شاتکریت سنتی

(شاتکریت با شبکه فلزی)

1-1- مقدمه

شاتکریت را می توان به عنوان بتن یا ملاتی که از طریق شیلنگهای لاستیکی حمل شده و با استفاده از هوای فشرده با سرعت زیاد به سطح مورد نظر پاشیده می شود، تعریف کرد.

اولین کاربرد شاتکریت به سال 1909 میلادی بر می‌گردد که در آن زمان تحت عنوان گونیت نامیده می‌شد و به کمک دستگاهی موسوم به تفنگ سیمان به کار می رفت.

در سال 1914 شاتکریت در یک معدن آزمایشی در ایالات متحده آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن این سیستم برای پوشش سطوح سنگها و حفاظت آنها در برابر هوازدگی و گاه نیز به عنوان سیستم نگهداری موقت به کار رفت. ازآنجا که شاتکریت به صورت ورقه‌هایی از سنگ زیرین جدا می شد، لذا به عنوان یک سیستم نگهداری اصلی چندان مورد توجه واقع نشد. از جمله امتیازات شاتکریت آن است که سطوح ناهموارحفریات زیرزمینی را می پو شاند و به شکل یک سطح نسبتاً صاف درمی آورد. البته شاتکریت همراه با پیچ سنگ، به عنوان سیستم نگهداری بسیاری از تونلها به کار رفته است.

در سالهای اخیر شاتکریت در معادن زیرزمینی، نگهداری حفریات دائمی از قبیل جاده های مورب، راهروهای اصلی حمل و نقل، ایستگاههای چاه و حجره های زیرزمینی سنگی نیز به کار می رود. تعداد حفریات زیرزمینی که بلافاصله بعد از حفاری شاتکریت می شوند روبه فزونی است. مسلح ساختن شاتکریت با الیاف فولادی یکی از مهمترین عوامل در گسترش کاربرد شاتکریت است زیرا کار طاقت فرسای نصب توری را کاهش می دهد.

آزمایشات و تجربیات اخیر نشان داده است که شاتکریت در شرایط ترکش سنگ ملایم(فرو ریزش کمتر،خودنگهدار) بسیار موثر است. اگر چه نتایج این مطالعات برای نتیجه گیری قطعی در این زمینه هنوز زود است ولی علائم موجود بیانگر آن است که در آینده در مورد کاربرد شاتکریت توجه جدی تری خواهد شد.

به طور کلی شاتکریت نوعی بتن مرکب از سیمان، ماسه و خرده سنگ است که به کمک هوای فشرده اجرا و در اثر سرعت زیاد به صورت دینامیکی فشرده می شود.

1-2- انواع شاتکریت

شاتکریت از نقطه نظر روش اجراء و مواد مورد استفاده انواع مختلفی دارد که از جمله آنها شاتکریت با مخلوط خشک و تر،شاتکریت با توری فلزی، شاتکریت میکروسیلیسی وشاتکریت با الیاف فولادی می‌باشند که سه تا از روشهای فوق که در حال حاضر بیشترین کاربرد را دارند عبارتند از:

1-2-1- شاتکریت با مخلوط خشک (dry mix shotcrete)

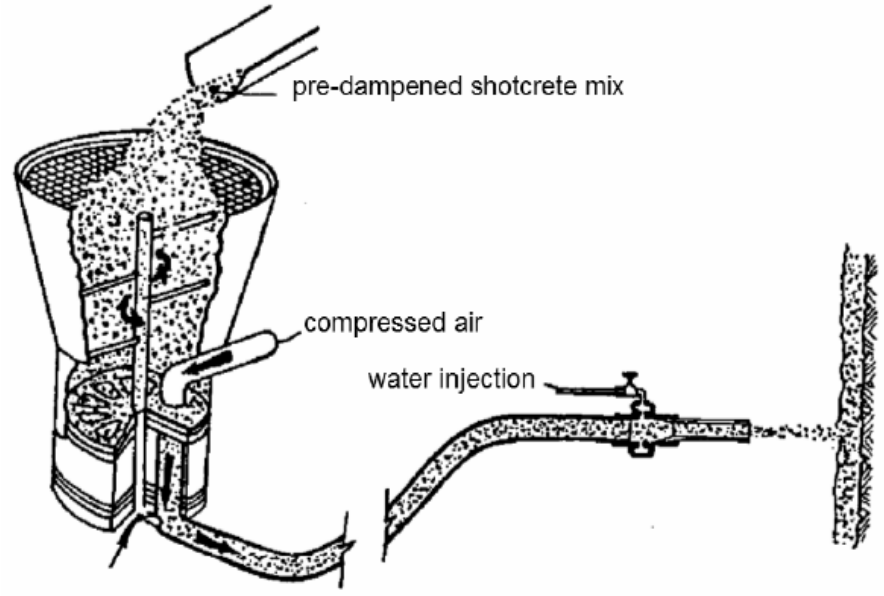
1-2- 2- " با مخلوط تر(wet mix shotcrete)

1-2- 3- " با میکروسیلیس

1-2- 4- " با توری فلزی (شبکه فلزی)

1-2-1- شاتکریت با مخلوط خشک (dry mix shotcrete)

مصالح شامل ماسه وسیمان: ماسه وسیمان توسط پمپ شاتکریت بداخل لوله انتقال هدایت شده و به قسمت پاشنده ملات(nozzle) منتقل می‌گردد. آب مورد نیاز در این حالت در حین خروج مصالح از سر نازل به آن اضافه می‌شود. این عمل در کسری از ثانیه صورت می‌پذیرد که در این حالت ممکن است آب به بعضی از دانه های سیمان نرسیده و در نتیجه این دانه ها هیدراته نشود. به همین دلیل از روش DMS تنها در عملیات تثبیت قبل ازاجرای لاینینگ تونل ها وکارهای روکش وتعمیراتی با ضخامت کمتر از 10سانتیمتری استفاده می‌گردد.درشکل 1- 1نیز طرح ساده‌ای ازتهیه شاتکریت نشان داده شده است. همانگونه که در شکل زیر دیده می شود، اجزای شاتکریت را که ممکن است برای کاهش گرد و غبارآن را کمی مرطوب کرده باشند، با سرعت یکنواخت به داخل قیفی می ریزند که به طورمداوم مخلوط را به هم می‌زند. در این سیستم هوای فشرده از طریق یک بشکه دوار یا منبع تغذیه دمیده می‌شود تا مواد را به صورت یک جریان پیوسته به شیلنگ تغذیه انتقال دهد. آب نیزازطریق افشانه انتهای شیلنگ به مخلوط اضافه می شود. دراوایل قرن بیستم، این مخلوط را که به روش خشک اسپری می‌شد، به نام گونیت می نامیدند که امروز واژه شاتکریت جایگزین آن شده است. درموارد لزوم،مواد شتاب دهنده نیز به مخلوط اضافه می شود. سیستم خشک معمولاً برای اجرای شاتکریت دانه درشت درحفریات زیرزمینی به کار می رود.



شکل1- 1- طرح ساده سیستم تهیه شاتکریت خشک

- دستگاه T260 شاتکریت خشک

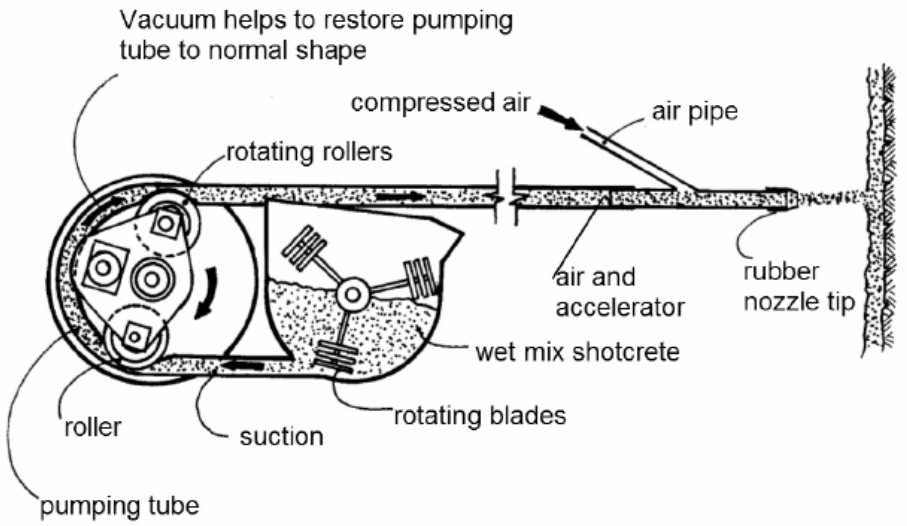
یکی از بهترین دستگاههای شاتکریت خشک بوده که با روتور16لیتری و دو سرعت کم و زیاد توانایی های وسیعی را برای مصرف کننده ایجاد می کند. دبی حمل مصالح بالا، خروجی 2/5 اینچ و طراحی جالب قیف خروجی از جمله

ویژگی های بارز این دستگاه میباشد، همچنین می توان به اجرای شاتکریت در مکانهایی که مصالح آن خشک نبوده نیز اشاره کرد که این مطلب یکی از بزرگترین معضلات اپراتوری بوده که به خاطر طراحی صحیح این دستگاه حل شده است.استفاده از افزودنی های شیمیایی و همچنین فایبرهای فلزی و پلیمری در این دستگاه توصیه شده و مشکلی برای مصرف کننده در پی نخواهد داشت.

طول	عرض	ارتفاع	وزن
175 cm	95 cm	155 cm	110 cm

1-2- 2- شاتکریت با مخلوط تر(wet mix shotcrete)

در این روش، ابتدا اجزای شاتکریت و آب را مخلوط کرده(معمولاً در مخلوط کن هایی که بر روی کامیونها نصب شده اند) و این مخلوط را به داخل پمپ های ویژه هدایت می‌کنند. این مخلوط با سیستم هیدرولیکی وارد شیلنگ انتقال می شود. در انتهای شیلنگ نیز، هوای فشرده را از طریق لوله ویژه‌ای اعمال می کنند که در نتیجه شاتکریت، با سرعت به سطح مورد نظر پاشیده می شود.



شکل1-2- دستگاه تهیه شاتکریت تر

محصول نهایی در هر دو روش خشک و تر بسیار به هم شبیه اند، اما از آنجا که در روش خشک نیـازی بـه کامیونهـای ویژه حمل مخلوط نیست و نیز در اجرای آن دستگاههای کوچکتر و جمع و جوری به کار مـی رود ، لـذا ایـن روش در عملیات معدنی گسترش بیشتری دارد. علاوه بر این، تاسیسات اجرای شاتکریت خشک رابه آسانی می توان در فضاهای زیرزمینی معدنی، جابه جا کرد. از سوی دیگر، روش تر برای مواردی که حجم شاتکریت مصـرفی زیـاد باشـد، ایـده آل است. به عنوان مثال می توان از چاههای عمیق و یا اصولاً هر جا که امکان حرکت و مانور کامیونهای حمل و نقل وجود داشته باشد نام برد. البته در این مورد نمی توان یک رهنمود همیشگی ارائه داد و انتخاب نوع شـاتکریت در مـورد هـر ساختگاه، باید به عنوان یک مسئله جدید بررسی و مناسب ترین روش انتخاب شود.

یکی از ویژگیهای روش تر، امکان کنترل دقیق نسبت آب به سیمان است. معمولاً حداکثر ابعاد خرده سنگهایی کـه بـه بکار می رود حدود 2سانتیمتر محدود می شود. یکی از مشکلات روش تر، پمپاژ کردن شاتکریت های سفت است و این امر باعث می شود که نسبت آب به سیمان، در حد بالاتری انتخاب شود. در چنین مواردی می توان از شتاب دهنده ها استفاده کرد ولی این کار، بر مقاومت نهایی شاتکریت، تاثیر می گذارد. از طرفی دیگر در این روش امکان اجرای بتنی با ضخامت 50سانتیمتری برای دیوار و 20سانتیمتری برای سقف در یک مرحله به راحتی امکان پذیر است. در جدول1-1روشهای خشک و تر از جهت های مختلف با هم مقایسه شده اند.

