



دوین کنفرانس ملی تجربیات ساخت تأسیسات آبی شبکه‌های آبیاری و زهکشی

۱۳۸۶ آبان ماه - دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی آب و خاک، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی

2nd Iranian Conference on Construction experiences of Hydraulic structures and Irrigation and Drainage networks (ICCHID)

23 - 25 October 2007 - Tehran University, Irrigation and Reclamation Dept.

اجرای تونل زهکش نعل اسبی ۱۵۰۰x۱۸۰۰ میلی متر

محمد مهدی محمدی

مدیر پروژه، طرح احداث زهکش خاتون، شیراز، شرکت بین المللی ارسا ساختمان
Mohammadi@arsa.ir

محمد مهدی کمانی

مسئول دفتر فنی، طرح احداث زهکش خاتون، شیراز، شرکت بین المللی ارسا ساختمان

سیامک محمد حسینی

کارشناس دفتر فنی، طرح احداث زهکش خاتون، شیراز، شرکت بین المللی ارسا ساختمان

چکیده

یکی از قدیم ترین روش های بهره برداری از آب زیرزمینی، احداث تونل زهکش و یا همان قنات می باشد. احداث تونل زهکش خاتون شهر شیراز به دو منظور انجام می شود، اول، استفاده از آب زیرزمینی جهت کشاورزی و در نهایت پایین انداختن سطح تراز آب زیرزمینی جهت رفع مشکلات شهرنشینی. مراحل مختلف احداث تونل زهکش عبارتند از: تعیین مشخصات، ابعاد و موقعیت سفره ی آب زیرزمینی، احداث چاه های آبکشی جهت خشکاندازی جبهه کار و تسهیل حفاری تونل در زیر سطح تراز آب، احداث میله چاه (چاه های دسترسی) که برای حفاری و نگهداری تونل انجام می شود و دو نوع اصلی و فرعی دارد، میله چاه فرعی فقط جهت دسترسی به تونل احداث شده و با عبور از جبهه کار پر می گردد؛ ولی میله چاه اصلی علاوه بر تأمین دسترسی به تونل، جهت نگهداری تونل نیز مورد استفاده قرار می گیرد؛ مرحله ی بعدی ساخت قطعات پیش ساخته ی مینیاتوری (سگمنت) جهت تحکیم محیط تونل است و در نهایت کار اصلی که حفاری و تحکیم تونل یا گالری می باشد، انجام می شود.

واژه های کلیدی: تونل زهکش، چاه آبکشی، سگمنت، گالری، میله چاه.

آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شیرین مورد نیاز انسان است. امروزه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی برای مصارفی چون کشاورزی، صنعت و شرب، توسعه‌ی زیادی پیدا کرده است. استفاده از آب‌های زیرزمینی در کشور ما که فاقد منابع آب سطحی فراوان است، از دیرباز رواج بسیار داشته است و فن تونل‌سازی سابقه‌ی دیرینه‌ای در حدود بیش از سه هزار سال در کشور ما دارد که در طی این زمان طولانی، قنات‌هایی به طول چند ده کیلومتر و در اعماق چند صد متر حفاری شده است.

در شهر شیراز به دلیل نبود زیرساخت‌های لازم، تخریب ساختارهای قبلی، عدم تناسب رشد شهر با ساختار زمین‌شناسی، آب حاصل از برف و باران در زیر سطح زمین انباشته شده و سطح تراز آب زیرزمینی تدریجاً بالا آمده و مشکلاتی را در زندگی شهری ایجاد کرده است.

لايه‌های زمین از دیدگاه علم هیدرولوژی به دو دسته‌ی کلی قابل نفوذ و غیر قابل نفوذ تقسیم می‌شود، تونل زهکش به دلیل منطقه‌ی وسیع جذب آب زیرزمینی، تعدد استفاده‌کنندگان تحت پوشش، هزینه‌های بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری، در مقایسه با سایر روش‌های موجود از جمله حفر چاه، به عنوان یکی از بهترین روش‌های استحصال آب و پایین انداختن سطح آب زیرزمینی محسوب می‌شود.

بالا بودن سفره‌ی آب زیرزمینی شیراز و در نتیجه مشکلاتی از قبیل نفوذ رطوبت به داخل پی، ریشه و کف ساختمان‌ها و بروز مشکلات بهداشتی از یک سو و نبود منابع آب کافی جهت آبیاری زمین‌های کشاورزی سرروستان منجر به ارائه طرحی جامع و در فازهای مختلف جهت رفع این دو مهم شد؛ پروژه‌ی تونل زهکش محور خاتون به عنوان یکی از فازهای این طرح هم‌اکنون در حال اجراست و از دو قسمت کانال‌کنی و لوله‌گذاری به طول ۱۶۰۰ متر لوله به قطر ۱۴۰۰ میلی‌متر و گالری زهکش به طول ۱۳ کیلومتر تشکیل شده است. برای این کار با حفر تونل در زیر زمین و پایین‌تر از تراز آب، آب به داخل این تونل‌ها زهکش شده و با توجه به شیب ملایم، آب به نقطه‌ی انتهایی تونل هدایت می‌شود و پس از تکمیل سایر فازهای این طرح جهت مصارف کشاورزی دشت سرروستان استفاده خواهد شد.

