

SAFE SENSE

sense your safety



راهکار هوشمند پایش سلامت سازه‌ها
دستاوردی دانش‌بنیان از دانشگاه صنعتی شریف



امنیت اجتماعی-اقتصادی در گرو ایمنی پل‌ها

آیا سازه موجود همچنان ایمن است؟ این سوالی است که پس از گذشت سال‌ها از احداث یک سازه و یا پس از یک رویداد شدید مانند زلزله ذهن مسؤولان و شهروندان زیادی را به خود جلب می‌کند. در شرایط کنونی، پل‌ها نقش به‌سزایی در تسهیل عبور و مرور و ترانزیت کالاها برعهده دارند. بنابراین، خرابی و یا از کارافتادگی آن‌ها می‌تواند خسارت‌های جانی و مالی غیرقابل جبرانی را به همراه داشته باشد. این موضوع زمانی اهمیت بیشتری می‌یابد که بدانیم عمر بسیاری از پل‌ها در ایران از عمر اسمی آن‌ها فراتر رفته و به دلیل شرایط محیطی دچار زوال نیز شده‌اند. این زوال در اثر عواملی مانند خستگی، خوردگی آرماتورها، خوردگی اسکلت فلزی پل و شکست اتصالات روی می‌دهد. به عنوان مثال در شکل ۱ آرماتورهای پایه پل دچار خوردگی شده‌اند که این می‌تواند باعث افت عملکرد سازه و یا حتی فروپاشی آن گردد. همچنین این خرابی‌ها می‌توانند در طول زمان گسترش یابند و یا در هنگام وقوع زلزله‌های بعدی، منشا آسیب شدید و عدم سرویس‌دهی پل‌ها برای مدت زمانی طولانی باشند.

در حال حاضر، تشخیص بصری اصلی‌ترین روش پایش سلامت پل‌هاست، اما به دلیل فراوانی زیاد، گستردگی جغرافیایی و عدم دسترسی به برخی از پل‌ها به‌خصوص پل‌های شبکه ریلی، روش تشخیص بصری نیازمند صرف هزینه و به‌کارگیری نیروی انسانی زیادی است. علاوه بر آن، بسیاری از خرابی‌ها مشهود نیستند و برای بررسی آن‌ها نیاز به انجام بازرسی‌های مخرب است. بنابراین، روش ارزیابی بصری زمان‌بر و نیازمند بررسی‌های دوره‌ای است. همچنین تشخیص اینکه این خرابی‌های قابل رویت تا چه میزان رفتار سازه را تغییر داده‌اند و آیا می‌توانند باعث ایجاد خسارت گردند یا خیر، نیازمند یک قضاوت مهندسی است که نتایج به‌دست آمده را با عدم قطعیت زیادی همراه می‌سازد. برای مثال در اوت ۲۰۲۰، در عرشه پل رزولت ایالت فلوریدای آمریکا که در سمت راست شکل ۱ نشان داده شده است، ترکی به‌وجود آمد. تصمیم‌گیری در رابطه با بستن جریان ترافیک این پل باعث ایجاد اختلاف شدید در بین مسؤولان و بهره‌برداران شد، زیرا از یک طرف گسترش ترک می‌توانست باعث ایجاد یک خرابی شدید و تلفات جانی گردد و از طرف دیگر مسدود کردن پل، تبعات اجتماعی-اقتصادی شدیدی را به دنبال داشت. این در حالی است که می‌توان با استفاده از ثبت ارتعاشات پل‌ها توسط حسگرهای شتاب‌سنج و کرنش‌سنج، پایش سلامت پل‌ها را در کوتاه‌ترین زمان، به‌صورت پیوسته و با قابلیت اطمینان بالا انجام داد.



