

## ژئوشیمی و پتروژئوز سنگ‌های آتشفشانی ترشیری منطقه حسین آباد (جنوب‌باختر بیرجند، خاور ایران)

سید سعید محمدی\*، محمد حسین زرین‌کوب و فاطمه کرامتی  
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

### چکیده

منطقه مورد مطالعه در ۵۰ کیلومتری جنوب‌باختر بیرجند در حاشیه شمال باختری زون جوش‌خورده سیستان قرار گرفته است. در منطقه حسین‌آباد، مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی متعلق به ترشیری، بخش‌های مختلف ردیف‌های افیولیتی منسوب به کرتاسه فوقانی را قطع نموده‌اند. این سنگ‌ها آندزیتی بوده، دارای بافت غالب پورفیری و گلوپوروفیری هستند. پلاژیوکلاز، هورنبلند، اوژیت و بیوتیت، درشت بلورهای این سنگ‌ها هستند. بافت غربالی و دگرسانی انتخابی در پلاژیوکلاز، وجود حاشیه سوخته در هورنبلند و حضور انکلاوهای میکاشیستی و آمفیبولیتی از ویژگی‌های بارز این سنگ‌هاست. بالا بودن نسبت LREE/HREE، مقدار نسبت Sr/Y (میانگین ۳۸/۵۵) و مقدار  $SiO_2$  (میانگین ۵۹/۰۹) به همراه فقدان آنومالی منفی Eu نشان می‌دهند که این سنگ‌ها شباهت زیادی به آداکیت‌های غنی از سیلیس دارند که می‌توانند از یک منبع گارنت آمفیبولیتی، حاصل از دگرگونی پوسته پایینی ضخیم شده، منشأ گرفته باشند.

واژه‌های کلیدی: آداکیت، آندزیت، بیرجند، ردیف‌های افیولیتی، سنگ‌های آتشفشانی

### مقدمه

ملانژ و نهشته‌های کربناتی نومولیت‌دار به سن ائوسن را قطع نموده، به نئوژن نسبت داده شده است (افتخار نژاد و وحدتی، ۱۳۶۹).

هدف از این تحقیق، پتروگرافی، ژئوشیمی و پتروژئوز این مجموعه آتشفشانی است که می‌تواند در رابطه با شناخت فعالیت‌های ماگمایی پس از جایگیری افیولیت ملانژ جنوب بیرجند و در نتیجه بخشی از زون سیستان مفید باشد.

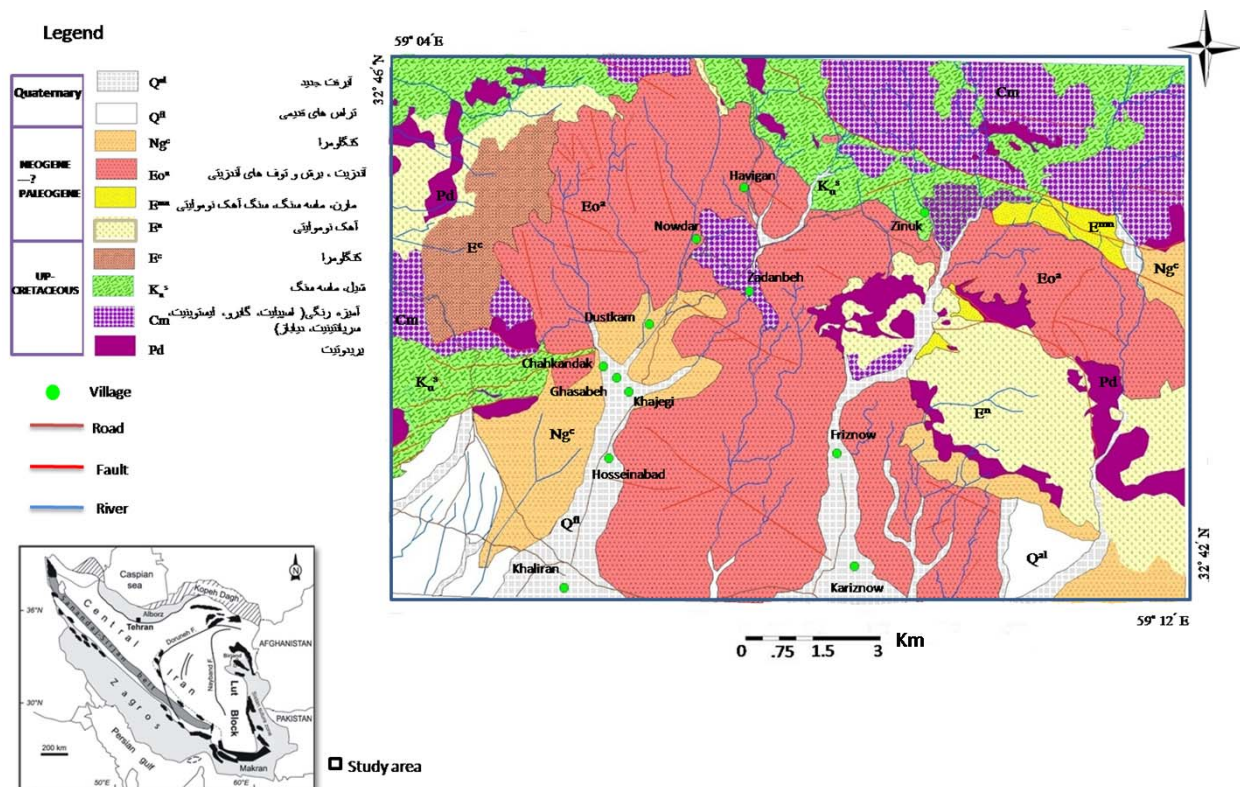
محدوده مطالعاتی در حد فاصل بین  $32^{\circ} 42' 22''$  تا  $32^{\circ} 46' 35''$  عرض شمالی و  $59^{\circ} 4' 35''$  تا  $11'$  طول خاوری در شمال روستای حسین‌آباد، جنوب‌باختر شهرستان بیرجند، خاور ایران قرار گرفته است. قدیمی‌ترین واحد سنگی در این منطقه، واحدهای مختلف افیولیتی منسوب به کرتاسه فوقانی است. سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه که مجموعه افیولیت

## زمین شناسی عمومی

منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی ایالت زمین شناختی لوت-سیستان (Nogole Sadat, 1983) واقع شده است. این منطقه بخشی از یک مجموعه جوش خورده حاصل از برخورد پهنه لوت با بلوک افغان است که به عنوان زمین درز سیستان معرفی شده است (Tirrul *et al.*, 1983). رژیم تکتونیکی فشارشی باعث جایگیری بخش های لیتوسفر اقیانوسی بر روی حاشیه قاره ای در

کرتاسه بالایی تا ترشیری تحتانی شده است (Khatib and Zarinkoub, 2009).

واحدهای سنگی عمده که در منطقه وجود دارند، دارای محدوده سنی کرتاسه بالایی تا نئوژن و شامل بخش های متعلق به افیولیت ملانژ، نهشته های فلیشی، سنگ آهک های نومولیت دار، سنگ های آتشفشانی و آذرآوری ترشیری و کنگلومرای نئوژن هستند (شکل ۱).



شکل ۱- نقشه زمین شناسی منطقه حسین آباد و جایگاه زون جوش خورده سیستان در خاور ایران (Berberian and King, 1981) که منطقه مورد مطالعه به صورت مربع بر روی آن مشخص شده است.