جهت حفاری تونل زهکش لازم است ابتدا با حفاری چاه‌های آبکشی و پمپاژ آن‌ها تا حد امکان آب منطقه را موقتاً تا زیر تراز گالری پایین انداخت آن‌گاه با حفر میله (چاه‌های دسترسی) و سپس حفاری گالری و نصب قطعات مینیاتوری پیش ساخته و پرکردن فضای خالی پیرامون آن با فیلتر، به اهداف پروژه دست یافت. در زیر به بررسی شیوه‌ها، تغییرات گستره، روش‌های اجرایی و اجزای کار پرداخته می‌شود:

۱. تعیین مشخصات، ابعاد و موقعیت سفره‌ی آب زیرزمینی

- با بررسی‌هایی که در سطح و زیر زمین انجام می‌گیرد، می‌توان اطلاعات مختلفی در مورد چگونگی و موقعیت منابع آب زیرزمینی در هر محل به دست آورد. اکتشاف و مشخص کردن خصوصیات منابع آب زیرزمینی در هر منطقه شامل مراحل و روش‌های مختلفی است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود.
- مطالعات زمین‌شناسی: تعبیر و تفسیر عکس‌های هوایی، نوع پوشش‌های گیاهی، شبکه‌های زهکش طبیعی، فرسایش، مطالعات ژئوفیزیک در سفره مورد نظر، رنگ و شکل زمین

- مطالعات آب‌شناسی: میزان تغذیه‌ی زمین از طریق بارندگی و آب‌های جاری، تعیین موقعیت، مقدار و نحوه‌ی تخلیه‌ی آب از چشمه‌ها و تبخیر و تعرق از طریق گیاهان
 - احداث چاه‌های اکتشافی یا گمانه: گرچه عملیات حفاری غالباً هزینه‌ی زیادی دارد ولی دقیق‌ترین اطلاعات در مورد عمق و کیفیت آب زیرزمینی در هر محل را به دست می‌دهد. چاه‌های گمانه معمولاً قطر کمی دارند (حدود ۸ تا ۱۰ اینچ). در موقع حفاری چاه‌ها، با نمونه‌برداری از لایه‌ها و آب و اندازه‌گیری تغییرات تراز آب، اطلاعات لازم در مورد لایه‌های آبدار به دست می‌آید.
- با شناسایی اطلاعات لایه‌های زمین از قبیل عمق، ضخامت، جنس و خصوصیات لایه‌ها و همچنین عمق لایه‌ی نفوذناپذیر، تعیین سطح تراز آب زیرزمینی و تعیین ضرایب هیدرودینامیک لایه‌ی آبدار شامل **K**، **T** و **S**، نوبت به تعیین مسیر احداث تونل زهکش می‌رسد. معمولاً مسیر تونل زهکش را طوری انتخاب می‌کنند که بیشترین آب، وارد آن شود بنابراین بهترین عمق برای تونل کمی بالاتر از لایه‌ی نفوذناپذیر است، زیرا تمام آب‌های بالای تونل وارد زهکش می‌شوند.

۲. چاه آبکشی

با مشخص شدن مسیر تونل زهکش، عملیات اجرایی احداث تونل آغاز می‌شود. به دلیل این که تمام مسیر تونل زیر سطح آب است، باید مسیر را تا آن‌جا که ممکن است خشک‌اندازی کرد تا خطرات ناشی از بالا بودن سطح آب و ریزش زمین به حداقل برسد. مسئله‌ای که مطرح می‌شود، ابعاد و فاصله‌ی حفاری چاه می‌باشد.

(۱) تعیین سطح مقطع و عمق چاه

هر چه قطر چاه بیشتر باشد بهتر است ولی به دلایل فنی و بالا بودن هزینه‌ی حفاری، باید قطری را تعیین کرد که از لحاظ اقتصادی، فنی و تأمین نیاز بهینه باشد. در این پروژه، قطر حفاری چاه ۱۸ اینچ در نظر گرفته شده که در نتیجه، قطر لوله جدارها برابر ۱۶ اینچ و قطر لوله‌ی مشبک آبکشی برابر ۱۲ اینچ خواهد شد.

عمق چاه نیز باید طوری انتخاب شود که انتهای چاه از سطح تحتانی لایه‌ی نفوذناپذیر تجاوز نکند ولی به دلیلی که در ذیل تشریح می‌شود معمولاً عمق چاه، حدود ۱۰ متر بیش‌تر از عمق لایه‌ی نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود، تا سطح تراز آب به اندازه‌ی کافی پایین بیفتد.

