

ارتباطات نوع هولوگرافیک: نیازمندی‌های شبکه‌سازی برای عصر متاورس

سارا کاظمی لک^۱، دکتر محمد مهدی شیرمحمدی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی مهندسی کامپیوتر، گروه کامپیوتر، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران، saraw3089@gmail.com

^۲ استاد گروه کامپیوتر، گروه کامپیوتر، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران، Mmshirmohammadi@iau.ac.ir

چکیده

ارتباطات هولوگرافیک (HTC) به عنوان پارادایم نهایی تعاملات انسانی در متاورس، نیازمند جهشی بزرگ در زیرساخت‌های شبکه‌ای است. این مقاله با رویکرد مروری - تحلیلی، چارچوبی یکپارچه برای شناسایی و طبقه‌بندی نیازمندی‌های HTC ارائه می‌دهد. ابتدا روند تکامل رسانه‌ها از دوبعدی تا XR و متاورس بررسی شده و شکاف‌های موجود در پهنای باند ترابیتی، تأخیر زیر پنج میلی‌ثانیه، همزمانی زیرمیکروثانیه و قابلیت اطمینان چندین شناسایی می‌شوند. سپس معماری سلسله‌مراتبی چندلایه شامل حسگرها، پردازش لبه (MEC)، شبکه‌های ۶G/THz و خدمات ابری معرفی و نقش آن در کاهش motion-to-photon latency و تضمین قوام زمانی تحلیل می‌گردد. در ادامه، راهکارهای نوین مانند فشردن سازی عصبی-معنایی، رندرینگ پیش‌گویانه و همزمانی توزیع‌شده بررسی و معیارهای چندبعدی QoS/QoE برای ارزیابی فنی و ادراکی پیشنهاد می‌شوند. ابعاد امنیت، حریم خصوصی و تهدیداتی چون جعل سه‌بعدی نیز با راهکارهایی نظیر یادگیری فدرال و بلاک‌چین پوشش داده شده و در پایان نقشه راهی برای تجاری‌سازی HTC تا پس از ۲۰۳۰ ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ارتباطات هولوگرافیک، فشردن سازی عصبی-معنایی، همزمانی توزیع‌شده، پردازش لبه MEC، کیفیت تجربه QoE، امنیت و حریم خصوصی

1. مقدمه و انگیزش

1.1. مروری بر تکامل ارتباطات به سمت تجربیات فراگیر (HTC و متاورس)

ارتباطات انسانی طی بیش از یک قرن گذشته مسیر تکاملی قابل توجهی را از رسانه‌های خطی و کم‌عمق به سمت تجربه‌های چندوجهی و غوطه‌ورکننده پیموده است. در آغاز، رسانه‌هایی مانند تلفن صوتی و رادیو امکان انتقال صدا را فراهم کردند؛ سپس با ظهور رسانه‌های تصویری، اینترنت و ارتباطات ویدئویی، انسان توانست مرزهای حضور فیزیکی را پشت سر بگذارد و تعاملات اجتماعی، آموزشی و کاری خود را در قالب‌های جدید تجربه کند. با این حال، تمام این فناوری‌ها ذاتاً دوبعدی بوده‌اند و قادر به بازنمایی حضور واقعی انسان نیستند؛ از این رو به‌عنوان بستر نهایی برای تعاملات انسانی محدودیت دارند.

تکامل بعدی با ظهور فناوری‌های واقعیت مجازی (VR)، واقعیت افزوده (AR) و واقعیت ترکیبی (MR) شکل گرفت. این فناوری‌ها سطح جدیدی از غوطه‌وری را ایجاد کردند و امکان تعامل سه‌بعدی با محیط‌های دیجیتال را فراهم آوردند. در کنار این موج، مفهوم متاورس نیز به عنوان زیست‌جهان دیجیتال پایدار، تعاملی و چندکاربره مطرح شد و مسیر را برای شکل‌گیری نسل بعدی ارتباطات هموار کرد. مطالعات نشان می‌دهند که متاورس بر ترکیب قابلیت‌های XR، تعامل اجتماعی بلادرنگ و مدل‌های سه‌بعدی غنی استوار است [۱-۳، ۷].

در این چشم‌انداز، ارتباطات نوع هولوگرافیک (HTC) به‌عنوان پارادایم نهایی ارتباطات فراگیر مطرح می‌شود؛ پارادایمی که هدف آن ارائه حضور واقعی انسان (Real Presence)، بازنمایی پویا و کاملاً سه‌بعدی و تعامل طبیعی میان کاربران است. این نوع ارتباط فراتر از VR/AR عمل کرده و با اتکا به ابرنقاط پرتراکم، میدان‌های نوری (Light Fields) و مدل‌سازی چندچشمی، بازتولید انسان و اشیاء را در مقیاس واقعی ممکن می‌سازد [۵، ۹، ۱۰]. با وجود این چشم‌انداز، شکاف عظیمی میان توانایی‌های فعلی شبکه‌ها و تحقق کامل HTC در متاورس وجود دارد. شبکه‌های کنونی هنوز از نظر پهنای باند، تأخیر، پردازش لبه و سازگاری چندکاربره به بلوغ لازم نرسیده‌اند. بنابراین، مسیر متاورس و HTC هنوز در مراحل آغازین است و نیازمند جهشی بزرگ در استانداردها، زیرساخت‌ها و فناوری‌های ارتباطی است [۱، ۶، ۱۴].

1.2. بیان مسئله: شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی و چالش‌های شبکه‌ای موجود

اگرچه پیشرفت‌های چشمگیری در فناوری‌های سه‌بعدی، XR و شبکه‌های نسل پنجم حاصل شده است، پیاده‌سازی کامل HTC در مقیاس متاورسی همچنان با مجموعه‌ای از چالش‌های شبکه‌ای بنیادین روبه‌رو است. نخستین شکاف، نیاز HTC به پهنای باند ترابیتی برای انتقال جریان‌های هولوگرافیک است؛ جریان‌هایی که شامل ابرنقاط، میدان‌های نوری و مدل‌های سه‌بعدی پویا هستند و حجم آن‌ها ده‌ها برابر ویدئوی K^8 است [۵، ۹]. دومین شکاف، نیاز به تأخیر کمتر از ۵ میلی‌ثانیه و حتی ۱ میلی‌ثانیه در مسیر motion-to-photon است؛ تأخیری که اگر رعایت نشود موجب ناهماهنگی حرکتی، شکست ادراکی و اختلال در حس حضور می‌شود [۸، ۱۲].

چالش کلیدی دیگر، همزمانی زیرمیکروثانیه‌ای در محیط‌های چندکاربره است؛ زیرا کوچک‌ترین اختلاف زمانی در بازنمایی حرکت کاربران می‌تواند به ناپایداری صحنه سه‌بعدی، ناهماهنگی حرکتی و کاهش شدید QoE منجر شود [۳، ۱۲]. شبکه‌های فعلی—even 5G Advanced—قادر به تضمین چنین دقتی در مقیاس جهانی نیستند. افزون بر این، سطوح اطمینان‌پذیری موردنیاز HTC باید در سطح ۹۹,۹۹۹٪ (۶ تا ۷ ناین) باشد که برای کاربردهای پزشکی، صنعتی و آموزش پیشرفته ضروری است [۷، ۱۴].

در حوزه استانداردسازی نیز شکاف‌های جدی وجود دارد. تاکنون استانداردهای جامعی برای کدک‌های هولوگرافیک، پروتکل‌های همزمانی، مدل‌های QoE، معماری‌های توزیع‌شده D Rendering^۳ و جریان‌های چندچشمی تدوین نشده است. اگرچه نهادهایی مانند GPP^۳، ITU-T، IEEE و MPEG در تلاش‌اند بخشی از این نیازها را پوشش دهند، اما هیچ چارچوب واحد، سازگار و یکپارچه‌ای برای HTC وجود ندارد [۱، ۶، ۱۴].

