پویا-نمادین، برنامه تحت آزمون به طور همزمان هم با داده‌های واقعی و هم با داده‌های نمادین اجرا می‌شود و سعی بر مرتفع نمودن مشکلات اجرای نمادین دارد. داده‌های واقعی برای اجرای مسیر خاصی از برنامه و داده‌های نمادین برای ثبت رفتار برنامه استفاده می‌شوند. مراحل اجرای روش پیشنهادی پویا-نمادین به شرح زیر است که بخشی از چگونگی پیاده‌سازی این پژوهش را نیز تشریح می‌نماید:

۱. یک داده ورودی واقعی برای بررسی مسیر اجرایی برنامه تحت آزمون انتخاب می‌شود.
۲. برنامه با این داده‌های ورودی واقعی اجرا می‌شود و همزمان داده‌ها و عملیات‌های مرتبط با داده ورودی به صورت نمادین ثبت می‌شوند.
۳. یک مدل نمادین از رفتار برنامه با استفاده از اطلاعات ثبت شده ساخته می‌شود.
۴. با استفاده از تحلیل نمادین، شرایطی که منجر به رسیدن به مسیرهای اجرایی جدید می‌شوند، استخراج می‌گردد.
۵. داده‌های ورودی واقعی جدیدی که این شرایط را برآورده می‌کنند، تولید می‌شوند.

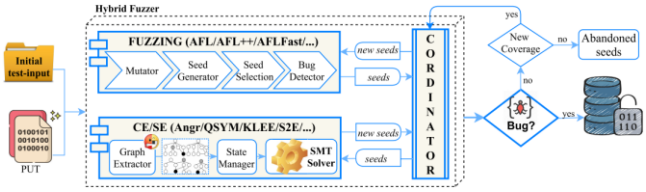
### ۴.۲. فازینگ ترکیبی[9]

فازینگ ترکیبی با ترکیب دو تکنیک فازینگ و اجرای پویا-نمادین تلاش می‌کند تا پوشش کد[10] و کارایی فرآیند فازینگ را افزایش دهد. شکل ۱ معماری یک سیستم آزمون فازینگ ترکیبی را نشان می‌دهد. این سیستم شامل سه بخش اصلی است:

۱. فازر
۲. موتور اجرای پویا-نمادین
۳. هماهنگ‌کننده

بخش هماهنگ‌کننده یک نرم‌افزار میانی است که تکنیک‌های فازینگ و اجرای پویا-نمادین را کنترل می‌کند و سه وظیفه اصلی دارد. ابتدا، فازر را نظارت می‌کند تا بتواند زمان اجرای پویا-نمادین را تشخیص دهد. دوم، محیط در حال اجرا را برای اجرای پویا-نمادین آماده می‌کند. سوم، داده‌های آزمونی را که بین فازر و اجرای پویا-نمادین اجرا می‌شوند، انتخاب و فیلتر می‌کند.

[8] Concolic Execution
[9] Hybrid Fuzzing
[10] Code Coverage




**شکل۱. ساختار کلی یک فازر ترکیبی [3]**

### ۵.۲. پروتکل های شبکه

پروتکل‌های شبکه به دو دسته دارای‌حالت[11] و بدون‌حالت[12] تقسیم می‌شوند. در پروتکل‌های بدون حالت مانندHTTP ، اطلاعات مربوط به حالت ارتباط ذخیره نمی‌شود و هر بسته به طور مستقل ارسال و پردازش می‌گردد. اما در پروتکل‌های دارای‌حالت مانند TLS، اطلاعاتی در مورد حالت اتصال ذخیره می‌شود که هر بسته می تواند به بسته های قبلی وابستگی داشته باشد و نحوه پردازش هر بسته ارسالی متفاوت باشد.

## ۳. بررسی مطالعات پیشین

بزرگترین چالش در فازینگ پروتکل‌های شبکه دارای‌حالت ، سرعت اجرا و حفظ حالت براساس ماشین حالت پروتکل است. اخیراً راه‌حل‌های متنوعی مطرح شده‌اند که تا حد زیادی چالش‌های اولیه در فازینگ این نوع محصولات نرم‌افزاری را برطرف کرده‌اند. حال گام بعدی در تکامل و پیشرفت این حوزه استفاده از تکنیک‌های بهبوددهنده و مکمل مانند اجرای پویا-نمادین در طول فرایند آزمون فازینگ برای تولید داده‌های آزمون با کیفیت‌تر است.

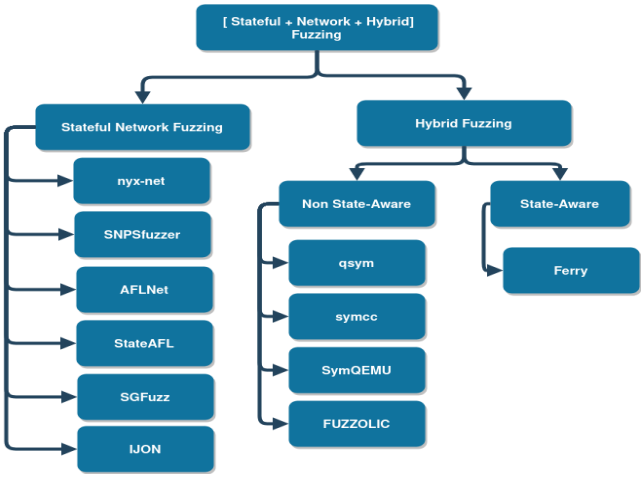
این پژوهش، اولین پیاده‌سازی اجرای پویا-نمادین بر روی اهداف سرویس‌های شبکه دارای‌حالت، بر پایه تحقیقات و کارهای انجام شده تاکنون خواهد بود که دسته‌بندی آن‌ها بر روی ۳ موضوع اصلی زیر انجام شده است:

- فازینگ پروتکل‌های شبکه دارای‌حالت : فازرهای مرتبط لیست شده‌اند تا بهترین تحقیقات انجام شده به عنوان فازر پایه انتخاب شود.
- فازینگ ترکیبی بر روی اهداف دارای‌حالت: مقالاتی که فازینگ ترکیبی را بر روی تمام جریان پردازش و ارتباط بین حالت‌های تعریف شده درون برنامه انجام می‌دهند.
- فازینگ ترکیبی بر روی اهداف بدون حالت: مقالاتی که فازرهای ترکیبی از آن‌ها استفاده کرده‌اند و یا به عنوان بخشی از فازرهای ترکیبی می‌باشند که بر روی اهداف بدون حالت و یا با در نظر نگرفتن حالت‌های گذشته عمل می‌کنند.

با بهره‌گیری از دانش و تجربیات به دست آمده از تحقیقات پیشین، هدف انتخاب درست تکنیک‌ها و ابزارهای مورد استفاده در این

[11] Statefull
[12] Stateless

پژوهش است. دسته بندی مقالات مطالعه شده در شکل ۲ قابل مشاهده است.