(۲) تعیین موقعیت و فواصل چاه‌ها

در این پروژه از لایه‌ی آبدار آزاد بهره‌برداری می‌شود، چون تونل زهکش بالای اولین لایه‌ی نفوذناپذیر احداث می‌شود بنابراین از معادلات لایه‌های آبدار آزاد استفاده می‌شود. اگر **Q** دبی چاه، **K** ضریب نفوذپذیری لایه‌ی آبدار، **r** فاصله‌ی شعاعی از چاه و **h** سطح ایستایی آب باشد:

$$Q = \frac{1.36K(h_2^2 - h_1^2)}{\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (1)$$

در لایه‌های آبدار آزاد، حتی اگر چاه‌ها به خوبی تجهیز شده و لوله‌گذاری مناسبی داشته باشند، به طوری که بتوان افت مربوط به ورود آب را نادیده گرفت، با این حال ارتفاع سطح آب در چاه در حال آبکشی همواره کم‌تر از ارتفاع سطح ایستایی مجاور چاه است. به همین دلیل عمق چاه معمولاً حدود ۱۰ متر پایین‌تر از لایه‌ی نفوذناپذیر در نظر گرفته می‌شود. اگر Q دبی ثابت چاه، T ضریب قابلیت انتقال، t زمان از شروع پمپاژ، S ضریب ذخیره، L مقدار افت سطح پیزومتریک و r فاصله تا مرکز چاه باشد:

$$L = \frac{QW}{4pT} \quad (2)$$

که در آن W به نام تابع چاه شناخته می‌شود و تابعی است از: r, t, S, T

$$W = f(r, S, T, t)$$

در مورد لایه‌های آبدار آزاد، چون در خلال پمپاژ با پایین رفتن سطح ایستایی، مقدار T نیز همراه با t و r تغییر می‌کند، به علاوه مولفه‌ی قائم جریان نیز ممکن است در نزدیک چاه بزرگ شود، لذا مسئله خیلی پیچیده‌تر است ولی در افت‌های کم با تقریب خوبی می‌توان از روابط بالا استفاده کرد.

۳) چگونگی حفاری

چاه آبکشی با دستگاه حفاری به قطر ۱۸ اینچ حفاری شده و سپس از لوله‌ی فولادی جدار ۱۶ اینچ و ۱۲ اینچ مشبک استفاده می‌شود. پس از پایان حفاری و لوله‌گذاری، بین دو لوله با فیلتر شن و ماسه پر می‌شود و سپس لوله‌ی جدار خارج می‌گردد. سپس یک پمپ کفکش و یا شناور به داخل چاه فرستاده می‌شود تا آبکشی آغاز گردد. دبی اسمی پمپ کفکش ۷۰۰ و پمپ شناور ۱۵۰۰ مترمکعب در روز است.

۴) آبکشی

در کارگاه به طول ۳۰۰ متر، حداقل ۱۸ حلقه چاه آبکشی و چهار میله چاه دسترسی حفاری می‌شود، که برای آبکشی در مجموع باید ۲۲ پمپ کفکش و شناور، همواره در حال پمپاژ باشند. باید شبکه‌ی انتقال برق و تأسیسات برای پمپ‌ها و ۴ عدد بالابر طراحی و اجرا شود هم‌چنین باید ۱۰ روز آبکشی انجام شود تا جبهه کار آماده برای حفاری شود و در طول حفاری تونل یا میله چاه عمل پمپاژ به طور پیوسته انجام شود تا جبهه از محل احداث چاه آبکشی عبور کند. پس از عبور جبهه کار از محل چاه آبکشی، پمپاژ آب متوقف شده و چاه پر می‌شود. قبل از پر کردن چاه آبکشی، لوله مشبک خارج شده، چاه با خاک پر می‌شود و ۲ متر بالای آن بتن می‌شود.

۵) زمان ویژه حفاری

فرآیند احداث یک چاه آبکشی ۳۶ متری از شروع حفاری تا شروع پمپاژ، با یک دستگاه حفاری و دو نفر کارگر، حدود ۷ روز به طول می‌انجامد. با توجه به مطالعات و احجام برآوردی جهت ۱۳ کیلومتر تونل، تعداد ۲۶۴ حلقه چاه به عمق میانگین ۲۰ متر طراحی و پیشنهاد شده بود که تا کنون (۷۸۰۰ متر تونل) تعداد ۴۸۸ حلقه چاه به عمق میانگین ۱۸ متر حفاری و آبکشی شده است.

۳. قطعات مینیاتوری سگمنت

جهت لاینینگ قسمت حفاری شده گالری از قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی (Segment) به شکل نعل اسب که از سه قسمت مجزا تشکیل شده و به صورت کام و زبانه در هم چفت می‌شوند، استفاده می‌شود، پیچیدگی اجرایی خاص، حجم کم (هر قطعه ۰،۳۶ متر مکعب) شکل هندسی ظریف، آرماتوربندی خاص (سگمنت دیواره به صورت منحنی با دو شعاع داخلی متفاوت ۸۲،۵ و ۱۳۹ سانتی‌متر و کف با درزها و گوشه‌های غیر چهارضلعی به طول ۱،۸ متر به ضخامت ۱۰ و عرض ۱۵ سانتی‌متر) از قطعات فوق‌نمای مینیاتوری زیبایی ساخته است که بیانگر نحوه‌ی تولید پیچیده و سخت آنها است. به دلیل نیاز به تولید انبوه این قطعات، حجم کم، نبود تجربه‌ی تولید در سایر کارگاه‌ها، تا تولید انبوه به شیوه‌ی فعلی، راه‌کارهای متفاوتی آزموده شده و هزینه‌های زیادی نیز داشته است.