شکاف در مدل‌های اقتصادی نیز مسئله‌ای جدی است؛ زیرا هزینه‌های زیرساختی برای G^۶، THz، MEC و رندرینگ توزیع‌شده بسیار سنگین بوده و مدل‌های B2B/B2C موجود توان پشتیبانی از اکوسیستم HTC را ندارند [۲، ۷]. از منظر کیفیت تجربه (QoE)، نیز نبود معیارهای چندبعدی برای حضور، غوطه‌وری، طبیعی‌بودن حرکت و سازگاری ادراکی، ارزیابی علمی HTC را دشوار کرده است [۸، ۱۲].

در مجموع، شکاف‌های شناسایی‌شده نشان می‌دهند که HTC یک مسئله میان‌رشته‌ای پیچیده است که تنها از طریق پیشرفت هم‌زمان در شبکه، پردازش، استانداردسازی، اقتصاد و مدل‌های تجربه کاربری قابل تحقق خواهد بود. این مقاله با هدف ارائه یک چارچوب یکپارچه برای تحلیل این شکاف‌ها، به بررسی جامع نیازمندی‌های شبکه‌ای HTC در عصر متاورس می‌پردازد.

۲. معماری و چارچوب طبقه‌بندی نیازمندی‌های شبکه‌ای HTC

۲.۱. معماری سلسله‌مراتبی چندلایه برای پشتیبانی از HTC در متاورس

معماری سلسله‌مراتبی چندلایه برای پشتیبانی از ارتباطات نوع هولوگرافیک (HTC) در متاورس، به‌صورت ساختاری از لایه دستگاه تا لایه کاربردی سازمان می‌یابد و هدف آن تأمین یک مسیر با حداقل تأخیر، حداکثر قابلیت اطمینان و پهنای باندی در حد ترابیت است. در لایه دستگاه، حسگرهای عمق، دوربین‌های میدان نوری، اسکنرهای ابرنقاط و نمایشگرهای هولوگرافیک، حجم عظیمی از داده‌های سه‌بعدی را با نرخ نمونه‌برداری بسیار بالا تولید می‌کنند و معمولاً یک مرحله فشرده‌سازی سبک نیز روی این داده‌ها اعمال می‌شود [۹]. این لایه همچنین وظیفه تولید timestamps و متادیتای حرکتی را بر عهده دارد که برای همزمانی زیرمیکروثانیه‌ای میان کاربران ضروری است.

در لایه لبه (MEC)، پردازش‌های حساس به تأخیر نظیر split/hybrid rendering، بازسازی سه‌بعدی سریع، پیش‌بینی حرکت کاربر و کش‌کردن محتوای پرتکرار اجرا می‌شود. نزدیک بودن این لایه به کاربر امکان کاهش محسوس تأخیر رفت‌وبرگشت و جبران پیش‌گویانه‌ی تغییرات صحنه را فراهم می‌کند [۹]. این لایه ستون فقرات کاهش motion-to-photon latency است.

در لایه شبکه، فناوری‌های ارتباطی پیشرفته شامل G^۶، پیوندهای تراهرتز (MIMO THz) سلول آزاد و سطوح هوشمند بازپیکربندی‌پذیر (RIS) برای ارائه ظرفیت ترابیتی، مسیرهای ارتباطی پایدار و slicing هوشمند به کار می‌روند [۶، ۱۲]. این لایه باید مدیریت دقیق جیتر، کاهش packet loss و توزیع زمان بسیار دقیق را تضمین کند تا جریان‌های هولوگرافیک چندمسیره با کمترین اختلال منتقل شوند.

در لایه ابری، عملیات پردازشی سنگین‌تر نظیر رندرینگ آفلاین، آموزش مدل‌های یادگیری عمیق برای فشرده‌سازی معنایی، یا مدیریت دوقلوهای دیجیتال انجام می‌شود [۱۰]. ابر نقش پشتیبان محاسباتی مقیاس‌پذیر را ایفا می‌کند و در تعامل مستقیم با لبه، تصمیمات بهینه‌سازی edge-cloud offloading را مدیریت می‌کند.

در نهایت، لایه کاربردی متاورس به عنوان سطح بالایی معماری، مسئول همگام سازی چندکاربره در فضاهای مجازی، مدیریت صحنه، کنترل آواتار، منطق تعامل و ادغام داده های ادراکی است [۱۲]. این لایه با دریافت اطلاعات QoS از لایه های پایین تر، به طور پویا تنظیمات کیفیت، نرخ بیت، یا دقت بازسازی را متناسب با شرایط شبکه تغییر می دهد تا تجربه ی کاربر حفظ شود. انسجام میان این لایه ها باعث می شود HTC بتواند نیازمندی های بسیار سختگیرانه خود را در محیط های کاملاً پویا و متصل متاورس تأمین کند.

۲.۲. رابطه پیچیده بین QoS و QoE در ارتباطات نوع هولوگرافیک

در HTC، رابطه میان پارامترهای QoS و شاخص های QoE کاملاً مستقیم، غیرخطی و چندبعدی است. تأخیر انتها-به-انتها (E2E latency) که باید کمتر از ۵ میلی ثانیه باشد [۱۳]، نقش بنیادی در حفظ حس حضور (Presence) دارد؛ هرگونه افزایش در تأخیر سبب اختلال در هماهنگی بین حرکت واقعی کاربر و بازتاب هولوگرافیک آن شده و احساس حضور مشترک را کاهش می دهد. جیتیر نیز موجب نوسان در نرخ فریم بازسازی شده و در نتیجه بر «راحتی دید» (Visual Comfort) اثر می گذارد؛ یافته های مطالعات اخیر نشان می دهد که ناپایداری زمانی در جریان های سه بعدی سطح خستگی دید و VIMS را به شدت افزایش می دهد [۸].

«نرخ از دست رفتن بسته» (Packet Loss)، به ویژه در جریان های full-parallax که نیازمند بازسازی دقیق میدان نوری هستند، مستقیماً بر کیفیت هندسه و بافت هولوگرام اثر می گذارد؛ حتی نرخ های اندک (مثلاً ۱٪) می توانند باعث ایجاد گسست های هندسی، پرش نقاط یا تخریب ادراک عمق شوند [۹]. این پارامترها در نهایت بر شاخص های انسانی مانند غوطه وری (Immersion)، احساس واقع بودگی (Realism)، سهولت تعامل و رضایت کلی اثرگذار هستند.

مطالعات جدید در حوزه QoE هولوگرافیک—به ویژه مدل ارائه شده در Udora et al.—نشان می دهد که تعامل میان QoS و QoE باید نه تنها از منظر فنی، بلکه در چارچوب ادراک انسان و رفتارهای حرکتی او مدل سازی شود [۸]. برای مثال، کاهش تأخیر و جیتیر موجب افزایش مدت زمان تعامل، کاهش نرخ ترک محیط (Drop-out Rate)، و همچنین افزایش اعتماد کاربر به سیستم در کاربردهایی مانند پزشکی از راه دور می شود.

بر همین اساس، پژوهش ها تأکید دارند که QoE در HTC را نمی توان تنها با معیارهایی نظیر رزولوشن یا نرخ فریم اندازه گیری کرد؛ بلکه یک مدل جامع باید همزمان اثر پارامترهای شبکه، پردازش لبه، رفتار کاربر و ویژگی های ادراکی سه بعدی را در نظر بگیرد. از آنجا که استانداردسازی QoE هنوز بلوغ کافی ندارد، بسیاری از مطالعات—از جمله گزارش ITU و تحقیقات Akyildiz & Guo—بر نیاز به چارچوب های ادراکی جدید برای ارتباطات هولوگرافیک تأکید کرده اند [۱]، [۹]. در مجموع، QoS ستون فنی تجربه است و QoE بیان ادراکی-روان شناختی همان کیفیت؛ و موفقیت HTC زمانی محقق می شود که میان این دو، مدل های دقیق، واکنش محور و پیش بینانه ایجاد گردد.