جدول1-1- مقایسه بین شاتکریت های خشک و تر

روش خشک	روش تر
- امکان کنترل بهتر آب به هنگام مواجهه با تغییرات شرایط زمین به ویژه در شرایط وجود آب در محیط. - وسایل ودستگاه های مورد نیاز معمولاً ارزان ومجموعه بیشتری از وسایل در اختیار است. - ماشین آلات لازم کوچک ترند. بنابراین در فضاهای کوچک قابلیت مانور بیشتری دارند - ممکن است به همه دانه ها آب نرسد و هیدراته نشده باقی بمانند. - در محل کارگاه گرد وغبارناشی از پراکنده شدن دانه سیمان زیاد است. - بدلیل نچسبیدن ملات(بدلیل هیدراته نشدن) ،پرت کار زیاد است. - نسبت آب به سیمان 0.5-0.3	- ریزش ودرنتیجه هدررفتن شاتکریت کمتراست. - گردو غبار کمتری تولید می شود. - کیفیت شاتکریت اجراشده نسبت به مهارت کارگر بتن پاش حساسیت کمتری دارد زیرا آب آن قبلاً تنظیم شده است. - کارگربتن پاش مستقیماً در مورد سرعت برخورد ذرات با سطح کار نظارت دارد و می تواند آن را با تغییر جریان هوا تنظیم کند. - سهولت بیشتر در تمیز کردن محیط و دستگاه. - هزینه های نگهداری کمتر و سرعت تولید بتن بیشتر است.

	- به علت شباهت آن با بتن معمولی و وجود تجربه کافی در این زمینه،کنترل کیفی آن ساده تر است. - نسبت آب به سیمان 0.5-0.4

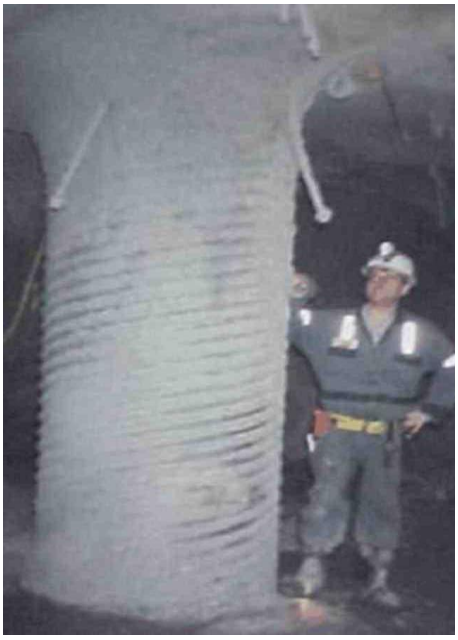
- **مزایای استفاده از شاتکریت با مخلوط تر:**

الف- مزایای اجرایی

1- دراغلب موارد نیاز به قالب بندی ندارد و در موارد خاص استفاده از یک سپر چوبی برای استقرار بتن کافی است وهمین مورد، هزینه های کلان قالب بندی و تجهیزات نیروی انسانی را کاهش می دهد.

شکل1-3- امکان اجرای سازه های بتنی با اشکال منحنی،مدور و غیر منظم (مثل استخر و آبگیر)

شکل1-4- تثبیت کوه ها و صخره ها با پوشاندن آنها با یک شبکه مش و پاشیدن بتن روی آنها



شکل 1-5- روکش کردن پایه پلها

شکل1-6- لا ینینگ تونلها وافزایش ضخامت لوله های بتنی درمحیط های خورنده وخطر ناک در مقابل آتش

ب - مزایای کیفی

1- مقاومت مکانیکی

- میزان نسبت آب به سیمان (w/c) در شاتکریت مخلوط خشک بین 0.5-0.3 و در مخلوط تر بین 0.5-0.4 میباشد. مقاومت فشاری درمحدوده های بین 250-480 (kg/cm^2) که با افزایش میکرو سیلیکا به بیش از 550(kg/cm^2) هم میرسد.

- استفاده از هوای فشرده سبب قفل شدن مصالح سنگی در هم و در نتیجه افزایش وزن مخصوص در محدوده بین 2230-2290(kg/m^2) شده وسبب چسبیده شدن ملات به زیر کار و عدم ورقه ورقه شدن در آینده میگردد.

2- چسبندگی بین بتن و میلگرد

- عدم استفاده از قالب سبب میشود نازل(nozzleman) بتواند فضای کار را دیده و بتن را به شکل مناسبی بین میلگردها جای دهد.

3- کاهش نفوذ پذیری(آب بندی) :

یکی از کاربرد های وسیع شاتکریت تر(WMS) و شاید راحت ترین آن که نیاز به تخصص نازلمن (nozzleman) ندارد احداث استخرها وآبگیراست، که به خوبی با فشار بالای هوا، آب بندی انجام میشود ونفوذ پذیری بسیاراندک میگردد.

ج- مزایای زمانی

- حذف سیستم قالببندی خود باعث از بین رفتن زمان تهیه، ساخت قالب، قالب‌بندی وبازکردن قالب می‌گردد. (بخصوص درجاهایی که قالب فقط یکبارقابل مصرف است، یعنی در جای دیگر کاربرد ندارد، مثل سازه‌های منحنی و لاینینگ تونلها و.....).
- سر عت بتن پاشی در شاتکریت تر(WMS) تقریبا برابر $3m^3/h$ میباشد.

کاربرد WMS در تعمیرات سد ها:

- اجرای سر ریزها
- لاینینگ تونلها
- روکش کردن بد نه سد (به منظور تقویت سازه ای)
- تثبیت دیوارهای حایل ودامنه کوه ها

توصیه های مهم تعمیرات سد در شاتکریت:

الف. لایه لایه شدن

یکی ازمسائل مهم در تعمیرات با شاتکریت، چسبندگی به لایه زیر کار است.به خوبی آب بندی نشدن زیر کار و سیکل های ذوب و انجماد داخل ترکها، باعث لایه لایه شدن میگردد.

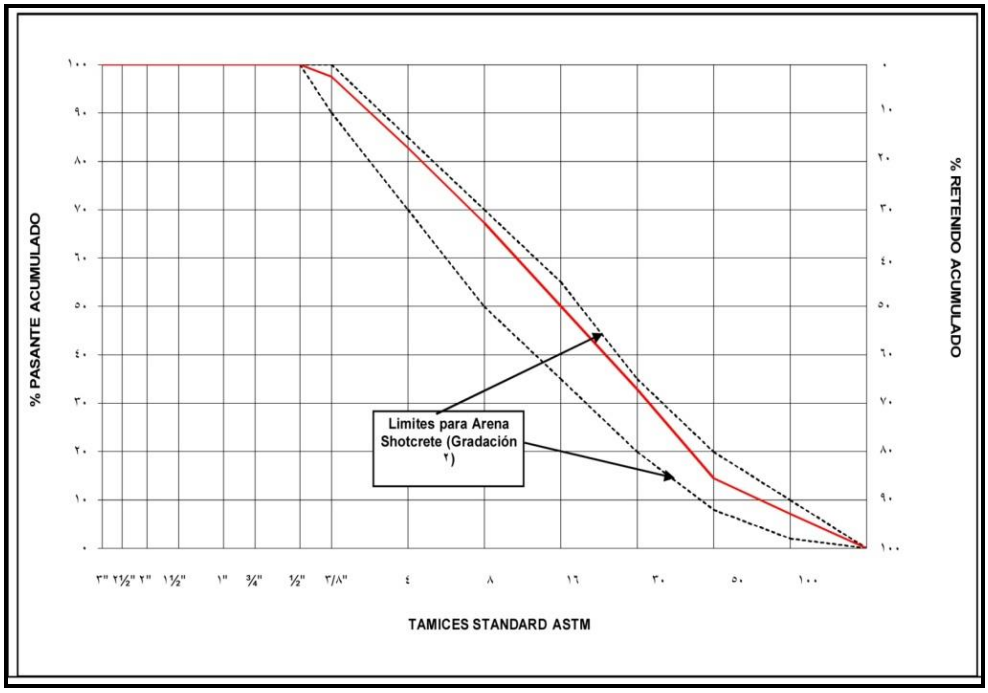
ب. درز انقباض و انبساط

شاتکریت نیز مانند هر بتن دیگر نیازمند درز انقباض و انبساط است،که فاصله درزه ها متغیر است و در محدوده بین 5 تا 10 سانتیمتر می باشد.

ج. آب بندی سطوح زیر کار

در صورتی که آب بندی بخوبی صورت نگیرد،ترکها وشکافها با جذب رطوبت کاملاً از آب اشباع شده و پس از اجرای شاتکریت در اثر سرما رطوبت داخل این ترکها،به یخ تبدیل شده و موجب از بین رفتن لایه شاتکریت می گردد.

منحنی دانه بندی و اندازه ذرات شاتکریت



شکل 1-7

طرح اختلاط شاتکریت تر با نسبت آب به سیمان 0.45

ترکیبات	شاتکریت معمولی	شاتکریت با میکروسیلیس	شاتکریت با میکروسیلیس والیاف فولادی
آب(kg/m3)	180		
سیمان(kg/m3)	400(٪15-٪20)	360	
میکروسیلیس(kg/m3)		40	
ماسه(kg/m3)	1250(٪50-٪40)		1225
شن(kg/m3)(0-10mm)	500(٪40-٪30)		475
الیاف فولادی (kg/m3)(L=35mm)	-	-	50
اسلامپ قبل از پمپاژ(mm)	80-120		
تخلخل(حجم هوا) قبل از پمپاژ٪	7-10		
نسبت آب به سیمان	0.3-0.6		

1-2- 3- شاتکریت با میکروسیلیس

ازبین تحولات و پیشرفتهای چشمگیر سالهای اخیر در تکنولوژی شاتکریت، دو دستاورد جدید اهمیت بیشتری دارند. یکی از این دواستفاده از دوده سیلیس(silica fume) به عنوان مخلوط چسباننده و دیگری الیاف فولادی برای تقویت آن است. دوده سیلیس یا میکروسیلیس محصول جنبی صنعتی فروسیلیس و پوزولان بی نهایت ریز است. پوزولان‌ها مواد سیمانی هستند که با هیدروکسید کلسیمی که در زمان سخت شدن سیمان تولید می‌شود، فعل و انفعال انجام می‌دهند. دوده سیلیس که به میزان 8تا13 درصد وزنی به سیمان اضافه می‌شود، مقاومت فشاری این نوع شاتکریت 2تا 3 برابر مقاومت شاتکریت معمولی افزایش می‌باشد و محصول حاصله ترکیبی بسیار قوی، غیر قابل نفوذ و با دوام است. از جمله امتیازات دیگر این نوع شاتکریت، افزایش مقاومت خمشی و بهبود چسبندگی به توده سنگ است، به گونه‌ای که به خاطر چسبندگی زیاد می توان لایه‌ای به ضخامت 200میلیمتر از آن را در یک مرحله اجرا کرد. وقتی که از این مواد همراه با شاتکریت تر استفاده شود، این چسبندگی کارایی مواد را کاهش می دهد و برای حفظ کارایی، باید از روانسازهای(superplaticizer) عالی استفاده کرد.