در ابتدا قطعات فوق به صورت قالب تک، بتن‌ریزی و ویریه می‌شد و راندمان اجرایی کار بسیار کم بود؛ چنان‌که با ۲۰ کارگر، ۸۰ قالب دیواره، ۴۰ قالب کف در ۱۲ ساعت کار پیوسته، حداکثر تولید سگمنت حدود ۱۲۰ قطعه بود. ولی هم‌اکنون به صورت قالب‌های پیش‌ساخته به صورت ست‌های ۱۰ تایی فنری و ویریه بدنه تولید می‌شود و با ۱۰ کارگر، ۳۶ قالب ۱۰ تایی در ۱۲ ساعت کار پیوسته، حداکثر تولید سگمنت حدود ۳۶۰ قطعه است.

• فرآیند تولید قطعات سگمنت

۱. بافت سبب سگمنت دیواره و کف (۴ رشته میلگرد ۱۰ به فاصله ۵ سانتی‌متر با سیم ۵،۳)
۲. نصب اسپیسر، چیدن ۴۰ عدد سبب روی پالت مخصوص، حمل با لیفتراک تا پای قالب
۳. نظافت، روغن‌کاری و درزبندی قالب‌ها
۴. نصب سبب آرماتورها در قالب و رگلاژ آن
۵. بتن‌ریزی، نصب ویراتورها که روی در قالب بدنه ثابت هستند، ویریه کردن بتن
۶. باز کردن قالب ویراتور بدنه، مالش کشی، نصب خرک، نصب چادرهای بخار روی هر ست قالب
۷. انجام بخاردهی طبق دستورالعمل جهت کیورینگ بتن
۸. جمع‌آوری چادر، درج شناسنامه، درآوردن قطعات، چیدن روی پالت، حمل به کارگاه تونل.

• نکات ویژه

۱. اصلاح نقشه سگمنت دیواری و ایجاد ضخامت در نوک سگمنت
۲. انجام فرآیند کیورینگ بتن با بخار به‌جای کیورینگ با آب و اصلاح آن جهت هر قالب ۱۰ تایی
۳. تهیه طرح اختلاط خاص با اسلامپ ۱۵ به همراه میکروسیلیس و فوق‌روان‌کننده‌ی تریکوزال ۴۰ (جهت پایین آوردن نفوذ آب به داخل بتن تا -۱۱×۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه)
۴. ساخت قالب‌های ۴۰ عددی برای تولید سگمنت دیواره و اصلاح تا یک قالب ۱۰ عددی
۵. ساخت در قالب جهت سگمنت دیواره و جلوگیری از حرکت بتن و به هم ریختن دانه بندی

۶. درزبندی قالب و در آن برای جلوگیری از فرار شیره بتن و شن نما شدن
۷. نصب و برباتور روی در قالب سگمنت دیواره و باز و بسته کردن در (در طراحی اولیه و بیره روی قالب در نظر گرفته شده بود و به دلیل فرآیند کیورینگ هر روز باز و بسته و مستهلک می‌شد)
۸. انجام آزمایشات زمان کیورینگ بر روی مکعب بتنی و کاهش زمان کیورینگ از ۱۲ به ۸ ساعت

۴. میله چاه

حفاری و اجرای میله چاه به عنوان گلوگاه حفاری گالری زهکش است. نقش این سازه از چند جهت حائز اهمیت می‌باشد: مسیر یابی و انتقال محور، دسترسی به تونل زهکش برای حفاری، تهویه تونل، دسترسی به گالری زهکش در زمان بهره‌برداری (تعمیر، نگهداری و لای‌روبی)

عمق میله چاه با توجه به شیب پروژه (حدود ۰،۰۰۱۵) و سطح زمین طبیعی از ۵ تا ۳۵ متر متغیر می‌باشد و هم اکنون در عمق ۲۱ متری می‌باشد. میله چاه‌ها به دو گروه اصلی و فرعی تقسیم می‌شوند، گروه اصلی پس از اجرا باقی مانده و گروه دوم پس از اجرای تونل زهکش با شفته آهک پر می‌شود.

نقطه‌ی آغاز حفاری گالری زهکش، اجرای میله چاه است و نیمی از زمان اجرای پروژه را به خود اختصاص می‌دهد و با توجه به موجود نبودن نقشه‌ی جزئیات عملیات حفاری میله چاه؛ روش‌های مختلفی بررسی و اجرا شد. در زیر به شرح مختصر روش‌های اجرایی میله چاه‌ها پرداخته می‌شود. نکته قابل ذکر این است که در همه‌ی میله چاه‌ها قبل از این که حفاری آغاز شود، حتماً حفاری و پمپاژ چاه آب‌کشی در کنار میله صورت گرفته است.