حاصل دگرسانی بخش های اولترامافیک متعلق به مجموعه افیولیت ملانژ هستند (زرین کوب و همکاران، ۱۳۸۴)، به رنگ های نارنجی و قهوه ای در راستای سطوح گسل ها رخمون دارند. گابروهای رودنگیتی شده و اسپیلیت ها به عنوان بخش های بازیک مجموعه افیولیت

به علت فعالیت های شدید تکتونیکی، واحدهای سنگی منطقه به صورت مخلوط و دارای مرزهای گسلی با یکدیگر هستند. پریدوتیت ها به عنوان قدیمی ترین واحدهای سنگی در منطقه هستند که به شدت به سرپانتین دگرسان شده اند. رگه های لیستونیکی که

آزمایشگاه SGS کانادا صورت گرفت. تعبیر و تفسیر داده‌ها به کمک نرم‌افزارهای GCDkit و Minpet انجام شده است.

### پتروگرافی

سنگ‌های آتشفشانی در جنوب‌باختر بیرجند شامل دو دسته آذرآواری و گدازه‌ای هستند. سنگ‌های آذرآواری شامل توف، آگلومرا و برش هستند. ویژگی‌های پتروگرافی سنگ‌های خروجی منطقه بررسی شد.

بافت غالب در سنگ‌های خروجی حسین‌آباد، پورفیری و گلومروپورفیری با زمینه ریز دانه تا شیشه‌ای است. درشت بلورهای پلاژیوکلاز، هورنبلند، پیروکسن و بیوتیت در زمینه‌ای از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز قرار گرفته‌اند. پلاژیوکلاز به‌عنوان فراوان‌ترین فنوکریست است که با توجه به زاویه خاموشی و روش میشل‌لوی (Kerr, 1977) از نوع الیگوکلاز تا آندزین، به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار، گاهی دارای منطقه‌بندی دیده می‌شود. هم‌زیستی پلاژیوکلازهای سالم و دگرسان شده در یک سنگ، یکی از موارد درخور توجه در برخی نمونه‌هاست (شکل ۲- A). این پدیده می‌تواند ناشی از دگرسانی انتخابی محلول‌های هیدروترمال (Shelly, 1993) یا بیانگر وجود دو نسل پلاژیوکلاز باشد. دگرسانی پلاژیوکلاز به اپیدوت متداول است (شکل ۲- B). برخی بلورهای پلاژیوکلاز از حاشیه تحلیل رفته و گرد شده‌اند (شکل ۲- C).

پس از پلاژیوکلاز، هورنبلند فراوان‌ترین فنوکریست در این سنگ‌هاست. اکسید شدن هورنبلند به‌طور کامل یا در حاشیه‌ها متداول است (شکل ۳- A).

ملانژ حضور دارند. سنگ آهک‌های پلاژیک و رادیولاریت، از جمله رسوبات همراه مجموعه افیولیت ملانژ است که اغلب به‌صورت تداخلی و همراه با گدازه‌های بالشی یافت می‌شوند. اسلیت‌ها، فیلیت‌ها و شیست‌ها مربوط به رخساره توربیدیتی هستند که متحمل دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین شده‌اند. مجموعه مرکبی از کنگلومرا، ماسه سنگ و سنگ آهک‌های نومولیت‌دار به‌صورت دگرشیب بر روی واحدهای افیولیت ملانژ قرار گرفته، در منطقه مورد مطالعه گسترش درخور توجهی دارند.

سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری به‌عنوان فراوان‌ترین واحد سنگی بر روی واحدهای آمیزه افیولیتی، نهشته‌های توربیدیتی و سنگ آهک‌های نومولیت‌دار واقع شده‌اند. سطح این واحدها به‌علت هوازدگی اغلب تیره است. فرسایش پوست پیازی و شکستگی‌های فراوان، از جمله پدیده‌های بارز در این سنگ‌هاست. مجموعه کنگلومرایی که شامل خرده‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی و قطعات مربوط به بخش افیولیتی است، در یک زمینه توفی-ماسه‌ای قرار گرفته و جوان‌ترین واحد سنگی منطقه را می‌سازند.

### روش انجام پژوهش

این پژوهش بر مبنای مشاهدات صحرایی، مطالعه مقاطع نازک، تجزیه شیمیایی نمونه‌ها و تعبیر و تفسیر داده‌ها انجام شده است. در این راستا، تعداد ۹۰ نمونه از سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه به‌صورت سیستماتیک نمونه‌برداری شده، از آن‌ها مقاطع نازک تهیه و مطالعه شدند.

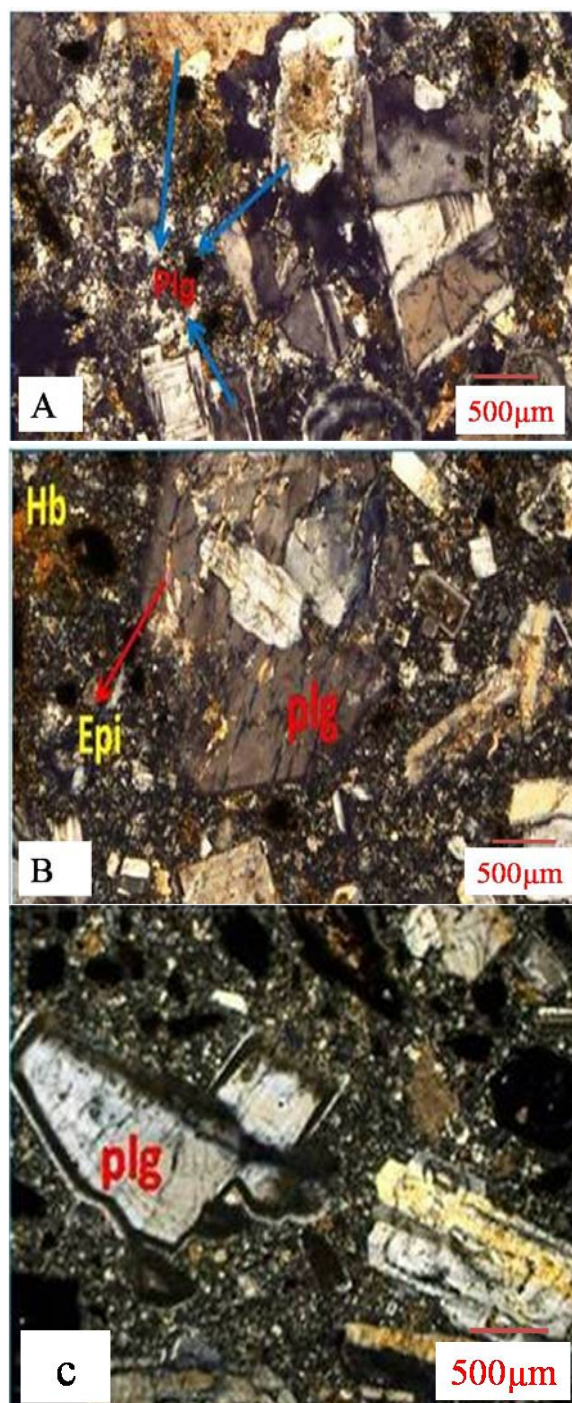
تعداد ۱۰ نمونه تازه انتخاب و آنالیز شیمی آن‌ها به روش ICP (برای عناصر اصلی) و ICP-MS (برای عناصر کمیاب و نادر خاکی) در

زون باشد. زون‌های تیره‌رنگ می‌توانند غنی از Fe و Al، و بخش‌های روشن‌کانی غنی از Mg و Si باشند (Rutherford and Devine, 2003) (شکل ۳- B).

