



Design of A Multi-epitope Vaccine Candidate against Q Fever based on the Outer Membrane Proteins OMP1 and LolB: An Immunoinformatic Study

Hamid Vaez ^{1,2*} , Ladan Shahrakimojehed ³

¹ Department of Microbiology, School of Medicine, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran

² Pediatric Gastroenterology and Hepatology Research Center, Zabol University of Medical Sciences, Zabol, Iran

³ Veterinary organization, Sistan and Baluchistan, Zabol, Iran

Abstract

Background: Q fever—caused by *Coxiella burnetii*—is a zoonotic disease reported worldwide. It can cause severe complications in the host, manifesting with conditions such as liver, heart, and vascular failure, pneumonia, and long-term chronic fatigue. Given the significant impact of *C. burnetii* on public health and the limitations of previously designed vaccines, this study aimed to design a Q fever vaccine based on *C. burnetii* outer membrane proteins using bioinformatics methods.

Materials and Methods: Epitopes that stimulate B- and T-lymphocytes were identified using the ABCpred and IEDB servers. After evaluating various properties—such as non-toxicity (ToxinPred server), lack of allergenicity (AllerTOP server), and immunogenicity (VaxiJen server)—a recombinant vaccine was designed. The characteristics of the vaccine candidate were evaluated using different servers (ProtParam, Solpro, PSIPRED, Cluspro, and C-ImmSim).

Results: Following comprehensive evaluations, three B-lymphocyte-stimulating epitopes and 17 T-lymphocyte-stimulating epitopes were selected for the OMP1 and LolB proteins, respectively. In addition, 17 and 9 T-lymphocyte-stimulating epitopes were identified for OMP1 and LolB, respectively. Various properties of the designed vaccine candidate, including physicochemical properties, secondary structure, expression levels, non-toxicity, and ability to elicit a positive immune system, were predicted.

Conclusion: Based on the computational findings of this study, the designed vaccine may effectively stimulate the immune system and provide immunity against Q fever. Further in vitro and in vivo studies are necessary to ensure the effectiveness and safety of the designed vaccine.

Keywords:

Q fever
Coxiella burnetii
Vaccine
OMP1
LolB

*Corresponding author

Hamid Vaez

h_vaez@zbmu.ac.ir

Received: 2026/05/17
Accepted: 2026/07/28





CrossMarck



10.66224/ismj.29.3.123

مقاله پژوهشی

طراحی کاندید واکسن چند اپی‌توپی علیه تب کیو بر پایه پروتئین‌های غشای خارجی OMP1 و LolB : یک مطالعه ایمنوآنفورماتیک

حمید واعظ^{۱*} ID، لادن شهرکی مجاهد^۳

^۱ گروه میکروپزشناسی، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران

^۲ مرکز تحقیقات گوارش و کبد کودکان، دانشگاه علوم پزشکی زابل، زابل، ایران

^۳ سازمان دامپزشکی، اداره دامپزشکی سیستان و بلوچستان، زابل، ایران

چکیده

زمینه: تب کیو (کوکسیلا بورتنتی)، بیماری مشترک بین انسان و حیوان است و می‌تواند مشکلات جدی مانند نارسایی‌های کبدی، قلبی و عروقی، پنومونی و خستگی‌های مزمن طولانی را در میزبان ایجاد کند. با توجه به تأثیر مهم کوکسیلا بورتنتی بر سلامت جامعه و محدودیت در استفاده از واکسن‌های طراحی شده قبلی، هدف از این مطالعه طراحی واکسن تب کیو بر اساس پروتئین‌های غشای خارجی کوکسیلا بورتنتی با استفاده از روش‌های بیوانفورماتیک بوده است.

مواد و روش‌ها: اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت‌های B و T پروتئین‌های OMP1 و LolB با استفاده از سرورهای IEDB و ABCpred شناسایی شد. پس از ارزیابی ویژگی‌های مختلف مانند عدم سمیت (سرور ToxinPred)، عدم ایجاد آلرژی (سرور AllerTOP) و توانایی تحریک سیستم ایمنی (سرور VaxiJen)، اپی‌توپ‌های نهایی انتخاب و کاندید واکسن نو ترکیب طراحی شد. ویژگی‌های کاندید واکسن طراحی شده با استفاده از سرورهای مختلف (Cluspro، PSIPRED، Solpro، ProtParam و C-ImmSim) ارزیابی شد.

یافته‌ها: در نهایت، برای پروتئین OMP1، ۳ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت B و ۱۷ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت T شناسایی شد. همچنین ۱ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت B و ۹ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت T برای پروتئین LolB شناسایی شد. ویژگی‌های مختلف کاندید واکسن طراحی شده مانند ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، ساختار ثانویه، عدم سمیت و توانایی تحریک سیستم ایمنی مثبت پیش بینی شد.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج محاسباتی مطالعه حاضر، کاندید واکسن طراحی شده ممکن است به خوبی سیستم ایمنی را تحریک و موجب ایمنی در برابر بیماری تب کیو شود. جهت اطمینان از اثربخشی و ایمن بودن کاندید واکسن طراحی شده مطالعات تکمیلی در شرایط آزمایشگاهی و بدن موجود زنده ضروری است.

پیام کلیدی: پروتئین‌های غشای خارجی OMP1 و LolB حامل اپی‌توپ‌های تحریک کننده سیستم ایمنی هستند و می‌توانند به عنوان کاندید مناسبی برای تهیه واکسن ضد تب کیو مورد استفاده قرار بگیرند.

واژگان کلیدی

تب کیو
کوکسیلا بورتنتی
واکسن
OMP1
LolB

*نویسنده مسئول

حمید واعظ

h_vaez@zbmu.ac.ir



دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۷
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

مقدمه

باکتری گرم منفی و درون سلولی کوکسیلا بورنتی (عامل بیماری تب کیو) برای اولین بار در اوایل قرن بیستم در کارگران کشتارگاهی در استرالیا شناسایی شد (۱). تب کیو (بیماری مشترک بین انسان و حیوان) از سراسر دنیا گزارش شده است. این باکتری در حیوانات مختلفی مانند پرندگان، گاو، گوسفند، سگ، گربه و بز وجود دارد و انسان از طریق استنشاق آئروسول و یا مصرف غذای آلوده به بیماری مبتلا می‌شود. بیماری تب کیو می‌تواند مشکلات جدی را در میزبان ایجاد کند و همراه علائمی مانند نارسایی‌های کبدی، قلبی، عروقی، پنومونی و خستگی‌های مزمن طولانی مدت بروز کند، به همین دلیل کوکسیلا بورنتی توسط مرکز کنترل بیماری‌های آمریکا به عنوان یک سلاح مهم بیولوژیک طبقه‌بندی شده است (۲). کوکسیلا بورنتی در خانم‌های باردار جفت را آلوده می‌کند و با تحریک سیستم ایمنی موجب تخریب آن و در نتیجه زایمان زودرس، تولد نوزاد نارس، سقط جنین و حتی مرگ نوزاد می‌شود. تب کیو در دامپزشکی نیز اهمیت بسیاری دارد زیرا می‌تواند موجب سقط جنین و زیان‌های اقتصادی فراوان در صنعت دامداری شود (۲ و ۳).

کوکسیلا بورنتی چرخه زندگی منحصر به فردی دارد و در طبیعت به دو شکل سلول‌های بزرگ (LCV: Large Cell Variant) و سلول‌های کوچک (SCV: Small Cell Variant) دیده می‌شود. اشکال LCV از نظر متابولیسمی فعال هستند، غشای خارجی و لیپوپلی ساکارید کامل دارند و به شرایط محیطی حساس هستند، در حالی‌که اشکال SCV این ویژگی‌ها را ندارند و در برابر شرایط نامساعد محیطی نیز مقاوم هستند. کوکسیلا بورنتی دچار تغییرات فازی می‌شود (فاز یک و دو). در فاز یک به دلیل داشتن لیپوپلی ساکارید کامل، قدرت بیماری‌زایی بالایی دارد، در حالی‌که با جهش در لیپوپلی ساکارید، باکتری به فاز دو که قدرت

بیماری‌زایی آن به شدت کاهش یافته، تبدیل می‌شود (۴).