**شکل۲. دسته بندی کارهای پیشین**

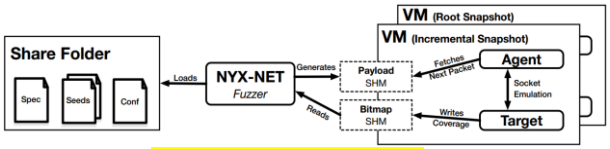
در بخش فازینگ ترکیبی آگاه به حالت بر روی اهداف دارای حالت تنها یک مقاله [4] وجود دارد که تحقیقات آن بر روی تجزیه‌گر فایل‌ها انجام شده است که نشان‌دهنده جدید بودن این موضوع و عدم تحقیقات کافی در این زمینه است. برای پیاده‌سازی فازینگ ترکیبی آگاه به حالت بر روی پروتکل‌های شبکه دارای حالت، ابتدا باید زیرساخت لازم برای فازینگ ترکیبی فراهم شود. بنابراین پیاده‌سازی فازینگ ترکیبی آگاه به حالت بر روی اهدافی که دارای‌حالت هستند، خارج از حوزه تحقیقاتی این پژوهش می باشد.

## ۱.۳. فازینگ پروتکل‌های شبکه دارای حالت

پس از موفقیت فازر AFL، برخی از محققین سعی کرده‌اند تا آن را برای سرویس‌های شبکه نیز به کار گیرند. بدین منظور سعی شده اهداف تحت آزمون را تغییر دهند تا به جای دریافت ورودی از سوکت شبکه، از فایل‌های ورودی دریافت کنند. اما این تغییرات ذات شبکه‌ای بودن اهداف را نقض کرده و برخی مشکلات را از دید فازر پنهان می‌کند. فازر AFLNet [5] سعی کرده است روش را معکوس کند؛ یعنی به جای تغییر اهداف تحت آزمون، خود فازر AFL را تغییر دهد تا متناسب با اهداف شبکه‌ای باشد. در بررسی کارایی طرح پیشنهادی این پژوهش AFLNet به عنوان State-of-the-art و پایه مقایسه‌ها در نظر گرفته می‌شود.

AFLNet از ترافیک ضبط‌شده بین سرویس‌دهنده و سرویس‌گیرنده به عنوان داده‌های اولیه استفاده می‌کند. به عنوان سرویس‌گیرنده عمل کرده و درخواست‌های جهش‌یافته را ارسال می‌کند. از کدهای پاسخ سرویس‌دهنده برای استنتاج ماشین حالت پروتکل و هدایت فازر استفاده می‌کند. در مقایسه با AFL برای پروتکل‌های پیچیده و دارای‌حالت موثرتر است. اما همچنان معایبی مانند نیاز به ترافیک اولیه، محدود بودن به پروتکل‌های خاص، عدم حفظ وضعیت و نیازمند اسکریپت cleanup و اجرای قبل از انجام هر تست، عملکرد ضعیف و همچنین نیاز به تجزیه‌گرهای سفارشی دارد.

فازر NYX [6] با استفاده از QEMU و KVM با ماشین مجازی یکپارچه شده و حالت آن را به یک پشتیبان‌گیری مقطعی[۱۳] تنظیم می‌کند. این فازر از یک عامل نماینده[۱۴] در ماشین مجازی برای کنترل چرخه فازینگ استفاده می‌کند. تکنیک پشتیبان‌گیری مقطعی در این فازر بر پایه Dirty-Page است که از امکانات سخت‌افزاری پردازنده‌های مدرن برای ردیابی صفحات تغییریافته استفاده می‌کند. نسخه توسعه‌یافته این فازر به نام NyxNet [7] است که از قابلیت‌های آن برای فازینگ پروتکل‌های شبکه استفاده می‌کند. معماری این فازر در شکل ۳ قابل مشاهده است. پشتیبان‌گیری مقطعی افزایشی[۱۵] منجر می شود تا تنها صفحات تغییریافته ذخیره و بازیابی شوند و سرعت را افزایش دهد. یکی دیگر از قابلیت‌های بسیار مفید فازر NyxNet هماهنگی کامل با زیرساخت و ساختار فازر AFL می‌باشد. همچنین اهدافی که برای این نوع فازر کامپایل شده‌اند، نیز به راحتی توسط NyxNet قابل استفاده خواهند بود و پیچیدگی و ابهاماتی در یادگیری و تسلط بر روی این فازر به حداقل ترین حالت خود خواهد رسید.




**شکل۳. معماری NyxNet [7]**

فازر SNPSFuzzer [8] راهکاری مبتنی بر پشتیبان‌گیری مقطعی برای تسریع فازینگ پروتکل‌های شبکه پیشنهاد می‌کند. این فازر با ذخیره و بازیابی اطلاعات مربوط به هر حالت، از تکرار ارسال پیشوندهای طولانی جلوگیری می‌کند. همچنین با استفاده از الگوریتم‌های تحلیل نقطه مقطع و زنجیره پیام، پوشش حالت‌ها را افزایش می‌دهد. اما پیچیدگی پیاده‌سازی، نیاز به تنظیم الگوریتم‌ها و کندی نسبی از محدودیت‌های این روش به شمار می‌روند. این فازر برای مدیریت پشتیبان‌گیری‌های مقطعی از CRIU استفاده می‌کند. کارایی CRIU را می‌توان با قابلیت مشابه در Qemu مقایسه کرد که جنبه‌های عملکردی مهم در فازینگ مانند کارایی و سرعت در آن مورد توجه نبوده است.

---

[۱۳] Snapshot

[۱۴] Agent

[۱۵] Incremental Snapshot

فازر StateAFL [9] یک فازر جعبه خاکستری برای سرورهای شبکه‌ای است که بدون نیاز به سفارشی‌سازی دستی، صرفاً با تجزیه و تحلیل ساده برنامه تحت آزمون کار می‌کند. این فازر کدهایی را درون برنامه هدف تزریق می‌کند تا اطلاعات حافظه و شبکه جمع‌آوری کند و پس از هر تعامل درخواست-پاسخ، یک پشتیبان‌گیری مقطعی از حافظه بلندمدت گرفته می‌شود. سپس هر پشتیبان‌گیری به یک شناسه حالت یکتا نگاشت می‌شود. این روش نیازی به تجزیه‌گرهای سفارشی پروتکل ندارد. نتایج نشان می‌دهد StateAFL بدون سفارشی‌سازی، می‌تواند پوشش و خرابی‌های قابل مقایسه و حتی بهتر از فازرهای سفارشی قبلی به دست آورد. اما محدودیت‌هایی مانند نیاز به دسترسی به کد منبع و افزایش زمان اجرا وجود دارد.

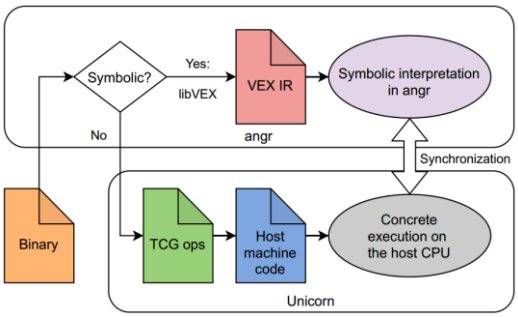
مقاله SGFUZZ [10]، روشی نوین بر پایه Libfuzzer برای فازینگ برنامه‌های دارای حالت همچون پروتکل‌های ارتباطی ارائه می‌دهد. راه حل پیشنهادی، شناسایی متغیرهای حالت برنامه با استفاده از الگویابی و پیگیری مقادیر آنها حین اجرای برنامه است. الگوی استفاده شده بر این فرض استوار است که اغلب حالت‌های برنامه به صورت شمارشی ذخیره[۱۶] و در دستورات شرطی بررسی می‌شوند. از مزایای این روش می‌توان به کشف خودکار فضای حالتی و عدم نیاز به دانش قبلی در مورد حالت‌های برنامه اشاره کرد. اما معایبی همچون کاهش سرعت اجرا، خطا در شناسایی متغیرها و عدم پوشش فضای حالت‌های ضمنی مانند تغییرات پایگاه داده‌ها، برای این روش وجود دارد. همچنین برای برنامه‌های با فضای حالتی بسیار بزرگ، کارایی کمتری خواهد داشت.

