

مطالعه ترمودینامیکی مخلوط نه‌گهای مذاب

حسین آقائی

گروه شیمی - دانشگاه تربیت معلم

دبر زمانی است که تسوجه عده زیادی از پژوهندگان و محققان صرف مطالعه خواص ترمودینامیکی مذابهای یونی و مخلوط آنها شده و از این راه اطلاعات بسیار ارزنده‌ای در خصوص ساختمان و صفات اینگونه مذابها و مخلوط آنها بدست آمده است. هر سال حاصل زحمات و کوششهای این دسته از پژوهشگران به صورت صدها مقاله تحقیقی و ده‌ها کتاب علمی منتشر می‌شود و در اختیار علاقمندان قرار می‌گیرد. البته پژوهشهای اولیه با مطالعه مذابهای یونی خالص آغاز شد و سپس به بررسی خواص مخلوط آنها توجه گردید.

روشهای تحقیق در نمکهای مذاب بسیار متنوع است. معمولترین آنها عبارت است از: روشهای کالریمتری (Calorimetric methods)، کریوسکوپی و آنالیز گرمایی (Cryoscopic method and Thermal analysis)، دیفرانسیال اسکین اشعه x (x-ray diffraction)، دیفرانسیال الکترونی (Electron diffraction)، استفاده از اشعه لایزر (Laser action)، و روشهای الکتروشیمیایی (Electrochemical methods) در بین این روشها، دو روش کالریمتری و آنالیز گرمایی بیشتر به کار رفته است.

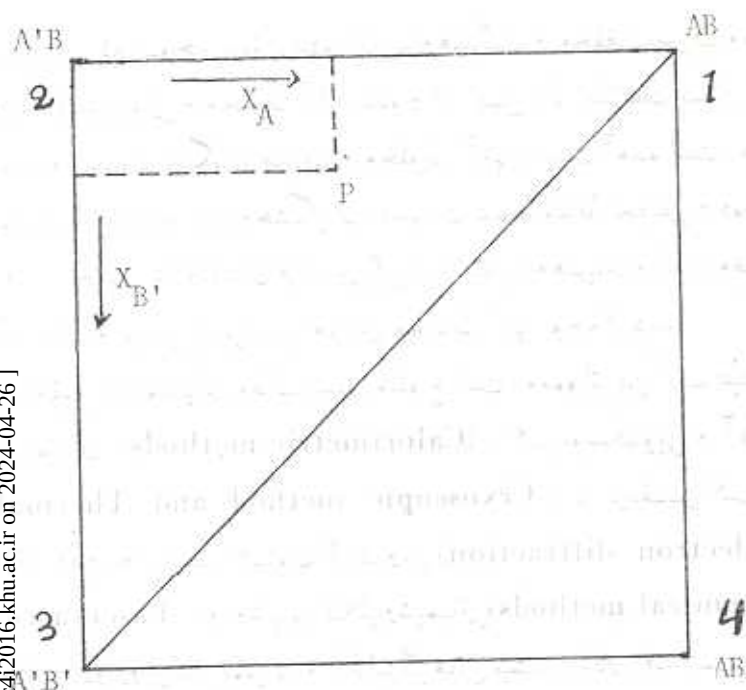
مخلوط مذابهای یونی به سیستمهای گوناگونی تقسیم می‌شود که در بین آنها سیستمهای بایون مشترک و سیستمهای متقابل یا زیپیرک (Reciprocal molten salt mixtures) مشهورتر است. سیستمهای بایون مشترک شامل دو یا چند کاتیون و یک آنیون و یا دو یا چند

دو آنیون) می باشد و ساده ترین صورت آن مانند $(A^+ + A^+ + B^- + B^-)$ است
 چنین سیستمی، چهار ترکیب یونی AB ، $A'B'$ ، $A'B$ و $A'B'$ شرکت دارد.
 ترکیب مطابق شکل (۱) در نمایش سیستم رسیپرک بکار می رود. هر دو ترکیبی که در
 مربع واقع است، یک سیستم دوتائی بایون مشترک را معرفی می نماید؛ در حالی
 واقع در دو طرف هر قطر مخلوطهای رسیپرک را بوجود می آورد. در ضمن واکنش



یکی از خاصه های بسیار ممتاز اینگونه مذابها می باشد.