به دلیل نیاز به داروهای متعدد و زمان درمان طولانی، واکسیناسیون می‌تواند نقش مهمی در کنترل و پیشگیری بیماری تب کیو ایفا کند. واکسن تهیه شده از کوکسیلا بورنتی غیر فعال شده فاز یک (Coxevac®) به‌عنوان تنها واکسن تأیید شده در بازار، در دسترس عموم قرار دارد محدودیت‌هایی مانند نیاز به تزریقات یادآور مکرر، واکنش‌های متفاوت در نژادهای مختلف و همچنین ایجاد اثرات جانبی ناخواسته، استفاده از این واکسن را محدود کرده است (۵ و ۶).

امروزه گسترش روش‌های بیوانفورماتیک و ژنتیک تحولی بنیادی در نگرش دانشمندان نسبت به چگونگی تعامل میزبان با میکروارگانیسم‌ها و همچنین طراحی واکسن برای پیشگیری از بیماری‌های عفونی ایجاد کرده است. یکی از این روش‌ها واکسیناسیون معکوس است، در این روش پروتئین‌ها و نواحی مختلف آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و قسمت‌هایی که توانایی بیشتری در تحریک سیستم ایمنی دارند (اپی‌توپ) انتخاب و معرفی می‌شوند (۷ و ۸). با توجه به گسترش روش‌های تعیین توالی و پایگاه‌های اطلاعاتی مختلف، نقش و عملکرد ژن‌های مختلف کوکسیلا بورنتی در ایجاد بیماری مشخص شده است (۹). به عنوان مثال نتایج مطالعات نشان داده است که پروتئین‌های غشای خارجی کوکسیلا بورنتی نقش بسیار مهمی در تحریک سیستم ایمنی دارند (۹ و ۱۰). پروتئین‌های غشای خارجی OMP1 و LolB از مهم‌ترین این پروتئین‌ها بوده و در حفظ ساختار باکتری، مقاومت در برابر سیستم ایمنی میزبان و تحریک سیستم ایمنی نقش مهمی ایفا می‌کنند (۹ و ۱۰). با توجه به تأثیر مهم کوکسیلا بورنتی بر سلامت جامعه و محدودیت در استفاده از واکسن‌های طراحی شده قبلی، هدف از این مطالعه

طراحی کاندید واکسن تب کیو بر اساس پروتئین‌های غشای خارجی OMP1 و LolB کوکسیلا بورنتی با استفاده از روش‌های بیوانفورماتیک است.

مواد و روش‌ها

توالی FASTA پروتئین OMP1 (شماره دسترسی Q83EK8.2) و پروتئین LolB (شماره دسترسی Q83AQ2.1)، سویه مرجع *Coxiella burnetii* strain RSA 493، از پایگاه اینترنتی NCBI به نشانی ([https:// www.ncbi. nlm. nih. gov/](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/)) دانلود شد. همچنین توالی ژن‌های بتا دفن‌سین ۲ (PDB ID:1FD3) و بتا دفن‌سین ۳ (PDB ID:1KJ6) از پایگاه اینترنتی PDB به آدرس ([https:// www. rcsb. org](https://www.rcsb.org/)) دانلود شد. ژن‌های بتا دفن‌سین به‌عنوان یاور (ادجوانت) عمل کرده و با تحریک سیستم ایمنی اثر بخشی واکسن را افزایش می‌دهند.

ارزیابی اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت B

برای اثربخشی واکسن، توانایی تحریک لنفوسیت‌های B و T توسط اپی‌توپ‌های مورد نظر ضروری است. به همین منظور برای شناسایی اپی‌توپ‌های خطی تحریک کننده لنفوسیت B از سرورهای IEDB و ABCpred به نشانی (<https://www.iedb.org/>) و ([http://crdd. osdd. net/](http://crdd.osdd.net/)) استفاده شد. از تنظیمات پیش فرض سرورها برای شناسایی اپی‌توپ‌ها استفاده شد. سرور ABCpred با استفاده از شبکه‌بندی مصنوعی (Artificial Neural Network) ANN و سرور RNN (Recurrent Neural Network) اپی‌توپ‌ها را شناسایی و امتیازدهی می‌کند. در سرور IEDB با در نظر گرفتن ویژگی‌های اسیدهای آمینه احتمال واکنش قسمت‌های مختلف پروتئین با سیستم ایمنی بررسی می‌شود (۱۱ و ۱۲). پس از ارزیابی اولیه، نتایج حاصل از دو سرور باهم مقایسه و توالی‌هایی که بیشترین

همپوشانی و امتیاز را داشتند برای ادامه کار انتخاب شدند.

ارزیابی اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت T

به منظور تحریک سیستم ایمنی توسط واکسن، وجود اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت‌های T (CTL و HTL) ضروری است. به همین منظور توانایی اتصال اپی‌توپ‌های پروتئین‌های غشای خارجی مورد ارزیابی به MHC کلاس یک و دو با استفاده از سرور TepiTool به نشانی اینترنتی (<https://tools.iedb.org/tepitool>) مورد ارزیابی قرار گرفت. برای شناسایی اپی‌توپ‌ها از تنظیمات پیش فرض سرور استفاده شد. برای شناسایی اپی‌توپ‌های قوی‌تر واکنش دهنده با MHC کلاس یک و دو به‌ترتیب اپی‌توپ‌هایی که براساس امتیاز دهی سرور در گروه یک دهم درصد و پنج درصد قرار گرفتند انتخاب شدند. با توجه به وسعت ال‌های HLA به‌ترتیب از ۲۷ و ۲۶ ال HLA کلاس یک و دو که در بین جمعیت‌های مختلف انسانی بیشتری شیوع را دارند استفاده شد (۱۳).

ارزیابی حساسیت‌زایی، سمیت و توانایی تحریک سیستم ایمنی در اپی‌توپ‌های انتخاب شده

به منظور پیشگیری از واکنش‌های ناخواسته در میزبان، اپی‌توپ‌های مورد استفاده در طراحی واکسن علاوه بر توانایی تحریک سیستم ایمنی باید از نظر حساسیت‌زایی و سمیت نیز مورد ارزیابی قرار بگیرند. به همین منظور برای ارزیابی حساسیت‌زایی و سمیت اپی‌توپ‌ها به‌ترتیب از سرورهای AllerTOP و ToxinPred به نشانی ([https:// www. ddg- pharm fac. net](https://www.ddg-pharmfac.net/)) و (<https://webs.iitd.edu.in/raghava/toxinpr/>) ed/ استفاده شد (۱۴ و ۱۵). برای اطمینان از توانایی تحریک سیستم ایمنی توسط اپی‌توپ‌های مورد بررسی از سرور VaxiJen به نشانی

پروتئین‌های انسانی به ترتیب با استفاده از سرورهای VaxiJen به نشانی <https://www.ddg-pharmfac.net> و Allergen FP به نشانی <http://ddg-pharmfac.net> و NCBI Blast به نشانی <https://blast.ncbi.nlm.nih.gov> مورد ارزیابی قرار گرفت. ویژگی‌های ساختاری پروتئین با استفاده از سرور ProtParam ([https:// web. expasy.org](https://web.expasy.org/ProtParam)) ارزیابی شد. در سرور ProtParam بسیاری از ویژگی‌های مهم پروتئین مانند وزن مولکولی، پی اچ ایزوالکتریک، نیمه عمر، میزان آبدوستی و پایداری پروتئین در برابر حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد (۱۷). یکی از ویژگی‌های مهم پروتئین که می‌تواند عملکرد آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد، حلالیت آن است. به همین منظور حلالیت کاندید واکسن طراحی شده با استفاده از سرور SOLpro (<http://scrat.ch.proteomics.ics.uci.edu/>) ارزیابی شد (۱۷).