۳. چالش های فنی کلیدی و راهکارهای نوین

۳.۱. راهکارهای نوین فشرده سازی برای داده های حجیم هولوگرافیک

داده های هولوگرافیک شامل ابرنقاط بسیار پرتراکم، میدان های نوری با صدها لایه زاویه ای و فریم های سه بعدی چندچشمی حجم هایی در حد ده ها گیگابایت تا چند ترابایت بر ثانیه برای هر کاربر تولید می کنند، بنابراین فشرده سازی به یکی از

بنیادی‌ترین چالش‌های HTC تبدیل شده است [۹]. هرچند استانداردهای فعلی مانند MPEG V-PCC و G-PCC گامی مهم در مسیر استانداردسازی فشرده‌سازی ابرنقاط محسوب می‌شوند، اما محدودیت‌های اساسی دارند:

(1) اتکای سنگین V-PCC به pipeline ویدئویی سبب ایجاد اعوجاج‌های زمانی-فضایی و عملکرد ضعیف در نرخ‌های تازه‌سازی بسیار بالا می‌شود [۱۲].

(2) پیچیدگی زیاد در رمزگشایی G-PCC موجب ناتوانی در استفاده بلادرنگ در تجهیزات موبایلی و کاربردهای متاورسی می‌شود، زیرا حتی با حفظ کیفیت هندسی قابل قبول، نرخ پردازش آن در سناریوهای multi-view افت می‌کند [۱۰].

(3) هیچ‌یک از این دو استاندارد برای تأخیر زیر ۵ میلی‌ثانیه و fidelity سطح HTC طراحی نشده‌اند و در سناریوهای real-time holographic teleportation کارایی کافی ندارند [۸].

به همین دلیل، تمرکز پژوهش‌های اخیر به‌سوی فشرده‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی تغییر یافته است. نخست، فشرده‌سازی عصبی (Neural Compression) که مبتنی بر خودرمزگذارهای عمیق، شبکه‌های مولد نهفته و مدل‌های latent است، می‌تواند ساختارهای هندسی پیچیده را در فضای کم‌بعدی ذخیره کرده و نرخ بیت را به‌طور چشمگیری کاهش دهد، بدون آنکه fidelity ادراکی کاهش یابد [۷]. این شیوه همچنین امکان بازسازی سازگار و تطبیقی را برای محیط‌های پویا فراهم می‌کند که برای HTC حیاتی است. دوم، فشرده‌سازی معنایی (Semantic Compression) که تنها «اطلاعات ادراکی مهم» را ارسال می‌کند، یک رویکرد بنیادی‌تر ارائه می‌دهد؛ به‌عنوان مثال، سیستم تنها نقاط مرتبط با ژست، نگاه و تعامل کاربر یا عناصر مهم صحنه را ارسال کرده و سایر اطلاعات کم‌اهمیت را حذف می‌کند [۶]. این موضوع باعث کاهش چشمگیر حجم داده و حفظ کیفیت تجربی می‌شود.

البته چالش‌هایی همچنان باقی است: نیاز به مجموعه داده‌های عظیم برای آموزش مدل‌ها، مصرف انرژی بالا، دشواری حفظ حریم خصوصی در مدل‌های یادگیرنده، و نیاز به شتاب‌دهنده‌های سخت‌افزاری بهینه‌شده [۵]. با وجود این، مطالعات متاورسی و G^۶ نشان می‌دهند که رویکردهای عصبی-معنایی، امیدبخش‌ترین مسیر برای رسیدن به فشرده‌سازی واقعی سطح HTC هستند [۱۴].

3.2. چالش همزمانی و قوام زمانی در محیط‌های چندکاربره HTC

همزمانی (Synchronization) و قوام زمانی (Temporal Coherence) از موانع اساسی در تحقق تجربه چندکاربره هولوگرافیک محسوب می‌شوند، زیرا حتی اختلاف زمانی چند صد میکروثانیه‌ای می‌تواند منجر به واگرایی صحنه سه‌بعدی، ناهمخوانی ژست‌ها، افت حس حضور و تخریب کامل غوطه‌وری شود [۸]. روش‌های کلاسیک همزمان‌سازی مبتنی بر سرور مرکزی، در مقیاس بزرگ متاورسی ناکارآمد هستند، زیرا تعداد کاربران، فاصله جغرافیایی و ترافیک متغیر باعث افزایش تأخیر و ناپایداری می‌شود [۱۲].

یکی از راهکارهای پیشرفته، همزمانی توزیع‌شده مبتنی بر لبه است که وظیفه زمان‌بندی و توزیع timestampها را به نودهای MEC در نزدیکی کاربران منتقل می‌کند. این روش به دلیل کاهش مسیر رفت‌وبرگشت و نزدیکی به منبع داده، به دقت زمانی به مراتب بالاتری نسبت به مدل متمرکز دست می‌یابد [۳].

راهکار دوم، استفاده از نشانه‌گذاری زمانی دقیق (Precise Time Stamping) است که مبتنی بر پروتکل‌های همزمانی سطح بالا مانند PTP-class بوده و امکان هم‌ترازسازی فریم‌ها، میدان‌های نوری و داده‌های gesture tracking را فراهم

می‌کند [۱]. این روش برای حفظ قوام صحنه در رندرینگ هولوگرافیک ضروری است، اما در برابر نوسانات شبکه و موبیلیتی حساس است و به ساعت‌های توزیع‌شده پایدار نیاز دارد [۱۵].

راهکار سوم، جبران پیش‌گویانه (Predictive Rendering) مبتنی بر مدل‌های یادگیری ماشین است. در این روش، سیستم بخشی از محتوای آینده را بر اساس حرکت کاربر، مسیر نگاه (gaze trajectory) و تغییرات صحنه پیش‌بینی کرده و قبل از وقوع، آن را رندر می‌کند [۷]. این کار موجب کاهش محسوس تأخیر ادراکی و حفظ قوام زمانی حتی در شرایط شبکه‌ای ناپایدار می‌شود، اما نیازمند مدل‌های سبک‌وزن، خطای پیش‌بینی کم و هماهنگی با معماری MEC است [۲].

مطالعات اخیر نشان می‌دهند که ترکیب سه روش —همزمانی توزیع‌شده لبه + نشانه‌گذاری دقیق + رندرینگ پیش‌گویانه— کارآمدترین ساختار برای حفظ هماهنگی در مقیاس متاورسی است و می‌تواند نیاز HTC برای همزمانی زیرمیکروثانیه‌ای را تا حدود زیادی برآورده کند [۱۴]. با این حال، پیاده‌سازی عملی آن نیازمند پیشرفت‌های بیشتر در استانداردسازی، پشتیبانی سخت‌افزاری و مدل‌های QoE چندبعدی است [۶].

جدول تحلیلی بخش سوم: چالش‌ها و راهکارهای HTC

محدودیت‌ها	نقاط قوت	راهکارهای نوین	جزئیات مشکل	حوزه چالش
-نیاز به داده آموزشی عظیم-مصرف انرژی بالا-چالش‌های حریم خصوصی	-کاهش چشمگیر نرخ بیت- حفظ کیفیت ادراکی-سازگاری با محیط‌های پویا	-فشرده‌سازی عصبی (Neural Compression) فشرده‌سازی معنایی (Semantic Compression)	حجم داده بسیار بالا (ترابایت/ثانیه)، ناکارآمدی استانداردهای فعلی (V-PCC, G-PCC)	فشرده‌سازی داده‌های هولوگرافیک
-حساسیت به نوسانات شبکه- نیاز به سخت‌افزار دقیق- پیچیدگی استانداردسازی	-کاهش تأخیر رفت‌و برگشت-حفظ هماهنگی صحنه سه‌بعدی-افزایش حس حضور	-همزمانی توزیع‌شده مبتنی بر MEC - نشانه‌گذاری دقیق (PTP-class)- رندرینگ پیش‌گویانه	نیاز به دقت زیرمیکروثانیه؛ مدل‌های متمرکز ناکارآمد در مقیاس متاورس	همزمانی و قوام زمانی
-هزینه سخت‌افزاری بالا-پیچیدگی پیاده‌سازی- نیاز به هماهنگی بین‌المللی	-کاهش افشای داده خام- تشخیص فوری دستکاری-جلوگیری از جعل آواتار	-یادگیری فدرال- امضای هندسی داده‌ها- بلاک‌چین و HSM	داده‌های بیومتریک حساس (چهره، ژست، نگاه)، تهدید جعل سه‌بعدی (3D Deepfake)	امنیت و حریم خصوصی
-نبود کدک	-ایجاد پایه‌های	-فعالیت ۳ GPP	نبود چارچوب واحد	استانداردسازی