منطقه‌بندی، بافت غربالی و جذب دوباره در پلاژیوکلاز، حاشیه‌های واکنشی در هورنبلند و گردش‌گی‌کانی‌ها از نشانه‌های وجود شرایط عدم تعادل حین انجماد ماگماست و احتمالاً بر اثر صعود سریع ماگما، افزایش فشار بخار آب، فرایندهای آرایش و هضم، اختلاط ماگمایی (Tsuchiyama, 1985; Pudlo and Franz, 1995) و افت سریع و ناگهانی فشار (Singer *et al.*, 1995; Zellmer *et al.*, 2003; Nelson and Montana, 1992) ایجاد شده‌اند.

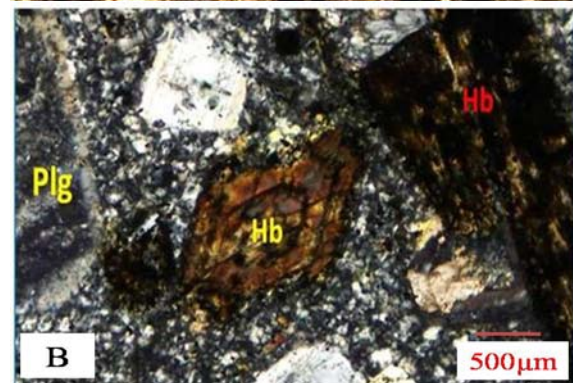
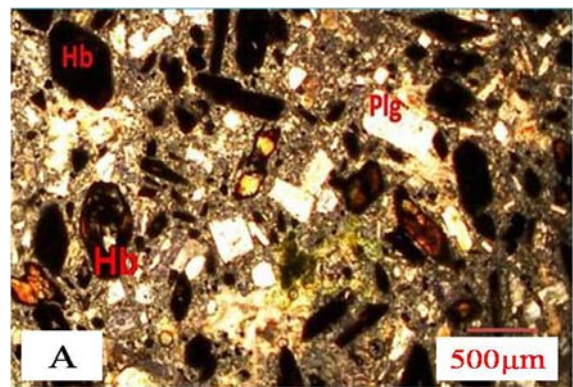
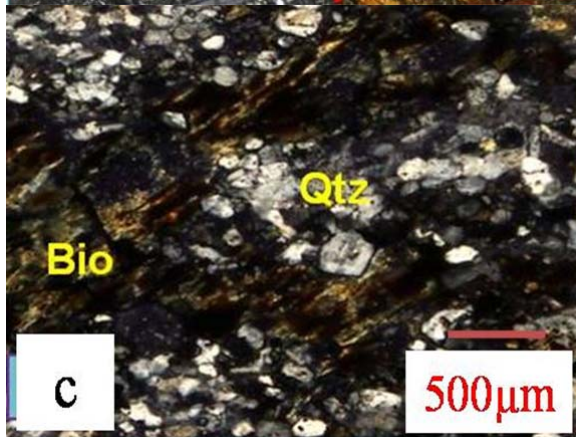
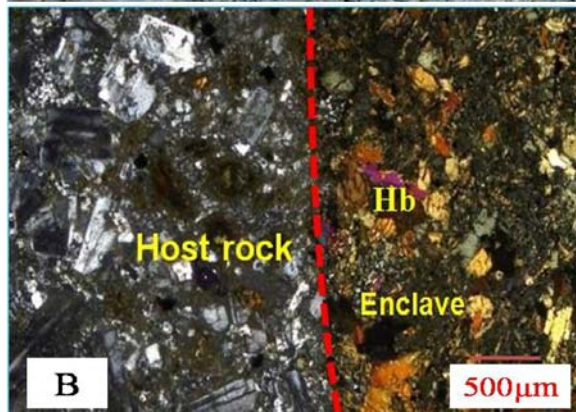
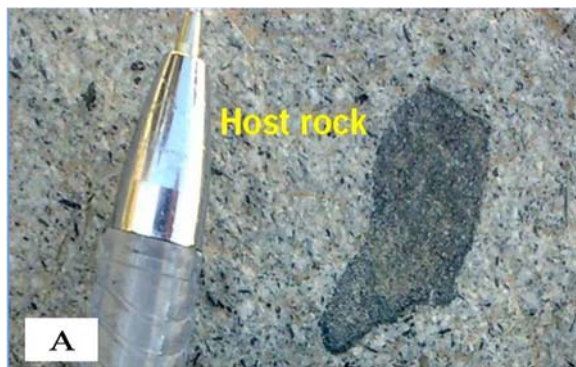
کلینوپیروکسن (اوژیت) به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و بیوتیت به مقدار کم در این سنگ‌ها وجود دارند. کانی‌های فرعی شامل ریز بلورهایی از آپاتیت، اسفن و کانی‌های کدر هستند. این سنگ‌ها با توجه به مجموعه کانی‌های خود، در رده آندزیت قرار می‌گیرند.

حضور انکلاو در سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه پدیده‌ای رایج است. انکلاوها در این سنگ‌ها در دو گروه اتولیت و زینولیت قرار می‌گیرند. اتولیت‌ها بافت میکروگرانولار نشان می‌دهند و به بخش‌های زود سرد شده ماگما مربوط هستند. زینولیت‌ها، آمفیبولیت و میکاشیستی هستند. زینولیت‌های آمفیبولیتی به شکل بیضوی، تیغه‌ای و به رنگ‌های سبز تیره تا سیاه دیده می‌شوند (شکل ۴- A). اندازه آن‌ها از چند میلی‌متر تا ۱۵ سانتی‌متر متغیر است. هورنبلند کانی اصلی، پلاژیوکلاز و کوارتز کانی‌های رایج را تشکیل می‌دهند. مرز زینولیت‌ها با سنگ میزبان ناگهانی است (شکل ۴- B) و می‌توان آن‌ها را به پی‌افیولیتی در منطقه مربوط دانست (یوسف زاده، ۱۳۸۵).



شکل ۲- A) حضور پلاژیوکلاز سالم و دگرسان شده در کنار هم (XPL)، B) تبدیل پلاژیوکلاز به اپیدوت (XPL)، C) کانی‌های پلاژیوکلاز با حاشیه‌های تحلیل رفته (XPL) (نمادهای اختصاری کانی‌ها برگرفته از Pichler, ۱۹۹۷).

پدیده منطقه‌بندی در کانی هورنبلند نیز دیده شده که می‌تواند نشان‌دهنده تغییر ترکیب شیمیایی در هر



شکل ۳- (A) اپاسیتی شدن هورنبلند (PPL)، (B) منطقه‌بندی در هورنبلند (XPL)، (نمادهای اختصاری کانی‌ها برگرفته از Pichler، ۱۹۹۷).

زینولیت‌های میکاشیستی دانه ریز (اندازه آن‌ها از چند میلی‌متر تا ۱۰ سانتی‌متر متغیر بوده) و به رنگ خاکستری بوده، کوارتز و بیوتیت از متشکله‌های اصلی آن‌ها هستند (شکل ۴- C). وجود زینولیت در این سنگ‌ها، گویای فراهم بودن شرایط برای بروز آلودگی پوسته‌ای و تحول ماگما هنگام صعود است.