۱. فرآیند اجرای میله چاه با مقطع قطعات مینیاتوری سگمنت

۱. حفاری میله چاه تا عمق ۳۰ سانتیمتر پایین‌تر از کف گالری
۲. انتقال محور تونل به داخل میله چاه و حفاری ۵۰ سانتیمتر از تونل طرفین
۳. کارگذاشتن ۳ دست سگمنت در هر طرف تونل، اجرای دیواره‌های بتنی و اتصال به نعل درگاه
۴. چیدن قطعات بتنی و سگمنت به عنوان دیواره‌ی میله چاه
۵. اجرای شفته آهک پشت دیواره در حین چیدن قطعات

• زمان ویژه

فرایند احداث یک عدد میله چاه با عمق ۸ متر از شروع حفاری تا شروع حفاری گالری با یک دستگاه بالابر و ۲ عدد واگن حمل خاک و سه نفر کارگر حدود ۱۴ روز به طول می‌انجامد.

• دلایل ناکارآمدی روش فوق

۱. افزایش عمق میله چاه
۲. عدم توانایی خشک‌اندازی کامل منطقه
۳. نامتقارن بودن سطح مقطع و بزرگی مقطع حفاری ۶ مترمربع (نعل اسبی)
۴. طولانی شدن زمان حفاری

۵. ریزش بسیار شدید در هنگام اجرا و کور شدن حفاری به این روش پس از اجرای ۵۱ میله چاه به متر ۳۶۵ و ۲ کیلومتر تونل کاملاً متوقف شد.
۲. فرآیند اجرای میله چاه با روش یقه چاه مربع
- باکس بتنی با ضخامت ۲۰ سانتیمتر و ابعاد ۱،۵×۱،۵×۱ متر اجرا و پس از حفاری داخل قطعه‌ی بتنی به دلیل گوشه‌های تیز، قطعه‌ی بتنی حرکت نکرد و در وضعیت اولیه باقی ماند و متوقف شد.
۳. فرآیند اجرای میله چاه با روش یقه چاه استوانه‌ای
۱. قالب‌بندی، بتن‌ریزی با ضخامت ۲۰، قطر داخلی ۱۵۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱ متر در محور میله چاه
 ۲. باز کردن قالب بیرونی و خارجی قطعه‌ی بتنی
 ۳. حفاری در داخل قطعه‌ی بتنی با قطر ۱۵۰ سانتیمتر و به عمق ۲۰ سانتیمتر
 ۴. تراشه زدن در زیر قطعه‌ی بتنی به صورت یک در میان و افتادن قطعه‌ی بتنی به عمق ۲۰ سانتیمتر
 ۵. ادامه‌ی حفاری به روش بالا
 ۶. پس از یک متر حفاری، مش بندی، قالب بندی و بتن ریزی مجدد یک متر دیگر در روی زمین
- فرایند احداث یک عدد میله چاه با عمق ۸ متر از شروع حفاری تا شروع حفاری گالری با یک دستگاه بالابر و یک عدد واگن و دو نفر کارگر حرفه‌ای حدود ۹ روز به طول می‌انجامد.
- دلایل ناکارآمدی روش فوق
۱. هم‌مرکز نبودن میله چاه اجرا شده با گالری و میله چاه طراحی شده
 ۲. پایین نرفتن قطعه‌ی بتنی به دلیل درزبندی نامناسب و به هم خوردن شکل بیرونی استوانه‌ای آن
 ۳. تخصصی بودن این نوع حفاری و نبودن پیمانکاران مناسب این کار و اقتصادی نبودن
 ۴. بالا بودن ریسک و پایین نرفتن یک میله چاه از عمق ۶ متر به بعد
 ۵. مشکل تخریب بتن در هنگام اجرای نعل درگاه
- حفاری میله چاه به روش فوق پس از حفر ۳ میله چاه کاملاً متوقف شد.
۴. فرآیند اجرای میله چاه با روش بتن درجا
۱. حفاری (تا عمقی که آب مشاهده شود با توجه به آبکشی نوع زمین از ۸ تا ۱۱ متری)
 ۲. ایجاد پاشنه در دیواره اطراف به عمق ۳۰ سانتیمتر در چهار طرف از ارتفاع یک متری کف اجرا شده تا بالای میله چاه در فاصله هر یک متر
 ۳. نصب مش آماده شده به ارتفاع ۳ متر در دیواره‌ها از کف اجرا شده و تنظیم همپوشانی (Overlap)
 ۴. نصب میلگرد عمود بر مش در پاشنه‌ها و اتصال به مش