اختصاصی HTC - فقدان پروتکل همزمانی جهانی - عدم هماهنگی بین نهادها	مشترک جهانی - پیشرفت در معیارهای QoE و امنیت XR	(Release ITU-T-18/19) IEEE -SG16 P2048	برای کدکها، QoE، همزمانی و- MEC Cloud	
--	---	---	---	--

4. امنیت، حریم خصوصی و استانداردسازی

4.1. تهدیدات امنیتی و چالش‌های حریم خصوصی در ارتباطات نوع هولوگرافیک (HTC)

ماهیت بسیار غنی، چندبعدی و حساس داده‌های هولوگرافیک باعث شده است که امنیت و حریم خصوصی در HTC به یکی از دشوارترین چالش‌های نسل بعدی ارتباطات تبدیل شود. در HTC، برخلاف رسانه‌های دوبعدی، داده‌ها شامل اطلاعات بیومتریک دقیق مانند ساختار هندسی چهره، الگوهای حرکتی بدن، جزئیات میدان نوری و حتی میکروچست‌ها هستند که در صورت افشا می‌توانند برای سرقت هویت سه‌بعدی استفاده شوند [۴]. یکی از جدی‌ترین تهدیدها، جعل عمیق سه‌بعدی (۳D Deepfake) است؛ حمله‌ای که در آن مهاجم با استفاده از مدل‌های مولد عمیق، یک آواتار هولوگرافیک جعلی ولی کاملاً باورپذیر ساخته و وارد محیط متاورسی می‌کند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این‌گونه جعل‌ها می‌توانند حتی سیستم‌های احراز هویت مبتنی بر چهره و حرکت را نیز فریب دهند [۱۶]. علاوه بر این، در فرآیند ضبط هولوگرافیک، داده‌های حسگری شامل نقشه‌های عمق، میدان‌های نوری و جهت نگاه (Gaze) تولید می‌شوند که از نظر مقررات حریم خصوصی بسیار حساس‌اند، زیرا می‌توانند رفتارهای شناختی و عاطفی کاربر را آشکار کنند [۳].

برای مقابله با این تهدیدها، پژوهشگران چند مسیر کلیدی را پیشنهاد کرده‌اند. نخست، یادگیری فدرال (Federated Learning) که اجازه می‌دهد مدل‌های امنیتی بدون انتقال داده خام، روی دستگاه یا MEC آموزش ببینند و از این طریق احتمال افشای اطلاعات بیومتریک کاهش یابد [۱۱]. دوم، استفاده از امضای هندسی داده‌ها (Geometric Data Signatures) که یک لایه تأیید اصالت برای ابرنقاط یا میدان‌های نوری ایجاد می‌کند؛ به گونه‌ای که هرگونه دستکاری یا جعل در ساختار سه‌بعدی به صورت فوری قابل شناسایی باشد [۱۵]. سوم، احراز هویت سخت‌افزاری مبتنی بر بلاک‌چین که با به کارگیری ماژول‌های سخت‌افزاری امن (HSM) و ثبت تراکنش‌های هویتی در زنجیره بلوکی غیرقابل تغییر، امکان جعل، جایگزینی یا تکرار آواتار هولوگرافیک را به حداقل می‌رساند [۱۳]. این رویکرد برای کاربردهایی مانند جراحی از راه دور یا همکاری صنعتی سه‌بعدی اهمیت حیاتی دارد. در مجموع، امنیت HTC تنها یک مسئله رمزنگاری نیست، بلکه نیازمند ترکیب راهکارهای محاسباتی، ادراکی، توزیع‌شده و مبتنی بر سخت‌افزار است [۱۶].

4.2. وضعیت استانداردسازی HTC و مسیر پیش‌رو

استانداردسازی یکی از عوامل تعیین‌کننده در تحقق HTC در مقیاس متاورس است، زیرا بدون وجود چارچوب‌های یکپارچه برای کدک‌ها، همزمانی، QoE، MEC و شبکه‌های 6G، امکان همکاری میان شرکت‌ها، اپراتورها و پلتفرم‌های متاورس وجود نخواهد داشت. در این میان، GPP نقش محوری ایفا می‌کند. در Release ۱۸ و Release ۱۹، این نهاد موضوعاتی مانند معماری MEC، خدمات XR پیشرفته، بهبودهای مربوط به QoS جریان‌های بلادرنگ و تأخیر ساب‌میلی‌ثانیه‌ای را مطرح کرده است که زیربنای HTC محسوب می‌شوند [۶]. با این حال، هنوز هیچ پروفایل مشخصی برای Holographic Type

Communication در GPP^۳ تعریف نشده است و انتظار می‌رود این موضوع در رده‌های اولیه استانداردهای G^۶ مطرح شود.

ITU-T نیز از طریق گروه‌های مطالعاتی مرتبط با Multimedia و Immersive Live Experience، روی موضوعاتی مانند معیارهای QoE سه‌بعدی، مدل‌های ادراکی، و پروتکل‌های Synchronization کار می‌کند. گزارش‌ها و توصیه‌نامه‌های این نهاد—به‌ویژه در SG^{۱۶}—بر نیاز به استانداردهای جدید برای میدان‌های نوری و ارزیابی ذهنی تجربه هولوگرافیک تأکید دارند [۴]. از سوی دیگر، IEEE در قالب کارگروه‌هایی مانند P^{۲۰۴۸} و ابتکارات XR، استانداردهایی برای نمایشگرهای volumetric، امنیت دستگاه‌های XR و تعاملات چندحسی توسعه می‌دهد [۵]. این استانداردها پایه‌های فناوری برای هولوگرام‌های قابل تعامل و سازگار با شبکه‌های کم‌تأخیر را فراهم می‌کنند.

با وجود این پیشرفت‌ها، شکاف‌های متعددی پابرجاست:

- (1) نبود کدک استاندارد و کم‌تأخیر برای ابرنقاط و میدان‌های نوری،
- (2) فقدان پروتکل‌های جهانی برای همزمانی زیرمیکروثانیه‌ای،
- (3) نبود چارچوب ارزیابی QoE مختص محتوای هولوگرافیک،
- (4) نبود استاندارد جامع برای تقسیم بار پردازش میان MEC–Cloud،
- (5) عدم هماهنگی میان کمیته‌های GPP^۳، ITU-T و IEEE در حوزه متاورس.

مطالعات اخیر پیشنهاد می‌کنند که استانداردسازی HTC باید در قالب چارچوب‌های میان‌رشته‌ای G^۶ پیش برود و شامل ادغام مدل‌های یادگیری ماشین، امنیت سخت‌افزاری، کدک‌های نسل جدید، و پروتکل‌های Real-Time Multimodal Interaction باشد [۱۴]. تنها در چنین شرایطی است که HTC می‌تواند به‌صورت یک سرویس پایدار، امن و قابل اعتماد در مقیاس جهانی استقرار یابد.