### ژئوشیمی

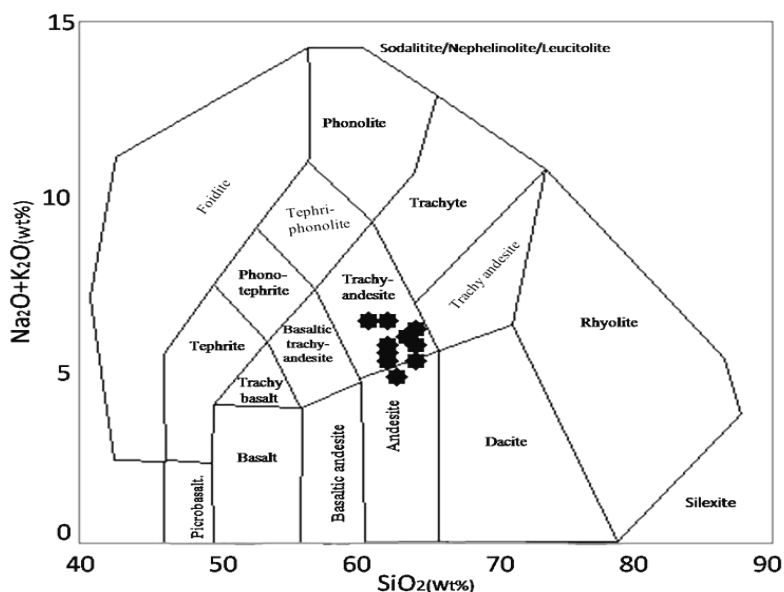
نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است. این سنگ‌ها در نمودار مجموع آلکالی‌ها ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) در برابر  $\text{SiO}_2$  (Middlemost, 1994) در محدوده آندزیت و تراکی آندزیت (شکل ۵) و در نمودار  $\text{K}_2\text{O}$  در مقابل  $\text{SiO}_2$  (LeMaitre *et al.*, 1989) متعلق به آندزیت‌های کالک‌آلکالن پتاسیم بالا هستند (شکل ۶).

شکل ۴- (A) حضور زینولیت آمفیبولیتی در آندزیت‌های حسین‌آباد، (B) مرز ناگهانی زینولیت آمفیبولیتی با سنگ میزبان (XPL)، (C) زینولیت میکاشیستی (XPL).

الگوی نمودار عناصر خاکی کمیاب به‌هنگار شده با کندریت (Nakamura, 1974) نشان‌دهنده غنی‌شدگی از عناصر LREE و تهی‌شدگی از عناصر HREE است (شکل ۷) که می‌تواند بر اثر تفریق کانی هورنبلند یا حضور گارنت در منشأ روی داده باشد (Jahangiri, 2007).

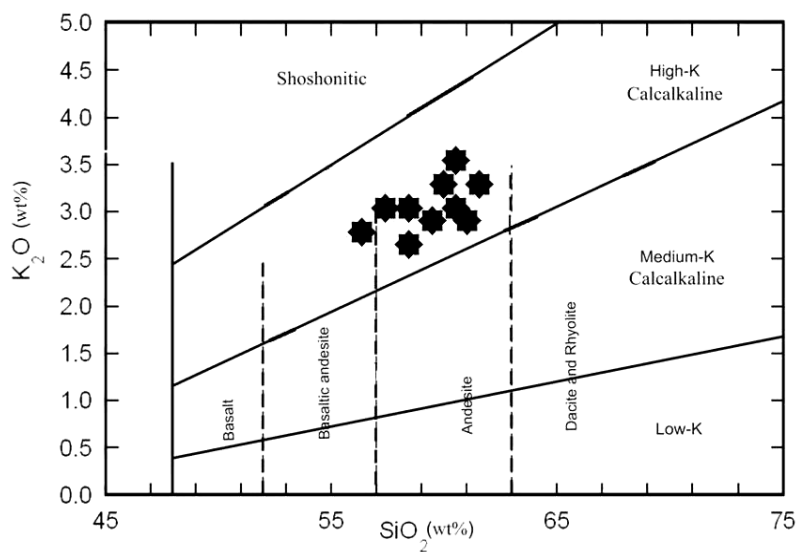
جدول ۱- نتایج آنالیز شیمیایی عناصر اصلی (بر حسب wt%) و کمیاب (بر حسب ppm) سنگ‌های آتشفشانی حسین‌آباد.

Sample No.	F-6	F-11	FH-30	HS-9	HS-19	ZD-12	ZD-16	ZD-25	ZD-26	ZD-29
<b>(wt%)</b>										
SiO <sub>2</sub>	59.8	58.5	61.3	58.5	59.3	56.9	60	59.4	58.3	60.4
TiO <sub>2</sub>	0.6	0.59	0.57	0.67	0.61	0.66	0.57	0.56	0.65	0.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.2	16.6	16.3	16.7	16.7	16.8	16.9	16.4	17	16.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	7.5	6.9	5.73	7.67	6.17	6.89	5.56	5.53	7.15	6.6
MnO	0.13	0.16	0.22	0.2	0.12	0.16	0.12	0.1	0.14	0.13
MgO	2.58	2.3	2.39	2.9	2.04	2.62	2.59	2.15	2.66	2.61
CaO	5.6	7.01	5.13	7.06	6.01	6.5	4.43	5.33	5.61	5.57
Na <sub>2</sub> O	3.6	3.4	3.8	3.9	3.3	4.6	4	3.6	4.6	4.3
K <sub>2</sub> O	2.92	2.9	3.31	2.98	2.73	2.89	3.16	2.82	2.66	2.61
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.29	0.28	0.25	0.29	0.29	0.3	0.3	0.3	0.3	0.31
LOI	1.20	1.89	1.19	1.10	2.40	1.99	2.21	3.23	1.15	1.19
<b>Total</b>	<b>100.42</b>	<b>100.53</b>	<b>100.19</b>	<b>101.97</b>	<b>99.67</b>	<b>100.31</b>	<b>99.84</b>	<b>99.42</b>	<b>100.22</b>	<b>100.88</b>
<b>(ppm)</b>										
Rb	93.3	77.3	104	82.8	79.4	80.1	81.1	92.3	90.5	84.3
Sr	680	750	740	680	750	610	810	840	660	820
Ba	690	710	770	600	710	670	940	950	710	950
Cs	5.1	3.3	9.4	2.9	2.9	4.4	8.1	3.9	3.6	4.6
Zr	150	150	150	140	150	140	130	140	150	120
Hf	4	4	4	4	4	3	3	4	4	3
Th	12.3	11.1	12.9	10.1	11.1	10.8	11.3	9.9	9.9	11
U	2.59	2.74	2.45	2.24	2.43	1.89	2.6	2.02	2.04	2.48
V	110	106	95	100	111	107	106	127	133	115
Y	19.5	20.7	19.4	19	16.8	18	18.7	21	20.1	17.9
Nb	8	8	8	6	8	6	6	8	8	7
Ta	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Ga	17	16	18	16	19	18	18	18	17	18
La	29.6	28.1	28.6	22.7	27.7	26.9	27.9	26.8	27.9	28.7
Ce	56	52.8	53.4	43.4	52.4	51.4	53.8	53.3	54.1	54.4
Pr	6.15	6.15	6.01	4.97	5.8	5.96	6.26	6.02	6.13	5.98
Nd	23.7	24.5	23.5	20.2	22.6	23.6	25.4	24.5	23.9	24.4
Sm	4	2.4	3.9	3.5	3.7	4	3.9	4	4.1	3.7
Eu	1.11	1.18	1.03	1.07	1.07	1.06	1.14	1.15	1.17	1.02
Gd	3.24	3.51	3.28	3	3.05	3.25	3.22	3.49	3.43	3.18
Tb	0.54	0.56	0.54	0.47	0.47	0.48	0.52	0.53	0.55	0.45
Dy	3.29	3.52	3.16	3.22	3.82	3.2	3.19	3.49	3.33	2.93
Ho	0.64	0.69	0.63	0.66	0.6	0.61	0.62	0.68	0.66	0.58
Er	1.99	2.14	2.01	2.03	1.74	1.94	1.85	2.08	2.1	1.78
Tm	0.27	3	0.28	0.29	0.27	3	0.27	3	0.29	0.26
Yb	2.1	2.2	2	2.1	1.9	2	1.9	2.2	2.2	1.8
Lu	0.28	0.31	0.29	0.29	0.27	0.30	0.28	0.32	0.30	0.26