مقاله IJON [11] رویکرد پیشنهادی با الهام از مدل Human-in-the-loop ارائه می نماید که امکان دخالت کاربر در خروجی یک فرایند یا رویداد را فراهم می‌سازد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد یک تحلیلگر انسانی می‌تواند فازر را در فضای حالتی برنامه هدایت کرده و بخش‌هایی از فضای حالتی را که نیاز به بررسی کامل دارند، مشخص نماید. با استفاده از قابلیت نشانه‌گذاری، می‌توان اطلاعات بیشتری در مورد وضعیت متغیرها و حالت‌های برنامه در اختیار فازر قرار داد که منجر به افزایش پوشش کد و تولید داده‌های آزمون باکیفیت‌تر می‌شود. اما مهم‌ترین محدودیت این روش، نیاز به نیروی انسانی متخصص و آشنا با کد منبع هدف است که نیازمند صرف زمان زیادی برای آشنایی با پیچیدگی‌های برنامه و معماری پیاده سازی آن است.

[۱۶] Enum

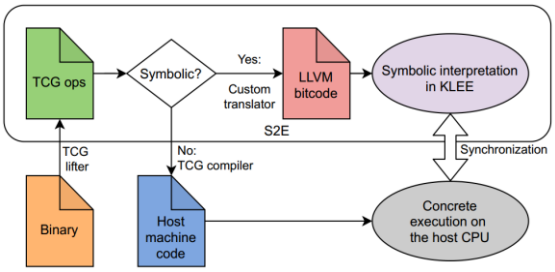
## ۲.۳. فازینگ ترکیبی

ابزار Angr [12] یک موتور اجرای نمادین کلاسیک است که از زبان میانی VEX استفاده می‌کند که باعث کاهش سرعت آن می‌شود، اما این کار باعث ساده شدن پیاده‌سازی آن شده است. معماری آن در شکل ۴ قابل مشاهده است. با توجه به اینکه Angr بر پایه VEX است، بنابراین می‌تواند تمام معماری هایی که VEX پشتیبانی می‌کند را به ارث برده و پشتیبانی نماید. از آنجایی که کد Angr در پایتون نوشته شده است، سرعت آن نسبتاً کند است.




**شکل۴. معماری Angr [16]**

ابزار S2E [13] یک سیستم‌عامل کامل را درون QEMU شبیه‌سازی می‌کند و آن را به موتور اجرای نمادین KLEE متصل می‌کند. این کار باعث می‌شود S2E بتواند تجزیه و تحلیل جامعی از کد در تمامی لایه‌های سیستم‌عامل ارائه کند. اما پیچیدگی زیاد آن باعث شده استفاده از آن دشوار باشد.

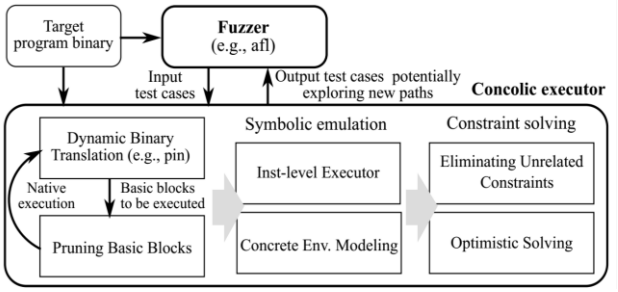



**شکل۵. معماری S2E [16]**

در دو راهکار S2E و Angr به عنوان state-of-the-art ، استفاده از یک زبان میانی در جهت کمتر شدن پیچیدگی پیاده سازی انتخاب شده است اما با کم شدن هزینه پیاده سازی ، عملکرد و کارایی به شدت کاهش یافته است.

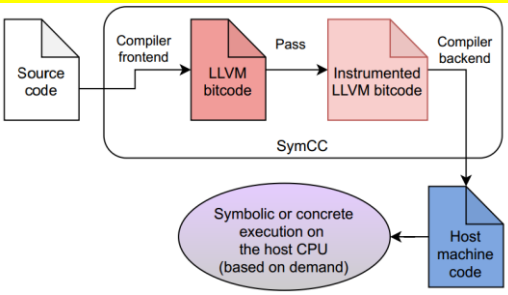
ابزار QSym [14] بدون استفاده از زبان میانی و با Instrument نمودن فایل باینری برنامه تحت آزمون در زمان اجرا، توانسته سرعت زیادی کسب کند. اما این روش محدود به معماری x86 است و پیاده‌سازی آن برای سایر معماری‌ها بسیار دشوار خواهد بود. ذات QSym برای فازینگ فایل می‌باشد و هنگام تجزیه و تحلیل یک فایل ۲۱۸ بایتی عکس png در برنامه libpng برای اجرای تمام شاخه ها به بیش از ۲ ساعت زمان نیاز دارد. بزرگترین

عیب این روش عدم سفارشی سازی و محدود نمودن شاخه های مورد بررسی می باشد.



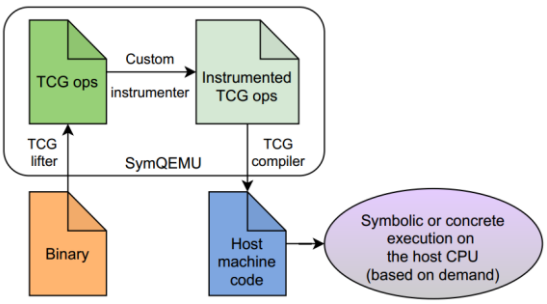

**شکل۶. معماری QSym [14]**

ابزار SymCC [15] به عنوان یک لفاف بر روی کامپایلر برپایه QSym ایجاد شده است که با افزودن کد مورد نیاز هنگام کامپایل، توانسته است سرعت اجرای خود را تا هزار برابر نسبت به سایر راهکارها افزایش دهد. اما نیازمند یک کامپایلر خاص است و قابلیت کار با باینری‌های موجود را ندارد. براساس مشاهدات تجربی ممکن است این کامپایلر خاص در برخی اهداف قابل استفاده نباشد و فرآیند کامپایل منجر به شکست گردد و همچنین دسترسی به کد منبع اهداف تحت آزمون به عنوان یک الزام مطرح می‌شود.



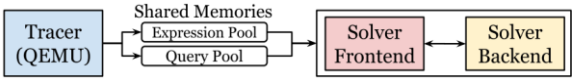

**شکل۷. معماری SymCC [16]**

ابزار SymQEMU [16] تلاش نموده است تا تمامی‌مزایا موجود در تحقیقات انجام شده تاکنون را در کنار هم قرار دهد. از سرعت و کارایی symcc و همچنین از Qemu و TCG که زبان میانی آن است استفاده نموده تا قابلیت پشتیبانی معماری مختلف را بدست آورد. این ابزار به عنوان شبیه سازی سطح کاربر می‌باشد و عملکردی مشابه به Angr و SymCC/QSym خواهد داشت. همچنین راه حلی را پیشنهاد می‌دهد تا بتوانند ایده اصلی SymCC که برای مراحل و فرآیند کامپایل کدمنبع بوده است را بر روی باینری اعمال کنند. ابزار SymQemu فقط بر روی معماری x86 پیاده سازی شده است. همچنین این پیاده سازی بر روی فازینگ فایل تمرکز داشته است. نمی توان بصورت سفارشی از آن برای تجزیه و تحلیل در سطح توابع استفاده کرد و یا به صورت سفارشی شده بخش های تعیین شده‌ای در برنامه تحت آزمون مورد بررسی و اجرای نمادین قرار گیرد.