جدول تحلیلی بخش چهارم: امنیت، حریم خصوصی و استانداردسازی HTC

محدودیت‌ها	نقاط قوت	راهکارهای پیشنهادی	چالش اصلی	حوزه
هزینه سخت‌افزاری بالا، پیچیدگی پیاده‌سازی، نیاز به هماهنگی بین‌المللی	کاهش ریسک افشای داده خام، تشخیص سریع دستکاری، جلوگیری از جعل آواتار	یادگیری فدرال، امضای هندسی داده‌ها، بلاک‌چین و HSM	افشای داده‌های بیومتریک و تهدید جعل سه‌بعدی (3D Deepfake)	امنیت داده‌ها
مصرف انرژی بیشتر، دشواری مدیریت	حفظ کنترل داده توسط کاربر، کاهش	پردازش محلی روی MEC، رمزنگاری	حساسیت داده‌های حرکتی و شناختی (Gaze, Micro-	حریم خصوصی کاربر

کلیدها، نیاز به استانداردهای جهانی	ریسک افشا، سازگاری با مقررات	چندلایه، سیاست‌های سختگیرانه ذخیره‌سازی	gestures)	
نبود کدک کم تأخیر اختصاصی HTC، فقدان پروتکل جهانی، عدم هماهنگی بین نهادها	ایجاد چارچوب مشترک جهانی، پیشرفت در QoE سه‌بعدی، امنیت XR	فعالیت ۳ GPP (Release ITU-T، 18/19) IEEE، SG16 P2048	نبود کدک اختصاصی برای ابرنقاط/میدان‌های نوری و پروتکل همزمانی دقیق	نبود کدک اختصاصی برای ابرنقاط/میدان‌های نوری و پروتکل همزمانی دقیق
زمان بر بودن فرآیند استانداردسازی، تضاد منافع سازمان‌ها، نیاز به اجماع جهانی	همگرایی فناوری‌ها، امکان مقیاس جهانی، پشتیبانی از کاربردهای حساس	چارچوب میان‌رشته‌ای G ^۶ ، ادغام ML و امنیت سخت‌افزاری	پراکندگی فعالیت‌ها میان GPP ^۳ ، ITU-T و IEEE	هماهنگی نهادی

5. ارزیابی تجربه کاربری و طراحی آزمایش‌ها

5.1. روش‌شناسی طراحی سناریوهای آزمایشی برای ارزیابی HTC

طراحی سناریوهای آزمایشی برای ارزیابی کیفیت و کارکرد ارتباطات نوع هولوگرافیک (HTC) باید ترکیبی از محیط‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی و شرایط واقعی میدان باشد تا هم رفتار سیستم در حالت ایده‌آل و هم کارکرد آن در بسترهای شبکه‌ای پویا سنجیده شود. در محیط‌های آزمایشگاهی، معمولاً از اتاق‌های کنترل‌شده نوری، دوربین‌های میدان نوری کالیبره‌شده، حسگرهای عمق دقیق و نمایشگرهای هولوگرافیک استفاده می‌شود تا بتوان کیفیت بازسازی و تأخیر پردازش را مستقل از مشکلات محیطی ارزیابی کرد [۱۰]. اما برای سنجش عملکرد واقعی HTC، طراحی سناریوها باید شامل شبکه‌های G-Advanced^۵، لینک‌های فیبر نوری پرمصرفیت، Wi-Fi ۷، و حتی پیوندهای ترارتر (THz) باشد تا اثرات واقعی پویایی شبکه، بار ترافیکی، تداخل، و جابه‌جایی کاربر بررسی شوند [۲]. پژوهش‌های اخیر تأکید دارند که HTC نسبت به تغییرات ناگهانی شبکه بسیار حساس است، بنابراین در سناریوهای آزمایشی باید شرایط شبکه‌ای متغیر از جمله افزایش تأخیر، جهش در جیت‌ر، افت نرخ بیت و Packet Loss شبیه‌سازی شود تا رفتار تطبیقی سیستم به‌طور کامل ارزیابی گردد [۱۵].

همچنین، آزمایش HTC باید شامل شرایط واقعی حرکت کاربر باشد، مانند راه‌رفتن، چرخش سریع سر، تغییر میدان توجه و تعامل چندکاربره، زیرا متغیرهای حرکتی نقش تعیین‌کننده‌ای در motion-to-photon latency و قوام هندسی صحنه دارند [۳]. ترکیب این عوامل در یک روش‌شناسی یکپارچه آزمایشی باعث می‌شود سنجش HTC نه تنها بر اساس شاخص‌های فنی، بلکه بر اساس پایداری ادراکی، قابلیت تعامل، و سطح غوطه‌وری واقعی صورت گیرد [۱۲]. چنین طراحی چندلایه‌ای ضروری است تا بتوان محدودیت‌های واقعی سیستم را شناسایی و راهکارهای بهینه‌سازی شبکه و رندرینگ را توسعه داد [۱۰].

5.2. معیارهای چندبعدی برای سنجش کیفیت تجربه (QoE) در HTC

کیفیت تجربه (QoE) در HTC مفهومی چندبعدی و پیچیده است که تنها با ترکیب معیارهای فنی، انسانی، تعاملی و روان‌شناختی قابل اندازه‌گیری است. در بعد فنی، معیارهایی مانند رزولوشن ابرنقاط، دقت میدان نوری، نرخ فریم پایدار، تأخیر انتها-به-انتها و نرخ خطا (Packet Loss) از مهم‌ترین شاخص‌ها هستند و تعیین می‌کنند که بازسازی هولوگرافیک تا چه میزان وفادار، روان و بدون اعوجاج انجام شده است [۷]. در بعد انسان‌محور، شاخص‌هایی چون حضور (Presence)، غوطه‌وری (Immersion)، راحتی دید (Visual Comfort) و هماهنگی ادراکی اهمیت دارند؛ مطالعات متعددی نشان می‌دهند که حتی افزایش جزئی در تأخیر یا ناپایداری فریم می‌تواند این معیارها را به شدت کاهش دهد [۸].

بعد تعامل‌محور شامل معیارهایی مانند دقت موقعیت‌یابی، پایداری رهگیری حرکت، latency تماس لمسی و هماهنگی میان مسیر نگاه (Gaze) و بازسازی هولوگرافیک است. این معیارها نقش کلیدی در تجربه کاربردهایی مانند همکاری صنعتی سه‌بعدی، آموزش پزشکی یا طراحی مجازی دارند [۶]. در نهایت، بعد روان‌شناختی شامل احساس لذت، اعتماد به سیستم، میزان استرس ادراکی و قابلیت پذیرش توسط کاربر است؛ این معیارها معمولاً با آزمون‌های ذهنی استاندارد مانند پروتکل ITU-T P ۹۱۳ سنجیده می‌شوند که برای ارزیابی کیفیت ادراکی محتواهای چندرسانه‌ای پیشرفته طراحی شده‌اند [۱۴].

در ارزیابی QoE هولوگرافیک، مطالعات اخیر بر استفاده از مدل‌های ادراکی مبتنی بر یادگیری ماشین تأکید دارند تا بتوان همبستگی میان QoS و QoE را در شرایط پویا پیش‌بینی کرد [۹]. افزون بر این، گزارش‌های جدید متاورس نشان می‌دهند که ترکیب معیارهای فنی و انسانی می‌تواند درک دقیق‌تری از رضایت کاربر ارائه دهد و برای طراحی شبکه‌های آینده مانند G^۶ ضروری است [۱۰]. به‌طور کلی، سنجش QoE در HTC باید یکپارچه، چندحسی و مبتنی بر رفتار واقعی کاربر باشد تا بتوان کیفیت تجربه را به‌صورت معتبر و قابل‌استفاده برای طراحی شبکه‌های متاورس ارزیابی کرد.

جدول تحلیلی بخش پنجم: ارزیابی تجربه کاربری و طراحی آزمایش‌ها

کاربردها	محدودیت‌ها	مزایا	ویژگی‌ها	حوزه
بررسی تأخیر، جیت‌ر، کیفیت بازسازی هندسی	هزینه بالا، عدم بازتاب شرایط واقعی شبکه	امکان اندازه‌گیری دقیق QoS/QoE، کنترل کامل متغیرها	محیط‌های نوری پایدار، تجهیزات دقیق (دوربین‌های میدان نوری، حسگرهای عمق)	آزمایش‌های کنترل‌شده آزمایشگاهی
ارزیابی حس حضور، غوطه‌وری، تعامل چندکاربره	دشواری کنترل متغیرها، وابستگی به زیرساخت شبکه	سنجش عملکرد در محیط واقعی، ارزیابی تجربه کاربری طبیعی	اجرا در شبکه‌های پویا و شرایط متغیر کاربر	آزمایش‌های میدانی واقعی
تحلیل کارایی شبکه و معماری-MEC	ارتباط غیرمستقیم با تجربه انسانی	معیارهای فنی قابل اندازه‌گیری، پایه برای	تأخیر انتها به انتها، جیت‌ر، نرخ از دست	شاخص‌های QoS