شکل ۱: آسیب سازه‌ای

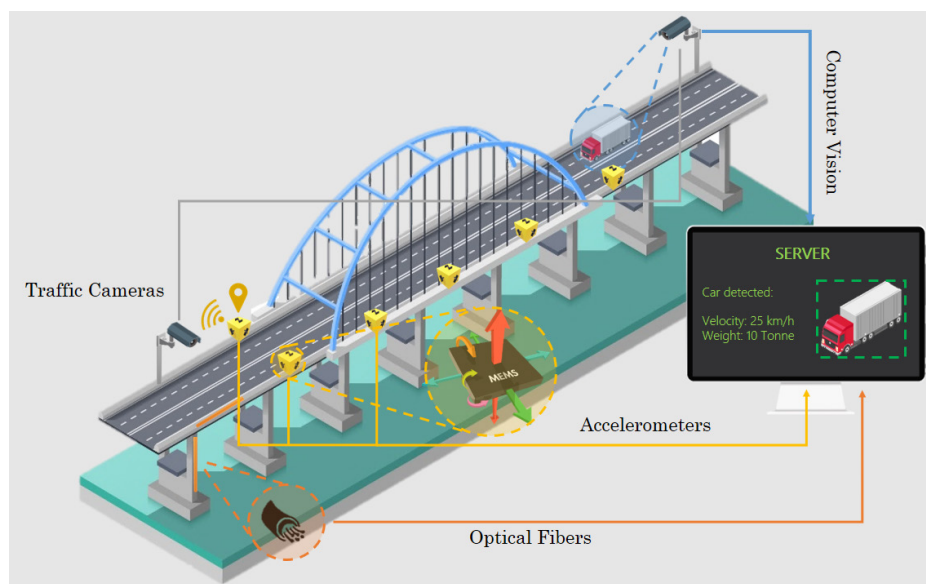
راهکار ما

Safesense با تجهیز پل‌ها به حسگرهای شتاب‌سنج و حسگرهای تار نوری به همراه شبیه‌سازی پل‌ها با مدل‌های پیشرفته دینامیکی و بهره‌گیری از روش‌های روز شناسایی سیستم و هوش مصنوعی، به‌صورت پیوسته وضعیت سلامت آن‌ها را پایش می‌کند. شکل ۲ شمایی از این راهکار را نمایش می‌دهد. در این راهکار، سلامت پل‌ها با تلفیق سه فناوری به شرح زیر پایش می‌شود:

۱. پردازش سیگنال‌های ارتعاشی به‌دست‌آمده از حسگرهای شتاب‌سنج جانمایی شده روی پل با استفاده از روش‌های شناسایی سیستم و هوش مصنوعی

۲. پردازش هم‌زمان تصاویر ثبت‌شده توسط دوربین‌های فیلم‌برداری با به‌کارگیری الگوریتم‌های بینایی ماشین برای تشخیص محل،

سرعت و وزن خودروهای عبوری به منظور کمی سازی بارگذاری دینامیکی پل
۳. پردازش سیگنال های حسگرهای تار نوری به منظور اندازه گیری کرنش در مقاطع حساس پل
با استفاده از این راهکار، پل ها همواره در یک سطح ایمن و رضایت بخش عملکردی نگاه داشته خواهند شد. تشخیص زود هنگام آسیب
سازه پل و در دست داشتن اطلاعاتی دقیق از شدت آن می تواند از وقفه در فرآیند بهره برداری از پل جلوگیری کند و طول دوره بازیابی
سازه آسیب دیده را کاهش دهد.



شکل ۲: راهکار Safesense در یک نگاه

شناسایی وسایل نقلیه

بخش اول راهکار Safesense برای پایش سلامت پل ها، شناسایی وسایل نقلیه بر اساس تصاویر ویدئویی دوربین های مستقر روی پل
است. در هر تصویر به صورت جداگانه وسایل نقلیه و محل آن ها در تصویر و ابعاد هر کدام استخراج می شود. به منظور نگاشت شناسایی های
مختلف در تصاویر مختلف دریافتی از روشی مبتنی بر فیلتر کالمن استفاده می شود که به وسیله آن هر وسیله نقلیه در فریم های مختلف
ردیابی می شود. در ادامه نوع هر وسیله نقلیه، اعم از سبک یا سنگین، توسط روش های یادگیری عمیق استخراج می شود تا به کمک آن
بتوان اطلاعات مورد نیاز را از پایگاه داده ای که از قبل ایجاد شده است، بدست آورد. در نهایت به کمک روش کالیبراسیون خودکار، نگاشت
میان تصویر دوربین و دنیای واقعی انجام و با استفاده از آن، سرعت هر وسیله نقلیه محاسبه می شود. برای همگام سازی اطلاعات ورودی
تصویری با دیگر اطلاعات خروجی و ورودی از حسگرهای دیگر از یک سازوکار بر مبنای GPS برای هر دوربین استفاده می شود که طی
آن، زمان با دقتی در حد نانو ثانیه از ماهواره دریافت شده و برای همگام سازی مورد استفاده قرار می گیرد.