1-2- 4- شاتکریت با توری فلزی(شبکه فلزی)

رفتار شکننده بتن از جمله مسائلی است که استفاده از بتن و شاتکریت به عنوان پوشش در تونل‌ها و یا به عنوان هر عضو سازه‌ای دیگری را دچار مشکل می‌سازد. این مسئله بویژه در پروژه‌هایی که سطح تنش نوسان دارد، بیشتر مشکل ساز است. برای مثال در حفاری‌هایی نظیر تونل دسترسی به رگه‌های معدنی و نقاط استخراج، از بتن یا شاتکریت غیر مسلح نباید استفاده شود. برای غلبه بر این مشکل، استفاده از توری سیمی یا شبکه فلزی به عنوان مسلح کننده مرسوم است. در مورد سنگهای ضعیف و سست، که چسبندگی شاتکریت به سطح سنگ ضعیف است، استفاده از توری فلزی، حتی بدون شاتکریت نیز باعث تقویت توده سنگ در حد قابل توجهی می‌شود. بنابراین در مورد سنگهای سست، اجرای شاتکریت همراه با توری فلزی، روش بسیار موثری به شمارمی‌آید. اگرچه در بعضی موارد از توریهای فلزی بافته شده استفاده می‌شود، اما این توریها همراه با شاتکریت چندان مناسب نیستند زیرا نفوذ شاتکریت به داخل دهانه‌های ریز آنها مشکل است. در این موارد بهتر است از توری‌های جوش داده شده استفاده شود.

شکل1-9- توری فلزی بافته شده که بسیار محکم وانعطاف پذیراست اما برای اجرای شاتکریت مناسب نیست

کیرستن(Kirsten)(1992-1993)، آزمایشهای خمشی جامعی را در روی شاتکریت با توری فلزی انجام داده است، در آزمایش خمش چه در مورد بار نقطه‌ای و چه درحالت بار گسترده، رفتار عالی از خود نشان داده است. به عقیده وی، این رفتار ناشی از جای گیری مناسب توری فلزی در داخل شاتکریت می باشد.

- **اجزای شاتکریت :**

از آنجا که کیفیت شاتکریت تابع اجزای آن است لذا در این قسمت، به اختصار در مورد اجزای تشکیل دهنده شاتکریت به بحث خواهیم پرداخت.

1- خرده سنگ(aggregate)

خرده سنگهای مصرفی در شاتکریت، باید استاندارد(معمولاً استاندارد ASTM). ابعاد این قطعات باید مطابق رده بندی از پیش تعیین شده باشد تا هدفهای مورد نظریعنی درجه تراکم، جرم مخصوص، نفوذ پذیری و مقاومت فشاری لازم حاصل شود. یک ترکیب مناسب خرده سنگ درجدول1-2 درج شده است.

جدول1-2- دانه بندی مناسب خرده سنگ برای تهیه شاتکریت

ابعاد سرند طبق استاندارد آمریکا	درصد وزنی عبوری ذرات
19 میلیمتر	100
12.5میلیمتر	75-95
9.5 میلیمتر	65-87
الک شماره4(4.75میلیمتر)	50-70
الک شماره8(2.36میلیمتر)	30-55
الک شماره16(1.18میلیمتر)	20-40
الک شماره30(0.6میلیمتر)	10-30
الک شماره50(0.3میلیمتر)	5-20
الک شماره100(0.15میلیمتر)	2-10
الک شماره200(0.075میلیمتر)	0-6

اگرچه خرده سنگ هایی که از طریق سنگ شکن حاصل می شود، ابعاد یکدست تر و گوشه‌های تیزتری دارد که این امر موجب چسبندگی و تراکم بهترمی شود اما مصالحی که به طور طبیعی گردشدگی دارند قابلیت پمپاژ آنها بهتر بوده و به همین جهت، در بسیاری موارد از این نوع مصالح استفاده می‌شود. خرده سنگهای مصرفی باید فاقد موادی همچون سیلت، رس، میکا و مواد آلی باشند.

توصیه شده است که ابعاد بزرگترین ذرات خرده سنگ، نباید ازسه چهارم قطر لوله ها و شیلنگهای انتقال، در باریکترین قسمتها، تجاوز کند و بنابراین بزرگترین ابعاد این ذرات به حدود19میلیمتر محدود است.

2- سیمان

برای تهیه شاتکریت از هر سه تیپ پرتلند I،II وIII می‌توان استفاده کرد. معمولاً نوع سیمان به گونه‌ای انتخاب می-شود که با شتاب دهنده ها، هماهنگی داشته باشد تا زمان گیرش بهینه، حاصل شود. بدین منظور، قبلاً باید هماهنگی این دو جزء، آزمایش شود. در مواردی که احتمال هجوم آبهای اسیدی می رود، باید از سیمان‌های مقاوم در برابر سولفات، استفاده کرد.

درصد سیمان به گونه‌ای انتخاب می‌شود که شاتکریت حاصله، مقاومت لازم را داشته باشد. البته نوع و ابعاد خرده سنگها نیز در تعیین میزان سیمان مصرفی، موثر است. ازسوی دیگر، اگر میزان سیمان مصرفی بالا باشد، علاوه بر هزینه زیادتر، انقباض بیشتر و ایجاد ترکها را در پی دارد. به عنوان مثال، بهترین میزان سیمان برای خرده سنگهایی به ابعاد19میلیمتر، که در تونل ون کور(Vancouver) به کار رفت، حدود 380کیلوگرم در مترمکعب و درمورد دانه های با ابعاد کوچکتر حدود 410کیلوگرم در مترمکعب بود.

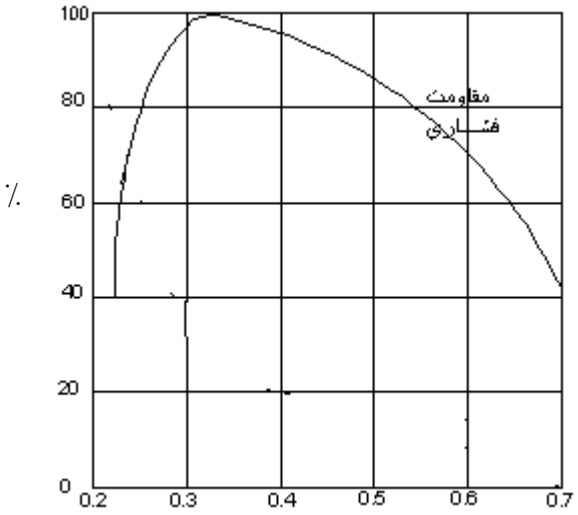
اگر ازسیمان ویژه زودگیر استفاده شود، دیگر نیازی به استفاده از شتاب دهنده ها نخواهد بود زیرا این نوع سیمان، در همان ساعات اولیه، مقاومت خوبی را به دست می آورد.

3- آب

آبی که برای تهیه شاتکریت مصرف می شود، باید همان استانداردها و مشخصات آب مصرفی در بتن را داشته باشد. این آب باید تمیز و فاقد مواد زائد مثل مواد نفتی، چربی ها، نمکها، مواد قلیایی و مواد آلی باشد. به طور ساده می توان گفت که آب مورد مصرف در شاتکریت باید تقریباًهمان ویژگیهای آب آشامیدنی را داشته باشد.

4- نسبت آب به سیمان

نسبت آب به سیمان در مقاومت شاتکریت و بتن نقش بسیار مهمی دارد. بنابراین در هر مورد، باید این نسبت را به گونه ای انتخاب کرد که هم از نظر اجراء و هم از نظر مقاومت، بهینه باشد. در شکل زیر نقش این نسبت در مقاومت فشارشی و آهنگ برجهندگی شاتکریت، نشان داده شده است. نسبت بهینه آب به سیمان در مورد شاتکریت‌های خشک و تر به ترتیب 0.3 تا0.5 و 0.4 تا 0.6 توصیه می شود.



شکل1-10- نقش نسبت آب به سیمان در مقاومت فشاری شاتکریت

5- شتاب دهنده ها

در مواردی که دستیابی سریع به مقاومت اولیه شاتکریت مورد نظر باشد، موادی به مخلوط شاتکریت اضافه می کنند که سبب سخت شدن سریع شاتکریت می‌شود. این مواد موجب بهتر شدن وضعیت پخش شاتکریت و جلوگیری از هدر رفتن آن نیز می شوند. ازجمله شتاب دهنده‌های متداول در بتن، می توان از کلرید کلسیم نام برد. اگر چه از این جسم، گاه در شاتکریت نیز استفاده می شود اما به علت آنکه مقاومت نهایی شاتکریت را کاهش می دهد لذا کاربرد آن چندان توصیه نمی شود.

بعضی از شتاب دهنده‌هایی که در شاتکریت به کار می‌روند، شامل کربنات سدیم، آلومینات سدیم و هیدروکسید کلسیم هستند که در هرمورد باید مقدار مناسبی از آنها را طبق توصیه کارخانه سازنده، به مخلوط شاتکریت اضافه کرد. این مقدار معمولاً 2 تا 6 درصد وزن سیمان مصرفی است. بدیهی است حتی المقدور باید مقدار مصرف این مواد را کمتر در نظر گرفت. معمولاً شتاب دهنده را برای اجرای شاتکریت در سقف و قسمت‌های بالایی دیواره حفریات زیرزمینی به کار می‌برند. در قسمتهای کف و یا جاهایی که ضخامت شاتکریت کم باشد و یا در مواردی که شاتکریت بر روی سنگ خشک و تمیز اجرا می شود، نیازی به این مواد نیست.

از سوی دیگر، در مواردی که هجوم آب به داخل تونل زیاد باشد، استفاده از شتاب دهنده ها اجباری است. به عنوان مثالی در این مورد، می توان از تونل زهکشی مکزیکوسیتی نام برد. در این تونل، شدت جریان حدود 3400لیتردردقیقه با اجرای شاتکریت کنترل شد. برای اینکه به هنگام اجرای شاتکریت، جریان آب اشکالی ایجاد نکند، لوله هایی به قطر 1و2اینچ در داخل شاتکریت کارگذاشتند و مجموعه آنها را به شیلنگ اصلی انتقال آب ارتباط دادند. در قسمتهایی از تونل که احتمال یخ زدن شیلنگ می رفت، آن را با ضخامت مناسبی از شاتکریت پوشاندند.

یکی از ویژگیهای دیگر شتاب دهنده ها آن است که با استفاده از آنها، می توان در هرنوبت لایه های ضخیم تری از شاتکریت را اجرا کرد. همچنین مدت کوتاهی پس از اجراء در قسمت حفاری شده تونل(حدود دو ساعت)، می توان با انجام آتشباری جدید، پیشروی تونل را ادامه داد.

از آنجا که ممکن است بعضی از شتاب دهنده ها با نوع سیمان مصرفی سازگاری نداشته باشند، لذا قبل از استفاده ازآنها باید مخلوط را در آزمایشگاه بررسی کرد. بدیهی است از آنجا که نسبت آب به سیمان نیز در رفتار شاتکریت نقش مهمی دارد لذا به هنگام آزمایش سازگاری سیمان و شتاب دهنده های مختلف، این نسبت باید ثابت و در حد 0.35 باشد.

با استفاده از شتاب دهنده ها، گیرش اولیه سیمان پس از 3دقیقه و گیرش نهایی پس از12دقیقه حاصل شده و با این ترکیب، شاتکریت های متعددی با موفقیت اجراء شده است.

- **ترکیب شاتکریت :**

اگر چه ترکیب مناسب اجزای شاتکریت، در مورد هر پروژه باید به عنوان یک مسئله جدید بررسی و بهترین ترکیب انتخاب شود اما ترکیب وزنی متوسط شاتکریت های معمولی را می توان به شرح زیر در نظر گرفت:

سیمان: 15تا20درصد

خرده سنگ دانه درشت: 30تا40درصد

خرده سنگ ریز یا ماسه: 40تا 50درصد

نسبت آب به سیمان: 0.3تا 0.6

واضح است که مشخصات شاتکریت با ترکیبهای مختلف، متفاوت است. این مشخصات شامل مقاومتهای فشارشی، چسبندگی، خمشی، کششی و مدول الاستیسته است که از بین آنها مقاومت فشارشی و مدول الاستیسیته اهمیت بیشتری دارند. مقاومت فشارشی شاتکریت های مختلف در جدول1-3 آمده است.