۵. قالب‌بندی تا ارتفاع ۳ متر از کف اجرا شده و تنظیم آن جهت بتن‌ریزی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر
 ۶. بتن‌ریزی، ویبره و ۱۲ ساعت انتظار جهت گیرش بتن
 ۷. انجام فرایند ۱ تا ۶ تا ۳۰ سانتیمتری زمین طبیعی با ارتفاع‌های ۳ متری، باز کردن قالب
 ۸. حفاری باکس بتنی تا عمق ۳ متر پایین‌تر از بتن و حفاری زیر قطعه بتنی به عمق ۲۰ سانتیمتر
 ۹. مش بندی، قالب‌بندی و بتن ریزی
 ۱۰. اجرای فرایند ۸-۹ تا سر نعل درگاه
 ۱۱. حفاری تا ۳۰ سانتیمتر پایین تر از کف گالری و انتقال محور حفاری ۵۰ سانتیمتر از تونل طرفین
 ۱۲. کارگذاری ۳ دست سگمنت در هر طرف تونل
 ۱۳. مش‌بندی، قالب‌بندی و بتن ریزی دیواره‌های بتنی طرفین و اتصال به نعل درگاه
- دلایل ناکارآمدی روش فوق

۱. طولانی شدن زمان اجرای میله چاه از عمق ۸ متری به بعد طبق جدول (۱):

جدول(۱): مقایسه افزایش عمق و زمان حفاری

عمق (متر)	۹ تا	۹ تا ۱۲	۱۲ تا ۱۵	۱۵ تا ۱۸
زمان تجمعی (روز)	۱۲	۱۹	۲۹	۴۰

۲. خطرات جانی ناشی از ریزش و ریزش مکرر منجر به باز کردن قالب، مش‌بندی و تخلیه‌ی لجن و اجرای مجدد در پاره‌ای از موارد تا ۴ بار
 ۳. مشکل تصحیح فاصله‌ی بین قطعات اجرا شده در بتن
 ۴. پایین نیفتادن آب علی‌رغم پمپاژ دائم
 ۵. بتن‌ریزی مازاد بسیار و هزینه‌های آن
 ۶. از بین رفتن کامل دو عدد میله چاه آماده و توقف کارگاه
- حفاری به این روش پس از اجرای ۸۰ میله چاه به متر اژ ۷۹۰ متر و ۵ کیلومتر تونل کاملاً متوقف شد.
۵. فرآیند اجرای میله چاه با روش مقطع دایره و لوله GRP
- با توجه به مشکلات روش‌های قبلی روش‌های سپرکوبی، کوبیدن لوله فلزی، حفاری و کیسینگ گذاری با دستگاه و حفاری دستی و نصب GRP طبق جدول (۲) مورد بررسی قرار گرفت:
- پس از بررسی و مشاهده وضعیت زمین و مقاومت کشش و فشار در لوله GRP، حفاری دستی و نصب لوله GRP به شرح زیر آغاز شد:

جدول (۲): مقایسه‌ی روش‌های مختلف اجرای میله چاه

روش اجرا	سپرکوبی	کوبیدن لوله فولادی	حفاری و جدار گذاری با دستگاه	حفاری دستی و نصب GRP
آیا اجرای روش از ریزش جلوگیری می‌کند؟	بلی	بلی	بلی	بلی
آیا اجرای روش، ایمن است؟	بلی	بلی	بلی	بلی
آیا روش در زمین آبدار قابلیت اجرایی دارد؟	بلی	بلی	بلی	بلی
آیا ضمن استفاده از این روش امکان اجرای نعل درگاه در محل تلاقی با تونل وجود دارد؟	بلی	بلی	بلی	بلی
با توجه به مسائل زیست محیطی آیا این روش در محدوده شهری قابلیت اجرایی دارد؟	خیر	خیر	بلی	بلی
آیا پیمانکار توانایی اجرایی این روش را دارد؟	خیر	بلی	بلی	بلی
هزینه اجرای روش با توجه به مفاد قرارداد قابل وصول است یا خیر؟	خیر	خیر	خیر	بلی

۱. حفاری به قطر ۲۲۰۰ میلی‌متر تا عمق ۱۲،۳ متر، نصب لوله ۱۲ متری به قطر ۲۰۰۰ میلی‌متر
 ۲. پرکردن فضای خالی پشت لوله با بتن عیار پایین (۲۰۰) و اسلامپ بالا
 ۳. حفاری تلسکوپی داخل لوله ۲۰۰۰ تا عمق ۳ تا ۴ متر
 ۴. نصب لوله به قطر ۱۸۰۰ میلی‌متر به ارتفاعی که تا یک متر زیر تونل را پوشش بدهد
 ۵. ادامه‌ی حفاری، حرکت لوله به پایین، در صورت ریزش پشت لوله بالا کشیدن لوله
 ۶. حفاری تا یک متر زیر کف گالری و بتن ریزی پشت لوله ۱۸۰۰ میلی‌متر
 ۷. انتقال محور، برش لوله در طرفین، حفاری ۵۰ سانتی‌متر از طرفین تونل و چیدن ۳ دست سگمنت
- مشکلات اجرایی روش فوق
۱. هم‌مرکز نبودن اولین میله چاه اجرا شده (کلاً لوله ۲۰۰۰ بوده) تصحیح آن در میله چاه‌های بعدی
 ۲. هنگام ریزش با بالا کشیدن لوله ۱۸۰۰ ریزش بالا آمده، به دلیل مقاومت لوله فضای کار امن است.
 ۳. به دلیل بالا بودن تراز آب و عدم امکان خشک اندازی مناسب ریزش ادامه دارد.
- به این روش تاکنون ۱۳ حلقه میله چاه به مترائز ۲۵۰ متر و ۱۰۳۰ متر تونل اجرا شده و هم‌اکنون نیز ادامه دارد.