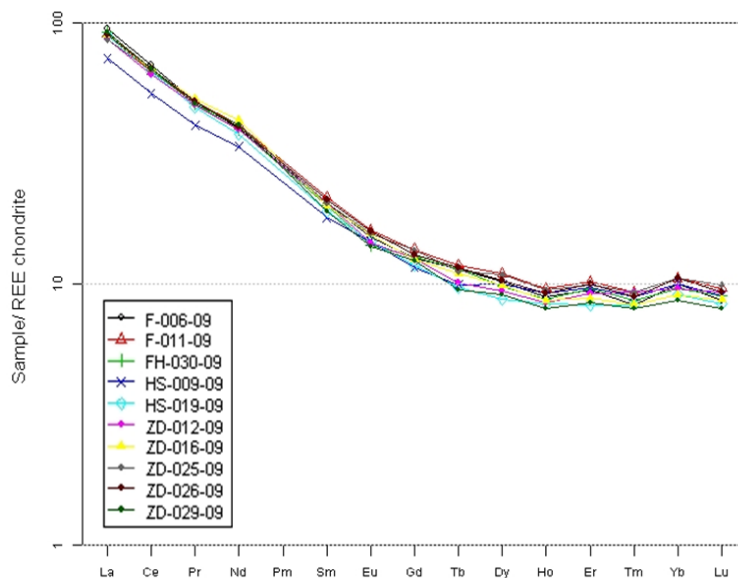


شکل ۵- نمودار رده‌بندی شیمیایی بر حسب مجموع آلکالی‌ها (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) در برابر SiO<sub>2</sub> (Middlemost, 1994)

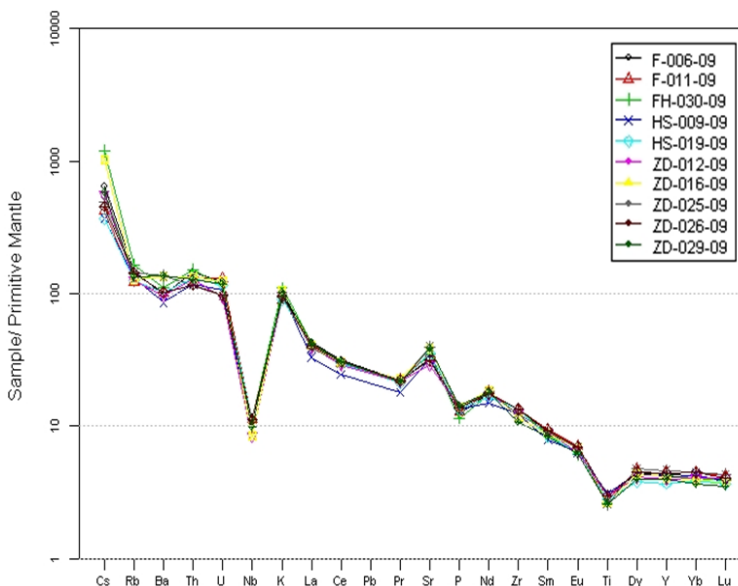
شکل ۶ - نمودار  $K_2O$  در مقابل  $SiO_2$  (LeMaitre *et al.*, 1989) و موقعیت سنگ‌های آتشفشانی منطقه حسین‌آباد



شکل ۷ - الگوی عناصر نادر خاکی کمیاب به‌هنگار شده با کندریت (Nakamura, 1974)



شکل ۸ - الگوی عناصر جزئی به‌هنگار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and McDonough, 1989)



al., 2005; Defant and Drummond, 1990; Martine, 1999). امروزه مطالعات نشان داده است که سنگ‌هایی وجود دارند که ویژگی‌های آداکیتی را نشان می‌دهند، اما در ارتباط مستقیم با ذوب ورقه اقیانوسی نیستند؛ از جمله:

- (۱) شکسته شدن پوسته اقیانوسی و بالا آمدگی آستنوسفر (Qin *et al.*, 2007; Jahangiri, 2007)
  - (۲) ماگمای مشتق شده از گوشته با مشارکت پوسته بالایی و تفریق (Chiaradia *et al.*, 2009; Castillo, 2006; Richard and Kerrich, 2007)
  - (۳) تبلور تفریقی بازالت‌های حاوی آمفیبول در خزینه ماگمایی (Castillo, 2006)
  - (۴) ذوب بخشی بازالت دگرگون شده و اکلوزیتی شده پوسته پایینی (Kay and Kay, 1991; Topuz *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2007; Varol *et al.*, 2007; Fang and Yong-Sheng, 2010)
  - (۵) ذوب بخشی پوسته پایینی رها شده در آستنوسفر (Wang *et al.*, 2004; Seghedi *et al.*, 2007; Pinto *et al.*, 2008)
- بر اساس نمودار در صد وزنی MgO در برابر SiO<sub>2</sub> (Pinto *et al.*, 2008) سنگ‌های مورد مطالعه در محدوده آداکیت‌های ناشی از ذوب بخشی پوسته تحتانی ضخیم شده قرار می‌گیرند (شکل ۱۰). این مطلب توسط نمودارهای K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O در برابر Sr و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> تایید می‌شود (شکل ۱۱ - A و B). Fang و Yong-Sheng (۲۰۱۰) آداکیت‌هایی را که از ذوب بخشی پوسته پایینی ایجاد می‌شوند، آداکیت‌های تیپ C (Lower Crust Continental) نامیده‌اند. بر این اساس، سنگ‌های مورد مطالعه از نوع آداکیت‌های تیپ C هستند.

نمودار فراوانی عناصر جزئی به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and Mc Donough, 1989)، غنی‌شدگی انتخابی عناصر LILE را نسبت به عناصر HFSE نشان می‌دهد. در این نمودار عناصر Sr، Cs، Th، U و K آنومالی مثبت و Ti و Nb آنومالی منفی نشان می‌دهند (شکل ۸).