در حالت کلی برای تشکیل یک مخلوط رسیپرک لازم است که سه ترکیب از
 یاد شده، در حالت مذاب درهم حل گردند. اما در حالت خاصی که مورد نظر ما است،



(شکل ۱)

در AB در $A'B$ یا $A'B'$ در AB' نیز مخلوط رسیپرک تشکیل می گردد. هرگاه
 در تشکیل مخلوط رسیپرک شرکت نماید، برای آن خواهیم داشت:

$$x_{A'} = x_{B'} = x_{A'B'}$$

درحالی که X_i مول جزئی شرکت کننده (i) را در مخلوط مذاب می‌رساند. چنانچه در تشکیل مخلوط، ترکیبهای AB' و $A'B$ به کار رود برای آن خواهیم داشت:

$$x_{A'} = x_B = x_{AB}$$

$$x_A = x_{B'} = x_{A'B'}$$

در حالت کلی هر مخلوط رسیپرک توسط نقطه‌ای از سطح مربع مشخص می‌گردد. اما کلیه مخلوطهایی که از AB و $A'B'$ و یا از $A'B$ و AB' پدید می‌آیند، بر روی اقطار مربع جای می‌گیرند.

پیش بینی خواص ترمودینامیکی مذابهای رسیپرک از روی صفات سیستمهای دوتایی شرکت کننده، یکی از مسایل بسیار جالب نظری است. کوششهای اولیه در این باره توسط Flood و همکارانش صورت گرفت (۱ و ۲). آنان در پی ریزی روابط ترمودینامیکی مذابهای رسیپرک، توزیع یونها را در مخلوط، کاملاً اتفاقی فرض کرده و از آنجا برای آنروپی مولی تشکیل مخلوطهایی از نوع $AB - A'B'$ بدست آوردند:

$$\Delta S = -R \left[x_A \log x_A + x_{A'} \log x_{A'} + x_B \log x_B + x_{B'} \log x_{B'} \right]$$

درمورد آنتالپی مولی تشکیل مخلوط (ΔH)، پس از یک سلسله استدلال بدست می‌آید، (۳)

$$\Delta H = x_{AB} x_{A'B'} \left[\Delta H^0 + x_{AB} (\lambda_A + \lambda_B) + x_{A'B'} (\lambda_{A'} + \lambda_{B'}) \right] \quad (۱)$$

ΔH^0 آنتالپی واکنش مشخصه



محتوای بسیار رفیق نشان می‌دهد.
در ضمن آنتالپی آزاد مولی تشکیل محلول (ΔG) با آسانی از روی ΔH محاسبه است.

پیش بینی‌هایی که بر پایه رابطه (۱) بعمل می‌آید با خواص عده‌ای از مذاب سازگار است، اما در حالتی که عکس‌العمل بین یونها شدید بوده و در نتیجه توزیع یونی باشد، دیگر نمی‌توان از آن در پیش بینی‌های نظری استفاده کرد. از همین رو در طبق روش کاملاً متفاوتی و تحت نام (Conformal Ionic Solutions)، صفات محلولهای یونی را مورد مطالعه مجدد قرار داد و از آنجا برای آنتالپی مولی تشکیل بدست می‌آید،

$$\begin{aligned} &= X_A X_{B'} \Delta H_{10} + X_A \Delta H_{14} + X_{A'} \Delta H_{25} + X_{B'} \Delta H_{12} + X_{B'} \Delta H_{54} \\ &- X_A X_{A'} X_{B'} X_{B'} (\Delta H_0)^2 / 2zRT \end{aligned} \quad (2)$$

به عنوان مثال ΔH_1 آنتالپی مولی تشکیل سیستم دوتائی $AB - AB'$ را ضمناً جمله آخر در طرف دوم رابطه، به توزیع غیر اتفاقی یونها در مخلوط مذاب می‌گردد.