جدول1-3- مقاومت فشارشی شاتکریتهای مختلف

زمان / نوع شاتکریت	1 تا 3 ساعت	3 تا 8 ساعت	1 روز	28 روز
شاتکریت بدون شتاب دهنده	0	0.2MPa	5.2MPa	41.4MPa
شاتکریت با 3درصد شتاب دهنده	0.69MPa	5.2MPa	10.3MPa	34.5MPa
شاتکریت با زمان گیرش تنظیم شده	8.27MPa	10.3MPa	13.8MPa	34.5MPa

مدول الاستیسیته شاتکریت نیز تا حدی زیادی به مقاومت فشاری آن وابسته است. در جدول1-4 مثالهایی از ترکیب شاتکریتی که در پروژه های مختلف به کار رفته،همراه با مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته آنها، آمده است.

جدول1-4- مثالهایی از ترکیب شاتکریت هایی که در پروژه های مختلف اجرا شده است و مشخصات مهندسی

پروژه	مشخصات			درصد وزنی اجزا					مقاومت فشاری Mpa				مدول الاستیسیته Gpa			
	نوع شاتکریت	نوع سیمان	ابعاد ذرات حداکثر	سیمان	سنگ	سنگ ریز خرده	ماسه	آب	3تا3ساعت	8تا8ساعت	1 روز	28 روز	6تا7 ساعت	8 تا 3 ساعت	1 روز	28 روز
متروشهر واشنگتون	خشک	I	13	18.7	40.6	40.5						34				
سد نیوملون	خشک	II	19	18.7	38.2		43			-3.7 4.1	-6.9 18.6	-16.3 32.3		-17.2 23.9		-19.7 27.5
تونل ونکور	خشک	I	19	16.6	23	21.7	38.7		4.5			35.9				
انستیتو تحقیقاتی ایلی نوز آمریکا	خشک	III	13	13.5	31.5		55		-0.4 13	-0.4 5.2	9.4	27.8				
	خشک	III	13	17.9	29.9		52.2		-0.76 3.45	-3.45 10.7	20.3	29.6	4 - 7.1	-18.8 21.3	-13.6 23.4	-17.8 23.1
	خشک	III	13	21.8	28.5		49.7		-0.34 3.58	-3.58 9.03	20.2	30.5				
موسسه تحقیقات آب	خشک	III	19	17.7	32.7		49.6					36				
مرکز تحقیقات دانشگاه ایلی نویز	خشک	I	9	18.4	41.4		40.2			-4.96 6.37		-27.6 41.4	-6.2 15.9	-21.4 50.3		
پروژه لیک شور	تر	II	13	15.8	34.5	41.3		8.4			6.9	27.6				
مرکز تحقیقات آب	تر	II	19	16.3	30.8		44.8	8.1				57.7				
انستیتو تحقیقاتی ایلی نوز آمریکا	تر	III	13	12.8	29.9		52.2	5.1		55	-6.14 10.4	-25.9 34.3				
	تر	III	13	16.7	27.9		48.7	6.7	1.17	-1.17 5.59	-18.9 20.3	-33.3 39.4		-22.3 27	-12.3 28	-23.8 35.9
	تر	III	13	20.1	26.2		45.7	8	1.51	-1.51 4.97	24.1	41.9				
سنت پل مینه سونا	تر	I	16	16.4	33.2		50.4									
معدن هندرسون	تر	I	9	17.8	27.4		54.8									

-

- مقاومت **شاتکریت** :

مقاومت شاتکریت، در واقع مقاومت بتن با همان ترکیب است که برای تعیین آن باید از آزمون فشارش کمک گرفت. ازآنجا که درمورد شاتکریت‌های اجرا شده، آزمونهای استاندارد وجود ندارد لذا بیان کمی مقاومت شاتکریت، چندان ساده نیست. البته این امکان وجود دارد که قطعات مکعب شکل و یا مغزه هایی از شاتکریت اجرا شده را تهیه کرد و تحت آزمون قراردارد اما درمورد شیوه انجام این آزمایشها، استانداردی موجود نیست. درکشورهای اروپایی، انجام آزمایش بر روی پهنه های بزرگ شاتکریت اجرا وتوصیه شده است.

در مقایسه با بتن، شاتکریت مصالحی با کیفیت متغییر است. بعضی از عوامل موثر در مقاومت فشاری شاتکریت به شرح زیر است:

الف – شاتکریت در واقع نوعی بتن شل به حساب می آید که در اثر ضربه متراکم می شود. بنابراین برای آنکه بدون جاری شدن درجای خود باقی بماند، باید به سرعت سخت شود. سرعت سخت شدن لازم، به عواملی همچون

وضعیت سطحی که شاتکریت بر روی آن اجرا می شود، ضخامت شاتکریت ، نسبت آب به سیمان و جریان آبهای زیرزمینی بستگی دارد.

ب – به منظور دستیابی به سرعت گیرش و سخت شدن لازم، از شتاب دهنده ها استفاده می کنند. اگرچه افزودن شتاب دهنده ها سرعت سخت شدن را افزایش می دهد اما در عین حال سبب کاهش مقاومت فشاری نهایی شاتکریت(28روزه) تا حد 20الی 30درصد.

ج – کاهش مقاومت 28روزه ناشی از به کارگیری شتاب دهنده ها ، به چند عامل از جمله میزان مصرف این مواد و سازگاری آنها با سیمان، بستگی دارد. میزان مصرف بهینه مواد نیز خود به عوامل همچون واکنش پذیری سیمان در اثر دما، فعالیت موادافزودنی، گسترش پیش هیدراسیون که به هنگام افزودن سیمان به مخلوط و وضعیت محل اجرا، وابسته است.

د – در مواردی که شاتکریت در سقف اجرا می شود، نسبت به حالت دیواره ها که سطوح قائم دارند، مواد شتاب دهنده بیبشتر موردنیاز است. اضافه شدن مواد شتاب دهنده ، زمان گیرش را کاهش می دهد و ریزش آن را از سطح کمتر می کند.

ه – کیفیت شاتکریت به کیفیت مواد تشکیل دهنده و عملیات تهیه آن بستگی دارد. از جمله عوامل مهم در کیفیت شاتکریت می توان به وجود رطوبت درخرده سنگها، مخلوط سازی سیمان و خرده سنگها، مخلوط سازی مواد خشک و شتاب دهنده ها، میزان آب، مخلوط سازی مواد خشک وآب دردهانه خروجی شیلنگ ، سرعت حرکت مواد و زاویه پرتاب شاتکریت نسبت به سطح، اشاره کرد.به هنگام اجرای شاتکریت درسقفها،جهش مواد ازسطح،متصدی اجرا را دچارمشکل می کند که این امربرکیفیت کاراو تاثیرمی گذارد. برای رفع این مشکل می توان سرعت پرتاب را کم کرد. بدین منظور، فشار هوای فشرده را کمتر و یا فاصله دهانه شیلنگ تا سطح را زیادترمی کنند.

عوامل یاد شده به خوبی علت تفاوت اعدادی را که توسط محققین مختلف به عنوان مقاومت فشاری شاتکریت بیان شده است، توضیح می دهد. ازسوی دیگر، تحقیقاتی که در مورد شاتکریت مترو شهرواشنگتون آمریکا انجام گرفت ، نشان داد که اجرای شاتکریت با مقاومت $340kg/cm^2$ در مقیاس وسیع ، کاملا" امکان پذیر است.

معمولاً مقاومت فشاری شاتکریت را فواصل زمانی 8ساعت، 3روزه و 28 روزه بررسی می کنند و بدین منظور مغزه هایی به قطر 7.5 سانتیمتر و یا مکعب هایی به ضلع 7.5 سانتیمتر را مورد آزمایش قرارمی دهند. این مقادیر در مورد یک شاتکریت مناسب به ترتیب باید در حدود 54، 150 و 270 کیلوگرم برسانتیمتر مربع باشد.

از سوی دیگر در مورد زمینهای بلوکی، مقاومت خمشی شاتکریت نیز ممکن است اهمیت داشته باشد. برای تعیین مقاومت خمشی از روی مقاومت فشاری، روابط مختلفی ارائه شده است. بر اساس این روابط، نسبت مقاومت خمشی به مقاومت فشاری در مورد شاتکریت یک روزه بین 0.15 تا 0.18 و در مورد شاتکریت 28روزه بین 0.18 تا 0.3 به دست آمده است.

از جمله ویژگیهای مهم دیگر شاتکریت، چسبندگی آن به سطوح مورد نظر است. بر اساس تحقیقاتی که دراین مورد انجام گرفته، مقاومت چسبندگی یا بیرون کشی، تقریباً $\frac{1}{4}$ مقاومت فشاری است که با تمیز کردن سطح و اجرای دقیق اولین لایه شاتکریت، می توان به این حد از مقاومت دست یافت .

- کنترل کیفیت شاتکریت

ضوابط کنترل کیفیت شاتکریت، برای اولین بار در یکی از تونلهای راه آهن کشور کانادا به کارگرفته شد. بدین منظور قطعات مکعبی شکلی از شاتکریت به ضلع 7.5سانتیمتر از شاتکریت اجراء شده تهیه می شد و مورد آزمایش قرار می گرفت. از آنجا که در بسیاری از موارد مقاومت این قطعات مکعبی بیش از 270کیلوگرم برسانتیمتر مربع بود، بنابراین، کیفیت شاتکریت تایید می‌شد و با وجود اینکه شاتکریت به عنوان سیستم نگهداری اولیه در نظر گرفته شده بود، در بسیاری قسمتها به عنوان سیستم نگهداری نهایی تلقی شد. از سوی دیگر، دستیابی به مقاومت مورد نظر به هنگام اجرای شاتکریت در تونلهایی درایالت های کالیفرنیا ، کلرادو و وانتاریو امریکا، با مشکلاتی مواجه شد و به همین منظور، ضرورت تهیه دستورالعملهایی در این زمینه آشکارگشت.

مطابق استانداردWMATA که درسال1973 میلادی ارائه شد، استفاده از مغزه هایی به طول 7.5 سانتیمتر، توصیه شده است. طبق همین استاندارد، مفهوم ضریب تغییرات و نقش آن در انتخاب ضریب اطمینان، به کار گرفته شد.

سازمان بازسازی ایالات متحده امریکا، به موازات استانداردWMATA دستورالعمل ویژه ای برای کنترل کیفیت شاتکریت ارائه کرده که این دستورالعمل بر اساس تجربیات این سازمان در چندین تونل مختلف، به دست آمده است. مطابق این دستورالعمل، باید مغزه هایی به قطر5.4 سانتیمتر و یا مکعب هایی به ضلع 10سانتیمتر از شاتکریت اجرا شده تهیه شود و مورد آزمایش قرارگیرد.

انستیتو بتن ایالات آمریکا(***ACI***)، در استاندارد شماره AC1506.2-77 خود توصیه کرده است که قبل از شاتکریت، مغزه هایی به قطر7.5سانتیمتر و یا مکعب هایی به ضلع7.5سانتیمتر از شاتکریت آزمایشی، مورد بررسی قرار گیرد.این مغزه ها و یا مکعب ها را از شاتکریتی که به طور آزمایشی بر روی یک پهنه اجرا شده است، تهیه می کنند. در هر دو استاندارد یاد شده، ضرایبی پیشنهاد شده است که به کمک آنها می توان نتایج حاصل از آزمایش مغزه و مکعب را به هم تبدیل کرد.