**شکل۸. معماری SymQemu [16]**

ابزار Fuzzolic [17] همانند SymQEMU از زبان میانی TCG استفاده می‌کند، اما با جدا کردن بخش حل‌کننده، توانسته است عملکرد بهتری داشته باشد. Fuzzolic سه حالت مختلف تجزیه و تحلیل پویا دارد که باعث بهبود دقت آن شده است.




**شکل۹. معماری** Fuzzolic [17]

با توجه به پیاده سازی مشابه Fuzzolic و SymQemu هر دو دارای معایب مشترکی می باشند.

## ۴. طرح پیشنهادی و پیاده سازی

با توجه به بررسی‌های انجام شده در بخش 3.1، ابزار NyxNet به عنوان بهترین گزینه برای استفاده به عنوان فازر پایه در جهت توسعه و بهبود ابزار پیشنهادی انتخاب می‌شود. این ابزار علاوه بر سرعت بالای اجرا و حفظ حالت در پروتکل‌های شبکه‌ای حالت‌دار، از برنامه‌های تحت تست باینری و نیز دارای کد منبع باز می‌باشد. علاوه بر معایب هرکدام از روش‌های مورد بررسی در بخش ۳، در ادامه ۳ چالش مطرح می شود.

چالش۱، همان‌طور که در بخش 3.2 بررسی شد، روش‌های موجود اجرای برنامه‌ها و توابع چندنخی را بصورت نمادین پشتیبانی نمی‌کنند. علت این محدودیت این است که اهداف این روش‌ها، تجزیه گرهای فایل بوده و به طور ضمنی تنها برنامه‌های تک‌نخی را پشتیبانی می‌کنند. در حالی که اکثر برنامه‌ها و سرویس‌های شبکه‌ای به صورت چندنخی پیاده‌سازی می‌شوند تا بتوانند با سرعت بیشتری به درخواست‌ها پاسخ دهند. این محدودیت باعث می‌شود نتوان از نتایج کارهای گذشته در حوزه فازینگ ترکیبی برای اهداف شبکه‌ای چندنخی استفاده کرد. عدم پشتیبانی برنامه‌های چندنخی یکی از مهم‌ترین نقاط ضعف مشترک تمام این روش‌ها به‌شمار می‌رود.

چالش ۲، برنامه‌ها و سرویس‌های شبکه‌ای در طول اجرای خود و پردازش داده های یک ارتباط، چندین بسته دریافت کرده و هر بسته بر حالت برنامه تأثیر می‌گذارد. بنابراین در فازینگ ترکیبی

نیاز است تا بتوان بخش‌های مختلف برنامه تحت تست را به صورت سفارشی و نمادین اجرا و بررسی کرد. به عنوان مثال، اگر داده تست شامل هفت بسته باشد، بخواهیم فقط روند اجرای بسته پنجم را به صورت نمادین بررسی کنیم. این امکان توسط روش‌های گذشته فراهم نبوده است.

چالش ۳، برخی ابزارهای بررسی شده بخش 3 در سطح باینری کار کرده و فرایند اجرا را در کتابخانه‌هایی مانند glibc نیز درگیر می‌کنند. این موضوع می‌تواند بر سرعت تجزیه و تحلیل و اجرای نمادین تاثیر منفی بگذارد. استفاده از توابع نمادین[۱۷] می‌تواند با کاهش حجم محاسبات، سرعت تحلیل و اجرای این ابزارها را افزایش دهد.

با توجه به معایب مطرح شده در بخش ۳ و همچنین سه چالش اصلی قبلاً ذکر شده در این بخش، در این پژوهش سعی بر آن است تا راهکاری جامع و منعطف برای اهداف سرویس‌های شبکه و پروتکل‌های دارای‌حالت ارائه شود.

به منظور مقابله با انفجار مسیر، بهینه‌سازی‌ها و روش‌هایی مانند محدود کردن عمق تجزیه و تحلیل، کاهش شرایط پیچیده و استفاده از ترکیب‌های تحلیل نمادین و آزمون‌های واقعی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند که به عبارت دیگر اجرای Concrete به نوعی مکمل تحلیل نمادین است به توان عیوب آن را مرتفع و از فواید آن استفاده نماییم. بدین منظور در این پژوهش با استفاده از آزمون های واقعی به همراه تحلیل نمادین که به آن تحلیل پویا-نمادین می‌گوییم ، سعی شده است تا بتوان با استفاده از مزایا هر دو روش بهبود در عملکرد ایجاد داده ای آزمون جدید برای فازر NyxNet انجام شود.

بسیاری از پروتکل‌ها شامل مفاهیم سرویس دهنده-سرویس گیرنده هستند که در آن سرویس گیرنده اتصال را آغاز می‌کند و سرویس دهنده پس از درخواست سرویس گیرنده پاسخ می‌دهد. در مرحله آزمون سرویس دهنده، عملکرد به نسبت آسان است. نرم‌افزار هدف در انتظار دریافت ارتباطات ورودی قرار دارد و فازر تنها نیاز دارد که به سرویس دهنده هدف متصل شود و داده‌های آزمون را ارسال کند. اما آزمون سرویس گیرنده به طور معمول پیچیده‌تر است. در این حالت، فازر باید مانند سرویس دهنده عمل کند و منتظر درخواست‌های ورودی از سوی سرویس گیرنده باشد. هر زمان که سرویس گیرنده هدف به فازر متصل می‌شود، فازر با ارسال یک داده آزمون به درخواست سرویس گیرنده پاسخ می‌دهد. به طور معمول، نیاز است که در سرویس گیرنده تغییراتی ایجاد شود تا به صورت مکرر به فازر متصل شود و بتواند دریافت داده‌های آزمون را ادامه دهد. چنین مواردی با ایجاد تغییر در چند خط کد منبع سرویس گیرنده با استفاده از وصله[۱۸] ها مرتفع شده است.

با توجه به اهداف تحت آزمون، اعداد تصادفی برای مواردی مانند رمزنگاری نقش بسیار مهمی را ایفا می کند. گاها تولید اعداد تصادفی می‌تواند برنامه تحت آزمون را در وضعیتی نامعین قرار دهد و همچنین خطاهای برنامه با استفاده از داده‌های آزمون، می‌بایست قابل بازتولید باشند. بسیاری از محصولات نرم‌افزاری که بر روی بستر شبکه کار می‌کنند، با توجه به تأخیرات در انتقال داده‌ها از توابعی مانند usleep(), sleep() استفاده می‌کنند تا وقفه‌های مصنوعی ایجاد کنند. اما این وقفه‌ها می‌توانند عملکرد فازر را به شدت کاهش دهند. برای به حداقل رساندن تاثیر وقفه‌ها و تأخیرها ، همچنین مواردی اعداد تصادفی که منجر به ایجاد مسیرهای متفاوت در هربار اجرای برنامه تحت آزمون می شود، سعی شده است که از قابلیت‌های DBI [۱۹]به طور کامل بهره‌برداری شود تا تمامی‌فرآیندها و تغییرات مورد نیاز به صورت خودکار انجام شود.