مدل آماری یونهای محصور (modele statistique en ions entoures) نیز برای توجیه خواص ترمودینامیکی مخلوطهای رسیپرک بسیار مناسب است. ابتدا به تشریح انرژی پتانسیل یونها در مذاب خالص و در مخلوط پرداخته می‌شود و محاسبه تابع توزیع محلول (Ω) می‌گردد. از روی رابطه اساسی $G = -kT \ln \Omega$ آزاد تشکیل محلول ($\Delta'G$) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} G = - \frac{RT}{\rho} & \left[\log \Omega - n_A \log \Omega_{AB} - (n_B - n_A) \log \Omega_{A'B} \right. \\ & \left. - n_{B'} \log \Omega_{A'B'} \right] \end{aligned}$$

انتالپی تشکیل محلول $\Delta'H$ از روی رابطه Gibbs-Helmholtz نتیجه می‌گردد.

$$\Delta'H = \frac{\partial(\Delta'G/T)}{\partial(1/T)}$$

از آنجا آنتروپی تشکیل محلول برابر می‌شود با :

$$\Delta'S = \frac{\Delta'H - \Delta'G}{T}$$

در شرایطی که توزیع یونها در محلول اتفاقی فرض گردد ، برای آنتالپی مولی تشکیل محلول بدست می‌آید:

$$\Delta H = X_A \Delta H_{14} + X_{A'} \Delta H_{23} + X_B \Delta H_{12} + X_{B'} \Delta H_{34} + X_A X_{B'} \Delta H_0 \quad (3)$$

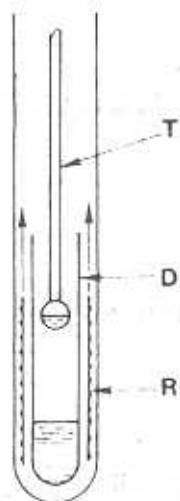
در صورتی که در توزیع یونها نوعی نظم برقرار باشد، نتیجه می‌شود،

$$\Delta H = (\Delta H)_{des.} - X_A X_{A'} X_B X_{B'} \frac{(\Delta H_0)^2}{2z'RT} \quad (4)$$

مطالعهٔ کالریمتری مذاب رسپیرك Na^+ , $K^+//NO_3^-$, Br^-

روش تجربی: دستگاه مورد استفاده از نوع میکروکالریمتر Calvet است که شرح آن در بسیاری از نشریه‌های علمی آمده است (۸ و ۷). برای انجام آزمایش، طبق شکل (۲)، یکی از نمک‌ها را در آمپولی از جنس Pyrex با جدار بسیار نازک قرار داده و نمک دیگری را در یک لولهٔ کوچک (D) جای می‌دهند. آمپول را به یک حامل (T) جوش داده و آن را در فاصلهٔ مناسبی در بالای نمک دوم و در داخل لولهٔ (D) نکه می‌دارند. سپس حامل و آمپول و لولهٔ آزمایش را در محفظهٔ دیگری که از جنس Pyrex است قرار داده و آن را در مخزن کالریمتر داخل می‌کنند. برای برقراری تعادل دمایی سه تا پنج ساعت وقت لازم است. پس از آن حامل (T) را به طرف

دو نمک در هم حل می شوند. اثر گرمائی حاصل از انحلال دو نمک در یکدیگر، به یک



شکل (۲)

منتقل شده و بیکی که سطح آن با مقدار گرمای
مبادله شده متناسب است، پدیدار می گردد. با
اندازه گیری سطح پیک و تعیین ضریب تبدیل
آن به گرمای $(\frac{P}{g})$ ، به آسانی مقدار گرمای
مبادله شده محاسبه می شود.

برای تعیین $(\frac{P}{g})$ قطعه های کوچک
و توزین شده طلا را از دمای محیط به داخل
کالریمتر رها می کنند و از روی سطح پیک
حاصل و با توجه به تغییر آنتالپی طلا که قابل

محاسبه است، مقدار $\frac{P}{g}$ را بدست می آورند. به علاوه برای اطمینان بیشتر، از روش

نیز برای تعیین $\frac{P}{g}$ کمک گرفته می شود. در این روش مقدار الکتریسته معینی را

مشخص (R) عبور داده و از روی سطح پیک حاصل ضریب $\frac{P}{g}$ را محاسبه می کنند.

درستی میکروکالریمتر به کار رفته، از طریق اجرای پاره ای آزمایشهای شناخته
بررسی قرار گرفته است (۹). ضمناً برای آگاهی از میزان گرمای حاصل از شکستن
آزمایشهایی به شرح فوق و با آمبولهای خالی صورت گرفته است و نتایج حاصل
که اثر مذکور ناچیز و قابل اغماض می باشد.