- **نحوه اجرای شاتکریت**

کیفیت شاتکریت اجرا شده، به نحوه و مراحل اجرای آن بستگی دارد. در زیر مراحل مختلف تهیه و اجرای شاتکریت را شرح می دهیم.

1- آماده سازی و مخلوط کردن

طبق استانداردهای موجود، رطوبت محتوای مجموعه خرده سنگهای ریز و درشت، قبل از مخلوط سازی آنها با سیمان، نباید از 3تا6 درصد تجاوز کند. تنظیم نبودن میزان رطوبت، باعث بی نظمی شاتکریت می شود و در نتیجه برکیفیت آن تاثیر می‌گذارد. با توجه به اینکه ذرات سنگ به طور طبیعی تمایل به زهکشی دارند لذا باید از این خاصیت، برای کنترل رطوبت آنها استفاده کرد. بخش عمده رطوبت اولیه، به ماسه مربوط می شود زیرا زهکشی آنها کندتر از ذرات درشت است.

ازسوی دیگر، اگر ماسه مصرفی کاملاً خشک باشد، باید ابتدا آن را تا حد 8درصد مربوط و با ذرات خرده سنگ مخلوط کرد و نیز قبل از اضافه کردن سیمان، میزان رطوبت مخلوط آن دو را مورد کنترل قرار داد. اگر میزان رطوبت مخلوط بیش از حد مجاز باشد، در آن صورت امکان گیر کردن مخلوط در خط تولید و نیز افزایش آهنگ سخت شدن در حد غیر مجاز، وجود دارد. از سوی دیگر، خشک بودن بیش از حد مخلوط نیز مشکلاتی را به هنگام تهیه شاتکریت در دهانه خروجی شیلنگ، در پی دارد و در عین حال گرد وغبار زیادی به پا می کند و تراکم شاتکریت را با مشکل مواجهه می سازد. مرطوب سازی مخلوط ماسه و خرده سنگ، در نوار نقاله ای که به ماشین تهیه شاتکریت منتهی می شود، با موفقیت به کار رفته است.

در بعضی موارد، حمل و نقل مواد اولیه و مخلوط سازی آنها در تونل ویژه انجام گرفته و بلافاصله به ماشین تهیه شاتکریت، انتقال می‌یابد. دراین موارد، مواد اولیه با استفاده از یک تغذیه کننده پیچی و یا نوار نقاله، از سیلوهای محتوی ماسه، خرده سنگ و سیمان، به ماشین تهیه شاتکریت هدایت می شود.

باید توجه داشت که مواد شتاب دهنده پودری را نباید تا قبل از ورود به ماشین، اضافه کرد. برای افزودن مناسب این مواد به مخلوط، می توان از یک تغذیه کننده مکانیکی استفاده کرد. شتاب دهنده های مایع را می توان با آب ورودی به دستگاه، مخلوط کرد.

2- حمل ونقل مواد اولیه

انتقال مواد به ماشین تهیه شاتکریت، باید به بهترین روش ممکن انجام گیرد. در مواردی که در تونلسازی از ماشینهای چرخ لاستیک استفاده می شود، می توان سیلوهای مواد اولیّه و ماشین تهیه را بر روی یک کامیون سوار کرد. در این صورت کامیون باید مجهز به یک بازوی هیدرولیکی قابل حرکت باشد که بتوان سکوی متصدی بتن پاش را بر روی یک ارابه سوار کرد.

گزینه دیگر، نصب سیلوهای مواد اولیّه در یک کامیون مجزا و ارتباط دادن آن به ماشین است. در یکی از تونلهای میلان ایتالیا، سیلوهای مواد اولیه بر روی کامیونی نصب شده بود که در کف، یک دریچه تغذیه کننده داشت و بدین ترتیب، نوار نقاله منتهی به ماشین را تغذیه می کرد.

3- تهیه و اجرای شاتکریت

برای تهیه و اجرای شاتکریت دو نوع دستگاه مختلف موسوم به ماشین با محفظه فشار دوگانه و ماشین دوار به کار می رود.

الف- ماشین با محفظه فشار دوگانه(Dual pressure chamber)

این ماشین، دو حجره بالایی و پایینی دارد که به وسیله یک هوابند(air lock)، به هم ارتباط دارند. مخلوط مواد اولیه خشک را به داخل محفظه بالایی می ریزند. با باز شدن هوابند ، این مواد در اثر وزن و تاثیر فشار هوا ، به محفظه پایینی و از درون این محفظه به کمک یک چرخ تغذیه ، به داخل شیلنگ رانده می شود.درهمین حال،محفظه بالایی که خالی شده است، مجدداً پر شده و عمل تکرار می شود و جریان مواد به درون شیلنگ، به طور مداوم ادامه می یابد .

ب- ماشن دوار

در این ماشین ، مواد اولیه خشک به طور مداوم به قیف دستگاه وارد شده و از آنجا به داخل استوانه دواری می ریزد که معمولا 6سوراخ دارد. مواد اولیه در این سوراخها، تحت تاثیر هوای فشرده قرار گرفته و به درون شیلنگ تغذیه منتقل می شوند.(شکل1-1)

در عمل، هر دو دستگاه یاد شده کارآیی خوبی را از خود نشان داده اند، اما با توجه به انواع مختلف ماشین دوار که به بازار عرضه شده است، به نظر می رسد که این دستگاه به تدریج جایگزین ماشین با محفظه دوگانه شود.

ظرفیت ماشینهای تهیه شاتکریت معمولا بین 5 تا 8/5 متر مکعب در ساعت است. فاصله انتقال شاتکریت نیز در ماشینهای مختلف در حد وسیعی تغییر می کند و در مورد فواصل افقی و قائم به ترتیب به 300 -100 متر نیز می رسد. اگر فاصله زیاد باشد، بهتر است به جای شیلنگ، از لوله های فلزی استفاده شود تا اصطکاک کاهش یابد.

4- آماده سازی سطح مورد نظر

قبل از اجرای شاتکریت، باید سطح مورد اجرا را آماده کرد. این سطح نباید خشک، کثیف، گردوخاکی و یا یخ زده باشد. بدین منظور معمولا سطح مورد نظر را با استفاده ازجت هوا-آب، تمیز می کنند. مهم آن است که اولین لایه شاتکریت ، به خوبی به سطح بچسبد.

در مواردی که سطح مورد اجرا درزه های آبدار مشخصی داشته باشد، باید تمهیداتی را برای زهکشی آب از درون لایه شاتکریت اجرا شده به کار بست. بدین منظور ، معمولا تعدادی لوله پلاستیکی در شاتکریت کار می گذارند تا آب از طریق آنها خارج شود.

5- اسپری کردن

از جمله مهمترین مسائل در اجرای شاتکریت، ثابت بودن جریان هوا ، آب و مواد در ماشین تهیه و شیلنگ اتصال شاتکریت است. در حالی که با به کار گیری متصدیان با تجربه بتن پاش می توان تغییرات جزئی شاتکریت را

خنثی کرد اما اگر ترکیب شاتکریت در لحظه های مختلف تغییر کند، هیچکس قادر به اجرای یک شاتکریت خوب ، نخواهد بود.

در حین اجرا، فشار آب و هوا باید در حد ثابتی حفظ و در صورت لزوم، رطوبت اضافی همراه با هوا حذف شود. فشار هوا در ورودی ماشین دوار باید در حد 3.8بار باشد و به ازای هر 15متر مازاد بر30 متراولیه شیلنگ باید حدود 0/34 بار به فشاراضافه شود. در مورد ماشینهای با محفظه فشار دوگانه، فشار باید در حد 1/5 بار باشد. فشار آب نیز در حد 0/7 تا 1 بار بیش از فشار هوای ورودی، ثابت نگهداشته شود. امتداد پاشش حتی المقدور باید عمود بر سطح مورد اجراء و به فاصله 1 تا 1/5 متر باشد.

متصدی بتن پاش باید اسپری کردن را از قسمت پایین سطح آغاز کند و در حالی که دهانه شیلنگ را به صورت دایره ای کوچکی می چرخاند، کار را به سمت بالا ادامه دهد. در ضمن فشار هوای اعمالی باید به اندازه ای باشد که جریان شاتکریت به طور دائم و با سرعت زیاد به سطح مورد اجراء برخورد کند. اگر فاصله دهانه شیلنگ تا سطح، بیش از 1.5متر باشد، سرعت برخورد مواد به سطح کمتر شده و در نتیجه تراکم ایده آل،حاصل نمی شود.

باید توجه داشت که بتن پاشی به ویژه در مورد سقف، کاری مشکل و پر زحمت است. به همین خاطر ، استفاده از رباطها در اجرای شاتکریت، در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از این رباطها می توان عملیات اجرایی را از دور کنترل کرد. درشکلهای زیر ، نمونه هایی از این رباطها نشان داده شده است.

شکل1-11- نوعی رباط برای اجرای شاتکریت که بر کامیونی تعبیه شده است و برای اجرای شاتکریت در تونلهای بزرگ بکار می رود.

شکل1-12- رباط بتن پاش که بر روی یک تریلر نصب شده است

6- مراحل اجرا

هدف اولیّه از اجرای شاتکریت، جلوگیری سست شدن و ریزش سنگهایی است که در اثر آتشباری و یا عملیات حفاری، در معرض هوا قرار گرفته اند. بنابراین اجرای آن حتی المقدور باید هرچه زودتر پس از خاتمه عملیات آتشباری و یا حفاری انجام گیرد.این زمان در مورد زمین های مسئله دار 2تا 4 ساعت است. در مورد سنگهایی که زمان پابرجایی طولانی دارند، می توان با اجرای شاتکریت به عنوان سیستم نگهداری دائمی پایداری آنها را ماندگار کرد.

در اولین مرحله باید سقف تونلها مد نظر قرار گیرد. در تونلهایی که ارتفاعشان بیش از 6 متر است، می توان سکوی متحرکی را به کمک بازوی ارابه ایجاد کرد و عملیات بتن پاشی را از روی آن انجام داد. عملیات بتن پاشی و حمل مواد حفاری شده ممکن است به تناوب انجام گیرد و یا اینکه در مورد تونلهای عریض، قسمت به قسمت اجرا شود، یعنی در حالی که در یک قسمت از تونل عملیات بارگیری و حمل و نقل مواد حفر شده در حال انجام است، در قسمت دیگری از جبهه کار، شاتکریت به اجرا در آید.

بتن پاشی باید از نزدیکی جبهه کار آغاز شود و به قسمت عقب ادامه یابد تا به شاتکریت قبلی، متصل شود. می توان حدود 2 ساعت پس از خاتمه عملیات بارگیری و حمل و نقل مواد از جبهه کار،می توان سیکل جدید آتشباری را اجراء کرد. در این گونه موارد می توان عملیات تکمیلی شاتکریت درقسمتهای مورد نیاز را در طول این مدت انجام داد.

از جمله مسایل مهمی که ضمن اجرا باید مورد توجه قرار گیرد، ایجاد ضخامت لازم شاتکریت در قسمتهای مختلف سطح مورد اجرا است. برای کنترل ضخامت شاتکریت، معمولا به فواصل 1 تا 1.5 متر در سطح مورد نظر، میخ

های نشانه، کار می گذارند که طول آنها برابر ضخامت مورد نظر است. گاه نیز برای کنترل ضخامت شاتکریت اجرا شده، در نقاط مختلف، چالهایی به قطر 6.5 سانتیمتر (2.5 اینچ) حفر می کنند.