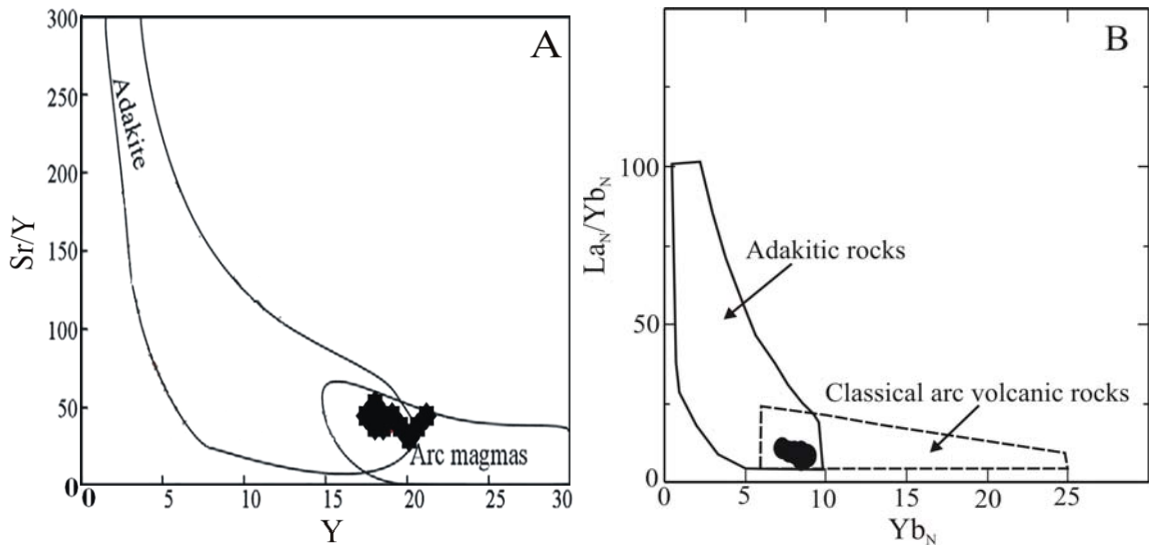
## بحث

بی‌هنجاری منفی Nb شاخص سنگ‌های قاره‌ای است و می‌تواند نشان‌دهنده مشارکت پوسته در فرایندهای ماگمایی باشد (Reichew, 2005). از طرفی، تهی‌شدگی Nb و Ti ویژه ماگماتیسم در زون فرورانش است (Wilson, 2007). بالا بودن نسبت LREE/HREE و نسبت Sr/Y (میانگین ۳۸/۵۵)، مقدار بالای SiO<sub>2</sub> (میانگین ۵۹/۰۹ درصد) و Sr (میانگین ۷۳۴ ppm)، مقدار پایین Yb (میانگین ۲/۴ ppm) و Y (میانگین ۱۹/۱۱ ppm)، مقدار Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O > 1، مقدار MgO (میانگین ۲/۴۵)، تهی‌شدگی در Ti، Nb و P به‌همراه فقدان آنومالی منفی Eu در سنگ‌های آندزیتی منطقه حسین‌آباد نشان می‌دهند که این سنگ‌ها شباهت زیادی به آداکیت‌های غنی از سیلیس دارند (Defant and Drummond, 1990; Martine, 1999; Martin *et al.*, 2005; Rollinson and Tarney, 2005; Shimoda, 2009; Moyen, 2009)

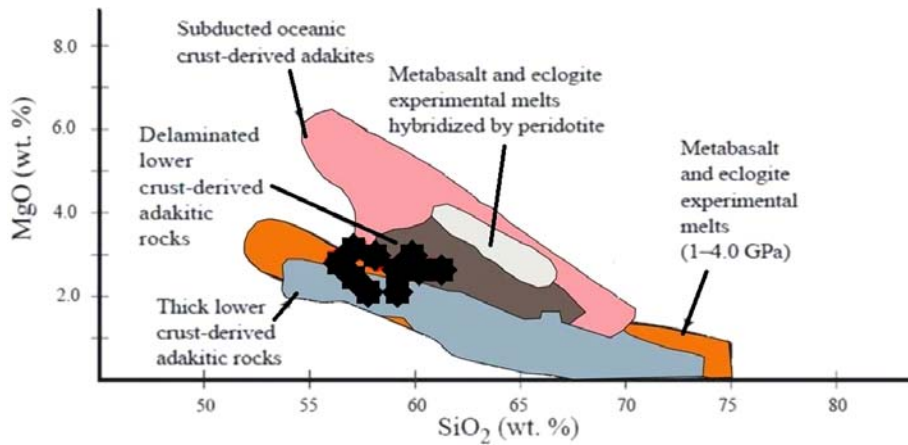
نمودار Sr/Y در برابر Y (Defant and Drummond, 1990) و La<sub>N</sub>/Yb<sub>N</sub> در مقابل Yb<sub>N</sub> (Martin, 1999) نشان می‌دهد که سنگ‌های آندزیتی منطقه حسین‌آباد در محدوده آداکیت‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۹ - A و B).

آداکیت‌ها از ذوب بخشی پوسته اقیانوسی جوان و گرم در زون‌های فرورانش ایجاد می‌شوند (Martin *et*

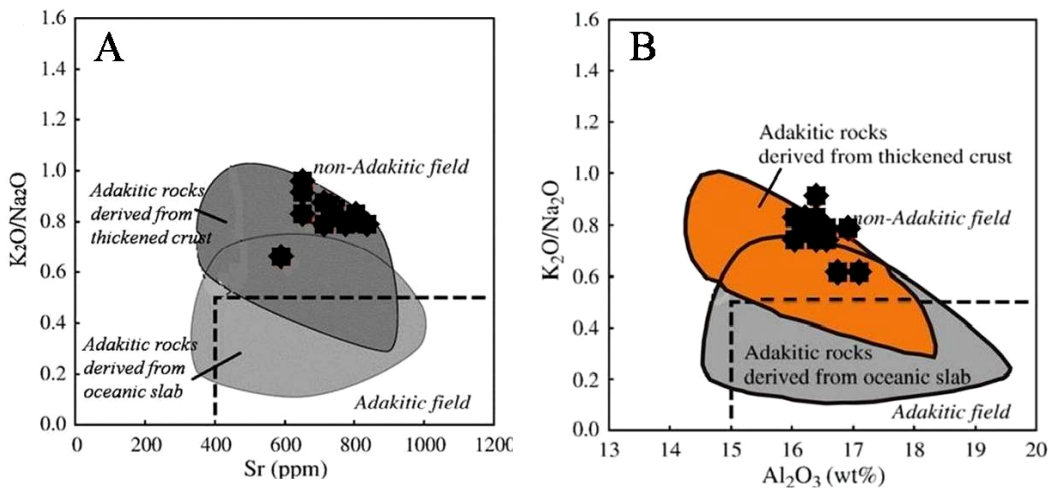




شکل ۹- (A) نمودار Sr/Y در برابر Y (Defant and Drummond, 1990)، (B) نمودار  $La_N/Yb_N$  در مقابل  $Yb_N$  (Martin, 1999) که موقعیت نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده آداکیت‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰- نمودار درصد وزنی MgO در برابر  $SiO_2$  (Pinto *et al.*, 2008) و موقعیت نمونه‌های منطقه حسین‌آباد.