ارزیابی ساختار دوم و سوم کاندید واکسن طراحی شده

برای تهیه ساختار دوم پروتئین از سرور SOPMA (<https://npsa-prabi.ibcp.fr/ml>) و PSIPRED (<http://bioinf.cs.ucl.ac.uk>) استفاده شد. در این سرورها با استفاده از توالی خطی اسیدهای آمینه ساختار دوم پروتئین و نواحی مختلف مانند صفحه بتا، آلفا هلیکس و نواحی نامنظم پیش‌بینی می‌شود. به منظور تهیه ساختار سوم پروتئین از سرور آلفافولد <https://alphafoldserver.com> استفاده شد. بهینه‌سازی ساختار سوم کاندید واکسن طراحی شده با استفاده از سرور GalaxyRefine به نشانی (<http://galaxy.seoklab>) انجام شد. در این سرور زنجیره‌های جانبی پروتئین ساخته می‌شود و با بررسی و حذف عواملی که موجب استرس و آشفتگی در ساختار نهایی پروتئین می‌شوند، ساختار بهینه می‌شود. همچنین به منظور کنترل کیفیت نهایی ساختار سوم از سرور ProSA به نشانی

<https://www.ddg-pharmfac.net> استفاده شد. در این سرور توالی اسیدهای آمینه با استفاده از الگوریتم‌های خاصی بررسی، مقایسه و امتیاز دهی می‌شوند. اپی‌توپ‌هایی که امتیاز بالاتر از ۰/۴ را کسب کردند برای ادامه کار انتخاب شدند.

طراحی واکسن نو ترکیب

با توجه به اینکه برای واکنش مناسب سیستم ایمنی در برابر کاندید واکسن طراحی شده در میزبان، اپی‌توپ نباید حساسیت‌زا و سمی باشد، پس از بررسی نتایج سرورهای مختلف و ویژگی‌هایی مانند سمیت، حساسیت‌زایی و توانایی تحریک سیستم ایمنی، اپی‌توپ‌های نهایی انتخاب شدند. به منظور طراحی واکسن نو ترکیب اپی‌توپ‌های انتخاب شده در مراحل قبل (لنفوسیت B و T) با استفاده از اتصال دهنده‌ها به یکدیگر وصل شدند. برای اتصال اپی‌توپ‌های مربوط به CTL، HTL و لنفوسیت B به ترتیب از اتصال دهنده‌های AAY، GPGPG و KK استفاده شد، همچنین برای اتصال پروتئین‌های بتا دفن‌سین (ادجوانت) از اتصال دهنده EAAAK استفاده شد. اتصال دهنده AAY باعث می‌شود شکست آنزیمی راحت‌تر انجام شود و فرایند فعال شدن لنفوسیت‌های T بهتر انجام شود. اتصال دهنده GPGPG موجب افزایش انعطاف‌پذیری پروتئین و افزایش عرضه آنتی ژن توسط MHC کلاس دو می‌شود. اتصال دهنده KK موجب عملکرد بهتر پروتئین‌های سلولی و عرضه بهتر اپی‌توپ‌ها در سطح پروتئین می‌شود. اتصال دهنده EAAAK ساختار محکمی دارد و از ایجاد واکنش‌های ناخواسته در پروتئین جلوگیری می‌کند (۱۶).

ارزیابی ویژگی‌های کاندید واکسن نو ترکیب طراحی شده

توانایی تحریک سیستم ایمنی و همچنین توانایی ایجاد حساسیت و شباهت واکسن طراحی شده با

تهیه شده با رسیپتور (HLA) میزان موفق بودن اتصال پیش‌بینی می‌شود (۲۳).

ارزیابی پاسخ سیستم ایمنی به کاندید واکسن طراحی شده

جهت ارزیابی تأثیر کاندید واکسن طراحی شده بر سیستم ایمنی از سرور C-ImmSim به نشانی <https://kraken.iac.rm.cnr.it/C-IMMSIM/index.php> استفاده شد. در این سرور پاسخ سیستم ایمنی خونی و سلولی با بررسی تولید سایتوکاین‌های مختلف، پاسخ سلول‌های لنفوسیتی مختلف (Th, PLB, LB) و CTL) و همچنین ماکروفاژها و سلول‌های دندریتیک ارزیابی می‌شود. برای بررسی تأثیر واکسن از تزریق سه بار واکسن به فاصله زمانی یک ماه استفاده شد (۲۴).

یافته‌ها

ارزیابی اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت B و T
در ارزیابی اولیه ۶ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت B، ۳۴ اپی‌توپ تحریک کننده CTL و ۸۰ اپی‌توپ تحریک کننده HTL برای پروتئین OMP1 شناسایی شد. پس از بررسی حساسیت‌زایی، سمیت و فعالیت آنتی‌ژن‌سیتی، ۳ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت B و ۱۷ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت T برای طراحی کاندید واکسن نو ترکیب انتخاب شدند. همچنین در ارزیابی اولیه برای پروتئین LolB، ۴ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت B و ۲۷ اپی‌توپ تحریک کننده CTL و ۶۶ اپی‌توپ تحریک کننده HTL شناسایی شد. پس از بررسی حساسیت‌زایی، سمیت و فعالیت آنتی‌ژن‌سیتی، ۱ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت B و ۹ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت T برای طراحی کاندید واکسن نو ترکیب انتخاب شدند (جدول ۱ و ۲).

https://prosa.services.came.sbg.ac.at/prosa.p_hp و <https://saves.mbi.ucla.edu> به نشانی UCLA از ابزارهای متنوعی مانند PROCHECK، ERRAT و نمودار Ramachandran برای تأیید کیفیت ساختار طراحی شده استفاده می‌شود. در نمودار Ramachandran زوایای اتصال اتم‌ها به یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت نواحی مطلوب شناسایی می‌شود (۱۸ و ۱۹). در سرور ProsA بر اساس میزان کل انرژی ساختار، خطاهای احتمالی (Z Score) شناسایی می‌شود (۱۸ و ۱۹).

کلونینگ کاندید واکسن طراحی شده

جهت تبدیل توالی پروتئین به نوکلئوتید از سرور Backtranseq به نشانی <https://www.ebi.ac.uk/Tools> استفاده شد (۲۰). با توجه به اهمیت وجود کدون مناسب برای بالا بردن میزان بیان ژن از سرور JCat به نشانی <http://www.jcat.de/> استفاده شد (۲۱). در نهایت با استفاده از نرم افزار SnapGene و پلاسمید (+) pET28a کلونینگ پروتئین طراحی شده انجام شد.

ارزیابی اتصال کاندید واکسن طراحی شده به HLA سیستم ایمنی

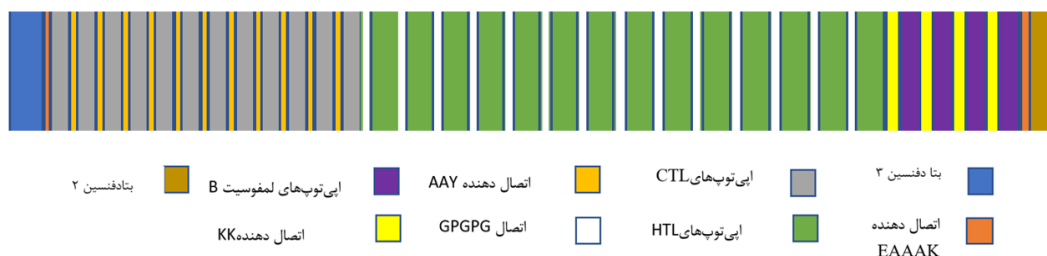
مولکولار داکینگ از روش‌های محاسباتی است که از آن برای مطالعه اتصال و واکنش لیگاند (دارو یا پروتئین) با رسیپتور استفاده می‌شود. نظر به اهمیت اتصال بهینه واکسن تهیه شده به HLA برای تحریک و ایجاد پاسخ سیستم ایمنی، از نرم‌افزار ClusPro برای شبیه‌سازی و اتصال کاندید واکسن تهیه شده با HLA-A-02:01 (PDB ID: 3TO2) استفاده شد (۲۲). همچنین برای ارزیابی عملکرد و پایداری کاندید واکسن تهیه شده از سرور iMODS به نشانی <https://imods.chaconlab.org> استفاده شد. در این سرور با ارزیابی انعطاف‌پذیری اتصال واکسن