- **موارد استعمال شاتکریت در فضاهای زیر زمینی**

اگر چه کاربرد شاتکریت در فضاهای زیرزمینی چندان متنوع نیست اما استفاده از آن در این فضاها اهمیت بیشتری دارد. موارد کاربرد عمده به شرح زیر است:

الف- نگهداری زمین(موقت، تعمیراتی، مکمل) تقریباً در کلیّه سازه های زیر زمینی.

ب- پوشش حفاظتی برای زمین های حفاری شده آسیب پذیر در مقابل هوا، همراه سیستم های نگهداری چوبی یا فلزی، پیچ سنگ، مهاری ها و موارد مشابه.

ج- آب بندی و کنترل نشت آب در مواردی که فشار و شدت جریان آب کم باشد.

د- کاربرد شاتکریت در روشهای ویژه تونلسازی.

1- استفاده از شاتکریت به عنوان وسیله نگهداری

بطوری که قبلا نیز گفتیم، در حفریات زیرزمینی، شاتکریت اساساً به عنوان وسیله نگهداری مورد استفاده قرارمی گیرد و به ویژه در تونلهای سنگی به طور گسترده ای اجرا می شود.

در طراحی سیستم های نگهداری، سه نوع فشار وارده بر سیستم در نظر گرفته می شود که عبارتند ازفشارسست شدگی(loosening)،فشارآماسی یا تورمی(swelling)وفشارخالص زمین(genuineround pressure) است.

فشار سست شدگی یا موضعی، ناشی از وزن مواد در محل تاج قوس تونل یا فضای زیر زمینی است که بر اثر سست شدگی بر روی پوشش اثر می کنند. این نوع فشار، به ویژه در سنگ های ترک دار، به طور گسترده ای وجود دارد و در طول مدت ایستایی سازه این فشار افزایش می یابد. طول این زمان با عرض دهانه تونل رابطه عکس دارد.

نا پایداری ناشی از سست شدگی سنگ درزه دار با سه نوع مکانیزم شکست زیر اتفاق می افتد:

الف ـ لغزش قطعات سنگ حاصل از برش سنگ از میان قسمتهای سالم یا لیز خوردن در امتداد صفحات نا پیوستگی.

ب ـ جدایی قطعات سنگ در اثر کشش یا دوران

ج ـ ترکیبی از دو حالت لغزش و جدایش

حرکت بخش سست شونده معمولا در طول درزه ها یا نا پیوستگی های دیگر سنگ روی می دهد. نیروی اولیه لازم برای جلوگیری از سقوط ناچیز است اما در اکثر موارد پس از آغاز جابجایی، در صدد رفع آن بر می آیند.

عوامل مؤثر در این نوع ناپایداری به شرح زیر است:

- خواص توده سنگ
- مشخصات ناپیوستگی های سنگ مثل مواد آکننده درزه ها
- وضعیت آبهای زیرزمینی
- نحوهٔ ترکیب ناپیوستگی ها و مناطق ضعیف از نظر زمین ساختاری
- میزان تنشهای افقی و قائم در توده سنگ بکر
- شکل حفره زیر زمینی
- نسبت فاصله درزه ها به دهانه حفره
- تغییرات هر یک از عوامل یاد شده نسبت به زمان
- روش حفاری

تغییرات هر یک از این عوامل ممکن است موجب ناپایداری سازه شود. فشارهای تورمی در نتیجه افزایش میزان رطوبت در زمینهایی است که دارای مواد منبسط شونده مانند کانیهای رسی فعال هستند. این پدیده ممکن است بدون ایجاد ناحیه پلاستیک در اطراف حفره روی دهد. از آن جا که توان سنگ برای جذب آب به تنشهای موجود وابسته است، لذا اندازه فشار تورمی به تنش های زمین ارتباط دارد. فشار تورمی به عواملی همچون مشخصات زمین شناسی(میزان و نوع کانیها)،زمان اجرای پوشش و سختی پوشش بستگی دارد. تورم نیز ممکن است سبب ایجاد سست شدگی در محدوده فضای زیرزمینی شود.

اگر سنگهای اطراف تونل از نوع نرم و سالم باشند، طبقات به داخل حفره فشرده می شوند و پس از تغییر شکل، احتمالاً به وضعیّت تعادل می رسند.اگر سنگ به شدت تحت تنش باشد، ممکن است این وضع تعادلی حاصل نشود. از سوی دیگر، درسنگهای ترد در صورت بزرگتر بودن تنشهای مماسی، غالباً سنگ به صورت قطعات مسطح از سطح حفره کنده می شوند.

در صورتی که قبل از خاتمه تغییرمکانهای شعاعی در تونل، پوشش اجرا شود، فشاری از طرف سنگهای فراگیر بر شاتکریت وارد خواهد شد که مقدار این فشار، به زمان اجرای پوشش، انعطاف پذیری تکیه گاه و گستردگی ناحیه پلاستیک اطراف تونل بستگی دارد. بنابراین فشار زمین ممکن است باعث پوسته پوسته شدن دیواره شود.اگر از شاتکریت بطور صحیح استفاده شود، علاوه براینکه بر تنش های زمین فائق می آید، می تواند به عنوان پوشش حفاظ از نفوذ آب یا هوا و تخریب سنگ نیز جلوگیری کند.

2ـ عملکرد تکیه گاهی شاتکریت

عمده ترین عاملی که باعث استفاده فراوان شاتکریت در نگهداری سازه های سنگی زیرزمینی شده، قابلیت چسبندگی آن به هر نوع سنگ و گیرش و سخت شدگی سریع آن است. محققین زیادی این موضوع را بررسی کرده اند که نتایج تحقیقات آنها را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

الف- اگر شاتکریت با فشار بر روی درز و ترکها و ناهمواریهای سطوح سنگی پاشیده شود، مانند یک ملات سبب یکپارچگی سطح مورد اجرا می شود.

ب- شکافهای سنگ محل تاثیر تنشهای متمرکز و جزو نقاط ضعیف آن محسوب می شوند. پر کردن این ترکها با بتن زودگیر سبب می شود که قسمتهای زاویه دار سنگ به صورت گرد درآید و در نتیجه، تنش های متمرکز کاهش یابد و از حرکات مخرب جلوگیری به عمل آید.

ج- از آنجا که شاتکریت به اکثر سنگها به خوبی می چسبد، لذا لایه نازکی از آن به شکل سطحی مقاوم در جهت تقویت سطوح ضعیف عمل می کند. با این روش، ترکیبی از سنگ و سطح تقویت شده به وجود می آید که بار وارده را به کمک مقاومتهای چسبندگی و برشی، به سنگهای پایدار مجاور منتقل می سازد. مقاومت برشی مناسب شاتکریت سبب می شود که بخوبی ازسقوط قطعات سست سنگ جلوگیری به عمل آید.

د- در صورت سست بودن اتصال سنگ و پوشش، لایه نازک و یکپارچه ای از شاتکریت به صورت یک غشاء در خمش و کشش کار می کند

ه- در اتصال بلوکهای سنگی به وسیله مهاری ها ، دیده شده است که با کاهش فاصله بلوکها، در مورد یک نوع مهاری با شکل و اندازه مشخص، تنشهای وارده بر آن کاهش می یابد . سنگ و شاتکریت را می توان به صورت یک تکیه گاه توأم که به طور پیوسته محیط تونل را احاطه کرده اند در نظر گرفت (با فاصله صفر بین بلوکها). به علت پایین بودن نسبی تنش گسترده در لایه شاتکریت، این لایه قادر به تحمل بار نسبتاً زیاد از ناحیه سنگ است. بعلاوه، با گسترش سطح تماس آن با سنگ در جهت طول تونل، ظرفیت تحمل بار این پوشش به مراتب بیشتر می شود.

و- شاتکریت از نشت آب از خلل و فرج سنگ جلوگیری می کند و در نتیجه از خروج ذرات آکننده ترکها ممانعت به عمل می آورد.در تونلسازی با روش سنتی حفاری و آتشباری، معمولا آب موجود در سنگها به وسیله گاز ناشی از انفجار پس زده می شود. اگر قبل از آنکه آب مزبور مجدداً به سطح سنگ برگردد، شاتکریت اجرا شود، اثر عایق بندی آن بیشتر خواهد بود.همچنین پوشش سریع سنگ عریان، سبب حفاظت آن در مقابل هوازدگی می شود.

ز- در ساعات اولیه، شاتکریت کمی به حالت تسلیم در می آید اما پس از چندی که فشارهای سست شدگی افزایش می یابد، سخت می شود. در شرایط تعادل، قوس فشار در بالای تونل ثابت شده و گسترش آن متوقف می شود. به این ترتیب، سنگ به صورت تکیه گاهی مستقل باید قسمتی از بارهای وارده از ناحیه بالای تونل را تحمل کند. یک لایه نازک شاتکریت که بلافاصله پس از حفاری پاشیده می شود،به شکل پوسته ای مناسب ، سنگ ضعیف را به وضعیت پایداری می رساند.

ح- شاتکریت به صورت پیوسته و لایه ای ضخیم (حداقل15 سانتیمتر) از نظر سازه ای به صورت یک حلقه بسته (تونلهای دایره ای) یا قوسی گیردار عمل می کند.

به طور خلاصه میتوان گفت که شاتکریت برخلاف سایر سیستمهای نگهداری،بار وارده را به کف تونل منتقل نمی کند بلکه به توده سنگ کمک می کند تا بارهای وارده را تحمل کند.

3- کاربرد شاتکریت به عنوان سیستم نگهداری دایمی تونلها

در صنعت تونلسازی ، از شاتکریت معمولا به عنوان سیستم نگهداری موقت استفاده می شود اما می توان آن را به عنوان سیستم نگهداری دائم نیز به کار برد. در حالت موقت ، برای پوشش سنگ تازه حفاری شده در خلال زمان پا برجایی بکار می رود. اگر طول این زمان کوتاه باشد و حفاری به صورت سنتی به روش چالزنی و آتشباری انجام گیرد، وجود مواد آتشباری شده مانع انجام این کار خواهد شد، ولی عملیات اجرایی را می توان از روی مواد باقیمانده از آتشباری یا سکوی متحرک ، انجام داد. در سالهای اخیر به علت وجود تجهیزات بتن پاشی از راه دور ، شاتکریت موارد کاربرد بیشتری پیدا کرده است. این نوع وسایل برای کارگر بتن پاش ایمنی بیشتری در بر دارد. همانگونه که گفتیم، اجرای شاتکریت را نمی توان بلافاصله پس از آتشباری آغاز کرد زیرا ابتدا باید سطح کاررا آماده ساخت. این مرحله که معمولا شامل لق گیری و پاکسازی سطح است ، یکی از مواردی است که در چسبندگی سنگ و شاتکریت تأثیربسیار دارد.

امکان کاربرد شاتکریت در سطوح ناصاف و انواع مقاطع حفاری شده، برتری آن را نسبت به سایر سیستمهای نگهداری مثل قابهای فولادی و قطعات بتنی پیش ساخته، نشان می دهد. شاتکریت را می توان همراه با پیچ سنگ، شبکه سیمی(فلزی) و یا هردو، مورد استفاده قرار داد. در شرایط خاصی که زمین سست باشد، می توان از شاتکریت و تکیه گاه های فلزی تواًماً استفاده کرد. در واقع استفاده از شاتکریت تنها، به عنوان وسیله نگهداری اصلی، در بسیاری از موارد توصیه نمی شود.

حداقل ضخامت یک لایه شاتکریت به عنوان پوشش تکیه گاهی 5 سانتیمتر است. در استفاده از شاتکریت به صورت لایه های متعدد، می توان توری فلزی را ما بین دو لایه یا داخل لایه ها قرار داد. استفاده از توری فلزی در سیستم نگهداری، باعث افزایش انعطاف پذیری شاتکریت می شود و از جدایی شاتکریت و سنگ و در نتیجه ریزش آن جلوگیری می کند. گاه از شاتکریت برای تقویت موضعی سیستم نگهداری استفاده می شود. به عنوان مثالی در این مورد، می توان استفاده از آن در زمینهای سست شونده و تحت تنش بیش از حد، در گذر از گسل ها، دیواره و قوس ها در زمینهایی با کیفیت متوسط را ذکر کرد. در معادن می توان از شاتکریت برای پایدارسازی و تقویت پایه های معدنی با نسبت ارتفاع به عرض بیش از2،استفاده کرد.