درجه خلوص نمکهای به کار رفته: نیتراهای به کار رفته از نوع محصولات

(Pour analyse) و با درجه خلوص ۹۹/۹۹٪ بوده است و بر موثرها از نوع (Sgarpur)

و با درجه خلوص فوق العاده زیاد. این نمکها قبل از استفاده، برای مدت یک تا دو
اتوی ۱۵۰ c° خشک شده و خنثی بودن آنها، قبل و بعد از آزمایش مورد بررسی قرار

خطای موجود در نتایج تجربی: در محاسبه آنتالپی، خطاهای مختلفی در

مهمترین آنها عبارت است از:

- خطای مربوط به گرمای ویژه (C_p) و عوامل مؤثر در تعیین ($\frac{p}{g}$)

- خطای مربوط به توزین نمونه‌ها و اثرهای حرارتی مزاحم

بطور کلی می‌توان انتظار داشت که خطای کلی نتایج تجربی در حدود ۵٪ باشد (۹)

نتایج تجربی: به منظور مطالعه مذاب ($Na^+ + K^+ + NO_3^- + Br^-$)، از یک طرف

سیستمهای دوتائی با یون مشترک را مورد نظر قرار داده‌ایم و از طرف دیگر به سیستمهای «نیترات سدیم-برمور پتاسیم-ونیترات پتاسیم-برمور سدیم» که تشکیل دهنده مذابهای رسیورک هستند، توجه نموده‌ایم. در هر مورد، در نوع اندازه‌گیری آنتالپی به عمل آمده است. یکی در محلولهای رقیق و دیگری در محلولهای غلیظ.

در دمای تجربی (293 K) نیتراتهای به کار رفته به صورت مذابند، در حالی که برمورها به حالت جامد. از این رو از حل شدن برمور در نیترات در دمای آزمایش، دو پدیده متفاوت رخ می‌دهد؛ یکی ذوب برمور در دمای پائین تر از دمای ذوب عادی آن، دیگری انحلال برمور مایع در حال تأخیر در انجامدادن در نیترات مذاب. اثر اول با دانستن آنتالپی ذوب و تصحیح آن تا دمای تجربی قابل محاسبه است. بنابراین از روی نتایج تجربی، به آسانی می‌توان سهم گرمائی اثر دوم را بدست آورد.

۱- سیستمهای دوتائی بایون مشترک

الف: سیستم نیترات سدیم - نیترات پتاسیم: از بیست اندازه‌گیری مستقل در محلولهای بسیار رقیق بدست آمده است (۹).

$$\left[\Delta \bar{H}^{\infty} (\text{NaNO}_3) \right]_{(\text{KNO}_3)} = -0,43 \pm 0,03 \text{ kcal.mol}^{-1}$$

$$\left[\Delta \bar{H}^{\infty} (\text{KNO}_3) \right]_{(\text{NaNO}_3)} = -0,49 \pm 0,03 \text{ kcal.mol}^{-1}$$

با توجه به مقدار بالا، برای آنتالپی مولی تشکیل محلول در هر غلظتی می‌توان داشت (۹).

$$\Delta H = X_{\text{NaNO}_3} X_{\text{KNO}_3} (-0,43 - 0,06 X_{\text{NaNO}_3}) \text{ kcal.mol}^{-1}$$

$$\left[\bar{H}^{\infty}_{<\text{NaBr}>} \right]_{(\text{NaNO}_3)} = 6,10 \pm 0,09 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$$

پس از کم کردن سهم آنتالپی ذوب بر مود سدیم در دمای 273°K (۱۰).

$$\left[\bar{H}^{\infty}_{(\text{NaBr})} \right]_{(\text{NaNO}_3)}^{723 \text{ K}} = 0,36 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$$

چون اندازه گیری آنتالپی مولی جزئی نیترات سدیم در بر مود سدیم، در محلول رقیق ممکن نیست (در دمای که بر مود ذوب می شود، نیترات تجزیه می گردد)، از این مورد مطالعه را بطور تقریب مانند یک محلول با قاعده (Regular Solution) و از آنجا:

$$H = 0,36 X_{\text{NaBr}} X_{\text{NaNO}_3} \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$$