ابزارهای DBI به وسیله ترجمه باینری در زمان اجرا، توانایی اعمال تغییرات در اجرای یک برنامه را داراست. به عنوان مثال، این قابلیت را دارد که بدون دسترسی به کد منبع، کدهای نظارتی را در نقاط مختلف درون باینری تزریق کند تا اطلاعاتی در مورد جریان اجرا جمع‌آوری کند. همچنین قادر است خطاها را شناسایی و اصلاح نماید یا فرآیند اجرا را با تغییرات مورد نیاز سازگار کند. با این حال، یکی از مشکلات اصلی این روش، سربار اجرایی بالای آن است. زیرا ترجمه باینری در زمان اجرا هزینه‌های زیادی دارد و باعث کندی در اجرای برنامه می‌شود. به همین دلیل، برای مواردی مانند آزمون فازینگ که نیاز به اجرای سریع و مکرر برنامه دارند، این روش چندان مناسب نمی‌باشد. خوشبختانه، Dynamorio [18] با استفاده از مکانیزم‌های مختلفی که پیاده‌سازی نموده است، توانسته است سربار اجرایی را به حداقل ممکن، به حدی که تنها ۱.۱ برابر سرعت اجرای اصلی باشد، کاهش دهد.

طرح کلی و تغییراتی که این پژوهش در فرآیند فازینگ NyxNet ایجاد خواهد کرد در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۱۰ برای کامپایل و آماده‌سازی اهداف آزمون دو روش کامپایل نیاز است.

استفاده از Patch اجباری نمی‌باشد و می‌تواند هدف آزمون بدون تغییرات در کدمنبع مناسب برای فازینگ باشد. گاها نیاز است که برخی تغییرات بسیار کمی‌در کدمنبع ایجاد شود تا وضعیت پایداری در فرآیند اجرا داشته باشیم. برخی از این تغییرات گاها توسط خود اهداف آزمون به صورت پارامترهای اجرایی در اختیار کاربر قرار می‌گیرند، به عنوان مثال اجرا نشدن برنامه تحت آزمون

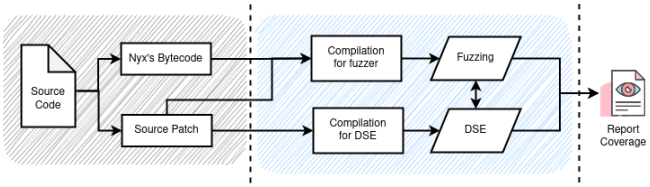
---

[۱۷] Semantic Functions

[۱۸] Patch

[۱۹] Dynamic Binary Instrumentation

به صورت سرویس[۲۰] ، اما بایت کدهای مختص به NYX و همچنین مفسرهای این بایت کدها باید توسط کاربر فراهم شده باشد تا بتوانند پکت‌های دریافت شده در طی فازینگ را تفسیر و به داخل برنامه تزریق نمایند. برای فرآیند فازینگ دو بخش بایت کدها و وصله ها نیاز است اما برای فرآیند اجرای پویا-نمادین تنها وصله ها لازم خواهد بود تا تغییرات لازمه را در فرآیند اجرای برنامه ایجاد نماید.




**شکل۱۰. طرح کلی پیاده سازی**

اهداف تحت آزمون آماده شده برای اجرای فازینگ در هنگام کامپایل با استفاده از کامپایلر پیش‌فرض afl-clang-fast توسط Sanitizer ها تغییر خواهند کرد تا به عنوان Oracle بتوانند مشکلات و خطاهای حافظه را تشخیص دهند. در صورت نیاز می‌توان پارامترهای کامپایل را تغییر داد و Sanitizer های دیگری را به عنوان Oracle انتخاب نمود تا انواع دیگری از باگ‌ها و آسیب‌پذیری‌ها را با استفاده از فازینگ کشف نماییم. اما با توجه به اینکه Sanitizer ها کدهایی را به درون برنامه تزریق می‌نمایند، در جهت عدم پردازش این کدها در تحلیل نمادین نیاز خواهیم داشت تا اهداف تحت آزمون را بدون چنین ویژگی هایی کامپایل نماییم. بنابراین دو روش کامپایل خواهیم داشت و فایل باینری مورد استفاده توسط فازر و تحلیل نمادین متفاوت خواهند بود. در ادامه دو فرآیند فازینگ و تحلیل پویا-نمادین همزمان اجرا شده و داده‌های خود را با یکدیگر به اشتراک خواهند گذاشت.

در ادامه شبه کد و منطق پیاده سازی انجام شده آورده شده است:

```
def coordinator():
  set_corpuses_notify()
  list_corpuses()
  while True:
    py_script = reproduce_corpus(
                  get_one_corpuse()
                )
    packets = load_packets(py_script)
    new_seeds = explore(packets)
    feed_to_nyxnet(new_seeds)

def explore():
  run_CE()
  handle_instructions()
  return solve_path_constraints()
```

[۲۰] Daemon

```
def handle_instructions():
  done = False
  while(not done):
    action = read_shm()
    if action == get_packet:
      packet = get_next_packet()
      if packet.is_last_one() :
        taint_memory(packet)
      send(packet)
    elif action == set_reg_mem :
      change_reg_mem_value()
    elif action == instruction :
      done = process_instruction()
```

بخش Coordinator وظیفه جمع‌آوری فایل‌های Corpus ایجاد شده توسط NyxNet را بر عهده دارد. سپس این فایل‌ها را بر اساس اندازه آنها مرتب می‌کند، به گونه‌ای که فایل‌های کوچکتر در اولویت بررسی قرار می‌گیرند. این اقدام به منظور بهینه‌سازی مصرف حافظه در فرآیند تحلیل نمادین انجام می‌شود. وظیفه دیگر این بخش دریافت اطلاعات پکت‌ها است تا بتواند آنها را به عنوان ورودی به پروسه اجرای پویا-نمادین ارسال کند.

در بخش SE[۲۱] یا همان تابع explore ، ابتدا پروسه CE[۲۲] اجرا می‌شود و سپس شروع به ارسال/دریافت داده می‌کند. بخش CE با استفاده از ابزار DynamoRio که یک DBI می باشد، پیاده سازی شده است. CE وظیفه اجرا برنامه تحت آزمون و تغییرات لازم در طول فرآیند اجرا مانند کاهش تاثیر وقفه ها و اعداد تصادفی را اعمال می‌نماید تا اجرا آسان و سریع شود و به علاوه، همچنان بتواند همگرایی و یکپارچگی برنامه تحت آزمون که یک برنامه شبکه‌ای است، را حفظ کند.

ارتباط میان CE/SE با استفاده از حافظه مشترک Shared Memory برقرار خواهد بود و برای رفع مشکلات و تداخلات همزمانی در ارسال و دریافت داده‌ها و همچنین پشتیبانی از برنامه های تحت آزمون چندنخی، از Semaphore و Mutex در پیاده‌سازی CE/SE استفاده شده است. در طی پردازش دستورالعمل‌های دریافت شده توسط SE عمل Context-Switching برای برنامه های چندنخی با استفاده از اطلاعات دریافت شده از CE انجام خواهد شد، بنابراین چالش ۱ مطرح شده در این بخش بدین صورت مرتفع می‌گردد. اگر پردازش دستورالعمل‌های دریافت شده به داده خاصی از حافظه و یا برخی از رجیسترهای خاص مانند XMM و YMM را نیاز داشته باشد، می‌تواند آن را از CE درخواست و دریافت نماید. همچنین مدیریت ورودی‌ها یا به عبارت دیگر، پکت‌ها توسط SE انجام خواهد شد و در صورت نیاز به دریافت پکت، CE می‌تواند آن را از طریق حافظه مشترک از SE درخواست و دریافت نماید.