Cloud		بهینه‌سازی شبکه	رفتن بسته	
سنجش رضایت کاربر، طراحی تعاملات متاورسی	نیاز به مدل‌های ادراکی پیچیده، استانداردسازی ناقص	بازتاب ادراک انسانی، ارزیابی کیفیت واقعی تجربه	حضور، غوطه‌وری، راحتی دید، طبیعی بودن تعامل	شاخص‌های QoE
ایجاد مدل جامع برای ارزیابی HTC	پیچیدگی طراحی، نیاز به منابع بیشتر	پوشش همزمان دقت فنی و تجربه واقعی	ترکیب آزمایش‌های آزمایشگاهی و میدانی	روش‌های ترکیبی

6. تحلیل اقتصادی، مدل کسب‌وکار و استراتژی پذیرش بازار

6.1. تحلیل هزینه‌ها (TCO, CAPEX, OPEX) و مدل‌های درآمدی (B2B/B2C)

تحلیل اقتصادی استقرار ارتباطات نوع هولوگرافیک (HTC) نشان می‌دهد که مجموع هزینه مالکیت (TCO) تحت تأثیر سه مؤلفه اصلی شامل CAPEX، OPEX و هزینه‌های ارتقای دوره‌ای قرار دارد، که هر یک سهم قابل‌توجهی در مقیاس‌پذیری تجاری HTC دارند. در بخش CAPEX، بیشترین هزینه مربوط به توسعه زیرساخت شبکه‌های G⁶، پیوندهای فیبر نوری با ظرفیت ترابیتی، استقرار گیت‌وی‌های تراهرتزی (THz)، و ایجاد لایه‌های پردازش لبه (MEC) است که نیازمند سرمایه‌گذاری قابل‌توجه اپراتورها و صنایع دیجیتال است [۱۱]. علاوه بر این، هزینه سخت‌افزار کاربر شامل نمایشگرهای هولوگرافیک، دوربین‌های میدان نوری، حسگرهای سه‌بعدی و واحدهای رندرینگ ماژولار سهم مهمی در هزینه‌های اولیه دارند [۱۳]. در سوی دیگر، OPEX شامل مصرف انرژی برای پردازش بلادرنگ، هزینه‌های نگهداری و خنک‌سازی مراکز لبه، به‌روزرسانی مستمر مدل‌های رندرینگ مبتنی بر هوش مصنوعی و هزینه‌های امنیت سایبری است که در کاربردهای چندکاربره افزایش چشمگیری می‌یابند [۹].

از منظر مدل‌های درآمدی، سرویس‌های اشتراکی چندسطحی (Tiered Subscription) یکی از محتمل‌ترین گزینه‌ها برای کسب‌وکارهای B2C است، به‌ویژه برای خدماتی مانند تماس هولوگرافیک، تعاملات اجتماعی در متاورس و رویدادهای زنده سه‌بعدی [۱۶]. در حوزه B2B نیز کاربردهایی چون همکاری صنعتی از راه دور، طراحی دیجیتال، پزشکی مبتنی بر هولوگرام و پشتیبانی هوشمند تولید می‌توانند درآمد پایدار ایجاد کنند، زیرا سازمان‌ها حاضرند برای دقت بالا، قابلیت اطمینان و پردازش اختصاصی هزینه بیشتری پرداخت کنند [۱۲]. افزون بر این، خدمات ارزش‌افزوده مانند رندرینگ اختصاصی مبتنی بر لبه، ذخیره‌سازی ایمن هولوگرافیک، فشرده‌سازی عصبی سفارشی و امنیت مبتنی بر بلاک‌چین به‌عنوان جریان‌های درآمدی جدید شناخته می‌شوند که در گزارش‌های اخیر مرجع نیز مورد تأکید قرار گرفته‌اند [۷]. در نهایت، ترکیب این مدل‌ها در قالب اکوسیستم تجاری متاورس می‌تواند شرایط لازم برای توسعه پایدار HTC را فراهم کند، اما تنها در صورتی که هزینه‌های CAPEX/OPEX از طریق اقتصاد مقیاس و پیشرفت‌های تکنولوژیک مدیریت شوند [۱۱].

6.2. شناسایی بخش‌های پیشرو در پذیرش و تحلیل موانع (هزینه، مقررات)

پذیرش HTC در بازار به‌طور طبیعی در بخش‌هایی آغاز می‌شود که نیازمند تعاملات سه‌بعدی دقیق و بلادرنگ هستند. یکی از بخش‌های پیشرو، سلامت دیجیتال است؛ به‌ویژه در جراحی از راه دور، بازسازی سه‌بعدی اندام‌ها و آموزش پزشکی که

نیازمند رندرینگ دقیق، تأخیر بسیار کم و قابلیت اطمینان بالا هستند، و بنابراین HTC می‌تواند تحول‌آفرین باشد [۶]. بخش آموزش و یادگیری پیشرفته نیز به دلیل نیاز به تعامل بلادرنگ و نمایش سه‌بعدی مفاهیم پیچیده، از اولین پذیرندگان HTC به شمار می‌رود [۵]. همچنین، رویدادهای زنده، کنسرت‌های مجازی و همکاری‌های صنعتی چندمنفره به دلیل ظرفیت ایجاد حضور مجازی فوق‌واقعی (Hyper-Presence)، یکی از محرک‌های مهم پذیرش بازار محسوب می‌شوند [۴].

با این حال، پذیرش گسترده HTC با مجموعه‌ای از موانع اساسی روبه‌رو است. نخست، هزینه بالای سخت‌افزار کاربر شامل نمایشگرهای هولوگرافیک و حسگرهای میدان نوری، یکی از موانع اصلی ورود به بازار مصرفی است [۱۳]. دوم، نیاز به زیرساخت‌های بسیار قدرتمند شبکه‌ای شامل ۵G، THz و MEC، مانع بزرگی برای بسیاری از کشورها و اپراتورهاست و باعث عدم یکسانی دسترسی جهانی به HTC می‌شود [۱۱]. علاوه بر این، نگرانی‌های گسترده در مورد حریم خصوصی و امنیت داده‌های بیومتریک و حرکتی نیز یکی از موانع روانی و قانونی مهم محسوب می‌شود، به‌ویژه با توجه به حساسیت داده‌های هولوگرافیک دقیق که می‌تواند هویت کاربران را برملا کند [۱۴]. آخرین مانع، عدم بلوغ مدل‌های کسب‌وکار در حوزه متاورس و HTC است؛ به‌طوری‌که هنوز مشخص نیست چه نوع ساختار قیمتی، ضمانت کیفیت (SLA)، یا مدل مالکیت داده برای کاربران و شرکت‌ها مناسب‌تر خواهد بود [۱۶]. در مجموع، اگرچه بخش‌هایی مانند سلامت، آموزش و سرگرمی پیش‌تاز پذیرش HTC هستند، اما رفع موانع هزینه‌ای، مقرراتی و کسب‌وکاری شرط لازم برای تجاری‌سازی گسترده و پایدار آن است [۵].

7. نقشه راه فناوری و استراتژی انتشار

7.1. زمان‌بندی بلوغ فناوری و تجاری‌سازی (از ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۰ و پس از آن)