برای ترمیم خرابی در پشت جبهه ای که سقف آن ریزش کرده یا در شرف ریزش است نیز می توان از شاتکریت استفاده کرد. قبل از ریزش شاتکریت، سنگ را استحکام می بخشد و آن را بصورت بلوکی یکپارچه در می آورد.اگر ریزش روی داده باشد، برای جلوگیری از گسترش می توان اجرای شاتکریت را از محلی ایمن شروع کرد.استفاده از

شاتکریت به عنوان سیستم نگهداری دائمی، مستلزم مسلح کردن آن به وسیله وسایلی نظیر پیچ سنگ ، میلگرد و توری فلزی یا الیاف فولادی است.

4- طراحی تجربی شاتکریت

طراحی سیستم نگهداری حفاری های زیرزمینی به وسیله شاتکریت کار بسیار دقیقی است، با این وجود ، مهندسین مجرب به خوبی از عهده این کار بر می آیند. در بسیاری از موارد از شاتکریت به عنوان آخرین راه حل به منظور نگهداری سنگهای لق شده در اطراف یک تونل استفاده شده ودر عین ناباوری ، این کار بسیار مؤثر بوده و از ریزش سنگ جلوگیری کرده است.

اندر کنش پیچیده بین توده سنگ سست اطراف حفاری های زیرزمینی و یک لایه شاتکریت با یک ضخامت متغییر و با خواصی که با سخت شدن آن تغییر می کند، گاه با تحلیلهای تئوری آن متفاوت است. در سالهای اخیر با تحولاتی که در زمینه تحلیلهای عددی و کاربرد کامپیوتر بوجود آمده می توان به تحلیلهای واقعی دست یافت و رفتار واقعی اندر کنش سیستم نگهداری – شاتکریت را تحلیل کرد. تحلیل روشن تر و واقع بینانه تر از رفتار شاتکرت، نیاز به سالها تجربه در زمینه استفاده و تحلیل نتایج حاصله از این برنامه ها دارد. از آنجا که شاتکریت به ندرت به تنهایی به عنوان سیستم نگهداری بکار می رود و معمولا همراه با پیچ سنگ، کابلهای مهاری، قابهای فلزی و دیگر وسایل نگهداری مورد استفاده قرار می گیرد، تحلیل نگهداری با شاتکریت پیچیده تر می شود.

جدول1-5 آخرین تجربیات محققین در این زمینه را نشان می دهد که طی آن، قوانین تجربی رابا تجربیات علمی خود تلفیق کرده اند. این جدول تنها باید به عنوان یک راهنمای کلی در مورد انتخاب نوع و ضخامت شاتکریت در شرایط مختلف مد نظر قرار گیرد. شاتکریت نمی تواند از تغییر شکل سنگ به ویژه در شرایطی که تنش بالا باشد جلوگیری کند، اما در کنترل تغییر شکل ، به ویژه زمانی که همراه با پیچ سنگ ، داول یا کابل مهاری و یا با وسایلی از جمله الیاف فولادی بکار رود، نقش مهمی ایفا می کند. در مواردی که پیچ سنگ یا کابل مهاری بعد از شاتکریت اولیه نصب شود،شاتکریت بسیار مؤثر خواهد بود.این امر سبب می شود که بارهای صفحات فشار بر روی سطح بزرگ واقع در زیر توده سنگ، توزیع شود.

5- طراحی تحلیلی شاتکریت

در روش تحلیلی،شاتکریت همانند یک عضو سازه ای در نظر گرفته شده و به منظور ساده کردن مسئله، فرضیاتی را مطابق زیر در نظر می گیرند. این فرضیات عبارتند از:

الف – تونل دارای مقطع دایره کامل است(حفاری به وسیله ماشین یا با استفاده ازآتشباری خیلی دقیق).

ب- ضخامت شاتکریت یکنواخت وبا محیط تونل بطورکامل درتماس است(استوانه جدارنازک وبسته)

ج – مقاومت پوشش شاتکریت تنها باید در حدی باشد که بتواند از افزایش فشار سست شدگی یا گسترش منطقه پلاستیک جلوگیری کند.

د- نیروهای وارده بر پوشش شاتکریت در کلیه جهات یکنواخت و برابر هستند. این نیروها ، تنها بارهایی هستند که پوشش باید در مقابل آنها مقاومت کند.

برای طراحی تحلیلی شاتکریت،چندین روش تحلیل سازه ای با توجه به فرضیات یاد شده توسط افراد مختلف ارائه شده است که در زیر به شرح دو روش می پردازیم:

1- روش دیر و همکاران

دیر (Deere) ضخامت شاتکریت را بر مبنای نیروی محوری لازم برای مقابله با فشار سنگ ، به صورت استوانه جدار نازک محاسبه کرد. در این روش ضخامت لازم از فرمول زیر بدست می آید:

$$t = \frac{p_i r}{\sigma_{all}}$$

که در آن :

t= ضخامت شاتکریت (cm)

P_i = فشار یکنواخت مؤثر بر تونل (kg/cm^2)

r = شعاع تونل (cm)

σ_{all} = تنش مجاز شاتکریت (kg/cm^2)

تنش مجاز شاتکریت ، به عنوان در صدی از مقاومت فشاری تک محوری آن با توجه به ضریب اطمینان، در نظر گرفته می شود.

2- روش هور

هور(Heuer) در سال 1974 روش دیگری را برای محاسبه ضخامت شاتکریت برمبنای طراحی سازه های بتنی با استفاده از مقاومت نهایی پیشنهاد کرد. این روش برای مواردی که ضخامت پوشش شاتکریت بیش از 15 سانتیمتر باشد، قابل کاربرد است .

نیروی محوری شاتکریت از رابطه زیر حاصل می شود :

$$T = P_i r$$

که در آن:

p_i = میانگین فشار شعاعی که به وسیله تکیه گاه تحمل می شود (kg/cm2)

r = شعاع انحنای تونل (cm)

حداکثر نیروی محوری T_U که به وسیله لایه شاتکریت تحمل می شود از رابطه زیر به دست می آید:

$$T_U = (LF) .T$$

که در آن LF عبارت از ضریب باری است که در محاسبات معمولی بتن مسلح اعمال می شود . مقدار این ضریب بین 1.4 برای بار مرده تا 1.9 برای نیروهای زلزله متغییر است .

از طرف دیگر، حداکثر ظرفیت شاتکریت در واحد طول تونل برابر است با:

$$T_U=(0/85\,\phi'\ \sigma_c)t_e$$

که در آن :

ϕ' = ضریب کاهش باربری که اندازه آن برای اعضای خمش 0.9، برای ستونهای دور پیچی شده 0.75 و برای بتن غیر مسلح 0.65 است .

σ_c = مقاومت فشاری تک محوری شاتکریت (kg/cm^2)

t_e = ضخامت مؤثر لایه شاتکریت (cm)

با ترکیب معادلات یاد شده ، نتیجه زیر به دست می اید:

$$t_e = \frac{LF}{0.85\phi'}\frac{p_i r}{\sigma_c} \qquad (5\text{-}10)$$

در این روش، مقدار ($\frac{LF}{0.85\phi'}$) ضریب اطمینان واقعی برای مقاومت شاتکریت است.هور پیشنهاد کرده است که در طراحی تکیه گاه موقت، این مقدار برابر 2 و برای تکیه گاه دائمی 2.5 تا 3 در نظر گرفته شود .

به هر حال، ضخامتی که از رابطه زیر به دست می آید،از ضخامت اسمی شاتکریت که به سبب تغییرات جزئی و بی نظمی های سطح حفاری شده ایجاد می شود، کمتر است.بنابراین برای در نظر گرفتن این مسئله، ضخامت اسمی را از رابطه زیر محاسبه می کنند:

$$t_n = t_e + (5 \sim 10\ cm)$$

و یا :

$$t_n = sf\frac{p_i r}{\sigma_{all}} + (5 \sim 10\ cm)$$

اگر چه در این روش ضرایب تجربی ϕ' و LF وارد می شوند اما می توان آن را روشی تحلیلی در نظر گرفت. با بررسی روش طرح سازه ای شاتکریت ، می بینیم که مهمترین مجهول طراحی، تخمین فشار داخلی زمین است و دقت طراحی شاتکریت به دقت برآورد آن بستگی دارد. بطور خلاصه ، با استفاده از مقدار محاسبه شده برای p_i و فرض اینکه پوشش بصورت حلقه ای فشاری عمل می کند و در وضعیتهای فشاری – برشی گسیخته می شود ، ضخامت لازم شاتکریت به دست می آید.

ضخامت مؤثر پوشش شاتکریت از رابطه زیر تعیین می شود :

$$t = sf\ \frac{p_i r}{\sigma_c}$$

که در آن:

P_i = فشار داخلی

r = شعاع تونل

σ_c = مقاومت فشاری تک محوری شاتکریت

Sf = ضریب اطمینان که مقدارش در حدود 2 تا 3 است .

همانطور که در صفحه قبل اشاره شد این ضخامت ها ، تنها شامل آن قسمتی از پوشش می شود که حلقه ای نسبتاً

صاف و مدور را تشکیل می دهد. بنابراین، به منظور پر کردن ناصافی های داخلی اطراف تونل، باید مقداری به آن اضافه شود .

جدول5- خلاصه ای از توصیه های کاربرد شاتکریت در حفریات زیر زمینی، برای شرایط مختلف توده سنگ

مشخصات توده سنگ	رفتار توده سنگ	ضروریات سیستم نگهداری	نحوه کاربرد شاتکریت
سنگ متراکم دگرگونی یا آذین، شرایط تنش پایین	خرد نمی شود . ورقه ورقه نمی شود . نمی شکند.	لازم نیست.	
سنگ متراکم رسوبی، شرایط تنش کم	در اثر رطوبت محتوا ممکن است سطوح بعضی از شیل ها، لای سنگها و یا سنگهای رسی فرو بپاشد.	آب بندی سطوح برای جلوگیری از فرو پاشی	استفاده از شاتکریت ساده به ضخامت 25 میلیمتر در سطوح دائم هرچه سریعتر بعد از حفاری. در صورت لزوم تعمیر شاتکریت در اثر صدمات ناشی از آتشباری
سنگ متراکم با یک گسل پهن منفرد یا زون برشی	گسل ممکن است سست و قابل فرسایش باشد و باعث بروز مشکلات نگهداری در سنگ درزه دار مجاور بشود	نگهداری و آب بندی سطحی در اطراف مناطق سست ناشی از گسل یا زون برشی	برداشت مواد سست تا عمقی برابربا پهنای گسل یا ناحیه برشی و نصب میلگرد تا سنگ سالم جانبی. در صورت لزوم می توان برای نگهداری موقت ریزش سنگ از توری سیمی جوش خورده استفاده کرد. قسمتهای خالی را باید با شاتکریت ساده پر کرد. حداقل برابر عرض گوژ گسل باید شاتکریت تقویت شده با الیاف فولادی را بطور عرضی بکار برد.
سنگ متراکم دگرگونی یا آذرین، شرایط تنش بالا	خرد شدن و لایه لایه شدن سطحی و امکان خطر ناشی از ترکش سنگ	حفظ سنگ شکسته و کنترل تورم یا انبساط توده سنگ	استفاده از یک لایه شاتکریت به ضخامت 50میلیمتر بر روی توری سیمی جوش خورده که به صفحات اتصال پیچ سنگ وصل شده است،یا کاربرد شاتکریت تقویت شده با الیاف فولادی به ضخامت50میلیمتر بر روی سنگ و نصب پیچ سنگ با ضخامت اتصال،سپس اجرای لایه دوم

			شاتکریت به ضخامت 25میلیمتر. ادامه استفاده از شاتکریت تا پایین دیواره های جانبی در مورد لزوم.
سنگ متراکم رسوبی. شرایط تنش بالا	خرد شدن و پوسته پوسته شدن سطحی و امکان فشارندگی در شیل ها و سنگهای نرم	حفظ سنگ شکسته و کنترل فشارندگی	اجرای یک لایه 75 میلیمتری شاتکریت مسلح به الیاف فولادی که مستقیما بر روی سنگ تمیز پاشیده می شود و گاه استفاده از پیچ سنگ یا داول نیز برای نگهداری کاملتر لازم است .
سنگ دگرگونی یا آذرین با تعداد کمی درزه های فاصله دار، شرایط تنش پایین	امکان ریزش یا لغزش گوه ها یا بلوکها در اثر نیروی وزن	تأمین نگهداری علاوه بر پیچ سنگ و یا کابلهای مهاری موجود	استفاده از شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت 50 میلیمتر بر روی سطوح سنگ در نقاطی که درزه ها رخنمون دارند.