جدول ۱. نتایج ارزیابی اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت B توسط سرورهای IEDB و ABCpred			
Q83EK8.2 (OMP1)		Q83AQ2.1 (Outer-membrane lipoprotein LolB)	
Peptide	Start	Peptide	Start
LGFGYKSYTYDQVGT	۴۰	IRGIPAPGAYQADFDT	۱۴۷
GVKAQYQYDNVRSVHI	۹۶		
APLVGSNYSYRTRLGS	۱۱۴		

جدول ۲. نتایج ارزیابی اپی‌توپ‌های تحریک کننده لنفوسیت T							
Q83EK8.2 (OMP1)	Vaxijen Score	سمیت	حساسیت	Q83AQ2.1 (LolB)	Vaxijen Score	سمیت	حساسیت
CTL				CTL			
RLNGGIAGI	۰/۸۸۷۲	منفی	منفی	EERSLRVRY	۲/۲۷۳۱	منفی	منفی
TTTKLAIGV	۰/۷۱۹۱	منفی	منفی	YTASTPEQL	۰/۵۱۸۱	منفی	منفی
RTRLGSHLT	۰/۴۴۵۱	منفی	منفی	AVKIVVKHW	۰/۴۶۹۰	منفی	منفی
IPMIDMNGF	۱/۰۰۱۷	منفی	منفی	RIHSSLDIY	۰/۹۴۴۵	منفی	منفی
DAPLVGSNY	۰/۸۹۰۰	منفی	منفی	QQSGWHIRF	۲/۴۰۱۷	منفی	منفی
KLAIGVSAL	۰/۶۹۶۴	منفی	منفی	HTL			
TAIGVSGTV	۰/۸۵۲۷	منفی	منفی	GWHIRFSQYTTVGSV	۱/۳۱۴۰	منفی	منفی
HTL				ISQWNIDGAFSIQQP	۰/۴۸۸۸	منفی	منفی
VKAQYQYDNVRSVHI	۱/۰۶۱۹	منفی	منفی	PAPGAYQADFDTYTH	۰/۶۴۳۰	منفی	منفی
LAGIKVNEANAVYLE	۰/۸۰۶۵	منفی	منفی	PRTLQLSNGSLAVKI	۰/۷۸۸۵	منفی	منفی
GYTFASDWWIAGVKA	۰/۶۹۹۱	منفی	منفی				
DWWIAGVKAQYQYDN	۰/۶۹۲۱	منفی	منفی				
NGGTVLSVLHPVSAS	۰/۴۶۱۳	منفی	منفی				
VSMKNRLNGGIAGIG	۰/۸۱۲۷	منفی	منفی				
DIPMIDMNGFHIGLG	۱/۳۸۳۶	منفی	منفی				
GTAIGVSGTVQNPKR	۰/۷۶۱۴	منفی	منفی				
SNYSYRTRLGSHLTA	۰/۷۷۷۰	منفی	منفی				
NPKRVAINGITATVN	۰/۷۲۴۷	منفی	منفی				

۱۴ اپی‌توپ HTL برای ساخت واکسن نو ترکیب حاوی ۶۰۹ اسید آمینه انتخاب شدند (شکل ۱ و پیوست).

طراحی کاندید واکسن نو ترکیب
پس از بررسی ویژگی‌هایی مانند سمیت، حساسیت‌زایی و توانایی تحریک سیستم ایمنی، در مجموع ۴ اپی‌توپ لنفوسیت B، ۱۲ اپی‌توپ CTL و



شکل ۱. اتصال اپی‌توپ‌های شناسایی شده به یکدیگر و تشکیل پروتئین نوترکیب با ۶۰۹ اسید آمینه. اپی‌توپ‌های مختلف با استفاده از رنگ‌های مختلف نشان داده شده است

Fig 1. Linking the identified epitopes to form a recombinant protein consisting of 609 amino acids. Epitopes are indicated by different colors

توجه به اینکه این مقدار بالاتر از ۰/۴ است این پروتئین می‌تواند سیستم ایمنی را تحریک کند. همچنین نتایج آلرژی‌زا بودن، شباهت به پروتئین‌های انسانی و سمیت برای پروتئین طراحی شده منفی بود.

ارزیابی ساختار دوم و سوم واکسن طراحی شده

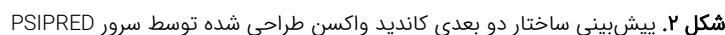
ارزیابی ساختار دوم نشان داد که کاندید واکسن طراحی شده تشکیل شده است از ۷۸/۶۵ درصد Extended Strand و ۱۹/۲۱ درصد Random Coil، ۲/۱۳ درصد آلفا هلیکس (شکل ۲).

پس از طراحی ساختار سه بعدی کاندید واکسن طراحی شده توسط سرور آلفافولد، کیفیت آن با استفاده از سرور GalaxyRefine اصلاح شد. با توجه به اهمیت کیفیت ساختار سوم واکسن طراحی شده برای ارزیابی اتصال و واکنش آن با سلول‌های سیستم ایمنی، کیفیت ساختار سوم طراحی شده با سرورهای مختلف مانند ProSA و UCLA مورد ارزیابی قرار گرفت. نمره کیفیت ساختار سوم ارزیابی شده توسط UCLA ۷۲/۵۲ و نمره Z Score ۳/۸۷ (محاسبه شده توسط سرور ProSA) به دست آمد. اعداد به دست آمده بیانگر کیفیت مناسب کاندید واکسن طراحی شده است.

ارزیابی ویژگی‌های کاندید واکسن نوترکیب طراحی شده

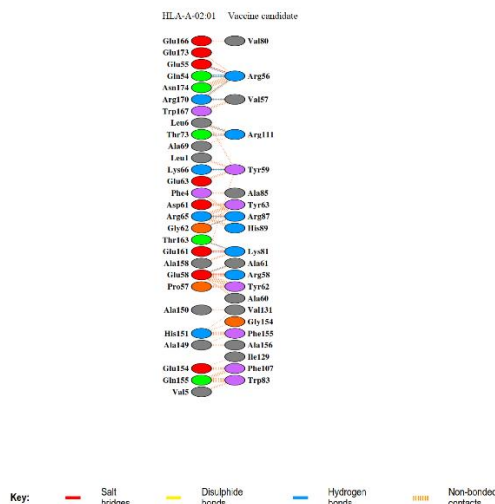
براساس نتایج تجزیه و تحلیل Protparam کاندید واکسن طراحی شده از ۶۰۹ اسید آمینه تشکیل شده و وزن مولکولی آن ۶۳۴۹۴/۴۱ دالتون است. پی اچ ایزوالکتریک واکسن طراحی شده ۹/۸ بدست آمد. تعداد کل اسید آمینه با بار منفی (گلوتامیک و آسپارتیک اسید) و اسید آمینه با بار مثبت (آرژنین و لیزین) به ترتیب ۲۶ و ۶۶ است. ضریب پایداری و شاخص آلیفاتیک به ترتیب ۲۳/۶۵ و ۷۳/۱۰ بدست آمد که نشان دهنده پایداری پروتئین طراحی شده است. شاخص گراویتی برای پروتئین طراحی شده ۰/۲۴۸- بدست آمد، این مقدار منفی نشان می‌دهد که پروتئین آبدوست است و می‌تواند با مولکول‌های آب واکنش بدهد. نیمه عمر کاندید واکسن طراحی شده در شرایط موجود زنده مانند سلول‌های انسانی، باکتریایی و مخمر به ترتیب ۳۰، بیش از ۱۰ و بیش از ۲۰ ساعت تخمین زده شد. تجزیه و تحلیل حلالیت کاندید واکسن طراحی شده با سرور Solpro نشان داد که پروتئین به احتمال ۸۰ درصد رسوب نخواهد کرد. بر اساس نتایج سرور VaxiJen آنتی ژنسیستی کاندید واکسن طراحی شده ۰/۸۸ بدست آمد، با