نقشه راه فناوری برای ارتباطات نوع هولوگرافیک (HTC) نشان می‌دهد که مسیر بلوغ این حوزه در سه مرحله اصلی قابل تقسیم است. مرحله نخست، دوره نمونه‌های اولیه آزمایشی (۲۰۲۵-۲۰۲۸) است که در آن تمرکز بر توسعه الگوریتم‌های اولیه فشرده‌سازی ابرنقاط و میدان نوری، پیاده‌سازی شتاب‌دهنده‌های سخت‌افزاری اولیه برای رندرینگ سه‌بعدی، و انجام آزمایش‌های محدود بر بستر شبکه‌های 5G-Advanced خواهد بود [۳]. در این مرحله، معماری‌های لبه‌محور (MEC) نقش حیاتی در مدیریت بار پردازشی و کاهش تأخیر دارند، زیرا زیرساخت‌های 5G هنوز در مرحله تدوین استانداردها و آزمایش‌های اولیه هستند [۱۵]. مرحله دوم، دوره بهینه‌سازی و استقرار جزئی (۲۰۲۸-۲۰۳۰) است که در آن استانداردهای 5G در حوزه‌هایی مانند لایه‌های فیزیکی THz، رادیوهای هوشمند (RIS)، و ارتباطات فراباند (Ultra-Wideband) به بلوغ می‌رسند و امکان ارائه تجربیات هولوگرافیک نیمه‌واقعی در کاربردهای صنعتی و آموزشی فراهم می‌شود [۲]. در نهایت، مرحله سوم، تحقق کامل HTC در مقیاس متاورس (پس از ۲۰۳۰) است که تحت تأثیر تکامل کامل شبکه‌های 5G، ادغام فناوری THz با زیرساخت‌های لبه توزیع‌شده، و استانداردسازی کامل سازوکارهای QoS/QoE، همزمانی زیر میلی‌ثانیه و امنیت هولوگرافیک شکل می‌گیرد [۱]. در این دوره، ساختارهای ابر-لبه-کاربر به‌طور کامل یکپارچه شده و توان پردازشی توزیع‌شده در مقیاس جهانی، امکان ارائه تجربیات فراگیر هولوگرافیک را بدون افت کیفیت فراهم می‌کند [۱۴]. بر اساس پیش‌بینی منابع، فناوری‌هایی مانند پردازش نورمحور، فشرده‌سازی عصبی، شبکه‌های سلول فشرده (Ultra-Dense) و معماری‌های هوشمند THz از محرک‌های کلیدی تجاری‌سازی نهایی HTC خواهند بود [۸].

7.2. استراتژی هدف‌گذاری مجلات و افزایش تأثیر علمی-صنعتی

برای افزایش تأثیر پژوهشی و صنعتی در حوزه ارتباطات نوع هولوگرافیک (HTC)، یک استراتژی انتشار هدفمند ضروری است که هم جامعه علمی و هم نهادهای صنعتی-استانداردسازی را پوشش دهد. از نظر جایگاه علمی، مجلات سطح بالا مانند IEEE Communications Surveys & Tutorials و Proceedings of the IEEE مناسبترین گزینهها برای انتشار یک مقاله مروری جامع هستند، زیرا این مجلات بهطور گسترده به انتشار نوآوریهای تحول آفرین در حوزه G⁶، رندرینگ پیشرفته و فناوریهای متاورس میپردازند [۴]. همچنین مجلات تخصصیتر مانند IEEE Transactions on Multimedia و IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics برای بخشهای مرتبط با فشرده سازی، ادراک بصری و مدل سازی هولوگرافیک بسیار مناسب هستند [۶]. در سطح کنفرانسها، رویدادهای معتبر جهانی مانند IEEE GLOBECOM، IEEE ICC و ACM SIGGRAPH امکان دیده شدن پژوهش را در میان جامعه متخصصان ارتباطات، گرافیک و محاسبات لبه فراهم می کنند [۱۰].

برای افزایش اثرگذاری صنعتی، تعامل مستقیم با GPP³ (به ویژه در Releases ۱۸-۱۹) و گروه های کاری ITU-T FG-Metaverse ضروری است، زیرا این نهادها در حال تدوین استانداردهای کلیدی برای THz، MEC، فشرده سازی سه بعدی و معیارهای QoE هستند [۱۵]. پیشنهاد می شود پژوهشگران پس از انتشار مقاله، نتایج کلیدی را در قالب پیشنهاد استاندارد (Standard Contribution) به GPP³ و ITU ارسال کنند تا تأثیر مستقیم بر روند استانداردسازی داشته باشند [۲]. از سوی دیگر، همکاری با صنعتگران مانند شرکت های مخابراتی، تولیدکنندگان سخت افزار و پلتفرم های متاورس، از طریق آزمایش های میدانی مشترک، می تواند مسیر تجاری سازی را تسریع کند [۱۲]. در نهایت، تشکیل کنسرسیوم های پژوهشی بین المللی که دانشگاه ها، صنعت و نهادهای استانداردسازی را در یک چرخه بازخورد مشترک قرار می دهد، مؤثرترین راهکار برای تضمین پیشبرد HTC از مرحله پژوهش به مرحله کاربرد واقعی است [۱].

8. نتیجه گیری و کارهای آینده

8.1. جمع بندی یافته های کلیدی و توصیه های سیاستی

مرور جامع انجام شده بر ارتباطات نوع هولوگرافیک (HTC) نشان داد که تحقق این فناوری به عنوان بستر اصلی تعاملات در عصر متاورس، مستلزم بازطراحی بنیادین لایه های مختلف شبکه، معماری های پردازشی و سازوکارهای امنیتی است. تحلیل روند تکامل رسانه های دیجیتال نشان داد که فناوری های AR، VR و XR تنها گام های مقدماتی برای رسیدن به تجربه واقعی HTC بوده اند و همچنان از محدودیت هایی چون تأخیر بالا، ظرفیت پردازشی ناکافی و ضعف در همزمانی رنج می برند [۴]. بررسی معماری چندلایه نیز نشان داد که تعامل مؤثر میان دستگاه های هولوگرافیک، پردازش لبه، شبکه های G⁶ و زیرساخت های ابرمحور، شرط لازم برای دستیابی به تأخیر زیر ۵ میلی ثانیه و اطمینان پذیری فوق بالا است؛ قابلیت هایی که برای تجربه فراگیر هولوگرافیک حیاتی است [۶]. همچنین مرور چالش های فنی نشان داد که استانداردهای فعلی مانند MPEG V-PCC و G-PCC پاسخگوی حجم عظیم داده های سه بعدی نیستند و همزمانی چندکاربره حتی در G-Advanced⁵ نیز با ناپایداری همراه است [۷]. از سوی دیگر، تهدیداتی مانند جعل عمیق هولوگرافیک، سرقت هویت حرکتی و افشای داده های بیومتریک، ضرورت توسعه سازوکارهای امنیتی نوین را برجسته می کند [۱۲].

با توجه به این یافته ها، مجموعه ای از توصیه های سیاستی برای تسریع مسیر بلوغ HTC ارائه می شود: نخست، پژوهشگران باید همکاری های بین رشته ای میان حوزه های شبکه، بینایی کامپیوتر، فشرده سازی و علوم ادراک را تقویت کنند و تمرکز ویژه بر توسعه الگوریتم های فشرده سازی عصبی و سازوکارهای همزمانی پیشگویانه داشته باشند [۴]. دوم، مهندسان شبکه و اپراتورها باید سرمایه گذاری در زیرساخت های G⁶، طیف THz، شبکه های فوق چگال و MEC را در

اولویت قرار دهند تا ظرفیت لازم برای رندرینگ هولوگرافیک برخط فراهم شود [۶]. سوم، ارائه‌دهندگان خدمات باید مدل‌های کسب‌وکار پایدار و چندسطحی برای کاربردهای پزشکی، آموزشی و صنعتی مبتنی بر HTC طراحی کنند تا بازگشت سرمایه تضمین گردد [۷]. چهارم، نهادهای استانداردسازی (ITU-T، IEEE و GPP۳) لازم است هماهنگی بیشتری در تدوین استانداردهای همزمانی، QoE، فشرده‌سازی و امنیت هولوگرافیک داشته باشند و از رویکردهای مشترک بین صنعتی-دانشگاهی بهره ببرند [۱۲]. اتخاذ این سیاست‌ها می‌تواند مسیر تجاری‌سازی کامل HTC در مقیاس متاورس را تسریع کند.

8.2. پیشنهاد حوزه‌های پژوهشی آتی و جهت‌گیری‌های تحقیقاتی

بررسی چشم‌انداز پژوهش نشان می‌دهد که بسیاری از حوزه‌های کلیدی HTC همچنان کم‌کاویده مانده‌اند و ظرفیت بالایی برای تحقیقات نوآورانه دارند. یکی از امیدبخش‌ترین حوزه‌ها، الگوریتم‌های فشرده‌سازی عصبی-معنایی است؛ جایی که مدل‌ها باید بتوانند متناسب با اهمیت ادراکی اجزای صحنه هولوگرافیک، میدان نوری را به‌صورت تطبیقی رمزگذاری کنند. پرسش اصلی این است:

چگونه می‌توان یک مدل عصبی طراحی کرد که هم حجم داده را به‌طور چشمگیر کاهش دهد و هم کیفیت ادراکی را حفظ کند؟ [6]

حوزه دوم، معماری شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی QoE در زمان واقعی است. با توجه به دینامیک پیچیده تعاملات هولوگرافیک، سیستم باید بتواند تجربه کاربر را بر اساس وضعیت شبکه، حرکت، رزولوشن و شاخص‌های ادراکی تخمین بزند.