ج- سیستم بر مود پتاسیم- نیترات پتاسیم: در نتیجه ده آزمایش جداگانه و طبق بالا بدست آمده است.

$$H = 0,26 X_{\text{KBr}} X_{\text{KNO}_3} \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$$

د- سیستم بر مود پتاسیم- برمورسدیم: در مورد این سیستم از نتایج رفتار گرفته ایم.

$$H = X_{\text{NaBr}} X_{\text{KBr}} (-0,53 - 0,03 X_{\text{NaBr}}) \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$$

II- سیستمهای تشکیل دهنده مذاب رسیپوک

۱- سیستم نیترات سدیم- برمور پتاسیم: بر اساس یازده سنجش کالریمتری بسیار رقیق نسبت به برمور، بدست آمده است.

$$\left[\Delta H^\infty_{\text{KBr}} \right] (\text{NaNO}_3) = 6,16 \pm 0,19 \text{ kcal.mol}^{-1}$$

پس از کم کردن آنتالپی ذوب بر موز پتاسیم در دمای آزمایش (۱۰).

$$\left[\Delta H^\infty_{\text{KBr}} \right] (\text{NaNO}_3) = A = 0,93 \text{ kcal.mol}^{-1}$$

آنتالپی مولی تشکیل اینگونه محلولها، با فرض اتفاقی بودن توزیع یونها، می تواند بر طبق رابطه زیر بیان گردد (۹).

$$\Delta H = X_{\text{KBr}} (1 - X_{\text{KBr}}) (A + B X_{\text{KBr}})$$

در حالی که:

$$(\Delta H^\infty_{\text{NaNO}_3} - \Delta H^\infty_{\text{KBr}}) = B \quad , \quad A = \Delta H^\infty_{\text{KBr}}$$

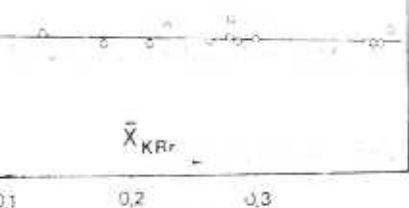
تعیین تجربی آنتالپی مولی جزئی اختلافی نیترات سدیم در بر موز پتاسیم در محلول بسیار رقیق نسبت به نیترات سدیم، امکان پذیر نیست؛ زیرا در دماهایی که بر موز ذوب می شود نیترات تجزیه می گردد. از این رو برای آگاهی از مقدار (B) به روش غیر مستقیم عمل گردیده است. در این روش از تغییر تابع $(\Delta H / X_{\text{KBr}})$ نسبت به X_{KBr} کمک گرفته می شود. در حالت حد (X_{KBr}°) و بطور تقریب می توان نوشت، (۹)

$$\frac{\Delta (\Delta H / X_{\text{KBr}})}{\Delta X_{\text{KBr}}} = B - A$$

شکل (۳) نتایج تجربی حاصل از رقیق شدن محلول نیترات سدیم و بر موز پتاسیم، توسط مذاب نیترات سدیم نشان می دهد. در این شکل داریم:

$$\bar{X}_{\text{KBr}} = \frac{1}{2} (X_{\text{KBr}}^{\text{initial}} + X_{\text{KBr}}^{\text{final}})$$

$$\Delta(\Delta H / X_{\text{KBr}}) = \left(\frac{\Delta H}{\bar{X}} \right)^{\text{final}} - \left(\frac{\Delta H}{\bar{X}} \right)^{\text{initial}}$$

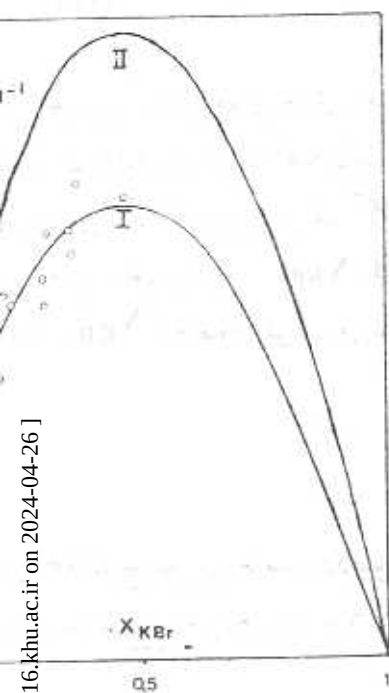


$$F = - \Delta (\Delta H / X_{KBr}) / \Delta X_{KBr}$$

شکل (۳)