همچنین بر اساس تجزیه و تحلیل Ramachandran map (محاسبه شده توسط سرور UCLA) ۹۸ درصد از



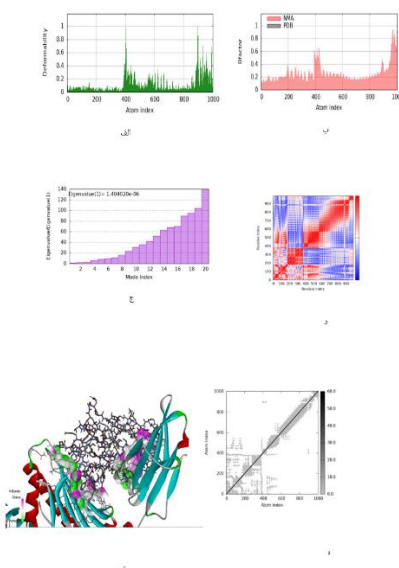
Ramachandran map برای ارزیابی کیفیت ساختار پیش‌بینی شده توسط سرور UCLA

6 Iran South Med J 2026; 29(3): 123-139 [Open Access Policy]..... ■ www.ismj.bpums.ac.ir



شکل ۵. نتایج برهم کنش اسیدهای آمینه در کاندید واکسن طراحی شده و HLA-A-02:01 بیست و یک اسید آمینه از کاندید واکسن طراحی شده با ۲۸ اسید آمینه از HLA-A-02:01 ارتباط داشتند.

Fig 5. Results of amino acid interactions between the designed vaccine candidate and HLA-A-02:01. Twenty-one amino acids from the designed vaccine candidate interacted with 28 amino acids of HLA-A-02:01

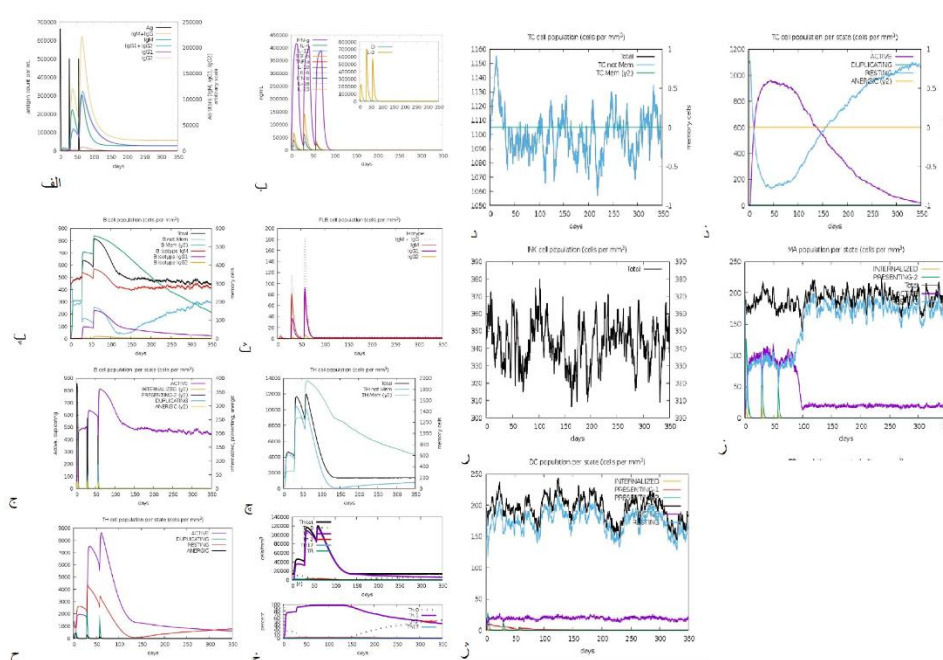


شکل ۶. نتایج ارزیابی عملکرد و پایداری کاندید واکسن طراحی شده با استفاده از سرور iMODS. نمودار الف: نشان دهنده تغییر شکل پروتئین در نواحی مختلف، اعداد بزرگتر نشان دهنده احتمال بیشتر برای تغییر. نمودار ب: نشان دهنده تغییرات اتمها نسبت به یکدیگر، اعداد بزرگتر نشان دهنده موقعیتهایی است که در آن احتمال جابجایی اتمها بیشتر است. نمودار ج: نشان دهنده حرکت و پویایی در قسمت‌های مختلف کمپلکس تشکیل شده است، اعداد کوچکتر نشان دهنده حرکت و پویایی بیشتر است. نمودار د: نشان دهنده نشان دهنده حرکت جمعی اتمها، اعداد مثبت نشان دهنده حرکت در جهت یکسان و اعداد منفی نشان دهنده حرکت در جهت منفی و عدد صفر نشان دهنده عدم تحرک. نمودار ه: نشان دهنده استحکام کلی واکسن طراحی شده. شکل ی: نشان دهنده اتصال واکسن (مولکول‌های میله‌ای) به رسیپتور (روبان پهن)

Fig 6. Results of the performance and stability assessment of the designed vaccine candidate using the iMODS server. Up left: Shows protein deformation across different regions; higher values indicate a greater probability of change. Up right: Shows atomic displacements relative to one another; higher values indicate positions where atomic displacement is more likely. Middle left: Illustrates the motion and dynamics within various parts of the formed complex; lower values indicate greater motion and dynamics. Middle right: Illustrates the collective motion of the atoms; positive values indicate motion in the same direction, negative values indicate motion in the opposite direction, and zero indicates a lack of motion. Down left: binding of the vaccine (rod-like molecules) to the receptor (broad ribbon). Down right: Shows the overall stability of the designed vaccine

است مشاهده شد. نتایج تجزیه و تحلیل تولید سایتوکاین‌ها و فعال شدن لنفوسیت‌های T نشان داد که کاندید واکسن طراحی شده ممکن است تولید اینترفرون گاما و اینترلوکین ۲ را تحریک کند و همچنین موجب فعال شدن لنفوسیت‌های T سیتوتوکسیک شود. یافته‌های حاصل از محاسبات مطالعه حاضر نشان داد که امکان فعال شدن سایر سلول‌های سیستم ایمنی مانند ماکروفاژها، سلول‌های دندریتیک و سلول‌های NK وجود دارد.