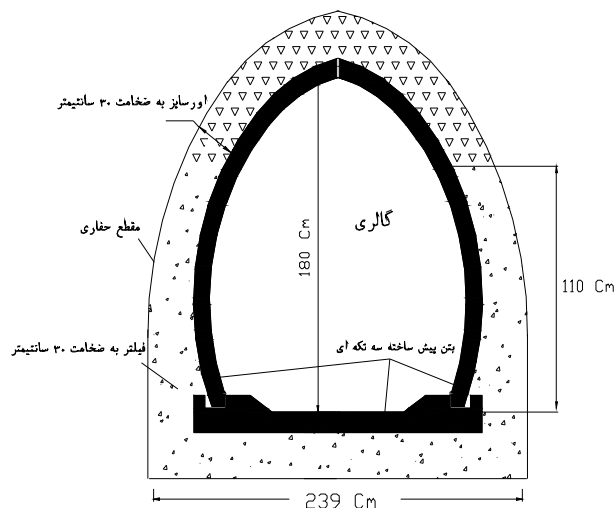
۵. گالری

عمق تونل کم‌تر از عمق لایه‌ی نفوذناپذیر است بنابراین مسیر تونل کمی بالاتر از لایه‌ی نفوذناپذیر است تا بیش‌ترین آب وارد تونل شده و انتقال یابد. علاوه بر این تونل شیب ملایمی دارد تا آب با نیروی ثقل جریان یابد.

این موضوع به گونه‌ای نیز باید تعیین شود که با اجرای میله چاه هیچ گونه خسارتی به تأسیسات شهری وارد نگردد.

• تعیین سطح مقطع

تحقیقات نشان داده که شکل نعل اسبی بیشترین استحکام را در برابر فشارهای عمودی و جانبی دارد، بنابراین سطح مقطع تونل بیش‌ترین شباهت را به آن دارد. مقطع حفاری و تونل مطابق شکل (۱) است:



شکل (۱): مقطع حفاری و تونل

• روش حفاری

۱. سطح مقطع حفاری تونل به دلیل شکل نعل اسبی حدوداً $۲,۴ \times ۲,۳$ متر می‌باشد
۲. حفاری تونل با چکش ضربه‌ای **Tex10** که قلم آن از نوع قلم حفاری در رس می‌باشد
۳. تراز کف تونل و چیدن کیسه‌های فیلتر کف تونل، چیدن ۶ قطعه بتنی کف و تنظیم آن
۴. چیدن ۶ جفت قطعه دیواره به صورت کام و زبانه و پر کردن کامل پشت آن با فیلتر دانه بندی شده

• نکات ویژه

۱. فاصله میله چاه‌ها از ابتدای پروژه طبق جدول (۳) تغییر کرده است:
- عمق کم و سهولت اجرا که فاصله را کم کرده بود به مرور به دلیل افزایش عمق و سختی اجرای میله چاه و بالا رفتن توانایی حفاری تونل فاصله میله چاه اضافه شده. در مورد میله چاه‌های بیش از ۱۰۰ متر نیز به دلیل برخورد با معارض یا کور شدن میله چاه میانی تونل به این طول اجرا شده است.

جدول (۳): تغییر فاصله میله چاه

فاصله میله چاه، متر	۲۸-۳۸	۳۸-۴۰	۴۰-۵۰	۵۰-۶۰	۶۰-۷۰	۷۰-۱۰۰	۱۰۰-۱۲۰
تعداد	۶۴	۶	۱۵	۲۲	۲۱	۷	۶

۲. در ابتدای کار با توجه به مشکلات حفاری به روش دستی، طی جلسات با کارفرما، مشاور روش‌های زیر طبق جدول (۴) بررسی شد:

جدول (۴) مقایسه روش‌های مختلف حفاری تونل

روش حفاری	TBM	Pipe Jacking	Micro Tunneling	دستی
هزینه اجرای روش با توجه به مفاد قرارداد قابل وصول است یا خیر؟	خیر	خیر	خیر	بلی
آیا با این روش امکان حفر تونل به ابعاد ۲،۳۰×۲،۴۰ متر مربع وجود دارد؟	بلی	به سختی	بلی	بلی
آیا با اجرای این روش ویژگی‌های مورد نیاز با توجه به نوع تونل (تونل زهکش) تامین می‌شود؟	بلی	خیر	خیر	بلی
میزان سد معابر در محدوده شهری با استفاده از این روش چگونه است؟	سد معبر باریک	سد معبر عریض	سد معبر عریض	سد معبر باریک

۳. کلید انجام حفاری به روش دستی حفاری چاه‌های آبکشی و پمپاژ مداوم است

۴. تونل فعلی جهت انتقال ۱،۲ مترمکعب بر ثانیه طراحی شده که ۲۰۰ لیتر آن را خود تأمین می‌کند و مابقی را زهکش‌های فرعی تأمین می‌کنند. با توجه به طراحی در محل فعلی (۷۸۰۰ متر تونل) آب خروجی باید ۱۲۰ لیتر بر ثانیه باشد که آخرین اندازه‌گیری‌ها ۱۷۰ لیتر بر ثانیه را نشان می‌دهد.