با توجه به مقدار F در حالت حد $(1/28 -)$ کیلوکالری بر مول، برای ضرب $35 \times 0 -$ کیلوکالری بر مول بدست می آید.
از آنجا عبارت آنتالپی مولی تشکیل در هر غلظتی برابر خواهد شد با:

$$\Delta H = X_{KBr} X_{NaNO_3} (0.93 - 0.35 X_{KBr}) \text{ kcal.mol}^{-1}$$



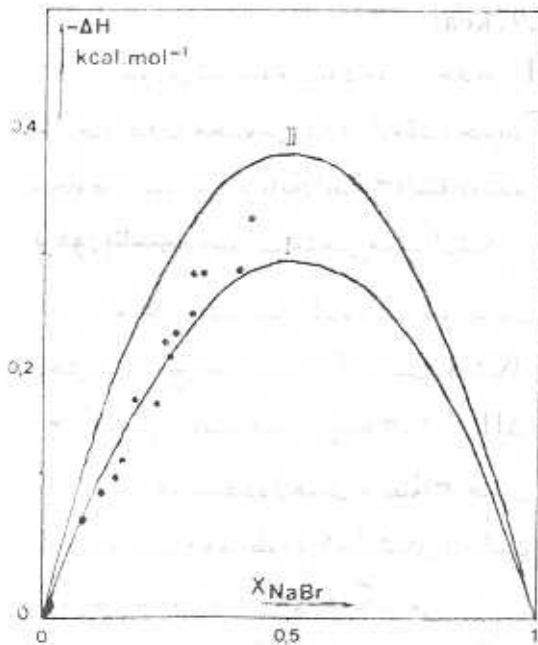
شکل (۴)

o و منحنی (II) نتایج تجربی و منحنی (I) نظری بر پایه رابطه (۳)

بر اساس رابطه عددی بالا، مقدار آنتالپی در تمام غلظتها حساب گردیده است و منحنی (I) از شکل (۳) نمودار آنست. بطوری که ملاحظه می شود، این منحنی با نتایج حاصل از اندازه گیری مستقیم آنتالپی تشکیل (۵) کاملاً سازگار می باشد.

منحنی (II) از شکل (۴) بر اساس پیش بینی و از طریق قراردادن نتایج تجربی مربوط به سیستمهای دوتائی و مقدار آنتالپی واکنش مشخصه سیستم $(3/1)$ کیلوکالری (۹) در رابطه (۳) بدست آمده است. همانطوری که ملاحظه می شود، این منحنی با نتایج تجربی چندان هم آهنگ نبوده و در باره آن بحث خواهیم کرد.

$$\Delta H = X_{NaBr} X_{KNO_3} (-1,05 - 0,26 X_{NaBr}) \text{ kcal.mol}^{-1}$$



شکل (۵)

و منحنی (I) نتایج تجربی

منحنی (II) پیش‌بینی نظری برپایه رابطه (۳)

منحنی (I) از شکل (۵)، تغییر ΔH را بر حسب X_{NaBr} و برپایه رابطه عددی بالا نشان می‌دهد. این منحنی بخوبی با نتایج حاصل از اندازه‌گیری مستقیم آنالیزی تشکیل (o) سازگار است. در اینجا هم مانند حالت قبل، منحنی بدست آمده از رابطه (۳) و معلومات مربوط به سیستمهای دوتائی و مقدار ΔH با نتایج تجربی سازگار نمی‌باشد.