در شکل ۷ نتایج پاسخ سیستم ایمنی به کاندید واکسن طراحی شده نشان داده شده است. بر اساس نتایج محاسباتی مطالعه حاضر، تولید آنتی‌بادی IgM ممکن است در اولین تزریق با موفقیت انجام شود، همچنین در تزریق‌های بعدی ممکن است تولید آنتی‌بادی IgG نیز با موفقیت و مقدار قابل توجه انجام شود. تحریک و پاسخ لنفوسیت‌های B که نشان دهنده پایداری واکسن و توانایی مناسب آن در تحریک پاسخ سیستم ایمنی



شکل ۷. نتایج تحریک سیستم ایمنی توسط کاندید واکسن طراحی شده. نمودار الف: نشان دهنده تولید موفق آنتی‌بادی. نمودار ب: نشان دهنده تولید موفق اینترفرون گاما و اینترلوکین ۲. نمودارهای پ، ث و ج: نشان دهنده فعال شدن لنفوسیت‌های B. نمودارهای چ، ح، د، ذ و ز: نشان دهنده فعال شدن لنفوسیت‌های T. نمودارهای ز و ژ: نشان دهنده فعال شدن ماکروفاژها و سلول‌های دندریتیک

Fig 7. Results of immune system stimulation (Antibody production, Cytokine production, Lymphocytes and microphage activation) by the designed vaccine candidate

سراسر دنیا ایجاد می‌کند (۲۵ و ۲۶). هرچند واکسن‌های تهیه شده با استفاده از روش‌های قدیمی مانند استفاده از سلول میکروب ضعیف شده و یا غیرفعال شده موفق بوده است ولی وجود

بحث

بیماری تب کیو از بیماری‌های عفونی قدیمی شناخته شده مشترک بین انسان و حیوان است و مشکلات زیادی را برای سیستم‌های بهداشتی و درمانی در

محدودیت‌هایی مانند امکان برگشت به حالت پاتوژن طبیعی، عدم امکان استفاده از واکسن برای افراد با سیستم ایمنی غیرطبیعی، عدم تحریک کافی سیستم ایمنی، کند بودن فرایند تولید، نیاز به تجهیزات و امکانات گران‌قیمت، نیاز به استفاده از زنجیره سرما، تغییرات آنتی‌ژنی، خطر آلودگی و واکنش‌های ناخواسته، استفاده از این نوع واکسن‌ها را با محدودیت روبرو کرده است (۲۷ و ۲۸). واکسن تهیه شده از کوکسیلا بورنتی غیرفعال شده فاز یک با عنوان Coxevac® به‌عنوان تنها واکسن تأیید شده در بازار در دسترس قرار دارد ولی محدودیت‌هایی مانند واکنش ناخواسته شدید در افرادی که قبلاً با کوکسیلا بورنتی مواجه شده‌اند، داخل سلولی بودن باکتری و عدم تحریک مناسب سیستم ایمنی، عدم دسترسی وسیع و نیاز به غربالگری قبل از انجام واکسیناسیون، استفاده از این واکسن را محدود کرده است (۳۰-۲۷). گسترش روش‌های تعیین توالی ژنوم میکروب‌ها موجب گسترش روش‌های نوین مانند استفاده از اپی‌توپ‌های چندگانه برای طراحی واکسن‌ها شده است.

با توجه به محدودیت‌های مذکور واکسن تب کیو، و نظر به اینکه امروزه سنتز و تولید پروتئین با استفاده از روش‌های مختلف بیوتکنولوژی گسترش یافته و بیشتر از پیش در دسترس جوامع علمی می‌باشد، هدف از این مطالعه طراحی واکسن نو ترکیب با استفاده از اپی‌توپ‌های پروتئین‌های غشای خارجی (OMP1 و LolB) کوکسیلا بورنتی بوده است.

اهمیت پروتئین‌های غشای خارجی کوکسیلا بورنتی در ایجاد بیماری و تحریک سیستم ایمنی در مطالعات قبلی گزارش شده است (۹ و ۳۱). در مطالعه حاضر، با استفاده از ابزار بیوانفورماتیک ویژگی‌های پروتئین‌های غشای خارجی OMP1 و LolB به منظور طراحی واکسن نو ترکیب مورد بررسی قرار گرفت. این پروتئین‌ها در حفظ ساختار باکتری، مقاومت در برابر

سیستم ایمنی میزبان و تحریک سیستم ایمنی نقش مهمی ایفا می‌کنند (۹). در مطالعه لی (Li) و همکاران با استفاده از تکنیک فیوژن پروتئین، پروتئین‌های غشای خارجی OMP1 و HspB به یکدیگر متصل شدند و به‌عنوان واکسن مورد استفاده قرار گرفت (۳۲). نتایج مطالعه مذکور نشان داد که فیوژن پروتئین طراحی شده می‌تواند موجب تحریک سیستم ایمنی و محافظت شود. همچنین در مطالعه گرلاک (Gerlach) و همکاران لیپوپروتئین Lol به‌عنوان هدفی مناسب برای تشخیص بیماری و تهیه واکسن معرفی شده است (۳۳). در مطالعات مشابه دیگر موفقیت واکسن‌های نو ترکیب در تحریک سیستم ایمنی بدون داشتن عوارض جانبی واکسن‌های قدیمی گزارش شده است (۳۴ و ۳۵).

برای اثر بخشی واکسن طراحی شده، فعال شدن لنفوسیت‌های B و T ضروری است. در مرحله اول مطالعه حاضر، پس از ارزیابی شاخص‌های کلیدی مانند توانایی تحریک سیستم ایمنی، عدم سمیت و عدم ایجاد حساسیت، در نهایت ۴ اپی‌توپ تحریک کننده لنفوسیت B و همچنین ۱۲ و ۱۴ اپی‌توپ تحریک کننده سلول‌های CTL و HTL شناسایی شد. به منظور افزایش بیان واکسن طراحی شده و همچنین حفظ ساختار و پایداری آن، اپی‌توپ‌ها با استفاده از اتصال دهنده‌های AAY، GP GPG و KK به یکدیگر متصل شدند. دفن‌سین با فعال کردن منوسیت‌ها، سلول‌های اپیتلیالی و لنفوسیت‌ها می‌تواند موجب تحریک تولید سایتوکاین‌ها و فعال شدن سیستم ایمنی شود، به همین دلیل به‌عنوان ادجوانت با استفاده از اتصال دهنده EAAAK به واکسن اضافه شد. به دلیل پل‌های نمکی که توسط گلوتامیک اسید و لیزین موجود در این اتصال دهنده ایجاد می‌شود، استفاده از آن موجب جلوگیری از ناپایداری ساختار می‌شود (۱۶).

در این مطالعه بیشترین اپی‌توپ‌های شناخته شده مربوط به HLA-II (HTL) بود، در مطالعه‌ای که در

هلدن انجام شده، نتایج نشان داده است که اپی‌توپ‌های واکنش دهنده با HLA-II می‌توانند به خوبی لنفوسیت‌های T را تحریک و ایمنی بلند مدت ایجاد کنند (۳۶). این یافته‌ها می‌تواند نشان دهنده اهمیت بیشتر لنفوسیت‌های T در ایمنی بر علیه کوکسیلا بورنتی باشد.

کاندید واکسن طراحی شده در این مطالعه وزنی حدود ۶۳ کیلو دالتون دارد که می‌تواند نشان دهنده مؤثر بودن آن باشد. جهت جلوگیری از رسوب پروتئین، دور بودن پی اچ ایزوالکتریک پروتئین از پی اچ ایزوالکتریک طبیعی بدن ضروری است. پی اچ ایزوالکتریک کاندید واکسن طراحی شده ۹/۸ بود، که نشان دهنده مناسب بودن آن است. یکی دیگر از شاخص‌های مهمی که در پروتئین باید در نظر گرفته شود ضریب پایداری و آبدوستی است، بر اساس پایگاه ProtParam ضریب پایداری کمتر از ۴۰ و میزان گراویتی منفی به‌ترتیب نشان دهنده پایداری و آبدوستی پروتئین است، در این مطالعه ضریب پایداری ۲۳/۶۵ و شاخص گراویتی -۰/۲۴۸ بود، که نشان دهنده پایداری و آبدوستی واکسن طراحی شده است. نیمه عمر بالای پروتئین طراحی شده در میزبان‌های زنده (ای کلای، مخمر و یا کشت سلول) از شاخص‌های مهم یک پروتئین نوترکیب محسوب می‌شود (۳۷). نیمه عمر واکسن طراحی شده در شرایط موجود زنده مانند سلول‌های انسانی، باکتریایی و مخمر به‌ترتیب ۳۰، بیش از ۱۰ و بیش از ۲۰ ساعت تخمین زده شد. از دیگر شاخص‌های مهم برای یک پروتئین نوترکیب، عدم سمیت، عدم ایجاد حساسیت، توانایی تحریک سیستم ایمنی و عدم شباهت به پروتئین‌های انسانی است که تمام موارد مذکور در واکسن طراحی شده وجود داشت.