[۲۱] Symbolic Executor

[۲۲] Concrete Executor

در پیاده‌سازی فعلی تحلیل نمادین تنها بر روی آخرین پکت انجام می‌شود. در صورت دریافت آخرین بسته، حافظه مورد استفاده بصورت Taint شده خواهد بود. بدین ترتیب چالش ۲ مطرح شده در این بخش مرتفع خواهد شد و در صورت نیاز می توان برای هر بسته دریافتی شرایط و پردازش خاصی را مدنظر داشته باشیم که این عمل می تواند برای داشتن زیرساخت تحلیل نمادین آگاه به حالت[۲۳] بسیار کارآمد باشد.

در تابع process_instruction بررسی می‌شود اگر فراخوانی تابعی بر روی یکی از توابع نمادین شده به عنوان مثال strcmp باشد به جای پردازش دستور العمل ها توابع نمادین اجرا خواهد شد و همچنین بخش CE ارسال دستورالعمل ها را تا خاتمه یافتن تابع نمادین شده برای SE متوقف خواهد کرد. بدین ترتیب چالش ۳ مطرح شده در این بخش مرتفع می گردد و بار پردازشی در تحلیل نمادین کاهش و سرعت اجرای CE افزایش خواهد یافت.

پس از پردازش کامل آخرین پکت توسط برنامه تحت آزمون، عملیات تحلیل نمادین و حل نمودن Path Constraints انجام می‌شود تا با حل نمودن محدودیت‌های موجود در طی مسیر پردازش آخرین پکت، داده‌های آزمون جدیدی ایجاد شود و به فرآیند فازینگ تزریق گردد تا بتوان پوشش کد را بهبود بخشید.

کدمنبع بخش Coordinator و همچنین SE به زبان پایتون نوشته شده است. اما بخش ارسال داده آزمون جدید به NyxNet به زبان Rust برنامه‌نویسی شده است تا بتوان براساس ساختارهای تعریف شده در این فازر داده‌های جدید را به فرآیند فازینگ تزریق نماییم. همچنین بخش CE به زبان C/C++ نوشته شده است.

یکی از نکات بسیار مهم که در طول تحقیقات در نظر گرفته شده، این است که اهداف آزمون پروتکل‌های شبکه وضعیت دار هستند. بنابراین، نمی‌توان به همان روشی که در آزمون‌های رایج برای تجزیه گرهای فایل‌ها استفاده می‌شود، اقدام به درون‌ریزی داده از ابتدا به داخل برنامه کرد و سپس تحلیل را انجام داد. بهمین دلیل با استفاده از قابلیت های DBI توابعی مهم که مرتبط با ارتباطات شبکه می‌باشند را Hook کرده و متناسب با نیاز تغییرات در فرآیند اجرا در آن ایجاد می‌شود. به عنوان مثال هنگام خواندن اطلاعات از Socket آن را به عنوان دریافت کننده ورودی تشخیص داده و درخواست دریافت پکت را به SE ارسال خواهد کرد بدین ترتیب اطلاعات با سرعت بیشتری نسبت به سوکت دریافت خواهد شد و بهبود در سرعت اجرا خواهیم داشت.

همچنین در جهت پیشگیری از احتمال انفجار مسیرها ورودی های با سایز کوچکتر ابتدا پردازش خواهند شد و همچنین بازه زمانی حداکثر دو دقیقه برای پردازش SE بر روی هر داده تست در نظر گرفته شده است تا در صورت پردازش ورودی هایی با سایز بزرگتر مشکلی در فرآیندها ایجاد نگردد.

## ۵. آزمایش ها و ارزیابی نتایج

شاخص ارزیابی و عملکرد میان ابزارها و تکنیک های فازینگ میزان افزایش پوشش کد در اهداف تحت تست می باشد. در این پژوهش نیز به منظور حفظ اصول و همچنین ارزیابی منصفانه در برابر تحقیقات انجام شده، شاخص بهبود بر پایه مقدار پوشش کد در نظر گرفته شده است. تمامی بهبودها در فازینگ سعی برآن دارند تا به پوشش کد صد درصد دست یابند و هر بهبود کمک در جهت رسیدن به این هدف می باشد. بررسی و ارزیابی ها بر روی یک دستگاه با معماری ۱۲ هسته اینتل Intel Xeon(R) با فعال بودن hyper-threading (مجموعاً ۲۴ هسته منطقی) و ۳۲ گیگابایت حافظه RAM در حال اجرای بر روی سیستم عامل Ubuntu 22.04 LTS x64 انجام شده است. برای اطمینان و قابلیت استناد به خروجی‌های ارزیابی، اجراها به صورت ۲۰ مرتبه با مدت زمان ۳۰ دقیقه انجام شدند. این تعداد اجراها و زمان مورد نیاز برای هر بار اجرا، به ما امکان می‌دهد از داده‌های قابل اعتماد و قابل استناد برای تحلیل و ارزیابی استفاده کنیم.

داده‌های مرتبط با پیاده سازی این پژوهش با نام NyxNet-Hybrid در مقایسه ها و تحلیل ها قابل مشاهده است. شاخص بهبود عملکرد NyxNet-Hybrid در مقایسه با فازرهای AFLNet و NyxNet می‌باشد. فازر NyxNet سه روش در گرفتن پشتیبان‌گیری مقطعی را ارائه می‌دهد که با توجه به ارزیابی های درون مقاله بهترین عملکرد آن بصورت Balanced بوده است و از همین رو این مکانیزم را برای مقایسه انتخاب نموده ایم و همچنین پیاده سازی این تحقیق نیز با Nyx-Balanced اجرا شده است.

جدول ۰۱ مقایسه عددی پوشش شاخه

| NyxNet-Hybrid | | NyxNet-Balanced | | AFLNet | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2948 | +2.71 | 2869 | -0.03 | 2870 | dcmtk |
| 1139 | +37.72 | 1042 | +25.9 | 827 | dnsmasq |

همانطور که اعداد جدول[۱] برای هدف آزمون dcmtk نشان می‌دهند، عملکرد فازر NyxNet در برابر AFLNet نسبتاً ضعیف بوده است. دلیل این امر می‌تواند پیچیدگی ساختار برنامه تحت آزمون و همچنین وجود شرایط خاص ورودی در dcmtk باشد که منجر به کاهش کارایی فازر شده است و به دلیل تصادفی بودن ایجاد داده آزمون ها شرایط قابل پاس شدن نبوده اند. با این حال، فازینگ ترکیبی توانسته است این عملکرد نسبتاً ضعیف را بهبود بخشد و درصد تفاوت در پوشش را مثبت کند. بنابراین می‌توان

[۲۳] Satte-Aware

نتیجه گرفت که فازینگ ترکیبی تأثیر مثبت خود را در طی فرایند ایفا نموده است.