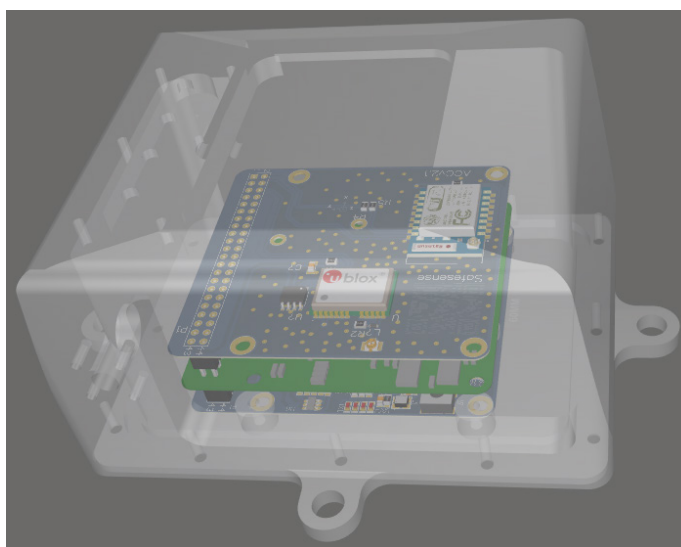
شکل ۳: شناسایی وسایل نقلیه

حسگر بومی شتاب‌سنج

حسگرهای شتاب‌سنج به صورت بومی توسط تیم Safesense طراحی و ساخته می‌شوند. این حسگرها از نظر دقت و سطح نویز رقیبی جدی برای محصولات خارجی محسوب می‌شوند و هزینه تمام‌شده بسیار پایین‌تری دارند. حسگر ساخته شده دارای دو قابلیت در اجرای اندازه‌گیری است. در حالت اندازه‌گیری موقت پل، این حسگر نیازی به کابل کشی برق و داده ندارد. در این حالت، تامین توان حسگر از طریق باتری خارجی صورت می‌گیرد و ارتباط حسگر با سرور محلی به صورت بی‌سیم و مبتنی بر WiFi است. برای بهره‌مندی حداکثری از قابلیت بی‌سیم، همگام‌سازی حسگرها و دوربین با یک ماژول GPS خارجی صورت می‌گیرد. در حالت نصب دائم حسگر بر روی پل، به منظور افزایش پایداری سیستم در طول زمان، امکان تامین توان و ارتباط با حسگر از طریق کابل شبکه و POE فراهم شده است. این حسگر دارای قابلیت ذخیره‌سازی داده‌های ثبت شده بر روی حافظه SD و تامین توان از باتری در حالت اضطراری، مثلاً در صورت قطع برق است. این قابلیت امکان ثبت داده در شرایط بحران مانند وقوع زلزله را فراهم می‌کند. جدول ۱ مشخصات فنی حسگر و شکل ۴

جدول ۱: مشخصات فنی حسگر شتاب‌سنج

قابلیت‌ها	جزئیات
ثبت و آشکارسازی لرزش‌های بسیار کوچک سازه در اثر تحریک‌های محیطی مانند باد و ترافیک و تحریک‌های قوی مانند زلزله و طوفان	تعداد محورها: ۳ خروجی: دیجیتال (RJ45) چگالی نویز: کمتر از $20\mu g/\sqrt{Hz}$ محدوده دینامیکی: بیش از 95 dB تامین توان: PoE، پورت پاور با قابلیت تامین توان از طریق باتری اضطراری
ایجاد شبکه حسگر بر روی LAN	حداکثر فاصله‌ی مجاز: تا ۲۰۰ متر بر روی LAN
ایجاد شبکه حسگر بی‌سیم	حداکثر فاصله مجاز: تا ۲۰۰ متر در فضای آزاد و دید مستقیم پروتکل: WiFi 2.4 GHz قابلیت همگام‌سازی با زمان ماژول GPS خارجی
همزمانی دریافت داده‌ها	از طریق ماژول خارجی GPS در هر حسگر



شکل ۴: حسگر شتاب‌سنج

حسگر تار نوری

حسگرهای تار نوری میزان کرنش دینامیکی وارد شده به پل را بر اساس تغییر طول تار نوری و به تبع آن، تغییر طول موج شعاع نور ثبت می‌کنند. ثبت این سیگنال‌های کرنش در مواضع آسیب‌پذیر پل و پردازش آن‌ها به همراه شتاب‌های وارده به پل تخمین دقیق‌تری را از آسیب وارده به پل بدست می‌دهد. مشخصات حسگر مورد استفاده در راهکار پیشنهادی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات حسگر تار نوری

قابلیت	جزئیات
طول حسگر	۲۵ سانتی متر تا ۱۰ متر
محدوده اندازه‌گیری کرنش	۱ تا ۵۰۰ میکرواسترین
دقت اندازه‌گیری	۰/۲٪ میکرواسترین
نرخ داده‌برداری	۵۰۰ هرتز

بازارسنجی

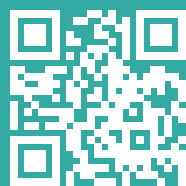
به منظور تجاری‌سازی راهکار توسعه داده شده، بخش‌های مختلف مشتریان در حوزه پل شناسایی و بر اساس بوم مدل کسب و کار، جریان درآمدی و ساختار هزینه مربوط به هر کدام از این بخش‌ها مشخص شده‌اند. با استفاده از این مدل، دید جامعی نسبت به فرآیندهای اجرایی و ساختار عملکرد اقتصادی و تجاری طرح به دست آمده است. شکل ۵ بوم مدل کسب و کار را نمایش می‌دهد.



شکل ۵: بوم کسب و کار

اطلاعات بیشتر

جهت کسب اطلاعات بیشتر و آشنایی با تیم Safesense می‌توانید به safesense.ir مراجعه نمایید.



w w w . s a f e s e n s e . i r