شکل ۱۱- (A) و (B) نمایش سنگ‌های آتشفشانی منطقه حسین‌آباد بر روی نمودار  $K_2O/Na_2O$  در برابر  $Al_2O_3$  و Sr (Kamei *et al.*, 2009)

### نتیجه‌گیری

بر اساس مطالعات پتروگرافی و رده‌بندی شیمیایی، سنگ‌های آتشفشانی مورد بررسی آندزیت هستند. حضور انکلاو به‌صورت اتولیت و زینولیت در سنگ‌های آتشفشانی منطقه مورد مطالعه پدیده‌ای رایج است. اتولیت‌ها مربوط به بخش‌های زود سرد شده ماگما و زینولیت‌ها، آمفیبولیت و میکاشیستی هستند. وجود زینولیت در این سنگ‌ها، حاکی از فراهم بودن شرایط برای بروز آلودگی پوسته‌ای و تحول ماگما هنگام صعود است.

داده‌های زمین‌شیمی نشان‌دهنده تعلق این سنگ‌ها به سری ماگمایی کالک‌آلکالن با ویژگی آداکیتی است. با بسته شدن اقیانوس تتیس بین پهنه لوت و افغان در خاور ایران، برخورد آن‌ها و به دنبال آن ضخیم‌شدن پوسته قاره‌ای و دگرگونی پوسته تحتانی، شرایط جدایش این بخش از پوسته و فرورفتن آن در آستنوسفر فراهم شده است. صعود آستنوسفر و بروز ذوب‌بخشی پوسته تحتانی دگرگون شده سبب ایجاد ماگمایی با مشخصات آداکیتی نوع C شده است. بالا بودن نسبت‌های LREE/HREE و Sr/Y در سنگ‌های مورد مطالعه حاکی از منشأگرفتن آن‌ها از یک منبع گارنت آمفیبولیتی است. این رخداد به عنوان یک پدیده پس از برخوردی در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود.

بر اثر نیروی برخوردی قاره-قاره، سنگ‌های پوسته پایینی در معرض دما و فشار بالا قرار می‌گیرند و طی آن واکنش‌های دگرگونی در پوسته پایینی قاره‌ای انجام می‌شود. بسته به مقدار افزایش فشار و پارائنز اولیه پوسته پایینی، بازالت و گابرو به آمفیبولیت ( $P < 1G \text{ Pa}$ ) و در فشار بالاتر به اکلوژیت، گرانولیت و گارنت پیروکسنیت تبدیل می‌شوند (Lustrino, 2005).

دگرگونی پوسته تحتانی و افزایش وزن مخصوص ناشی از این دگرگونی، شرایط جدایش این بخش از پوسته و فرورفتن در آستنوسفر را فراهم نموده است. این فرآیند باعث صعود آستنوسفر و بروز ذوب‌بخشی پوسته تحتانی دگرگون شده، ماگمایی با مشخصات آداکیتی ایجاد می‌شود (زرین کوب و دیگران، ۱۳۸۹).  
مطالعات ژئوفیزیکی Dehghani و Makris (۱۹۸۳)، Priestley و McKenzie (۲۰۰۶، ۲۰۰۸)، Walker و همکاران (۲۰۰۹) و Hatzfeld و Molnar (۲۰۱۰) نشان داده‌اند که پوسته در خاور ایران نسبتاً ضخیم است (۴۰ تا ۴۸ کیلومتر) که می‌تواند پیامد برخورد دو بلوک قاره‌ای لوت و سیستان (Zarrinkoub *et al.*, 2010) باشد. در نتیجه، ضخیم‌شدگی پوسته و به تبع آن لیتوسفر، شرایط دگرگونی بخش تحتانی پوسته (گارنت آمفیبولیت) فراهم شده است.

### منابع

- افتخارزاد، ج. و وحدتی‌دانشمند، ف. (۱۳۶۹) نقشه زمین‌شناسی چهار گوش بیرجند با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران.
- زرین کوب، م. ح.، امینی، ص.، آفتابی، ع. و کریم‌پور، م. ح. (۱۳۸۴) کانی‌شناسی، زمین‌شیمی، موقعیت زمین‌ساختی و ارائه مدل ژنتیکی برای لیستونیت‌های خاور ایران. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران ۱۳(۲): ۳۶۳-۳۷۸.
- زرین کوب، م. ح.، چانگ، س. ل.، خطیب، م. م. و محمدی، س. (۱۳۸۹) سن سنجی زیرکن-سرب، سنگ‌نگاشتی و زمین‌شیمی توده‌های نفوذی کم عمق در جنوب‌باختری بیرجند (منطقه رچ). مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران ۱۸(۳): ۴۷۱-۴۸۲.

یوسف‌زاده، م. ح.، پورمعافی، س. م.، عابدینی‌وثوقی، م. و امامی، م. ه. (۱۳۸۵) سنگ‌شناسی و زمین‌شیمی آتشفشان‌های دوران سوم در منطقه بیرجند با تأکیدی بر انکلاوهای آن. مجموعه مقالات چهاردهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه بیرجند، خراسان جنوبی، ایران.

- Berberian, M. and King, G. C. P. (1981) Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18: 210–265.
- Castillo, P. R. (2006) An overview of adakite Petrogenesis. *Chinese Science Bulletin* 51: 257–268 .
- Chiaradia, M., Müntener, O., Beate, B. and Fontignie, D. (2009) Adakite-like volcanism of Ecuador: lower crust magmatic evolution and recycling. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 158: 563–588 .
- Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1990) Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347: 662–665.
- Dehghani, A. and Makris, J. (1983) The gravity field and crustal structure of Iran, Geodynamic project (Geotraverse) in Iran. Geological survey of Iran, Report No. 51.
- Fang, H. and YongSheng, H. (2010) Partial melting of the dry mafic continental crust: Implications for petrogenesis of C-type adakites. *Chinese Science Bulletin* 55: 2428–2439.
- Guo, Z., Wilson, M. and Liu, J. (2007) Post-collisional adakites in south Tibet: Products of partial melting of subduction-modified lower crust. *Lithos* 96: 205–224.
- Hatzfeld, D. and Molnar, P. (2010) Comparisons of the kinematics and deep structures of the Zagros and Himalaya and of the Iranian and Tibetan plateaus and geodynamic implications. *Reviews of Geophysics* 48.
- Jahangiri, A. (2007) Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: Geochemical and geodynamic implications. *Asian Earth Sciences* 30: 433–447.
- Kamei, A., Owada, Y. M. M. and Kimura, J. I. (2009) A pseudo adakite derived from partial melting of tonalitic to granodioritic crust, Kyushu, southwest Japan arc. *Lithos* 112: 615–625.
- Kay, R. W. and Kay, S. M. (1991) Creation and destruction of lower continental crust. *Geologische Rundschau* 80: 259–278.
- Kerr, P.F. (1977) *Optical mineralogy*. McGraw-Hill book Company.
- Khatib, M. M. and Zarinkoub, M. H. (2009) Morphotectonic of emplacement of the andesitic ring in Givshad ,east of Iran. 11 EGU-5359.
- Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre, Le Bas, M. J., Sabine, P. A., Schmid, R., Sorensen, H., Streckeisen, A., Woolley, A. R. and Zanettin, B. (1989) *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. Blackwell, Oxford.
- Lustrino, M. (2005) How the delamination and detachment of lower crust can influence basaltic magmatism. *Earth-Science Reviews* 72: 21–38.
- Martin, H. (1999) Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos* 46: 411–429.
- Martin, H., Smithies, R. H., Rapp, R., Moyen, J. F. and Champion, D. (2005) An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos* 79: 1–24.
- McKenzie, D. and Priestley, K. (2008) The influence of lithospheric thickness variations on continental evolution. *Lithos* 102: 1–11.