III - تجزیه و تحلیل نتایج تجربی

بطوری که ملاحظه شد، پیش‌بینیهای نظری آنالیزی برپایه رابطه (۳) با نتایج تجربی حاصل در مورد سیستمهای نیترات سدیم - برموریتاسیم و نیترات پتاسیم - برموریتاسیم سازگار نبود و میان آنها اختلاف قابل ملاحظه‌ای وجود داشت. در قدم اول، ممکن است که اختلاف مذکور را زائیده توزیع غیر اتفاقی یونها در مخلوط دانست و برای بحساب آوردن آن، جمله $(\Delta H_o) / 2ZRT \cdot X_A X_A \cdot X_B X_B$ را برطبق رابطه (۴)، در پیش‌بینی آنالیزیهای تشکیل مخلوط وارد ساخت. اما بطوری که محاسبه نشان می‌دهد، تأثیر این جمله در نتایج کلی، بسیار ضعیف بوده و در حدود ۳٪ می‌باشد. پس با رعایت آن نیز نمی‌توان اختلاف موجود را از میان برداشت بنابراین اختلاف مذکور منطقاً می‌تواند به خطای موجود در مقدار ΔH مربوط گردد. زیرا جمله اخیر تنها مقداری است که از راه محاسبه بدست آمده است و در تعیین

این بهای می توان استفاده از ΔH با خطای قابل ملاحظه ای همراه باشد. این خطا، سعی گردیده است که مقدار ΔH به طور مستقیم و از روی نتایج تجربی مربوط به آ مولی تشکیل محلولهای رسیپرک در غلظتهای مساوی محاسبه گردد (۹). بر اساس آن بدست می آید:

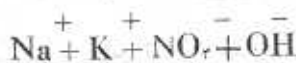
$$\Delta H_f = 0.97 \text{ kcal}$$

بطوری که دیده می شود مقدار جدید ΔH_f (۰/۹۷ کیلوکالری) با مقدار قبلی آن (کالری) تفاوت محسوسی دارد. از مقدار جدید آنتالپی، برای پیش بینی مجدد آنتالپیهای مخلوط رسیپرک و بر پایه رابطه (۳) استفاده شده و نتایج حاصل از آن در مورد سیستم نیترواز بر موریتاسیم، به صورت منحنی ممتد از شکل (۶) در آمده است. همانطوری که ملاحظه



این بار منحنی پیش بینی شده، به نخورضایت بخشی با نتایج تجربی سازگار است. در شکل (۶)، منحنی نقطه چین بر پایه $\Delta H_f = 1/3$ کیلوکالری و با استفاده از همان رابطه (۳) حاصل گردیده است و همانطوری که از شکل پیداست با نتایج تجربی (۵) هم آهنگ نمی باشد.

به عنوان خلاصه این بحث می توان گفت که در پیش بینی آنتالپی تشکیل مخلوطهای رسیپرک، دو نکته واجدا اهمیت است؛ یکی توجه به چگونگی توزیع یونها در محلول مذاب و دیگری تعیین دقیق آنتالپی واکنش مشخصه (ΔH_f)، در شرایط آزمایش. تأثیر عامل آخری گاهی اوقات به حدی است که نتایج پیش بینی شده را بکلی دگرگون می سازد. برای مثال این مسئله در مطالعه سیستم



نیز کمال اهمیت را داشته است (۱۲).

از این رو به نظر میرسد که رعایت این مطلب، در مورد اغلب مذابهای رسیپرک لازم می آید.

- 1- H. Flood, T. Forland & K. Grjotheim
Z. Anorg. Allgem. Chem., (1954), 276, 289
- 2- T. Forland
Norg. Tek. Vitenskapsakad., (1957), Ser. 2, n°4.
- 3- H. Aghaï
these Doct. Spécialité, Marseille, 26 Juin, 1973
- 4- M. Blander & S.J. Yosim
J. chem. phys., (1963), 39, 2610.
- 5- M. Gaune-Escard, J. C. Mathieu, P. Desre et Y. Doucet
J. Chim. Phys., (1973), 6, 1003.
- 6- M. Gaune-Escard et...
J. Chim. Phys., (1973), 7-8, 1033
- 7- E. Calvet, H. Prat
Microcalorimétrie, Masson, Paris, 1955
- 8- E. Calvet,
Récents Progrès en microcalorimétrie,
Dunod, Paris, 1958
- 9- H. Aghaï
Thèse. Doct. D'etat Marseille, 10, Juillet, 1974
- 10- O. J. kleppa, S. V. Meschel
J. Phys. Chem., (1963) 67, 668.
- 11- M. Gaune-Escard
Thèse, Marseille, 1972
- 12- H. Aghaï, J. P. Bros, And M. Gaune-Escard
J. Chem. Thermodynamics, (1976), 8, 331-338