ادامه جدول1-5--خلاصه ای از توصیه های کاربرد شاتکریت در حفریات زیر زمینی،برای شرایط مختلف توده سنگ

مشخصات توده سنگ	رفتار توده سنگ	ضروریات سیستم نگهداری	نحوه کاربرد شاتکریت
سنگ رسوبی با تعداد معدودی صفحات لایه بندی یا درزه های فاصله دار، شرایط تنش پایین	امکان ریزش یا لغزش گوه ها یا بلوکهای سنگی در اثر نیروی وزن وجود دارد. رخنمون سطوح ممکن است به سرعت تخریب شود	تأمین نگهداری علاوه بر پیچ سنگها و یا کابلهای مهاری موجود. آب بندی رخنمون سطوح لایه بندی ضعیف	استفاده از شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت 50 میلیمتر بر روی سطح سنگ که در آن آثار پیوستگی مشخص است ، با توجه خاص به آثار سطوح لایه بندی.
سنگ دگرگونی یا سنگ آذرین درزه دار،شرایط تنش بالا	ترکیب شکستهای ساختاری و تنشی پیرامون محدوده تونل	حفظ سنگ شکسته و کنترل انبساط توده سنگ	استفاده از شاتکریت ساده به ضخامت75میلیمتر بر روی توری فلزی جوش خورده که به صفحات اتصالی پیچ سنگها متصل شده است یا استفاده از شاتکریت تقویت شده با الیاف فولادی به ضخامت 75میلیمتر بر روی سنگ،نصب پیچ سنگ با صفحات اتصال و سپس اجرای لایه دوم شاتکریت به ضخامت25میلیمتر،در جاهایی که تمرکز تنش بالا است،ممکن است لایه های شاتکریت ضخیم تری مورد نیاز باشد.
سنگ سست لایه لایه و درزه دار رسوبی، شرایط	پوسته پوسته شدن، خرد شدن و احتمال فشارندگی	کنترل فشارندگی و شکستگی توده سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت 75 میلیمتر بر روی سطوح تمیز سنگ ، نصب پیچ سنگ همراه با صفحه اتصال از میان شاتکریت ، اجرای لایه دوم

تنش بالا			شاتکریت به ضخامت 75 میلیمتر
سنگ دگرگونی یا سنگ آذرین درزه های زیاد، شرایط تنش بالا	ریزش گوه ها و بلوکهای کوچک ناشی از برخورد صفحات درزه	جلوگیری از ریزش پیش رونده	اجرای شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت 50 میلیمتر بر روی سطوح تمیز سنگ در سقف تونل ممکن است برای نگهداری کاملتر بلوکهای بزرگ، نصب پیچ سنگ یا داول نیز ضرورت یابد.
سنگ رسوبی لایه لایه و یا با درزه زیاد، شرایط تنش پایین	جدایش لایه ها در حفریات زیر زمینی با دهانه بزرگ و ریزش در امتداد لایه بندی در جبهه کارهای شیب دار	کنترل جدایش لایه و ریزش	برای کنترل جدایش لایه ها باید ار پیچ سنگ و داول استفاده کرد. اجرای شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت 75 میلیمتر بر روی آثار صفحات لایه بندی قبل از نصب پیچ سنگ
سنگهای بسیار پر درزه دگرگونی یا آذرین، کنگلومرا یا آکننده های سیمانی شده،شرایط تنش بالا	فشارندگی وجریان پلاستیک توده سنگ در اطراف فضای زیرزمین	کنترل شکستگی و انبساط توده سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت 100 میلیمتر و نصب پیچ سنگ همراه با صفحه اتصال از میان شاتکریت ، اجرای لایه دوم شاتکریت اضافی به ضخامت 50 میلیمتر در موارد ضروری، در صورت لزوم، سیستم نگهداری تا پایین دیواره های جانبی ادامه یابد.

ادامه جدول 1-5--خلاصه ای از توصیه های کاربرد شاتکریت در حفریات زیر زمینی، برای شرایط مختلف توده سنگ

مشخصات توده سنگ	رفتار توده سنگ	ضروریات سیستم نگهداری	نحوه کاربرد شاتکریت
سنگ رسوبی بسیار پردرزه با سطوحی که با رس پوشش داده شده است ، شرایط تنش بالا	فشارندگی و جریان پلاستیک توده سنگ در اطراف حفاری. سنگهایی که رس زیاد داشته باشند، ممکن است متورم شوند.	کنترل شکستگی و انبساط توده سنگ	اجرای هرچه سریعتر شاتکریت مسلح به الیاف فولادی به ضخامت 50 میلیمتر، نصب شبکه فولادی یا قبهای فولادی سبک در مکانهای ضروری . سپس اجرای لایه دوم شاتکریت مسلح به الیاف فولادی برای پوشش دادن قابها یا شبکه، ممکن است استفاده از سیستم پیش نگهداری و پیش حائل زنی برای پایدارسازی جلوی جبهه کار حفاری لازم شود. در لایه آخری شاتکریت ، باید فاصله هایی را در نظر گرفت تا امکان حرکت و جابجایی کنترل شده ناشی از فشارندگی و تورم ممکن باشد. در مواردی که فضای زیرزمینی پایدار باشد. باید فاصله ها را نزدیک به هم انتخاب کرد.
شرایط ترکش سنگ ملایم در توده سنگ که در شرایط تنش بالا قرار دارد	خرد شدن و پوسته پوسته شدن و امکان ترکش سنگ ملایم	حفظ سنگ شکسته و کنترل گسترش شکستگی	اجرای شاتکریت به ضخامت 50 تا 100 میلیمتر بر روی توری سیمی یا کابلی که به کمک پیچ سنگ یا کابل مهاری به طور محکم به سنگ دوخته شده است .

انواع دستگاههای شاتکریت :

T ۲۴۰:

دراجرای دیوارهای سبک به روش سه بعدی و ساندویچ پانل کاربرد دارد. سرعت بالا، سهولت کار و ظرافت ملات پاشیده شده از جمله خصوصیات این دستگاه محسوب می شود.

طول	عرض	ارتفاع	وزن
120 Cm	70 Cm	130 Cm	280 Kg

252:T

رعایت اصل سادگی و سبکی وزن و دارای روتوری 16 لیتری می باشد.دراجرای شاتکریت در گالری های کوچک و با مصالح خشک، همچنین ترانشه های متوسط از جمله مکانهایی است که استفاده از این دستگاه توصیه می شود.

طول	عرض	ارتفاع	وزن
162 Cm	80 Cm	142 Cm	850 Kg

۲۶۰:T

یکی از بهترین دستگاههای شاتکریت خشک بوده که با روتور 16 لیتری و دو سرعت کم و زیاد توانایی های وسیعی را برای مصرف کننده ایجاد می کند.دبی حمل مصالح بالا، خروجی 2/5 اینچ و طراحی جالب قیف خروجی از جمله ویژگی های بارز این دستگاه می باشد، همچنین می توان به اجرای شاتکریت در مکانهایی که مصالح آن خشک نبوده نیز اشاره کرد که این مطلب یکی از بزرگترین معضلات اپراتوری بوده که به خاطر طراحی صحیح این دستگاه حل شده است.استفاده از افزودنی های شیمیایی و همچنین فایبرهای فلزی و پلیمری در این دستگاه توصیه شده و مشکلی برای مصرف کننده در پی نخواهد داشت.

طول	عرض	ارتفاع	وزن
175 Cm	95 Cm	155 Cm	110 Kg

262:T

این دستگاه جزو خانواده دستگاههای تر پاش محسوب میشود. مکانیزم بسیار پیشرفته در عین حال ساده این دستگاه ضمن دادن توانایی پاشیدن بتن آماده امکان پاشیدن بتن با فایبر فلزی و پلیمری را نیز فراهم می کند.لازم به ذکر است برای شاتکریت کردن با این دستگاه نیازی به کمپرسورهای فشار قوی نبوده و این از جمله ویژگیهای این دستگاه محسوب می شود.

طول	عرض	ارتفاع	وزن
175 Cm	95 Cm	155 Cm	1100 Kg

263:T

ضمن داشتن توانایی تهیه شاتکریت الیاف فلزی و پلیمری ، توانایی پاشیدن را نیز دارد . این ویژگی باعث شده تا از این دستگاه در دستگاههای Pea Gravel استفاده گردد.TBM توانایی اجرای شاتکریت تر و خشک را داشته، بطوریکه شما می توانید در عرض چند دقیقه از حالت شاتکریتی تر به خشک و بالعکس تغییر حالت دهید.یکی دیگر از ویژگیهای این دستگاه توانایی حمل مصالح به میزان 4 الی 15 متر مکعب در ساعت می باشد.

طول	عرض	ارتفاع	وزن

1450 Kg	139 Cm	110 Cm	203 Cm

i۲۸۵:T

ماشینی بسیار قدرتمند است که به شما امکان می دهد خیلی سریع از حالت شاتکریت تر به شاتکریت خشک و بالعکس تغییر حالت دهید.این دستگاه قوای محرک خود را از یک دستگاه الکتروموتور قوی که سرعت آن الکترونیکی کنترل می شود دریافت کرده که این ویژگی عامل برتری این دستگاه نسبت به نمونه های خارجی خود می باشد.در این دستگاه دبی خروجی مصالح از 3 تا 11 متر مکعب در ساعت تغییر می کند. اجرای شاتکریت با انواع فایبر و سیستم منحصر به فرد ایجاد فشردگی در صفحات لاستیکی از مشخصات بارز این دستگاه می باشد .

وزن	ارتفاع	عرض	طول
1300 Kg	170 Cm	95 Cm	225 Cm

B۲۸۵:T

علاوه بر بهره گیری از طراحی نو، توانایی پاشش مصالح تر و خشک را داشته به طوریکه شما می توانید در چند دقیقه از حالت تر به خشک و بالعکس تغییر حالت دهید.در این دستگاه با کم و زیاد کردن سرعت می توان دبی خروجی را از 8 تا 19 متر مکعب در ساعت تغییر داد و این از جمله ویژگیهای این دستگاه محسوب می شود.لازم به ذکر است این دستگاه بیشترین دبی حمل مصالح را داشته و توانایی شاتکریت با انواع فایبر را نیز دارا می باشد.

وزن	ارتفاع	عرض	طول
1550 Kg	141 Cm	110 Cm	246 Cm