کیفیت ساختار سوم پروتئین در واکنش آن و تحریک سیستم ایمنی کاملاً تأثیرگذار است. در مطالعه حاضر با توجه به نمره Z Score که ۳/۸۷- و نمره شاخص کیفیت که ۷۲/۵۲ به‌دست آمد،

می‌توان چنین نتیجه گرفت که ساختار سوم واکسن تهیه شده از کیفیت مناسبی برای واکنش با سیستم ایمنی برخوردار است، زیرا اعداد منفی در Z اسکور و شاخص کیفیت بالاتر از ۵۰ نشان از کیفیت قابل قبول پروتئین دارد (۳۸). همچنین در این مطالعه جهت اطمینان از اتصال مناسب کاندید واکسن طراحی شده با سیستم ایمنی از آنالیز Cluspro و iMod استفاده شد، نتایج بدست آمده (شکل ۵ و ۶) مؤید واکنش مؤثر واکسن طراحی شده با HLA-A-02:01 بود.

تمام کدون‌ها به میزان مساوی بیان نمی‌شوند، به همین منظور و برای افزایش بیان واکسن طراحی شده، بهینه‌سازی کدون انجام شد. با توجه به نتایجی که بدست آمد، CIA و درصد GC برای واکسن طراحی شده به‌ترتیب ۱ و ۵۴/۶۲ بود، در نتیجه می‌توان انتظار داشت که واکسن طراحی شده به میزان مناسبی در میزبان (ای کلای) بیان شود.

توانایی تحریک سیستم ایمنی (خونی و سلولی) برای موفق بودن واکسن کاملاً ضروری است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که واکسن طراحی شده ممکن است سیستم ایمنی را تحریک کند زیرا همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است تحریک تولید سایتوکاین‌ها، آنتی‌بادی و لنفوسیت‌ها با موفقیت پیش‌بینی شده است. عدم بررسی تغییرات پس از ترجمه، عدم مطالعه واکنش کاندید واکسن طراحی شده با گیرنده‌های TLR و همچنین عدم ارزیابی نتایج حاصل از این مطالعه در شرایط بدن موجود زنده از محدودیت‌های مطالعه حاضر می‌باشد و باید در مطالعات آتی مد نظر قرار گیرد.

نتیجه‌گیری

امروزه طراحی واکسن حامل اپی‌توپ‌های چندگانه با استفاده از روش‌های بیوانفورماتیک بسیار ضروری به نظر می‌رسد زیرا علاوه بر کاهش هزینه‌ها می‌تواند موجب بهبود عملکرد واکسن در مقایسه با

سیاس و قدردانی

بدینوسیله از معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی زابل که از انجام این مطالعه حمایت کرده‌اند، تشکر می‌گردد.
مطالعه حاضر تحت حمایت مالی هیچ سازمان و یا مؤسسه‌ای نبوده است.

تضاد منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

واکسن‌های تهیه شده با روش‌های قدیمی‌تر شود. در مطالعه حاضر واکسن طراحی شده حاوی ۳۰ اپیتوپ مختلف بود. نتایج محاسباتی این مطالعه نشان داد که کاندید واکسن طراحی شده ممکن است سیستم ایمنی را تحریک کند و موجب محافظت در میزبان شود. علی‌رغم نتایج امیدوارکننده‌ای که در مطالعه حاضر مشاهده شد، جهت اطمینان از اثربخشی کاندید واکسن طراحی شده مطالعات تکمیلی در شرایط آزمایشگاهی و همچنین بدن موجود زنده ضروری است.

References:

1. Mezouar S, Desnues B, Bechah Y, et al. Pathogenicity and Virulence of *Coxiella burnetii*: Focus on Q fever. *Virulence* 2025; 16(1): 2495842. [10.1080/21505594.2025.2495842](https://doi.org/10.1080/21505594.2025.2495842)
2. Bauer BU, Knittler MR, Andrack J, et al. Interdisciplinary studies on *Coxiella burnetii*: From molecular to cellular, to host, to one health research. *Int J Med Microbiol* 2023; 313(6): 151590. [10.1016/j.ijmm.2023.151590](https://doi.org/10.1016/j.ijmm.2023.151590)
3. Latifian M, Amiri FB, Mostafavi E, et al. Evidence of *Coxiella burnetii* infection among pregnant and aborted women: A systematic review and meta-analysis. *New Microbes New Infect* 2025; 67: 101619. [10.1016/j.nmni.2025.101619](https://doi.org/10.1016/j.nmni.2025.101619)
4. Sasikala A, Prakash C, Valli Ramamoorthy M, et al. *Coxiella burnetii* as a model system for understanding host immune response against obligate intracellular, vacuolar pathogens. *PLoS Pathog* 2025; 21(5): e1013071. [10.1371/journal.ppat.1013071](https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1013071)
5. Ullah Q, Jamil T, Saqib M, et al. Q fever—a neglected zoonosis. *Microorganisms* 2022; 10(8): 1530. [10.3390/microorganisms10081530](https://doi.org/10.3390/microorganisms10081530)
6. Gisbert P, Hurtado A, Guatteo R. Efficacy and safety of an inactivated phase I *Coxiella burnetii* vaccine to control Q fever in ruminants: a systematic review. *Animals* 2024; 14(10): 1484. [10.3390/ani14101484](https://doi.org/10.3390/ani14101484)
7. Basmenj ER, Pajhouh SR, Fallah AE, et al. Computational epitope-based vaccine design with bioinformatics approach; a review. *Heliyon* 2025; 11(1): e41714. [10.1016/j.heliyon.2025.e41714](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41714)
8. García-Machorro J, Ramírez-Salinas GL, Martínez-Archundia M, et al. The advantage of using immunoinformatic tools on vaccine design and development for coronavirus. *Vaccines* 2022; 10(11): 1844. [10.3390/vaccines10111844](https://doi.org/10.3390/vaccines10111844)
9. Kodori M., Amani J, Ahmadi A. Unveiling promising immunogenic targets in *Coxiella burnetii* through in silico analysis: paving the way for novel vaccine strategies. *BMC Infect Dis* 2023; 23(1): 902. [10.1186/s12879-023-08904-7](https://doi.org/10.1186/s12879-023-08904-7)
10. Metters G, Hemsley C, Norville I, et al. Identification of essential genes in *Coxiella burnetii*. *Microb Genom* 2023; 9(2): mgen000944. [10.1099/mgen.0.000944](https://doi.org/10.1099/mgen.0.000944)
11. Sanchez-Trincado JL, Gomez-Perosanz M, Reche PA. Fundamentals and methods for T-and B-cell epitope prediction. *J immunol res* 2017; 2017: 2680160. [10.1155/2017/2680160](https://doi.org/10.1155/2017/2680160)
12. Vaez H, Vaez V. Comprehensive analysis of four major surface proteins for vaccine design against *Klebsiella pneumoniae*. *Infect Epidemiol Microbiol* 2025; 11(1): 1-12. [10.61186/iem.11.1.1](https://doi.org/10.61186/iem.11.1.1)
13. Paul S, Sidney J, Sette A, et al. TepiTool: a pipeline for computational prediction of T cell epitope candidates. *Curr protoc immunol* 2016; 114: 1-18. [10.1002/cpim.12](https://doi.org/10.1002/cpim.12)
14. Gupta S, Kapoor P, Chaudhary K, et al. In silico approach for predicting toxicity of peptides and proteins. *PloS one* 2013; 8(9): e73957. [10.1371/journal.pone.0073957](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0073957)
15. Nguyen MN, Krutz NL, Limviphuvadh V, et al. AllerCatPro 2.0: a web server for predicting protein allergenicity potential. *Nucleic Acids Res* 2022; 50(W1): W36-W43. [10.1093/nar/gkac446](https://doi.org/10.1093/nar/gkac446)
16. Rouzbahani AK, Kheirandish F, Hosseini SZ. Design of a multi-epitope-based peptide vaccine against the S and N proteins of SARS-COV-2 using immunoinformatics