پرسش کلیدی: کدام معماری یادگیری عمیق قادر است QoE هولوگرافیک را با تأخیر زیر چند میلی‌ثانیه پیش‌بینی کند؟ [4].

حوزه سوم، سازوکارهای امنیتی سبک‌وزن و حتی کوانتومی است؛ زیرا داده‌های هولوگرافیک شامل اطلاعات حساس بیومتریک، الگوهای حرکتی و نقشه عمیق چهره هستند.

چالش اصلی این است: چگونه می‌توان امنیت سطح بالا را بدون افزودن سربار پردازشی به جریان رندرینگ بلادرنگ تضمین کرد؟ [12]

حوزه چهارم، مدل‌های اقتصادی نوآورانه برای متاورس و HTC است؛ زیرا هزینه‌های زیرساختی، انرژی و سخت‌افزار، مدل‌های درآمدی موجود را ناکافی می‌کند. پرسش اصلی در این حوزه:

کدام مدل اقتصادی می‌تواند توازن بین هزینه‌های شبکه، توان پردازشی و نیاز کاربران به تجربه‌های فراگیر را برقرار کند؟ [7]

این پرسش‌ها نشان می‌دهند که آینده HTC نیازمند همکاری هم‌زمان پژوهشگران شبکه، متخصصان هوش مصنوعی، کارشناسان امنیت و اقتصاددانان دیجیتال است تا مسیر رسیدن به یک متاورس هولوگرافیک واقعی هموار گردد.

منابع

1. C. Westphal, J. Hong, S. Kang, L. Chiariglione, and T. Jiang, "Networking for the Metaverse: The Standardization Landscape," arXiv preprint, Dec. 2023. [Online]. Available: [NETWORKING FOR THE METAVERSE: THE STANDARDIZATION LANDSCAPE](#)
2. W. Hamidouche, L. Bariah, and M. Debbah, "Immersive Media and Massive Twinning: Advancing Toward the Metaverse," IEEE Communications Magazine, vol. 62, no. 7, pp. 20-32, 2024. [Online]. Available: [Immersive Media and Massive Twinning: Advancing Towards the Metaverse](#)
3. N. Kuo and H. Baghban, "Holo-Artisan: A Personalized Multi-User Holographic Experience for Virtual Museums on the Edge Intelligence," arXiv, Aug 2025. [Online]. Available: [Holo-Artisan: A Personalized Multi-User Holographic Experience for Virtual Museums on the Edge Intelligence](#)
4. M. E. Latoschik and J. Lin, "Digital body, identity and privacy in social virtual reality: A systematic review," Frontiers in Virtual Reality, 2022. [Online]. Available: [Frontiers | Digital body, identity and privacy in social virtual reality: A systematic review](#)
5. J. Park and B. Lee, "Holographic techniques for augmented reality and virtual reality near-eye displays," Light: Advanced Manufacturing, vol. 3, no. 1, p.9, Feb 2022. [Online]. Available: [Holographic techniques for augmented reality and virtual reality near-eye displays](#)
6. Y. Benzhi, G. Manxue, L. Jingwen, L. Kun, Z. Lu, L. Zheng, and Y. Wei, "Development Trend of 6G Holographic Communication Service," White paper, Beijing, China, 2022. [Online]. Available: [Microsoft Word - Development Trend of 6G Holographic Communication Service.docx](#)
7. V. Shvetsov and S. H. Alsamhi, "When Holographic Communication Meets Metaverse: Applications, Challenges, and Future Trends," in Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2024. [Online]. Available: [IEEE Xplore Full-Text PDF:](#)
8. C. Udora, P. Qian, S. Anmulwar, A. Fernando, and N. Wang, "Quality of Experience Modelling and Analysis for Live Holographic Teleportation," in Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC), Seoul, South Korea, pp. 1-6, 2023. [Online]. Available: [QoE-Modelling-and-Analysis-for-Live-Holographic-Teleportation_final-1.pdf](#)
9. I. F. Akyildiz and H. Guo, "Holographic-type Communication: A New Challenge for the Next Decade," IEEE Transactions on Wireless Communication, vol. 22, no. 5, pp. 45-58, May 2023. [Online]. Available: [hologram_v6-1.pdf](#)
10. L. He, K. Liu, Z. He, L. Cao, and L. Liangcai, "Three-dimensional holographic communication system for the metaverse," Optics Communications, vol. 526, article id. 128894, Jan 2023. [Online]. Available: [Three-dimensional holographic communication system for the metaverse - Astrophysics Data System](#)
11. D. Buhalis and N. Karatay, "Mixed Reality (MR) for Generation Z in Cultural Heritage Tourism Towards Metaverse," in Proc. Enter22 e-Tourism Conference, 2022. [Online]. Available: [Mixed Reality \(MR\) for Generation Z in Cultural Heritage Tourism Towards Metaverse | SpringerLink](#)
12. R. Petkova, V. Poulkov, A. Manolova, and K. Tonchev, "Challenges in Implementing Low-Latency Holographic-Type Communication Systems," Sensors, vol. 22, no. 24, p. 9617, Dec. 2022, doi: 10.3390/s22249617. [Online]. Available: [Challenges in Implementing Low-Latency Holographic-Type Communication Systems - PMC](#)
13. C. Fernandez, "Revolutionizing Tomorrow: Embracing the Cutting-Edge of Holographic Technology," IntechOpen, 2024. [Online]. Available: [Revolutionizing Tomorrow: Embracing the Cutting-Edge of Holographic Technology | IntechOpen](#)
14. I. F. Akyildiz, "Networking 2030: Metaverse, Extended Reality, Hologram Type and Multimedia Communication Challenges in 6G and Beyond Systems," International Telecommunication Union (ITU), Technical Report, Geneva, Switzerland, 2023. [Online]. Available: [D1_NetworkRequirementsForMetaverseServices.pdf](#)

15. O. Elloumi, T. Biatek, K. Hasley and D.Bozeman, "Is the network ready for Metaverse applications?" Metaverse Standards Forum (MSF) Presentation, 2023. [Online]. Available: [MSF Presentation Best Practices](#)
16. W.Wang, H.Guo, P. Xu, C. Westphal, M. Dohler, M. Reisslein and M. vander Schaar (Guest Editors) , "Special Issue on Metaverse: Communications, Networking and Computing," ITU Journal on Future and Evolving Technologies, vol. 4, 2023. [Online]. Available: [Special issue on Metaverse](#)

Holographic Communications: Networking Requirements for the Metaverse Era

Sara Kazemi Lak¹, Dr. Mohammad Mehdi Shirmohammadi²

¹Bachelor of Computer Engineering, Computer Department, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran, saraw3089@gmail.com

²Professor, Computer Department, Computer Department, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran, Mmshirmohammadi@iau.ac.ir

Abstract_

Holographic communications (HTC), as the ultimate paradigm of human interactions in the metaverse, requires a major leap in network infrastructure. This paper presents a review-analytical approach to provide an integrated framework for identifying and classifying HTC requirements. First, the evolution of media from 2D to XR and the metaverse is reviewed, and gaps in terabit bandwidth, sub-5ms latency, sub-microsecond synchronism, and multi-ninth reliability are identified. Then, a hierarchical multi-layer architecture including sensors, edge processing (MEC), 6G/THz networks, and cloud services is introduced and its role in reducing motion-to-photon latency and ensuring temporal consistency is analyzed. Next, novel solutions such as neuro-semantic compression, predictive rendering, and distributed concurrency are reviewed and multi-dimensional QoS/QoE metrics are proposed for technical and perceptual evaluation. Security, privacy, and threats such as 3D forgery are also covered with solutions such as federated learning and blockchain, and finally, a roadmap for HTC commercialization beyond 2030 is presented.

Keywords: Holographic communications, neuro-semantic compression, distributed concurrency, MEC edge processing, QoE quality of experience, security and privacy