- Middlemost, E. A. K. (1994) Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth Science Reviews* 37: 215–224.
- Moyen, J. F. (2009) High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the adakitic signature. *Lithos* 112: 556–574.
- Muller, D. and Groves, D. I. (1997) Direct and indirect associations between potassic igneous rocks, Shoshonites and gold- copper deposits. *Ore Geological Review* 8: 383-406.
- Nakamura, N. (1974) Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochemical. Acta* 38: 757-775.
- Nelson, S. T. and Montana, A. (1992) sieve –textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist* 77: 1242-1249 .
- Nogole Sadat, M. A.A. (1983) Seismotectonic map of Iran, 1:1000000 Scale. Geological Survey of Iran.
- Pichler, H. and Schmitt- Riegraf, C. (1997) Rock- forming minerals in thin section. Translated by L. Hoke, Chapman and Hall .
- Pinto-Linares<sup>1</sup>, P. J., Levesse, G., Tritlla, J., Valencia, V. A., Torres-Aguilera, J. M., González, M. and Estrada, D. (2008) Transitional adakite-like to calc-alkaline magmas in a continental extensional setting at La Paz Au-Cu skarn deposits, Mesa Central, Mexico: metallogenic implications. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 25(1):39-58.
- Priestley, K. and McKenzie, D. (2006) The thermal structure of the lithosphere from shear wave velocities. *Earth and Planetary Science Letters* 244: 285-301.
- Pudlo, D. and Franz, G. (1995) Records of deep seated magma chamber processes from plagioclase and amphibole phenocrysts in Pan-African dyke rocks of Bir Safsaf/SW-Egypt. In: G., Baer and A., Heimann, (Eds.): *Physics and Chemistry of Dykes*. 251-265. Balkema, Rotterdam-Brookfield .
- Qin, J., Lai, S. and Li, Y. (2007) Post-collisional adakitic biotite plagiogranites from Guangtoushan pluton (Mianxian, central China), Petrogenesis and tectonic implication. *Earth and Environmental Science* 1(3): 299-303.
- Reichow, M., Saunders, A. D., White, R. V., Al'Mukhamedov, A. I. and Medvedev, A. Ya.(2005) Geochemistry and petrogenesis of basalts from the West Siberian Basin: an extension of the Permo Triassic Siberian Traps, Russia. *Lithos* 79: 425-452.
- Richards, J. P. and Kerrich, R. (2007) Special Paper, Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis. *Economic Geology* 102(4): 537-576.
- Rollinson, H.R., Tarney, J. (2005) Adakites- the key to understanding LILE Depletion in granulites. *Lithos* 79: 61-81.
- Rutherford, M.J., Devine, J.D. (2003) Magmatic conditions and magma ascent as indicated by hornblende phase equilibria and reactions in the 1995-2002 Sufriere Hills magma. *Journal of petrology* 44(8): 1433-1454.
- Seghedi, I., Bojar, A-V., Downes, H., Roşu, E., Tonarini, S. and Mason, P. (2007) Generation of normal and adakite-like calc-alkaline magmas in a non-subductional environment: An Sr–O–H isotopic study of the Apuseni Mountains neogene magmatic province, Romania. *Chemical Geology* 245: 70–88.
- Shelley, D. (1993) *Igneous and metamorphic rocks under the microscope*. Chapman and Hall, University Press, Cambridge, U. K.

- Shimoda, G. (2009) Genetic link between EMI and EMII: An adakite connection. *Lithos* 112: 591–602.
- Singer, S. B. A., Dungan, M. and Layne, G. (1995) Texture and Sr, Ba, Mg, Fe, K and Ti compositional profile in volcanic plagioclase, clues to the dynamics of calc alkaline magma chamber. *American Mineralogist* 80: 776-798.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) A chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication* 42: 313–345.
- Tirrul.R., Bell, I.R., Griffis, R.J. and Camp, V.E. (1983) The Sistan suture zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 94: 134-150.
- Topuz, G. B., Altherr, R., Schwarz, W. H., Siebel, W., Satir, M. and Dokuz, A. (2005) Post-collisional plutonism with adakite-like signatures: the Eocene Saraycık granodiorite (Eastern Pontides, Turkey). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 150: 441-455.
- Tsuchiyama, A. (1985) Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside – albite-anorthite and origin of dusty plagioclase in andesite. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 89:1-16.
- Varol, E., Temel A., Gourgaud, A. and Bellon, H. (2007) Early Miocene adakite-like volcanism in the Balkuyumcu region, central Anatolia, Turkey: Petrology and geochemistry. *Asian Earth Sciences* 30: 613–628.
- Walker, R. T., Gans, P., Allen, M. B., Jackson, J., Khatib, M., Marsh, N. and Zarrinkoub, M. (2009) Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran, *Geophysical Journal International* 177: 783–805.
- Wang, F., Xu, Q., J., Zhao, Z.H., Bao, Z.W., Xu, W. and Xiong, X.L. (2004) Cretaceous high-potassium intrusive rocks in the Yueshan-Hongzhen area of east China: Adakites in an extensional tectonic regime within a continent. *Geochemical Journal* 38: 417–434 .
- Wilson, M. (2007) *Igneous petrogenesis, a global tectonic approach*. Springer.
- Zarrinkoub, M.H., Chung, Sun-Lin., Chiu, H.Y., Mohammadi, S.S., Khatib, MM. and Lin, I-Jhen(2010) Zircon U-PB age and geochemical constraints from the northern Sistan Suture Zone on the Neotethyan magmatic and tectonic evolution in eastern Iran. *Tectonic Crossroads: Evolving Orogens of Eurasia-Africa-Arabia*, Ankara, Turkey.
- Zellmer, G. F., Sparks, R. S. G., Hawksworth, C. J. and Wiedenbeck, M. (2003) Magma emplacement and remobilization timescale beneath Montserrat: Insight from Sr and Ba zonation in plagioclase phenocrysts. *Journal of Petrology* 44(8): 1413-1431.



## **The geochemistry and petrogenesis of Hossein abad Tertiary volcanic rocks (southwest of Birjand, East of Iran)**

**Seyed Saeid Mohammadi \*, Mohammad Hossein Zarrinkoub  
and Fatemeh Keramati**

Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

### **Abstract**

The study area is located 50 km southwest of Birjand, in the northwest margin of Sistan suture zone. In Hosseinabad area, the Tertiary volcanic rocks cross-cut the upper Cretaceous ophiolitic sequences. These rocks are andesite and display porphyric and glomeroporphyric textures. Plagioclase, hornblende, augite and biotite are the main phenocrysts. Sieve texture and selective alteration in plagioclase, opacitization of hornblende and the presence of mica-schist and amphibolitic enclaves are very common in these rocks. High ratio of LREE/HREE, Sr/Y (average: 38.55) and SiO<sub>2</sub> (average: 59.09), and lack of Eu negative anomalies indicate that these rocks are similar to silica-rich adakites suggesting that this magma could have been originated from a garnet amphibolite source, resulting from metamorphism of thickened lower crust.

**Key words:** Volcanic rocks, Birjand, Adakite, Andesite, Ophiolitic sequences

---

\* ssmohammadi2003@yahoo.com