- approach. *Egy J Med Hum Genet* 2022; 23(1): 16. [10.1186/s43042-022-00224-w](https://doi.org/10.1186/s43042-022-00224-w)
17. Gasteiger E, Hoogland C, Gattiker A, et al. Protein Identification and Analysis Tools on the ExPASy Server. In *The Proteomics Protocols Handbook* 2005. Totowa, NJ: Humana press; 571-607. [10.1385/1-59259-890-0:571](https://doi.org/10.1385/1-59259-890-0:571)
18. Wiederstein M, Sippl MJ. ProSA-web: interactive web service for the recognition of errors in three-dimensional structures of proteins. *Nucleic acids res* 2007; 35: W407-410. [10.1093/nar/gkm290](https://doi.org/10.1093/nar/gkm290)
19. Heo L, Park H, Seok C. GalaxyRefine: Protein structure refinement driven by side-chain repacking. *Nucleic acids res* 2013; 41: W384-388. [10.1093/nar/gkt458](https://doi.org/10.1093/nar/gkt458)
20. Madeira F, Park YM, Lee J, et al. The EMBL-EBI search and sequence analysis tools APIs in 2019. *Nucleic acids res* 2019; 47: W636-W641. [10.1093/nar/gkz268](https://doi.org/10.1093/nar/gkz268)
21. Grote A, Hiller K, Scheer M, et al. JCat: a novel tool to adapt codon usage of a target gene to its potential expression host. *Nucleic acids res* 2005; 33: W526-531. [10.1093/nar/gki376](https://doi.org/10.1093/nar/gki376)
22. Desta IT, Kotelnikov S, Jones G, et al. The ClusPro AbEMap web server for the prediction of antibody epitopes. *Nat protoc* 2023; 18(6): 1814-1840. [10.1038/s41596-023-00826-7](https://doi.org/10.1038/s41596-023-00826-7)
23. López-Blanco JR, Aliaga JI, Quintana-Ortí ES, et al. iMODS: internal coordinates normal mode analysis server. *Nucleic acids res* 2014; 42: W271-276. [10.1093/nar/gku339](https://doi.org/10.1093/nar/gku339)
24. Castiglione F, Mantile F, De Berardinis P, et al. How the interval between prime and boost injection affects the immune response in a computational model of the immune system. *Comput math meth med* 2012; 2012(1): 842329. [10.1155/2012/842329](https://doi.org/10.1155/2012/842329)
25. Tan T, Heller J, Firestone S, et al. A systematic review of global Q fever outbreaks. *One Health* 2023; 18: 100667. [10.1016/j.onehlt.2023.100667](https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2023.100667)
26. Ahmadianezhad M, Mounesan L, Doosti-Irani A, et al. The prevalence of Q fever in the Eastern Mediterranean region: a systematic review and meta-analysis. *Epidemiol Health* 2022; 44: e2022097. [10.4178/epih.e2022097](https://doi.org/10.4178/epih.e2022097)
27. Sam G, Stenos J, Graves SR, et al. Q fever immunology: the quest for a safe and effective vaccine. *NPJ Vaccines* 2023; 8(1): 133. [10.1038/s41541-023-00727-6](https://doi.org/10.1038/s41541-023-00727-6)
28. Fratzke AP, van Schaik EJ, Samuel JE. Immunogenicity and reactogenicity in Q fever vaccine development. *Front Immunol* 2022; 13:886810. [10.3389/fimmu.2022.886810](https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.886810)
29. Sellens E, Bosward KL, Willis S, et al. Frequency of adverse events following Q Fever immunisation in young adults. *Vaccines* 2018; 6(4): 83. [10.3390/vaccines6040083](https://doi.org/10.3390/vaccines6040083)
30. Sellens E, Bosward KL, Norris JM, et al. Coxiella burnetii seroprevalence in unvaccinated veterinary workers in Australia: evidence to support Q Fever vaccination. *Zoonoses Public Health* 2020; 67(1): 79-88. [10.1111/zph.12658](https://doi.org/10.1111/zph.12658)
31. Sam G, Plain K, Chen S, et al. Synthetic particulate subunit vaccines for the prevention of Q fever. *Adv Health Mater* 2024; 13(7): e2302351. [10.1002/adhm.202302351](https://doi.org/10.1002/adhm.202302351)
32. Li Q, Niu D, Wen B, et al. Protective immunity against Q Fever induced with a recombinant P1 antigen fused with HspB of Coxiella burnetii. *Ann N Y Acad Sci* 2005; 1063: 130-142. [10.1196/annals.1355.021](https://doi.org/10.1196/annals.1355.021)
33. Gerlach C, Škultéty I, Henning K, et al. Coxiella burnetii immunogenic proteins as a basis for new Q Fever diagnostic and vaccine development. *Acta Virol* 2017; 61(3): 377-390. [10.4149/av_2017_320](https://doi.org/10.4149/av_2017_320)
34. Sluder AE, Raju Paul S, Moise L, et al. Evaluation of a human T cell-targeted multi-epitope vaccine for Q fever in animal models of Coxiella burnetii immunity. *Front Immunol* 2022; 13: 901372. [10.3389/fimmu.2022.901372](https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.901372)
35. Rashidian E, Gandabeh ZS, Forouharmehr A, et al. Immunoinformatics approach to engineer a potent polypeptide fusion protein vaccine against Coxiella burnetii. *Int J Pep Res Ther* 2020; 26(4): 2191-2201. [10.1007/s10989-019-10013-6](https://doi.org/10.1007/s10989-019-10013-6)
36. Scholzen A, Richard G, Moise L, et al. Promiscuous Coxiella burnetii CD4 epitope clusters associated with human recall responses are candidates for a novel T-cell targeted multi-epitope Q Fever vaccine. *Front Immunol* 2019; 10: 207. [10.3389/fimmu.2019.00207](https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.00207)
37. Duvaud S, Gabella C, Lisacek F, et al. ExPASy, the Swiss Bioinformatics Resource Portal, as designed by its users. *Nucleic Acids Res* 2021; 49(W1): W216-W227. [10.1093/nar/gkab225](https://doi.org/10.1093/nar/gkab225)
38. Laskowski RA, MacArthur MW, Moss DS, et al. PROCHECK: a program to check the stereochemical quality of protein structures. *Applied Crystallog* 1993; 26(2): 283-291. [10.1107/S0021889892009944](https://doi.org/10.1107/S0021889892009944)

GIINTLQKYYCRVRGGRCVLSCLPKEEQIGKCSTRGRKCCRRKKEAAAKEERSLRVRYAAYYTASTPEQLAAYAV
KIVVKHWAAYRIHSSLDIYAAAYQQSGWHIRFAAYRLNGGIAGIAAYTTTKLAIGVAAYRTRLGSHLTAAYIPMIDMNGFA
AYDAPLVGSNYAAYKLAIGVSALAAYTAIGVSGTVGPGPGGWHIRFSQYTTVGSVGPGPSQWNIDGAFSIQQP
GPGPGPAPGAYQADFDYTHGPGPGSNGSLAVKIVVKHWQGP GPGPRTLQLSNGSLAVKIGPGPGVKAQYQ
YDNVRSVHIGPGPGLAGIKVNEANAVYLEGPGPGGYTFASDWWIAGVKAGPGPGDWWIAGVKAQYQYDNG
PGPGNGGTVLSVLHPVSASGPGPGVSMKNRLNGGIAGIGPGPGDIPMIDMNGFHIGLGGPGPGGTAGVS
GTVQNPKRGP GPGSNYSYRTRLGSHLTAGPGPGNPKRVAINGITATVNKKLGFYKSYTYDQVGT VKKGVKAQ
YQYDNVRSVHIKKAPLVGSNYSYRTRLGSKKIRGIPAPGAYQADFDTEAAAKGIGDPVTCLKSGAICHPVFCPRRY
KQIGTCGLPGTKCCKKP