۵. با توجه به شکل مسیر و میزان راندمان روزانه جهت اقتصادی شدن، در هر میله چاه باید به دو طرف حفاری کرد که میزان حفاری رو به عقب (جهت شیب تونل) بستگی به میزان آب موجود در تونل دارد و در صورتی که چندان مشکلی ایجاد نکند ۴۰ متر حفاری رو به عقب انجام می‌شود.

۶. در این منطقه قنات‌های زیادی فعال بوده‌اند که عملاً از دهه‌ی ۴۰ به بعد همگی کور و غیرفعال شده‌اند. در مسیر حفاری فعلی به ۳ قنات به صورت عمود بر امتداد تونل و ۲ قنات در امتداد تونل برخورد شده و آخرین قنات الان در کنار تونل است و ۱۴۰ متر آن با فیلتر پر شده و ادامه دارد.

۷. پس از اخراج نیروهای حفار غیرایرانی از ابتدای سال جاری راندمان حفاری کاهش یافته ولی با جای-گزینی نیروهای بومی کارگاه گام به گام به راندمان اقتصادی نزدیک می‌شود.

• زمان ویژه

۱. اگر جبهه کار به اندازه کافی خشک باشد و ریزش نداشته باشد و مشکل خاصی پیش نیاید با سه شیفت کاری و چهار کارگر حفار در هر شیفت، پیش‌روی تونل چیزی در حدود ۲/۵ متر در روز می-باشد.

۲. در صورتی که زمین اجازه ندهد، میزان حفاری به ۶۰ سانتیمتر (چهار دست سگمنت) نیز کاهش می-یابد که در این موارد هر سگمنت با سیم به سگمنت‌های قبلی وصل می‌شود.

۳. بیشترین میزان حفاری و پوشش در ۲۴ ساعت در یک جبهه کاری ۸ متر بوده است.

بحث و نتیجه گیری

با توجه به اجرای تونل مذکور در شهر شیراز و حصول نتیجه طبق طراحی اولیه و حل شکل بالا بودن سطح آب زیرزمینی در مناطقی که تونل اجرا شده و تثبیت آب در عمق ۱۰ متری پیشنهادهای اجرایی زیر ارائه می شود:

۱. اجرای سیستم زهکش در موارد مشابه مانند شهر شیراز به شکل مذکور
۲. با توجه به هزینه‌ی بسیار پایین نسبت به سیستم های کاملاً مکانیزه و حل مشکلات اجرایی می توان از این روش به آسانی در موارد مشابه با همین اندازه حفاری بهره برداری نمود
۳. استفاده از لوله GRP به عنوان پوشش دیواره عملاً نجات بخش پروژه بوده در صورتی که بتوان از دستگاه های حفاری مانند Soilmech استفاده کرد با توجه به راندمان بسیار بالای حفاری می توان از روش حفاری با دستگاه و پوشش با GRP استفاده کرد. (حل قراردادی)
۴. استفاده از سیستم عمل آوری با بخار در عمل آوری بتن در مورد قطعات پیش ساخته بتنی سرعت تولید را بسیار بالا می برد و از نظر اقتصادی نیز کاملاً مقرون به صرفه می باشد.

تقدیر و تشکر

از زحمات آقایان مهندس مسعود پردازی، مهندس فرشاد جدیدی، مهندس سید جمال الدین فاطمی، مهندس همایون صفیری، مهندس شریعتمداری، مهندس عبدالحمید نیکروان و مدیران محترم شرکت بین المللی ارسا ساختمان جهت اجرای پروژه و تهیه این مقاله تشکر می شود.

مراجع

- ۱- براجا ام داس، (۱۹۴۱)، "اصول مهندسی ژئوتکنیک"، جلد اول: مکانیک خاک، ویرایش دوم
- ۲- علیزاده امین، (۱۳۷۶)، "اصول هیدرولوژی کاربردی"، دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات آستان قدس
- ۳- صداقت محمود، (۱۳۷۲)، "زمین و منابع آن"، آب های زیرزمینی، دانشگاه پیام نور، سری انتشارات آزمایشی متون درسی
- ۴- مدنی حسن، (۱۳۷۷)، "تونلسازی"، جلد اول: حفاری و اجرا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
- ۵- پاپلی یزدی محمدحسین، (۱۳۷۹)، "قنات قصبه گناباد، یک اسطوره"، شرکت سهامی آب منطقه ای خراسان