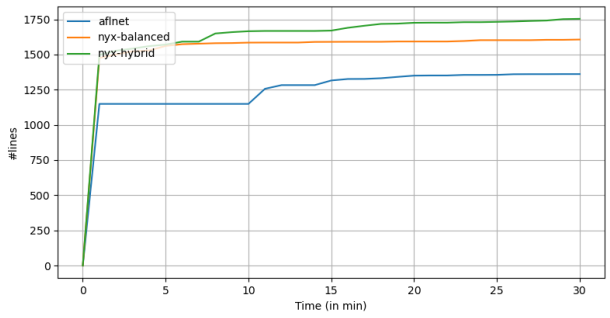
اما برای هدف آزمون dnsmasq، عملکرد و بهبود هر دو فازر نسبت به AFLNet کاملاً مشهود است. فازینگ ترکیبی همچنان موجب افزایش پوشش در این هدف آزمون شده است و این بهبود نزدیک به ۳۸ درصد می‌باشد.

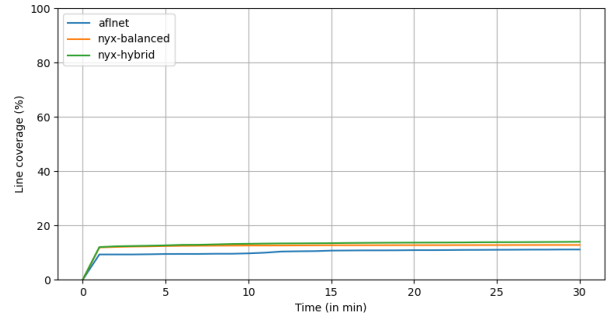
شاخص بعدی ارزیابی پوشش کد می باشد که بر مبنای تعداد خط کد ارزیابی انجام می‌شود. این مقادیر با ابزارهایی مانند gcov قابل بدست آوردن است. جدول ۲ مقادیر عددی برای این شاخص ارزیابی را نشان می‌دهد.

| NyxNet-Hybrid | | NyxNet-Balanced | | AFLNet | |
|---|---|---|---|---|---|
| 4526 | +1.95 | 4407 | -0.7 | 4439 | dcmtk |
| 1753 | +28.89 | 1606 | +18 | 1361 | dnsmasq |

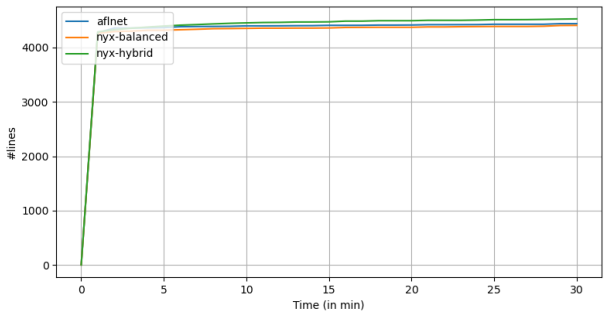
جدول ۲. مقایسه عددی پوشش خط کد

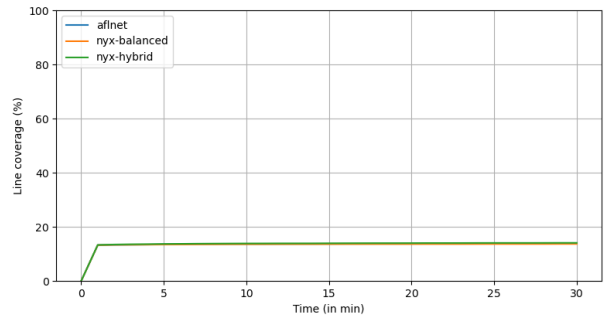
با توجه به شاخص پوشش شاخه که یکی از معیارهای مهم در ارزیابی کیفیت فرایند آزمون نرم‌افزار می‌باشد، از نظر مثبت و منفی بودن خروجی، مفهوم کلی به دست آمده از جدول ۲ و جدول ۱ شبیه به یکدیگر است، اما از نظر عددی مقادیر دو جدول تفاوت‌هایی دارند. همچنان عملکرد نسبتاً ضعیف فازرها در هدف آزمون dcmtk با وجود پیچیدگی‌های خاص این برنامه قابل مشاهده است. با این وجود، فازینگ ترکیبی توانسته است تعداد ۸۷ خط کد بیشتری را در طی زمان ۳۰ دقیقه پوشش دهد که خود نشان‌دهنده بهبود نسبی در فرایند آزمون فازینگ ترکیبی می‌باشد. اما این اعداد در هدف آزمون dnsmasq به مراتب بیشتر بوده و فازینگ ترکیبی توانسته است تا نزدیک به ۴۰۰ خط کد بیشتری را نسبت به سایر فازرها پوشش دهد در شکل ۱۱ و ۱۲ نیز می توان نمودار پوشش خط کد هر دو سرویس تحت آزمون را مشاهده کرد.




**شکل۱۱. پوشش خط کد سرویس dnsmasq**




**شکل۱۲. پوشش خط کد سرویس dcmtk**

با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی فازینگ ترکیبی با استفاده از ابزارهای DynamoRIO و Triton [19] توانسته است منجر به بهبود فرآیند فازینگ شود. البته این بهبود در تمامی موارد یکسان نبوده و بستگی به شرایط و ویژگی های برنامه مورد آزمایش داشته است. در آزمون های انجام شده روی برنامه dcmtk، اگرچه شاهد بهبود چشمگیری در معیارهای ارزیابی مانند پوشش کد و پوشش شاخه نبوده ایم، اما با این حال نتایج حاکی از آن است که فازینگ ترکیبی توانسته به نحوی شرایط را بهبود بخشد. از آنجایی که dcmtk یک برنامه پیچیده با ویژگی های خاص خود می باشد، احتمالا پیاده سازی فازینگ ترکیبی و اجرای نمادین برای آن

دشوارتر بوده است. اما در آزمون های انجام شده روی برنامه dnsmasq شاهد بهبود قابل توجهی در معیارهای ارزیابی بودیم که نشان دهنده تاثیر مثبت روش پیشنهادی می باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که میزان بهبود حاصل از فازینگ ترکیبی بستگی به ویژگی ها و پیچیدگی برنامه موردنظر دارد.

علیرغم چالش های موجود در پیاده سازی این روش، با توجه به نتایج به دست آمده، به نظر می رسد از لحاظ صرفه جویی در زمان نتایج رضایت بخشی حاصل شده است. همچنین با بهینه سازی بیشتر در پیاده سازی، امکان ارتقای نتایج وجود دارد. در مجموع این پژوهش نشان داد که فازینگ ترکیبی می‌تواند گزینه مناسبی برای بهبود فرآیند فازینگ پروتکل های شبکه باشد و مسیر مناسبی را برای پژوهش های آتی در این حوزه هموار نماید.

## ۶. چالش های فرارو و پیشنهادها

در این پژوهش سعی شده است تا اخرین و جدیدترین مقالات مرتبط با فازینگ ترکیبی پروتکل های شبکه مطالعه شود و بهترین راهکارهای موجود نیز مورد بررسی قرار گیرند. از آنجایی که تاکنون چنین پیاده سازی جامعی صورت نگرفته است، لذا باید بهترین روش از میان راهکارهای موجود انتخاب شود تا بتوان از آن برای رسیدن به اهداف مورد نظر بهره برد. البته پیاده‌سازی‌های موجود تمرکز بیشتری بر روی فرایند فازینگ فایل‌ها داشته‌اند و کمتر با دید شبکه‌ای صورت گرفته‌اند. همان‌طور که در ارزیابی‌های انجام شده مشخص است، آنها در کنار فاکتورهای مربوط به فازینگ فایل، تنها بر اساس همان معیارها ارزیابی و پیش‌رفته‌اند. با این حال، کدمنبع تمامی آنها بررسی و در برخی موارد اصلاح شد تا امکان‌سنجی استفاده از آن‌ها در این پژوهش فراهم شود.

اما این پژوهش تلاش کرده است مسیر جدیدی را طی کند و با تمرکز بر پروتکل‌های شبکه، پیاده‌سازی اختصاصی متناسب با نیازهای فازینگ شبکه انجام دهد. دو ابزار Triton و DynamoRIO که بهترین در حوزه کاری خود هستند، مورد استفاده قرار گرفتند تا بهترین عملکرد و خروجی حاصل شود که خوشبختانه چنین هم شد. پس از پیاده‌سازی، ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که انتخاب زیرساخت مناسب و همچنین تکنیک فازینگ ترکیبی، همچنان فرایند فازینگ پروتکل‌های شبکه را بهبود می‌بخشند. بنابراین می‌توان از این تکنیک برای فازینگ پروتکل‌های شبکه بهره برد.

از جمله چالش‌ها و محدودیت‌های پیش‌روی فازینگ ترکیبی پروتکل‌های شبکه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- پیاده‌سازی توابع بیشتر به صورت نمادین در SE که می‌تواند دقت بیشتر و همچنین سربار محاسباتی کمتری را به همراه داشته باشد.
- استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای الویت بندی و انتخاب مناسب‌ترین داده‌های ورودی و پرهیز از انفجار مسیرها در بخش SE

به نظر می‌رسد با پیگیری این موارد در تحقیقات آتی، بتوان چالش‌های فازینگ ترکیبی پروتکل‌های شبکه را به طور مؤثری مدیریت کرد.

## ۶. مراجع


[1] Cui, Lei, Jiancong Cui, Zhiyu Hao, Lun Li, Zhenquan Ding, and Yongji Liu. "An empirical study of vulnerability discovery methods over the past ten years." Computers & Security, 2022.

[2] M. Zalewski, “American fuzzy lop - a security-oriented fuzzer”.

[3] F. Rustamov, J. Kim, J. Yu, and J. Yun, “Exploratory review of hybrid fuzzing for automated vulnerability detection,” IEEE Access, vol. 9, pp. 131166–131190, 2021.

[4] S. Zhou, Z. Yang, D. Qiao, P. Liu, M. Yang, Z. Wang, and C. Wu, “Ferry:{StateAware} symbolic execution for exploring {State-Dependent} program paths,” in 31st USENIX Security Symposium (USENIX Security 22), pp. 4365–4382, 2022.

[5] V.-T. Pham, M. Böhme, and A. Roychoudhury, “Aflnet: a greybox fuzzer for network protocols,” in 2020 IEEE 13th International Conference on Software Testing, Validation and Verification (ICST), pp. 460–465, IEEE, 2020.

[6] S. Schumilo, C. Aschermann, A. Abbasi, S. Wörner, and T. Holz, “Nyx: Greybox hypervisor fuzzing using fast snapshots and affne types,” in 30th USENIX Security Symposium (USENIX Security 21), pp. 2597–2614, 2021.

[7] S. Schumilo, C. Aschermann, A. Jemmett, A. Abbasi, and T. Holz, “Nyx-net: network fuzzing with incremental snapshots,” in Proceedings of the Seventeenth European Conference on Computer Systems, pp. 166–180, 2022.

[8] J. Li, S. Li, G. Sun, T. Chen, and H. Yu, “Snpsfuzzer: A fast greybox fuzzer for stateful network protocols using snapshots,” IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 17, pp. 2673–2687, 2022.

[9] R. Natella, “Stateafl: Greybox fuzzing for stateful network servers,” Empirical Software Engineering, vol. 27, no. 7, p. 191, 2022و.

[10] J. Ba, M. Böhme, Z. Mirzamomen, and A. Roychoudhury, “Stateful greybox fuzzing,” in

Distributed System Security Symposium, Internet Society, 2021.
[17] L. Borzacchiello, E. Coppa, and C. Demetrescu, “Fuzzolic: Mixing fuzzing and concolic execution,” Computers & Security, vol. 108, p. 102368, 2021.
[18] D. Bruening and T. Garnett, “Building dynamic instrumentation tools with dynamorio,” in Proc. Int. Conf. IEEE/ACM Code Generation and Optimi zation (CGO), Shen Zhen, China, 2013.
[19] F. Saudel and J. Salwan, “Triton: A dynamic symbolic execution framework,” in Symposium sur la sécurité des technologies de l’information et des communications, SSTIC, France, Rennes, pp. 31–54, 2015.
31st USENIX Security Symposium (USENIX Security 22), pp. 3255– 3272, 2022.
[11] C. Aschermann, S. Schumilo, A. Abbasi, and T. Holz, “Ijon: Exploring deep state spaces via fuzzing,” in 2020 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), pp. 1597–1612, IEEE, 2020.
[12] Y. Shoshitaishvili, R. Wang, C. Salls, N. Stephens, M. Polino, A. Dutcher, J. Grosen, S. Feng, C. Hauser, C. Kruegel, and G. Vigna, “SoK: (State of) The Art of War: Offensive Techniques in Binary Analysis,” in IEEE Symposium on Security and Privacy, 2016.
[13] V. Chipounov, V. Kuznetsov, and G. Candea, “S2e: A platform for in-vivo multipath analysis of software systems,” Acm Sigplan Notices, vol. 46, no. 3, pp. 265–278, 2011.
[14] I. Yun, S. Lee, M. Xu, Y. Jang, and T. Kim, “{QSYM}: A practical concolic execution engine tailored for hybrid fuzzing,” in 27th USENIX Security Symposium (USENIX Security 18), pp. 745–761, 2018.
[15] S. Poeplau and A. Francillon, “Symbolic execution with {SymCC}: Don’t interpret, compile!” in 29th USENIX Security Symposium (USENIX Security 20), pp. 181– 198, 2020.
[16] S. Poeplau and A. Francillon, “Symqemu: Compilation-based symbolic execution for binaries,” in NDSS 2021, Network and

# Improving Code Coverage Metrics for Discovering Vulnerabilities in Stateful Network Protocols using Hybrid Fuzzing

***Abstract*:**
Fuzzing software is a method for finding security vulnerabilities in applications. In this method, by sending random data to the program, attempts are made to find cases that lead to undesirable behaviors and errors such as memory corruption or unauthorized access. One of the proposed methods for improving and enhancing fuzzing is the use of symbolic analysis and dynamic-symbolic execution. In this method, in addition to generating random data, logical analysis of the program and its symbolic execution are used to generate data that can cover new paths in program execution. In this research, we have shown that the dynamic-symbolic execution method can be used for fuzzing network protocols and also improve this process. For this purpose, the first framework for hybrid fuzzing of network protocols has been designed and implemented. The results on two services dcmtk and dnsmasq show that hybrid fuzzing performs better in terms of code coverage compared to traditional fuzzing. Branch coverage in the dcmtk service improved by 2.71 percent compared to AFLNet, which was able to make the negative performance of NyxNet compared to AFLNet positive. Also, branch coverage in the dnsmasq service improved by 37.72 percent compared to AFLNet and by 11.82 percent compared to NyxNet.

***Keywords*:** Fuzz Testing, Network Protocol Testing, Vulnerabilities, Symbolic Execution, Concolic Execution